

بررسی عددی توزیع زیر فشار متغیر در سطح اعمال شتاب ناشی از زمین لرزه در موقعیت ترک بدنه سد بتنی

علیرضا مردوخ پور^۱

رامتین صبح خیز فومنی^{۲*}

امیرمحمد مرحمتی^۳

چکیده

بررسی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی، به دلیل اهمیت ایمنی سد در هنگام زلزله، مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. زیرا تخریب این سازه‌ها در اثر زلزله می‌تواند آثار سوء اقتصادی و اجتماعی در پی داشته باشد. از طرفی پیش بینی رفتار سدهای بتنی در زمان وقوع زلزله یکی از پیچیده‌ترین و سخت‌ترین مسائل در دینامیک سازه است. در تحقیق حاضر تأثیرات نیروی فشار برکنش و توزیع آن به صورت متغیر بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سد بتنی وزنی تحت زمین لرزه‌های حوزه نزدیک و حوزه دور از گسل با استفاده از مدل عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مربوط به مقایسه‌ی تغییر مکان قائم تاج سد در زمان زلزله براساس سه شتاب‌نگاشت انتخابی نشان داد، بیشترین جابجایی قائم تاج سد مربوط به شتاب‌نگاشت نورث‌ریج با مقدار ۴ سانتیمتر است. کمترین مقدار نیز مربوط به شتاب‌نگاشت لوما پریتا با مقدار ۳ سانتیمتر است. همچنین نتایج مربوط به مقایسه فشار آب حفره‌ای در زمان زلزله (حداصل پاشنه-پنجه) براساس سه شتاب‌نگاشت انتخابی نشان داد که بیشترین فشار آب حفره‌ای مربوط به شتاب‌نگاشت مورگان هیل با مقدار ۰/۰۶۵ مگاپاسکال است. مقدار حداکثر فشار آب حفره‌ای برای دو شتاب‌نگاشت دیگر حدود ۰/۰۶۴ می‌باشد. مطابق این نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای به طور کلی در طول زمان زلزله دارای نوسان زیاد با دامنه نسبتاً کم می‌باشد.

واژه کلیدی: سد بتنی، فشار برکنش، ترک، زمین لغزه، نرم‌افزار آباکوس

^۱استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

^۲دانشجوی دکتری گروه عمران، دانشگاه قم، قم، ایران، sobhkhizarman@yahoo.co.uk

^۳کارشناس ارشد گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

علمی-پژوهشی

مقدمه

طراحی سدهای بتنی به منظور مقاومت در برابر بارهای وارده و همچنین کنترل رفتار آن حین بهره‌برداری و تحت بارهای دینامیکی، همچون بار زلزله یکی از چالش‌برانگیزترین موضوعات مهندسی سد می‌باشد. نظر به اهمیت قابل ملاحظه سدهای بتنی در مهار آب‌های سطحی و تولید انرژی برق آبی و همچنین هزینه بالای طرح و اجرای این سازه‌های عظیم، بررسی مسائل مرتبط با آنها همواره با اولویت مضاعفی نسبت به سایر ابنیه‌های متعارف مهندسی، مورد توجه قرار گرفته است. به علاوه، هرگونه ایراد و نقص در برآورد بهره‌برداری سد می‌تواند خسارات مادی و انسانی جبران‌ناپذیری را تحمیل کند. لذا ارزیابی دقیق از نحوه عملکرد سد، مخصوصاً رفتار آن، تحت بارهای شدید دینامیکی، بایستی با دقت و نظارت بیشتری انجام پذیرد (کلانه و قاملو،^۱ ۱۳۹۶).

از طرفی بتن‌های غیر مسلح، مصالح مستعد ترک‌خوردگی هستند که بر اساس معیار شکست رانکین^۲ اگر تنش اصلی ماکزیمم (کششی) در نقطه‌ای از مصالح بتن غیر مسلح از مقاومت کششی بتن بیشتر شود، بتن دچار ترک‌خوردگی می‌شود. سدهای بتنی حتی تحت اثر بارهای سرویس (بارهای وزن و هیدرواستاتیک) ممکن است دچار ترک‌خوردگی شوند. اما تحت اثر زلزله‌های شدید معمولاً تنش‌های ایجاد شده در برخی نقاط بدنه سد از ظرفیت الاستیک سدهای بتنی تجاوز خواهند نمود که در نتیجه ترک‌خوردگی مقطع سد و کاهش سختی کلی سازه مشاهده می‌شود. دو منبع اصلی رفتار غیرخطی در سدهای بتنی وزنی شامل رفتار غیرخطی مصالح (ترک‌خوردگی کششی و یا خردشدگی فشاری مصالح بتن) و نیز رفتار غیرخطی هندسی (لغزش و بلندشدگی در امتداد درزهای موجود در سطوح ترک‌خورده) می‌باشد. در راستای نیل به نتایج واقع‌بینانه، هرگونه مدل‌سازی ریاضی از اینگونه

مسائل می‌بایست علاوه بر قابلیت شبیه‌سازی هر حوزه، امکان بررسی اندرکنش محیط سد با محیط‌های سیال و فونداسیون را با در نظر داشتن اثرات توپوگرافی سطحی و زیرسطحی فراهم سازد. نظر به وقوع پدیده تفرق امواج و بروز میرایی در سیستم، روش اجزاء محدود ابزار مناسبی برای مدل‌سازی اینگونه سیستم‌ها در حالات K بارگذاری می‌باشد. بنابراین بررسی رفتار سد منوط به در نظرگیری شرایط محیط‌های مجاور از جمله مخزن آن می‌باشد که بایستی شرایط مرزی مناسبی بین سد و مخزن در نظر گرفته شود و تبادل اطلاعات بین این دو محیط با اتخاذ فرضیات و شرایط مناسب در طول تحلیل انجام پذیرد. علاوه بر موارد مذکور توزیع و مقادیر فشار برکنش نیز می‌تواند در رفتار لرزه‌ای سد نقش برجسته‌ای را ایفا کند. وجود چاه‌های زهکشی بر توزیع فشار برکنش تأثیرگذار می‌باشد و به عنوان یکی از پارامترهای مهم می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد (کلانه و قاملو، ۱۳۹۶).

مقایسه بین روش ترک‌پخشی دورانی و ترک‌پخشی ثابت در سدهای بتنی وزنی تحت اثر زلزله مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌ها با استفاده از روش المان محدود و با بهره‌گیری از برنامه‌نویسی کامپیوتری به زبان فرترن انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که بسته به مورد، هر یک از دو روش مدل‌سازی ترک، از مزایا و معایب نسبی برخوردار است (نوایی نیا و همکاران^۳، ۱۳۹۳).

در تحقیقی موضوع اندرکنش تماسی بین پوسته فولادی موجدار و خاک بر اساس اندازه‌گیری تغییر شکل‌های پوسته پرداخته شد. نتایج تحقیق در قالب دو الگوریتم ارائه شده است که در الگوریتم اول بر اساس کرنش‌های واحد، نیروهای داخلی در پوسته تعیین شده و در نتیجه اندرکنش‌های تماسی محاسبه شده و تعداد زیادی از نقاط اندازه‌گیری توزیع شده در بخش محیطی پوسته برای محاسبات مورد نیاز است. در

³ Navaeinia et al

¹ Kalateh and Ghamatloo

² Rankine

افزایش عمق مدفون پی و مستقل سبب کاهش پارامترهای مقاومت خاک شده است (مطلبیان و همکاران^۳، ۲۰۲۰). در یک تحقیق، پایداری لرزه‌ای سد بتنی وزنی کوینا^۴ در حالت ترک‌خورده بررسی شد. در این تحقیق محل تشکیل ترک به وسیله مدل شکست بتن پالستیک با روش المان محدود غیرخطی مشخص شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در زلزله های شدید، گسترش ترک در زیر تاج سد کوینا به سرعت اتفاق می‌افتد و قبل از شکست کلی سد، قسمت تاج آن از بدنه جدا می‌شود (ژیانگ و همکاران^۵، ۲۰۱۲).

در پژوهشی، گسترش ترک در بدنه سد بتنی با روش ترک چسبیده مدل‌سازی شد. تشخیص جهت ترک در این مدل براساس ایجاد بیشترین تنش در انتهای ترک است. نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج موجود در سایر تحقیقات عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت که حاکی از قابلیت قابل قبول روش پیشنهادی است (شی و همکاران^۶، ۲۰۱۳).

در تحقیقی، وجود ترک در بدنه سد کاربیل با روش المان محدود سه بعدی و با در نظرگیری رفتارهای کششی و فشاری بتن و تأثیر آن بر عملکرد ترک براساس مفهوم آسیب ایزوتروپیک مدل‌سازی شد. مدل مورد نظر، با گسسته‌سازی های متفاوت و بارهای وارده مختلف مورد تحلیل قرار گرفته و بیشترین تنش‌های حاصل و همچنین پیشروی ترک در بدنه مورد بررسی قرار گرفت (اولیورا و همکاران^۷، ۲۰۰۶).

در یک پژوهش، بررسی عددی پایداری سد در حالت سه بعدی با توجه به سیستم سد- مخزن- پی مدنظر قرار گرفت که در مدل‌سازی، مخزن ذخیره سیال به صورت تراکم پذیر فرض شد و سد به صورت رفتار دینامیکی غیرخطی به روش ترک‌پخشی در نقاط گووس مدل شد. نتایج نشان داد که جرم

الگوریتم دوم، از شرایط هم‌آمیزی استفاده می‌شود که بر اساس آن، نتیجه به دست آمده از مدل هندسه پوسته باید با جابجایی اندازه‌گیری شده نقطه هم‌آمیزی سازه مطابقت داشته باشد. هنگامی که این نقاط بیشتر باشد، نتیجه تخمینی دقیق تر است. مزیت هر دو الگوریتم این است که ویژگی‌های فیزیکی خاک در لایه‌های پس‌پر را در نظر می‌گیرند، اما مهم‌تر از همه این است که فناوری لایه‌گذاری و فشرده‌سازی را در نظر می‌گیرند. نتایج چنین تحلیل‌هایی می‌تواند مبنایی برای مقایسه کارایی مدل‌های ژئوتکنیکی مرسوم باشد (مچلسکی و کوروسویوژ^۱، ۲۰۲۱).

