

بررسی اثر طول مخزن بر تحلیل دینامیکی سد بتنی با توجه به اندرکنش سد-پی-مخزن با استفاده از روش اجزاء محدود

رامین علی پور^۱، علی افروس^۲

۱- گروه سازه‌های هیدرولیکی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

۲- گروه مهندسی آب، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۱۲

چکیده

در سال‌های اخیر، بررسی رفتار سدهای بتنی در برابر زمین‌لرزه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. هدف از این تحقیق بررسی اثر طول مخزن به عنوان عامل تاثیرگذار در تحلیل دینامیکی سدهای بتنی می‌باشد. در این راستا از سیستم سد وزنی پایین‌فالت مخزن-پی، در قالب روش المان محدود و در چهارچوب تحلیلی نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. بر این اساس آب درون مخزن تراکم‌پذیر، سد بتن وزنی و پی سنگی نیز ایزوتروپ و همسانگرد در نظر گرفته شده‌اند. جهت مدل‌سازی سد-مخزن-پی، رویکرد کوپله سازه-آکوستیک مورد استفاده قرار گرفته است. شرط مرزی سامرفیلد برای انتهای دور بریده شده مورد استفاده قرار گرفته است و برای حل معادلات کوپله از روش انتگرال‌گیری ضمنی استفاده می‌شود. به منظور بررسی اثر طول مخزن، انتهای دور بریده شده در فواصل مختلفی از محل سد مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول مخزن از $3H$ به $5H$ مقادیر فشار هیدرودینامیکی وارد بر پاشنه و جابجایی‌های تاج سد دستخوش تغییرات فراوان می‌شود، اما از فاصله $5H$ به بعد نتایج تغییر چندانی ننموده است و بر این اساس اقتصادی‌ترین طول مخزن و پی به منظور مدل‌سازی سیستم سد-مخزن-پی، معادل با ۵ برابر ارتفاع سد از محل ساختگاه سد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اندرکنش سد-مخزن-پی، روش اجزای محدود، شرط مرزی سامرفیلد

مقدمه

اندرکنش میان سیال-سازه، محل و چگونگی اعمال شرایط مرزی، نیروی زلزله، هندسه سد و مخزن پشت آن از اهمیت بالایی برخوردار هستند. دانشید و طالبی‌دختی (۲۰۰۶)، با استفاده از روش اویلری و در قالب برنامه کامپیوتری SAGAD به تحلیل لرزه‌ای سد کوثر پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که اندرکنش مخزن و پی با سد موجب افزایش تنش در بدنه سد می‌گردد. سیدموسوی و لطف‌اللهی (۱۳۸۷)، به وسیله روش اجزای محدود و با تکیه

از جمله مهم‌ترین بارگذاری‌های دینامیکی در سازه-ها بارگذاری لرزه‌ای می‌باشد. در این بارگذاری، پایه سازه تحت تاثیر تحریکات لرزه‌ای قرار گرفته و پاسخ سازه در طول زمان تغییر می‌کند. روش‌های مختلفی جهت انجام تحلیل‌های لرزه‌ای در انواع مختلف سازه‌ها وجود دارد، که یکی از قدرتمندترین این روش‌ها، روش اجزای محدود می‌باشد. در تحلیل دینامیکی سدهای بتنی به روش اجزای محدود، برخی از ملاحظات مانند:

ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی بلند پرداخته‌اند. یافته‌های آنان حاکی از آن است که، جابجایی‌های تاج سد برای سیستم سد-پی، ۵/۵۶۲ میلی‌متر بیشتر از سیستم سد میباشد. تاریخ‌آورد پیربوداغی (۲۰۱۴)، با استفاده از روش‌های FEM و SEM به تحلیل لرزه‌ای اندرکنش سد-مخزن پرداخته‌اند، نتایج پژوهش‌های آنها نشان داد که روش SEM در محاسبه اندرکنش سد-مخزن جواب‌های بهتری را نسبت به روش FEM می‌دهد. وارقیس و نیکیتا (۲۰۱۶)، رفتار لرزه‌ای سدهای بتن وزنی را با استفاده از روش اجزای محدود و در قالب تحلیلی نرم‌افزار ANSYS مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌داد، ماکزیمم جابجایی‌های بدنه سد در محل تاج و بیشینه مقدار تنش وارد شده بر بدنه سد در محل پاشنه، گردن و نقطه مقابل آن در قسمت بالادست سد رخ می‌دهد.

در این تحقیقات اکثر مهندسين دامنه سیال را نامحدود در نظر گرفته و از شرط مرزی سامرفیلد برای انتهای دور بریده شده استفاده نموده‌اند. این نوع شرط مرزی به منظور شبیه‌سازی انتشار امواج آب در انتهای دور مخزن به کار می‌رود و در صورتیکه به اندازه کافی از سازه مرتعش‌کننده فاصله داشته باشد، موجب جذب انرژی امواج برگشتی به این ناحیه می‌گردد، لذا در تحقیق حاضر به بررسی مکان مناسب برای در نظرگیری شرط مرزی انتهای دور با فرض سیال تراکم‌پذیر پرداخته شده است، همچنین محیط سیال از نوع آکوستیک و محیط سازه به صورت لاگرانژی در نظر گرفته خواهد شد و بر این اساس معادلات حاکم بر سازه و سیال تعریف می‌گردد، مدل در نظر گرفته شده برای تحلیل، سیستم سد پایین‌فالت مخزن-پی می‌باشد و از شتابنگاشت زلزله سنترو (۱۹۷۹) برای آنالیز استفاده گردیده است.

