

تأثیر فشار هیدرودینامیکی مخزن سد ناشی از زلزله در نتایج تحلیل دینامیکی سه بعدی سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی

آراز نامی شب‌خانه^۱

علی اصغر میرقاسمی^{۲*}

چکیده

سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی جزو سازه‌هایی هستند که به دلیل مزایای شناخته شده آنها امروزه بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه هنگام وقوع زلزله‌های بزرگ، فشار هیدرودینامیکی مقادیر قابل توجهی خواهد داشت، اعمال فشار هیدرودینامیکی مخزن سد ناشی از زلزله و بررسی اثرات آن در مدل‌های سه بعدی هدف اصلی این پژوهش می‌باشد. در این پژوهش مدل سه بعدی المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس ساخته شده است، همچنین تحلیل‌ها مربوط به سدهایی با ارتفاع ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ متر واقع در دره با نسبت طول تاج سد به ارتفاع سد $(L/H)=1$ و $(L/H)=3$ است. بعلاوه برای بررسی اثر زلزله، ورودی شتاب بیشینه مقیاس شده‌ی $0.6g$ استفاده شده است. مدل الاستوپلاستیک خطی موهر-کولمب برای بدنه‌ی سنگریزه‌ای، مدل الاستیک برای پی و تکیه‌گاه سنگی و مدل بتن پلاستیک آسیب‌دیده برای رویه‌ی بتنی در نظر گرفته شده است. برای اعمال فشار هیدرودینامیکی از مدل‌سازی آب مخزن بصورت المان‌های آکوستیک در محیط لاگرانژی استفاده شده است. اعمال فشار هیدرودینامیکی باعث افزایش مقادیر نشست به میزان ۵ الی ۸۰ درصد، کرنش پلاستیک به میزان ۳۷ درصد، تنش فشاری رویه به میزان ۲۰ الی ۵۷ درصد و شتاب حداکثر تاج سد تا ۲ برابر در برخی از سدهای تحلیل شده، می‌گردد. همچنین اعمال فشار هیدرودینامیکی باعث افزایش تنش کششی رویه و کاهش تغییر مکان افقی تاج و بدنه سد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی

سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی، فشار هیدرودینامیکی، تحلیل دینامیکی، تحلیل سه بعدی، زلزله

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تهران.

^{۲*} استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران. aghasemi@ut.ac.ir

مقدمه

امروزه برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه، پاسخ دینامیکی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای عموماً به کمک تحلیل دینامیکی دو بعدی مقطع عرضی آنها بررسی می‌شود. با توجه به اینکه مجموعه‌ی سد، پی و تکیه‌گاه‌های آن و آب مخزن، ماهیت فیزیکی سه بعدی دارند، لذا در این پژوهش مدل‌سازی و تحلیل به شکل سه بعدی انجام شده است. همچنین بدلیل اینکه در اکثر پژوهش‌های گذشته از اثرات فشار هیدرودینامیکی مخزن تحت بارهای لرزه‌ای صرف‌نظر شده است، لازم است مقادیر فشار هیدرودینامیکی و اثرات آن اعمال شده و با حالت‌هایی که این فشار و اثراتش در نظر گرفته نمی‌شوند، مقایسه گردد.

(بایراکتار^۱ و همکاران، ۲۰۰۹) با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود، به مقایسه تاثیر زلزله‌های نزدیک گسل و دور از گسل بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سدها با در نظرگیری اندرکنش سد مخزن پی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که جهت حصول نتایج واقعی و دقیق، تحلیل لرزه‌ای سازه‌های مهم مثل سد، بایستی بر اساس زلزله نزدیک گسل انجام شود. (ژانگ^۲ و ژانگ، ۲۰۰۹) با استفاده از المان اندرکنش آسیب الاستوپلاستیک و با استفاده از تحلیل اجزای محدود، اندرکنش بین رویه بتنی و لایه سنگریزه‌ای را مدل‌سازی نمودند. آنها با به کارگیری المان اندرکنش مذکور در مدل اجزای محدود^۳ CFRD، به این نتیجه رسیدند که در نظر گرفتن اندرکنش بین دال رویه و بدنه منجر به تغییرات اساسی در نیروهای ایجاد شده در دال رویه هنگام آبیگری و زلزله می‌شود. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از یک لایه قیری بین دال رویه و سنگریزه بدنه، تاثیر مهمی روی پاسخ لرزه‌ای رویه دارد. (بایراکتار و همکاران، ۲۰۱۰) با بررسی اجزای محدود دوبعدی، رفتار رویه بتنی سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی تورول^۴ به ارتفاع ۱۴۲ متر واقع در ترکیه را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش تاثیر سطح آب مخزن در دو حالت تحلیل خطی و غیرخطی با در نظر گرفتن اندرکنش اصطکاکی بین رویه و

بدنه و نیز اثرات هیدرودینامیکی آب مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین نتایج این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- اثرات هیدرودینامیکی آب مخزن موجب افزایش مقادیر تغییر مکان‌ها، تنش‌ها و شتاب رویه بتنی می‌شود.
 - بر اساس نتایج تحلیل خطی، حداکثر مقادیر تنش رویه در نزدیکی پی سد مشاهده می‌شود و در این ناحیه مقادیر تنش فشاری حداکثر از مقادیر تنش کششی حداکثر بیشتر است.
 - فشار هیدرودینامیکی آب مخزن موجب بزرگتر شدن ناحیه جداشدگی می‌شود.
- (مهابادی و همکاران، ۲۰۱۴) مدل المان محدود سه بعدی از یک CFRD به ارتفاع ۱۱۰ متری ارائه کردند و تحلیل‌های استاتیکی را جهت مقایسه تغییرشکل‌ها و تنش‌ها در دو حالت بتن رویه‌ی یکپارچه و بتن به همراه درزه‌های قائم انجام دادند. رفتار مصالح را الاستیک در نظر گرفتند و نتایج زیر حاصل شد:
- تنش‌های رویه‌ی بتنی در پایان آبیگری نشان می‌دهد تنش‌های اصلی کششی تفاوت ۱۴ درصدی و تنش‌های اصلی فشاری تفاوت ۶ درصدی بین دو حالت ذکر شده را خواهند داشت. فشار نرمال هیدرواستاتیک اعمال شده به رویه منجر به مقاومت برشی بالاتر در محل تماس بین رویه و شیب بالادست در عمق‌های بیشتر می‌شود.
 - (یوان^۵ و همکاران، ۲۰۱۳) اقدام به ساخت و آزمایش مدل کوچکی از CFRD و ECRD^۶ بر روی میز لرزه کردند. نتایج حاصله به شرح زیر است:
 - کاهش فرکانس اصلی سد برای CFRD کمتر از ECRD است، که این نشان دهنده‌ی آسیب‌های کمتر CFRD نسبت به ECRD در طول زلزله است.
 - فرکانس و شتاب حداکثر زلزله‌ی ورودی بر پاسخ سد تاثیر گذار است. با افزایش شتاب حداکثر، ضریب تشدید در هر دو سد کاهش می‌یابد.

⁴ Torul

⁵ Yuan, L.

⁶ Earth Core Rockfill Dam

¹ Bayraktar

² Zhang, G., & Zhang, J. M.

³ Concrete Face Rockfill Dam

اتفاق می‌افتد که این نتیجه با مدل معادل خطی (داکولاس^۴، ۲۰۱۲) مطابقت دارد.

• میزان نشست و جابجایی افقی تاج سد در پایان زلزله ۸۰ و ۳۰ سانتی متر شد که مقادیر بدست آمده نسبت به اندازه‌گیری‌های میدانی بعد از زلزله خطای کمی داشتند. میزان کرنش برشی پلاستیک در گوه‌ای کاملاً سطحی در ترازهای بالایی سد از ۳ درصد هم فراتر رفت که این به دلیل لغزش نسبی رویه‌ی بتنی در آن ناحیه بود.

