

بررسی شاخص آسیب لرزه‌ای متأثر از تغییرات تراز آب در مخزن با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی سد بتنی وزنی تحت زمین‌لرزه‌های حوزه دور و نزدیک

فرهود کلاته^{۱*}

امیر قامتلو^۲

چکیده

در مقاله حاضر تأثیر تراز مختلف آب در مخزن سد، بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سد بتنی وزنی در اثر زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک و دور از گسل با استفاده از مدل عددی، مورد مطالعه قرار گرفته است، لذا در مطالعه حاضر با فرض سه تراز مختلف آب در مخزن تأثیر تراز آب بر رفتار دینامیکی و میزان آسیب لرزه‌ای سد بتنی وزنی بررسی شده است. همچنین جهت بررسی دقیق‌تر موضوع شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک و دور، در سه زلزله متفاوت بر سازه سیستم سد-مخزن-فونداسیون اعمال گردیده است. مدل خرابی پلاستیک بتن (CDP) که شامل رفتار سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی کرنشی بتن است در تحلیل دینامیکی غیرخطی بکار رفته است. به‌عنوان مطالعه موردی تحلیل دینامیکی غیرخطی و آنالیز خرابی لرزه‌ای سد بتنی وزنی شفارود، واقع در استان گیلان تحت زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک و دور مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از تحلیل حاکی از تأثیر قابل‌ملاحظه تراز آب در مخزن بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سد بتنی وزنی می‌باشد و همچنین وجود آب در مخزن اثر کاهشی بر سطح خرابی بدنه سد بتنی وزنی تحت زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک دارد.

واژه‌های کلیدی

سد بتنی وزنی، آنالیز دینامیکی غیرخطی، تراز آب در مخزن، اندیس خرابی لرزه‌ای، زلزله حوزه نزدیک و دور

^{۱*} استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز- گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، fkalateh@tabrizu.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد- سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

مقدمه

زمین‌لرزه در نظر گرفته شود. نوایی نیا و همکاران (۱۳۹۳) مقایسه بین روش ترک پخشی دورانی و ترک پخشی ثابت در سدهای بتنی وزنی تحت اثر زلزله مورد بررسی قرار دادند. 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، هریک از دو روش مدل‌سازی ترک از مزایا و معایب نسبی برخوردار است. رحیم‌زاده رفویی و امیدی (۱۳۸۱) به بررسی پایداری سد قوسی امیرکبیر (کرج) و ارزیابی اثرات رفتار غیرخطی بتن با وجود درزهای انقباضی و اندرکنش سد- مخزن با فرض تراکم‌پذیری آب بر پاسخ لرزه‌ای آن پرداختند. نتایج، حاکی از محدود شدن تنش‌های کششی بالا در قسمت‌های مختلف بدنه سد و تغییر رفتار سد به صورت افزایش پیوند ارتعاشی و نیز تغییر مکان نقاط مختلف بدنه سد است. نژاد فرد (۱۳۹۱)، با انتخاب سد بتنی قوسی کارون ۴ به عنوان نمونه موردی و با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی را انجام داد. سیستم تحت مؤلفه‌های افقی و قائم شتاب‌نگاشت زلزله منجیل قرار گرفته است. دریاچه با المان‌های اولرین مدل‌سازی شده و اثرات غیرخطی شدن هندسی بدنه سد لحاظ شده است. همچنین اثرات اندرکنش‌های موجود بین سد، پی سنگی جرم‌دار و دریاچه در نظر گرفته شده است. با استفاده از مدل خرابی پلاستیک بتن و در نظر گرفتن معیارهای آسیب کششی و فشاری، شدت و محل خرابی‌ها مشخص شده است. تحلیل‌ها با فرض سد سالم، بدون معیارهای آسیب‌دیدگی و سد ترک‌خورده، در حالت وجود معیارهای آسیب، در حالت‌های مخزن پر و خالی تحلیل شده و نتایج حالات مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین با اعمال زلزله دوم به سیستم، عملکرد سد بعد از تجربه زلزله اول مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به صورت پاسخ‌های تاریخچه زمانی و هم به صورت طیف پاسخ ارائه شده است. نتایج نشان داد که به وجود آمدن آسیب در بتن در زمان زلزله قطعی بوده و ترک‌خوردگی‌ها باعث بالا رفتن پاسخ‌های شتاب در سد شده و منجر به کاهش در پاسخ تنش و جابجایی خواهد شد، همچنین ترک‌خوردگی تأثیر ناچیزی بر پاسخ‌های سرعت دارد. محمودیان شوشتریان و همکار (۱۳۹۲)، از

نظر به اهمیت بالای 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 بناهای 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. 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 ارتفاع مختلف، مخزن ذخیره آب با لحاظ اندرکنش سد و مخزن و فونداسیون پرداخته خواهد شد.

بررسی تحقیقات پیشین

پروولکس و همکاران (۲۰۰۱) به ارزیابی تجربی اثرات تراز آب مختلف در مخزن سد بر پاسخ دینامیکی سد قوسی Emossoucanal با ارتفاع آن ۱۸۰ متر، در سوئیس پرداخته‌اند. آزمایش‌های ارتعاشی صورت گرفته در خصوص سد مذکور در طی چهار دوره مختلف در طی یک دوره یکساله انجام شده است. پاسخ‌های فرکانس شتاب و تغییرات فشار هیدرو دینامیکی در چندین موقعیت ثبت و این در شرایطی بوده است که سد تحت بارگذاری افقی هارمونیک قرار گرفته بود. تنوع فراوانی رزونانس به عنوان تابعی از تراز سطح آب در مخزن بررسی شده است. خلاصه‌ای از فاز همبستگی عددی با استفاده از یک مدل سه‌بعدی برای سیستم پایه سد مخزنی نیز ارائه شده است. آکوس و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر سطح آب مخزن، بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سدهای قوسی مورد بررسی قرار دادند، برای این منظور رفتار غیرخطی بتن بدنه سد به صورت الاستوپلاستیک با استفاده از مدل Drucker-prager بر اساس قانون حاکم مربوط به جریان همبسته، است، نتایج حاصل از تحلیل‌های غیرخطی برای سطوح مختلف آب با یکدیگر مقایسه شده است و اثرات سطوح آب مخزن باید در تحلیل الاستوپلاستیک سدهای قوسی به حرکت

چسبنده^۱ مدل سازی کردند. تشخیص جهت ترک در این مدل بر اساس ایجاد بیشترین تنش در انتهای ترک است. نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج موجود در سایر تحقیقات عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت که حاکی از قابلیت قابل قبول روش پیشنهادی است. البیورا و همکاران (۲۰۰۶) وجود ترک در بدنه سد کاربیل را با روش المان محدود سه بعدی و با در نظرگیری رفتارهای کششی و فشاری بتن و تأثیر آن بر عملکرد ترک بر اساس مفهوم آسیب ایزوتروپیک مدل سازی کردند. مدل مورد نظر را با گسسته سازی های متفاوت و بارهای وارده مختلف مورد تحلیل قرار گرفته و بیشترین تنش های حاصل و همچنین پیشروی ترک در بدنه مورد بررسی قرار گرفت. وپ و همکاران (۱۹۹۳) با در مدل سازی اندرکنش سد بتنی- مخزن پاسخ لرزه ای سد را با در نظرگیری ترک در بدنه سد ارزیابی کردند. در این مدل سازی از المان های ترک در مناطقی که ریزترک ها در آن موجود است استفاده شده است. همچنین محیط مخزن توسط روش المان مرزی گسسته شده است که در انتهای آن شرایط مرزی بی نهایت قابل تعریف است. نتایج تحقیق نشان داد مقادیر به دست آمده فشار هیدرو دینامیکی به خصوص در گام های اول اعمال بار لرزه ای با مقادیر به دست آمده از روش مرسوم جرم افزوده متفاوت است و روش جرم افزوده فقط تحت شرایط خاصی قابل اطمینان است. حسینی و مرادلو (۱۳۹۳)، بررسی آسیب در سدهای بتنی وزنی با استفاده از دو معیار رکورد زلزله های میدانی نزدیک و دور از گسل پرداخته شده و با مقایسه نتایج سد کوینا که مورد ارزیابی زلزله نزدیک و دور از گسل قرار گرفته، زلزله حوزه نزدیک گسل باعث خرابی و ترک خوردگی شده است. کلاته و قامتلو (۱۳۹۶)، تأثیر زلزله های حوزه دور و نزدیک بر سد بتنی وزنی با لحاظ اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون مورد مطالعه قرار دادند، با استفاده از نرم افزار آباکوس بر اساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که جابجایی و بیشترین تنش فشاری و کششی مربوط به مدل حوزه نزدیک گسل تأثیر زیادی بر رفتار دینامیکی سد دارد. ریسچر (۱۹۹۰)، نشان داد که بسیاری از سدهای بتنی وزنی ترک خوردگی را در شرایط بارگذاری عملیاتی و زلزله

