

تحلیل دینامیکی سد بتنی وزنی با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن (مطالعه موردی: سد بتنی وزنی کونا)

رضا تازی نژاد^۱، آرش انورزاده مراغی^۲، علی اصغر بور^{۳*}

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- کارشناس ارشد، سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: ali.bour472@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۶

چکیده

امروزه ساخت و احداث سدها به منظور جمع‌آوری و نگهداری آب رودخانه‌ها برای مصارف آشامیدن، کشاورزی، صنعت امری اجتناب‌ناپذیر است. باین وجود سدها، سازه‌های عظیمی هستند که خطرات بالقوه‌ای را برای جامعه پایین‌دست خود به همراه دارند و شکست آن‌ها می‌تواند فاجعه‌آمیز باشد. تحلیل دینامیکی سدهای بتنی به دلیل وجود مخزن، نسبت به سازه‌های متعارف از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. این پیچیدگی عمدتاً ناشی از اندرکنش سد و مخزن در شرایط لرزه‌ای است. در این پژوهش پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus در شرایط مختلف پر، نیمه‌پر و خالی بودن مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور سد بتنی وزنی کونا با مشخصات هندسی و فیزیکی مشخص با اعمال رکوردهای زمین‌لرزه کوبه مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از آنالیز المان محدود نشان می‌دهد مقادیر تنش‌های اصلی در حالات مختلف آنالیز بسیار قابل توجه است. عمده این تنش‌ها در محل تغییر شیب پایین‌دست (تراز ۶۶/۵ متر) رخ داده و موجب تمرکز تنش در این قسمت شده‌اند. همچنین بر اساس نتایج با افزایش تراز مخزن بر میزان نوسان جابه‌جایی‌ها و نیز مقدار آن‌ها افزوده می‌شود. این مسئله ناشی از اندرکنش سد و مخزن و تأثیر نوسان فشار هیدروپنماتیک مخزن در منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج سد می‌باشد. به‌طور کلی در شرایط پر بودن مخزن سطح تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها نسبت به سایر حالات بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: اندرکنش سد و مخزن، تحلیل دینامیکی، روش المان محدود، سد بتنی وزنی، ABAQUS.

مقدمه

زلزله‌های رخ داده، شناخت دقیق‌تر ماهیت زلزله‌های اعمالی و نیز افزایش سرعت رایانه‌ها امکان انجام مطالعه و آنالیزهای دینامیکی غیرخطی سه‌بعدی دقیق‌تر بر روی رفتار سدها فراهم شده است. اولین بار (1993) Westergaard پاسخی تحلیلی برای فشار هیدروپنماتیک وارد بر سد وزنی صلب تحت اثر بار هارمونیک ارائه کرد. در ادامه تحقیقات (1967) Chopra پاسخ سد تحت اثر شتاب افقی و قائم زمین با مقدار دلخواه ارائه نمود. سپس (1963) Bustamante et al. اثر طول مخزن برای بازه‌ای از پریودهای تحریک عریض‌تر از بازه‌های

در طی سالیان متمادی که بشر اقدام به ساخت سدها کرده است همواره با توجه به اطلاعات در دسترس و نیز امکانات موجود، فرضیاتی را اتخاذ نموده و مدل‌هایی را برای تعریف رفتار سدها، مصالح ساخت و نیروهای اعمالی توسعه داده است که با توجه به پیشرفت‌های حاصله بسیاری از این فرضیات اعتبار خود را از دست داده‌اند. علاوه بر آن با توسعه نرم‌افزارهای پیشرفته، تدقیق مدل‌های رفتاری مصالح بر پایه نتایج آزمایشگاهی، مطالعه پاسخ‌های سدهای موجود در حین

بررسی شده قبلی را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که برای پریودهای تحریک بزرگتر از پریود طبیعی مخزن، اثر طول مخزن ناچیز است ولی برای پریودهای کوتاهتر، طول مدل شده مخزن نقش مهمی را در حرکت هارمونیک بازی می کند. وی همچنین اثر امواج سطحی را برای تحریک هارمونیک بررسی کرد و خطای نادیده گرفتن امواج سطحی را به دست آورد. Zangar (1953) فشار هیدرودینامیک را برای شکل های مختلف وجه بالادست سد به دست آورد. او فرض کرد که آب تراکم ناپذیر است و بنابراین روش آنالوگ الکتریکی قابل استفاده است. با به وجود آمدن امکان پردازش محاسبات بسیار سنگین توسط رایانه ها، استفاده از روش های عددی جهت مدل نمودن سدهای بتنی وزنی توسعه یافت. Zhong et al. (2013) اثرات تقویت ضد لرزه ای با مصالح پلیمری تقویت شده فیبردار (FRP) در سدهای بتنی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها نشان دادند که FRP به عنوان یک ماده تقویت کننده، زمان وقوع ترک ها را به تعویق می اندازد و همین طور مانع از پیوستن ترک هایی بالادست و پایین دست به یکدیگر می شود. به این معنی که سد تقویت شده می تواند عملکرد بهره برداری در هنگام وقوع زمین لرزه را حفظ نماید. تحلیل استاتیکی و دینامیکی فشار آب حفره ای در سد خاکی آزادی با نرم افزار آباکوس توسط مظاهری و همکاران (۱۳۹۹) انجام گرفت. کاربرد مدل تصادفی فازی بازه ای چند مرحله ای در تخصیص آب سد لتیان مورد مطالعه قرار گرفت (رستگاری - پور، ۱۳۹۹). مقیمی و همکاران (۱۳۹۹) قابلیت آزمون فشار آب در محاسبه میزان نشت از پرده آب بند سد سیمره در استان ایلام را بررسی کردند. بررسی مشکل فرار آب از مخزن سد شاه قاسم با استفاده از آنالیز هیدروژئولوژیکی توسط مظفری (۱۳۹۸) بررسی شد.

گرفته شده بود. کل سیستم متشکل از دو زیرسیستم می شد: سد به صورت یک سیستم المان محدود و مخزن به شکل یک محیط پیوسته با طول بی نهایت در جهت بالادست که معادله موج حاکم بر آن است. جابه جایی سازه ای سد (شامل تأثیرات آب) به عنوان یک ترکیب خطی از مودهای ارتعاش سد با مخزن خاکی نشان داده شد. در ابتدا پاسخ فرکانسی مختلط برای جابه جایی های مودال محاسبه شد. متعاقباً پاسخ سیستم به حرکت لرزه ای دلخواه با الگوریتم تبدیل فوریه سریع به دست آمد. خسارات سازه ای وارد شده به سد کوینا در طی زلزله سال ۱۹۶۷ سؤالاتی را در خصوص پاسخ لرزه ای سدهای بتنی وزنی ایجاد کرد. Chakrabarti and Chopra (1972) مطالعه ای را بر روی تجربه لرزه ای این سد و به صورت کلی تنش های به وجود آمده در اثر زلزله در بدنه سدهای بتنی وزنی انجام دادند. به این ترتیب مطالعه تنها محدود به تجربه لرزه ای سد کوینا نمی شد، اما شامل فرضیاتی همچون یک سد با مقطع تیپ و زمین لرزه ای با بزرگی مشابه بود به طوری که حداکثر شتاب لرزه ای این زمین لرزه و محتوای فرکانسی آن متفاوت با زمین لرزه کوینا بود. پاسخ لرزه ای در تعدادی حالات به وسیله روش المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می داد تنش های کششی با اهمیت در سد کوینا طی زلزله کوینا توسعه خواهد یافت و تنش های مشابه حتی در سد وزنی با مقطع تیپ نیز توسعه می یابد. همچنین تأثیر زمین لرزه کوینا بر روی سد بتنی وزنی به نسبت زلزله ی کالیفرنیا که بزرگی مشابه دارد شدیدتر می باشد. Chakrabarti and Chopra (1981) این دو پاسخ لرزه ای سدهای بتنی وزنی را با فرض تأثیرات اندرکنش سد، پی و دریاچه مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه زیر سازه فونداسیون به حالت قبلی اضافه شده بود و مدل ارائه شده قابلیت بررسی انعطاف پذیری پی را دارا بود. همچنین جابه جایی های سازه ای سد به صورت ترکیبی خطی از بردارهای ریتز بیان شده بود. رائو و شیک (۲۰۱۴) با استفاده از روش اجزا محدود بر اساس رویکرد کدهای استاندارد و با استفاده از نرم افزار STAADPRO V8i، به ارزیابی پاسخ لرزه ای سدهای بتنی وزنی پرداخته اند. یافته های آنان حاکی از آن است که جابه جایی های تاج سد برای سیستم سد پی ۵/۵۶۲ میلی متر بیشتر از سیستم سد می باشد (Rao et al., 2014).

