

مشکلات ناشی از درصد نشانه خمیری کم هسته سدهای خاکی بررسی موردی: سد دوستی استان خراسان رضوی

احمدرضا مظاهری*؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

علی نورزاد؛ دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

محمدرضا امام؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

پذیرش ۹۲/۴/۱۸

تاریخ: دریافت ۹۱/۴/۷

چکیده

در احداث هسته سدهای خاکی، به خاکی با خاصیت خمیری نسبتاً زیاد و ضریب نفوذپذیری کم نیاز است که این خاک معمولاً از منابع قرضه نزدیک سد تأمین می‌شود. ولی در بعضی مناطق خاک رس با چنین خصوصیتی برای ایجاد هسته در دسترس نیست. هسته سد خاکی دوستی واقع در استان خراسان رضوی از مصالح رسی سیلتی با خاصیت خمیری اندک است و از این قاعده مستثنا نیست. در این مقاله ابتدا نحوه بررسی پتانسیل ترک خوردگی سدهای خاکی با هسته دارای پلاستیسیته کم با تکیه بر اصول مکانیک خاک حالت بحرانی بیان می‌شود و سپس پایداری داخلی سد دوستی با استفاده از این روش بررسی شده است و مناطقی که مستعد ترک خوردگی هستند بر مبنای معیارهای مربوط شناسایی شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که بر اساس این روش، دو ناحیه در بالای هسته سد پتانسیل ترک خوردگی‌اند.

واژه‌های کلیدی: ترک خوردگی سد، هسته سد با درصد نشانه خمیری کم، سد دوستی، حالت بحرانی، FLAC

* نویسنده مسئول mazaheri.ahmadreza@gmail.com

مقدمه

پیدایش ترک در سطح سدهای خاکی ممکن است به علت نامتعادل بودن نشست‌ها، جابه‌جایی‌های افقی ناشی از انقباض و انبساط، تفاوت بین مدول‌های تغییر شکل بخش‌های مختلف سد، تفاوت تغییر شکل‌پذیری خاک و بخش‌های صلب مجاور سد، نفوذ آب و شستشوی دانه‌های ریز و عوامل دیگر باشد. در هر حال هنگامی که کرنش کششی یا کرنش برشی در ناحیه‌ای از سد از حد مشخصی فزونی یابد، ترک‌هایی در سد ظاهر می‌شود. این ترک‌ها در صورتی که عمیق باشند و ترمیم نشوند ممکن است منجر به ریزش بخشی از سد گردند.

در ترک خوردگی سدها علاوه بر تأثیر نیروها، نوع، رطوبت و دانسیته خاک متراکم شده و حتی کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک می‌توانند نقش به‌سزایی داشته باشد. به هر حال خاک‌های خشک و با پلاستیسیته کم‌تر احتمال ترک‌خوردگی بیش‌تری دارند. از آن‌جا که مقاومت کششی خاک ناچیز است، حتی کرنش‌های کششی کم می‌تواند موجب ترک‌خوردگی خاک شود. آزمایش‌های متعدد پژوهش‌گران نشان می‌دهد که این کرنش کششی در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۴۸ درصد است و در خاک‌ها و شرایط مختلف، متفاوت است [۹]. برای اندازه‌گیری و مشاهده بررسی وضعیت ترک‌خوردگی سدها، پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. اسکوفید^۱ (۲۰۰۰) نشان داد که با استفاده از اصول مکانیک خاک حالت بحرانی می‌توان امکان به‌وجود آمدن ترک در خاک‌های ریزدانه با پلاستیسیته کم را بررسی کرد. وی با بررسی مناطقی که در آن‌ها نسبت تنش برشی به تنش متوسط نرمال باعث به‌وجود آمدن کشش در خاک می‌شود و همچنین با جای‌گزین کردن نشانه خمیری به‌جای حجم ویژه در نمودار تنش موثر همه‌جانبه-حجم ویژه شرایطی را که در خاک ریزدانه می‌تواند ترک ایجاد کند را مشخص کرد. ماناهن^۲ و اسکوفید (۲۰۰۰) از این روش برای بررسی پتانسیل ترک‌خوردگی در سد تتون^۳ که در اثر ناپایداری داخلی هسته دارای پلاستیسیته کم آن تخریب شد استفاده کردند و نشان دادند که بر اساس این روش، در محل‌هایی که شروع تخریب از آن نقاط است، پتانسیل ایجاد ترک وجود داشته است. برای به‌کاربردن این روش می‌توان با استفاده از مدل‌سازی به‌روش اجزای محدود

