

## بررسی اثر جرم فونداسیون بر رفتار لرزه ای سدهای بتنی وزنی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک

امیر هوشنگ اخویسی

استادیار، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران  
ahakhaveissy@razi.ac.ir

نازنین امیری

دانشجوی ارشد، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران  
nazanin.amiri23@gamil.com

کلید واژه‌ها: زلزله حوزه نزدیک، سدهای بتنی وزنی، اندرکنش مخزن-سد-فونداسیون، پاسخ لرزه ای، المان های نیمه بی نهایت

### چکیده

در دهه های اخیر، محققین به موضوع پایداری سدها در هنگام زلزله توجه بیشتری نشان داده اند. پاسخ لرزه ای سدهای بتنی تحت تاثیر عوامل زیادی قرار دارد که اندرکنش سد با مخزن و هم چنین اندرکنش سد با فونداسیون از جمله مهم ترین عوامل هستند. در این تحقیق به بررسی پاسخ لرزه ای سدهای بتنی تحت زلزله های حوزه نزدیک پرداخته شده است. اندرکنش سد-پی سبب انعطاف پذیری در پایه سازه شده و مکانیزم های میرایی اضافی از طریق میرایی مصالح و میرایی انتشار بوجود می آورد. این اثرات اندرکنشی سبب ایجاد نیروهای وابسته به فرکانس در محل تماس سد و پی می شود. در تحقیقات پیشین فقط انعطاف پذیری پی در نظر گرفته می شد و از اینرسی و میرایی آن صرف نظر می شد در حالیکه اثر جرم پی بر رفتار لرزه ای سد بسیار تاثیر گذار می باشد. در این تحقیق سد بتنی وزنی هیروی در نرم افزار آباکوس مدل سازی و مورد بررسی قرار گرفته است نتایج بیانگر اهمیت در نظر گرفتن جرم پی در بررسی رفتار سدهای بتنی تحت زلزله های حوزه نزدیک می باشد.

### مقدمه

تحلیل دینامیکی لرزه ای سیستم سد-مخزن-پی دارای پیچیدگی های زیادی می باشد. این پیچیدگی ها شامل نحوه مدلسازی پی انعطاف پذیر و نیز نحوه اعمال بارگذاری لرزه ای می باشد. پی انعطاف پذیر تمایل به افزایش پریود ارتعاشی سازه داشته و میرایی های ایجاد شده از این طریق سبب کاهش پاسخ سازه می شوند. با در نظر گرفتن جرم پی به علت انتشار امواج زلزله در محیط خاک و هم چنین بازگشت امواج زلزله پس از برخورد با مرزها به داخل محیط پی نیاز است که شرایط مرزی خاصی برای مرزهای دور پی جهت انتشار امواج به فضای نیمه بی نهایت زیر پی و عدم بازگشت امواج فشاری از مرزهای پی به داخل پی، در نظر گرفته شود.

زلزله های حوزه نزدیک به جهت نزدیکی فاصله محل منبع انتشار موج دارای خواص ویژه ای می باشند که رفتار آنها را متفاوت می سازد. نگاشت های ثبت شده در نزدیکی گسل فعال، به شدت تحت تاثیر مکانیزم گسل هستند و این نگاشت ها معمولا دارای مدت زمان موثر کمتری نسبت به نگاشت های دور از گسل هستند و در نگاشت های سرعت نزدیک گسل، یک یا چند پالس ضربه ای با دامنه بزرگ و دوره تناوب زیاد وجود دارد. این پالس توسط لغزش گسل ایجاد می شود و باعث می شود تا قسمت بزرگی از انرژی زلزله در یک یا دو پالس بطور ناگهانی به سازه وارد شود (Chai et al., 2004). در زلزله های حوزه نزدیک به جهت فاصله کوتاه بین محل شکست (منبع تولید موج) و محل دریافت آن فرصتی جهت میرا شدن فرکانسهای بالا نبوده از همین رو تاریخچه زمانی شتاب آنها محتوای فرکانسی بالایی دارند. در تحقیقات انجام شده مشاهده شده است رابطه بین محتوای فرکانسی زلزله و فرکانس اصلی سازه ها فاکتور مهمی برای پاسخ سازه ها هستند (Choi et al., 2005). از اینرو اگر سازه به علت یک تغییر مکان بزرگ در محدوده غیرخطی قرار گیرد. آنگاه فرکانس سازه کاهش خواهد یافت و پاسخ تغییر مکان بطور چشمگیری افزایش می یابد. از ویژگیهای زلزله نزدیک گسل یک حالت ضربه ای با پریود بلند است که در یک زمان کوتاه رخ میدهد. این ارتعاش ضربه ای با پریود بلند در سازه های دارای پریود زمانی بلند مانند پل ها باعث خسارت های عمده ای می شوند (Bayraktare et al., 2009). اما در سازه های با فرکانس بالا که در محدوده خطی قرار دارند تحت زلزله های نزدیک گسل که دارای محتوای فرکانسی کوتاه هستند، دارای پاسخ بزرگی نمی باشند. بررسی