بر رویکرد اوپلر-لاگرانژی و در چارچوب تحلیلی نرم-افزار ABAQUS، اثر شیب مخزن بر نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه سد با توجه به اندرکنش سد و مخزن را مورد بررسی قرار دادند، نتایج پژوهش‌های آنها بیانگر آن است که با افزایش شیب مخزن موجب بیشتر شدن نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سد می‌گردد. همچنین خان محمدی و همکاران (۱۳۸۸) به ارزیابی روش‌های اوپلری و لاگرانژی در تحلیل دینامیکی خطی سدهای بتنی وزنی با احتساب اندرکنش مخزن-پی تحت اثر نیروی زلزله و با استفاده از نرم‌افزار visual C#.Net پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد، جواب‌های حاصله از تحلیل لاگرانژی تقریباً ۱۰٪ بزرگتر از جواب‌های بدست آمده از روش اوپلری است. خسروی و حیدری (۲۰۱۳)، بوسیله روش اجزاء محدود به مدل‌سازی سد بتن‌وزنی، با احتساب اندرکنش دینامیکی سد-مخزن-پی در چارچوب زبان برنامه‌نویسی APDL پرداخته‌اند. یافته‌های آنان حاکی از آن است که اندرکنش سد-مخزن و سد-پی تاثیر بسزایی بر پاسخ سدهای بتنی در هنگام زمین‌لرزه دارد، به طوری که عدم در نظرگیری هر کدام از اندرکنش‌ها باعث ایجاد خطا در نتایج و تحلیل می‌گردد. مهدی‌پور و همکارانش (۲۰۱۴)، نیز به بررسی اثر پی انعطاف‌پذیر بر رفتار لرزه‌ای سد بتن‌وزنی با توجه به اندرکنش سد-مخزن-پی با رویکرد اجزای محدود اوپلر-لاگرانژی در قالب نرم‌افزار ANSYS پرداخته‌اند، حاصل تحقیقات آنها بیانگر آن است که تغییر مدول الاستیسیته پی و سد موجب تغییراتی در تنش‌های به وجود آمده در بدنه سد می‌گردد اما این تغییرات روند خاصی را دنبال نمی‌نماید.

رائو و شیک^۱ (۲۰۱۴)، با استفاده از روش اجزای محدود بر اساس رویکرد کدهای استاندارد هندی و با استفاده از نرم‌افزار StaadPro V8i ، به ارزیابی

مواد و روش‌ها

به منظور مدل‌سازی سد بتن‌وزنی-مخزن-پی و برای بدست آوردن معادله کوپله سازه-سیال، می‌توان معادله حاکم بر محیط سیال (مخزن) و سازه (سد و فنداسیون) را به صورت همزمان با استفاده از روش اجزاء محدود به شرح زیر گسسته‌سازی نمود.

معادله دینامیکی حاکم بر محیط سیال

با فرض سیال تراکم‌پذیر خطی و غیرلزج و صرفنظر از قسمت نوسانی سیال معادله حاکم بر محیط مخزن را که به معادله موج معروف است می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$\nabla^2 P(x, y, t) = \frac{1}{C^2} \ddot{P}(x, y, t) \quad (1)$$

در رابطه بالا P فشار هیدرودینامیک آکوستیک، C سرعت امواج فشاری، علامت دو نقطه بیانگر تعداد دفعات مشتق‌گیری و ∇^2 ، لاپلاسین می‌باشد. توزیع فشار هیدرودینامیک در دامنه سیال با استفاده از روابط شرط مرزی پیرو بدست خواهد آمد:

الف) شرط مرزی سد-مخزن:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho a_n(x, y, t) \quad (2)$$

در معادله (۲) ρ چگالی آب و $a_x(x, y, t)$ مولفه‌های شتاب در جهت بردار نرمال n (بردار عمود بر مرز) می‌باشد.

ب) شرط مرزی مخزن-پی:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho a_n(x, y, t) - q \dot{p}(x, y, t) \quad (3)$$

در رابطه ۳ q گذرایی یا ظریب میرایی نامیده شده و مقدار آن از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$q = \frac{1}{C} \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) \quad (4)$$

در معادله (۴) α ، نسبت دامنه موج برگشتی به دامنه موج برخوردکننده به کف مخزن می‌باشد.

ج) در انتهای دور مخزن شرط مرزی سامرفیلد^۱ مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\frac{\partial P(x, y, t)}{\partial n} = -\frac{1}{c} \dot{P}(x, y, t) \quad (5)$$

شرط مرزی سامرفیلد روش معمول مورد استفاده برای مخزنی است که طول آن به اندازه کافی در نظر گرفته شده باشد و انتهای دور بریده شده در فاصله مناسبی از محل سد برای عبور امواج صفحه‌ای قرار گرفته باشند. این شرط مرزی بیشتر برای تحلیل در "حوزه زمان" مورد استفاده قرار می‌گیرد.

د) شرط مرزی سطح آزاد:

$$P = 0 \quad (6)$$

به عبارت دیگر برای کلیه گره‌های واقع در سطح مخزن، فشار صفر به عنوان شرط مرزی تعریف خواهد شد. همچنین این فرض، عدم وجود امواج سطحی در مخزن سدهای بتنی را بیان می‌نماید زیرا از امواج سطحی در مدل‌سازی صرف نظر گردیده است. با گسسته‌سازی اجزای محدودی معادله (۱) و با اعمال شرایط مرزی پیرو معادله حاکم بر سیال آکوستیک را می‌توان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$[E] \{\ddot{P}\} + [H] \{\dot{P}\} + [A] \{P\} = \{f_2\} - \rho [Q]^T \{\ddot{u}_{tot}\} \quad (7)$$

در معادله (۷)، $[A]$ ، $[H]$ ، $[E]$ ، به ترتیب ماتریس‌های شبه‌جرم، شبه‌میرایی و شبه‌سختی سیال، $\{P\}$ فشار هیدرودینامیک، $[Q]$ ماتریس اندرکنش، $\{f_2\}$ بردار نیروهای هیدرودینامیک و $\{\ddot{u}_{tot}\}$ بردار شتاب کلی سازه می‌باشد.