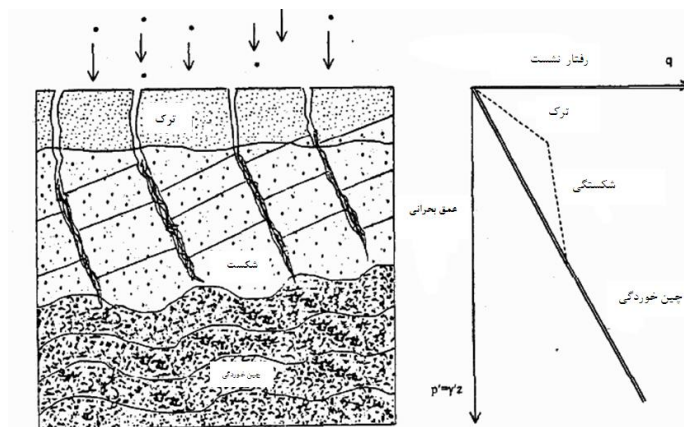
۱. Schofield ۲. Munahan ۳. Teton

رفتار تنش-کرنش سد، نقاط مربوط به کشش را در سدهای خاکی تعیین و راه‌هایی برای ترمیم آن‌ها پیش‌بینی کرد [۱].

کاربرد مکانیک خاک حالت بحرانی برای بررسی پتانسیل ترک خوردگی

مرزهای حالت حدی برای توده‌های رسوبی

بر اساس نظر اسکوفید (۲۰۰۰) مجموعه ذراتی که خاک طبیعی یا ساخته شده به دست انسان را تشکیل می‌دهند سه گروه رفتاری مجزا و جداگانه را نشان می‌دهند (شکل ۱). در عمق‌های زیاد فشار بالا، باعث تسلیم‌شدگی شکل‌پذیر توده خاک می‌شود و لایه رسوبی را وادار به چین‌خوردن می‌کند. در بالای این اعماق و در فشارهای کم‌تر مجموعه ذرات خاک شکسته می‌شود و لایه‌ها در امتداد صفحات لغزش گسیخته می‌شوند. در نزدیکی سطح جایی که فشار به مراتب کم‌تر از این اعماق است لایه‌ها شکاف بر می‌دارند و ترک‌های بزرگی در خاک ایجاد می‌شود. در مکانیک خاک حالت بحرانی، خاک توده‌ای از ذرات اصطکاکی با قفل و بست داخلی است و نوع رفتار خاک وابسته به چگالی و تنش مؤثر آن است [۱].



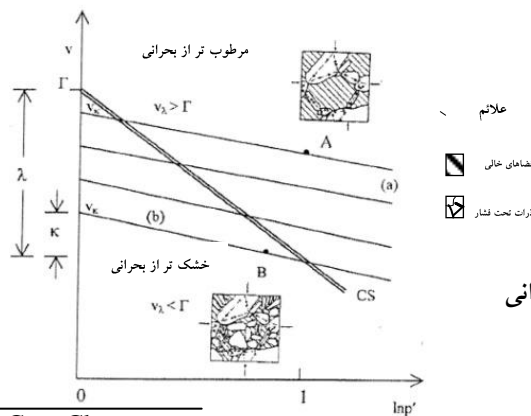
شکل ۱. چین‌ها، گسل‌ها و شکاف‌ها در توده‌های رسوبی (اسکوفید، ۲۰۰۰)

ارتباط پتانسیل ترک‌خوردگی با رفتار خاک در فضای $v - Lnp'$

در محیط خاک حالت بحرانی تراکم و تورم الاستیک به‌طور معمول از معادله (۱) پیروی می‌کند.

$$v_k = v + kLnp' = constant \quad (1)$$

که v_k محل برخورد هر خط دل‌خواهی با محور v در نمودار $v-Lnp'$ است؛ برای مثال در شکل ۲ مقدار v_k فشار p' و حجم ویژه v برای تعریف رفتار توده ذرات تحت شرایط متناظر با خطی که از نقطه A می‌گذرد، به‌کار می‌رود. مشخصه‌های تراکم و تورم کشسان یک توده، شیب این خط را تعریف می‌کند و مقدار v_k به چگالی توده وابسته است. برای خاک ایده‌آل مانند آن چه در مدل کم-کلی^۱ تعریف می‌شود، در حالت رفتار الاستیک هیچ لغزشی بین ذرات توده خاک روی نمی‌دهد. تغییر شکل‌های خمیری زمانی رخ می‌دهد که لغزش بین ذرات نقاط تماس دانه‌ها را کم کند هر زمان تغییر شکل خمیری در توده به‌وجود بیاید، ساختمان جدیدی از ذرات تشکیل می‌شود (موقعیت ذرات نسبت به هم تغییر می‌کند) و خط تراکم و تورمی با همان شیب ولی با v_k ای متفاوت به‌وجود می‌آید. این جابه‌جایی بین خطوط تغییر حجمی خمیری از وضعیتی به وضعیت جدید را نشان می‌دهد. دو نمونه از توده ذرات را در نظر بگیرید که تنش مؤثر عمودی میانگین یکسان دارند. فرض کنید که یکی روی خط (A) و دیگری روی خط (B) قرار داشته باشد و این دو خط شبکه‌ای یکسان از ذرات درشت‌دانه تحت فشار اما متفاوت در مقدار ذرات ریزدانه با تنش کم دارند (شکل ۲).



