

تحلیل استاتیکی سدهای سنگریز با رویه ی بتنی بر اساس

رفتار کشسانی - خمیری مصالح

سید محسن حائری (دانشیار)

مجتبی اصفهانی (کارشناس ارشد)

دانشکده ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

در نوشتار حاضر، مجموعه ی تحقیقات انجام شده در مورد رفتار سدهای سنگریز با رویه ی بتنی^۱ (سدهای CFR) تحت اثر وزن و فشار ناشی از آبگیری مخزن ارائه می شود. به منظور ارزیابی رفتاری این سدها، ابتدا مطالعات گذشته ی آنها بررسی می شود و سپس، مقدمات مورد نیاز برای انجام تحلیل، شامل بررسی مدل رفتاری مناسب برای مصالح و جزئیات تدوین و کنترل عملکرد برنامه ی رایانه یی مطرح می شود. در ادامه با مدل سازی مسئله ی مورد بحث جزئیات نتایج به دست آمده از تحلیل ارائه شده و جمع بندی نهایی صورت می گیرد. از مهم ترین نتایج این بررسی می توان به پیش بینی نحوه ی توزیع تغییر شکل های خمیری در بدنه ی سد و نیز مشاهده ی اثر تغییرات تراز آب مخزن، به ویژه روی رفتار دال بتنی^۲ رویه، اشاره کرد.

مقدمه

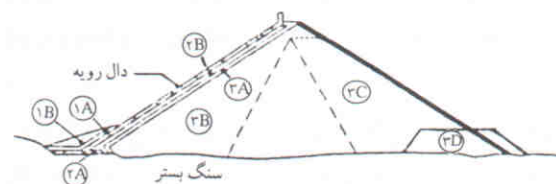
معرفی سدهای سنگریز با رویه ی بتنی

تا ۵/۰ متر و از نوع مسلح است. تسلیح دال برای مقابله با تنش های حرارتی و افت صورت می گیرد. برای جلوگیری از لغزش دال رویه قبل از آبیگری مخزن، در پای دال و روی سنگ بستر، دال بتنی با ضخامت حدود ۵/۰ متر اجرا می شود. این دال نیز مسلح بوده و توسط میل مهار در سنگ بستر محکم می شود.

سدهای سنگریز با رویه ی بتنی، یکی از انواع خاص سدهای سنگریز هستند که در آنها، کاهش تراوش آب از طریق اجرای یک دال بتنی بر شیب بالادست سد تأمین می شود. شکل ۱ جزئیات عمومی بدنه ی سدهای CFR را نمایش می دهد. چنانکه مشاهده می شود بدنه ی سد از جنس مصالح سنگریز تشکیل شده است، به صورتی که از بالادست به طرف پائین دست به تدریج اندازه ی سنگ دانه ها بزرگ تر شده و امکان اجرای عملیات تراکم در لایه های ضخیم تر فراهم می شود. اندازه ی ابعاد قطعات سنگریز باید به گونه یی باشد که حداکثر ۳۰ درصد آنها کوچک تر از ۲/۵ سانتی متر باشد. همچنین مقاومت فشاری قطعات سنگ نباید از ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع کمتر باشد. دال بتنی که بر شیب بالادست اجرا می شود با ضخامت متغیر ۰/۳

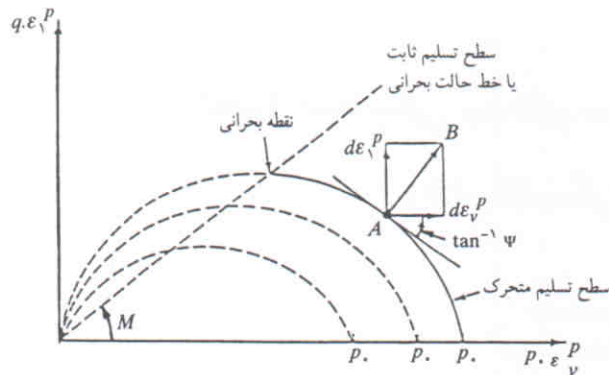
مطالعات گذشته

در غالب سدهای CFR که تا کنون طراحی و ساخته شده اند تحلیل پایداری به شکلی که در سدهای خاکی و سنگریز مطرح است صورت نگرفته است. در واقع به دلیل مقاومت برشی قابل توجه مصالح سنگریز و عدم وجود آب در فضاهای خالی ما بین مصالح و در نتیجه عدم تولید فشار آب حفره یی، سدهای CFR را می توان در رده ی سدهای بسیار مقاوم در برابر لغزش و گسیختگی به شمار آورد. از این رو دیدگاه حاکم بر تحلیل سدهای CFR عموماً دیدگاه خرابی و تعادل حدی نیست بلکه از منظر کنترل تنش و کرنش در بدنه، به ویژه در دال، به مسئله نگرسته می شود.