(لیو و چی^۵، ۲۰۱۳) با استفاده از نتایج ابزار دقیق سد زیپینگپو و داده‌های مربوط به نشست‌های ماندگار بدنه سد، به بررسی رفتار لرزه‌ای سد فوق تحت زلزله سال ۲۰۰۸ ونچوان^۶ پرداختند. آنها با استفاده از روش اجزای محدود، با وارد کردن مقادیر تغییر مکان پسماند در نقاط مختلف بدنه سد، به محاسبه میدان‌های تغییر مکان، کرنش برشی و کرنش حجمی، مبادرت ورزیدند. بر اساس نتایج این پژوهش موارد زیر قابل استنتاج می‌باشد:

- حداکثر نرخ تغییر مکان قائم بدنه سد در فاصله $\frac{2}{3}$ ارتفاع سد از تاج، اتفاق می‌افتد.
- تغییر شکل‌های اتساعی روی شیب‌های بالادست و پایین‌دست بدنه سد، در فاصله ۲۵-۳۰ متری از تاج رخ می‌دهد.
- تکیه‌گاه‌های جانبی سد، در شرایط زلزله تحت کشش قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر حین زلزله، کل بدنه سد به سمت مرکز دره منقبض می‌گردد.
- (ونگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۴) با مطالعه اجزای محدود سه بعدی سد گنگ باکسیا^۸ به ارتفاع ۱۳۲/۲ متر، به بررسی ترک‌های رویه بتنی ناشی از دو عامل تنش‌های سازه‌ای (مثل نشست بدنه و آبگیری) و تنش‌های حرارتی ناشی از تغییرات دمایی در طول سال، پرداختند. نتایج اصلی این پژوهش عبارتند از:
- تنش‌های ناشی از تغییرات دمایی، نقش اصلی را در

• حداکثر شتاب در ECRD در تاج سد ولی در CFRD در ۰/۶ تا ۰/۹ ارتفاع سد اتفاق می‌افتد.

• جابجایی افقی پسماند برای CFRD کمتر از ECRD است. برای هر دو لغزش‌های سطحی در شیب پایین دست رخ می‌دهد ولی شتاب بحرانی لغزش برای CFRD بیشتر از ECRD است که نشان از عملکرد بهتر CFRD دارد.

(یالین آریجی^۱، ۲۰۱۳) برای مدل دو بعدی سد CFRD کوکالا در ترکیه به ارتفاع ۸۳ متر، عملکرد رویه‌ی بتنی را در شرایط استاتیکی و دینامیکی بررسی کرد. این محقق با تمرکز بر تغییرات عوامل مختلف تاثیرگذار در عملکرد رویه، ترک‌خوردگی در رویه را به عنوان عامل ایجاد ضعف در سد معیار قرار داد. نتایج این پژوهش در ادامه آمده است:

- ترک‌خوردگی در زلزله از پایین‌ترین ترازهای رویه شروع و تا نصف ارتفاع رویه ادامه می‌یابد.
- میزان مقاومت فشاری رویه‌ی بتنی و پوشش آرماتورهای مدفون در رویه، کمترین اثر را در عملکرد رویه هنگام زلزله دارد. دوام بتن رویه اهمیت بیشتری نسبت به این عوامل دارد و نگران‌کننده‌تر است.
- نشست بدنه در زلزله منجر به افزایش تنش فشاری در رویه‌ی بتنی در $\frac{4}{5}$ تراز پایینی و بسته شدن ترک‌ها می‌شود. هرچند این تغییر شکل در درزه‌ها می‌تواند به کماتورها منجر شود.

(زو^۲ و همکاران، ۲۰۱۳) در پژوهش خود پاسخ دینامیکی سد ۱۵۶ متری ساخته شده‌ی زیپینگپو^۳ را بررسی کردند. این سد نمونه‌ای از سدهای بزرگ جهان است که تحت تاثیر زلزله‌ی بزرگ قرار گرفته است. زلزله‌ی ۸ ریشتری ونچوان در سال ۲۰۰۸ در محل این سد اتفاق افتاد. نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- شتاب برای تاج سد به مقادیر $g \frac{1}{15}$ (۲ برابر شتاب ماکزیمم ورودی) رسید و توزیع این شتاب در مقطع میانی به این صورت بود که مقادیر ماکزیمم در تاج سد

⁵ Liu, Z., & Chi, S

⁶ Wenchuan

⁷ Wang, Z.

⁸ Gongboxia

¹ Yalin arici

² Zou, D.

³ Zipingpu

⁴ Dakoulas

- تحت بارهای لرزه‌ای عمودی، فشار هیدرودینامیکی با افزایش ضریب بازتاب مرز مخزن، تا حد قابل توجهی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نادیده گرفتن تراکم‌پذیری آب مخزن ممکن است منجر به خطای قابل توجه فشار هیدرودینامیکی شود.
 - بنابراین ملاحظه می‌گردد که در اکثر پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی تحلیل دینامیکی سدهای سنگریزه‌ای با رویه‌ی بتنی از اثرات فشار هیدرودینامیکی مخزن سد در هنگام زلزله صرف‌نظر شده است. مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی سه بعدی با مخزن پر با اعمال فشارهای هیدرودینامیکی و بدون اعمال فشارهای هیدرودینامیکی و بررسی تاثیر فشارهای هیدرودینامیکی روی نتایج، تاکنون مورد پژوهش قرار نگرفته‌اند. لذا در پژوهش حاضر به بررسی این مهم پرداخته شده است.
- مراحل مدل‌سازی سه بعدی**
- هندسه سدها و خصوصیات مدل‌های عددی**
- در تحلیل‌های انجام شده فرض شده است که سد بر روی پی سنگی همگن با کیفیت بالا قرار گرفته است. در تمام تحلیل‌ها عرض تاج برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. شیب بدنه در بالادست و پایین‌دست سد ۱/۴ (قائم: افقی) می‌باشد و ضخامت رویه بتنی بر اساس رابطه (۱) در نظر گرفته شده است (ICOLD, 2004).
- $$t = 0.3 + 0.002 H \text{ (m)} \quad (1)$$
- ناحیه 3B و 3C نیز به صورت شکل (۱) از هم تفکیک شده‌اند. برای انتقال مناسب فشار آب به پی سد باید ناحیه 3B حداقل تراکم‌پذیری را داشته باشد تا از نشست دال بتنی جلوگیری شود. غالباً مصالح با ضخامت ۱ متر ریخته و توسط غلتک ارتعاشی متراکم می‌شوند. این ناحیه نقش اصلی را در باربری سد ایفا می‌کند. ناحیه 3C تاثیر قابل ملاحظه‌ای در انتقال بار ندارد، لذا در لایه‌های ضخیم‌تر ۱/۵ تا ۲ متری متراکم می‌شوند. در ناحیه 3C می‌توان قطعات درشت سنگ را که در بخش‌های دیگر قابل استفاده نیستند، بکار برد.
- ایجاد ترک در رویه بتنی سد گنگ باکسیا را دارند. نواحی بالای رویه که در مجاورت سطح آب قرار دارند به دلیل گرادیان دمایی بالای این ناحیه در زمستان، بیشترین ترک‌خوردگی را متحمل می‌شوند.
 - تنش‌های کششی ایجاد شده در رویه ناشی از نشست بدنه و فشار آب مخزن، عمدتاً در نواحی تکیه‌گاهی می‌باشد، در حالی که در نواحی مرکزی سد، شاهد تنش‌های فشاری در رویه می‌باشیم.
 - (شو^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). یک تحلیل سه بعدی از یک سیستم مخزن CFRD در معرض بارگذاری زلزله در جهت های مختلف برای بررسی توزیع فشار هیدرودینامیکی و مکانیسم تأثیر آن بر تنش دینامیکی در رویه بتنی انجام دادند. فشار هیدرودینامیکی یک مخزن تراکم‌ناپذیر در قالب یک ماتریس کامل با جرم اضافه شده بیان شده است. برخی از نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:
 - حداکثر فشارهای هیدرودینامیکی مشاهده شده در جهت قائم، بیش از دو برابر فشارهای لرزه‌ای در دو جهت دیگر است.
 - تحت بارهای لرزه‌ای در جهت بالادست-پایین‌دست، فشار هیدرودینامیکی تأثیر آشکاری بر تنش دینامیکی در دال‌ها می‌گذارد. تحت بارهای لرزه‌ای در جهت قائم، فشار هیدرودینامیکی تأثیر زیادی بر تنش دینامیکی در دال‌ها در طول جهت شیب می‌گذارد.
 - (شو و همکاران، ۲۰۱۸) تجزیه و تحلیل اندرکنش دینامیکی بین سد CFR به ارتفاع ۳۰۰ متر انجام داده‌اند. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی به دست آمده از شرایط مختلف مخزن، تأثیر تراکم آب مخزن و لایه جذب رسوب در قسمت زیرین مخزن و شیب دره مخزن روی فشار هیدرودینامیکی و تنش دینامیکی در رویه بتنی تحت بار لرزه‌ای در جهات مختلف را بررسی کردند. برخی از نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:
 - تأثیر مرز جذب مخزن بر تنش دینامیکی در رویه بتنی ناچیز است و تراکم‌پذیری آب مخزن تنها با یک خطای کوچک در تنش دینامیکی رویه بتنی تحت بار لرزه‌ای در طول جهت بالادست-پایین‌دست همراه است.

