



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۶۵ تا ۷۸  
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 65-78



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

AmirKabir Journal of Science & Research  
Civil and Environmental Engineering  
(ASJR-CEE)

## تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی در اثر حرکات غیریکنواخت انتقالی و دورانی زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن

لیلا کلانی ساروکلایی<sup>۱</sup>، بهرام نوائی نیا<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترای تخصصی عمران - سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۳۰، پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۱۳)

### چکیده

هدف این تحقیق ارائه فرمول‌بندی مناسب برای بررسی حرکات غیریکنواخت انتقالی و اثر هم‌زمان آن با مولفه دورانی حرکت زمین بر پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن به روش اجزای محدود است. بدین منظور حرکات غیریکنواخت زمین با در نظر گرفتن تاخیر زمانی حرکت امواج در کف سد و مخزن تولید می‌شوند. مولفه دورانی حرکت زمین نیز با استفاده از مولفه‌های انتقالی و نیز روابط کلاسیک نظریه الاستیسیته و نظریه انتشار امواج به صورت تابعی از فرکانس تعیین و سپس با اعمال هم‌زمان مولفه‌های انتقالی غیریکنواخت و دورانی به روش‌های مناسب، پاسخ دینامیکی مدل اجزای محدود سیستم سد - مخزن با استفاده از روش نیومارک و با در نظرگیری تغییر مکان به عنوان متغیر در گره‌های شبکه اجزای محدود کل سیستم که به روش لاگرانژی - لاگرانژی معروف است به دست می‌آید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که مولفه گهواره‌ای همراه با مقادیر بسیار کم تاخیر زمانی مولفه‌های انتقالی می‌تواند بر پاسخ دینامیکی خطی سدهای بتنی وزنی در اثر شرایط خاص، بسته به تراز آب مخزن و نیز محتوای فرکانسی حرکت زمین، تاثیرگذار باشد.

### کلمات کلیدی:

حرکات غیریکنواخت انتقالی حرکت زمین، مولفه دورانی زلزله، اندرکنش سد و مخزن، روش لاگرانژی - لاگرانژی

## ۱- مقدمه

در تحلیل سازه‌ها در اثر زمین‌لرزه، اغلب از انتشار غیریکنواخت امواج در خاک صرف‌نظر شده و فرض می‌گردد امواج زلزله به طور همزمان به تمام قیدهای سازه می‌رسند. این فرض بدان معناست که یا امواج لرزه‌ای به شکل قائم به سازه برخورد نموده و سرعت فاز افقی آنها بینهایت است و یا این که امواج به شکل مورب به سازه برخورد نموده ولی طول موج آنها در مقایسه با ابعاد سازه بسیار بزرگ است. اما در حالت کلی امواج لرزه‌ای به شکل مورب به تکیه‌گاه‌های سازه برخورد نموده و ممکن است طول موج آنها قابل مقایسه با ابعاد افقی سازه باشد که در این صورت حرکات زمین در پایه‌ها غیرهمفاز خواهند بود. نظریه در نظرگرفتن حرکات غیریکنواخت زمین اولین بار توسط چوپرا [۶] به عنوان یکی از مسائل مهم در تحلیل دینامیکی سدها مطرح شد. بعد از آن محققان دیگری به بررسی تاثیر این عامل در تحلیل خطی و غیرخطی سدهای بتنی و پاسخ فشار هیدرودینامیکی این سازه‌ها پرداختند. آن چه که اکثر این تحقیقات را از یکدیگر مجزا می‌کند روش تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی غیریکنواخت در نقاط مختلف تکیه‌گاهی و نیز روش تحلیل آنها است. در یک سری از تحقیقات، تنها عامل زمان به عنوان عامل موثر در توزیع غیریکنواخت شتاب زمین در نظر گرفته می‌شد و بر اساس آن سدهای بتنی وزنی و قوسی مورد تحلیل خطی و غیرخطی قرار می‌گرفتند [۹-۷]. بعد از آن الوز [۱۰] در مطالعه موردی بر روی سد قوسی پاکوما علاوه بر عامل زمان که ناشی از تاخیر زمانی انتشار امواج است عامل مکان را نیز به صورت ضریب تقویت توپوگرافی در نظر گرفت و به بررسی رفتار دینامیکی غیرخطی سد با استفاده از برنامه تحلیل اجزای محدود اسکادا پرداخت. وی با داشتن تاریخچه زمانی تحریک چند نقطه از بدنه و پی سد، به تولید تاریخچه زمانی تحریک و پاسخ سایر نقاط پرداخت. بیلوسی و همکاران [۱۱] نیز با استفاده از ارتعاشات تصادفی به بررسی پاسخ دینامیکی خطی سیستم سد - پی - مخزن سدهای بتنی وزنی پرداختند. آنها نیز علاوه بر در نظر گرفتن تاخیر زمانی حرکت امواج، اثرهای ناهمگنی و چسبندگی مصالح پی را به صورت عامل مکان در نظر گرفته و به مشارکت مولفه‌های شبه استاتیکی و دینامیکی در پاسخ کل سیستم اشاره نموده و نشان دادند که تنش و تغییر مکان‌های جسم سد در اثر حرکات غیریکنواخت زمین بیشتر ناشی از مولفه‌های شبه استاتیکی پاسخ بوده و با در نظر گرفتن حرکات غیریکنواخت زمین ممکن است پاسخ سازه به شکل قابل توجهی بزرگتر از پاسخ در اثر حرکات یکسان به دست آید، در حالی که توزیع فشار هیدرودینامیکی بیشتر ناشی از مولفه دینامیکی پاسخ بوده و با در نظرگیری حرکات غیریکنواخت زمین مقادیر کمتری برای آن به دست خواهد آمد.

یکی دیگر از مسائل مهم در تحلیل دینامیکی سازه‌ها، بررسی اثر هم‌زمان مولفه انتقالی و دورانی حرکت زمین بر پاسخ آنها است. در حالت کلی حرکت زمین در هر نقطه از سطح آن شامل سه مولفه حرکت انتقالی و سه مولفه حرکت دورانی (دو مولفه گهواره‌ای و یک مولفه پیچشی)

می‌باشد ولی تاکنون در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در برابر زلزله تنها اثر مولفه‌های انتقالی زلزله مد نظر بوده و مولفه‌های دورانی کمتر مورد توجه واقع می‌شدند. علت اصلی این امر کوچک بودن دامنه ارتعاش مولفه‌های دورانی و نبود امکان ثبت آنها با استفاده از دستگاه‌های استاندارد لرزه‌نگاری و نیز کوچک انگاشته شدن تاثیر آنها بر سازه‌ها است. مشکلات ثبت مولفه‌های دورانی جنبش زمین با دستگاه‌های استاندارد لرزه‌نگاری موجب شده تا محققان در صدد تولید این مولفه‌ها با استفاده از مولفه‌های انتقالی موجود برآمده و برای این منظور به استفاده از روابط نظری روی آورند. با در نظرگرفتن روابط نظری، دو روش کلی برای تولید مولفه‌های دورانی حرکت زمین با استفاده از مولفه‌های انتقالی، توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است که شامل: ۱- استخراج مولفه دورانی بر مبنای استفاده از معادله کلاسیک نظریه الاستیسیته بین حرکت انتقالی داخل صفحه و دوران عمود بر صفحه؛ ۲- استخراج مولفه دورانی بر مبنای استفاده همزمان از معادلات کلاسیک نظریه الاستیسیته و نظریه انتشار امواج هستند. روش اول توسط نیومارک [۱۲] در سال ۱۹۶۹ مطرح شد و تاثیر آن بر پاسخ سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بعدها با توسعه روش نیومارک، سه روش برای برآورد مولفه دورانی بر حسب مولفه‌های انتقالی معرفی شدند که شامل روش‌های مشتق زمانی، تفاضل محدود و ژئودتیک هستند. روش مشتق زمانی توسط محققین مختلفی از جمله غفوری آشتیانی و سینگ [۱۳] در سال ۱۹۸۶ برای برآورد مولفه پیچشی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، تنها با داشتن شتاب‌نگاشت‌های انتقالی در یک نقطه از سطح زمین می‌توان مولفه‌های دورانی حرکت زمین را به دست آورد. روش تفاضل محدود نیز در تحقیقات متعددی که توسط هوانگ [۱۴] در سال ۲۰۰۳ و قائم‌مقامیان و نوری [۱۵] در سال ۲۰۰۷ برای برآورد مولفه پیچشی انجام شده، مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش شتاب‌نگاشت حداقل دو نقطه از سطح زمین باید در دسترس باشد. روش ژئودتیک نیز توسط اسپودیچ و همکاران [۱۶] در سال ۱۹۹۵ مطرح شده است. در این روش می‌توان با به کارگیری همزمان چندین ایستگاه، مولفه‌های دورانی را با دقت بیشتری محاسبه نمود. با این حال وجود حداقل سه ایستگاه برای تعیین گرادیان جابه‌جایی افقی در این روش ضروری است. قائم‌مقامیان و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از شبکه شتاب‌نگاری مترامک چپیا به تولید مولفه‌های پیچشی با استفاده از روش ژئودتیک پرداختند و نتایج به دست آمده را با نتایج به دست آمده از روش‌های مشتق زمانی تک-ایستگاهی و روش تفاضل محدود در دو ایستگاه مورد مقایسه قرار داده و نتیجه گرفتند که مقادیر حاصل از روش مشتق زمانی در همه ایستگاه‌ها از نتایج به دست آمده از روش تفاضل محدود بیشتر بوده و مقادیر محاسبه شده با روش ژئودتیک کمتر از مقادیر به دست آمده از دو روش مذکور هستند، به طوری که گاهی نسبت حداکثر دوران در روش مشتق زمانی به روش ژئودتیک به ۳ نیز می‌رسد. در روش‌های فوق که از روش نیومارک نتیجه می‌شود، سرعت ظاهری امواج ثابت فرض می‌شود در حالی که