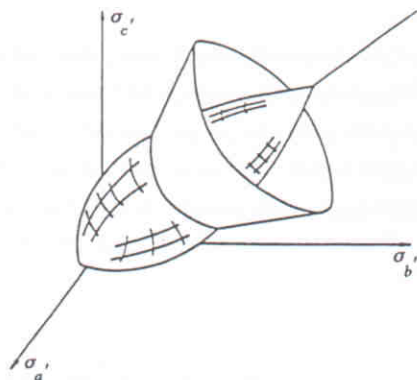


مطالعات گذشته در مورد رفتار سدهای CFR غالباً با بررسی رفتار دینامیکی این نوع سدها در شرایط وقوع زلزله صورت گرفته و اطلاعات کمتری در مورد بررسی رفتار استاتیکی این نوع سدها در متون فنی موجود است.^[۳] به علاوه در مطالعات گذشته مسئله ی رفتار کشسانی - خمیری مصالح سنگریز کمتر مورد توجه قرار گرفته و اثر تغییرات تراز آب مخزن روی بدنه ی سد و دال دیده نشده است.

- ۱A = خاک نفوذناپذیر
- ۱B = مصالح دلخواه
- ۲A = فیلتر ریزدانه
- ۲B = مخلوط سنگ شکسته و ماسه
- ۲A = سنگریز اجرایی در لایه های ۰/۵ متر
- ۲B = سنگریز اجرایی در لایه های ۱ متر
- ۲C = سنگریز اجرایی در لایه های ۲ متر
- ۲D = انباشت موقت سنگریز
- شکل ۱. مقطع عمومی سد CFR و اجزای آن.



شکل ۲. سطوح تسلیم مدل رفتار حالت بحرانی در فضای p-q [۱]



شکل ۳. مدل رفتار حالت بحرانی در فضای سه‌بعدی [۲]

افزودن یک مدل رفتاری کشسانی-خمیری مناسب، در قالب یک زیربرنامه‌ی رایانه‌یی به آن، مورد توجه محققین واقع شد. مهم‌ترین مزیت این انتخاب امکان استفاده از سیستم حل معادلات و پس‌پردازنده‌ی قدرتمند این نرم‌افزار است. [۱۵] در مقابل، یکی از نقاط ضعف برنامه‌ی ANSYS، که رفع آن هدف این مطالعات است، فقدان یک مدل رفتاری مناسب برای مصالح خاکی و سنگریز در این برنامه‌ی رایانه‌یی است. برای جبران این نقطه ضعف، مدل رفتاری حالت بحرانی در قالب یک زیربرنامه‌ی رایانه‌یی به اصل برنامه افزوده شده و نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ی برنامه حاصل شده است. این نسخه‌ی اصلاح‌شده، کلیه‌ی قابلیت‌های عددی برنامه‌ی ANSYS را داراست و به‌علاوه زیربرنامه‌ی نوشته شده در آن قابل استفاده خواهد بود.

برای ارزیابی عملکرد برنامه‌ی اصلاح‌شده، مجموعه‌یی از مسائل حل شده با استفاده از مدل رفتاری حالت بحرانی انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته که در ادامه به طرح دو نمونه از آنها می‌پردازیم.

مسئله‌ی اول، مدل‌سازی یک آزمایش سه‌محوری عادی (CTC) است که در آن تغییرات کرنش قائم نمونه‌ی آزمایشگاهی در برابر اختلاف تنش‌های اصلی اعمال شده بر آن بررسی می‌شود. [۱۴]

بر این اساس مطالعات حاضر به منظور توسعه‌ی دایره‌ی اطلاعات موجود در مورد رفتار سدهای CFR مطرح می‌شود.