های محققین به این نتیجه رسید که میزان جابجایی تاج سد تحت اثر زلزله های حوزه نزدیک نسبت به رکوردهای حوزه دور در حالتی که هر دو دارای مقدار رکورد دارای پیک شتاب یکسانی هستند بیشتر است (Akkose and Simsek, 2010). بنابراین برای حداقل کردن خسارت حاصل از زلزله به سدهای بتنی که دارای اهمیت فراوانی هستند نیازمند به مطالعات بیشتری در این زمینه هستیم.

## مدلسازی عددی

در این تحقیق مقطع غیر سرریز سد وزنی هیروی مورد تحلیل قرار گرفته است. هنگامیکه پی بدون جرم در نظر گرفته می شود ابعاد پی در نظر گرفته شده اهمیت چندانی ندارد زیرا تنها سختی آن در مدل منظور شده و شرایط مرزی آن مهم نمی باشد. اما در شرایطی که جرم پی در نظر گرفته می شود ابعاد پی و شرایط مرزی پی و همچنین در نظر گرفتن شرایط مرزی برای خروج و عدم بازگشت امواج فشاری به داخل مخزن در انتهای مخزن اهمیت می یابند. آب درون مخزن تراکم پذیر و اندرکنش سد و آب درون مخزن اندرکنش سد و پی نیز در نظر گرفته شده است. ابتدا جرم پی در مدلسازی در نظر گرفته نشده است و مجموعه سد - پی - مخزن تحت سه رکورد زلزله های امپریال ولی، کوبه و لوما که مشخصات این رکوردها در جدول (۱) آورده شد است، آنالیز شده است سپس تغییرات لازم بر روی مدل صورت گرفته و جرم پی در آنالیز وارد شده است و شرایط مرزی مناسب در انتها دور پی اعمال شده است. به منظور عدم بازگشت امواج به داخل محیط پی از المان های نامحدود در مرزها استفاده شده است. و نتایج حاصل از این دو آنالیز با هم مقایسه شده اند.

جدول ۱: مشخصات زلزله های انتخاب شده

| شماره | نام زلزله         | PGV(cm/s) | PGA(g) | PGD(cm) | فاصله تا گسل (m) |
|-------|-------------------|-----------|--------|---------|------------------|
| ۱     | امپریال ولی، ۱۹۴۰ | ۲۹/۸      | ۰/۳۱۳  | ۱۳/۳۲   | ۸/۳              |
| ۲     | کوبه، ۱۹۹۵        | ۸۵/۳      | ۰/۶۹۴  | ۱۶/۷۵   | ۱/۲              |
| ۳     | لوما، ۱۹۸۹        | ۵۵/۲      | ۰/۶۴۴  | ۱۰/۸۸   | ۵/۱              |

