

# تحلیل دینامیکی اندر کنش سد وزنی و مخزن نیمه بینهایت در حوزه فرکانس به کمک نرم افزار ANSYS

محمد مهدی حیدری<sup>1</sup>، علی سبحانی<sup>2</sup>

۱. دانشجوی دکترای سازه های آبی دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات اهواز

۲. کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب

mehdiheydari1@yahoo.com

## خلاصه

مدل کردن مخزن سدها به روش اجزای محدود با مشکلاتی روبروست. مهمترین مشکل، عدم توانایی در مدل کردن کل مخزن در اجزای محدود می باشد که ناگزیر باید مدل را در فاصله مناسبی از بدنه سد قطع نمود و با اعمال یک شرط مرزی جاذب موج مناسب در این ناحیه، از بازگشت مجدد امواج به سد جلوگیری کرد. در این تحقیق چگونگی مدل کردن مخزن سد توسط نرم افزار ANSYS بیان شده است و المانی که شرط مرزی جاذب موج انتهای مخزن را فراهم می کند و همانند شرط سامرفیلد عمل می نماید معرفی و نحوه استفاده از آن تشریح گردیده است. همچنین، دیگر گزینه جذب موج موجود در نرم افزار که به سریع تر انجام شدن تحلیل کمک می کند نیز، معرفی و نتایج حاصل از بکارگیری آن در تحلیل هارمونیک سد و مخزن، ارائه گردیده است.

کلید واژه ها: اجزای محدود، مدل کردن مخزن سد، اندرکنش سد و مخزن

## مقدمه

پس از آسیب دیدگی چند سد بزرگ بر اثر زلزله در سالهای آغازین دهه هفتاد میلادی، توجه بسیاری از پژوهشگران به مساله تحلیل لرزه ای سدهای بتنی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سد، مخزن و سنگ پی معطوف گشت که این امر تاکنون، سبب پیشرفتهای شگرفی در زمینه مورد بحث و ارائه راهکارهای فراوانی، در جهت مدلسازی هر چه دقیقتر رفتار این مجموعه پیچیده گردیده است. در این میان، تحلیل اندر کنش دینامیکی سد و مخزن نامحدود، بدلیل اهمیت بیشتر، حجم قابل توجهی از تحقیقات انجام گرفته را به خود اختصاص داده است. [۴،۳،۲،۱] برای انجام تحلیل در این دوحوزه، روشهای عددی گوناگونی مانند اجزای محدود و اجزای مرزی مورد استفاده قرار گرفته است [۶،۵،۱]. در اغلب موارد، مخزن پشت سد دارای طول بسیار زیادی بوده، بطور معمول، محیطی نیمه بینهایت پنداشته می شود و راهکارهای خاصی، برای تحلیل می طلبد. شایان توجه است یکی از روشهای مناسب تحلیل اینگونه محیطها، بکارگیری المانهای نیمه بینهایت یا Hyper Element می باشد. این المانها، که برای مسائل سه بعدی و دوبعدی، بترتیب ماهیتی دوبعدی و یک بعدی دارند، رفتار مصالح رادرجهت شبکه بندی شده بصورت تقریبی و درجهت عمود بر آن (که المان دارای طول بینهایت است)، به شکلی دقیق و غیر عددی، مدلسازی می کنند. اما از آنجا که المانهای نیمه بینهایت سیال، ماهیتی وابسته به فرکانس دارند، بکارگیری آنها در تحلیلهای حوزه زمان امری غیرممکن است. در نرم افزار ANSYS المانی که بتواند شرایط HE را برای سیستم سدومخزن ایجاد کند وجود ندارد. المانهای جذب موج این نرم افزار، عملکردی همانند شرط سامرفیلد دارند که در بخش ۲ شرط سامرفیلد تشریح و در بخش ۳ المانهای جاذب موج نرم افزار ANSYS معرفی گردیده است.

## رابطه سازی مساله سد و مخزن

بر اساس تئوری اجزای محدود، معادله ماتریسی حاکم بر پاسخ دینامیکی سازه به تحریک تکیه گاهی در حوزه زمان را می توان به صورت زیر نشان داد

$$[M] \{\ddot{r}\} + [C] \{\dot{r}\} + [K] \{r\} = -[M][J] \{a_g\} \quad (1)$$

که در آن  $[M]$  = ماتریس مشخصه جرم،  $[C]$  = ماتریس مشخصه میرایی،  $[K]$  = ماتریس مشخصه سختی سازه،  $\{F\}$  = بردار تغییر مکانهای گرهی نسبی و  $[J]$  = ماتریس یکه که وظیفه انتقال بردار شتاب تکیه گاهی  $\{a_g\}$  به درجه های آزادی سازه را برعهده دارد. باید دانست، در صورتی که سیالی مانند آب درون مخزن پشت سد تحت تحریک تکیه گاهی قرار گیرد، معادله ای مشابه رابطه فوق بر رفتار آن حاکم خواهد بود:

$$[G]\{\ddot{p}\} + [L]\{\dot{p}\} + [H]\{p\} = -[B][J]\{a_g\} \quad (2)$$

که در آن  $[G]$  = ماتریس مشخصه شبه جرم،  $[L]$  = ماتریس مشخصه شبه میرایی،  $[H]$  = ماتریس مشخصه شبه سختی سازه،  $\{p\}$  = بردار فشارهای هیدرودینامیک و  $[B]$  = ماتریس نگاشت که سبب تبدیل شتاب تکیه گاهی  $\{a_g\}$  به شارّ فشار شده و در کنار ماتریس  $[J]$  که تعریفی همانند قبل را داراست، طرف راست معادله ماتریس حاکم بر سیال را تشکیل می دهد. هنگامی که سازه و سیال در مجاورت هم قرار بگیرند و تحت تاثیر یک شتاب پایه واحد باشند، مساله اندرکنش سازه و سیال اهمیت یافته و سبب تغییر پاسخ هریک از دوی بخش مزبور می گردد. در این حالت، ماتریس نگاشت  $[B]$  افزون بر نقش تبدیل شتابهای تکیه گاهی به شارّ فشار، وظایف مهم دیگری نیز بر عهده دارد که همانا تبدیل شتابهای سازه به شارّ فشار و همچنین، تبدیل فشارهای دینامیک به نیروهای وارده به سازه است. در واقع ماتریس مزبور، عامل ایجاد اندرکنش در سازه و سیال می باشد. 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:

$$\begin{bmatrix} [M] & 0 \\ [B] & [G] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{r} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & 0 \\ 0 & [L] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r \\ p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] - [B]^T \\ 0 & [G] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -[M][J]\{a_g\} \\ -[B][J]\{a_g\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

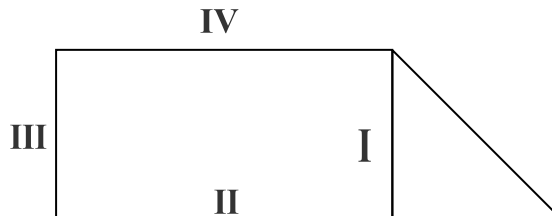
در ادامه، رابطه فوق به حوزه فرکانس انتقال یافته و برای یافتن پاسخ دینامیکی سد، با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سازه و سیال بکار می رود. ناگفته نماند، از آنجایی که در سدهای بتنی بطور معمول از مفهوم میرایی هیستریک بهره می جویند، ماتریس میرایی  $[C]$  به صورت  $[C] = (2\beta/\omega)[K]$  تعریف شده و رابطه فوق پس از اندکی ساده سازی بقرار زیر در می آید:

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

لازم به ذکر است، رابطه فوق برای تحلیل مجموعه سد و مخزن محدود کامل می باشد. اما در صورت نیاز به تحلیل مخزن نیمه بینهایت که طول آن در راستای جریان، بسیار بیشتر از سایر ابعاد آن است، باید به گونه ای اثربخیز بودن مخزن که سبب عبور و استهلاک امواج می شود را در رابطه (4) وارد نمود. در این میان یکی از بهترین شیوه ها برای وارد ساختن اثر مزبور، استفاده از اجزای نیمه بینهایت یا ابر جزء است. در حالت مخزن دوبعدی، ابر جزء یک شبکه یک بعدی از المانهای محدود بوده که عمود بر جهت جریان قرار گرفته و در واقع، طولی بینهایت در راستای جریان دارد. از دیدگاه ریاضی، ابر جزء با استفاده از ماتریس مشخصه خود، رابطه میان فشار و شارّ آن در مرز بالادست مخزن که تابینهایت ادامه دارد را مشخص می سازد و بدین ترتیب امکان عبور امواج از مرز مزبور را فراهم می سازد. راهکار دیگری که در انتهای مخزن می توان از آن برای جذب موج بهره جست شرط مرزی سامرفیلد می باشد. شرط مرزی سامرفیلد (رابطه 5)، یک شرط مرزی تقریبی است. تقریبی بودن این شرط مرزی به این دلیل است که این رابطه فقط توانایی جذب امواجی یک بعدی را دارد که با آن زاویه قائمه داشته باشد.

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

در رابطه فوق،  $p$  فشار،  $t$  زمان و  $n$  بردار نرمال عمود بر سطح می باشد. شرطهای مرزی چهارگانه مخزن هنگامی که سد، انعطاف پذیر در نظر گرفته شود، بقرار زیر است:



شکل ۱ - شرایط مرزی مخزن

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho a_g^n$$

شرط مرزی I

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

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

$$p = 0 \quad \text{شرط مرزی IV}$$

نرم افزار ANSYS برای انجام تحلیل دینامیکی هنگامی که اندرکنش بین سدومخزن وجود داشته باشد از رابطه (۲-۴) برای حل معادلات استفاده می کند. شایان ذکر است برای مدل کردن شرط مرزی انتهای مخزن در نرم افزار ANSYS، از المان خاصی استفاده شده است که در قسمت سوم شرح کامل آن ارائه می شود. این المان شرایطی همچون شرط سامرفیلد در انتهای مخزن برای جذب موج ایجاد می کند.

### مدلسازی سیستم سد و مخزن

برای مدل کردن سیستم سدومخزن، باید از المانهای سازه ای وسیال بهره جست. از آنجا که تحلیل سدوزنی بصورت دوبعدی صورت می گیرد، لذا در نرم افزار نیز از المانهای دوبعدی بهره گرفته است. بدین منظور، برای سداز المان PLANE82 که ۸ گرهی است و برای مخزن از المان FLUID29 که ۴ گرهی است، استفاده شده است. هنگامی که سدومخزن به یکدیگر متصل می شوند، گره میانی PLANE82 به علت اینکه با گرهی از المان FLUID29 جفت نمی شود باز می ماند. برای جلوگیری از خطایی که به این خاطر بوجود می آید، درجات آزادی این گره ها به درجات آزادی گره های بالا و پایین کوپل شده اند. مدل کامل سد و مخزن در شکل (۲) قابل مشاهده است. میرایی در نظر گرفته شده برای تحلیل از نوع هیستریک و به مقدار ۰/۰۵۰ می باشد. در این نوع تحلیل از اندرکنش سد با پی انعطاف پذیر صرف نظر شده و پی، صلب در نظر گرفته شده است. تحریک بصورت شتاب واحد یعنی  $1 \frac{m}{s^2}$  به گره های پایه در جهات افقی وقائم اعمال شده است. تحریک در محدوده فرکانس ۰ تا ۲۰ هرتز و با گام فرکانسی افزایشی ۰/۰۴ صورت گرفته است. بتن سد با مشخصات زیر برای نرم افزار تعریف شده است:

$$\rho = 2480 \frac{kg}{m^3} \quad \text{چگالی بتن} \quad E = 27.50 \times 10^9 \text{ pa} \quad \text{مدول الاستیسیته}$$

$$v = 0.20 \quad \text{ضریب پواسون}$$

برای مخزن نیز آب با مشخصات زیر تعریف شده است:

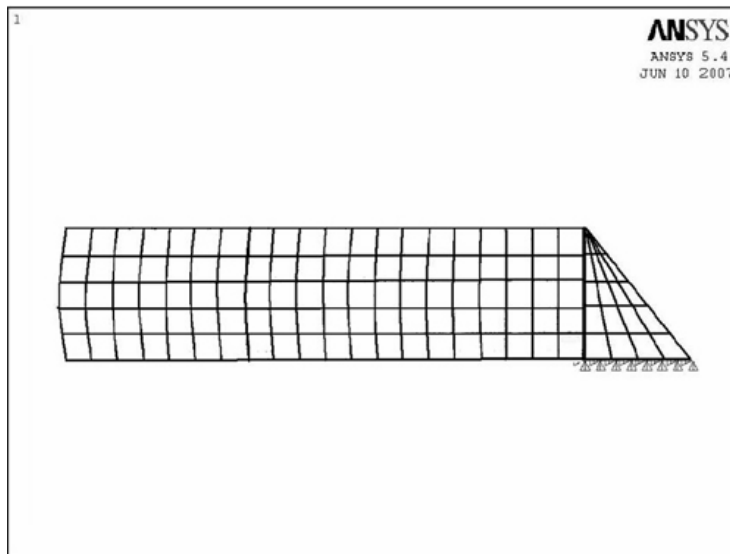
$$c = 1440 \frac{m}{s} \quad \text{سرعت صوت در آب} \quad \rho = 1000 \frac{kg}{m^3} \quad \text{چگالی بتن}$$

$$MU = 0-1 \quad \text{حد ورودی}$$

ارتفاع مخزن سد ۲۰۰ متر و طول آن بصورت  $L/H = 4$  یعنی ۸۰۰ متر در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن شرط مرزی جاذب موج انتهای مخزن که موضوع اصلی این تحقیق است از المان FLUID129 استفاده شده است. این المان بصورت خطی و دو گرهی است. جهت استفاده از این المان باید شروط زیر را رعایت کرد:

۱. از این المان فقط برای شرط مرزی ناحیه ای می توان استفاده کرد که با FLUID29 مدل شده باشد. ۲. انتهای مخزن باید بصورت کمانی از دایره باشد. ۳. مرکز کمانی که المان بر روی آن قرار می گیرد باید در نزدیکی مرکز سازه مجاور المان FLUID29 باشد. ۴. حداقل فاصله کمان از مرکز

سازه باید بصورت  $R > L/2 + 0.2 \frac{c}{f}$  باشد، که L طول سازه، c سرعت انتشار موج در آب و f فرکانس تحریک می باشد.

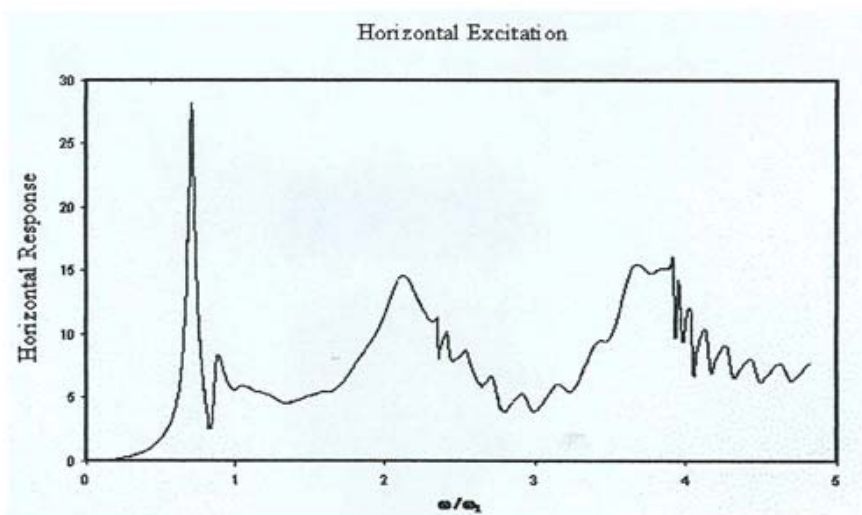


شکل ۲: مدل سیستم سد و مخزن در ANSYS هنگام تحریک افقی

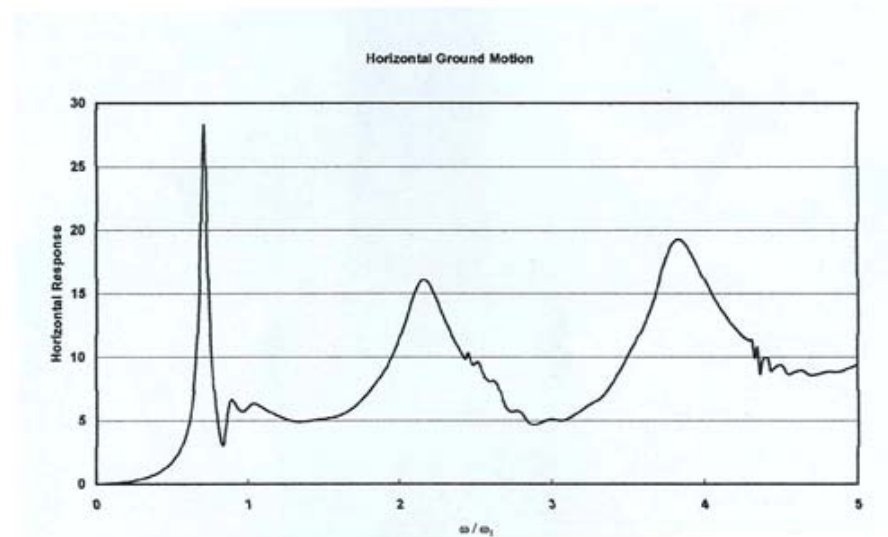
استفاده از المان FLUID129 مستلزم رعایت تمامی موارد فوق می باشد. در مواردی که سد بصورت چند تکه ای مدل می شود، برای اعمال اندرکنش صحیح، باید مخزن نیز همانندسد، جندتکه ای مدل شودو لذا باید کمان انتهایی مخزن نیز به همان تعداد، تقسیم و مدل شود. در این حالت کمان انتهایی مخزن باید بصورت تکه هایی هم مرکزوهم شعاع باشد. این موضوع دقت بالای کاربر را می طلبدکه با حوصله این کمانها را ایجادکند، در صورتی که این دقت لحاظ نشود نرم افزار قادر به انجام تحلیل نخواهد بود. در اینگونه مدلهاو هنگامی که زمان برای انجام تحلیل کم است، برای شبیه سازی شرط مرزی انتهایی مخزن، میتوان غیراز المان FLUID129 از روش دیگری نیز بهره جست. در این روش، از بارگذاری سیالاتی Impedance جهت جذب موج استفاده می شود. بکارگیری این شرط جذب موج، دیگر مستلزم اینکه انتهایی مخزن بصورت کمانی از دایره باشد (علیرغم شرط لازم برای استفاده از FLUID129) نیست و می توان مخزن را بصورت مستطیل مدل کرد. جهت استفاده از این شرط، باید در قسمت خواص مصالحی که برای آب در نظر گرفته می شود به MU مقدار یک داده شود. همچنین به خط انتهایی مخزن نیز باید بار سیالاتی Impedance با مقدار یک اعمال شود .

### نتایج عددی

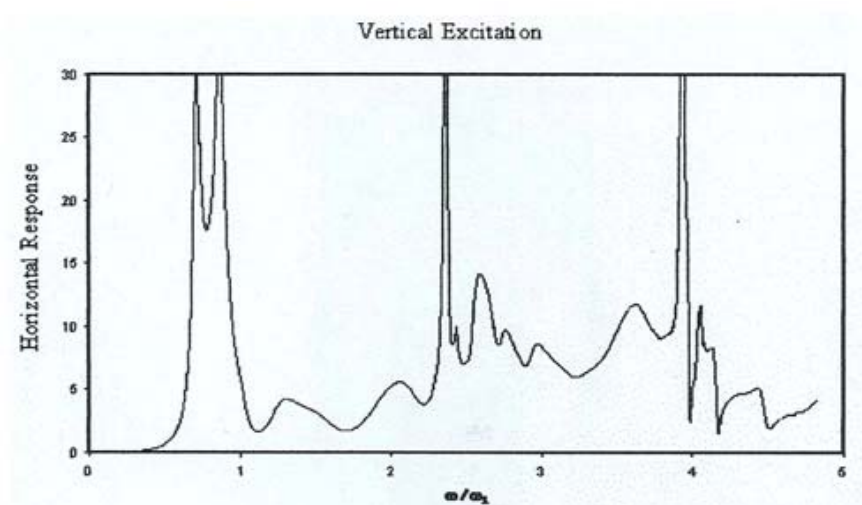
پس از آنکه سد ایده آل مثلثی و مخزن آن با مشخصات ذکر شده در بخش ۳ مدل شد، مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفت. در این تحلیل، اندرکنش بین سدو مخزن لحاظ و همانگونه که در قبل گفته شد پی سیستم صلب و از اندرکنش سد با پی صرفنظرشد. برای نشان دادن نتایج این تحلیل در حوزه فرکانس، از نمودارهای تابع انتقال استفاده شده است. در این نمودارها، محور افقی، فرکانس تحریک را نشان می دهد؛ این محورها تقسیم فرکانسها بر فرکانس مود طبیعی اول که از تحلیل مودال سد بدون مخزن بدست آمده،بی بعد شده است . محور قائم نیز بیانگر پاسخ تاج سد به تحریکهای مختلف می باشد که البته این پاسخ از جنس شتاب است. قابل ذکر است که پاسخ ها بصورت مقادیر مطلق هستند . شکلهای ۳ و ۴ بعنوان گرافهای مرجع انتخاب شده اند و مقایسه پاسخ ها نسبت به آنها انجام گرفته است. پاسخهای این نمودارها از تحلیل دینامیکی ای که بوسیله برنامه نویسی کامپیوتری و بکارگیری شرط سامرفیلد بعنوان شرط مرزی جاذب موج انتهایی مخزن، انجام گرفته ، بدست آمده اند. در شکلهای ۵ و ۶ ، پاسخ افقی تاج سد ایده آل مثلثی بترتیب به تحریکهای افقی و قائم در حالتی که تحلیل هارمونیک سد توسط نرم افزار ANSYS انجام شده و در آن، المان FLUID129 بعنوان شرط مرزی جاذب موج انتهایی مخزن استفاده گردیده، آورده شده است. با مقایسه شکلهای ۵ و ۶ با شکلهای ۳ و ۴ می توان دریافت که نتایج حاصل از تحلیل به کمک نرم افزار ANSYS و با بهره جویی از المان پیشنهادی، تطابق بسیار خوبی با نتایج بدست آمده از شرط سامرفیلد داشته وحتی از بعد عدم وجود اغتشاش چندان در پاسخها، المان مزبور بهتر از شرط سامرفیلد عمل می نماید. در شکلهای ۷ تا ۱۰ ، به مقایسه پاسخهای حاصل از نرم افزار ANSYS پرداخته می شود. در این نمودارها، نتایج حاصل از بکارگیری المان FLUID129 برای هر دو گونه تحریک افقی وعمودی با نتایج بدست آمده ازفعال کردن گزینه Impedance به عنوان شرط مرزی جاذب موج انتهایی مخزن قابل مشاهده اند. مقایسه این پاسخها می تواند در ارائه روشهایی برای بهینه سازی استفاده از نرم افزار در تحلیل دینامیکی سد و مخزن کمک کند .



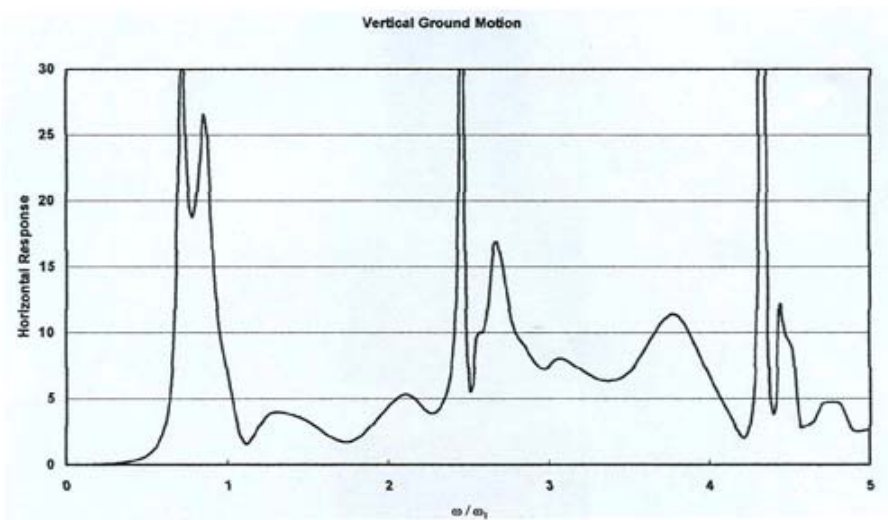
شکل ۳: پاسخ افقی تاج سد به تحریک افقی با بکارگیری شرط سامرفیلد [ 8 ]



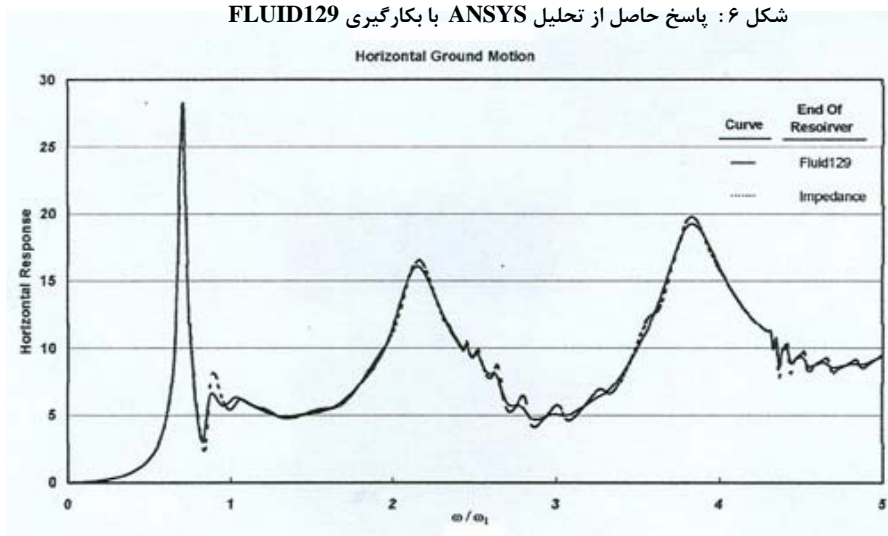
شکل ۴: پاسخ حاصل از تحلیل ANSYS با بکارگیری FLUID129



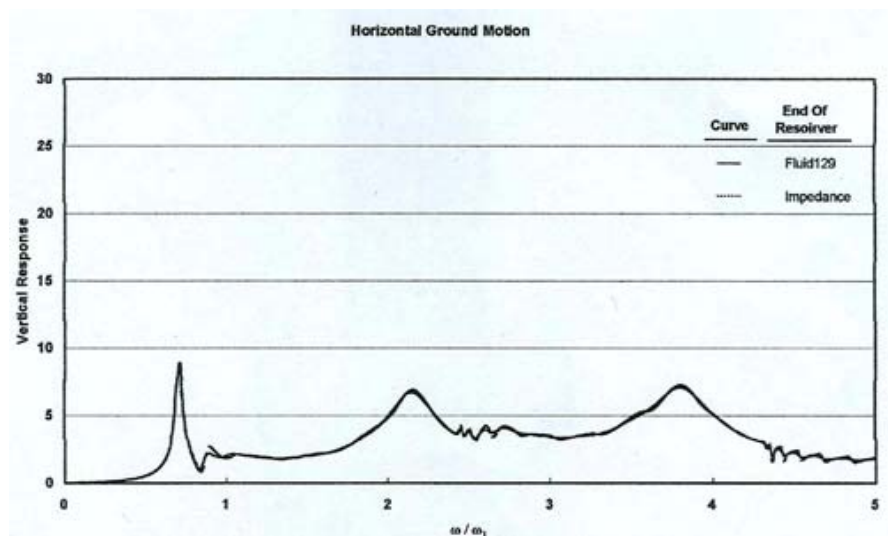
شکل ۵: پاسخ افقی تاج سد به تحریک قائم با بکارگیری شرط سامرفیلد [ 8 ]



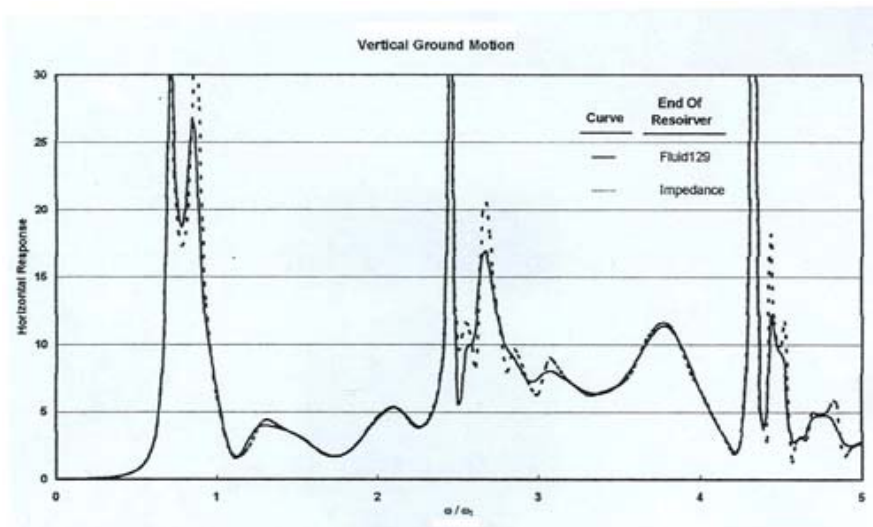
شکل ۶: پاسخ حاصل از تحلیل ANSYS با بکارگیری FLUID129



