

بررسی تأثیر درصد رطوبت در مقاومت کششی و طاقت شکست خاک رس هسته‌ی سدهای خاکی

Research Note

امین اکرامی فرد (کارشناس ارشد)

علی اخترپور* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

طبق آمار حدود یک سوم علت خرابی سدهای خاکی، فرسایش داخلی بوده است. شکست هیدرولیکی و فرسایش داخلی، دو پدیده‌ی وابسته به یکدیگر هستند. شکست هیدرولیکی موجب ایجاد ترک و توسعه‌ی آن می‌شود. عبور آب از داخل ترک‌های ایجاد شده باعث شسته شدن مصالح و وقوع فرسایش داخلی می‌شود. یکی از روش‌های مطالعه‌ی شکست هیدرولیکی، استفاده از مفاهیم مکانیک شکست است. طاقت شکست، یکی از پارامترهای مهم در مکانیک شکست است که با روش‌های آزمایشگاهی مانند استاندارد ASTM E399 قابل تعیین است. سد بیدواز، یک سد خاکی سنگریزه‌یی با هسته‌ی رسی مایل است. حدود ۷/۵ سال بعد از شروع اولین آبگیری، فروافتادگی در رویه‌ی سد مشاهده شد. پدیده‌ی شکست هیدرولیکی به‌عنوان یکی از علل اصلی شروع فرسایش داخلی در سد بیدواز مطرح بوده است. در نوشتار حاضر، با کمک روش ارائه شده در دستورالعمل استاندارد ASTM E399، پارامترهای مکانیک شکست خاک هسته‌ی سد بیدواز و معیار شکست هیدرولیکی برای خاک مذکور ارائه شده است.

واژگان کلیدی: سدخاکی سنگریزه‌یی، مقاومت کششی، طاقت شکست، درصد رطوبت، خاک رسی.

۱. مقدمه

افزایش عرض ترک و توسعه‌ی آن می‌شوند. چنین شرایطی را شکست هیدرولیکی^۴ می‌نامند. هر چند پدیده‌ی شکست هیدرولیکی خود می‌تواند موجب ایجاد ترک و در ادامه، توسعه‌ی آن شود اما برخی از پژوهشگران اعتقاد دارند که وجود ترک، یک پیش‌نیاز برای وقوع پدیده‌ی مذکور است.^[۵]

شکست هیدرولیکی و فرسایش داخلی^۵ دو پدیده‌ی وابسته به یکدیگر هستند. عبور آب از داخل ترک‌ها، باعث شسته شدن خاک هسته و فرسایش داخلی می‌شود. اگر شکست هیدرولیکی اتفاق بیافتد، اما مصالح داخل ترک دچار فرسایش نشوند، خطری ایمنی سد را تهدید نمی‌کند. مطالعات آماری نشان می‌دهد که حدود یک سوم خرابی سدهای خاکی، ناشی از فرسایش داخلی است.^[۶]

با مقایسه‌ی فشار شکست هیدرولیکی با فشار آب در وجه بالادست هسته، می‌توان وقوع شکست هیدرولیکی را بررسی کرد. برای تعیین فشار شکست هیدرولیکی روابط مختلفی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را در ۳ گروه کلی تقسیم‌بندی کرد:^[۷] گروه اول، روابط تجربی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی یا میدانی ارائه شده‌اند،^[۸-۱۲] گروه دوم، روابط تئوریک که براساس مدل‌های پیشنهاد شده در نظریه‌ی خمیری توسعه یافته‌اند،^[۱۳-۱۴] و گروه سوم روابطی که از مکانیک شکست استفاده می‌کنند.^[۱۵]

شکست هیدرولیکی در هسته‌ی سدهای خاکی، یک مسئله‌ی مهم در زمینه‌ی ایمنی سدها بوده و به‌عنوان یکی از دلایل اصلی خرابی سدها مطرح است. تاکنون مطالعات زیادی بر روی پدیده‌ی شکست هیدرولیکی انجام شده است،^[۱۶] خصوصاً بعد از شکست سد تن^۱ آمریکا در سال ۱۹۷۶،^[۲] ولی تاکنون این مسئله کاملاً حل نشده است. سدهای تن آمریکا در سال ۱۹۷۵،^[۲] سد بالدرهد^۲ انگلستان در سال ۱۹۶۵،^[۴] و سد هیته‌جووت^۳ نروژ، از جمله سدهای آسیب‌دیده در اثر شکست هیدرولیکی هستند.

وجود ترک در هسته‌ی رسی سدهای خاکی، امری اجتناب‌ناپذیر است. هنگامی که تنش‌های اصلی دست‌کم در یک ناحیه از هسته به صفر میل می‌کنند، احتمال وقوع ترک زیاد می‌شود. با افزایش تراز آب در مخزن و نفوذ آب به داخل ترک، وضعیت تنش‌ها در سطح داخلی ترک تغییر می‌کند. تنش‌های ایجاد شده‌ی داخلی ناشی از افزایش فشار آب روی سطح داخلی ترک، اگر از مقاومت خاک تجاوز کنند، باعث

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۶/۱۱/۱۳۹۵، اصلاحیه ۲۹/۲/۱۳۹۶، پذیرش ۱۹/۲/۱۳۹۶.

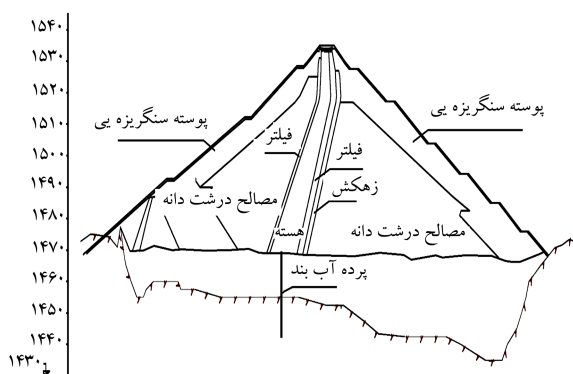
DOI:10.24200/J30.2018.2004.2060

سد بیدواز بررسی شده است. سپس با کمک روش ارائه شده در سال ۲۰۰۶ و ایجاد تغییراتی در دستگاه برش مستقیم، پارامترهای مکانیک شکست خاک هسته‌ی سد بیدواز تعیین شده است. در انتها براساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، نمودار اندرکنش مدهای ۱ و ۲ برای درصد رطوبت‌های مختلف رسم شده است. نمودار حاصل به‌عنوان معیار شکست معرفی شده است، که می‌توان با کمک آن رفتار هسته‌ی ترک‌خورده را پیش‌بینی کرد.

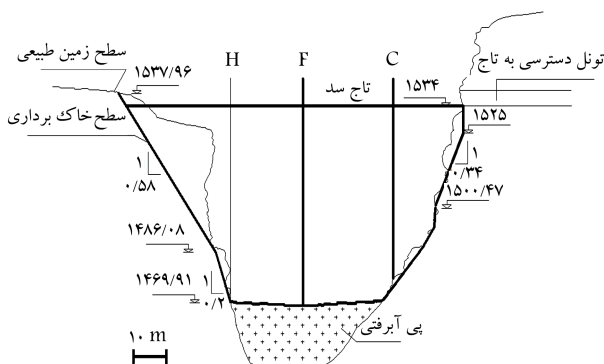
۲. سد بیدواز

سد بیدواز اسفراین، یک سد خاکی سنگریزه‌یی با هسته‌ی رسی مایل نازک است که در ۲۰ کیلومتری شرق اسفراین بر روی رودخانه‌ی بیدواز ساخته شده است. سد بیدواز در دره‌ی تنگ و تقریباً U شکل با عرض متوسط ۴۵ متر در رقوم بستر رودخانه احداث شده است. شیب متوسط دیواره‌های تکیه‌گاه برابر ۶۰ درجه نسبت به افق است. در کف دره، لایه‌ی آبرفتی درشت‌دانه‌ی بسیار متراکم به ضخامت بیشینه‌ی ۲۳ متر وجود دارد. عملیات خاکریزی سد از ۴ مرداد ۱۳۸۲ شروع شده و در ۱۵ شهریور ۱۳۸۳ به اتمام رسیده است. ارتفاع بیشینه‌ی سد ۶۶ متر (تراز بیشینه‌ی ۱۵۳۴+)، طول تاج ۱۰۴ متر و عرض تاج ۱۱ متر است. برای کنترل تراوش از پی دیواره‌ی آب‌بند، بتن خمیری در زیر هسته‌ی رسی سد اجرا شده است. در شکل ۱، مقطع عرضی سد و در شکل ۲، مقطع طولی سد نشان داده شده است.