از برنامه‌ی اجزاء محدود ABAQUS جهت مدل‌سازی گسترش ترک در سدهای بتنی وزنی استفاده شد. سد بتنی وزنی تحت بارهای دینامیکی قرار داده شد و با تعریف رفتار غیرخطی بتن (CDP) مدل ترک بتن و آسیب‌دیدگی سد مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه نتایج، حاکی از رشد و گسترش ترک در نقاط مورد تمرکز تنش‌های کششی می‌باشد. موقعیت ترک‌ها و نحوه گسترش آنها در بدنه‌ی سد، به منظور درک صحیح‌تر از رفتار سد در زمین‌لرزه‌های بزرگ محتمل به دست آمده است (محمودیان شوشتریان و صادقی چیکانی^۲، ۱۳۹۲). پژوهشی در زمینه بررسی عددی تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ استاتیکی پایه توریب بادی پرداخته شد. براساس نتایج، اثرات اندرکنش خاک و سازه، خروج از مرکز نیروها، پارامترهای مقاومت خاک و عمق مدفون پی، بر پاسخ استاتیکی پی مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج حاکی از آن است که تأثیر اندرکنش خاک-سازه به بزرگی گریز از مرکز نیروها و عمق پی بستگی دارد، به طوری که اندرکنش خاک-سازه، تأثیر کمی بر نشست پی دارد. همچنین نتایج نشان داد که با

⁵ Jiang et al

⁶ Shi et al

⁷ Oliveira et al

¹ Machelski and Korusiewicz

² Mahmoudian Shooshtarian and Sadeghi Chikani

³ Motallebian et al

⁴ Kwena

مواد و روش‌ها

نیروهای وارده بر سدها، چگونگی توزیع آنها، ضرایب اطمینان و تنش‌های مجاز از موضوعات مهم جهت تعیین نوع، موقعیت و علل ترک خوردگی سدها بوده و جهت مرمت و پیشگیری از وقوع ترک در سدهای بتنی ضروری هستند. همچنین تحلیل سدهای بتنی به منظور تعیین مقدار و توزیع تنش‌ها در بدنه سد و فونداسیون آن انجام می‌شود. هدف از تحلیل سازه سد، کنترل معیارهای پایداری سد، به منظور طراحی اطمینان بخش یک سد بتنی در تحمل بارهای وارده است. جهت این تحلیل از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود.

حل معادله مخزن

وسترگارد^۴، ۱۹۳۳ برای اولین بار معادله موج را برای سدهای صلب در طی زلزله حل کرد. در این حل، مخزن در جهت بالادست تا بی‌نهایت امتداد داشت و از اثر امواج سطحی صرف نظر شد. سیال با دامنه کم و بدون لزجت فرض شد. او نشان داد که در این حالت می‌توان امواج هیدرودینامیکی را به شکل محدود مشخصی از سیال که به همراه بدنه حرکت می‌کند، در نظر گرفت. به این رویکرد، روش جرم افزوده گفته می‌شود. در نتیجه کافی است به منظور در نظر گرفتن اثرات مخزن قسمتی از جرم سیال به بدنه سد متصل و با آن حرکت کند، برای آبی با وزن ۹۸۱۰ نیوتن بر متر مکعب، عرض آبی که در راستای افقی با بدنه سد نوسان می‌کند با توجه به معادله‌ی (۱) به دست می‌آید. (گورای و مایتی، ۲۰۲۱)

$$b = \frac{7}{8} \sqrt{h(h-y)} \quad (1)$$

تعریف محیط آکوستیک برای مخزن

برای پی، باعث کاهش پروفیل ترک و آسیب در سازه سد می‌شود (حریری اردبیلی و میرزا بزرگ^۱، ۲۰۱۳). در پژوهشی به تحلیل لرزه‌ای سد بتنی وزنی تحت گسل نزدیک و دور با ترکیب اندرکنش سد-مخزن-پی پرداخته شد. در سد مورد نظر هشت شتاب‌نگاشت مختلف زلزله برای تحلیل تاریخچه زمانی در نظر گرفته شد و عملکرد لرزه‌ای سد با استفاده از مدت زمان تجمعی-افزایش تنش (COD) و نسبت تقاضا به ظرفیت (CDR) ارزیابی شد. نتایج تحقیق نشان‌دهنده اهمیت اثر حرکت زمین نزدیک به گسل بر عملکرد لرزه‌ای سد بتنی ثقیلی است (پاندریک و همکاران^۲، ۲۰۲۰).

بررسی رفتار لرزه‌ای سدها نسبت به حرکت زمین گسل نزدیک و گسل دور در قالب یک پژوهش انجام شد که ارزیابی ایمنی لرزه‌ای سدها تحت حرکات زمین مد نظر بوده است. این مطالعه همچنین تکنیک‌های مدل‌سازی موجود سیستم سد-مخزن-پی، مدهای شکست، روش تحلیل لرزه‌ای و پاسخ لرزه‌ای انواع سدها به زلزله‌های گسل نزدیک و گسل دور را تشریح می‌کند. در نهایت، این تحقیق سعی در یافتن خلأهای پژوهشی دارد که باید در آینده مورد توجه قرار گیرد (گورای و مایتی^۳، ۲۰۲۱).

در تحقیق حاضر به بررسی آسیب‌پذیری و میزان خرابی سد بتنی وزنی تحت بار ناشی از زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل، با در نظرگیری توزیع فشار برکنش به صورت متغیر در محل زمین‌لرزه با اعمال شتاب و با لحاظ اندرکنش سد و مخزن و فونداسیون پرداخته خواهد شد. لذا نوآوری این پژوهش بررسی تأثیر توزیع فشار برکنش به صورت متغیر و نقش غیرخطی بودن آن در نحوه موقعیت ترک و گسترش آن و مدل‌سازی مربوطه است.

⁴ Westergaard

¹ Hariri-Ardebili and Mirzabozorg

² Pundrik et al

³ Gorai and Maity

در حالتی که بارگذاری سازه تابع زمان باشد، پاسخ سازه نیز به زمان وابسته خواهد بود. محاسبات نشان می‌دهد که اگر فرکانس بارگذاری کمتر از یک چهارم فرکانس طبیعی ارتعاش سازه باشد، پاسخ سازه به زحمت از پاسخ استاتیکی بیشتر می‌شود و بنابراین از روش‌های شبه استاتیکی می‌توان استفاده کرد. اما اگر فرکانس بارگذاری بیشتر و یا به صورت ناگهانی به سازه وارد شود، تحلیل دینامیکی مورد نیاز خواهد بود. در تحلیل دینامیکی علاوه بر ماتریس سختی، ماتریس جرم و میرایی نیز مورد نیاز خواهد بود (یانگ و ژو، ۲۰۱۵).

در تحلیل دینامیکی به دنبال پاسخ گذرا که به آن تاریخچه پاسخ می‌گویند هستیم. در اینجا نیاز به انتگرال‌گیری از معادله حرکت نسبت به زمان داریم. روش انتگرال‌گیری مستقیم، یک روش گام به گام نسبت به زمان است و پاسخ سازه در فواصل زمانی Δt محاسبه می‌شود. در گام زمانی n ام معادلات حرکت به صورت زیر است (شرونک، ۲۰۱۳).

$$M\ddot{u}_n + C\dot{u}_n + R_n^{int} = R_n^{ext} \quad (4)$$

$$M\ddot{u}_n + C\dot{u}_n + Ku_n = R_n^{ext} \quad (5)$$

M ماتریس جرم، C ماتریس میدانی، K ماتریس سختی، R^{int} ، R^{ext} ماتریس نیروهای خارجی و داخلی و ماتریس تغییر مکان نقاط گرهی سازه می‌باشد (شرونک، ۲۰۱۳).

مدل مورد مطالعه

مدل مورد مطالعه این تحقیق مربوط به سد شفارود واقع در استان گیلان است که شکل (۱) و (۲) به ترتیب هندسه سد و هندسه سد بتنی به همراه پی و مخزن آب را نشان می‌دهد.

معادله تعادل برای حرکت با دامنه که سیال تراکم پذیر غیر لزج که از درون یک مصالح ماتریسی مقاوم جریان دارد عبارت است از:

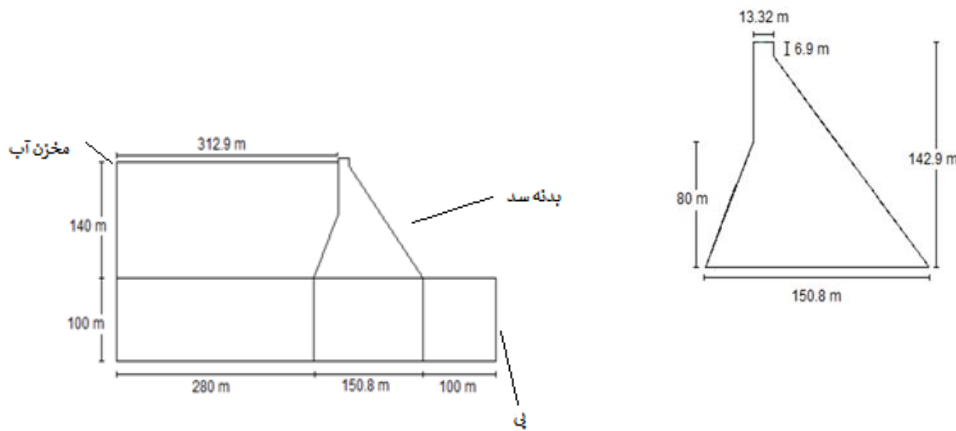
$$\frac{\partial p}{\partial x} + \gamma u^f + \rho_f \ddot{u}^f = 0 \quad (2)$$

که در آن p فشار دینامیکی سیال (بدون اعمال فشارهای استاتیکی اولیه)، X موقعیت فضایی ذره، u^f سرعت ذرات سیال، \ddot{u}^f شتاب ذرات سیال و γ کشش حجمی است. کشش حجمی سبب اتلاف انرژی امواج آکوستیک می‌شود. در اینجا رفتار ساختاری سیال، تراکم‌پذیر و غیر لزج فرض می‌شود، به گونه‌ای که مدول بالک محیط آکوستیک، فشار دینامیکی محیط و کرنش حجمی را با استفاده از رابطه زیر مرتبط می‌سازد. (شرونک، ۲۰۱۳)

$$P = -K_f \varepsilon_v \quad (3)$$

که در آن $\varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ کرنش حجمی است. در نتیجه هم مدول بالک K_f و هم چگالی ρ_f محیط کوستیک باید برای تعریف مشخص باشد. در واقع یک تحلیل آکوستیک برای مدل‌سازی انتشار صوت به کار رفته و می‌تواند شامل امواج برخوردکننده به یک سازه نیز شود. این نوع تحلیل تنها در مدل‌سازی‌های دینامیکی کارایی داشته و می‌تواند برای مدل‌سازی سیستم کوپله سازه-محیط آکوستیک نیز به کار رود. همچنین باید در آن، از المان‌های آکوستیک استفاده شود و در تحلیل سیستم کوپله سازه آکوستیک، اندرکنش بین سازه و محیط آکوستیک باید براساس سطح با استفاده از قید گره و یا در ABAQUS استاندارد، با استفاده از المان‌های فاصل آکوستیک مدل‌سازی شود (یانگ و ژو، ۲۰۱۵).

روش حل معادلات حاکم بر سیستم



ب) هندسه سد، پی، مخزن آب

الف) هندسه سد

شکل (۱): شمای سد سفارود گیلان

تثبیت می‌شود، سپس در گام بعدی بار سد بتنی و مخزن آب بر روی خاک منتقل شده و تحکیم اتفاق می‌افتد که در حین آن میزان فشار آب حفره‌ای در خاک زیر سد تثبیت و سپس در گام زلزله شتاب‌نگاشت اعمال می‌شود. ابتدا اجزای مدل ایجاد شده و مقاطع سد و آب پشت سد و روکش بتنی در نرم‌افزار ترسیم دو بعدی گردیده و تبدیل به قطعات سه بعدی می‌شود.

