

اثر مؤلفه‌های دورانی زلزله در پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی با احتساب اندرکنش سد و مخزن

لیلاکلانی ساروکلابی (دانشجوی دکتری)

بهرام نوانی نیا* (دانشیار)

جواد وانقی امیری (دانشیار)

حمیدرضا توکلی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص. ۹۳-۸۱)
دربی ۲-۳۰، شماره ۱/۲، ص. ۹۳-۸۱

هدف این پژوهش، ارائه‌ی فرمول‌بندی مناسب به منظور بررسی اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی حرکت زمین در پاسخ سدهای بتنی وزنی با احتساب اندرکنش سد و مخزن به روش اجزاء محدود است. بدین منظور، مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین با استفاده از مؤلفه‌های انتقالی آن با در نظر گرفتن سرعت امواج وابسته به بسامد تولید می‌شوند. سپس این مؤلفه‌ها به روش‌های مناسب به مدل اجزاء محدود سیستم سد-مخزن اعمال و پاسخ دینامیکی آن با استفاده از روش نیومارک و با در نظرگیری تغییرمکان به‌عنوان متغیر مجهول در گره‌های شبکه‌ی اجزاء محدود کل سیستم که به روش لاگرانژی-لاگرانژی معروف است، در دست می‌آید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با توجه به بیشینه‌ی مقدار مؤلفه‌های دورانی و نیز طیف محتوای بسامدی آنها، ممکن است به طور قابل توجهی، تحت شرایط خاص مؤثر باشند.

l.kalani@stu.nit.ac.ir
navayi@nit.ac.ir
vaseghi@nit.ac.ir
tavakoli@nit.ac.ir

واژگان کلیدی: مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین، سرعت امواج وابسته به بسامد، اندرکنش سد و مخزن، روش لاگرانژی-لاگرانژی.

۱. مقدمه

آنالیز دینامیکی سدهای بتنی وزنی اولین بار در سال ۱۹۳۳ به منظور تعیین فشار هیدرودینامیک به فرم تحلیلی و با یک سری فرضیات ساده‌شونده صورت پذیرفت.^[۱] همچنین در سال ۱۹۶۷ فشار هیدرودینامیک وارد بر سد با برطرف شدن محدودیت رابطه‌ی وسترگارد برای تحریک‌های با دوره‌ی تناوب پایین تعیین شد.^[۲] بعد از آن طی مقالات متعددی به تأثیر اهمیت اندرکنش سد و مخزن، سد و پی و مخزن، شیب بالادست سد، اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله، اثر رسوبات، شیب کف مخزن و حرکات ناهمگون زمین در تحلیل دینامیکی سدها اشاره شد.^[۳-۵] همچنین در سال ۱۹۷۰ با در نظر گرفتن انعطاف پذیری سد، پاسخ سازه به تحریک هارمونیک به صورت تحلیلی ارائه و نشان داده شد که در نظر نگرفتن تراکم‌پذیری سیال و نیز اندرکنش بین سد و مخزن در بسیاری از حالات، خطای قابل توجهی به دنبال خواهد داشت.^[۶] علاوه بر این، در سال ۱۹۷۳ در پژوهشی دیگر با لحاظ کردن مؤلفه‌ی قائم زلزله به روش تحلیلی نتیجه گرفته شد که مؤلفه‌ی قائم زلزله تأثیر زیادی در نیروی هیدرودینامیک وارد بر وجه بالادست سد دارد.^[۷] این اثر به خصوص زمانی که اندرکنش سد و مخزن نیز لحاظ شود، بیشتر می‌شود. به دلیل محدودیت‌های روش تحلیلی جهت

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۱۲/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۱/۹/۲۲، پذیرش ۱۳۹۱/۱۱/۲۸.

و پدیده‌ی خلاءسازی بر پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی را مورد بررسی قرار دادند. [۲۰، ۱۹، ۱۶]

در حالت کلی روش‌های برخورد با مسئله‌ی اندرکنش جامد و سیال را می‌توان به ۳ گروه طبقه‌بندی کرد، که شامل: روش‌های جرم‌افزوده، لاگرانژی-اویلری، و لاگرانژی-لاگرانژی هستند. در روش جرم‌افزوده، مقداری از جرم سیال در سطح مشترک بین سد و مخزن به مدل سد اضافه و با این جرم افزوده، سازه آنالیز دینامیکی می‌شود. در این روش سد انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده است و از تراکم‌پذیری و سختی سیال صرف‌نظر می‌شود. این روش نسبتاً ساده است و لیکن نتایج حاصله محافظه‌کارانه خواهد بود. [۱] در روش اویلری-لاگرانژی، محیط سد و مخزن به ترتیب براساس دیدگاه‌های لاگرانژی و اویلری فرمول‌بندی می‌شوند که در تحلیل به روش اجزاء محدود، معادلات سیستم کوپله ضمن نامتقارنی وقت زیادی را نیز جهت آنالیز سیستم می‌طلبد. علاوه بر این، در صورتی که محاسبات با در نظر گرفتن تراکم‌پذیری سیال صورت پذیرد؛ محاسبات نسبت به حالت تراکم‌ناپذیر وقت‌گیرتر و طولانی‌تر می‌شود. [۱۷] جهت رفع عیوب ذکرشده و به منظور ساخت فرمول‌بندی یکسان در دو محیط سازه و سیال، روش لاگرانژی در محیط سیال اولین بار در پژوهشی پیشنهاد، [۲۱] و در پژوهش دیگری برای تحلیل لرزه‌ی سدهای قوسی به کار گرفته شد. [۲۲] بعد از آن فرمول‌بندی روش‌های اویلری و لاگرانژی در سیال توسط پژوهشگران مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت، [۲۳، ۲۴] و نشان داده شد که نتایج حاصله از تحلیل اجزاء محدود مخزن سد به دو روش اویلری و لاگرانژی در محیطی رفتار خطی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. در ادامه، کارهای زیادی به تحلیل دینامیکی سد و مخزن با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار غیرخطی اختصاص یافته است که در این پژوهش مورد بررسی قرار نمی‌گیرند.

یکی دیگر از مسائلی که در تحلیل دینامیکی سیستم سد-مخزن می‌تواند تأثیرگذار باشد، اثر مؤلفه‌ی دورانی جنبش زمین است. در حالت کلی جنبش زمین شامل ۳ مؤلفه‌ی حرکت انتقالی و ۳ مؤلفه‌ی حرکت دورانی است. مؤلفه‌های انتقالی شامل ۲ مؤلفه‌ی افقی و ۱ مؤلفه‌ی قائم و مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین شامل دو مؤلفه‌ی گهواره‌ی (حول محورهای افقی) و یک مؤلفه‌ی پیچشی (حول محور قائم) هستند. آنچه تاکنون در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ی سازه‌ها در برابر زلزله مرسوم بوده است، در نظر گرفتن اثر مؤلفه‌های انتقالی زلزله است و مؤلفه‌های دورانی کمتر مورد توجه واقع شده‌اند، که علت اصلی این امر کوچک بودن دامنه‌ی ارتعاش مؤلفه‌های دورانی و عدم امکان ثبت آنها با استفاده از دستگاه‌های استاندارد لرزه‌نگاری و نیز کوچک انگاشته شدن تأثیر آنها در سازه‌هاست. در طول سال‌های متمادی، مشکلاتی که در زمینه‌ی ثبت مؤلفه‌های دورانی جنبش زمین وجود داشته است، موجب شده است تا پژوهشگران در صدد تولید این مؤلفه‌ها با استفاده از مؤلفه‌های انتقالی موجود برآیند و برای این منظور به استفاده از روابط تئوری روی آورند. با در نظر گرفتن روابط تئوریک، دو روش کلی برای تولید مؤلفه‌های دورانی توسط پژوهشگران مختلف مورد استفاده قرار گرفته است:

روش اول: استفاده از معادله‌ی کلاسیک تئوری کشسانی که در آن رابطه‌ی بین حرکت انتقالی در داخل صفحه و چرخش حول محور عمود بر صفحه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش اولین بار در سال ۱۹۶۹ مطرح شد. [۲۵] بعدها با توسعه‌ی این روش، ۳ روش برای برآورد مؤلفه‌ی دورانی بر حسب مؤلفه‌های انتقالی معرفی شد که شامل: روش‌های مشتق زمانی، تفاضل محدود، و ژئودتیک است. روش مشتق زمانی توسط پژوهشگران مختلفی به منظور برآورد مؤلفه‌ی پیچشی مورد استفاده قرار گرفته است. [۲۶] در این روش، فقط با داشتن شتاب‌نگاشت‌های انتقالی در

یک نقطه از سطح زمین می‌توان مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین را به دست آورد. روش تفاضل محدود نیز در پژوهش‌های متعددی که در سال‌های ۲۰۰۳، [۲۷] و در ۲۰۰۷، [۲۸] به منظور برآورد مؤلفه‌ی پیچشی انجام شده مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، شتاب‌نگاشت دست‌کم دو نقطه از سطح زمین باید در دسترس باشد. روش ژئودتیک نیز در سال ۱۹۹۵ مطرح شده است. [۲۹] در این روش می‌توان با به کارگیری هم‌زمان چندین ایستگاه، مؤلفه‌های دورانی را با دقت بیشتری محاسبه کرد. با این حال، وجود دست‌کم ۳ ایستگاه برای تعیین گرادبان جابه‌جایی افقی در این روش ضروری است. در سال‌های اخیر، تلاش‌هایی چند در زمینه‌ی اختراع دستگاه‌های لرزه‌نگاری با حساسیت بسیار بالا و یا ساخت سازه‌های صلب متشکل از چندین شتاب‌نگار انتقالی به منظور ثبت مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین صورت پذیرفته است. اولین بار در سال ۱۹۹۴ با استفاده از مقادیر متناهی مواد منفجره (حدود ۱ کیلو تن) و با اجرای آزمایش انفجار شیمیایی در صحرای نوادی آمریکا اندازه‌گیری جنبش انتقالی و پیچشی با استفاده از یک حس‌گر دورانی انجام شد. [۳۰] ولی کاربرد چنین حس‌گرهایی بسیار محدود و فقط برای بزرگای بالا و نیز فاصله‌ی کم دارای دقت مناسب است. در چند سال اخیر استفاده از دستگاه‌های اپتیکی به خصوص استفاده از لیزر در توسعه‌ی دستگاه‌های اندازه‌گیری مؤلفه‌ی پیچشی نقش زیادی داشته است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۶ با نصب یک حلقه‌ی لیزری در کنار شبکه‌ی لرزه‌نگاری، مؤلفه‌ی پیچشی حاصل از اختلاف تفاضلی مؤلفه‌های انتقالی و مؤلفه‌ی پیچشی ثبت‌شده در شبکه‌ی لیزری مورد مقایسه قرار گرفت. [۳۱] نتایج بررسی‌ها نشان داد که در حالت کلی، بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده‌ی حاصل از حلقه‌ی لیزری و شبکه‌ی لرزه‌نگاری به روش ژئودتیک، تطابق بسیار خوبی وجود داشته و بیشینه‌ی ضریب همبستگی بین این دو مقدار به ۰٫۹۴ نیز رسیده است. در سال ۲۰۰۴، لرزه‌نگارهای دورانی در ایستگاه HGSD در تایوان نصب شده است، که تاکنون موفق به ثبت مؤلفه‌ی دورانی مربوط به چند زلزله‌ی محلی شده‌اند. جمع‌آوری نتایج مربوط به ثبت شتاب‌نگارهای انتقالی و دورانی بین سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ نشان می‌دهد که بین بیشینه‌ی شتاب انتقالی و بیشینه‌ی سرعت دورانی رابطه‌ی خطی وجود دارد. [۳۲] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از شبکه‌ی شتاب‌نگاری مترکم، چپا که یکی از شبکه‌های منحصر به فرد شتاب‌نگاری از لحاظ تعداد، چیدمان و فواصل جای‌گذاری شتاب‌نگارهاست، به تولید مؤلفه‌های پیچشی با استفاده از روش ژئودتیک پرداخته شد و نتایج به دست‌آمده با نتایج حاصل از روش‌های مشتق زمانی تک‌ایستگاهی و روش تفاضل محدود دو ایستگاه مورد مقایسه قرار گرفت و این نتیجه به دست‌آمد که مقادیر حاصل از روش مشتق زمانی در همه‌ی ایستگاه‌ها از نتایج به دست‌آمده از روش تفاضل محدود بیشتر است و در فواصل جدایی کم (در حدود ۵ متر)، مقادیر این دو روش تطابق قابل قبولی داشته‌اند. [۳۳] این در حالی است که مقادیر محاسبه‌شده با روش ژئودتیک کمتر از مقادیر به دست‌آمده از روش‌های مشتق زمانی و تفاضل محدود بوده است، به طوری که بعضاً نسبت بیشینه‌ی دوران در روش مشتق زمانی به روش ژئودتیک به ۳ نیز می‌رسد.