شکل ۲. رفتار توده خاک و حالت بحرانی (اسکوفید-۲۰۰۰)

۱. Cam-Clay

اگر خط (A) مقدار v_k بیش تری از خط (B) داشته باشد، نمونه (A) ذرات ریزدانه با تنش کم، کم تری نسبت به نمونه (B) دارد. اگر اجتماع ذراتی که به وسیله (A) و (B) نشان داده می شوند تحت تنش برشی قرار بگیرند و اجازه زه کشی به نمونه ها داده شود، انتظار می رود که ذرات پر فشار بلغزند و تغییر حجمی خمیری ایجاد کنند و در نتیجه ذرات شبکه پر فشار دیگری را تشکیل می دهند.

واکنش حجمی خمیری دو نمونه که تنش مؤثر میانگین یکسان دارند. بسته به ماهیت قرارگیری ذرات ریزدانه با تنش کم آن ها، متفاوت خواهد بود. نمونه (A) با ذرات ریزدانه با تنش کم، کم تری که روی خط (A) قرار دارد و نمونه ای سست است، در هنگام تغییر شکل برشی با کاهش v_k متراکم خواهد شد. اما نمونه متراکم روی خط (B) با افزایش v متسع خواهد شد. بین این دو حد یک چگالی ویژه وجود دارد که در آن چگالی هنگام تغییر شکل برشی ناشی از بارگذاری متوالی که به وسیله شبکه های ذرات تحت تنش در حال تحمل است، ساختارهای جدیدی از ذرات در همان چگالی توده به طور متوالی تشکیل و تخریب می شوند. در این افزایش کرنش برشی یک نسبت قطعی از ذرات که یک زمانی اسکلت حمل بار توده را تشکیل می دادند، اکنون به عنوان ذرات منفرد تبدیل به ذرات نسبتاً کم تنش یا بدون تنش شده اند و نقش ذرات پرکننده حفره ها را بازی می کنند. نظریه حالت بحرانی این است که نسبت منافذ بحرانی وجود دارد که در آن جریان دائمی در تنش مؤثر عمودی میانگین ثابت p' بدون آسیب به ذرات و فقط با تغییر در موقعیت آن ها محتمل است.

حالت های حدی در فضای تنش های $q-p'$

در چارچوب خاک حالت بحرانی نمایش وضعیت صفحات مرزی تعدیل شده در فضاهای q/p_{crit} ، p/p_{crit} نشان داده شده است (شکل ۳).

مکانیک خاک حالت بحرانی رفتار خاک در وضعیت های حدی را به سه گروه گسیختگی مجزا تقسیم می کند. خط حدی OA و OG که وضعیت خاک هنگام تشکیل ترک های باز یا شکاف ها را نشان می دهد (کشش). خطوط GE و AB ترک های ورسلف روی صفحات گسل

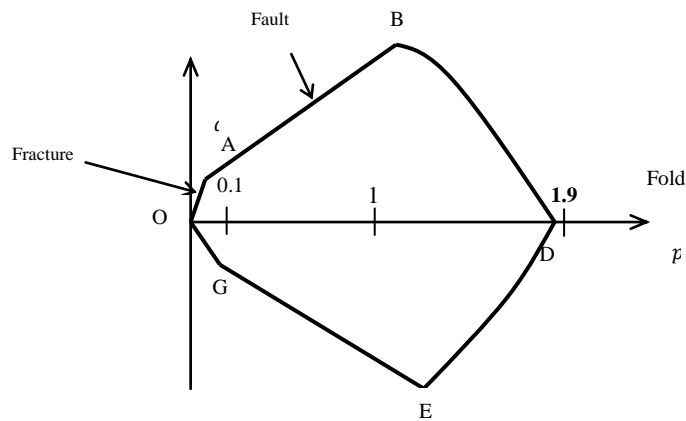
را نشان می‌دهند و خطوط BD و ED نیز تسلیم‌شدگی با معیار کم-کلی و چین‌خوردگی لایه‌های رسوبی را نشان می‌دهند.

وضعیت‌های مختلف خاک روی سطوح ترک موجب ایجاد شکاف‌ها و ترک‌های باز ناپایدار می‌شود. رس‌های به‌شدت پیش تحکیم یافته و ماسه‌های به‌شدت متراکم شده در تنش‌های محصورکننده کم می‌توانند به این وضعیت‌های حدی برسند.