مشخصات مصالح

در تعریف و اختصاص مشخصات مصالح به مقاطع ایجاد شده، ابتدا مصالح بتن براساس بتن مورد استفاده در مقاله کلاته و قاملو، ۱۳۹۸ تعریف شده است. علاوه بر خصوصیات الاستیک بتن، خصوصیات پلاستیک و تخریب بتن نیز به‌طور کامل اعمال شده است. همچنین مشخصات آب به صورت المان آکوستیک تعریف می‌شود. تعیین مشخصات بتن تنها با استفاده از نمودار الاستوپلاستیک بسیار مشکل است. یکی از مهمترین پارامترهای مورد نیاز برای تعریف دقیق رفتار بتن، تخریب پلاستیک بتن CDP است که می‌توان آن را با بارگذاری و باربرداری بر روی نمونه‌های مکعبی در آزمایشگاه

مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

در این بخش، به مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و همچنین صحت‌سنجی پرداخته می‌شود. ابتدا مدل ارائه شده در مقاله مرجع، مدل‌سازی و صحت‌سنجی می‌گردد. مدل مورد استفاده در صحت‌سنجی و این پژوهش، سد سفارود گیلان است. پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی و تحلیل، تأثیر توزیع فشار برکنش متغیر در سطح اعمال شتاب ناشی از زمین‌لرزه در موقعیت ترک سد بتنی سنجیده خواهد شد و در نهایت نتایج مقایسه می‌گردند. المان‌ها به‌صورت المان پوسته‌ی دوبعدی ترسیم می‌گردند و در مرحله انتخاب نوع المان، المان‌های سد بتنی به‌صورت کرنش ساده، المان‌های خاک از نوع تنش/حفره آب و المان‌های آب از نوع آکوستیک انتخاب شده‌اند. به منظور در نظر گرفتن اثر فشار برکنش به نحو متغیر در سطح اعمال شتاب‌نگاشت، می‌بایست فشار آب حفره‌ای به صورت واقعی در خاک وجود داشته باشد تا در هنگام اعمال شتاب زلزله، تغییرات فشار آب حفره میزان واقعی نیروی برکنش را تعیین کنند و فشار برکنش به‌صورت بار مستقل و دستی وارد نمی‌شود. بدین منظور ۳ گام تحلیل ایجاد می‌شود که در گام اول نیروهای ژئواستاتیک خاک اشباع اعمال و

به دست آورد. جدول (۱) مشخصات بتن مصرفی را نشان می

دهد.

جدول (۱): مشخصات بتن مصرفی

تنش تسلیم	مدول الاستیسیته	ضریب پواسون	چگالی	گریز از مرکزیت	fb0/fc0	مدول بالک	پارامتر ویسکوزیته	کرنش پیک	کرنش نهایی	مقاومت کششی	بازشدگی بحرانی ترک
Mpa	Gpa	-	Kg/m3	-	-	-	-	%	%	Mpa	mm
۲۵	۳۰	۰/۲	۲۶۳۰	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۶۷	۰/۰۰۰۱	۰/۲۷۵	۰/۳۵	۳	۰/۱۵۶

گام‌های تحلیل

در خصوص گام‌های تحلیل، گام اول تحلیل گام اولیه بوده که معرف شرایط اولیه تحلیل است. به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی از تحلیل دینامیک غیرصریح استفاده می‌شود. زمان تحلیل نیز براساس زمان شتاب‌نگاشت انتخابی است. گام دوم، تحلیل گام ژئواستاتیک است که زمان تثبیت شرایط اولیه خاک و بار ژئواستاتیک خاک است. گام سوم، گام خاک است که درصد اشباع، تخلخل و فشار آب حفره‌ای و بارهای ثقلی سد و مخزن در طی ۷۲۰۰ ثانیه تحکیم و تثبیت می‌شوند. گام سوم، هم گام دینامیکی غیرخطی است که شتاب‌نگاشت‌ها با زمان مشخصه شتاب‌نگاشت اعمال می‌شوند.

اندرکنش

المان‌های مورد استفاده در این تحقیق برای تحلیل بدین صورت است که المان‌های سد و پی، از نوع استاندارد پیوسته جامد تنش صفحه‌ای خطی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (CPS4R) فرض شد و همچنین المان‌های مخزن به صورت آکوستیک دوبعدی خطی (AC2D4) در نظر گرفته شد.

اندرکنش بین اجزا و قطعات اسمبل شده یعنی سد بتنی، پی و آب، هرکدام به صورت جداگانه و از نوع Tie تعریف گردید و به محل اتصال اختصاص داده شد. از طرفی اندرکنش سد و آب در نقطه تقاطع با پی جدا فرض شده و اندرکنش تماسی به صورت بدون اصطکاک تعریف شد.

باتوجه به نیاز به تحلیل بدون وجود سد و مخزن در گام تحلیل اول که گام ژئواستاتیک است، در مرحله بعد که گام خاک است، سد و مخزن به تحلیل اضافه می‌شود و در گام اول سد و مخزن غیر فعال و در گام دوم دوباره فعال می‌شود.

شرایط مرزی

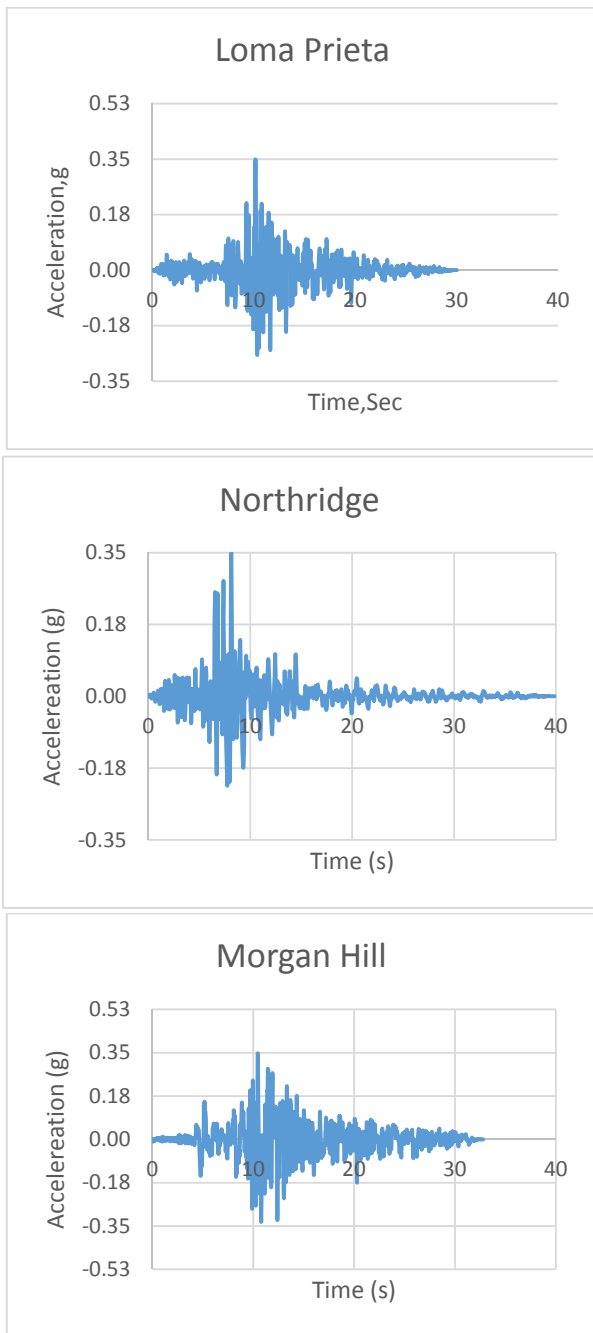
شرایط مرزی محیط به طوری تعریف شد که گیرداری کف پی و همچنین گیرداری وجوه گام اول و دوم تحلیل اعمال شد. از طرفی قید قائم پی در هنگام اعمال زلزله به همراه اعمال شتاب‌نگاشت در گام سوم تحلیل اعمال شد.

انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها

برای تحلیل مدل از ۳ شتاب‌نگاشت مورگان هیل^۱، لوماپریتا^۲ و نورثریج^۳ استفاده شده است. شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از

³ Northridge

¹ Morgan hill
² Loma perieta



شکل (۲): شتاب‌نگاشت زلزله‌ها الف) لوما پریتا ب) نورث‌ریج ج) مورگان هیل

نرم‌افزار سائزموسیگنال^۱ و بر اساس شتاب‌گرانش حاوی مقیاس گردیدند. مقدار مقیاس براساس Eurocode ۰/۳۵ شتاب‌گرانش (0.35g) می‌باشد. (<http://ngawest2.Berkeley.edu>). درخصوص انتخاب این شتاب‌نگاشتها می‌توان به این مطلب اشاره کرد که جنبش‌های ثبت شده در گسل‌های نزدیک، به علت اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده و تغییر مکان ماندگار دارای ویژگی‌های متفاوتی نسبت به جنبش‌های ثبت شده در فاصله دور از گسل هستند. از جمله مهمترین خصوصیات متمایز این زلزله‌ها می‌توان به وجود پالس‌های پریود بلند در تاریخچه‌ی زمانی، شتاب، سرعت، جابجایی، نسبت کوچک حداکثر شتاب به حداکثر سرعت در تاریخچه‌ی زمانی و مدت دوام کوتاه در مولفه عمود بر گسل، نگاشت اشاره کرد. با توجه به اینکه شتاب‌نگاشتها مقیاس شده‌اند نیازی به اعمال ضریب مقیاس در آباکوس نیست و ضریب شتاب برابر با ۱ در نظر گرفته شد. شکل (۲) به ترتیب شتاب‌نگاشت زلزله لوماپریتا، نورث‌ریج، مورگان هیل را نشان می‌دهد.

¹ Seismosignal

مش بندی

یکی از روش‌هایی که به منظور ارزیابی مناسب بودن ابعاد المان‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، بررسی نتایج المانی در مدل است. وجود ناپیوستگی‌ها و پرش‌های بزرگ نتایج در یک المان موید دقت کم آنالیز خواهد بود. بنابراین پس از اتمام شبیه‌سازی نتایج المانی باید بررسی شود. در مش بندی این تحقیق ۳ تیپ وجود دارد که مش اول مربوط به سد بتنی و تعیین نوع المان - کرنش ساده است. مش دوم مربوط به پی و تعیین نوع المان تنش/حفره آب است. مش سوم نیز مربوط به آب مخزن و تعیین نوع المان آکوستیک است.

