

## تحلیل دینامیکی سد کارون ۳ با در نظر گرفتن اثر اندرکنش آب و سازه و مقایسه آن با یک سد قوسی دیگر

احمد آفتابی ثانی\*<sup>(۱)</sup>

(۱) استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه عمران، مشهد، ایران

**چکیده** در نظر گرفتن اثر اندرکنش آب و سازه، پاسخ لرزه‌ای سدهای قوسی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما از سوی دیگر، مدل‌سازی سدهای قوسی به همراه اثر مزبور، به ویژه در حالت معمول که مخزن سد دارای طول بسیار زیاد بوده و محیطی نیمه‌بی‌نهایت پنداشته می‌شود، کاری دشوار و پیچیده است. در این مقاله، روش مؤثر تحلیل دینامیکی سد - مخزن نیمه نامحدود در حوزه فرکانس، به گونه‌ای گذرا و با درج مختصر روابط ریاضی، مرور شده و در ادامه به شکلی عملی و کاربردی در یک مسأله واقعی به کار گرفته می‌شود. در بخش نتایج عددی، پاسخ‌های دینامیکی سد کارون ۳ که با در نظر گرفتن اثر اندرکنش آب تراکم‌پذیر و سازه به دست آمده‌اند، برای حالات مختلف درج می‌گردد. هم‌چنین این نتایج با پاسخ‌های مربوط به سد قوسی دیگری (سد معروف ماروپوینت) مقایسه شده و نتایج جالبی به دست می‌آید. یکی از مهم‌ترین این نتایج، شباهت بسیار زیاد توابع پاسخ فرکانسی یا همان FRF های این دو سد متفاوت، البته پس از نرمالایز شدن نسبت به فرکانس طبیعی نخست هر یک از آنهاست.

**واژه‌های کلیدی** تحلیل دینامیکی، سد قوسی، اندرکنش آب و سازه، سد کارون ۳.

\*عهده دار مکاتبات

نشانی: مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، دانشکده مهندسی، گروه عمران

پست الکترونیکی: aftabi@mshdiau.ac.ir

تلفن: ۰۵۱۱-۶۶۲۴۸۱۳

### ۱- پیش گفتار

پس از آسیب دیدگی چند سد بزرگ بر اثر زلزله، در سال‌های آغازین دهه هفتاد میلادی، توجه بسیاری از پژوهش‌گران به مسأله تحلیل لرزه‌ای سدهای بتنی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی آب و سازه معطوف گشت. این امر تاکنون سبب بروز پیشرفت‌های شگرفی در زمینه مورد بحث و ارائه راهکارهای متنوع و گوناگونی در جهت مدل‌سازی هر چه دقیق‌تر رفتار دینامیکی این مجموعه پیچیده گردیده است.

در آغاز، روش‌های تحلیل اندرکنش سد - مخزن، کاملاً تحلیلی و غیر عددی بوده و تنها به بررسی رفتار لرزه‌ای سدهای دوبعدی وزنی می‌پرداختند [۱]. در واقع، بیشتر مدل‌های ارائه شده در آن زمان، جزء گونه‌های اصلاح شده و بهبود یافته روش سنتی وسترگارد (جرم‌های افزوده) به شمار می‌رفتند [۲]. باید دانست در تمامی این روش‌ها، آب درون مخزن سد، تراکم‌ناپذیر فرض می‌شد که این فرض، خود سبب بروز خطاهایی در برآورد پاسخ لرزه‌ای، به ویژه در مورد سدهای با ارتفاع زیاد می‌گردد [۳]. نکته جالب این‌جاست که در نظر گرفتن تراکم‌پذیری سیال و به سخن دیگر، تحلیل دقیق مسأله اندرکنش سد - مخزن، به دلیل پیچیدگی‌های موجود در روند رابطه‌سازی ریاضی و استفاده عملی، هنوز هم در بسیاری از موارد، مد نظر قرار نگرفته و تحلیل‌های عملی و کاربردی با چشم‌پوشی از اثر تراکم‌پذیری آب به انجام می‌رسند.

نخستین مدل‌های مربوط به مخازن نیمه‌بی‌نهایت با آب تراکم‌پذیر، در سال‌های آغازین دهه هشتاد میلادی پیشنهاد [۴] و در سال ۱۹۸۳ تکمیل شد [۵]. این مدل‌ها که از روش اجزای محدود برای مدل‌سازی مخزن در ناحیه مجاور سد بهره می‌جستند، کار مدل‌سازی ناحیه دور یا همان بالادست مخزن را با به کارگیری اجزای نیمه‌بی‌نهایت سیال به انجام می‌رساندند. باید افزود، روند معرفی راهکارهای مناسب برای مدل‌سازی مرز بالادست مخزن هنوز هم ادامه

داشته و تاکنون از روش‌های گوناگونی مانند شیوه تفاوت‌های محدود، فن اجزای مرزی و ...، برای تحلیل آن استفاده شده است [۶ و ۷ و ۸].

پس از معرفی و تکمیل مدل‌ها و شیوه‌های مناسب برای تحلیل اندرکنش سد-مخزن، پژوهش‌گران در سدد رفع نارسایی مهم موجود در آن‌ها که همانا دشواری‌های محاسباتی و زمان چشم‌گیر لازم برای تحلیل بود، برآمدند [۹]. خاطر نشان می‌سازد، تحلیل دینامیکی سیستم سد-مخزن، به دلیل بزرگ بودن هر دو بخش مسأله، تعداد زیاد درجات آزادی، نامتقارن بودن هر دو ماتریس جرم و سختی مجموعه، نیمه‌بی‌نهایت بودن مخزن و وجود مرز انتقالی در بالادست آن، مختلط شدن پاسخ‌ها به دلیل وجود میرایی تشعشعی در آب و ... فرایندی دشوار و زمانبر است. در ادامه و به عنوان نمونه، یکی از تکنیک‌های مرسوم برای غلبه بر پاره‌ای از مشکلات فوق که خود منجر به ارائه شیوه‌های نوینی شده است، به اختصار، مرور می‌گردد.

همانند هر مسأله تحلیل دینامیکی دیگر، تحلیل مودال مجموعه با استفاده از شکل مودهای ترکیبی سیستم سازه - سیال، یکی از راه‌های کوچک ساختن ابعاد معادلات حاکم بر مسأله و سرعت بخشیدن به روند تحلیل می‌باشد. از سوی دیگر، نامتقارن بودن ماتریس‌های جرم و سختی سیستم و در نتیجه، نامتقارن شدن مسأله مقدار ویژه متناظر با آن‌ها، سبب بروز مشکلاتی در مسیر محاسبه شکل مودهای ترکیبی و دقیق مجموعه می‌گردد.

عدم امکان استفاده از حلگرهای معمول مسائل مقدار ویژه بزرگ متقارن (مانند روش تکراری زیرفضا)، نبود حلگرهای کارا و عملی برای مسائل مقدار ویژه نامتقارن، وجود بردارهای ویژه راست و چپ در مسائل نامتقارن به جای استفاده از تنها یک دسته شکل مود در مسائل متقارن و ... پاره‌ای از مشکلات مورد اشاره می‌باشند. با وجود این، تاکنون راهکارهایی برای تحلیل مودال سیستم‌های اندرکنشی سازه-سیال پیشنهاد شده

منشوری در راستای طول) تقسیم شده و هر بخش به یاری راهکار مناسب خود تحلیل می‌شوند.

شایان توجه است، یکی از روش‌های مناسب برای تحلیل این گونه محیط‌های نیمه‌نامحدود، استفاده از المان‌های نیمه‌بی‌نهایت می‌باشد. این المان‌ها، که برای مسائل سه‌بعدی و دوبعدی، به ترتیب، ماهیتی دوبعدی و یک‌بعدی دارند، رفتار محیط را در جهت شبکه‌بندی شده به صورت تقریبی و در جهت عمود بر آن (که المان دارای طول بی‌نهایت است)، به شکلی دقیق و غیر عددی مدل‌سازی می‌کنند. به عنوان نمونه، در صورت انتخاب روش اجزای محدود برای حل عددی مسئله انتشار امواج در مخزن سد، تابع فشار هیدرو دینامیکی در جهت شبکه‌بندی المان مزبور، به صورت ترکیبی از توابع درونیاب یا همان توابع شکل جزء محدود و در جهت عمود بر آن، پاسخ دقیق مسئله انتشار موج یک بعدی در محیطی نیمه‌بی‌نهایت (تابعی نمایی با آرگومان منفی) می‌باشد [۵]. همان‌گونه که پیش از این بیان شد، تاکنون تکنیک‌های گوناگونی برای تحلیل المان‌های مزبور ارائه شده است که در این جا، از شیوه نوین پیشنهادی در مرجع [۸] بهره خواهیم جست. بدین ترتیب، راهکار مورد استفاده در این مقاله، برای تحلیل مجموعه سد-مخزن نیمه‌بی‌نهایت را می‌توان روش FE-(FE-HE) نام نهاد که بیانگر به کارگیری اجزای محدود (Finite-Elements) برای تحلیل سد و بخش نخست مخزن، و ابرجزء‌های سیال (Hyper-Elements) برای مرز بالادست مخزن است.

در حالت کلی‌تر، این شیوه امکان استفاده از روش قدرتمند اجزای مرزی (Boundary Elements) برای تحلیل دینامیکی فونداسیون سد قوسی را نیز داشته و به روش BE-(FE-HE)-FE تبدیل می‌گردد [۱۱].

با این کار، تمامی اثرات اندرکنشی موجود، شامل اندرکنش آب و سازه، سازه و سنگ پی و هم‌چنین، آب و سنگ پی، به طور دقیق در نظر گرفته شده و تحلیل دینامیکی با حداکثر دقت ممکن و از طرف دیگر با

است که در این میان می‌توان به روش پیشنهادی در مرجع خواندنی [۱۰] اشاره کرد.

بدین ترتیب، در حال حاضر راهکارهای دقیق و در عین حال سریعی برای تحلیل دینامیکی سدهای بتنی قوسی با لحاظ کردن اثر اندرکنش سازه-سیال وجود دارند که شایسته است در کارهای عملی مورد استفاده قرار گیرند. بخشی از اهداف مقاله پیش‌رو، در همین راستا تعریف شده است.

