

یک مرز انتقالی مناسب برای تحلیل دینامیکی سیستم سد وزنی - مخزن با بکارگیری نرم افزار ANSYS

عباس منصوری^{۱*} و علی سبحانی^۲

^۱استادیار گروه سازه‌های هیدرولیکی مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
^۲دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
(تاریخ دریافت ۸۶/۷/۱۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۱/۲۵، تاریخ تصویب ۸۸/۴/۳۰)

چکیده

مدل کردن اندرکنش سد - مخزن در حالت مخزن نامحدود با استفاده از روش اجزای محدود با مشکلاتی رو به روست که از طبیعت نیمه نامحدود مخزن ناشی می‌شود. نرم‌افزاریهایی مانند ANSYS نیز که از روش اجزای محدود برای تحلیل بهره می‌جویند، با این مشکل مواجه هستند. در این تحقیق سعی شده است که روشی برای بر طرف کردن این موضوع در ANSYS ارائه شود. بدین منظور از یکی از المان‌های موجود در نرم‌افزار مزبور استفاده می‌شود. این المان که توانایی جذب نسبی امواج را دارد، FLUID129 نام دارد و برای به کارگیری آن، باید شرایط خاصی را فراهم کرد. در این مقاله، شرایط مزبور بیان و پاره‌ای نتایج مربوط به آن با پاسخ‌های موجود در سایر مراجع مقایسه می‌شود تا درستی راهکار پیشنهادی نمایان شود.

واژه های کلیدی: سد وزنی، مخزن، اندرکنش، شرط مرزی سامرفیلد، ANSYS

مقدمه

مرزی مورد استفاده قرار گرفته است [۸،۷،۶]. در اغلب موارد، مخزن پشت سد دارای طول بسیار زیاد بوده، به طور معمول، محیطی نیمه‌بینهایت پنداشته می‌شود و راهکارهای خاصی برای تحلیل می‌طلبند. در روش اجزای محدود، باید مدل مخزن را در فاصله مناسبی از بالادست بدنه سد قطع کرد و با اعمال یک شرط مرزی جذاب موج مناسب، از بازگشت دوباره امواج به سیستم جلوگیری کرد. تا کنون نرم‌افزارهای فراوانی برای تحلیل به روش اجزای محدود به وجود آمده است. در این میان، ANSYS، نرم‌افزاری است که شرایط استفاده از آن براحتی برای کاربران مهیا است و دقت قابل قبولی در تحلیل دارد؛ بنابراین، در صورتی که بتوان از آن برای تحلیل دینامیکی اندرکنش سد و مخزن بهره جست، می‌توان به طراحی هر چه دقیق‌تر و از طرفی ساده‌تر سدها پرداخت. المان مورد استفاده برای جذب موج این نرم‌افزار، عملکردی همانند شرط سامرفیلد دارد که در بخش ۲، این شرط مرزی و در بخش ۳، المان جذاب موج ANSYS و شرایط لازم برای استفاده از آن، معرفی می‌شود.

رابطه سازی سد و مخزن [۱۲]

در این بخش روابط ماتریسی حاکم بر مسئله در حوزه

در نظر گرفتن اندرکنش سازه - سیال در تحلیل دینامیکی سدهای بتنی سبب افزایش دقت پاسخ‌های به دست آمده از تحلیل و برآورد بهتر نیروهای هیدرودینامیک و به دنبال آن، تنش‌های ایجاد شده در بدنه سد می‌شود. در بسیاری از حالات چشم‌پوشی از اثر مزبور، پاسخ‌های غیرمحافظة کارانه و نه چندان مناسبی بخواهد دست می‌دهد که ممکن است، سازه طراحی شده را با مشکلاتی رو به رو کند. بر همین اساس، چند سد بزرگ بر اثر زلزله‌های رخ داده در سال‌های آغازین دهه هفتاد میلادی، دچار آسیب‌هایی شدند که این موضوع، توجه بسیاری از پژوهشگران را به موضوع تحلیل لرزه‌ای سدهای بتنی با در نظر گرفتن اندرکنش سد - مخزن معطوف داشت. در این راستا، تاکنون پیشرفت‌های شگرفی در زمینه مورد بحث به وجود آمده و راه کارهای فراوانی برای مدل‌سازی دقیق‌تر رفتار این مجموعه پیچیده ارائه شده است. در این میان، تحلیل اندرکنش دینامیکی سد و مخزن نامحدود، به دلیل اهمیت بیشتر، حجم قابل توجهی از تحقیقات انجام گرفته را به خود اختصاص داده است. این تحلیل‌ها در دو حوزه زمان و فرکانس انجام شده است [۵،۴،۳،۲،۱]. برای انجام تحلیل در این دو حوزه، روش‌های عددی گوناگونی مانند اجزای محدود و اجزای