برای نمونه‌ای سه‌محوری معیار عدم کشش با $\sigma'_3=0$ به صورت $p'=\sigma'_1/3$ یا $q/p'=3$ است و به‌وجود آمدن کشش منجر به ترک‌های عمودی که شاخص آن خط OA است می‌شود. برای به‌وجود آمدن ترک‌های افقی معیار $\sigma'_1=0$ به صورت $p'=2/3\sigma'_3$ یا $q'=3\sigma'_3$ یا $q/p'=1/5$ در می‌آید که شاخص آن خط OG است. برای رس‌ها و رس‌های لای‌دار، اسکوفیلد (۱۹۸۰) پیشنهاد کرده است که تغییر از حالت گسیختگی به ترک‌های کششی در فشار $p'_c=0.1p'_c$ اتفاق می‌افتد که در آن تنش محصورکننده در حالت بحرانی است. این معادل نسبت بیش تحکیمی در حدود ۲۰ است. هنگامی که مسیر تنش مؤثر سطح ترک خوردگی OA ، را قطع می‌کند المان خاک شروع به فروپاشی می‌کند و به‌صورت توده‌ای از دانه‌ها که تحت تنش نیستند، از توده خاک جدا می‌شوند. در چنین موردی حجم ویژه میانگین توده جدا شونده می‌تواند افزایش پیدا کند (در اثر ترک‌ها و حفره‌های بزرگ) و به تبع آن نفوذپذیری توده نیز به‌شدت و به‌سرعت افزایش پیدا خواهد کرد.

تنش‌های برشی بزرگ داخلی و خارجی در تنش محصورکننده کم می‌توانند باعث عبور وضعیت خاک از سطح شکست OA و افزایش چشم‌گیری در حجم ویژه شوند. هنگامی که چنین وضعیتی به‌وقوع بپیوندد حفرات در توده خاک می‌توانند تبدیل به لوله یا کانالی موضعی شوند. اگر چنین حفره‌هایی (کانال یا ترک) در معرض آب قرار بگیرند می‌تواند منجر به ایجاد جریان آزادانه آب از درون توده خاک به سمت شیب پایین‌دست (در سدها) شوند.

۱. Clastic Body



شکل ۳. محدوده حالت‌های پایدار در فضای تنش‌های تعدیل شده (اسکوفید-۲۰۰۰)

بررسی پتانسیل ترک خوردگی در سدهای خاکی

بررسی موردی: سد دوستی

گستره طرح از دیدگاه زمین‌شناسی در منتهی‌الیه شرقی زون زمین‌ساختی هزارمسجد-کپه‌داغ واقع شده است. شرق کپه‌داغ کم عمق‌ترین منطقه حوضه رسوبی هزارمسجد-کپه‌داغ است به طوری که کهن‌سال‌ترین واحدهای سنگی این زون که متعلق به دوران اول زمین‌شناسی است در این منطقه رخنمون دارند و رسوبات دوم و سوم نیز با ضخامت نسبتاً کمی در این بخش تشکیل شده‌اند.

سد دوستی که از نوع خاکی سنگ‌ریزه‌ای با هسته سیلتی است و در موقعیت عرض جغرافیایی $35^{\circ} 75'$ شمالی و طول جغرافیایی $61^{\circ} 9'$ شرقی در مرز مشترک ایران و ترکمنستان واقع شده است. این سد با ارتفاع ۷۹ متر از پی با طول تاج ۶۵۵ متر و عرض ۴۱۸ متر در پی و ۱۵ متر در تاج به منظور تأمین آب شرب مشهد و آب کشاورزی دشت سرخس ساخته شده است. بخش نفوذناپذیر بدنه سد دوستی شامل هسته‌ای رسی سیلتی با نفوذپذیری متوسط 75×10^{-7} سانتی‌متر بر ثانیه است که بر روی سنگ کف سالم قرار گرفته است [۱۱]. مصالح هسته سیلتی در تماس با پی و گالری و تکیه‌گاه‌ها باید ضریب خمیری حداقل ۱۵ داشته باشد، اما با توجه به مشخصات خاک منابع قرضه این میزان دامنه خمیری خاک در حالت طبیعی در

دسترس نیست. برای دستیابی به این شاخص خمیری ($PI=15$) خاک‌های در تماس با پی سد با مقدار مشخصی بتونیت مخلوط شده است.

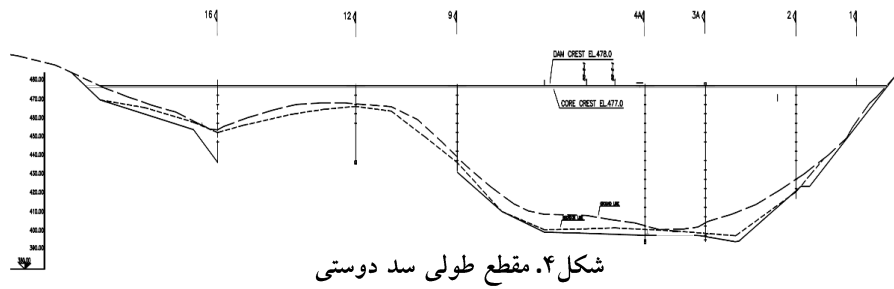
مبنای اولیه طراحی سدهای خاکی، کنترل نشست و تأمین پایداری شیروانی‌های آن است. پیشرفت علم و تجربه در زمینه طراحی و اجرای سدهای خاکی نشان داده است که تغییر شکل‌های ایجاد شده در بدنه و پی سد، حائز اهمیت است و طراحی باید به گونه‌ای باشد که ترجیحاً در سد، ترک ایجاد نشود و در صورت وقوع ترک، باید کنترل شود [۱۲].