برای این منظور، با به کارگرفتن پاره‌ای از روش‌های تحلیلی که در بخش آتی، به طور گذرا و با درج مختصر روابط ریاضی معرفی می‌شوند، برنامه‌هایی رایانه‌ای تدوین شده و به کمک آن‌ها، پاسخ دینامیکی سد قوسی محاسبه می‌شود. هم‌چنین به عنوان یک نمونه واقعی، مدل اجزای محدود مخزن سد کارون ۳، با تراکم‌پذیر پنداشتن آب درون آن (برای اولین بار)، تهیه شده و مورد تحلیل دینامیکی قرار می‌گیرد. در ادامه، پاسخ‌های به دست آمده، با پاسخ‌های مربوط به یک سد قوسی دیگر که بارها توسط پژوهش‌گران مختلف تحلیل شده و به صورت یک مسئله سنگ نشانه (Benchmark) درآمده است، مقایسه می‌گردد. این مقاله با درج نتایج حاصل از این مقایسه و پاره‌ای نتایج کمی و کیفی دیگر به پایان می‌رسد.

## ۲- معرفی مسئله

همان‌طور که پیش از این بدان اشاره شد، هر یک از دو بخش مدل مسئله (یعنی سد قوسی و مخزن)، به یاری راهکار مناسب خود تحلیل می‌شوند. در این میان، روش اجزای محدود عهده‌دار تحلیل سد قوسی و بخش مجاور سد مخزن می‌باشد.

خاطر نشان می‌سازد، از آن‌جا که مخزن پشت سد، به طور معمول دارای طول بسیار زیادی است، می‌توان طول آن را، نسبت به سایر ابعاد مسئله، بی‌نهایت پنداشت. بدین ترتیب، مخزن به دو ناحیه نزدیک (با شکل هندسی یکنواخت) و دور (با هندسه یکنواخت و

اندرکنش سازه- سیال، تحلیل دینامیکی هر چه دقیق تر سد قوسی و پیش بینی هر چه واقعی تر پاسخ آن به تحریک های تکیه گاهی است. آشکار می باشد، در صورت چشم پوشی از این اثر مهم و قابل توجه، تحلیل دینامیکی سد در روش اجزای محدود با صفر پنداشتن نیروهای وارد به وجه بالادست آن، صورت می پذیرد؛ اما با لحاظ کردن اثر اندرکنش سازه- سیال، دیگر نه تنها نمی توان نیروهای وارد به سازه را صفر پنداشت، بلکه باید اثرات ناشی از انعطاف پذیری سد در تعیین فشارهای هیدرو دینامیک آب درون مخزن را نیز در تحلیل وارد ساخت.

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

$$M\ddot{r} + C\dot{r} + Kr = -MJa_g + F_f \quad (1)$$

در این رابطه،  $M$ ،  $C$  و  $K$ ، به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی سازه و  $r$ ، بردار تغییر مکان های گرهی نسبی (نسبت به تکیه گاه) آندند.  $J$  نیز ماتریسی شبه یکه است که وظیفه انتقال بردار شتاب تکیه گاهی  $a_g$  به درجه های آزادی سازه را بر عهده دارد. هم چنین  $F_f$  نشان دهنده نیروهای وارد از طرف سیال بر سازه می باشد.

به طور مشابه، در صورتی که سیالی مانند آب درون مخزن پشت سد تحت تحریک تکیه گاهی قرار گیرد، معادله ذیل بر رفتار آن حاکم است:

$$G\ddot{p} + L\dot{p} + Hp = -B\ddot{U} \quad (2)$$

در این جا،  $G$ ،  $L$  و  $H$  را می توان به ترتیب ماتریس های شبه جرم، شبه میرایی و شبه سختی سیال نامید که در تعیین فشارهای هیدرو دینامیک  $p$  نقش بسزایی دارند. افزون بر این ها، ماتریس نگاشت  $B$ ، سبب تبدیل بردار شتاب های مطلق گرهی  $\ddot{U}$  به شار فشار شده و طرف راست معادله ماتریسی حاکم بر سیال را تشکیل می دهد. خاطر نشان می سازد، بردار شتاب های مطلق گرهی، دربرگیرنده شتاب های نسبی و تکیه گاهی

سرعتی مناسب و معقول انجام می پذیرد.

بدین ترتیب، دو عامل مهم دقت و سرعت، در تحلیل سیستم پیچیده ای مانند «سد قوسی- مخزن- سنگ پی» به یکدیگر خورده و این، یکی از امتیازات مهم شیوه پیشنهادی است.

## ۲-۱- اندرکنش سازه - سیال

معادله دیفرانسیل حاکم بر آب درون مخزن، با وارد ساختن فرض های عملی و ساده کننده ای مانند لزجت صفر، غیر چرخشی و کوچک بودن دامنه حرکت سیال و ... در معادله برداری ناویر- استوکس، به دست می آید. این معادله، در صورت تراکم پذیر پنداشتن آب و در نظر گرفتن امکان انتشار امواج در آن، همان معادله موج یا هلمولتز است. این معادله، در صورت چشم پوشی از اثر انتشار امواج و تراکم ناپذیر پنداشتن آب که معادل بی نهایت دانستن سرعت موج در آن است، به معادله ساده تر لاپلاس تبدیل می گردد. باید افزود، هر چند این کار به از میان رفتن بسیاری از مشکلات موجود در حل معادله موج (مانند لزوم به کارگیری شرط مرزی بالادست) می انجامد، اما سبب بروز خطاهای چشم گیری در پاسخ های دینامیکی مجموعه می گردد. از این رو در تحقیق پیش رو، آب درون مخزن، تراکم پذیر و اثر باز بودن انتهای مخزن نیز با استفاده از ابرجزه های سیال، به طور دقیق لحاظ شده است که این امر، سبب برتری روش پیشنهادی نسبت به روش های مشابه می گردد.

ناگفته نماند، هر چند به طور معمول در برپایی معادله حاکم بر آب از ساده سازی های بسیاری، مانند آنچه در بالا بدان اشاره شد، استفاده می شود، اما بعضی از پژوهش گران به وارد ساختن این اثرات و حذف فرضیات مزبور پرداخته اند که نتیجه آن، چندان قابل توجه نبودن اثرات مذکور در مسئله سد قوسی - مخزن می باشد [۱۲].

یادآوری می کند، هدف از وارد ساختن اثر

باید به گونه‌ای اثر بیکران بودن مخزن که سبب عبور و استهلاک امواج می‌شود را در رابطه (۴) وارد نمود. همان‌طور که گفته شد، یکی از بهترین شیوه‌ها برای وارد ساختن اثر طویل بودن مخزن، استفاده از اجزای نیمه‌بی‌نهایت یا ابرجزء است. در حالت مخزن سه‌بعدی، ابرجزء یک شبکه دوطبقه از المان‌های محدود بوده که عمود بر جهت جریان قرار گرفته و در واقع، طولی بی‌نهایت در راستای جریان دارد. از نقطه نظر ریاضی، ابرجزء با استفاده از ماتریس مشخصه خود، رابطه میان فشار و شار آن در مرز بالادست مخزن که تا بی‌نهایت ادامه دارد را مشخص می‌سازد و بدین ترتیب، امکان عبور امواج از مرز مزبور را فراهم می‌نماید [۵].

## ۲-۲- تحلیل دینامیکی

تحلیل‌های دینامیکی، به طور معمول در دو حوزه زمان و فرکانس به انجام می‌رسند که حلقه اتصال این دو حوزه، همان تبدیلات فوریه است. در مسأله مورد بحث، از آن‌جا که المان‌های نیمه‌بی‌نهایت سیال، ماهیتی وابسته به فرکانس دارند، استفاده از آن‌ها در تحلیل‌های حوزه زمان، امری تقریباً غیرممکن می‌باشد. بنابراین، در این‌جا کار تحلیل در حوزه فرکانس صورت می‌پذیرد.

پس از انتخاب حوزه تحلیل، باید دقت نمود که خود تحلیل دینامیکی در حوزه فرکانس را نیز می‌توان به دو روش کلی مستقیم و مودال انجام داد. در این میان، هر دو راهکار مزبور به حل دستگاه معادلات حاکم بر مجموعه سازه - سیال، برای مقادیر گوناگون فرکانس تحریک می‌پردازند. برای این منظور، به طور معمول با فرض مقدار واحد برای یکی از درایه‌های بردار شتاب تکیه‌گاهی و عدد صفر برای دو درایه دیگر، پاسخ دستگاه که همان بردار تغییر مکان‌های گرهی به ازاء فرکانس تحریک است، به دست می‌آید. به عنوان مثال، برای سدهای قوسی مورد بحث در این مقاله که محورهای x، y و z آن‌ها به ترتیب، منطبق با جهت عمود بر جریان، در راستای جریان و امتداد قائم است،

سازه می‌باشد.