در ادامه، با توجه به مزیت حوزه فرکانس برای تحلیل محیط های نیمه بی نهایت (مانند مخازن سدها) رابطه فوق به حوزه فرکانس انتقال می یابد [۹]. سپس پاسخ دینامیکی سد، با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سازه و سیال به دست می آید. ناگفته نماند، از آنجایی که در سدهای بتنی به طور معمول از مفهوم میرایی هیسترتیک بهره می جویند، ماتریس میرایی C به صورت $C = (2\beta/\omega)K$ تعریف شده که β ، میرایی هیسترتیک بوده و رابطه بالا پس از اندکی ساده سازی به این شکل در می آید:

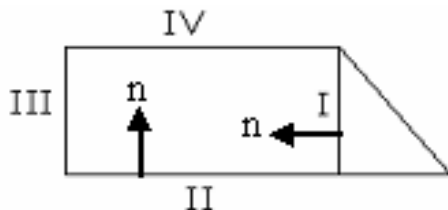
$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M + (1+2\beta i)K & -B^T \\ -B & \frac{1}{\omega^2}(-\omega^2 G + i\omega L + H) \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -M\mathbf{J}\mathbf{a}_g \\ \frac{1}{\omega^2} B\mathbf{J}\mathbf{a}_g \end{Bmatrix} \quad (4)$$

این رابطه برای تحلیل سد با مخزن محدود، کامل است. در صورت نیاز به تحلیل مخزن نیمه بی نهایت، که طول آن در راستای جریان، بسیار بیشتر از سایر ابعاد آن است، باید به گونه ای اثر بیکران بودن مخزن که سبب عبور و استهلاك امواج می شود را در رابطه (۴) وارد کرد [۱۰].

یکی از راهکارهای مناسب و ساده برای مدل سازی وجه بالادست مخزن، استفاده از شرط مرزی سامرفیلد است [۱۱، ۱۰]. این شرط مرزی که رابطه نهایی آن را می توان به کمک تئوری یک بُعدی انتشار امواج استخراج کرد، دامنه امواجی که با آن زاویه قائمه دارند را به طور کامل جذب کرده و از برگشت آن به مخزن جلوگیری می کند. بر اساس رابطه ذکر شده، شارّ فشار در محل اعمال شرط سامرفیلد به صورت زیر با کمیت فشار مرتبط می شود:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{c} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5)$$

در این رابطه، $\partial p / \partial n$ شارّ فشار است که p فشار و n بردار نرمال عمود بر سطح است. همچنین در این رابطه c سرعت انتشار موج در آب و t زمان است. شرط های مرزی چهارگانه مخزن، هنگامی که سد انعطاف پذیر در نظر گرفته شود، به این قرار است:



شکل ۱: شرایط مرزی مخزن.

فرکانس، با استفاده از روش اجزای محدود تشریح می شود. خاطر نشان می کند، نرم افزار ANSYS مشابه سایر نرم افزارهای تحلیل سازه - سیال، اندرکنش این دو را به کمک روابطی که در این بخش ارائه می شوند در نظر گرفته و پاسخ های دینامیکی را با حل معادله نهایی در هر فرکانس تحریک به دست می دهد. بر اساس تئوری اجزای محدود، معادله ماتریسی حاکم بر پاسخ دینامیکی سازه به تحریک تکیه گاهی در حوزه زمان به صورت زیر است:

$$M\ddot{\mathbf{r}} + C\dot{\mathbf{r}} + K\mathbf{r} = -M\mathbf{J}\mathbf{a}_g \quad (1)$$

