

# ارزیابی اثر تغییرات تراز آب مخزن بر پاسخ دینامیکی

## سدهای سنگریز با رویه بتنی

سید محسن حائری (استاد)

مجتبی اصفهانی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار مجموعه‌ی از بررسی‌های انجام شده در مورد رفتار لرزه‌ی سدهای سنگریز با رویه‌ی بتنی<sup>[1]</sup> (CFR) ارائه می‌شود. جهت‌گیری عمده در این بررسی، ارزیابی اثر تغییرات تراز آب مخزن سدهای CFR بر پاسخ دینامیکی آنهاست. در آغاز مروری بر مطالعات گذشته در مورد رفتار دینامیکی این سدها مطرح می‌شود. سپس با بررسی نرم‌افزار و شیوه‌ی حل مسئله مقدمات مورد نیاز برای انجام تحلیل موردی ارائه می‌شود. با معرفی هندسه و ویژگی‌های مصالح، تعریف مسئله تکمیل شده و نتایج تحلیل دینامیکی شامل تحلیل مودال، پاسخ لرزه‌ی بدنه و پاسخ لرزه‌ی دال بتنی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS اصلاح شده و بر مبنای رفتار کشسان خمیری (الاستوپلاستیک) حالت بحرانی برای مصالح سنگریز مطرح می‌شود. و در پایان جمع‌بندی نهایی از مجموع بررسی‌ها ارائه خواهد شد. از مهم‌ترین نتایج این بررسی می‌توان به پیش‌بینی پدیده‌ی برخواست<sup>آ</sup> (برکنش) دال بتنی رویه در ترازهای آبیگری پایین‌ترین و وقوع زلزله اشاره کرد.

### مقدمه

همین سال بورو با استفاده از یک برنامه‌ی تفاضل محدود، موسوم به DSAGE، مودهای گسیختگی سدهای CFR و الگوی توزیع تغییر شکل در آنها را بررسی کرد.<sup>[1]</sup> دو سال بعد، در سال ۱۹۸۷، مطالعات انجام شده توسط شرارد و کوک صحت نتایج به دست آمده توسط بورو را مورد تردید قرار داد.<sup>[2]</sup> شرارد و کوک از مقایسه‌ی اطلاعات تجربی ناشی از وقوع زلزله در ساختگاه سد هفتم کاکوتی در شیلی با نتایج عددی برنامه‌ی DSAGE دریافتند که نتایج تحلیلی، تغییر شکل‌های بزرگ‌تری نسبت به آنچه در واقعیت اتفاق افتاده ارائه می‌دهند. بر این اساس، آنان توصیه کردند که برنامه‌های رایانه‌ی با ملاحظه‌ی رفتار غیرخطی مصالح سنگریز و نیز میرایی انرژی لرزه‌ی در مصالح، اصلاح شوند.

سدهای سنگریز با رویه‌ی بتنی (CFR)، یکی از انواع سدهای سنگریزند که در آنها برای کاهش تراوش آب - به جای شیوه‌ی مرسوم اجرای هسته‌ی رسی - از ساخت یک دال بتنی روی شیب بالادست سد استفاده می‌شود. بدنه‌ی سد از جنس مصالح سنگریز است. به‌صورتی که از بالادست سد به طرف پائین دست به تدریج ابعاد سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. دال بتنی رویه با ضخامت ۰/۳ تا ۰/۵ متر و به‌صورت مسلح روی شیب بالادست اجرا می‌شود، و نیز برای جلوگیری از لغزش دال تا قبل از آبیگری مخزن، در پای دال و روی سنگ کف، دال بتنی پنجه با ضخامت متوسط ۰/۵ متر ساخته می‌شود.

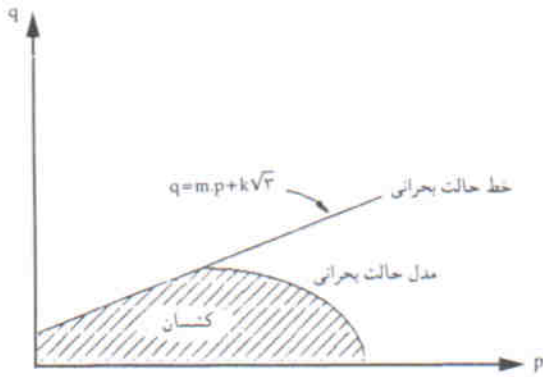
در نوشتار حاضر رفتار لرزه‌ی این نوع سدها با توجه ویژه به مسئله‌ی اثر تغییرات تراز آب مخزن بر پاسخ دینامیکی آنها بررسی شده است.

### مطالعات گذشته

هان و همکاران وی در سال ۱۹۸۸ آزمایشات مدل بر روی میز لرزان را برای بررسی رفتار سدهای CFR به کار برده‌اند.<sup>[1]</sup> این مطالعات از نظر کیفی صحت نتایج به دست آمده از بررسی‌های تحلیلی را تأیید می‌کنند، ولی نتایج کمی آنها با توجه به عدم تأثیر کافی وزن روی رفتار مصالح قابل اطمینان نیست.