برنامه ای اجزاء محدود آباکوس جهت مدل سازی گسترش ترک در سدهای بتنی وزنی تهیه شده استفاده کردند. سد بتنی وزنی تحت بارهای دینامیکی قرار داده و با تعریف رفتار غیرخطی بتن ((CDP مدل ترک بتن و آسیب دیدگی سد مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه نتایج حاکی از رشد و گسترش ترک در نقاط مورد تمرکز تنش های کششی است. موقعیت ترک ها و نحوه گسترش آن ها در بدنه سد به منظور درک صحیح تر از رفتار سد در زمین لرزه های بزرگ محتمل بدست آمده است. آقازادگان و مرادلو (۱۳۹۱)، به بررسی پارامترهای مدل شکست بتن به خصوص انرژی شکست بر رفتار لرزه ای غیرخطی سدهای بتنی قوسی پرداختند. در این تحقیق از یک مدل ترک پخشی سه بعدی برای بررسی رفتار غیرخطی توده بتن استفاده شده است. مدل پیشنهادی، توانایی مدل سازی ویژگی های اصلی بتن حجیم سدها تحت شرایط بارگذاری سه بعدی را داراست. در تحلیل، اندرکنش آب و سازه با احتساب تراکم پذیری سیال و شرایط مرزی جاذب مخزن در نظر گرفته شده است. از اندرکنش پی و سازه صرف نظر شده و پی سد در تحلیل ها صلب فرض شده است. معادلات اندرکنش آب و سازه با استفاده از مدل نوسانی حل شده است و نتایج به صورت الگوی ترک خوردگی بدنه سد و تاریخچه زمانی تغییر مکان ها در نقاط مختلف سد برای مقادیر مختلف انرژی شکست ارائه شده است. نتایج نشان می دهند که افزایش انرژی شکست سبب کاهش تعداد المان های ترک خورده در سد بتنی قوسی می شود ولی بر پارامترهای اوج جابجایی تأثیر چندانی ندارد و پاسخ سد در محدوده رفتار هندسی خطی قرار می گیرد. جیانگ و همکاران (۲۰۱۲)، پایداری لرزه ای سد بتنی وزنی کوینا را در حالت ترک خورده را بررسی کردند. در این تحقیق محل تشکیل ترک به وسیله مدل شکست بتن پلاستیک با روش المان محدود غیرخطی مشخص می شود. اندرکنش ترک در جهت نرمال با روش تماس سخت و در جهت مماس از روش اصطکاکی کولمب استفاده شده است. نتایج مدل سازی نشان داد که در زلزله های شدید گسترش ترک در زیر تاج سد کوینا به سرعت اتفاق می افتد و قبل از شکست کلی سد، قسمت تاج آن از بدنه جدا می گردد. شی و همکاران (۲۰۱۳)، گسترش ترک در بدنه سد بتنی را با روش ترک

^۱. Cohesive Crack

بررسی شاخص آسیب لرزه‌ای متأثر از تغییرات تراز آب در مخزن با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی.....۶۵

ارزیابی قرار گیرد. هدف اصلی از تحقیق حاضر مقایسه اثرات تراز مختلف ذخیره آب در مخزن سد، در فرایند تحلیل دینامیکی غیرخطی سدهای بتنی وزنی با فرض توزیع‌های محتمل برای این بارگذاری تحت زمین‌لرزه‌های حوزه دور و نزدیک گسل با لحاظ اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون و مقایسه رفتار سد بتنی وزنی تحت شرایط مختلف و برآورد میزان خرابی و آسیب بتن بدنه سد با محاسبه و تعیین شاخص خرابی لرزه‌ای است.

شتاب‌نگاشت‌های انتخابی حوزه نزدیک و دور در تحقیق حاضر

شتاب‌نگاشت‌های منتخب به‌منظور تحلیل دینامیکی غیرخطی سد بتنی وزنی به‌عنوان نماینده‌ای از شتاب

تجربه خواهد کرد، پس فرض رفتار خطی احتمال دارد در تحلیل لرزه‌ای سد بتنی وزنی مناسب نباشد، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل غیرخطی سدهای بتنی وابسته به روش مورد‌استفاده در مدل‌سازی اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون هستند. نائیم (۲۰۰۱)، در مطالعه‌ای نتیجه گرفت که در مقایسه زلزله‌های حوزه دور و نزدیک این دو زلزله از لحاظ شکل رکورد و محتوای فرکانس با یکدیگر متفاوت بوده و از این رو اثرات متفاوتی بر روی سازه می‌گذارد، رکورد شتابی ورود به سازه در زلزله‌های حوزه نزدیک با توجه به فاصله ساختگاه از مرکز زلزله و جهت‌گیری و گسترش گسل مولد زلزله نسبت به ساختگاه متغیر است لذا تنها فاصله از ساختگاه به‌تنهایی نمی‌تواند مبین طبقه‌بندی زلزله‌های حوزه نزدیک باشد لذا برای مشخص کردن نوع رکورد باید معیارهای دیگر هم مورد

جدول (۱): مشخصات زلزله‌های انتخابی

شماره	نام زلزله	سال وقوع	ایستگاه	R(km)	V_{30} (m/s)	PGA(g)	PGV(cm/s)	PGD(cm)
۱	Cape Mendocino (Near-Fault)	۱۹۹۲	Cape Mendocino	۶/۹۶	۵۶۸	۱/۴۹	۶۱/۱۷	۸/۱۶
۲	Cape Mendocino (Far-Fault)	۱۹۹۲	Fortuna Fire station	۲۰/۴۱	۳۵۵/۲	۰/۳۳	۶۷/۸۲	۸۳/۴۶
۳	Tabas (Near-Fault)	۱۹۷۸	Tabas	۲/۵	۷۶۷	۰/۸۶	۶۱/۷۰	۲۳/۴۱
۴	Tabas (Far-Fault)	۱۹۷۸	Boshrooyeh	۲۸/۷۹	۳۲۴/۵۷	۰/۱۱	۶/۶۵	۱/۹۱
۵	Morgan Hill (Near-Fault)	۱۹۸۴	GilroyArray#6	۹/۸۷	۶۶۳/۳۱	۰/۲۹	۷۲/۹۹	۲۳/۷۸
۶	Morgan Hill (Far-Fault)	۱۹۸۴	UCSC Lick observatory	۴۵/۴۷	۷۱۳/۶	۰/۰۷۶	۷/۸۶	۳/۱۱

