

اثر اندرکنش آب - سازه بر پاسخ لرزه‌ای سد و دیوار حائل

محمد داودی، استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
محمد کاظم جعفری، استاد، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
آزاده سلاجقه، دانشجوی دکترای مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده

که از آن جمله می‌توان به تأثیر جنس مصالح سازه و ساختگاه آن، نوع، هندسه و ارتفاع سازه، مکانیزم انتشار و برخورد موج به سیستم، خصوصیات بارهای لرزه‌ای اعمالی نظیر شتاب حداکثر و محتوای فرکانسی بار، تأثیر شرایط تکیه‌گاهی و تأثیر اندرکنش سازه - فونداسیون و سازه - سیال اشاره کرد. یکی از عواملی که می‌تواند در هنگام اعمال بارهای زلزله تأثیر فراوانی بر پاسخ لرزه‌ای سازه داشته باشد، وجود آب پشت آن و اثر اندرکنش آن با بدنه سازه و با فونداسیون می‌باشد. زیرا وجود سیال در هنگام زلزله، باعث اعمال یک نیروی هیدرودینامیکی اضافی بر بدنه سازه می‌گردد. مقدار این نیرو در زلزله‌های قوی می‌تواند قابل ملاحظه باشد و با افزایش پاسخهای لرزه‌ای، می‌تواند پایداری آن را با مشکل مواجه سازد.

در روشهای قدیمی این نیروی هیدرودینامیک با فرض رفتار غیر قابل تراکم سیال، به صورت نیرویی شبه‌استاتیک و مستقل از فرکانس بارگذاری در محاسبات مربوط به طراحی سازه منظور می‌شد. اما به مرور مشخص شد تأثیر تراکم‌پذیری سیال بر پاسخ دینامیک سیستم تابعی از نسبت فرکانس طبیعی مخزن به سازه، عمق مخزن و فرکانس بارگذاری است و بنابراین محاسبه نیروی هیدرودینامیک ناشی از اثر سیال تراکم‌پذیر و ارتباط آن با محتوای فرکانسی بار و خصوصیات سازه مورد توجه قرار گرفت [۱] - [۲]. در سدهای کوتاه معمولاً فرکانس طبیعی مخزن بیش از فرکانسهای حامل عمده انرژی زمین‌لرزه است و با دقت خوبی می‌توان با صرف‌نظر کردن از تأثیر تراکم‌پذیری سیال، از روشهایی مانند جرم افزوده برای محاسبه نیروی هیدرودینامیک سیال استفاده نمود [۱]. با توجه به کاهش فرکانس مخزن در سدهای بلند، خاصیت تراکم‌پذیری سیال

در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های در تماس با آب، عوامل مختلفی بر پاسخ نهایی سازه تأثیرگذار هستند. یکی از این عوامل لحاظ نمودن تأثیر مستقیم مخزن است که به ویژه در هنگام وقوع زلزله‌های شدید و در سازه‌های بلند می‌تواند حائز اهمیت باشد. با توجه به این امر مطالعات گوناگونی در زمینه تحلیل اندرکنش سازه - سیال در علوم مهندسی مختلف ارائه گردیده است که در این گفتار تحقیقات انجام گرفته در زمینه مهندسی عمران با تکیه بیشتر بر انواع سدها مورد توجه خواهد بود. در تحقیق حاضر ابتدا روشهای مختلف تحلیل مسائل اندرکنش سازه - سیال بررسی و سپس نمونه‌هایی از اعمال این روشها با استفاده از مطالعات موردی انجام گرفته در زمینه بررسی اثر وجود مخزن بر سازه‌هایی نظیر دیوار حائل، سدهای بتنی، سدهای سنگریزه‌ای با پوشش بتنی و سدهای خاکی ارائه خواهد شد. به دلیل گسترش روشهای عددی در سالهای اخیر، در تحقیق حاضر مطالعات صورت پذیرفته با روشهای عددی با تأکید بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد و بر مبنای ادبیات فنی موجود توصیه‌های کلی در مورد محدوده تأثیر اندرکنش سد - مخزن ارائه می‌گردد. همچنین مثالهایی از تحلیل‌های انجام گرفته بر روی سدهای بتنی وزنی و سدهای CFRD که توسط مولفین با نرم‌افزار ADINA انجام گرفته است، ارائه و نتایج آن با نتایج موجود در ادبیات فنی مقایسه خواهد گردید.

کلیدواژه‌ها: اندرکنش سازه - سیال، اندرکنش سد - مخزن، تحلیل دینامیکی، نرم‌افزار ADINA

۱- مقدمه

در هنگام رخ دادن یک زلزله قوی، عوامل گوناگونی بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های در مجاورت سیال تأثیرگذار هستند

اندرکنش سازه- سیال در سدهای بتنی ارائه شده است. تحقیقات در مورد سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD) از سال ۱۹۸۱ در سطحی بسیار محدودتر از سدهای بتنی آغاز گردیده و همچنان ادامه دارد. با این وجود تحلیل مسأله اندرکنش سازه- سیال در سدهای خاکی کمتر مورد توجه بوده است [۴]. در ادبیات فنی دلایل این امر شیب ملایم بدنه سدهای خاکی، نفوذپذیری زیاد پوسته بالادست در مقایسه با نفوذناپذیری بتن که باعث جذب بخشی از انرژی موج می‌شود، ذکر شده است و تصور می‌شود مجموع این عوامل باعث کاهش نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه سد خاکی گردد [۵]. هر چند محققین دیگری صحت این استدلال را در مورد سدهای خاکی و CFR بلند در مناطق با لرزه‌خیزی بالا مورد تردید قرار داده‌اند [۴]. ضمن این که تاکنون نیز مطالعه جامعی برای اثبات صحت فرضیات فوق در حالات مختلف تحلیل سدهای خاکی بلند انجام نگرفته است. در سالهای اخیر گسترش ساخت سدهای خاکی بلند در پهنه‌های لرزه‌خیز، ضرورت انجام تحلیل لرزه‌ای سدهای خاکی با در نظر گرفتن اثر کوپل مخزن را آشکار کرده است.

۲- روشهای حل مسائل اندرکنش سد- مخزن

برای حل معادلات اندرکنش سازه- سیال، از شیوه‌های مختلفی استفاده شده است. این روشها را می‌توان از دو دیدگاه کلی طبقه‌بندی نمود. در طبقه بندی نوع اول که بر مبنای تکنیک تحلیل مسأله می‌باشد، به منظور بررسی فشار هیدرودینامیک وارد بر بدنه سد از دو دسته کلی روشهای تحلیلی^۱ و عددی^۲ استفاده شده است. از نظر تاریخچه ادبیات فنی، ابتدا مسأله اندرکنش سد- مخزن با روشهای تحلیلی در بعضی حالات خاص و برای فرضیات ساده‌تر، بررسی شد. در سالهای اخیر با پیشرفت امکانات رایانه‌ای و گسترش روشهای عددی، تحلیل مسأله اندرکنش سد- مخزن با فرضیات، شرایط مرزی، شرایط هندسی و مدل‌های رفتاری پیچیده‌تر امکان‌پذیر شده است.