مدل رفتاری حالت بحرانی^۳

در مطالعات حاضر برای مدل‌سازی رفتار کشسانی-خمیری مصالح سنگریز بدنه‌ی سد از مدل رفتاری حالت بحرانی استفاده می‌شود. این مدل رفتاری در عین سادگی و فرمول‌بندی مناسب به‌نحو قابل قبول، رفتار مصالح خاکی و سنگریز را مدل‌سازی می‌کند.

در شکل اصلاح‌شده‌ی این مدل، کلاهک‌های تسلیم با معادله‌ی ساده‌ی یک بیضی نشان داده می‌شود (شکل ۲). اگر سطح تنش در داخل بیضی قرار گیرد، رفتار مصالح به‌صورت کشسانی و در خارج آن به‌صورت ترکیبی از رفتارهای کشسانی و خمیری فرض می‌شود. برای تعریف مدل، پنج پارامتر مورد نیاز است. این پارامترها عموماً با انجام آزمایش‌های متعارف روی مصالح قابل محاسبه‌اند. برای مصالح درشت‌دانه استفاده از آزمایش سه‌محوری با تنش همه‌جانبه^۴ و برای مصالح ریزدانه استفاده از آزمایش تحکیم ادمتر^۵ توصیه می‌شود.

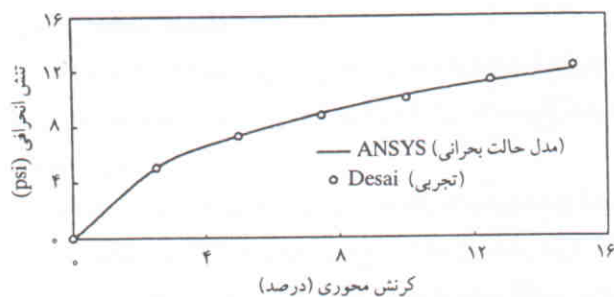
در مرحله‌ی باربرداری، رفتار مصالح به‌صورت کشسان فرض می‌شود. در مدل رفتاری حالت بحرانی نیز این امر با قرار گرفتن وضعیت تنش در داخل بیضی تسلیم مدل می‌شود. شکل ۳ نمای سه‌بعدی سطوح تسلیم را نمایش می‌دهد.

در فرمول‌بندی رایج برای مدل حالت بحرانی عموماً تابع پتانسیل خمیری (g) برابر با تابع تسلیم (f) در نظر گرفته شده و در اصطلاح از قانون جریان وابسته^۶ تبعیت می‌شود. در این شرایط با فرض برقراری قانون تعامد روی سطح بیضی تسلیم، نرخ کرنش پلاستیک عمود بر سطح تسلیم در نظر گرفته می‌شود. [۴]

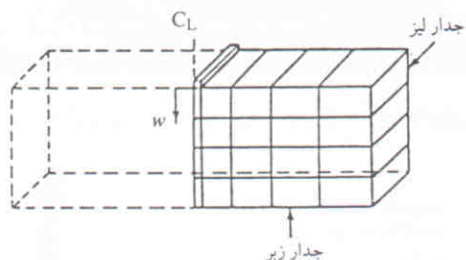
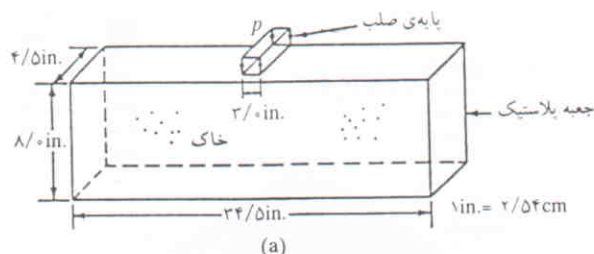
چنانکه در شکل ۲ ملاحظه می‌شود علاوه بر سطح تسلیم متحرک (کلاهک)، سطح ثابتی که معادل سطح حالت بحرانی است به‌عنوان حد‌نهایی باربری مصالح در نظر گرفته می‌شود. برای مدل کردن این سطح حالت بحرانی، در مطالعات حاضر از مدل رفتاری دراگر - پراگر^۷ استفاده شده است. با رسیدن سطح تنش به سطح بحرانی، مدل دراگر - پراگر وارد عمل شده و سطح تنش را در حد سطح حالت بحرانی محدود می‌کند. برای جلوگیری از اثراتساع^۸ روی سطح حالت بحرانی از قانون جریان غیر وابسته^۹ استفاده می‌شود. در این حالت روی سطح بحرانی قانون تعامد برقرار نبوده و تابع پتانسیل خمیری با تابع تسلیم متفاوت خواهد بود.