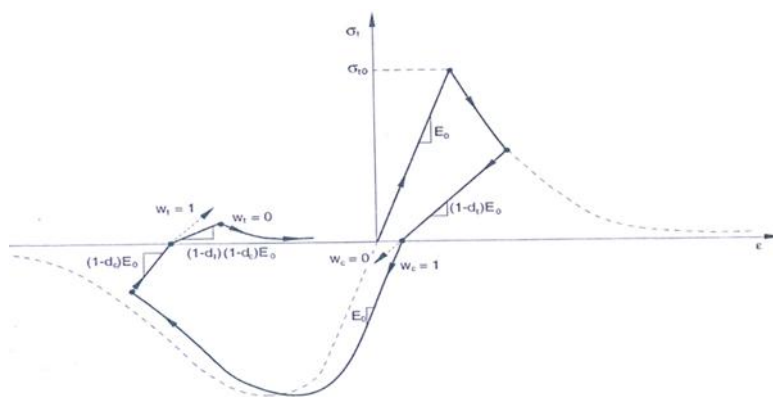
زمین‌لرزه Tabas، Cape Mendocino و Morgan Hill به‌عنوان زمین‌لرزه‌هایی با محتوای فرکانسی ضعیف، متوسط

نگاشت‌های ثبت‌شده در حوضه‌های دور و نزدیک طی زمین‌لرزه‌های مختلف در جدول (۱) ارائه شده است. سه

رفتار غیرخطی مصالح و حل آن

مسئله سازه‌های غیرخطی، مسئله‌ای است که در آن سختی سازه با تغییر شکل آن تغییر می‌کند. در تحلیل غیرخطی ضمنی، ماتریس سختی سازه در طول تحلیل باید دفعات زیادی تشکیل شده و معکوس شود که سبب می‌شود هزینه تحلیل غیرخطی نسبت به تحلیل خطی بسیار بالاتر باشد. در یک تحلیل غیرخطی صریح، این افزایش هزینه به علت کاهش بازه زمانی پایدار می‌باشد.

و قوی و همچنین دامنه و شدت متفاوت، به‌منظور بررسی اثرات زمین‌لرزه‌ای با ویژگی‌های مختلف انتخاب گردید. لازم به ذکر است که اطلاعات این رکوردها از سایت (PEER) اخذ گردیده‌اند در تحقیق حاضر زمین‌لرزه‌های حوضه نزدیک محدود به زمین‌لرزه‌هایی شده است که ایستگاه ثبت در محدوده شعاعی کمتر از ۱۰ کیلومتر با گسل فاصله داشته باشد. در مطالعه حاضر از مطالعه اثرات جهت‌پذیری که جزو ویژگی زمین‌لرزه‌های حوضه نزدیک است صرف‌نظر شده است.



شکل (۱) پاسخ بتن به بارگذاری تک‌محوره در (الف) کشش و (ب) فشار

اسکالر برای توصیف خرابی برگشت‌ناپذیر که در طی پروسه‌های شکست رخ می‌دهد، است.

رفتار مکانیکی

مدل استفاده شده برای رفتار بدنه بتنی سد وزنی تحت بارگذاری لرزه‌ای، یک مدل آسیب پیوسته بر اساس پلاستیسیته برای بتن است. این مدل فرض می‌کند که دو مکانیسم اصلی شکست، ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری مصالح بتنی است.

رفتار فشاری و کششی تک‌محوره

این مدل فرض می‌کند که پاسخ کششی و فشاری تک‌محوره بتن همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است با پلاستیسیته خرابی مشخص می‌شود. تحت شرایط بارگذاری دوره‌ای تک‌محوره، مکانیسم بازیافت

که بتوان رفتار بازآفرینی سختی الاستیک با تغییرات بارگذاری به وجود آمده در طول بارگذاری سیکلی تک‌محوره را مورد بررسی قرار داد. اثر بازیابی سختی، مشابه اثر

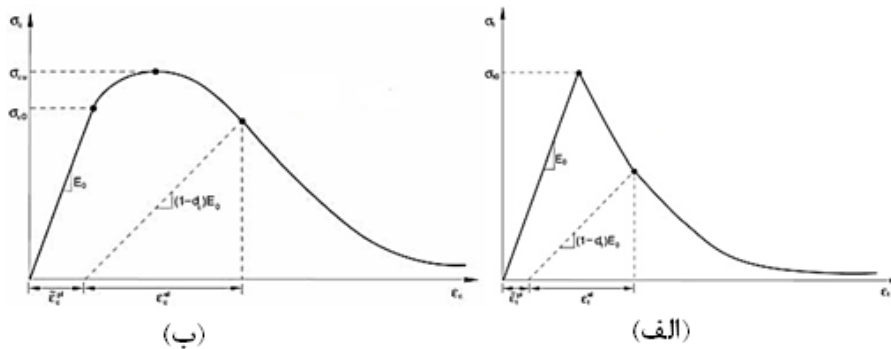
مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن در آباکوس

سه مدل ساختاری مختلف برای تحلیل رفتار غیرخطی مصالح بتن و ترک‌خوردگی آن، تحت فشار محصورکنندگی کم، در نرم‌افزار آباکوس وجود دارد. این مدل‌ها وابسته به محصول انتخابی برای تحلیل می‌باشند. مدل ترک‌خوردگی آغشته‌ای بتن در آباکوس - استاندارد و مدل ترک‌خوردگی شکننده بتن در آباکوس - صریح موجود است. مدل پلاستیسیته خرابی (آسیب) بتن در هر دو مورد قابل استفاده است. مدل انتخابی جهت بررسی رفتار غیرخطی بتن در پژوهش حاضر مدل آسیب بتن است (CDP). مدل پلاستیسیته آسیب بتن در آباکوس توانایی مدل‌سازی بتن و سایر مصالح شبه ترد در همه انواع سازه‌ها اعم از تیرها، پوسته‌ها و اجسام جامد را دارد. این مدل متشکل از ترکیب پلاستیسیته چند سختی غیرهمبسته و الاستیسیته خرابی

مقاومت کاملاً پیچیده می‌باشد، که شامل بازشدگی و بسته‌شدگی ریزترک‌های توزیع‌شده در جسم است، که باید به‌خوبی اثرات متقابل آن لحاظ شود. آزمایش تنها راهی است

بازیابی سختی فشاری می‌شود. شکل (۲) چرخه بارگذاری تک‌محوره را نشان می‌دهد.

تک‌سویه، یک جنبه مهمی از رفتار بتن تحت بارگذاری دوره-ای است. اثر تغییر بارگذاری از کشش به فشار، معمولاً موجب بسته شدن ترک‌های کششی گردیده و منجر به

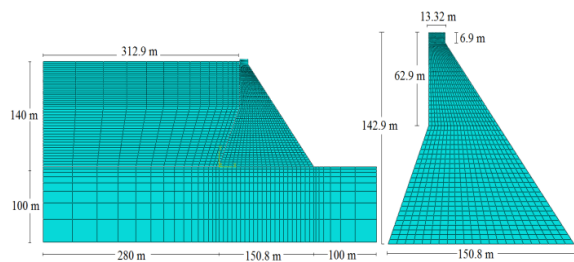


شکل (۲) چرخه بارگذاری تک‌محوره (کشش- فشار- کشش) برای فاکتورهای بازیابی سختی

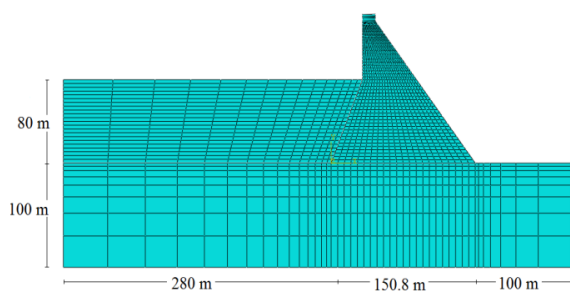
با فرض ضریب میرایی بحرانی برابر ۵ درصد لحاظ شده است.