بررسی شده قبلی را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که برای پریودهای تحریک بزرگتر از پریود طبیعی مخزن، اثر طول مخزن ناچیز است ولی برای پریودهای کوتاهتر، طول مدل شده مخزن نقش مهمی را در حرکت هارمونیک بازی می کند. وی همچنین اثر امواج سطحی را برای تحریک هارمونیک بررسی کرد و خطای نادیده گرفتن امواج سطحی را به دست آورد. Zangar (1953) فشار هیدرودینامیک را برای شکل های مختلف وجه بالادست سد به دست آورد. او فرض کرد که آب تراکم ناپذیر است و بنابراین روش آنالوگ الکتریکی قابل استفاده است. با به وجود آمدن امکان پردازش محاسبات بسیار سنگین توسط رایانه ها، استفاده از روش های عددی جهت مدل نمودن سدهای بتنی وزنی توسعه یافت. Zhong et al. (2013) اثرات تقویت ضد لرزه ای با مصالح پلیمری تقویت شده فیبردار (FRP) در سدهای بتنی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها نشان دادند که FRP به عنوان یک ماده تقویت کننده، زمان وقوع ترک ها را به تعویق می اندازد و همین طور مانع از پیوستن ترک هایی بالادست و پایین دست به یکدیگر می شود. به این معنی که سد تقویت شده می تواند عملکرد بهره برداری در هنگام وقوع زمین لرزه را حفظ نماید. تحلیل استاتیکی و دینامیکی فشار آب حفره ای در سد خاکی آزادی با نرم افزار آباکوس توسط مظاهری و همکاران (۱۳۹۹) انجام گرفت. کاربرد مدل تصادفی فازی بازه ای چند مرحله ای در تخصیص آب سد لتیان مورد مطالعه قرار گرفت (رستگاری - پور، ۱۳۹۹). مقیمی و همکاران (۱۳۹۹) قابلیت آزمون فشار آب در محاسبه میزان نشت از پرده آب بند سد سیمره در استان ایلام را بررسی کردند. بررسی مشکل فرار آب از مخزن سد شاه قاسم با استفاده از آنالیز هیدروژئولوژیکی توسط مظفری (۱۳۹۸) بررسی شد.

Chakrabarti and Chopra (1973) مطالعه ای را بر روی فشار هیدرودینامیک و پاسخ سدهای وزنی به مؤلفه ی قائم زمین لرزه انجام دادند. همچنین برنامه ای کامپیوتری را به منظور تحلیل دینامیکی سدهای وزنی با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن ارائه نمودند. در این تحقیقات یک رویه کلی برای تحلیل سدهای وزنی شامل اندرکنش هیدرودینامیک و تراکم پذیری آب تحت مؤلفه های قائم و افقی زمین لرزه ارائه شد. مدل عددی یک مدل دوبعدی بود و رفتار مصالح نیز خطی در نظر

که حرکات غیریکنواخت زمین که از تأخیر زمانی حرکت امواج در کف سد نشأت گرفته است می‌تواند بر توزیع پاسخ‌ها تأثیرگذار باشد.

در این مطالعه پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus در شرایط مختلف پر، نیمه‌پر و خالی بودن مخزن موردبررسی قرار گرفته است. بدین منظور سد بتنی وزنی کوینا با مشخصات هندسی و فیزیکی مشخص با اعمال رکوردهای زمین‌لرزه کوبه و همچنین با اعمال شتاب لرزه‌ای در جهت افقی مورد تحلیل قرار گرفته که این تحلیل‌ها شامل تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی است. هدف از این تحقیق، تحلیل دینامیکی سد بتنی وزنی کوینا با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن با استفاده از نرم‌افزار آباکوس است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

سد کوینا در ایالت ماهاراشترا در هندوستان واقع شده و دارای ۸۵۳ متر طول و ۱۰۳ متر ارتفاع نسبت به کف رودخانه می‌باشد. در طراحی این سد از ضریب زلزله ۰/۵ به‌طور یکنواخت در ارتفاع استفاده شده است و به‌دلیل مصالح نامرغوب و شکل غیرمعمول، این سد در مقابل زلزله بسیار آسیب‌پذیر است و در اثر زلزله خرابی زیادی در آن مشاهده شده است. طول سد در مقایسه با ابعاد دیگر آن بسیار بزرگ‌تر می‌باشد و تأثیر زلزله بر روی سد در جهت عرض سازه (در جهت رود) مخرب‌تر است (قاضی مرعشی و استاد حسین، ۱۳۹۳)

روش‌های محاسباتی

نرم‌افزار آباکوس

نرم‌افزار آباکوس مجموعه‌ای از برنامه‌های شبیه‌سازی مهندسی بر اساس روش المان محدود می‌باشد که توانایی حل محدوده وسیعی از مسائل مهندسی از مسائل خطی ساده تا شبیه‌سازی‌های غیرخطی پیچیده را دارد. آباکوس کتابخانه گسترده‌ای از انواع مختلف المان‌ها و همچنین مجموعه گسترده‌ای از مدل‌های مصالح مختلف برای مدل‌سازی اغلب مصالح مهندسی معمول را دارد. این نرم‌افزار توانایی انجام تحلیل‌های سازه‌ای و همچنین تحلیل‌های حرارتی. الکتریکی

(Varughese and Sreelakshmi, 2016) رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی را با استفاده از روش اجزا محدود و قالب تحلیلی دینامیکی موردبررسی قرار داده‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی‌های بدنه سد در محل تاج و بیشینه مقدار تنش واردشده بر بدنه در محل پاشنه و نقطه مقابل آن در قسمت بالادست سد رخ می‌دهد.

Feneves and Chopra (1984) تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی را با فرض اندرکنش سد، مخزن و پی‌سنگی و همچنین قابلیت جذب امواج در کف مخزن موردبررسی قرار دادند.

Arici et al. (2014) اندرکنش لرزه‌ای سه‌بعدی سد، مخزن و

پی سد بتنی غلتکی آندیز را بررسی کردند. رفتار حرارتی یک سد قوسی تحت تأثیر دمای محیط را با برنامه Abaqus که

دارای قابلیت بالا در تحلیل حرارتی است را مدل‌سازی و تحلیل آن را تحت تأثیر بارهای حرارتی و بارهای وزن و فشار هیدرواستاتیک بررسی شد. نتایج حاصل از تحلیل تنش‌ها و

کرنش‌ها و جابجایی‌ها مشخص کرد که این امکان وجود دارد که در پایین‌دست جریان و در مجاورت لبه‌ها نزدیک به تاج سد، ترک‌های کششی تجزیه گردند و بارهای حرارتی در سد

قوسی بسیار مؤثر بوده و اثر آنها نباید نادیده انگاشته شود (لیب زاده و همکاران، ۱۳۹۰). با استفاده از روش اجزا محدود

بر اساس رویکرد کدهای استاندارد و با استفاده از نرم‌افزار

STAADPRO V8i، به ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی

وزنی پرداخته شد. یافته‌ها حاکی از آن است که جابجایی‌های

تاج سد برای سیستم سد پی ۵/۵۶۲ میلی‌متر بیشتر از سیستم

سد می‌باشد (Rao and Shaik, 2014). رفتار لرزه‌ای سدهای

بتنی وزنی را با استفاده از روش اجزا محدود و قالب تحلیلی

دینامیکی موردبررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات نشان داد که

بیشترین جابجایی‌های بدنه سد در محل تاج و بیشینه مقدار

تنش واردشده بر بدنه در محل پاشنه و نقطه مقابل آن در

قسمت بالادست سد رخ می‌دهد (Varughese and

Sreelakshmi, 2016). کلانی و نوائی نیا (۱۳۹۵) اثر هم‌زمان

مؤلفه‌های انتقالی و گهواره‌ای زلزله و حرکات غیریکنواخت

انتقالی ناشی از عامل تأخیر زمانی را بر روی سد بتنی وزنی

پاین فلت^۱ بررسی نمودند و به‌صورت کلی و با در نظرگیری اثر

توأم مؤلفه‌های انتقالی و گهواره‌ای شتاب زمین، نشان دادند

¹ Pine Flat

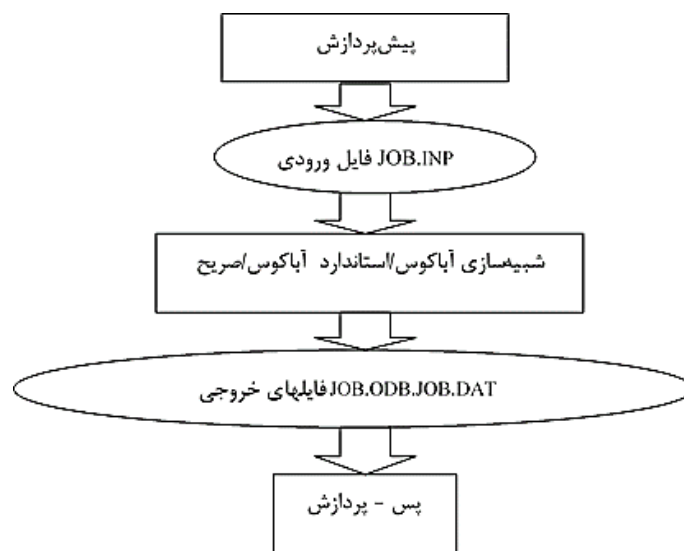
مدل سازی با استفاده از نرم افزار آباکوس

اولین مرحله در هر تحلیل المان محدود، گسسته سازی هندسه واقعی با استفاده از مجموعه ای از المان های محدود می باشد. هر المان محدود معرف بخش گسسته ای از مدل فیزیکی اصلی می باشد. المان های محدود توسط گره های اشتراکی به هم متصل هستند. به مجموعه ی گره ها و المان های محدود، مش گفته می شود. به تعداد المان ها در واحد طول، سطح و یا حجم، چگالی مش گفته می شود. در هر تحلیل در هریک از گره ها، متغیری به عنوان متغیر پایه در محاسبات در نظر گرفته می شود. برای مثال در تحلیل های تنش این متغیر پایه، جابجایی های هر گره می باشد. پس از تعیین جابجایی ها مقدار تنش ها و کرنش ها در هر المان محدود به راحتی قابل محاسبه می باشند.