عموماً تحلیل سدهای خاکی در دو مرحله صورت می‌گیرد: مرحله نخست، تحلیل‌های حین ساخت تا پایان ساخت و مرحله دوم تحلیل‌های زمان آب‌گیری اولیه و طول دوره بهره‌برداری ساختمان است. یک سد خاکی شامل ریختن و کوبیدن لایه‌های مختلف خاکریز (معمولاً به ضخامت ۰/۲ تا ۱ متر) است. تحلیل‌های انجام شده بر اساس ساخت یک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای برای سد همگن بر روی پی صلب نشان داده است که بین تنش‌های حاصل از دو روش اختلاف چندانی نیست ولی اختلاف در مورد تغییر شکل‌ها بسیار چشم‌گیر است.

مدل سازی سد دوستی با نرم افزار FLAC

برای بررسی وضعیت تنش‌ها در هسته سد دوستی مقطعی طولی از این سد برای تحلیل دو بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC انتخاب شد. برای تعیین شبکه المان‌ها، شبکه‌ای با ۳۳۱ المان در امتداد محور طول‌ها (X) و ۷۹ المان در امتداد محور عرض‌ها (Y) با استفاده از دستور $GRID^1$ تعریف شد.

این تعداد المان با توجه به طول تاج ۶۶۵ متر و ارتفاع ۷۹ متر انتخاب شد و بنا بر این مدل سد دوستی در مرحله ساخت و قبل از آب‌گیری انجام گرفته است به همین علت سطح آب در مدل‌سازی لحاظ نشده است. مقطع شکل ۴ در FLAC طی ۱۳ مرحله (هر ۶ متر در یک مرحله اجرا شده است) مدل‌سازی شده است و شرایط مرزی آن وارد و تحلیل شده است.



شکل ۴. مقطع طولی سد دوستی

تعیین پارامترهای مدل

مدل انتخابی برای تحلیل سد دوستی در نرم‌افزار **FLAC** مدل کم-کلی است که برای استفاده از این مدل باید پارامترهای آن محاسبه شوند. برای تعیین پارامترهای مدل از نتایج آزمایش تحکیم و برش استفاده شده است.

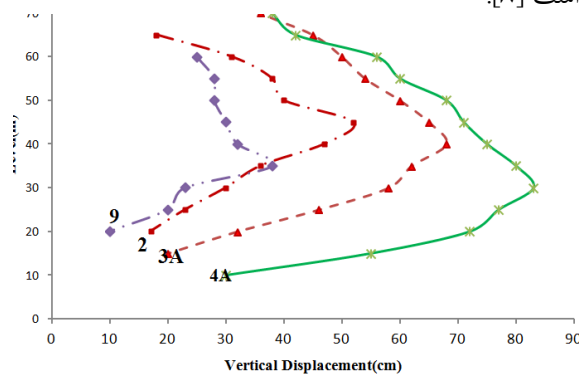
برای تعیین پارامترهای مدل نتایج آزمایش‌های تحکیم بر روی مصالح ریزدانه سد که در تعداد شش گزارش آمده است استفاده شده است (مهندسین مشاور طوس آب-۱۳۷۸). در انتخاب پارامترهای تحلیل میانگین نتایج آزمایش‌ها استفاده شده است. مقادیر پارامترهای مدل کم-کلی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. پارامترهای مدل کم-کلی برای تحلیل سد دوستی

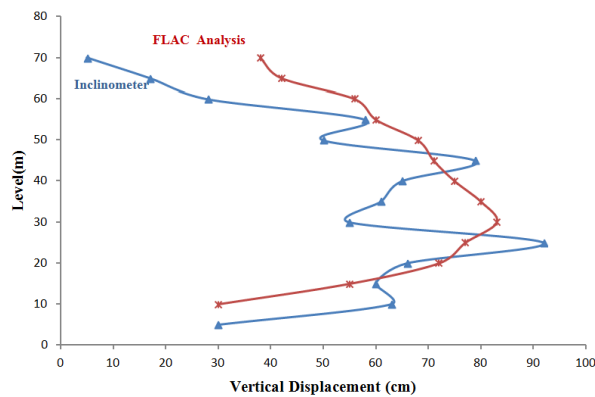
مقدار	پارامترهای حالت بحرانی
۰/۰۰۴	k
۰/۰۲۸	λ
۱/۳۵۲	v
۱/۵۴۱	N
2×10^9	Bulk (Pa)
$1/6 \times 10^6$	P_c (Pa)

نتایج تحلیل برای مقاطع مختلف سد

از مدل‌سازی سد و تحلیل آن بر اساس پارامترهای مدل کم-کلی مقادیر نشست پس از پایان هر مرحله خاک‌ریزی برای ۶ مقطع اصلی سد (مقاطع ۱۲-۹-۴A-۳A-۲) به دست آمد که این نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است. برای برای صحت نتایج حاصل از تحلیل مقادیر نشست در بزرگ‌ترین مقطع سد (مقطع ۴A) که نشست بیشینه‌ای به میزان ۸۵ سانتی‌متر در تراز ۴۰ متری از پی دارد) با نتایج ثبت شده ابزار دقیق نصب شده در آن مقطع مقایسه شده است (شکل ۶). چنان‌که در این شکل مشخص است نتایج نسبتاً هم‌خوانی دارند. لازم به ذکر است تغییرات ناگهانی که در نتایج ثبت شده ابزار دقیق مشاهده می‌شود ناشی از توقف چند ماهه مراحل خاک‌ریزی است [۸].