در این رابطه، M ، C و K ، به ترتیب ماتریس های مشخصه جرم، میرایی و سختی سازه و \mathbf{r} بردار تغییر مکان های گرهی نسبی آنند. J نیز ماتریس یکه ای است که وظیفه انتقال بردار شتاب تکیه گاهی \mathbf{a}_g به درجه های آزادی سازه را بر عهده دارد. باید دانست در صورتی که سیالی مانند آب مخزن پشت سد، تحت تحریک تکیه گاهی قرار گیرد، معادله ای مشابه رابطه زیر بر رفتار آن حاکم خواهد بود:

$$G\ddot{\mathbf{p}} + L\dot{\mathbf{p}} + H\mathbf{p} = -B\mathbf{J}\mathbf{a}_g \quad (2)$$

در اینجا G ، L و H را می توان به ترتیب ماتریس های مشخصه شبه جرم، شبه میرایی و شبه سختی سیال نامید که در تعیین فشارهای هیدرو دینامیک \mathbf{p} نقش بسزایی دارند. افزون بر این ها، ماتریس نگاشت B سبب تبدیل شتاب تکیه گاهی \mathbf{a}_g به شارّ فشار شده و در کنار ماتریس J که تعریفی همانند قبل را دارد، طرف راست معادله ماتریس حاکم بر سیال را تشکیل می دهد.

هنگامی که سازه و سیال در مجاورت هم قرار بگیرند و تحت تأثیر یک شتاب پایه واحد باشند، اندرکنش سازه و سیال اهمیت یافته و سبب تغییر پاسخ هر یک از دو بخش مزبور می شود. در این حالت، ماتریس نگاشت B ، افزون بر نقش تبدیل شتاب های تکیه گاهی به شارّ فشار، وظایف مهم دیگری نیز بر عهده دارد که همانا تبدیل شتاب های سازه به شارّ فشار و همچنین، تبدیل فشارهای هیدرو دینامیک به نیروهای وارده به سازه است. در واقع ماتریس مزبور، عامل ایجاد اندرکنش در سازه و سیال ماست. در این حالت، دو معادله حاکم بر سازه و سیال در کنار هم قرار گرفته و رابطه بنیادین حاکم بر مجموعه را بنا می نهد:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ B & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{r}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -B^T \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -M\mathbf{J}\mathbf{a}_g \\ -B\mathbf{J}\mathbf{a}_g \end{Bmatrix} \quad (3)$$

مدل سازی بالادست مخزن است. اما از آنجا که در نرم افزار ANSYS، چنین گزینه‌ای برای تحلیل وجود ندارد، باید برای استفاده از نرم افزار مزبور در تحلیل مسئله مورد بحث چاره‌ای اندیشید. از طرف دیگر، شرط مرزی سامرفیلد به دلیل داشتن تقریب در نحوه جذب امواج دقت کمتری دارد. اما، به دلیل سادگی نسبی، در بسیاری از کارهای عملی مورد استفاده قرار گرفته و در این مقاله نیز به عنوان معیار سنجش پاسخ ها برگزیده می‌شود.

در ادامه، راهکار پیشنهادی در این مقاله که همانا استفاده از یکی از گزینه‌های موجود در نرم افزار ANSYS است تشریح می‌شود. برای مدل کردن شرط مرزی جاذب موج انتهایی مخزن از المان FLUID129 استفاده شده است. از این المان تنها برای شرط مرزی ناحیه‌ای که با المان FLUID29 مش‌بندی شده باشد، می‌توان بهره جست. این المان به صورت خطی و دو گرهی است که دارای یک درجه آزادی از نوع فشار دارد و تنها مشخصه مورد نیاز آن، سرعت انتشار صوت در سیال است. برای استفاده از این المان باید موارد زیر مهیا باشد [۱۲]:

- ۱- این المان باید روی مرز کمائی شکل ناحیه‌ای قرار بگیرد که با المان FLUID29 مش‌بندی شده باشد.
- ۲- شعاع مرز کمائی شکل باید عدد حقیقی (Real) باشد. مختصات مرکز کمان نیز باید به صورت اعداد حقیقی وارد شود، در غیر این صورت، نرم‌افزار مرکز کمان را روی مرکز مدل فرض می‌کند. حتی المقدور، مرکز کمان باید در نزدیکی مرکز مدل باشد.
- ۳- در صورت وجود سازه‌ای در مجاورت سیالی که با المان FLUID29 مش‌بندی شده است، باید حداقل فاصله مرزی که قرار است المان FLUID129 روی آن قرار بگیرد تا محل اتصال سازه به سیال، 0.2 Lambda باشد که $\text{Lambda} = c/f$ است. در این رابطه c سرعت انتشار صوت در سیال و f دامنه فرکانسی موج فشاری است.