نوع دوم طبقه‌بندی روشهای تحلیل مسائل اندرکنش سد- مخزن، بر مبنای نوع مجهولات مسأله استوار است. در

اهمیت پیدا می‌کند و در بارگذاریهای با فرکانسی بیش از فرکانس طبیعی مخزن، سیال رفتار دینامیکی خود را آشکار می‌سازد [۱].

در تحقیقات اولیه از روشهای تحلیلی برای حل معادله دیفرانسیل حاکم بر انتشار امواج فشار هیدرودینامیک در محیط مخزن که به معادله هلمهولتز موسوم می‌باشد، استفاده شده است. نخستین بار وسترگارد [۳] روشی تحلیلی برای محاسبه فشار هیدرودینامیک آب بر روی سدهای بتنی وزنی تحت اثر حرکت هارمونیک افقی زمین ارائه نمود. بر اساس رابطه وسترگارد فشار هیدرودینامیک به طور خطی با جرم حجمی سیال، عمق مخزن و شتاب حداکثر زمین، متناسب است و با دور شدن از بدنه سد به سمت بالا دست مخزن مقدار آن کوچکتر شده و مستهلک می‌گردد. وسترگارد همچنین بر مبنای هم فاز بودن فشار هیدرودینامیک مخزن و شتاب سد نتیجه گرفت که قسمتی از آب مخزن به همراه سد به نوسان در می‌آید و لذا می‌توان نیروی اینرسی آب را به صورت جرم معادلی بر بدنه سد اعمال نمود که به آن جرم افزوده می‌گویند [۳]. علیرغم این که روش جرم افزوده تنها در حالتی که فرکانس بارگذاری کمتر از فرکانس طبیعی پایه مخزن باشد، صحیح است، این روش تا مدت‌ها به عنوان روش مرجع در طراحی سازه‌های مهندسی نظیر اسکله‌ها، دیوارهای حائل و سدها در نظر گرفته می‌شد.

پاسخهای حاصل از روش وسترگارد تنها برای ارتعاشات با فرکانس کمتر از فرکانس طبیعی پایه مخزن صادق است [۲]. چوپرا [۲] نشان داد که پدیده انتشار امواج ناشی از خاصیت تراکم‌پذیری سیال است که نقش عمده‌ای در مستهلک کردن انرژی در محیط مخزن ایفا می‌کند. وی با استفاده از اعداد مختلط روش وسترگارد را به گونه‌ای اصلاح نمود که قادر به برآورد صحیح فشار هیدرودینامیک سیال در تمامی فرکانسهای بارگذاری باشد. با بررسی رابطه تعیین فشار هیدرودینامیک در روش چوپرا و وسترگارد ملاحظه می‌شود که این روابط از لحاظ ظاهری دقیقاً مشابه یکدیگر هستند؛ با این تفاوت که به دلیل استفاده از مفهوم اعداد مختلط در روابط چوپرا محدودیت کوچکتر بودن فرکانس بارگذاری نسبت به فرکانس طبیعی پایه مخزن برداشته شده است.

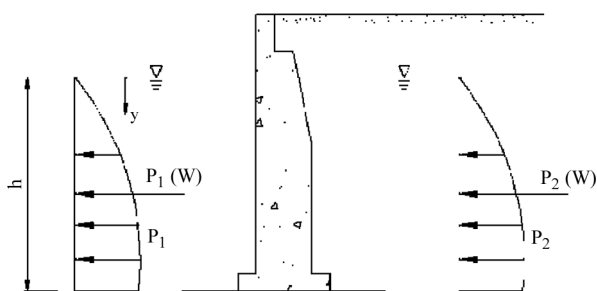
از سال ۱۹۶۷ تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه تحلیل

۳- بررسی مطالعات موردی

در چند دهه اخیر در دسترس قرار گرفتن کامپیوترها، باعث گسترش استفاده از روشهای عددی در مسائل تحقیقاتی و کاربردی شده است که به عنوان نمونه می‌توان به روشهای اجزاء محدود، تفاضل محدود و اجزاء مرزی اشاره نمود. در زمینه تحلیل دینامیکی سیستم‌های سد و مخزن نیز مطالعات گسترده‌ای با استفاده از روشهای عددی انجام پذیرفته است. به کمک این روشها طراحان بر محدودیتهای عمده روشهای تحلیلی فائق آمده و سیستم‌های سد و مخزن با هندسه دلخواه و شرایط مرزی پیچیده را آنالیز کرده‌اند. در روشهای عددی، هر دو نوع شیوه حل معادلات اویلرین و لاگرانژین را برای حل معادلات تعادل سیستم کوپل سازه-سیال به کار برده‌اند. در ادامه این بخش نمونه‌هایی از مطالعات انجام گرفته در زمینه تحلیل اندرکنش دینامیکی انواع مختلف سازه‌ها با محیط سیال ارائه خواهد شد.

۳-۱- مطالعات موردی انجام گرفته در زمینه دیوارهای حائل

به منظور تحلیل دینامیکی دیوارهای حائل در ساده‌ترین حالت، از روش شبه‌استاتیکی مشابه با روش جرم افزوده وسترگارد در تعیین فشارهای جانبی ناشی از زلزله بر دیوار حائل استفاده شده است، شکل (۱).



شکل (۱): نیروهای هیدرودینامیک اعمالی بر دیوارهای حائل در سمت آب و خاک [۸].

چنانچه در شکل (۱) مشاهده می‌شود مشابه با رابطه وسترگارد، فشار هیدرودینامیک در سمت آب از رابطه $P_1 = \frac{7}{8} k_h \gamma_w \sqrt{hy}$ محاسبه می‌شود و نیز مقدار فشار هیدرودینامیک آب در سمت خاک (P_2) برابر با ۷۰ درصد

این راستا تاکنون دو شیوه متفاوت از نظر انتخاب مجهول گرهی در محیط سیال به کار رفته است. در شیوه نخست که به فرمولاسیون اویلر موسوم است، متغیر محیط سازه از نوع جابه‌جایی و مجهول گرهی در محیط سیال فشار هیدرودینامیک یا نرخ تغییرات سرعت انتخاب می‌شود. در شیوه دوم که به فرمولاسیون لاگرانژ موسوم است، مجهول گرهی محیط سیال همانند محیط سازه همان تغییر مکان در نظر گرفته می‌شود، با این تفاوت که مدول برشی سیال مساوی صفر منظور می‌گردد [۶].

محدودیت عمده روش اویلر در معادلات اجزاء محدود، نامتقارن و غیرباندی شدن ماتریسهای جرم و میرایی و سختی سیستم است که باعث می‌شود حل دستگاه معادلات سیستم به حجم بالایی از محاسبات نیاز داشته باشد [۲]. البته این اشکال با اعمال روشهای خاصی قابل اصلاح می‌باشد [۲]. در روش اویلر، هر یک از دو محیط سازه و سیال به صورت جداگانه و غیرکوپل تحلیل می‌شوند. تأثیر فشار هیدرودینامیک ناشی از محیط سیال بر بدنه سد به صورت اعمال یک بار خارجی بر بدنه بالا دست سد اعمال می‌گردد و سپس با تحلیل محیط بدنه سد، پاسخ جابه‌جاییهای دینامیکی بدنه سد محاسبه خواهد شد. بخش کوپل آنالیز در فصل مشترک سازه و سیال برای در نظر گرفتن نیروهای اندرکنش سد و مخزن استفاده می‌شود [۶]. از آنجایی که در روشهای با مبنای لاگرانژ کلیه متغیرها از نوع جابه‌جایی هستند، این روشها در نرم‌افزارهای اجزاء محدود به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶]. با این وجود این روشها نیز در بعضی موارد با مشکلات عددی نظیر مود انرژی صفر مواجه می‌شوند [۷]. بزرگترین عیب این روش حجم زیاد حافظه مورد نیاز برای محیط سیال و نیز مشکل اعمال شرط مرزی مناسب برای مرز مشترک بین آب و سازه است [۶].