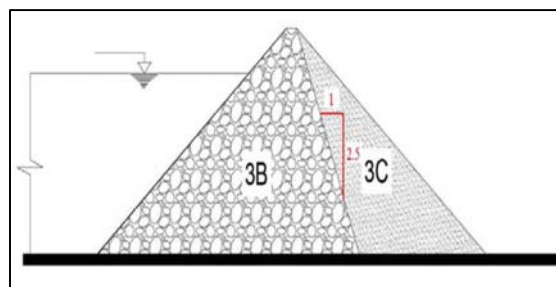
هیدرودینامیکی (علاوه بر فشار هیدرواستاتیکی) در ۳ ارتفاع مختلف (۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰) و شکل ۲ دره مختلف $L/H=1$ و $L/H=3$ در نظر گرفته شده است. در این پژوهش اشکال و نمودارها مربوط به سد به ارتفاع ۱۰۰ متر واقع در دره مثلثی می باشد و نتایج مربوط به سدهای با ارتفاع ۷۰ و ۱۳۰ متر و دره ی با نسبت $L/H=3$ بصورت خلاصه در جدول شماره (۳)، (۴) و (۵) آورده شده است.

خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح

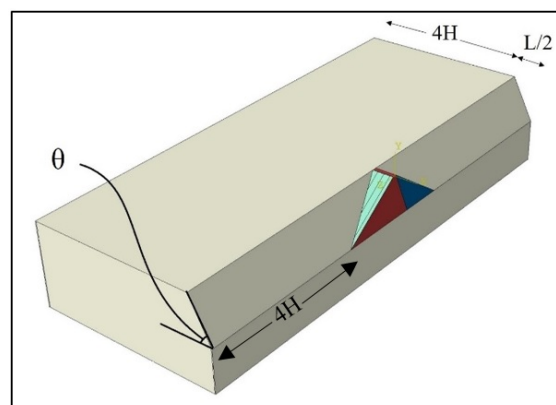
با توجه به ناحیه بندی انتخاب شده برای بدنه سنگریزه ای (شکل (۱))، در نواحی 3B و 3C از مدل رفتاری موهر-کولمب^۱ با پارامترهای متفاوت استفاده شده است. این مدل بدلیل سادگی و کاربرد گسترده ای که در مسائل ژئوتکنیکی دارد، مورد استفاده قرار گرفته است. مدل الاستیک برای پی و مدل بتن پلاستیک آسیب دیده برای رویه ی بتنی در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری آسیب پلاستیک جهت مدل سازی بارگذاری رفت و برگشتی توسط (لی و فنوس^۲، ۱۹۹۸) ارائه گردیده است. این مدل تابع سرعت بارگذاری بوده و اثر نرم شوندگی کرنشی و همچنین تفاوت در رفتار بتن آسیب دیده در کشش و فشار در نظر می گیرد (شکل (۳)). مدل فوق با اعمال تاثیر ترک در بتن بر کاهش مدول الاستیک و بازیابی مدول الاستیک پس از بسته شدن ترک، رفتار واقعی بتن را شبیه سازی می کند. پارامترهای ورودی این مدل شامل چگالی بتن، مدول الاستیک بتن، ضریب پواسون بتن و نمودارهای تنش-کرنش برای رفتار غیر خطی کششی و فشاری می باشد.

در مقاله حاضر مقاومت کششی بتن $2/9$ مگاپاسکال و مقاومت فشاری آن $24/1$ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. همچنین آب از دیدگاه لاگرانژی مدلسازی شده است. در این حالت سیال در واقع جامدی با مدول برشی صفر فرض می شود. بنابراین سیال نیز مانند سازه جابجایی های گرهی دارد. در جدول (۱) پارامترهای در نظر گرفته شده برای مدل ها ارائه گردیده است.

چسبندگی برای هر دو ناحیه ی 3B و 3C برابر با صفر بوده و همچنین مدول بالک در نظر گرفته شده برای آب مخزن



شکل (۱): ناحیه بندی در نظر گرفته شده برای بدنه سد



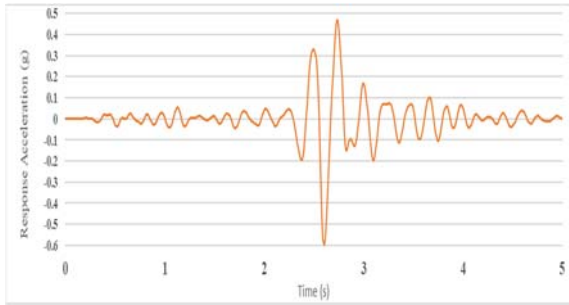
شکل (۲): شمای کلی هندسه سد

عمق آب در مخزن برابر ۹۵٪ ارتفاع سد فرض شده است. ارتفاع سدهای مورد مطالعه برابر ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ متر می باشد. مدل سازی بصورت اعمال فشارهای هیدرواستاتیکی صورت گرفته و همچنین جهت اعمال فشار هیدرودینامیکی، آب مخزن بصورت المان های آکوستیک در نظر گرفته شده است. همچنین در شکل (۲) متغیرهای هندسی مورد نظر نشان داده شده است. برای ساخت هندسه کامل دره نیاز به پارامتر دیگری داریم که زاویه تکیه گاه با افق θ می باشد. برای این زاویه مقدار ۴۵ و ۶۳ درجه فرض شده است. تحلیل سه بعدی در دره های با نسبت طول سد به ارتفاع سد ($L/H=1$ و $L/H=3$) مدل سازی شده است. کلیه تحلیل ها با نرم افزار آباکوس انجام شده است. همچنین در تحلیل ها جهت کاهش هزینه محاسباتی تنها نیمی از جسم سد، مخزن، پی و تکیه گاه مدلسازی شده است. این فرض با توجه به اینکه جهت اعمال تاریخچه شتاب زلزله تنها در جهت محور رودخانه می باشد و تکیه گاه چپ و راست نیز نسبت به صفحه ی میانیشان متقارن هستند، در نتایج تاثیر گذار نمی باشد. بدین ترتیب در تحلیل سه بعدی یک هندسه صرفا با اعمال فشار هیدرواستاتیکی و یک هندسه با اعمال فشار

² Lee, J., & Fenves, G. L.