در روش‌های مذکور که از روش نیومارک نشأت می‌گیرد، سرعت ظاهری امواج ثابت فرض می‌شود. در حالی که امواج با بسامدهای مختلف می‌توانند دارای سرعت‌های متفاوتی باشند، ضمن اینکه در این روش تفاوتی در نحوه‌ی به دست‌آوردن مؤلفه‌های گهواره‌ی و پیچشی وجود ندارد.

روش دوم: که در پژوهش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، [۳۴-۳۶] استفاده از معادلات تئوری کشسانی و تئوری انتشار امواج به طور هم‌زمان است؛ که علاوه بر سرعت ظاهری امواج، زاویه‌ی موج حادث نیز در برآورد مؤلفه‌ی پیچشی و گهواره‌ی

(ASS) و زاویه‌ی آنها با محور z را نشان می‌دهد. همچنین مؤلفه‌های انتقالی w و u و مؤلفه‌ی گهواره‌ی نظیر ϕ_{gy} ناشی از انتشار موج حادث SV در صفحه‌ی $y = 0$ نیز در این شکل نشان داده شده است. این مشخصه‌ها برای مؤلفه‌های انتقالی w, v و مؤلفه‌ی گهواره‌ی نظیر ϕ_{gx} در صفحه‌ی $x = 0$ نیز قابل تعمیم هستند. این تذکر لازم است که در شکل ۱ زوایای موج حادث θ_0 و موج SV بازتابیده شده (θ_1) با هم برابر و نیز زاویه‌ی موج بازتابیده‌ی P برابر θ_1 است. برای موج هارمونیک با بسامد ω ، تابع پتانسیل حرکت موج بر حسب مختصات مکانی و زمان به صورت روابط ۱ الی ۳ قابل بیان است.^[۲۹]

$$\psi_{SV} = A_S \exp i\omega \left(\frac{\sin \theta_0}{\beta} x - \frac{\cos \theta_0}{\beta} z - t \right) \quad (1)$$

$$\varphi_{SP} = A_{SP} \exp i\omega \left(\frac{\sin \theta_1}{\alpha} x + \frac{\cos \theta_1}{\alpha} z - t \right) \quad (2)$$

$$\psi_{SS} = A_{SS} \exp i\omega \left(\frac{\sin \theta_0}{\beta} x + \frac{\cos \theta_0}{\beta} z - t \right) \quad (3)$$

که در این روابط، α و β به ترتیب سرعت انتشار امواج P و S است و از روابط ۴ و ۵ قابل محاسبه هستند.^[۳۰]

$$\alpha = \left[\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\beta = \left[\frac{G}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{E}{\rho} \frac{1}{(1+\nu)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

در این روابط، E, G, ρ و ν بیه ترتیب مدول یانگ، مدول برشی، چگالی و ضریب پواسون بستر است.

با استفاده از تابع پتانسیل حرکت، مؤلفه‌های w و u در جهات x و z به صورت روابط ۶ و ۷ بیان می‌شوند:

$$u = \frac{\partial \varphi_{SP}}{\partial x} + \frac{\partial (\psi_{SV} + \psi_{SS})}{\partial z} \quad (6)$$

$$w = \frac{\partial \varphi_{SP}}{\partial z} - \frac{\partial (\psi_{SV} + \psi_{SS})}{\partial x} \quad (7)$$

با استفاده از شرط مرزی تنش برشی صفر در سطح زمین (رابطه‌ی ۸) و رابطه‌ی کلاسیک تئوری کشسانی بین چرخش و تغییرمکان (رابطه‌ی ۹)، مؤلفه‌ی گهواره‌ی حرکت به دست می‌آید (رابطه‌ی ۱۰):

$$\tau_{xz} \Big|_{z=0} = \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=0} = 0 \quad (8)$$

$$\phi_{gy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (9)$$

$$\phi_{gy} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial^2 \varphi_{SP}}{\partial z \partial x} - \frac{\partial^2 (\psi_{SV} + \psi_{SS})}{\partial^2 x} = i\omega \frac{\cos \theta_1}{\alpha} i\omega \frac{\sin \theta_0}{\alpha} \varphi_{SP} - \left[(i\omega \frac{\sin \theta_0}{\beta}) \psi_{SV} + (i\omega \frac{\sin \theta_0}{\beta})^2 \psi_{SS} \right] \quad (10)$$

در نهایت با به‌کارگیری قانون اسنل می‌توان رابطه‌ی ۱۱ را نتیجه گرفت:^[۳۱]

$$\varphi_{gy} = \frac{i\omega}{C_x} w \quad (11)$$

که در آن، $C_x = \beta / \sin \theta_0$ است. این روابط به طور مشابه برای مؤلفه‌ی گهواره‌ی φ_{gx} نیز قابل استنتاج هستند. مؤلفه‌ی پیچشی حرکت زمین نیز از انتشار موج SH به دست می‌آید.^[۳۲] در روابط مذکور، زاویه‌ی انتشار موج حادث $(\sin \theta_0)$ و سرعت ظاهری امواج $(C_x = \beta / \sin \theta_0)$ ، که وابسته به بسامد آنها هستند، باید محاسبه شوند.

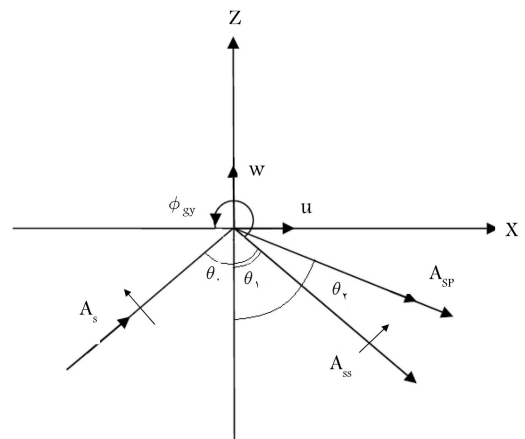
تأثیرگذار است. با وجود این، در این روش سرعت امواج و زاویه‌ی موج حادث، مستقل از بسامد در نظر گرفته شده است. پژوهشگرانی نیز با توسعه‌ی این روش، سرعت و نیز زاویه‌ی موج حادث وابسته به بسامد را در محاسبه‌ی مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین در نظر گرفته‌اند.^[۳۳] در پژوهشی دیگر نیز با استفاده از روش مذکور به بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی مخازن هوایی آب با در نظرگیری اندرکنش آب و سازه پرداخته و نشان داده شد که مؤلفه‌های دورانی جنبش زمین در شرایط خاص می‌توانند تأثیر بسزایی در پاسخ لرزه‌ی این‌گونه سازه‌ها داشته باشد.^[۳۴]

در این پژوهش 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، تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زمین مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج با حالتی که فقط اثر مؤلفه‌های انتقالی در نظر گرفته شده، مقایسه شده است. بدین منظور مؤلفه‌های دورانی حرکت با استفاده از مؤلفه‌های انتقالی ثبت‌شده‌ی مربوط به ۶ زلزله با محتوای بسامدی مختلف به روش هانگ نان لی و با در نظرگیری سرعت امواج و زاویه‌ی موج وابسته به بسامد تولید و به سیستم اجزاء محدود سد و مخزن اعمال شده است. علاوه بر این، با تغییر تراز آب مخزن و در نتیجه تغییر بسامد ارتعاش طبیعی سیستم، اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی در پاسخ دینامیکی سیستم نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. تئوری

۲.۱. ایجاد مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین

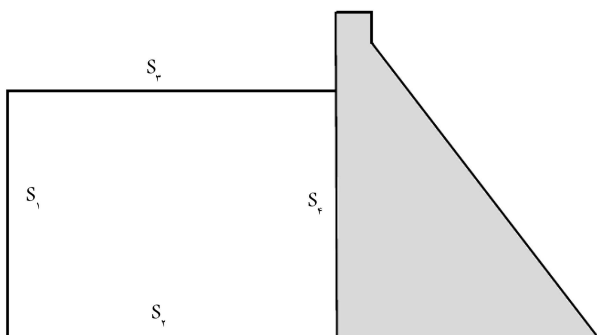
در این پژوهش از روش توسعه‌یافته‌ی هانگ نان لی و همکاران،^[۳۵] برای تولید مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین استفاده شده است، که در آن از تابع پتانسیل حرکت امواج زلزله، که از مرکز کانونی زمین لرزه ساطع می‌شوند و به سمت سطح زمین حرکت می‌کنند، استفاده شده است. این توابع پتانسیل برای امواج SH, SV, P و امواج سطحی متفاوت هستند. از آنجا که امواج ناشی از زلزله، بیشتر ناشی از حرکت زمین در راستای گسل هستند و چنین حرکتی منجر به ایجاد امواج برشی می‌شود،^[۳۶] و نیز به دلیل اینکه در این پژوهش تحلیل در فضای دو بعدی صورت می‌پذیرد؛ از تابع پتانسیل موج SV برای تولید مؤلفه‌ی گهواره‌ی حرکت زمین حول محور y استفاده شده است. شکل ۱، نحوه‌ی انتشار موج حادث SV با دامنه‌ی (A_S) و امواج بازتاب‌شده‌ی P و SV ناشی از آن در سطح زمین با دامنه‌های (A_{SP}) و



شکل ۱. نحوه‌ی انتشار موج SV و امواج بازتابی ناشی از آن در سطح زمین.^[۳۷]



شکل ۲. الگوریتم استخراج مؤلفه‌ی گهواره‌بی زلزله.