استفاده از المان FLUID129 مستلزم رعایت همه موارد ذکر شده در بالا است. در برخی از مواقع، امکان مدل کردن یک پارچه سد به دلیل هندسه خاص آن وجود ندارد و باید سد را به صورت قطعات بهم پیوسته مدل کرد. در این گونه موارد، برای اعمال صحیح اندرکنش، باید مدل سازی مخزن نیز همانند بدنه سد و درست در نواحی جداسازی بخش های مختلف آن، به صورت جداگانه و چند قسمتی انجام گیرد. از آن جا که شرط لازم برای

$$I \quad \frac{\partial p}{\partial n} = -\rho a_s^n \quad (6)$$

$$II \quad \frac{\partial p}{\partial n} = -\rho a_g^n - q \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$III \quad \frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{c} \dot{p}$$

$$IV \quad p=0$$

شرط I بیانگر اندرکنشی بودن مسئله سد و مخزن و وابستگی پاسخ های هر یک به دیگری است. در این رابطه a_s^n شتاب سد و a_g^n شتاب زمین در راستای بردار n است که a_g^n به سد نیز منتقل می‌شود، ρ نیز چگالی آب درون مخزن است. همان گونه که مشخص است، مقدار شار فشار ایجاد شده در مخزن، به مقدار شتاب سد وابسته است. شرط II مربوط به کف مخزن است و می‌توان آن را شرط کلی حاکم بر چهار مرز مخزن نامید. در این رابطه، $q = \rho_1 / \rho_2 c_2$ است که پارامترهای دارای اندیس ۱ مربوط به سیال و اندیس ۲ مربوط به سازه است. شرط III نیز، همان شرط مرزی سامرفیلد است که در رابطه (۵) معرفی شد. شرط IV، مربوط به سطح آب مخزن است که چون با هوا در ارتباط است، فشار برابر صفر است.

بدین ترتیب، روابط ماتریسی حاکم بر محدوده سد - مخزن و شرطهای مرزی مربوط به آنها ارائه شد که می‌توان از آنها برای تحلیل دینامیکی مجموعه بهره جست. ناگفته نماند، تاکنون روش‌های گوناگونی برای بیان شرط مرزی بالادست مخزن پیشنهاد شده‌اند که در اینجا از شرط مرزی سامرفیلد، با توجه به سادگی نسبی روابط و پاسخ های مناسب آن به ویژه در فرکانس های پایین بهره‌جویی شد. المان های نیمه‌بی‌نهایت سیال و شرطهایی هم چون شاران و ...، گزینه‌های دیگری برای مدل سازی وجه بالادست مخزن هستند که بررسی آنها مجال بیشتری می‌طلبد [۱۰، ۱۱]. در بخش آتی، روش پیشنهادی در این مقاله برای مدل سازی وجه بالادست مخزن تشریح می‌شود.

مدل سازی بالادست مخزن

همان گونه که پیش از این بدان اشاره شد، برای مدل سازی وجه بالادست مخزن، گزینه‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان به المان های نیمه‌بی‌نهایت سیال (HE) و شرط مرزی سامرفیلد اشاره کرد. در این میان، از آنجا که HE نحوه گسترش امواج در امتداد مخزن را به طور دقیق در نظر گرفته و راهکاری نیمه‌تحلیلی برای عبور موج در بالادست ارائه می‌کند، روش بسیار مناسبی برای

و مخزن نمایش داده شود، بر خلاف شکل (۲)، مش بندی به هیچ وجه قابل تشخیص نخواهد بود.