در راستای کاهش مشکلات عددی و محاسباتی روش لاگرانژ، مطالعاتی انجام شده است که منجر به بهبود و اصلاح نوع لاگرانژی المانهای سیال شده است [۷]. روش لاگرانژ قابلیت در نظر گرفتن آب در هر دو حالت سیال تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر را داراست.

۳-۲-۱- نحوه مدلسازی سیستم کوپل

در دهه ۷۰ میلادی، چوپرا نتایج روش تحلیلی خود را به حوزه روشهای عددی بسط داد و روش زیر سازه را برای تحلیل مسأله اندرکنش سدهای بتنی- مخزن- فونداسیون ارائه نمود. در روش زیر سازه که جزء روشهای با مبنای اویلرین طبقه‌بندی می‌گردد، محیط کوپل سد- مخزن- فونداسیون به صورت سه محیط مجزا در نظر گرفته می‌شود و نیروهای حاصل از زیر سازه‌های مخزن و فونداسیون بر بدنه سد اعمال می‌شود. چوپرا و همکارانش [۱۵-۲۳] در ادامه طی دهه ۸۰ و ۹۰ میلادی، روش زیر سازه و برنامه کامپیوتری مرتبط با آن را برای سدهای بتنی وزنی و قوسی و شرایط مرزی مختلف کف مخزن بسط و گسترش دادند. یکی از مهمترین نتایج این مطالعات تعیین محدوده تأثیر اندرکنش مخزن بر مبنای پارامتر $\Omega = \frac{\omega_f}{\omega_s}$ برای سدهای بتنی وزنی بود. بر این مبنا چنانچه $\Omega > 2$ باشد، در نظر گرفتن تراکم‌پذیری سیال، تأثیر چندانی بر پاسخ سدهای بتنی وزنی نخواهد گذاشت. در رابطه فوق ω_f فرکانس طبیعی مخزن و ω_s فرکانس طبیعی سازه هستند.

کالایر و همکارانش [۶]، تحلیل دو بعدی لرزه‌ای سد بتنی وزنی پایین فلت را با استفاده از هر دو روش اویلر و لاگرانژ انجام دادند و پاسخها را با یکدیگر مقایسه نمودند. ژائو و همکارانش [۲۴]، یک روش دینامیکی صریح را برای تحلیل اندرکنش سیستم سه‌گانه سد- مخزن- لایه آبرفتی کف مخزن- لایه آبرفتی کف مخزن- فونداسیون به کار بردند. از خصوصیات این روش سرعت حل بالا و نیاز به حافظه کامپیوتری کمتر می‌باشد که به ویژه در تحلیل مسائل غیرخطی حائز اهمیت است. مطابق با نظر نویسندگان این تحقیق، اشکال عمده روش ارائه شده ایجاد حالت خطاهای ناشی از ناپایداری عددی است [۲۴].

۳-۲-۲- نحوه مدلسازی شرایط مرزی مخزن

مقدار نیروی هیدرو دینامیک به عوامل مختلفی نظیر ارتفاع مخزن، شیب بدنه سد، تراکم‌پذیری سیال و محتوای فرکانسی بار بستگی دارد. مقدار این نیرو همچنین به شرایط مرزی محیط اطراف، یعنی کف و کناره‌های مخزن بستگی دارد. از سویی مقادیر حداکثر پاسخهای سد به میرایی مصالح سازه

فشار P_1 است. در این رابطه k_h ضریب زلزله استاتیکی معادل، h ارتفاع مخزن و y فاصله از سطح مخزن می‌باشد. با گسترش روشهای عددی مطالعات زیادی در زمینه تحلیل کوپل دیوارهای حائل در مجاورت آب انجام شده است که در راستا به یک نمونه اشاره می‌شود. منز و فرناندز [۸] تحلیل اندرکنش دیوار حائل، آب و خاک را با روش المان محدود لاگرانژین بررسی نمودند. دیوار حائلی با ارتفاع ۶ متر و دارای میل‌مه‌ار مدلسازی شده است. تحلیل در دو حالت اجرای میل‌مه‌ارها بالاتر از تراز آب و در حالت اجرای آنها به صورت مستغرق انجام گرفته است. بر مبنای نتایج حاصل، اثر اندرکنش آب در هر دو حالت باعث افزایش نیروی مه‌ارها و لنگر اعمالی بر دیوار بوده است. در حالتی که مه‌ار در پایین خط فریاتیکی قرار دارد، تأثیر اندرکنش آب بر نیروها چشمگیرتر است.

۳-۲-۲- مطالعات موردی انجام گرفته در زمینه سدهای

بتنی

در زمینه تحلیل دینامیکی سدهای بتنی با در نظر گرفتن اندرکنش مخزن، مطالعات بسیار گسترده‌ای انجام گرفته است. به طور خلاصه می‌توان این مطالعات را در سه محور زیر جمع‌بندی نمود.

- مدلسازی سیستم کوپل و روش تحلیل مسأله (نوع المانها، نوع مجهولات، نوع روش عددی مورد استفاده در تحلیل)؛

- مدلسازی شرایط مرزی (فونداسیون مخزن، شرایط مرزی کف و شرایط مرزی انتهای دور مخزن)؛

- مدلسازی رفتار مصالح سد که در این زمینه رفتار غیرخطی مصالح بتنی با دو دیدگاه تئوری پلاستیسیته [۹-۱۱] و مکانیزم گسیختگی و ترک [۱۲-۱۴]

بررسی شده است.

از آنجایی که تأکید پژوهش حاضر بر میزان و نحوه تأثیر مسأله اندرکنش مخزن بر پاسخ لرزه‌ای انواع سازه‌ها می‌باشد، در این مبحث از ذکر جزئیات مطالعات موردی انجام شده در زمینه نحوه مدلسازی رفتار مصالح بدنه سد خودداری شده است.

با توجه به کاستیهای روشهای تعریف شرایط مرزی مخزن در حوزه زمان، محققین استفاده از روشهای حوزه فرکانس را برای تعریف این شرایط مرزی پیشنهاد نمودند [۲۹]. مزیت شرایط مرزی حوزه فرکانس امکان تعریف خصوصیات وابسته به فرکانس این مرزها در تحلیل است که این امر در حوزه زمان میسر نمی‌باشد [۲۹]. مشکل تحلیل‌های حوزه فرکانس عدم امکان انجام تحلیل‌های غیرخطی است. همچنین در تحلیل‌های حوزه فرکانس بایستی محتوای فرکانسی و نه زمانی جنبش نیرومند زمین تعریف شود که به منظور تهیه آن، از روشهایی مانند تحلیل فوریه سریع استفاده می‌شود و این روش هیچ‌گونه اطلاعاتی را درباره این که طیف فوریه چگونه با زمان تغییر می‌کند، ارائه نمی‌دهد [۲۹]. در زمینه تعریف شرایط مرزی در حوزه فرکانس می‌توان به مطالعات انجام گرفته توسط فنوس و چوپرا [۱۹-۲۰]، حاتمی [۲۵]، هومار و روفائیل [۳۰]، شاران [۳۱-۳۲] و لی و همکارانش [۳۳] اشاره نمود.