شکل ۵. مقایسه نتایج نشست‌ها برای مقاطع مختلف سد دوستی [۸]

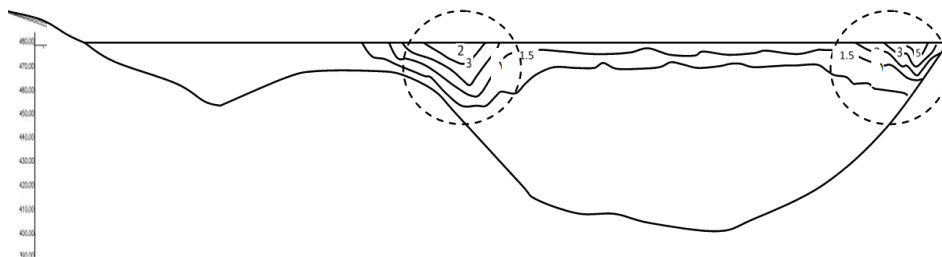


شکل ۶. مقایسه نتایج نشست حاصل از تحلیل با نتایج ابزار دقیق در مقطع ۴A

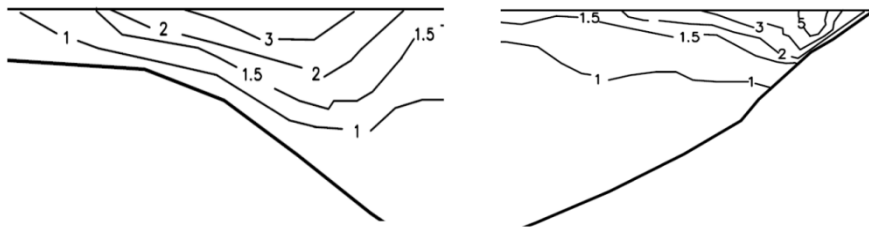
بررسی نتایج نسبت تنش‌ها و احتمال ترک خوردگی

بر اساس نظریه ذکر شده در قبل، نواحی دارای نسبت تنش‌های (q/p') بزرگ‌تر از ۳ وجود ترک‌ها یا شکاف‌هایی عمودی را نشان خواهند داد. چنین نواحی‌ای برای هسته سد دوستی از منحنی‌های q/p' که در شکل ۶ نشان داده شده، قابل مشاهده است. این نتایج نشان می‌دهند که در پایان مرحله ساخت، هسته سد پتانسیل تشکیل چنین ترک‌هایی را در دو ناحیه یکی در ایستگاه ۲۹۶ متری در تکیه‌گاه چپ و دیگری در ایستگاه ۶۴۰ متری در تکیه‌گاه راست سد داشته است. پتانسیل تشکیل ترک در ایستگاه ۲۹۶ متری تا عمق ۷ متر وجود دارد در حالی که در ایستگاه ۶۴۰ متری این پتانسیل تا عمق ۱۰ متر از تاج سد موجود است (شکل ۷). با توجه به این که براساس تئوری ذکر شده در نواحی دارای q/p' بزرگ‌تر از ۳ احتمال ایجاد ترک وجود دارد و اگر این ترک‌ها در داخل هسته ایجاد شوند حرکت آب از میان این ترک‌ها به آرامی موجب فرسایش این ترک‌ها و تبدیل آن‌ها به شکافی بزرگ می‌شود که پایداری سد را به مخاطره می‌اندازد.

هم‌چنین به علت نشانه خمیری پایین مصالح هسته سد دوستی شاخص روانی این مصالح به میزان رطوبت خاک بسیار حساس است و این امر اثر چشم‌گیری بر عمل‌کرد خاک هسته تحت تغییر سریع تنش‌های برشی و تنش‌های محصورکننده به‌ویژه در تکیه‌گاه‌ها، می‌گذارد. در تکیه‌گاه‌های دارای شیب تند، ارتفاع ستون خاک کاهش پیدا می‌کند و متعاقباً آلمان‌های خاک تنش محصورکننده کم‌تری را تحمل می‌کنند. در حقیقت ستون‌های خاک در تکیه‌گاه‌ها در الگوی رفتاری ورسلف بوده‌اند در حالی که ستون‌های خاک مقطع عرضی سد در میانه دره، در نزدیکی یا درون الگوی رفتاری شکل‌پذیر (کم - کلی) بوده‌اند.



