نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال دوم / شماره چهارم / بهار ۱۳۹۴

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
2nd Year / No. 4 / June 2015

بررسی تأثیر مؤلفه پیچشی زلزله روی رفتار لرزه ای سدهای بتنی دو قوسی با استفاده از مدل اجزای محدود

مجید پاسبانی خیاوی*[۱]
مرتضی علی قربانی[۲]
اسدالله ابولی[۳]

چکیده

در این مقاله به تاثیر مؤلفه پیچشی بر روی پاسخ لرزه‌ای سد دو قوسی پرداخته می شود. برای انجام آنالیز از نرم افزار Ansys که مبتنی بر روش اجزای محدود می باشد، استفاده شده و تاثیر اندرکنش سد، مخزن و فونداسیون در مدل لحاظ شده است. با توجه به رفتار و هندسه سدهای دو قوسی، مدل‌سازی به صورت سه بعدی انجام گرفته و برای حل معادلات دینامیکی استخراج شده نیز از روش Newmark که یک روش ضمنی و پایدار از لحاظ عددی می باشد، استفاده شده است. به عنوان یک مطالعه موردی، آنالیز لرزه‌ای سد قوسی ماروپوینت مورد توجه قرار گرفته است. برای بررسی تأثیر مؤلفه پیچشی، در ابتدا با اعمال زمین لرزه السترو، مدل تهیه شده برای دو حالت اعمال مؤلفه‌های انتقالی تنها و اعمال مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی به صورت توأم مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل با هم مقایسه شده است. نتایج حاصل از تحلیل، تأثیر مؤلفه پیچشی را در افزایش پاسخ‌ها نشان می دهد. در ادامه برای بررسی شدت زلزله و محتوای فرکانسی آن، مدل مورد نظر تحت اعمال مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی زلزله تفت قرار گرفته و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده برای این حالت تأثیر کاهشی مؤلفه پیچشی را در پاسخ لرزه‌ای نشان می دهد. در نتیجه می‌توان گفت که مؤلفه پیچشی با توجه به شدت زلزله و محتوای فرکانسی آن می تواند پاسخ لرزه ای را افزایش یا کاهش دهد. بنابراین برای طراحی ایمن سدهای قوسی لازم است که با انتخاب شتاب نگاشت‌های مناسب زمین لرزه، اثرات مؤلفه پیچشی را مورد توجه قرار داد.

واژه‌های کلیدی

زلزله، سد قوسی، مؤلفه پیچشی، اجزای محدود.

۱.*استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی pasbani@uma.ac.ir
۲. مربی گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی gorbani@uma.ac.ir
۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران- سازه های هیدرولیکی، دانشگاه محقق اردبیلی aboliiman@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۰۵

مقدمه

در هنگام بروز زلزله به دلیل تأثیر امواج، مؤلفه‌های انتقالی همراه با مؤلفه پیچشی حرکت زمین وجود دارند، ولی با توجه به اینکه امکان ثبت مؤلفه پیچشی زمین به طور مستقیم به وسیله دستگاه‌های شتاب نگاری وجود ندارد، در تحلیل دینامیکی سازه‌ها معمولا مؤلفه‌های دورانی در نظر گرفته نمی‌شوند. مؤلفه پیچشی جنبش شدید زمین در تغییرات پاسخ سازه هنگام وقوع حرکات زمین لرزه می‌تواند تأثیر زیادی داشته باشد، لذا لزوم تحقیقات بیشتر راجع به این موضوع ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های مختلفی جهت محاسبه این مؤلفه توسط محققین ارائه گردیده است و اهمیت این موضوع در مطالعاتی که صورت گرفته نشان داده شده است. حتی سازه‌های متقارن نیز هنگام زمین لرزه می‌توانند تحت تحریکات پیچشی قابل توجهی قرار گیرند (ناتان و مک‌کنزی[۱] (۱۹۷۵)، لی و تریفوناک[۲] (۱۹۸۵) و لرا و چوپرا[۳] (۱۹۹۴).

اثر حرکت دورانی زمین، تنها نظر تعداد کمی از زلزله شناسان را در دهه‌های گذشته به خود جلب کرده است. اگر چه برخی از محققین بیان کرده‌اند که اثر حرکت دورانی زمین ناشی از زلزله می‌تواند بر روی سطح زمین و بعضی سازه‌ها قابل مشاهده باشد، اما ابزارهای اندازه گیری حرکت دورانی زمین هنوز برای اندازه-گیری آن دقت کافی ندارند.

در مهندسی زلزله، اثر حرکت دورانی زمین برای سازه‌های بلند مانند پل‌ها، خطوط لوله و یا سیستم‌های انتقال، به رسمیت شناخته شده است. در آغاز، این اثرات برای سازه‌های غیر متقارن در نظر گرفته می‌شد؛ اما مطالعات نشان می‌دهد که ساختمان‌های متقارن زیادی وجود دارند که تحت تحریک مودهای دورانی حول محور قائم قرار گرفته اند (تاکاموری[۴] و همکاران (۲۰۰۹) و تیسیر[۵] (۲۰۱۰)). ونگ[۶] در سال ۱۹۹۵ تأثیر مؤلفه پیچشی را بر روی پاسخ سازه‌های پوسته ای جدار نازک بررسی کرد و نشان داد که اثرات مؤلفه پیچشی حتی برای سازه‌های متقارن نیز قابل صرف نظر کردن نیست.

حرکت دورانی به صورت کامل به وسیله یک ژیروسکوپ رینگ لیزری به وسیله ایگل[۷] و همکارانش (۲۰۰۵ و ۲۰۰۷) ثبت شد. آنها نشان دادند که حرکت دورانی ناشی از رویداد لرزه‌ای دور از مرکز زلزله با مجموع رکورد شتاب‌های عرضی ثبت شده به وسیله یک زلزله استاندارد، هر دو در فاز و دامنه سازگاری دارد. حرکت دورانی می‌تواند از اندازه‌گیری حرکت انتقالی در چندین مکان بدست آید.

شبکه شتاب‌نگاری متراکم دائم، که فواصل بین شتابنگارها در محدوده کوچکی متغیر می‌باشد تا امکان بررسی تغییر مکان و محاسبه مؤلفه‌های دورانی از روابط تفاضلی را فراهم نماید، عمدتاً محدود به دو شبکه SMART-1 و CHIBA است (قایمقامیان و نوری[۸]، ۲۰۰۷). چون در بسیاری از ساختمان‌ها، سیستم فونداسیون سخت فرض می شود، در نتیجه امکان ایجاد حرکات دلخواه در نقاط مختلف آن فراهم نمی باشد. چوپرا یک روش ساده را جهت تعیین مؤلفه دورانی زلزله از مؤلفه‌های انتقالی زلزله، پیشنهاد داد.

محققین، روابطی را به منظور برآورد مؤلفه پیچشی براساس دو مؤلفه انتقالی ثبت شده در یک نقطه ارائه کرده‌اند. اولین پیشنهاد بر چگونگی برآورد مؤلفه پیچشی را نیومارک[۹] (۱۹۶۹) ارائه داد. وی رابطه ساده‌ای را بین مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی جنبش زمین ارائه داد که در تحقیقات دیگر مورد بررسی بیشتری قرار گرفت. او تأکید کرد که مؤلفه دورانی حرکت زمین در طراحی سازه های مهندسی دارای اهمیت می باشد. در حال حاضر روش‌های متنوعی برای برآورد مؤلفه پیچشی برحسب مؤلفه‌های انتقالی جنبش شدید زمین با توجه به روابط، وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش مشتق زمانی و روش تفاضلات محدود اشاره کرد. غفوری آشتیانی و سینگ[۱۰] (۱۹۸۶) رابطه ساده‌ای را برای محاسبه مؤلفه پیچشی زمین با استفاده از روش مشتق زمانی ارائه دادند که در این مقاله از این روش برای محاسبه مؤلفه پیچشی استفاده می شود. بر طبق روابط ارائه شده توسط آن‌ها مؤلفه پیچشی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود:

1 Nathan & MacKenzie
2 Lee & Trifunac
3 LIera & Chopra
4 Takamori
5 Teisseyre
6 Wang
7 Igel
8 Ghaymaghamian & Nouri
9 Newmark
10 Ghafory Ashtiany & Singh

$$\Psi_k(t) = -\frac{1}{C}\frac{d}{dt}\left[\dot{x}_j(t) - \dot{x}_i(t)\right] \qquad (۱)$$

در رابطه فوق x_i و x_j جابه‌جایی در امتداد و Ψ_k دوران حول محور می باشد. C نیز سرعت موج برشی بوده و برای تمام جهات ثابت فرض شده است.

یکی از سازه‌های مهمی که تأثیر مؤلفه پیچشی روی آن کمتر مورد بررسی محققین قرار گرفته است، سد دو قوسی است که در این مقاله به بررسی تأثیر مؤلفه پیچشی زلزله بر پاسخ لرزه‌ای آن با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش پرداخته می‌شود. برای مطالعه دقیق رفتار دینامیکی یک سد بتنی قوسی، باید همه دامنه‌های مؤثر بر رفتار لرزه‌ای سد در مدل‌سازی در نظر گرفته شوند. این دامنه‌ها در حالت کلی بدنه سد، مخزن و فونداسیون می‌باشند که می‌توانند با هم اندرکنش داشته باشند.

مسئله اندرکنش سازه و سیال از گسترده‌ترین بحث‌های مربوط به رفتار سیال است که از نقطه نظر مهندسی جالب بوده و کارهای تحقیقاتی متعددی در خصوص آن انجام شده است. مسائل مربوط به اندرکنش سازه و سیال زمانی به وجود می‌آید که بین دو سیستم حرکت نسبی وجود داشته باشد. یکی از مسائل مهم در بحث مربوط به اندرکنش سیال- سازه، اندرکنش بین سیستم سد - مخزن در هنگام وقوع زلزله می‌باشد. اندرکنش یک سد قوسی با آب ذخیره شده در پشت آن سبب افزایش دوره ارتعاشات سد می شود. دلیل این امر آن است که سد نمی‌تواند بدون تغییرات مکانی آب مماس بر آن، حرکت کند. آبی که همراه سد حرکت می کند سبب افزایش جرم کلی حرکت داده شده به دلیل زلزله می‌شود. این جرم افزوده شده، دوره ارتعاشات طبیعی سد را افزایش داده و نیروهای اینرسی به وجود آمده به علت زلزله را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین می‌تواند سبب افزایش میرایی در حین جذب امواج فشاری در مرزهای مخزن و انتشار به سمت بالادست گردد. این اثرات سبب می شود که پاسخ لرزه ای سد نسبت به حالت مربوط به سد با مخزن خالی متفاوت باشد (احمدی و قره باغی ۱۳۷۲).

مطالعات انجام شده در خصوص مدل‌سازی اثرات اندرکنش در مسائل مربوط به آنالیز لرزه‌ای سدها دارای سابقه طولانی است. اولین مطالعه را در این زمینه وسترگارد[1] در سال ۱۹۳۳ ارائه داد. او اثرات اندرکنش را به صورت یک مدل دو بعدی سد- مخزن که تحت اثر ارتعاش ناشی از حرکت افقی زمین قرار گرفته است، مورد توجه قرار داد. او فرض کرد که سد صلب و دارای یک مخزن نیمه محدود با عمق ثابت است. وی با روش‌های تحلیلی، توزیع فشار سیال را در محل تماس سد و مخزن استخراج کرد. او دریافت که نیروی ناشی از اندرکنش متناسب با شتاب ناشی از حرکت لرزه‌ای زمین می‌باشد و ممکن است به وسیله یک توزیع سهموی جرم روی ارتفاع سد تقریب زده شود. این روش به عنوان تقریب جرم افزوده نامیده می شود. به علت وجود جرم افزوده، فرکانس‌های ویژه مربوط به پاسخ لرزه‌ای سد برای سیستم سد- مخزن به صورت کاملاً مشخصی کمتر از سیستم سد خالی می‌باشد. تقریب جرم افزوده وسترگارد به علت ساده بودن، یکی از کاربردی‌ترین مدل‌ها برای آنالیز سدها در عملیات مهندسی می‌باشد، ولی این تقریب هیچگونه استهلاک مربوط به انتشار را در نظر نمی‌گیرد و تنها منبع استهلاک انرژی، ناشی از میرایی سازه‌ای سد است. چوپرا[2] (۱۹۶۷)، اثرات تراکم‌پذیری سیال را روی نیروی ناشی از اندرکنش سازه و سیال بررسی کرد. مدل فیزیکی او مشابه مدل وسترگارد بود. او نتیجه گرفت که در صورت در نظر نگرفتن اثرات تراکم پذیری، خطاهای محسوسی در نتایج آنالیز ظاهر خواهد شد. در بیشتر مطالعات انجام گرفته از فرض تراکم ناپذیر بودن آب استفاده شده است، زیرا در نظر گرفتن چنین فرضی، مدل‌سازی سیستم سد و مخزن را با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش بسیار ساده می‌کند. در آب تراکم ناپذیر، امواج با سرعت نامحدودی حرکت می‌کنند به‌طوری‌که نیروهای اندرکنش متناسب با شتابی است که به سیال اعمال می‌شود. بنابراین در این شرایط حل انتگرال‌های پیچیده مورد نیاز نیست.

در بعضی تحقیقات انجام شده نیز، نیروهای ناشی از اندرکنش در حین حرکت لرزه‌ای زمین به صورت یک نیروی خارجی روی سد در نظر گرفته می‌شود و پاسخ سد در محاسبه نیروهای اندرکنش دخالت ندارد، زیرا سد صلب فرض می‌شود. چوپرا (۱۹۶۸ و ۱۹۷۰) تأثیر انعطاف پذیر بودن سد را روی نیروهای اندرکنش با مدل‌سازی سد به صورت سیستمی شامل جرم، میراگر و فنر مطالعه کرد. او نشان داد که فرکانس های طبیعی

1 Westergaard

2 Chopra

سیستم کوپل شده سد و مخزن متفاوت با سیستم غیر کوپل می‌باشد. او دریافت که اگر نسبت اولین فرکانس ویژه سد به اولین فرکانس ویژه مخزن بزرگتر از دو باشد، می توان از تأثیر تراکم پذیر بودن آب صرف نظر کرد. او نتیجه گرفت که هنگام در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سد و مخزن پاسخ سد نسبت به حالتی که از اثر اندرکنش صرف نظر می شود، به طور محسوسی افزایش می‌یابد.

برای هندسه‌های خیلی پیچیده، معادله موج هیدرودینامیک فقط می‌تواند به صورت عددی و با گسسته‌سازی مناسب برای دامنه مخزن حل شود. مشخصات مربوط به نامحدود بودن مخزن، لازم است با انتخاب یک مدل عددی مناسب در مرز قطع شده، نمایش داده شود تا محاسبات بر اساس عدم وجود امواج منعکس شده از مرز دوردست صورت گیرد. برای دستیابی به یک نتیجه نسبتاً دقیق در محاسبه فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد با دامنه مخزن نامنظم، معمولاً مخزن سد به صورت مجموعه‌ای از عناصر محدود در نظر گرفته می‌شود. برای اولین بار زینکوویچ[1] و همکاران (۱۹۶۵) فرمول بندی عناصر محدود را برای نمایش پاسخ یک سازه مستغرق با فرض تراکم ناپذیر بودن آب، نمایش دادند. همچنین زینکوویچ و همکاران (۱۹۷۸) فرمول بندی عناصر محدود را برای حل معادله موج فشاری دامنه نامحدود مخزن آزمایش کردند. ایشان نشان دادند که شرط مرزی دوردست سامرفلد برای مدل مخزن کاملاً طویل مناسب است و می توان از آن به عنوان شرط مرزی در محل قطع دامنه در مدل گسسته عناصر محدود دامنه سیال، استفاده نمود.

در زمینه تحلیل لرزه‌ای با در نظر گرفتن مؤلفه پیچشی و اثرات اندرکنش سازه و سیال، قزوینی[2] و همکاران (۲۰۱۳) پاسخ لرزه ای مخازن ذخیره استوانه ای را با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادن که مؤلفه پیچشی زمین لرزه می‌تواند پاسخ‌ها را افزایش یا کاهش دهد و این امر به محتوای فرکانسی و دامنه زلزله و نیز به فرکانس طبیعی سازه بستگی دارد. کلانی[3] و همکاران (۲۰۱۵) نیز با تحلیل دینامیکی غیر خطی به به تأثیر کاهنده یا افزاینده مؤلفه پیچشی روی پاسخ سدهای بتنی وزنی پرداخته و نشان دادند که افزایش یا کاهش پاسخ‌ها وابسته به فرکانس سیستم سد- مخزن و فرکانس غالب زمین لرزه است.

در مطالعه حاضر از نرم افزار Ansys که بر اساس روش اجزای محدود نوشته شده است، برای مدل‌سازی عددی معادلات حاکم استفاده می شود. برای آنالیز دینامیکی از تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است که مناسب‌ترین روش برای انجام تحلیل لرزه‌ای می‌باشد و برای فائق آمدن به محدودیت‌های روش طیف پاسخ، محاسبه پاسخ وابسته به زمان سازه و سیال و نیز نمایش بهتر اثرات اندرکنش به کار می‌رود. ورودی‌های زلزله برای آنالیز در حوزه زمان، معمولاً به شکل تاریخچه زمانی شتاب می‌باشد که نسبت به خیلی از مشخصه‌های حرکت لرزه‌ای زمین از قبیل تداوم و فرکانس بسیار دقیق است. آنالیز تاریخچه زمانی همچنین تنها روش مناسب برای تخمین معیار آسیب است. در این روش، پاسخ در دامنه زمان با استفاده از انتگرال‌گیری عددی گام‌به‌گام محاسبه می‌شود. برای حل معادلات دینامیکی استخراج شده نیز از روش نیومارک که یک روش ضمنی و پایدار از لحاظ عددی می باشد، استفاده شده است.

معادلات حاکم

در این بخش، ملاحظات سازه‌ای و هیدرودینامیکی مسئله فرمول‌بندی می‌شود. آب داخل مخزن، به صورت سیال غیر لزج، تراکم ناپذیر و با تغییر مکان‌های کوچک فرض می شود. همچنین سد و فونداسیون به صورت جامد الاستیک با رفتار خطی مصالح در نظر گرفته می شود.

مدل‌سازی دامنه سد

معادله حاکم بر رفتار سد، معادله حرکت است. ولی برای در نظر گرفتن و تعریف کامل اندرکنش سیال و سازه، بار اعمال شده ناشی از فشار هیدرودینامیکی سیال در محل تماس سازه و سیال باید به معادلات سازه افزوده شود.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = M\ddot{u}_g + F^{Pr} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق، M ماتریس جرم، C ماتریس میرایی و K ماتریس سختی سازه هستند. u بردار تغییر مکان نسبی، $\ddot{u}_g$ بردار شتاب

1 Zienkiewicz
2 Ghazvini
3 Kalani

زمین می باشد و F^{Pr} بار فشاری وارد شده از طرف سازه بر سد در محل تماس می باشد.

مدل‌سازی دامنه مخزن

در مسائل مربوط به اندرکنش آکوستیکی سازه و سیال، معادله مربوط به دینامیک سازه لازم است همراه با معادلات ناویر- استوکس اندازه حرکت و پیوستگی سیال در نظر گرفته شود. با فرض اینکه آب داخل مخزن غیرلزج، تراکم ناپذیر و با تغییرمکان‌های کوچک است، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به معادله موج خلاصه می‌شوند. همچنین فشار اعمال شده از طرف سیال بر سازه در محل تماس، برای تشکیل ماتریس اندرکنش در نظر گرفته می شود (احمدی و همکاران (۱۳۷۲) و چوپرا (۱۹۶۸)).

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \qquad (۳)$$

در رابطه فوق، $c = \sqrt{k/\rho_0}$ سرعت امواج صوتی در سیال، ρ_0 جرم مخصوص سیال، k مدول سختی سیال، P فشار هیدرودینامیکی و t زمان می باشد.

شرایط مرزی

در سطح آزاد مخزن از اثرات امواج سطحی صرف نظر می شود. بنابراین:

$$P = 0 \qquad (۴)$$

در محل تماس مخزن با سد و با فونداسیون، شرط مرزی اندرکنش به صورت زیر اعمال می شود:

$$\rho \vec{a}_{ns} = -\frac{\partial P}{\partial n} \qquad (۵)$$

در معادله (۵) a_{ns} بردار شتاب سد یا فونداسیون در مرز مشترک با مخزن می‌باشد و n بردار واحد عمود بر سطح سد یا فونداسیون و به سمت داخل سیال است. در انتهای دوردست مخزن از شرط مرزی استهلاک سامرفلد استفاده می شود که به صورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{C}\frac{\partial P}{\partial t} \qquad (۶)$$

در رابطه ی فوق C سرعت انتشار امواج می باشد.

فرمول‌بندی اجزای محدود معادلات حاکم

معادلات حاکم بر سیستم سد- مخزن- فونداسیون با استفاده از روش اجزای محدود به صورت ماتریسی بسط داده می‌شوند. معادله دینامیکی گسسته‌سازی شده سیستم سد می تواند با استفاده از عناصر سازه‌ای فرمول‌بندی شود. برای اعمال اثرات اندرکنش لازم است بار فشاری اعمال شده از طرف سیال بر روی سازه به فرمول‌بندی اضافه شود. ماتریس‌های عناصر مخزن نیز با گسسته سازی معادله موج استخراج می‌شوند. در استخراج ماتریس‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌ها به صورت مشتقات مرتبه اول و دوم تغییر مکان‌ها بسط داده می شوند.

مدل اجزای محدود سیال

معادله (۳) شامل فشار سیال و مؤلفه‌های تغییر مکان‌های سازه می باشد که پارامترهای مجهول برای تحلیل می‌باشند. توابع شکل تقریب اجزای محدود برای متغیرهای فشار و تغییر مکان به صورت زیر می باشد:

$$P = \{N\}^T\{P_e\} \qquad (۷)$$

$$u = \{N'\}^T\{u_e\} \qquad (۸)$$

که در آن $\{N\}$ تابع شکل عنصر برای فشار، $\{N'\}$ تابع شکل عنصر برای تغییر مکانها، $\{P_e\}$ بردار فشار گرهی، $\{u_e\}$ بردار تغییر مکان‌های گرهی می‌باشد. با استفاده از روابط (۷) و (۸)، مشتق دوم زمانی متغیرها و تغییرات فشار به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \{N\}^T\{\ddot{P}_e\} \qquad (۹)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}\{u\} = \{N'\}^T\{\ddot{u}_e\} \qquad (۱۰)$$

$$\delta P = \{N\}^T\{\delta P_e\} \qquad (۱۱)$$

با به کار بردن عملگر$\{L\}$ روی توابع شکل عنصر می توان نوشت:

$$[B] = \{L\}\{N\}^T \qquad (۱۲)$$

با جایگزینی روابط (۷) تا (۱۲) در معادله (۲) و اعمال شرط مرزی، معادله موج در شکل اجزای محدود به صورت زیر استخراج می شود:

$$\int_V \frac{1}{c^2}\{\delta P_e\}^T\{N\}\{N\}^T dV\,\{\ddot{P}_e\} +$$
$$\int_V \{\delta P_e\}^T\{B\}^T[B]dV\,\{P_e\} +$$

$$\int_S \rho_0\{\delta P_e\}^T\{N\}\{n\}^T[N']dS\,\{\ddot{u}_e\} = 0 \qquad (۱۳)$$

که در آن $\{n\}$ عمود بر مرزهای سیال می باشد. جمله‌هایی که روی عنصر تغییر نمی‌کنند، می‌توانند بیرون انتگرال قرار گیرند. $\{\delta P_e\}$ یک پارامتر اختیاری می‌باشد که تغییرات فشار گرهی را نشان می‌دهد و در رابطه اخیر می‌تواند حذف شود. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{c^2}\int_V \{N\}\{N\}^T dV\,\{\ddot{P}_e\} + \int_V \{B\}^T[B]dV\,\{P_e\} + \rho_0\int_S \{N\}\{n\}^T[N']dS\,\{\ddot{u}_e\} = 0 \qquad (۱۴)$$

با نوشتن معادله فوق به شکل ماتریسی می توان حالت گسسته معادله موج را به صورت زیر نوشت:

$$[M_e^P]\{\ddot{P}_e\} + [K_e^P]\{P_e\} + \rho_0[R_e]^T\{\ddot{u}_e\} = 0 \qquad (۱۵)$$

که در آن $[M_e^P] = \frac{1}{c^2}\int_V \{N\}\{N\}^T dV$ ماتریس جرم سیال، $[K_e^P] = \int_V \{B\}^T[B]dV$ ماتریس سختی سیال و $\rho_0[R_e]^T = \rho_0\int_S \{N\}\{n\}^T[N']dS$ ماتریس جرم مربوط به اندرکنش سازه و سیال می‌باشد.

مدل اجزای محدود سد

معادله اجزای محدود دامنه سد به صورت زیر می باشد:

$$[M_e]\{\ddot{u}_e\} + [C_e]\{\dot{u}_e\} + [K_e]\{u_e\} = \{F_e\} + \{F_e^{Pr}\} \qquad (۱۶)$$

که در آن بردار بار فشاری از طرف سیال $\{F_e^{Pr}\}$، در محل تماس با انتگرال‌گیری بردار به دست می آید:

$$\{F_e^{Pr}\} = \int_S \{N'\}P\{n\}dS \qquad (۱۷)$$

که در آن $\{N'\}$ توابع درون‌یابی به کار برده شده برای گسسته‌سازی مؤلفه‌های تغییر مکان و $\{n\}$ بردار نرمال در محل تماس می‌باشد.

$$\{F_e^{Pr}\} = \int_S \{N'\}\{N\}^T\{n\}dS\{P_e\} \qquad (۱۸)$$

یا

$$\{F_e^{Pr}\} = [Re]\,\{P_e\} \qquad (۱۹)$$

که در آن:

$$[Re]^T = \int_S \{N'\}\{N\}^T\{n\}dS \qquad (۲۰)$$

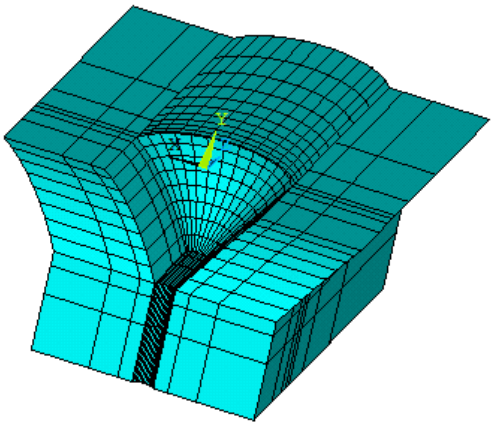
جایگزینی معادله (۲۰) در (۱۶) معادله دینامیکی اجزای محدود سازه را به صورت زیر نتیجه می دهد:

$$[M_e]\{\ddot{u}_e\} + [C_e]\{\dot{u}_e\} + [K_e]\{u_e\} - [Re]\{P_e\} = \{F_e\} \qquad (۲۱)$$

معادلات گسسته‌سازی شده (۱۵) و (۲۱) به صورت هم زمان یا با استفاده از روش تکراری سعی و خطا حل شده و نتایج مورد نظر برای سیستم استخراج می شود.

آنالیز مدل

برای آنالیز لرزه‌ای سد بتنی دو قوسی مورد نظر از نرم افزار Ansys استفاده شده است. این نرم افزار قابلیت آنالیز لرزه ای با در نظر گرفتن هندسه نامنظم دامنه‌ها و اثرات اندرکنش مخزن و پی را دارا می‌باشد. برای انتگرال‌گیری عددی از روش Newmark استفاده شده که پارامترهای آن به صورت $\beta = 0.25$ و $\gamma = 0.5$ و گام زمانی برابر $\Delta t = 0.02$ انتخاب شده است و برای اعمال اثرات میرایی نیز روش ریلی مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور آنالیز دینامیکی، سد ماروپوینت به ارتفاع ۱۴۳ متر به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. برای گسسته‌سازی مدل از عناصر Solid45 که یک عنصر سه بعدی مناسب برای هندسه‌های خمیده می‌باشد برای قسمت جامد و از Fluid30 که عنصر مناسب برای نمایش خاصیت تراکم‌پذیری سیال است، برای مدل مخزن استفاده شده است. گسسته‌سازی اجزای محدود مدل مورد نظر در شکل (۱) و مشخصات مصالح در جدول (۱) نمایش داده شده است:

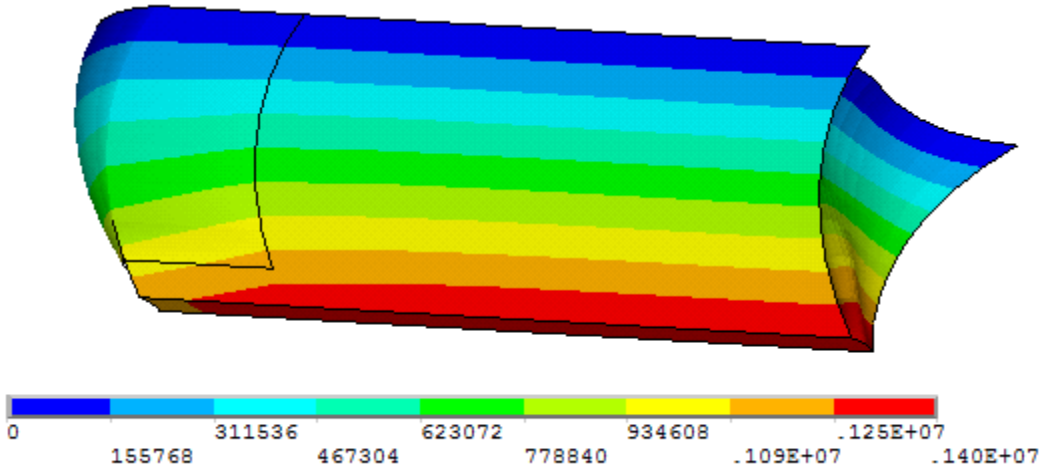


شکل(۱): هندسه مدل سد ماروپوینت و گسسته سازی اجزای محدود

جدول(۱): مشخصات مصالح سیستم

دامنه	سد	فونداسیون
وزن حجمی (نیوتن بر متر مکعب)	۲۴۸۰۰	۲۶۴۳۰
مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	۲۷/۵	۲۲
ضریب پواسون	۰/۲	۰/۲

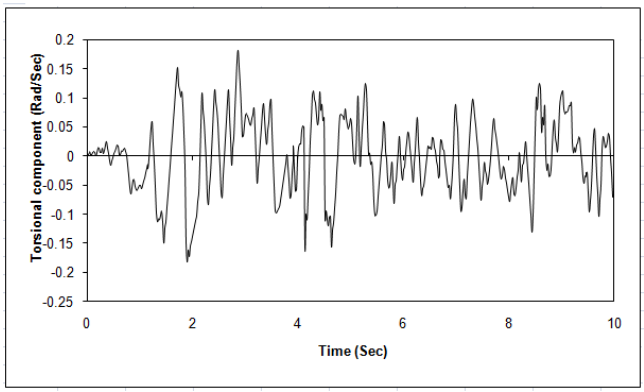
در اولین مرحله، برای اینکه دقت مدل با توجه به وضعیت شبکه بندی و شرایط مرزی اعمال شده مورد بررسی قرار گیرد، مدل اجزای محدود به صورت استاتیکی تحلیل شده و کانتور توزیع فشار در مخزن به صورت شکل (۲) استخراج شده است .



شکل(۲): کانتور نمایش توزیع فشار هیدرواستاتیکی در مخزن

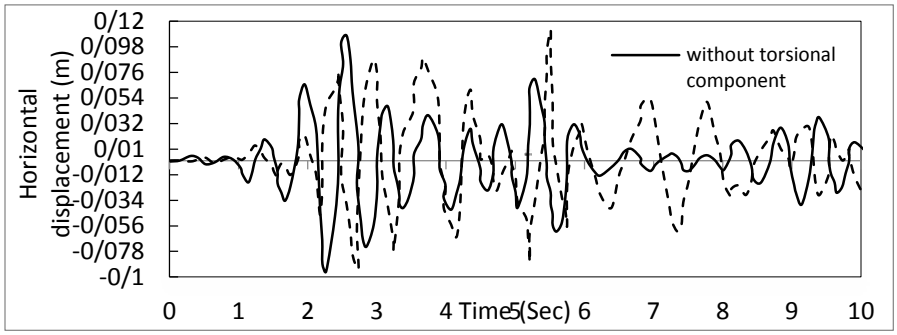
با توجه به کانتور نشان داده شده می‌توان روند خطی توزیع فشار را ارزیابی کرد. همان گونه که مشخص است توزیع فشار در عمق h از سطح آزاد مخزن از رابطه $\rho g h$ پیروی می‌کند. به عنوان مثال اگر h برابر ارتفاع مخزن (۱۴۳ متر) در نظر گرفته شود مقدار فشار در پاشنه سد برابر با ۱۴۰۲۸۳۰ پاسکال به دست می‌آید که با توجه به کانتور ارائه شده نیز فشار در پاشنه در حدود ۱/۴ مگاپاسکال می باشد که این امر دقت مدل اجزای محدود را نشان می‌دهد.

در ادامه برای انجام تحلیل لرزه‌ای و بررسی تأثیر مؤلفه پیچشی، شتاب نگاشت‌های زلزله السنترو که در سال ۱۹۴۰ رخ داد، انتخاب شده است. با استفاده از رابطه ذکر شده در معادله (۱) ، مؤلفه پیچشی زمین لرزه السنترو از روی مؤلفه‌های انتقالی استخراج شده است. شکل(۳) مؤلفه پیچشی زمین لرزه السنترو را نمایش می دهد.

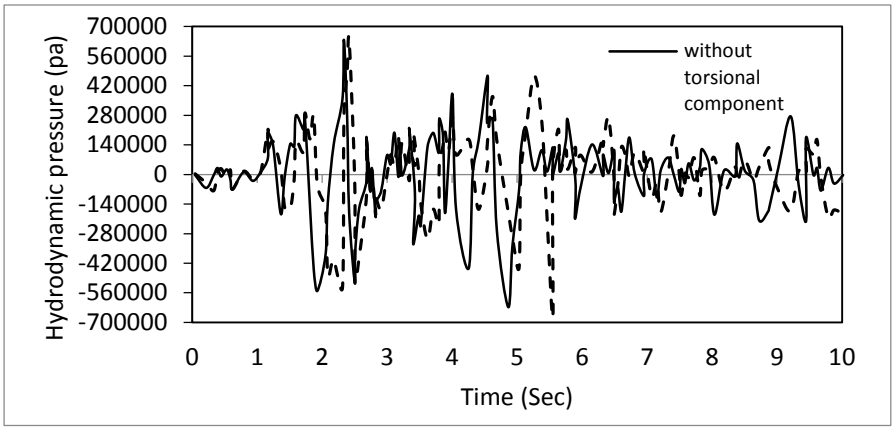


شکل(۳): مؤلفه پیچشی زمین لرزه السنترو حول محور قائم

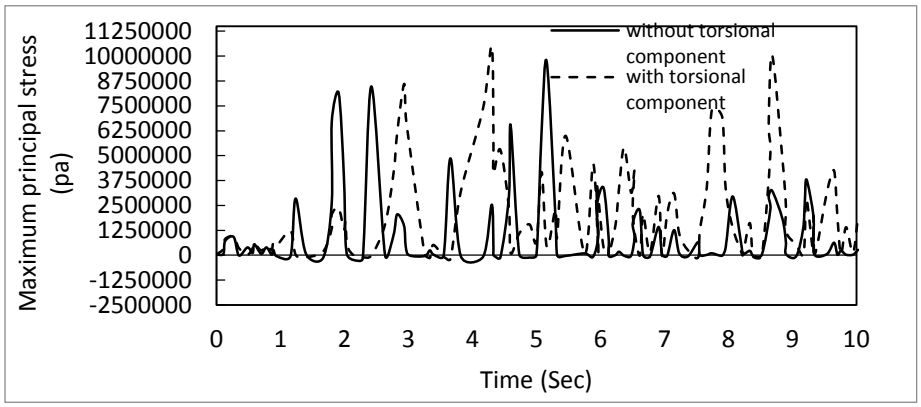
بعد از مدل‌سازی و انجام تحلیل دینامیکی، نتایج مربوط به پاسخ‌های تغییر مکان، تنش‌های به وجود آمده در بدنه سد و فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخزن استخراج شده است. با توجه به اینکه هدف اصلی این مقاله، بررسی تأثیرمؤلفه پیچشی بر پاسخ لرزه‌ای سد دو قوسی است، مدل مورد نظر برای دو حالت اعمال زلزله با در نظر گرفتن مؤلفه‌های انتقالی تنها و اعمال توأم مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل، برای دو حالت به صورت تاریخچه زمانی ارائه شده است. شکل‌های (۴) تا (۷) نتایج مربوط به تغییر مکان افقی نقطه میانی تاج سد در امتداد مخزن، فشار هیدرودینامیکی در پاشنه و بیشینه مقدار تنش‌های اصلی در بدنه سد را برای دو حالت نشان می‌دهند.



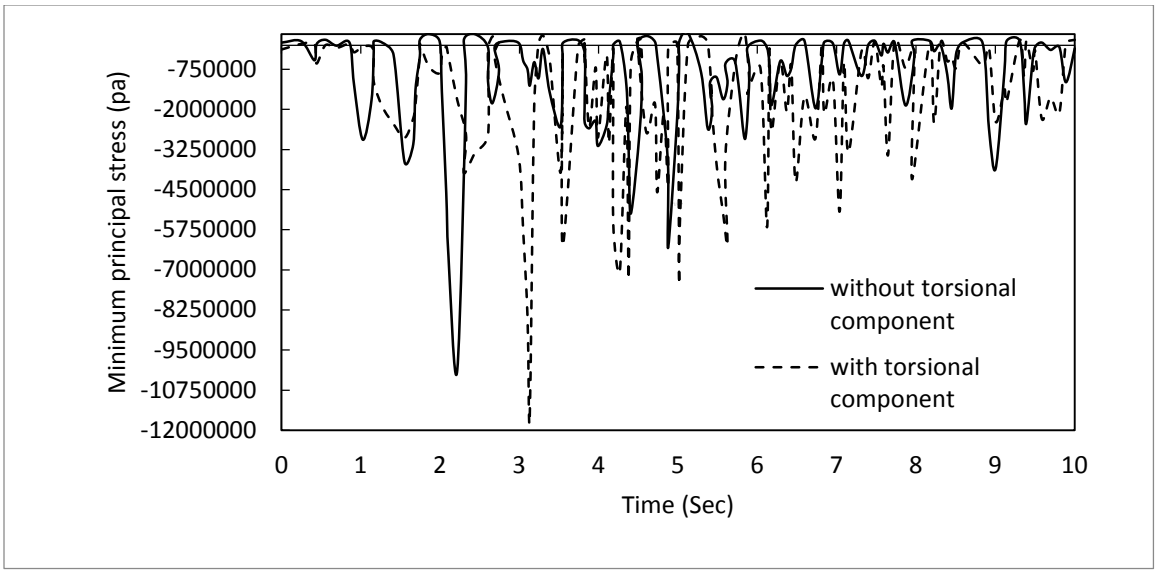
شکل(۴): مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی تاج سد برای دوحالت اعمال زلزله



شکل(۵): مقایسه تاریخچه زمانی توزیع فشار هیدرودینامیکی در پاشنه سد برای دوحالت اعمال زلزله



شکل (۶): مقایسه تاریخچه زمانی تنش اصلی حداکثر در بدنه سد برای دوحالت اعمال زلزله



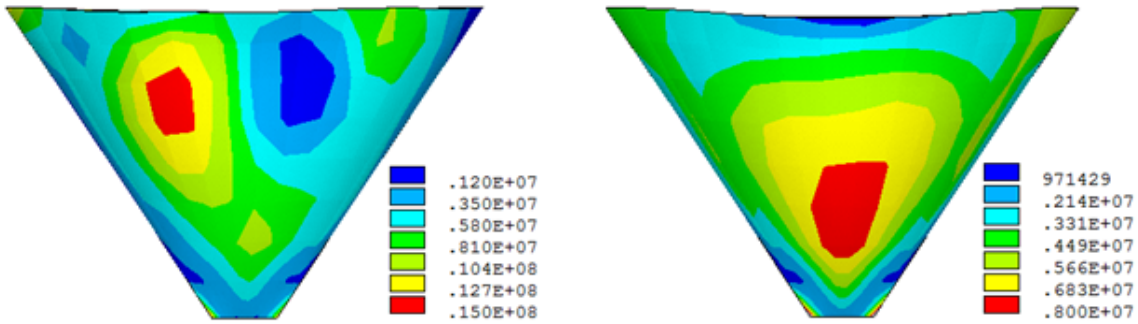
شکل(۷): مقایسه تاریخچه زمانی تنش اصلی حداقل در بدنه سد برای دوحالت اعمال زلزله

برای بررسی دقیق‌تر تأثیر مؤلفه پیچشی بر پاسخ لرزه‌ای مدل سد دو قوسی مورد نظر، مقادیر عددی پاسخ‌ها به صورت جدول ارائه شده است. جدول (۲) مقادیر عددی پاسخ‌ها را برای دو حالت اعمال زلزله نشان می‌دهد.

جدول(۲): مقادیر عددی و درصد افزایش پاسخهای حداکثر برای دو حالت اعمال زلزله السنترو

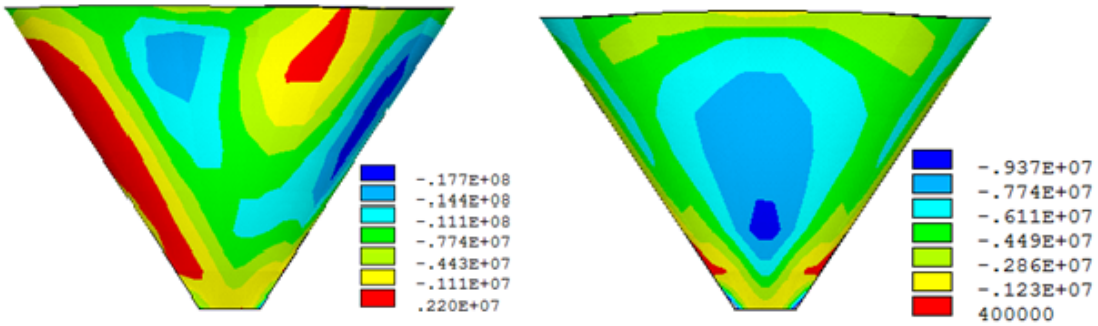
شرایط اعمال زلزله	بدون مؤلفه پیچشی	با مؤلفه پیچشی	درصد تغییر پاسخ
حداکثر تغییرمکان افقی تاج سد (m)	۰/۱۰۹	۰/۱۱۲	۲/۷ (افزایش)
فشار هیدرودینامیکی حداکثر (Pa)	۶۳۲۱۰۲	۶۷۶۰۹۳	۶/۹ (افزایش)
تنش کششی اصلی حداکثر (MPa)	۹/۶۴	۱۰/۴۸	۸/۷ (افزایش)
تنش فشاری اصلی حداکثر (MPa)	۱۰/۱	۱۱/۶	۱۴/۸ (افزایش)

با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت که اعمال مؤلفه پیچشی مربوط به زمین لرزه السنترو بر روی سیستم سد قوسی همراه با مخزن و فونداسیون، پاسخ لرزه‌ای را افزایش می‌دهد که این افزایش برای پاسخ تغییر مکان تاج و فشار هیدرودینامیکی مخزن قابل توجه نمی‌باشد. ولی در نظر گرفتن مؤلفه پیچشی پاسخ تنش‌ها را به میزان محسوسی افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه میزان تنش‌های به وجود آمده در بدنه سدهای قوسی یکی از معیارهای مهم در طراحی می‌باشد، برای طراحی ایمن لازم است به اثرات مؤلفه پیچشی توجه شود. در ادامه برای درک بهتر اثرات مؤلفه پیچشی بر نمایش لرزه‌ای، کانتور توزیع تنش‌های اصلی به وجود آمده در بدنه سد بر حسب پاسکال برای بحرانی‌ترین حالت در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه شده است.



الف- بدون اعمال مؤلفه پیچشی **ب- با اعمال مؤلفه پیچشی**

شکل ۸- مقایسه کانتور توزیع تنش اصلی حداکثر در بدنه سد برای دوحالت اعمال زلزله



الف- بدون اعمال مؤلفه پیچشی **ب- با اعمال مؤلفه پیچشی**

شکل ۹- مقایسه کانتور توزیع تنش اصلی حداقل در بدنه سد برای دوحالت اعمال زلزله

با مقایسه کانتورهای توزیع تنش برای دو حالت می توان به افزایش تنش‌های اصلی و محل‌های حداکثر وقوع آنها پی برد. نتیجه مهم دیگری که از مقایسه کانتورها می توان استنباط کرد متقارن نبودن توزیع تنش‌ها در حالت اعمال مؤلفه پیچشی می‌باشد. دلیل این امر پیچش بدنه سد قوسی می‌باشد که سبب تغییر جهت تنش‌ها در دو نیمه بدنه می‌شود.

در خاتمه برای بررسی تأثیر محتوای فرکانسی زلزله، مدل تهیه شده با اعمال زمین لرزه تفت برای دو حالت بدون در نظر گرفتن مؤلفه پیچشی و لحاظ کردن آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و نتایج مربوط به پاسخ‌های جابه‌جایی افقی تاج سد، فشار هیدرودینامیکی مخزن، تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل به وجود آمده در بدنه سد استخراج شده است. جدول شماره (۳) مقادیر حداکثر پاسخ‌ها و مقایسه آنها را برای دو حالت نشان می دهد:

جدول(۳): مقادیر عددی و درصد افزایش پاسخهای حداکثر برای دو حالت مختلف اعمال زلزله تفت

شرایط اعمال زلزله	بدون مؤلفه پیچشی	با مؤلفه پیچشی	درصد تغییر پاسخ
حداکثر تغییرمکان افقی مثبت تاج سد (m)	۰/۰۶۹۶	۰/۰۶۷۴	۳ (کاهش)
فشار هیدرودینامیکی مثبت حداکثر (Pa)	۴۵۳۰۰۰	۴۳۳۰۰۰	۵ (کاهش)
تنش کششی اصلی حداکثر (MPa)	۸/۷۵	۸/۶۷	۱/۴ (کاهش)
تنش فشاری اصلی حداکثر (MPa)	۸/۷۶	۸/۶۴	۱ (کاهش)

با توجه به جدول فوق، تقریباً در تمامی نتایج می‌توان شاهد کاهش پاسخ سد در حالت مواجه با اعمال توأم مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله تفت بود. دلیل این امر همان گونه که در مرور

تحقیقات گذشته نیز اشاره است، متفاوت بودن محتوای زلزله تفت و شرایط فرکانس آن نسبت به زمین لرزه السنترو می باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به تأثیر مؤلفه پیچشی بر پاسخ لرزه ای سد دو قوسی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش پرداخته شد. برای این منظور مدل جامعی با استفاده از روش اجزای محدود تهیه شد و نتایج پاسخ‌های مربوط به دو حالت مدل با اعمال مؤلفه‌های انتقالی تنها و اعمال مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی به صورت توأم مقایسه گردید. در ابتدا مدل مورد نظر با اعمال زلزله السنترو مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج استخراج شد. با توجه به نتایج حاصل می‌توان به افزایش قابل توجه پاسخ‌های تنش هنگام در نظر گرفتن مؤلفه پیچشی همراه با مؤلفه‌های انتقالی زمین لرزه السنترو پی برد. در ادامه مدل تهیه شده با اعمال زلزله تفت نیز تحلیل شده و نتایج به دست آمده بررسی شد. نتایج حاصل از اعمال توأم مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی زلزله تفت نشان داد که پاسخ سد در مواجهه با مؤلفه پیچشی کاهش می یابد. با توجه به نتایج استخراج شده از تحلیل مدل بر اساس دو زلزله می توان گفت که مؤلفه پیچشی زلزله می تواند پاسخی کاهنده یا افزاینده بر مدل داشته باشد و این کاملاً وابسته به فرکانس و محتوای زلزله اعمالی بر سد می‌باشد. در خاتمه می‌توان نتیجه گرفت که برای طراحی سدهای قوسی با ضریب اطمینان مناسب در مناطق لزه خیز مانند ایران، لازم است که با انتخاب زلزله‌های مناسب، اثرات مؤلفه پیچشی را مورد توجه قرار داد.

مراجع

۱- احمدی، م.ت. و قره باغی، م. ۱۳۷۲، "تحلیل اندرکنش دینامیکی سد و مخزن به روش اویلر- لاگرانژ" ، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

2- Chopra, A. K. (1967). "Hydrodynamic pressure on dams during earthquakes". Journal of engineering mechanics division. 93, 205-223.

3- Chopra, A. K. (1968). "Earthquake behavior of reservoir-dam systems". Journal of engineering mechanics division. 94(6), 1475-1500.

4- Chopra, A. K. (1970). "Earthquake response of concrete gravity dams". Journal of engineering mechanics division. 96, 443-454.

5- De La Llera, J. C. and Chopra, A. (1994). "Accidental torsion in building due to stiffness uncertainty". Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 23(2), 117-136.

6- Ghafory-Ashtiany, M. and Singh, M. P. (1986). "Structural response for six correlated earthquake components". Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 14(1), 103–119.

7- Ghayamghamian, M. R., and Nouri, G. R. (2007). "On the characteristics of ground motion rotational components using Chiba dense array data". Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 36(10), 1407-1429.

8- Ghazvini, T., Tavakoli, H., Navayi Neya, B. and Kalani Sarokolayi, L. (2013). "Seismic response of aboveground steel storage tanks: comparative study of analyses by six and three correlated earthquake components". Latin American journal of solids and structures. 10(6),1155-1176.

9- Igel, H., Cochard, A., Wassermann, J., Schreiber, U., Velikoseltsev, A., and Pham, N. D. (2007). "Broadband observations of rotational ground motions". Geophys. J. Int.. 168, 182–197.

10-Igel, H., Schreiber, U., Flaws, A., Schuberth, B., Velikoseltsev, A., and Cochard, A. (2005) "Rotational motions induced by the M8.1 Tokachi-oki earthquake." Geophysical Research Letter, 32(8): L08309, doi:10.1029/2004GL022336.

11-Kalani Sarokolayi, L., Navayi Neya, B. and Vaseghi Amiri, J. (2015). "Nonlinear dynamic analysis of concrete gravity dams considering rotational component of ground motion". International journal of civil engineering. 13(1), 16-29.

12-Lee, V. W. and Trifunac, M. D. (1985). "Torsional accelerograms". International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 4(3), 132-139.

13-Nathan, N. D. and MacKenzie, J. R. (1975). "Rotational components of earthquake motions". Canadian Journal of Civil Engineering. 2(4), 430–436.

14-Newmark, N. M. (1969). "Torsion in Symmetrical Buildings". Proceeding of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile, 2, A3. 19-A3.32.

15-Takamori, A., Araya, A., Otake, Y., Ishidoshiro, K., and Ando, M. (2009). "Research and development status of a new rotational seismometer based on the flux pinning effect of a superconductor". Bulletin of the Seismological Society of America. 99(2B), 1174–1180.

16-Teisseyre, R. (2010). "Why rotation seismology: Confrontation between classic and asymmetric theories". Second IWGoRS Workshop. October 11-13, Prague, Czech Republic.

17-Wang, J. (1995). "The effect of torsional ground motion on thin cylindric shell structures". Acta Seismologica Sinica. 8(2), 265-270.

18-Westergaard, H. M. (1933). "Water pressure on dams during earthquake". Transactions, ASCE. 98(2), 418-433.

19-Zienkiewicz, O. C., and Bettess, P. (1978). "Dynamic fluid-structure interaction: Numerical modeling of the coupled problem". John wiley, New york. 185-193.

20-Zienkiewicz, O. C., Iron, B. and Nath, B. (1965). "Natural frequencies of complex free or submerged structures by the finite element method". Symp. Vibration Civ. Engng. Butterworths, London.