

تعیین فشار شکست هیدرولیکی خاک با استفاده از سلول پیشرفته‌ی تحکیم

علی قنبری (دکترای ژئوتکنیک)

اسماعیل افلاکی (استادیار)

سیدعبدالعظیم امیرشاکرمی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

هسته‌ی رسی سدهای خاکی و سنگریزه‌یی محیطی است که در آن دو فاز جامد و مایع در تقابل قرار می‌گیرند. افزایش بیش از حد فشار آب موجود در ترک‌ها باعث ایجاد و گسترش ترک‌خوردگی در توده‌ی رسی می‌شود. این فرایند به نام شکست هیدرولیکی نام‌گذاری شده و یکی از خطرناک‌ترین پدیده‌های خرابی در سدهای خاکی است.

در این مطالعه، ضمن بررسی سازوکارهای شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی، و جمع‌آوری تجربیات حاصل از مطالعه‌ی آزمایشگاهی این پدیده در مراکز علمی دنیا، نهایتاً مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام شده توسط مؤلفان در ایران مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است. برای مدل‌سازی شرایط هسته‌ی سدهای خاکی یک سلول ویژه بر مبنای سلول تحکیم یافته‌ی پیشرفته^۱ طراحی و ساخته شد و با این دستگاه آزمایش‌های شکست هیدرولیکی انجام شد. آزمایش‌ها غالباً در شرایط تحکیم نیافته و اشباع نشده روی مصالح سدهای در حال احداث انجام شده و نتایج آن با توجه به شرایط بحرانی بروز شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی مورد استناد قرار گرفته است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برای خاک‌های ریزدانه، و نیز خاک‌های درشت‌دانه‌ی شامل درصد قابل توجهی ریزدانه، فشار لازم برای ایجاد شکست هیدرولیکی به‌طور خطی تابع تنش اصلی کوچک‌تر خاک است و با افزایش این تنش، فشار لازم برای ایجاد شکست هیدرولیکی افزایش می‌یابد. همچنین در این مطالعه رابطه‌ی تجربی بین خواص خاک (چسبندگی و اصطکاک) و فشار لازم برای ایجاد شکست هیدرولیکی استخراج شده و تأثیر انرژی تراکم در آن مورد بحث قرار می‌گیرد. نهایتاً ضمن جمع‌بندی مطالعه و مقایسه با شرایط واقعی سدهای خاکی، توصیه‌های عملی برای جلوگیری از وقوع شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی ارائه می‌شود.

مقدمه

هسته‌ی سدهای خاکی و سنگریزه‌یی عهده‌دار وظیفه‌ی آب‌بندی سد است و هرگونه ترک‌خوردگی در آن ممکن است منجر به خرابی کلی سد شود. شکست هیدرولیکی یکی از پدیده‌های مخرب هسته‌ی سدهای خاکی است که در اثر غلبه‌ی فشار آب مخزن بر تنش خاک در هسته به وجود می‌آید و موجب بروز ترک هیدرولیکی می‌شود. در این فرایند فشار آب باعث می‌شود موقعیت تنش در یک نقطه با سازوکار برشی یا کششی به سوی پوش^۲ خرابی حرکت کند و در نتیجه ترک‌هایی در توده‌ی خاک ایجاد شود. این ترک‌ها «ترک هیدرولیکی»^۳ نام دارند و فشار آبی که منجر به شروع ترک‌خوردگی می‌شود «فشار شکست هیدرولیکی»^۴ نامیده می‌شود. با توجه به نقش حائز اهمیت فشار شکست هیدرولیکی در مطالعه‌ی ترک‌خوردگی هسته‌ی سدهای خاکی، بسیاری از محققین اقدام به انجام مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه کرده‌اند. در یکی از قدیمی‌ترین مطالعات آزمایشگاهی پیرامون شکست

هیدرولیکی، محققین برای انجام آزمایش‌های خود دستگاه آزمایش سه‌محوری را اصلاح کرده و از خاک‌های رسی ماسه‌دار متراکم شده استفاده کرده‌اند.^[۱] دستگاه اصلاح‌شده‌ی آنها از قابلیت اعمال تنش محوری فشار آب در درون و اطراف نمونه برخوردار است. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که در نمونه‌های آزمایش شده، شکست به صورت کششی است و ترک در صفحه‌ی تنش کششی حداکثر اتفاق افتاده است. از طرف دیگر شکست برشی در این نمونه‌ها گزارش نشده است.

پس از خرابی سد تنن (Teton) در سال ۱۹۷۵، کمیته‌ی ویژه‌یی برای پیگیری دلایل ویرانی کامل این سد بزرگ در اولین آنگیری مخزن تشکیل شد، و نهایتاً وقوع ترک هیدرولیکی از مهم‌ترین دلایل خرابی سد اعلام شد. مطالعات آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را روی مصالح دوباره متراکم شده‌ی این سد محققان انجام داده‌اند.^[۲] آنان از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۲۰۳ میلی‌متر که سوراخی با قطر ۸/۴ میلی‌متر در وسط نمونه دارد، استفاده کرده‌اند. نتایج کار این

آنها با خاک‌های ریزدانه پرداخته است. در مطالعات گذشته آزمایش شکست هیدرولیکی با استفاده از خاک‌هایی که درصد قابل توجهی از آن درشت‌دانه‌اند دیده نمی‌شود.