¹ Mohr-Coulomb

نگاشت مورد استفاده در تحلیل‌ها نشان داده شده است.



شکل (۴): شتاب نگاشت مورد استفاده با شتاب حداکثر ۰/۶g

شرایط مرزی

رویکرد اصلی در اکثر مدل‌سازی‌های مسائل دینامیکی که در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از مرزهای جاذب در مدل است. یکی از این مرزها توسط (لیسمر و کوهلمیر^۲، ۱۹۶۹) ارائه شده است. آنها برای جذب امواج در مرزهای مدل از دو میراگر عمود بر هم که یکی موج P و دیگری موج S را جذب می‌کند، استفاده کرده‌اند. ضریب میراگر در مرزها به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$c = \rho v A \quad (2)$$

که در رابطه بالا ρ چگالی خاک، v سرعت موج برشی یا فشاری و A اندازه المان تحت تأثیر در نقطه اتصال میراگر است.

سرعت موج برشی و موج فشاری نیز به ترتیب از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه می‌باشند.

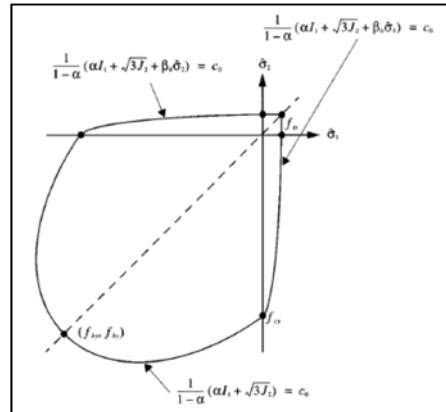
$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}} \quad E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (4)$$

که در روابط بالا V_s سرعت موج برشی، V_p سرعت موج فشاری، ρ چگالی خاک، G مدول برشی، E مدول الاستیسیته، ν نسبت پواسون، E_{oed} مدول ادئومتری خاک می‌باشد.

بنابراین می‌توان با محاسبه سرعت موج فشاری، ضریب میراگر در جهت عمود بر مرز و با محاسبه سرعت موج برشی، ضریب میراگر در جهت مماس بر مرز را برای جذب امواج در

۲/۰۷ GPa می‌باشد. چگالی آب مخزن برابر با ۱۰۰۰ kg/m^3 در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): سطح تسلیم بتن در مدل رفتاری آسیب پلاستیک (لی و فنوس، ۱۹۹۸)

جدول (۱): پارامترهای فرض شده برای نواحی بدنه سد

ناحیه	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک (درجه)	زاویه اتساع (درجه)
بتن رویه	۲۶۴۳	۳۱۰۲۷	۰/۲	-	-
پی و تکیه‌گاه	۲۵۰۰	۲۰۰۰۰	۰/۲۵	-	-
ناحیه 3B	۲۱۰۰	۲۰۰	۰/۳۵	۵۰	۱۵
ناحیه 3C	۱۹۰۰	۱۵۰	۰/۳۵	۴۵	۱۰

شتاب نگاشت زلزله ورودی

در کلیه تحلیل‌ها زلزله در عمق برابر با ارتفاع سد از سطح زمین به کف پی سنگی و تنها در راستای محور رودخانه (با صرف نظر از مولفه قائم آن) وارد شده است. تاریخچه شتاب زلزله انتخابی مربوط به زلزله با شدت ۶/۴ ریشتر در سال ۱۹۸۳ در کولینگای^۱ کالیفرنیا بوده که در بستر سنگی ثبت شده است. این زلزله دارای شتاب بیشینه $0.67g$ بوده و پیروید غالب آن نیز 0.118 ثانیه است (peer.berkeley.edu). برای استفاده از این تاریخچه ابتدا برای کنترل حداکثر اندازه المان‌ها در نواحی مختلف سد، فرکانس‌های بیش از ۱۰ هرتز از تاریخچه فیلتر شده‌اند. پس از فیلتر نمودن تحرکات با فرکانس بزرگتر از ۱۰ هرتز و اصلاح پایه شتاب نگاشت، تاریخچه شتاب به گونه‌ای مقیاس شده که به تاریخچه با شتاب بیشینه $0.6g$ دست پیدا کنیم. در شکل (۴) شتاب

¹ Coalinga

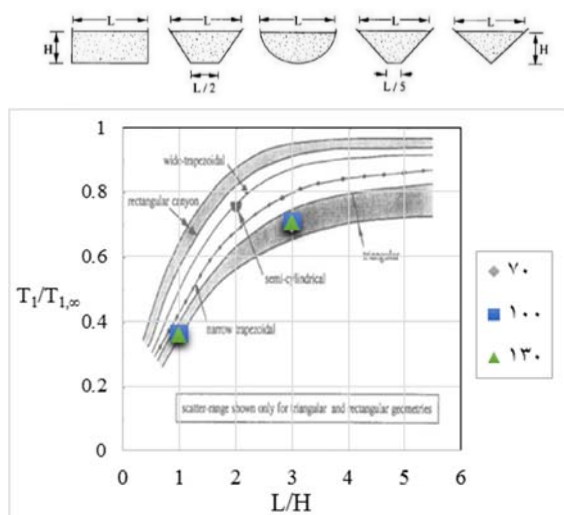
² Lysmer, J. d Kulemever, R.L.

سدهای واقع در دره‌های با اشکال مختلف را با پریشدهای حاصل از تحلیل‌های دوبعدی مقایسه نموده‌اند. در دره‌های با نسبت طول تاج به ارتفاع $L/H=1$ هندسه‌های ساخته شده در این پژوهش، مثلی شکل هستند. در دره با نسبت $L/H=3$ ، هندسه‌های ساخته شده در این پژوهش همگی دوزنقه‌ای شکل هستند.

جدول (۲): فرکانس اول ارتعاشات و پریشده اصلی سازه

H	Model	L/H	f	T	$T_1/T_{1,\infty}$
۷۰	سه بعدی	۱	۲/۴۶۵	۰/۴۰۶	۰/۳۶۰۵
	دو بعدی	۳	۱/۲۷۱	۰/۷۸۷	۰/۶۹۹۲
۱۰۰	سه بعدی	۱	۱/۷۳۷	۰/۵۷۶	۰/۳۶۲۵
	دو بعدی	۳	۰/۸۸۶	۱/۱۲۹	۰/۷۱۰۷
۱۳۰	سه بعدی	۱	۱/۳۴۷	۰/۷۴۲	۰/۳۶۲۰
	دو بعدی	۳	۰/۶۸۹	۱/۴۵۲	۰/۷۰۷۸

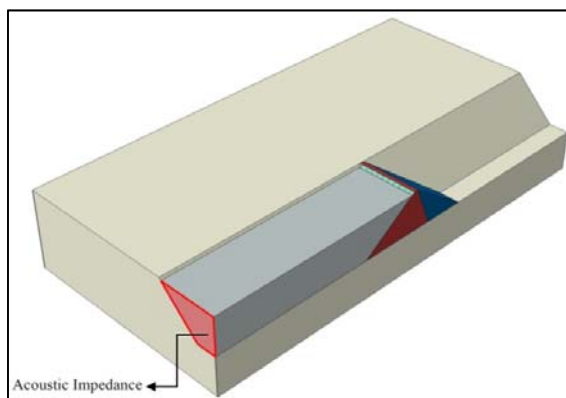
رابطه فرکانس اصلی ارتعاشات سد در تحلیل‌های سه بعدی و دو بعدی در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شکل محور افقی نشان دهنده نسبت طول تاج به ارتفاع سد (L/H) بوده و محور قائم نیز نسبت پریشده اصلی ارتعاشات در تحلیل‌های سه بعدی به تحلیل‌های دو بعدی می‌باشد ($T_1/T_{1,\infty}$). ملاحظه می‌شود که نقاط $T_1/T_{1,\infty}$ برای ارتفاع‌های مختلف در محدوده شکل (۶) قرار گرفته‌اند.