میرایی در نظر گرفته شده برای تحلیل هر دو سد از نوع هیسترتیک و به مقدار $0/05$ است. در همه تحلیل‌ها، از اندرکنش سد با پی انعطاف پذیر، صرف نظر شده و پی، صلب در نظر گرفته شده است. تحریک به صورت شتاب واحد یعنی $1m/s^2$ در محدوده فرکانسی صفر تا 20 هرتز و با گام فرکانسی افزایشی $0/04$ به گره‌های پایه در جهت‌های افقی و قائم اعمال شده است. ضریب بازگشت موج کف مخزن (α) ، 1 و $0/5$ تعیین شده است. بتن سدها با مشخصات زیر برای نرم افزار تعریف شده است:

$E_d = 27/5$ Gpa مدول الاستیسیته

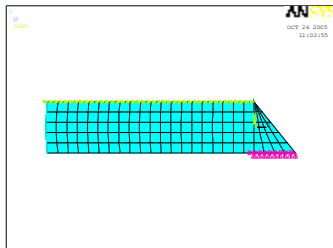
$\gamma = 24/8$ kN/m³ چگالی بتن

$\nu = 0/2$ ضریب پواسون

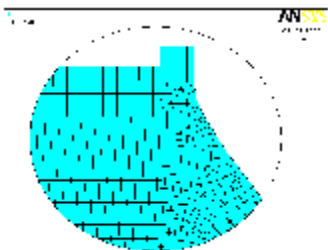
برای مخزن‌ها نیز آب، سیالی ویسکوز و تراکم پذیر با مشخصات زیر در نظر گرفته شده است:

$\gamma = 10$ kN/m³ چگالی آب

$c = 1440$ m/s سرعت صوت در آب



شکل ۲: سد ایده آل مثلثی و مخزن آن.



شکل ۳: سد PineFlat و مخزن آن.

نتایج عددی

پس از آنکه سد ایده آل مثلثی و سد PineFlat به همراه مخازنشان مدل شد، مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفت. برای نشان دادن نتایج این تحلیل در حوزه فرکانس، از نمودارهای تابع انتقال استفاده شده است. در این نمودارها، محور افقی، فرکانس تحریک است؛ این محور

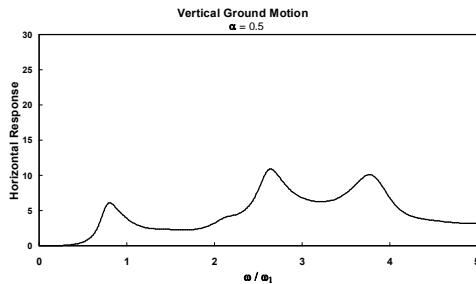
استفاده از المان FLUID129، کمائی بودن مرز مزبور است، بنابراین انتهای هر یک از قطعات مخزن نیز باید به صورت کمان باشد. شرط کافی برای آنکه نرم افزار قادر به انجام تحلیل باشد این است که همه این کمان ها هم شعاع و هم مرکز باشند.

مدل‌های عددی

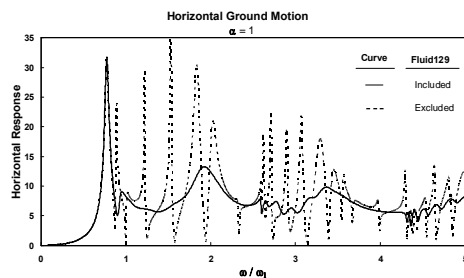
در این بخش، تحلیل دینامیکی در حوزه فرکانس روی دو مدل سد ایده آل مثلثی و سد PineFlat به انجام می‌رسد. سد ایده آل مثلثی با ارتفاع 200 متر و عرض پایه 160 متر مدل شده است. برای مش بندی سد، هر سه وجه آن به قطعات 40 متری تقسیم شده است. مخزن سد نیز، با ارتفاع 200 متر و طول 800 متر ($L/H=4$) در نظر گرفته شده است. خاطر نشان می‌کند نسبت $L/H=4$ در بسیاری از مراجع معتبر به عنوان نسبت مناسب برای طول مخزن برگزیده شده است [۱]. بنابراین در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. مش بندی مخزن با تقسیم وجوه آن به قطعات 40 متری به دست آمده است. از آنجا که تحلیل سد وزنی به صورت دو بعدی انجام می‌گیرد، پس در نرم افزار نیز از المان های دو بعدی بهره گرفته شده است. بدین منظور، برای سد از المان ۸ گرهی PLANE82 و برای مخزن نیز، از المان ۴ گرهی FLUID29 استفاده شده است. به دلیل آنکه وجه بالادست سد که به مخزن متصل است، دارای یک سازه مش بندی در هر دو محیط (سد و مخزن) با اندازه 40 متر است و نیز با توجه به اینکه المان PLANE82، ۸ گرهی است و المان FLUID29 ۴ گرهی، بنابراین هنگام شبکه بندی سیستم، گره‌های میانی المان PLANE82 به علت جفت نشدن با گرهی از المان FLUID29 آزاد می‌ماند. برای جلوگیری از خطای ناشی از آزاد ماندن این گره‌ها، درجات آزادی آنها به درجات آزادی همنام گره‌های بالا و پایین آن کوپل شده است. مدل کامل سد و مخزن در شکل (۲) قابل مشاهده است.