نظر گرفتن اثر اندرکنش دینامیکی آنها می‌باشد که روش‌های جرم افزوده، اویلری - لاگرانژی و لاگرانژی - لاگرانژی برای این منظور وجود دارد. در روش اویلری-لاگرانژی، تحلیل جامد و سیال با فرمول‌بندی مختلف اجزای محدود صورت گرفته و حل دستگاه معادلات حاکم بر سیستم زمان زیادی را می‌طلبد [۲۷]. علاوه بر این در صورتی که محاسبات با در نظرگیری تراکم‌پذیری سیال صورت گیرد محاسبات نسبت به حالت تراکم ناپذیر وقت‌گیرتر و طولانی‌تر می‌شوند. جهت رفع عیوب ذکر شده و برای ساخت فرمول‌بندی مشترک در سازه و سیال، روش لاگرانژی در محیط سیال اولین بار توسط حمدی [۲۸] پیشنهاد گردید سپس خلوتی و ویلسون فرمول‌بندی مذکور را توسعه [۲۹] و توسط احمدی و ازاکا [۳۰] به شکل موفقیت‌آمیزی برای تحلیل لرزه‌ای سدهای قوسی به کار گرفته شد. بعد از آن فرمول‌بندی روش‌های اویلری و لاگرانژی در سیال توسط محققان مختلف از جمله [۱، ۲، ۳۱] مورد ارزیابی قرار گرفتند و نشان داده شد که نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود مخزن سد به دو روش اویلری و لاگرانژی در حیطه رفتار خطی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. در این تحقیق پاسخ سدهای بتنی وزنی در حالت دو بعدی با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن به روش لاگرانژی - لاگرانژی و با اعمال شرایط سرحدی در مرزهای مخزن، در اثر تحریک همزمان مولفه‌های غیریکنواخت انتقالی و دورانی زمین مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور حرکات غیریکنواخت زمین با در نظر گرفتن تأخیر زمانی حرکت امواج در کف سد و مخزن مدل‌سازی شده است. مولفه‌های گهواره‌ای حرکت نیز با استفاده از مولفه‌های انتقالی ثبت شده مربوط به سه زلزله با محتوای فرکانسی مختلف به روش هانگ نان لی و با در نظر گرفتن سرعت امواج و زاویه موج وابسته به فرکانس تولید و به سیستم اجزای محدود سد و مخزن اعمال شده‌اند. علاوه بر این با تغییر سرعت موج برشی، تأثیر این عامل بر تأخیر زمانی و در نتیجه بر پاسخ دینامیکی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این با تغییر تراز آب مخزن و در نتیجه تغییر فرکانس ارتعاش طبیعی سیستم، اثر همزمان مولفه‌های انتقالی و گهواره‌ای نیز بر پاسخ سیستم سد - مخزن بررسی شده است. برای این منظور بر اساس فرمول‌بندی ارائه شده در این تحقیق، برنامه رایانه‌ای به روش اجزای محدود توسط نویسندگان در محیط نرم‌افزار فرترن ۹۱ تهیه شده که شامل یک برنامه اصلی و ۳۳ زیر برنامه است که قادر به مدل‌سازی اثر اندرکنش سد - مخزن به روش لاگرانژی - لاگرانژی، اثر مولفه‌های دورانی، غیریکنواختی حرکت زمین و بسیاری عوامل تأثیرگذار دیگر است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- تولید مولفه‌های دورانی حرکت زمین

در این تحقیق از روش توسعه یافته هانگ نان لی و همکاران [۲۱] برای تولید مولفه‌های دورانی حرکت زمین استفاده می‌شود. برای این منظور از تابع پتانسیل حرکت موج SV که از مرکز کانونی زمین لرزه منتشر و

امواج با فرکانس‌های مختلف می‌توانند دارای سرعت‌های متفاوتی باشند، ضمن این که در این روش تفاوتی در نحوه‌ی به دست آوردن مولفه‌های گهواره‌ای و پیچشی وجود ندارد. در روش دوم که توسط محققان مختلفی از جمله تریفیوناک و همکاران [۱۸، ۱۹] و لی و لیانگ [۲۰] مورد استفاده قرار گرفته است، از معادلات نظریه الاستیسیته و نظریه انتشار امواج به طور همزمان استفاده شده و علاوه بر سرعت ظاهری امواج، زاویه موج حادث نیز در برآورد مولفه پیچشی و گهواره‌ای مد نظر قرار گرفته است. با این وجود، در روش آنها سرعت امواج و زاویه موج حادث مستقل از فرکانس در نظر گرفته شده است. هانگ نان لی و همکاران [۲۱] با در نظر گرفتن سرعت و زاویه موج حادث وابسته به فرکانس به تولید مولفه‌های دورانی حرکت زمین پرداختند و نشان دادند که در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی حرکت امواج می‌تواند تغییراتی را در تاریخچه زمانی مولفه دورانی ایجاد نماید. به موازات روش‌های نظری اشاره شده، تلاش‌هایی نیز برای ثبت مولفه‌های دورانی حرکت زمین صورت پذیرفته است. نیگیور [۲۲] در سال ۱۹۹۴ با اجرای آزمایش انفجار شیمیایی در صحرای نوادای آمریکا موفق به اندازه‌گیری جنبش انتقالی و پیچشی با استفاده از یک حس‌گر دورانی جدید شد ولی کاربرد چنین حس‌گرهایی بسیار محدود و فقط برای دامنه‌های بالا و نیز فاصله کم دارای دقت مناسب است. در چند سال اخیر استفاده از دستگاه‌های اپتیکی به خصوص استفاده از لیزر در توسعه دستگاه‌های اندازه‌گیری مولفه پیچشی نقش زیادی داشته است. ساریانتو و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۰۶ با نصب یک حلقه لیزری در کنار شبکه لرزه‌نگاری، مولفه پیچشی حاصل از اختلاف تفاضلی مولفه‌های انتقالی و مولفه پیچشی ثبت شده در شبکه لیزری را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که در حالت کلی، بین مقادیر اندازه‌گیری شده حاصل از حلقه لیزری و شبکه لرزه‌نگاری به روش ژئودیتیک، تطابق بسیار خوبی وجود داشته و حداکثر ضریب همبستگی بین این دو مقدار به ۰/۹۴ نیز رسیده است. در سال ۲۰۰۴ لرزه‌نگارهای دورانی در ایستگاهی در تایوان نصب شده که تاکنون موفق به ثبت مولفه دورانی مربوط به چند زلزله محلی شده‌اند [۲۴]. جمع‌آوری نتایج مربوط به ثبت شتاب‌نگارهای انتقالی و دورانی در این ایستگاه در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ نشان می‌دهد که بین بیشینه شتاب انتقالی و بیشینه سرعت دورانی رابطه خطی وجود دارد. کلب [۲۵، ۲۶] در سال ۲۰۱۲ از لرزه‌نگار الکترو دینامیکی S-5-S برای ثبت مولفه دورانی حرکت زمین استفاده نمود. این دستگاه که در یکی از معادن منطقه کاروینا در کشور چک نصب شده است از یک سری مبدل سنسور و میراگر الکترو دینامیکی و همچنین از یک مبدل تغییر مکان‌های زاویه‌ای تشکیل شده است. این سنسور می‌تواند علاوه بر ثبت مولفه‌های سرعت انتقالی، تغییر مکان و سرعت زاویه‌ای را نیز ثبت نماید. با این وجود این دستگاه تنها قادر است تحریک‌های شدید با محدوده فرکانسی بین ۰/۵ تا ۲۵ هرتز که فاصله مرکز تحریک از دستگاه زیر ۱۰ کیلومتر است را ثبت نماید.

یکی دیگر از مسائل مهم در تحلیل دینامیکی سیستم سد - مخزن، در

بحرانی موج حادث هستند.

برای محاسبه تاریخچه زمانی گهواره‌ای حرکت زمین، می‌توان رابطه (۲) را به شکل مختلط و به صورت رابطه (۵) بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} \phi_{gv}(t) &= \frac{i\omega}{C_x} w = (1e^{\frac{\pi i}{2}}) \left( \frac{\omega}{C_x} \right) (R_w e^{i\theta_w}) \\ &= \left( \frac{\omega}{C_x} R_w \right) (e^{\frac{\pi + \theta_w}{2} i}) \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه بالا  $R_w$  دامنه فرکانسی مولفه قائم انتقالی و  $\theta_w$  فاز موج در فرکانس موردنظر می‌باشند که از طیف محتوای فرکانسی مولفه انتقالی  $W$  به دست می‌آیند. این رابطه همچنین نشان می‌دهد که طیف مولفه گهواره‌ای دارای دامنه‌ای برابر  $\frac{\omega}{C_x} R_w$  با بوده و اختلاف فاز آنها با مولفه انتقالی  $W$  برابر  $\frac{\pi}{2}$  است. بنابراین با استفاده از تبدیل فوریه گسسته، طیف دامنه و فاز فرکانسی مولفه‌های انتقالی محاسبه و سپس مقدار  $G$  مربوط به هر فرکانس تعیین و با جایگذاری مقدار  $G$  در روابط (۳) و (۴) و حل معادلات مذکور، مقدار  $x = \sin \theta_0$  و در نتیجه سرعت ظاهری امواج از رابطه  $C_x = \beta / \sin \theta_0$  برای فرکانس مورد نظر محاسبه می‌گردد. سپس از رابطه (۵) دامنه و فاز فرکانسی مولفه گهواره‌ای حرکت زمین تعیین و در نهایت با تبدیل عکس فوریه، تاریخچه زمانی این مولفه به دست می‌آید.

در این تحقیق فرمول‌بندی مطرح شده، شامل دستورهای تبدیل فوریه، حل معادلات (۳) و (۴) و نیز تبدیل عکس فوریه است که در نرم‌افزار مطلب (MATLAB) نسخه ۲۰۱۰ کدنویسی و مولفه گهواره‌ای حرکت زمین به دست آمده است.