شکل (۶): مقایسه پریشدهای طبیعی حاصل از تحلیل‌های سه بعدی به دو بعدی

لحظه برخورد با مرزها محاسبه نمود. مرزهای لیسمر و کوهلمیر امواج لاو و رایلی^۱ را جذب نمی‌کنند.

بدلیل بی‌نهایت بودن مخزن در مرز نشان داده شده در شکل (۵) فشار هیدرودینامیک ایجاد شده در مخزن در اثر بارهای لرزه‌ای، جذب می‌شوند. در واقع در فاصله‌ی دور از سد امواج ایجاد شده اثری روی سد نخواهد داشت به همین دلیل برای مدل‌سازی کاهش اثرات هیدرودینامیکی فواصل دور از سد لازم است مرز جذب کننده امواج در نظر گرفته شود، به همین دلیل مرز انتهایی مخزن آب به عنوان مرز جاذب امواج آب در نظر گرفته شده است که در این پژوهش فاصله‌ی مرز جاذب امواج سد با پاشنه بتنی سد به اندازه ۴ برابر ارتفاع سد می‌باشد.



شکل (۵): سطح جاذب امواج مخزن آب در مدل‌های سه بعدی اندرکنش‌ها

جهت مدل‌سازی دقیق رفتار رویه بتنی و با توجه به شرایط ساخت رایج در سدهای CFR استفاده از المان‌های اندرکنش بین رویه و بدنه سنگریز و نیز بین پانل‌های رویه با یکدیگر، ضروری می‌باشد. بر این اساس و مطابق توصیه‌های (داکولاس^۲، ۲۰۱۲) در نواحی اتصال رویه و بدنه از المان‌های اندرکنش اصطکاکی با ضریب اصطکاک $\mu=0.7$ و در نواحی اتصال پانل‌های رویه، از اندرکنش مشابه ولی با ضریب اصطکاک $\mu=0.5$ استفاده شده است.

صحت‌سنجی به روش محاسبه پریشده اصلی ارتعاشات برای صحت‌سنجی روش‌های مورد استفاده در تحلیل از کنترل مقادیر پریشدهای طبیعی استفاده شده است. (گزناس و داکولاس^۲، ۱۹۹۲) در یک گزارش پریشدهای طبیعی

³ Gazetas, G. & Dakoulas, P

¹ Love & Rayleigh Wave

² Dakoulas, P

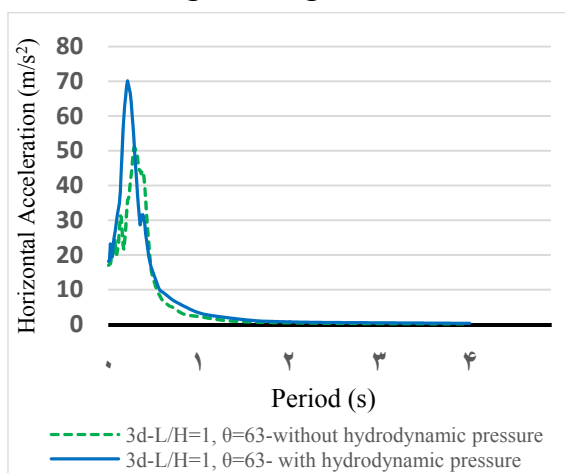
نتایج و بحث

در این بخش نمودارهای مربوط به نتایج تحلیل سد با ارتفاع ۱۰۰ متر واقع در دره مثلی با نسبت طول به ارتفاع ($L/H=1$) به شرح زیر آورده شده است.

- طیف پاسخ شتاب افقی تاج سد
- تاریخچه زمانی شتاب تاج سد
- کرنش حداکثر در مسیر قائم میانی
- تغییر مکان افقی پسماند در مسیر قائم میانی
- تغییر مکان قائم پسماند در مسیر قائم میانی
- تنش کششی حداکثر رویه بتنی
- تنش فشاری حداکثر رویه بتنی
- تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی وارد بر رویه بتنی

طیف پاسخ شتاب افقی تاج سد

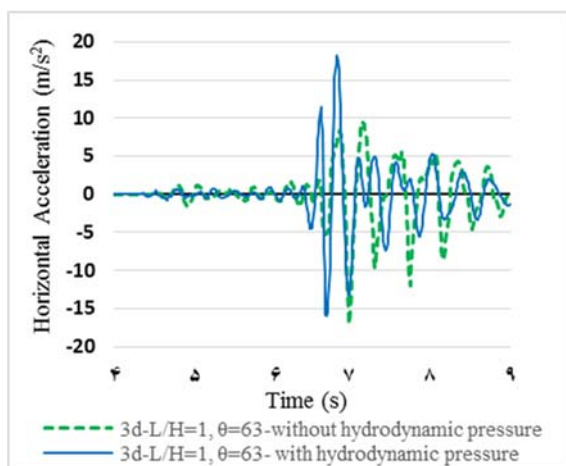
در شکل (۷) مشاهده می‌شود که شتاب انتقالی به تاج سد در مدل سه بعدی با اثرات فشار هیدرودینامیکی ۴۰ درصد بیشتر از مدل سه بعدی بدون اثرات فشار هیدرودینامیکی می‌باشد. در واقع اعمال اثرات فشار هیدرودینامیکی باعث تشدید و افزایش انتقال امواج زلزله به تاج سد شده است.



شکل (۷): مقایسه طیف پاسخ شتاب تاج سد در تحلیل‌های سه بعدی با و بدون اعمال اثرات هیدرودینامیکی

تاریخچه زمانی شتاب تاج سد

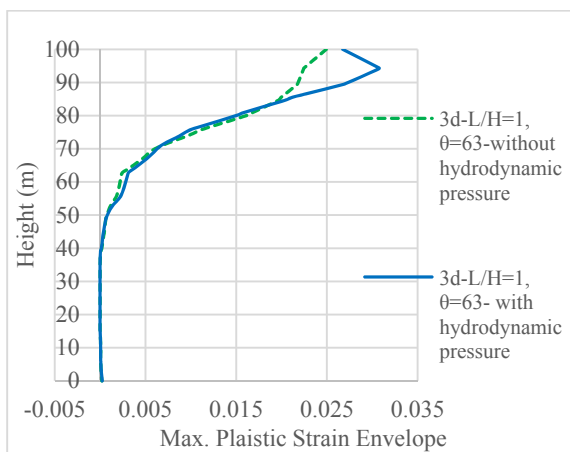
در شکل (۸) مشاهده می‌شود که شتاب انتقالی به تاج سد در اثر زلزله در حالتی که فشار هیدرودینامیکی آب مخزن اعمال شده بطور میانگین حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد بیشتر از حالت بدون فشار هیدرودینامیکی است. در واقع نمودار تاریخچه زمانی شتاب تاج سد مطابق با نتایج طیف پاسخ شتاب افقی تاج سد می‌باشد.



شکل (۸): مقایسه تاریخچه زمانی شتاب تاج سد در تحلیل‌های سه بعدی با و بدون اعمال اثرات هیدرودینامیکی

کرنش حداکثر در مسیر قائم میانی

در شکل (۹) مشاهده می‌شود که بیشترین کرنش پلاستیک در حالت بدون اعمال فشار هیدرودینامیکی در تاج سد رخ داده است ولی در تحلیل با فشار هیدرودینامیکی در تراز پایین‌تر از تاج سد و در تراز سطح آب مخزن رخ داده است. بیشترین اختلاف کرنش حداکثر در دو حالت با و بدون اعمال فشار هیدرودینامیکی مربوط به تراز سطح آب (۹۵ متر) بوده و با اعمال اثرات فشار هیدرودینامیکی افزایش ۳۷ درصدی کرنش حداکثر در مسیر قائم میانی مشاهده می‌گردد.