مدل المان محدود سد وزنی شفارود

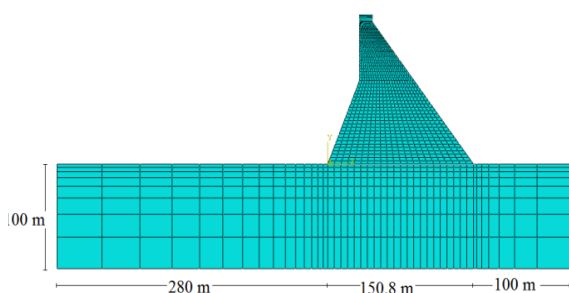
نرم‌افزار المان محدود آباکوس جهت مدل‌سازی و تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است. المان‌های هشت‌گره‌ای دوبعدی کرنش مسطح جهت مدل‌سازی بدنه سد و فونداسیون مورد استفاده قرار گرفته است و از المان چهارگره‌ای برای مدل‌سازی مخزن استفاده شده است. تعداد المان مورد استفاده در بدنه سد ۱۲۰۰ و در مخزن در حالت پر ۶۷۵ و در فونداسیون ۲۶۴ المان است. لازم به ذکر است تعداد المان‌های مناسب برای مدل بدنه سد از طریق تحلیل حساسیت و استقلال نتایج از مش انتخابی بدست آمده است. مصالح مورد استفاده در مخزن سد به صورت آکوستیک و مصالح فونداسیون به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است به صورتی که ضریب پواسون ۰/۳۳۳ و ضریب یانگ ۳۰ گیگاپاسکال است. همان‌طور که در اشکال (۳)، (۴) و (۵) مشخص است، تحلیل‌ها در سه سناریو مختلف صورت گرفته است، به طوری که در حالت اول سیستم سد و فونداسیون با مخزن پر و در حالت دوم سیستم سد و فونداسیون با مخزن نیمه‌پر و در حالت آخر سیستم سد و فونداسیون با مخزن خالی تحلیل شده است. لازم به ذکر است در تحلیل‌ها، (۱) نیروی وزن، (۲) فشار هیدرواستاتیک، (۳) فشار هیدرودینامیکی، به مدل‌ها اعمال شده است، میرایی بر اساس ضرایب میرایی تناسبی رایلی برای جرم و سختی

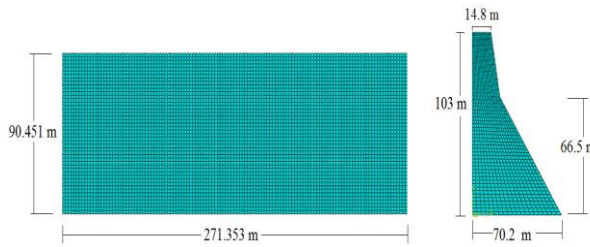


شکل (۳) مدل المان محدود، سد- مخزن- فونداسیون (مدل تحلیل شفارود)، در حالت مخزن پر



شکل (۴) مدل المان محدود، سد- مخزن- فونداسیون (مدل تحلیل شفارود)، در حالت مخزن نیمه‌پر

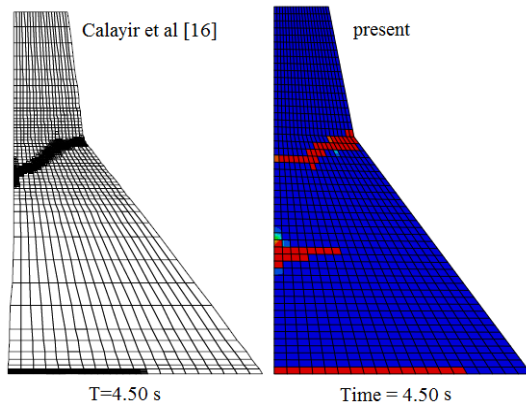




شکل (۶) مدل المان محدود سد - مخزن، سد بتنی وزنی کوبنا مورد استفاده در صحت‌سنجی



شکل (۷) مؤلفه‌های شتاب‌نگاشت، (A) شتاب‌نگاشت قائم، (B) شتاب‌نگاشت افقی



شکل (۸) مقایسه شکل پروفیل ترک در دو حالت

پاسخ سد بتنی وزنی تحت تأثیر زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک و دور از گسل

با توجه به نمودارهای ترسیم‌شده در شکل (۹) مشاهده می‌شود، تراز آب در مخزن تأثیر فراوانی بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی مورد مطالعه دارد. به طوری که با کاهش تراز آب در مخزن از حالت پر به خالی، تغییر مکان ماکزیمم تاج

شکل (۵) مدل المان محدود، سد - فونداسیون در حالت مخزن خالی

پاسخ دینامیکی غیرخطی

سه مجموعه تحلیل به صورت تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک و دور از گسل جهت مطالعه تأثیر جنبش زمین نزدیک گسل و دور از آن و مطالعه اثر ارتفاع مختلف آب ذخیره‌شده در مخزن بر پاسخ لرزه‌ای سیستم سد - مخزن - فونداسیون انجام شده است. هر مجموعه شامل ۳ رکورد مختلف جنبش زمین است، اساساً با تاریخچه تغییر مکان تحلیلی که از جنبش زمین دور از گسل به دست آمده است با پاسخ حاصل طی زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک متفاوت است. مقادیر تغییر مکان افقی تاج در جنبش زمین نزدیک گسل بزرگ‌تر از مقادیر مورد نظر برای جنبش زمین دور از گسل هست مقایسه تاریخچه تغییر مکان افقی تاج سد با استفاده از تحلیل غیرخطی سیستم سد - منبع ذخیره - فونداسیون که در معرض جنبش زمین نزدیک گسل و دور از آن واقع شده را نشان می‌دهد که انحراف بالادست قابل توجهی در پاسخ سد تحت اگر موارد جنبش زمین نزدیک گسل آشکار می‌شود. (مقادیر بیشینه تغییر مکان‌های افقی برای سد تحت اثر حرکات زمین نزدیک گسل عموماً بزرگ‌تر از مقادیر مورد نظر برای جنبش زمین دور از گسل هست.)

