# تأثیر انعطافپذیری پی بر پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی تحت اثر مؤلفههای همبسته انتقالی و دورانی شتاب زمین

بهرام نوایینیا <sup>\*۱</sup>و لیلا کلانی ساروکلایی <sup>۲</sup> <sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ۲ دانشجوی دکترای تخصصی عمران- سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

### چکیدہ

هدف از این تحقیق، بررسی پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی با در نظر گرفتن اثر همزمان مؤلفههای همبسته انتقالی و دورانی شتاب زمین در طی زلزله در حالت دو بعدی و با احتساب اندرکنش سیستم سد- پی- مخزن میباشد. برای این منظور، مؤلفههای دورانی حرکت زمین با استفاده از مؤلفههای انتقالی و نیز روابط کلاسیک تئوری الاستیسیته و تئوری انتشار امواج و با در نظر گرفتن سرعت امواج وابسته به فرکانس تولید و به روش مناسب به مدل اجزاء محدود سیستم اعمال و پاسخ دینامیکی آن به روش نیومارک و استفاده از تغییر مکان به عنوان متغیر مجهول در گرههای شبکه اجزاء محدود کل سیستم که به روش لاگرانژی-لاگرانژی معروف میباشد، به دست میآید. بر اساس فرمولبندی مطرح شده حساسیت پاسخ سد با تغییر مدول الاستیسیته پی، تراز آب مخزن و نیز ضریب جذب کف مخزن تحت شتابنگاشتهای مختلف با احتساب اثر مؤلفه دورانی زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان میدهند که بسته به محتوای فرکانسی و طیف توان مؤلفه دورانی زلزله، تاثیر آن بر پاسخ سد میتواند کم یا زیاد باشد. در هر حال در مواردی که تأثیر مؤلفه دورانی بر پاسخ سد قابل توجه باشد، با افزایش سختی پی سد و افزایش ضریب بذبی کی از ای مواند کم یا زیاد باشد. در می ایر گرفته است. نتایج نشان میدهند که بسته به محتوای فرکانسی و طیف توان مؤلفه دورانی زلزله، تاثیر آن بر پاسخ سد میتواند کم یا زیاد باشد. در می عبر ماور دی که تأثیر مؤلفه دورانی بر پاسخ سد قابل توجه باشد، با افزایش سختی پی سد و افزایش ضریب جذب کف، اثر مؤلفه دورانی کاهش می در ان در مواردی که تأثیر مؤلفه دورانی بر پاسخ سد قابل توجه باشد، با افزایش سختی پی سد و افزایش ضریب جذب کف، اثر مؤلفه دورانی کاهش

**واژگان کلیدی:** مؤلفههای همبسته انتقالی و دورانی زمین، سیستم سد- پی- مخزن، اندر کنش سازه و سیال.

### ۱– مقدمه

تحلیل دینامیکی سدهای وزنی به منظور تعیین فشار هیدرودینامیکی، اولین بار در سال ۱۹۳۳ توسط Westergard [۱] به فرم تحلیلی و با یک سری فرضیات سادهشونده صورت پذیرفت. در ادامه تحقیقات، Chopra [۲-۴] نشان داد که اندر کنش سد و مخزن، سد و پی، پی و مخزن، شیب بالادست سد، اثر مؤلفه قائم زلزله، اثر رسوبات و شيب كف مخزن، رفتار غیرخطی مصالح و آب و حرکات ناهمگون زمین می توانند نقش مهمی در تحلیل این گونه سازهها داشته باشند. بعد از آن به دلیل محدودیتهای روش تحلیلی به منظور در نظر گرفتن تمامی عوامل فوق، محققان مختلفي از جمله Zienkiewicz و همكاران , Clough ([Y , Y] Chopra , Chakrabarti  $([\Delta]$ , Lotfi ([9] Chopra , Fenves ([A] Zienkiewicz همكاران [10] El-Aidi و [11] Hall و [11] Navayi Neya واثقى [١٣] Ahmadi ، [١٣] و Ghobarah واثقى [١٣] Kalateh و [۱۵] و Kalateh و Attarnejad [۱۶] به بررسی تأثیر پارامترهای مذکور بر پاسخ دینامیکی سیستم سد- پی- مخزن

به روشهای عددی از جمله روش اجزاء محدود پرداخته و به اهمیت در نظر گرفتن این پارامترها در تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی تأکید نمودند. در کلیه تحقیقات پیشین به دلیل عدم امکان ثبت مؤلفه دورانی حرکت زمین، اثر آن بر پاسخ دینامیکی سدها مورد توجه قرار نگرفته است.

با پیشرفت علم و تکنولوژی، محققان مختلف به روشهای گوناگون درصدد ثبت و یا تولید مؤلفههای دورانی و نیز بررسی اثر آنها بر پاسخ لرزهای سازهها برآمده و نشان دادند که مؤلفه-های دورانی میتوانند تأثیر بسزایی بر پاسخ دینامیکی برخی از سازهها داشته باشند. محدودیتهای فراوانی که در زمینه ثبت مؤلفههای دورانی و لزوم به کارگیری حسگرهایی با حساسیت بسیار بالا وجود داشت، موجب گردید تا محققان در صدد تولید این مؤلفهها با استفاده مؤلفههای انتقالی موجود برآمده و برای این منظور به استفاده از روابط تئوریک روی آورند. با در نظر گرفتن روابط تئوریک، دو روش کلی برای تولید مؤلفههای دورانی توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار میگیرد. روش

می باشد که در آن رابطه بین حرکت انتقالی در داخل صفحه و چرخش حول محور عمود بر صفحه مورد استفاده قرار می گیرد. این روش اولین بار توسط Newmark [۱۷] مطرح گردید. بعدها با توسعه روش نیومارک، سه روش برای برآورد مؤلفه دورانی بر حسب مؤلفههای انتقالی معرفی شد که شامل روشهای مشتق زمانی، تفاضل محدود و ژئودتیک میباشد. روش مشتق زمانی توسط محققين مختلفي از جمله Ghafory Ashtiani و Ghafory [۱۸] به منظور برآورد مؤلفه پیچشی استفاده گردید. ایشان با به کارگیری روش مذکور و تنها با داشتن شتابنگاشتهای انتقالی در یک نقطه از سطح زمین به تولید مؤلفههای دورانی پرداختند. Ghayamghamian و [۱۹] Huang و ۲۰] نيز به منظور برآورد مؤلفه پیچشی حرکت زمین از روش تفاضل محدود استفاده نمودند. ایشان در این روش نیازمند استفاده از حداقل دو شتابنگاشت انتقالی در سطح زمین بودند. Spudich و همکاران [۲۱] و Nouri و Ghayamghamian [۲۲] نیز با به کارگیری همزمان چندین ایستگاه به صورت شبکه شتابنگاری متراکم و استفاده از روش ژئودتیک، مؤلفههای دورانی را با دقت بیشتری محاسبه نمودند و نتيجه گرفتند که مقادير حاصل از روش مشتق زمانی در همه ایستگاهها از نتایج به دست آمده از روش تفاضل محدود بیشتر بوده و در فواصل جدایی کم مقادیر این دو روش تطابق قابل قبولی دارند. این در حالی است که مقادیر محاسبه شده با روش ژئودتیک کمتر از مقادیر به دست آمده از روش مشتق زمانی و روش تفاضل محدود بوده به طوری که گاها نسبت حداکثر دوران در روش مشتق زمانی به روش ژئودتیک به ۳ نیز میرسد.