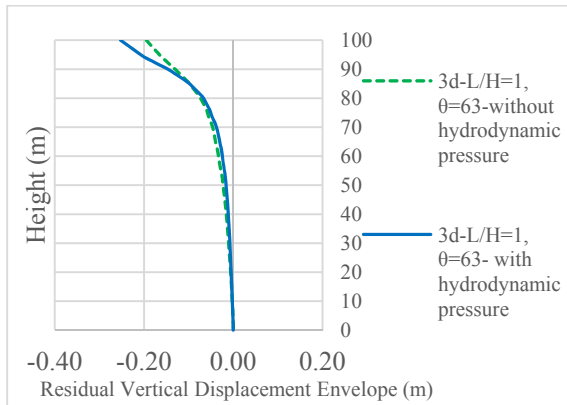


شکل (۹): مقایسه کرنش حداکثر در مسیر قائم میانی در تحلیل‌های سه بعدی با و بدون اعمال اثرات هیدرودینامیکی

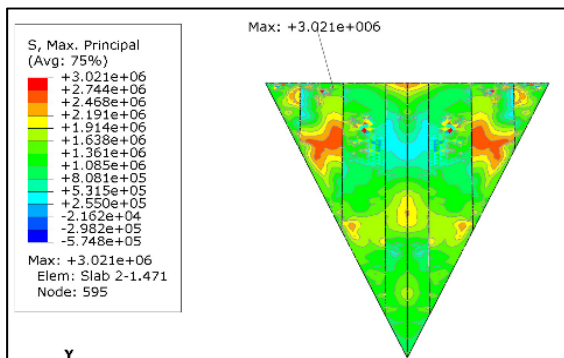
تغییر مکان افقی پسماند در مسیر قائم میانی

در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که تغییر مکان افقی پسماند تا تراز ۸۵ متر در هر دو حالت مشابه و تقریباً بصورت مساوی تغییر می‌کند. تاثیر فشار هیدرودینامیکی در نزدیکی سطح

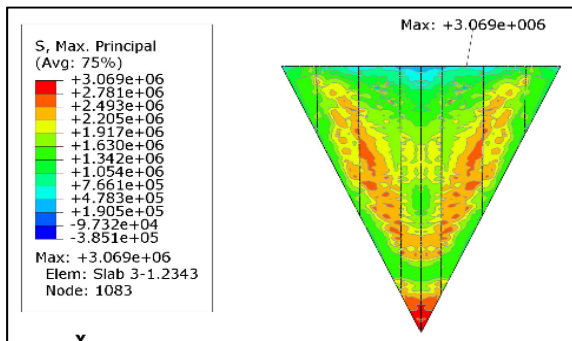
و ترک‌های کششی رخ خواهد داد (شکل (۱۲) و (۱۳))، ولی در سطح زیادی از رویه بتنی بدلیل فشار محصور کننده مخزن آب، تنش‌های کششی کاهش یافته و ترک کششی بوقوع نمی‌پیوندد. همچنین در حالتی که فشارهای هیدرودینامیکی در نظر گرفته می‌شود مقدار تنش کششی به میزان ۱۲ درصد بیشتر از حالت بدون فشار هیدرودینامیکی می‌باشد.



شکل (۱۱): مقایسه تغییر مکان قائم پسماند در مسیر قائم میانی در تحلیل‌های سه بعدی با و بدون اعمال اثرات هیدرودینامیکی

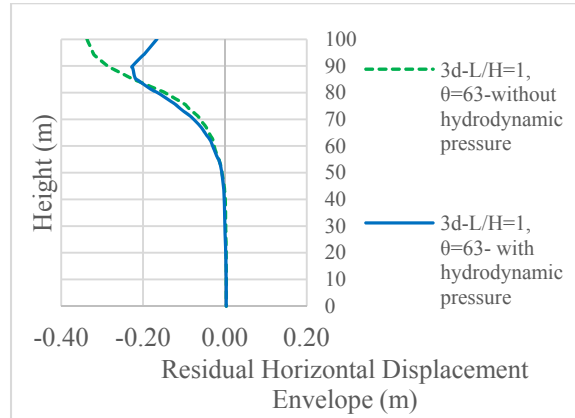


شکل (۱۲): کانتور تنش کششی حداکثر رویه بتنی مدل سه بعدی بدون اعمال اثرات فشار هیدرودینامیکی



شکل (۱۳): کانتور تنش کششی حداکثر رویه بتنی مدل سه بعدی با اعمال اثرات فشار هیدرودینامیکی تنش فشاری حداکثر رویه بتنی

آب مخزن بیشتر نمایان می‌شود بطوری که با نزدیک شدن به سطح آب، فشار هیدرودینامیکی ناشی از امواج حاصل از زلزله افزایش پیدا کرده و باعث کاهش تغییر مکان افقی پسماند در نزدیکی سطح آب مخزن شده است. در واقع بدلیل اعمال فشار هیدرودینامیکی از تغییر مکان افقی به سمت مخزن به میزان ۵۰ درصد کاسته شده است.



شکل (۱۰): مقایسه تغییر مکان افقی پسماند در مسیر قائم میانی در تحلیل‌های سه بعدی با و بدون اعمال اثرات هیدرودینامیکی

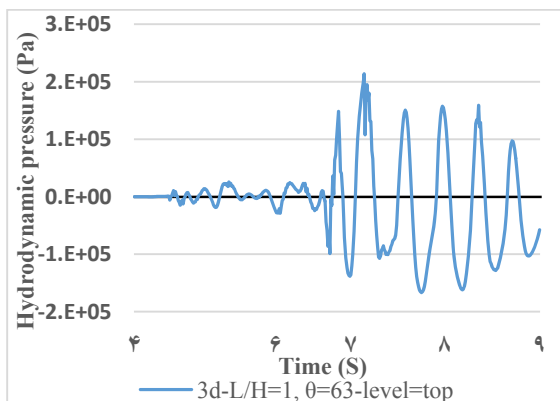
تغییر مکان قائم پسماند در مسیر قائم میانی

در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که تغییر مکان قائم پسماند از کمترین مقدار در پایه به مقدار حداکثر خود در ترازهای بالا صعود می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که تا تراز ۹۰ و نزدیک سطح آب، نمودار در هر دو حالت مشابه و تقریباً منطبق بر هم می‌باشد ولی در نزدیکی سطح آب مقدار نشست برای حالت با اعمال فشار هیدرودینامیکی بیشتر می‌باشد. در واقع در تاج سد میزان نشست در حالتی که فشارهای هیدرودینامیکی در نظر گرفته می‌شود ۲۵ سانتی‌متر و در حالتی که فشار هیدرودینامیکی منظور نمی‌شود ۱۹ سانتی‌متر می‌باشد که این نشانگر افزایش ۳۰ درصدی نشست در ترازهای نزدیک تاج سد در اثر فشارهای هیدرودینامیکی می‌باشد.

تنش کششی حداکثر رویه بتنی

با توجه به اینکه ظرفیت کششی بتن رویه ۲/۹ مگاپاسکال است، بتن رویه در هر دو تحلیل سه بعدی به ظرفیت کششی خود می‌رسد و در نتیجه ترک کششی رخ می‌دهد. در تحلیل‌های سه بعدی مشاهده می‌شود که در نواحی قرمز رنگ تنش کششی از ظرفیت کششی بتن رویه بیشتر شده

زلزله‌ی ورودی می‌باشد. همچنین با مقایسه‌ی نمودار شتاب نگاشت (شکل (۴)) و نمودار تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی (شکل (۱۶)) مشاهده می‌گردد با کاهش شدت امواج زلزله فشار هیدرودینامیکی به همان میزان کاهش نیافته و مدت زمان بیشتری برای میرا شدن این امواج مورد نیاز می‌باشد. در واقع فشار هیدرودینامیکی پس از عبور از پیک زلزله همچنان مقدار زیادی داشته و امواج رفت و برگشتی بزرگ حاصل می‌شود.