## ۲-۲- ایجاد حرکات غیریکنواخت انتقالی زلزله

در حالت کلی عوامل موثر بر توزیع غیریکنواخت شتاب زمین را می‌توان به دو عامل زمانی و مکانی تقسیم‌بندی نمود که برای بستر همگن و همسان، شتاب دو نقطه  $m$  و  $n$  در سطح زمین را پس از ساده‌سازی بر حسب زمان می‌توان با رابطه (۶) بیان نمود [۱۰]:

$$A_n(t) = A_m(t - \tau_{n,m}) \quad (6)$$

که در آن و به ترتیب شتاب نقاط دلخواه  $m$  و  $n$  زمان  $t$  و  $\tau_{n,m}$  تاخیر زمانی رسیدن موج از نقطه  $m$  به  $n$  بوده و از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

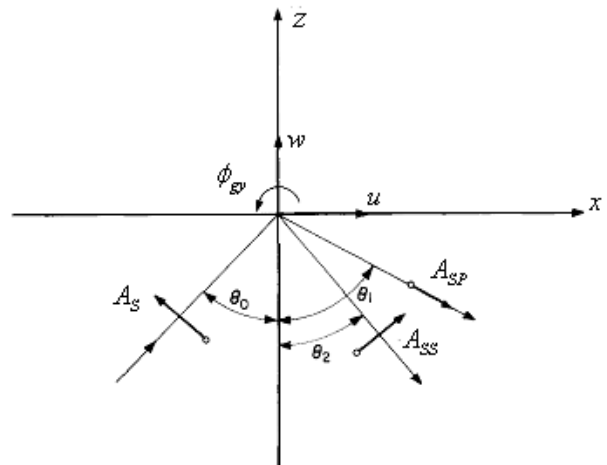
$$\tau_{n,m} = \frac{l_{n,m}}{V} \quad (7)$$

که در آن  $l_{m,n}$  فاصله دو نقطه مورد بررسی و  $V$  سرعت حرکت موج در این فاصله است.

## ۲-۳- فرمول‌بندی اجزای محدود

در این تحقیق از روش لاگرانژی - لاگرانژی برای تحلیل اندرکنش دینامیکی سیستم سد - مخزن به روش اجزای محدود استفاده می‌شود. معادله تعادل دینامیکی یک سیستم  $n$  درجه آزادی که در اثر شتاب زمین

به سمت سطح زمین حرکت می‌نماید برای تولید مولفه دورانی حرکت زمین در صفحه  $x-z$  که به مولفه گهواره‌ای معروف است استفاده می‌شود [۳]. شکل (۱)، نحوه انتشار موج حادث  $SV$  با دامنه  $(A_S)$  و امواج بازتاب شده  $P$  و  $SV$  ناشی از آن در سطح زمین با دامنه‌های  $(A_{SP})$  و  $(A_{SS})$  و زاویه آنها با محور  $z$  را نشان می‌دهد. همچنین مولفه‌های انتقالی  $u$  و  $w$  مولفه گهواره‌ای نظیر  $\phi_{gv}$  ناشی از انتشار موج حادث  $SV$  در صفحه  $y=0$  نیز در این شکل نشان داده شده‌اند. گفتنی است که در شکل (۱) زوایای موج حادث  $\theta_0$  و موج بازتابیده شده  $SV$ ،  $\theta_2$ ، با هم برابر و زاویه موج بازتابیده  $P$  برابر  $\theta_1$  است.



شکل ۱: نحوه‌ی انتشار موج  $SV$  و امواج بازتابی ناشی از آن در سطح زمین [۲۱]

با استفاده از تابع پتانسیل حرکت موج  $SV$ ، شرط مرزی تنش برشی صفر در سطح زمین و نیز رابطه کلاسیک نظریه الاستیسیته بین چرخش و تغییرمکان، رابطه (۱)، مولفه گهواره‌ای حرکت به صورت رابطه (۲) به دست می‌آید [۳، ۳۲]:

$$\phi_{gv} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\phi_{gv} = \frac{i\omega}{C_x} w \quad (2)$$

که در آن  $C_x = \beta / \sin \theta_0$  سرعت ظاهری امواج،  $\beta$  سرعت امواج برشی و  $\omega$  سرعت زاویه‌ای حرکت موج می‌باشند.

در روش توسعه یافته هانگ نان لی و همکاران [۲۱] با تغییر متغیر  $x = \sin \theta_0$ ، از روابط (۳) و (۴) برای محاسبه زاویه موج حادث استفاده می‌شود:

$$G = \frac{2x \sqrt{1 - K^2 x^2}}{K(1 - 2x^2)}, \quad \theta_0 < \theta_c \quad (3)$$

$$G = -\frac{2x \sqrt{1 - K^2 x^2}}{iK(1 - 2x^2)}, \quad \theta_0 > \theta_c \quad (4)$$

که در روابط بالا  $G = \text{tg} \bar{e} = w/u$ ،  $K = \alpha/\beta$  و  $\theta_c = \arcsin(\beta/\alpha)$  زاویه

قرار گرفته باشد را می‌توان به فرم زیر بیان نمود:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P_{eff}(t) \quad (8)$$

که در آن  $m$  و  $c$  و  $k$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی،  $\ddot{u}(t)$  و  $\dot{u}(t)$  و  $u(t)$  به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و تغییر مکان نقاط گرهی شبکه اجزای محدود،  $P_{eff}(t) = -m\ddot{U}_g(t)$  بردار تغییر مکان صلب درجات آزادی سازه به ازای تغییر مکان واحد زمین بوده که در حالت حرکت یکنواخت شامل درایه‌های صفر و یک است و  $\ddot{U}_g(t)$  نیز بردار شتاب حرکت زمین در حالت کلی است [۳۳].

ماتریس جرم مورد استفاده در این تحقیق به روش هینتون [۳۴] و به فرم یک ماتریس قطری به کار گرفته می‌شود. به دلیل وجود درزهای انقباض در بعد سوم سدهای بتنی وزنی، تحلیل این گونه سازه‌ها معمولاً به صورت دوبعدی انجام می‌شود. در این تحقیق برای محیط سد اجزای هشت‌گره‌ای با وضعیت تنش مسطح و ۹ نقطه انتگرال‌گیری و برای محیط سیال از اجزای نه‌گره‌ای با ۴ نقطه انتگرال‌گیری برای اعمال تکنیک نقاط انتگرال‌گیری کاهش‌یافته در روش لاگرانژی استفاده شده است. علاوه بر این برای اعمال شرط مرزی بین جامد و سیال از اجزای تماسی شش‌گره‌ای با سه نقطه انتگرال‌گیری استفاده شده است. اجزای مورد استفاده دوبعدی و با دو درجه آزادی مستقل انتقالی در هر گره می‌باشند که برای اعمال شتاب دورانی زلزله به مدل اجزای محدود سیستم سد - مخزن از تبدیل آن به شتاب انتقالی معادل استفاده می‌شود. درستی عملکرد اجزای مذکور توسط مولفین مقاله در تحقیقات پیشین [۴، ۵] مورد بررسی قرار گرفته است.

ماتریس سختی کل سیستم از سر هم نمودن ماتریس سختی نظیر اجزای سد  $K_D$ ، مخزن  $K_R$  و نیز اجزای تماسی  $K_{INT}$  از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$K = K_D + K_R + K_{INT} \quad (9)$$

در رابطه بالا  $K_{INT}$  برای اعمال شرایط مرزی آزادی لغزش و نیز جدا نشدن سد از مخزن در مرز مشترک آنها که توسط اجزای تماسی اعمال می‌گردد در نظر گرفته شده است [۴، ۵]. نکته قابل توجه این است که در تشکیل ماتریس سختی اجزای مخزن برای اعمال قید نبود چرخش از تابع جریمه استفاده شد. بدین منظور برای جلوگیری از به وجود آمدن سختی کاذب ناشی از قید نبود چرخش از انتگرال‌گیری کاهش یافته با تعداد نقاط گاوس  $2 \times 2$  استفاده است [۲۸-۳۱]. در تعیین ماتریس سختی اجزای سیال از رابطه (۱۰) استفاده شده که در آن  $S_f$  سختی ناشی از امواج سطحی می‌باشد.

$$K_R = \int_V B^T C_f B dV + S_f \quad (10)$$

$$S_f = \rho_w \cdot g \int_{S_3} N^T \cdot N ds \quad (11)$$

در روابط بالا  $N$  تابع شکل گره‌های سطح سیال،  $B$  ماتریس دیفرانسیلی توابع شکل،  $B^T$  ترانزپانده ماتریس  $B$ ،  $C_f$  ماتریس الاستیسیته سیال

مطابق رابطه (۱۲)،  $S$  دامنه سطح سیال و  $V$  دامنه مخزن،  $\rho_w$  چگالی آب و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد.

$$C_f = \begin{bmatrix} K_w & 0 \\ 0 & 100K_w \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در رابطه بالا  $K_w$  مدول بالک آب مخزن می‌باشد.

ماتریس میرایی کل سیستم نیز از مجموع میرایی داخلی  $C_{int}$  و میرایی ناشی از انتشار امواج در مرز بالادست مخزن  $C_{rad}$  مطابق رابطه (۱۳) به دست می‌آید [۳۱].

$$C = C_{int} + C_{rad} \quad (13)$$

میرایی داخلی را با استفاده از رابطه (۱۴) می‌توان به ماتریس جرم و سختی کل سیستم ارتباط داد [۳۳].

$$C_{int} = \alpha_1 [M] + \beta_1 [K] \quad (14)$$

که  $\alpha_1$  و  $\beta_1$  به ترتیب از روابط (۱۵) و (۱۶) قابل محاسبه می‌باشند [۳۱].

$$\alpha_1 = 2\omega_1 \xi_1 - (\omega_1^2 \beta_1) \quad (15)$$

$$\beta_1 = 2 \frac{(\xi_1 \omega_1 - \xi_2 \omega_2)}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \quad (16)$$

در روابط بالا  $\omega_1$  و  $\omega_2$  دو فرکانس مود ارتعاشی سیستم سد - مخزن و  $\xi_1$  و  $\xi_2$  نیز ضرایب میرایی نظیر آنها می‌باشند.