شکل ۳. سیستم سد - مخزن و شرایط مرزی آنها.

در روش توسعه یافته‌ی هانگ نان لی و همکاران،^[۲۷] برای محاسبه‌ی زاویه‌ی موج حادث، با تغییر متغیر $x = \sin \theta$ و بر مبنای قانون اسنل و نیز شرط مرزی تنش برشی و عمودی صفر در سطح زمین (روابط ۱۲ و ۱۳) و در نهایت از روابط ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شود:

$$K^2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - 2 \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{z=0} = 0 \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = 0 \quad (13)$$

$$G = \frac{2x\sqrt{1-K^2x^2}}{K(1-2x^2)}, \quad \theta_0 < \theta_C \quad (14)$$

$$G = -\frac{2x\sqrt{1-K^2x^2}}{iK(1-2x^2)}, \quad \theta_0 > \theta_C \quad (15)$$

که در این روابط، $\theta_C = \arcsin(\beta/\alpha)$ و $K = \alpha/\beta$ ، $G = \text{tg} \bar{e} = w/u$ زاویه‌ی بحرانی موج حادث است.

به منظور محاسبه‌ی تاریخچه‌ی زمانی گهواره‌بی حرکت زمین، می‌توان رابطه‌ی ۱۱ را به فرم مختلط و به صورت رابطه‌ی ۱۶ بازنویسی کرد:

$$\varphi_{gy}(t) = \frac{i\omega}{C_x} w = (\lambda e^{\frac{\pi}{4}i}) \left(\frac{\omega}{C_x} \right) (R_w \cdot e^{i\theta_w}) = \left(\frac{\omega}{C_x} R_w \right) (e^{(\frac{\pi}{4} + \theta_w)i}) \quad (16)$$

که در آن، ω سرعت زاویه‌ی، R_w دامنه‌ی بسامدی و θ_w فاز موج در بسامد موردنظر هستند که از طیف محتوای بسامدی مؤلفه‌ی انتقالی w به دست می‌آیند. این رابطه همچنین نشان می‌دهد که طیف مؤلفه‌ی گهواره‌بی دارای دامنه‌ی برابر با $\frac{\omega}{C_x} R_w$ است و اختلاف فاز آنها با مؤلفه‌ی انتقالی w برابر $\frac{\pi}{4}$ است. بنابراین، الگوریتم استخراج مؤلفه‌ی گهواره‌بی زلزله، مطابق شکل ۲ است.

در این پژوهش، فرمول‌بندی مطرح شده که شامل دستورهای تبدیل فوریه، حل معادله‌های ۱۴ و ۱۵ و تبدیل عکس فوریه است؛ در نرم‌افزار MATLAB نسخه‌ی ۲۰۱۰ کدنویسی و مؤلفه‌ی گهواره‌بی حرکت زمین به دست آمده است.

۲.۲. معادلات حاکم و شرایط مرزی

سیستم سد - مخزن سدهای بتنی وزنی در حالت دو بعدی که شامل مخزن به طول بی‌نهایت در وجه بالادست سد و نیز رسوبات کف مخزن است، به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر محیط مخزن غیر ویسکوز بر حسب میدان فشار هیدرودینامیکی (P_d) را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۷، که به معادله‌ی موج موسوم است، بیان کرد.^[۲۴،۲۳،۱۷]

$$\nabla^2 P_d = \frac{1}{C_w^2} \frac{\partial^2 P_d}{\partial t^2} \quad (17)$$

در این رابطه، C_w سرعت امواج کشسان در سیال و t زمان است. با توجه به شکل ۳، چهار نوع شرط مرزی برای مخزن می‌توان در نظر گرفت که شامل شرط انتشار امواج در مرز S_1 ، اثر کف مخزن در مرز S_2 ، اثر امواج سطحی در مرز S_3 و اندرکنش سد و مخزن در مرز S_4 هستند.^[۲۴،۲۳]

۳.۲. مدل اجزاء محدود سیستم سد - مخزن

معادلات حاکم بر محیط سد و مخزن به روش لاگرانژی - اویلری به ترتیب بر حسب متغیر تغییر مکان و فشار، رابطه ۱۷، یا تابع پتانسیل سرعت بیان می‌شود. به دلیل

C_{rad} مطابق رابطه ۲۳ به دست می‌آید:

$$C = C_{int} + C_{rad} \quad (23)$$

میرایی داخلی را با استفاده از رابطه ۲۴ می‌توان به ماتریس جرم و سختی کل سیستم ارتباط داد.^[۲۵]

$$C_{int} = \alpha_1 [M] + \beta_1 [K] \quad (24)$$

که در این رابطه، α_1 و β_1 به ترتیب از روابط ۲۵ و ۲۶ قابل محاسبه هستند:^[۲۳]

$$\alpha_1 = 2\omega_1\xi_1 - (\omega_1^\dagger\beta_1) \quad (25)$$

$$\beta_1 = 2 \frac{(\xi_1\omega_1 - \xi_2\omega_2)}{(\omega_1^\dagger - \omega_2^\dagger)} \quad (26)$$

در این روابط، ω_1 و ω_2 دو بسامد مود ارتعاشی سیستم سد-مخزن و ξ_1 و ξ_2 نیز ضرایب میرایی نظیر آنها هستند. میرایی ناشی از انتشار امواج در بالادست مخزن نیز از رابطه ۲۷ قابل محاسبه است:^[۲۳]

$$C_{rad} = \rho_w \cdot C_w \int_{s_1} N^T \cdot N ds \quad (27)$$

در این روابط، N تابع شکل اجزاء آب و C_w نیز سرعت انتشار موج در آب است.

۴.۲. اثر مؤلفه‌ی دورانی شتاب زمین

برای محاسبه‌ی $P_{eff}(t)$ ، در حالتی که اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی مدنظر است، لازم است که شتاب انتقالی نقاط مختلف سیستم با توجه به بحث سینماتیک اجسام صلب و تئوری مربوط محاسبه شود.^[۲۴]

شکل ۴، حرکت عمومی یک جسم صلب و شتاب‌های مربوط به دو حرکت انتقالی و دورانی را نشان می‌دهد. در صورتی که ω و α به ترتیب سرعت و شتاب زاویه‌یی، x و z مختصات نقاط موردنظر نسبت به مبدأ دوران، r بردار موقعیت ذره و $\ddot{u}_g(t)$ و $\ddot{w}_g(t)$ شتاب ناشی از حرکت انتقالی زمین در جهت x و z باشند، شتاب‌های نرمال و مماسی ناشی از این حرکت دورانی از رابطه‌ی ۲۸ قابل محاسبه هستند.^[۲۴]

$$\begin{cases} a_t = r\alpha \\ a_n = r\omega^2 \end{cases} \quad (28)$$

با تبدیل این مؤلفه‌های شتاب از مختصات نرمال و مماسی به مختصات کارترین، رابطه‌ی ۲۹ نتیجه خواهد شد:

$$\begin{cases} a_x = \alpha z - \omega^2 x \\ a_n = -(\alpha x + \omega^2 z) \end{cases} \quad (29)$$

با جمع‌کردن شتاب‌های انتقالی با شتاب‌های به دست آمده از رابطه‌ی ۲۸، در نهایت رابطه‌ی ۳۰ برای محاسبه‌ی شتاب انتقالی معادل به دست می‌آید:

$$\{\ddot{U}_g(t)\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_g(t) + \alpha z - \omega^2 x \\ \ddot{w}_g(t) - (\alpha x + \omega^2 z) \end{Bmatrix} \quad (30)$$

با اعمال این شتاب‌ها به گره‌های اجزاء محدود سیستم سد-مخزن به ترتیب در جهات x و z می‌توان اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله را در نظر گرفت. لازم به ذکر است که به دلیل تأثیر بسیار ناچیز اینرسی دورانی در مقایسه با سایر جملات شتاب از اثر آن صرف‌نظر شده است.

متفاوت بودن متغیر در هر یک از مجموعه معادلات اشاره شده، حل هم‌زمان این معادلات نیازمند محاسبات پیچیده‌ی رایانه‌یی می‌باشد. از این رو در این پژوهش از روش لاگرانژی-لاگرانژی به منظور تحلیل اندرکنش دینامیکی سیستم به روش اجزاء محدود استفاده شده است. در این روش، معادله‌ی دینامیکی حرکت برای سیستم سد-مخزن که تحت شتاب زمین قرار گرفته است، بر حسب تغییر مکان نقاط گره‌یی شبکه‌ی اجزاء محدود به فرم رابطه‌ی ۱۸ بیان می‌شود.^[۲۱]

$$[M] \ddot{U} + [C] \dot{U} + [K] U = P_{eff}(t) \quad (18)$$

که در این رابطه، $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی، $\ddot{U}(t)$ ، $\dot{U}(t)$ و $U(t)$ به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و تغییر مکان نقاط گره‌یی شبکه‌ی اجزاء محدود و $\{U_g(t)\} = [M]^{-1} P_{eff}(t)$ بردار بار گره‌یی مؤثر ناشی از زلزله است. ماتریس جرم مورد استفاده در این پژوهش به روش هیتون^[۲۳] و به فرم یک ماتریس قطری به کار گرفته می‌شود. به دلیل وجود درزهای انقباض در بعد سوم سدهای بتنی وزنی، تحلیل این‌گونه سازه‌ها معمولاً به صورت دوبعدی صورت می‌پذیرد. در این پژوهش، اجزاء مورد استفاده برای محیط سد ۸ گره‌یی با وضعیت تنش مسطح، برای محیط سیال ۹ گره‌یی و در مرز S_2 و به منظور اعمال شرط مرزی از اجزاء تماسی استفاده می‌شود.^[۲۳] اجزاء مورد استفاده، دو بعدی و با دو درجه‌ی آزادی به صورت مستقل انتقالی در هر گره هستند؛ که به منظور اعمال شتاب دورانی زلزله به مدل اجزاء محدود سیستم سد-مخزن از تبدیل آن به شتاب انتقالی معادل، که در بند ۴.۲ اشاره شده استفاده می‌شود. ماتریس سختی کل سیستم از سرهم‌کردن ماتریس سختی نظیر اجزاء سد K_D ، مخزن K_R و نیز اجزاء تماسی K_{INT} مطابق رابطه‌ی ۱۹ به دست می‌آید.

$$K = K_D + K_R + K_{INT} \quad (19)$$

در این رابطه، K_{INT} به منظور اعمال شرایط مرزی آزادی لغزش و نیز عدم جدایی سد از مخزن در مرز S_2 ، که به وسیله‌ی اجزاء تماسی اعمال می‌شود، در نظر گرفته شده است.^[۲۳،۲۴] این تذکر لازم است که در تشکیل ماتریس سختی اجزاء مخزن، برای اعمال قید عدم چرخش، از تابع جریمه استفاده شد. بدین منظور برای جلوگیری از به وجود آمدن سختی کاذب ناشی از قید عدم چرخش، از انتگرال‌گیری کاهش یافته با تعداد نقاط گاوس $2 * 2$ استفاده شده است.^[۲۳،۲۴،۲۵] در تعیین ماتریس سختی اجزاء سیال از رابطه‌ی ۲۰ استفاده شده است که در آن S_f سختی ناشی از امواج سطحی است (رابطه‌ی ۲۱).