در روش دوم که توسط Trifunac [۲۳] و Lee و Trifunac و Lee و Trifunac و Trifunac و Trifunac و Trifunac و [۲۴] و Fal و Liang و [۲۴] و Fal و Liang معادلات تئوری الاستیسیته و تئوری انتشار امواج به طور همزمان به منظور تولید مؤلفههای دورانی حرکت زمین استفاده می شود. در این روش علاوه بر سرعت ظاهری امواج، زاویه موج حادث نیز در برآورد مؤلفه پیچشی و گهوارهای تأثیرگذار می-حادث نیز در برآورد مؤلفه پیچشی و گهوارهای تأثیرگذار می-حادث نیز در برآورد مؤلفه پیچشی و گهوارهای تأثیرگذار می-مستقل از فرکانس در نظر گرفته می شوند. Hong-Nan Li و باسته موج حادث همکاران [۲۶] با توسعه این روش، سرعت و نیز زاویه موج حادث وابسته به فرکانس را در محاسبه مؤلفههای دورانی حرکت زمین در نظر گرفتند و به تولید مؤلفههای دورانی زلزله السنترو با

Trifunac و Gupta ،[۲۷] Rubin و Abdel-Ghaffar و Goel و ۲۹] ابه طور جداگانه در مطالعات [۲۸] و Goel

خود به اهمیت مؤلفههای دورانی در تحلیل و طراحی سازهها اشاره نمودند. Awad و Humar [۳۰] نیز نشان دادند که حتی سازههای متقارن نیز به هنگام وقوع زلزله میتوانند تحت تحریک پیچشی قابل توجهی قرار گیرند. مطالعات انجام شده در زمینه اثر مؤلفههای چرخشی زلزله در سازهها بیشتر محدود به پلها و سازههای ساختمانی میشود. Kalani و همکاران [۳۱] با استفاده از روش توسعه یافته Kalani و همکاران [۳۱] با دینامیکی خطی و غیرخطی مخازن هوایی و زمینی آب با درنظر گرفتن اندرکنش آب و سازه پرداخته و نشان دادند که مؤلفههای دورانی جنبش زمین در شرایط خاص میتوانند تأثیر به سزایی بر پاسخ لرزهای این گونه سازهها داشته باشند.

از آن جائی که اثر مؤلفههای دورانی شتاب زمین در تعیین پاسخ سد و مخزن با احتساب پی تاکنون مورد توجه واقع نشده است در این تحقیق، سیستم سد- پی- مخزن سدهای بتنی وزنی با فرض رفتار خطی در حالت دو بعدی با در نظرگیری اندرکنش سازه و سیال به روش لاگرانژی-لاگرانژی و با اعمال شرایط سرحدی در مرزهای مخزن و پی و نیز اثر جذب کف مدلسازی شده و تحت اثر همزمان مؤلفه های انتقالی و دورانی زمین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### ۲-تئوری

### ۲-۱- معادلات حاکم و شرایط مرزی

سیستم سد- پی- مخزن سدهای بتنی وزنی در حالت دو بعدی که شامل مخزن به طول بینهایت در وجه بالادست سد، بستر نیمه بینهایت و نیز رسوبات کف مخزن میباشد، به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. معادله دیفرانسیل حاکم بر محیط مخزن بدون احتساب ویسکوزیته آب برحسب میدان فشار هیدرودینامیکی، *P* را به صورت رابطه (۱) که به معادله موج موسوم است میتوان نوشت [۱۳].





$$\nabla^2 P_d = \frac{1}{C_w} \frac{\partial^2 P_d}{\partial t}$$
(1)

در رابطه فوق، 
$$C_{_W}$$
 سرعت امواج الاستیک در سیال و  $t$  زمان می باشد.

با توجه به شکل (۱) چهار نوع شرط مرزی برای مخزن می-توان در نظر گرفت که شامل انتشار امواج در بالادست مخزن  $(S_1)$ ، جذب پارهای توسط رسوبات کف مخزن  $(S_1)$ ، شرط مرزی اندر کنش بین سد و مخزن  $(S_{_3})$  و امواج سطحی در سطح مخزن  $(S_{_{A}})$  میباشد. در روشهای تحلیلی فرض می گردد که مخزن تا بینهایت ادامه دارد و با دور شدن از سد به سمت بالادست مخزن، فشار هیدرودینامیک رفته رفته مستهلک و در دوردست به صفر میل مینماید. لذا شرط فشار صفر به عنوان شرط مرزی در بالادست مخزن  $(S_1)$  مورد استفاده قرار می گیرد. در سطح مخزن  $(S_{_{A}})$  نیز فرض ساده فشار صفر به عنوان شرط مرزی در روشهای تحلیلی محسوب می گردد. تحقیقات انجام شده توسط Bustamante [۳۲] نشان میدهند که این فرض تقریب زیادی در نتایج به وجود نمی آورد. در مرز مشترک بین سد و مخزن  $(S_{_2})$ نیز فرض می گردد که سرعت نرمال مخزن و سد یکسان باشد. بر این مبنا شرط مرزی سینماتیک بین سد و مخزن با استفاده از رابطه ناویر- استوک به فرم رابطه (۲) بیان می شود [۱۳].

$$\frac{\partial P_{d}}{\partial x} = -\rho a_{ns} \tag{(Y)}$$

که X مختصه مؤلفه افقی و  $a_{ns}^{n}$  نیز شتاب زمین میباشد. شرط مرزی کف مخزن  $(S_2)$  نیز تقریباً شبیه شرط مرزی بین سد و مخزن میباشد. با فرض این که شتاب زمین دارای مؤلفه  $\ddot{W}_{g}$  در راستای قائم Z نیز باشد و شتاب کف مخزن در اثر اندرکنش بین مخزن و رسوب،  $\ddot{X}$ ، نیز در نظر گرفته شود، شرط مرزی  $(S_2)$  به صورت رابطه (۳) بیان میشود [۳۳].

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho(\ddot{w}_g + \ddot{X}) \tag{(7)}$$

با در نظر گرفتن پارامتر q به فرم رابطه (۴)، میتوان رابطه (۳) را به فرم رابطه (۵) بازنویسی نمود [۳۳].

$$q = \frac{\rho}{\rho_r C_r} = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \tag{(f)}$$

$$\frac{\partial P_d}{\partial z} - q \frac{\partial P_d}{\partial t} = -\rho \ddot{w}_g \tag{(b)}$$

که  $\begin{array}{c} \rho_r & \rho_r \end{array}$  چگالی رسوب و سرعت امواج الاستیک در آن و  $\rho_r$  ک  $\sigma_r$  مریب جذب کف میباشند. lpha

در مرزهای پی  ${S_5 \choose 5}$  نیز همانند مرز  ${S_1 \choose 1}$  مخزن، شرط مرزی انتشار امواج برقرار میباشد. بدین معنی که در دوردست تغییر مکانهای پی مستهلک شده و به سمت صفر میل مینمایند.

### ۲-۲- تولید مؤلفههای دورانی حرکت زمین با استفاده از مؤلفههای انتقالی



شکل ۲- نحوه انتشار موج SV و امواج بازتابی ناشی از آن در سطح زمین [۲۶]

با استفاده از تابع پتانسیل حرکت موج SV، شرط مرزی تنش برشی صفر در سطح زمین و نیز رابطه کلاسیک تئوری الاستیسیته بین چرخش و تغییرمکان، رابطه (۶)، مؤلفه گهواره-ای حرکت به صورت رابطه (۷) به دست می آید [۲۶ و ۳۴].

$$\varphi_{gy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \tag{(6)}$$

$$\varphi_{gy} = \frac{i\omega}{C_x} w \tag{Y}$$

که در آن  $\beta$  ، سرعت ظاهری امواج،  $\beta$  سرعت امواج  $C_x = \beta / \sin \theta_0$  سرعت امواج برشی و  $\omega$  سرعت زاویه ای حرکت موج می باشند.