میرایی ناشی از انتشار امواج در بالادست مخزن نیز از رابطه (۱۷) قابل محاسبه می‌باشد [۳۱].

$$C_{rad} = \rho_w \cdot C_w \int_{S_1} N^T \cdot N ds \quad (17)$$

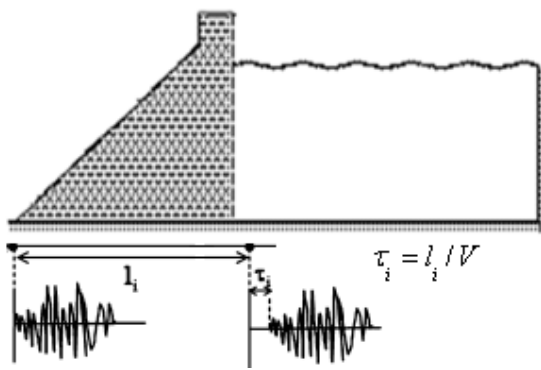
در روابط بالا تابع  $N$  شکل اجزای آب و  $C_w$  نیز سرعت انتشار موج در آب می‌باشد.

### ۲-۳-۱- اثر مولفه گهواره‌ای شتاب زمین

برای محاسبه  $P_{eff}(t)$  در حالتی که اثر همزمان مولفه‌های انتقالی و گهواره‌ای مد نظر باشد، لازم است که شتاب انتقالی نقاط مختلف سیستم با توجه به بحث سینماتیک اجسام صلب و نظریه مربوطه محاسبه گردد [۳۵]. مطابق شکل (۲)، که حرکت عمومی یک جسم صلب و شتاب‌های مربوط به دو حرکت انتقالی و گهواره‌ای را نشان می‌دهد، در صورتی که  $\omega$  و  $\alpha$  به ترتیب سرعت و شتاب زاویه‌ای،  $x$  و  $z$  مختصات نقاط مورد نظر نسبت به مبدا دوران و  $r$  نیز بردار موقعیت ذره باشد، شتاب‌های نرمال و مماسی ناشی از حرکت گهواره‌ای بالا از رابطه (۱۸) قابل محاسبه می‌باشند [۳۵].

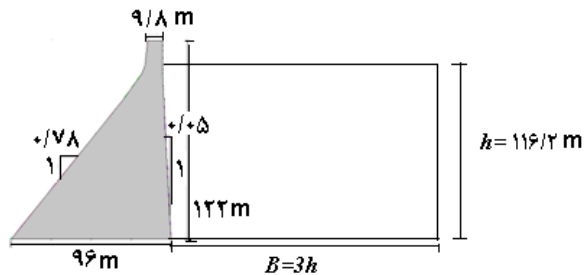
$$\begin{cases} a_t = r\alpha \\ a_n = r\omega^2 \end{cases} \quad (18)$$

با تبدیل این مولفه‌های شتاب از مختصات نرمال و مماسی به مختصات کارترین، رابطه (۱۹) نتیجه خواهد شد [۵].



شکل ۳: حرکت موج در کف سد و مخزن و تاخیر زمانی ناشی از آن مطابق نظریه مطرح شده، انجام شده است.

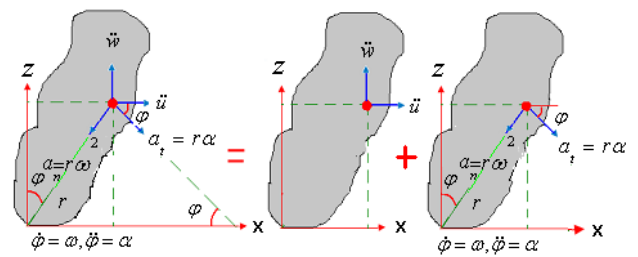
مشخصات هندسی سد پایین فلت و مخزن آن در شکل (۴) نشان داده شده که در آن حداکثر تراز سطح آب نسبت به کف سد ۱۱۶/۲ متر بوده و طول مخزن سد نیز سه برابر ارتفاع آن در نظر گرفته شده است [۳]. در کلیه تحلیل‌ها در این تحقیق، محیط سد و مخزن ایزوتروپ و همگن با رفتار الاستیک خطی فرض شده است. ضریب استهلاک مصالح سد در دو فرکانس ارتعاشی اول سیستم سد - مخزن به ترتیب ۴ و ۵ درصد و ضریب استهلاک مخزن نیز ۱ در صد در نظر گرفته شده است. علاوه بر این مشخصات مکانیکی شامل چگالی  $1000 \text{ kg/m}^3$  و مدول بالک  $2/07 \text{ GPa}$  برای آب مخزن و نیز چگالی  $2500 \text{ kg/m}^3$  مدول الاستیسیته  $22/75 \text{ GPa}$  و ضریب پواسون  $0/2$  برای مصالح بتن سد لحاظ شده است [۳]. در این تحقیق تعداد اجزای به کار رفته در تحلیل سیستم سد - مخزن با



شکل ۴: مشخصات هندسی سد پایین فلت به همراه مخزن

استفاده از تحلیل حساسیت پاسخ تغییرمکان تاج سد نسبت به تعداد اجزا به دست آمده است به طوری که در عین حفظ دقت، سرعت محاسبات اجزای محدود سیستم بالا رود. بر این اساس تعداد اجزای انتخابی در محیط سد و مخزن به ترتیب ۶۳۰ و ۵۴۰ و تعداد اجزای تماسی برابر ۳۶ در نظر گرفته شده است.

برای تعیین پاسخ سیستم سد - مخزن از سه شتاب‌نگاشت تفت، نورث‌ریچ و سن‌فرناندو مطابق جدول (۱) استفاده شده است. به دلیل تاثیر سرعت امواج برشی بر دامنه مولفه دورانی، سعی شده است سه زلزله مورد بررسی دارای تنوع سرعت امواج برشی باشند. علاوه بر این در انتخاب این شتاب‌نگاشت‌ها، یکی بودن مکانیزم گسلس و بزرگای زلزله‌ها نیز مدنظر قرار گرفته است.



شکل ۲: حرکت عمومی جسم صلب و شتاب‌های ناشی از آن

$$\begin{cases} a_x = \alpha z - \omega^2 x \\ a_n = -(\alpha x + \omega^2 z) \end{cases} \quad (19)$$

با جمع نمودن شتاب‌های انتقالی با شتاب‌های انتقالی معادل ناشی از شتاب‌های دورانی به کمک رابطه (۱۹)، رابطه (۲۰) برای محاسبه شتاب انتقالی معادل به دست می‌آید.

$$\{\ddot{\mathbf{U}}_g(\mathbf{t})\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_g(t) + \alpha z - \omega^2 x \\ \ddot{w}_g(t) - (\alpha x + \omega^2 z) \end{Bmatrix} \quad (20)$$

با اعمال شتاب‌های بالا به گره‌های اجزای محدود سیستم سد - مخزن به ترتیب در جهات  $x$  و  $z$  می‌توان اثر همزمان مولفه‌های انتقالی و گهواره‌ای حرکت زمین را در نظر گرفت. نکته قابل توجه این است که به دلیل تاثیر بسیار ناچیز اینرسی دورانی در مقایسه با سایر جملات شتاب، از اثر آن صرف‌نظر شده است.

### ۲-۳-۲- اثر حرکات غیریکنواخت زمین

برای محاسبه بردار  $I$  ناشی از تغییرمکان صلب درجات آزادی سازه در محاسبه بردار بار گرهی موثر  $P_{eff}(t)$  در حالتی که شتاب غیریکنواخت انتقالی مطابق شکل (۳) بر سیستم اعمال می‌شود می‌توان از رابطه (۲۱) استفاده نمود [۳۳].

$$I = -k_s^{-1} k_{sg} \quad (21)$$

در رابطه بالا  $k_s$  و  $k_{sg}$  به ترتیب ماتریس سختی نظیر درجات آزادی غیرمقید سیستم سد - مخزن به ازای تغییرمکان واحد درجات آزادی غیرمقید و مقید آن است که مطابق رابطه (۲۲) از ماتریس سختی کل سیستم قابل استخراج است [۳۳].

$$[k] = \begin{bmatrix} k_g & k_{sg} \\ k_{sg} & k_s \end{bmatrix} \quad (22)$$

### ۳- نتایج عددی

در این تحقیق برای تحلیل دینامیکی سیستم سد - مخزن با در نظر گرفتن اثر همزمان مولفه‌های انتقالی و گهواره‌ای زلزله و حرکات غیریکنواخت انتقالی بر مبنای فرمول‌بندی ارائه شده در بند ۲، برنامه رایانه‌ای به زبان فرترن تهیه و به کمک آن تحلیل دینامیکی سیستم سد - مخزن سد پایین فلت در اثر تحریک یکنواخت، غیریکنواخت و نیز مولفه گهواره‌ای زلزله،