هنگامی که سازه و سیال در مجاورت هم قرار گرفته و تحت تأثیر یک شتاب پایه واحد باشند، مسأله اندرکنش سازه و سیال اهمیت یافته و سبب تغییر پاسخ هر یک از دو بخش مزبور می‌گردد. در این حالت، ماتریس نگاشت B افزون بر نقش تبدیل شتاب‌های تکیه‌گاهی به شار فشار، وظائف مهم دیگری نیز به عهده دارد که همانا تبدیل شتاب‌های سازه به شار فشار و همچنین، تبدیل فشارهای هیدرودینامیک به نیروهای وارد به سازه است. در واقع ماتریس مزبور، عامل ایجاد اندرکنش در سازه و سیال می‌باشد. در این حالت، دو معادله حاکم بر سازه و سیال در کنار هم قرار گرفته و رابطه بنیادین حاکم بر مجموعه را بنا می‌نهد:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B} & \mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{r}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & -\mathbf{B}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\mathbf{M} \mathbf{J} \mathbf{a}_g \\ -\mathbf{B} \mathbf{J} \mathbf{a}_g \end{Bmatrix} \quad (۳)$$

در ادامه، رابطه فوق به حوزه فرکانس انتقال یافته و برای یافتن پاسخ دینامیکی سد، با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سازه و سیال به کار می‌رود. ناگفته نماند از آنجایی که در سدهای بتنی به طور معمول از مفهوم میرایی هیستریتیک بهره می‌جویند، ماتریس میرایی C به صورت  $\mathbf{C} = (2\beta/\omega)\mathbf{K}$  تعریف شده، رابطه فوق پس از اندکی ساده‌سازی به قرار زیر در می‌آید [۸]:

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 \mathbf{M} + (1 + 2\beta i) \mathbf{K} & -\mathbf{B}^T \\ -\omega^2 \mathbf{B} & -\omega^2 \mathbf{G} + i\omega \mathbf{L} + \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\mathbf{M} \mathbf{J} \mathbf{a}_g \\ -\mathbf{B} \mathbf{J} \mathbf{a}_g \end{Bmatrix} \quad (۴)$$

لازم به ذکر است، رابطه فوق برای تحلیل مجموعه سد و مخزن محدود کامل می‌باشد؛ اما در صورت نیاز به تحلیل مخزن نیمه‌بی‌نهایت که طول آن در راستای جریان بسیار بیش‌تر از سایر ابعاد آن است،

جهت اعتبارسنجی خروجی‌های برنامه، نتایج آن در حالت‌های گوناگون، در نوشتارهای دیگری با نتایج سایر پژوهش‌گران مقایسه شده و درستی آن به اثبات رسیده است. نمونه‌ای از این مقایسه‌ها در بخش نتایج آمده است.

### ۳- مدل‌های تحلیلی

در این بخش به تحلیل دینامیکی دو سد قوسی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی آب تراکم‌پذیر و سازه پرداخته می‌شود. یادآوری می‌نماید در این مقاله، تحلیل سد قوسی با بهره‌جویی از روش اجزای محدود به انجام می‌رسد. هم‌چنین برای وارد ساختن اثر اندرکنشی آب درون مخزن که به طور معمول دارای طول بسیار زیاد بوده و محیطی نیمه‌بی‌نهایت پنداشته می‌شود، از المان‌های محدود و نیمه نامحدود سیال استفاده شده است. در ادامه، ویژگی‌های مدل‌های به کار رفته تشریح می‌گردد.

در این‌جا، هر دو سد قوسی با استفاده از المان‌های ایزوپارامتریک (هم‌عامل) بیست‌گره‌ی حجمی مدل‌سازی می‌شوند. هم‌چنین، مخزن پشت سدها به دو ناحیه نزدیک و دور تقسیم شده، مدل‌سازی ناحیه نزدیک به کمک اجزای هم‌عامل بیست‌گره‌ی سیال و ناحیه دور، با استفاده از المان‌های نیمه‌بی‌نهایت هشت‌گره‌ی مستوی که به انتهای شبکه ناحیه نزدیک مخزن متصل می‌گردند، صورت می‌پذیرد.

آب درون مخزن نیز تراکم‌پذیر (با سرعت عبور امواج فشاری ۱۴۴۰ متر بر ثانیه) و غیر ویسکوز (با وسکوزیته صفر) پنداشته شده و وزن حجمی آن، برابر ۹/۸۱ کیلو نیوتن بر متر مکعب فرض می‌گردد. ناگفته نماند مشخصات بتن به کار رفته در دو سد قوسی، به قرار ذیل است:

۱- سد ماروپوینت [۱۳]:

- ضریب کشسانی: ۲۷/۵ گیگا پاسگال

- وزن حجمی: ۲۴/۸ کیلو نیوتن بر متر مکعب

- نسبت پواسون: ۰/۲

- ضریب میرایی هیسترتیک: ۰/۵

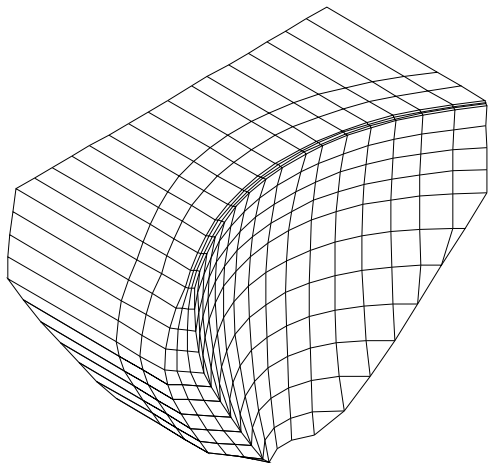
۲- سد کارون ۳:

بردارهای سه‌گانه شتاب زمین، یعنی  $\{1\ 0\ 0\}^T$ ،  $\{0\ 1\ 0\}^T$  و  $\{0\ 0\ 1\}^T$ ، به ترتیب، بیانگر تحریک عمود بر جهت جریان، تحریک در راستای جریان (امتداد طول مخزن) و تحریک قائم می‌باشند.

این مقاله از روش مستقیم برای حل مسأله بهره می‌جوید. برای این منظور، دستگاه معادلات حاکم بر مجموعه سازه-سیال، به ازاء هر یک از مقادیر معلوم فرکانس تحریک ( $\omega$ ) بین صفر تا ۱۲۰ رادیان بر ثانیه با گام ۰/۵، در مجموع ۲۴۰ مقدار، یک بار حل می‌گردد. با این کار، بردار تغییرمکان‌های سازه و فشارهای هیدرودینامیک سیال که دارای درایه‌هایی مختلط است، در دسترس قرار می‌گیرد. در این میان، بردار نخست، مجهول اصلی مسأله است که در تعیین تنش‌های به وجود آمده در بدنه سد و در نتیجه طراحی بدنه، به کار گرفته می‌شود. بدین ترتیب، امکان طراحی دقیق‌تر سد بر اساس تنش‌های اضافی ناشی از فشارهای دقیق هیدرودینامیک، فراهم می‌آید.

ناگفته نماند به دلیل صفر بودن اغلب درایه‌های موجود در ماتریس‌های مشخصه سازه و سیال و هم‌چنین، ماتریس‌های مربوط به لحاظ نمودن اثرات اندرکنشی که از ویژگی تُنکی (Sparseness) آن‌ها ناشی می‌گردد، می‌توان از ذخیره‌سازی و انجام عملیات بر روی صفرها خودداری کرد و با این کار بر سرعت روند تحلیل افزود. در این‌جا، با به کارگیری روش ذخیره‌سازی و حل خط آسمان، شمار عملیات مورد نیاز به شدت کاهش می‌یابد.

اینک پس از آشنایی با روش‌های وارد ساختن اثر اندرکنش سازه - سیال در روند تحلیل دینامیکی سدهای قوسی، می‌توان این کار را به طور عملی و بر روی مدل‌هایی واقعی به انجام رساند. در بخش آتی، سد کارون ۳ به همراه سد معروف ماروپوینت (Morrow Point)، مورد تحلیل عددی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن ارائه می‌شود. باید افزود، تمامی تحلیل‌های انجام‌گرفته در این پژوهش به یاری برنامه رایانه‌ای تدوین‌شده توسط نگارنده و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Fortran، صورت پذیرفته‌اند. هم‌چنین،



شکل ۳ مدل سد-مخزن-ابرجزه سد کارون ۳

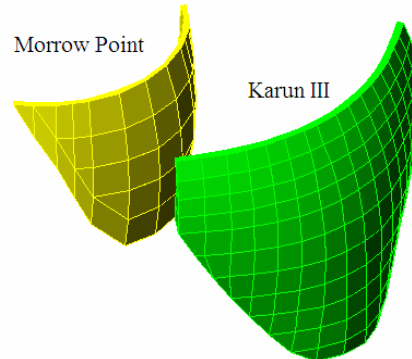
همان‌طور که پیش از این بیان شد، سد ماروپوینت پیش از این توسط پژوهش‌گران مختلف و با روش‌های گوناگون مورد تحلیل قرار گرفته و به صورت یک مسأله سنگ نشانه (Benchmark) درآمده است. در این مقاله برای انجام پاره‌ای کنترل‌ها، اعتبارسنجی نتایج و هم‌چنین، بررسی شباهت‌های جالب بین توابع پاسخ فرکانسی نرمالایز شده آن با سد قوسی کارون ۳، کار تحلیل بر روی سد ماروپوینت به انجام رسیده است. نمونه‌ای از نتایج این تحلیل‌ها که نشان‌دهنده درستی راهکارها و برنامه تحلیل تدوین شده است، در انتهای مقاله قابل مشاهده می‌باشد.

خاطر نشان می‌کند برای بررسی تنش در بدنه سد که البته مد نظر این مقاله نیست، باید از شبکه‌بندی ریزتری بهره جست [۱۳]. این در حالی است که شبکه‌های درشت برای مطالعه تغییر مکان‌های گرهی و توابع پاسخ آن‌ها که در این مقاله به نمایش در آمده‌اند، مناسبند. در این‌جا، به دلیل استفاده از شبکه‌بندی مورد استفاده در فرایند طراحی سد کارون ۳، تعداد المان‌های مدل اجزای محدود آن زیاد بوده، به گونه‌ای که در راستای ضخامت بدنه سد از سه لایه المان حجمی استفاده شده است. از سوی دیگر در مدل معروف سد ماروپوینت، ضخامت سد تنها به کمک یک لایه المان

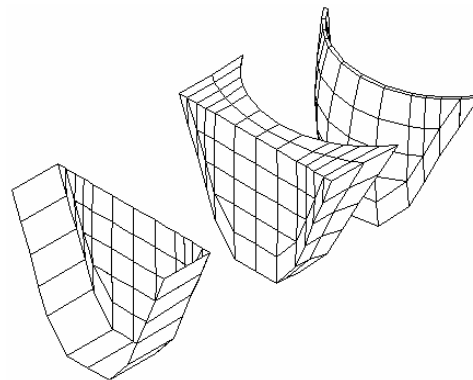
- ضریب کشسانی: ۲۳/۶ گیگا پاسگال
- وزن حجمی: ۲۴/۵ کیلو نیوتن بر متر مکعب
- نسبت پواسون: ۰/۲
- ضریب میرایی هیسترتیک: ۵٪

گفتنی است، المان هم‌عامل بیست گرهی، به دلیل داشتن سه گره در هر ضلع، امکان در نظر گرفتن یک تابع درجه دو (سه‌می) برای شبیه‌سازی هر چه بهتر و دقیق‌تر هندسه منحنی شکل و پیچیده سد دو قوسی را داراست. هم‌چنین، بالاتر بودن درجه توابع شکل و در نتیجه، افزایش دقت تحلیل با وجود شمار نه چندان زیاد المان‌ها و درجات آزادی کل مدل، خود دلیل دیگری برای بهره جستن از این المان است.