در روش توسعه یافته Hong-Nan Li و همکاران [۲۶] با تغییر متغیر  $x = \sin \theta_0$ ، از روابط (۸) و (۹) برای محاسبه زاویه موج حادث به شرح زیر استفاده می شود.

$$G = \frac{2x\sqrt{1 - K^2 x^2}}{K(1 - 2x^2)}, \qquad \qquad \theta_0 \prec \theta_C \qquad (\wedge)$$

$$G = -\frac{2x\sqrt{1 - K^2 x^2}}{iK(1 - 2x^2)}, \qquad \qquad \theta_0 \succ \theta_C \qquad (9)$$

که در آن  $K = \alpha / \beta$  ،  $G = tg\overline{e} = w/u$  و  $G = tg\overline{e} = w/u$  و  $\theta_c = \arcsin(\beta / \alpha)$   $\mu_c$  میباشد.  $\sigma_c$  به منظور محاسبه تاریخچه زمانی گهوارهای حرکت زمین، می توان رابطه (۲) را به فرم مختلط و به صورت رابطه (۱۰) بازنویسی نمود.

$$\varphi_{gy}(t) = e^{\frac{\pi}{2}i} \frac{\omega}{C_x} R_w \cdot e^{i\theta_w}$$

$$= \left(\frac{\omega}{C_x} R_w\right) \left(e^{\left(\frac{\pi}{2} + \theta_w\right)i}\right)$$
(1.)

در رابطه فوق  $R_w$  دامنه فرکانسی و  $\Theta_w$  فاز موج در فرکانس مورد نظر میباشند که از طیف محتوای فرکانسی مؤلفه انتقالی W به دست میآیند. این رابطه همچنین نشان میدهد که طیف مؤلفه گهوارهای دارای دامنهای برابر با  $(\omega/C_x)R_w$  بوده و اختلاف فاز آنها با مؤلفه انتقالی W برابر  $\pi/2$  میباشد.

در این تحقیق فرمول بندی مطرح شده، شامل دستورهای تبدیل فوریه، حل معادلات (۸) و (۹) و نیز تبدیل عکس فوریه

میباشد که در نرمافزار MATLAB نسخه 2010 کدنویسی و مؤلفه گهوارهای حرکت زمین برای شش زلزله مورد بررسی به دست آمده است.

### ۲-۳- فرمولبندی اجزاء محدود

پیشبینی پاسخ کوپله سیستم سد- پی- مخزن به صورت تحلیلی به جز در چند مورد با هندسه خاص، بسیار پیچیده می-باشد. در این تحقیق سیستم سد- پی- مخزن سدهای بتنی وزنی در حالت دوبعدی به روش اجزا محدود و با برنامهنویسی به زبان فرترن مدلسازی گردیدند. بدین منظور از اجزاء با درجه آزادی تغییرمکان برای محیط سازه و سیال استفاده می شود که شامل اجزا هشت گرهی با وضعیت تنش مسطح و دو درجه آزادی در هر گره برای مدلسازی سد و پی، اجزاء ۹ گرهی با دو درجه آزادی در هر گره برای مدلسازی آب و اجزا اتصالی شش گرهی با دو درجه آزادی در هر گره به منظور اعمال شرایط مرزی فصل مشترک آب و سازه و در شرایط دینامیکی به منظور در نظر گیری شرایط اندر کنش آب و سازه میباشد. تعداد نقاط انتگرال گیری اجزاء سازه و سیال در حالت دو بعدی به ترتیب نه و چهار میباشد که در محیط سیال به دلیل اعمال قید عدم چرخش و سختی کاذب ناشی از آن از تکنیک کاهش نقاط انتگرال گیری استفاده می شود. روش مذکور که به روش لاگرانژی-لاگرانژی موسوم است، به منظور در نظرگیری شرایط اندرکنش سازه و سیال به کار گرفته می شود و در آن حل دستگاه معادلات محیط سازه و سیال به راحتی امکان پذیر خواهد بود [17، ۳۵ و ۳۶].

با استفاده از روش اجزاء محدود استاندارد و گسستهسازی معادلات محیط سازه و سیال بر پایه تغییرمکانهای گرهی آنها، معادله دینامیکی حرکت برای سیستم سد- پی- مخزن که تحت شتاب زمین قرار گرفته به فرم ماتریسی به صورت رابطه (۱۱) بیان می شود [۳۷].

$$\begin{bmatrix} M \end{bmatrix} \dot{U} + \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \dot{U} + \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} U = P_{eff}(t)$$
(11)

که در رابطه فوق [M]، [C]و [X] به ترتیب ماتریسهای جرم، میرایی و سختی،  $\ddot{U}(t)$ ،  $\ddot{U}(t)$  و U(t) به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و تغییرمکان نقاط گرهی شبکه اجزا محدود و شتاب، سرعت و تغییرمکان نقاط گرهی مؤثر ناشی از زلزله  $P_{eff}(t) = -[M] \{ \ddot{U}_g(t) \}$ میباشد. ماتریس جرم مورد استفاده در این تحقیق به روش Hinton [۳۸] و به فرم یک ماتریس قطری به کار گرفته می-شود. ماتریس سختی کل سیستم از سر هم نمودن ماتریس سختی نظیر اجزا سد و پی <sub>C</sub>۸، مخزن <sub>K</sub>۸ و نیز اجزا تماسی <sub>MM</sub> مطابق رابطه (۱۲) به دست میآید.

$$K = K_{D} + K_{R} + K_{INT}$$
(17)

در رابطه فوق  $K_{INT}$  به منظور اعمال شرایط مرزی آزادی لغزش و نیز عدم جدایی سد از مخزن یا پی از مخزن در مرزهای  $S_3$  و  $S_2$  که توسط اجزا تماسی اعمال میگردد در نظر گرفته میشود [۳۹ و ۴۰]. در تعیین ماتریس سختی اجزا سیال نیز از رابطه (۱۳) استفاده میشود که در آن  $S_f$  سختی ناشی از امواج

سطحی بوده و از رابطه (۱۴) به دست می آید [۳۹].

$$K_{R} = \int_{V} B^{T} C_{f} B dV + S_{f}$$
(17)

$$S_{f} = \rho_{w} g \int_{S4} N^{T} N ds$$
 (14)

در روابط فوق N تابع شکل گرههای سطح سیال، B ماتریس دیفرانسیلی توابع شکل،  $B^T$  ترانهاده ماتریس B،  $C_f$  ماتریس  $B^T$  دیفرانسیلی توابع شکل،  $D^T$  ترانهاده ماتریس  $S_f$  دامنه سطح مخزن و الاستیسیته سیال مطابق رابطه (۱۵)،  $S_f$  دامنه سطح مخزن و V دامنه حجم مخزن،  $\rho_w$  چگالی آب و g شتاب ثقل می باشد [۳۹].

$$C_{f} = \begin{bmatrix} K_{w} & 0\\ 0 & 100K_{w} \end{bmatrix}$$
(1 $\Delta$ )

ماتریس میرایی کل سیستم نیز از مجموع میرایی داخلی  $C_{\rm int}$  و میرایی ناشی از انتشار امواج در مرز بالادست مخزن و مرزهای پی  $C_{rad}$  مطابق رابطه (۱۶) به دست میآید.

$$C = C_{\text{int}} + C_{rad} \tag{19}$$

میرایی داخلی را با استفاده از رابطه (۱۷) میتوان به ماتریس جرم و سختی کل سیستم ارتباط داد [۳۹].