## ۳-۱- بررسی درستی فرمول بندی

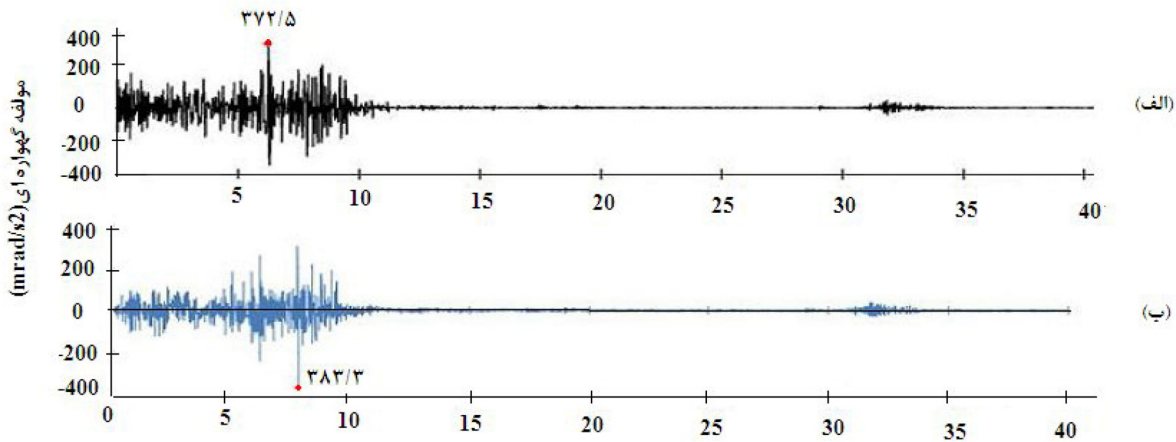
برای بررسی درستی فرمول بندی مورد استفاده و نیز عملکرد برنامه رایانه‌ای تهیه شده در محاسبه مولفه‌های گهواره‌ای، نتایج این تحقیق با نتایج به دست آمده توسط لی و لیانگ [۲۰] مقایسه شده است. مقادیر بیشینه به دست آمده برای مولفه گهواره‌ای و پیچشی زلزله سن فرناندو در مرجع [۲۰] به ترتیب  $0/3725$  و  $0/2480 \text{ rad/s}^2$  و در روش مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب  $-0/3833$  و  $-0/2545 \text{ rad/s}^2$  به ازای سرعت موج برشی  $300 \text{ m/s}$  است که نتایج بسیار به هم نزدیک و اختلاف آنها کمتر از ۳ درصد است. علت این اختلاف را نیز می‌توان به  $\frac{\omega}{C_x}$  ارتباط داد که مقدار  $C_x$  توسط لی و لیانگ تقریبی‌تر و مستقل از فرکانس در نظر گرفته شده، در حالی که در این تحقیق وابسته به فرکانس لحاظ شده است. علاوه بر این تاریخچه زمانی مولفه گهواره‌ای زلزله مذکور با نتایج مرجع [۲۰] مقایسه و مطابق شکل (۵) دقت بسیار مناسبی بین نتایج حاصل شده است. در این تحقیق برای بررسی دقیق‌تر درستی فرمول بندی به کار رفته در تولید مولفه دورانی، از داده‌های ثبت شده توسط لرزه‌نگارهای دورانی S-5-S نیز استفاده شده که در سال ۲۰۱۱ اندازه‌گیری و در مراجع [۲۵، ۲۶] ارائه گردیده است. در شکل (۶) نتایج سرعت دورانی ثبت شده توسط لرزه‌نگار S-5-S و تولید شده در تحقیق حاضر با هم مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده دارای ضریب همبستگی

$0/833$  می‌باشند که نشان‌دهنده تطابق و دقت نسبتاً مناسب روش مورد استفاده در تحقیق حاضر می‌باشد.

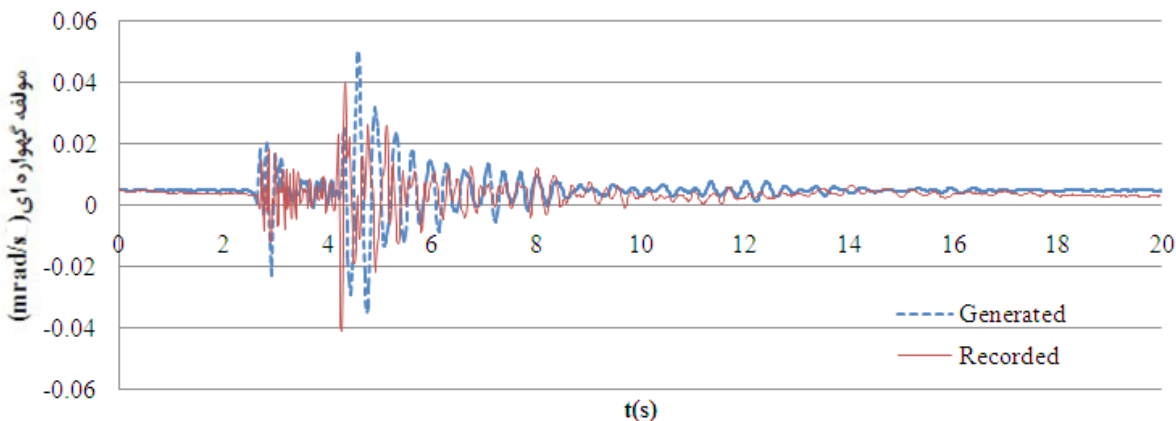
برای بررسی درستی برنامه رایانه‌ای تهیه شده در مدل‌سازی حرکات غیریکنواخت زمین، سد پایین فلت در حالت مخزن پر، یک بار در اثر تحریک همزمان مولفه‌های افقی و قائم انتقالی و مولفه گهواره‌ای (تحریک سه مولفه‌ای) و نیز در اثر تحریک فقط مولفه‌های افقی و قائم انتقالی (تحریک دو مولفه‌ای) به صورت تحریک یکنواخت قرار گرفته و بار دیگر با محاسبه بردار از رابطه (۲۱) در اثر همان شتاب‌ها در کلیه نقاط تکیه‌گاهی مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در دو حالت مذکور کاملاً بر یکدیگر منطبق بوده که به عنوان نمونه نتایج تغییرمکان افقی تاج سد در حالت تحریک سه مولفه‌ای زلزله تفت به دو روش مذکور در شکل (۷) نشان داده شده است.

برای کنترل درستی فرمول بندی مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود سیستم، تغییرمکان افقی و قائم تاج سد پایین فلت در اثر مولفه‌های S۶۹E و قائم زلزله تفت با نتایج تحلیلی چوپرا [۳۶] و نیز سایر محققان [۱، ۲، ۴] مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در تمامی حالات تطابق بسیار خوبی بین نتایج به دست آمده وجود دارد [۴] و [۵].

## ۳-۲- تحلیل دینامیکی



شکل ۵: تاریخچه زمانی مولفه گهواره‌ای زلزله سن فرناندو، (الف) مرجع [۲۰]، (ب) تحقیق حاضر



شکل ۶: تاریخچه زمانی سرعت دورانی ثبت شده توسط S-5-S و به دست آمده در تحقیق حاضر

برای بررسی اثر حرکات غیریکنواخت انتقالی و چرخشی زلزله بر پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی، سیستم سد - مخزن سد پایین فلت در سه حالت فقط در اثر دو مولفه یکنواخت انتقالی زلزله، در اثر دو مولفه غیریکنواخت انتقالی و نیز در اثر همزمان مولفه‌های غیریکنواخت انتقالی و گهواره‌ای زلزله (سه مولفه‌ای) تحلیل شده که به عنوان نمونه نتایج تغییرمکان افقی و قائم تاج سد به صورت کیفی در اثر سه تحریک مذکور برای زلزله تفت در دو حالت مخزن خالی و پر در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده و نتایج کمی آن در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. علاوه بر این با تغییر امتداد حرکت زلزله در کف سد، تاثیر جهت حرکت موج و تاخیر زمانی ناشی از آن نیز بر پاسخ تغییرمکان تاج سد مورد بررسی قرار گرفته که به عنوان نمونه نتایج برای حالت مخزن پر در اثر زلزله تفت در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۸)، مولفه گهواره‌ای شتاب زلزله تفت و نیز غیریکنواختی حرکت زمین تاثیر کمی بر پاسخ تاج سد در حالت مخزن خالی دارند. این موضوع برای هر دو مولفه تغییرمکان افقی و قائم تاج سد صادق است به طوری که مطابق جدول‌های (۲) و (۳)، غیریکنواختی حرکت زمین موجب کاهش پاسخ به نسبت حدود  $0/65$  برابر پاسخ در اثر تحریک یکنواخت و اثر مولفه دورانی موجب افزایش پاسخ به نسبت حدود  $1/03$  برابر پاسخ در اثر تحریک دو مولفه‌ای شده است در حالی که مطابق شکل (۹) در حالت مخزن پر اختلاف قابل توجهی بین پاسخ تاج سد به تحریک دو مولفه‌ای یکنواخت و سه مولفه‌ای غیریکنواخت زلزله به چشم می‌خورد به طوری که نسبت این تغییرات با توجه به جدول‌های (۲) و (۳) به حدود ۸ برابر می‌رسد. این مساله می‌تواند به دلیل افزایش سختی سیستم سد - مخزن با افزایش ارتفاع مخزن باشد که در این حالت اثر مولفه دورانی افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این وجود مخزن می‌تواند مسیر پیموده شده توسط امواج را افزایش داده و در نتیجه تاخیر زمانی بیشتری در تحریک غیریکنواخت را نتیجه دهد. این مساله می‌تواند بر پاسخ سد تاثیرگذار باشد. یکی دیگر از دلایلی که می‌تواند این مساله را توجیه نماید نزدیک شدن فرکانس ارتعاش طبیعی سیستم سد و مخزن در حالت مخزن پر به فرکانس غالب زلزله‌ها در این حالت می‌باشد که می‌تواند موجب تشدید پاسخ‌ها گردد.

در شکل (۱۰) پاسخ تغییرمکان افقی تاج سد در حالت مخزن پر در اثر تحریک دو مولفه‌ای غیریکنواخت زلزله تفت در دو حالت مختلف، وقتی که زمان شروع تحریک در پنجه سد و نیز در انتهای کف مخزن باشد با هم مقایسه شدند. همان‌طور که از شکل پیداست با تغییر امتداد و نیز موقعیتی که زلزله در آن شروع به تحریک می‌گردد تاریخچه زمانی پاسخ از نظر کیفی دستخوش تغییرات قابل توجهی شده در حالی که مقادیر بیشینه آن تغییر قابل توجهی نخواهد داشت، به طوری که زمان وقوع پاسخ بیشینه از  $4/7$  به ثانیه ۵ منتقل شده و مقدار بیشینه پاسخ نیز حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد.