مشخصات سد PineFlat در بسیاری از مقالات موجود است [۱۳]. مخزن این سد نیز به صورت $L/H = 4$ مدل شده است. برای مش بندی سد و مخزن، از مش بندی آزاد با اندازه بسیار ریز بهره گرفته شده است. شکل (۳)، نمایش دهنده قسمت انتخاب شده‌ای از مش بندی سد PineFlat به همراه مخزن آن است. از آن جا که مش بندی این سد و مخزن آن بسیار ریز است، در صورتی که کل سد

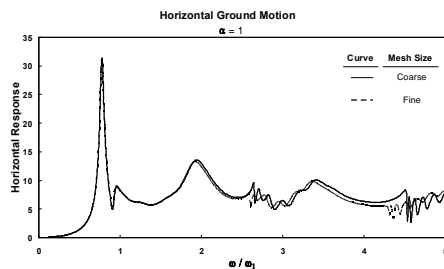
جاذب موج انتهای مخزن استفاده شده با گراف‌های مرجع که پاسخ‌های آن از تحلیل دینامیکی‌ای که به وسیله برنامه‌نویسی کامپیوتری و به کارگیری شرط سامرفیلد به عنوان شرط مرزی جاذب موج انتهای مخزن، به دست آمده، مقایسه شده است. نمودارهای (۳) و (۴) توانایی روش ارائه شده را به هنگام تحریک، در حالتی که ضریب بازگشت موج کف مخزن ۰/۵ باشد ($\alpha=0.5$)، نشان می‌دهد.



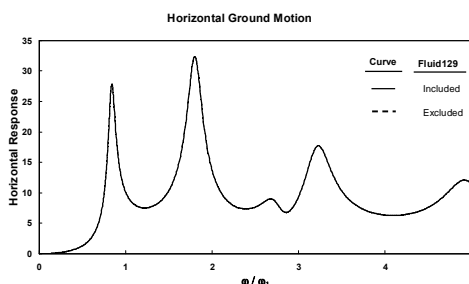
نمودار ۴: پاسخ افقی تاج سد ایده‌آل مثلی به تحریک قائم.



نمودار ۵: تأثیر شرط مرزی انتهای مخزن بر پاسخ تاج سد PineFlat.

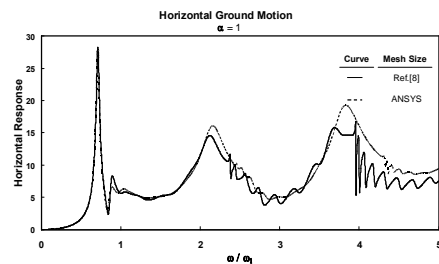


نمودار ۶: تأثیر مش‌بندی ریز بر پاسخ تاج سد PineFlat.

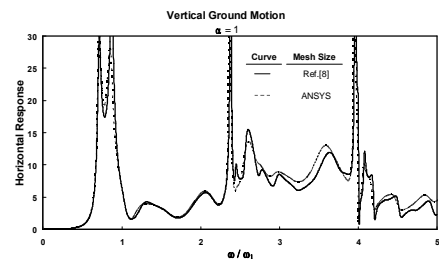


نمودار ۷: تأثیر شرط مرزی انتهای مخزن بر پاسخ تاج سد PineFlat در آب تراکم‌ناپذیر.