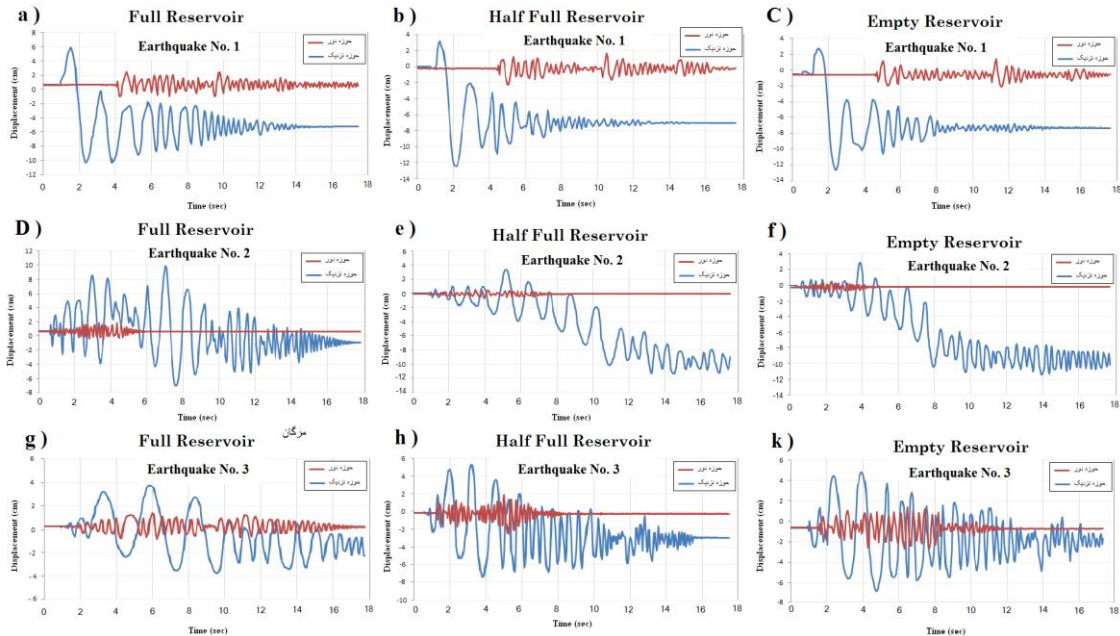
صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی تحلیل دینامیکی غیرخطی از نتایج کالایر و همکار (۲۰۰۵) که به تحلیل سد کوبنا (شکل (۶)) تحت شتاب‌نگاشت مؤلفه افقی و قائم زلزله کوبنا پرداخته، (شکل (۷))، استفاده شده است. در این مدل که ارتفاع سد ۱۳۰ متر عرض آن ۱۴/۸ متر است، مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج بدست آمده و الگوی خرابی حاصل از تحقیق حاضر با الگوی خرابی ارائه شده توسط کالایر و همکار (۲۰۰۵)، مورد مقایسه قرار گرفته است. به طوری که نتایج این مقایسه در شکل (۸) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابقت مناسبی مابین نتایج هر دو تحقیق وجود دارد.

۶۹.....بررسی شاخص آسیب لرزه‌ای متأثر از تغییرات تراز آب در مخزن با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی

تلقی گردد. در جدول (۲) ماکزیمم تغییرمکان تاج سد به تفکیک، به سمت بالادست و پایین‌دست ارائه شده است.

سد به سمت پایین در زمین‌لرزه‌های مختلف کاهش ولی ماکزیمم تغییرمکان تاج سد در امتداد بالادست (مخزن) افزایش یافته است. لذا می‌توان گفت آب داخل مخزن خود مانعی جهت تغییرمکان تاج سد به سمت مخزن می‌تواند

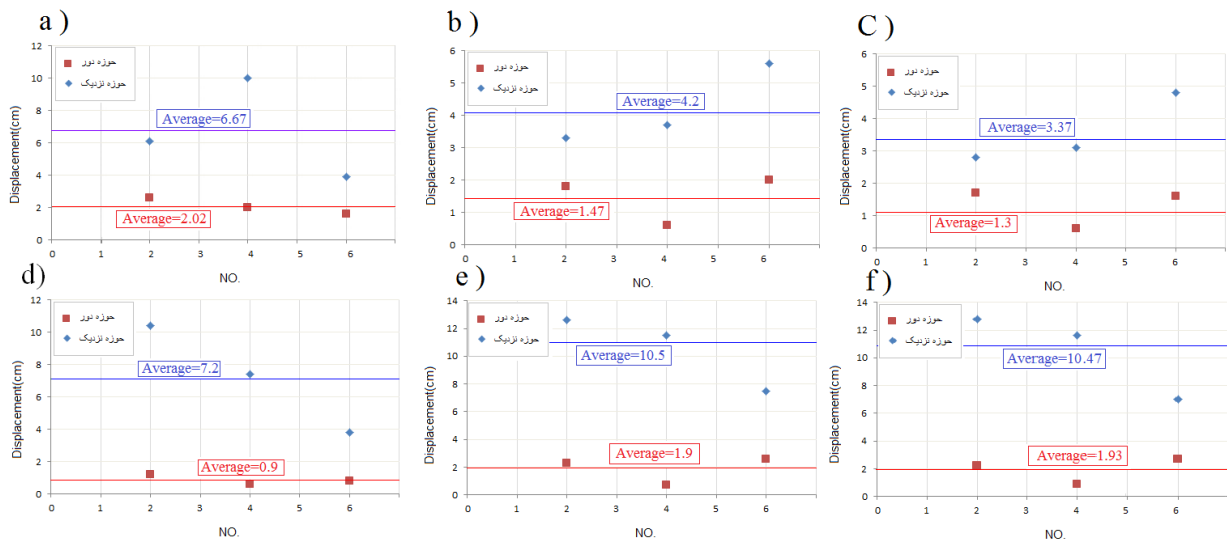


شکل (۹) (a) زلزله Cape Mendocino برای حالت مخزن پر، با احتساب زلزله حوزه نزدیک و دور، (b) زلزله Cape Mendocino برای حالت مخزن نیمه پر، با احتساب زلزله حوزه نزدیک و دور، (c) زلزله Cape Mendocino برای حالت بدون مخزن با احتساب زلزله حوزه نزدیک و دور، (d) زلزله Tabas برای حالت مخزن پر، با احتساب زلزله حوزه نزدیک و دور، (e) زلزله Tabas برای حالت مخزن نیمه پر، با احتساب زلزله حوزه نزدیک و دور، (f) زلزله Tabas برای حالت بدون مخزن با احتساب زلزله حوزه نزدیک و دور، (g) زلزله Morgan Hill برای حالت مخزن پر، با احتساب زلزله حوزه نزدیک و دور، (h) زلزله Morgan Hill برای حالت مخزن نیمه پر، با احتساب زلزله حوزه نزدیک و دور، (k) زلزله Morgan Hill برای حالت بدون مخزن با احتساب زلزله حوزه نزدیک و دور

(۱۱) الی (۱۲) همچنین ملاحظه می‌شود که تغییر شکل‌های پلاستیک در بدنه سد در معرض زلزله‌های نزدیک گسل بزرگ‌تر از تغییر شکل‌های پلاستیک در اثر زمین‌لرزه‌های دور از گسل است. در جدول (۲) ماکزیمم تغییر مکان‌های افقی حاصل از آنالیز غیرخطی در اثر اعمال زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل و دور از گسل ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است حجم آب موجود در مخزن در حالت پر، در زلزله‌های حوزه نزدیک و دور، باعث افزایش خرابی و تنش در بدنه سد می‌شود.

تغییرمکان افقی تاج سد در زلزله‌های حوزه نزدیک و دور

در شکل (۱۰) مقایسه‌ای مابین ماکزیمم تغییرمکان افقی تاج سد حاصل از تحلیل غیرخطی سیستم سد-مخزن-فونداسیون که در معرض زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل و دور از آن قرار گرفته است با لحاظ ارتفاع مختلف آب در مخزن ارائه شده است، با توجه به نتایج بدست آمده مشخص می‌گردد که جابه‌جایی قابل توجهی در بدنه سد تحت اثر زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل حاصل می‌گردد. در اشکال



شکل (۱۰) (a) ماکزیمم تغییر مکان تاج سد در جهت پایین دست سد برای حالت مخزن پر، با احتساب زلزله حوزة نزدیک و دور، (b) ماکزیمم تغییر مکان تاج سد در جهت پایین دست سد برای حالت مخزن نیمه پر، با احتساب زلزله حوزة نزدیک و دور برای حالت، (c) ماکزیمم تغییر مکان تاج سد در جهت پایین دست سد برای حالت مخزن خالی، با احتساب زلزله حوزة نزدیک و دور، (d) ماکزیمم تغییر مکان تاج سد در جهت بالادست سد برای حالت مخزن پر، با احتساب زلزله حوزة نزدیک و دور، (e) ماکزیمم تغییر مکان تاج سد در جهت بالادست سد برای حالت مخزن نیمه پر، با احتساب زلزله حوزة نزدیک و دور، (f) ماکزیمم تغییر مکان تاج سد در جهت بالادست سد برای حالت مخزن خالی، با احتساب زلزله حوزة نزدیک و دور