تحلیل کامل آباکوس معمولاً از سه مرحله ی مجزا تشکیل شده است: پیش پردازش، شبیه سازی و پس پردازش. این سه مرحله از طریق فایل های مختلف، همانند شکل به یکدیگر مرتبط می شوند.

مکانیک خاک انتقال جرم و نیز تحلیل های اندرکنشی مانند اندرکنش سازه- سیال را دارد. در تحلیل های غیرخطی، آباکوس به شکل خودکار به انتخاب نمو بارگذاری مناسب و تلورانس همگرایی پرداخته و به شکل پیوسته در طی تحلیل آن ها تنظیم می کند تا پاسخ دقیق به شکل کارآمدی به دست آید.

آباکوس از دو فرآیند تحلیلی اصلی تشکیل شده است: آباکوس/استاندارد و آباکوس/صریح. آباکوس/استاندارد یک فرایند تحلیلی کلی می باشد؛ که توانایی حل محدوده وسیعی از تحلیل های خطی و غیرخطی، استاتیکی و دینامیکی را دارد. این فرایند سیستم معادلات حاکم بر مسئله را به شکل ضمنی در هر بازه تحلیل حل می کند. در مقابل، آباکوس/صریح تحلیل را در طی زمان با استفاده از زمانی بسیار کوچک، بدون حل سیستم درگیر معادلات در هر بازه به جلو می برد. آباکوس/صریح از فرمولاسیون المان محدود دینامیکی صریح استفاده می کند. این فرایند برای مدل سازی وقایع دینامیکی گذرا و نیز مسائل با غیرخطی بالا مفید می باشد.



شکل ۱- مراحل تحلیل مدل توسط نرم افزار آباکوس.

تعریف شده در مدل می پردازند. خروجی های تحلیل که در فایل های دودوی ذخیره می شوند آماده ارزیابی و پس- پردازش می باشند. مدت زمان انجام پروسه تحلیل بسته به پیچیدگی های موجود در مدل و قدرت و توانایی پردازشگر

در مرحله پیش- پردازش مدل بر اساس مسئله فیزیکی اصلی، تعریف شده و فایل ورودی آباکوس تشکیل می شود. این مدل معمولاً از طریق محیط CAE تولید می شود. در مرحله شبیه سازی فرآیندهای تحلیلی آباکوس به حل مسئله عددی

سد در سال ۱۹۶۴ در ایالت مازندران هندوستان و بر روی رودخانه کوینا با مصالح نامرغوب احداث شده است. این سد در حدود ۸۰۷ متر طول تاج و ۱۰۳ متر ارتفاع دارد. علت انتخاب این سد آن است که مطالعات زیادی بر روی آن انجام شده و به کمک این مدل بررسی صحت نتایج به راحتی امکان پذیر است. مدلی که مطالعات بر روی آن صورت گرفته است، مشابه مقطع فاقد سرریز کوینا می باشد که مشخصات آن در جدول ۱ دیده می شود.

شکل شماره ۲ مقطع عرضی حداکثر این سد را نشان می دهد که هندسه سد در مدل سازی با نرم افزار مشابه این مقطع در نظر گرفته شده است. شکل ۳ نحوه مش بندی بدنه سد را در مدل المان محدود نشان می دهد. جهت مدل کردن سد از ۲۵۰ المان ۴ گرهی از نوع Plane Stress استفاده شده است (CPS4R).

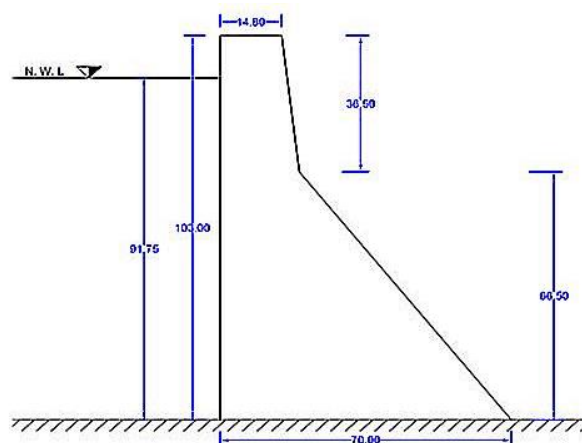
مورد استفاده ممکن است بسیار متغیر باشد. در انتهای شبیه سازی، پس از محاسبه پارامترها و متغیرهای پایه ای در مدل می توان به ارزیابی نتایج پرداخت. این ارزیابی نیز مجدداً می تواند از طریق محیط CAE صورت گیرد که در آن می توان به ترسیم و مشاهده کانتورهای رنگی، انیمیشن ها، فرم تغییر شکل یافته سازه، نمودارهای تاریخچه زمانی و غیره پرداخت. لازم به ذکر است که نرم افزار آباکوس توانایی تولید انبوهی از پارامترهای خروجی را دارد. برای جلوگیری از اشغال بیش از حد فضای دیسک می توان به سفارش خروجی های لازم برای تفسیر نتایج به دست آمده بسنده کرد.

مشخصات بدنه سد

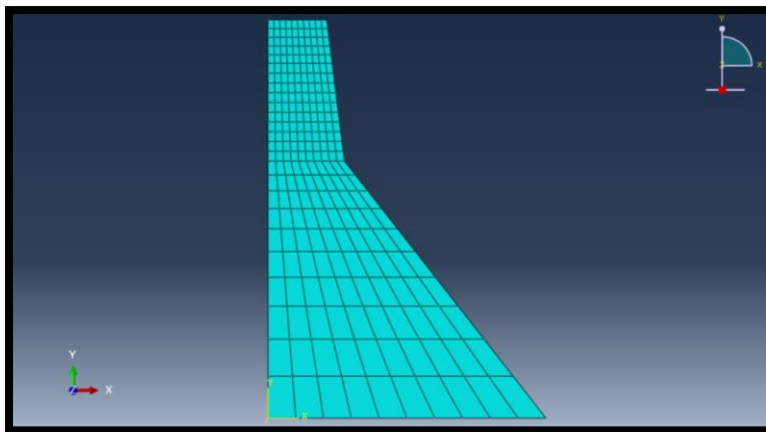
سد مورد مطالعه در این تحقیق سد کوینا است. این سد یکی از مشهورترین سدهای بتنی وزنی است که رفتار دینامیکی آن توسط محققین متعددی بررسی شده است، این

جدول ۱- مشخصات هندسی سد کوینا.

مشخصات هندسی	متر
طول تاج سد	۸۰۷
ارتفاع سد	۱۰۳
ضخامت تاج سد	۱۴/۸
ضخامت سد در تراز پی	۷۰
شیب بالادست سد	صفر
شیب پایین دست سد	۱ به ۰/۷۵
ماکزیمم تراز آب از کف رودخانه	۹۱/۷۵



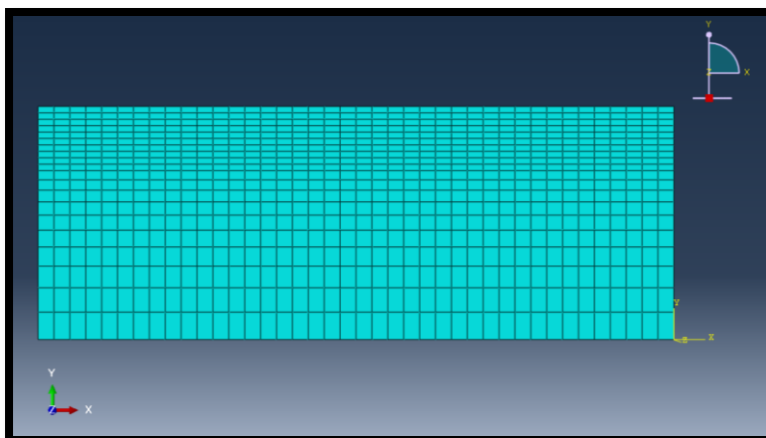
شکل ۲- مقطع عرضی حداکثر سد کوینا.



شکل ۳- مدل المان محدود سد کوبنا.

مشخصات مخزن

آب مخزن غیر چرخشی و غیر ویسکوز فرض شده است. وزن حجمی آب، ۱۰ کیلو نیوتن بر مترمکعب و سرعت امواج فشاری ۱۴۴۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. جهت مدل کردن مخزن سد از ۸۰۰ المان ۴ گرهی از نوع Acoustic استفاده شده است (AC2D4). شکل ۴ نحوه مش بندی مخزن را در مدل المان محدود نشان می دهد.



شکل ۴- مدل المان محدود مخزن سد کوبنا در حالت مخزن پر.