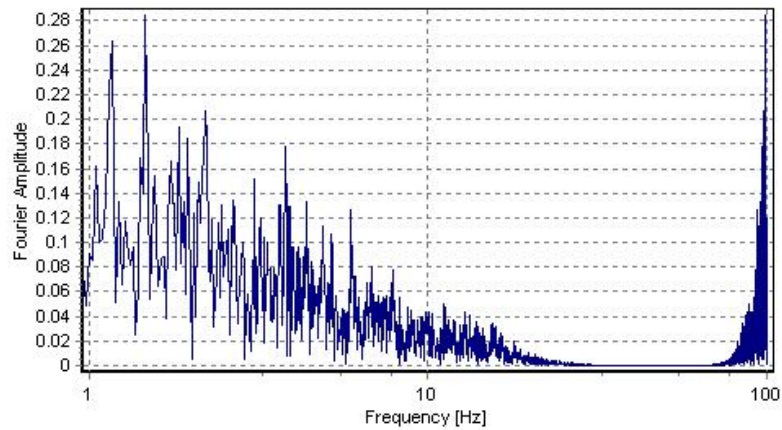
پاسخ لرزه ای سدها تحت تاثیر محتوی فرکانسی زلزله است نسبت بزرگ حداکثر سرعت به حداکثر شتاب و تاریخچه زمانی پالس مانند نگاشتهای حوزه نزدیک باعث پهنتر شدن ناحیه حساس به شتاب در طیف زلزله های حوزه نزدیک می گردد که در نتیجه آن سد در محدوده فرکانسی بیشتری تحت شتاب قرار میگرد. همچنین نزدیک بودن پریود پالس غالب به پریود طبیعی سد باعث تشدید در پاسخ شتاب میگرد. در جدول (۲) فرکانس های طبیعی سیستم سد و پی برای پنج مود اول ارائه شده است و طیف دامنه فوریه رکوردهای انتخاب شده در اشکال ۱ تا ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲: فرکانس های طبیعی سیستم بیدنه و پی سد

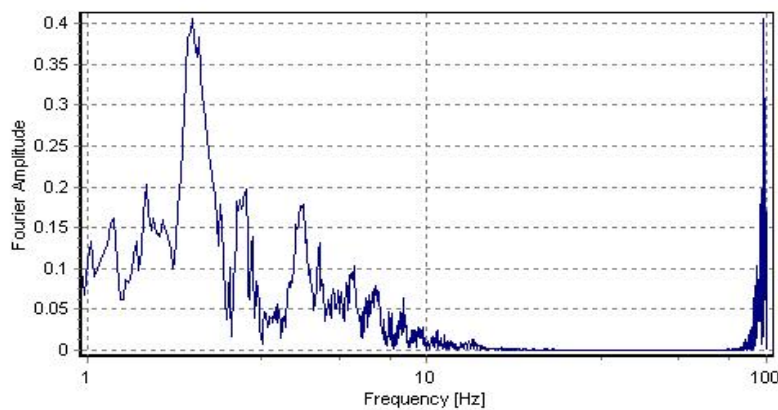
| شماره مود | فرکانس طبیعی (هرتز) |
|-----------|---------------------|
| ۱         | ۲/۱۶۲۴۳             |
| ۲         | ۳/۲۹۷۰۹             |
| ۳         | ۶/۰۹۴۶۷             |
| ۴         | ۱۹/۰۴۳۴             |
| ۵         | ۳۱/۷۸۷۳             |

مجموعه سد- مخزن - پی به صورت دو بعدی در نرم افزار آباکوس مدل شده است. برای مدل سازی سد از المان های CPS4R، برای مخزن از المان AC2D4 و برای المان های محدود پی از المان CPE4R و برای المان های نیمه بی نهایت پی از المان های CINPE4 استفاده شده است. المان های نیمه بی نهایت در تحلیل های دینامیکی مرزهای ساکن (خاموش) در المان های محدود ایجاد می کنند و از بازتاب هر گونه آشفستگی در مرزها به سمت سازه سد جلوگیری می کند. در شکل (۴) ابعاد سد و نحوه المان بندی مجموعه سد- مخزن - پی در نرم افزار نشان داده شده است. سد هیروی بر روی رودخانه سیروان واقع شده است و مقطع غیر سرریز آن دارای ارتفاع ۴۲ متر می باشد و ارتفاع آب درون مخزن ۳۹ متر و طول مخزن ۵ برابر ارتفاع سازه سد در نظر گرفته شده است.

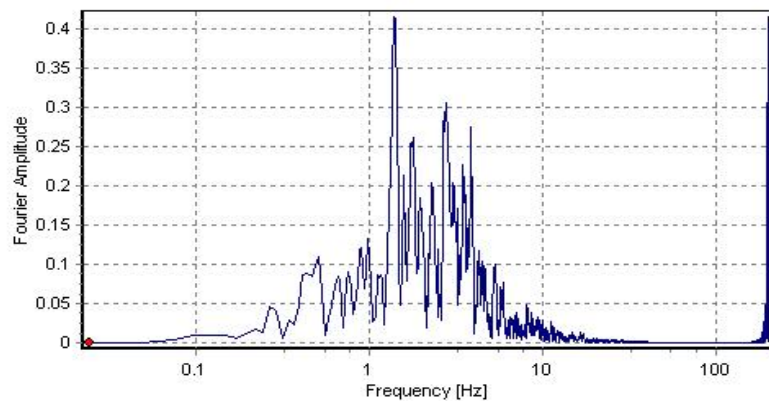




شکل ۱: طیف دامنه فوریه مولفه شتاب افقی زلزله امپریال ولی



شکل ۲: طیف دامنه فوریه مولفه شتاب افقی زلزله کوبه



شکل ۳: طیف دامنه فوریه مولفه شتاب افقی زلزله لوما

در عمل مخزن سدها دارای طول زیادی هستند که باعث می شود امواج ایجاد شده در آب در انتها از بین بروند اما در مدل سازی های عددی ما مجبور هستیم طول مخزن را محدود در نظر بگیریم بنا به تحقیقات انجام شده طولی معادل ۵ برابر ارتفاع سد، برای طول مخزن مناسب می باشد (Akhavessy and Malekshahi, 2014).

در انتها مخزن شرایط مرزی سامرفیلد را که از فرمول زیر تبعیت می کند در نظر می گیریم:

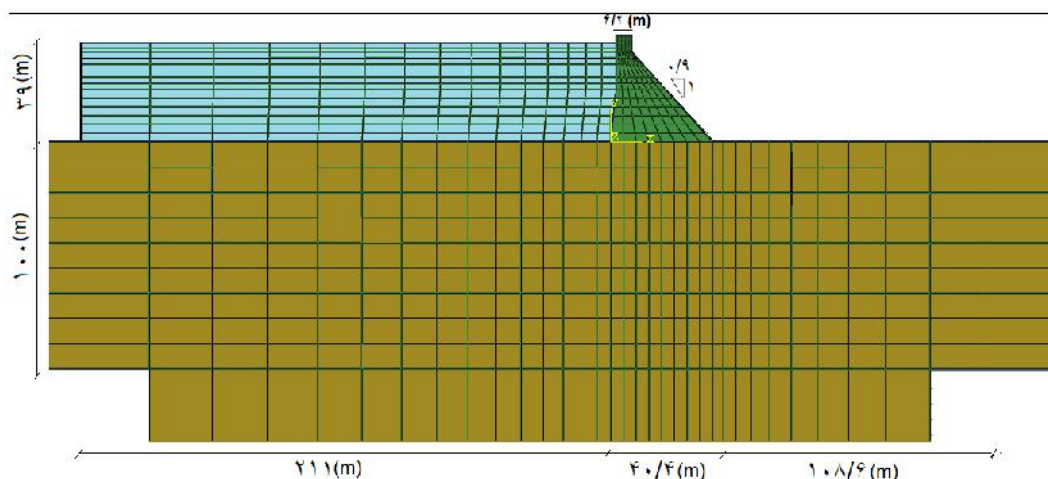
$$\frac{\partial p}{\partial n} = -(1/c) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

در معادله بالا  $p$  فشار و  $c$  سرعت صوت می باشد.

ارتباط بین فشار هیدرودینامیکی درون مخزن  $P$  با نیروی موجود بر روی فصل مشترک سد-مخزن  $F$  را ماتریس کویله  $Q$  طبق رابطه زیر

برقرار می کند:

$$\{P\}[Q] = \{F\} \quad (2)$$



شکل ۴: ابعاد سد هیروی

اندرکنش سد-مخزن یک مساله درگیر کلاسیک شامل دو معادله دیفرانسیلی درجه دو می باشد. این دو معادله برای مخزن و سد به شکل

زیر می باشد:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F_1\} + [Q]\{P\} \quad (1)$$

$$[G]\{\ddot{p}\} + [C']\{\dot{p}\} + [K']\{p\} = \{F_2\} - \dots [Q]^T \{\ddot{u}\} \quad (2)$$

در معادلات بالا  $[M]$ ،  $[C]$  و  $[K]$  به ترتیب ماتریس های جرم و میرایی و سختی سازه هستند و  $[G]$ ،  $[C']$  و  $[K']$  به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی مخزن هستند.  $\{F_1\}$  بردار نیروهای بدنه ای و هیدرواستاتیک،  $\{p\}$  و  $\{u\}$  به ترتیب بردار فشارهای هیدرودینامیکی و جابجایی هستند (آفتابی ثانی، ۱۳۸۸). مشخصات مصالح بتن سد و آب و پی در جداول زیر آورده شده است. گزارش طراحی و تحلیل بدنه سد هیروی

جدول ۳: مشخصات مصالح بتن سد

| مشخصات مصالح    | مقدار                     |
|-----------------|---------------------------|
| مدول الاستیسیته | ۲۶/۲۵ (Gpa)               |
| نسبت پواسون     | ۰/۲                       |
| چگالی           | ۲۴۰۰ (kg/m <sup>3</sup> ) |
| تنش مجاز کششی   | ۲/۱۷ (Mpa)                |
| تنش مجاز فشاری  | ۲۰ (Mpa)                  |

جدول ۴: مشخصات آب

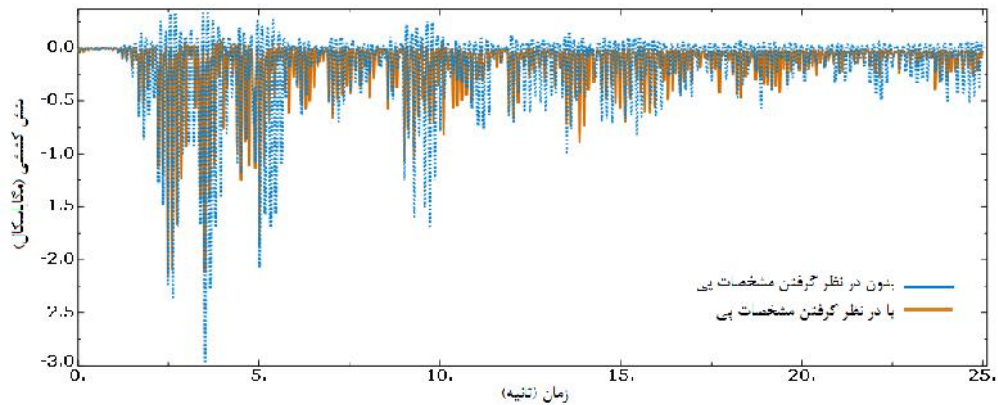
| مشخصات مصالح | مقدار                     |
|--------------|---------------------------|
| مدول بالک    | ۲/۰۷ (Gpa)                |
| چگالی        | ۱۰۰۰ (kg/m <sup>3</sup> ) |

جدول ۵- مشخصات مصالح پی

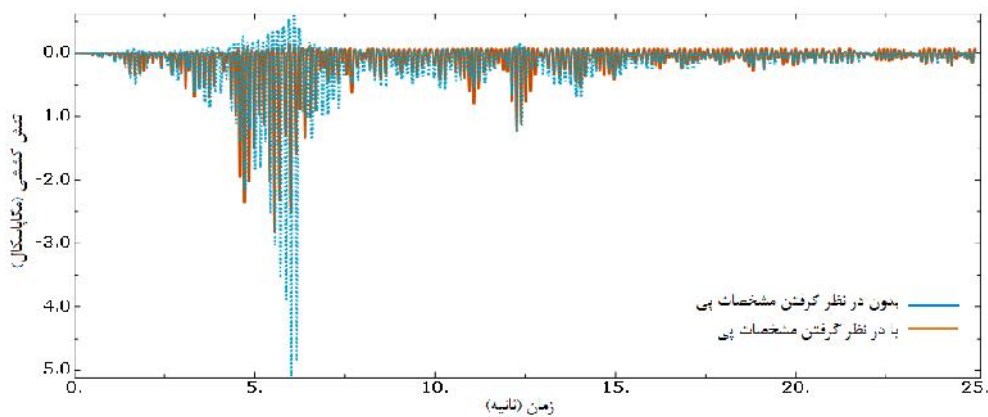
| مشخصات مصالح | مقدار                     |
|--------------|---------------------------|
| نسبت پواسون  | ۰/۲۵                      |
| چگالی        | ۲۱۰۰ (kg/m <sup>3</sup> ) |
| چسبندگی      | ۰/۲۷ (Mpa)                |
| زاویه اصطکاک | ۳۶                        |

## بحث و نتیجه گیری

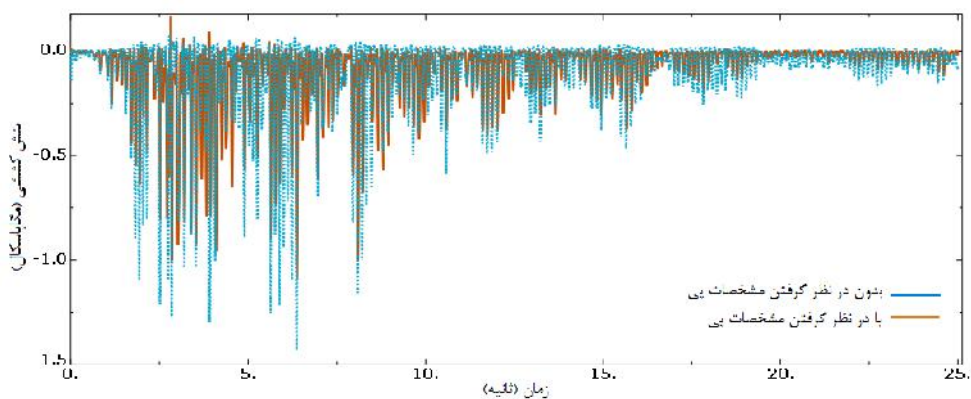
هدف از انجام این مطالعه بررسی اثرات در نظر گرفتن جرم و میرایی پی بر پاسخ های سازه سد تحت زلزله های حوزه نزدیک می باشد، سازه سد و فونداسیون آن تحت تاثیر شتاب زلزله به صورت دو سیستم مجزا عمل نمی کنند و رفتاری وابسته و اندرکنشی دارند. همانطور که در قسمت قبلی نیز بیان شد به این منظور یک بار جرم و میرایی پی در آنالیزها در نظر گرفته شده است و یک بار از خصوصیات پی در طول آنالیزها صرف نظر شده است. میزان تنش در پاشنه سد برای رکوردهای متفاوت در حالت بدون جرم و میرایی و در حالت با جرم و میرایی با هم مقایسه شده اند. همان طور که در اشکال زیر مشاهده می شود میزان تنش در پاشنه سد با در نظر گرفتن خصوصیات پیبه طور محسوسی کاهش می یابد.