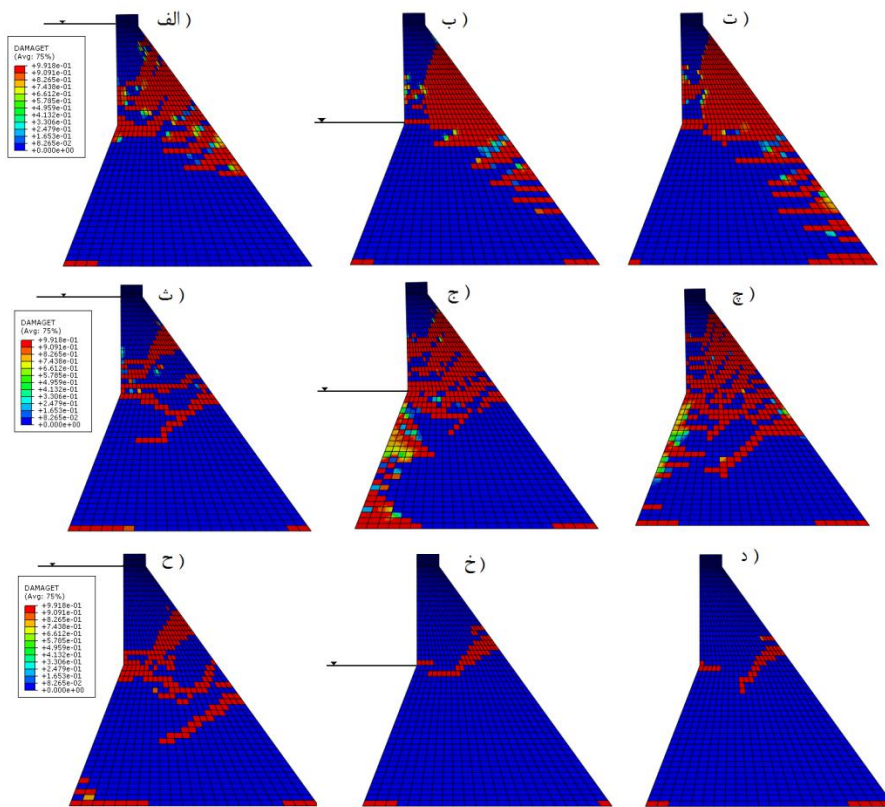
جدول (۲) ماکزیمم تغییر مکان افقی تاج سد در زلزله های مختلف

ماکزیمم تغییر مکان تاج سد (Cm)						حوزه	نوع زلزله	NO
مخزن خالی		مخزن نیمه پر		مخزن پر				
بالادست	پایین دست	بالادست	پایین دست	بالادست	پایین دست			
۲/۲	۱/۷	۲/۳	۱/۸	۱/۲	۲/۶	دور	زلزله Cape	۱
۱۲/۸	۲/۸	۱۲/۶	۳/۳	۱۰/۴	۶/۱	نزدیک	زلزله Cape	۲
۰/۹	۰/۶	۰/۷	۰/۶	۰/۶	۲	دور	زلزله Tabas	۳
۱۱/۶	۳/۱	۱۱/۵	۳/۷	۷/۴	۱۰	نزدیک	زلزله Tabas	۴
۲/۷	۱/۶	۲/۶	۲	۰/۸	۱/۶	دور	زلزله Morgan	۵
۷	۴/۸	۷/۵	۵/۶	۳/۸	۳/۹	نزدیک	زلزله Morgan	۶

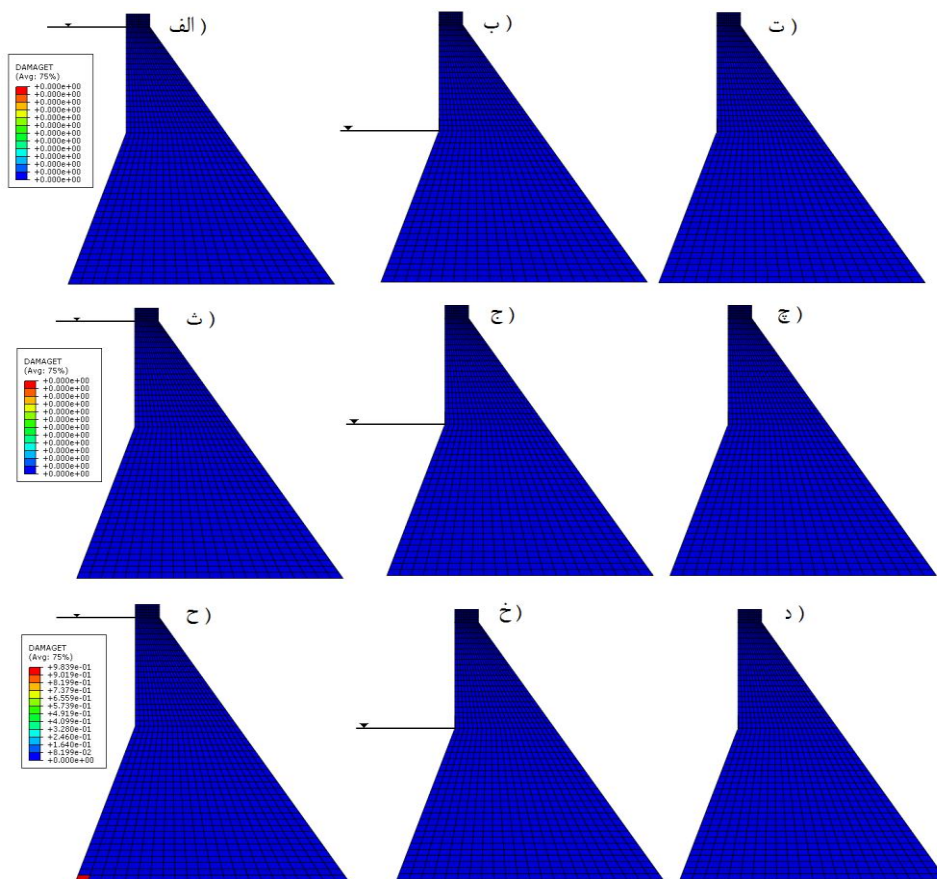
چگونگی توزیع المان های گسیخته شده در بدنه سد در حالت های مختلف تحت اثر زلزله های حوزة نزدیک و دور در اشکال (۱۱) و (۱۲) به ترتیب نشان داده شده است. مناطق سایه زده شده بارنگ قرمز المان هایی را مشخص می کند که مقداری از تراز آسیب کششی را در طول تحلیل تجربه کرده اند. این اشکال آسیب هایی را نمایش

ترک برداری همیشه از پاشنه سد آغاز شده و سپس مسیر طولانی را از وجه بالادست به وجه پایین دست پیشرفت کرده است. پروفایل‌های ترک برداری در قسمت بالایی سد همیشه در نقطه گسستگی شیب در وجه پایین دست آغاز شده است. پروفایل‌های ترک برداری بالا تقریباً هم به صورت افقی و هم رو به پایین و شیب دار از وجه‌های پایین دست به سمت وجه‌های بالادست امتداد می‌یابند؛ اما در بعضی تحلیل‌ها، پیش‌بینی می‌شود که ترک‌ها تقریباً از وسط وجه بالادست یا پایین دست آغاز شده و به داخل سد امتداد می‌یابند.