اندرکنش سد و مخزن

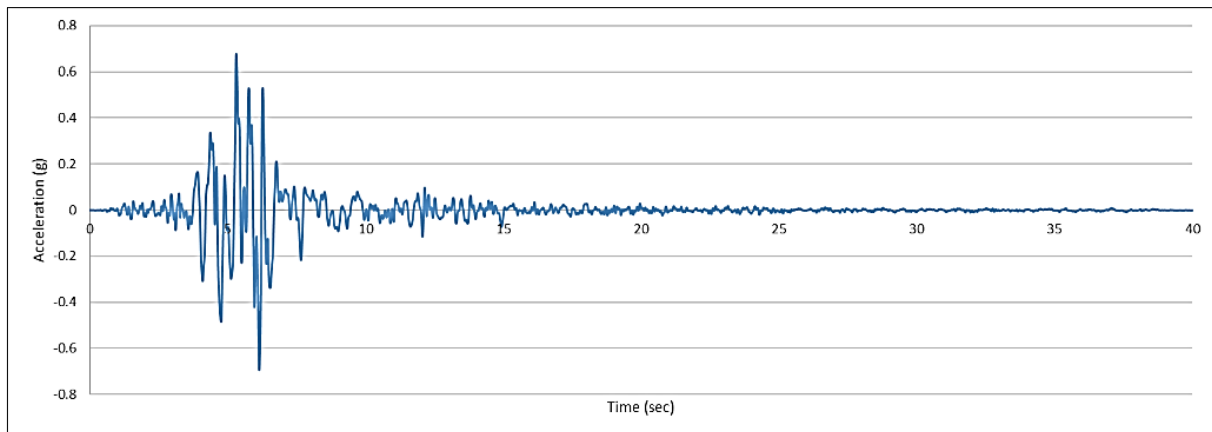
برای انتهای دور دریاچه شرط عدم برگشت موج در نظر گرفته شده که معادل شرایط طول بی نهایت می باشد. در تحلیل های انجام گرفته سیال تراکم پذیر فرض شده است.

نحوه اعمال رکورد زلزله

برای اعمال زلزله از رکوردهای زلزله Kobe استفاده شده است. به این منظور از رکوردها در جهت قائم صرف نظر شده و تنها در جهت افقی رکوردهای زلزله مذکور در کف سد و مخزن اعمال شده است. در شکل زیر تاریخچه زمانی شتاب لرزه ای اعمال شده قابل مشاهده است.

در مدل ایجاد شده توسط نرم افزار Abaqus اندرکنش بدنه سد و مخزن توسط گره زدن المان های مخزن و سد امکان پذیر شده است. به این ترتیب با کوپل شدن معادلات حاکم بر مدل المان محدود سد با معادلات حاکم بر مدل المان محدود مخزن تأثیر اندرکنش سد و مخزن در پاسخ سد لحاظ خواهد شد.

انتهای دور دریاچه



شکل ۵- تاریخچه زمانی شتاب زلزله Kobe در جهت افقی.

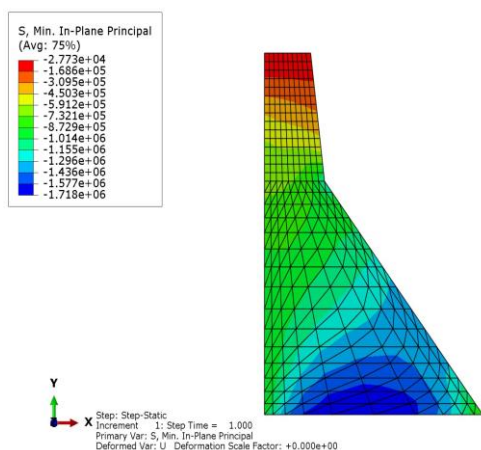
استاتیک در بالادست بدنه سد اعمال گردیده است. شکل‌های شماره ۶ الف و ب کانتور تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل را نشان می‌دهند. در این کانتورها و در سایر شکل‌های مشابه علامت مثبت نشان‌دهنده تنش کششی و علامت منفی نشان‌دهنده تنش فشاری است.

در اثر اعمال بار استاتیکی تغییر مکان تاج سد در جهت افقی ۳/۸ میلی‌متر و در جهت قائم ۱/۹ میلی‌متر به‌دست آمده است.

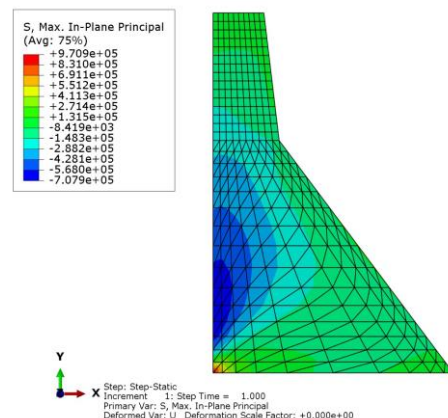
در این تاریخچه زمانی حداکثر شتاب در لحظه ۵/۳۲ ثانیه و در جهت مثبت نمودار برابر ۰/۶۷۸ شتاب ثقل و حداکثر شتاب در لحظه ۶/۱۵ ثانیه و در جهت منفی نمودار به میزان ۰/۶۹۴ شتاب ثقل است.

حالت آنالیز استاتیکی (S)

آنالیز استاتیکی با فرض مخزن در تراز ۹۱/۷۵ متر انجام شده است. در این آنالیز فشار مخزن به‌صورت هیدرو



ب- تنش اصلی حداقل در حالت S.



الف- تنش اصلی حداکثر در حالت S.

شکل ۶- کانتور تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل (برحسب پاسکال).

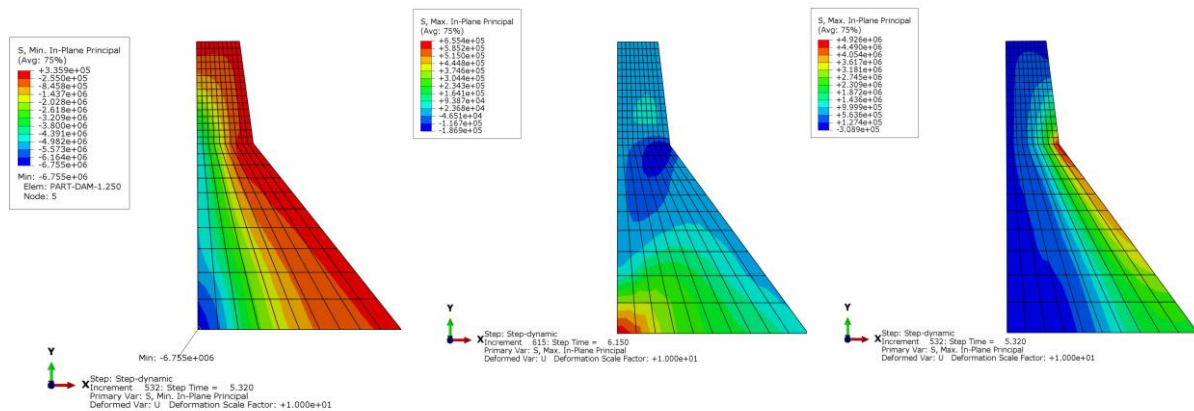
تنها تحت اثر بار زلزله قرار گرفته است. در این بخش نتایج مربوط به آنالیز دینامیکی در این حالت ارائه شده است. شکل‌های شماره ۷ الف تاج کانتور تنش‌های حداکثر و حداقل

بحث و نتایج

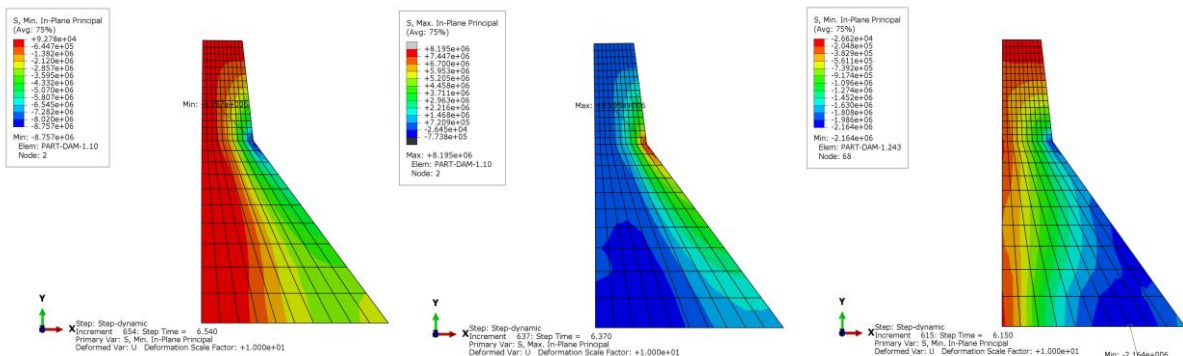
حالت آنالیز دینامیکی مخزن خالی (D1)

در حالت مخزن خالی هیچ‌گونه فشار هیدرواستاتیک یا هیدرو دینامیک به بدنه سد وارد نخواهد شد. به این ترتیب سد

را در زمان‌های ۵/۳۲ ثانیه و ۶/۱۵ ثانیه که حداکثر و حداقل شتاب لرزهای به سازه اعمال می‌شود، نشان می‌دهند.



الف- تنش اصلی حداکثر در ثانیه ۵/۳۲ (حداکثر شتاب لرزهای) در حالت D1. ب- تنش اصلی حداکثر در ثانیه ۶/۱۵ (حداکثر شتاب لرزهای) در حالت D1. پ- تنش اصلی حداقل در ثانیه ۵/۳۲ (حداکثر شتاب لرزهای) در حالت D1.