مطابق جدول (۲) اختلاف بسیار جزئی در مقایسه تحلیل صحت‌سنجی انجام شده و مقاله (کلاته و قامتلو، ۱۳۹۸) وجود دارد که صحت روش مدل‌سازی و تحلیل پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جدول (۲): مقایسه نتایج جابجایی جانبی تاج سد در پژوهش حاضر و مقاله (کلاته و قامتلو، ۱۳۹۸)

شتاب‌نگاشت	نتایج جابجایی جانبی تاج سد (سانتی متر)	
	مقاله کلاته و قامتلو (۱۳۹۸)	آنالیز انجام شده
Loma Prieta	6.2	6.22
Northridge	6.1	6.08
Morgan Hill	9.2	9.16

نتایج تحلیل گام ژئواستاتیک

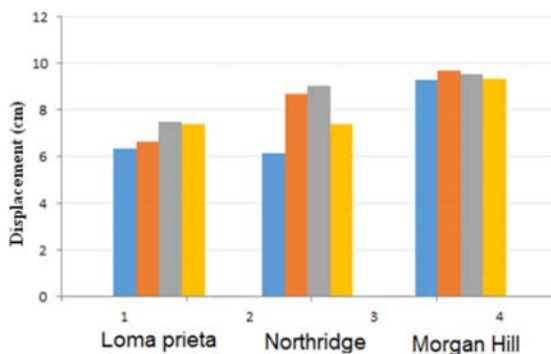
شکل (۴) نشان‌دهنده نمودار کانتور تنش در گام تحلیل ژئواستاتیک است. در این گام بارهای استاتیکی خاک اثر می‌کند. مطابق این نمودار حداکثر تنش در زیر پی و با مقدار ۱ مگاپاسکال است. شکل (۵) نشان‌دهنده نمودار کانتور تغییر مکان در گام تحلیل ژئواستاتیک است. مطابق این نمودار تغییر مکان در اثر بار ژئواستاتیک بسیار ناچیز است.

جدول شتاب-زمان هر شتاب‌نگاشت به نرم‌افزار آباکوس معرفی و در هر تحلیل به صورت جداگانه از طریق شرط مرزی به محل کف مدل اعمال شد. همچنین به منظور کاهش زمان تحلیل می‌توان از زمان موثر شتاب‌نگاشت استفاده کرد. در جهت تعریف بار ژئواستاتیک پی، نقطه ۱ معرف بار ژئواستاتیک و مختصات نقطه فوقانی خاک است که صفر بوده و در نقطه ۲ که مختصات ۱۰۰- متر است مقدار ارتفاع خاک را در وزن خاک اشباع ضرب نموده و وارد شد. ضریب جانبی نیز برای پی سد مقدار ۰/۴۸ بوده که می‌توان ۰/۵ در نظر گرفت.

آنالیز و تحلیل نتایج

نتایج تحلیل صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی، فشار برکنش آب مربوط به یکی از تحلیل‌های مقاله (کلاته و قامتلو، ۱۳۹۸) در نظر گرفته شده و نتایج مقایسه شد. شکل (۳) نشان‌دهنده نمودار میله‌ای جابجایی تاج سد در مقاله (کلاته و قامتلو، ۱۳۹۸) می‌باشد.



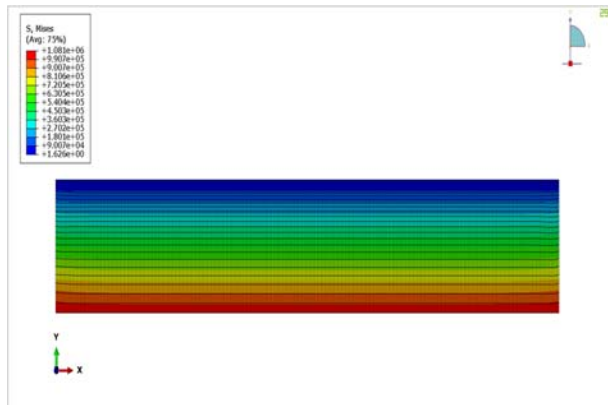
شکل (۳): نتایج جابجایی جانبی تاج سد در مقاله (کلاته و قامتلو، ۱۳۹۸).

مطابق این نمودار تحلیل‌های آبی رنگ مربوط به حالت بدون وجود نیروی برکنش آب است.

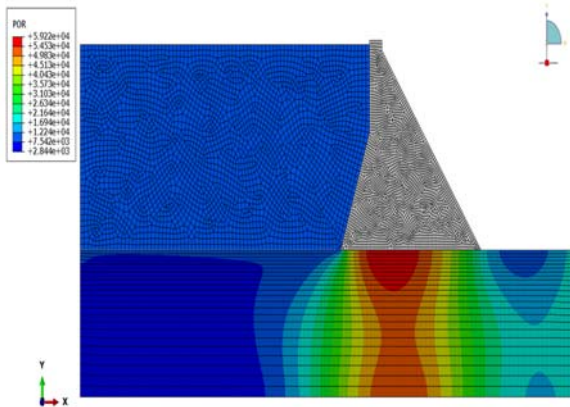
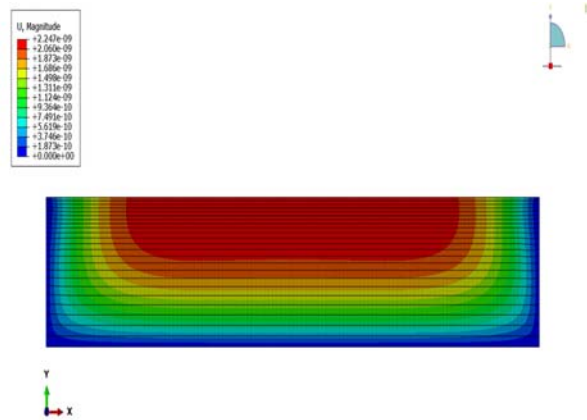
شکل (۵): کانتور تغییر مکان در گام تحلیل ژئواستاتیک

نتایج تحلیل گام تحلیل خاک – Soil

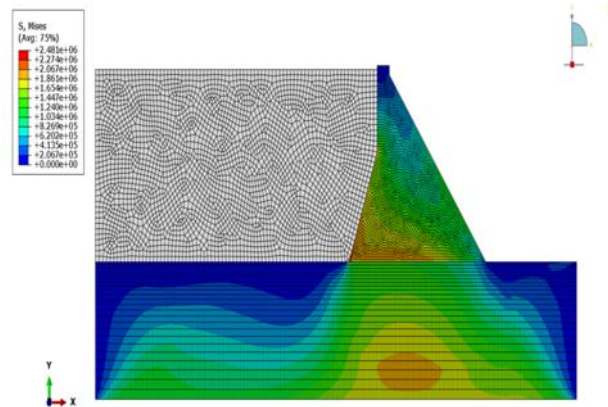
شکل (۶) قسمت (الف) نشان‌دهنده نمودار کانتور تنش در گام تحلیل خاک است. مطابق این نمودار تنش حداکثر ۲/۴۸ مگاپاسکال است. این درحالی است که در شکل (۶) و قسمت (ب) نشان‌دهنده نمودار کانتور فشار آب در گام تحلیل خاک است. مطابق این نمودار فشار حداکثر ۰/۰۵۹ مگاپاسکال است. و در زیر سد بتنی به دلیل وزن سد اتفاق افتاده است. همچنین قسمت (ج) از شکل (۶) نمودار کانتور تغییر مکان در گام تحلیل خاک است. مطابق این نمودار تغییر مکان حداکثر ۱/۷ سانتیمتر است.



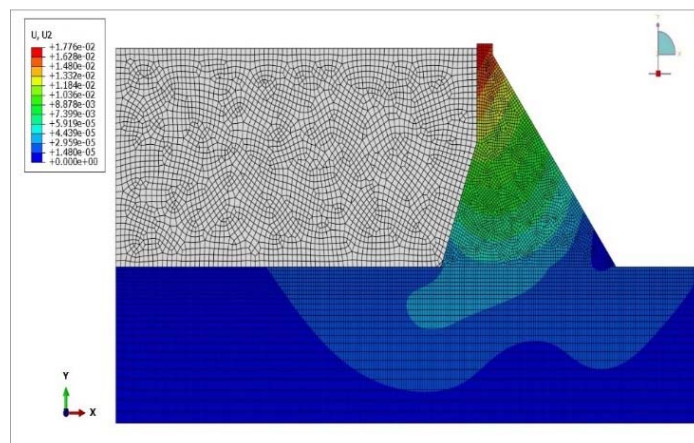
شکل (۴): کانتور تنش در گام تحلیل ژئواستاتیک



(ب)



(الف)



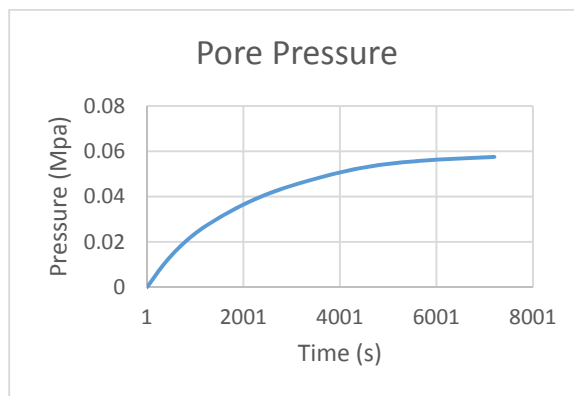
(ج)

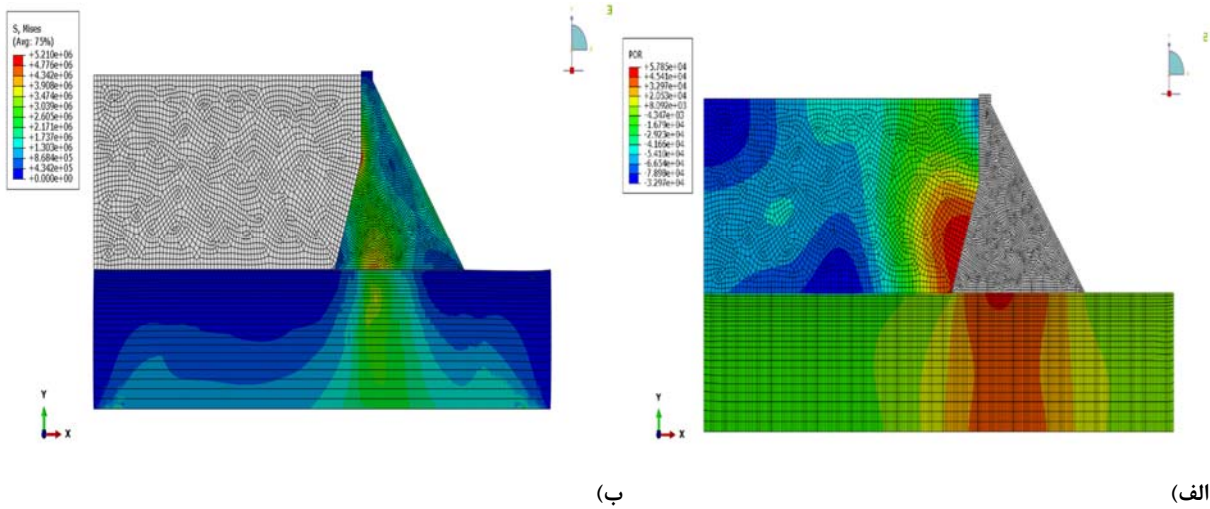
شکل (۶): کانتورها در گام تحلیل خاک الف) کانتور تنش ب) کانتور فشار آب پ) کانتور تغییر مکان

شکل (۷): نمودار فشار آب منفذی در گام تحلیل خاک در پاشنه سد

شکل (۸) قسمت الف) نشان دهنده نمودار نمونه کانتور فشار آب در میانه گام تحلیل زلزله است. مطابق این نمودار فشار حداکثر ۰/۰۵۷ مگاپاسکال است و در زیر سد بتنی به دلیل وزن سد اتفاق افتاده است در عین حال که در مخزن آب نیز در محل مرز سد و آب و نیمه پایین بدنه نیز همین مقدار به دلیل ایجاد فشار موج در مخزن ایجاد شده است. این در حالی است که در قسمت ب) از شکل (۸)، نشان دهنده نمودار کانتور تنش در گام تحلیل خاک است. مطابق این نمودار تنش حداکثر ۵/۲۱ مگاپاسکال است. و در نقطه شکست هندسی سد که جزو نقاط ضعف در سدهای بتنی می باشد، اتفاق افتاده است.