می‌دهد که برای جنبش‌های واقعی زمین در این مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. از پروفایل‌های ترک نشان داده شده در شکل (۱۱) و (۱۲) می‌توان مشاهده کرد که رکورد‌های جنبش زمین ثبت شده نزدیک گسل تأثیر قابل توجهی بر آسیب لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی دارند، در بعضی موارد نتایج منطبق بر حرکت‌های ورودی با جنبش‌های زمین نزدیک گسل به وضوح نشان‌دهنده کاهش قابل توجه مقاومت سد با یک الگوی ترک برداری است که کاملاً در عرض مقطع بالایی گسترش یافته است. همچنین از شکل (۱۱) و (۱۲) دیده می‌شود که مکانیسم گسیختگی از دو ناحیه آسیب اصلی تشکیل شده است. یکی در مبنا و دیگری در بخش‌های بالاتر سد. تقریباً در تمامی تحلیل



شکل (۱۱): نحوه گسترش ترک در بدنه سد شفارود تحت زلزله حوزه نزدیک گسل با لحاظ اثرات مختلف ارتفاع سد، الف) زلزله Cape Mendocino برای حالت مخزن پر، برای زلزله حوزه نزدیک، ب) زلزله Cape Mendocino برای حالت مخزن نیمه پر، برای زلزله حوزه نزدیک، پ) زلزله Cape Mendocino برای حالت مخزن خالی برای زلزله حوزه نزدیک ت) زلزله Tabas برای حالت مخزن پر، برای زلزله حوزه نزدیک، ج) زلزله Tabas برای حالت مخزن نیمه پر، برای زلزله حوزه نزدیک، چ) زلزله Tabas برای حالت بدون مخزن برای زلزله حوزه نزدیک، ح) زلزله Morgan Hill برای حالت مخزن پر، برای زلزله حوزه نزدیک، خ) زلزله Morgan Hill برای حالت مخزن نیمه پر، برای زلزله حوزه نزدیک، د) زلزله Morgan Hill برای حالت مخزن خالی برای زلزله حوزه نزدیک



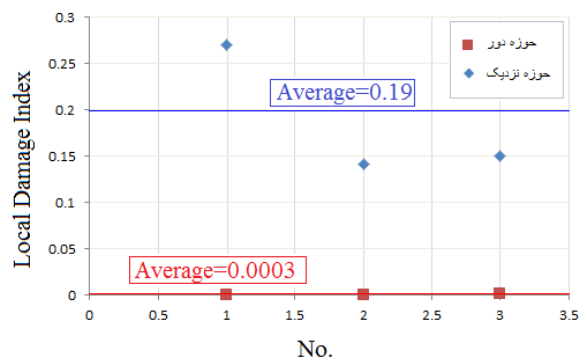
شکل (۱۲): نحوه گسترش ترک در بدنه سد سفارود تحت زلزله دور از گسل با لحاظ اثرات مختلف ارتفاع سد، زلزله Cape Mendocino برای حالت مخزن پر، برای زلزله Cape Mendocino حوضه دور، (ب) زلزله Cape Mendocino برای حالت مخزن نیمه پر، برای زلزله حوضه دور، (پ) زلزله Cape Mendocino برای حالت بدون مخزن برای زلزله حوضه دور، (ث) زلزله Tabas برای حالت مخزن پر، برای زلزله حوضه دور، (ج) زلزله Tabas برای حالت مخزن نیمه پر، برای زلزله حوضه دور، (چ) زلزله Tabas برای حالت بدون مخزن برای زلزله حوضه دور، (ح) زلزله Morgan Hill برای حالت مخزن پر، برای زلزله حوضه دور، (خ) زلزله Morgan Hill برای حالت مخزن نیمه پر، برای زلزله حوضه دور، (د) زلزله Morgan Hill برای حالت مخزن خالی و زلزله حوضه دور

یا بخش زیادی از آن را بیان می کنند. در مطالعه حاضر شاخص خرابی کلی به صورت نسبت تعداد المان های گسیخته شده در بدنه سد بتنی وزنی به کل المان های بدنه تعریف و جهت بررسی اثرات ارتفاع آب در مخزن بر میزان شدت خرابی بدنه سد مورداستفاده گرفته است، نتایج حاصل در شکل ۱۳ الی ۱۵ ارائه شده است. با توجه به اشکال ۱۳ الی ۱۵ مشاهده می شود در جنبش های حوضه نزدیک با کاهش سطح آب میزان شاخص خرابی به مقدار اندکی افزایش می یابد و می توان نتیجه گرفت که در تحریک های حوضه نزدیک آب موجود در مخزن به صورت

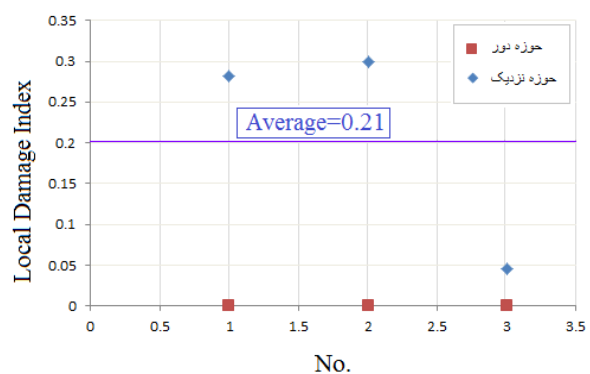
اندیس خرابی سد، در زمین لرزه های حوضه نزدیک و دور از گسل در ترازهای مختلف آب مخزن به منظور بررسی میزان خسارت وارده به سازه ابتدا بایستی شاخص هایی تعریف و با استفاده از این شاخص ها، خرابی ها را به مقادیر کمی تبدیل نمود. بدین منظور یکسری شاخص های خرابی تعریف شده است. اغلب شاخص های خرابی بر اساس تغییر شکل های ایجاد شده در سازه و یا انرژی چرخه ای جذب شده در آن تعریف می شوند. خرابی سازه ای به دو صورت محلی و کلی قابل بررسی است به طوری که شاخص های محلی مبین میزان خرابی در اعضای گوناگون بوده و شاخص های کلی، حالت کل سازه

تحلیل، شش رکورد جنبش زمین نزدیک و دور از گسل برای تحریک‌های لرزه‌ای استفاده شده است. تحلیل لرزه‌ای غیرخطی سدهای بتنی وزنی تحت اثر شرایط زلزله مطابق با مدل وزنی سفارود، برای تحلیل و مطالعه موردی انتخاب شده است. تحلیل لرزه‌ای غیرخطی سدهای بتنی وزنی تحت اثر شرایط زلزله مطابق با مدل است. تحلیل لرزه‌ای غیرخطی سدهای بتنی وزنی تحت اثر شرایط زلزله مطابق با مدل رفتاری خرابی پلاستیک بتن انجام شده که شامل کرنش سخت شدگی یا رفتار نرم‌شونده است. بر اساس نتایج بدست آمده از تحقیق مشخص می‌شود که پاسخ غیرخطی سد بتنی وزنی نسبت به حرکات زمین نزدیک گسل اساساً تاریخچه تغییر مکان متفاوتی نسبت به حرکت زمین دور از گسل دارد. مقادیر تغییر مکان افقی تاج برای جنبش‌های نزدیک گسل بزرگ‌تر از مقادیر موردنظر برای جنبش‌های دور از گسل است. مقایسه تاریخچه تغییر مکان افقی تاج سد با استفاده از تحلیل غیرخطی سیستم سد- مخزن- فونداسیون که در معرض جنبش زمین نزدیک گسل و دور از آن واقع شده است، نشان می‌دهد که انحراف بالادست قابل توجهی در رفتار سد تحت اثر موارد جنبش نزدیک گسل اتفاق می‌افتد. تحلیل آسیب لرزه‌ای انجام شده نشان می‌دهد که آسیب تجمعی سدها تحت شرایط در نظر گرفته متأثر از حرکات زمین نزدیک گسل است. ناحیه بالایی سدهای بتنی وزنی برای زلزله‌های نزدیک گسل در مقایسه با جنبش‌های زمین دور از گسل بیشتر آسیب‌پذیر است. در بعضی موارد نتایج منطبق بر جنبش‌های ورودی با جنبش‌های زمین نزدیک گسل به‌وضوح نشان‌دهنده کاهش مقاومت قابل توجه در سد با الگوی ترک‌برداری که کاملاً در عرض مقطع بالایی امتداد یافته، است. مطابق این مطالعه، جنبش‌های زمین نزدیک گسل تأثیرات قابل توجهی بر پاسخ دینامیکی غیرخطی و آسیب تجمعی سدهای بتنی وزنی دارد که مربوط به اثرات ضربه بر روی سازه است. جنبش‌های نزدیک گسل پتانسیل آسیب‌رسانی شدیدی به بدنه سدها را در مقایسه با جنبش‌های دور از گسل دارند. نتایج تحلیل برای سه تراز مختلف آب در مخزن سد حاکی از اثر بالای آب مخزن بر رفتار دینامیکی سد بتنی است و