اولین بررسی‌های دقیق در مورد پاسخ دینامیکی سدهای سنگریز با رویه‌ی بتنی (CFR) در سال ۱۹۸۵ توسط سید و همکاران وی صورت گرفت.<sup>[۱]</sup> این بررسی‌ها به‌روش مدل‌سازی اجزاء محدود و با فرض رفتار کشسان خطی برای مصالح سنگریز انجام شده است. در

گراناس و اودین در سال ۱۹۹۵ مجموعه تحقیقاتی را گزارش کرده‌اند که در برگیرنده‌ی مطالعات نسبتاً کاملی در مورد رفتار دینامیکی سدهای CFR، و به‌ویژه خصوصیات رفتار دال بتنی در حین زلزله است.<sup>[۱۵]</sup> این بررسی‌ها با مدل‌سازی اجزاء محدود کرنش



شکل ۱. جزئیات سطوح تسلیم و نواحی رفتاری.

سطوح تسلیم متحرک با معادله‌ی ساده‌ی یک بیضی معرفی می‌شوند. وجود سطح تسلیم متحرک، مدل رفتاری را قادر می‌سازد که رفتار سخت شوندگی مصالح را وارد معادلات کند. اگر سطح تنش زیر حد تسلیم قرار گیرد (در بارگذاری و یا باربرداری) رفتار به صورت کشسان غیرخطی با اصلاح پارامترهای سختی مصالح براساس سطح تنش موجود فرض می‌شود. در محدوده‌ی رفتار خمیری، کرنش خمیری تولید شده و ماتریس سختی مماسی کشسان خمیری محاسبه می‌شود. شکل ۱ جزئیات سطوح تسلیم را در فضای  $p-q$  نمایش می‌دهد.

برای مدل‌سازی میرایی متغیر مصالح سنگریز از مدل هایپربولیک اصلاح شده‌ی پایک (۱۹۷۹) استفاده شده است.<sup>[۷]</sup> چون در برنامه‌ی ANSYS مقدار میرایی عدد ثابتی فرض می‌شود، لازم است که برای اصلاح میرایی در خلال حل مسئله، یک زیربرنامه‌ی جداگانه تدوین شود. این زیربرنامه که از نوع ماکروهای قابل تعریف در اصل برنامه است، قادر است که در هر گام بارگذاری دینامیکی و برای هر یک از اجزاء سنگریز، نسبت میرایی اصلاح شده را محاسبه کند.

### ویژگی‌های هندسی و خصوصیات مصالح مدل

برای بررسی پاسخ دینامیکی سد CFR، از مدل‌سازی دوبعدی سطح مقطع سد و فرض برقراری رفتار کرنش مسطح در آن استفاده شده است.

شکل ۲ جزئیات هندسی مدل مورد بررسی در این مطالعات را نمایش می‌دهد. چنان‌که در این شکل ملاحظه می‌شود، ارتفاع سد برابر  $10^*$  متر و شیب جانبی آن برابر  $1:1/5$  اختیار شده است. عرض تاج سد نیز برابر ۱۲ متر فرض شده و دال پنتی رویه به ضخامت ثابت  $3^*$  سانتی‌متر روی شیب بالادست مدل شده است.

مسطح، و با فرض رفتار معادل خطی برای مصالح سنگریز صورت گرفت. از مهم‌ترین نتایج این بررسی می‌توان به پیش‌بینی ایجاد تنش کششی در دال پنتی حین وقوع لرزش‌های شدید اشاره کرد. این امر ضرورت اصلاح جزئیات طراحی دال پنتی برای جلوگیری از ایجاد ترک خوردگی آن را به اثبات رسانید.

در تحقیقات بیشتری که حائری و کیهانی بر نتایج به دست آمده توسط اودین و گزرتاس انجام دادند<sup>[۶]</sup>، با تدوین یک برنامه‌ی رایانه‌ی، رفتار غیرخطی مصالح سنگریز براساس مدل هایپربولیک اصلاح شده مدل شد. این بررسی‌ها تا حدود زیادی نتایج به دست آمده توسط گزرتاس و اودین را تأیید می‌کند و نیز افق‌های تازه‌ی برای بررسی بیشتر در مورد ویژگی‌های سدهای CFR پیش روی قرار می‌دهد.

مطالعات حاضر با هدف توسعه و تعمیق اطلاعات موجود در مورد رفتار لرزه‌ی سدهای CFR، به‌ویژه تحت اثر تغییرات تراز آب مخزن مطرح می‌شود. به‌علاوه، برای مدل‌سازی رفتار مصالح سنگریز از مدل کشسان خمیری حالت بحرانی استفاده خواهد شد. این دو ویژگی که در مطالعات گذشته به چشم نمی‌خورد، مهم‌ترین خصوصیات تحقیق حاضر به شمار خواهد آمد.