معادله دینامیکی حاکم بر محیط سازه

با گسسته‌سازی معادله دینامیکی سازه و با در نظر گرفتن نیروهای اعمالی زلزله در حوزه زمان و با استفاده از رویکرد اجزاء محدودی معادله دینامیکی حاکم بر سد و پی به فرم ماتریسی زیر نوشته خواهد شد:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \quad (۸)$$

$$\{f_1\} - [M]\{\ddot{U}_g\} + [Q]\{P\}$$

در رابطه (۸)، $[M]$ ، $[C]$ ، $[K]$ ، به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه می‌باشند. $\{U\}$ ، $\{\dot{U}\}$ ، $\{\ddot{U}\}$ ، به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب سازه، $\{f_1\}$ بردار نیروهای بدنه‌ای، $\{\ddot{U}_g\}$ شتاب زمین لرزه می‌باشد.

معادله کوپله سد-مخزن-پی

با توجه به مطالب گفته شده در نهایت اندرکنش سازه-سیال یک مساله درگیر شامل ۲ معادله دیفرانسیلی مرتبه دوم می‌باشد، بر این اساس می‌توان معادلات حاکم بر سازه-مخزن-پی را به صورت زیر نوشت:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \quad (۹)$$

$$[f_1] - [M]\{\ddot{u}_g\} + [Q]\{p\}$$

$$[E]\{\ddot{p}\} + [A]\{\dot{p}\} + [H]\{p\} = \quad (۱۰)$$

$$\{f_2\} - \rho[Q]^T\{\ddot{u}_{tot}\}$$

معادله‌های دیفرانسیلی (۹) و (۱۰) را می‌توان همزمان با استفاده از روش انتگرال‌گیری ضمنی (لوگان، ۲۰۱۱) حل نمود.

مدل سازی دینامیکی سیستم سد-مخزن-پی

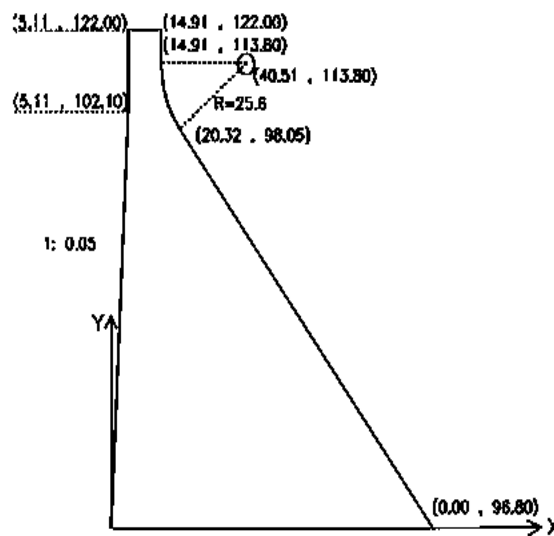
در این قسمت به بررسی اثر طول مخزن بر جابجایی‌ها و فشارهای هیدرو دینامیکی ناشی از آن در چارچوب تحلیلی نرم‌افزار ABAQUS پرداخته خواهد شد. این نرم‌افزار قابلیت حل مسائل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدلسازی‌های غیر خطی را دارا می‌باشد. ABAQUS دارای مجموعه المانهای بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدل کرد و از دو فرایند تحلیل اصلی تشکیل شده است: آباکوس / استاندارد و آباکوس / صریح. فرایند آباکوس / استاندارد از تحلیل ضمنی برای حل مسائل خطی و غیر خطی استفاده می‌نماید و آباکوس / صریح، از تحلیل صریح در حل مسائل غیرخطی با سرعت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد (باقری و سید کاظمی، ۱۳۹۲). بنابراین می‌توان گفت: فرایند آباکوس / استاندارد، برای تحلیل دینامیکی خطی سیستم سد-مخزن-پی مناسب می‌باشد.

احتمال می‌رود افزایش طول مخزن، تغییراتی را در پاسخ سد به هنگام وقوع زمین لرزه موجب شود، همچنین با توجه به این که در شرط مرزی سامرفیلد انتهای دور بریده شده می‌بایست در فاصله مناسبی از محل سد برای عبور امواج صفحه‌ای قرار گیرد (گروه مهندسی ارتش آمریکا، ۲۰۰۳)، لزوم انجام این تحقیق را بیشتر می‌کند، در تحقیقات قبلی فاصله مناسب برای انتهای دور بریده شده برای اندرکنش سیستم سد - مخزن $3H$ در نظر گرفته شده است. H ، ارتفاع سد می‌باشد.