$$C_{\rm int} = \alpha_1 [M] + \beta_1 [K] \tag{1Y}$$

که  $_{1}^{}$  و  $_{1}^{}$  به ترتیب از روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می-شوند [۳۹].

$$\alpha_{1} = 2\omega_{1}\xi_{1} - (\omega_{1}^{2}\beta_{1}) \tag{1}$$

$$\beta_{1} = 2 \frac{(\xi_{1}\omega_{1} - \xi_{2}\omega_{2})}{(\omega_{1}^{2} - \omega_{2}^{2})}$$
(19)

در روابط فوق $_{1}^{0}$  و $_{2}^{0}$  دو فرکانس مود ارتعاشی سیستم و  $_{1}^{2}$  و  $_{2}^{2}$  نیز ضرایب میرایی نظیرآن ها می باشند. میرایی ناشی از انتشار امواج در بالادست مخزن نیز از رابطه (۲۰) محاسبه می شود [۳۹].

$$C_{rad} = \rho_{w} C_{w} \int_{s_{1}}^{N} Nds \qquad (\Upsilon \cdot)$$

در روابط فوق N تابع شکل اجزا آب و  $C_{_w}$  نیز سرعت انتشار موج در آب می باشد.

برای محاسبه (t) و در حالتی که اثر همزمان مؤلفههای انتقالی و دورانی مدنظر باشد، لازم است که شتاب انتقالی نقاط مختلف سیستم با توجه به بحث سینماتیک اجسام صلب و با در نظرگیری تئوری مربوط به حرکت عمومی اجسام صلب محاسبه گردد [۴1]. با توجه به بحث فوق و تجزیه حرکت عمومی جسم به دو حرکت انتقالی و دورانی در نهایت روابط (۲۱) تا (۲۳) برای محاسبه شتاب انتقالی نقاط مختلف جسم به دست میآیند.

$$A_{x} = \ddot{u}_{g}(t) + \alpha z - \omega^{2} x \tag{(Y1)}$$

$$A_{z} = \ddot{w}_{g}(t) - (\alpha x + \omega^{2} z)$$
(YY)

$$\ddot{U}_{g}(t) = \begin{cases} A_{X} \\ A_{Z} \end{cases}$$
(YT)

در روابط فوق،  $\omega$  و  $\alpha$  به ترتیب سرعت زاویهای و شتاب زاویهای، x و z مختصات نقاط مورد نظر نسبت به مبدأ دوران،  $(t)_{g}$   $u_{g}(t)$  شتاب ناشی از حرکت انتقالی زمین

x و  $A_Z$  و  $A_Z$  متاب انتقالی معادل نقاط مختلف در جهت x و Z میباشند که در آن از اثر ممان جرمی به دلیل تأثیر کم آن صرفنظر شده است.

در این تحقیق برای حل معادله تعادل دینامیکی، رابطه (۱۱)، از روش نیومارک به دلیل سادگی و پایداری عددی آن استفاده می شود [۳۷].

### ۳- تحلیل عددی

در نظر گرفته می شود. در کار حاضر پنج مقدار مختلف ۰/۵، ۱، ۲ و ۲۰ و  $\infty$  برای نیمه پر و پر  $F_f/E_d$  ترازهای خالی، نیمه پر و پر برای ارتفاع آب مخزن و مقادیر ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۵ و ۱ برای ضرایب جذب کف در نظر گرفته می شود که مقدار صفر بیانگر جذب کامل و مقدار ۱ بیانگر انعکاس کامل امواج در کف مخزن می باشد.



شکل ۳- مشخصات هندسی سد پاینفلت

به منظور بررسی اثر همزمان مؤلفههای انتقالی و دورانی زلزله بر پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی، از شش زوج شتاب-نگاشت انتقالی ثبت شده که مشخصات آنها مطابق جدول (۱) میباشد استفاده میشود. این شتابنگاشتها به نحوی انتخاب گردیدهاند که طیف گستردهای از فرکانسها، سرعت امواج برشی و نیز دوری و نزدیکی به گسل را شامل شوند.

جدول ۱- مشخصات زلزلههای مورد استفاده در تحقیق حاضر									
زلزله	ایستگاه	فاصله مرکز سطحی (km)	مؤلفه ثبت شده	PGA (g)	سرعت موج برشی (m/s)				
Imperial Valley	117 El Centro Array	41/46	Up-Down	۰/۰۱۳	K1W/F				
1951/01/24	#9	177/11	North-South	•/•۲٩	1 1 1 7 1				
San Fernando	Deceme Dem	\\/AG	Vertical	٠/٧٠٩	7.19/1				
1971/02/09	Pacoma Dam	11/77	S74W	۱/•۷۵	1 • 17/1				
Taft	Lincoln	**	Vertical	•/\۵۵	21 V/E				
1952/7/21	School Tunnel	10	S69E	•/١٧٩	1 \lambda \lambda / 1				
Tabas,Iran	Dachraavah	VEICC	Vertical	۰/۰۶۹	****				
1978/09/16	Bosiliooyen		Longitudinal	٠/١٠٩					
Chi Chi Taiwan	CWD000017415	***	Vertical	•/•٧۴	A A 19/15				
1999/09/20	CwD999991/ALS	1 7/71	North-South •/\Y۵						
Northridge	000LA Dom	11/29	Vertical	•/474	64.8				
1994/01/17	UUULA Dam	11/4 (	Longitudinal	•/۵۱۱					

### ۳-۱- تحليل مودال

در این تحقیق تحلیل مودال سد خالی و سیستم سد- پی-مخزن با نسبت  $E_f/E_d$  و تراز آب مختلف صورت پذیرفته و پنج فرکانس اول ارتعاشی آنها به همراه فرکانس غالب سیستمهای مورد بررسی که بیشترین ضریب مشارکت مودی را در بین آنها دارا میباشند در جدول (۲) ارائه گردیده است.

نتایج به دست آمده از تحلیل مودال در مراحل بعدی به منظور تحلیل دینامیکی سیستم سد- پی- مخزن و نیز در به دست آوردن ضرایب میرایی از روابط (۱۸) و (۱۹) مورد استفاده قرار میگیرند. برای این منظور نسبت میرایی نظیر آنها ۰/۰۵ در نظر گرفته می شود.

شماره مود					ر بالغ والمعدوم و الم	E /E	
۵	۴	٣	٢	١	المشارة مودهاي عانب	$E_f/E_d$	سيستم
۲/۸۵	۲/۳۷	۲/۰۰	١/۵٣	۱/۵۰	٣,۴		سد– پی
۲/۵۹	7/44	١/٩١	1/84	١/۵٢	١,٣	•/۵	سد- پی- مخزن
۳/۷۵	۳/۲۳	۲/۶۱	۲/۱۲	۲/۱۱	٣,۴	,	سد- پی
۳/۴۱	۲/۸۸	۲/۴۴	۲/۱۶	1/98	١,٢	,	سد- پی- مخزن
۵/۰۵	4/47	۳/۳۳	۲/۹۸	۲/۶۶	٣,۴	5	سد– پی
٣/۵۴	۳/۵۰	۲/۹۱	۲/۶۹	۲/۱۲	١,٢	ſ	سد- پی- مخزن
14/24	۱۱/۳۵	٨/٧٧	۶/۵۵	٣/١٩	١,٢	5	سد– پی
۴/۱۹	۳/۶۲	٣/٢١	٣/١٠	۲/۳۱	١,٣	1	سد- پی- مخزن
۱۸/۱۴	۱۱/۵۹	٨/٨١	۶/۶۰	٣/١٩	١,٢	~	سد- پی
۴/۵۳	۴/۰۸	٣/٣٩	۳/۲۳	۲/۷۴	١,٢	w .	سد- پی- مخزن