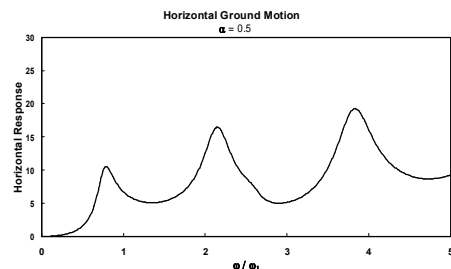
با تقسیم فرکانس‌های تحریک بر فرکانس مود اول طبیعی (ω_1) که از تحلیل مودال سد با مخزن خالی به دست آمده، بی‌تعد شده است. محور قائم نیز بیان‌گر پاسخ تاج سد به تحریک‌های مختلف است که البته این پاسخ‌ها از جنس شتاب است. در حقیقت این پاسخ‌ها مقدار شتابی است که در گره تاج سد بر اثر اعمال شتاب واحد به گره‌های کف، ایجاد شده است. قابل ذکر است که پاسخ‌های به دست آمده از تحلیل سیستم، به صورت اعداد مختلط است که قسمت حقیقی و موهومی دارد و ترسیم نمودار این پاسخ‌ها صحیح نیست. برای رفع این مشکل، مقادیر مطلق پاسخ‌ها، محاسبه شده است. بنابراین محور قائم نشان‌دهنده مقدار مطلق پاسخ تاج سد است.



نمودار ۱: پاسخ افقی تاج سد ایده‌آل مثلی به تحریک افقی.



نمودار ۲: پاسخ افقی تاج سد ایده‌آل مثلی به تحریک قائم.



نمودار ۳: پاسخ افقی تاج سد ایده‌آل مثلی به تحریک افقی.

نمودارهای (۱) تا (۴)، نتایج تحلیل سد ایده‌آل مثلی است. نمودار (۱) و (۲)، پاسخ افقی تاج سد را به تحریک افقی و قائم نشان می‌دهد. در این نمودارها، پاسخ تحلیل هارمونیک سد که توسط نرم‌افزار ANSYS انجام شده و در آن، المان FLUID129 به عنوان شرط مرزی

دقت بسیار مناسب بهره جست. همچنین اغتشاش کمتر موجود در پاسخ های به دست آمده از نرم افزار در مقایسه با شرط سامرفیلد، می تواند به عنوان یکی از مزایای کار با ANSYS به شمار رود.

- در صورت تراکم پذیر پنداشتن آب درون مخزن، مدلسازی وجه بالادست آن اهمیت بسیاری دارد. در این حالت آشکار است حتی با افزایش چشمگیر طول مخزن نیز نمی توان به پاسخ های مناسبی دست یافت و باید لزوماً وجه بالادست را به صورت مناسبی مدل سازی کرد تا از برخورد امواج و برگشت دوباره آنها به مخزن جلوگیری کرد. بنابراین، استفاده از المان FLUID129 و ویژگی مفید آن در جذب متناسب امواج برخوردی، امری لازم و ضروری است و حذف آن همان گونه که در نمودار (۵) نمایان است، سبب ایجاد اغتشاش در پاسخ ها می شود.

- تابع پاسخ فرکانسی دو مدل ریز و درشت، تفاوت زیادی با هم نداشته و تنها در فرکانس های بالا قابل تفکیک هستند بنابراین ریز کردن ابعاد المان ها، تأثیر چندانی در توابع انتقال شتاب تاج سد ندارد. باید دانست، در صورت بررسی تنش در بدنه سد، این اثر بیشتر شده و باید از مدل های ریزتری بهره جست.

- هنگامی که آب تراکم ناپذیر فرض شود، شرط مرزی جاذب موج انتهای مخزن، هیچ نقشی در تحلیل ایفا نمی کند. به بیان دیگر، بود یا نبود المان جاذب موجی نظیر FLUID129، تغییری در پاسخ ها به وجود نمی آورد.

تقدیر و تشکر

در انتها مراتب سپاس و ارادتمندی خود را به آقای دکتر احمد آفتابی ثانی، استادیار دانشگاه آزاد مشهد که در تمامی مراحل تهیه این مقاله، با راهنمایی های ارزنده خود ما را یاری کردند، تقدیر می کنیم.

نمودارهای (۵) تا (۷)، مربوط به پاسخ افقی تاج سد PineFlat به تحریک افقی است. در نمودار (۵)، تأثیر المان FLUID129 با مقایسه پاسخ ها، در حالتی که این المان به کارگیری شود و یا مورد استفاده قرار نگیرد، بررسی شده است. نمودار (۶)، بیانگر تغییرات ایجاد شده در پاسخ سیستم در اثر اندازه های مختلف مش بندی است. در این نمودار، پاسخ های مش بندی ریز و درشت ارائه شده است. یادآوری می شود که مش بندی ریز سیستم سد و مخزن در شکل (۳) نشان داده شده است. از آوردن شکل مش بندی درشت به دلیل اختصار، صرف نظر شده است.