در شکل (۱)، دو مدل اجزای محدود مربوط به بدنه سدهای کارون ۳ و ماروپوینت با هم مقایسه شده‌اند. هم‌چنین، شکل‌های (۲) و (۳)، به ترتیب، مدل کامل سد قوسی-مخزن-ابرجزه مربوط به سد ماروپوینت و مدل متصل سد و مخزن کارون ۳ را نشان می‌دهند.



شکل ۱ مقایسه ظاهری دو سد قوسی ماروپوینت و کارون ۳



شکل ۲ مدل سد-مخزن-ابرجزه برای سد ماروپوینت

حجمی شبکه‌بندی گردیده است؛ بر همین اساس، در این پژوهش با تهیه شبکه یک‌لایه‌ای سد کارون ۳ همانند شبکه سد ماروپوینت، مقایسه‌ای میان پاسخ‌های دو شبکه ریز و درشت به انجام رسیده که در بخش

نتایج عددی قابل مشاهده می‌باشد. لازم به ذکر است، پاره‌ای از مشخصات هندسی دو سد مورد مطالعه در بخش نخست جدول (۱) آمده‌اند.

جدول ۱ مقایسه کمی دو مدل مربوط به سدهای قوسی کارون ۳ و ماروپوینت

عامل مورد مقایسه	جزئیات	کارون ۳	ماروپوینت
مشخصات هندسی سد	ارتفاع سد (متر)	۲۰۵	۱۴۳
	طول تاج (متر)	۲۷۵	۲۲۱
	طول مخزن مدلسازی شده (متر)	۹۰	۳۰
مدل اجزای محدود سد	تعداد المان‌ها	۴۲۰	۴۰
	تعداد لایه‌ها در جهت ضخامت	۳	۱
	تعداد گره‌ها	۲۲۶۱	۳۱۸
	شمار درجات آزادی	۵۹۳۷	۷۶۵
مدل اجزای محدود مخزن	طول بردار خط آسمان	۳۵۹۰۲۳۸	۶۲۹۱۰
	تعداد المان‌ها	۴۲۰	۸۰
	تعداد لایه‌ها در جهت طول	۳	۲
	تعداد گره‌ها	۲۲۶۱	۵۰۱
	شمار درجات آزادی	۲۰۷۸	۴۰۰
مدل کامل سد و مخزن	طول بردار خط آسمان	۱۰۵۹۴۹۰	۴۹۲۲۶
	تعداد المان‌ها	۸۴۰	۱۲۰
	تعداد گره‌ها	۴۰۷۳	۶۸۴
	شمار درجات آزادی	۸۰۱۵	۱۱۶۵
مدل المان‌های نیمه‌بی‌نهایت	طول بردار خط آسمان	۶۲۱۸۵۰۹	۱۶۷۰۳۰
	تعداد المان‌ها	۱۴۰	۴۰
	تعداد گره‌ها	۴۴۹	۱۳۵
	شمار درجات آزادی	۴۱۶	۱۱۰
اولین فرکانس طبیعی بر حسب هرتز	مود متقارن سد خالی	۲/۵۳	۴/۲۰
	مود پاد متقارن سد خالی	۲/۱۴	۳/۷۵
	مخزن	۲/۲۷	۳/۴۲
زمان تحلیل برای ۲۴۰ فرکانس مورد نیاز بر حسب ثانیه	تحلیل سد خالی	۳۲۶۴۰	۹۶
	محاسبه ماتریس المان نیمه‌بی‌نهایت	۴۹۰	۲۷۵
	تحلیل مجموعه کامل سد و مخزن	۷۵۶۰۰	۱۲۷۴

#### ۴- نتایج عددی

در آغاز این بخش، قالب و محتوای کلی نمودارهای ارائه شده در مقاله که همانا توابع پاسخ شتاب سازه بر حسب فرکانس می باشند، معرفی می گردد. این توابع، در واقع، نسبت شتاب ایجاد شده در سازه به شتاب زلزله وارد به تکیه گاه ها را به ازاء فرکانس های مختلف تحریک نشان می دهند. ناگفته نماند به دلیل استفاده از میرایی هیستریک در سازه و وجود میرایی تشعشی در آب، این نسبت یک عدد مختلط است که به طور معمول، اندازه آن (یعنی مجذور مجموع مربعات دو جزء حقیقی و موهومی آن) در نمودارها به نمایش در می آیند. بنابراین، محور افقی، فرکانس تحریک تکیه گاهی و محور قائم، نسبت شتاب سازه به شتاب تکیه گاه است.

در پاره ای از نمودارهای ارائه شده در این بخش، محور افقی، نشان دهنده فرکانس نُر مال و بی بُعد شده می باشد. این کمیت با تقسیم هر فرکانس تحریک بر فرکانس های اول سد قوسی با مخزن خالی، در دو حالت تغییر شکل متقارن و پادمقارن، به دست می آید. هم چنین، محتویات بخش راهنمای نمودارها، نام سد قوسی، مدل به کار رفته در تحلیل و تعداد لایه های المان در جهت ضخامت سد، پُر یا خالی بودن مخزن، ضریب جذب امواج کف مخزن در حالت پُر و ... را نشان می دهند.

افزون بر این ها، زاویه مرکزی مربوط به نقطه ای از تاج سد که نتایج آن در هر نمودار آمده است را می توان در بخش فوقانی و سمت چپ آن نمودار مشاهده کرد. خاطر نشان می کند، برای نشان دادن پاسخ سد به تحریک عمود بر جهت جریان، زاویه مرکزی نقطه انتخابی در سد ماروپوینت برابر ۱۳/۲۵ درجه و در سد کارون ۳ برابر ۱۴/۴۰ درجه می باشد. هم چنین در مورد دو خروجی اول مربوط به تحریک

در راستای جریان و تحریک قائم، در هر دو مدل، همان نقطه میانی (با زاویه مرکزی صفر) به کار رفته است.

آشکار است با حل دستگاه معادلات حاکم، تمامی درایه های بردار تغییر مکان سازه به دست می آیند؛ اما در میان تمامی این درایه ها، دو تا از آن ها که همانا تغییر مکان در جهت جریان گره میانی تاج سد و هم چنین، تغییر مکان شعاعی نقطه ای از تاج با زاویه مرکزی مشخص (همان ۱۳/۲۵ یا ۱۴/۴۰ درجه) است، انتخاب شده و منحنی تغییرات اندازه آن ها پس از تبدیل به شتاب بر حسب فرکانس مزبور ترسیم می گردد. باید دانست به دلیل وضوح بیشتر پاسخ مربوط به نقطه اول، برای تحریک های در جهت جریان و قائم و نقطه دوم، برای تحریک عمود بر جهت جریان، سال هاست که همین سه خروجی به دست آمده از تحلیل دینامیکی سدهای قوسی، مورد توجه پژوهش گران بوده و به معیار سنجش روش های تحلیلی گوناگون تبدیل شده است.

ناگفته نماند اثر جذب امواج به خاطر برخورد به کف و جداره مخزن سد را می توان به یاری رابطه ای که در مرجع [۴] معرفی گردیده و بعدها در بسیاری از تحقیقات وابسته به کار گرفته شده است، لحاظ نمود. این رابطه ساده به کمک تئوری یک بعدی انتشار امواج در محیط های الاستیک به دست می آید و نسبت دامنه موج منعکس شده به موج برخوردی را با استفاده از ضریبی بی بُعد به نام  $\alpha$  بیان می دارد.

این ضریب در مورد کف های صلب (انعکاس کامل) برابر یک و در مورد مرز بسیار نرم (جذب کامل) برابر صفر بوده و با افزایش چگالی و سختی مصالح موجود در کف مخزن، زیاد می گردد. در این جا برای نشان دادن اثر این ضریب در پاسخ دینامیکی هر دو سد قوسی، پاسخ ها در دو حالت حدی  $\alpha=0$  و

$\alpha=1$  که به ترتیب، نمایان‌گر حداکثر و حداقل میزان جذب موج توسط جداره سنگی و یا رسوبی مخزن می‌باشند [۵]، به دست آمده و با هم مقایسه شده‌اند.