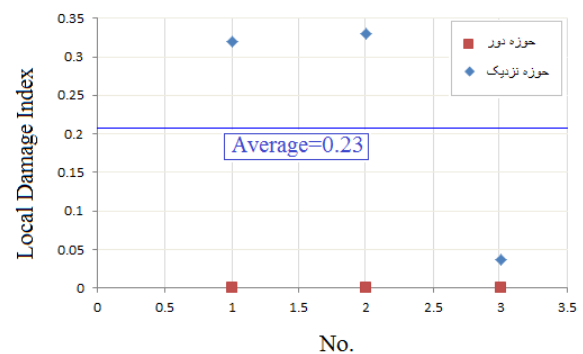
یک میراگر عمل نموده و با جذب بخشی از انرژی زلزله موجب کاهش میزان خسارت وارده بر بدنه سد می‌گردد.



شکل (۱۳) شاخص آسیب برای حالت مخزن پر از آب



شکل (۱۴) شاخص آسیب برای حالت مخزن نیمه پر



شکل (۱۵) شاخص آسیب برای حالت مخزن خالی

نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق حاضر برآورد عددی اثرات جنبش‌های نزدیک و دور از گسل به همراه بررسی اثرات تراز مختلف آب در مخزن، بر پاسخ دینامیکی غیرخطی و سطح آسیب لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی با لحاظ اثرات سد- مخزن- فونداسیون است. مدل سد - مخزن - فونداسیون با استفاده از اجزاء محدود به صورت دوبعدی و به وسیله رویکرد لاگرانژی مدل‌سازی شده، سد بتنی وزنی سفارود، برای تحلیل و مطالعه موردی انتخاب گردید، در این

نموده و موجب کاهش نسبی سطح آسیب در بدنه سد می‌گردد.

9. Calayir, Y. Karaton, M. (2005). A continuum damage concrete model for earthquake analysis of concrete gravity dam-reservoir systems. *Journal Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25:857-869.
10. Jiang, S. Y. & Du, C. B. (2012). Seismic stability analysis of concrete gravity dams with penetrated cracks. *Water Science and Engineering*, 5(1), 105-119.
11. Naeim, F. *The Seismic Design Handbook*, 2nd edition, Kluwer Academic Publishers, 2001.
12. Oliveira, S. Gaspar, N. & Dinis, P. (2006). Cracking Analysis in Concrete Dams using Isotropic Damage Models. Objectivity of Numerical Solutions. In III European Conference on Computational Mechanics (pp. 369-369). Springer Netherlands.
13. Proulx J. Paultre P. Rheault J. Robert Y. (2001). An experimental investigation of water level effects on the dynamic behavior of a large arch dam. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30:1147-1166
14. Rescher, O. Importance of cracking in concrete dams. *Engng. Frac. Mech.* 1990, 35(3):503-2
15. 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.
16. Wepf, D. H. Feltrin, G. & Bachmann, H. (1993). Influence of time-domain dam-reservoir interaction on cracking of concrete gravity DAMS. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 22(7), 573-582.

با مقایسه نتایج مشخص می‌شود که در زمین لرزه‌های حوزه نزدیک آب داخل مخزن به صورت یک میراگر عمل

مراجع

۱. آقازادگان، ا. مرادلو، ج. بررسی پارامترهای مدل شکست بتن بر پاسخ لرزه‌های غیرخطی سدهای بتنی قوسی، دومین کنفرانس ملی یافته‌های نوین در مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، ۱۳۹۱.
۲. حسینی، مرادلو، مقایسه اثرات زلزله‌های میدانی دور و نزدیک بر پاسخ غیرخطی سدهای بتنی وزنی، نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، زمستان ۱۳۹۳
۳. رحیم زاده رفویی، ف. امید، ا. بررسی اثرات رفتار غیرخطی بتن بر پاسخ لرزه‌های سدهای بتنی قوسی، اولین کنفرانس ایمن سازی و بهسازی سازه‌ها، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۱.
۴. کلاته، قاملو، مقایسه فونداسیون جرم‌دار و بدون جرم بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سد بتنی وزنی با لحاظ اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، دانشگاه شهید بهشتی ۱۳۹۶
۵. محمودیان شوشتری، م. صادقی چیکانی، پ. تحلیل دینامیکی سدهای وزنی با در نظر گرفتن ترک‌خوردگی بتن به روش اجزاء محدود، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان، ۱۳۹۲.
۶. نژاد فرد، ح. اثر ترک‌خوردگی بر طیف پاسخ سدهای بتنی قوسی به روش اجزاء محدود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد، ۱۳۹۱.
۷. نوایی نیا، ب. ناصری، ن. کلانی، ل. واثقی امیری، ج. ارزیابی پاسخ غیرخطی سدهای بتنی وزنی با مدل‌سازی ترک به روش چرخشی و ثابت. اولین همایش ملی مهندسی سازه ایران، مرکز همایش‌های هتل المپیک، تهران، ایران، ۱۳۹۳.
8. Akkos, M. Bayraktar, A. Dumanoglu, A. A. Reservoir water level effects on nonlinear dynamic response of arch dams. (2008). *Journal of fluids and structures*. 24:418-435

Investigation of seismic damage index due to water level changes in reservoir through nonlinear dynamic analysis under Far-Fault and Near-Fault ground motions

F. Kalateh¹

A. Ghamatloo²

Abstract:

In this study, reservoir water level effects on nonlinear dynamic response of concrete gravity dams are investigated. For this purpose, the nonlinear behavior of the dam concrete is captured using the concrete damage plasticity (CDP) on the non associated flow rule assumption. Water in the reservoir is represented by the Lagrangian (displacement-based) fluid finite elements. The program ABAQUS is applied for nonlinear dynamic analysis of dam-foundation-reservoir systems and employed in the response calculations. Nonlinear dynamic analysis of Shafarood concrete gravity dam subjected to three far-fault and three near-fault earthquake ground motions are performed for three different water levels. The crest displacements, the failure element distribution in dam body and damaged Index in different conditions are presented. The results obtained from nonlinear analyses for different water levels are compared with each other. It is apparent that the reservoir water level significantly affected the dynamic response of gravity dam but under near-fault ground motions reservoir has a mitigation effect on nonlinear dynamic response of dam.

Keywords:

Concrete gravity Dam, Nonlinear Dynamic Analysis, water reservoir level, Damage index, Near-fault & Far-fault ground motions.

¹.Assistant Prof. Hydraulic Structure Eng. Dept. Faculty of Civil Eng. University of Tabriz.
Email: fkalateh@tabrizu.ac.ir

².MSc. of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil Eng. University of Tabriz