سلول پیشرفته‌ی تحکیم

سلول پیشرفته‌ی تحکیم نوع اصلاح شده‌ی سلول معمولی تحکیم خاک است که حدود ۴۵ سال پیش به منظور رفع نواقص دستگاه ادمتر در انگلستان ابداع شده است و هم‌اکنون در بسیاری از آزمایشگاه‌های معتبر دنیا کاربرد دارد. در استاندارد BS-1377 انگلستان نیز این سلول معرفی شده است. این سلول امتیازهای ویژه‌ی دارد که از آن جمله می‌توان به قابلیت اعمال بارگذاری پیوسته روی نمونه‌های خاک اشاره کرد. از دیگر امتیازهای سلول پیشرفته‌ی تحکیم قابلیت اندازه‌گیری خواص تحکیم و نفوذپذیری خاک به صورت شعاعی است. این سلول می‌تواند نمونه‌های خاک را به صورت افقی زه‌کشی کند یا از وسط نمونه به طرف جدار به صورت افقی اعمال فشار کند. این سلول همچنین از سهولت کنترل بارگذاری، امکان اندازه‌گیری حجم آب خروجی و همچنین قابلیت اعمال پس فشار برخوردار است. با توجه به وجود اندازه‌های مختلف برای این سلول و امکان انتخاب سلول‌های با قطر بزرگ، نتایج آزمایش‌های آن نمایانگر شرایط واقعی تری از خاک است.

به منظور مطالعه‌ی ارتباط پارامترهای خاک با فشار شکست هیدرولیکی، دستگاه آزمایش شکست هیدرولیکی با ایجاد اصلاحاتی در سلول پیشرفته‌ی تحکیم در دانشگاه صنعتی امیرکبیر طراحی و ساخته شده است. قطر داخلی سلول ساخته شده ۲۵ سانتی‌متر است و نسبت به سلول تحکیم از این امتیاز برخوردار است که علاوه بر زه‌کشی شعاعی قادر است بر نمونه‌ها نیز فشار جانبی اعمال کند.

این سلول شامل قطعات مختلفی از قبیل بدنه‌ی سلول، شیرآلات، پیچ و مهره، لاستیک آب‌بندی، صفحات فلزی و متخلخل، دیافراگم لاستیکی و... است. تصویری از دستگاه ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است. برای این سلول نمونه‌گیر ویژه‌ی نیز طراحی و ساخته شده است.

سیستم آزمایش‌های شکست هیدرولیکی

برای انجام آزمایش‌های شکست هیدرولیکی سیستمی متشکل از منبع تولید فشار هوا، تنظیم‌کننده‌ی فشار، شیر کنترل دبی، ابزار قرائت و اندازه‌گیری داده‌ها و مجموعه‌ی سلول آزمایش طراحی شده است. شمای کلی این سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است. اعمال فشار توسط کمپرسور هوا صورت می‌گیرد و از طریق مخازن آب، فشار

گروه نشان می‌دهد برای خاک مورد آزمایش که از نوع ریزدانه بوده، فشار شکست هیدرولیکی تابع خطی از تنش افقی کل اولیه است و با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$P_f = m\sigma_h + \sigma_{ta}$$

که در آن σ_{ta} مقاومت کششی ظاهری خاک برای جلوگیری از وقوع ترک در فشار شکست P_f است. همچنین m شیب رابطه‌ی خطی بین فشار شکست با تنش افقی است و σ_h تنش اصلی حداقل (در حالت تنش کل) است، قبل از اینکه حفره ایجاد شود.

مطالعات دیگری که با استفاده از نمونه‌های استوانه‌یی توخالی توسط دستگاه اصلاح شده‌ی سه محوری روی خاک‌های ریزدانه انجام شده، وجود رابطه‌ی خطی بین فشار شکست هیدرولیکی و تنش‌های اصلی را برای خاک مذکور تأیید کرده است.^[۳] محققان این رابطه را به صورت زیر بیان کرده‌اند:

$$P_f = (\frac{1}{5}\sigma_p - \frac{1}{5}\sigma_c)(1 + \sin \phi_u) + C_u \cos \phi_u$$

که در آن P_f فشار شکست هیدرولیکی، σ_p ، σ_c تنش‌های اصلی و C_u ، ϕ_u چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک زه‌کشی نشده‌ی خاک‌اند. این محققین همچنین بر برشی بودن شکست نمونه‌ها تأکید داشته‌اند.

همچنین با استفاده از نمونه‌های مکعبی، سازوکار ترک هیدرولیکی در خاک رس سیلتی^۵ مطالعه شده و با استفاده از نظریه‌ی مکانیک شکست، رابطه‌ی زیر برای ضریب شدت تنش بحرانی (K_{ic}) ارائه شده است:^[۴]

$$K_{ic} = P_f \sqrt{(a_i - \pi)}$$

که در آن P_f فشار شکست هیدرولیکی و a_i نصف طول ترک است.

از جمع‌بندی مجموع مطالعات گذشته چنین نتیجه می‌شود که به‌طور کلی فشار شکست هیدرولیکی در خاک‌های ریزدانه و خاک‌های ریزدانه‌ی رسی حاوی ماسه، تابع خطی از تنش افقی است. همچنین شکست نمونه‌ها در خاک‌های ریزدانه‌ی رسی به صورت برشی و در خاک‌های ریزدانه‌ی ماسه‌دار احتمالاً کششی است.

در مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط نگارندگان درباره‌ی رابطه‌ی فشار شکست هیدرولیکی در خاک‌های شنی حاوی رس (GM و GC) تحقیق شده است. به همین منظور نسبت به طراحی و ساخت یک سلول آزمایشگاهی و نمونه‌ساز ویژه اقدام شد، که با توجه به دانه‌بندی خاک مورد استفاده از قطر نسبتاً بزرگی برخوردار است.

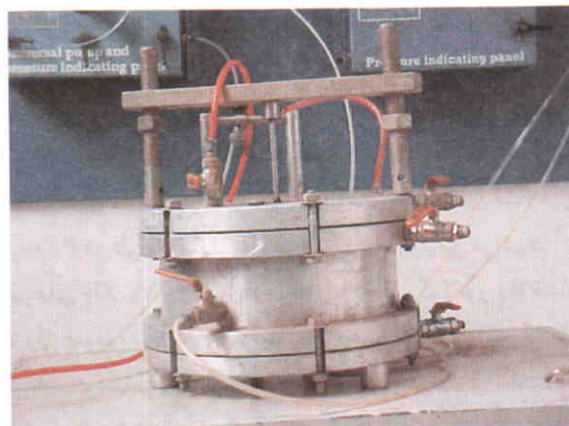
در ادامه‌ی این نوشتار پس از بحث پیرامون مبانی طراحی و ساخت تجهیزات آزمایشگاهی، نتایج مطالعات آزمایشگاهی تشریح می‌شود. یادآوری می‌شود که نوشتار حاضر به تحقیق پیرامون پدیده‌ی شکست هیدرولیکی در خاک‌های درشت‌دانه و مقایسه‌ی

به ترتیب عبارت‌اند از: دانه‌بندی، تأمین رطوبت نمونه، تراکم، استحصال نمونه از نمونه‌گیر، جاسازی نمونه در سلول، بارگذاری، ایجاد ترک هیدرولیکی و ثبت داده‌ها.

شمای کلی روش انجام آزمایش‌ها بدین صورت است که ابتدا مطابق منحنی مورد نظر برای دانه‌بندی خاک، به مقدار لازم خاک دانه‌بندی شده را تهیه کرده و سپس رطوبت لازم برای آن با افزودن آب تأمین می‌شود. پس از همگن‌سازی مخلوط خاک و آب، با کوبیدن یک چکش پنج کیلویی روی نمونه، خاک به حد کافی متراکم می‌شود. با توجه به سیستم خاصی که برای نمونه‌گیر طراحی شده است و متعاقباً تشریح می‌شود، نهایتاً نمونه‌هایی به شکل استوانه‌ای توخالی از درون نمونه‌گیر استحصال شده و در سلول آزمایش جاسازی می‌شود.

برای تأمین آب بندی نمونه از گل بنتونیت استفاده شده و به منظور افزایش کارایی آن در بالا و پایین نمونه‌ی صفحات شیشه‌یی تعبیه شده است. پس از آماده کردن سلول، بارگذاری روی نمونه آغاز شده و همگام با آن داده‌های آزمایش نیز ثبت می‌شود. در حالتی که آزمایش برای شرایط اشباع شده انجام می‌شود، لازم است پس از جایگیری نمونه در نمونه‌گیر، جریان آب به صورت شعاعی از خارج به داخل نمونه برقرار شود. نمونه هنگامی کاملاً اشباع می‌شود که فشار داخلی و خارجی نمونه یکسان شوند.

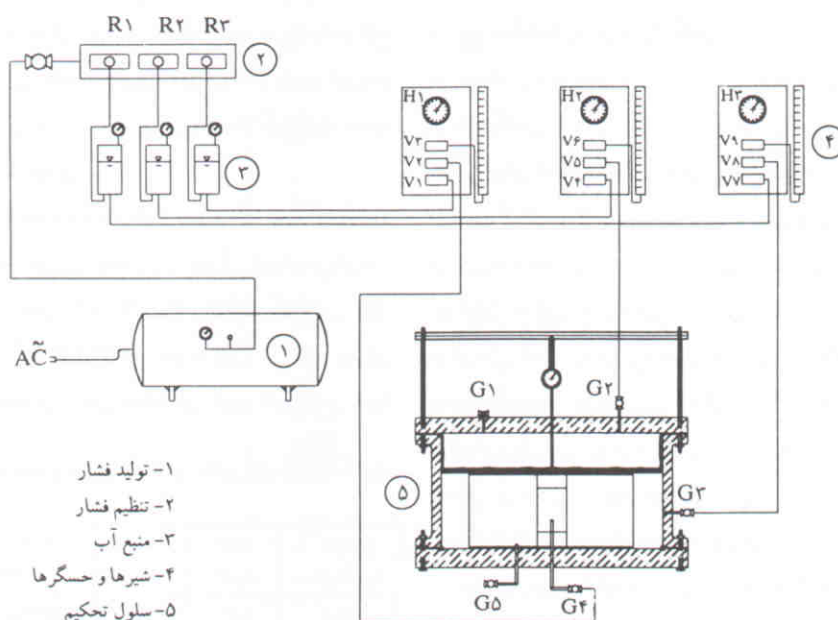
در اینجا هر یک از مراحل آزمایش را به اختصار شرح می‌دهیم. جزئیات بیشتر این مراحل و دستگاه‌های مورد استفاده قابل دسترسی است.^[۵]



شکل ۱. تصویر سلول ساخته شده برای آزمایش‌های شکست هیدرولیکی.