جدول ۲- فرکانس مودهای ارتعاشی بر حسب هرتز، ضرایب مشارکت مودی و فرکانس غالب سیستم سد- پی- مخزن

### ۳-۲- تحلیل دینامیکی

### ۳-۲-۲ ایجاد مؤلفههای دورانی زلزله

برای تحقیق حاضر در محاسبه مؤلفههای دورانی، از نتایج به برای تحقیق حاضر در محاسبه مؤلفههای دورانی، از نتایج به دست آمده توسط Lee و Liang [۲۵] در سال ۲۰۰۸ استفاده شده است. ایشان نیز با استفاده همزمان از معادلات تئوری الاستیسیته و تئوری انتشار امواج و در نتیجه معادله (۱۰) به تولید مؤلفه گهوارهای حرکت زمین پرداختند و به عنوان مطالعه موردی، از مؤلفه *S74E* و مؤلفه قائم زلزله سن فرناندو سال موردی، از مؤلفه متاب آنها به ترتیب ۱۰۵۵ و <sup>2</sup> cm/s موردی، از مؤلفه متاب آنها به ترتیب ۱۰۵۵ و <sup>2</sup> cm/s مطالعات خود زاویه موج حادث و سرعت امواج را ثابت فرض مطالعات خود زاویه موج حادث و سرعت امواج را ثابت فرض مؤلفههای گهوارهای و پیچشی به ترتیب ۱۷۲۵ و <sup>2</sup> rad/s مؤلفههای گهوارهای و پیچشی به ترتیب ۱۷۲۵ و <sup>2</sup> cm/s

قابل قبول بوده و علت این اختلاف نیز در نسبت  $\omega/C_x$  می-باشد که مقدار  $C_x$  در این تحقیق وابسته به فرکانس بوده ولی در روش Liang و Lea مستقل از فرکانس می باشد [۲۵].

مؤلفه گهوارهای نظیر شش زلزله مورد بررسی با در نظرگیری سرعت موج برشی مطابق جدول (۱) به دست آمده و مقادیر ماکزیمم شتاب زاویهای، سرعت زاویهای و فرکانس غالب مؤلفه-های انتقالی و چرخشی آنها در جدول (۳) آورده شدهاند.

### ۲-۲-۳ صحتسنجی مدل های مورد استفاده

در این تحقیق به منظور بررسی صحت عملکرد برنامه کامپیوتری تهیه شده در مدلسازی اجزای محدود سیستم سد-پی- مخزن، نتایج استاتیکی و دینامیکی مسائل دو بعدی در شرایط مختلف به دست آمده و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است [۳۹]. به عنوان نمونه نتایج تحلیل دینامیکی سد پاین فلت تحت مؤلفه *S69E* زلزله تفت با نتایج به دست آمده توسط Fenves و Fenves (۴) و (۵) نشان داده شده است.

$\ddot{\varphi}_{ m max}$ (mrad/s <sup>2</sup> )		Imperial Valley	San Fernando	Taft	Tabas	Chi Chi Taiwan	Northridge
		- <i>۶</i> /۱۷	-ΔV	۱۵/۶۰	$-1 \cdot \Lambda/\Delta$	۱۱/۵	44V/4
$\varphi_{\max}$ (mrad/s)		-•/• <b>~</b> •	٠/٣٧	-•/• <b>۴</b> ٣	•/٣٧۶	۰/۰۵۴	-1/77
- فركانس غالب - (HZ)	مؤلفه قائم	۴/۴۵	۴/۰۵	۲/۳۰	٠/٩٠	٠/٢۵	۱۰/۲۵
	مؤلفه افقى	۲/۲۵	۴/۷۸	۴/۴۰	۷/۴۰	• /Y •	• /YA
	مؤلفه گهوارهای	۱/۶۵	٣/١٩	۴/۴۰	•/٨٨	۲/۸۳	۱۰/۳۰
بیشینه طیف توان مؤلفه گهوارهای		١٠	۹/۸۵	۲۵	١٠٩	۶/۶۵	٩٠

جدول ۳- ماکزیمم شتاب زاویهای، سرعت زاویهای، فرکانس غالب مؤلفههای انتقالی و چرخشی و ماکزیمم طیف توان مؤلفه گهوارهای زلزله



شکل۴- تغییر مکان افقی تاج سد پاین فلت در حالت مخزن خالی تحت تحریک مؤلفه S69E زلزله تفت، الف) برگرفته از مرجع [۴۲]، ب) در تحقیق حاضر



شکل ۵- تغییر مکان افقی تاج سد پاین فلت در حالت مخزن پر بر روی پی صلب تحت تحریک مؤلفه *S69E* زلزله تفت، الف) برگرفته از مرجع [۴۲]، ب) در تحقیق حاضر

۳-۲-۳- تحلیل دینامیکی سیستم سد-پی- مخزن در تحقیق حاضر سیستم سد- پی- مخزن، یک بار تحت تأثیر دو مؤلفه افقی و قائم زلزله (تحریک دو مؤلفهای) و بار دیگر تحت اثر دو مؤلفه مذکور و مؤلفه گهوارهای نظیر آنها (تحریک سه مؤلفهای) تحلیل شده و از نسبت تغییرمکان افقی تاج سد تحت تحریک سهمؤلفهای به تحریک دو مؤلفهای، پاسخ نرمال شده آن محاسبه میگردد. پاسخ نرمالشده تغییرمکان افقی تاج

سد پاین فلت با تغییر نسبت  $E_f/E_d$  و نیز ضریب جذب کف به ترتیب در جداول (۴) و (۵) ارائه گردیده است. علاوه بر این تاریخچه زمانی تغییرمکان افقی تاج سد در حالت مخزن پر تحت  $E_f/E_d$  تحریک دو مؤلفهای و سهمؤلفهای زلزله تفت بازای نسبت  $E_f/E_d$ مختلف در شکل (۶) و بازای ترازهای مختلف آب مخزن در شکل (۷) نشان داده شده است.

شماره مود										
۵	۴	٣	٢	١	شماره مودهای غالب	$E_f/E_d$	سيستم			
۲/۸۵	۲/۳۷	۲/۰۰	۱/۵۳	۱/۵۰	۳,۴		سد– پی			
۲/۵۹	7/44	۱/۹۱	1/84	۱/۵۲	١,٣	•/۵	سد- پی- مخزن			
٣/٧۵	٣/٢٣	۲/۶۱	۲/۱۲	۲/۱۱	٣,۴		سد- پی			
۳/۴۱	۲/۸۸	۲/۴۴	۲/۱۶	١/٩٢	١,٢	) )	سد- پی- مخزن			
۵/۰۵	4/47	۳/۳۳	۲/۹۸	۲/۶۶	٣,۴	J	سد– پی			
۳/۵۴	۳/۵۰	۲/۹۱	۲/۶۹	۲/۱۲	١,٢	۲	سد- پی- مخزن			
14/24	۱۱/۳۵	$\lambda/\gamma\gamma$	۶/۵۵	٣/١٩	١,٢	J	سد– پی			
۴/۱۹	37/85	٣/٢١	٣/١٠	۲/۳۱	١,٣	7	سد- پی- مخزن			
18/14	۱۱/۵۹	٨/٨١	8/8·	۳/۱۹	١,٢		سد– پی			
۴/۵۳	۴/۰۸	٣/٣٩	٣/٢٣	۲/۷۴	1,7	00	سد- پی- مخزن			