ارزیابی عملکرد برنامه‌ی رایانه‌یی

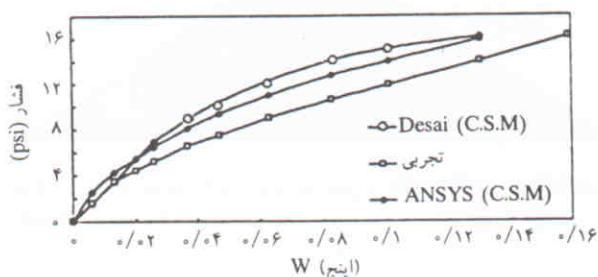
در مطالعات حاضر استفاده از بدنه‌ی اصلی نرم‌افزار ANSYS و



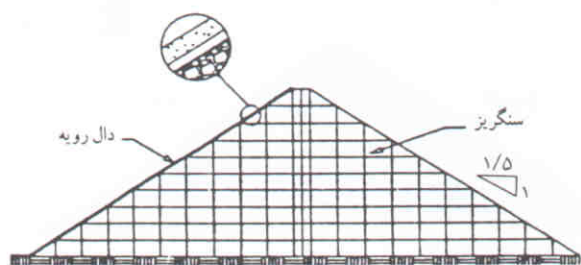
شکل ۴. مقایسه‌ی پاسخ‌ها در مسئله‌ی آزمایش سه‌محوری.



شکل ۵. جزئیات مسئله‌ی نسبت پی. [۱]



شکل ۶. مقایسه‌ی پاسخ‌ها در مسئله‌ی نسبت پی.



شکل ۷. مدل‌سازی سد CFR بصورت المان محدود.

مدل مسئله‌ی آزمایش سه‌محوری، یک مدل تقارن محوری مستطیل‌شکل است که ارتفاع آن دو برابر عرض انتخاب می‌شود. براین اساس، پاسخ حاصل از تحلیل به کمک برنامه‌ی ANSYS اصلاح شده، به همراه پاسخ تجربی ارائه شده در مرجع در شکل ۴ مشاهده می‌شود. چنانکه ملاحظه می‌شود پاسخ حاصل اختلاف معنی‌داری با پاسخ ارائه شده در مرجع ندارد و این امر صحت عملکرد زیربرنامه را نشان می‌دهد.

مسئله‌ی دوم یک مسئله‌ی معمول ژئوتکنیک است که در آن نحوه‌ی تغییر شکل خاک زیرپی با استفاده از مدل رفتار حالت بحرانی ارزیابی می‌شود [۱] (شکل ۵).

شکل ۶ نشانگر پاسخ به دست آمده از نسخه‌ی اصلاح شده‌ی برنامه‌ی ANSYS و مقایسه‌ی آن با پاسخ‌های عددی و تجربی موجود [۱] است. چنانکه مشاهده می‌شود پاسخ به دست آمده تا حد زیادی با پاسخ‌های موجود منطبق بوده و نشست نهایی محاسبه شده در دو حالت کمتر از ۲٪ اختلاف دارد. همچنین به دلیل استفاده از تعداد زیرگام‌های بیشتر در حل مسئله، پاسخ به دست آمده نسبت به پاسخ موجود، به نتایج تجربی نزدیک‌تر است.

جزئیات مدل‌سازی سدهای CFR

در ادامه‌ی روند مطالعات، گام بعدی استفاده از زیربرنامه‌ی تدوین شده در بررسی رفتار سدهای سنگریز با رویه‌ی بتنی است. برای این منظور یک مقطع عمومی از یک سد CFR به صورت دوبعدی مدل‌سازی می‌شود. ارتفاع این مقطع ۱۰۰ متر و شیب جانبی آن ۱:۵ است (شکل ۷).

برای مدل‌سازی بدنه‌ی سد از المان‌های چهارگره‌ی هم‌متغیر با مدل رفتاری حالت بحرانی و در نظر گرفتن مراحل ساخت بدنه در ۱۰ لایه استفاده می‌شود. بر روی شیب بالادست، دال بتنی به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و به کمک المان‌های چهارگره‌ی ریزتر مدل‌سازی می‌شود و رفتار بتنی به صورت کشسان خطی فرض می‌شود. در حد فاصل دال بتنی و بدنه‌ی سنگریز از المان‌های درز سه‌گره‌ی با رفتار کشسانی-خمیری کامل استفاده می‌شود. رفتار المان تا قبل از رسیدن به آستانه‌ی لغزش دال روی بدنه کشسان، و پس از آن خمیری کامل است. مدل رفتاری مورد استفاده در المان حد فاصل، مدل رفتاری موهر-کولمب^{۱۰} است.