شکل (۷) نشان دهنده نمودار فشار آب منفذی در گام تحلیل خاک است. مطابق این نمودار فشار حداکثر ۰/۰۵۷ مگاپاسکال است و در این مقدار فشار آب تثبیت شده و نشان از تثبیت شرایط خاک و زمان مناسب در نظر گرفته شده برای تحلیل خاک است.

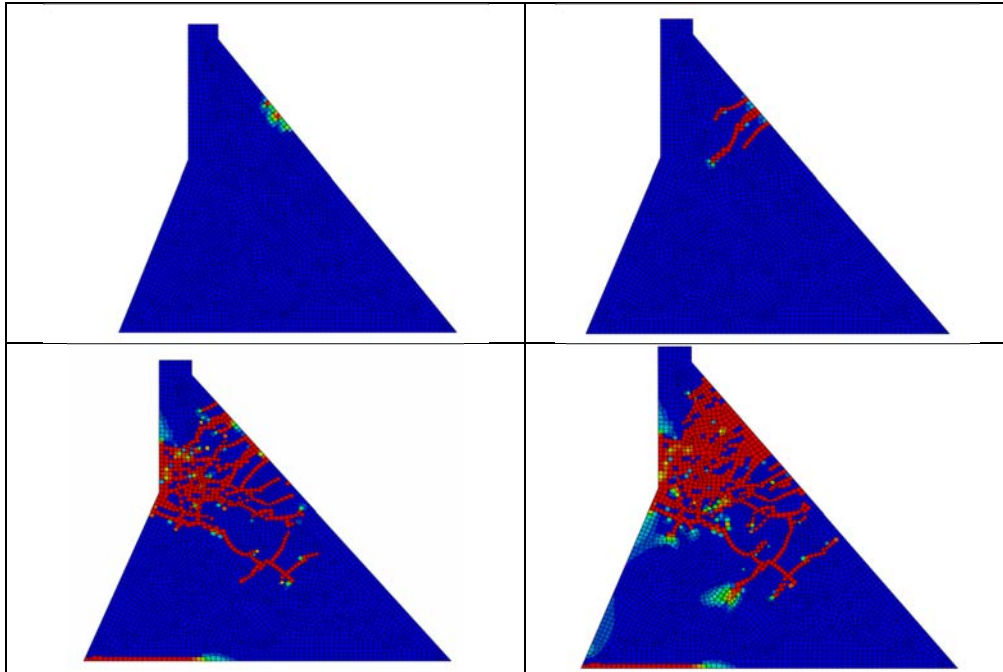




شکل (۸): کانتور در گام تحلیل زلزله الف) کانتور فشار آب ب) کانتور تنش

نتایج شتاب‌نگاشت مورگان هیل

در این بخش نتایج شتاب‌نگاشت مورگان هیل ارائه خواهد شد. شکل (۹) نشان‌دهنده گسترش ترک در زمان زلزله در بدنه سد است. مطابق این شکل ابتدا ترک در پیشانی سد اتفاق افتاده و سپس از محل شکست هندسی شروع به رشد کرده و در نهایت محیط بین پیشانی و شکست هندسی ترک‌ها افزایش یافته است. همچنین در پاشنه سد نیز تخریب به صورت طولی در طول فاصله بین پاشنه و پنجه انتشار یافته است.

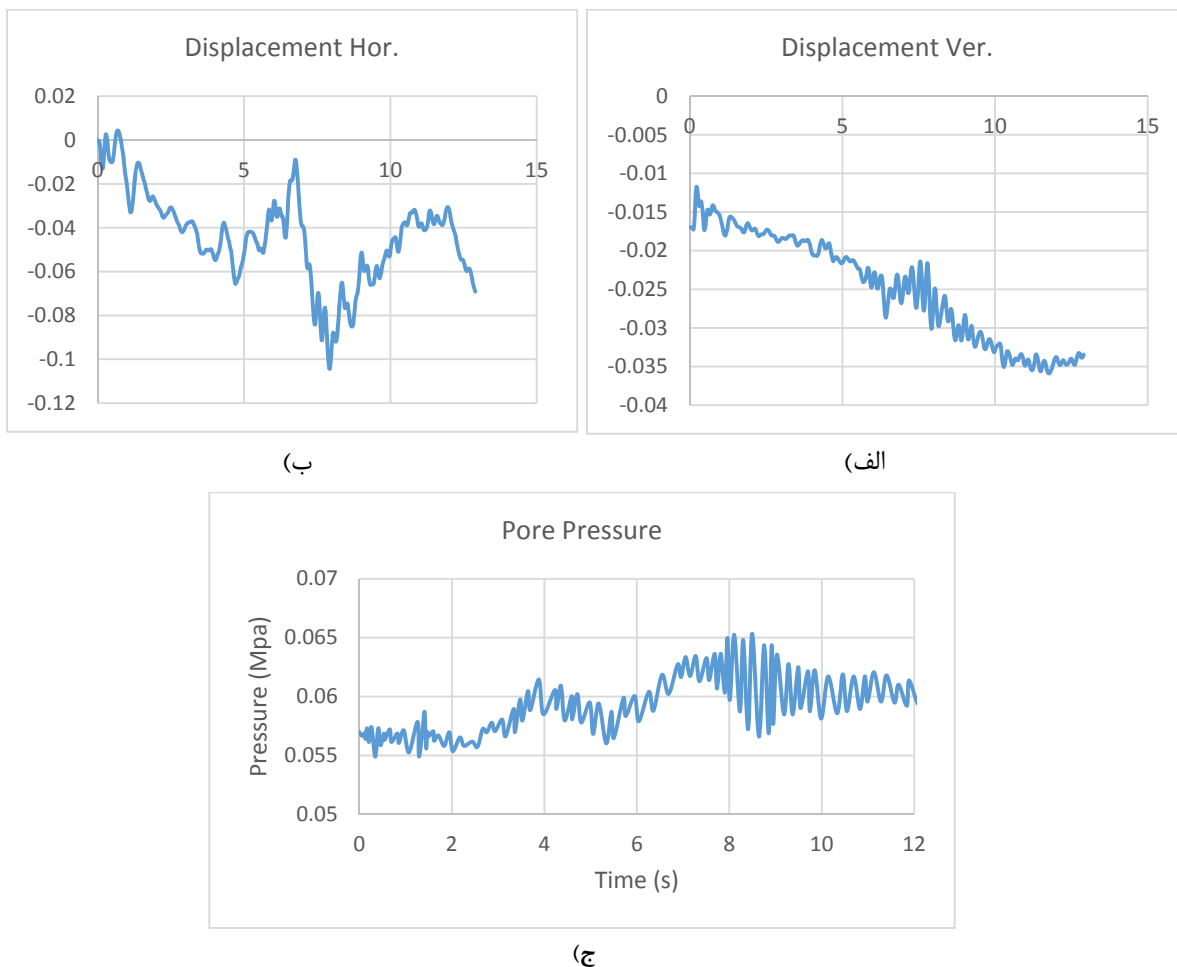


شکل (۹): گسترش ترک در زمان زلزله در بدنه سد

همچنین بخش ج از شکل (۱۰)، نشان‌دهنده نمودار تغییر فشار آب منفذی در پایین سد (حداصل پاشنه-پنجه) در طول زلزله است. مطابق این نمودار فشار آب منفذی حداکثر معادل $0/065$ مگاپاسکال است. مطابق این نمودار فشار آب منفذی در طول زمان زلزله تغییرات نسبتاً کمی را دارد. در عین حال که با توجه به نمودار این مقدار متناسب با تغییر مکان قائم سد و تغییرات فشار در خاک در اثر آن است. به طور کلی با نشست تدریجی سد در زمان زلزله فشار منفذی افزایش یافته و در محدوده $0/06$ مگاپاسکال متغیر است.

شکل (۱۰) بخش الف، نشان‌دهنده نمودار تغییر مکان جانبی در تاج سد در طول زلزله است. مطابق این نمودار حداکثر تغییر مکان جانبی در تاج سد معادل 11 سانتیمتر است. موج های تولید شده توسط مخزن و ضربات آن به دیواره سد باعث شده است که تغییر مکان جانبی به سمت پایین دست متمایل باشد.

این در حالی است که بخش ب از شکل (۱۰)، نشان‌دهنده نمودار تغییر مکان قائم در تاج سد در طول زلزله است. مطابق این نمودار حداکثر تغییر مکان قائم در تاج سد معادل $3/5$ سانتیمتر است. با توجه به نمودار فوق، نشست در سد اتفاق افتاده است.



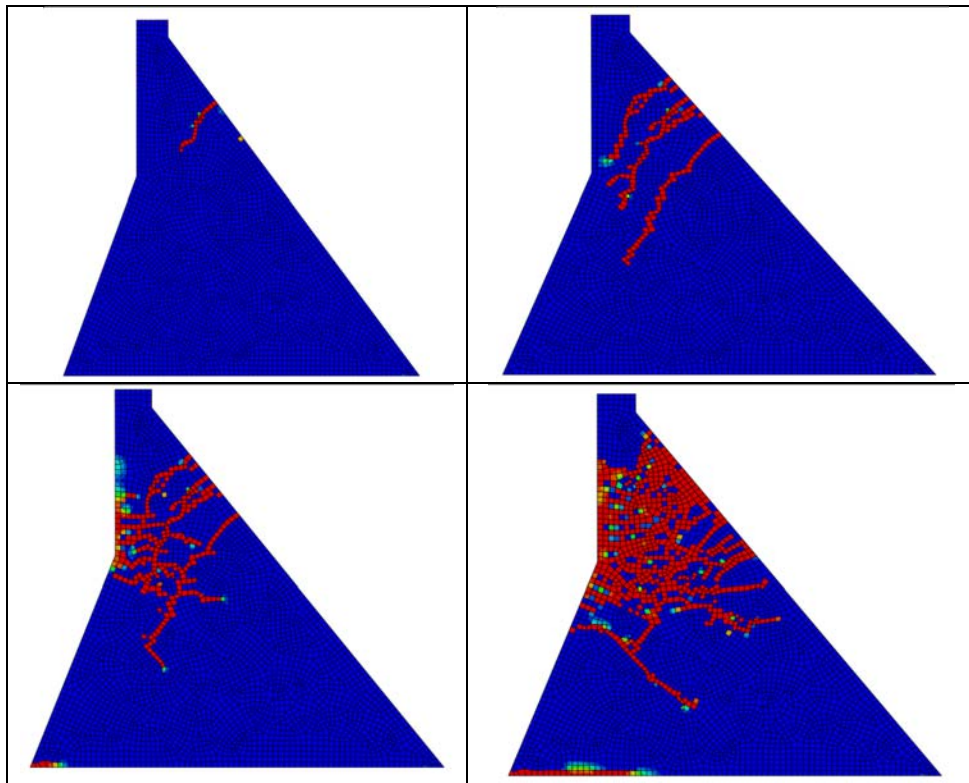
شکل (۱۰): نمودار تغییرات سد در طول زلزله