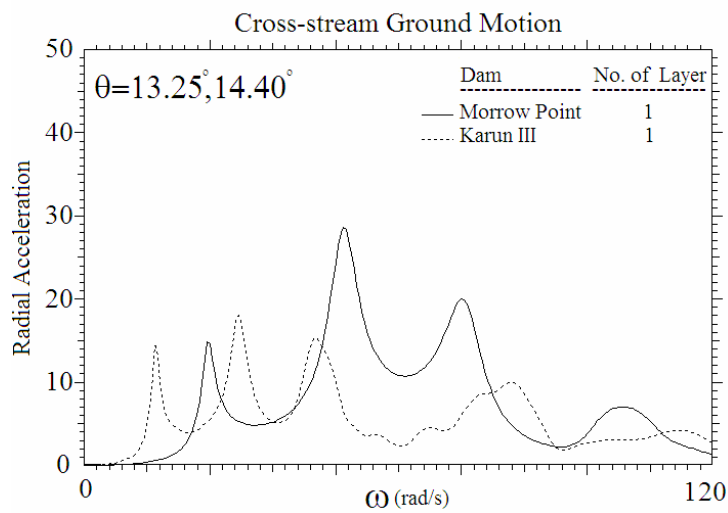
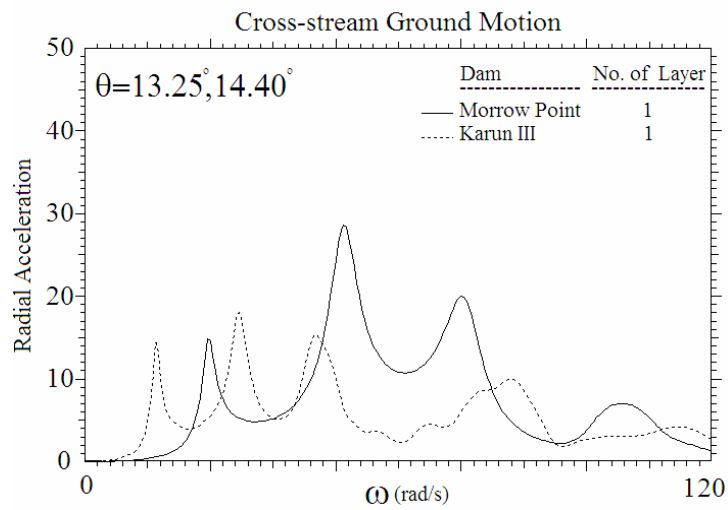
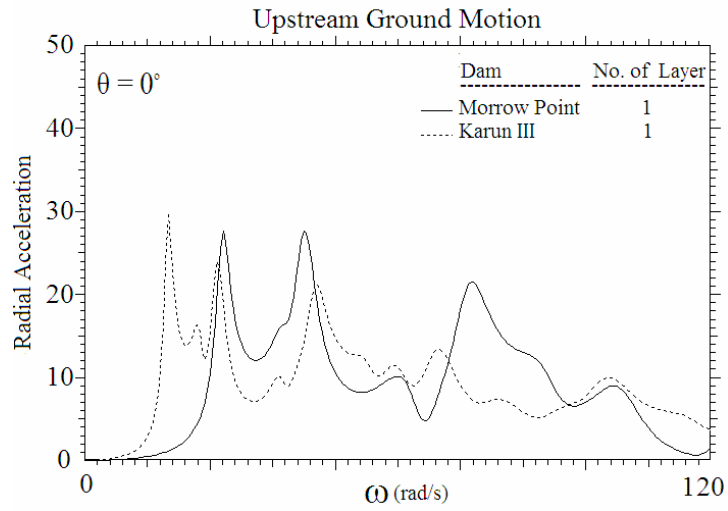
باید افزود، این مقاله در مرحله اول، شامل هفت دسته نمودار است و همان‌گونه که پیش از این بیان گردید، نشان‌دهنده توابع پاسخ فرکانسی (Frequency Response Function) دو سد قوسی در حالات گوناگون می‌باشد. از آن‌جا که طیف فرکانسی زلزله‌های حوزه دور موجود، به طور معمول، بین فرکانس‌های صفر تا بیست هرتز قابل توجه‌اند، در این‌جا تحلیل هر دو سد، حداکثر تا همان فرکانس تحریک بیست هرتز (حدوداً معادل فرکانس زاویه‌ای  $\omega$  برابر ۱۲۰ رادیان بر ثانیه) به انجام می‌رسد. در مرحله دوم برای انجام پاره‌ای از کنترل‌ها، نمونه‌ای از نتایج انتقال یافته از حوزه فرکانس به حوزه زمان، در قالب نمودارهای (۸) و (۹)، درج می‌شود. در ادامه به تشریح یکایک نمودارهای درج‌شده در پایان مقاله خواهیم پرداخت.

در نمودارهای (۱)، می‌توان توابع پاسخ هر دو سد قوسی را در حالت به کارگیری شبکه درشت تک‌لایه‌ای و با فرض مخزن خالی به نظاره نشست. آشکار است سد کارون ۳ به دلیل ارتفاع بیش‌تر، دارای زمان تناوب نوسانی بالاتر و لذا، فرکانس طبیعی اول کم‌تری از سد ماروپوینت می‌باشد. این امر با توجه به محل وقوع نخستین قله (پیک) در توابع پاسخ نمودارهای (۱)، کاملاً مشهود است. یادآوری می‌نماید، در دو حالت تحریک در جهت جریان و تحریک قائم، قله نخست به مود اول متقارن و در حالت تحریک عمود بر جهت جریان، قله نخست به مود اول پادمقارن (که دارای فرکانس کم‌تری است)

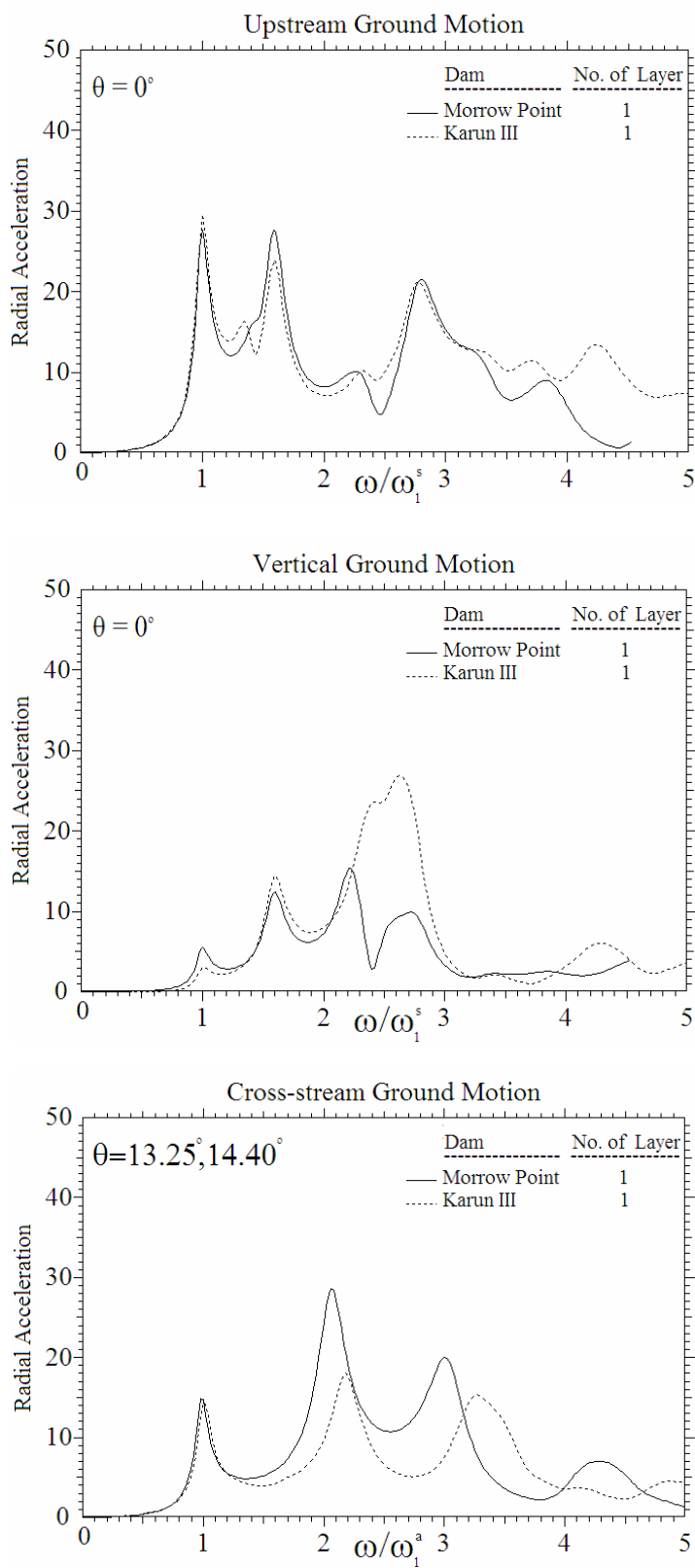
مربوط می‌شود. نمودارهای (۲) نشان‌دهنده همان توابع پاسخ فرکانسی به نمایش درآمده در نمودارهای (۱)، اما به صورت نرمال‌شده می‌باشند. در این نمودارها، اعداد محور افقی با تقسیم شدن بر فرکانس نخست هر یک از دو سد، به حالت نرمال و بی‌بعد شده درآمده‌اند و پاسخ هر سد بر حسب فرکانس نرمال‌شده خودش رسم گردیده است. بدین ترتیب در نمودارهای (۲)، اعداد موجود در محور افقی، نسبت فرکانس تحریک به فرکانس مود اول هر سد را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در هر سه نمودار مزبور مشهود است، با نرمال کردن محورهای افقی، توابع پاسخ دو سد متفاوت کارون ۳ و ماروپوینت، بسیار شبیه هم می‌گردند. در بخش نتیجه‌گیری، دلیل این امر را بیشتر بررسی می‌کنیم.