شکل ۷. منحنی نسبت تنش‌های (q/p') روی مقطع طولی سد دوستی



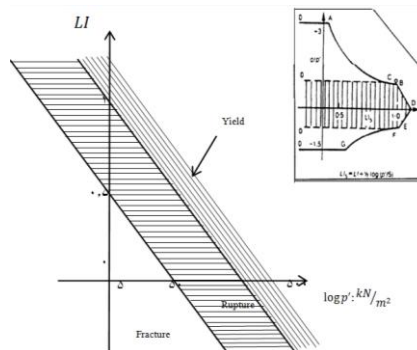
شکل ۸. بزرگ‌نمایی نسبت تنش‌های q/p' در سمت راست مقطع طولی سد دوستی

شکستگی و گسیختگی بر مبنای شاخص روانی معادل

اسکوفید (۱۹۸۰) نشان داد که می‌توان محورهای چگالی یا حجم ویژه استفاده شده در فرمولاسیون مکانیک خاک حالت بحرانی را با متغیر شاخص روانی (LI) جای‌گزین کرد. شاخص روانی برای یک خاک با استفاده از این رابطه تعریف می‌شود [۴].

$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL} \quad (2)$$

در فضای $LI-p'$ مرزهای کاملاً متمایزی وجود دارند که نواحی شکستگی، گسیختگی و رفتار شکل‌پذیر را مشخص می‌کنند. این روندی مستقل و مناسب برای تفکیک حالت‌های رفتاری گسیختگی/شکستگی/تسلیم شکل‌پذیر با استفاده از مشخصه‌های فیزیکی خاک است. با توجه به شکل ۱۰ مشخص است توده‌ی خاکی که دارای $LI = 0.5$ باشد و تحت تنش فشاری الاستیک قرار گرفته باشد، در عمق‌های کم، جایی که $p' < 50 \text{ kpa}$ ممکن است ترک‌دار باشد. اما در عمق‌هایی که $50 \text{ kpa} < p' < 500 \text{ kpa}$ است، خاک تا زمان تغییر شکل آب‌بند باقی خواهد ماند [۴].



شکل ۱۰. نمودار $LI-Log p'$ (اسکوفید-۱۹۸۰)

اما در مقابل توده خاکی که دارای $LI=0$ است ترک‌هایی را در عمق‌هایی که در آن‌ها $p' < 50 kpa$ یا سربار در حدود ۳ متر است تجربه خواهد کرد. به عبارت دیگر عمق سربار برای اطمینان از ایجاد صفحات گسیختگی (شرایط آب‌بند) به جای ایجاد ترک‌های باز باید از ۳ متر بیش‌تر است. اگر $LI = -0.25$ باشد سربار باید فشاری در حدود $100 kPa$ ایجاد کند و یا عمقی در حدود ۶ متر داشته باشد. هم‌چنین حد روانی پیشنهادی اسکوفیلد (۱۹۸۰) بدین صورت ارائه شد [۴]:

$$LI_5 = LI + \frac{1}{2} \log \left(\frac{p'}{5} \right) \quad (3)$$

بنا بر این روانی معادل برابر رطوبت در جای خاک به علاوه اصلاحی برای تنش‌ها است. مقدار LI_5 کم‌تر از ۰/۵ عموماً نواحی گسیخته شده را نمایش می‌دهد. مقادیر ۰/۵ تا ۱/۰ نواحی شکستگی و مقادیر بزرگ‌تر از ۱/۰ نواحی شکل پذیر کم-کلی را نشان می‌دهند. بر اساس گزارش‌های ارائه شده شرکت مشاور، خاک‌ریزی سد دوستی در اردیبهشت ۱۳۸۲ آغاز شده و تا آذر ماه ۱۳۸۳ ادامه داشته است. طی این مدت برای هر لایه خاک‌ریزی آزمایش‌های تعیین درصد رطوبت و تراکم انجام گرفته است که میانگین آن‌ها در جدول ۲ آمده است

چنان‌که در جدول ۲ مشاهده می‌شود نمونه ۱ در اوایل خاک‌ریزی سد (اردیبهشت ۸۲) و نمونه ۳ در اواخر خاک‌ریزی (مرداد ۸۳) تهیه شده است.

با توجه به درصدهای رطوبت ارائه شده، LI برای نمونه‌های بازه‌های زمانی مختلف با استفاده از فرمول (۳) محاسبه و در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر به دست آمده برای شاخص روانی در سه نقطه نمونه‌گیری

تاریخ نمونه گیری	رطوبت تراکم (%)	رطوبت ایتمم (%)	LL (%)	PL (%)	LI (%)
اردیبهشت/۱۳۸۲	۱۴	۱۵/۵	۲۶	۱۶	-۰/۲
شهریور/۱۳۸۲	۱۳/۵	۱۴/۵	۲۴	۱۷	-۰/۵
مرداد/۱۳۸۳	۱۴	۱۳/۵	۲۳	۱۷	-۰/۵۸

با توجه به شکل ۹ مشخص است که خاک‌های با نشانه روانی $0/2 -$ باید $p' > 80 kpa$ (در حدود ۴ متر سربار) و خاک‌های با نشانه روانی $0/5 -$ باید فشار $p' > 300 kpa$ (در حدود ۱۵ متر سربار) و خاک‌های با نشانه روانی $0/58 -$ باید فشار $p' > 400 kpa$ را تحمل کنند که مانع از ایجاد ترک در درون هسته شوند.