### نرم‌افزار و شیوه‌ی حل مسئله

در مطالعات حاضر برای مدل‌سازی اجزاء محدود و ارزیابی رفتار سدهای CFR از نرم‌افزار رایانه‌ی ANSYS، با اعمال اصلاحات لازم، استفاده می‌شود. نسخه‌ی اصلی برنامه‌ی ANSYS از بین مدل‌های رفتاری مناسب برای مصالح خاکی و سنگریز، امکان استفاده از مدل کشسانی - خمیری کامل دراکر - پراگر<sup>۳</sup> را پیش‌بینی کرده است. در این مطالعات برای مدل‌سازی دقیق‌تر رفتار مصالح سنگریز از مدل رفتاری کشسان خمیری حالت بحرانی<sup>۴</sup> استفاده می‌شود و برای این منظور یک زیربرنامه‌ی رایانه‌ی برای اعمال مدل حالت بحرانی در برنامه‌ی ANSYS، تدوین شده است. این زیربرنامه به‌عنوان جزئی از برنامه‌ی اصلی و به همراه آن پردازش شده و نسخه‌ی اصلاح شده‌ی برنامه‌ی ANSYS را ارائه می‌دهد، به‌طوری‌که برنامه‌ی جدید کلیه‌ی قابلیت‌های نرم‌افزار اصلی را داراست و به‌علاوه مدل حالت بحرانی در آن قابل استفاده خواهد بود.

در مدل حالت بحرانی، رفتار مصالح به صورت ترکیبی از رفتار کشسانی و خمیری سخت شونده در نظر گرفته می‌شود. سطح تسلیم ثابت برای مصالح، خط حالت بحرانی است که روی آن از قانون جریان غیر وابسته (برای حذف اثر اتساع) استفاده می‌شود و

تعیین شده و سپس سایر پارامترها برای ایجاد همسازی بین پارامترهای کشسان و فرمول‌های تجربی موجود اختیار شده است. در جدول ۱ مقدار پارامترهای به کار رفته برای مدل حالت بحرانی مصالح سنگریز ارائه شده است.

### تحلیل دینامیکی

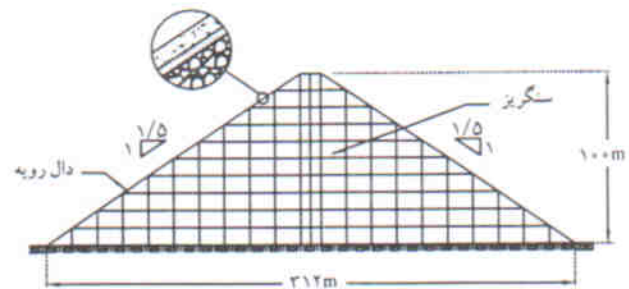
بر اساس مدل هندسی و ویژگی‌های ارائه شده برای مصالح سنگریز و دال بتنی، تحلیل دینامیکی سازه بر اساس مفهوم تاریخچه‌ی تنش و رعایت توالی و ترتیب مراحل اعمال بار صورت گرفت. تحلیل دینامیکی در دو بخش شامل تحلیل مودال و تحلیل لرزه‌ی تاریخیچه‌ی زمانی انجام شد. در تحلیل مودال بر اساس رفتار کشسان مصالح، شکل مودهای نوسانی سازه و مقدار فرکانس ارتعاشی آن تعیین شد. انجام تحلیل مودال به منظور کنترل صحت مدل‌سازی و نیز تعیین فرکانس اول ارتعاشی سیستم صورت می‌گیرد. فرکانس اول ارتعاشی برای تعیین ضرایب میرایی رایلی و اعمال آن در معادلات اجزاء محدود به منظور حل معادله‌ی تعادل دینامیکی به کار می‌رود. در بخش دوم بنا در نظر گرفتن رکورد زلزله‌ی ال‌سنترو (PGA = ۰/۳۵g) به عنوان مبنای مطالعات، تاریخچه‌ی شتاب این زلزله به صورت تحریک ارتعاشی بر سد اعمال شده و با تغییر تراز آب مخزن، اثر این تغییرات در پاسخ دینامیکی و رفتار لرزه‌ی بررسی شده است.

### نتایج تحلیل مودال

در جدول ۲ نتایج به دست آمده از تحلیل مودال مقطع سد CFR مورد بحث شامل مقدار فرکانس ارتعاشی و زمان تناوب نظیر آن برای ۱۰ مود ارتعاشی اول سازه ارائه شده است. چون رفتار در تحلیل مودال به صورت کشسان خطی است برای وارد کردن اثر تنش همه‌جانبه در مقدار سختی اجزاء، در هر لایه‌ی مصالح سنگریز از متوسط تنش

جدول ۲. نتایج تحلیل مودال سد CFR.

مرد	فرکانس (HZ)	T(sec)	مرد	فرکانس (HZ)	T(sec)
۱	۱/۲۲۸	۰/۸۱۴	۶	۳/۱۰۱	۰/۳۲۲
۲	۱/۸۹۳	۱/۵۲۸	۷	۳/۳۹۲	۰/۲۹۵
۳	۲/۱۴۷	۰/۴۶۶	۸	۳/۴۷۹	۰/۲۸۷
۴	۲/۶۴۰	۰/۳۷۹	۹	۴/۰۷۷	۰/۲۴۵
۵	۲/۸۹۶	۰/۳۴۵	۱۰	۴/۱۵۲	۰/۲۴۱



شکل ۲. جزئیات هندسی مدل سد CFR.