 $E_f/E_d$  جدول ۴- نسبت تغییر مکان افقی نرمال شده تاج سد بازای مقادیر مختلف

j · u	<b>6</b> 7 . <i>a</i> = ÷	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	8 0 0	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	- 07 .
	(	$^{lpha}$ , ضریب جذب کف			زلزله
١	٠/٧۵	•/۵	۰/۲۵	•/••	
١/٧٩٠	۱/۴۱۰	1/41.	۱/۶۶۰	۱/۷۱۰	Imperial Valley
۱/•۵۰	•/٩٩•	٠/٩٧٩	•/٩۶٨	۰/٩۶٣	San Fernando
1/• 4•	۱/۱۰۰	1/17.	۱/۲۳۰	۱/۲۵۰	Taft
۵/۱۵۰	۱۰/۴۰۰	11/9	۱۳/۵۰۰	11/0	Tabas, Iran
۱/۰۳۰	۱/•۶۰	۱/۰۳۰	۱/۰۲۰	۱/۰۱۰	Chi Chi Taiwan
۲/۳۳۰	۲/۷۴۰	۳/۰۶۰	۳/۳۴۰	۳/۵۱۰	Northridge

 $E_f/E_d = 1$  جدول ۵– نسبت تغییر مکان افقی نرمال شدہ تاج سد با تغییر ضریب جذب کف  $\alpha$  به ازای

مطابق جدول (۴) و شکل (۶)، در اکثر موارد اختلاف نتایج با و بدون در نظر گرفتن اثر مؤلفه دورانی با افزایش مدول الاستیسیته پی کاهش مییابد. علاوه بر این با افزایش مدول الاستیسیته پی، پاسخ نرمالشده تغییر مکان افقی تاج سد به پاسخ سیستم سد- مخزن بر روی پی کاملاً صلب نزدیک میشود و همچنین در حالتی که مخزن سد کاملاً خالی باشد اثر مؤلفه دورانی به حداقل مقدار خود میرسد.

همان طور که از جداول (۳) و (۴) مشاهده می شود، به دلیل بزرگ بودن دامنه مؤلفه گهوارهای زلزلههای نور ثریج و طبس

نسبت به سایر زلزلهها، مؤلفه گهوارهای آنها بیشترین تأثیر را بر پاسخ سیستم داشته و در سایر موارد با توجه به فرکانس غالب مؤلفه گهوارهای زلزله و دوری یا نزدیکی آن به فرکانس اصلی سیستم و نیز طیف توان آنها تأثیر متفاوتی بر پاسخ سیستم داشته و میتوانند باعث افزایش و یا کاهش پاسخ گردند.

افزایش ضریب جذب کف نیز مطابق جدول (۵) موجب کاهش پاسخ نرمال سیستم می گردد و با در نظر گرفتن ضریب جذب معادل یک، پاسخ سیستم به پاسخ حالتی که پی صلب نزدیک می گردد.





تاج سد پاین فلت تحت تحریک زلزله تفت برابر با ۱/۲۵، ۱ و ۱/۰۸ به ترتیب برای حالت مخزن پر، نیمه پر و بدون وجود مخزن به دست میآید. علاوه بر این، مطابق شکل (۷) با کاهش تراز آب مخزن، ضمن کاهش تغییر مکان افقی تاج سد، زمان وقوع بیشینه آن نیز تغییر مییابد. در این حالت پاسخ نرمال شده تغییر مکان افقی



 $E_{f}/E_{d}=1$  شکل ۷- تغییر مکان افقی تاج سد پاین فلت تحت تحریک سه مؤلفهای زلزله تفت با تغییر تراز آب مخزن به ازای

۴- نتیجهگیری

در این تحقیق اثر انعطاف پذیری پی بر پاسخ دینامیکی سیستم سد– پی– مخزن سد بتنی وزنی پاین فلت با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن به روش لاگرانژی–لاگرانژی و با احتساب مؤلفه گهوارهای شش زلزله مختلف به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته پی، ضریب جذب کف و تراز آب مخزن مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل گردیدهاند:

۱- با توجه به محتوای فرکانسی و طیف توان مؤلفه گهواره-ای زلزله و نیز فرکانس غالب سیستمهای مورد بررسی، تأثیر مؤلفه گهوارهای بر پاسخ سد میتواند کم یا زیاد باشد. در هر حال در مواردی که تأثیر مؤلفه دورانی بر پاسخ سد قابل توجه باشد، با افزایش سختی پی سد اثر مؤلفه دورانی کاهش مییابد.

۲- با افزایش ضریب جذب کف، پاسخ نرمال شده تغییر مکان
 تاج سد و اثر مؤلفه گهواره ای کاهش می یابد.

۳- با تغییر ارتفاع آب مخزن و تحریک سه مؤلفهای سیستم، تاریخچه زمانی پاسخ و زمان وقوع بیشینه دستخوش تغییرات کیفی نسبتاً قابل توجهی گردیده و عموماً با افزایش تراز آب، تاریخچه زمانی و پاسخ نرمالشده تغییر مکان افقی تاج سد افزایش مییابد.

۴- با توجه به فرکانس غالب و بیشینه طیف توان مؤلفه گهوارهای و دوری و نزدیکی آن به فرکانس اصلی سیستم، در مواردی که دامنه شتاب گهوارهای و طیف توان آن نسبتاً کوچک باشند، تأثیر آن بر پاسخ نرمالشده سیستم روند مشخصی

نداشته و مؤلفه گهوارهای میتواند موجب افزایش و یا کاهش یاسخ گردد.

۵- مراجع

- Westergard, H. M., "Water Pressure on Dams during Earthquakes", ASCE Transactions, 1933, 98, 418-433.
- [2] Chopra, A. K., "Hydrodynamic Pressure on Dam during Earthquakes", ASCE Transactions, 1967, 93 (EM6), 205-223.
- [3] Chopra, A. K., "Earthquake Behavior of Reservoir-Dam Systems", ASCE Transactions, 1968, 94 (EM6), 1475-1500.
- [4] Chopra, A. K., Dibaj, M., Clough, R. W., Penzin, J., Seed, H. B., "Earthquake Analysis of Earth Dam", Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chie, January, 1969, pp A5-55.
- [5] Zienkiewicz, O. C., Nath, B., Irons, B. M., "Natural Frequencies of Complex, Free, or Submerged Structures by the Finite Element Method", School of Engineering, University College of Swansea, 1965.
- [6] Chakrabarti, P., Chopra, A. K., "Earthquake Analysis of Gravity Dams Including Hydrodynamic Interaction", Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1973, 2 (2), 143-160.
- [7] Chakrabarti, P., Chopra, A. K., "Hydrodynamic Effect in Earthquake Response of Gravity Dams", ASCE Journal

Earthquake Components", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1986, 14 (1), 103-119.

- [19] Huang, B. S., "Ground Rotational Motions of the 1999 Chi Chi, Taiwan Earthquake as Inferred from Dense Array Observations", Geophysical Research Letters, 2003, 30 (6), 1307-1310.
- [20] Ghayamghamian, M. R., Nouri, G. R., "On the Characteristics of Ground Motion Rotational Components using Chiba Dense Array Data", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36 (10), 1407-1442.
- [21] Spudich, P., Steck, L. K., Hellweg, M., Fletcher, J. B., Baker, L. M., "Transient Stresses at Parkfield, California, Produced by the M7.4 Landers Earthquake of June 28, 1992: Observation from the UPSAR Dense Seismograph Array", Journal of Geophysics Research, 1995, 100 (B1), 675-690.

"مقایسه روشهای برآورد مؤلفه پیچشی جنبش زمین با

استفاده از دادههای شبکه شتابنگاری متراکم"، مجله

ژئوفیزیک ایران، ۱۳۸۹، ۴ (۲)، ۳۲-۴۸.

- [23] Trifunac, M. D., "A Note on Rotational Components of Earthquake Motions on Ground Surface for Incident Body Waves", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1982, 1 (1), 11-19.
- [24] Lee, V. W., Trifunac, M. D., "Rocking Strong Earthquake Accelerations", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1987, 6 (2), 75-89.
- [25] Lee, V. W., Liang, L., "Rotational Components of Strong Motion Earthquakes", the 14<sup>th</sup> world Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [26] Hong-Nan Li, Li-Ye Sun, Su-Yan Wang, "Improved Approach for Obtaining Rotational Components of Seismic Motion", Nuclear Engineering and Design, 2004, 232 (2), 131-137.
- [27] Abdel-Ghaffar, A. M., Rubin, L. I., "Torsional Earthquake Response of Suspension Bridges", ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110 (10), 1467-1484.
- [28] Gupta, V. K., Trifunac, M. D., "Investigation of Building Response to Translational and Excitations", Report No. CE 89-02. Department of Civil Engineering, University of Southern California, 1989.

of Structural Division, ASCE, 1974, 100 (6), 1211-1224.

- [8] Clough, R. W., Zienkiewicz, O. C., "Finite Element Method in Analysis and Design of Dams", International Symposium Criteria and Assumptions for Numerical Analysis of Dams, Swansea, 1975.
- [9] Fenves, G., Chopra, A. K., "Effects of Reservoir Bottom Absorption and Dam-Water-Foundation Rock Interaction on Frequency Response Functions for Concrete Gravity Dams", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1985, 13 (1), 13-31.
- [10] Lotfi, V., Roesset, J. M., Tassoulas, J. L., "A Technique for the Analysis of the Response of Dams to Earthquakes", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1987, 15 (4), 463-490.
- [11] El-Aidi, B. J. F., Hall, "Nonlinear Earthquake Response of Concrete Gravity Dams, Part 1: Modeling", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18 (6), 837-851.
- [12] Navayi Neya, B., "Mathematical Modeling of Concrete Gravity Dams under Earthquake Loading Considering Construction Joints", PhD Thesis, Moscow Power Engineering Institute, 1998.

- Ghaemian, M., Ghobarah, "Nonlinear Seismic Response of Concrete Gravity Dams with Dam-Reservoir Interaction", Engineering Structures, 1999, 21 (4), 306-315.
- [15] Ahmadi, M. T., Razavi, S., "A Three-Dimensional Joint Opening Analysis of an Arch Dam", Computers & Structures, 1992, 44 (1-2, 3), 187-192.
- [16] Kalateh, F., Attarnejad, R., "Finite Element Simulation of Acoustic Cavitation in the Reservoir and Effects on Dynamic Response of Concrete Dams", Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47 (5), 543-558.
- [17] Newmark, N. M., "Torsion in Symmetrical Buildings", The 4<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 1969, pp A3.19-A3.32.
- [18] Ghafory Ashtiani, M., Singh, M. P., "Structural Response for Six Correlated

- [36] El-Aidi, B., Hall, J., "Nonlinear Earthquake Response of Concrete Gravity Dams, Part 1: Modeling", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18 (6), 837-851.
- [37] Bathe, K. J., "Finite Element Procedures", Prentice Hall, London, 1996.
- [38] Hinton, E., Rock, T., Zienkiewicz, O. C., "A Note on Mass Lumping and Related Processes in the Finite Element", Journal of Earthquake Engineering Structral Dynamics, 1976, 4 (3), 245-249.

[۳۹] نوائی نیا، ب.، "تحلیل هیدرودینامیک سد و مخزن به

روش لاگرانژی"، پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۶۹.

[۴۰] احمدی، م. ت.، نوائینیا، ب.، "تحلیل دینامیکی سد و

مخزن به روش لاگرانژی"، مجله بینالمللی مهندسی

(دانشگاه علم و صنعت)، ۱۳۷۴، (۱) ۶.

- [41] Merriam, J. L., Kraige, L. G., "Engineering Mechanics-Dynamics", Vol. (2), John Wiley & Sons, 2012.
- [42] Fenves, G., Chopra, A. K., "Reservoir Bottom Absorption Effects in Earthquake Response of Concrete Gravity Dams", ASCE Journal of Structural Engineering, 1975, 111 (3), 249-258.

- [29] Goel, R. K., Chopra, A. K., "Dual-level Approach for Seismic Design of Asymmetric-plan Buildings", ASCE, Journal of Structural Engineering, 1994, 120 (1), 161-179.
- [30] Awad, A. M., Humar, J. L., "Dynamic Response of Buildings to Ground Rotational Motion", Canadian Journal of Civil Engineering, 1984, 11 (1), 48-56.
- [31] Kalani Sarokolayi, L., Navayi Neya, B., Tavakoli, H. R., "Dynamic Analysis of Elevated Water Storage Tanks due to Ground Motions Rotational and Translational Components", Arabian Journal of Science and Engineering, 2014, 39 (6), 4391-4403.
- [32] Bustamante, J. I., Flores, A., "Water Pressure on Dams Subjected to Earthquake", ASCE, Journal, Engineering Mechanics, Division, 1966, 92, 115-127.
- [33] Mirzabozorg, H., Varmazyari, M., Ghaemian, M., "Dam-reservoir-Massed Foundation System and Travelling Wave along Reservoir Bottom", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30 (8), 746-756.

[35] Wilson, E. L., Khalvati, M., "Finite Elements for Dynamic Analysis of Fluid-Solid systems", International Journal of Numerical Methodsin Engineering, 1983, .19 (11), 1657-1668.

### **EXTENDED ABSTRACT**

## Foundation Flexibility Effect on Dynamic Response of Concrete Gravity Dams under Correlated Translational and Rotational Components of Ground Motion

Bahram Navayi Neya \*, Leila Kalani Sarokolayi

Faculty of Civil Engineering, Babol University of Technology, Babol 4714871167, Iran

Received: 21 November 2013; Accepted: 28 April 2014

### **Keywords**:

Correlated translational and rotational components, Dam-reservoir-foundation system, Fluid-structure interaction

### 1. Introduction

The kinematics of any point in a medium is ideally expressed in terms of three translational and three rotational components. Observations of earthquake events have shown that many structural failures and damage are associated to rotational components of ground motions. Newmark [1] was perhaps the first to establish a relationship between the torsional and translational components of a ground motion based on constant velocity of wave propagation assumption. Lee and Liang [2] have used wave propagation and classical elasticity theories based on constant wave velocity to develop the algorithms for generating rotational motion from the corresponding available translational motions and Hong-Nan Li et al. [3] proposed an improved approach based on frequency dependent wave velocity to generate the rotational components. Kalani Sarokolayi et al. [4] have used this method and they have verified their results using recorded rotational components. Recently the effect of rotational component on dynamic analysis of dam-reservoir system without foundation effect is considered by authors in their previous research [5]; but the effects of rotational components have not been considered in dynamic analysis of dam-reservoir-foundation systems in previous researches.

The fluid- structure interaction is also an important subject to dynamic analysis of dams. The Lagrangian approach which were proposed by Hamdi [6] and completed by Wilson and Khalvati [7], have been used by many researchers such as [7-9]. In addition the reservoir bottom absorption effects in earthquake response of concrete gravity dams have been also investigated by some researchers such as Fenves and Chopra [10].