هوا به فشار آب تبدیل می‌شود. اجزای متشکله‌ی این سیستم عبارت‌اند از:

- کمپرسور هوا؛
 - مخازن مبدل فشار هوا به فشار آب (S_1, S_2, S_3)؛
 - تنظیم‌کننده کنترل فشار (R_1, R_2, R_3)؛
 - عقربه‌های اندازه‌گیری فشار آب (H_1, H_2, H_3)؛
 - شیرهای کنترل جریان آب (V_1 تا V_9)؛
 - سلول آزمایش شکست هیدرولیکی که شیرهای (G_1 تا G_5) و چندین ابزار دیگر به آن متصل می‌شوند؛
 - وسایل نمونه‌گیری (قالب نمونه‌گیر، چکش ۵ کیلویی و...).
- فرایند انجام آزمایش مشتمل بر هفت مرحله‌ی اصلی است که



شکل ۲. شمای کلی سیستم آزمایش‌های شکست هیدرولیکی.

تهیه‌ی نمونه

دانه‌بندی باید منطبق بر دانه‌بندی واقعی خاک مورد مطالعه باشد. اگرچه حداکثر اندازه‌ی دانه‌ها در هسته‌ی سدهای خاکی معمولاً به حدود یک اینچ می‌رسد، در تعداد قابل توجهی از سدهای خاکی دانه‌های درشت‌تری نیز برای هسته‌ی سد به کار گرفته شده است. در صورتی که دانه‌بندی واقعی خاک حاوی دانه‌های درشت‌تر از حد معمول باشد، باید دانه‌بندی با روش استاندارد یا روش‌های معتبر در مراجع مکانیک خاک اصلاح شود. خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق از مصالح سدهای در دست احداث انتخاب شده و دانه‌بندی آنها منطبق بر شرایط واقعی هسته سدهای خاکی است.

نمونه‌های آزمایش شکست به شکل استوانه‌ی توخالی تهیه شده‌اند. بنابراین برای آماده‌سازی آنها لازم است که از دستگاه نمونه‌ساز ویژه‌ی استفاده شود. به همین منظور یک قالب استوانه‌ی بی‌میله‌ی در وسط طراحی و ساخته شده است که قابلیت ساخت نمونه‌های استوانه‌ی مترکم و توخالی را دارد. این نمونه‌ساز یک وزنه‌ی ۵ کیلوگی دارد که در راستای میله‌ی وسط قالب روی نمونه خاک سقوط می‌کند. تعداد لایه‌های نمونه، تعداد ضربه‌ها و ارتفاع سقوط وزنه با توجه به نوع تراکم معادل تعیین می‌شود. مشخصات تراکم معادل روش‌های تراکم پراکتور استاندارد و اصلاح شده در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود تعداد ضربات چکش این نمونه‌گیر با تعداد ضربات چکش استاندارد متفاوت است. پس از اضافه کردن رطوبت به میزان بهینه و انجام تراکم، نمونه‌ی حاصله با قطر داخلی ۴۰ و قطر بیرونی ۱۵۰ و ارتفاع ۹۰ میلی‌متر است. این نمونه در درون سلول آزمایش قرار می‌گیرد. برای سهولت زه‌کشی و یکنواختی توزیع فشار، پیرامون و داخل این نمونه با مصالح ماسه‌ی پر می‌شود. همچنین فاصله‌ی بین سطوح بالا و پایین نمونه و درپوش‌های سلول با خمیر بتونیت اندود می‌شود تا هیچ‌گونه نشت آبی از این دو سطح صورت نپذیرد.

برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی پس از ایجاد فشار باد در پشت تنظیم‌کننده‌ها، مراحل زیر به صورت متوالی انجام می‌شود:

الف) با باز نگه داشتن شیرهای G_2 ، V_4 و V_5 و تنظیم رگولاتور R_2 ، فشار عمودی به میزان 2 kg/cm^2 بر نمونه وارد می‌شود. برای اطمینان از هواگیری فضای داخل دیافراگم، شیر تخلیه‌ی هوا

جدول ۱. مشخصات انتخاب شده برای تراکم نمونه‌های آزمایش شکست هیدرولیکی در نمونه‌ساز ویژه.

روش تراکم	شماره‌ی استاندارد معادل	تعداد لایه‌ها	تعداد ضربه	ارتفاع سقوط وزنه
پراکتور استاندارد	ASTM-D۶۹۸	۳	۱۳	۱۸ اینچ
اصلاح شده	ASTM-D۱۵۵۷	۵	۲۵	۱۸ اینچ

G_1) راباز کرده و پس از بالا زدن آب از آن، مجدداً آن را می‌بندیم. ب) با باز نگه داشتن شیرهای G_3 ، V_7 و V_8 و تنظیم رگولاتور R_1 ، فشار جانبی به میزان مورد نظر بر نمونه وارد می‌شود. ج) شیرهای V_5 و V_8 را بسته نگه داشته و بنابراین اتصال آنها را با مخازن مربوطه قطع می‌کنیم. این کار باعث ثابت ماندن فشارهای σ_r و P_0 در طول آزمایش تا وقوع ترک هیدرولیکی می‌شود. د) شیرهای G_4 ، V_1 و V_2 را باز کرده و با تنظیم رگولاتور R_2 فشار درونی نمونه را به آرامی افزایش می‌دهیم. افزایش این فشار می‌بایست متناسب با سرعت مفروض برای بارگذاری باشد. در همین حال، ضمن اندازه‌گیری زمان از شروع این مرحله، عقربه‌های H_1 ، H_2 و H_3 نیز به دقت قرائت و نتایج مربوطه در فرم‌هایی ثبت می‌شود.