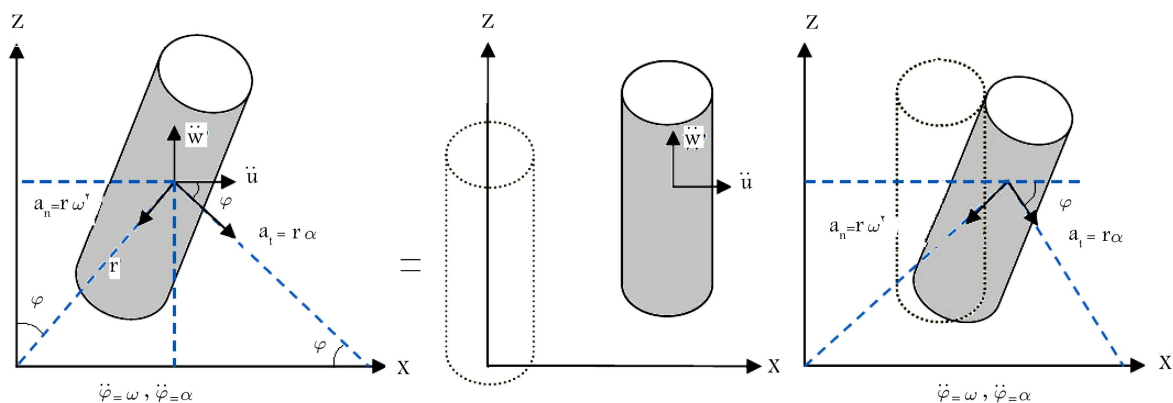
$$K_R = \int_V B^T C_f B dV + S_f \quad (20)$$

$$S_f = \rho_w \cdot g \int_{S_f} N^T \cdot N \cdot ds \quad (21)$$

در این روابط، N تابع شکل گره‌های سطح سیال، B ماتریس دیفرانسیلی توابع شکل، B^T ترانزاده‌ی ماتریس B ، C_f ماتریس کشسانی سیال (که از رابطه‌ی ۲۲ به دست می‌آید)، S ، دامنه‌ی سطح سیال، V ، دامنه‌ی مخزن، ρ_w چگالی آب و g شتاب نقل است.

$$C_f = \begin{bmatrix} K_w & 0 \\ 0 & 100 K_w \end{bmatrix} \quad (22)$$

که در این رابطه، K_w مدول بالک آب مخزن است. ماتریس میرایی کل سیستم نیز از مجموع میرایی داخلی C_{int} و میرایی ناشی از انتشار امواج در مرز بالادست مخزن



شکل ۴. حرکت عمومی جسم صلب و شتاب‌های ناشی از تجزیه‌ی آن.

۳. نتایج عددی

در این پژوهش، به منظور تحلیل دینامیکی سیستم سد-مخزن با در نظر گرفتن اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله بر مبنای فرمول‌بندی ارائه شده در بند ۲، برنامه‌ی رایانه‌ی به زبان فرترن تهیه و به کمک آن محاسبات صورت پذیرفته است. در این پژوهش از مشخصات هندسی و مکانیکی سیستم سد-مخزن سد پایین فلت استفاده شده است.^[۴۴] مشخصات هندسی مقطع این سد و مدل اجزاء محدود آن در شکل ۵ نشان داده شده است، که در آن بیشینه‌ی تراز سطح آب نسبت به کف سد ۱۱۶/۲ متر است و طول مخزن سد نیز ۳ برابر ارتفاع آن در نظر گرفته شده است.

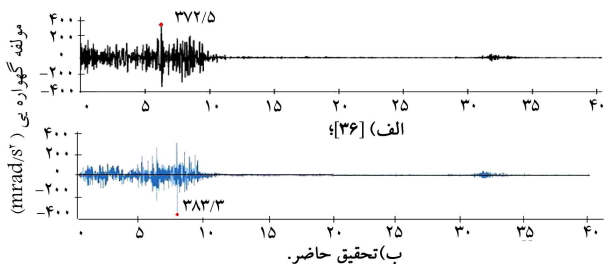
در کلیه‌ی تحلیل‌ها در این پژوهش، محیط سد و مخزن ایزوتروپ و همگن با رفتارکشسان خطی فرض شده است. ماتریس میرایی داخلی سیستم سد-مخزن از جمع ماتریس‌های میرایی سد در بسامد اول و دوم سیستم سد-مخزن با ضریب استهلاک ۵٪ $\xi_1 = 0.05$ و ۴٪ $\xi_2 = 0.04$ و نیز ماتریس میرایی مخزن با ضریب استهلاک ۱٪ $\xi_1 = 0.01$ در بسامد ارتعاشی اول سیستم سد-مخزن تعیین شده است. علاوه بر این، مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح مورد استفاده بدین شرح هستند: چگالی 1000 kg/m^3 و مدول بالک 27 GPa برای آب مخزن و نیز چگالی 2500 kg/m^3 مدول کشسانی 22.75 GPa و ضریب پواسون 0.2 برای مصالح بتن سد.^[۴۴]

برای تعیین پاسخ سیستم سد-مخزن از ۶ شتاب‌نگاشت مختلف مطابق جدول ۱ استفاده شده است. ۶ زلزله‌ی مورد استفاده به گونه‌ی انتخاب شده‌اند که طیف گسترده‌ی از بسامدهای انتقالی و بزرگا و نیز شرایط دوری یا نزدیکی از گسل را شامل شوند.

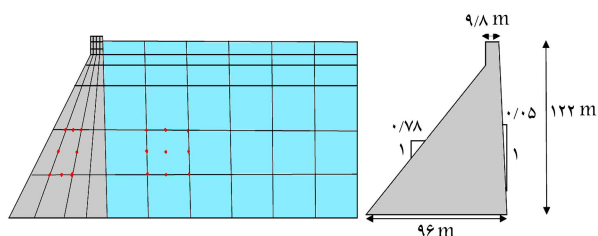
۱.۳. تولید مؤلفه‌ی گهواره‌ی زلزله‌ها

به منظور بررسی صحت فرمول‌بندی مورد استفاده و نیز عملکرد برنامه‌ی تهیه شده در محاسبه‌ی مؤلفه‌های دورانی، نتایج این تحقیق با نتایج به دست آمده‌ی لی و لیانگ^[۳۶] مقایسه شده است. ایشان نیز با استفاده‌ی هم‌زمان از معادلات تئوری کشسانی و تئوری انتشار امواج و در نتیجه معادله‌ی ۱۱، به تولید مؤلفه‌ی گهواره‌ی حرکت زمین پرداختند و به عنوان مطالعه‌ی موردی، از مؤلفه‌ی SYFE و مؤلفه‌ی قائم زلزله‌ی سن فرناندو (۱۹۷۲)، که مقادیر بیشینه‌ی شتاب آنها به ترتیب 1055 cm/s^2 و 696 cm/s^2 است، استفاده کرده‌اند. این تذکر لازم است که ایشان در مطالعات خود، زاویه‌ی موج حادث و سرعت امواج را ثابت فرض کردند. مقادیر بیشینه‌ی به دست آمده در پژوهش‌های ایشان برای مؤلفه‌های گهواره‌ی و پیچشی به ترتیب 0.2725 و 0.248 rad/s^2 و در روش مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب 0.3833 و 0.2545 rad/s^2 - به ازای سرعت موج برشی 300 m/s است. علاوه بر این، تاریخچه‌ی زمانی مؤلفه‌ی گهواره‌ی^[۳۶] و روش مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۶ نشان داده شده است، که اختلاف جواب‌های به دست آمده کمتر از ۳٪ است. علت این اختلاف را می‌توان به $\frac{\omega}{C_s}$ نسبت داد که مقدار C_s توسط لی و لیانگ تقریبی‌تر و مستقل از بسامد در نظر گرفته شده است؛ در حالی که در این پژوهش، وابسته به بسامد لحاظ شده است.

پس از بررسی صحت عملکرد برنامه، مؤلفه‌ی گهواره‌ی نظیر ۶ زلزله‌ی مورد بررسی به روش اشاره شده و با در نظر گرفتن سرعت موج برشی مطابق جدول ۱، تعیین و مقادیر بیشینه‌ی شتاب و سرعت زاویه‌ی و نیز بسامد غالب مؤلفه‌های انتقالی و دورانی آنها در جدول ۲ آورده شده است. علاوه بر این، طیف دامنه‌ی فوریه‌ی مؤلفه‌ی گهواره‌ی ۶ شتاب‌نگاشت انتقالی نیز در شکل ۷ نشان داده شده



شکل ۶. تاریخچه‌ی زمانی مؤلفه‌ی گهواره‌ی زلزله‌ی سن فرناندو.



شکل ۵. مشخصات هندسی و مدل اجزاء محدود سد پایین فلت.

جدول ۱. مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در این پژوهش.

سرعت موج برشی (m/s)	PGA (g)	مؤلفه‌ی ثابت شده	فاصله‌ی مرکز سطحی (km)	ایستگاه	تاریخ وقوع	زلزله
۲۱۳٫۴	۰٫۱۳ ۰٫۲۹	Up-Down North-South	۲۸٫۲۴	۱۱۷EI Centro	۱۹۵۱٫۰۱٫۲۴	Imperial Valley
۲۰۱۶٫۱	۰٫۷۰۹ ۱٫۰۷۵	Vertical SV۴W	۱۱٫۸۶	Pacoma Dam	۱۹۷۱٫۰۲٫۰۹	San Fernando
۳۸۵٫۴	۰٫۱۵۵ ۰٫۱۷۹	Vertical S۶۹E	۳۵٫۰۰	Lincoln School	۱۹۵۲٫۰۷٫۲۱	Taft
۳۳۸٫۶	۰٫۰۶۹ ۰٫۱۰۹	Vertical Longitudinal	۷۴٫۶۶	Boshrooyeh	۱۹۷۸٫۰۹٫۱۶	Iran Tabas,
۵۵۳٫۴	۰٫۰۷۴ ۰٫۱۷۵	Vertical North-South	۳۷٫۸۳	ALS۱۹۹۹۹۱WCWB	۱۹۹۹٫۰۹٫۲۰	Chi Chi Taiwan
۶۲۹٫۰	۰٫۴۲۴ ۰٫۵۱۱	Vertical Longitudinal	۱۱٫۷۹	000LA Dam	۱۹۹۴٫۰۱٫۱۷	Northridge

جدول ۲. بیشینه‌ی شتاب زاویه‌یی، سرعت زاویه‌یی و بسامد غالب مؤلفه‌های انتقالی و دورانی ۶ زلزله‌ی مورد بررسی.