با توجه به کاستیهای روشهای حوزه زمان و فرکانس در تعریف شرایط مرزی، شماری از محققین روشهایی را برای ترکیب تحلیل‌های حوزه زمان و فرکانس ارائه نمودند و در این راستا از روشهایی به غیر از تحلیل سریع فوریه استفاده کرده‌اند تا تأثیر زمان در طیف فرکانسی بارگذاری در تحلیل اثر داده شود. به عنوان نمونه گوگوی و مایتی [۲۹]، روش تبدیل فوریه زمان کوتاه^۴ (STFT) را برای تعریف خصوصیات مرزهای جاذب کف و انتهای مخزن به کار برده و دقت و صحت نتایج حاصله را قابل قبول گزارش کرده‌اند [۲۹].

۳-۲-۳- مدلسازی سد بتنی وزنی پائین فلت

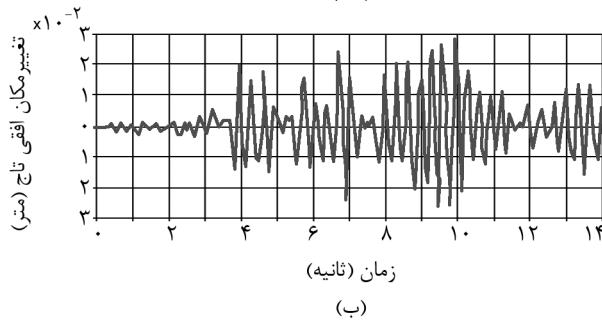
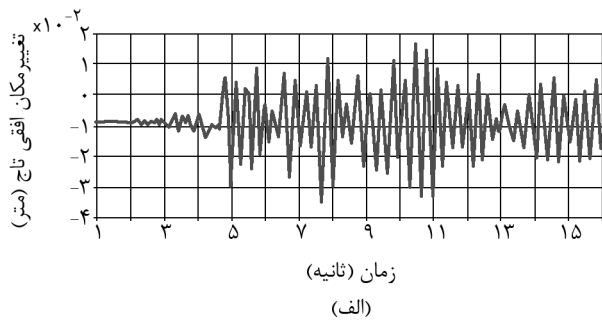
در این بخش نتایج تحلیل دینامیکی کوپل سد بتنی-مخزن که توسط مؤلفین با استفاده از نرم‌افزار ADINA انجام گرفته است، ارائه می‌شود. لازم به ذکر است نرم-افزارهای المان محدود موجود نظیر ANSYS، ABACUS و ADINA برای در نظر گرفتن اندرکنش سازه-سیال مناسب هستند. با این حال نرم‌افزارهای ANSYS و ABACUS دارای محدودیتهایی در تعریف مدل‌های رفتاری مربوط به مصالح خاکی و تحلیل لرزه‌ای محیط‌های دوفازه مانند خاک می‌باشند. از آنجایی که هدف نهایی مؤلفین مقاله حاضر

نیز وابسته است. هر چند این میرایی در سدهای بتنی نسبت به بسیاری از سازه‌ها اهمیت کمتری دارد، اما انواع دیگری از میرایی در این مسأله قابل توجه هستند. میرایی ناشی از انتشار موج در راستای نامحدود بالا دست مخزن و یا جذب موج در لایه رسوبی کف مخزن می‌تواند باعث کاهش قابل توجهی در مقادیر پاسخهای سد بتنی شود. همچنین فونداسیون سد بخشی از ارتعاش آن را به محیط دور منتقل می‌کند. این میرایی وابسته به شرایط هندسی را می‌توان با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب در مسائل مدلسازی نمود [۲۵].

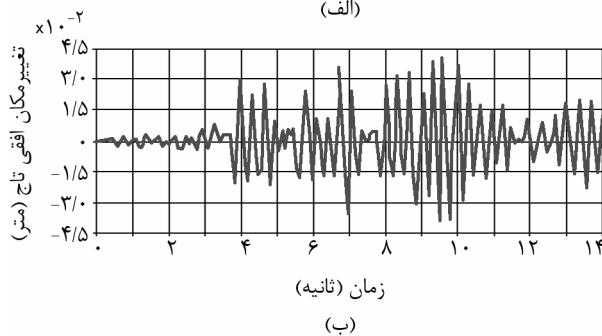
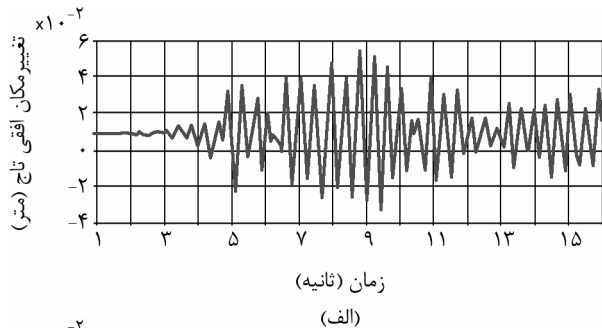
برای تعریف شرایط مرزی کف و انتهای دور مخزن، روشهای مختلفی در هر دو حوزه زمان و فرکانس توسط محققین ارائه شده‌است. مرسوم‌ترین روش مدلسازی مرزهای جاذب انتهای مخزن در حوزه زمان، استفاده از شرط مرزی مرتبه اول سامرفیلد است که توسط میراگرهای ویسکوز و در حوزه زمان تعریف می‌شود. در صورت استفاده از مرزهای سامرفیلد، برای رسیدن به پاسخهای دقیق بایستی طول مخزن به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود. برای کاهش طول مخزن در مدلسازی، بایستی از شرایط مرزی پیچیده‌تری با مرتبه بالاتر استفاده نمود. همچنین شرایط مرزی کف و انتهای دور مخزن وابسته به محتوای فرکانسی بار اعمالی نیز می‌باشد که در حوزه زمان قابل تعریف نمی‌باشد [۲۶].

در حوزه زمان محققین زیادی شرایط مرزی مختلفی را ابداع نمودند. ژائو و همکاران [۲۷]، با استفاده از تلفیق روش المان محدود و المان نامحدود، مطالعه‌ای برای تعیین تأثیر ضخامت لایه رسوبی کف مخزن بر پاسخ لرزه‌ای سیستم سد بتنی-مخزن-فونداسیون انجام دادند. بیرکتار و همکاران [۲۸]، تأثیر نحوه تعریف و خصوصیات فونداسیون بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی ساریار را با استفاده از تحلیل احتمالاتی^۳ بررسی نمودند. پارینلو و بورینو [۲۶]، از مرزهای جاذب غیرخطی درجه دوم هیگدام برای مرز انتهای دور مخزن در تحلیل لاگرانژی استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که در حالت در نظر گرفتن تأثیر امواج سطحی و اعمال تحریک ورودی حامل فرکانسهای بار مختلف، استفاده از مرزهای جاذب هیگدام مرتبه دوم نسبت به مرزهای سامرفیلد کمک شایانی به بهبود نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی سیستم اندرکنش سازه و سیال خواهد نمود.