جدول ۱. پارامترهای مدل حالت بحرانی برای مصالح سنگریز.

مقدار	نشان	کیت
۰	c	چسبندگی (kpa)
۴۰°	$\phi$	زاویه‌ی اصطکاک داخلی
۰	$\phi_p$	زاویه‌ی انبساط
۰/۰۰۴	$\lambda$	نشان بارگذاری مصالح
۰/۰۰۰۶	k	نشان باربرداری مصالح
۰/۷	$e_0$	تخلخل اولیه‌ی مصالح
۶۰	$p_0$	فشار همه‌جانبه (kpa)

برای جزء بندی بدنه‌ی سنگریز از ۱۰ لایه، هر یک به ارتفاع ۱۰ متر استفاده شده و جزء به کار رفته برای آن چهار گره‌ی ایزو پارامتریک است. در حین تحلیل با فعال کردن تدریجی وزن لایه‌های سد، توالی اجرای لایه‌ها و مسئله‌ی ساخت تدریجی در نظر گرفته شده است. دال بتنی رویه به صورت کشسان و توسط اجزاء چهار گره‌ی ریز تر مدل شده و با رعایت نسبت طول به عرض اجزاء از لاغر شدن آنها جلوگیری به عمل آمده است. همچنین برای اتصال دال بتنی به بدنه‌ی سنگریز از اجزاء حد فاصل سه گره‌ی با قابلیت مدل‌سازی فشاری صرف (بدون تحمل کشش) استفاده شده است. مدل رفتاری حاکم بر این جزء، مدل موهر-کولمب است و در نتیجه قابلیت مدل‌سازی لغزش دال بر روی سطح شیب بالادست ایجاد شده است.

برای تعیین پارامترهای مدل حالت بحرانی که به منظور مدل‌سازی رفتار مصالح سنگریز به کار گرفته شده، به دلیل فقدان نتایج آزمایشگاهی مناسب، از روش مبتنی بر فرمول‌های تجربی و قضاوت مهندسی استفاده شده است.

بر اساس این روش پارامترهای کشسان مصالح (E و G) بر اساس متوسط سطح تنش یک لایه‌ی مصالح سنگریز به ضخامت ۱۰ متر

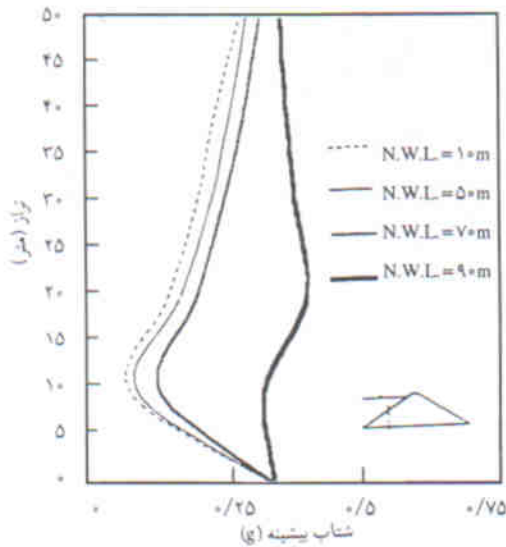
ناشی از وزن لایه‌های فوقانی برای تعیین مدول الاستیسیته‌ی آن لایه استفاده می‌شود.

طبق نتایج به دست آمده، فرکانس مود ارتعاشی اول برابر  $1/228$  هرتر است که از آن در تعیین ضرایب میرایی زایل‌ی استفاده می‌شود.

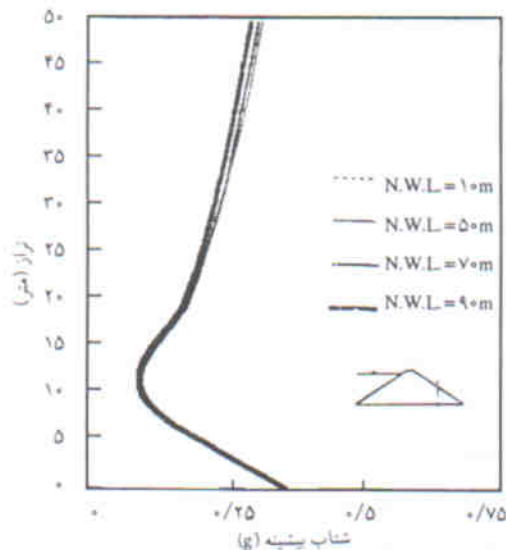
### پاسخ لرزه‌ی بدنه‌ی سد

نتایج حاصل از تحلیل لرزه‌ی سد با در نظر گرفتن چهار تراز مختلف برای آبیگیری مخزن ( $10$ ،  $50$ ،  $70$  و  $90$  متر) در شکل‌های ۳ تا ۶ مشاهده می‌شود.