فرض تراکم ناپذیری آب نیز به عنوان یک حالت دیگر، مورد مطالعه قرار گرفته است. تراکم ناپذیری آب با اختصاص دادن عدد بزرگی به c (مانند 10^{10}) به دست آمده است. نمودار (۷)، نشان دهنده پاسخ های کاربرد و یا به کار نگرفتن المان FLUID129 به عنوان شرط مرزی جاذب موج در آب تراکم ناپذیر است.

نتیجه گیری

پس از مدل سازی سیستم های سد و مخزن، تحلیل دینامیکی روی این سیستم ها به وسیله تحریک واحد پی سدها انجام گرفت. در تحلیل های جداگانه، شرایط گوناگونی برای سیستم های اندرکنشی سد و مخزن فرض گردید و مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به مجموع تحلیل های عددی انجام گرفته به کمک نرم افزار ANSYS و مقایسه پاسخ ها با یکدیگر و همچنین با نتایج موجود در مراجع، می توان نتایج زیر را به دست آورد:

- همگرایی نزدیکی بین پاسخ های تحلیل حاصل از به کارگیری شرط سامرفیلد با پاسخ های حاصل از تحلیل با نرم افزار ANSYS وجود دارد. این موضوع نشان دهنده آن است که می توان از المان موجود در ANSYS برای تحلیل دینامیکی سیستم های اندرکنشی سد و مخزن با

مراجع

- 1 - Maeso, O., Aznarez, J. J. and Dominguez, J. (2004). "Tree-dimensional models of reservoir sediment and effect of the seismic response of arch dams." *Earthquake Eng. and Struc. Dyn.*, Vol. 33, PP. 1103-1123.
- 2 - Lotfi, V. (2003). "Seismic analysis of concrete gravity dams by decoupled modal approach in time domain." *Struc. Eng. and Mech.*, Vol. 15, PP. 102-116.
- 3 - Camara, R. J. (2000). "A method for coupled arch dam-foundation-reservoir seismic behaviour analysis." *Earthquake Eng. and Struc. Dyn.*, Vol. 29, PP. 441-460.

- 4 - Tan, H., Chopra, A.K. (1995) "Earthquake analysis of arch dams including dam-water-foundation rock interaction." *Earthquake Eng. Struc. Dyn.*, Vol. 24, PP. 1453-1474.
- 5 - Kucukarslan, S, Coskun, S.B. and Taskin B.(2005). "Transient analysis of dam- reservoir interaction including the reservoir bottom effects." *Fluid and Structures*, Vol. 20, PP. 1073-1084.
- 6 - Zhang, C., Jin, F. and Pekau, O. A. (1995). "Time domain procedure of FE-BE-IBE coupling for seismic interaction of arch dams and canyons." *Rock Earthquake Eng. and Struc. Dyn.*, Vol. 24, PP. 1651-1666.
- 7 - Jablonski, A. M. and Humar, J. L. (1995). "Tree dimensional boundary element reservoir model for seismic analysis of the arch and gravity dams." *Earthquake Eng. and Struc. Dyn.*, Vol. 19, PP. 359-376.
- 8 - Arjmandi, A. A. and Lotfi, V. (2007). "An investigation on the accuracy of the Sommerfeld boundary condition in dynamic analysis of concrete gravity dams." *Amirkabir Jour. of Sci. and Tech.*, in Persian.
- 9 - Lotfi, V. (2001). "Frequency domain analysis of concrete gravity dams including hydrodynamic effects." *Dam Eng.*, Vol. 12, PP. 33-53.
- 10 - Hall, J. F and Chopra, A. K. (1983). "Dynamic analysis of arch dams including hydrodynamic effects." *Eng. Mech. ASCE*, Vol. 109, PP. 1479-167.
- 11 - Chopra, A.K. (1967). "Hydrodynamic pressure on dams during earthquake." *J of Eng. Mech. Division*, Vol. 93, No. EM6.
- 12 - ANSYS manual, Ver. (9.0)
- 13 - Chopra, A. K. and Chakrabarti, P. (1981). "Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction." *Earthquake Eng. and Struc. Dyn.*, Vol. 9, PP. 363-383.