در این تحقیق مولفه گهواره‌ای و تاخیر زمانی حرکت نظیر سه زلزله

مورد بررسی با در نظر گرفتن سرعت موج برشی مطابق جدول (۱) و نیز به ازای دو و چهار برابر مقادیر مذکور محاسبه و با تغییر تراز آب مخزن، پاسخ سد پایین فلت در اثر سه تحریک بالا به دست آمده است. مقادیر بیشینه تغییرمکان افقی و قائم تاج سد و پاسخ نرمال شده آن که نسبت پاسخ تحریک دو مولفه‌ای غیریکنواخت به پاسخ تحریک دو مولفه‌ای یکنواخت، که به ترتیب برای مولفه افقی و قائم با  $N1V$  و  $N1H$ ، و نیز نسبت پاسخ تحریک سه مولفه‌ای غیریکنواخت به پاسخ تحریک دو مولفه‌ای یکنواخت، که به ترتیب برای مولفه افقی و قائم با  $N2V$  و  $N2H$  مشخص شده، در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده‌اند. نتایج ارائه شده در جدول‌های (۲) و (۳) نشان می‌دهد که غیریکنواختی حرکت زمین باعث کاهش پاسخ نرمال تغییر مکان افقی تاج سد،  $N1H$ ، در اکثر موارد در حالت مخزن خالی، یک سوم پر و دو سوم پر شده در حالی که در حالت مخزن پر این عامل باعث افزایش نسبتاً قابل توجه پاسخ شده است. این مساله می‌تواند نشان‌دهنده تاثیر غیریکنواختی حرکت زمین بر توزیع فشار هیدرودینامیک باشد که با افزایش تراز آب اثر آن نمایان تر می‌شود، به طوری که بیشینه کاهش و نیز افزایش پاسخ نرمال شده  $N1H$  مربوط به زلزله تفت در حالت مخزن یک سوم پر و مخزن پر به ترتیب به  $0/620$  و  $8/260$  می‌رسد. این موضوع در مورد پاسخ نرمال شده تغییرمکان قائم تاج سد،  $N1V$ ، نیز قابل مشاهده است به طوری که بیشینه کاهش آن به  $0/583$  در حالت مخزن یک سوم پر و بیشینه افزایش آن به  $7/091$  در حالت مخزن پر می‌رسد.

اثر همزمان حرکت غیریکنواخت زمین و نیز مولفه چرخشی زلزله، مطابق جدول‌های (۲) و (۳)، در اکثر موارد افزایش پاسخ نرمال تاج سد،  $N2H$  و  $N2V$ ، را به دنبال خواهد داشت. در برخی موارد، به عنوان نمونه در مورد زلزله نورتریج، اثر مولفه گهواره‌ای بر پاسخ نسبتاً زیاد بوده و این مساله می‌تواند از بزرگ بودن مقدار بیشینه شتاب زاویه‌ای مربوط به زلزله مذکور و نزدیک بودن فرکانس غالب مولفه گهواره‌ای زلزله به فرکانس طبیعی سیستم ناشی شود [۵]. علاوه بر این در برخی موارد در این جدول اثر غیریکنواختی نمایان تر از اثر مولفه گهواره‌ای است. این مساله در حالت مخزن پر مشهودتر بوده که علت آن نیز افزایش فشار هیدرودینامیک ناشی از حرکات غیریکنواخت زمین است.

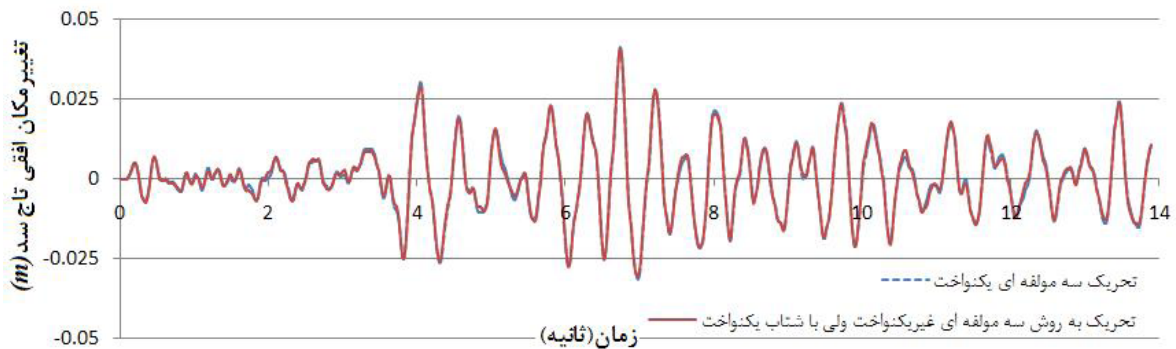
برای بررسی اثر مولفه دورانی و غیریکنواختی حرکت زمین بر توزیع تنش در بدنه سد، منحنی تنش کششی اصلی در اثر تحریک‌های مختلف به دست آمده و به عنوان نمونه منحنی تنش سد در حالت مخزن پر در اثر تحریک یکنواخت  $2C$  و  $2C+R$  زلزله تفت در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، مولفه دورانی حرکت زمین، بیشینه تنش کششی در بدنه سد را افزایش می‌دهد و در نتیجه با در نظر گرفتن مولفه دورانی، تغییر مکان افقی و قائم تاج سد نیز تا حدود ۸ برابر افزایش می‌یابند.

برای بررسی اثر سرعت موج برشی زلزله بر پاسخ سد در حالت مخزن پر به ازای تحریک‌های مختلف، نتایج پاسخ نرمال شده سد پایین فلت به

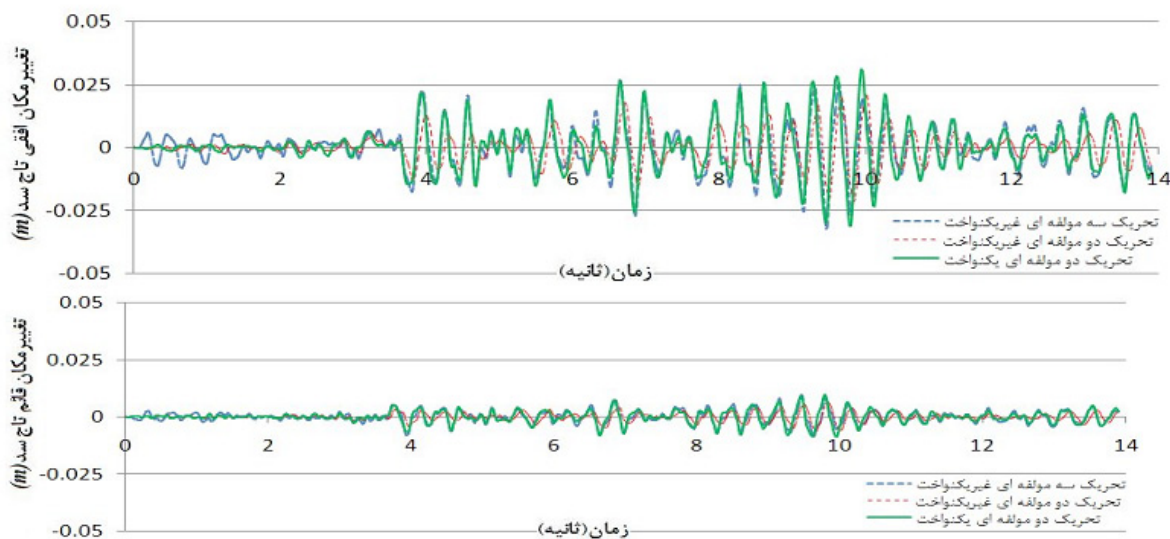


جدول ۱: مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در این تحقیق

زلزله	تاریخ وقوع	ایستگاه	فاصله مرکز سطحی (km)	مولفه ثبت شده	PGA (g)	سرعت موج برشی (m/s)
تفت	۱۹۵۲/۷/۲۱	Lincoln School	۳۵	Vertical	۰/۱۵۵	۳۸۵/۴
				S69E	۰/۱۷۹	
سن فرناندو	۱۹۹۴/۱/۱۷	000LA Dam	۱۱/۷۹	Vertical	۰/۴۲۴	۶۲۹
				Longitudinal	۰/۵۱۱	
نورثریج	۱۹۷۱/۳/۹	Pacoma Dam	۱۱/۸۶	Vertical	۰/۷۰۹	۲۰۱۶/۱
				S74W	۱/۰۷۵	



شکل ۷: تغییر مکان افقی تاج سد پایین فلت به تحریک سه مولفه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت زلزله تفت در حالت مخزن پر



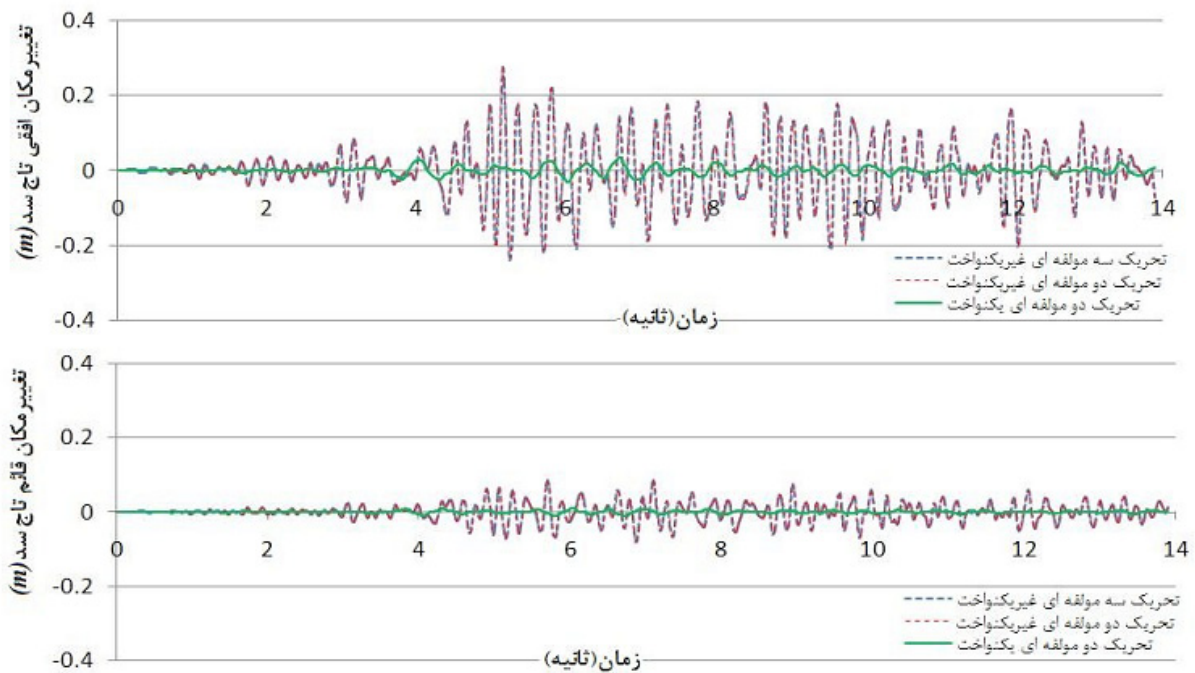
شکل ۸: تغییر مکان افقی و قائم تاج سد پایین فلت در حالت مخزن خالی در اثر تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زلزله تفت