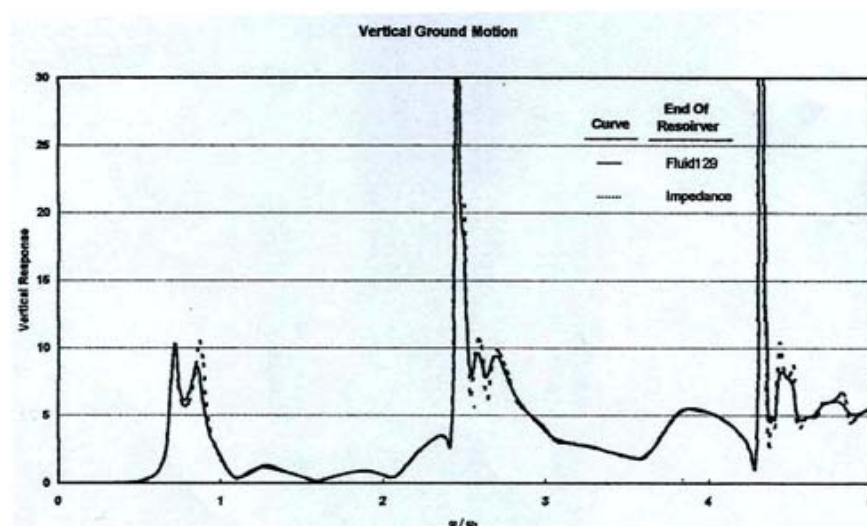
شکل ۷: پاسخ افقی تاج سد به تحریک افقی



شکل ۸: پاسخ قائم تاج سد به تحریک افقی



شکل ۹: پاسخ افقی تاج سد به تحریک قائم



شکل ۱۰: پاسخ قائم تاج سد به تحریک قائم

### نتیجه گیری

۱ - همگرایی نزدیکی بین پاسخهای تحلیل حاصل از بکارگیری شرط سامرفیلد با پاسخهای حاصل از تحلیل با نرم افزار ANSYS وجود دارد. این موضوع نشاندهنده آن است که می توان از المان پیشنهادی موجود در نرم افزار ANSYS برای تحلیل دینامیکی سیستمهای اندرکنشی سدومخزن با دقت بسیار مناسب بهره جست. همچنین اغتشاش کمتر موجود در پاسخهای بدست آمده از نرم افزار در مقایسه با شرط سامرفیلد، می توان به عنوان یکی از مزایای کار با ANSYS به شمار رود.

۲ - مقایسه پاسخ های حاصل از بکارگیری المان FLUID129 و بارگذاری Impedance بعنوان شرط مرزی جاذب موج انتهای مخزن در نرم افزار ANSYS، مشخص می سازد که خطای کمی بین پاسخهای روش Impedance با روش بکارگیری FLUID129 وجود دارد و با آنکه جوابها دارای اغتشاش بیشتری نسبت به روش اصلی هستند ولی بارگذاری Impedance نیز می تواند گزینه خوبی برای جذب امواج در انتهای مخزن باشد.

### مراجع

[1] Maeso, O, Aznarez J. J. and Dominguez, J. " Three-Dimensional Models of Reservoir Sediment and Effects on the Seismic Response of Arch Dams", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 33 , pp. 1103 – 1123 , 2004

[2]Lotfi.V, “ Seismic Analysis of Concrete Gravity Dams by Decoupled Modal Approach in Time domain” , Electronic Journal of Structural Engineering,vol.15,pp.102–116, 2003 .

[3] Camara. R.J, “ A Method for Coupled Arch Dam-Foundation-Reservoir Seismic Behavior Analysis ”, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics , vol. 29 , pp. 441 – 460 , 2000 .

[4] Kucukarslan. S, Coskun. S.B and Taskin. B, “ Transient Analysis of Dam - Reservoir Interaction Including the Reservoir Bottom Effects ”, Journal of Fluids and Structures , Nov 2005 .

[5] Zhang. C, Jin. F and Pekau. O.A,“ Time Domain Procedure of FE-BE-IBE Coupling for Seismic Interaction of Arch Dam and Canyons ”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics , Jul 1996 .

[6] فتحی ، آر ش . " محاسبه اندرکنش بین سد ، مخزن و فونداسیون به کمک روش اجزای محدود و روش اجزای مرزی " . سال ۱۳۸۱ .