اواخر سال ۱۳۹۱، با افزایش تراز آب مخزن تا تراز ۱۵۲۱ متر، در جناح چپ سد بیدواز اسفراین فرونشست‌هایی ظاهر شد. بررسی نتایج ابزار دقیق نشان می‌دهد که



شکل ۱. مقطع عرضی سد بیدواز.



شکل ۲. مقطع طولی سد بیدواز.

مکانیک شکست^۶، شاخه‌یی از علم مکانیک است که به مطالعه‌ی انتشار ترک در مصالح، نیرو محرکه‌ی ایجاد ترک، و توصیف مقاومت مواد در برابر ترک و شکستگی می‌پردازد.^[۱۶] برای توضیح مکانیسم شکست هیدرولیکی و ارائه‌ی معیارهای شکست هیدرولیکی، می‌توان از تئوری‌های مکانیک شکست کمک گرفت. مکانیک شکست در مصالح خاکی با سایر مواد متفاوت است؛ زیرا بار اعمالی به خاک علاوه بر تغییر سطح تنش، در ویژگی‌های خاک نیز تأثیر می‌گذارد. همچنین در عمل برای شناخت مکانیک شکست از اعمال تنش کششی بر مصالح استفاده می‌شود، در حالی که تنش‌های اعمالی به مصالح ژئوتکنیکی معمولاً کششی نیستند.^[۵] مطالعه بر روی ترک در خاک از حدود ۵۰ سال پیش آغاز شده است. منظور از خاک در مکانیک شکست، خاک چسبیده مانند خاک رس است. معمولاً می‌توان برای مطالعه‌ی شکست در خاک از تئوری مکانیک شکست کشسان خطی (LEFM)^۷ استفاده کرد.^[۱۷]

یکی از مفاهیم اساسی مکانیک شکست که برای تعیین وضعیت تنش اطراف نوک ترک به کار می‌رود، ضریب شدت تنش^۸ است. زمانی که ضریب شدت تنش به مقدار بحرانی، یعنی طاقت شکست (k_{1c}) برسد، ترک به صورت ناپایدار توسعه می‌یابد. طاقت شکست^۹ توانایی مصالح برای مقاومت در برابر شکست و توسعه‌ی ترک‌های موجود است. طاقت شکست مدهای ۱ و ۲ (k_{1c} و k_{2c}) دو پارامتر مهم مصالح در مکانیک شکست هستند که با روش‌های آزمایشگاهی قابل تعیین هستند. در استاندارد ASTM E399، روش تعیین طاقت شکست فلزات ارائه شده است که قابل استفاده برای مصالح بتنی و خاکی نیز است.^[۱۶]

در سال ۱۹۹۵، برای اولین بار مفاهیم مکانیک شکست در مصالح خاکی توسعه داده شد. یکی از جنبه‌های مطالعات آزمایشگاهی، مکانیک شکست تعیین طاقت شکست مصالح است و از آزمون شکست دیسک ترک‌دار، برای تعیین مقاومت کششی و طاقت شکست خاک متراکم شده‌ی خشک استفاده شد.^[۱۸] همچنین در سال ۲۰۰۰، از آزمون ۳ نقطه‌یی خمشی برای تعیین طاقت شکست سد ۱ خاک بیخ‌زده استفاده و تأثیر دما، درصد رطوبت و سرعت بارگذاری در k_{1c} بررسی شد.^[۱۹] در سال ۲۰۰۵، نیز برای تعیین پارامترهای مکانیک شکست خاک از آزمون خمشی کمک گرفته شد.^[۲۰] همچنین در سال ۲۰۰۶، با انجام آزمون‌های ۳ نقطه‌یی خمشی^{۱۰} و ۴ نقطه‌یی خمشی^{۱۱}، طاقت شکست مدهای ۱ و ۲ و ضریب شدت تنش مد ترکیبی ۱-۲ خاک تعیین شد و براساس نتایج آزمایش‌های مذکور، عوامل مؤثر در طاقت شکست، درصد رطوبت، چگالی خشک و فشار پیش‌تحکیمی معرفی شد. برخی پژوهشگران (۲۰۰۹)، نیز براساس نتایج آزمایش‌های خود توانستند یک معیار شکست برای خاک مورد مطالعه معرفی کنند.^[۲۱]

یکی از پدیده‌های مرتبط با شکست هیدرولیکی، قوس‌زدگی^{۱۲} است که باعث کاهش سطح تنش در هسته‌ی سد می‌شود. در پدیده‌ی قوس‌زدگی، بخشی از وزن محیط خاکی به محیط مجاور که باید سخت‌تر باشد، منتقل می‌شود. در نتیجه، تنش‌های قائم از وزن خاک کمتر می‌شود.^[۸] در نوشتار حاضر، مطالعات بر روی خاک هسته‌ی سد بیدواز انجام شده است. سد بیدواز اسفراین، یک سد خاکی سنگریزه‌یی است که اواخر سال ۱۳۹۱ در جناح چپ سد، فرونشست‌هایی ظاهر شد. با توجه به شکل ساخت‌گاه سد، وقوع پدیده‌ی شکست هیدرولیکی و فرسایش داخلی به‌عنوان یکی از دلایل اصلی وقوع عارضه‌ی مذکور مطرح است. در صورتی که پارامترهای مکانیک شکست خاک هسته‌ی سد بیدواز تعیین شود، می‌توان با کمک مفاهیم مکانیک شکست وقوع و توسعه‌ی شکست هیدرولیکی را در هسته‌ی سد بررسی کرد.

به همین منظور ابتدا تأثیر درصد رطوبت در مقاومت کششی خاک هسته‌ی

۴. مقاومت کششی خاک هسته‌ی سد بیدواز

منظور از مقاومت خاک در طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی، مقاومت برشی است. مقاومت کششی خاک در برابر مقاومت برشی ناچیز و در بیشتر موارد قابل صرف نظر کردن بوده است. مقاومت کششی خاک به صورت مقاومت ایجاد شده در خاک در برابر نیروهای ایجادکننده‌ی ترک و شکست تعریف می‌شود. [۲۴-۲۲] تاکنون روش‌ها و روابط تجربی مختلفی برای تعیین مقاومت کششی خاک ارائه شده است. مکش بافتی، درصد رس و ظرفیت تبادل کاتیونی مهم‌ترین عوامل مؤثر در مقاومت کششی هستند. [۲۲] برای تعیین مقاومت کششی خاک، روش‌های آزمایشگاهی مختلفی، مانند: آزمون کشش مستقیم، آزمون نفوذ محصورنشده، آزمون خمشی، آزمون برزیلی و آزمون استوانه‌ی توخالی توسط پژوهشگران مختلف معرفی شده است. [۲۸-۲۳]

۴.۱. روش انجام آزمایش

آزمون خمشی یکی از روش‌های غیرمستقیم تعیین مقاومت کششی خاک است، [۲۹ و ۲۶] که به صورت ۳ نقطه‌یی خمشی و ۴ نقطه‌یی خمشی انجام می‌شود. شرایط تکیه‌گاهی در آزمون ۴ نقطه‌یی خمشی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. در این شرایط مقدار برش در وسط نمونه صفر است. بنابراین در بازه‌ی مذکور، لنگر خمشی ثابت است و با کمک رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود. به همین دلیل برای تعیین مقاومت کششی، استفاده از آزمون ۴ نقطه‌یی خمشی نسبت به آزمون ۳ نقطه‌یی خمشی مناسب‌تر است. تنش کششی بیشینه در یک سوم میانی نمونه با کمک رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید. تنش کششی محاسبه شده با کمک رابطه‌ی ۲ در لحظه‌ی گسیختگی برابر مقاومت کششی خاک است.