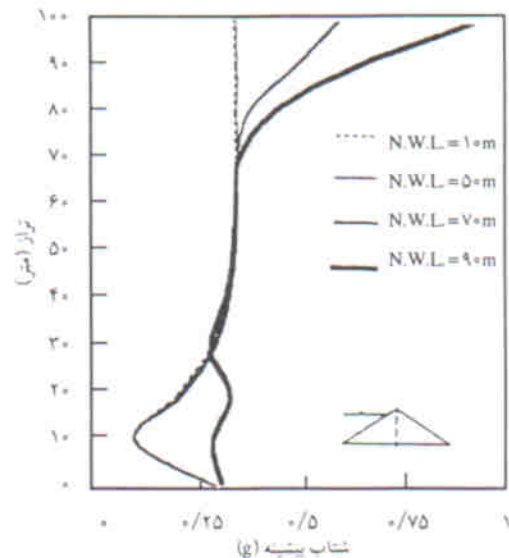
چنان‌که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، شتاب القایی در ترازهای آبیگیری  $70$  تا  $90$  متر در بخش یک‌سوم فوقانی سد، به‌ویژه در



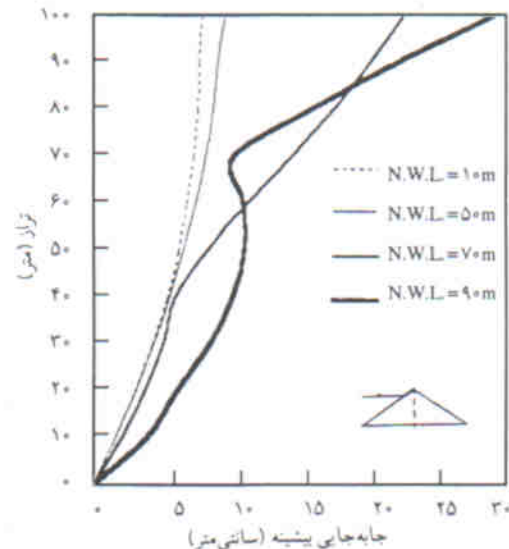
شکل ۵. توزیع حداکثر شتاب افقی در محور بالادست سد.



شکل ۶. توزیع حداکثر شتاب افقی در محور پایین‌دست سد.



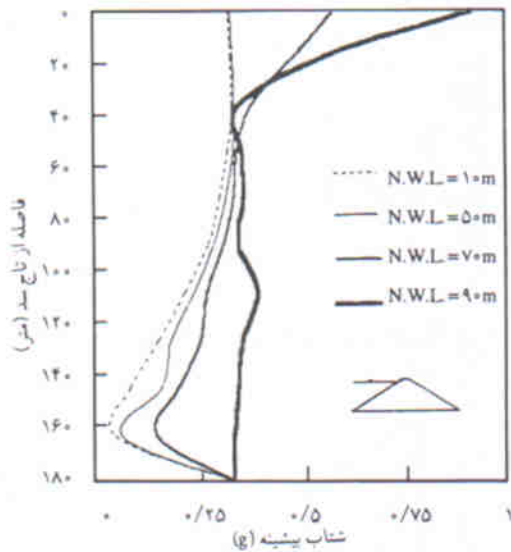
شکل ۳. توزیع حداکثر شتاب افقی در محور مرکزی سد.



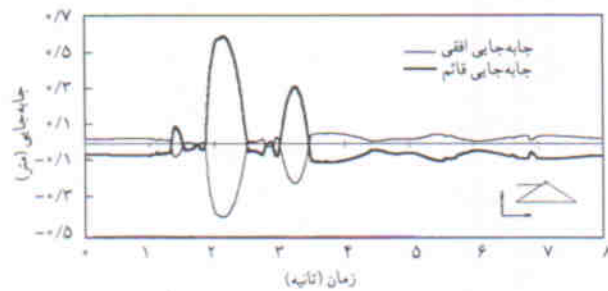
شکل ۴. توزیع حداکثر تغییر مکان افقی در محور مرکزی سد.

مجاورت تاج، تشدید می‌شود، به‌طوری‌که ضریب تشدید در تاج نسبت به سنگ بستر در دو حالت مذکور به  $1/73$  و  $2/65$  می‌رسد. چنین پدیده‌ی در تراز آبیگیری پائین‌تر ( $10$  و  $50$  متر) قابل مشاهده نیست. علت عمده‌ی این اختلاف را می‌توان به تغییر مود نوسانی غالب بر اثر افزایش ارتفاع آبیگیری مخزن مربوط دانست. چنان‌که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع آب تا  $70$  و  $90$  متر، شکل کلی تغییر مکان افقی سد تغییر کرده و با شرایط مشابه مود اول ارتعاشی جسم یک درجه آزادی متفاوت می‌شود.