### 2. Methodology

The main purpose of this research is the evaluation of dynamic response of concrete gravity dams considering three correlated translational and rotational components of ground motion and dam-reservoir-foundation interaction using finite element method. For this purpose, the rotational component of ground motion is obtained using translational components and relation of classical elasticity between rotation and wave propagation theories considering frequency dependent wave velocity. Then, these rotational and translational components are applied in finite element model and the dynamic response of system are calculated using Newmark method and Lagrangian-Lagrangian approach based on displacement unknown in both solid and fluid domains. In addition, with the change of elasticity modulus of foundation, earthquake acceleration, water elevation and absorption coefficient of reservoir bottom, the sensitivity of response with respect to these parameters are evaluated.

### 2.1. Rotational component

Based on the classical elasticity and the wave propagation theories, the rocking component of ground motion is obtained from Eq. (1) where this equation can be rewritten as Eq. (2).

\* Corresponding Author

E-mail addresses: Kalani@stu.nit.ac.ir (Leila Kalani Sarokolayi), Navayi@nit.ac.ir (Bahram Navayi Neya).

$$\varphi_{gy} = \frac{i\omega}{C_x} w \tag{1}$$

$$\varphi_{gy}(\omega) = \left(\frac{\omega}{C_x} R_w\right) e^{\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}w\right)^2}$$
(2)

in which  $C_x = \beta / \sin \theta_0$ ,  $\beta$  is the propagation velocity of S wave,  $\omega$  is the angular velocity of each harmonic waves, and  $R_w$  and  $\theta_w$  are amplitude and phase of the vertical component of ground motion.

### 2.2. Dam model and materials

In this paper, the Pine Flat concrete gravity dam was used as a case study. Geometrical characteristics of the pine flat dam are shown in Fig. 1 [9].



Fig. 1. The geometrical characteristic of Pine Flat dam- reservoir- foundation system.

The six earthquakes which were used in calculations are Imperial Valley 1951, San Fernando 1971, Taft 1952, Tabas 1978, Chi Chi 1999 and Northridge 1994. These earthquake have different shear velocity which is an important factor in their peak rotation rates (PRR).

The material properties of the dam were the elasticity modulus;  $E_d = 2.275 \times 10^{10} N/m^2$ , density  $\rho_d = 2500 \ kg/m^3$ , and poisson's ratio  $\upsilon = 0.2$ . These properties for foundation are  $E_f = 7.03 \times 10^{10} N/m^2$ ,  $\rho_f = 2650 \ kg/m^3$  and  $\upsilon_f = 0.33$ , respectively. The bulk modulus and density of water are considered as  $K_w = 2.07 \times 10^{10} N/m^2$  and  $\rho = 1000 \ kg/m^3$ . In this research, different ratios of elasticity modulus for dam and foundation, absorption coefficients of reservoir bottom and water elevations were considered.

#### 3. Results and discussion

The horizontal displacement of dam crest for dam-reservoir (D-R) and dam-reservoir-foundation (D-R-F) systems subjected to two translational components, 2C, and two translational added by their correlated rotational components, 3C, are obtained and the ratio of response due to 3C and 2C which is named as Normalized response, are presented in Table 1. The effects of absorption coefficients on Normalized response of system are also shown in Table 2 and the effects of water elevation on dam crest response subjected to 3C are shown in Fig. 2.

Earthquake	$E_f/E_d$	<sub>d</sub> =0.5	$E_f/I$	$E_d = 1$	$E_f/I$	$E_d = 2$	$E_f/E_c$	l=200	$E_f/E$	$d = \infty$
	D-R	D-R-F	D-R	D-R-F	D-R	D-R-F	D-R	D-R-F	D-R	D-R-F
Imperial Valley	2.87	2.03	2.59	1.71	2.26	1.44	1.15	1.27	1.15	1.27
San Fernando	1.30	0.98	1.33	0.96	1.12	1.02	1.06	1.01	0.99	1.07
Taft	1.35	1.15	1.08	1.25	1.13	1.20	1.02	1.18	1.03	1.19
Tabas,Iran	19.60	17.40	17.20	11.50	14.40	8.18	26.10	6.38	5.49	6.15
Chi Chi Taiwan	1.01	1.04	0.98	1.01	1.00	1.05	1.05	0.98	1.05	0.98
Northridge	7.75	2.92	7.32	3.51	8.06	3.23	5.58	2.30	5.42	2.42

Table 1. The effect of elasticity modulus on Normalized response of system

Absorption coeificient		0.0	0.25	0.5	0.75	1
	Imperial Valley	1.71	1.66	1.41	1.41	1.79
	San Fernando	0.96	0.97	0.98	0.99	1.05
E authanialia	Taft	1.25	1.23	1.17	1.10	1.04
Eartnquake	Tabas,Iran	11.50	13.50	11.90	10.40	5.15
	Chi Chi Taiwan	1.01	1.02	1.03	1.06	1.03
	Northridge	3.51	3.34	3.06	2.74	2.33

Table 2. The effect of absorption coefficients on Normalized response of system

According to the results, it is concluded that the rotational effects and normalized response of system decrease by increasing the elasticity modulus of foundation.



Fig. 2. The effect of water elevation on dam response subjected to 3C of Taft earthquake.

### 4. Conclusions

Results showed that the effects of rotational components of ground motion on the dynamic response of concrete gravity dams can be low or high depending on their frequency range and power spectrum. In cases which the rotational effect is high, the dam response to rotational component of earthquake will be decreased with the increase of the foundation elasticity modulus and reservoir bottom absorption coefficients. In addition with the increase of water elevation, the rotational effect will increase and the response time history also will change.

### 5. References

- [1] Newmark, N. M., "Torsion in Symmetrical Buildings", The 4<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 1969, pp A3.19-A3.32.
- [2] Lee, V. W., Liang, L., "Rotational Components of Strong Motion Earthquakes", the 14<sup>th</sup> world Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [3] Hong-Nan Li, Li-Ye Sun, Su-Yan Wang, "Improved Approach for Obtaining Rotational Components of Seismic Motion", Nuclear Engineering and Design, 2004, 232 (2), 131-137.
- [4] Kalani Sarokolayi, L., Navayi Neya, B., Tavakoli., H. R., "Dynamic Analysis of Elevated Water Storage Tanks due to Ground Motions Rotational and Translational Components", Arabian Journal of Science and Engineering, 2014, 39 (6), 4391-4403.
- [5] Kalani Sarokolayi, L., Navayi Neya, B., Vaseghi Amiri, J., "Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Gravity Dam Considering Rotational Component of Ground Motion", International Journal of Civil Engineering, 2015, 13 (1), 327-334.
- [6] Hamdi, M. A., Ousset, Y., Verchery, G., "A Displacement Method for the Analysis of Vibration of Coupled Fluid-Structure System", International Journal of Numerical Methods in Engineering, 1978, 13(1), 130-150.
- [7] Wilson, E. L., Khalvati, M., "Finite Elements for Dynamic Analysis of Fluid-Solid systems", International Journal of Numerical Methodsin Engineering, 1983, .19 (11), 1657-1668.
- [8] El-Aidi, B., Hall, J., "Nonlinear Earthquake Response of Concrete Gravity Dams, Part 1: Modeling", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18 (6), 837-851.
- [9] Navayi Neya, B., "Mathematical Modeling of Concrete Gravity Dams under Earthquake Loading Considering Construction Joints", PhD Thesis, Moscow Power Engineering Institute, 1998.
- [10] Fenves, G., Chopra, A. K., "Reservoir Bottom Absorption Effects in Earthquake Response of Concrete Gravity Dams", ASCE Journal of Structural Engineering, 1975, 111 (3), 249-258.