در این تحقیق مدل سازی بر روی طول‌های $3H$ ، $5H$ ، $10H$ ، $15H$ ، $20H$ ، از محل قرارگیری سد تا انتهای دور بریده شده انجام خواهد شد، جهت مدل‌سازی سد بلندترین مونولیت سد وزنی پایین‌فالت واقع در ایالت متحده آمریکا بر روی رودخانه کینگز در نظر گرفته شده است، ارتفاع این مونولیت ۱۲۲ متر

به عنوان تحریک لرزه ای در تحلیل سیستم مورد استفاده قرار می گیرد. مولفه های طولی زلزله به شکل یکنواخت به وجه مشترک پی و سد اعمال می گردند، مولفه های افقی زلزله السنترو به کار رفته در تحلیل در شکل (۲) نشان داده شده است، شایان ذکر است مراجع و مقالات مختلفی جهت تحلیل دینامیکی سد پایین فلت از مولفه های زلزله ال-سنترو استفاده کرده اند. بر این اساس می توان ورودی های مدل نرم افزاری را مشخصات مصالح سد و پی (مدول الاستیسیته، نسب بواسون و چگالی)، مشخصات مصالح آکوستیک (چگالی سیال و مدول بالک سیال)، اعمال شرایط مرزی ذکر شده در قسمت ۲ این مقاله، نیروی وزن سد، فشار هیدرواستاتیک، بارگذاری دینامیکی سازه و مقدار میرایی رایلی دانست.

می باشد و بتن آن ایزوتروپ و همگن فرض شده است. مشخصات هندسی مقطع ۲ بعدی سد پایین فلت در شکل ۱ مشاهده می گردد. همچنین فنداسیون از نوع سنگی، ایزوتروپ و همگن در نظر گرفته شده است. آب درون مخزن تراکم پذیر و از لزجت آن صرف نظر شده است و ارتفاع آب درون مخزن ۱۱۶ متر می باشد. نوع و مشخصات مصالح به کار رفته در تحلیل حاضر در جدول ۱ نشان داده شده است، در ساختگاه سد، ضریب میرایی رایلی معادل با ۰.۵٪ میرایی بحرانی برای فرکانس های طبیعی اول و سوم در نظر گرفته شده است. آنالیز صورت گرفته تاریخچه زمانی بوده و گام زمانی در نظر گرفته شده برای تحلیل ۰/۰۱ ثانیه می باشد. مدت ۴۰ ثانیه رکورد ثبت شده در ایستگاه السنترو در طی زلزله ۱۹۷۹ در ایالت کالیفرنیا آمریکا،



شکل ۱- مشخصات هندسی بلندترین مقطع دوبعدی غیر سرریز سد پایین فلت، مشخصات های وارد شده بر حسب متر

جدول ۱ الف) - مشخصات توده مصالح بتن سد

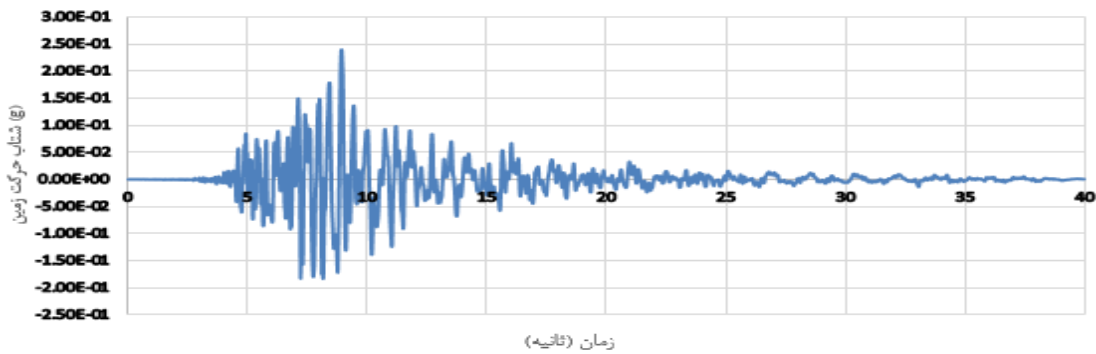
مشخصه	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته، E	۲۷/۸۵	گیگاپاسکال، GPa
نسبت بواسون، (ν)	۰/۲
چگالی، ρ	۲۴۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب، kg/m^3

جدول ۱ (ب) - مشخصات توده مصالح سنگ پی

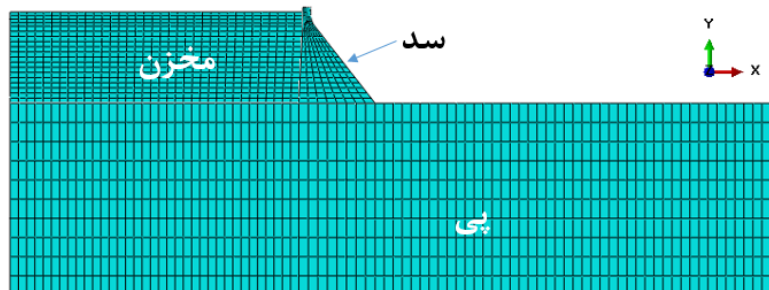
مشخصه	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته، E	۳۱/۳۴	گیگاپاسکال، GPa
نسبت پواسون، (ν)	۰/۳۳
چگالی، ρ	۰	کیلوگرم بر متر مکعب، kg/m^3

جدول ۱ (ج) - مشخصات مصالح آکوستیک مخزن

مشخصه	مقدار	واحد
مدول بالک k	۲/۰۷	گیگاپاسکال، GPa
سرعت موج فشاری C	۱۴۳۸/۷۴	متر بر مجذور ثانیه، m/s^2
چگالی ρ	۱۰۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب، kg/m^3



شکل ۲- شتاب نگاشت طولی زلزله الستر و واقع در ایالت کالیفرنیا آمریکا (۱۹۷۹)، ماکزیمم شتاب حرکت زمین در لحظه 9.01 ثانیه صورت گرفته است و مقدار آن برابر با $0.24g$ می باشد (گروه مهندسی ارتش آمریکا، ۲۰۰۳)



شکل ۳. مدل مش بندی شده سیستم سد-مخزن-پی توسط نرم افزار آباکوس

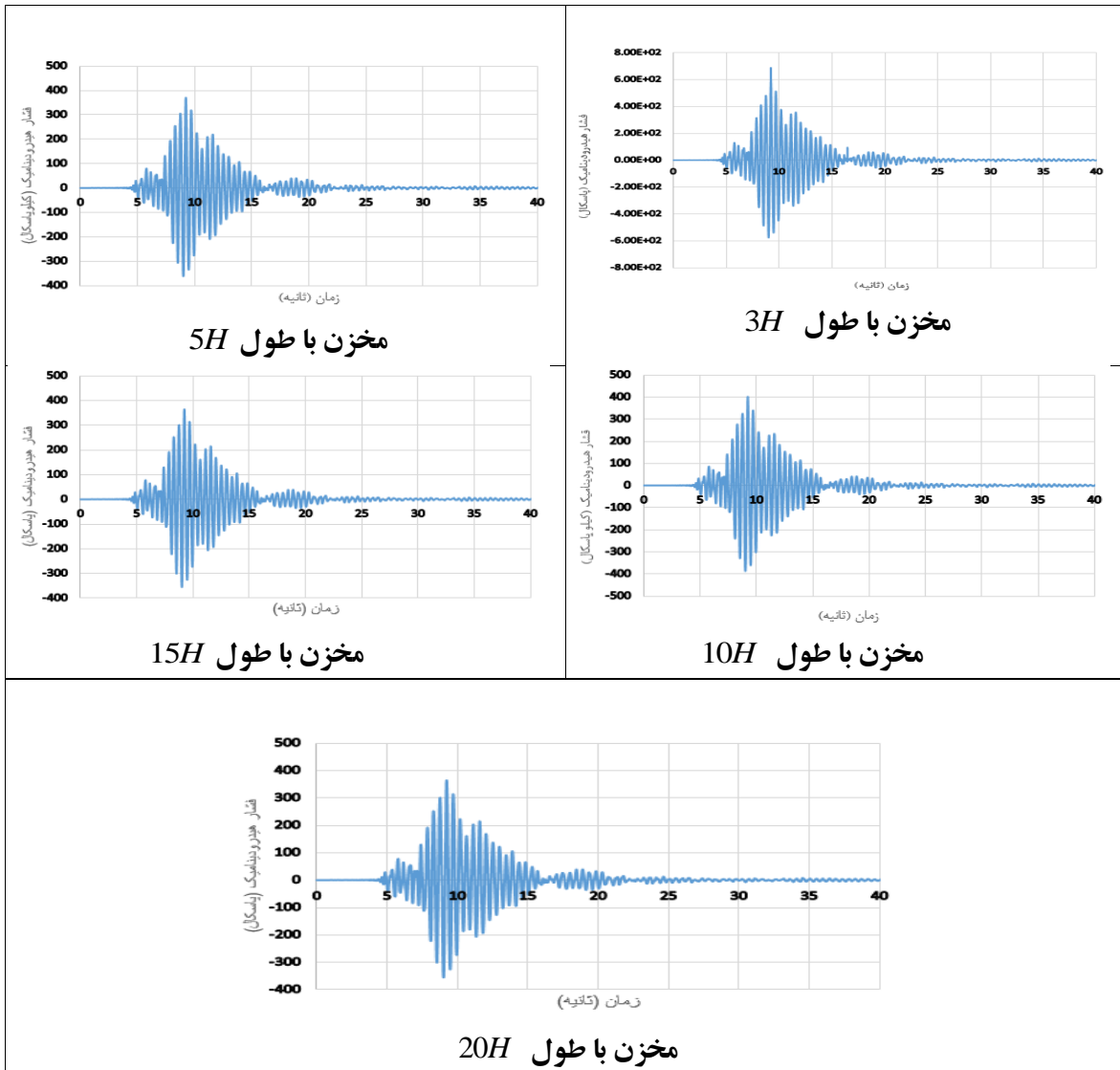
استفاده از روش انتگرال گیری ضمنی حل گردیده است. آنالیز صورت گرفته تاریخچه زمانی بوده و گام زمانی در نظر گرفته شده برای تحلیل ۰/۰۱ ثانیه می باشد. خروجی های نرم افزار آباکوس شامل: جدول ۲، منحنی های تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیک وارد بر پاشنه و جدول (۳)، منحنی های جابجایی های تاج سد برای مخزن با طول های $3H$ ، $5H$ ، $10H$ ، $15H$ ، $20H$ می باشند. با توجه به منحنی های جدول ۲ و ۳، برای مخزن با طول $5H$ تا $20H$ ، مقادیر فشار هیدرودینامیکی وارد بر پاشنه و جابجایی های تاج سد روندی همگام با شتاب زلزله اعمال شده را دنبال می نماید، اما برای مخزن با طول $3H$ منحنی های فشار و جابجایی (به ترتیب جدول ۲ الف) و ۳ الف) به ترتیب در لحظه ۱۶،۴۷ ثانیه و ۱۷،۷۴ ثانیه از روند معمول خود خارج گردیده است. علت این ناهمانگی در ثانیه ۱۶،۴۷ ثانیه برای منحنی جدول ۲ الف)، بازگشت بخشی از امواج هیدرودینامیک به درون مخزن، از انتهای دور بریده شده می باشد، و افزایش ناگهانی جابجایی تاج سد در لحظه ۱۷،۷۴ ثانیه ناشی از افزایش فشار هیدرودینامیکی در ثانیه ۱۶،۶۴ ثانیه است که به بدنه سد وارد شده است. شایان ذکر است به منظور کالیبره نمودن مدل در چند مرحله به تعداد المان ها اضافه گردیده و پس از آنکه در جواب حاصله تغییر قابل ملاحظه ای صورت نگرفت، مقادیر بدست آمده به عنوان جواب اصلی منظور گردید.

شکل ۳ نمونه مش بندی شده سیستم سد-مخزن-پی توسط نرم افزار آباکوس را نشان می دهد. به منظور مش بندی پی و سد با توجه به ویژگی هندسی از المان مربعی چهارگره ای با در نظرگیری این موضوع که سد و پی جامد و پیوسته می باشند، دو درجه آزادی برای هر گره منظور گردیده است، این المان در محیط آباکوس با نام $CPS4R$ معرفی شده است. همچنین با توجه به این موضوع که تنها درجه آزادی در مخزن سدهای بتنی، مقدار فشار می باشد، برای مدل سازی مخزن با توجه به هندسه المانهای مربعی ۴ گرهی آکوستیک با یک درجه آزادی مورد استفاده قرار گرفته است. این نوع المان در محیط آباکوس با مشخصه $AC2D4$ معرفی شده است. برای نشان دادن ماکزیمم جابجایی تاج سد و ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی در محل پاشنه سد نمودارهای تاریخچه زمانی در نقاط در نظر گرفته شده استخراج خواهد شد، سپس با استفاده از منحنی های نامبرده مقادیر ماکزیمم فشار هیدرودینامیک در پاشنه و حداکثر جابجایی در تاج سد استخراج خواهد گردید.

نتایج عددی

در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از تغییرات طول مخزن بر تحلیل دینامیکی سد پایین فلت خواهیم پرداخت. معادلات اجزای محدودی سازه-سیال حاکم بر سیستم سد-مخزن-پی در قالب رویکرد المان محدود و در چارچوب تحلیلی نرم افزار آباکوس با

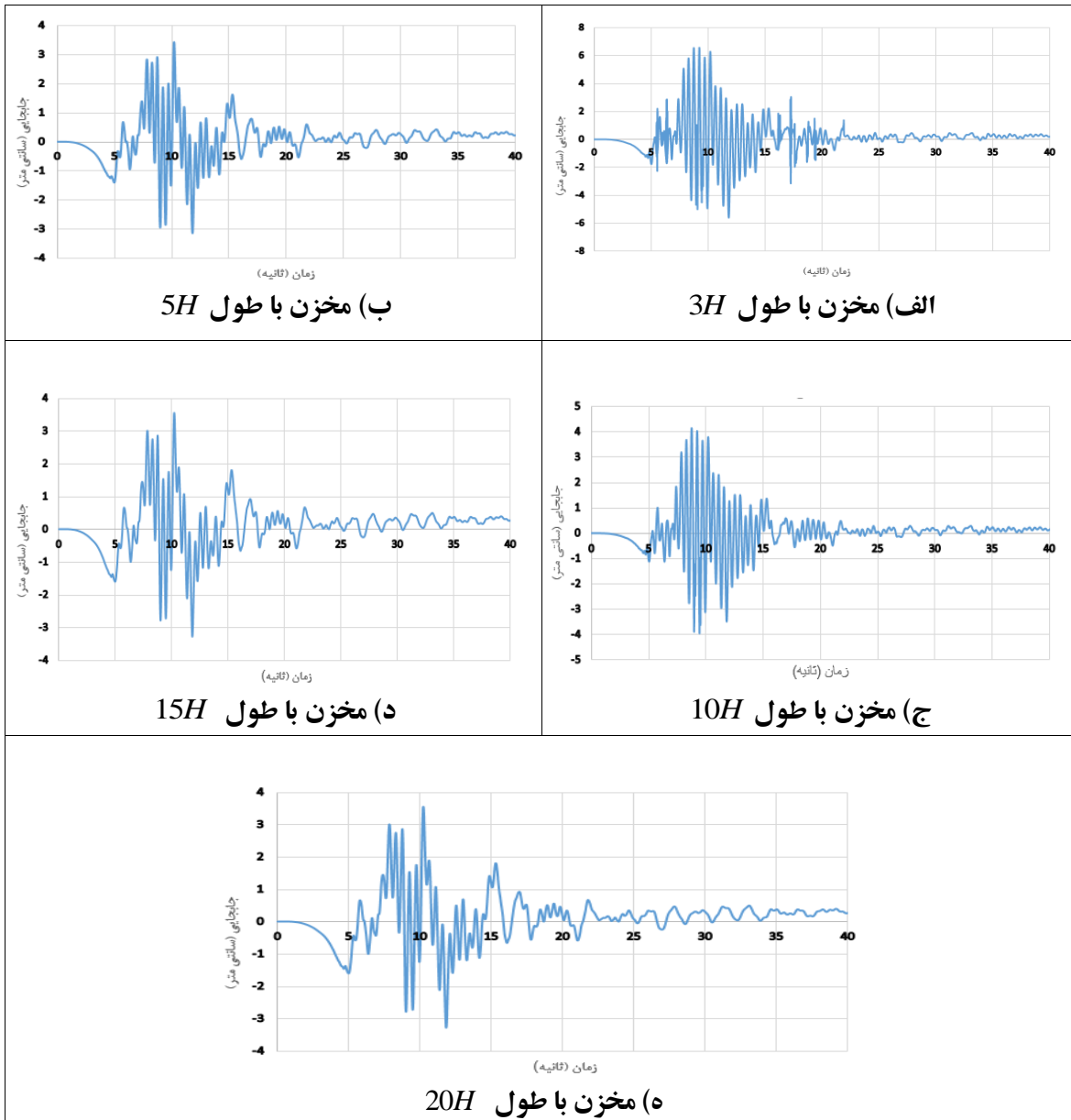
جدول ۲- منحنی های پاسخ فشار هیدرودینامیکی پاشنه سد به تحریک زلزله برای طول های مختلف مخزن



حسب ثانیه و محور قائم مقدار فشار هیدرودینامیک بر حسب کیلوپاسکال می باشد.

منحنی های جدول ۲، مقادیر فشار هیدرودینامیکی وارد بر پاشنه سد برای شیب های مختلف را در هر ۰/۰۱ ثانیه نشان می دهد. محور افقی مقادیر زمان بر

جدول ۳- منحنی پاسخ جابجایی تاج سد به تحریک زلزله برای طول های مختلف مخزن



می‌دهد. محور افقی مقادیر زمان بر حسب ثانیه و محور قائم مقدار جابجایی است و واحد آن سانتی متر می‌باشد.

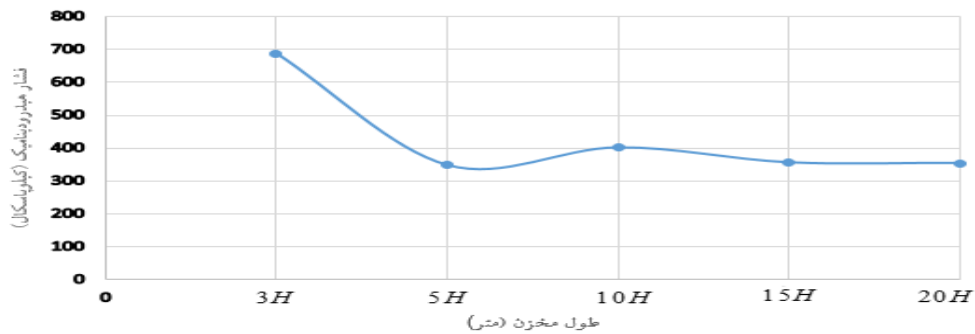
منحنی‌های جدول ۳، مقادیر جابجایی‌های تاج سد برای شیب‌های مختلف را در هر $0/01$ ثانیه نشان

جدول ۴- مقادیر پاسخ سد به تحریک زلزله در طول های مختلف

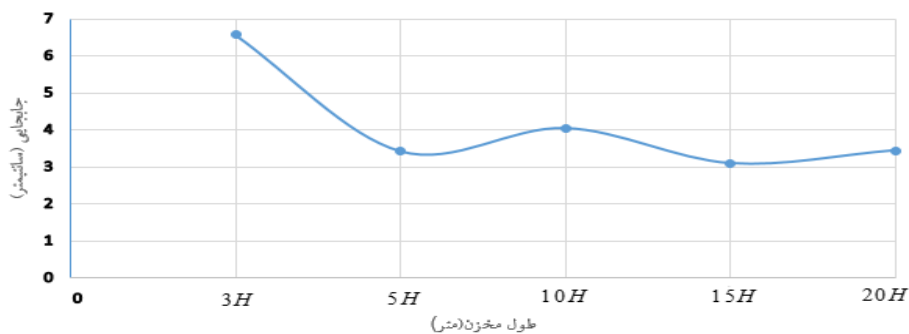
طول مخزن (متر)	ماکزیمم جابجایی تاج سد (سانتی متر)	ماکزیمم فشار هیدرو دینامیکی وارد بر پاشنه (کیلو پاسکال)	تعداد مشهایی که مدل با آن کالیبره گردیده است
3H	6.57	688.03	794
5H	3.42	347.81	3051
10H	4.05	401.45	6932
15H	3.10	355.97	10886
20H	3.45	354.31	15457

آمده است. با استفاده از جدول ۴ می توان نمودارهای جابجایی تاج سد و فشارهای هیدرو دینامیکی وارد بر پاشنه سد را همانند شکل ۳ رسم نمود.

جدول ۴ ماکزیمم جابجایی های تاج سد، فشارهای هیدرو دینامیکی وارد بر پاشنه، و تعداد مشهایی که مدل توسط آنها کالیبره گردید است را نشان می دهد. مقادیر ماکزیمم از منحنی های جدول ۲ و ۳ بدست



شکل ۳ (الف) - نمودار ماکزیمم فشار هیدرو دینامیک وارد بر پاشنه سد برای طول های مختلف مخزن



شکل ۳ (ب) - نمودار ماکزیمم جابجایی تاج سد برای طول های مختلف مخزن

نمی‌کند اما تغییرات آن نسبت به طول $3H$ بسیار کمتر است، علت این امر آن است که شرط مرزی سامرفیلد که در انتهای دور مخزن قرار دارد می‌بایست به اندازه کافی از سازه مرتعش‌کننده محیط آکوستیک دور باشد، تا از برگشت امواج به درون مخزن قابل صرف نظر گردد، در غیر اینصورت بازتابش امواج به درون مخزن موجب افزایش فشارهای هیدرودینامیکی شده و افزایش این فشارها باعث افزایش جابجایی تاج سد می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت که اقتصادی‌ترین طول مخزن به منظور مدل‌سازی سیستم سد-مخزن-پی، فاصله‌ای معادل با ۵ برابر ارتفاع سد از محل ساختگاه سد می‌باشد. زیرا از این طول به بعد نیز با توجه به اینکه مقادیر فشار و جابجایی تغییر قابل ملاحظه‌ای نکرده است آنالیز صورت گرفته متحمل هزینه زمانی بیشتری خواهد گردید.