Northridge	Chi Chi Taiwan	Tabas, Iran	Taft	San Fernando	Imperial Valley	زلزله
۴۴۷٫۴	۱۱٫۵	-۱۰٫۸۱۵	۱۵٫۶۰	-۵۷	-۶٫۱۷	$\dot{\varphi}_{max}$ (mrad/S ²)
-۱٫۲۲	۰٫۰۵۴	۰٫۳۷۶	-۰٫۰۴۳	۰٫۳۷	-۰٫۰۳۰	$\dot{\varphi}_{max}$ (mrad/s)
۱۰٫۲۵	۰٫۷۵	۰٫۹۰	۲٫۳۰	۴٫۰۵	۴٫۴۵	مؤلفه‌ی قائم
۰٫۷۸	۰٫۷۰	۷٫۴۰	۴٫۴۰	۴٫۷۸	۲٫۲۵	مؤلفه‌ی طولی
۱٫۱	۰٫۷۵	۰٫۸۸	۱٫۳	۱۱٫۲	۱٫۶۵	مؤلفه‌ی گهواره‌یی

نتایج حاصله با نتایج تئوریک و با نتایج سایر مراجع^[۲۳،۲۴] مقایسه شد، که حاکی از صحت فرمول‌بندی و برنامه‌ی رایانه‌یی تهیه‌شده است. برای حالت‌های دینامیکی علاوه بر کنترل شرط انتشار امواج در بالادست مخزن، فشار هیدرودینامیک ناشی از ارتعاش هارمونیک مخزن برای سد صلب با پاسخ وسترگارد^[۱] و همچنین پاسخ تاج سد پلین فلت تحت شتاب تحریک مؤلفه‌های S۶۹E و قائم زلزله‌ی تفت با نتایج چوپرا^[۱۱] و نیز سایر پژوهشگران^[۲۳،۲۴] مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی موارد، تطابق بسیار خوبی بین نتایج به دست آمده وجود دارد؛ که به‌عنوان نمونه تغییرمکان افقی و قائم تاج سد پلین فلت تحت شتاب تحریک مؤلفه‌ی S۶۹E زلزله‌ی تفت در شکل ۸ با مرجع^[۱۱] مقایسه شده است.

۲.۳.۳. اثر مؤلفه‌های انتقالی و دورانی

به منظور بررسی اثر مؤلفه‌ی گهواره‌یی حرکت زمین بر پاسخ سدهای بتنی وزنی، سد پلین فلت تحت تأثیر ۶ زلزله مطابق جدول ۲ قرار گرفتند. بدین منظور نتایج تحلیل سیستم سد-مخزن در دو حالت فقط تحت اثر مؤلفه‌های انتقالی زلزله (۲ مؤلفه‌یی)، و تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله (۳ مؤلفه‌یی) به دست آمده است، که به‌عنوان نمونه برای زلزله‌های تایوان، تفت، ال سنترو و نورثریج در شکل‌های ۹ الی ۱۲ ارائه شده است.

شکل ۹ پاسخ تغییرمکان افقی و قائم تاج سد پلین فلت در دو حالت مخزن خالی و پر به ازای شتاب‌های تحریک ۲ مؤلفه‌یی و ۳ مؤلفه‌یی زلزله‌ی تایوان را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، مؤلفه‌ی گهواره‌یی شتاب زلزله‌ی تایوان تأثیر چندانی در پاسخ تاج سد چه در حالت مخزن خالی و چه در حالت

است. همان‌طور که از این شکل پیداست، مقادیر بزرگ‌تر طیف دامنه‌ی فوریه در محدوده‌یی از بسامدها اتفاق می‌افتد، که چنانچه این محدوده نزدیک به بسامدهای غالب طبیعی سیستم با ضرایب مشارکت مودی نزدیک‌تر به ۱ باشد، انتظار پاسخ بیشتری از سد می‌رود. همان‌طور که در الگوریتم شکل ۲ اشاره شد، با تبدیل عکس فوریه‌ی طیف‌های مذکور، تاریخچه‌ی زمانی مؤلفه‌ی گهواره‌یی حرکت زمین به دست می‌آید.

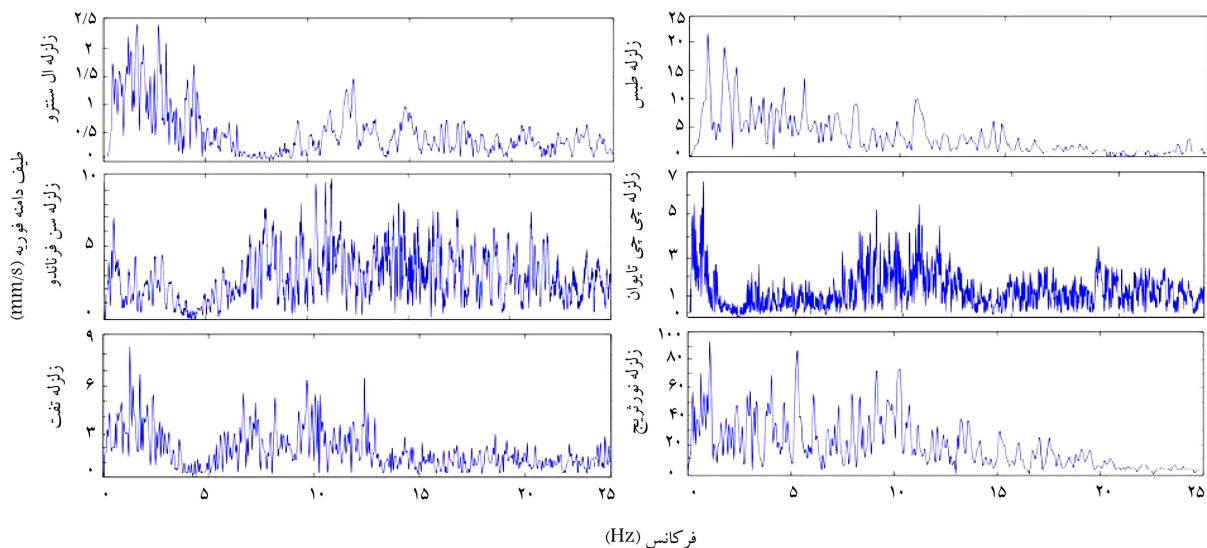
۲.۳.۳. آنالیز مودال

به منظور تعیین بسامدهای ارتعاش آزاد، آنالیز مودال سد خالی و سیستم سد-مخزن با ترازهای یک سوم، دو سوم و تراز نرمال آب مخزن انجام و پنج بسامد ارتعاشی اول به همراه ضرایب مشارکت مودی آنها و نیز بسامد غالب سیستم‌های مورد بررسی تعیین و نتایج در جدول ۳ فهرست شده‌اند. نتایج به دست آمده از آنالیز مودال در مراحل بعدی به منظور تحلیل دینامیکی سیستم در روابط ۲۵ و ۲۶ مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، با تعیین ضرایب مشارکت مودی می‌توان مود غالب ارتعاشی را تعیین کرد که در تفسیر پاسخ سد می‌تواند مؤثر واقع شود.

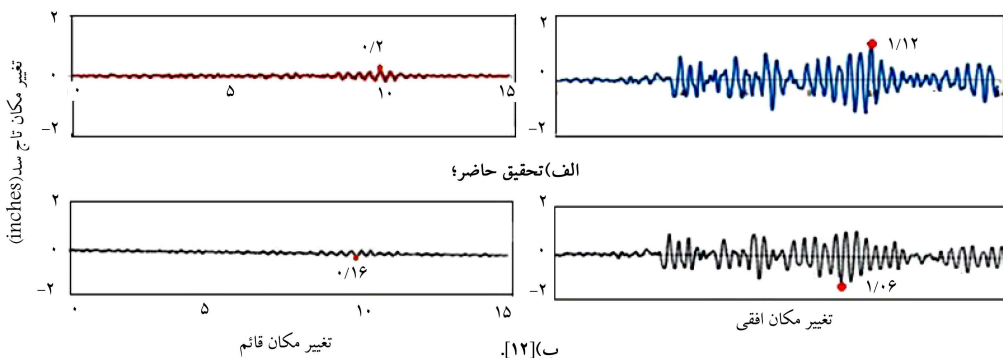
۳.۳. تحلیل دینامیکی

۱.۳.۳. صحت‌سنجی مدل‌سازی

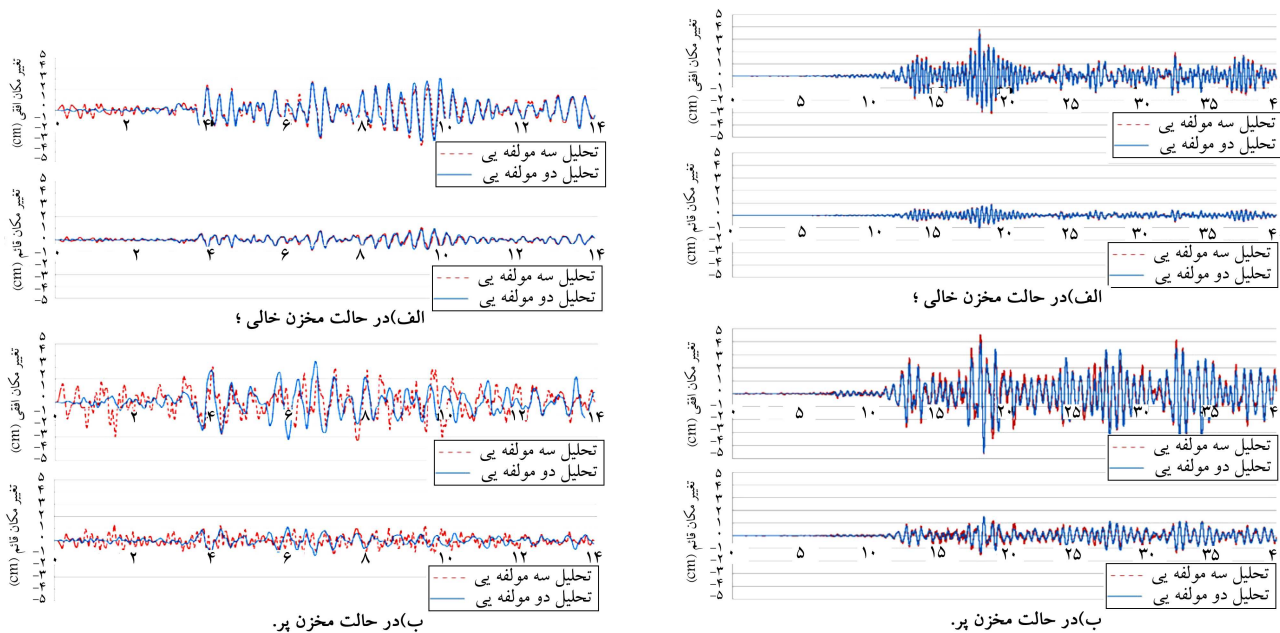
به منظور بررسی کنترل صحت فرمول‌بندی مورد استفاده و برنامه‌ی رایانه‌یی تهیه‌شده در تحلیل سیستم سد-مخزن به روش اجزاء محدود، ابتدا در حالت استاتیکی



شکل ۷. طیف دامنه‌ی بسامدی مؤلفه‌ی گهواره‌یی ۶ شتاب‌نگاشت مورد استفاده بر حسب بسامد.