به محض وقوع ترک در نمونه، جریان آب از درون نمونه به بیرون آن راه یافته و لذا فشار همه‌جانبه‌ی نمونه افزایش می‌یابد. این تغییر توسط عقربه‌ی H_3 قابل اندازه‌گیری است. با توجه به روند افزایش این عقربه گسیختگی ناگهانی و یا آرام نمونه نیز قابل تشخیص است. مقدار P_1 در لحظه‌ی گسیختگی معادل P_f است. در همین حال برای نمونه‌های اشباع، مقدار فشار آب حفره‌ی نمونه و افزایش آن در حین آزمایش توسط شیر G_5 قابل اندازه‌گیری است.

پس از انجام آزمایش به آرامی فشارها از روی نمونه برداشته شده و سپس درپوش فوقانی سلول برداشته می‌شود. پس از تخلیه‌ی آب‌های داخل سلول مسیر وقوع ترک ردیابی می‌شود. معمولاً مسیر ترک واضح است و به راحتی دیده می‌شود.

نتایج مطالعات آزمایشگاهی

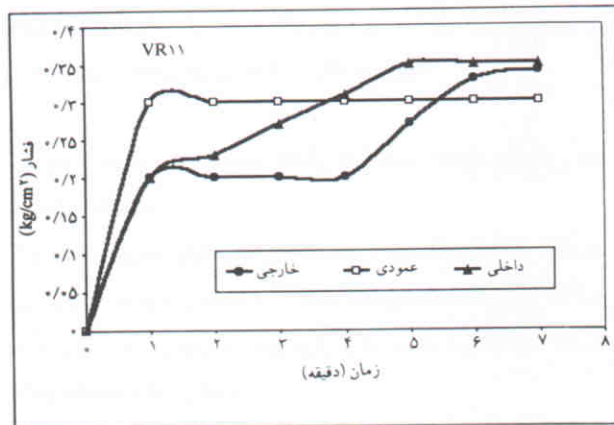
در بخش مقدمه‌ی این نوشتار خلاصه‌ی نتایج مطالعات آزمایشگاهی گذشته پیرامون شکست هیدرولیکی در توده‌های خاکی بیان شد. مطالعات مذکور عمدتاً برای خاک‌های ریزدانه صورت گرفته و آزمایش شکست هیدرولیکی بر روی خاک‌های درشت‌دانه حاوی رس در میان آنها دیده نمی‌شود. از طرف دیگر در مطالعات مذکور به تحقیق رابطه‌ی فشار شکست هیدرولیکی و چگونگی شکست در توده‌های خاکی پرداخته شده ولی نتایج به دست آمده تا حدودی پراکندگی دارد و به طور قطع حالت غالب ترک خوردگی در خاک‌های ریزدانه مشخص نشده است. در مطالعه‌ی حاضر، موارد زیر اختصاصاً مورد توجه بوده است:

الف) تحقیق فشار شکست هیدرولیکی برای خاک‌های درشت‌دانه‌ی حاوی رس و مقایسه‌ی آن با نتایج خاک‌های ریزدانه؛

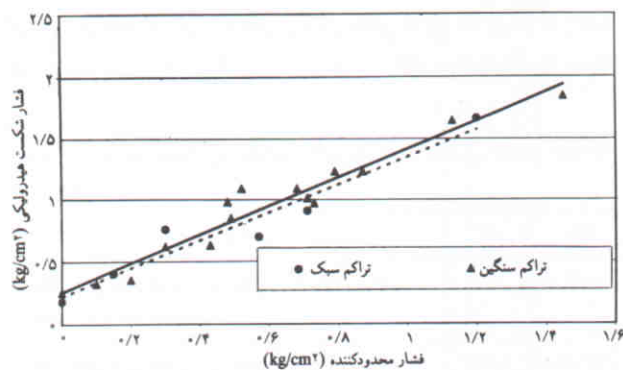
ب) در نظرگیری شرایط خاص پدیده‌ی شکست هیدرولیکی در هسته‌ی سدهای خاکی؛



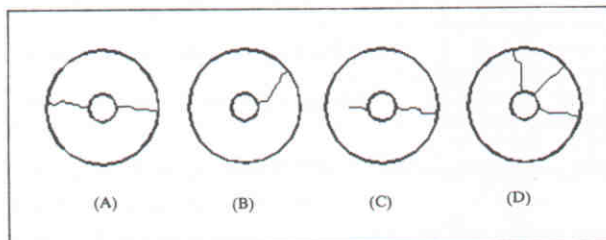
شکل ۳. تصویر یکی از نمونه‌های آزمایش شده.



شکل ۴. تغییرات تنش‌ها در مقابل زمان برای یکی از نمونه‌ها.



شکل ۵. نتایج فشار شکست هیدرولیکی نمونه‌ها در دو حالت تراکم سبک و تراکم سنگین.



شکل ۶. انواع ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌ها.

ج) تعیین چگونگی شکست، موقعیت و جهت ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌ها.