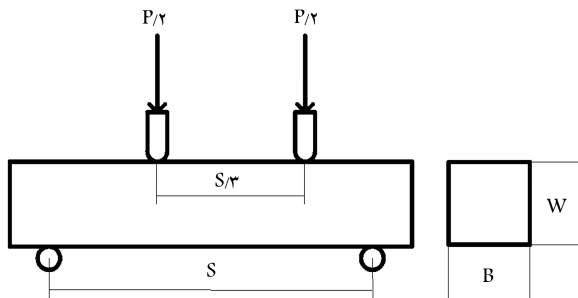
$$M = \frac{PS}{6} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{My}{I} = \frac{(\frac{PS}{6})(\frac{W}{4})}{\frac{1}{12}BW^3} = \frac{PS}{BW^2} \quad (2)$$

که در آن، M : لنگر خمشی ($kg.cm$)، P : بار اعمالی به نمونه (kg)، S : طول مؤثر نمونه (فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها) (cm)، σ_t : تنش کششی (kg/cm^2)، W : عرض نمونه (cm)، B : ضخامت نمونه (cm).

۴.۲. دستگاه آزمایش

در دستگاه‌های آزمون خمشی موجود، بارگذاری به صورت قائم انجام می‌شود. اگر از دستگاه‌های موجود برای تعیین مقاومت کششی خاک استفاده شود، به علت

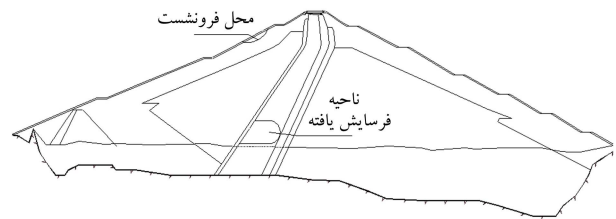


شکل ۵. شرایط تکیه‌گاهی آزمون ۴ نقطه‌یی خمشی برای تعیین مقاومت کششی.

در جناح چپ، تنش مؤثر در هسته تا مقدار صفر کاهش یافته و فشار آب داخل هسته برابر تراز پیرومتری آب مخزن شده است. این موضوع بیانگر این مطلب است که خاک هسته، دچار فرسایش شده و آب مخزن مستقیماً با پیرومتر داخل بدنه در ارتباط بوده است. شکل ۳، محل فرونشست سطحی در جناح چپ و ناحیه‌ی فرسایش یافته را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیک و نیز گمانه‌های حفاری شده در هسته تأیید کردند که در بخش‌هایی از هسته واقع در ترازهای تحتانی سد، که مجاور به تکیه‌گاه جناح چپ هستند، فرسایش داخلی به وقوع پیوسته است. با توجه به شیب تند دیواره‌های دره‌ی سد و احتمال افزایش قوس زدگی و در نتیجه کاهش تنش اصلی کمینه، وقوع پدیده‌ی شکست هیدرولیکی به عنوان یکی از فرضیات اصلی مسبب وقوع فرسایش در هسته‌ی سد بیدواز مطرح است.

۳. مشخصات خاک مورد آزمایش

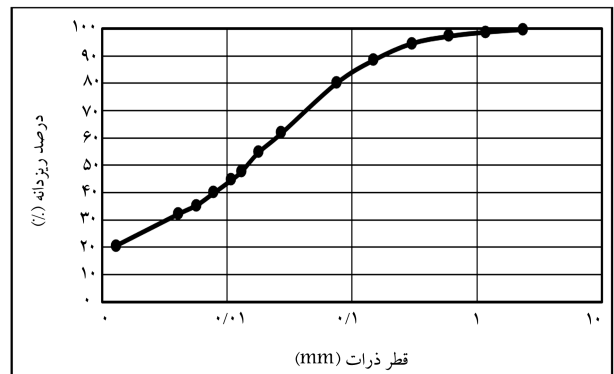
در مطالعه‌ی حاضر، خاک رس با حالت خمیری کم بررسی و از آن در ساخت هسته‌ی سد بیدواز اسفراپن استفاده شده است. مشخصات فیزیکی خاک مذکور در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی آن نیز در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۳. محل فرونشست سطحی در مقطع H-H و ناحیه‌ی فرسایش یافته.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک هسته‌ی سد بیدواز.

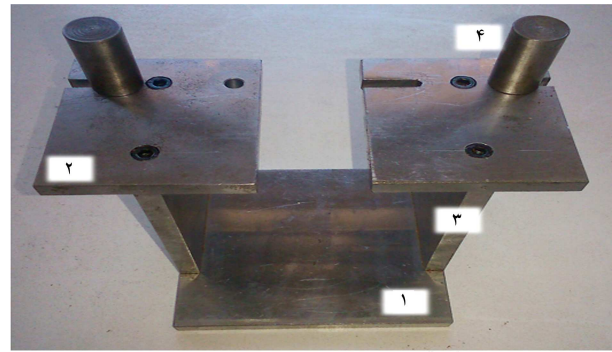
نوع خاک	CL
حد خمیری	۱۶/۱۲ (%)
حد روانی	۲۶/۰۶ (%)
شاخص خمیری	۹/۹۵ (%)
چگالی ویژه	۲/۷۹
درصد رطوبت بهینه	۱۵/۵۲ (%)
وزن مخصوص خشک بیشینه	۱/۸۲ ($\frac{kg}{cm^3}$)



شکل ۴. منحنی توزیع دانه‌بندی خاک هسته‌ی سد بیدواز.



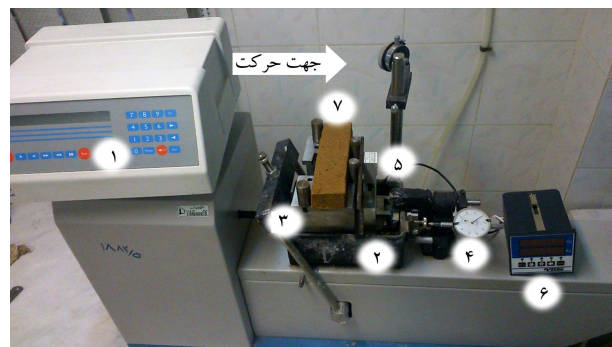
۱- لودسل ۲- حلقه ی بارگذاری ۳- محل اتصال قالب برش مستقیم به حلقه بارگذاری
۴- محل اتصال لودسل به قطعه ی ۳
شکل ۸. نحوه ی اتصال قسمت ثابت لودسل.



۱- صفحه اتصال به جعبه برش ۲- صفحه ی زیر نمونه
۳- صفحات قائم ۴- تکیه گاه استوانه یی
شکل ۶. تکیه گاه دستگاه آزمون خمشی.



شکل ۹. نحوه ی اتصال قسمت متحرک لودسل.



۱- تنظیم سرعت بارگذاری ۲- جعبه ی برش ۳- تکیه گاه
۴- گیج اندازه گیری جابه جایی افقی ۵- لودسل ۶- نمایشگر
۷- نمونه
شکل ۷. دستگاه آزمون خمشی.

۳.۴. نمونه سازی

برای ساخت نمونه از قالب استوانه‌یی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. ابتدا براساس ابعاد قالب، وزن مخصوص خشک نمونه $(\frac{kg}{cm^3})$ (۱/۷۸) و برای درصد رطوبت‌های مختلف، وزن خاک موردنیاز برای تهیه‌ی نمونه محاسبه شده است. سپس خاک در ۵ لایه داخل قالب با چکش تراکم استاندارد کوبیده شده است. سپس نمونه از قالب خارج و با کمک یک وسیله‌ی تیز و نازک، نمونه‌ی استوانه‌یی برش خورده و یک تیر با ابعاد $4 \times 5 \times 19$ سانتی‌متر تهیه شده است.

۴.۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

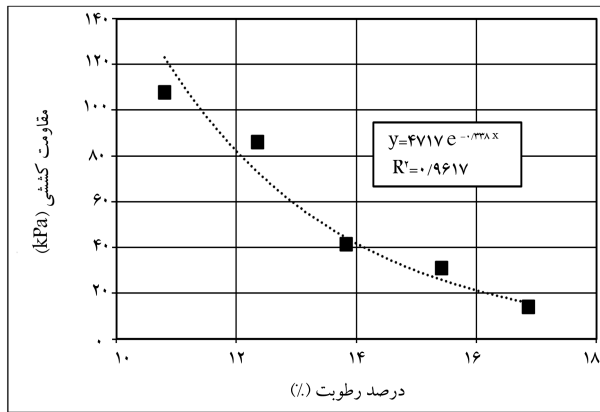
مقاومت کششی در خاک‌های ریزدانه، تابع مقدار مکش بافتی است. مقدار مکش بافتی نیز براساس درصد رطوبت تعیین می‌شود بنابراین مهم‌ترین عامل مؤثر در مقاومت کششی خاک‌های ریزدانه درصد رطوبت است. [۳] در نوشتار حاضر، برای ارزیابی تأثیر درصد رطوبت در مقاومت کششی خاک هسته‌ی سد بیدواز، آزمون خمشی با درصد رطوبت‌های مختلف انجام شده است.

هسته‌ی رسی سدهای خاکی با رطوبت ۲٪ زیر رطوبت بهینه تا ۲٪ بالای رطوبت بهینه متراکم شدند. با توجه به درصد رطوبت بهینه‌ی خاک هسته‌ی سد بیدواز (۱۵/۵٪)، درصد رطوبت در بازه ۱۰/۵ تا ۱۷ تغییر کرده است. همچنین تمام نمونه‌ها با وزن مخصوص خشک یکسان و برابر $(\frac{kg}{cm^3})$ (۱/۷۸) تراکم استاندارد) بوده‌اند. نمونه‌های ساخته‌شده مشابه شکل ۱۰ داخل دستگاه قرار گرفتند. فاصله‌ی دو محور بارگذاری برابر ۶ سانتی‌متر و فاصله‌ی دو تکیه‌گاه برابر ۱۸ سانتی‌متر تنظیم شده است. باید دقت کرد که دو تکیه‌گاه و دو محور بارگذاری به صورت هم‌زمان

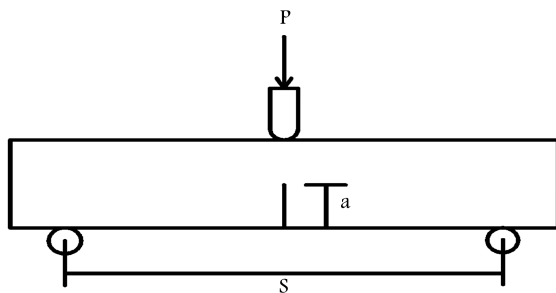
مقاومت کششی کم خاک، باید تأثیر وزن نمونه در نتایج در نظر گرفته شود بنابراین توصیه می‌شود که برای از بین بردن تأثیر وزن نمونه، بارگذاری به صورت افقی انجام شود. در دستگاه برش مستقیم، بارگذاری به صورت افقی انجام می‌شود. به همین دلیل برای اعمال نیرو در آزمون خمشی می‌توان از دستگاه برش مستقیم کمک گرفت. برای فراهم کردن شرایط تکیه‌گاهی نیز قطعه‌یی مشابه شکل ۶ و از جنس فولاد ساخته شده است، که داخل جعبه‌ی برش قرار می‌گیرد و نمونه‌ی خاک بر روی آن ریخته می‌شود.

در شکل ۷، دستگاه آزمون خمشی ۴ نقطه‌یی و نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ی داخل آن نشان داده شده است. جابه‌جایی افقی با کمک گیج که مطابق شکل ۷ بر روی یک پایه‌ی ثابت نصب شده است، اندازه‌گیری می‌شود. سر میله‌ی اندازه‌گیری گیج به جعبه‌ی برش مماس می‌شود و جابه‌جایی افقی آن را اندازه‌گیری می‌کند. در دستگاه آزمون خمشی، نیرو با کمک لودسل تک‌پایه با ظرفیت ۳۰ کیلوگرم اندازه‌گیری می‌شود. در لودسل تک‌پایه، یک انتها ثابت است و نیرو به انتهای دیگر اعمال و براساس میزان خمش در لودسل نیرو محاسبه می‌شود. در شکل ۸، نحوه‌ی اتصال قسمت ثابت لودسل نشان داده شده است.

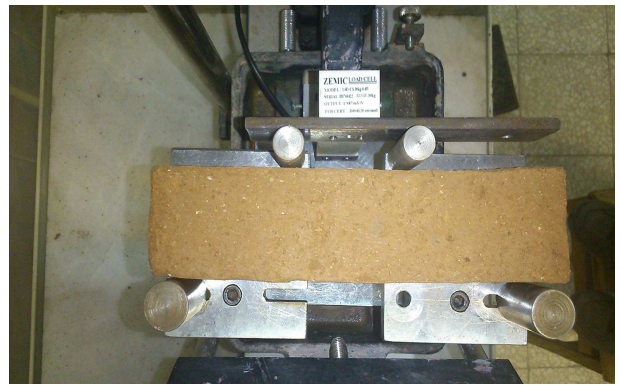
انتهای دیگر لودسل در تماس با نمونه قرار دارد. در آزمون خمشی ۴ نقطه‌یی، نیرو در دو نقطه به نمونه اعمال می‌شود؛ بنابراین لودسل باید در دو نقطه با نمونه در تماس باشد. برای این منظور، مشابه شکل ۹ یک ورقه‌ی فولادی که دو استوانه‌ی فولادی به آن متصل است، به لودسل متصل می‌شود. ورقه‌ی فولادی در چند نقطه با فاصله‌ی معین سوراخ می‌شود، تا به توان محل اعمال نیرو را تغییر داد.



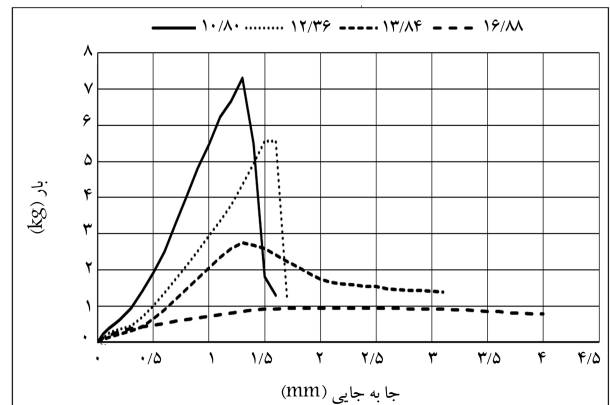
شکل ۱۲. نمودار تغییرات مقاومت کششی در برابر درصد رطوبت.



شکل ۱۳. شرایط تکیه‌گاهی آزمون خمش ۳ نقطه‌یی بر روی نمونه‌ی تیر خمشی ترک‌دار. [۲۱]



شکل ۱۰. نحوه‌ی قرارگیری نمونه داخل دستگاه برای تعیین مقاومت کششی.



شکل ۱۱. نمودار بار- جا به جایی حاصل از آزمایش خمش.

۵. طاقت شکست خاک هسته‌ی سد بیدواز

۱.۵. طاقت شکست مد ۱

آزمون ۳ نقطه‌یی خمشی، یکی از روش‌های متداول برای تعیین طاقت شکست مد ۱ (k_{1c}) است که در آن مطابق استاندارد ASTM E۳۹۹ از نمونه‌ی تیر خمشی ترک‌دار استفاده می‌شود. در سال ۱۹۸۵، برای اولین بار روش تیر خمشی ترک‌دار برای تعیین پارامترهای مکانیک شکست خاک استفاده شده است. [۲۱] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۶، آزمون ۳ نقطه‌یی خمشی با توجه به ویژگی‌های خاک اصلاح و پارامترهای مکانیک شکست خاک تعیین و بیان شد که با توجه به مقاومت کششی کم خاک، برای کاهش تأثیر وزن در نتایج، بارگذاری به صورت افقی انجام شود. در شکل ۱۳، شرایط تکیه‌گاهی آزمون خمش ۳ نقطه‌یی بر روی نمونه‌ی تیر خمشی ترک‌دار نشان داده شده است. [۲۱] در نمونه‌ی مذکور، مقدار ضریب شدت تنش به کمک رابطه‌های ۴ و ۵ به دست می‌آید:

$$k_1 = \frac{PS}{BW^{\frac{2}{3}}} f_1\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4)$$

$$f_1\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)(2.15 - 3.93\left(\frac{a}{W}\right) + 2.7\left(\frac{a}{W}\right)^2) \right]}{2\left(1 + \frac{2a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

که در آن‌ها، S : طول مؤثر نمونه (فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها) (cm)، P : بار اعمالی به نمونه (kg)، k_1 : ضریب شدت تنش مد اول ($kPa \cdot m^{\frac{3}{2}}$)، W : عرض نمونه (cm)، B : ضخامت نمونه (cm)، a : عمق ترک (cm).

با نمونه مماس شوند. بارگذاری با سرعت ثابت ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است.

نیرو و جا به جایی در محل اعمال نیرو در طول آزمایش ثبت می‌شود. در شکل ۱۱، نتایج مربوط به آزمایش تعیین مقاومت کششی در درصد رطوبت‌های مختلف ارائه شده است که مطابق آن، رفتار خاک براساس درصد رطوبت به ۳ دسته تقسیم می‌شود:

۱. رفتار ترد (درصد رطوبت کمتر از ۱۲/۵): تنش کششی بعد از رسیدن به مقدار بیشینه به سرعت افت می‌کند.

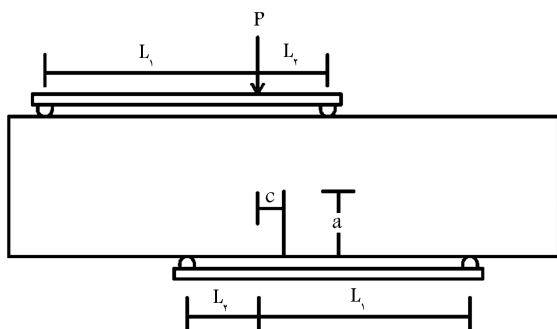
۲. رفتار نیمه ترد (درصد رطوبت بین ۱۲/۵ تا ۱۵/۵): تنش کششی بعد از رسیدن به مقدار بیشینه، رفتار نرم‌شونده دارد و به تدریج کاهش می‌یابد.

۳. رفتار انعطاف پذیر (درصد رطوبت بیشتر از ۱۵/۵): تنش کششی بعد از رسیدن به مقدار بیشینه تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

در شکل ۱۲، نمودار تغییرات مقاومت کششی در برابر درصد رطوبت براساس نتایج آزمایش رسم شده است که مطابق آن با افزایش درصد رطوبت، مقاومت کششی کاهش می‌یابد. با عبور بهترین خط از میان داده‌های تجربی، می‌توان رابطه‌ی ۳ را برای تعیین مقاومت کششی براساس درصد رطوبت بیان کرد:

$$\sigma_t = 4717e^{-0.3328w} \quad (3)$$

که در آن، σ_t مقاومت کششی (کیلوپاسکال) و w درصد رطوبت است.



شکل ۱۵. شرایط تکیه‌گاهی آزمون خمشی ۳ نقطه‌یی بر روی نمونه‌ی تیر خمشی ترک‌دار. [۲۱]

و با کمک روش مذکور، پارامترهای مکانیک شکست خاک تعیین شده است. در آزمون مذکور، از نمونه‌ی تیر خمشی ترک‌دار استفاده می‌شود. در شکل ۱۵، شرایط تکیه‌گاهی آزمون خمشی ۴ نقطه‌یی بر روی نمونه‌ی تیر خمشی ترک‌دار نشان داده شده است. [۲۱] با کمک معادلات تعادل، نیروی برشی و لنگر خمشی در صفحه‌ی ترک با روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند:

$$Q = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} P \quad (6)$$

$$M = (L_2 + c) \frac{L_1}{L_1 + L_2} P - (L_1 + c) \frac{L_2}{L_1 + L_2} P \quad (7)$$

که در آن‌ها، Q : نیروی برشی اعمالی بر صفحه‌ی ترک (kg)، M : لنگر خمشی اعمالی بر صفحه‌ی ترک ($kg.cm$)، P : کل نیروی اعمالی به تیر (kg)، L_1 و L_2 : فاصله‌ی افقی تکیه‌گاه‌ها تا محل بار (cm)، c : فاصله‌ی افقی ترک و بار (cm)، همچنین با کمک روابط ۸ و ۹، مقدار عامل شدت تنش به ترتیب در مدهای ۱ و ۲ تعیین می‌شوند:

$$k_1 = \frac{M}{BW^{\frac{5}{4}}} f_1 \left(\frac{a}{W} \right) \quad (8)$$

$$k_2 = \frac{Q}{BW^{\frac{3}{4}}} f_2 \left(\frac{a}{W} \right) \quad (9)$$

که در آن‌ها، f_1 و f_2 با کمک روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شوند:

$$f_1 \left(\frac{a}{W} \right) = \frac{6 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1.99 - \left(\frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right) (2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{W} \right) + 2.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2) \right]}{\left(1 + \frac{1.9a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

$$f_2 \left(\frac{a}{W} \right) = \left[1.442 - 0.8 \left(\frac{a}{W} - 0.507 \right)^2 \right] \sec \frac{\pi a}{2W} \sqrt{\sin \frac{\pi a}{2W}} \quad (11)$$

اگر در آزمایش مذکور $c = 0$ باشد، لنگر خمشی در محل ترک برابر صفر می‌شود و در نتیجه ضریب شدت تنش مد ۱ برابر صفر و شکست فقط شامل مد ۲ می‌شود؛ بنابراین برای تعیین طاق‌ت شکست مد ۲، نمونه به نحوی داخل دستگاه قرار می‌گیرد که فاصله‌ی افقی ترک و بار صفر باشد. با محاسبه‌ی ضریب شدت تنش به ازاء بار بیشینه (لحظه‌ی توسعه‌ی ترک) طاق‌ت شکست مد ۲ به دست می‌آید. برای تعیین طاق‌ت شکست مد ۲ خاک هسته‌ی سد بیدواز، نمونه‌ی آزمایش مشابه آزمون ۳ نقطه‌یی خمشی تهیه شده است. نمونه با ابعاد $3 \times 5 \times 19$ سانتی‌متر

جدول ۲. ابعاد نمونه‌های تیر خمشی در مطالعات مختلف.

مرجع	ابعاد (cm)	عمق ترک (cm)	نرخ بارگذاری
[۱۸]	$14 \times 2.5 \times 2.5$	۲٫۵	1 mm/min
[۱۹]	$30 \times 10 \times 10$	۴	200 N/s
[۲۱]	$18.5 \times 4.6 \times 2.3$	$2.1 - 2.5$	0.5 mm/min
[۲۱]	$14 \times 3 \times 3$	۱٫۵	0.2 mm/min



شکل ۱۴. نحوه‌ی قرارگیری نمونه داخل دستگاه برای تعیین طاق‌ت شکست مد ۱.

در مطالعه‌ی حاضر، برای تعیین طاق‌ت شکست مد ۱ خاک هسته‌ی سد بیدواز از روش ارائه‌شده‌ی در سال ۲۰۰۶ استفاده شده است. [۲۱] نمونه‌ی آزمایش مشابه آزمون کششی تهیه شده است. ابتدا خاک در ۵ لایه داخل قالب با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر با چکش تراکم استاندارد کوبیده شده است. سپس نمونه از قالب خارج شده و با کمک یک وسیله‌ی تیز و نازک برش خورده و یک تیر با ابعاد مشخص تهیه شده است.

در جدول ۲، ابعاد نمونه‌های مورد استفاده در مطالعات مختلف ارائه شده است. در پژوهش حاضر، با توجه به جدول ۲ و معیارهای پیشنهاد شده در استاندارد ASTM E399، نمونه‌ها با ابعاد $3 \times 5 \times 19$ سانتی‌متر ساخته شده‌اند. در انتها یک ترک با عمق 2.1 تا 2.5 سانتی‌متر در وسط نمونه مشابه شکل ۱۴ ایجاد می‌شود. برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه معرفی‌شده در بخش ۴-۲ استفاده شده است. با این تفاوت که مشابه شکل ۱۳، نیرو در یک نقطه به نمونه اعمال و فاصله‌ی دو تکیه‌گاه برابر 17 سانتی‌متر تنظیم شده است. نمونه‌ها مشابه شکل ۱۴، داخل دستگاه و با سرعت ثابت 0.1 میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. در این سری آزمایش‌ها برای ارزیابی تأثیر درصد رطوبت در طاق‌ت شکست خاک هسته‌ی سد بیدواز، آزمایش‌ها با درصد رطوبت‌های مختلف انجام شده‌اند. حدود تغییرات درصد رطوبت در بازه‌ی 0.5 تا 16 قرار داشت. همچنین نمونه‌ها، وزن مخصوص خشک یکسان و برابر $1.78 \left(\frac{kg}{cm^3} \right)$ (۹۸٪ تراکم استاندارد) داشته‌اند.

۲.۵. طاق‌ت شکست مد ۲

آزمون پیچش استوانه‌ی توخالی و آزمون ۴ نقطه‌یی خمشی، دو روش تعیین طاق‌ت شکست مد ۲ هستند. مزیت استفاده از آزمون ۴ نقطه‌یی خمشی این است که می‌توان علاوه بر تعیین طاق‌ت شکست مد ۲، ضریب شدت تنش مد ترکیبی ۱ و ۲ را نیز مشخص کرد. [۲۱] آزمون ۴ نقطه‌یی خمشی غیرمقارن^{۱۳}، یکی از روش‌های متداول تعیین طاق‌ت شکست مد ۲ (k_{TC}) است که در سال ۲۰۰۶، [۲۱] اصلاح

ساتنی متر باشند. باید دقت کرد که دو تکیه‌گاه و محورهای بارگذاری به صورت هم‌زمان به نمونه متصل شوند. برای تعیین ضریب شدت تنش مد ترکیبی ۱-۲ خاک هسته‌ی سد بیدواز، نمونه‌ی آزمایش مشابه آزمون ۳ نقطه‌ی خمشی تهیه شده است. نمونه با ابعاد $3 \times 5 \times 19$ سانتی‌متر ساخته و یک ترک با عمق 2.1 تا 2.4 سانتی‌متر در وسط نمونه ایجاد شده است. برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه معرفی شده در بخش ۲-۴ استفاده شده و نمونه با سرعت ثابت 0.1 میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری قرار گرفته است. آزمایش‌های مذکور در شرایط مشابه آزمایش‌های قبلی به لحاظ رطوبت و تراکم صورت گرفته است.

۴.۵. نتایج آزمایش‌ها

در شکل ۱۸، نمودار بار - جابه‌جایی در آزمایش‌های ۳ نقطه‌ی خمشی ارائه شده است که در شکل ۱۸ مطابق آن، نمودار بار - جابه‌جایی، ابتدا روند افزایشی دارد. با کاهش درصد رطوبت، شیب نمودار افزایش می‌یابد؛ زیرا مکش بافتی و مقاومت کششی با کاهش رطوبت افزایش می‌یابد. سپس نمودارها به نقطه‌ی بیشینه‌ی خود می‌رسند که محل شروع توسعه‌ی ترک است. با جای‌گذاری مقدار نیروی متناظر با نقطه‌ی مذکور در رابطه‌ی ۴، طاقت شکست مد ۱ به دست می‌آید. بعد از نقطه‌ی بیشینه، نمودارها روند نزولی دارند. در درصد رطوبت کم به علت رفتار ترد خاک، مقدار نیرو با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۹، نمودار تغییرات طاقت شکست مد ۱، طاقت شکست مد ۲ و ضریب شدت تنش مد ترکیبی ۱-۲ در برابر درصد رطوبت براساس نتایج آزمایش رسم شده است. مطابق شکل مذکور، با افزایش درصد رطوبت طاقت شکست کاهش می‌یابد. با کمک عبور بهترین منحنی از میان نتایج تجربی می‌توان رابطه‌های ۱۲ الی ۱۵ را برای تعیین طاقت شکست براساس درصد رطوبت بیان کرد. باید توجه کرد که روابط مذکور فقط برای درصد‌های رطوبت ۱۱ الی ۱۶، معتبر هستند.

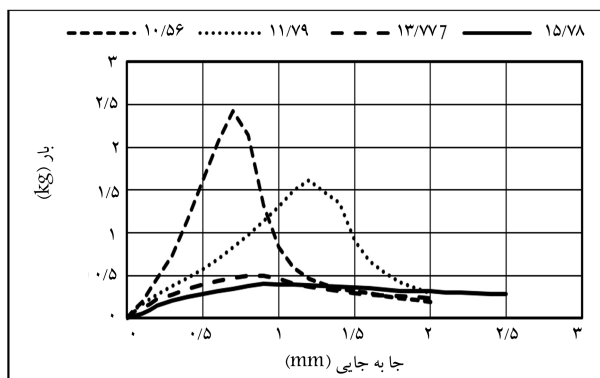
$$k_{1c} = 1138.8e^{-0.26\omega} \quad (12)$$

$$k_{2c} = 198.72e^{-0.24\omega} \quad (13)$$

$$k_1 = -2.4355\omega + 39.131 \quad (14)$$

$$k_2 = -1.8421\omega + 29.838 \quad (15)$$

که در آن‌ها، k_{1c} : طاقت شکست مد ۱ ($kPa \cdot m^{0.5}$)، k_{2c} : طاقت شکست مد ۲ ($kPa \cdot m^{0.5}$)، k_1 و k_2 : ضریب شدت تنش مد ۱ و مد ۲ ($kPa \cdot m^{0.5}$)، ω : درصد رطوبت.



شکل ۱۸. منحنی تغییرات بار - جابه‌جایی در آزمون ۳ نقطه‌ی خمشی.

ساخته و یک ترک با عمق 2.1 تا 2.4 سانتی‌متر در وسط نمونه ایجاد شده است. برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه معرفی شده در بخش ۲-۴ استفاده شده و نمونه با سرعت ثابت 0.1 میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری قرار گرفته است. آزمایش‌های مذکور در شرایط مشابه آزمایش‌های قبلی به لحاظ رطوبت و تراکم صورت گرفته است.

برای انجام آزمایش، نمونه مشابه شکل ۱۶ داخل دستگاه قرار گرفته و نیرو در دو نقطه به آن وارد شده است. نمونه به نحوی داخل دستگاه قرار گرفته است، که مقادیر L_1 ، L_2 و c به ترتیب برابر ۸، ۳ و صفر سانتی‌متر باشند. باید دقت کرد که دو تکیه‌گاه و محورهای بارگذاری به صورت هم‌زمان به نمونه متصل شوند.

۳.۵. ضریب شدت تنش مد ترکیبی ۱ و ۲

ترک‌ها در واقعیت تحت مد ترکیبی ۱-۲ توسعه یافته و کمتر مشاهده شده است که به صورت خالص، مد ۱ یا مد ۲ را شامل شوند. هنگامی که ترک بر محور تنش‌های اصلی عمود نباشد، مد ترکیبی ۱-۲ اتفاق می‌افتد؛ اما از آنجا که مطالعه‌ی مد ترکیبی ۱-۲ دشوار است، مدهای ۱ و ۲ به صورت خالص بررسی می‌شوند و اگر رفتار کشسان فرض شود، می‌توان با برهم‌نهی نتایج به بررسی مد ترکیبی ۱-۲ پرداخت. [۵] با کمک آزمون ۴ نقطه‌ی خمشی غیرمتقارن می‌توان مد ترکیبی ۱-۲ را مطالعه کرد. شرایط تکیه‌گاهی مشابه حالت مد ۲ شکست است، با این تفاوت که در این حالت $c \neq 0$ انتخاب می‌شود، یعنی ترک خارج از راستای بارگذاری قرار می‌گیرد؛ بنابراین با توجه به معادلات ۶ و ۷ در صفحه‌ی ترک، لنگر خمشی و نیروی برشی هم‌زمان ایجاد می‌شوند. با کمک معادلات ۸ و ۹ می‌توان ضریب شدت تنش مد ترکیبی ۱ و ۲ را محاسبه کرد.

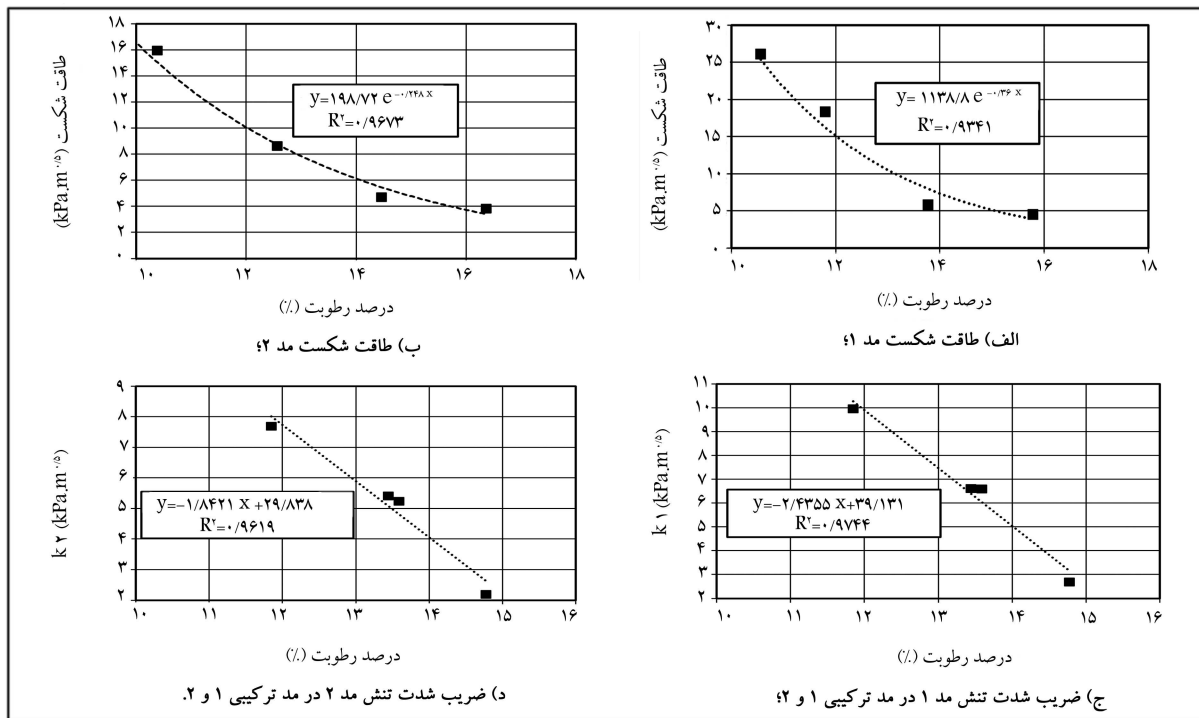
در شکل ۱۷، نحوه‌ی قرارگیری نمونه داخل دستگاه مشاهده می‌شود. نمونه به نحوی داخل دستگاه قرار گرفته است که مقادیر L_1 ، L_2 و c به ترتیب برابر ۸، ۳ و ۱



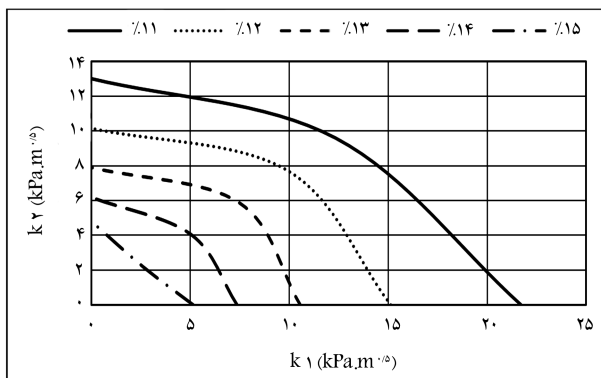
شکل ۱۶. نحوه‌ی قرارگیری نمونه داخل دستگاه برای تعیین طاقت شکست مد ۲.



شکل ۱۷. نحوه‌ی قرارگیری نمونه داخل دستگاه برای تعیین ضریب شدت تنش مد ترکیبی ۱-۲.



شکل ۱۹. منحنی تغییرات طاقث شکست در برابر درصد رطوبت.



شکل ۲۲. منحنی اندرکنش مد ۱ و ۲.

شکست است. از آنجا که رفتار خاک‌های ریزدانه متأثر از درصد رطوبت است، معیار شکست براساس درصد رطوبت‌های مختلف تعیین می‌شود. در شکل ۲۲، نتایج حاصل از روابط بالا در درصد رطوبت‌های مختلف رسم شده است. محور افقی طاقث شکست مد ۱، محور قائم طاقث شکست مد ۲ و نقاط بین محورها ضریب شدت تنش در حالت مد ترکیبی ۱-۲ را نشان می‌دهد. شکل ۲۲ نمودار اندرکنش مد ۱ و ۲ نامیده می‌شود. با کمک این نمودار می‌توان طراحی سازه‌های ترک‌دار را انجام داد. در شکل مذکور مشاهده می‌شود که مقادیر طاقث شکست مد ۱ بیشتر از مد ۲ به دست آمده است؛ بنابراین می‌توان گفت که در خاک هسته‌ی سد بیدواز، احتمال توسعه‌ی ترک با مکانیسم کششی (مد ۱) کمتر از مکانیسم برشی (مد ۲) است.

۶.۵. رابطه‌ی میان طاقث شکست مد ۱ و مقاومت کششی

مقاومت کششی خاک به صورت مقاومت خاک در برابر نیروهای ایجادکننده‌ی ترک و شکست (مد ۱ شکست) تعریف می‌شود؛ بنابراین، می‌توان میان طاقث شکست



شکل ۲۰. نحوه‌ی توسعه‌ی مد ۱ ترک بعد از شکست.



شکل ۲۱. نحوه‌ی توسعه‌ی مد ۲ ترک بعد از شکست.

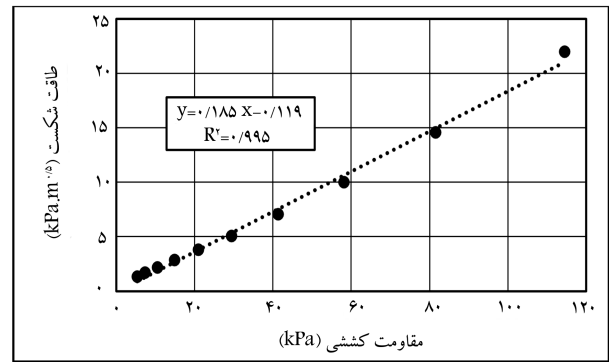
در شکل ۲۰، نحوه‌ی توسعه‌ی ترک در مد ۱ و در شکل ۲۱، نحوه‌ی توسعه‌ی ترک در مد ۲ نشان داده شده است. در مد ۱، ترک در امتداد ترک اولیه گسترش می‌یابد؛ اما در مد ۲ و مد ترکیبی ۱ و ۲، ترک با زاویه نسبت به امتداد ترک اولیه گسترش می‌یابد.

۵.۵. معیار شکست

هدف از انجام آزمایش‌های مکانیک شکست در مدهای مختلف، ارائه‌ی معیار

است. در نوشتار حاضر، با کمک آزمایش خمشی، مقاومت کششی خاک هسته‌ی سد بیدواز در درصد رطوبت‌های مختلف به‌دست آمده است. با ایجاد تغییرات در دستگاه برش مستقیم، امکان تعیین مقاومت کششی خاک با آزمون خمشی فراهم شده است. براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که خاک‌ها براساس درصد رطوبت، سه نوع رفتار ترد، نیمه ترد، و انعطاف‌پذیر دارند. زمانی که هسته‌ی سدهای خاکی با حدود ۳٪ کمتر از رطوبت بهینه متراکم شوند، رفتار ترد دارند. در این حالت با تغییرشکل کم، احتمال ترک‌خوردگی و شکست زیاد می‌شود. برخی پژوهشگران در سال ۲۰۱۶ بیان کردند که احتمال وقوع شکست هیدرولیکی با افزایش درصد رطوبت کاهش می‌یابد.^[۷] همچنین براساس نتایج آزمایشگاهی، رابطه‌ی تجربی برای محاسبه‌ی مقاومت کششی براساس درصد رطوبت ارائه شده است. مشاهده می‌شود که کاهش درصد رطوبت، باعث افزایش مکش بافتی و افزایش مقاومت کششی خاک می‌شود.

در ادامه سعی شده است با کمک مفاهیم مکانیک شکست، یک معیار شکست هیدرولیکی برای خاک هسته‌ی سد بیدواز ارائه شود. برای این منظور از روش ارائه‌شده‌ی در سال ۲۰۰۶^[۲۱] برای تعیین پارامترهای مکانیک شکست استفاده شده است. با ایجاد تغییراتی در دستگاه برش مستقیم، این دستگاه برای انجام آزمایش ۳ و ۴ نقطه‌ی خمشی آماده شده است. خاک هسته‌ی سد بیدواز که در شمال شرق ایران قرار دارد، به‌عنوان مورد مطالعاتی که دچار شکست هیدرولیکی شده است، بررسی شده است. با انجام آزمون‌های ۳ نقطه‌ی خمشی و ۴ نقطه‌ی خمشی با درصد رطوبت‌های مختلف، طاقت شکست مد ۱، طاقت شکست مد ۲ و ضریب شدت تنش مد ترکیبی ۱-۲ برای خاک هسته‌ی سد بیدواز تعیین شده است. براساس نتایج آزمایش‌ها، روابط تجربی برای محاسبه‌ی طاقت شکست براساس درصد رطوبت ارائه شده است. در مجموع مقادیر طاقت شکست مد ۱ بیشتر از مد ۲ به‌دست آمده است؛ بنابراین می‌توان گفت که در خاک هسته‌ی سد بیدواز، احتمال توسعه‌ی ترک با مکانیسم کششی (مد ۱) کمتر از مکانیسم برشی (مد ۲) است. در انتها براساس نتایج حاصل نمودار اندرکنش مدهای ۱ و ۲ برای درصد رطوبت‌های مختلف رسم شده است. نمودار حاصل به‌عنوان معیار شکست معرفی شده است و می‌توان از آن برای طراحی استفاده کرد.



شکل ۲۳. رابطه‌ی میان مقاومت کششی و طاقت شکست مد ۱.

مد ۱ و مقاومت کششی رابطه برقرار کرد. نتایج تجربی نیز نشان می‌دهد که میان دو پارامتر طاقت شکست مد ۱ و مقاومت کششی در خاک‌ها می‌توان رابطه‌ی خطی برقرار کرد. برخی پژوهشگران در سال ۲۰۰۷، ارتباط میان طاقت شکست مد ۱ و مقاومت کششی را با کمک رابطه‌ی خطی ۱۶ بیان کرده‌اند:^[۲۳]

$$k_{1c} = \alpha \sigma_t \quad (16)$$

که در آن، α ضریب تناسب است. براساس نتایج تجربی، روابط ۳ و ۱۲ به ترتیب برای تعیین مقاومت کششی و طاقت شکست مد ۱ خاک هسته‌ی سد بیدواز ارائه شده‌اند. با کمک روابط مذکور، مقادیر مقاومت کششی و طاقت شکست مد ۱ برای درصد رطوبت‌های مختلف محاسبه و نتایج در شکل ۲۳ ارائه شده‌اند. با عبور بهترین منحنی از میان نتایج تجربی، می‌توان رابطه‌ی ۱۷ را برای تعیین طاقت شکست براساس درصد رطوبت بیان کرد:

$$k_{1c} = 0.185\sigma_t - 0.119 \cong 0.185\sigma \quad (17)$$

۶. نتیجه‌گیری

از جمله مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در توسعه‌ی ترک در خاک‌ها، مقاومت کششی

پانویس‌ها

1. Teton
2. Balderhead
3. Hyttejuvet
4. hydraulic fracturing
5. internal erosion
6. fracture mechanics
7. linear elastic fracture mechanics
8. stress intensity factor
9. fracture toughness
10. three point bending test
11. four point bending test
12. arching
13. four point unsymmetrical bending test

منابع (References)

1. Lo, K. and Kaniaru, K. "Hydraulic fracture in earth and rock-fill dams", *Canadian Geotechnical Journal*, **27**(4), pp. 496-506 (1990).
2. Sherard, J.L. "Hydraulic fracturing in embankment dams", *Journal of Geotechnical Engineering*, **112**(10), pp. 905-927 (1986).
3. Panel, I. "Review cause of Teton Dam failure", Denver, Colom, US Bureau of Reclamation (1976).
4. Vaughan, P. "The use of hydraulic fracturing tests to detect crack formation in embankment dam cores", Ini-

- tial report, Department of Civil Engineering, Imperial College, London, England (1971).
5. Wang, J.J. "Hydraulic fracturing in earth-rock fill dams", 272 p. (2014).
 6. Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M. "The statistics of embankment dam failures and accidents", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(5), pp. 1000-1024 (2000).
 7. Khanna, R. and Chitra, R. "Hydraulic fracturing in core of earth and rockfill dams", *International Journal of Engineering Innovation & Research*, **5**(1), pp. 136-142 (2016).
 8. Fukushima, S. "Hydraulic fracturing criterion in the core of fill dams", *Report Fujita Kogyo Technical Institute*, **22**, pp. 131-136 (1986).
 9. Mori, A. and Tamura, M. "Hydrofracturing Pressure of cohesive soils", *Journal of Soil and Foundation Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **27**(1), pp. 14-22 (1987).
 10. Satoh, H. and Yamaguchi, Y. "Laboratory hydraulic fracturing tests for core materials using large size hollow cylindrical specimens", In The 1st International Symposium on Rockfill Dams, Chengdu, China (2008).
 11. Jaworski, G.W., Duncan, J.M. and Seed, H.B. "Laboratory study of hydraulic fracturing", *J. Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng., United States*, **107**(6), pp. 713-733 (1981).
 12. Ghanbari, A. and Rad, S.S. "Development of an empirical criterion for predicting the hydraulic fracturing in the core of earth dams", *Acta Geotechnica*, **10**(2), pp. 243-254 (2015).
 13. Komak Panah, A. and Yanagisawa, E. "Laboratory study on hydraulic fracturing criteria in soil", *Journal of Soils & Foundations*, **29**(4), pp. 14-22 (1989).
 14. Yanagisawa, E and Komak Panah, A. "Two dimensional study of hydraulic fracturing criteria in cohesive soil", *Journal of the Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **34**(1), pp. 1-9 (1994).
 15. Murdoch, L.C. "Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments Part 3", *Theoretical, Geotechnique*, **43**(2), pp. 277-287 (1993).
 16. Anderson, T.L. and Anderson, T. "Fracture mechanics: Fundamentals and applications", CRC press (2005).
 17. Juarez-Luna, G. and Ayala, G. "Application of fracture mechanics to cracking problems in soils", *Open Construction and Building Technology Journal*, **8**(1), pp. 1-8 (2014).
 18. Hallett, P., Dexter, A. and Seville, J. "The application of fracture mechanics to crack propagation in dry soil", *European Journal of Soil Science*, **46**(4), pp. 591-599 (1995).
 19. Li, H., Yang, H. and Liu, Z. "Experimental investigation of fracture toughness K_{IIC} of frozen soil", *Canadian geotechnical journal*, **37**(1), pp. 253-258 (2000).
 20. Hallett, P. and Newson, T. "Describing soil crack formation using elastic-plastic fracture mechanics", *European Journal of Soil Science*, **56**(1), pp. 31-38 (2005).
 21. He-Jun, C., Jun-Gao, Z. and Jun-Jie, W. "Experimental study on fracture behavior of a silty clay", *Geotechnical Testing*, **30**(4), pp. 1-9 (2006).
 22. Rao, B.H., Singh, D. and Venkataramana, K. "A critical review of the methodologies employed for determination of tensile strength of fine-grained soils", *Journal of Testing and Evaluation*, **37**(2), pp. 1-7 (2009).
 23. Kim, T.-H. and et al. "Factors influencing crack-induced tensile strength of compacted soil", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **24**(3), pp. 315-320 (2011).
 24. Tej, P.R. and Singh, D. "Estimation of tensile strength of soils from penetration resistance", *International Journal of Geomechanics*, **13**(5), pp. 496-501 (2012).
 25. Gary, X.T. and James, G. "A method for testing tensile strength in unsaturated soils", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, **23**(3), pp. 377-382 (2000).
 26. Azmatch, T.F., Sego, D., Arenson, L.U. and et al. "Tensile strength of frozen soils using four-point bending test", In *Proceedings of the 63rd Canadian Geotechnical Conference and 6th Canadian Permafrost Conference*, Calgary, Canada (2010).
 27. Tamrakar, S.B., Mitachi, M., Toyosawa, Y. and et al. "Development of a new soil tensile strength test apparatus", In *Site Characterization and Modeling*, ASCE (2005).
 28. Tang, C.-S., Pei, X.-J., Wang, D.-Y. and et al. "Tensile strength of compacted clayey soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **141**(4), pp. 1-8 (2014).
 29. Ammeri, A., Jamei, M., Bouassida, M. and et al. "Numerical study of bending test on compacted clay by discrete element method: Tensile strength determination", *International Journal of Computer Applications in Technology*, **34**(1), pp. 13-22 (2009).
 30. Zeh, R.M. and Witt, K.J. "The tensile strength of compacted clays as affected by suction and soil structure", In *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Springer. pp. 219-226 (2007).
 31. Amarasiri, A.L., Costa, S. and Kodikara, J.K. "Determination of cohesive properties for mode I fracture from compacted clay beams", *Canadian Geotechnical Journal*, **48**(8), pp. 1163-1173 (2011).
 32. Wang, J.-J., Zhu, J.-G., Chiu, C.F. and et al. "Experimental study on fracture toughness and tensile strength of a clay", *Engineering Geology*, **94**(1), pp. 65-75 (2007).