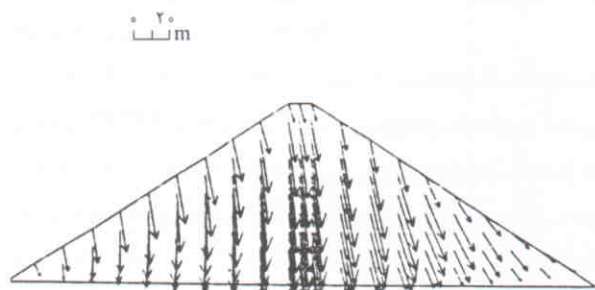
تحلیل سازه تحت اثر وزن آن در ۱۰ گام، و هر گام با فعال کردن وزن یک لایه‌ی جدید صورت می‌گیرد. در گام ۱۱ وزن دال بتنی فعال می‌شود و در گام آخر فشار آب موجود در مخزن اعمال می‌شود. در هر یک از گام‌های دوازده‌گانه تعداد ۱۰ تا ۵۰ زیرگام برای تصدیق تحلیل غیر خطی به کار می‌رود.

است. اگر حداکثر نشست سد با استفاده از مدل رفتاری کشسان برای مصالح سنگریز محاسبه شود، مقدار آن برابر ۲۰ سانتی‌متر (۰/۲) درصد ارتفاع سد) به دست می‌آید (شکل ۹). از سوی دیگر مقدار نشست بیشینه برای سدی به ارتفاع ۱۱۰ متر و شیب جانبی ۱/۳:۱، پس از آبیگری با استفاده از مدل رفتاری معادل خطی، برابر ۳۱ سانتی‌متر (۰/۳۱) درصد ارتفاع سد) محاسبه شده است.^[۳] در شکل ۱۰ الگوی تغییر مکان افقی بدنه‌ی سد رسم شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، حداکثر تغییر مکان افقی بدنه‌ی سد برابر ۹

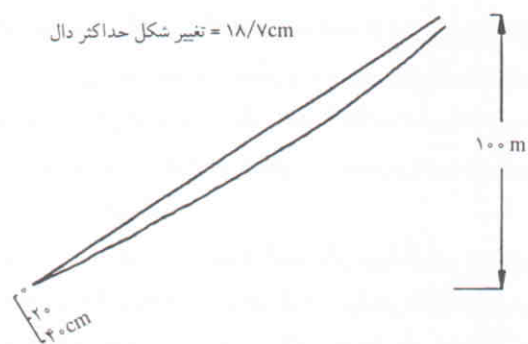
بررسی نتایج حاصله

در شکل‌های ۸ تا ۱۳ مهم‌ترین نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی سد در شرایط وجود آب در تراز نرمال خود (برابر ۹۰ متر از کف) مشاهده می‌شود.

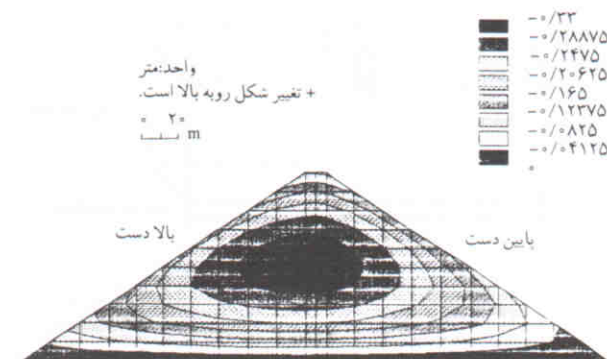
چنانکه در شکل ۸ مشاهده می‌شود، حداکثر نشست به دست آمده برابر ۳۳ سانتی‌متر (۰/۳۳) درصد ارتفاع سد) است که در تراز ۵۰ متری از کف حاصل می‌شود. باید توجه داشت که چنین الگویی برای نشست قائم به دلیل در نظر گرفتن توالی ساخت لایه‌ها به دست آمده



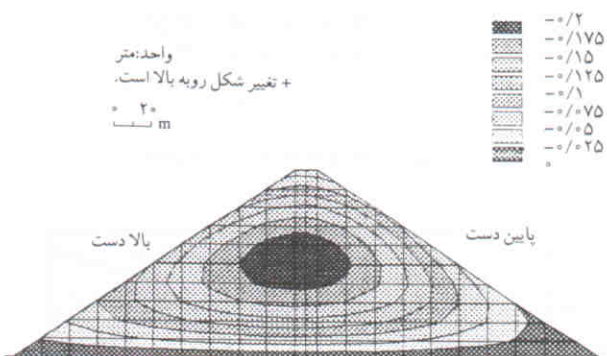
شکل ۱۱. الگوی توزیع بردارهای تغییر مکان بدنه پس از آبیگری.



شکل ۱۲. الگوی تغییر شکل دال بتنی رویه.



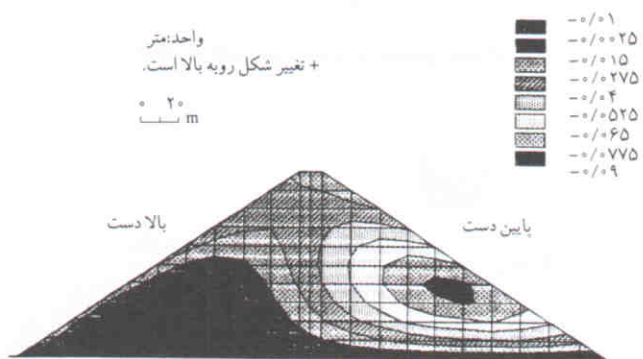
شکل ۸. الگوی نشست قائم بدنه‌ی سد پس از آبیگری تا تراز نرمال.



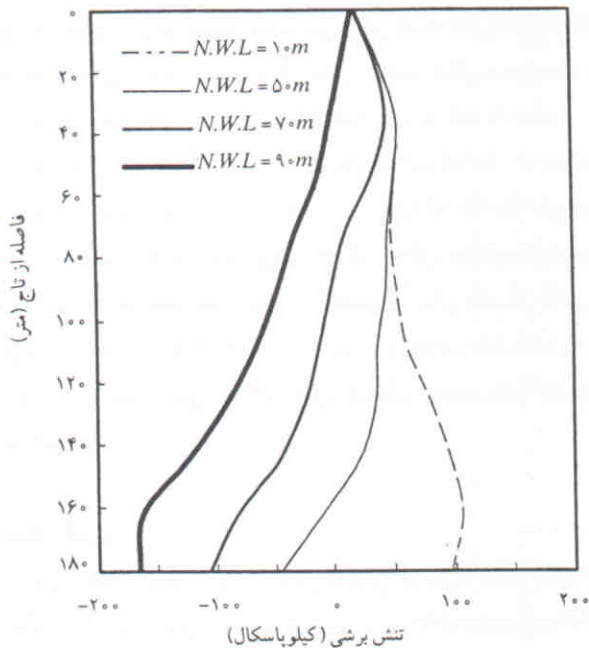
شکل ۹. الگوی نشست قائم بدنه‌ی سد پس از آبیگری تا تراز نرمال (رفتار کشسانی - خمیری).



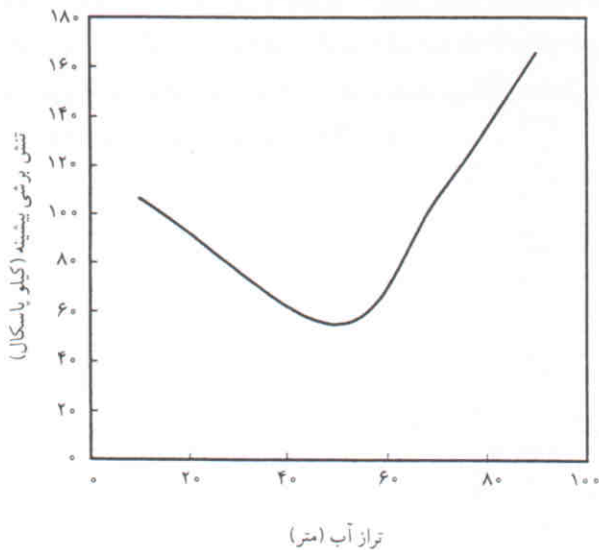
شکل ۱۳. الگوی توزیع تنش برشی در بدنه‌ی سد.



شکل ۱۰. الگوی تغییر شکل افقی بدنه‌ی سد پس از آبیگری تا تراز نرمال (رفتار کشسانی - خمیری).



شکل ۱۵. اثر تغییر تراز آب روی توزیع تنش برشی در مرز بین دال و بدنه سد.



شکل ۱۶. اثر تغییرات تراز آب روی مقدار تنش برشی حداکثر در مرز دال و بدنه سد.

ملاحظه می شود، در شرایطی که ارتفاع آب در مخزن سد برابر ۱۰ متر فرض شود تنش برشی مثبت است و دال بتنی به طرف پائین حرکت می کند. این امر منجر به وارد شدن فشار روی دال بتنی پنجه می شود. به همین دلیل در ساخت سدهای CFR پیش بینی درز در محل تماس دال رویه و دال پنجه و پرکردن آن از مواد قابل تراکم توصیه می شود. به تدریج با افزایش ارتفاع آب در مخزن سد، علامت تنش برشی تغییر می کند و بخش بیشتری از دال بتنی تمایل به حرکت نسبی به طرف تاج سد می یابد. وقوع چنین پدیده بی را می توان از یک سوناشی از

سانتی متر است که در مجاورت پوسته ی پائین دست سد حاصل می شود.

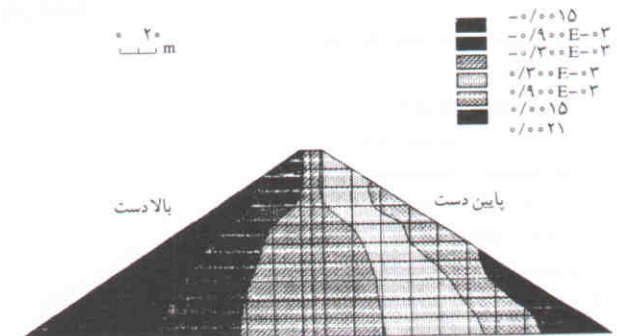
در شکل ۱۱، توزیع بردارهای تغییر مکان نقاط مختلف بدنه ی سد ملاحظه می شود. چنانکه مشاهده می شود روند عمومی تغییر مکان نقاط حرکت به طرف پائین دست است، به گونه یی که انتظار می رود برآمدگی ملایمی در پوسته ی پائین دست سد ظاهر شود.

در شکل ۱۲ نحوه ی تغییر شکل دال بتنی رویه نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می شود حداکثر مقدار تغییر شکل دال حدود ۱۹ سانتی متر است که حدوداً در ارتفاع ۶۰ متری از کف اتفاق می افتد.

در شکل ۱۳ و ۱۴ الگوی توزیع تنش برشی و کرنش برشی خمیری در بدنه ی سد ملاحظه می شود. چنانکه در شکل ۱۳ مشاهده می شود مقدار حداکثر تنش برشی در بدنه ی سد حدود ۲۶۰ کیلو پاسکال است که در مجاورت کف در بخش پائین دست سد اتفاق می افتد.

همچنین چنانکه در شکل ۱۴ مشاهده می شود، حداکثر کرنش برشی خمیری حدود ۰/۲۱ درصد است و در مجاورت پوسته ی پائین دست سد ایجاد می شود. الگوی توزیع کرنش برشی خمیری می تواند به عنوان یک معیار کیفی، نحوه ی توزیع شرایط خمیری در بخش های مختلف بدنه ی سد را نیز نمایش دهد.

بخش دیگری از مطالعات حاضر، شامل بررسی اثر تغییرات تراز آب مخزن رفتار سدهای CFR است، در قالب شکل های ۱۵ و ۱۶ ملاحظه می شود. مهم ترین پارامتر مورد توجه در این بررسی، نحوه ی توزیع تنش برشی در مرز دال و بدنه ی سد است. این امر به ویژه از نظر آشنایی با چگونگی رفتار دال بتنی حائز اهمیت است. چنانکه در شکل ۱۵ ملاحظه می شود، نحوه ی توزیع تنش برشی در محیط حد فاصل در سه تراز مختلف آبرگیری مخزن رسم شده است. در این نمودار، علامت مثبت تنش برشی نشان دهنده ی حرکت نسبی دال بر روی شیب به طرف پائین (سنگ بستر) و علامت منفی معرف حرکت نسبی دال به طرف بالا (تاج^{۱۱} سد) است. براین اساس، چنانکه



شکل ۱۴. الگوی توزیع کرنش برشی خمیری در بدنه ی سد.