زمان آغاز تحلیل دینامیکی، بیانگر تغییر مکان افقی استاتیکی تاج سد می‌باشد.



شکل (۳): تغییر مکان افقی لرزه‌ای تاج سد پایین فلت با مخزن خالی: الف) تحقیق حاضر و ب) مرجع [۱].

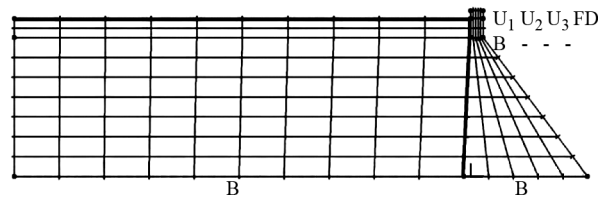


شکل (۴): تغییر مکان افقی لرزه‌ای تاج سد پایین فلت با مخزن پر: الف) تحقیق حاضر و ب) مرجع [۱].

۳-۳- مطالعات موردی انجام گرفته در زمینه سدهای سنگریزه‌ای با پوشش بتنی (CFRD)

وان دان و هریس [۳۴] تأثیر وجود مخزن بر پاسخ

تحلیل اندرکنش سدهای خاکی - مخزن می‌باشد، نرم‌افزار ADINA انتخاب شده است. در مثال در نظر گرفته شده در این بخش، تحلیل دینامیکی سد بتنی وزنی پایین فلت با ارتفاع ۱۲۱/۹ متر تحت تأثیر مؤلفه افقی نگاشت S69E زلزله TAFT انجام گرفته است. نتایج تحلیل انجام گرفته توسط مؤلفین، با نتایج ارائه شده در گزارش احمدی و قره-باغی [۱] که توسط برنامه DARINA و با استفاده از روش اویلر-لاگرانژ به دست آمده‌اند، مقایسه شده است. خصوصیات مصالح و هندسه سد نیز مطابق مثال ارائه شده در گزارش مربوطه تعریف می‌شود. شکل (۲) نمایی کلی از مدل سد و مخزن تعریف شده در ADINA را نشان می‌دهد.

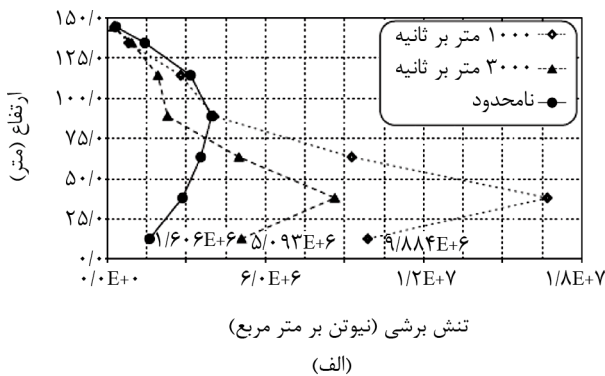


شکل (۲): نمای کلی مدل تعریف شده سد پایین فلت به همراه مخزن در ADINA.

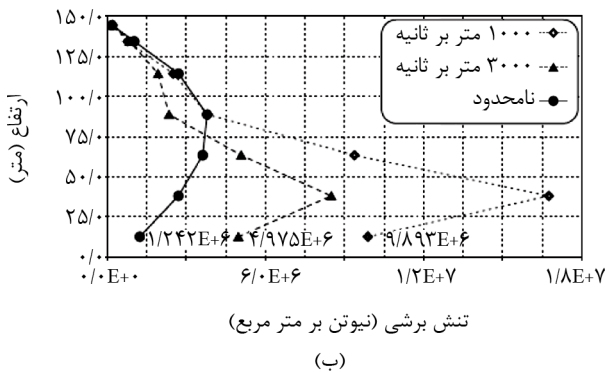
در ابتدا مدل سد خالی تحت تأثیر زلزله TAFT تحلیل می‌گردد. نتایج این تحلیل برای مدل ساخته شده در نرم‌افزار ADINA و مدل نرم‌افزار DARINA (تهیه شده توسط احمدی و قره‌باغی) در شکل (۳) نشان داده شده است. بر این اساس مقدار تغییر مکان افقی برای سد خالی در مدل ارائه شده توسط مؤلفین ۲۶ میلیمتر محاسبه می‌شود که با مقدار محاسبه شده توسط احمدی و قره‌باغی [۱] (۲۹ میلیمتر) همخوانی دارد.

در مرحله بعد تحلیل لرزه‌ای اندرکنش سد-مخزن با تعریف مسقیم المانهای مخزن تراکم‌پذیر انجام می‌گیرد. چنانچه در شکل (۴) مشاهده می‌شود، مقادیر تغییر مکان افقی دینامیکی تاج سد پر برای دو مدل، تطابق خوبی با یکدیگر نشان می‌دهند. با توجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار ADINA، حداکثر تغییر مکان افقی تاج سد پر در تحلیل دینامیکی ۴۵/۵ میلیمتر می‌باشد که این مقدار در نرم‌افزار DARINA، برابر با ۳۷ میلیمتر و در تحقیق چوپرا [۱۹] برابر با ۴۶/۵ میلیمتر، به دست آمده است. لازم به ذکر است در نمودارهای مربوط به مدل ADINA مقدار تغییر مکان اولیه در

سنگریزه‌ای سد می‌گردد. همچنین تحریک غیر هم‌فاز باعث تغییر چشمگیری در محتوای فرکانسی پاسخ تنش در پاشنه سد شده است. با این حال وجود مخزن تأثیری بر مقادیر و محتوای فرکانسی پاسخها ندارد. بیرکتار و همکاران [۳۵] بر اساس پاسخهای به دست آمده نتیجه گرفتند که در این سد خاص و برای تحریک غیرهم‌فاز، در نظر گرفتن اندرکنش مخزن ضرورت چندانی ندارد. با این حال نتایج بایستی برای سدهای مختلف و تحریکهای ورودی متفاوت بررسی گردند تا امکان نتیجه‌گیری منطقی‌تری فراهم گردد.



شکل (الف): تنش برشی (نیوتن بر متر مربع) در حالت الف (مخزن خالی و ب)



شکل (ب): تنش برشی (نیوتن بر متر مربع) در حالت الف (مخزن خالی و ب)

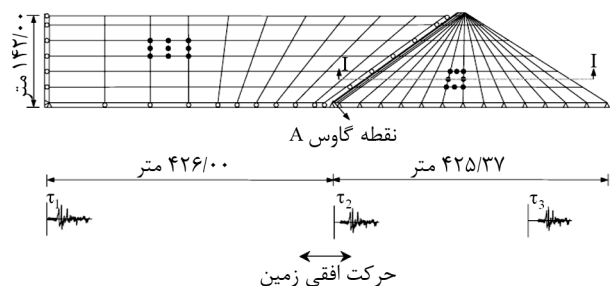
شکل (۶): تنش برشی در رویه بتنی در حالت الف (مخزن خالی و ب) مخزن پر [۳۵].