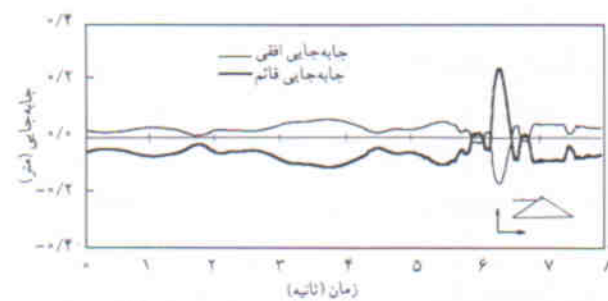
در ترازهای آبیگیری  $10$  و  $50$  متر، سد شبیه یک سازه‌ی یک درجه آزادی عمل می‌کند و حداکثر تغییر مکان افقی تاج سد به حدود



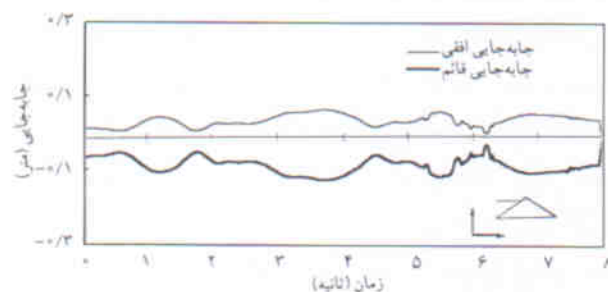
شکل ۷. توزیع حداکثر شتاب افقی در امتداد دال بتنی رویه.



شکل ۸. تاریخچه‌ی تغییر مکان نقطه‌ی بالایی دال در تراز آبگیری ۱۰ متر.



شکل ۹. تاریخچه‌ی تغییر مکان نقطه‌ی بالایی دال در تراز آبگیری ۵۰ متر.



شکل ۱۰. تاریخچه‌ی تغییر مکان نقطه‌ی بالایی دال در تراز آبگیری ۷۰ متر.

۸ سانتی‌متر می‌رسد. با افزایش ارتفاع آب، تغییر مکان تاج به شدت افزایش یافته و مقدار آن همراه با تغییر توزیع جابه‌جایی در ارتفاع سد تا حدود ۳۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۵ و ۶، توزیع حداکثر شتاب افقی در محورهای قائم بالادست و پائین‌دست سد مشاهده می‌شود، چنانکه محور بالادست به فاصله‌ی ۷۵ متر از پاشنه‌ی سد، و محور پائین‌دست به فاصله‌ی ۷۵ متر از پنجه‌ی سد در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ ملاحظه می‌شود که الگوی توزیع شتاب در ترازهای آبگیری ۱۰، ۵۰ و ۷۰ متر شبیه یکدیگرند و تشدید قابل توجهی در آنها مشاهده نمی‌شود.

در تراز آبگیری ۹۰ متر، الگوی توزیع شتاب تغییر کرده و تشدیدی مختصر در حدود ارتفاع ۲۰ متری از کف ملاحظه می‌شود (ضریب تشدید معادل ۱/۱۶). الگوی توزیع شتاب در محور پائین‌دست مطابق شکل ۶ به صورت نسبی مستقل از ارتفاع آبگیری مخزن است که این امر با توجه به حجم زیاد مصالح سنگریز در بدنه‌ی سد و عدم تأثیر قابل ملاحظه‌ی آبگیری در بخش پائین‌دست محور مرکزی توجیه می‌شود. همچنین مطابق این شکل، انتظار پدیده‌ی تشدید قابل ملاحظه‌ی راد در بخش پائین‌دست سد نداریم.

### پاسخ لرزه‌ی دال بتنی

مهم‌ترین نتایج حاصل از تحلیل لرزه‌ی برای بخش دال بتنی رویه در شکل‌های ۷ تا ۱۲ ملاحظه می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، تراز آبگیری مخزن روی بیشینه‌ی شتاب القایی در امتداد دال بتنی اثر قابل ملاحظه‌ی دارد - به طوری کلی، با افزایش ارتفاع آبگیری شتاب ثبت شده بیشتر می‌شود و حداکثر تشدید در مجاورت تاج سد و نظیر تراز آبگیری حداکثر (معادل ۹۰ متر) اتفاق می‌افتد. در این حالت ضریب تشدید در مجاورت تاج به ۲/۶۷ می‌رسد. ایجاد این تشدید، به‌ویژه از نظر پتانسیل بروز خرابی دیواره‌ی نگهدارنده‌ی مجاور تاج سد اهمیت دارد و می‌تواند منجر به خرابی این دیوار و کاهش فاصله‌ی آزاد بین تراز بیشینه‌ی آب و تاج سد شود.

در شکل‌های ۸ تا ۱۱ تاریخچه‌ی تغییر مکان نقطه‌ی بالایی دال (نقطه‌ی مجاور تاج سد) در ترازهای آبگیری مختلف و در ضمن وقوع زلزله ارائه شده است. چنانکه در شکل ۸ مشاهده می‌شود در تراز آبگیری ۱۰ متر به دلیل فقدان فشار هیدروستاتیکی آب بر روی بخش عمده‌ی دال بتنی، پتانسیل برخاست دال از روی بدنه وجود دارد و نقطه‌ی فوقانی دال تا حدود ۶۰ سانتی‌متر به طرف بالا و حدود ۴۰ سانتی‌متر به طرف بالادست تغییر مکان می‌دهد (حدود ۷۰ سانتی‌متر عمود بر شیب بالادست). در تراز آبگیری ۵۰ متر (شکل ۹)