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار خطی سیستم سد - مخزن سد بتنی وزنی پایین فلت با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن به روش لاگرانژی - لاگرانژی و با تغییر تراز آب مخزن، در اثر حرکات غیریکنواخت انتقالی و نیز در اثر همزمان مولفه‌های غیریکنواخت انتقالی و گهواره‌ای زمین بررسی و نتایج زیر به دست آمده است:

۱- حرکات غیریکنواخت زمین که در این تحقیق از تاخیر زمانی حرکت

ازای مقادیر مختلف فرضی سرعت موج برشی زلزله نورثریج در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت موج برشی، پاسخ نرمال شده تاج سد به عدد ۱ نزدیک می‌شود زیرا با افزایش این عامل اثر غیریکنواختی حرکت زمین کمتر و یا تقریباً حذف و اثر مولفه گهواره‌ای نیز به دلیل کاهش مقدار شتاب زاویه‌ای کاهش می‌یابد. بنابراین اثر غیریکنواختی و نیز مولفه گهواره‌ای شتاب حرکت زمین بر پاسخ در مورد سدهای بتنی وزنی به شدت در اثر تاثیر مقدار سرعت موج برشی می‌باشد.



شکل ۹: تغییر مکان افقی و قائم تاج سد پایین فلت در حالت مخزن پر در اثر تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زلزله نفت

جدول ۲: تغییر مکان افقی بیشینه و نرمال شده تاج سد پایین فلت

سیستم مورد بررسی	نوع زلزله	تغییر مکان افقی بیشینه (m)			N1H	N2H
		تحریک دو مولفه‌ای یکنواخت	تحریک دو مولفه‌ای غیریکنواخت	تحریک سه مولفه‌ای غیریکنواخت		
سد و مخزن خالی	تفت	۰/۰۳۱۱	۰/۰۲۱۵	۰/۰۳۲۱	۰/۶۹۱	۱/۰۳۲
	سن فرناندو	۰/۰۶۶۳	۰/۰۵۹۸	۰/۰۶۳۷	۰/۹۰۲	۰/۹۶۱
	نورثریچ	۰/۰۵۹۴	۰/۰۴۷۶	۰/۰۲۴۱۰	۰/۸۰۱	۴/۰۵۷
سد و مخزن پر یک سوم	تفت	۰/۰۳۰۸	۰/۰۱۹۱	۰/۰۲۳۸	۰/۶۲۰	۰/۷۷۳
	سن فرناندو	۰/۰۸۵۵	۰/۰۷۵۶	۰/۰۷۷۱	۰/۸۸۴	۰/۹۰۲
	نورثریچ	۰/۰۶۸۲	۰/۰۵۳	۰/۰۲۳۶۰	۰/۷۷۷	۳/۴۶۰
سد و مخزن پر دو سوم	تفت	۰/۰۵۰۰	۰/۱۱۵۰	۰/۱۱۲۳۰	۲/۳۰۰	۲/۴۶۰
	سن فرناندو	۰/۰۷۶۶	۰/۰۷۵۷	۰/۰۸۴۲	۰/۹۸۸	۱/۰۹۹
	نورثریچ	۰/۰۶۸۳	۰/۰۶۶۷	۰/۰۳۵۷۰	۰/۹۷۶	۵/۳۵۰
سد و مخزن پر	تفت	۰/۰۳۳۴	۰/۰۲۷۶۰	۰/۰۲۷۵۰	۸/۲۶۰	۸/۲۳۰
	سن فرناندو	۰/۱۱۴۰	۰/۰۲۸۵۰	۰/۰۲۸۵۰	۲/۵۰۰	۲/۵۰۰
	نورثریچ	۰/۰۷۲۵	۰/۰۴۲۳۰	۰/۰۴۶۸۰	۵/۸۳۰	۶/۴۵۰

که شتاب گهواره‌ای نسبتاً بزرگ و نیز تراز آب مخزن پایین باشد بیشتر ناشی از مولفه گهواره‌ای خواهد بود. در غیر این صورت اثر غیریکنواختی بر پاسخ تاج سد بیشتر از مولفه گهواره‌ای است.

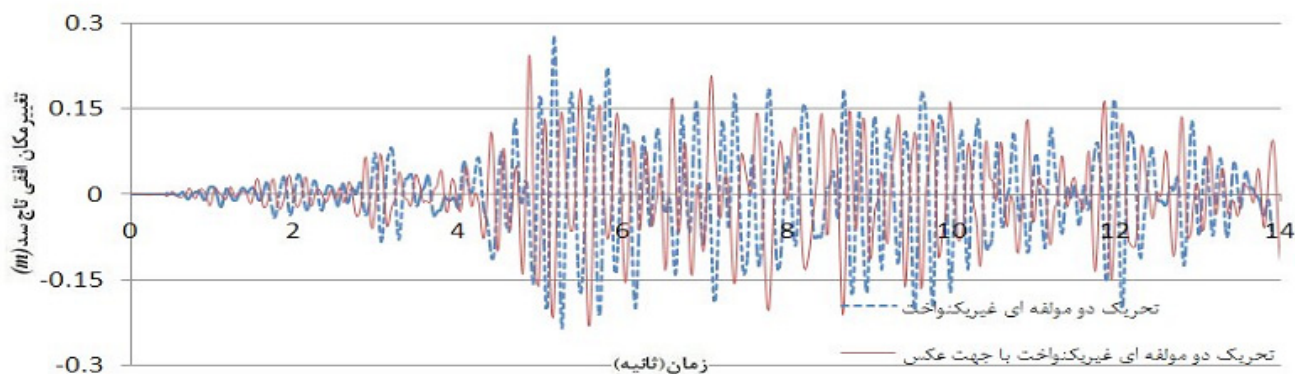
۳- در صورتی که تراز آب مخزن پایین تر از تراز نرمال باشد و یا مخزن سد خالی باشد، غیریکنواختی حرکت زمین باعث کاهش پاسخ تاج سد و در نتیجه پاسخ نرمال کمتر از واحد می‌گردد که در صورت بزرگ بودن

امواج در کف سد نشأت گرفته است می‌تواند بر توزیع فشار هیدرودینامیک در ارتفاع سد تاثیرگذار و در نتیجه افزایش پاسخ تاج سد در حالت مخزن پر را به دنبال داشته باشد. با کاهش تراز آب، تاثیر این عامل کمتر شده به طوری که در حالت مخزن یک سوم پر و یا خالی این عامل باعث کاهش پاسخ می‌گردد.

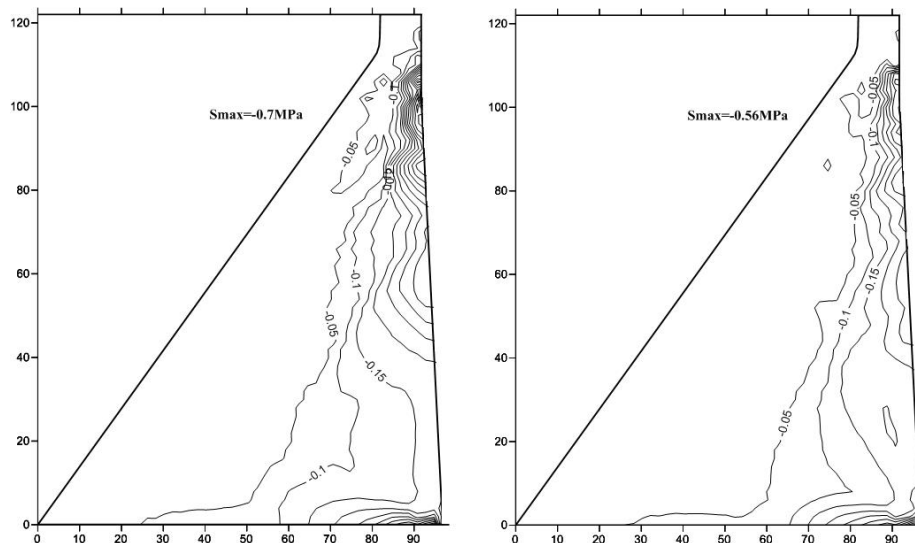
۲- اثر همزمان مولفه‌های غیریکنواخت انتقالی و گهواره‌ای در مواردی