الف) تغییر مکان جانبی در تاج ب) تغییر مکان جانبی در تاج سد ج) نمودار تغییر فشار آب منفذی در پایین سد

نتایج شتاب‌نگاشت نورث‌ریچ

در این بخش، نتایج تحلیل شتاب‌نگاشت نورث‌ریچ ارائه خواهد شد. شکل (۱۱) نشان‌دهنده گسترش ترک در زمان زلزله در بدنه سد است. مطابق این شکل ابتدا ترک در پیشانی سد اتفاق افتاده و بیشتر در این ناحیه رشد ترک را مشاهده می

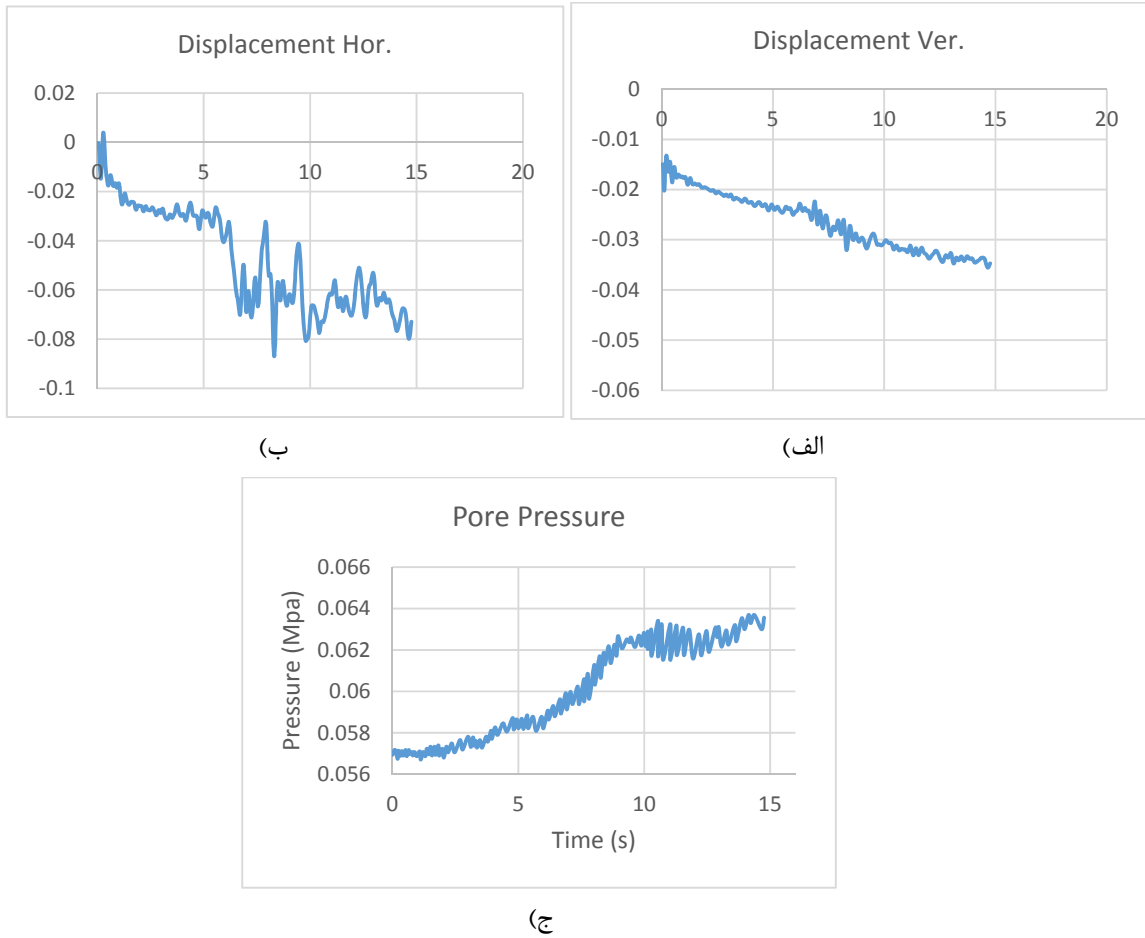
کنیم و سپس از محل شکست هندسی شروع به رشد کرده و در نهایت محیط بین پیشانی و شکست هندسی ترک‌ها افزایش یافته است. بیشترین مقدار رشد ترک نیز از ناحیه پیشانی است.



شکل (۱۱): گسترش ترک در زمان زلزله در بدنه سد

نمودار تغییر فشار آب منفذی در پایین سد (حداصل پاشنه- پنجه) در طول زلزله است. مطابق این نمودار فشار آب منفذی حداکثر معادل $0/064$ مگاپاسکال است. مطابق این نمودار فشار آب منفذی در طول زمان زلزله تغییرات نسبتاً کمی را دارد در عین حال که با توجه به نمودار این مقدار متناسب با تغییر مکان قائم سد و تغییرات فشار در خاک در اثر آن است.

شکل (۱۲) بخش الف، نشان‌دهنده نمودار تغییر مکان جانبی در تاج سد در طول زلزله است. مطابق این نمودار، حداکثر تغییر مکان جانبی در تاج سد معادل $8/69$ سانتیمتر است. این در حالی است که بخش ب از شکل (۱۲) نشان‌دهنده نمودار تغییر مکان قائم در تاج سد در طول زلزله است. مطابق این نمودار حداکثر تغییر مکان قائم در تاج سد معادل $3/5$ سانتیمتر است. با توجه به نمودار فوق، نشست در سد اتفاق افتاده است. همچنین بخش ج از شکل (۱۲)، نشان‌دهنده



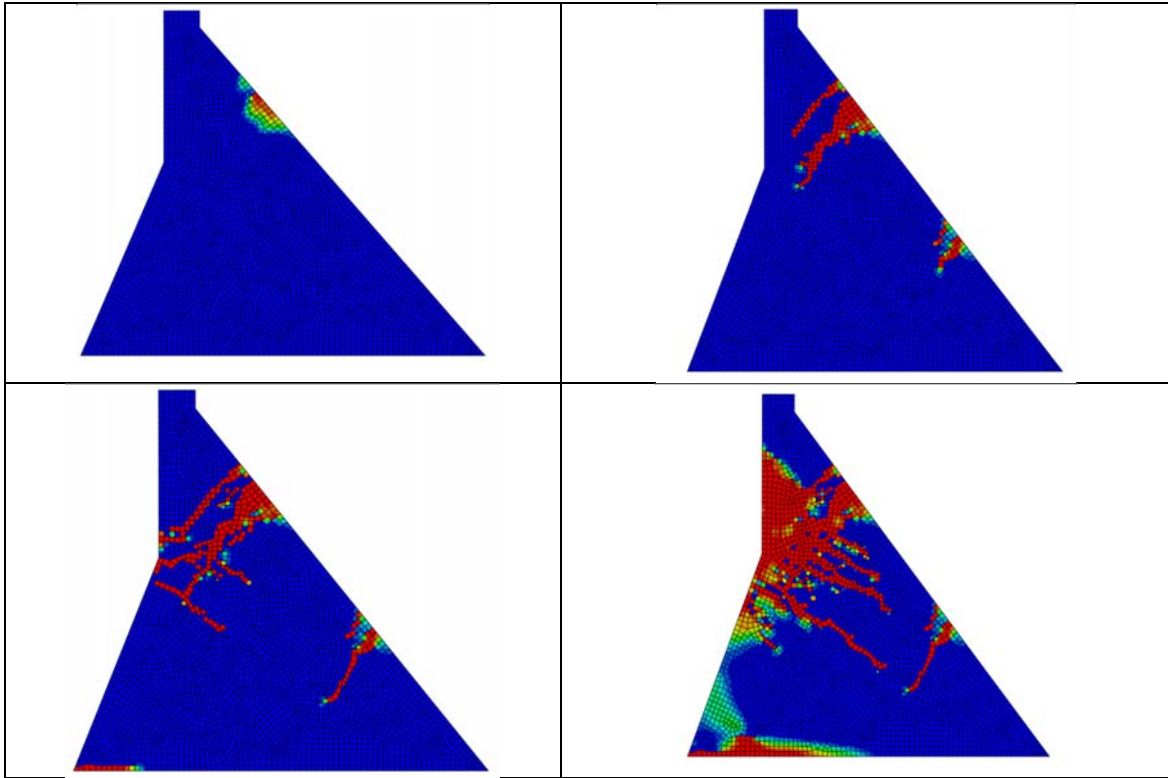
شکل (۱۲): نمودار تغییرات سد در طول زلزله

الف) تغییر مکان جانبی در تاج سد ب) تغییر مکان جانبی در تاج سد ج) تغییر فشار آب منفذی در پایین سد

نتایج شتاب‌نگاشت لوما پریتا

در این بخش به نتایج تحلیل شتاب‌نگاشت لوما پریتا پرداخته شده است. شکل (۱۳) نشان‌دهنده گسترش ترک در زمان زلزله در بدنه سد است. مطابق این شکل، ابتدا ترک در پیشانی سد و سپس حد فاصل پیشانی و پنجه اتفاق افتاده و در این ناحیه رشد ترک بیشتر شده و همچنین هنگام رشد ترک، تخریب گسترده‌تری در این ناحیه نسبت به دیگر شتاب‌نگاشت