بیرکتار و همکاران [۳۶]، همچنین تحقیق دیگری بر روی سد تورول انجام دادند و تأثیر جنبش حوزه دور و نزدیک زمین را بر روی این سد بررسی نمودند و نتیجه گرفتند برای این سد خاص تأثیر وجود مخزن در پاسخهای نهایی تنش و تغییرمکان، در هر دو حالت زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک ناچیز بوده است.

در ادامه مؤلفین تحقیق حاضر، تحلیل دینامیکی سد CFR تورول را بر مبنای مشخصات مذکور در تحقیق

جابه‌جایی سدهای CFR را با در نظر گرفتن اثر اندرکنش مخزن بررسی نمودند و در پایان انجام تحلیل‌های بیشتر در این زمینه را پیشنهاد نمودند. سید و همکاران [۵]، بر اساس تحلیل‌های خود نتیجه‌گیری نمودند که در سدهای CFR اثر اندرکنش دینامیکی بین سد و مخزن ناچیز است و در نظر گرفتن نیروی هیدرودینامیک مخزن نیز مانند سدهای خاکی تأثیر چندانی بر پاسخ سیستم ندارد. سکو پینتو [۴]، معتقد است که صحت استدلال سید و همکاران در مورد کم اهمیت بودن تأثیر اندرکنش مخزن بر پاسخ نهایی سدهای CFR بایستی مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. بیرکتار، هاسیفندیوگلو و مووافیک [۳۵]، تأثیر تحریک غیر هم‌فاز سد سنگریزه‌ای با پوشش بتنی با نام تورول را با در نظر گرفتن اندرکنش مخزن و با روش لاگرانژ برای دو حالت مخزن پر و خالی مورد بررسی قرار دادند. محرک ورودی از نوع جابه‌جایی تکیه‌گاهی در راستای افقی می‌باشد که با دو بار انتگرال‌گیری از رکورد زمانی شتاب فیلتر شده و اصلاح شده مؤلفه شرقی-غربی ارزینکان به دست آمده است.

مطابق شکل (۵)، تحریک غیرهم‌فاز در سه نقطه در قسمت پایین مخزن و سد در سه زمان مختلف به مدل انتخاب اعمال می‌شود. زمان رسیدن موج به این نقاط به سرعت موج و فاصله نقطه از مبدأ بستگی دارد. در این تحقیق سه سرعت مختلف موج برابر با ۱۰۰۰ متر بر ثانیه، ۳۰۰۰ متر بر ثانیه و بینهایت در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): مدل اجزاء محدود سیستم اندرکنش سد-مخزن [۳۵].

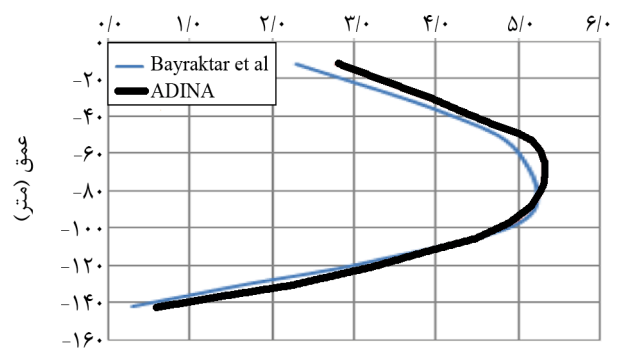
شکل (۶) توزیع تنشهای برشی حداکثر در رویه بتنی در ارتفاع را برای سرعتهای مختلف موج ورودی نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود کاهش سرعت انتقال موج در تکیه‌گاه باعث افزایش مقادیر تنشها در رویه بتنی و مصالح

خاکی بلند در مناطق با لرزه‌خیزی بالاتر است که هر دو عامل افزایش ارتفاع و افزایش شدت محرک ورودی می‌تواند میزان تأثیر مدلسازی مستقیم مخزن را افزایش دهد. از سویی ویژگیهای خاص زلزله‌های حوزه نزدیک نظیر اثر جهت-پذیری، اثرات تغییر مکان ماندگار، اثر فرا دیواره و اثر مؤلفه قائم، می‌تواند باعث افزایش میزان تأثیر وجود مخزن بر پاسخ نهایی سیستم کوپل گردد. همچنین تأثیر وجود محرک تکیه‌گاهی غیرهمسان نیز می‌تواند مد نظر باشد. با توجه به جمیع نکات فوق، اهمیت بررسی اندرکنش دینامیکی سدهای خاکی - مخزن آشکار می‌گردد. در ادامه دو تحقیق موجود در این زمینه با تفصیل بیشتری مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در تحقیق نخست که توسط گوان و مور [۳۷] منتشر

شد، تحلیل سد خاکی لاولیتا تحت اثر زلزله ال سنترال سنیرو با روش زیر سازه در حوزه فرکانس انجام شده و درصد تأثیر آب مخزن و فونداسیون بر پاسخ سد در دو حالت مخزن پر و خالی بررسی گردید. در تحلیل محیط مخزن با استفاده از توابع گرین، روش جدیدی برای محاسبه جرمهای اضافه و ابسته به فرکانس ناشی از مخزن بر بدنه سد ارائه می‌شود. به دلیل استفاده از روش زیر سازه، تنها بدنه سد مدلسازی و مش بندی می‌شود و نیروهای ناشی از فونداسیون و مخزن بر آن اعمال می‌گردد [۳۷]. بر مبنای نتایج حاصل از این تحقیق مشاهده شد که در مدل سد لاولیتا اختلاف پاسخهای مخزن پر و خالی به ویژه در محدوده فرکانسهای بارگذاری $0.60 < \frac{\omega}{\omega_1} < 1.0$ چشمگیرتر است که ω فرکانس طبیعی پایه مدل سد است. همچنین افزایش شیب بدنه بالادست سد، باعث افزایش اختلاف پاسخهای مخزن پر و خالی می‌شود.

در تحقیق دوم، وانگ و وانگ [۳۸]، مطالعه‌ای را برای تحقیق صحت برآورد خطر روانگرایی در سدهای خاکی بر مبنای مطالعات اصلاح‌شده بر اساس اندرکنش سیستم مخزن - سد خاکی - فونداسیون انجام دادند. در این مطالعه از نرم‌افزار المان محدود ADINA استفاده شده است. آب پشت سد و آب موجود در بدنه سد خاکی و ساختگاه به صورت همزمان تعریف و به صورت تمام کوپل در تحلیل منظور می‌شوند. آب مخزن با استفاده از دو نوع از المانهای سیال با مبنای پتانسیل که در نرم‌افزار موجود هستند، مدلسازی شده است. اولین نوع

بیرکتار و همکاران [۳۵] انجام داده‌اند. برای تحلیل دینامیکی از زلزله ارزینکان ترکیه که در سال ۱۹۹۲ رخ داده، استفاده شده است. هندسه مدل نیز مشابه با شکل (۵) در نرم‌افزار ADINA مدلسازی شده است. نتایج حاصل از مدلسازی با نرم‌افزار ADINA با نتایج مقاله مزبور [۳۵] در حالت سرعت موج برشی بینهایت (معادل با تحریک هم‌فاز) مقایسه گردیده است. شکل (۷) توزیع تنشهای افقی در رویه بتنی در ارتفاع سد را نشان می‌دهد. نمودار مربوطه بیانگر تطابق بسیار خوب نتایج این تحقیق با مدلسازی انجام گرفته توسط بیرکتار و همکاران [۳۵] می‌باشد.

تنشهای افقی (x۱۰^۶)

شکل (۷): توزیع تنشهای افقی دینامیکی رویه بتنی سد تورول با در نظر گرفتن اندرکنش مخزن.

۳-۴- مطالعات موردی انجام گرفته در زمینه سدهای خاکی

بنا به دلایل مذکور در مقدمه این تحقیق، حجم مطالعات موجود در زمینه اندرکنش سدهای خاکی و مخزن بسیار محدودتر از سدهای بتنی بوده است. با این حال صحت این استدلالها به دلایل زیادی بایستی مورد ارزیابی مجدد قرار گیرد. نخست آن که در هنگام اعمال بارهای لرزه‌ای، بالا رفتن فشار آب حفره‌ای در مصالح نفوذپذیر پوسته و در نتیجه کاهش تنش مؤثر در آن، می‌تواند پاسخهای دینامیکی سد نظیر حداکثر شتاب، حداکثر تغییر مکانها و کرنشهای تاج سد و یا پایداری شیب بالا دست را تحت تأثیر قرار دهد. از سوی دیگر تاکنون تحقیقی در زمینه اثر طیف گسترده‌ای از تغییرات مقادیر نفوذپذیری مصالح پوسته بر پاسخ نهایی سد خاکی منتشر نشده است. دلیل دیگر گسترش ساخت سدهای

جای مدل دراگر-پراگر و همچنین اصلاح روش تعریف میرایی، نتایج به نحو چشمگیری بهبود می‌یابد.

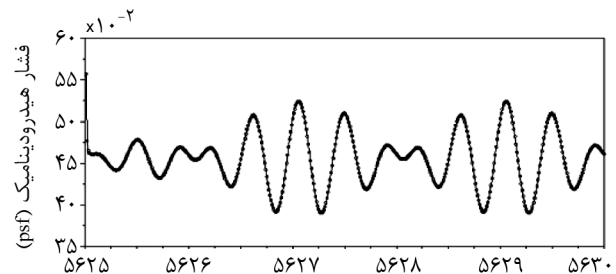
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر اندرکنش مخزن بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های مختلف و روشهای گوناگون تحلیل مسائل اندرکنش سازه-سیال، به صورت اجمالی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه بخشی از مطالعات موردی انجام شده در زمینه تأثیر اندرکنش دینامیکی مخزن بر سازه‌هایی نظیر دیوارهای حائل، سدهای بتنی، سدهای CFR و سدهای خاکی ارائه گردید. همچنین نمونه‌ای از تحلیل‌های انجام گرفته بر روی سیستم کوپل سد بتنی-مخزن و سد CFR-مخزن که توسط مؤلفین و با استفاده از نرم‌افزار ADINA صورت پذیرفته است، ارائه شد. مقایسه نتایج این تحلیل‌ها با نتایج تحقیقات پیشین، بیانگر صحت تحلیل‌های انجام گرفته می‌باشد.

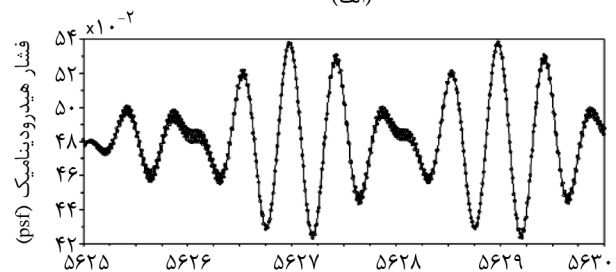
با توجه به بررسی مطالعات پیشین، می‌توان نتیجه گرفت که میزان نیروی هیدرودینامیک ناشی از سیال تابع محتوای فرکانسی بارگذاری و نسبت فرکانس طبیعی سد به مخزن است و لذا نمی‌توان برای انواع سدهای مختلف محدوده ارتفاعی خاصی را تعیین نمود که در آن به صورت قطعی به تحلیل اندرکنش سازه-سیال نیاز باشد. به طور کلی می‌توان گفت که در نظر گرفتن اندرکنش سازه-سیال در فرکانسهای حامل عمده انرژی زلزله کمتر از فرکانس طبیعی پایه مخزن، تأثیر چندانی بر پاسخ فشار هیدرودینامیک مخزن و در نتیجه پاسخهای نهایی سیستم کوپل نخواهد داشت و می‌توان از تأثیر آن در محاسبات صرف‌نظر کرد. به علاوه چنانچه نسبت فرکانس طبیعی مخزن به سد بزرگتر از ۲ باشد، در نظر گرفتن تراکم‌پذیری سیال، تأثیر چندانی بر پاسخ سدهای وزنی نخواهد گذاشت. در زمینه سدهای CFR و سدهای خاکی می‌توان گفت که تأثیر اندرکنش مخزن در شیبهای معمول بدنه این سدها، کمتر از سدهای بتنی می‌باشد. با این حال ممکن است این اثر در برخی فرکانسهای خاص بارگذاری قابل توجه باشد. همچنین تأثیر وجود مخزن در سدهای خاکی بلند در مناطق با لرزه‌خیزی بالا و یا برای حالات مختلف تحریک ورودی نظیر زلزله‌های حوزه نزدیک می‌تواند مورد بررسی

این المانها دارای تراکم‌پذیری کم و نوع دوم دارای تراکم-پذیری بالا می‌باشند. این دو نوع المان مصالح خاکی با استفاده از مدل دراگر-پراگر تعریف شده‌اند [۳۸].

بر مبنای فرضیات فوق، تحلیل دینامیکی سدی شبیه به سد سن فرناندو بالایی انجام شده است و پاسخهای نهایی سد نظیر فشار هیدرودینامیکی آب بر مرزهای مشترک، فشار آب حفره‌ای در بدنه سد، تنشهای عمودی ایجاد شده در المانهای خاک و جابه‌جاییهای افقی در زمانهای مختلف تحلیل دینامیکی و برای هر دو نوع المان سیال با تراکم-پذیری کم و تراکم‌پذیری بالا محاسبه و ارائه شده است. مؤلفین نتیجه گرفته‌اند که پاسخهای حاصل از تحلیل با این دو نوع المان سیال تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و می‌توان با دقت مناسبی از هر دو نوع این المانهای سیال در تحلیل مسائل اندرکنش سد خاکی-مخزن استفاده نمود. نمونه‌ای از پاسخهای ارائه شده مربوط به فشار در پنجه سد برای هر دو نوع المان سیال در شکل (۸) مشاهده می‌شود. همچنین محققین بر این عقیده‌اند که علیرغم این که پاسخها در محدوده منطقی و قابل قبولی قرار گرفته‌اند، در صورت استفاده از یک مدل رفتاری کارآمدتر و کاملتر به



شکل (الف)



شکل (ب)

شکل (۸): پاسخ تاریخیچه زمانی فشار در پنجه سد (الف) المان با تراکم‌پذیری پایین و (ب) المان با تراکم‌پذیری بالا [۳۸].

10. Espandar, R. and Lotfi, V. (2003). Comparison of non-orthogonal smeared crack and plasticity models for dynamic analysis of concrete arch dams, *Computers and Structures*, **81**(14), 1461-1474.
11. Bayraktar, A., Sevim, B., and Altunisik, A.C. (2011). Finite element model updating effects on nonlinear seismic response of arch dam-reservoir-foundation systems, *Finite Elements in Analysis and Design*, **47**(2), 85-97
12. Valliappan, S., Yazdchi, M., and Khalili, N. (1999). Seismic analysis of arch dams-a continuum damage mechanics approach, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **45**(11), 1695-1724.
13. Ghaemian, M. and Ghobarah, A. (1999). Non-linear seismic response of concrete gravity dams with dam-reservoir interaction, *Engineering Structures*, **21**(4), 306-315.
14. Ghrib, F. and Tinawi, R. (1995). An application of damage mechanics for seismic analysis of concrete gravity dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **24**(2), 157-173.
15. Chakrabarti, P. and Chopra, A.K. (1973). Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **2**(2), 143-160.
16. Chakrabarti, P. and Chopra, A.K. (1981). Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **9**(4), 363-383.
17. Chopra, A.K. and Gupta, S. (1982). Hydrodynamic and foundation interaction effects in frequency response functions for concrete gravity dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**(1), 89-106.
18. Hall, J.F. and Chopra, A.K. (1982). Hydrodynamic effects in the dynamic response of concrete gravity dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**(2), 333-345.
19. Fenves, G. and Chopra, A.K. (1983). Effects of reservoir bottom absorption on earthquake response of concrete gravity dams, *Earthquake*

بیشتر قرار گیرد. با این وجود، به دلیل حجم اندک مطالعات موجود در زمینه سدهای خاکی، نیاز به انجام تحقیقات جامعتر برای بررسی میزان و نحوه تأثیر اندرکنش دینامیکی مخزن بر پاسخ لرزه‌ای سدهای خاکی احساس می‌شود.

۵- مراجع

۱. احمدی، محمدتقی و قره‌باغی، بهرام (۱۳۷۲). روش نوین تحلیل اندرکنش دینامیکی سد و مخزن به روش اویلر- لاگرانژ، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
2. Chopra, A.K. (1967). Hydrodynamic pressure on dams during earthquakes, *PROC, ASCE*, **93**(EM6).
3. Westergaard, H.M. (1933). Water pressure on dams during earthquake, *ASCE*.
4. Seco e Pinto, P.S. (1993). Dynamic analysis of embankment dams, *Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering, Proc. of the Seminar on SDGEE*, Seco e Pinto (editor), Balkema, Rotterdam, 159-269.
5. Seed, H.B., et al (1985). Seismic design of concrete faced rockfill dams, *Proc. of Symposium Concrete Faced Rockfill Dams- Design, Construction and Performance*, 459-478.
6. Calayar, Y., Dumanoglu, A.A., and Bayraktar, A. (1996). Earthquake analysis of gravity dam-reservoir systems using the Eulerian and Lagrangian approaches, *Computers and Structures*, **59**(5), 877-890.
7. Wilson, E.L. and Khalvati, M. (1983). Finite element for the dynamic analysis of fluid-solid system, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, **19**(11), 1657-1668.
8. Menezes, J.E.T. and Matos Fernandes, M. (1992). The influence of water on the seismic response of waterfront retaining walls, *Computers and Structures*, **44**(4), 859-862.
9. Akkose, M., Adanur, S., Bayraktar, A., Aydın and Dumanoglu, A.A. (2008). Elasto-plastic earthquake response of arch dams including fluid-structure interaction by the Lagrangian approach, *Applied Mathematical Modelling*, **32**(11), 2396-2412.

29. Gogoi, I. and Maity, D. (2010). A novel procedure for determination of hydrodynamic pressure along upstream face of dams due to earthquakes, *Computers and Structures*, **88**(9-10), 539-548.
30. Humar, J.L. and Roufaiel, M. (1983). Finite element analysis of reservoir vibration, *Journal of Engineering Mechanics*, **109**(1), 215-230.
31. Sharan, S.K. (1987). A non-reflecting boundary in fluid-structure interaction, *Computers and Structures*, **26**(5), 841-846.
32. Sharan, S.K. (1992). Efficient finite element analysis of hydrodynamic pressure on dams, *Computers and Structures*, **42**(5), 713-723.
33. Li, X., Romo, M.P., and Aviles, L.J. (1996). Finite element analysis of dam-reservoir systems using an exact far-boundary condition, *Computers and Structures*, **60**(5), 751-762.
34. Von Thun, L. and Harris, C.W. (1981). Estimation of displacements of rockfill dams to seismic shaking, *Proc. ICRA GEESD. St. Louis*, **I**, 417-423.
35. Bayraktar, A., Hacıfendioglu, K., and Muvafik, M. (2005). Asynchronous seismic analysis of concrete-faced rockfill dams including dam-reservoir interaction, *Canadian Journal of Civil Engineering*, **32**(5), 940-947.
36. Bayraktar, A. et al (2009). Comparison of near- and far-fault ground motion effect on the nonlinear response of dam-reservoir-foundation systems, *Nonlinear Dynamics*, **58**(1-2), 655-673.
37. Guan, F. and Moore, I.D. (1997). New techniques for modelling reservoir-dam and foundation-dam interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **16**(4), 285-293.
38. Wang, X. and Wang, L.B. (2007). Dynamic analysis of a water-soil-pore water coupling system, *Computers and Structures*, **85**(11-14), 1020-1031.
20. Fennes, G. and Chopra, A.K. (1984). Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **12**(5), 663-680.
21. Porter, C.S. and Chopra, A.K. (1982). Hydrodynamic effects in dynamic response of simple arch dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**(3), 417-431.
22. Fok, K. and Chopra, A.K. (1986). Earthquake analysis of arch dams including dam-water interaction, reservoir boundary absorption and foundation flexibility, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **14**(2), 155-184.
23. Tan, H. and Chopra, A.K. (1995). Earthquake analysis of arch dams including dam-water-foundation rock interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **24**(11), 1453-1474.
24. Zhao, C., Li, W., and Wang, J. (2005). An explicit finite element method for dynamic analysis in fluid saturated porous medium-elastic single-phase medium-ideal fluid medium coupled systems and its application, *Journal of Sound and Vibration*, **282**(3-5), 1155-1168.
25. Hatami, K. (1997). Effect of reservoir bottom on earthquake response of concrete dams, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **16**(7-8), 407-415.
26. Parrinello, F. and Borino, G. (2007). Lagrangian finite element modelling of dam-fluid interaction: accurate absorbing boundary conditions, *Computers and Structures*, **85**(11-14), 932-943.
27. Zhao, C., XU, T.P., and Valliappan, S. (1995). Seismic response of concrete gravity dams including water-dam-sediment-foundation interaction, *Computers and Structures*, **54**(4), 705-715.
28. Bayraktar, A., Hancer, E., and Akkose, M. (2005). Influence of base-rock characteristics on the stochastic dynamic response of dam-reservoir-foundation systems, *Engineering Structures*, **27**(10), 1498-1508.

۶- پانویس

۱- Analytical Solution

۲- Numerical Solution

۳- Stochastic Dynamic Analysis

۴- Short Time Fourier Transform