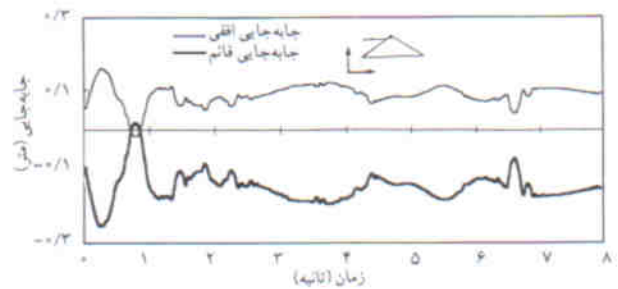
در شکل ۱۲ الگوی توزیع مقدار حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در دال بتنی رویه ارائه شده است. چنانکه مشاهده می شود، الگوی تغییرات برای ترازهای آبیگری ۵۰، ۷۰ و ۹۰ متر مشابه است و با افزایش ارتفاع آب، مقدار نیروی محوری حداکثر که در فاصله ۱۰۰ تا ۱۳۰ متری تاج سد ایجاد می شود، به تدریج افزایش می یابد. در تراز آبیگری ۱۰ متر الگوی تغییرات نیروی محوری عوض می شود و مقدار بیشینه نیروی محوری در مجاورت دال بتنی پنجه (در پای سد) اتفاق می افتد. اگر بیشینه تنش کششی قابل تحمل برای بتن حدود ۳ تا ۴ مگاپاسکال فرض شود، مقدار نیروی محوری حداکثر تا قبل از ایجاد ترک در بتن به حدود ۱/۲ مگانیوتن بالغ می شود. در نتیجه، طبق شکل ۱۲، برای جلوگیری از ایجاد ترک در بتن تحت اثر لرزش ناشی از زلزله، لازم است تمهیدات خاصی مانند افزایش تسلیح بتن دال رویه در فاصله ۷۰ تا ۱۵۰ متری تاج سد یا افزایش ضخامت دال در این محدوده (تا حدود ۵۰ سانتی متر) به کار گرفته شود.

مجموعه نتایج به دست آمده در این بررسی، به ویژه نتایج نظیر شرایط مخزن پر، با نتایج به دست آمده توسط هان و اودین (۱۵ و ۱۶) تطابق دارد و صحت نتایج را تأیید می کند. از حیث نتایج به دست آمده در سایر شرایط آبیگری مخزن، به دلیل فقدان تحقیقات مدون در مورد این مسئله، تأیید نتایج حاصل از این بررسی از موضع انطباق با بررسی های گذشته مقدور نبوده و به ادامه تحقیقات در آینده موکول خواهد شد.

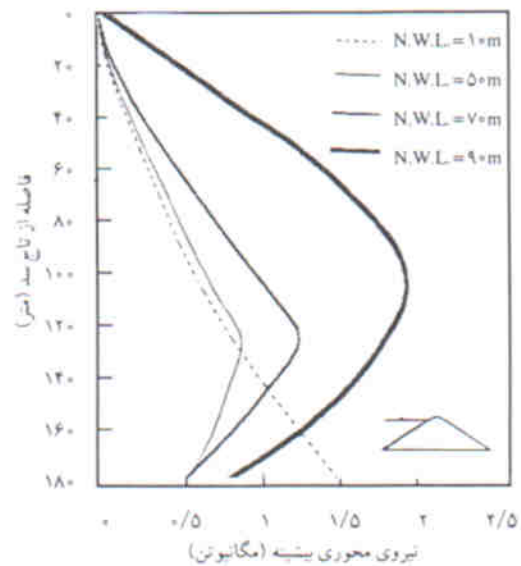
### نتیجه گیری

در این نوشتار، برخی از نتایج تحلیلی به دست آمده در مورد رفتار لرزه‌ی سدهای CFR ارائه شد. در این بررسی ها، با استفاده از مدل سازی اجزای محدود در حالت کرنش مسطح، مقطع عمومی یک سد سنگریز با رویه بتنی (CFR) بر اساس رفتار کشسان خمیری حالت بحرانی مصالح سنگریز و رفتار کشسان خطی دال بتنی رویه تحت اثر رکورد شتاب الاسترو مورد تحلیل واقع شد. مهم ترین نتایج حاصل از این مطالعات را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱. با افزایش تراز آبیگری مخزن در سدهای CFR، شتاب القایی در بخش یک سوم فوقانی و به ویژه در تاج سد تشدید می شود و ضریب تشدید بین ۱/۷ تا ۲/۷ حاصل می شود. در ترازهای آبیگری پایین تر از حالت مخزن نیمه پر پدیده تشدید مشاهده نمی شود.
۲. در ترازهای آبیگری بالاتر از شرایط مخزن نیمه پر، طبیعت جابه جایی های افقی سد تغییر کرده و مود نوسانی غالب از شرایط



شکل ۱۱. تاریخچه تغییر مکان نقطه بالایی دال در تراز آبیگری ۹۰ متر.