پیشنهادات

این مقاله به بررسی اثر طول مخزن بر تحلیل دینامیکی سد بتنی پرداخته است. با توجه به این موضوع که سد بتنی در نظر گرفته شده در این تحقیق از نوع وزنی است، پیشنهاد می‌گردد:

۱- بررسی اثر طول مخزن بر تحلیل دینامیکی سدهای بتنی قوسی: با در نظر گرفتن این واقعیت که پاسخ سد به تحریکات زلزله تنها تابعی از طول مخزن و شیب بستر نمی‌باشد و نوع هندسه سد مورد بررسی نیز بر روی نیروهای هیدرودینامیکی و جابجایی‌های به وجود آمده تاثیرگذار است، لذا انتظار می‌رود در صورتی که تحقیق حاضر بر روی سدهای قوسی انجام بگیرد خروجی پاسخ سد متفاوت از خروجی‌های بدست آمده از این تحقیق باشد.

۲- بررسی اثر طول مخزن بر تحلیل دینامیکی سدهای خاکی: بر این اساس که جنس مصالح به کار رفته در ساخت سد، می‌تواند بر نیروها و جابجایی‌های به وجود آمده در نقاط گوناگون سد اثرگذار باشد، لذا

نمودار شکل ۳ (الف)، نشان می‌دهد با افزایش طول مخزن تا فاصله $5H$ ، فشار هیدرودینامیکی با تغییرات فراوانی همراه است و از طول $5H$ به بعد مقدار فشار هیدرودینامیکی وارد بر محل پاشنه تغییر بسیاری نموده است، نمودار شکل ۳ (ب)، نیز بیانگر آن است که با افزایش طول مخزن از $5H$ به $20H$ در جابجایی‌های تاج سد چندانی رخ نداده است. این امر نشان می‌دهد در مدل‌سازی صورت گرفته از فاصله $5H$ تا $20H$ جواب‌های بدست آمده به علت منظور نمودن حجم کافی از محیط مخزن دستخوش تغییرات فراوان نگردیده است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر طول مخزن بر رفتار دینامیکی سد بتن وزنی با احتساب اندرکنش سد-مخزن-پی پرداخته شده است. آنالیز صورت گرفته تاریخچه زمانی بوده و مدل‌سازی با استفاده از روش اجزای محدود در چارچوب تحلیلی نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است. به منظور مدل‌سازی، سد و پی از المان $CPS 4R$ و جهت مدل‌سازی مخزن از المان $AC 2D4$ استفاده گردیده است. جهت کالیبره کردن مدل از روش همگرایی مش‌ها استفاده شده است. همچنین برای انتهای دور بریده شده شرط مرزی سامرفیلد اعمال گردیده است، آب تراکم‌پذیر فرض گردیده و از لزجت آن صرف نظر شده است.

نمودار شکل (۳)، روند تغییرات فشار هیدرودینامیک وارد بر پاشنه سد و جابجایی‌های تاج سد را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد در فاصله $3H$ تا $5H$ فشارهای هیدرودینامیکی وارد بر پاشنه و جابجایی‌های تاج سد بشدت دچار تغییرات گردیده است، اما با افزایش طول مخزن به بیش از $5H$ جابجایی‌های تاج سد تغییر قابل ملاحظه‌ای نکرده است. همچنین فشار هیدرودینامیک وارد بر پاشنه از طول $5H$ به بعد هرچند که روند خاصی را دنبال

انتظار می‌رود در صورتی که تحقیق حاضر بر روی سدهای خاکی صورت پذیرد، پاسخ سد متفاوت از پاسخ بدست آمده در این تحقیق باشد.

منابع

۱. باقری، م.ع.، سید کاظمی، م. مدل سازی عددی سدهای بتنی وزنی، انتشارات سیمای دانش، ۳۲۰ صفحه. ۱۳۹۲.
۲. خان محمدی، ل.، نوائی نیا، ب.، واثقی امیری، ج.، ارزیابی روش اولبری و لاگرانژی در تحلیل دینامیکی خطی سدهای بتن وزنی با احتساب اندرکنش مخزن و پی تحت اثر زلزله، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت، دانشگاه شیراز، ایران. ۱۳۸۸.
۳. سید موسوی، س.م.، لطف الهی یقین، م.ع.، بررسی اثر شیب بستر مخزن در نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سد با توجه به اندرکنش دینامیکی سد و مخزن، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران. ۱۳۸۷.
4. Daneshbod, Y., & Talebbeydokhti, N.(2006). Dam-reservoir seismic analysis by the Eulerian method, Kowsar dam, a case study. Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, 30(B1)
5. Khosravi, S., & Heydari, M. M.(2013). Modelling of Concrete Gravity Dam Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction. World Applied Sciences Journal, 22(4), 538-546.
6. Logan, D.(2011).A first course in the finite element method. Cengage Learning.
7. Mehdi pour, B . , MirMohamadSadeghi, M ., and Saba, H.(2014).Seismic Effect of Foundation Flexibility on Concrete Dam Considering the Interaction of the Fluid and Body of the Dam.2014 4th International Conference on Environment Science and Engineering, IPCBEE vol.68 IACSIT Press, Singapore, DOI: 10.7763/IPCBEE. 2014. V68
8. 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", International Journal of Emerging Engineering Research and Technology Volume 2, Issue 2 : PP 178-186.
9. Tarinejad.R., Pirboudaghi.S.(2014). Legendre spectral element method for seismic analysis of dam-reservoir interaction, International Journal of Civil Engineering, Vol. 13, No. 2, Transaction.
10. USACE.(2003).Time-history dynamic analysis of concrete hydraulic structure, United States Army Corps of Engineers, EM 1110-2-6051.
11. varughese.J.A., Sreelakshmi.N.(2016).Seismic Behavior of Concret Gravity Dams, Advanced in Computational Design, Vol . 1 , NO.2 : 195-20.