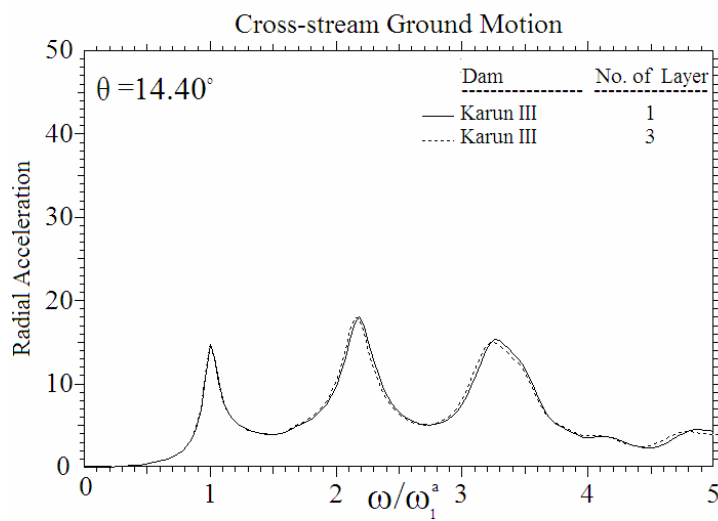
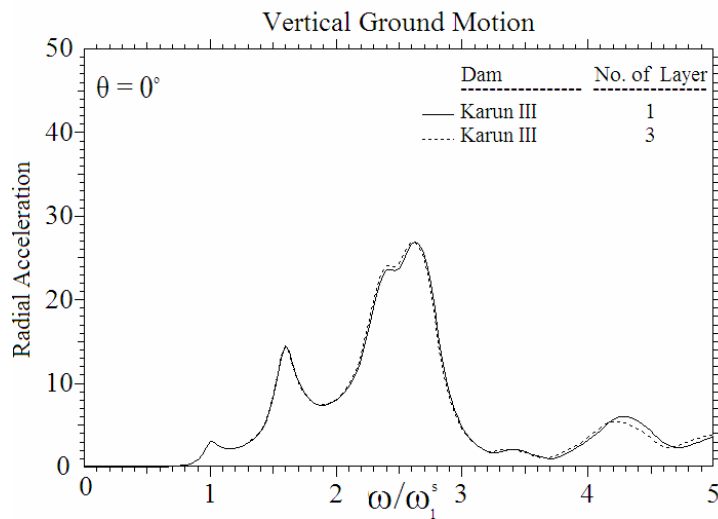
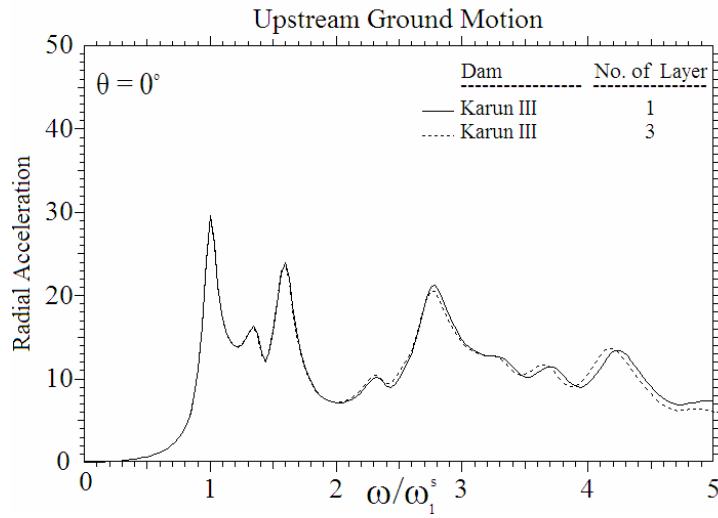
در نمودارهای (۳)، اثر ریز کردن شبکه‌بندی اجزای محدود و افزایش تعداد لایه‌های المان‌های حجمی در جهت ضخامت سد کارون ۳ در حالت مخزن خالی (تحلیل دینامیکی سد به تنهایی و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش آب و سازه)، مورد بررسی قرار گرفته است. خاطر نشان می‌کند، باز هم در این نمودارها و سایر نمودارهای بعدی تا انتهای مقاله، محور افقی با تقسیم فرکانس تحریک بر فرکانس مود اول، به صورت نرمال و بی‌بعد شده درآمده است. همان‌گونه که از توابع پاسخ رسم‌شده در نمودارهای سه‌گانه (۳) بر می‌آید، ریز کردن شبکه، تأثیر چندانی در پاسخ‌های سد خالی ندارد؛ اما این تأثیر در مورد تنش‌های موجود در بدنه سد، چشم‌گیر بوده و توصیه بر آن است که بررسی و تحلیل تنش، در شبکه‌های ریز صورت پذیرد [۱۳].



نمودارهای ۱ مقایسه توابع پاسخ فرکانسی دو سد با مخزن خالی بر حسب فرکانس نرمال نشده



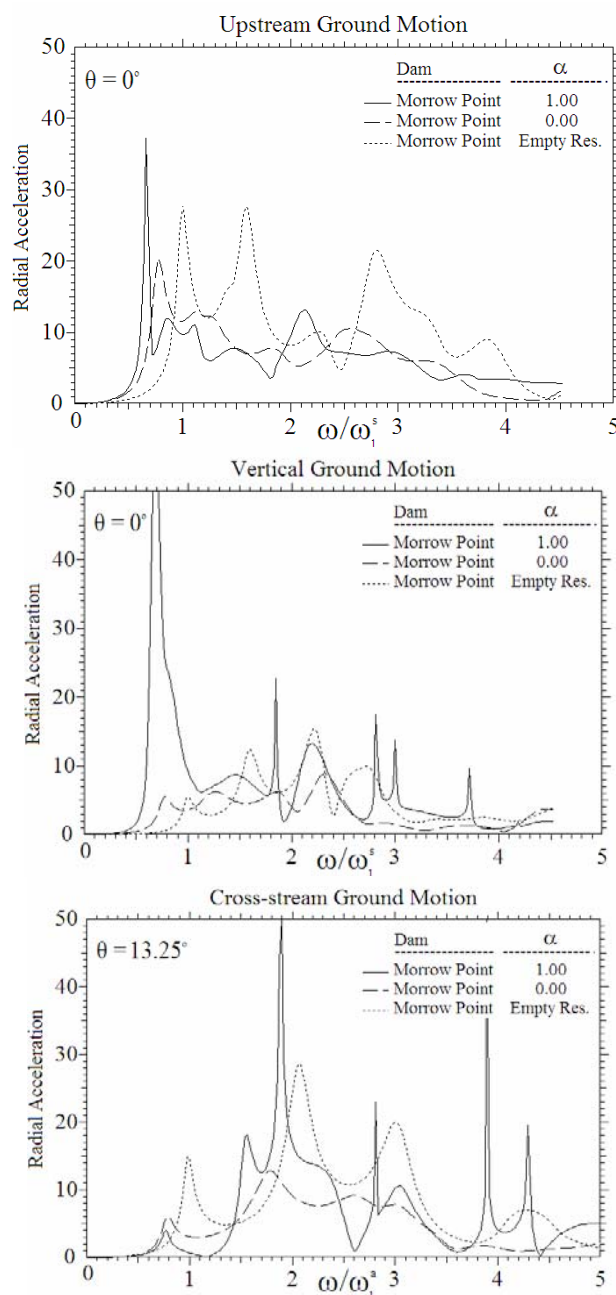
نمودارهای ۲ مقایسه نوابغ پاسخ دو سد با مخزن خالی بر حسب فرکانس نرمال شده نسبت به فرکانس مودهای اول متقارن و نامتقارن هر یک از دو سد قوسی



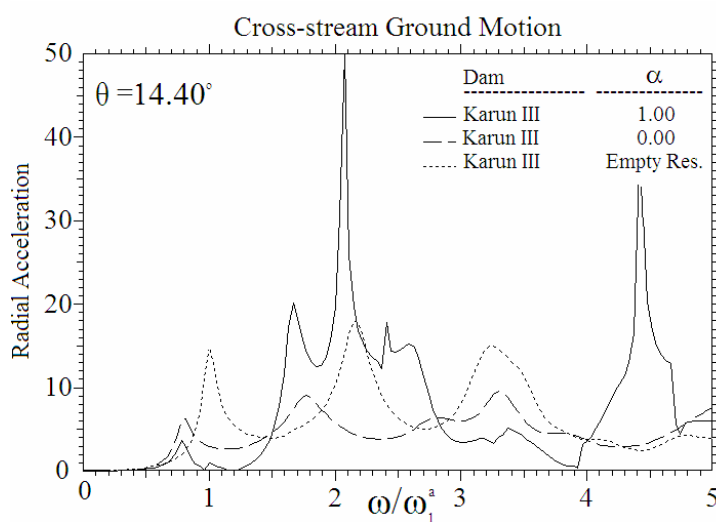
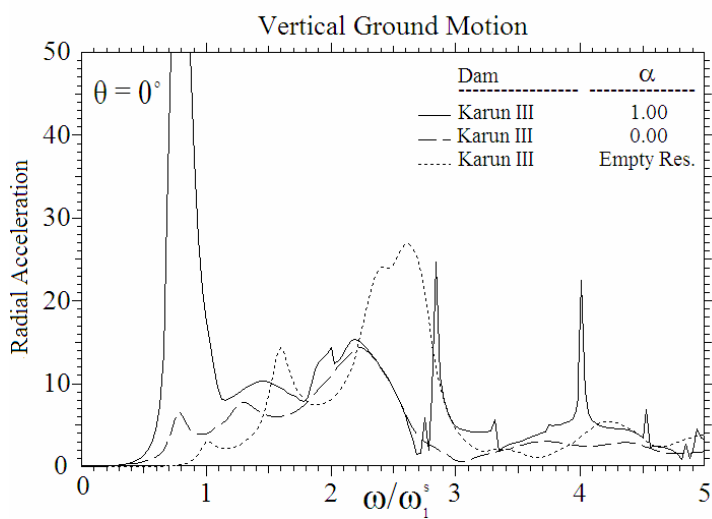
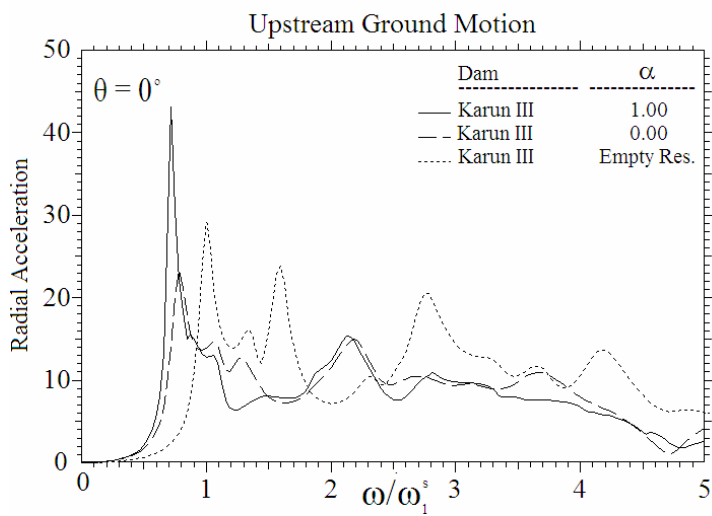
نمودارهای ۳ مقایسه توابع پاسخ مربوط به دو نوع شبکه‌بندی یک و سه لایه‌ای سد کارون ۳ بر حسب فرکانس نرمال شده در حالت مخزن خالی

نمودارها به خوبی مشهود است، چندان تحت تأثیر مقدار  $\alpha$  (ضریب جذب امواج بستر) نمی‌باشد. اما از سوی دیگر با کم شدن این ضریب و بالا رفتن میرایی سیال، دامنه پاسخ، بطور کلی کاهش می‌یابد؛ هر چند ممکن است که باز هم دامنه پاسخ، به دلیل وابستگی به فرکانس، به ازاء پاره‌ای فرکانس‌ها، اندکی زیاد شود.