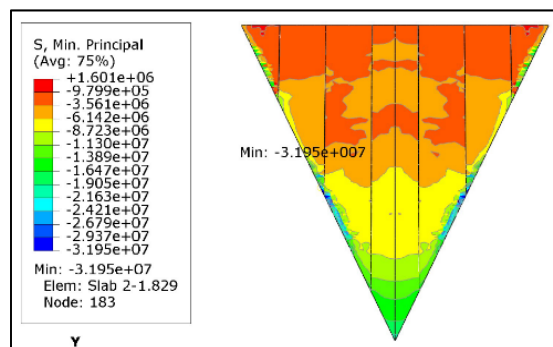
شکل (۱۶): تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی وارد بر رویه بتنی در تراز بالایی مخزن

مقایسه‌ی نتایج تحلیل سدهای با ارتفاع و دره‌های مختلف

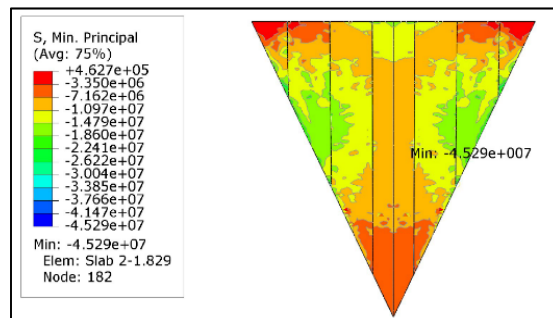
در این بخش نتایج حاصل از تحلیل‌های سه بعدی با ۳ ارتفاع سد ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ واقع در دو دره با نسبت طول به ارتفاع سد $L/H=1$ و $L/H=3$ در دو حالت با اعمال فشار هیدرودینامیکی و بدون اعمال فشار هیدرودینامیکی در جداول شماره (۳)، (۴) و (۵) آورده شده است.

با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود اعمال فشار هیدرودینامیکی در سدهای با ارتفاع‌های ۷۰ الی ۱۳۰ و دره‌های مختلف باعث افزایش تنش کششی حداکثر رویه به میزان ۱۴ الی ۲۷ درصد شده است. همچنین با اعمال فشار هیدرودینامیکی تنش فشاری حداکثر بین ۲۰ الی ۵۴ درصد در ارتفاع‌های مختلف و هر دو شکل دره افزایش پیدا می‌کند. با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر شتاب افقی انتقالی به تاج سد با اعمال فشار هیدرودینامیکی در برخی حالات تا ۲ برابر افزایش پیدا می‌کند (ارتفاع ۷۰ و دره با نسبت طول به ارتفاع $L/H=3$)، ولی مشاهده می‌گردد با افزایش ارتفاع تاثیر فشار هیدرودینامیکی بر شتاب افقی

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌شود که در تحلیل‌های سه بعدی در هر دو حالت با و بدون اعمال فشارهای هیدرودینامیکی در نزدیکی‌های تکیه‌گاه و محل اتصال درزه‌های قائم تنش فشاری بیشتر از ظرفیت بتن رویه بوقوع می‌پیوندد که با توجه به اینکه امکان حرکت و لغزش درزه‌های قائم در کنار یکدیگر وجود دارد، از انتقال تنش فشاری بیش از ظرفیت به بتن رویه جلوگیری شده و تنش فشاری با لغزش نوارهای بتنی کاهش پیدا کرده و مانع شکست رویه می‌شود. هرچند مشاهده می‌شود که تنش فشاری رویه در حالت با اعمال فشارهای هیدرودینامیکی در حدود ۴۵ مگاپاسکال می‌باشد و ۴۰ درصد بیشتر از حالت بدون اعمال فشار هیدرودینامیکی است.



شکل (۱۴): تنش فشاری حداکثر رویه بتنی مدل سه بعدی بدون اعمال اثرات فشار هیدرودینامیکی



شکل (۱۵): تنش فشاری حداکثر رویه بتنی مدل سه بعدی با اعمال اثرات فشار هیدرودینامیکی

تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی وارد بر رویه بتنی

در شکل (۱۶) تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی وارد بر رویه بتنی در تراز برابر با سطح آب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که فشارهای وارد بر رویه بتنی مشابه نمودار شتاب نگاشت زلزله‌ی ورودی تغییر می‌کند. پیک نمودار فشار هیدرودینامیکی منطبق بر پیک نمودار شتاب نگاشت

حداکثر تاج سد کمتر می‌شود. اعمال فشار هیدرودینامیکی، افزایش نشست به میزان ۵ الی

با توجه به جدول (۵) مشاهده می‌شود، در اکثر تحلیل‌ها ۸۳ درصد مشاهده گردید.

اعمال فشار هیدرودینامیکی باعث کاهش تغییر مکان افقی

حداکثر به میزان ۲۰ الی ۴۰ درصد شده است، همچنین با

جدول (۳): خلاصه نتایج پوش تنش کششی و فشاری حداکثر رویه بتنی برای سدهای با ارتفاع ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰

ارتفاع سد (متر)	پارامترهای هندسی دره			تنش کششی حداکثر رویه (MPa)		تنش فشاری حداکثر رویه (MPa)	
				مقدار	نسبت تاثیر فشار هیدرودینامیکی	مقدار	نسبت تاثیر فشار هیدرودینامیکی
۷۰	with H P*	L/H=۱	$\theta=63$	۳/۲	۱/۱۸	۳۰	۱/۲۰
	without H P	L/H=۱	$\theta=63$	۲/۷		۲۵	
	with H P	L/H=۳	$\theta=45$	۳/۲۳	۱/۱۷	۲۶	۱/۴۴
	without H P	L/H=۳	$\theta=45$	۲/۷۵		۱۸	
۱۰۰	with H P	L/H=۱	$\theta=63$	۳/۱۶	۱/۱۲	۴۵	۱/۴۰
	without H P	L/H=۱	$\theta=63$	۲/۸۲		۳۲	
	with H P	L/H=۳	$\theta=45$	۳/۳	۱/۲۷	۳۳	۱/۳۷
	without H P	L/H=۳	$\theta=45$	۲/۶		۲۴	
۱۳۰	with H P	L/H=۱	$\theta=63$	۳/۲	۱/۱۴	۲۷	۱/۵۴
	without H P	L/H=۱	$\theta=63$	۲/۸		۱۷/۵	
	with H P	L/H=۳	$\theta=45$	۳	۱/۱۵	۱۷	۱/۳۰
	without H P	L/H=۳	$\theta=45$	۲/۶		۱۳	

* H P= Hydrodynamic Pressure

جدول (۴): خلاصه نتایج شتاب افقی حداکثر تاج برای سدهای با ارتفاع ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰

ارتفاع سد (متر)	پارامترهای هندسی دره			شتاب افقی حداکثر تاج سد (m/s^2)	
				مقدار	نسبت تاثیر فشار هیدرودینامیکی
۷۰	with H P*	L/H=۱	$\theta=63$	۲۶/۲	۱/۵۴
	without H P	L/H=۱	$\theta=63$	۱۷	
	with H P	L/H=۳	$\theta=45$	۲۴/۲	۲
	without H P	L/H=۳	$\theta=45$	۱۲	
۱۰۰	with H P	L/H=۱	$\theta=63$	۱۸/۲	۱/۰۷
	without H P	L/H=۱	$\theta=63$	۱۷	
	with H P	L/H=۳	$\theta=45$	۱۷/۵	۱
	without H P	L/H=۳	$\theta=45$	۱۷/۴	
۱۳۰	with H P	L/H=۱	$\theta=63$	۱۱/۱	۰/۹۲۵
	without H P	L/H=۱	$\theta=63$	۱۲	
	with H P	L/H=۳	$\theta=45$	۱۱/۱	۱
	without H P	L/H=۳	$\theta=45$	۱۱/۱	