۱. حداکثر نشست بدنه‌ی سد حدود $0/33$ درصد ارتفاع سد حاصل و محل وقوع بیشینه‌ی نشست قائم در فاصله‌ی $0/5H$ از روی سنگ کف مشاهده شد.
۲. حداکثر تغییر شکل افقی بدنه‌ی سد در مجاورت پوسته‌ی پائین دست حاصل می‌شود و از این رو انتظار می‌رود که پوسته‌ی پائین دست دچار برآمدگی ملایمی شود.
۳. حداکثر تغییر شکل دال بتنی برای سد مورد مطالعه حدود $0/2$ درصد ارتفاع سداست که در محدوده‌ی $0/6H$ از روی سنگ بستر مشاهده می‌شود.
۴. حداکثر کرنش برشی خمیری حدود $0/2$ درصد است و بخش‌های مجاور پوسته‌ی بالادست و پائین دست حداکثر رفتار خمیری را از خود بروز می‌دهند.
۵. تغییر جهت تنش برشی در محل تماس دال و بدنه بر اثر تغییرات تراز آب مخزن، مؤید این است که در ترازهای آبدگیری پائین، حرکت نسبی دال بتنی به طرف پائین و در ترازهای آبدگیری بالا، حرکت نسبی دال بتنی به طرف تاج سداست.
۶. حداکثر تنش برشی در مرز دال و بدنه، از ابتدای آبدگیری تا حدود تراز معادل $0/5$ درصد ارتفاع کل سد کم می‌شود و پس از آن در جهت عکس افزایش می‌یابد.

افزایش ظرفیت برشی محیط حد فاصل بر اثر اضافه شدن تنش نرمال حاصل از وزن آب، و از سوی دیگر ناشی از تغییر شکل بدنه‌ی سد رو به پائین دست و تمایل دال به تبعیت از شکل جدید بدنه دانست. در شکل ۱۶ حداکثر تنش برشی محیط حد فاصل در برابر ترازهای مختلف آب مخزن رسم شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود تا حدود ارتفاع $0/5$ متر، تنش برشی حداکثر به دلیل عملکرد فشار آب و وزن دال در دو جهت متفاوت و اثر کاهنده‌ی آنها بر یکدیگر کاهش می‌یابد. از حدود ارتفاع $0/5$ متر به بعد به دلیل غلبه‌ی عامل فشار آب بر وزن دال، تنش برشی حداکثر، علی‌رغم تغییر جهت، دائماً افزایش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار، مجموعه‌ی نتایج تحلیلی در مورد رفتار سدهای سنگریز با رویه‌ی بتنی ارائه شد. در این بررسی‌ها از مدل‌سازی المان محدود، برای مدل کردن رفتار مصالح سنگریز از مدل رفتار حالت بحرانی استفاده شد. دال بتنی به صورت کشسان مدل شده و برای اتصال مناسب دال بتنی به بدنه‌ی سنگریز المان درز با رفتار کشسانی - خمیری کامل موهر - کولمب به کار رفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این مطالعات را می‌توان بدین شرح خلاصه کرد:

پانوشته‌ها

1. concrete faced rockfill dam
2. concrete slab
3. critical state model
4. hydrostatic compression
5. oedometer consolidation test
6. associated flow rule
7. drucker-prager
8. dilation
9. nonassociated flow rule
10. mohr-coulomb
11. crest

منابع

1. Desai, C. S. and Siriwardane, H. J., Constitutive laws for engineering materials, Prentice-Hall Inc., New Jersey, (1984).
2. Britto, A. M. and Gunn, M. J., Critical state soil mechanics via finite elements, John Wiley & Sons, New York, (1987).
3. Marg, M., Rockfill Dams, Central Board of Irrigation and Power, New Delhi, (1992).
4. Nayak, G. C., and Zienkiewicz, O. C., "Elasto-Plastic stress analysis", *Int. J. for Num. Methods in Engrg.*, 5, pp 113-135, (1972).
- 5- ANSYS user manual, 2nd Edition, SAS IP. Inc., (1996).