مطالعه‌ی پیشین نویسنده‌گان نشان می‌دهد که زمان اولین آبرگیری مخزن سد محتمل‌ترین زمان وقوع شکست هیدرولیکی در طول عمر سد است. [۶] در این وضعیت قاعداً هسته‌ی سد هنوز کاملاً اشباع نشده است و خاک آن در بارگذاری به صورت اشباع نشده عمل می‌کند. به همین منظور نمونه‌های مورد آزمایش در شرایط اشباع نشده تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند و با توجه به زمان بسیار کوتاه آزمایش، در طول آزمایش نیز اشباع نشده‌اند.

خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده که با انجام آزمایش‌های مختلف مکانیک خاک برآورد شده، به طور خلاصه عبارت است از:

- طبقه بندی: GM-GC؛

- شاخص خمیری: ۶؛

- اندازه‌ی بیشینه‌ی داده‌ها: ۵۰ میلی‌متر؛

- رطوبت بهینه: ۱۰٪؛

- زاویه‌ی اصطکاک: ۴ درجه؛

- چسبندگی: 0.076 Kg/cm^2 ؛

- مقاومت کششی: 0.013 Kg/cm^2 .

تصویر یکی از نمونه‌های آزمایش شده نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.

بررسی نتایج آزمایش‌های شکست هیدرولیکی با استفاده از ۱۹ نمونه خاک انجام شده است. نمونه‌ی از منحنی‌های حاصل از این آزمایش‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین منحنی‌های فشار شکست هیدرولیکی در برابر فشار همه‌جانبه برای نمونه‌های نوع اول در دو تراکم سبک و سنگین در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، بین فشار شکست و فشار همه‌جانبه‌ی نمونه رابطه‌ی تقریباً خطی وجود دارد. همچنین بررسی شکل ترک‌های ایجاد شده در هر نمونه نشان می‌دهد که ترک‌های ایجاد شده مطابق شکل ۶ در چهار دسته طبقه بندی می‌شود. شروع هر چهار نوع ترک از داخل نمونه صورت می‌گیرد و سازوکار آنها مطابق یکی از وضعیت‌های شکست برشی، کششی و یا ترکیبی از برش و کشش است. در گسترش ترک عواملی از قبیل نامتعادلی هندسی و یا ناهمگنی مصالح مؤثر است؛ بنابراین ترک‌های ایجاد شده از اشکال متفاوتی برخوردارند.

ارائه‌ی یک رابطه‌ی تجربی برای فشار شکست هیدرولیکی

نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که با تقریب بسیار خوبی می‌توان رابطه‌ی بین فشار شکست هیدرولیکی و فشار همه‌جانبه‌ی نمونه‌ها را

بیان کرد. با این حال، برخی از خاک‌ها نسبت به خط مذکور انحراف معیار کمتری را نشان می‌دهند.

مقاومت برشی خاک: در صورتی که نمونه‌ها در حالت کششی گسیخته شوند چسبندگی و اصطکاک خاک هیچ تأثیری در فشار شکست هیدرولیکی ندارند. با این حال نتایج تجربی نشان می‌دهد که حالت برشی یا حالت ترکیبی از برش و کشش، نسبت به حالت کششی انطباق بیشتری بر نتایج دارد. بنابراین چسبندگی و اصطکاک هر دو در فشار شکست هیدرولیکی تأثیر دارند و مخصوصاً در سطوح تنش بالاتر از 0.5 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع موجب افزایش آن می‌شوند. مقاومت کششی خاک، میزان تراکم نمونه‌ها و درصد رطوبت تراکم: مقایسه‌ی مقاومت کششی خاک‌های مورد مطالعه با پارامترهای m و n نشان می‌دهد که این پارامترها با مقاومت کششی خاک رابطه‌ی مشخصی ندارند. (جدول ۳)

نکته‌ی حائز اهمیت‌ی که در جدول ۳ دیده می‌شود، کاهش مقاومت کششی با افزایش تراکم است. در مطالعات محققین پیشین نیز این نکته مورد توجه واقع شده است ولی پراکندگی نتایج حاصله، و در برخی موارد متضاد بودن نتایج محققین مختلف، نشان می‌دهد که تغییرات مقاومت کششی با انرژی تراکم در تمام محدوده‌ها روند ثابتی ندارد. [۱۲]

در این مطالعه تغییرات فشار شکست هیدرولیکی بر اثر تغییر درصد آب موجود در نمونه‌ها مورد نظر نبوده است. با این حال مطالعات نشان می‌دهد که فشار شکست هیدرولیکی با افزایش درصد آب اولیه‌ی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. [۱۱] به نظر می‌رسد که این نتیجه‌گیری فقط برای میزان خاصی از درصد رطوبت صادق باشد. زیرا با افزایش درصد رطوبت انعطاف‌پذیری نمونه بیشتر شده و مقاومت کششی آن افزایش یافته و نهایتاً فشار شکست هیدرولیکی افزایش می‌یابد. با این حال اثر افزایش رطوبت در کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی نیز می‌بایست در نظر گرفته شود.