اثر پر بودن مخزن و هم‌چنین ضریب جذب امواج جداره و کف آن را می‌توان در نمودارهای (۴) و (۵) که به ترتیب به سدهای ماروپوینت و کارون ۳ مربوط می‌شوند، مشاهده کرد. آشکار است با اضافه شدن آب درون مخزن به مدل مسأله، جرم کلی آن افزایش یافته و لذا، فرکانس مجموعه سد-مخزن کم‌تر می‌گردد. این کاهش که در محل وقوع نخستین قله



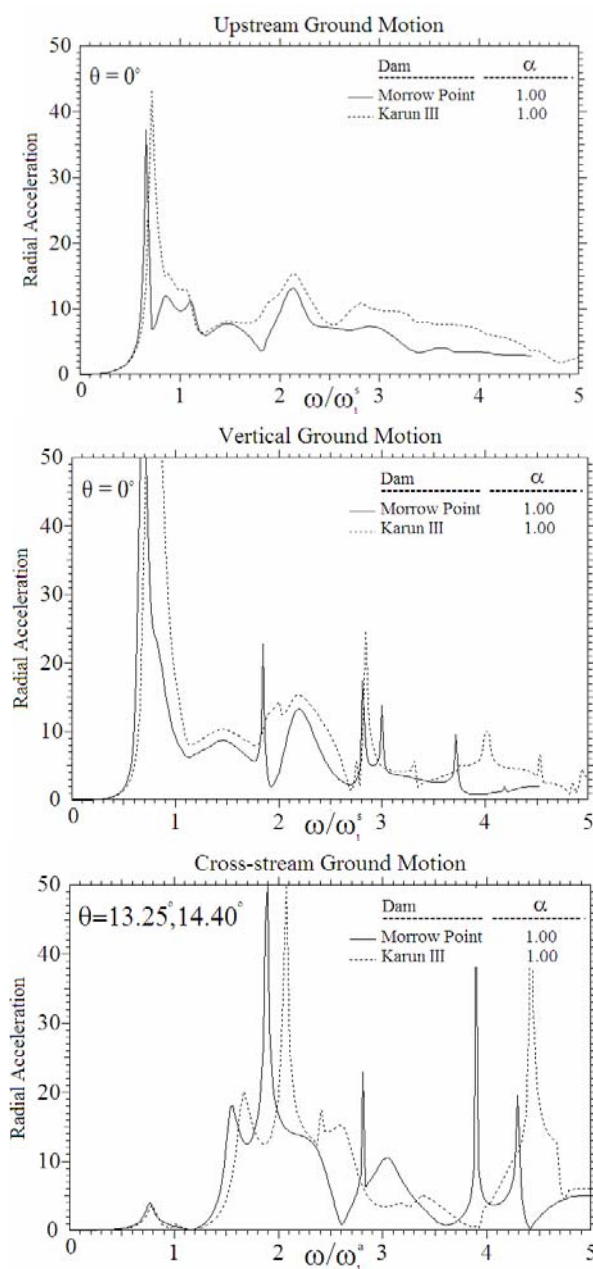
نمودارهای ۴ توابع پاسخ فرکانسی سد ماروپوینت بر حسب فرکانس نرمال‌شده در سه حالت مخزن خالی، مخزن پر با  $\alpha = 0$  و  $\alpha = 1$



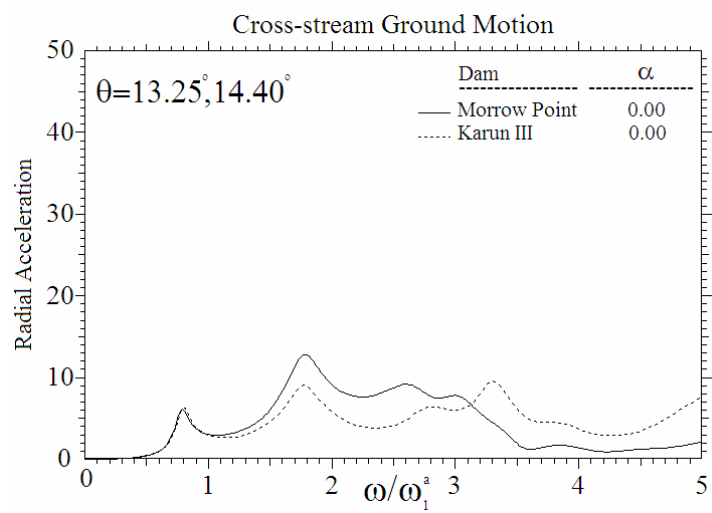
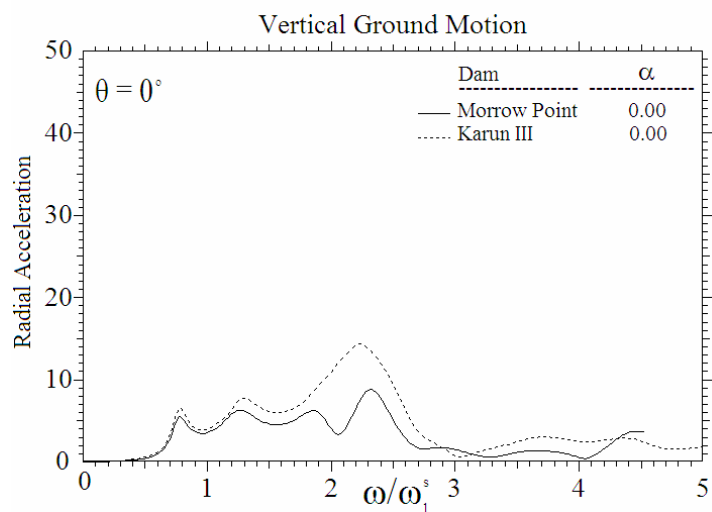
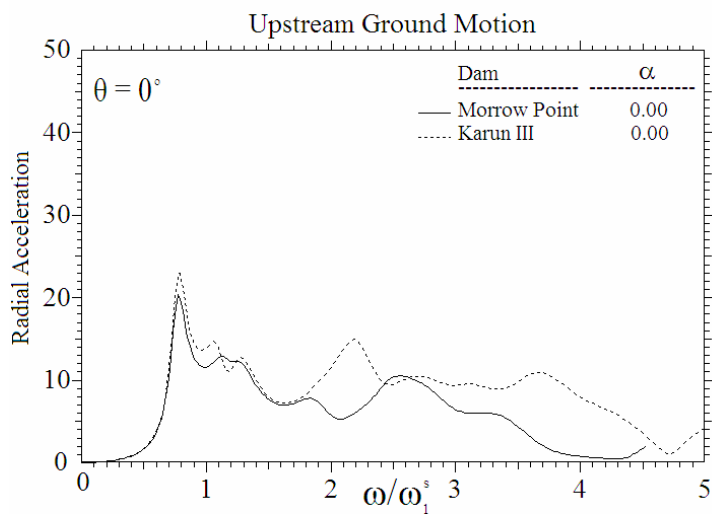
نمودارهای ۵ توابع پاسخ فرکانسی سد کارون ۳ بر حسب فرکانس نرمال شده در سه حالت مخزن خالی، مخزن پر با  $\alpha=0$  و  $\alpha=1$

نبود میرایی ناشی از جذب امواج در کف و جداره مخزن مربوط می‌شود، پدیده تشدید در سیال، سبب افزایش شدید پاسخ‌های هر دو سد قوسی، به ازاء فرکانس‌های طبیعی مجموعه سد-مخزن شده است. باید دانست مقدار  $\alpha=1$  یک اندازه ایده‌آل بوده و در عمل، هیچ‌گاه رخ نمی‌دهد. در واقع، همان اندک میرایی موجود در بستر مخزن، اندازه  $\alpha$  را همواره کم‌تر از یک می‌سازد [۴].

در دو دسته نمودارهای (۶) و (۷)، پاسخ دو سد کارون ۳ و ماروپوینت، در حالت مخزن پُر و با دو فرض  $\alpha=0$  و  $\alpha=1$ ، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این دو دسته نمودار، مشابه نمودارهای (۲) که به مقایسه پاسخ دینامیکی این دو سد در حالت مخزن خالی می‌پرداخت، توابع پاسخ را بر حسب فرکانس نرمال و بی‌بعد شده نشان می‌دهند. در نمودارهای (۶) که به حالت  $\alpha=1$



نمودارهای ۶ مقایسه توابع پاسخ فرکانسی دو سد، با مخزن پُر و  $\alpha=1$  بر حسب فرکانس نرمال شده نسبت به فرکانس مودهای اول هر یک از دو سد قوسی در حالت مخزن خالی

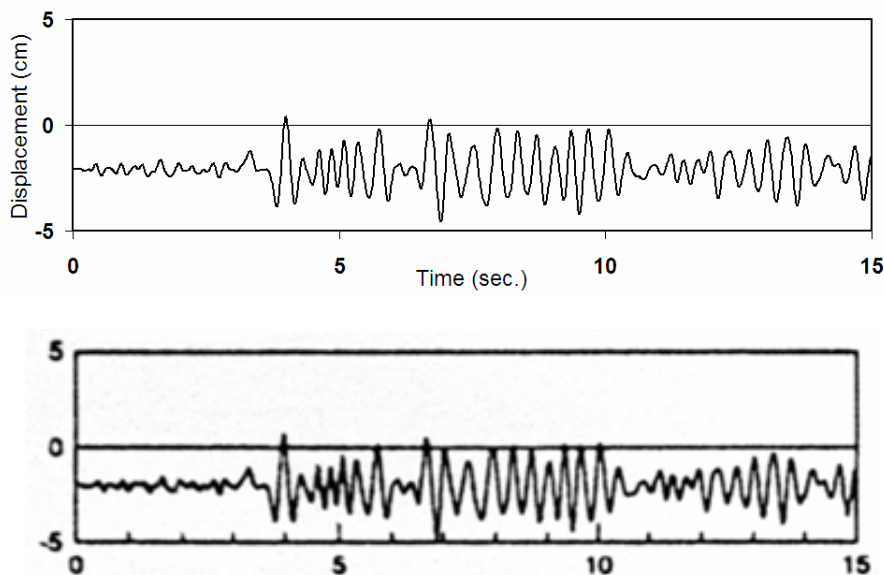


نمودارهای ۷ مقایسه توابع پاسخ فرکانسی دو سد، با مخزن پُر و  $\alpha = 0$  بر حسب فرکانس نرمال شده نسبت به فرکانس مودهای اول هر یک از دو سد قوسی در حالت مخزن خالی