با توجه به زمان‌های خاک‌ریزی، نمونه‌های ۱ و ۲ از نظر فشار سربار لازم برای جلوگیری از ایجاد ترک با مشکلی مواجه نیستند ولی در نمونه ۳ که مربوط به دوران پایانی خاک‌ریزی است برای جلوگیری از ایجاد ترک باید سرباری در حدود ۲۰ متر بر آن وارد شود که این امر امکان پذیر نیست.

نتیجه‌گیری

با مدل‌سازی عددی سد و بررسی نسبت (q/p') بر اساس مکانیک خاک حالت بحرانی مشخص شد که در دو ناحیه نسبت از سه (q/p') تجاوز می‌کند. یکی در ایستگاه ۲۹۶ متری در تکیه‌گاه چپ و دیگری ایستگاه ۶۴۰ متری در تکیه‌گاه راست سد. در ایستگاه ۲۹۶ متری این مناطق دارای عمق ۷ متر است در حالی که در ایستگاه ۶۴۰ متری دارای عمق ۱۰ متر از تاج سد هستند.

مشخصات فنی طراحی سد دوستی نشان می‌دهد که مقدار رطوبت تراکم خاک هسته ۲٪ یا ۱٪ کم‌تر از رطوبت اپتیمم است که در این صورت هسته سد شاخص خمیری کمی خواهد داشت. براساس تحلیل انجام شده، میزان رطوبت خاک، شاخص روانی در حدود صفر یا منفی را نشان می‌دهد که اجازه می‌دهد تا عمق چشم‌گیری از هسته در معرض ترک‌خوردگی قرار گیرد. بدون آسیب جدی به چگالی خاک متراکم شده، ۱ یا ۲ درصد رطوبت بیش‌تر برای این مصالح می‌توانست روانی معادل کافی، حداقل در ۰/۵ را برای غالب مصالح خاک‌ریز تأمین کند. این عمل تمام مصالح خاک‌ریز به جز ۲ تا ۳ متر فوقانی (ناحیه ارتفاع آزاد) آن را در الگوی رفتاری ورسلف که مقاوم‌تر و ناتراواتر است، نگه می‌داشت.

نتایج نشست حاصل از تحلیل مقطع طولی بیشینه نشست را در مقطع A4 (که بزرگ‌ترین مقطع سد است) و در تراز ۴۰ متری از پی سد برابر ۸۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد که در حدود یک درصد ارتفاع سد است. که در حد قابل انتظار است.

منابع

1. Muhunthan B., Schofield, "Liquifaction and Dam Failures", GeoDenver, Denver, Colorado (2000).
2. Schofield A. N., Wroth P., "Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill" (1968).
3. "International Water Power and Dam Construction", Failure report-the Case of Teton dam (2006).
4. Schofield A. N., "Cambridge geotechnical centrifuge operations", 20th Rankine Lecture, Geotechnique (1980) 227-268.
5. "Interior Review Group (IRG), Failure of Teton Dam-Final Report", USBR, Engineering and Research Center, Denver (1980).
6. Seed H. B., Leps T. M., Duncan J. M., Bieber R. E. "Hydraulic Fracturing and Its Possible Role in Teton Dam Failure", Appendix D of Report to U.S. Department of Interior and State of Idaho on Failure of Teton Dam by Independent Panel to Review Cause of Teton Dam Failure (1976) D1-D39.
7. "Independent Panel (IP)", Report to U.S. Department of Interior and State of Idaho on Failure of Teton Dam., U.S Government Printing Office, Washington, D. C.

8. Imam R., Mazaheri A, R., Noorzad A., "Examination of cracking potential in the low-plasticity core of an earth dam", 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Toronto, Canada (2011).
۹. شمسایی الف.، طراحی و ساخت سدهای مخزنی، جلد دوم، سدهای خاکی و سنگریزه‌های. دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۳).
۱۰. علیزاده م.، بررسی امکان پدیده ترک‌خوردگی در سدهای خاکی غیرهمگن با هسته رسی با نشانه خمیری پایین، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۶).
۱۱. مطالعات مرحله دوم سد مخزنی دوستی، گزارش فنی بدنه سد، کتاب اول، جلد پنجم، گزارش شماره ۱۲۲۷-۲۳۲۰۹۳، شرکت آب منطقه‌ای خراسان، شرکت مهندسی مشاور طوس آب، اسفند (۱۳۷۸)
۱۲. عملیات خاک‌ریزی بدنه سد، گروه مستندسازی فنی، گزارش شماره ۳۶۶۹-۴۳۰۴۱۲، شرکت آب منطقه‌ای خراسان، شرکت مهندسی مشاور طوس آب، زمستان (۱۳۸۳).