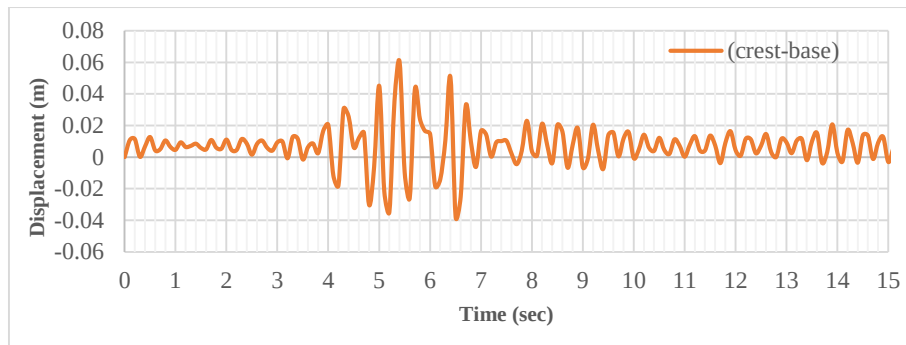


ت- تنش اصلی حداقل در ثانیه ۶/۱۵ (حداکثر شتاب لرزهای) در حالت D1. ث- حداکثر تنش کششی در حالت D1. ج حداکثر تنش فشاری در حالت D1.

شکل ۷- کانتور تنش‌های حداکثر و حداقل را در زمان‌های ۵/۳۲ ثانیه و ۶/۱۵ ثانیه (برحسب پاسکال).

است که اگر جهت شتاب لرزهای اعمال شده از پایین دست به بالادست باشد (ثانیه ۶/۱۵)، حداکثر تنش فشاری در محل کف سد در محدوده پایین دست به وقوع خواهد پیوست. شایان ذکر است که حداکثر تنش‌های کششی و فشاری لزوماً در زمان‌های مشخص شده اتفاق نمی‌افتد. شکل‌های شماره ۷- ث و ۷- ج حداکثر تنش‌های کششی و فشاری را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل‌ها، حداکثر تنش‌های کششی و فشاری به ترتیب در ثانیه‌های ۶/۳۷ و ۶/۵۴ و در موقعیت تغییر شیب پایین دست در تراز ۶۶/۵ متر رخ می‌دهد. شکل شماره ۸ تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج نسبت به کف سد را در حالت D1 نشان می‌دهد.

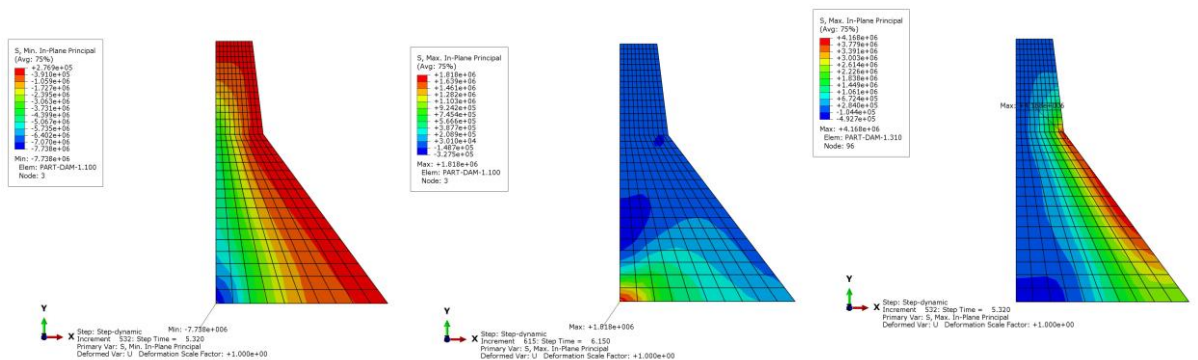
بر اساس شکل‌های شماره ۷- الف و ۷- ب در زمانی که جهت شتاب زلزله اعمال شده به سیستم در کف سد و مخزن از جهت بالادست به سوی پایین دست است (ثانیه ۵/۳۲)، حداکثر تنش کششی در محل تغییر شیب پایین دست رخ می‌دهد. این در حالی است که اگر جهت شتاب لرزهای اعمال شده از پایین دست به بالادست باشد (ثانیه ۶/۱۵)، حداکثر تنش کششی در محل پاشنه سد به وقوع خواهد پیوست. شکل‌های ۷- پ و ۷- ت نشان می‌دهند، در زمانی که جهت شتاب زلزله اعمال شده به سیستم در کف سد و مخزن از جهت بالادست به سوی پایین دست است (ثانیه ۵/۳۲)، حداکثر تنش فشاری در محل در محل پاشنه سد رخ می‌دهد. این در حالی



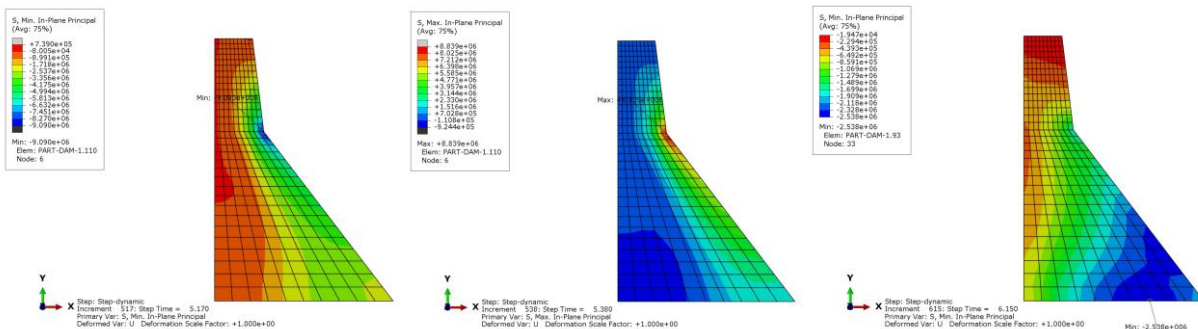
شکل ۸- تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج سد نسبت به کف در حالت D1.

حالت آنالیز دینامیکی مخزن نیمه‌پر (D2)
در حالت مخزن نیمه‌پر تراز مخزن ۴۵ متر در نظر گرفته شده است. در این بخش نتایج مربوط به آنالیز دینامیکی در این حالت ارائه شده است. شکل‌های شماره ۹ الف تا ج

کانتور تنش‌های حداکثر و حداقل را در زمان‌های ۵/۳۲ ثانیه و ۶/۱۵ ثانیه که حداکثر شتاب لرزه‌ای به سازه اعمال می‌شود نشان می‌دهند.



الف- تنش اصلی حداکثر در ثانیه ۵/۳۲ (حداکثر شتاب لرزه‌ای) در حالت D2. ب- تنش اصلی حداکثر در ثانیه ۶/۱۵ (حداکثر شتاب لرزه‌ای) در حالت D2. پ- تنش اصلی حداقل در ثانیه ۵/۳۲ (حداکثر شتاب لرزه‌ای) در حالت D2.



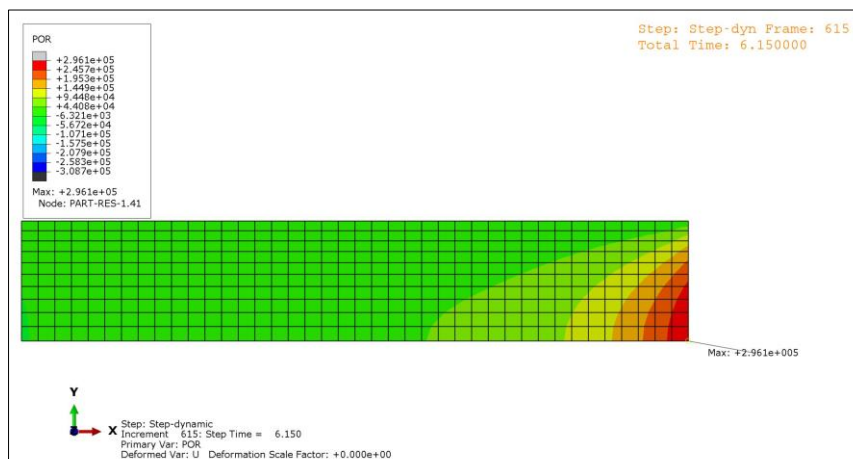
ت- تنش اصلی حداقل در ثانیه ۶/۱۵ (حداکثر شتاب لرزه‌ای) در حالت D2. ث- حداکثر تنش کششی در حالت D2. ج- حداکثر تنش فشاری در حالت D2.

شکل ۹- کانتور تنش‌های حداکثر و حداقل را در زمان‌های ۵/۳۲ ثانیه و ۶/۱۵ ثانیه.