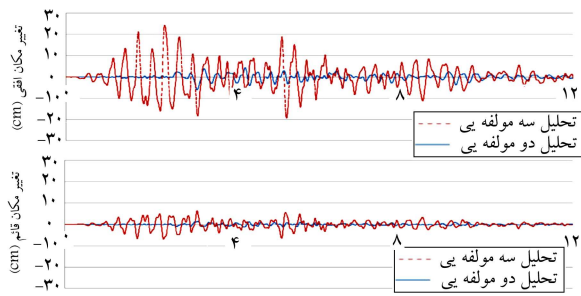


شکل ۸. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان افقی و قائم تاج سد پایین فلت تحت مؤلفه‌ی S69E زلزله‌ی نفت.



شکل ۹. تغییر مکان افقی و قائم تاج سد پایین فلت تحت تحریک زلزله‌ی چی چی تایوان.

شکل ۱۰. تغییر مکان افقی و قائم تاج سد پایین فلت تحت اثر تحریک زلزله‌ی نفت.



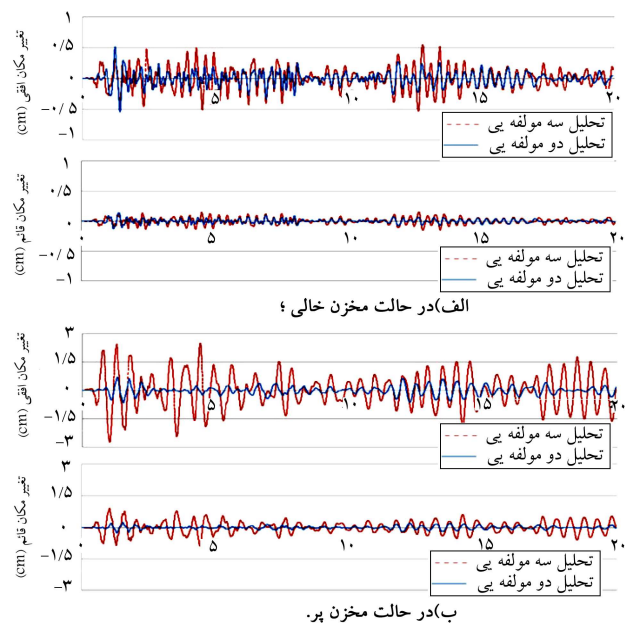
شکل ۱۲. تغییرمکان افقی و قائم تاج سد پائین فلت تحت اثر مؤلفه‌های انتقالی و دورانی زلزله‌ی نورث‌ریج در حالت مخزن خالی.

مخزن پر ندارد. این موضوع برای هر دو مؤلفه‌ی تغییرمکان افقی و قائم تاج سد صادق است. شکل ۱۰ نیز پاسخ تغییرمکان افقی و قائم تاج سد به ازای تحریک ۲ مؤلفه‌ی و ۳ مؤلفه‌ی زلزله‌ی تفت برای دو حالت مخزن خالی و پر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، در حالت مخزن خالی اختلاف قابل توجهی بین پاسخ تاج سد به تحریک ۲ مؤلفه‌ی و ۳ مؤلفه‌ی زلزله وجود ندارد. در حالی که برای حالت مخزن پر، اختلاف نتایج قابل توجه است. این موضوع برای هر دو مؤلفه‌ی تغییرمکان افقی و قائم صادق است. شکل ۱۱، نتایج تحلیل سد پائین فلت تحت اثر تحریک ۲ مؤلفه‌ی و ۳ مؤلفه‌ی زلزله‌ی ال‌سنسترو را نشان می‌دهد. در این حالت مطابق شکل، پاسخ بیشینه‌ی تاج سد به شتاب ۳ مؤلفه‌ی زلزله‌ی ال‌سنسترو در حالت مخزن خالی تغییر چندانی نکرده است و در حالت مخزن پر به‌طور قابل ملاحظه‌ی افزایش یافته است. علاوه بر این، شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهند که در حالت تحریک ۳ مؤلفه‌ی، تاریخچه‌ی زمانی پاسخ تاج سد علاوه بر تغییرات کمی، دستخوش تغییرات کیفی نسبتاً قابل توجهی نیز شده است. برای نمونه، زمان وقوع بیشینه‌ی تغییرمکان افقی از لحظه‌ی $t = 1/5$ به $t = 1/3$ در حالت مخزن خالی و از لحظه‌ی $t = 1/7$ به $t = 1/3$ در حالت مخزن پر جا به جا شده است. بررسی شکل‌های ۹ الی ۱۲ نشان می‌دهد چنانچه طیف محتوای بسامدی مؤلفه‌ی گهواره‌ی زلزله در محدوده‌ی ۳ تا ۵ هرتز، تقریباً بازه‌ی که بسامد ارتعاش طبیعی سیستم سد-مخزن یا سد خالی در آن واقع است، غالب است و در صورتی که دامنه‌ی مؤلفه‌ی گهواره‌ی زلزله، نسبتاً بزرگ باشد؛ وجود این مؤلفه منجر به افزایش پاسخ و در برخی موارد تغییر کیفی و جا به جایی آن نسبت به زمان می‌شود. لازم به ذکر است که چنانچه یکی از شرایط مذکور برقرار نباشد، تأثیر این مؤلفه در پاسخ سد کمتر خواهد شد. شکل ۱۳ دلیلی بر این مدعاست که در آن نتایج تغییرمکان افقی تاج سد پائین فلت با مخزن خالی در سه حالت برای زلزله‌ی سن‌فرناندو با بیشینه‌ی شتاب گهواره‌ی 57 mrad/s^2 (م پیشوند میلی است) و بسامد غالب بالاتراز 10 mrad/s^2 هرتز، زلزله‌ی نورث‌ریج با بیشینه‌ی شتاب گهواره‌ی $447/4 \text{ mrad/s}^2$ و بسامد غالب پایین‌تر از 10 mrad/s^2 هرتز و زلزله‌ی نورث‌ریج که در آن فقط مؤلفه‌ی گهواره‌ی با ضریب $0/1$ مقیاس و بیشینه‌ی شتاب دورانی که به‌طور مصنوعی از $447/4$ به $44/7 \text{ mrad/s}^2$ تقلیل داده شده قابل مشاهده است. همان‌طور که از شکل ۱۳ پیداست، در مورد زلزله‌ی سن‌فرناندو با وجود بزرگ‌بودن بیشینه‌ی دامنه‌ی مؤلفه‌ی گهواره‌ی به دلیل کوچک‌بودن طیف محتوای بسامدی آن در محدوده‌ی ۳ تا ۵ هرتز، وجود این مؤلفه تأثیر چندانی در تغییرمکان افقی تاج سد ندارد. در مورد زلزله‌ی نورث‌ریج نیز وجود هم‌زمان دو عامل مذکور باعث تأثیر قابل توجه مؤلفه‌ی گهواره‌ی در پاسخ تاج سد شده است و در صورت کوچک‌کردن مصنوعی دامنه‌ی مؤلفه‌ی گهواره‌ی، اثر آن نیز به‌طور چشم‌گیری تقلیل پیدا کرده است.

نتایج مشابه زلزله‌ی نورث‌ریج در مورد زلزله‌ی طیس نیز قابل مشاهده است، که

جدول ۳. بسامد ارتعاشی و ضرایب مشارکت مودی سیستم.

وضعیت مخزن	شماره‌ی مود	بسامد (Hz)	ضریب مشارکت مودی	مود غالب
خالی	۱	۳,۱۸۹	۱,۰۰۰	۳,۱۸۹
	۲	۶,۶۰۳	۰,۸۵۹	
	۳	۸,۸۱۳	۰,۴۲۹	
	۴	۱۱,۵۹۱	۰,۶۲۰	
	۵	۱۸,۱۳۸	۰,۵۲۰	
یک سوم پر	۱	۲,۸۱۲	۰,۳۵۵	۲,۸۱۲
	۲	۳,۲۰۶	۰,۳۱۱	
	۳	۵,۶۲۵	۰,۱۷۷	
	۴	۶,۶۳۴	۰,۱۵۱	
	۵	۸,۵۳۲	۰,۱۱۷	
دو سوم پر	۱	۲,۶۱۱	۰,۲۸۷	۴,۴۵۹
	۲	۳,۵۱۲	۰,۱۶۸	
	۳	۴,۳۳۵	۰,۳۰۸	
	۴	۴,۴۵۹	۱,۰۰۰	
	۵	۴,۷۴۹	۰,۰۲۲	
کاملاً پر	۱	۲,۷۴۰	۰,۹۷۵	۳,۲۲۶
	۲	۳,۲۲۶	۱,۰۰۰	
	۳	۳,۳۸۷	۰,۱۴۰	
	۴	۴,۰۸۲	۰,۱۵۰	
	۵	۴,۵۲۹	۰,۰۱۰	



شکل ۱۱. تغییرمکان افقی و قائم تاج سد پائین فلت تحت تحریک زلزله‌ی ال‌سنسترو.

جدول ۴. تغییرمکان افقی و قائم بیشینه و نسبت تغییرمکان افقی نرمال‌شده‌ی تاج سد پایین فلت.

تغییرمکان قائم	تغییرمکان قائم بیشینه (Cm)		تغییرمکان افقی نرمال‌شده	تغییرمکان افقی بیشینه (Cm)		نوع زلزله	سیستم مورد بررسی	
	تحریریک ۳ مؤلفه‌یی	تحریریک ۲ مؤلفه‌یی		تحریریک ۳ مؤلفه‌یی	تحریریک ۲ مؤلفه‌یی			
۱,۰۹۸	۱,۰۵۲	۰,۹۵۸	۱,۰۹۰	۳,۳۷۸	۳,۰۹۹	Taft	سد خالی	
۱,۰۹۰	۰,۱۵۲	۰,۱۴۰	۱,۰۰۵	۰,۵۴۹	۰,۵۴۶	Imperial Valley (El Centro)		
۰,۹۸۵	۳,۳۲۷	۳,۳۷۸	۱,۰۰۴	۱۱,۴۸۱	۱۱,۴۳۰	San Fernando		
۱,۰۴۳	۱,۰۳۹	۰,۹۹۶	۱,۰۴۱	۳,۸۳۵	۲,۶۸۳	Chi Chi Taiwan		
۴,۷۴۰	۶,۷۸۲	۱,۴۳۰	۴,۱۰۰	۲۴,۳۸۴	۵,۹۴۴	ق		
۱,۳۲۰	۱,۸۸۷	۱,۴۳۰	۱,۱۹۰	۷,۱۱۲	۵,۹۴۴	ق		
۵,۱۶۸	۱,۵۶۲	۰,۳۰۲	۵,۲۹۰	۴,۸۵۱	۰,۹۱۷	ق		
۱,۰۸۴	۰,۳۲۸	۰,۳۰۲	۱,۱۵۵	۱,۰۵۹	۰,۹۱۷	ق		
۱,۴۵۹	۲,۲۵۰	۱,۵۴۲	۱,۳۶۸	۷,۵۴۴	۵,۵۱۲	Taft		
۴,۰۲۰	۰,۷۶۲	۰,۱۹۱	۳,۴۱۰	۲,۴۸۹	۰,۷۲۹	Imperial Valley (El Centro)		
۱,۴۹۶	۵,۴۳۶	۳,۶۳۲	۱,۶۳۲	۱۷,۱۱۹	۱۰,۴۹۰	San Fernando		سد با مخزن یک سوم پر
۱,۳۹۵	۲,۰۹۸	۱,۵۰۴	۱,۳۱۱	۶,۹۵۹	۵,۳۰۸	Chi Chi Taiwan		
۱۸,۸۳۰	۳۶,۰۶۸	۱,۹۱۵	۱۶,۴۰۰	۳۸,۱۰۰	۷,۰۱۰	Northridge		
۱۲,۰۷۰	۴,۸۷۷	۰,۴۰۴	۱۳,۳۳۰	۱۱۷,۷۰۰	۱,۲۸۸	Tabas,Iran		
۱,۶۳۵	۱,۸۲۴	۱,۱۱۵	۱,۴۸۷	۵,۹۶۹	۴,۰۱۳	Taft	سد با مخزن دو سوم پر	
۴,۰۵۰	۰,۶۲۷	۰,۱۵۵	۳,۴۶۷	۱,۸۸۵	۰,۵۴۴	Imperial Valley (El Centro)		
۱,۰۰۵	۴,۶۷۴	۴,۶۴۸	۱,۰۴۳	۱۲,۸۰۲	۱۲,۲۶۸	San Fernando		
۱,۴۱۹	۱,۱۸۶	۰,۸۳۷	۱,۳۲۵	۴,۳۴۳	۳,۲۷۷	Chi Chi Taiwan		
۱۲,۸۱۲	۲۲,۹۱۱	۱,۷۸۸	۱۲,۱۵۰	۷۸,۷۴۰	۶,۴۷۷	Northridge		
۵,۶۳۳	۲,۳۰۴	۰,۴۰۹	۵,۹۷۸	۶,۹۸۵	۱,۶۸۰	Tabas,Iran		
۱,۰۷	۱,۳۲۰	۱,۲۳۷	۰,۹۲۹	۳,۲۸۰	۳,۵۳۱	Taft		
۳,۵	۰,۹۱۷	۰,۲۶۲	۳,۹۴۰	۲,۷۴۳	۰,۶۹۶	Imperial Valley (El Centro)		
۱,۰۹۵	۴,۹۷۸	۲,۵۰۲	۰,۹۸۵	۱۶,۰۷۸	۱۶,۳۰۷	San Fernando		
۰,۹۹۵	۱,۵۲۴	۱,۵۳۲	۱,۰۲۲	۴,۶۵۰	۴,۵۴۷	Chi Chi Taiwan		
۱۲,۷۷	۳۲,۷۶۶	۲,۵۶۵	۱۲,۳۹۰	۸۹,۶۶۰	۷,۲۳۹	Northridge		
۳۵,۶۳	۱۱,۴۰۵	۰,۳۲۰	۳۷,۵۴	۳۵,۵۱۲	۰,۸۶۶	Tabas,Iran		

مخزن یک سوم پر و در مورد زلزله‌ی تایوان نیز در حالت مخزن دو سوم پر برای هر دو مؤلفه‌ی افقی و قائم به چشم می‌خورد. علت این موضوع را می‌توان به بسامد طبیعی سد وقتی که مخزن آن یک سوم یا دو سوم پر باشد، نسبت داد؛ که باعث جابه‌جایی بسامد طبیعی سیستم می‌شود. علاوه بر این، نتایج به دست‌آمده در مورد زلزله‌ی سن‌فرناندو و تایوان در جدول ۴ نشان می‌دهد که پاسخ نرمال‌شده می‌تواند کمتر از واحد نیز شود، که بیان‌کننده‌ی کاهش، هرچند بسیار کم، پاسخ ناشی از مؤلفه‌ی گهواره‌یی زلزله است. مطابق جدول ۴ در مورد زلزله‌های نورتریج و طیس به دلیل بزرگ بودن نسبی دامنه و طیف محتوای بسامدی مؤلفه‌ی گهواره‌یی در محدوده‌ی ۳ تا ۵ هرتز، نسبت پاسخ نرمال‌شده‌ی تغییرمکان افقی و قائم بزرگ است و با مقیاس کردن مؤلفه‌ی گهواره‌یی این دو زلزله با ضریب ۰/۱، این نسبت به طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند؛ به طوری که مقدار آن از ۴/۱ به ۱/۱۹ و از ۵/۲۹ به ۱/۱۵۵ به ترتیب برای مؤلفه‌ی افقی زلزله نورتریج و طیس و از مقدار ۴/۷۴ به ۱/۳۲ و ۵/۱۶۸ به ۱/۸۴ به ترتیب برای مؤلفه‌ی قائم زلزله‌ی نورتریج و طیس در حالت مخزن خالی تقلیل می‌یابد. همان‌طور که پیداست کاهش پاسخ نرمال در مورد زلزله‌ی طیس بیشتر از زلزله‌ی نورتریج است و این مسئله حاکی از تأثیر بیشتر

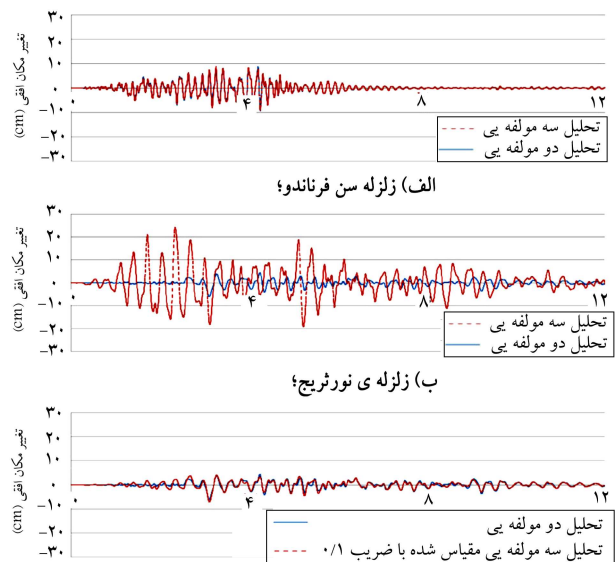
در این مورد و در سایر حالت‌های مورد بررسی، نتایج به دست‌آمده در جدول ۴ خلاصه شده است. در این جدول، تغییرمکان افقی و قائم بیشینه و پاسخ نرمال‌شده‌ی تاج سد، که نسبت پاسخ تحت تحریریک ۳ مؤلفه‌یی به پاسخ تحت تحریریک دو مؤلفه‌یی است، در حالت‌های مختلف و با تغییر تراز آب مخزن برای ۶ زلزله‌ی مورد استفاده ارائه شده است. لازم به ذکر است که پاسخ نرمال‌شده‌ی بزرگ‌تر از ۱ نشان‌دهنده‌ی آن است که مؤلفه‌ی گهواره‌یی حرکت زمین پاسخ سد را افزایش می‌دهد. بر اساس جدول ۴، پاسخ نرمال‌شده‌ی تغییرمکان افقی و قائم تاج سد تحت زلزله‌ی تفت به ترتیب از ۱/۰۹ و ۱/۰۹۸ در حالت مخزن خالی به ۰/۹۲۹ و ۱/۰۷ در حالت مخزن پر می‌رسد. برای زلزله‌ی مذکور با افزایش آب مخزن تا دو سوم تراز آن، این نسبت روند افزایشی و در حالت مخزن کاملاً پر روند کاهش‌ی دارد. در مورد زلزله‌ی ال‌سترو نیز پاسخ نرمال‌شده‌ی تغییرمکان افقی تاج سد با افزایش تراز مخزن از مقدار ۵/۱۰ به ۳/۹۴ افزایش می‌یابد. در حالی که این روند افزایشی در مورد مؤلفه‌ی قائم زلزله‌ی ال‌سترو با افزایش تراز مخزن به چشم نمی‌خورد. در این مورد پاسخ نرمال‌شده‌ی تغییرمکان قائم، بیشترین مقدار را در حالت مخزن دو سوم پر به خود اختصاص می‌دهد. این مسئله در مورد زلزله‌ی سن‌فرناندو در حالت

مؤلفه‌های انتقالی و دورانی بررسی و این نتایج به دست آمده است:

۱. مقادیر مؤلفه‌ی دورانی حرکت زمین، مؤلفه‌ی گهواره‌یی، که با روش پیشنهادی هانگ نان لی محاسبه شده است، به طیف محتوای بسامدی شتاب‌نگاشت‌های انتقالی، سرعت حرکت امواج و زاویه‌ی موج حادث بستگی دارد و نتایج تطابق خوبی را با کار سایر پژوهشگران نشان می‌دهد.
۲. پاسخ نرمال‌شده‌ی سد به شدت به محتوای بسامدی مؤلفه‌ی گهواره‌یی و نیز مقدار بیشینه‌ی شتاب دورانی وابسته است و در صورتی‌که هم‌زمان دامنه‌ی شتاب دورانی بزرگ و محتوای بسامدی غالب زلزله به بسامد اصلی ارتعاشی سد نزدیک باشد، تأثیر مؤلفه‌ی دورانی در پاسخ سازه زیاد خواهد بود. در این پژوهش، این مسئله در مورد زلزله‌های نورث‌ریچ و طیس به طور مشخص قابل توجه است.
۳. در صورتی‌که طیف غالب محتوای بسامدی زلزله در محدوده‌ی بسامد اصلی سد نباشد، مستقل از بزرگای دامنه‌ی مؤلفه‌ی گهواره‌یی، اثر این مؤلفه بسیار ناچیز است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در این پژوهش، این مسئله در مورد زلزله‌های سن فرناندو و تایوان قابل مشاهده است.
۴. در صورت بزرگ بودن دامنه‌ی بسامدی مؤلفه‌ی گهواره‌یی تحریک در محدوده‌ی بسامد اصلی سازه و وقوع پدیده‌ی تشدید، علاوه بر تغییر پاسخ نرمال‌شده‌ی تاج سد، شکل پاسخ سد نیز دچار تغییر کیفی قابل توجه می‌شود.
۵. وجود مخزن سد با ترازهای مختلف باعث تغییر بسامد ارتعاشی سیستم و در نتیجه تغییر پاسخ نرمال‌شده‌ی تاج سد می‌شود. تغییر پاسخ ممکن است افزایشی یا کاهششی، بسته به نوع زلزله و طیف محتوای بسامدی آن باشد.
۶. مؤلفه‌ی گهواره‌یی زلزله در برخی موارد پاسخ نرمال کمتر از واحد را نتیجه خواهد داد. در صورتی‌که بسامد غالب تحریک گهواره‌یی از بسامد اصلی سازه دور باشد، این مسئله مستقل از بزرگای مؤلفه‌ی دورانی است. بنابراین تأثیر دور یا نزدیک بودن بسامدهای دورانی نسبت به بزرگای آنها در پاسخ نرمال سد بیشتر است.

منابع (References)

1. Westergard, H.M. "Water pressure on dams during earthquakes", Trans, *ASCE*, **78**, pp. 418-433 (1933).
2. Chopra, A.K. "Hydrodynamic pressure on dam during earthquakes", *ASCE*, **93**(EM6), pp. 205-223 (1967).
3. Chopra, A.K. "Earthquake behavior of reservoir-dam systems", *ASCE*, **94**(EM6), PP. 1475-1500 (1968).
4. Chopra, A.K. and et al. "Earthquake analysis of earth dam", Fourth world Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile (Jan. 1969).
5. Chopra, A.K. and Perumalswami, P.R. "Dam- foundation during earthquakes", Fourth world Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile (Jan. 1969).
6. Chopra, A.K. "Earthquake response analysis of concrete gravity dams", *ASCE*, **96**(EM4), pp.443-457 (1970).



ج) زلزله نورث‌ریچ با مؤلفه‌ی گهواره‌یی مقیاس شده با ضریب ۰/۱

شکل ۱۳. تغییر مکان افقی تاج سد پایین فلت با مخزن خالی.

دامنه‌ی مؤلفه‌ی گهواره‌یی حرکت زلزله‌ی طیس نسبت به طیف محتوای بسامدی آن در پاسخ نرمال تاج سد است. در زلزله‌های مذکور با تغییر تراز مخزن، پاسخ نرمال نیز دستخوش تغییر خواهد شد، ولی همواره مقادیر بزرگی را به خود اختصاص خواهد داد؛ که نتایج با وجود مخزن در جدول ۴ به طور خلاصه ارائه شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار خطی سد بتنی وزنی پایین فلت با در نظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن با ترازهای متفاوت مخزن به روش لاگرانژی-لاگرانژی، تحت اثر هم‌زمان

7. Chakrabarti, P. and Chopra, A.K. "Hydrodynamic pressures and response of gravity dams to vertical earthquake component", *J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **1**(4), pp. 325-335 (1973).
8. Zienkiewicz, B. "Natural frequencies of complex free or submerged structures by the finite element method", Symp. Vibrations Civ. Engng, Butterworths, London (1965).
9. Chakrabarti, P. and Chopra, A.K. "Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction", *Earthq. Engng. Struct. Dyn.*, **2**(2), pp. 143-160 (1973).
10. Chakrabarti, P. and Chopra, A.K. "Hydrodynamic effect in earthquake response of gravity dams", *J. Struct. Div., ASCE*, **100**, pp. 1211-1224 (1974).
11. Clough, R.W. and Zienkiewicz, O.C. "Finite element method in analysis and design of dams", Int. Symp. Cri-

- teria and Assumptions for Numer., Analysis of Dams, Swansea (1975).
12. Fenves, G. and Chopra, A.K. "Effects of reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction on frequency response functions for concrete gravity dams", *J. Earthquake Eng. Struc. Dyn.*, **13**, pp. 13-31 (1985).
 13. Lotfi, V. and et al. "A technique for the analysis of the response of dams to earthquakes", *J. Earthquake Eng. Struc. Dyn.*, **15**(4), pp. 463-490 (1987).
 14. El-Aidi, B. and Hall, J.F. "Nonlinear earthquake response of concrete gravity dams, part. 1: Modeling", *J. Earthquake Eng. Structural Dyn.*, **18**(6), pp. 837-851, (1989).
 15. El-Aidi, B. and Hall, J.F. "Nonlinear earthquake response of concrete gravity dams, part. 2: Behavior", *J. Earthquake Eng. Structural Dyn.*, **18**(6), pp. 853-865 (1989).
 16. Navayi Neya, B. "Mathematical modeling of concrete gravity dams under earthquake loading considering construction joints", Ph.D thesis, Moscow Power Engineering Institute (1998).
 17. Ahmadi, M.T. and Vaseghi Amiri, J. "A new constitute model for nonlinear fracture analysis of concrete gravity dams including earthquake", *International Journal of Engineering Science*, Iran university of science and Technology , **9**(3), pp. 23-42 (1998).
 18. Ghaemian, M. and Ghobarah, A. "Nonlinear seismic response of concrete gravity dams with dam-reservoir interaction", *J. Eng. Struct*, **21**(4), pp. 306-315 (1999).
 19. Kalateh, F. and Attarnejad, R. "Finite element simulation of acoustic cavitation in the reservoir and effects on dynamic response of concrete dams", *J. Finite elements in analysis and design*, **47**, pp. 543-558 (2011).
 20. Vatani Oskouei, A. and Dumanglu, A.A. "Nonlinear dynamic response of concrete gravity dams: cavitation effect", *J. Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **21**, pp. 99-112 (2001).
 21. Hamdi, M.E. and et al. "A displacements for the analysis of vibrations of coupled Fluid-Structure Systems", *Int. J. Numerical Methods Engineering.*, **13**(1), pp.139-150 (1978).
 22. Ahmadi, M.T. "New method of analysis for arch dam:reservoir and Foundation dynamic interactions, and static joint opening", Ph.D Thesis, Tohoku university (1988).
 23. AliJamshidi, D., Navaeinia, B. and Vaseghi Amiri, J. "Dynamic analysis of concrete gravity dams including modeling of reservoir with method of lagrange and oliver", *Journal of Engineering Faculty, Tehran University*, **41**(6), pp. 709-724, (In Persian) (2008).
 24. Khanmohammadi, L., Vaseghi Amiri, J., Navayi Neya, B. and Davoodi, M. "Evaluation of eulerian and lagrangian method in analysis of concrete gravity dam including dam water foundation interaction", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **58**, pp. 761-767 (2009).
 25. Newmark, N.M. "Torsion in symmetrical buildings", *Proceeding of the 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, A3, pp. 19-23 (1969).
 26. Ghafory Ashtiani, M. and Singh, M.P. "Structural response for six correlated earthquake components", *J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**(1), pp. 103-119 (1986).
 27. Huang, B.S. "Ground rotational motions of the 1999 Chi Chi, Taiwan earthquake as inferred from dense array observations", *Geophysical Research Letters*, **30**, pp. 1307-1310 (2003).
 28. Ghayamghamian, M.R. and Nouri, G.R. "On the characteristics of ground motion rotational components using Chiba dense array data", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**(10), pp. 1407-1442 (2007).
 29. Spudich, P., Steck, L.K., Hellweg, M., Fletcher, J.B. and 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", *J. Geophys. Res.*, **100**, pp. 675-690 (1995).
 30. Nigbor, R.L. "Six-degree-of-freedom ground motion measurement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, pp. 1665-1669 (1994).
 31. Suryanto, W., Igel, H., Wassermann, J., Cochard, A., Schuberth, B., Vollmer, D., Scherbaum, F., Schreiber, U. and Velikoseltsev, A. "First comparison of array-direct ring laser measurements", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**, pp. 2059-2071 (2006).
 32. Liu, C.C., Huang, B.S., Lee, W. and Lin, C.J. "Observation rotational and translational ground motion at the HGSD station in Taiwan from 2007 to 2008", *Bulletin of Seismological Society of America*, **99**, pp. 1228-1236 (2009).
 33. Trifunac, M.D. "A note on rotational components of earthquake motions on ground surface for incident body waves", *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, **1**(1), pp. 11-19 (1982).
 34. Trifunac, M.D. "A note on rotational components of earthquake motions on ground surface for incident body waves", *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, **1**, pp. 11-19 (1982).
 35. Lee, V.W. and Trifunac, M.D. "Rocking strong earthquake accelerations", *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, **6**(2), pp. 75-89 (1987).
 36. Lee, V.W. and Liang, L. "Rotational components of strong motion earthquakes", The 14th world Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China (2008).
 37. Hong-Nan, L., Li-Ye, S. and Su-Yan, W. "Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion", *Nuclear Eng. and Design*, **232**(2), pp. 131-137 (2004).
 38. Kalani Sarokolayi, L., Navayi Neya, B., Tavakoli, H.R. and Vaseghi Amiri, J. "Seismic analysis of elevated water storage tanks subjected to six correlated ground motion components", *Iranica J. of Energy and Environment*, **4**(3) Geo-hazard and Civil Engineering, pp.195-203 (2013).
 39. Mozami Goudarzi, Kh., *Seismology*, Publications of the Ministry of Science and Higher Education (In Persian) (1972).
 40. Datta, T. K., *Seismic Analysis of Structures*, John Wiley and Sons (2010).

41. Bathe, K.J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall (1996).
42. Hinton E. and et al. "A note on mass lumping and related processes in the finite element", *Earthquake. Eng. Struct. Dyn.*, **4**(3), pp.245-249 (1976).
43. Navayi Neya, B. "Hydrodynamic analysis of dam and reservoir using Lagrangian approach", Msc thesis, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran, (in Persian) (1991).
44. Ahmadi, M.T. and Navayi Neya, B. "Dynamic analysis of dam and reservoir using Lagrangian approach", *International Journal of Civil Engineering, Iran university of science & Thechnology*, **6**(74), pp. 1-13 (1995).
45. Chopra, A.K., *Dynamic of Structures*, Theory and Application to Earthquake Engineering, 3rd Ed., Prentice all of India (2008).
46. Merriam, J.L. and Kraige, L.G., *Engineering Mechanics-Dynamic*, 6th Ed., John Wiley & Sons (2008).