شکل ۱۲. توزیع نیروی محوری بیشینه در دال بتنی رویه.

مقدار تغییر مکان کاهش می یابد و به حدود ۲۵ سانتی متر عمود بر شیب بالادست سد می رسد.

با افزایش ارتفاع آب مخزن به ۷۰ متر (شکل ۱۰)، پتانسیل برخاست نقطه فوقانی دال از بین می رود و اثر قابل توجه وزن آب مانع از بلند شدن دال از روی بدنه می شود. افزایش بیشتر ارتفاع آب در مخزن سد گرچه باعث افزایش وزن مؤثر روی دال بتنی می شود، از طرف دیگر طبق شکل ۷ منجر به تشدید شتاب در مجاورت تاج و افزایش شتاب القایی در دال بتنی می شود، چنانکه مطابق شکل ۱۱ در تراز آبیگری ۹۰ متر بار دیگر پتانسیل برخاست در دال ایجاد می شود و مقدار آن به حدود ۵ سانتی متر عمود بر شیب بالادست بالغ می شود. در واقع افزایش ارتفاع آب در مخزن سد اثر دوگانه‌ی بر دال بتنی دارد، به طوری که از یک سو منجر به افزایش شتاب القایی در تاج می شود و از سوی دیگر وزن مؤثر بر روی دال را افزایش می دهد. در تراز آبیگری حدود ۷۰ متر، این دو عامل اثر یکدیگر را خنثی کرده و پدیده برخاست به طور کامل محو می شود.

۴. افزایش ارتفاع آب در مخزن سد اثر دوگانه‌یی بر دال بتنی دارد چنانکه از یک طرف موجب تشدید شتاب در مجاورت تاج می‌شود، و از سوی دیگر وزن مؤثر بر روی دال را افزایش داده و از برخاستن آن جلوگیری می‌کند. در تراز آبگیری «۷ متر این دو پدیده اثر یکدیگر را خنثی کرده و برخاست دال مشاهده نمی‌شود اما در تراز آبگیری کمتر و بیشتر از این حد پدیده‌ی برخاست به صورت قوی (حدود «۷ سانتی‌متر) یا ضعیف (حدود ۵ سانتی‌متر) مشاهده می‌شود.

مشابه مود ارتعاشی اول سیستم یک درجه آزادی دور می‌شود. بیشینه‌ی جابه‌جایی افقی در تاج سد به حدود ۲۸ سانتی‌متر در شرایط آبگیری مخزن پر بالغ می‌شود.

۳. با افزایش ارتفاع آب در مخزن سد، شتاب القایی در دال بتنی رویه به‌ویژه در مجاورت تاج سد افزایش می‌یابد و در تراز بیشینه‌ی آب، ضریب تشدید به ۲/۶۷ می‌رسد. این شتاب القایی می‌تواند منجر به خرابی دیواره‌ی نگهدارنده و کاهش ارتفاع آزاد آب در مخزن سد شود.

#### پانوش

1. Concrete faced rockfill dam
2. uplift
3. Drucker - Prager
4. critical state model
5. parapet wall

#### منابع

1. Seed, H. B., Seed, R. B., Lai, S.S., and Khamenehpour, B. "Seismic design of concrete-faced rockfill dams", Proc. of symp. on Concrete-Face Rockfill Dams - Design, Construction and Performance, ASCE, New York, N. Y., PP 459-478, (1985).
2. Bureau, G., Volpe, R.L., Roth, W., and Udaka, T. "Seismic analysis of concrete face rockfill dams", Proc. of symp. on Concrete-Face Rockfill Dams- Design, Construction and Performance, ASCE, New York, N.Y., PP 479-508, (1985).
3. Sherard, J.L., and Cooke, J.B., Concrete faced rockfill dams, I. Assesment and II. Design, *J. of Geotech. Engrg., ASCE*, 113

(10), pp 1096-1132, (1987).

4. Han, G., Kong, X., and Li, J., Dynamic experiments and numerical simulations of model concrete-faced rockfill dams, Proc. of IX World Conf. on Earthq. Engrg., VI, Tokyo-Kyoto, Japan, (1988).
5. Uddin, N., and Gazetas, G., Dynamic response of concrete - faced rockfill dams to strong seismic excitations, *J. of Geotech. Engrg. ASCE*, 121 (2), pp 185-196, (1995).
6. حائری، سید محسن و کیهانی، رضا. «آنالیز دینامیکی سدهای سنگریز با رویه‌ی بتنی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح». مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، جلد ۳، تهران، صص ۹۵ تا ۱۰۴، (۱۳۷۸).
7. Pyke, R., Nonlinear Soil Models for Irregular Cyclic Loading, *J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 105 (GT6), pp. 715-726, (1979).
8. Desai, C.S. and Siriwardane, H.J., Constitutive laws for engineering materials, Prentice-Hall Inc, New Jersey, (1984).
9. Britto, A.M., and Gunn, M.J., Critical state soil mechanics via finite elements, John Wiley & Sons, New York, (1987).
10. ANSYS user manual, 2nd Edition, SAS IP, Inc., (1996).