مشابه حالت قبل (D1) و بر اساس شکل‌های شماره ۹- الف و ب در زمانی که جهت شتاب زلزله اعمال شده به سیستم در کف سد و مخزن از جهت بالادست به‌سوی پایین‌دست است (ثانیه ۵/۳۲)، حداکثر تنش کششی در محل تغییر شیب پایین‌دست رخ می‌دهد. همچنین اگر جهت شتاب لرزه‌ای اعمال شده از پایین‌دست به بالادست باشد (ثانیه ۶/۱۵)،

این شکل‌ها، حداکثر تنش‌های کششی و فشاری به ترتیب در ثانیه‌های ۶/۱۷ و ۶/۳۸ و در موقعیت تغییر شیب پایین‌دست در تراز ۶۶/۵ متر رخ می‌دهد. این به این معنی است که نیمه‌پر بودن مخزن نسبت به حالتی که در آن مخزن خالی است زمان وقوع حداکثر تنش‌های کششی و فشاری را تغییر می‌دهد. هرچند الگوی توزیع تنش به شکل قابل‌ملاحظه‌ای تغییر نیافته است.

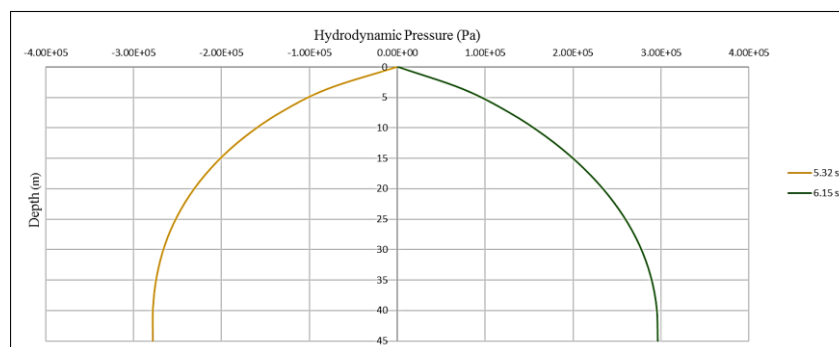
در شکل شماره ۱۰ کانتور فشار هیدرودینامیک مخزن در زمانی که بیشترین فشار هیدرودینامیک رخ داده است (ثانیه ۶/۱۵) و در حالت D2 (برحسب پاسکال) قابل‌مشاهده است.



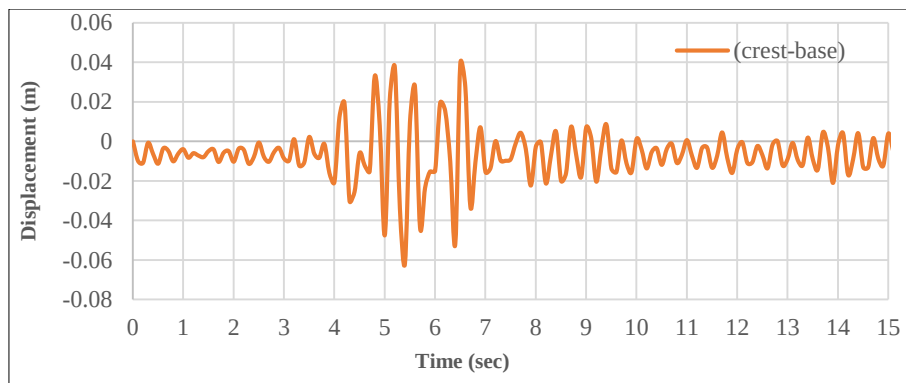
شکل ۱۰- کانتور فشار هیدرودینامیک مخزن در حالت D2 (برحسب پاسکال).

تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج و کف سد را در حالت D2 در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این حالت حداکثر جابه‌جایی تاج نسبت به کف مخزن به ترتیب در حدود ۰/۰۶ متر محاسبه شده است.

شکل شماره ۱۱ فشار آکوستیک مخزن را در سطح مشترک سد و مخزن در زمان‌های ۵/۳۲ و ۶/۱۵ ثانیه در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد. قابل‌ذکر است که این فشار تنها مربوط به فشار هیدرودینامیک مخزن است و برای محاسبه کل فشار، می‌بایست فشار هیدرواستاتیک به آن اضافه شود.



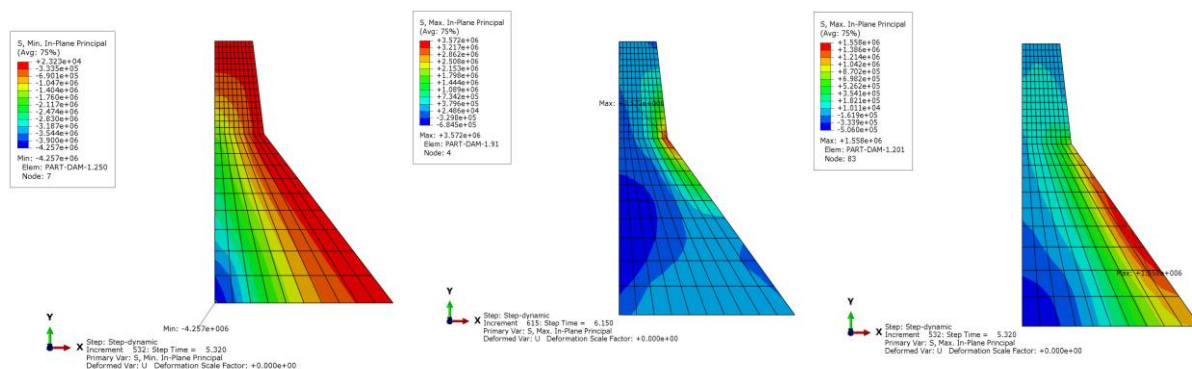
شکل ۱۱- فشار آکوستیک مخزن در سطح مشترک سد و مخزن در زمان‌های ۵/۳۲ و ۶/۱۵ ثانیه در عمق‌های مختلف در حالت D2.



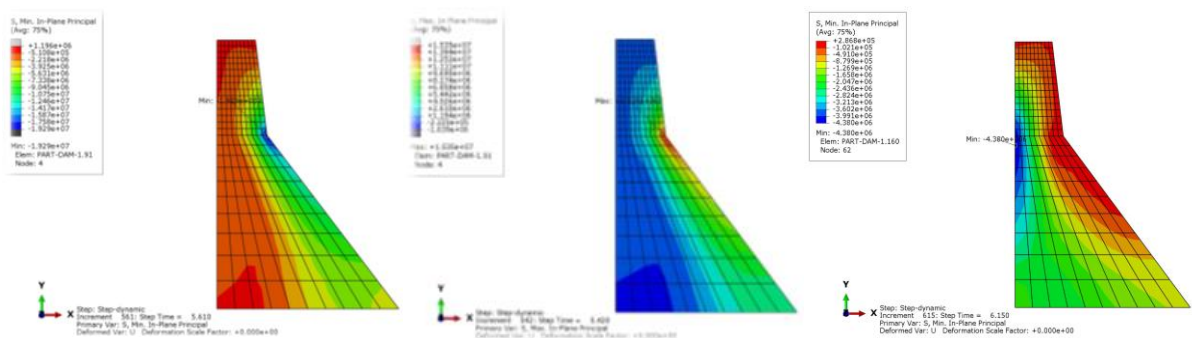
شکل ۱۲- تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج نسبت به کف سد در حالت D2.

حالت آنالیز دینامیکی مخزن پر (D3)
در حالت مخزن پر، تراز مخزن برابر ۹۱/۷۵ متر در نظر گرفته شده است. در این بخش نتایج مربوط به آنالیز دینامیکی در این حالت ارائه شده است. شکل‌های شماره ۱۳- الف تا ج

کانتور تنش‌های حداکثر و حداقل را در زمان‌های ۵/۳۲ ثانیه و ۶/۱۵ ثانیه که حداکثر و حداقل شتاب لرزه‌ای به سازه اعمال می‌شود نشان می‌دهند.



الف- تنش اصلی حداکثر در ثانیه ۵/۳۲ (حداکثر شتاب لرزه‌ای در حالت D3).
ب- تنش اصلی حداکثر در ثانیه ۶/۱۵ (حداکثر شتاب لرزه‌ای در حالت D3).
پ- تنش اصلی حداقل در ثانیه ۵/۳۲ (حداکثر شتاب لرزه‌ای در حالت D3).



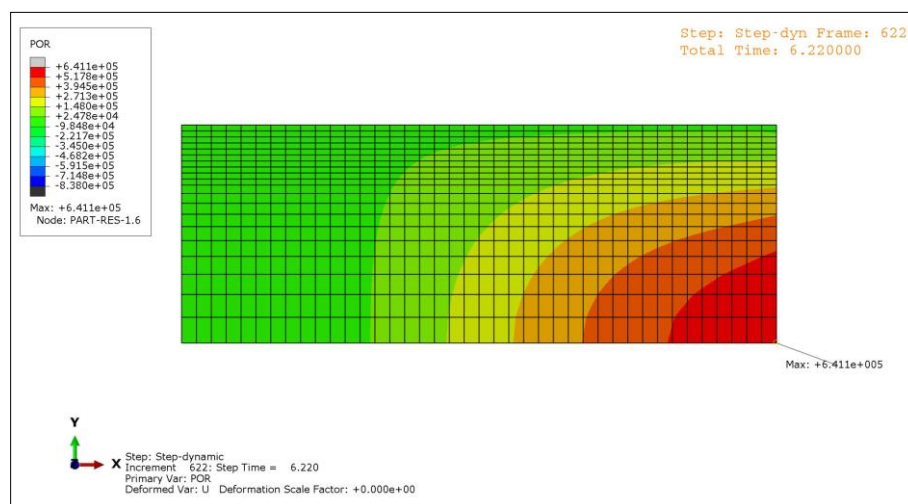
ت- تنش اصلی حداقل در ثانیه ۶/۱۵ (حداکثر شتاب لرزه‌ای در حالت D3).
ث- حداکثر تنش کششی در حالت D3.
ج- حداکثر تنش فشاری در حالت D3.