جدول ۳: تغییر مکان قائم بیشینه و نرمال شده تاج سد پایین فلت

سیستم مورد بررسی	نوع زلزله	تغییر مکان قائم بیشینه (m)			N1V	N2V
		تحریک دو مولفه‌ای یکنواخت	تحریک دو مولفه‌ای غیریکنواخت	تحریک سه مولفه‌ای غیریکنواخت		
سد و مخزن خالی	تفت	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۹۷	۰/۶۵۶	۱/۰۱۰
	سن فرناندو	۰/۰۲۲۵	۰/۰۲۱۷	۰/۰۲۳۳	۰/۹۶۴	۱/۰۳۵
	نورثریج	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۶۴	۰/۰۷۷۱	۱/۱۴۷	۵/۳۹۲
سد و مخزن یک سوم پر	تفت	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۶۹	۰/۵۸۳	۰/۸۲۱
	سن فرناندو	۰/۰۲۴۶	۰/۰۲۴۷	۰/۰۲۵۶	۱/۰۰۴	۱/۰۳۶
	نورثریج	۰/۰۱۸۰	۰/۰۱۵۱	۰/۰۷۱۶	۰/۸۳۹	۳/۹۷۷
سد و مخزن دو سوم پر	تفت	۰/۰۱۶۰	۰/۰۳۹۶	۰/۰۴۲۵	۲/۴۷۵	۲/۶۵۶
	سن فرناندو	۰/۰۲۶۱	۰/۰۲۹۶	۰/۰۳۲۵	۱/۱۳۴	۱/۲۴۵
	نورثریج	۰/۰۲۰۲	۰/۰۲۵۵	۰/۱۱۳۰	۱/۲۶۲	۵/۵۹۴
سد و مخزن پر	تفت	۰/۰۱۲۰	۰/۰۸۵۱	۰/۰۸۵۹	۷/۰۹۱	۷/۱۵۸
	سن فرناندو	۰/۰۳۸۲	۰/۱۶۶۰	۰/۱۶۷۰	۴/۳۴۵	۴/۳۷۲
	نورثریج	۰/۰۲۵۷	۰/۱۵۸۰	۰/۱۸۷۰	۶/۱۴۸	۷/۲۷۶



شکل ۱۰: تاثیر جهت حرکت امواج زلزله بر پاسخ سد پایین فلت در حالت مخزن پر در اثر تحریک دو مولفه‌ای غیریکنواخت زلزله تفت



شکل ۱۱: منحنی تنش کششی اصلی در بدنه سد در اثر تحریک یکنواخت ۲C و ۲C+R زلزله تفت به ترتیب از چپ به راست

- [11] Bilici, Y.; et al.; "Stochastic dynamic response of dam-reservoir-foundation systems to spatially varying earthquake ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29, PP. 444-458, 2009.
- [12] Newmark, N. M.; "Torsion in Symmetrical Buildings", *Proceeding of the 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile; A3, PP. 19-23, 1969.
- [13] Ghafory Ashtiani, M.; Singh, M. P.; "Structural response for six correlated earthquake components" *Journal Of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 14, No. 1, PP. 103-119, 1986.
- [14] Huang, B. S.; "Ground rotational motions of the 1999 Chi Chi, Taiwan earthquake as inferred from dense array observations", *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 6, PP. 1307-1310, 2003.
- [15] Ghayamghamian, M. R.; Nouri, G. R.; "On the characteristics of ground motion rotational components using Chiba dense array data", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, No. 10, PP. 1407-1442, 2007.
- [16] Spudich, P.; et al. "Transient stresses at Parkfield, California, produced by the M 7.4 Landers earthquake of June 28, 1992: Observations from the UPSAR dense seismograph array", *Journal of geophysical research*, Vol. 100, No. B1, PP. 675-690, 1995.
- [17] Ghayamghamian, M. R.; et al.; "A comparison among different methods in the evaluation of torsional ground motion", *Journal of Iran geophysics*, Vol. 4, No. 3, PP.2-44, 2010.
- [18] Trifunac, M.D.; "A note on rotational components of earthquake motions on ground surface for incident body waves", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, Vol. 1, No. 1, PP. 11-19, 1982.
- [19] Lee, V.W.; Trifunac, M.D.; "Rocking strong earthquake accelerations", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 2, PP. 75-89, 1987.
- [20] Lee, V. W.; Liang, L.; "Rotational components of strong motion earthquakes", *The 14th world conference on earthquake engineering*. Beijing, China, 2008.
- [21] Li, H. N.; Sun, L. Y.; Wang, S. Y.; "Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion" *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 232, No. 2, PP. 131-137, 2004.
- [22] Nigbor, R. L.; "Six- degree- of- freedom ground شتاب گهواره‌ای مقدار آن به ۱ نزدیک می‌شود.
- ۴- با افزایش سرعت موج برشی و در نتیجه کاهش شتاب گهواره‌ای و تاخیر زمانی حرکت موج، اثر غیریکنواختی و نیز اثر مولفه گهواره‌ای تقریباً حذف شده و پاسخ نرمال شده تاج سد به عدد ۱ نزدیک می‌شود.
- ۵- تغییر امتداد و نیز موقیت مکانی تحریک زلزله غیریکنواخت تاریخچه زمانی پاسخ تاج سد در حالت مخزن پر را دستخوش تغییرات کیفی قابل توجهی می‌نماید در حالی که پاسخ نرمال شده تاج سد تغییر چندانی نخواهد داشت.
- ### ۵- مراجع
- [۱] احمدی، محمد تقی؛ نوائی‌نیا، بهرام، تحلیل دینامیکی سد و مخزن به روش لاگرانژی، مجله بین المللی مهندسی (دانشگاه علم و صنعت)، جلد ۶، شماره ۱۳۷۴، ۱۳۸۶.
- [۲] علی جمشیدی، داوود؛ نوائی‌نیا، بهرام؛ واثقی امیری، جواد؛ تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی با مدل‌سازی مخزن به روش‌های لاگرانژی و اویلری؛ نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، شماره ۶، جلد ۴۱، صفحه ۷۲۴-۷۰۹، ۱۳۸۶.
- [۳] معظمی گودرزی، خسرو؛ لرزه‌شناسی، انتشارات وزارت علوم و آموزش عالی، ۱۳۵۱.
- [۴] نوائی‌نیا، بهرام؛ تحلیل هیدرودینامیک سد و مخزن به روش لاگرانژی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۶۹.
- [۵] کلانی ساروکلایی، لیلیا؛ نوائی‌نیا، بهرام؛ واثقی امیری، جواد؛ توکلی، حمیدرضا؛ اثر مولفه دورانی زلزله بر پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی با احتساب اندرکنش سد و مخزن، مجله علمی و پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۰.
- [6] Chopra, A. K.; "Earthquake Behavior of Reservoir-Dam Systems", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 94, EM6, PP. 1475-1500, 1968.
- [7] Bayraktar, A.; Dumanogluand, A. A.; Calayir, Y.; "Asynchronous dynamic analysis of dam-reservoir-foundation system by the Lagrangian approach", *Journal of Computer and Structure*, Vol. 58, No. 5, PP. 925-935, 1996.
- [8] Kojic, S.; Trifunac, M. D.; "Earthquake response of arch dams to nonuniform canyon motion", *University of Southern California, Department of Civil Engineering*, Report No. CE 88-03, 1988.
- [9] Mirzabozorg, H.; Varmazyari, M.; Ghaemian, M.; "Dam- reservoir- mass foundation system and traveling wave along reservoir bottom", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, No. 8, PP. 746-756, 2009.
- [10] Alves, S. W.; "Nonlinear analysis of Pacoima dam with spatially nonuniform ground motion", *Ph.D thesis, California Institute of Technology*, 2005.

- 13, No. 1, PP. 139-150, 1978.
- [29] Wilson, E. L.; Khalvati, M.; "Finite elements for the dynamic analysis of fluid-solid systems" International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 19, No. 11, PP. 1657-1668, 1983.
- [30] Ahmadi, M. T.; Ozaka, Y.; "A simple method for the full- scale 3- D dynamic analysis of arch dams" 9th World Conference on Earthquake Engineering Japan, Tokyo, 1988.
- [31] Navayi Neya, B.; "Mathematical modeling of concrete gravity dams under earthquake loading considering construction joints", Ph.D thesis, Moscow Power Engineering Institute, 1998.
- [32] Sadd, M. H.; "Elasticity, Theory, Applications and Numerics", Academic Press, Elsevier, 2009.
- [33] Chopra, A. K., "Dynamic of structures, Theory and application to earthquake engineering", 3rd Ed., Prentice all of India, 2008.
- [34] Hinton, E.; et al.; "A note on mass lumping and related processes in the finite element", Earthquake Engineering and Structural Dynamic, Vol.4, No. 3, PP. 245-249, 1976.
- [35] Merriam, J. L.; Kraige, L. G.; "Engineering Mechanics-Dynamic", 6th Ed., John Wiley& Sons, 2008.
- [36] Chopra, A. K.; "Earthquake Response Analysis of concrete Gravity Dams", ASCE, Vol. 96, No. EM4, PP.443-457,1970.
- motion measurement", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 5, PP. 1665-1669, 1994.
- [23] Suryanto, W.; et al.; "First comparison of array-direct ring laser measurements", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 6, PP. 2059-2071, 2006.
- [24] Liu, C. C.; et al.; "Observation rotational and translational ground motion at the HGSD station in Taiwan from 2007 to 2008", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 99, No. 2B, PP. 1228-1236, 2009.
- [25] Kalab, Z.; Knejzlik, J.; "Examples of rotational component records of mining induced seismic events from the Karvina region", ACTA Geodynamica and Geomaterialia, Vol. 9, No. 2, PP. 173- 178, 2012.
- [26] Kalab, Z.; Knejzlik, J.; Lednicka, M.; "Observation of rotational component in digital data of mining induced seismic events" Gornictwo, Vol. 7, No. 1, PP. 59- 74, 2012.
- [27] Calayir, Y.; Dumanoglu, A.; Bayraktar, A.; "Earthquake analysis of gravity dam-reservoir systems using the Eulerian and Lagrangian approaches", Journal of Computers and Structures, Vol. 59, No. 5, PP. 877-890, 1996.
- [28] Hamdi, M. A.; Ousset, Y.; Verchery, G.; "A displacement method for the analysis of vibrations of coupled fluid -structure systems" International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.