شکل ۵: تنش در پاشنه سد تحت زلزله امیریال ولی



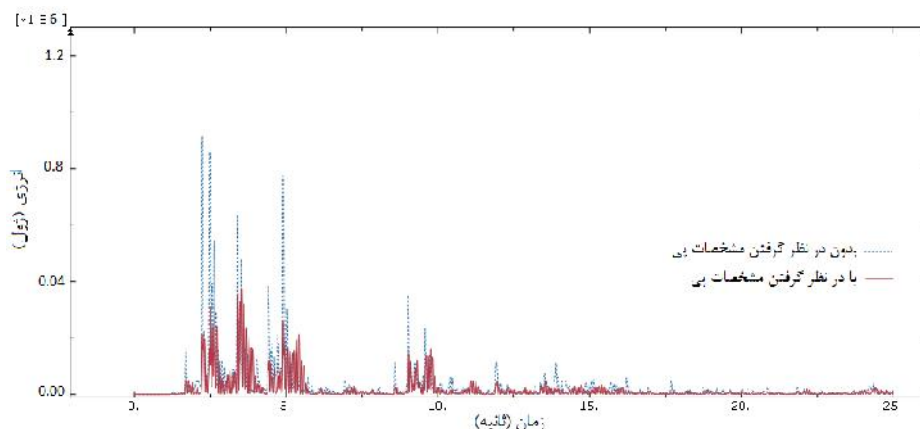
شکل ۶: تنش در پاشنه سد تحت زلزله کوبه



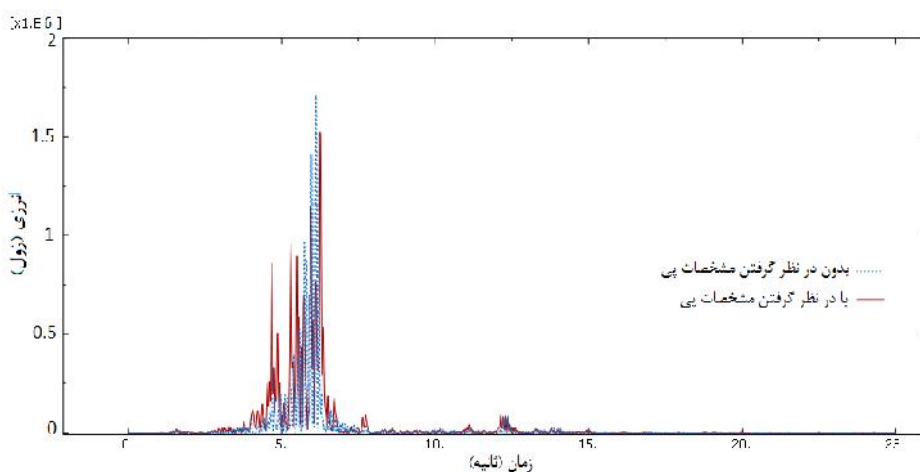
شکل ۷: تنش در پاشنه سد تحت زلزله لوما

در حالتی که اثرات جرم پی در نظر گرفته نمی شود مقدار تنش کششی ایجاد شده در پاشنه سد از تنش مجاز کششی بتن سد تجاوز کرده و نشان از ایجاد ترک خوردگی در پاشنه سد است در حالیکه با در نظرگیری اثرات جرم پی میزان تنش از تنش مجاز کششی بتن کمتر بوده

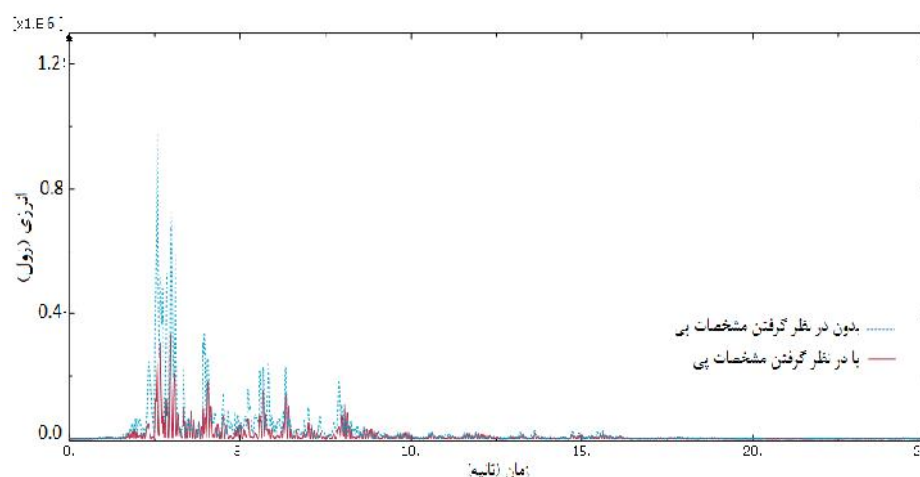
و بیان کننده این مطلب است که رفتار سد در محدوده خطی باقی می ماند. کاهش تنش های ایجاد شده در پاشنه سد ناشی از کاهش انرژی بدنه سد می باشد همان طور که در نمودارهای زیر دیده می شود میزان انرژی در این دو حالت با هم مقایسه شده اند.



شکل ۸: انرژی در بدنه سد تحت زلزله امپریال ولی



شکل ۹: انرژی در بدنه سد تحت کوبه



شکل ۱۰: انرژی در بدنه سد تحت زلزله لوما

در نزدیکی گسل ها با افزایش بزرگی زلزله میزان انرژی کرنشی درون سازه سد افزایش می یابد و باعث ترک خوردگی سد می شود اما با در نظر گرفتن میرایی حاصل از اندرکنش سد و فونداسیون میزان انرژی داخلی سد کاهش می یابد که این امر بر زمان و نحوه شکل گیری ترک ها در بدنه سد تاثیرگذار خواهد بود.





هر منبع اندرکنشی اثرات مهمی بر توابع پاسخ فرکانسی سد دارد. همان گونه که اشاره شد به علت اندرکنش سد و پی، فرکانس رزونانسی پایه سیستم، کاهش و میرایی ظاهری آن افزایش می یابد. به علت اثرات هیدرودینامیکی، منحنی های پاسخ در نزدیکی فرکانس های طبیعی آب مخزن پیچیده شده و فرکانس های رزونانسی سد کاهش می یابند. این تاثیر بیشتر بر روی فرکانس پایه دیده می شود. نسبت بزرگ حداکثر سرعت به حداکثر شتاب و تاریخچه زمانی پالس مانند نگاشتهای حوزه نزدی کباعث پهنتر شدن ناحیه حساس به شتاب در طیف زلزله های حوزه نزدیکی می گردد که در نتیجه آن سد در محدوده فرکانسی بیشتری تحت شتاب قرار میگرد. همچنین نزدیکی بودن پریود پالس غالب به پریود طبیعی سد باعث تشدید در پاسخ شتاب میگردد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که پاسخ های لرزه ای سد علاوه بر اینکه تحت تاثیر مشخصات فرکانسی زلزله ورودی است، متاثر از عوامل اندرکنشی نیز می باشد و فرض عدم در نظرگیری مشخصات پی، در پی های بدون جرم برای سایت هایی که در آنها مدول الاستیک پی اساسا کمتر از بتن توده سد می باشد، مناسب نیست در واقع در مواردی که سدها بر روی خاک نرم بنا شده اند، اثرات برهم کنش خاک و سازه پریود اصلی سیستم را افزایش داده و باعث کاهش نیروی برشی پایه می شوند. از سوی دیگر فرکانس حرکت ورودی زمین در فصل مشترک خاک و سازه، نقش مهمی در نحوه تأثیر بر هم کنش خاک و سازه دارد.

## مراجع

آفتابی ثانی ا (۱۳۸۸) تحلیل دینامیکی سد کارون ۳ با در نظر گرفتن اثر اندرکنش آب و سازه و مقایسه ی آن با یک سد قوسی دیگر، مجله فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد ، دوره سوم، شماره اول، ۴۲-۲۵

گزارش طراحی و تحلیل بدنه سد هیروی (۱۳۹۲) مطالعات مرحله دوم، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران

Akhaveissy AMandMalekshahi M (2014)The effect of reservoir length on dam reservoir interaction analysis based on the compressible fluid assumption, *JSEE*, 16(1):43-54

Akkose M andSismek E (2010) Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction, *Applied Mathematical Modeling*, 34:3685-3700

Bayraktar A, Sevim B, Altunisik AC, Turker T, Kartal ME, Akkose M and Bilici Y (2009) Comparison of near and far fault ground motion effects on the seismic performance evaluation of dam-reservoir-foundation systems, *Dam Eng*, XIX(4): 201-239

Chai J, Teng T and Liao W (2004) Numerical Simulation of Near-Fault Ground Motions and Induced Structural Responses, *13<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering*, 3309-3314

Choi I, Kim M, Choun Y and Seo J (2005) Shaking table test of structures subjected to scenario earthquakes, *Journal of the Nuclear Engineering and Technology*, 37(2)