شکل ۱۳- کانتور تنش‌های حداکثر و حداقل را در زمان‌های ۵/۳۲ ثانیه و ۶/۱۵ ثانیه (برحسب پاسکال).

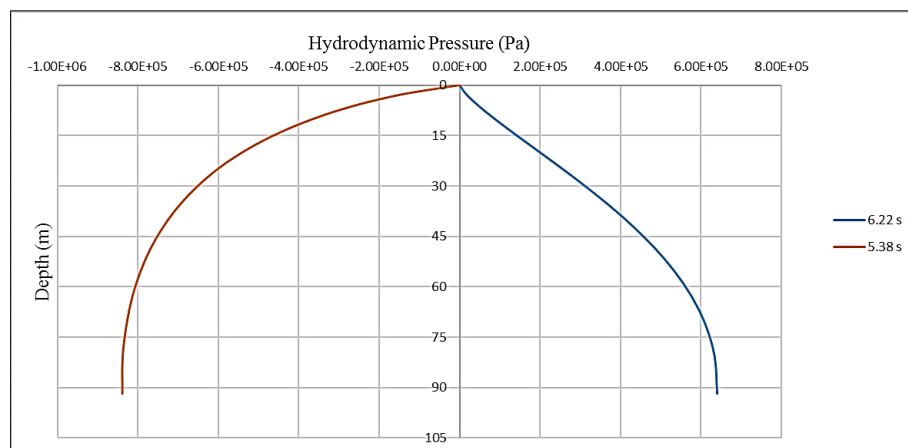
حداقل فشار هیدرودینامیکی مخزن را نشان می‌دهد که به ترتیب در زمان‌های ۶/۲۲ و ۵/۳۸ ثانیه رخ داده است. در شکل شماره ۱۶ تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج و کف سد در حالت D3 نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده جابه‌جایی تاج سد در این حالت نسبت به حالت مخزن پر در حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است (۰/۲۴۱ متر در جهت جریان و ۰/۲۴۵ متر در خلاف جهت جریان). نکته‌ای که در خصوص جابه‌جایی حائز اهمیت است این است که حداکثر جابه‌جایی در زمان پیک شتاب لرزه‌ای رخ نمی‌دهد و با کمی تأخیر نسبت به آن رخ می‌دهد. این مسئله به‌دلیل پیچیدگی رفتار دینامیکی سد است.

بر اساس نتایج تنش‌های کششی حداکثر در زمان‌های ۵/۳۲ و ۶/۱۵ به ترتیب در موقعیت‌های شیب پایین‌دست سد و محل تغییر شیب پایین‌دست در تراز ۶۶/۵ متر رخ می‌دهد. از این رو افزایش تراز مخزن نسبت به حالت مخزن نیمه‌پر موجب تغییر موقعیت تنش‌های حداکثر شده است. در مورد تنش فشاری نیز در ثانیه ۶/۱۵ موقعیت حداکثر تنش بر روی وجه بالادست و در محدوده تراز ۶۵ متر است که این موقعیت برای حالت مشابه در شرایط مخزن نیمه‌پر متفاوت است. به‌هر حال حداکثر تنش‌های کششی و فشاری در ثانیه‌های ۵/۴۲ و ۵/۶۱ رخ می‌دهد که مشابه با مخزن نیمه‌پر موقعیت این تنش‌ها در محل تغییر شیب پایین‌دست است.

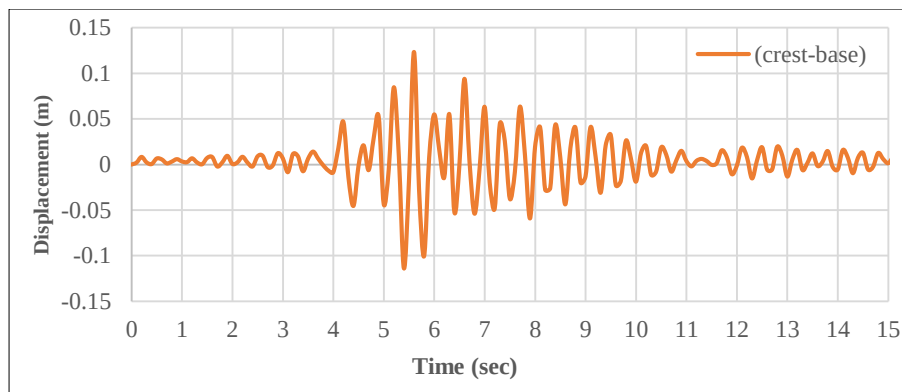
بر اساس شکل شماره ۱۴ حداکثر فشار هیدرودینامیکی مخزن برابر ۰/۶۴۱ مگا پاسکال است. شکل شماره ۱۵ حداکثر و



شکل ۱۴- کانتور فشار هیدرودینامیک مخزن در حالت D3 (برحسب پاسکال).



شکل ۱۵- فشار آکوستیک مخزن در سطح مشترک سد و مخزن در زمان‌های ۵/۳۸ و ۶/۲۲ ثانیه در عمق‌های مختلف در حالت D3.



شکل ۱۶- تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج نسبت به کف سد در حالت D3.

مقایسه نتایج جابه‌جایی‌های افقی در حالات مختلف

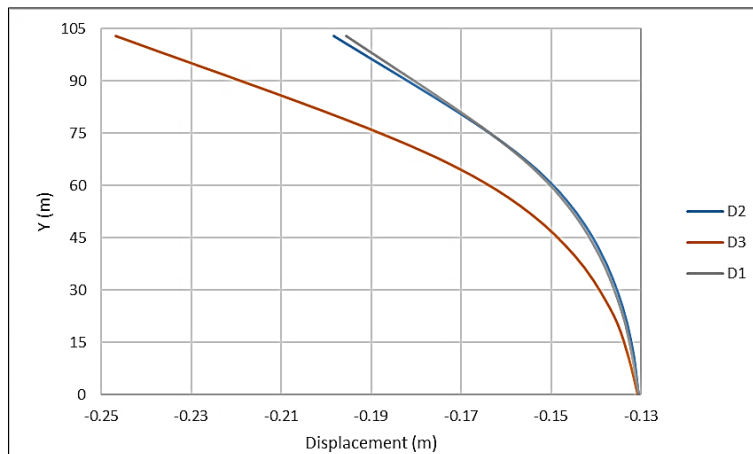
در این بخش نتایج جابه‌جایی وجه بالادست سد در زمان وقوع حداکثر جابه‌جایی و نیز تاج سد در زمان‌های مختلف برای حالات مختلف تحلیل ارائه شده است.

در شکل شماره ۱۷ جابه‌جایی‌های حداکثر برای حالات D1 و D2 در ثانیه ۵/۳۷ رخ داده است در حالی که در حالت D3 این جابه‌جایی‌ها مربوط به ثانیه ۵/۴۱ می‌گردد. در شکل شماره ۱۸ نیز جابه‌جایی‌های حداکثر برای حالات D1 و D2 در ثانیه ۶/۵۳ و در حالت D3 در ثانیه ۶/۵۹ اتفاق می‌افتد.

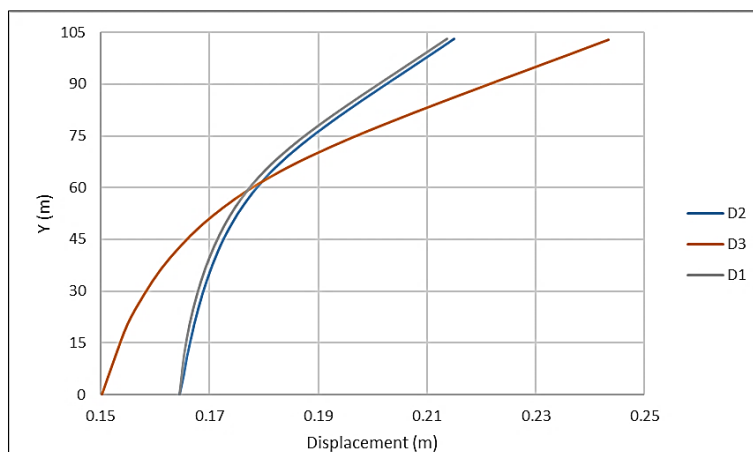
بر اساس نتایج ارائه شده به‌طور کلی در حالت دینامیکی مخزن پر (D3) جابه‌جایی تاج سد بیش از حالات دیگر است. همان‌طور که اشاره شد حداکثر جابه‌جایی افقی در زمان پیک شتاب زلزله رخ نمی‌دهد. با توجه به اینکه در شرایط مخزن خالی نیز این امر مشهود است، می‌توان دلیل اصلی آن را پیچیدگی رفتار دینامیکی سد عنوان کرد و سهم اندرکنش سد و مخزن را در آن ناچیز تصور نمود. در حالات مخزن خالی (D1) و مخزن نیمه‌پر (D2) جابه‌جایی در حدود یکدیگر است در حالی که با افزایش تراز مخزن از ۴۵ متر به ۹۱/۷۵ متر تغییرات چشمگیری در حداکثر جابه‌جایی‌ها رخ داده است.