همچنین خاک‌هایی که از اندیس خمیری (PI) بالاتری برخوردارند به لحاظ انعطاف‌پذیری در مقابل ترک‌خوردگی مقاوم‌ترند. با این حال ممکن است خاک‌های خمیری مقاومت برشی کمتری داشته باشند، و به همین علت در مقابل شکست هیدرولیکی ضعیف‌تر باشند. ولی به عنوان یک قاعده‌ی کلی می‌توان پذیرفت که افزایش اندیس خمیری موجب بهبود مقاومت در مقابل ترک‌خوردگی می‌شود. بر مبنای نتایج این مطالعه با افزایش PI خاک مقدار ضریب n آن افزایش می‌یابد.

اثر عوامل دیگر: علاوه بر عوامل یاد شده، پارامترهای دیگری نیز در میزان فشار شکست هیدرولیکی مؤثرند که از اهداف این مطالعه نبوده‌اند. از جمله عوامل مذکور می‌توان به سرعت بارگذاری،

توسط یک خط بیان کرد. بر همین مبنای، در اینجا برای ارائه‌ی رابطه‌ی تجربی از فرمول کلی خط استفاده می‌شود. رابطه‌ی خطی مذکور به شکل زیر بیان شود:

$$P_f = m\sigma_{fn} + n$$

که در آن دو پارامتر m و n تابع نوع خاک، شرایط اشباع و تراکم نمونه‌اند. مطالعات این تحقیق نشان می‌دهد که برای خاک‌های متراکم در حالت اشباع نشده m معمولاً بین $1/0$ تا $1/2$ و n بین $0/2$ تا $0/4$ در تغییر است. مقدار دقیق این پارامترها برای هر خاک تابع عوامل مختلفی است که از آن جمله می‌توان به دانه‌بندی، خواص خمیری خاک، میزان زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی خاک و میزان تراکم آن اشاره کرد. بر مبنای نتایج به دست آمده از این تحقیق و با مطالعه‌ی تحقیقات انجام شده توسط محققین پیشین، جدول ۲ برای برآورد پارامترهای رابطه‌ی تجربی مذکور ارائه می‌شود.

تجزیه‌ی میزان حساسیت فشار شکست هیدرولیکی به عوامل مختلف

با توجه به تغییرات پارامترهای خاک میزان حساسیت فشار شکست هیدرولیکی به عوامل مختلف، از جمله خصوصیات مکانیکی خاک و بارگذاری روی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا به اختصار نتایج حاصله ارائه می‌شود.

فشار همه‌جانبه: بر اساس نتایج حاصله از خاک‌های مورد مطالعه، فشار شکست هیدرولیکی با افزایش فشار همه‌جانبه‌ی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، برازش خطی نتایج حاکی از آن است که به خوبی می‌توان رابطه‌ی بین دو عامل مذکور را توسط یک خط جدول ۲. نحوه‌ی استخراج پارامترهای رابطه‌ی تجربی فشار شکست هیدرولیکی.

نوع خاک	n	m
خاک‌های مخلوط درشت دانه با دانه‌بندی خوب، حاوی ریزدانه‌ی رسی	$0/4$	$1/2$
خاک‌های شنی حاوی ریزدانه‌ی سیلتی و رسی	$0/25$	$1/15$
خاک‌های ماسه‌یی با دانه‌بندی خوب، حاوی رس و سیلت	$0/25$	$1/05$
خاک‌های ماسه‌یی با دانه‌بندی بد، حاوی رس و سیلت	$0/2$	$1/0$
خاک‌های ریزدانه با پلاستیسیته‌ی بالا (CH)	$0/4$	$1/0$
خاک‌های ریزدانه با پلاستیسیته‌ی پایین (CL)	$0/3$	$1/05$

در صورتی که تراکم به روش سبک (ASTM-D698) صورت پذیرد می‌توان مقدار m و n را به میزان $0/05$ کاهش داد. در صورتی که نمونه پس از اشباع شدن مورد آزمایش قرار گرفته باشد می‌توان مقدار n را به میزان $0/1$ تا $0/2$ کاهش داد.

هسته‌ی سدهای خاکی، با اصلاح سلول پیشرفته‌ی تحکیم خاک، سلول تحقیقاتی و نمونه‌گیر ویژه‌ی ابداع، و سیستم آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی راه‌اندازی شده است. خاک‌های مورد آزمایش از سه نوع مختلف (جدول ۲) بوده و از مصالح سدهای در دست اجرا تهیه شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده حاکی از آن است که یک رابطه‌ی خطی بین فشار شکست هیدرولیکی و فشار همه‌جانبه‌ی خاک برقرار است. بر همین مبنا، یک رابطه‌ی تجربی برای به‌دست آوردن فشار شکست هیدرولیکی خاک ارائه شد که پارامترهای آن را می‌توان از جدول ۲ به‌دست آورد. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که نمونه‌های اشباع شده نسبت به نمونه‌های اشباع نشده از فشار شکست کمتری برخوردارند. علاوه بر این، افزایش انرژی تراکم خاک موجب کاهش مقاومت کششی نمونه شده ولی غالباً فشار شکست هیدرولیکی را افزایش داده است.

بررسی شکل ترک‌های ایجاد شده در هر نمونه و همچنین مقایسه‌ی شکست به‌دست آمده در آزمایشگاه با مقادیر نظری فشار شکست هیدرولیکی در هر یک از مدل‌های گسیختگی فشاری و کششی نیز نشان می‌دهد که نمونه‌ها در مدل‌های مختلف کششی، برشی و ترکیب برش و کشش گسیخته شده‌اند. با این حال با افزایش سطح تنش همه‌جانبه گسیختگی از حالت کششی به برشی تبدیل شده که این مورد منطبق بر معیارهای کشسانی - خمیری رفتار خاک نظیر مدل حالت حد می‌باشد.