* H P= Hydrodynamic Pressure

جدول (۵): خلاصه نتایج تغییر مکان افقی و قائم حداکثر تاج برای سدهای با ارتفاع ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰

ارتفاع سد (متر)	پارامترهای هندسی دره			تغییر مکان افقی حداکثر (m)		تغییر مکان قائم حداکثر (m)	
				نسبت تاثیر فشار هیدرودینامیکی	مقدار	نسبت تاثیر فشار هیدرودینامیکی	مقدار
۷۰	with H P*	L/H=۱	$\theta=63$	۰/۳۱	۰/۷۵	۰/۲۳	۱/۰۵
	without H P	L/H=۱	$\theta=63$	۰/۴۱		۰/۲۲	
	with H P	L/H=۳	$\theta=45$	۰/۰۶	۱/۱۳	۰/۱۱	۱/۸۳
	without H P	L/H=۳	$\theta=45$	۰/۰۵		۰/۰۶	
۱۰۰	with H P	L/H=۱	$\theta=63$	۰/۱۷	۰/۵۴	۰/۲۵	۱/۳۹
	without H P	L/H=۱	$\theta=63$	۰/۳۲		۰/۱۸	
	with H P	L/H=۳	$\theta=45$	۰/۰۵	۰/۶۰	۰/۰۶۶	۱/۶۵
	without H P	L/H=۳	$\theta=45$	۰/۰۸		۰/۰۴	
۱۳۰	with H P	L/H=۱	$\theta=63$	۰/۱۴	۰/۷۴	۰/۱۶	۱/۶
	without H P	L/H=۱	$\theta=63$	۰/۱۹		۰/۱	
	with H P	L/H=۳	$\theta=45$	۰/۰۳۷	۰/۵۹	۰/۰۴۷	۱/۳
	without H P	L/H=۳	$\theta=45$	۰/۰۶۳		۰/۰۳۶	

* H P= Hydrodynamic Pressure

نتیجه گیری

با توجه به نمودارها و مقایسه‌های صورت گرفته بین تحلیل‌های سه بعدی با اعمال فشار هیدرودینامیکی و بدون اعمال فشار هیدرودینامیکی نتایج زیر حاصل می‌شود.

- اعمال فشار هیدرودینامیکی باعث افزایش تا ۲ برابر شتاب منتقل شده به تاج سد می‌شود.
- اعمال فشار هیدرودینامیکی باعث کاهش تغییر مکان افقی پسماند به میزان ۲۰ الی ۴۰ درصد در تاج سد می‌گردد.
- اعمال فشار هیدرودینامیکی باعث افزایش میزان نشست تاج سد بین ۵ الی ۸۰ درصد می‌شود.
- اعمال فشار هیدرودینامیکی باعث افزایش تنش کششی حداکثر، به میزان ۱۴ الی ۲۷ درصد شده است.
- اعمال فشار هیدرودینامیکی باعث افزایش تنش فشاری حداکثر، به میزان ۲۰ الی ۵۴ درصد شده است.

با توجه به نتایج حاصل شده و اختلاف چشمگیر نتایج تحلیل‌های با اعمال فشار هیدرودینامیکی و بدون اعمال فشار هیدرودینامیکی می‌توان نتیجه گرفت برای مدل‌سازی

و تحلیل سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی می‌بایست اثرات فشار هیدرودینامیکی مخزن اعمال شود.

مراجع

- 1- Arici, Y. (2013). Evaluation of the performance of the face slab of a CFRD during earthquake excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55, 71-82.
- 2- Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Sevim, B., Kartal, M. E., Türker, T., & Bilici, Y. (2009). Comparison of near- and far-fault ground motion effect on the nonlinear response of dam-reservoir-foundation systems. *Nonlinear Dynamics*, 58(4), 655-673.
- 3- Bayraktar, A., & Kartal, M. E. (2010). Linear and nonlinear response of concrete slab on CFR dam during earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), 990-1003.
- 4- Dakoulas, P. (2012). Nonlinear seismic response of tall concrete-faced rockfill dams in narrow canyons. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 34(1), 11-24.
- 5- Gazetas, G., & Dakoulas, P. (1992). Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11(1), 27-61.
- 6- ICOLD, 2004. *Concrete Face Rockfill Dams*. ICOLD, (November)
- 7- Lee, J., & Fenves, G. L. (1998). Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of engineering mechanics*, 124(8), 892-900.
- 8- Liu, Z., & Chi, S. (2013). Analysis on residual strain of Zipingpu Concrete Faced Rockfill Dam after Wenchuan earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12(2), 221-228.

- 9- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(4), 859-877.
- 10- Mahabad, N. M., Imam, R., Javanmardi, Y., & Jalali, H. (2014). Three-dimensional analysis of a concrete-face rockfill dam. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 167(4), 323-343.
- 11- Peer berkeley.edu.. PEER Strong Ground Motion Database.
- 12- Wang, Z., Liu, S., Vallejo, L., & Wang, L. (2014). Numerical analysis of the causes of face slab cracks in Gongboxia rockfill dam. *Engineering Geology*, 181, 224-232.
- 13- Xu, H., Zou, D., Kong, X., & Hu, Z. (2016). Study on the effects of hydrodynamic pressure on the dynamic stresses in slabs of high CFRD based on the scaled boundary finite-element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 223-236.
- 14- Xu, H., Zou, D., Kong, X., Hu, Z., & Su, X. (2018). A nonlinear analysis of dynamic interactions of CFRD-compressible reservoir system based on FEM-SBFEM. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 112, 24-34.
- 15- Yuan, L., Liu, X., Wang, X., Yang, Y., & Yang, Z. (2014). Seismic performance of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by large-scale shaking table tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 56, 1-12.
- 16- Zhang, G., & Zhang, J. M. (2009). Numerical modeling of soil-structure interface of a concrete-faced rockfill dam. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 762-772.
- 17- Zou, D., Xu, B., Kong, X., Liu, H., & Zhou, Y. (2013). Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model. *Computers and Geotechnics*, 49, 111-122.

The effect of hydrodynamic pressure of the dam reservoir caused by the earthquake on the results of 3D dynamic analysis of concrete face rockfill dams

Araz Nami Shabkhaneh¹
Ali Asghar Mirghasemi*²

Abstract

Concrete faced rockfill dams (CFRDs) are among the structures that due to their advantages such ease of construction and low execution costs, have attracted more attention nowadays. Due to the fact that during large earthquakes, the hydrodynamic pressure will be large and cannot be ignored, the main purpose of this research is to apply reservoir hydrodynamic pressure of dam reservoir caused by the earthquake and investigate its effects in three-dimensional analysis using ABAQUS software. The considered dams in this study have 70, 100 and 130 meters height located in the valley with the length to height ratio of (L/H=1) and (L/H=3). To investigate the effect of the earthquake, a maximum scaled acceleration of 0.6g was used in the carried out analysis. Linear elastoplastic Mohr-Coulomb material model for rockfill embankment, an elastic material model for rocky foundation, and the concrete damage plasticity model for the concrete face are adopted. In order to take into account, the effects of the reservoir hydrodynamic pressure, the reservoir water is represented by acoustic elements with the Lagrangian formulation. It is found that considering the hydrodynamic pressure, increases the settling values by 5% to 80%, plastic strain by 37%, surface compressive stress by 20% to 57% and maximum dam crest acceleration up to 2 times in some of the analyzed dams. Also, applying hydrodynamic pressure increases the tensile stress of the surface and reduces the horizontal displacement of the crest and the body of the dams.

Keywords

Concrete faced rockfill dam, Hydrodynamic pressure, Dynamic analysis, 3D analysis, Earthquake

¹ Msc. in civil engineering, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

^{2*} Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
aghasemi@ut.ac.ir