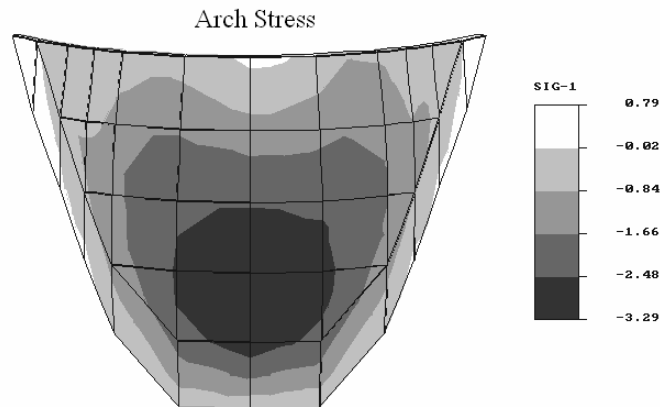
همچنین، برای کنترل فرض خطی بودن رفتار بتن که یکی از فرض‌های اساسی به کار رفته در تمامی تحلیل‌ها بود، پاسخ‌های موجود در حوزه فرکانس به حوزه زمان انتقال یافته و پس از محاسبه تنش‌ها و سپس تنش‌های اصلی، حدود ماکزیمم و می‌نیمم آن‌ها با محدوده رفتار خطی بتن (تنش کششی دو و فشاری بیست مگاپاسگال) مقایسه می‌شود. این کار در قالب نمودار (۹) به انجام می‌رسد که نتیجه آن، از درستی فرض مزبور حکایت دارد. در نمودار مورد اشاره، نمونه‌ای از دیاگرام پوش تنش‌های اصلی (با واحد مگاپاسگال و قرارداد علامت مثبت برای تنش‌های کششی) که به دلیل اعمال زلزله Taft و با در نظر گرفتن تمامی اثرات اندرکنشی به دست آمده است، ارائه می‌شود. همان‌طور که از اعداد درج شده در راهنمای نمودار برمی‌آید، حداکثر تنش‌های فشاری و کششی موجود در محدوده بیان شده برای رفتار خطی بتن قرار دارند.

همان‌طور که از دو دسته نمودار آخر بر می‌آید، در حالت مخزن پُر، همسانی و شباهت میان پاسخ‌های دو سد مورد مطالعه، به آن اندازه که در نمودارهای (۲) و در حالت مخزن خالی مشهود بود، مشهود نیست. اما با وجود این، افزایش میرایی مصالحی در سیال، این همسانی را بیشتر و بیشتر می‌سازد. مقایسه نمودارهای (۷) مربوط به  $\alpha=0$  با نمودارهای (۶)، خود گویای این امر است.

پس از ارائه نتایج مربوط به حوزه فرکانس و توابع پاسخ فرکانسی این دو سد قوسی، بخش نتایج عددی با درج دو نمونه از پاسخ‌های انتقال یافته به حوزه زمان و در واقع، پاسخ تاریخچه زمانی سازه پایان می‌پذیرد. در نمودار (۸)، پاسخ تاریخچه زمانی تغییر مکان نقطه میانی تاج سد ماروپوینت به زلزله معروف Taft که با به کار بستن روش پیشنهادی در این مقاله و با در نظر گرفتن تمامی اثرات اندرکنشی محاسبه شده است، در کنار نتایج مربوط به یکی از پژوهش‌های شناخته شده [۱۳] درج می‌گردد.



نمودار ۸ پاسخ تاریخچه زمانی سد ماروپوینت به زلزله Taft با در نظر گرفتن تمامی اثرات اندرکنشی (نمودار بالایی) و مقایسه روش پیشنهادی با یکی از پژوهش‌های پیشین و شناخته شده [۱۳] (نمودار پایینی)



نمودار ۹ دیگرام پوش تنش‌های اصلی (با واحد مگاپاسگال) در وجه بالادست سد ماروپوینت به خاطر اعمال زلزله Taft و با در نظر گرفتن تمامی اثرات اندرکنشی

### ۵- نتیجه گیری

در این بخش با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده و پاسخ‌های به دست‌آمده، پاره‌ای نتایج حاصل از این پژوهش فهرست می‌شوند:

- با وجود تفاوت‌های هندسی (مانند ارتفاع، طول تاج، ضخامت و ...) میان دو سد قوسی کارون ۳ و ماروپوینت، توابع پاسخ فرکانسی آن‌ها بسیار مشابهند و حتی در صورت نرمال و بی‌بُعد کردن فرکانس‌ها، می‌توان گفت که تقریباً همسان می‌باشند. با وجود همه این تفاوت‌ها، دلیل شباهت رفتار دینامیکی دو سد مورد مطالعه را می‌توان «یکسان بودن تقریبی نسبت ابعاد آن‌ها» دانست. در واقع، نسبت ارتفاع سد به طول تاج و یا عرض درزه و همچنین، نسبت ضخامت به ارتفاع در ترازهای گوناگون، تفاوت شگرفی در دو سد مزبور نداشته و می‌توان هندسه و نسبت ابعادی دو سد را در عین عدم همسانی کامل، بسیار مشابه قلمداد کرد.

- شباهت میان توابع پاسخ فرکانسی دو سد قوسی کارون ۳ و ماروپوینت، در حالت مخزن پُر و به ویژه برای  $\alpha=1$  (نبود میرایی ناشی از جذب موج بستر در سیال)، به میزان شباهت موجود بین این توابع در حالت مخزن خالی نیست. دلیل این امر را می‌توان در بیشتر بودن ارتفاع سد کارون ۳ و همچنین، بزرگ‌تر بودن

دهانه درزه آن که سبب افزایش نیروهای هیدرودینامیکی وارد به وجه بالادست سد و بالارفتن دامنه پاسخ می‌گردد، جستجو کرد. آشکار است این اثر با افزایش میرایی سیال و برای حالت  $\alpha=0$  کم‌تر شده؛ لذا، شباهت میان پاسخ‌ها در این حالت دوم، فزونی می‌یابد. - تحلیل دینامیکی سدهای قوسی و به ویژه سدهای مرتفع، با در نظر گرفتن اندرکنش سازه - آب تراکم‌پذیر، پاسخ‌های سد را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. این تأثیر را می‌توان در هر دو محور افقی و قائم تابع پاسخ فرکانسی که به دو ویژگی مهم پاسخ فرکانسی سیستم، یعنی فرکانس طبیعی و دامنه پاسخ برمی‌گردند، مشاهده کرد.

در نظر گرفتن این اثر، فرکانس طبیعی سیستم را به دلیل افزایش جرم ناشی از آب، کاهش داده و در بعضی مقادیر فرکانس تحریک، باعث بالا رفتن دامنه پاسخ به دلیل افزایش بارهای خارجی ناشی از فشارهای هیدرودینامیک می‌گردد.

بنابراین، همگام با سایر پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون، می‌توان بر لزوم وارد ساختن اثر اندرکنش آب و سازه در تحلیل دینامیکی سدهای قوسی تأکید نمود [۱۴ و ۱۵].

## ٦- مراجع

1. P. Chakrabarti and A. K. Chopra, "Hydrodynamic Pressures and Response of Gravity Dams to Vertical Earthquake Component", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 1, pp 325-335, 1973.
2. P. Chakrabarti and A. K. Chopra, "Hydrodynamic Effects in Earthquake Response of Gravity Dams", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1974, Vol. 100, pp 1221-1244, 1974.
3. O. Maeso, J. J. Aznárez and J. Dominguez, "Three-Dimensional Models of Reservoir Sediment and Effects on the Seismic Response of Arch Dams", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, pp 1103-1123, 2004.
4. A. K. Chopra and P. Chakrabarti "Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams including Dam-Water-Foundation Rock Interaction", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, pp 363-383, 1981.
5. J. F. Hall and A. K. Chopra, "Dynamic Analysis of Arch Dams including Hydrodynamic Effects", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 109, pp 149-167, 1983.
6. O. Maeso, J. J. Aznárez and J. Domínguez, "Effects of Space Distribution of Excitation on Seismic Response of Arch Dams", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 128, pp 759-770, 2002.
7. O. Maeso, J. J. Aznárez and J. Domínguez, "Three-Dimensional Models of Reservoir Sediment and Effects on the Seismic Response of Arch Dams", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, pp 1103-1123, 2004.
8. V. Lotfi, "An efficient three-dimensional fluid hyper-element for dynamic analysis of concrete arch dams", *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 24(6), pp 683-698, 2006.
9. K. Fok and A. K. Chopra, "Earthquake Analysis of Arch Dams including Dam-Water-Interaction reservoir Boundary Absorption and Foundation Flexibility", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 14, pp 155-184, 1986.
10. G. Sandberg, "A New Strategy for Fluid-Structure Problems", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 38, pp 357-370, 1995.
11. C. Bang-Fuh, "Nonlinear Hydrodynamic Effects on Concrete Dam", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 18, pp 201-212, 1996.
12. S. Kucukarslan, "Dam-Reservoir Interaction for Incompressible-Unbounded Fluid Domains Using an Exact Truncation Boundary Condition", *Proceeding of 16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, University of Washington, Seattle, 2003.
13. Y. Long, C. Zhang and Y. Xu, "Nonlinear seismic analyses of a high gravity dam with and without the presence of reinforcement", *Journal of Engineering Structures*, 31(10), pp 2486-2494, 2009.