برای جلوگیری از وقوع شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی توصیه می‌شود حتی‌المقدور با ایجاد یک ناحیه‌ی وسیع انتقالی بین هسته و پوسته و با از بین بردن ناهمواری‌های پی از بروز مناطق کم‌تنش در هسته جلوگیری شود. به‌منظور پیش‌بینی وقوع شکست می‌توان از رابطه‌ی تجربی ارائه شده در این نوشتار استفاده کرد. با این حال توصیه می‌شود که فشار شکست به‌طور محافظه‌کارانه‌ی معادل تنش همه‌جانبه در نظر گرفته شود.

جدول ۳. تغییرات پارامترهای m و n با مقاومت کششی در نمونه‌های آزمایش شده.

خاک نوع اول (دانه‌ی با تراکم سبک)	خاک نوع اول (دانه‌ی با تراکم سنگین)	σ_t (Kg/cm ²)
۰/۱۸۶	۰/۱۳	n
۰/۲۱۵	۰/۲۵۲	m
۱/۱۳۷	۱/۱۶۴	

درجه‌ی تحکیم و میزان نفوذپذیری خاک اشاره کرد. همچنین اثر اندازه‌ی نمونه نیز شایان توجه می‌باشد.

مطالعات نشان می‌دهد که تغییرات قابل توجهی در فشار شکست هیدرولیکی با افزایش سرعت بارگذاری دیده نمی‌شود. [۱۷] مطالعات صورت گرفته در محدوده‌ی ۱ تا ۱۰ کیلو پاسکال در دقیقه انجام شده است. به نظر می‌رسد در این ارتباط لازم است تحقیقات مجزایی صورت پذیرد. مطالعات انجام شده حاکی است که خاک‌های تحکیم یافته مقاومت بیشتری در مقابل شکست هیدرولیکی نسبت به خاک‌های تحکیم نیافته دارند. [۱۸] همچنین نمونه‌های اشباع شده نسبت به نمونه‌های اشباع نشده مقاومت کمتری نشان می‌دهند. برپایه‌ی بررسی‌های انجام شده، فشار شکست هیدرولیکی با افزایش نفوذپذیری کاهش می‌یابد. این در حالی است که دیگر مطالعات خلاف این مطلب را نشان می‌دهد. [۱۲] همچنین برخی از مطالعات نشان می‌دهد که اندازه‌ی نمونه تأثیر چندانی در نتایج حاصله ندارد. و نیز نشان داده شده است که برای نسبت a/b ثابت، فشار هیدرولیکی با تغییر اندازه‌ی نمونه تغییری نمی‌کند ولی با افزایش a/b این فشار مقداری کاهش می‌یابد. [۱۹]

نتیجه‌گیری

به‌منظور مطالعه‌ی آزمایشگاهی پدیده‌ی شکست هیدرولیکی در

پانوش

1. developed consolidated cell
2. envelope
3. hydraulic crack
4. hydraulic fracture
5. silty clay

منابع

1. Nobari E.S., Lee K.L. and Duncan J.M., "Hydraulic fracturing in zoned earth and rockfill dams", *Contract Report TE-73-1*, U.S Army Engineers Waterways Experimental Station, Uickburg MS., (1973).
2. Jaworski, G.W., Duncan, J.M., and Seed, H.B., "Laboratory study of hydraulic fracturing", *Journal of The Geo. Eng. Div., ASCE*, pp. 713-732., (1981).
3. Yanagisawa, E., Komakpanah A., "Two dimensional study of hydraulic fracturing criteria in cohesive soils", *Soil and Foundations*, 34. (1), (1994).
4. Mordoch, L.C., "Hydraulic fracturing of soil during laboratory

- experiments", *Getechnique*, (43), (1993).
۵. افلاکی، اسماعیل و قنبری، علی. ساخت دستگاه پیشرفته تحکیم خاک، پروژه‌ی مستقل پژوهشی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۰).
۶. قنبری، علی. "زمان محتمل برای وقوع شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی"، نشست پنجم، مقاله‌ی شماره‌ی ۷۷، چهارمین کنفرانس سدسازی کشور، (۱۳۷۹).
7. Medeiros, C.H. de A.C., "Hydraulic fracturing of soil during Laboratory experiments", *Getechnique*, (43), (1994).
8. Lo, K. Y., Kaniaru, K., "Hydraulic fracture in earth and rockfill dams", *Canadian geotechnique, Jnl.*, (27), pp. 496-506, (1990).
9. Mhatch, H.K., **An experimental study of hydraulic fracture and erosion**, *Ph.D. Thesis, City University, London*. (1991).
10. Fukushima, S., "Hydraulic fracturing critrion in the core of fill dams", *Report of Fujita Kogyo Technical Institute*, (22), pp. 131-136, (1986).
11. Sherard, J.L., "Hydraulic fracturing in embankment dam", *Jnl. of Goet. Eng. Div., ASCE*, **112**. (10), pp. 905-927 (1986).
12. Hassani, A.W., Singh, B. and Saini, S.S. "Experimental investigation of hydraulic fracturing", *Indian Journal of Power and River Valley Development*, **33**, (516), PP. 181- 187, (1983).