شکل شماره ۱۹ نشان می‌دهد در حالت D1 که مخزن خالی است منحنی جابه‌جایی تاج سد نسبت به سایر حالات هموارتر است. با افزایش تراز مخزن بر میزان نوسان جابه‌جایی‌ها و نیز مقدار آن‌ها افزوده می‌شود.

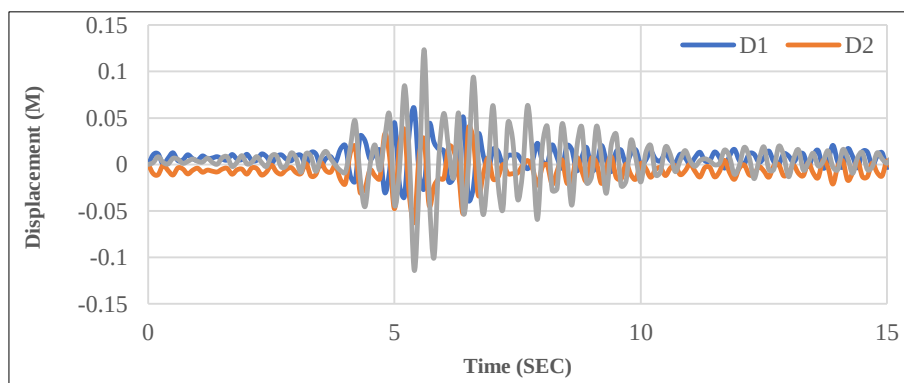
منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج سد در حالت D1 که مخزن خالی است نسبت به سایر حالات هموارتر است. با افزایش تراز مخزن بر میزان نوسان جابه‌جایی‌ها و نیز مقدار آن‌ها افزوده می‌شود. این مسئله ناشی از اندرکنش سد و مخزن و مشاهده تأثیر نوسان فشار هیدرودینامیک مخزن در منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج سد می‌باشد. حداکثر فشار هیدرودینامیک وارده از سوی مخزن به بدنه سد در حالت D2 در حدود ۰/۲۹۶ مگاپاسکال است. این مقدار در حالت D3 با ۱۱۷ درصد افزایش به ۰/۶۴۱ مگاپاسکال می‌رسد. لازم به ذکر است فشار حداکثر یادشده در حالت D2 در ثانیه ۶/۱۵ و زمان پیک شتاب لرزه‌ای رخ می‌دهد، در حالی که در حالت D3 و با افزایش تراز مخزن این اتفاق با اندکی تأخیر و در زمان ۶/۲۲ ثانیه رخ می‌دهد. دلیل این مسئله این است که با افزایش تراز مخزن پیچیدگی‌های ناشی از تأثیر متقابل ارتعاش سد و مخزن بر روی یکدیگر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷- حداکثر جابه‌جایی وجه بالادست سد در جهت بالادست به پایین‌دست در حالات مختلف آنالیز.



شکل ۱۸- حداکثر جابه‌جایی وجه بالادست سد در جهت پایین‌دست به بالادست در حالات مختلف آنالیز.



شکل ۱۹- مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی تاج سد در حالات مختلف آنالیز.

نتیجه‌گیری

دینامیکی در حالت مخزن نیمه‌پر (D2) و دینامیکی در حالت مخزن پر (D3) بودند. مقادیر تنش‌های کششی و فشاری در حالات مختلف آنالیز بسیار قابل توجه است. عمده این تنش‌های حداکثر در محل تغییر شیب پایین‌دست (تراز ۶۶/۵ متر)

نتایج آنالیز المان محدود سد کوپنا تحت اثر شتاب لرزه‌ای تعریف شده ارائه شد. آنالیزهای انجام شده شامل آنالیز استاتیکی (S)، دینامیکی در حالت مخزن خالی (D1)،

نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر، مهندسی عمران و محیط زیست، ۱(۴۸): ۹۱-۱۰۳.

مظفری، م.، ۱۳۹۸. بررسی مشکل فرار آب از مخزن سد شاه قاسم با استفاده از آنالیز هیدروژئولوژیکی. هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۱۴۵-۱۵۶.

مقیم، ه.، راوش، ف.، کشاورز بخشایش، م.، ۱۳۹۹. بررسی قابلیت آزمون فشار آب در محاسبه میزان نشت از پرده آببند سد سیمره در استان ایلام. هیدروژئولوژی، ۵(۱): ۱۵-۱.

Arici, Y., Binici, B. and Aldemir, A., 2014. Comparison of the expected damage patterns from two-and three-dimensional nonlinear dynamic analyses of a roller compacted concrete dam. Structure and Infrastructure Engineering, 10(3): 305-315.

Bustamante, J. I., Rosenblueth, E., Herrera, I., Flores, A., 1963. Presion hidrodinamica en presas y depositos. Boletin Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica, 1(2).

Chakrabarti, P., Chopra A. K., 1973. Earthquake Analysis of Gravity Dams Including Hydrodynamic Interaction", Earthquake Engrg.Struct. Dyn.. 2(2): 143- 160.

Chopra, A.K., Chakarabarti, P. 1981. Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 9(4): 363-383.

Chopra, Anil K., and P. Chakrabarti., 1972. The earthquake experience at Koyna dam and stresses in concrete gravity dams. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1.2: 151-164.

Chopra, A.K., 1967. Hydrodynamic pressure on dams during earthquakes. Proc., ASCE, EM6.

Feneves, G., Chopra, A.K., 1984. Earthquake analysis of concrete gravity dams including bottom dam-water-foundation rock interaction. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 12: 663-683.

Labib zadeh, M. Sadr nejad, S., Khaje dezfuly, A., 2010, Thermal assessment of karun-1 dam, Academic journals inc, 5(4): 251-266.

Rao. R., M., Shaik. N.N., 2014. Finite Element Modelling and Seismic Response Evaluation of Large Concrete Gravity Dams - An Approach based on Indian Standard Codal Guidelines,

رخ داده و موجب تمرکز تنش در این قسمت شده اند. در صورتی که مقطع عرضی سد به گونه ای طرح می گردید که این شکست یا تغییر شیب پایین دست در تراز بالتر و نزدیک به تاج سد پیش بینی می شد مقادیر تنش در این قسمت به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می یافت.

به طور کلی در شرایط پر بودن مخزن سطح تنش ها و جابه جایی ها نسبت به سایر حالات بیشتر است. در حالت D3 حداکثر تنش کششی به دست آمده ۷۴ درصد بیش از مقدار مشابه در حالت D2 است. در مورد تنش فشاری این میزان به ۱۱۲ درصد می رسد. این در حالی است که در حالت D2 حداکثر تنش کششی و فشاری به ترتیب ۸ و ۴ درصد نسبت به D1 بیشتر است. این مسئله در خصوص جابه جایی ها نیز صدق می کند. با وجود تغییر تراز آب مخزن، به طور کلی الگوی توزیع تنش ها دچار تغییرات اساسی نمی گردد. هر چند در برخی لحظات موقعیت وقوع حداکثر تنش در حالات مختلف متفاوت است ولی حداکثر تنش های فشاری و کششی در ناحیه تغییر وجه شیب پایین دست رخ می دهند. حداکثر جابه جایی افقی دقیقاً در زمان پیک شتاب زلزله رخ نمی دهد. با توجه به اینکه در شرایط مخزن خالی نیز این امر مشهود است، می توان دلیل اصلی آن را پیچیدگی رفتار دینامیکی سد عنوان کرد و سهم اندرکنش سد و مخزن را در آن ناچیز تصور نمود. مطلب مذکور در خصوص حداکثر تنش های کششی و فشاری نیز صدق می کند.

منابع

رستگاری پور، ف.، ۱۳۹۹. کاربرد مدل تصادفی فازی بازه ای چند مرحله ای در تخصیص آب مطالعه موردی: سد لتیان. هیدروژئولوژی، ۵(۱): ۴۷-۶۰.

قاضی مرعشی، ا.، و استاد حسین، ح.، ۱۳۹۳. تحلیل ترک در سدهای بتنی وزنی با استفاده از روش های اجزای محدود و با بهره گیری از معیار مکانیک شکست غیرخطی، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل.

کلانی ساروکلایی، ل.، نوائی نیا، ب.، ۱۳۹۵. تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی در اثر حرکات غیریکنواخت انتقالی و دورانی زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن،

International Journal of Emerging Engineering Research and Technology, 2(2): 178-186.

Varughese.J.A., Sreelakshmi.N., 2016. Seismic Behavior of Concret Gravity Dams, Advanced in Computational Design, 1(2): 195-20.

Westergaard, H.M., 1933. Water pressure on dams during earthquake, Transaction, ASCE, 98:418-433

Zangar, C.N., Haefei, R.J., 1952. Electric analog indicates effects of horizontal earthquake shock on dams. Civil Eng. Pp:54-55.

Zhong, H., Wang, NL., Lin, G., 2013. Seismic response of concrete gravity dam reinforced with FRP sheets on dam surface. Water Science and Engineering, 6(4): 409-422.