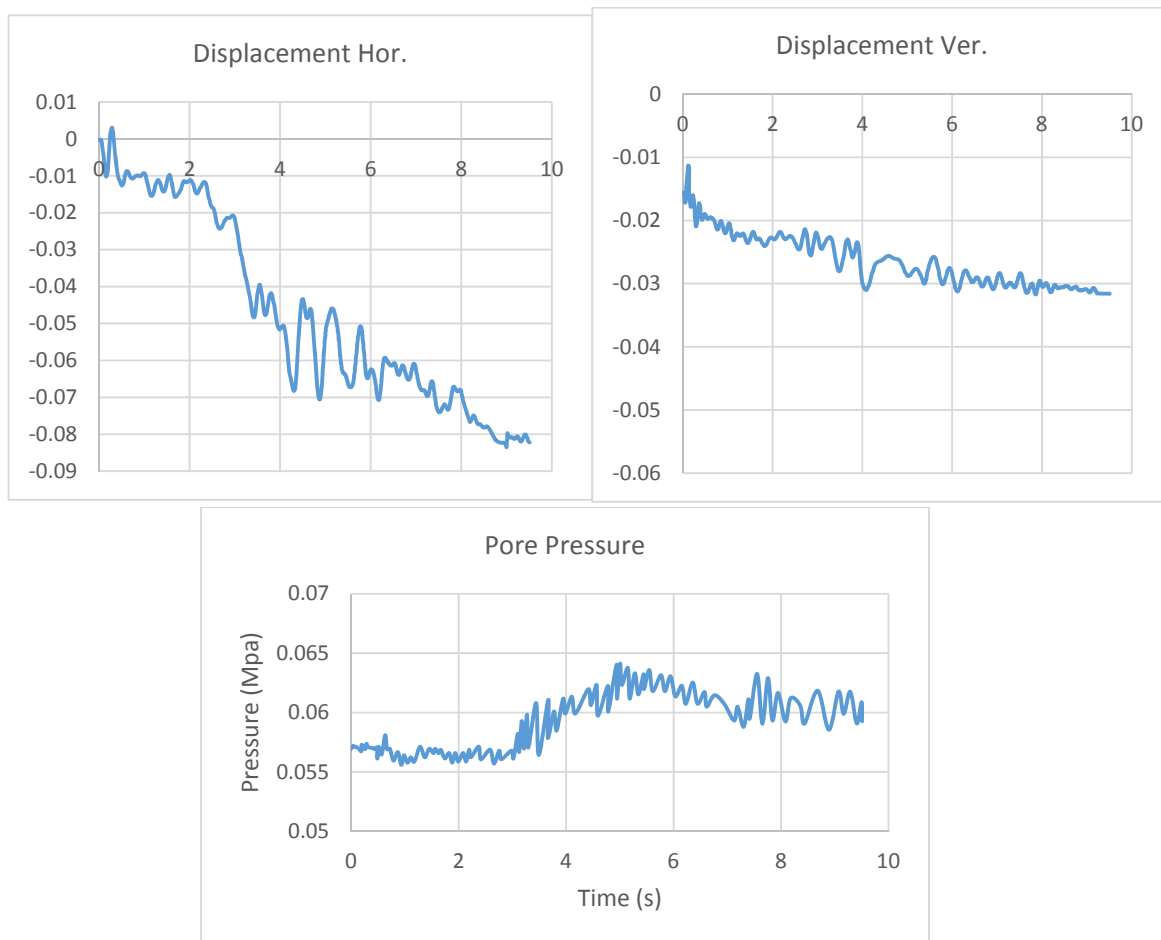
ها مشاهده می‌شود و ترک‌ها بیشتر رشد عرضی دارند تا رشد طولی. در قسمت شکست هندسی سد نیز همین امر مشاهده می‌شود، با گسترش ترک‌ها، میزان رشد عرضی آنها بسیار زیاد است. همچنین تخریب در ناحیه پاشنه نیز بیشتر به شکل تخریب کششی عمده است تا رشد ترک.



شکل (۱۳): گسترش ترک در زمان زلزله در بدنه سد

شکل (۱۴) بخش الف، نشان‌دهنده‌ی نمودار تغییر مکان جانبی در تاج سد در طول زلزله است. مطابق این نمودار، حداکثر تغییر مکان جانبی در تاج سد معادل ۸/۲ سانتیمتر است. این در حالی است که بخش ب از شکل (۱۲)، نشان دهنده نمودار تغییر مکان قائم در تاج سد در طول زلزله است. مطابق این نمودار حداکثر تغییر مکان قائم در تاج سد معادل ۳/۱ سانتیمتر است. با توجه به نمودار فوق نشست در سد اتفاق افتاده است. همچنین شکل (۱۲) بخش ج، نشان دهنده نمودار تغییر فشار آب منفذی در پایین سد (حدفاصل پاشنه- پنجه) در طول زلزله است. مطابق این نمودار، فشار آب منفذی حداکثر معادل ۰/۰۶۴ مگاپاسکال است. مطابق این نمودار، فشار آب منفذی در طول زمان زلزله تغییرات نسبتاً کمی را دارد، در عین حال که با توجه به نمودار، این مقدار متناسب با تغییر مکان قائم سد و تغییرات فشار در خاک در اثر آن است. بطور کلی با نشست تدریجی سد در زمان زلزله فشار منفذی افزایش یافته و در محدوده ۰/۰۶ مگاپاسکال متغیر است.

شکل (۱۴) بخش الف، نشان‌دهنده‌ی نمودار تغییر مکان جانبی در تاج سد در طول زلزله است. مطابق این نمودار، حداکثر تغییر مکان جانبی در تاج سد معادل ۸/۲ سانتیمتر است. این در حالی است که بخش ب از شکل (۱۲)، نشان دهنده نمودار تغییر مکان قائم در تاج سد در طول زلزله است. مطابق این نمودار حداکثر تغییر مکان قائم در تاج سد معادل ۳/۱ سانتیمتر است. با توجه به نمودار فوق نشست در سد اتفاق افتاده است. همچنین شکل (۱۲) بخش ج، نشان دهنده نمودار تغییر فشار آب منفذی در پایین سد (حدفاصل پاشنه- پنجه) در طول زلزله است. مطابق این نمودار، فشار آب منفذی



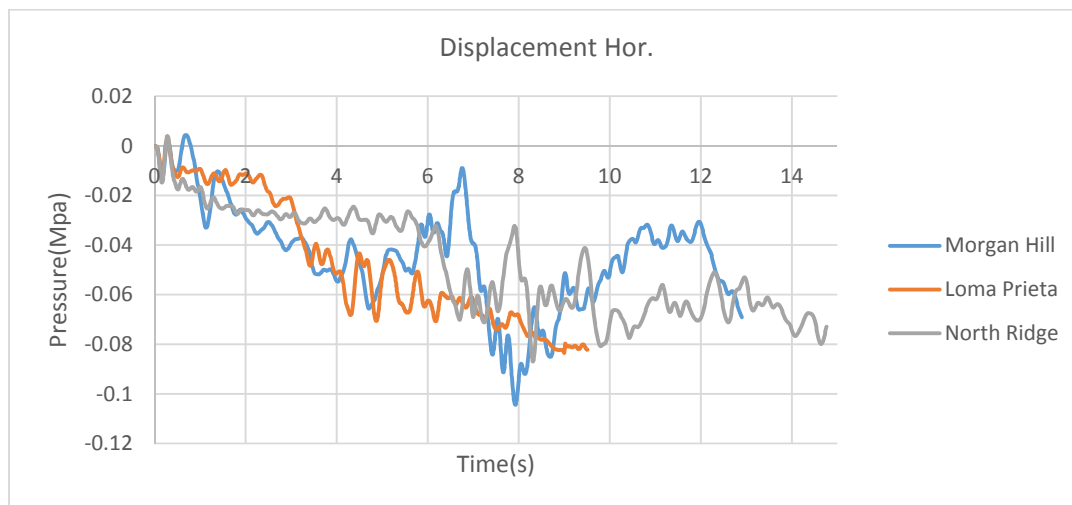
شکل (۱۴): نمودار تغییرات سد در طول زلزله

الف) تغییر مکان جانبی در تاج سد ب) تغییر مکان جانبی در تاج سد ج) تغییر فشار آب منفذی در پایین سد

مقایسه نتایج

بعد از آنالیز نتایج شتاب‌نگاشت‌های متفاوت، حال به مقایسه نتایج پرداخته خواهد شد. شکل (۱۵) نشان دهنده نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان جانبی تاج سد در زمان زلزله بر اساس

۳ شتاب‌نگاشت انتخابی است. مطابق این نمودار بیشترین جابجایی جانبی تاج سد مربوط به شتاب‌نگاشت مورگان هیل با مقدار ۱۱ سانتیمتر است. بیشترین تغییرات نسبی نیز مربوط به همین شتاب‌نگاشت است.



شکل (۱۵): نمودار مقایسه ای تغییر مکان جانبی تاج سد در زمان زلزله

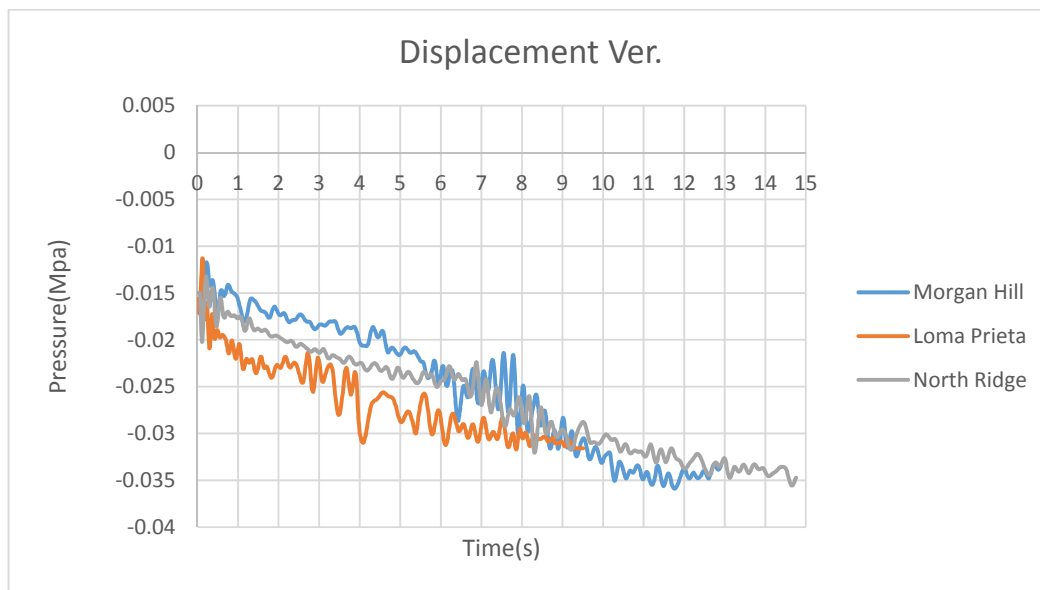
شکل (۱۶) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان قائم تاج سد در زمان زلزله بر اساس ۳ شتاب‌نگاشت انتخابی است. مطابق این نمودار، بیشترین جابجایی قائم تاج سد، مربوط به شتاب‌نگاشت نورث‌ریج با مقدار ۴ سانتیمتر است. کمترین مقدار نیز مربوط به شتاب‌نگاشت لوما پریتا با مقدار ۳ سانتیمتر است. همچنین شکل (۱۷) نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای فشار آب حفره‌ای در زمان زلزله (حداصل پاشنه- پنجه) بر اساس ۳ شتاب‌نگاشت انتخابی است. مطابق این نمودار بیشترین فشار آب حفره ای مربوط به شتاب‌نگاشت مورگان هیل با مقدار ۰/۰۶۵ مگاپاسکال است. مقدار حداکثر فشار آب حفره‌ای برای دو شتاب‌نگاشت دیگر حدود ۰/۰۶۴ است. مطابق این نمودار تغییرات فشار آب حفره ای به‌طور کلی در طول زمان زلزله دارای نوسان زیاد با دامنه نسبتاً کم است.

جدول (۳) نشان‌دهنده مقایسه نتایج جابجایی افقی پژوهش حاضر و مقاله کلاته و قامتلو، ۱۳۹۸ با احتساب نیروی برکنش است با این تفاوت که در مقاله کلاته و قامتلو، ۱۳۹۸ نیروی برکنش به‌صورت بار ثابت دوزنقه‌ای وارد گردیده اما در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای به صورت متغیر در طول تحلیل، نیروی برکنش به صورت محاسباتی از طریق خود نرم‌افزار محاسبه و در هر لحظه اعمال گردیده است و در واقع تابع شرایط لحظه‌ای فشار آب حفره‌ای در مدل در طول شتاب‌نگاشت است.

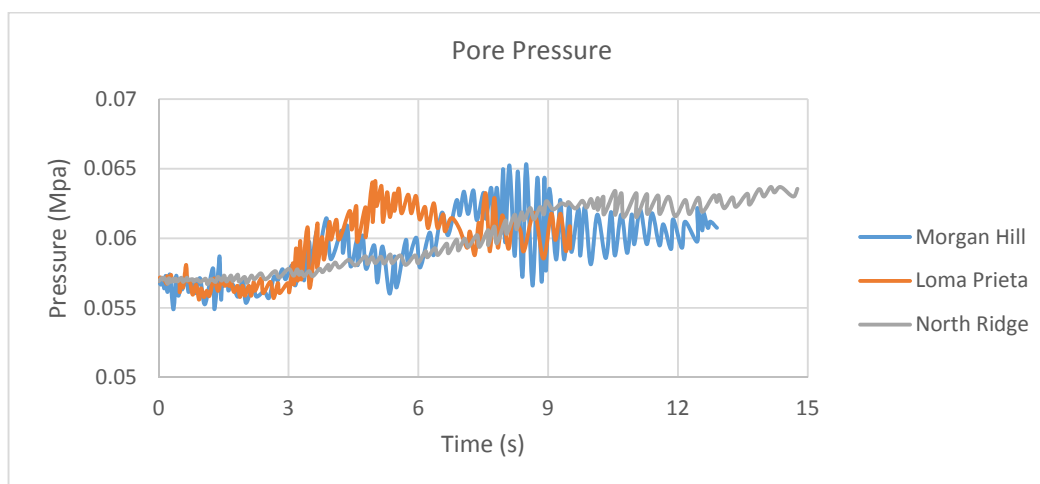
جدول (۳): مقایسه نتایج جابجایی افقی پژوهش حاضر و

مقاله (کلاته و قامتلو، ۱۳۹۸)

شتاب‌نگاشت	پارامتر جابجایی افقی	
	مقاله کلاته و قامتلو (۱۳۹۸)	پژوهش حاضر
لوما پریتا	7.5	8.2
نورث‌ریج	8.4	8.69
مورگان هیل	9.6	9.73



شکل (۱۶): نمودار مقایسه ای تغییر مکان جانبی تاج سد در زمان زلزله



شکل (۱۷): نمودار مقایسه ای فشار آب حفره ای در زمان زلزله

نتیجه گیری

امروزه یکی از مهمترین بحثها، بحث مقاومت سدها است که با توجه به هزینه ساخت بالای ساخت سد بررسی تأثیر شرایط مختلف از جمله فشار برکنش آب بسیار مهم است. در عین حال با توجه به ایجاد آسیبهای مالی و جانی به دلیل شکست سد، این مسئله دارای اهمیت بسیار بالایی است. به این دلیل در پژوهش حاضر به تحلیل تأثیر توزیع فشار برکنش متغیر

در سطح اعمال شتاب ناشی از زمین لرزه در موقعیت ترک سد بتنی پرداخته شد. نتایج موردی این تحقیق عبارتند از:
 ۱- به منظور اعمال نیروی برکنش متغیر در زیر سد، می بایست فشار آب حفره ای، درصد اشباع و تخلخل خاک در نظر گرفته شود. همچنین نیروهای ژئواستاتیک خاک و همچنین نیروهای ثقلی وارد از مخزن و سد به خاک وارد شده و زمان لازم برای تثبیت خاک و فشار آب حفره ای لحاظ گردد. بدین ترتیب در هنگام اعمال شتاب نگاشت فشار آب حفره ای

۷- مقایسه تغییر مکان قائم تاج سد در زمان زلزله براساس سه شتاب‌نگاشت انتخابی نشان داد که بیشترین جابجایی قائم تاج سد مربوط به شتاب‌نگاشت نورث‌ریچ با مقدار ۴ سانتیمتر است. کمترین مقدار نیز مربوط به شتاب‌نگاشت لوما پریتا با مقدار ۳ سانتیمتر است.

۸- مقایسه‌ی فشار آب حفره‌ای در زمان زلزله (حداصل پاشنه-پنجه) بر اساس سه شتاب‌نگاشت انتخابی نشان داد که بیشترین فشار آب حفره‌ای مربوط به شتاب‌نگاشت مورگان هیل با مقدار ۰/۰۶۵ مگاپاسکال است. مقدار حداکثر فشار آب حفره‌ای برای دو شتاب‌نگاشت دیگر حدود ۰/۰۶۴ است. مطابق این نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای به‌طور کلی در طول زمان زلزله دارای نوسان زیاد با دامنه نسبتاً کم است.

مراجع

Gorai, S. Maity, D (2021) Seismic behaviour of dams to near fault and far fault ground motions: A state of the art review. *Journal of Earthquakes and Structures* 21(3):251-263

Hariri-Ardebili, M.A., Mirzabozorg, H.A (2013) Comparative Study of the Seismic Stability of Coupled Arch Dam-Foundation-Reservoir System using Infinite Elements and viscous Boundary Models., *International journal of structural Stability and Dynamics*

Jiang, S. Y., & Du, C. B (2012) Seismic stability analysis of concrete gravity dam with penetrated cracks. *Water Science and Engineering*, 5(1), 105-119

Kalate, F., Ghamtalo, A. (2016). Comparison of massed and non-massed foundation on nonlinear dynamic response of weighted concrete dam in terms of dam-reservoir-foundation interaction, *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning of Contemporary Iran*, Shahid Beheshti University (in persian)

Kalate, F. Ghamatloo, A. (2018) Investigating the effect of uplift on the seismic damage of weighted concrete dam in earthquakes in far and near areas. 6(1), 202-221 (in persian)

Machelski, C. Korusiewicz, L (2021) Contact Interaction between Corrugated Steel Shell and the

می‌تواند به صورت متغیر در نرم‌افزار محاسبه گردد و همچنین نیروی برکنش حاصل از آن نیز توسط آباکوس محاسبه گردد.

۲- موج‌های حاصل از زلزله در مخزن سد باعث جلوگیری از بازگشت سد به سمت مخزن و در عین حال کمک به جابجایی در جهت پایین دست سد می‌کند. به همین دلیل جابجایی جانبی سد به‌طور کلی متمایل به سمت پایین دست جریان است.

۳- ارتعاش حاصل از زلزله باعث نشست خاک و در نهایت سد بتنی می‌شود و تغییر مکان قائم سد متمایل به فرو نشست است.

۴- رشد ترک در هر ۳ شتاب‌نگاشت، از پیشانی شروع شده است و سپس در نقطه مقابل آن، محل شکست هندسی سد شروع به انتشار می‌کند و سپس با رشد ترک از دو طرف ناحیه میان این دو دچار تخریب کششی عمده خواهد شد.

۵- فشار آب حفره‌ای در طول زلزله نوسانات بسیار شدید ولی با دامنه کمی دارد، به همین دلیل تأثیر کمی بر روی جابجایی‌های جانبی و قائم سازه را داراست. اما در هر صورت با لحاظ نمودن شکل واقعی نیروی برکنش آب، مانند پژوهش حاضر، باعث مقداری افزایش در جابجایی جانبی و قائم سد نسبت به حالت مرسوم محاسباتی و اعمال دستی نیرو به صورت دوزنقه‌ای است. بدین ترتیب، در عین حال که مقدار آن کم است اما قابل بررسی و تأمل است و با توسعه این مطالعه و تحقیق برای انواع سدهای دیگر (خاکی، قوسی و...) و همچنین شتاب‌نگاشت‌های دیگر و یا خاک و پی با مصالح متفاوت، می‌تواند اثرات متفاوت و یا بزرگتر را ایجاد کند.

۶- مقایسه تغییر مکان جانبی تاج سد در زمان زلزله براساس سه شتاب‌نگاشت انتخابی نشان داد که بیشترین جابجایی جانبی تاج سد، مربوط به شتاب‌نگاشت مورگان هیل با مقدار ۱۱ سانتیمتر است. بیشترین تغییرات نسبی نیز مربوط به همین شتاب‌نگاشت است.

PEER., Pacific Earthquake Engineering Research Center., Ground motion database, NGWEST2 project. (Available from: <http://ngawest2. Berkeley.edu>).

Pundrik P, Bahuguna A, Firoj M (2020) Near fault and far fault seismic analysis of concrete gravity dam. *Journal of Hydraulic Structures* 6(2): 56-79

Sherong ,G(2013)Effects of near-Fault and far-fault ground motions on nonlinear dynamic response and seismic damage of concrete gravity dam.*Journal soil dynamics and Earthquake engineering* 53(1),217-229.

Shi, M., Zhong, H., Ooi, E. T., Zhang, C., & Song, C(2013) Modelling of crack propagation of gravity dams by scaled boundary polygons and cohesive crack model. *International Journal of Fracture*, 183(1), 29-48

Westergaad, HM., Water Pressure on dam during earthquakes.,*Transactions of the American society of civil engineers*, 1933,98,1303-1318.

Yang, D., Zhou, J(2015)A stochastic model and synthesis for near-fault impulsive ground motions, *Earthquake Engineering and Astructural dynamics*,44(1),243-264.

Soil Backfill Determined based on the Measurements of Shell Deformations. *Journal of Archives of Civil Engineering*. 67(1) ,57-79.

Mahmoudian Shooshtri, M., Sadeghi Chikani, P (2013) Dynamic analysis of weight dams considering concrete cracking using the finite element method, 7th National Civil Engineering Congress, Shahid Nikbakht College of Engineering, Zahedan (in persian)

Motallebian,A. Bayat ,M Nadi,B(2020) Analyzing the Effects of Soil-Structure Interactions on the Static Response of Onshore Wind Turbine Foundations Using Finite Element Method, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 53(1), 189-205

Navaeinia, B., Naseri, N., Kalani, L., Vathaghi Amiri, J.(2013)Evaluation of nonlinear response of weighted concrete dams with rotational and static crack modeling, First National Conference on Structural Engineering of Iran, Hotel Conference Center Olympics, Tehran, Iran. (in persian)

Oliveira, S., Gaspar, N., & Dinis, P (2006) Cracking Analysis in Concrete Dams using Isotropic Damage Models.Objectivity of Numerical Solutions. InIII European Conference on Computational Mechanics, Springer Netherlands.369-369

Numerical investigation of variable uplift distribution at the level of landslide-induced acceleration at the concrete dam body crack position

Alireza Mardookhpour¹
Ramtin Sobhkhiz Foumani^{2*}
Amir Mohammad Merhamati³

Abstract

The study of seismic behavior of concrete dams has been considered by many researchers due to the importance of dam safety during earthquakes. Because the destruction of these structures by earthquakes can have adverse economic and social effects. On the other hand, predicting the behavior of concrete dams during an earthquake is one of the most complex and difficult issues in structural dynamics. In the present study, the effects of compressive force (uplift) and its distribution as a variable on the nonlinear dynamic response of a weighted concrete dam under earthquakes near and far from the fault have been studied using a numerical model. The results showed that the waves generated by the earthquake in the reservoir of the dam prevent the return of the dam to the reservoir and at the same time help to move downstream of the dam, therefore the lateral displacement of the dam is generally inclined downstream. The results also showed that the cavity water pressure fluctuates very strongly during the earthquake but with a small amplitude, therefore it has little effect on lateral and vertical displacements of the structure.

Keywords: Concrete Dam, Uplift Pressure, Crack, Landslide, Abaqus Software

¹ Assistance Professor of Civil Engineering Department, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

² PhD student of Civil Engineering Department, University of Qom, Qom, Iran

³ M.sc of Civil Engineering Department, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran