

بررسی اثر افزایش ضخامت و ارتفاع هسته رسی سد خاکی بر رفتار دینامیک سد (مطالعه موردی: سد مروک)

مقاله علمی - پژوهشی

فاطمه ساکی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران
احمدرضا مظاهری*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران
مسعود احمدی، استادیار، گروه مهندسی ژئومکانیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: A.Mazaheri@Abru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۴۶۸-۴۵۳

چکیده

صنعت سدسازی به عنوان یکی از نخستین و پیچیده‌ترین قسمت‌ها از امور عمرانی به شمار می‌رود و از این رو همواره یکی از مباحث تحت نظر جوامع مختلف بوده است. سدهای مرتفع در مقابل تنش‌های برشی دارای ضعف‌هایی هستند. طبق نتایج آنالیز دینامیکی این نتیجه حاصل می‌شود که شوک‌های لرزه‌ای ناشی از زلزله سبب گسترش بسیاری از ترک‌های بزرگ و کوچک در مناطق بالایی هسته می‌شود. با توجه به این که سدها معمولاً در مناطق کوهستانی احداث می‌شوند، از این رو وجود گسل در فواصل دور و نزدیک محور سد اجتناب‌ناپذیر است. بررسی پتانسیل لرزه‌خیزی هر گسل در فاصله دور و یا نزدیک و تاثیر زمین‌لرزه ناشی از آن بر پایداری سد، یکی از معیارهای اصلی مکان‌یابی محور سد می‌باشد. بنابراین بررسی دقیق تاثیر زمین‌لرزه‌های میدان‌های دور و نزدیک بر پایداری سدها از اهمیت ویژه‌ای در طراحی سد و ارزیابی پایداری سدهای موجود، برخوردار می‌باشد. مدل‌سازی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ژئواستودیو (۲۰۱۸) انجام شده است. جهت انجام تحلیل دینامیکی از رکورد زلزله‌های بروجرد، خرم‌آباد و سرپل‌ذهاب کرمانشاه استفاده شده است. مطابق نتایج حاصل از تحلیل شبه‌استاتیکی سد مروک این نتیجه حاصل شد که، افزایش ضخامت هسته سبب کاهش ضریب‌اطمینان پایداری سد شده است؛ همچنین نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی سد مورد مطالعه نشان داد که، ماکزیمم نشست رخ داده در سد در حالت بدون افزایش عرض هسته تحت اثر زلزله‌های بروجرد، خرم‌آباد و سرپل‌ذهاب به ترتیب ۰/۱۸ متر، ۲/۳۵ متر، ۰/۰۴ متر نتیجه شده است؛ این در حالی است که تحت اثر زلزله‌های مذکور با افزایش ضخامت هسته به میزان ۱۴ متر، بیشینه نشست سد به ترتیب به میزان ۲۰، ۳۳/۹ و ۲۲/۲۲ درصد افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: سد مروک، تحلیل دینامیکی، تحلیل شبه‌دینامیکی، زلزله

۱- مقدمه

سدها، از اولویت و اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. بسیاری از سدها در بالادست آبادی‌ها و یا شهرهای پر جمعیت بنا شده که عدم ایمنی آن‌ها منجر به خطرات و تلفات جبران‌ناپذیری خواهند شد (Alicescu et al., 2010). اگر عواملی همچون

نیاز روز افزون به سدها و لزوم احداث آن‌ها در مکان‌های مختلف با شرایط ژئومکانیکی و هیدرولوژی متفاوت و احتمالاً نامساعد، باعث شده که احداث هر یک از این سدها حاوی تجربه جدیدی باشد. بررسی رفتاری و نظارت‌های دراز مدت

قرار داد و نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی سد را با نتایج حاصل از روش‌های تحلیل تابع انتقال و تبدیل هیلبرت - هوانگ^۴ مقایسه نمود. نتایج به دست آمده نشان داد که، مدول برشی اولیه بزرگ‌تر تولید جواب قوی‌تر در فرکانس‌های بالا و به وجود آمدن تغییر شکل‌های کوچک‌تر در سد می‌کنند؛ همچنین آدریانوپولوس^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۴ (Andrianopoulos et al., 2014)، رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی با ارتفاع ۲۰ تا ۱۲۰ متر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعات نشان داد که دوره غالب ارتعاش به شدت تحت تأثیر ارتفاع و ویژگی‌های حرکت ورودی قرار دارد.

در سال ۲۰۱۸ آقایان جباری و استوار کشکولی^۶ (Ostovar Kashkouli & Jabari, 2018)، به بررسی پاسخ حاصل از تحلیل عددی سد رودبال با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای FLAC و ABAQUS و مقایسه نتایج حاصل از تحلیل با نتایج حاصل از ابزار دقیق نصب شده در محل سد رودبال پرداختند. طبق نتایج به دست آمده از تحلیل، این مهم حاصل شد که، استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب در نتایج نشست قائم هسته دارای دقت مناسبی می‌باشد. مویوکسا^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۹ (Mouyeaux et al., 2019)، با استفاده از آنالیز اجزای محدود به بررسی ایجاد فشار آب حفره‌ای و نتایج حاصل از ابزار دقیق پرداختند. با بررسی نتایج آشکار شد که، بیش‌ترین نوسان در فشار آب منفذی در ناحیه بالای هسته دیده شد. همچنین فشار آب منفذی محاسبه شده در مدل به مقدار ناچیزی بیش از مقادیر حاصل از ابزار دقیق بوده است. در سال ۲۰۲۰ پیلکانوس و همکاران (Pelecanos et al., 2020)، اثر فشار هیدرودینامیکی مخزن بر شتاب لرزه‌ای سد و تنش و کرنش‌های برشی لرزه‌ای در بدنه سد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که شاید شتاب ایجاد شده در تاج سد به اندرکنش مخزن سد حساس نباشد و تأثیری از آن نپذیرد؛ اما با در نظر نگرفتن مخزن سد، کرنش‌ها و تنش‌های به وجود آمده در سد که از وجود مخزن تأثیر بسیار می‌گیرند؛ نادیده گرفته خواهند شد و تأثیر مخزن بر آن‌ها قابل صرف‌نظر کردن نیست. نورزاد و همکاران در سال ۱۳۸۹ (Noorzad et al., 2010)، به تحلیل دینامیکی سدهای خاکی و بررسی اثر میرایی در آن پرداختند. نتایج تحلیل آنان نشان داد که، افزایش میرایی سبب کاهش نشست در تمام شتاب‌نگاشت‌ها می‌شود و به ازای هر یک از درصد‌های میرایی،

رسوب‌گذاری مخزن موجود نباشد، در زمان بهره‌برداری و طول عمر سد، محدودیتی وجود نخواهد داشت (Sadeghi, 2012). تقریباً در فاصله زمانی ۱۰ ساله، بخش‌هایی از ایران تحت اثر زلزله‌های بزرگ قرار گرفته و دچار ویرانی شده‌است. اگر تعداد زلزله‌های کوچک‌تر و خسارات ناشی از آن‌ها در نظر گرفته شود؛ این نتیجه حاصل می‌شود که زلزله و خسارات ناشی از آن، همواره به صورت تهدیدی جدی علیه آسایش و اقتصاد مردم کشور ما بوده است (Janjani, 2013). از سوی دیگر در سال‌های اخیر، با توجه به شدت بالای زلزله‌هایی که در مناطق توسعه‌یافته جهان از جمله ایالات متحده و ژاپن، رخ داده و حامل خسارت‌های مالی و جانی ناچیزی بوده که در بیشتر موارد تعداد کشته‌شدگان از مرز چند نفر فراتر نرفته‌است، این مهم حاصل می‌شود که، برخورد علمی و مهندسی با مبحث زلزله، تأثیر به‌سزایی در کاهش خسارت‌های ناشی از زلزله دارد (Wang & Hoeg, 2010). آزاد شدن انرژی از زلزله‌ها، موج‌های شتاب لرزه‌ای به سطح زمین می‌فرستند که این بار دینامیکی گذرا، تنش‌های برشی در شیب را به شدت افزایش می‌دهد و با کاهش حجم منافذ، باعث افزایش فشار سیال در منافذ و شکستگی‌ها می‌شوند. در نتیجه نیروهای برشی افزایش می‌یابد و نیروهای اصطکاکی مقاوم کاهش می‌یابد. مسائل متعددی بر پاسخ شیب در طی زلزله اثر می‌گذارند که می‌توان بزرگای شتاب زمین‌لرزه، دوام زمین‌لرزه، مشخصه دینامیکی مصالح و ابعاد شیب را مثال زد (Ersayin, 2006). در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه بررسی پایداری سدهای خاکی صورت گرفته که در ادامه تعدادی از آن‌ها بیان می‌گردد.

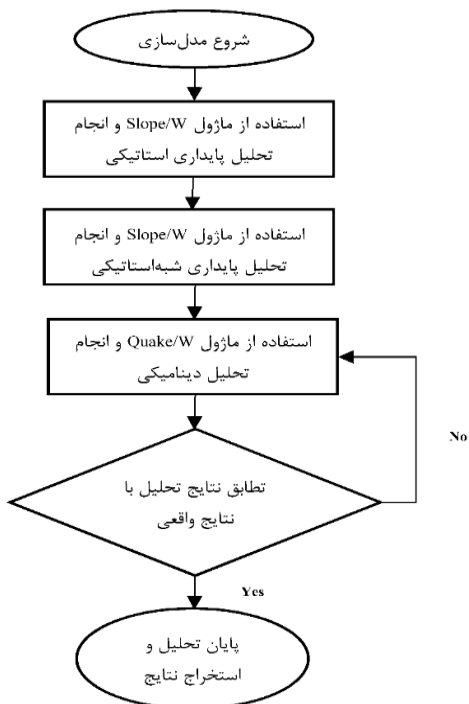
سارمیتو^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۴ (Sarmiento et al., 2004)، با در نظر گرفتن تغییر محرک ورودی تکیه‌گاهی بر روی پی صلب، تحلیل دینامیکی یک سد با ارتفاع ۱۵۳ متر و طول تاج ۷۸۰ متر را انجام دادند. نتایج نشان داد که حرکات حوزه نزدیک می‌تواند تغییرات مهمی در حرکاتی که در زیر سد عمل می‌کند، ایجاد نماید. نصرالهی^۲ در سال ۲۰۰۸ (Nasrollahi, 2008)، اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در سدهای خاکی بعد از زلزله را با نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که ماکزیمم افزایش در فشار آب حفره‌ای، ۲۶ درصد مقدار عددی فشار آب حفره‌ای در یکی از نقاط سد می‌باشد. در سال ۲۰۱۰ آقای لی^۳ (Li, 2008)، سد خاکی بوتان در تایوان را مورد تحلیل عددی

دستیابی به اهداف تحقیق حاضر، از نرم‌افزار المان محدود ژئواستودیو استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور شبیه‌سازی پاسخ رفتاری یک سد تحت اثر بارهای لرزه‌ای ناشی از زلزله، استفاده از مدل‌سازی عددی و انجام تحلیل به وسیله نرم‌افزارهای رایانه‌ای، یکی از متداول‌ترین و در دسترس‌ترین ابزارها است. به منظور اطمینان از صحت شبیه‌سازی پاسخ رفتاری یک سد در طول زلزله، لزوم تطابق میان مدل ساخته‌شده و مشخصات واقعی سد آشکار می‌گردد. از هندسه و شرایط مرزی مدل و نیز نحوه اعمال بار و رفتار مصالح، از جمله مهم‌ترین عواملی به‌شمار می‌آیند که می‌تواند تاثیر به‌سزایی در صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی داشته باشند. از این‌رو می‌بایست مدل‌سازی و تحلیل عددی، با توجه به این موارد صورت پذیرد تا نتایج حاصله با واقعیت تطابق قابل قبولی داشته باشد (Liu et al., 2012).

به‌منظور دستیابی به نتایج مورد نیاز و اهداف مطالعه، مراحل زیر بر پایه روندنمای شکل ۱، دنبال گردید.



شکل ۱. مراحل کلی انجام تحلیل در پژوهش حاضر

افزایش میزان ارتفاع سد از بستر، مقدار نشست رخ داده افزایش یافته به طوری که در ناحیه تاج سد به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در سال ۱۳۹۱ صمیمی و همکاران (Samimi et al., 2011)، با بهره‌گیری از نرم‌افزار Ansys، به بررسی تاثیر میرایی بر تغییرشکل‌های افقی و قائم در تحلیل دینامیکی سدهای خاکی پرداختند. نتایج تحلیل آنان نشان دهنده کاهش میزان جابه‌جایی تحت اثر افزایش میرایی است؛ نتایج تحلیل آن‌ها همچنین نشان داد که با افزایش تراکم، میزان تاثیر زلزله کم‌تر می‌شود. مظاهری و همکاران در سال ۱۳۹۸ (Mazaheri et al., 2018)، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود GeoStudio به بررسی پاسخ رفتاری سد خاکی مروک واقع در استان لرستان پرداختند. با بررسی نتایج حاصل از تحلیل، به این نتیجه رسیدند که، افزایش تراز خاکریزی سبب کاهش میزان قوس‌زدگی می‌شود و میزان قوس‌زدگی در اطراف نواحی انتقالی مانند فیلتر، بیشینه مقدار بوده که به علت تفاوت میان مشخصات مصالح اجرایی و اولیه با مشکل در ابزار دقیق این مورد رخ می‌دهد. در سال ۱۳۹۸ کماسی و همکاران (Komasi & Biranvand, 2018)، با بهره‌گیری از نرم‌افزار PLAXIS و GeoStudio فشار آب حفره‌ای پی و هسته سد سیوند پس از اولین آبیگری را با نتایج حاصل از ابزار دقیق، مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند. با بررسی نتایج حاصل از تحلیل و نتایج حاصل از ابزار دقیق این مهم حاصل شد که، میان نتایج تحلیل و ابزار دقیق، وضعیت رفتاری مشابهی وجود دارد. سدهای مرتفع در مقابل تنش‌های برشی دارای ضعف‌هایی هستند. طبق نتایج آنالیز دینامیکی این نتیجه حاصل می‌شود که شوک‌های لرزه‌ای ناشی از زلزله سبب گسترش بسیاری از ترک‌های بزرگ و کوچک در مناطق بالایی هسته می‌شود. بر اساس تغییر شکل پیش‌بینی شده برای هسته سد و برآورد کرنش برشی در مصالح هسته، گسیختگی کامل هسته سد قابل انتظار نخواهد بود؛ ولی گسترش ترک‌ها و افزایش نفوذپذیری در قسمت‌های بالایی هسته ممکن است اتفاق بیفتد. به دلیل اهمیت موضوع آنالیز دینامیکی سدهای خاکی و واقع شدن کشور در منطقه لرزه‌ای و از آنجایی که در مطالعات انجام شده تا به امروز، بررسی اثر تغییرات مقطع هندسی هسته سد بر روی رفتار سد در برابر بارهای دینامیکی کم‌تر مورد توجه بوده است. بنابراین در این تحقیق، بررسی تاثیر تغییرات ابعاد هندسی هسته در رفتار دینامیکی سد مروک مورد بررسی عددی قرار می‌گیرد؛ به منظور

در این پژوهش از سه رکورد زلزله بروجرد، خرم‌آباد و سر پل ذهاب کرمانشاه استفاده شده است.

۲-۱- مطالعه موردی (سد مروک)

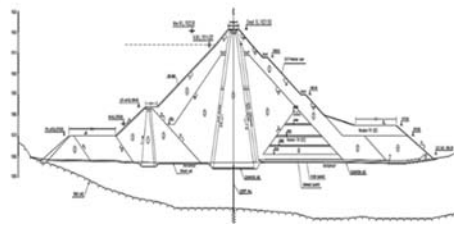
سد مخزنی مروک در فاصله دو کیلومتری بالادست روستای مروک و حدود ۴۰ کیلومتری شهر دورود در مختصات جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۴۰ دقیقه عرض شمالی، بر روی رودخانه تیره احداث شده است. مساحت حوضه آبریز رودخانه تیره تا محور سد مخزنی مروک ۹۶۲ کیلومتر مربع است. دسترسی به ساحل راست ساخت‌گاه، از طریق جاده آسفالتی روستای مروک واقع در پایین دست محور سد امکان‌پذیر است. در شکل ۲ نمایی از سد مروک نشان داده شده است.



شکل ۲. نمایی از سد مروک

سد مخزنی مروک از نوع سد سنگریزه‌ای با هسته رسی با طول تاج ۴۸۶ متر، عرض تاج ۱۲ و ارتفاع ۶۸ متر است. رودخانه تیره در محل احداث سد مروک دارای آورد متوسط سالانه حدود ۱۴۵ میلیون مترمکعب است که با تکمیل سد کمال صالح در ۲۰ کیلومتری بالادست مروک و استفاده از حدود ۶۵ میلیون مترمکعب آب این رودخانه برای انتقال به شهر اراک، آورد متوسط در محل سد مروک به حدود ۸۰ میلیون متر مکعب در سال کاهش می‌یابد. ساخت‌گاه سد مخزنی مروک، از دیدگاه زمین‌شناسی ایران در منطقه سنندج-سیرجان در جنوب‌شرقی شهر بروجرد و شمال غربی شهر دورود قرار دارد. در ساخت‌گاه، رودخانه تیره از سوی شمال خاوری به‌سوی جنوب باختران جریان دارد و تنگه‌ای به طول ۶۸۸ متر در سنگ‌های آهک بلورین، هورنفلس و شیست حفر کرده است. ساخت‌گاه در ابتدای تنگه قرار گرفته است. در شکل ۳ مقطع عرضی سد نشان داده است. در جدول ۱ نیز مقادیر پارامترهای مصالح سد مروک ارائه شده است.

در گام نخست پس از ترسیم هندسه سد مروک با بهره‌گیری از ماژول SLOPE/W، معین نمودن نواحی مختلف سد و تعریف مصالح برای هر ناحیه، اولین تحلیل پایداری شیب انجام شد. مقادیر محاسبه شده با نتایج حاصل از محاسبه دستی مربوطه مورد مقایسه قرار گرفت که مقایسه حاضر تطابق میان نتایج را نشان داد. مقایسه انجام شده به‌منظور بررسی میزان مقبولیت شبیه‌سازی انجام شده، امر ضروری جلوه می‌دهد. لازم به ذکر است که مطابق نشریه ۶۲۴، مقدار قابل قبول ضریب اطمینان پایداری توصیه شده در ICOLD در برابر لغزش در سدهای خاکی، ۱/۵ است که نشان‌دهنده این است که نیروی مقاومت ۱/۵ برابر بیش‌تر از نیروی محرک در منحنی شکست لغزشی است (Vice President for Planning and Strategic Supervision, 2014). یادآوری این نکته نیز ضروری است که تمامی تحلیل‌های پایداری شیب بر اساس روش تعادل حدی به محاسبه ضریب اطمینان مربوطه پرداخته است. در گام دوم پس از انجام تحلیل استاتیکی با استفاده از ماژول SLOPE/W، تحلیل شبه‌استاتیکی (شبه‌دینامیکی) با اعمال ضریب شتاب شبه‌استاتیکی به نرم‌افزار، صورت گرفته و به مقایسه نتایج حاصل از تحلیل و نتایج حاصل از حل دستی (استفاده از دو روش مورگنسترن‌پرایس و قطعات برای انجام محاسبه دستی)، پرداخته که مقایسه حاضر، تطابق میان نتایج را نشان می‌دهد. در گام سوم، تحلیل دینامیکی سد با استفاده از ماژول Quack/W و اختصاص مصالح به نواحی مختلف و همچنین اعمال رکورد زلزله به نرم‌افزار، نتایج دینامیکی حاصل از تحلیل استخراج شده و با نتایج واقعی مورد مقایسه قرار گرفت. در این مرحله نیز میان نتایج، تطابق قابل قبولی مشاهده شد. در انتخاب شتاب‌نگاشت مناسب برای یک ساخت‌گاه، لازم است خصوصیات ساخت‌گاه و منبع زلزله از نظر بزرگای زلزله، مکانیزم گسلش (مستقیم، معکوس و غیره)، عمق کانونی، فاصله ساخت‌گاه تا منبع زلزله، زمین‌شناسی منطقه، شتاب حداکثر، محتوای فرکانسی، مدت زلزله و انرژی مورد توجه قرار گیرد و تا حد امکان این ویژگی‌ها با خصوصیات ساخت‌گاه طرح و زلزله محتمل در آن همسان باشد. روش‌های مختلفی برای انتخاب شتاب‌نگاشت متناسب با ساخت‌گاه جهت انجام تحلیل دینامیکی وجود دارد. برخی از مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از: -انتخاب تاریخچه زلزله‌ای که در ساخت‌گاهی مشابه و دارای پارامترهای لرزه‌خیزی مشابه ساخت‌گاه مورد نظر و تقریباً در همان فاصله مورد انتظار رخ داده باشد. -استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی برای بزرگای هدف. -تخمین طیف پاسخ ساخت‌گاه با توجه به فاصله، بزرگای، شرایط ساخت‌گاهی و مکانیزم گسلش و مقیاس کردن طیف پاسخ یک زلزله منخب ثبت شده یا مصنوعی متناسب با آن. -شبیه‌سازی انتقال موج از منبع زلزله و محاسبه شتاب‌نگاشت حاصله در موقعیت ساخت‌گاه.



شکل ۳. مقطع عرضی سد

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مصالح سد مروک

نوع مصالح	نفوذپذیری (m/s)	ضریب پواسون	مدول الاستیک (KN/m ²)	چسبندگی (KN/m ²)	زاویه اصطکاک (درجه)	وزن مخصوص مرطوب (KN/m ³)	وزن مخصوص خشک (KN/m ³)
هسته	$2/5 \times 10^{-9}$	۰/۳	۲۰	۲۰	۱۸	۱۷	۱۸
پوسته	1×10^{-2}	۰/۲	۳۵	۰	۳۰	۱۹	۲۰
پوسته درشت‌دانه	1×10^{-4}	۰/۲	۹۰	۰	۴۴	۲۰	۲۱
فیلتر	1×10^{-4}	۰/۲	۲۵	۰	۲۵	۲۰	۲۱
زهکش	1×10^{-4}	۰/۲	۲۵	۰	۲۵	۲۰	۲۱
فونداسیون	1×10^{-10}	۰/۳	۴۰	۱۰۰	۲۷	۲۱	۲۲

۲-۲- روش‌های تحلیل شبه‌دینامیک

لحاظ می‌شود. این روش به دلیل سادگی درک مفاهیم و سهولت کاربرد، علی‌رغم پیشرفت‌هایی که در زمینه تحلیل‌های به‌مراتب دقیق‌تر و ابزار مورد نیاز آن به‌وجود آمده است، همچنان از سوی مهندسان مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس روش شبه‌دینامیک بر معادل‌سازی بارگذاری حاصل از ارتعاشات زلزله با یک بار استاتیکی استوار گشته است، در حالی که بارهای ناشی از یک زلزله طی لحظات بسیار کوتاهی اعمال شده و تغییر جهت و مقدار می‌دهد. در این روش، بار استاتیکی معادل همواره از جهت و مقدار ثابتی برخوردار بوده و به‌صورت دائمی اعمال می‌گردد. مقادیر نیروهای شبه‌دینامیکی بر اساس روابط زیر محاسبه می‌گردند (USBR, 1987).

روش شبه‌دینامیک، ساده‌ترین راه برای یافتن پاسخ لرزه‌ای یک سازه در مقابل زلزله است. در مقایسه با سایر روش‌های تحلیل دینامیکی، روش شبه‌دینامیک متداول‌ترین و در عین حال قدیمی‌ترین روش ممکن جهت انجام تحلیل لرزه‌ای سد شناخته شده است. در این روش، پتانسیل لغزش یک توده خاک با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل پایداری مورد بررسی قرار گرفته و با اعمال یک ضریب زلزله افقی و یا قائم (برحسب نیاز)، ضریب اطمینان پایداری آن در مقابل لغزش محاسبه می‌گردد. در واقع در این روش، اثر زلزله به‌صورت استاتیکی و با اعمال نیروهایی که از حاصل ضرب ضرایب زلزله در وزن توده لغزنده در دو امتداد افق و قائم به‌دست می‌آید، در تحلیل

$F_h = \frac{a_h \cdot W}{g} = K_h \cdot W$	(۱)
$F_v = \frac{a_v \cdot W}{g} = K_v \cdot W$	(۲)

روش‌های تعیین ضریب شتاب شبه‌دینامیک، انتخاب مقدار آن بر اساس حداکثر میزان شتاب زمین PGA در طی یک زلزله با سطح خطر مشخص و بر اساس رابطه (۳) انجام می‌شود.

در روابط بالا، a_h و a_v به ترتیب شتاب‌های شبه‌دینامیکی افقی و قائم، K_h و K_v ضرایب بدون بعد شبه‌دینامیکی افقی و قائم و W وزن توده لغزشی می‌باشد. یکی از متداول‌ترین

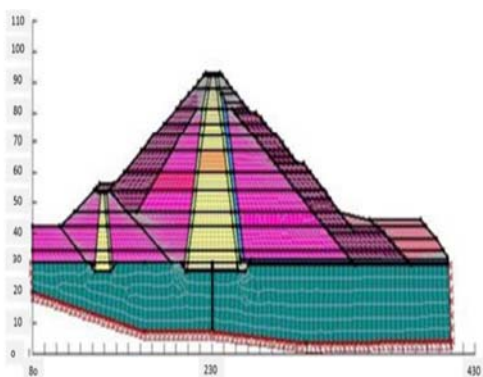
هندسه سازه در نظر گرفته شود. در تحلیل‌های دینامیکی نیز دو روش تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی موجود می‌باشد. تحلیل دینامیکی خطی می‌تواند به دو روش طیفی یا تاریخیچه زمانی انجام شود. فرضیات خاص این روش در محدوده رفتار خطی عبارتند از:

-رفتار سازه را می‌توان به صورت ترکیبی خطی از حالت‌های مودهای ارتعاشی مختلف سازه که مستقل از یکدیگرند محاسبه نمود.

-زمان تناوب ارتعاشات سازه در هر مورد در طول زلزله ثابت است.

۲-۴- اعتبارسنجی

یکی از دغدغه‌ها و مباحث مد نظر محققان داخل و خارج کشور، صحت و دقت نتایج حاصل از نرم‌افزارهای مورد استفاده در زمینه‌های مختلف می‌باشد. بنابراین یک محقق در صورت استفاده از هر نرم‌افزار ابتدا باید از صحت نتایج حاصله مطمئن شود. برای اطمینان از صحت پاسخ هر نرم‌افزار، روش‌های متعدد بعضاً تئوریک، عملی یا مطالعاتی از جمله (۱) صحت‌سنجی با موارد عملی، (۲) روش مطالعاتی و (۳) مقایسه نتایج روش عددی و معادلات وجود دارد. در این پژوهش به منظور صحت‌سنجی مدل، از مطالعه مظاهری و همکاران (۱۳۹۸) استفاده شده است. ایشان در تحقیق خود، سد خاکی مروک را به صورت عددی مدل‌سازی و مورد مطالعه قرار دادند. مدل ساخته شده در تحقیق ایشان و پژوهش حاضر به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.



شکل ۴. مدل ساخته شده در پژوهش مظاهری و همکاران

در سال ۱۳۹۸

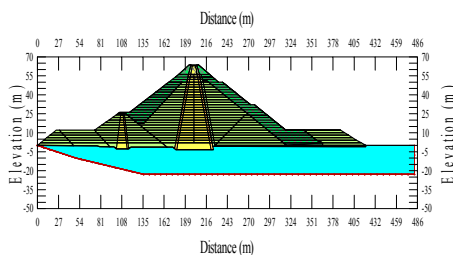
$K_h = \frac{\alpha \times PGA}{g}, \quad \frac{1}{3} \leq \frac{1}{2}$	(۳)
$0.1 \leq K_h \leq 0.2$	(۴)

در رابطه فوق، α به صورت یک ضریب ثابت در محدوده ۰/۳۳ تا ۰/۵ توصیه می‌شود. شتاب PGA نیز معادل شتاب بیشینه زمین در صورت رخداد زلزله طرح می‌باشد که عموماً در سدهای متعارف بر مبنای سطح خطر MDE (حداکثر زلزله طراحی) در نظر گرفته می‌شود. زلزله مربوط به سطح خطر MDE طی مطالعات لرزه‌خیزی ساختگاه سد بر اساس طول عمر مفید و درصد احتمال وقوع این سطح از زلزله محاسبه می‌شود. در این محاسبات معمولاً طول عمر سدها بین ۵۰ تا ۱۰۰ سال و درصد وقوع زلزله MDE بین پنج تا ۱۰ درصد در طول این مدت در نظر گرفته می‌شود. انتخاب هر یک از این پارامترها در یک سد اصولاً تابعی از درجه اهمیت سد و اقتصاد طرح و تبعات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است که در صورت آسیب آن در زلزله انتظار می‌رود. مقادیر حداقل و حداکثر ضریب زلزله افقی به صورت رابطه (۴) ارائه شده است (Ganbari, 2014). در این پژوهش، از شتاب ثابت در ارتفاع استفاده شده است.

۲-۳- روش‌های تحلیل دینامیکی

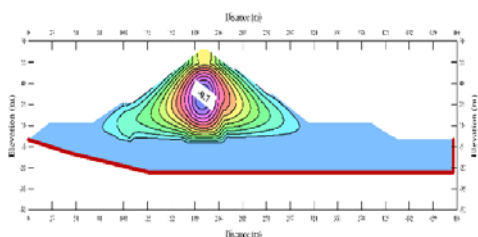
با توجه به این که سدها معمولاً در مناطق کوهستانی احداث می‌شوند، بنابراین وجود گسل در فواصل دور و نزدیک محور سد اجتناب‌ناپذیر است. بررسی پتانسیل لرزه‌خیزی هر گسل در فاصله دور و یا نزدیک و تاثیر زمین‌لرزه ناشی از آن بر پایداری سد، یکی از معیارهای اصلی مکان‌یابی محور سد می‌باشد. از این رو بررسی دقیق تاثیر زمین‌لرزه‌های میدان‌های دور و نزدیک بر پایداری سدها از اهمیت ویژه‌ای در طراحی سد و ارزیابی پایداری سدهای موجود، برخوردار می‌باشد (Pasbani Khiavi et al., 2021). با توجه به ماهیت دینامیکی نیروهای ناشی از زمین‌لرزه که به صورت مشخص در قالب یک تابع ریاضی قابل بیان نیستند؛ روش‌های متعدد تحلیل عددی دینامیکی سازه‌ها توسعه یافتند. به دلیل این که سازه‌ها تحت اثر اعمال زلزله‌های، رفتاری غیرخطی از خود نشان می‌دهند؛ لذا بایستی در تحلیل آن‌ها رفتار غیرخطی مصالح و

صورت پذیرد تا نتایج حاصله با واقعیت تطابق قابل قبولی داشته باشد. قبل از اقدام به مدل سازی دینامیکی، مدل سازی استاتیکی توسط ماژول SIGMA انجام شده است. در این بخش به منظور نزدیک ساختن مدل به سازه واقعی، مدل در ۲۷ مرحله مدل سازی و آنالیز گردیده است (شکل ۸).



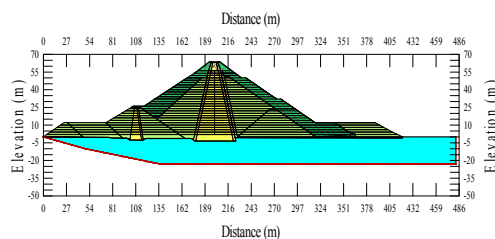
شکل ۸. مدل سازی استاتیکی در نرم افزار ژئواستودیو

در شکل ۹ میزان نشست محاسبه شده سد در انتهای ساخت ارائه شده است. مقدار نشست محاسبه شده بیشینه، ۰/۷ متر بوده که این مقدار یک درصد ارتفاع می باشد که از نشست مجاز کم تر بوده و قابل قبول است. همچنین بیشینه مقدار نشست در محدوده دو سوم ارتفاعی تا یک سوم ارتفاعی رخ داده است که منطقی و قابل قبول تلقی می شود.



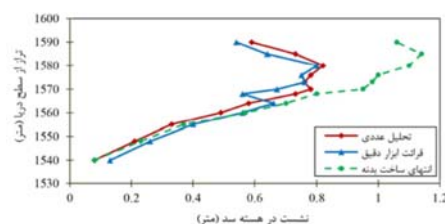
شکل ۹. نشست سد در پایان ساخت.

در این پژوهش از زلزله بروجرد، خرم آباد و سرپل ذهاب استفاده شده است. در شکل های ۱۰ تا ۱۵ به ترتیب رکوردهای انتخابی تحلیل دینامیکی و مدت زمان موثر این زلزله ها نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود؛ در زلزله بروجرد، خرم آباد و سرپل ذهاب، ۹۵ درصد انرژی زلزله به ترتیب در ثانیه صفر تا ۴۰، صفر تا ۸۰ و صفر تا ۲۷ ثانیه نهفته است. بنابراین تحلیل ها به ترتیب در ۴۰، ۸۰ و ۳۰ ثانیه اول صورت گرفته است.

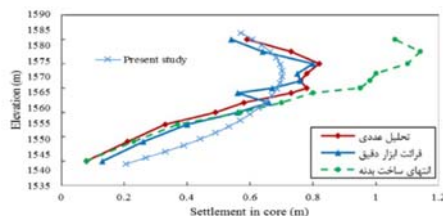


شکل ۵. مدل ساخته شده در پژوهش حاضر

مظاهری و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهش خود، نتایج را با مقادیر محاسبه شده توسط ابزار دقیق مقایسه نموده که در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشست در پژوهش حاضر نیز در شکل ۷ ارائه شده است. مطابق شکل ۷ مشاهده می شود که نرم افزار، توانسته به خوبی روند مطالعه مظاهری و ابزار دقیق را محاسبه نماید و از این حیث می توان به نتایج این نسخه از نرم افزار اعتماد نموده و باقی محاسبات را انجام داد.



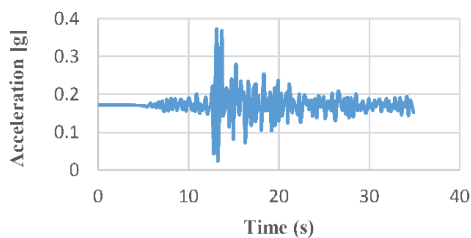
شکل ۶. مقایسه مطالعه مظاهری با نتایج ابزار دقیق



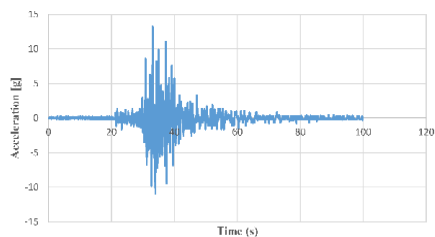
شکل ۷. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج مظاهری

و ابزار دقیق

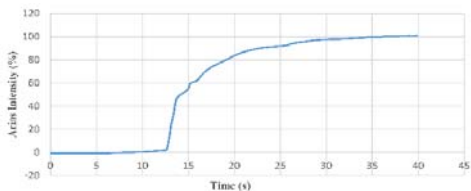
برای آن که یک مدل سازی و تحلیل عددی قادر باشد شبیه سازی مناسبی را از رفتار یک سد طی زلزله ارائه دهد؛ لازم است تا حد ممکن مدل ساخته شده با مشخصات واقعی سد تطابق داشته باشد. هندسه و شرایط مرزی مدل و نیز نحوه اعمال بار و رفتار مصالح از جمله مهم ترین عواملی به شمار می آیند که می تواند تأثیر به سزایی در صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی داشته باشند. از این رو می بایست مدل سازی و تحلیل عددی، با توجه به این موارد



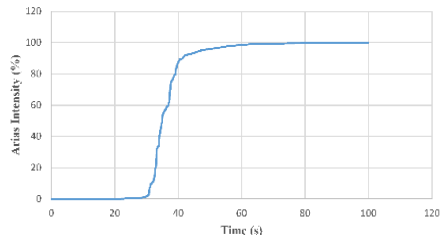
شکل ۱۴. رکورد زلزله سرپل ذهاب



شکل ۱۰. رکورد زلزله بروجرد



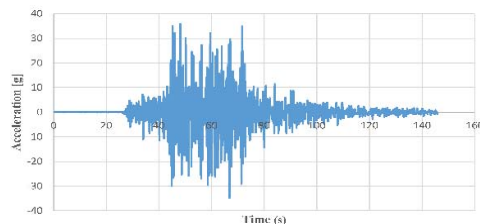
شکل ۱۵. مدت زمان موثر زلزله سرپل ذهاب



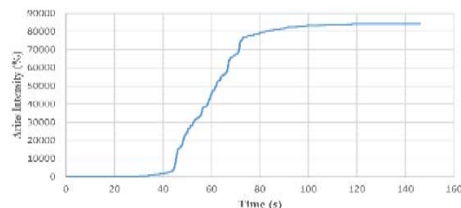
شکل ۱۱. زمان موثر زلزله بروجرد

۳- بحث و نتایج

در این پژوهش، اثر تغییر عرض هسته بر پایداری دینامیکی سد خاکی مروک بررسی شده است. بدین منظور آنالیز دینامیکی سد در پایان ساخت و در حالت مخزن پر با استفاده از نرم افزار ژئواستودینامیک انجام شده است. مدل مورد استفاده در تحلیل دینامیکی این پژوهش، معادل خطی و مدل مورد استفاده در تحلیل شبه دینامیکی، مدل موهر-کلمب بوده و آنالیز مطابق با شرایط پارامتریک تنش کل انجام شده است. در جدول ۲ ضرایب ایمنی لرزه‌ای در حالت مخزن پر برای سد به ارتفاع ۶۸ متر تحت شتاب افقی $0.1g$ با دو عرض هسته متفاوت ارائه شده است. لازم به ذکر است که، طبق آیین‌نامه، مقدار ضخامت مجاز برای هسته سد از 0.2 تا 0.5 ارتفاع متغیر است. در این پژوهش ضخامت ابتدایی هسته سد، 0.3 ارتفاع در نظر گرفته شده است.



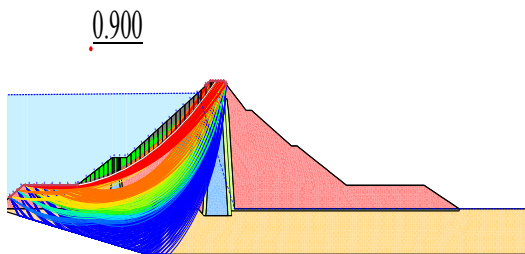
شکل ۱۲. رکورد زلزله خرم‌آباد



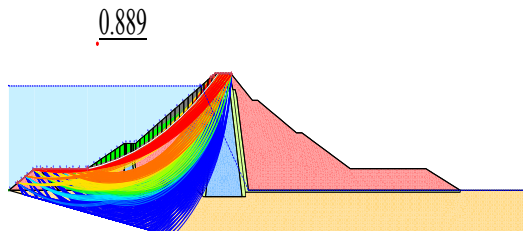
شکل ۱۳. مدت زمان موثر زلزله خرم‌آباد

جدول ۲. مقایسه ضرایب ایمنی لرزه‌ای در حالت مخزن پر

ضریب ایمنی	ضخامت هسته بر حسب ارتفاع سد (متر)	حالت تحلیل	شیب
۱/۳۷۶	۰/۳	مخزن پر	بالادست
۱/۳۴۸	۰/۵	مخزن پر	بالادست
۱/۳۷۸	۰/۳	مخزن پر	پایین دست
۱/۳۰۲	۰/۵	مخزن پر	پایین دست



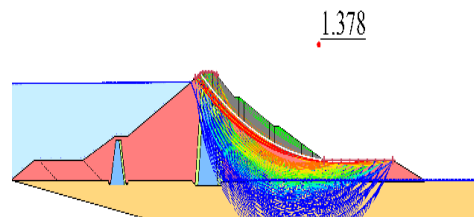
شکل ۱۸. ضریب ایمنی لرزه‌ای شیب بالادست در حالت مخزن پر



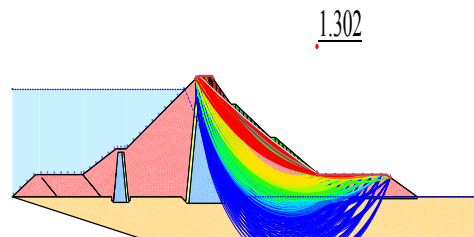
شکل ۱۹. ضریب ایمنی لرزه‌ای شیب بالادست در حالت مخزن پر با افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش عرض هسته، باعث کاهش ضریب ایمنی سد خواهد شد. در ادامه تغییر شکل افقی سد در انتهای زلزله بروجرد، خرم‌آباد و سرپل ذهاب در حالت مخزن پر برای عرض اصلی هسته سد و برای افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر به ترتیب در شکل‌های ۲۰ تا ۲۵ ارائه شده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود که ماکزیمم تغییر شکل افقی در حالت بدون افزایش عرض هسته برای زلزله بروجرد، ۷/۵۲ متر، برای زلزله خرم‌آباد ۱۰/۷۷ متر و برای زلزله سرپل ذهاب ۰/۰۳ متر است و در حالت افزایش عرض هسته برای زلزله بروجرد، ۶/۴۰ متر، برای زلزله خرم‌آباد ۱۰/۴۴ متر و برای زلزله سرپل ذهاب ۰/۰۲ متر می‌باشد. همچنین ماکزیمم تغییر شکل افقی در بالادست سد و مینیمم تغییر شکل افقی در پایین دست سد و در قسمت پوسته رخ داده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود به دلیل مکانیزم‌های ایجاد شده، تغییر شکل افقی سد با افزودن عرض هسته به میزان چهارده متر برای زلزله بروجرد، خرم‌آباد و سرپل ذهاب به ترتیب، کاهش تغییر شکل افقی حدود ۱۶/۰۹، ۳/۱۱ و ۴۰ درصدی را سبب شده است.

از بررسی جدول ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش عرض هسته، ضریب ایمنی لرزه‌ای بالادست سد به میزان ۲/۰۳ درصد و ضریب ایمنی لرزه‌ای پایین دست سد به میزان ۵/۵۲ درصد، کاهش می‌یابد. در ادامه نتایج تغییر شکل افقی، نشست و کرنش‌های برشی سد در حالت افزایش عرض هسته سد ارائه شده است. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب ضرایب ایمنی لرزه‌ای شیب پایین دست سد مخزنی مروک با ارتفاع ۶۸ متر برای عرض ابتدایی سد و اضافه عرض چهارده متر ۰/۵ ارتفاع در حالت مخزن پر ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش عرض هسته سد به میزان چهارده متر، ضریب ایمنی سد به میزان ۵/۵۲ درصد کاهش می‌یابد.

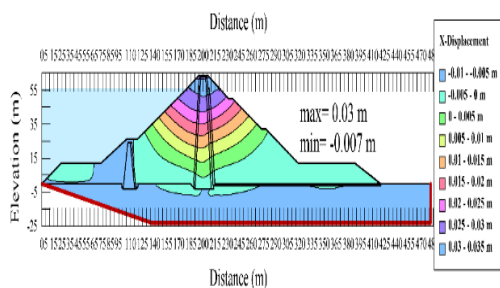


شکل ۱۶. ضریب ایمنی لرزه‌ای شیب پایین دست در حالت مخزن پر

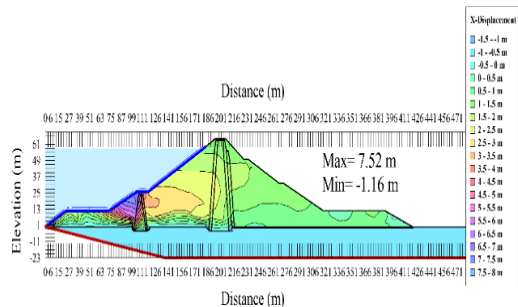


شکل ۱۷. ضریب ایمنی لرزه‌ای شیب پایین دست در حالت مخزن پر با افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر

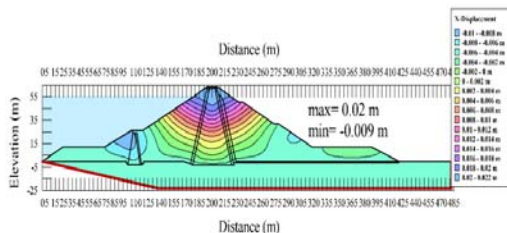
در ادامه ضرایب ایمنی لرزه‌ای شیب بالادست در حالت مخزن پر به ترتیب برای عرض اصلی سد و اضافه شدن چهارده متر به عرض هسته در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عرض هسته سد به میزان چهارده متر، ضریب ایمنی لرزه‌ای شیب بالادست سد به میزان ۱/۲۲ درصد کاهش می‌یابد.



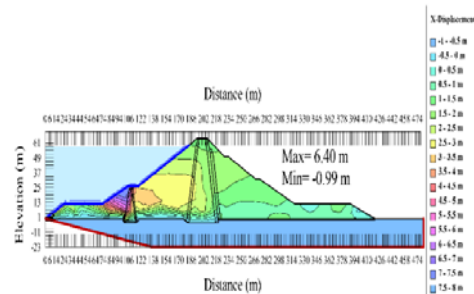
۲۴. تغییر شکل افقی سد در انتهای زلزله سرپل ذهاب
حالت مخزن پر



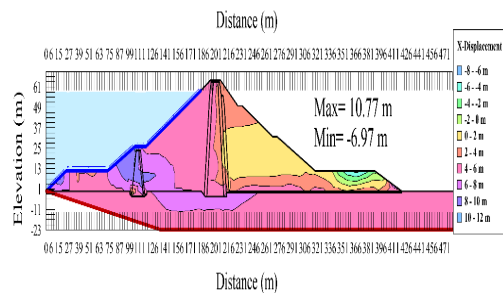
شکل ۲۰. تغییر شکل افقی سد در انتهای زلزله بروجرد



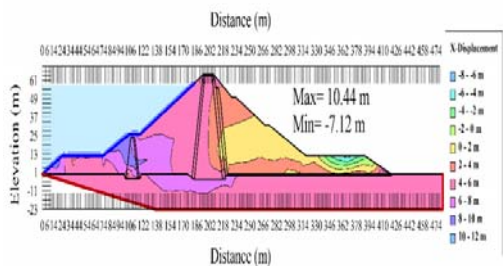
شکل ۲۵. تغییر شکل افقی سد در انتهای زلزله سرپل ذهاب
حالت مخزن پر با افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر



شکل ۲۱. تغییر شکل افقی سد در انتهای زلزله بروجرد حالت
مخزن پر با افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر



شکل ۲۲. تغییر شکل افقی سد در انتهای زلزله خرم‌آباد
حالت مخزن پر



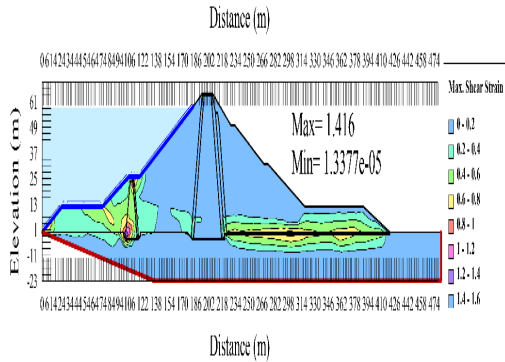
شکل ۲۳. تغییر شکل افقی سد در انتهای زلزله خرم‌آباد حالت
مخزن پر با افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر

۴- یافته‌ها

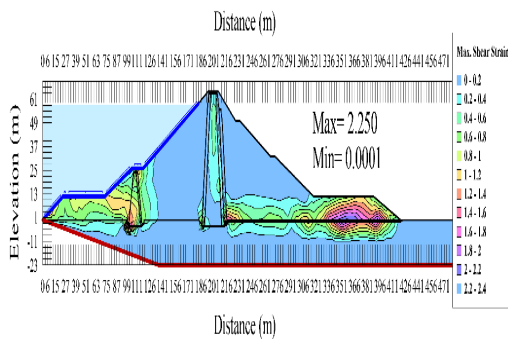
نتایج نشست سد مروک به ارتفاع ۶۸ متر با عرض هسته اصلی و افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر برای زلزله بروجرد، خرم‌آباد و سرپل ذهاب در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی، ماکزیمم مقدار نشست تحت اثر سه زلزله مذکور در دو سوم ارتفاعی هسته و در نزدیکی تاج سد اتفاق افتاده است. مطابق جدول ۳ مشاهده می‌شود که، تحت اثر زلزله بروجرد، خرم‌آباد و سرپل ذهاب با افزایش ضخامت هسته به میزان چهارده متر، بیشینه نشست سد به ترتیب به میزان ۲۰٪، ۳۳٪ و ۲۲٪ درصد افزایش یافته است.

جدول ۳. ماکزیم نشست دینامیکی سد

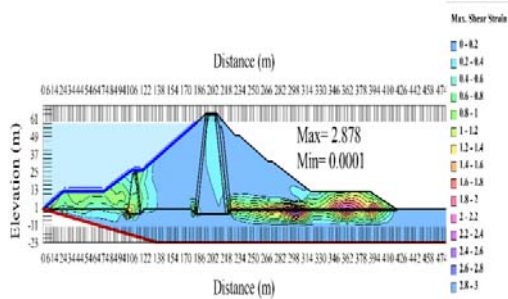
ماکزیم نشست به زلزله	ماکزیم نشست برای عرض اصلی (متر)	ماکزیم نشست برای عرض هسته به میزان ۱۴ متر (متر)
بروجرد	۰/۱۸	۰/۲۲
خرم‌آباد	۲/۳۵	۲/۵۸
سرپل‌ذهاب	۰/۰۴	۰/۰۵



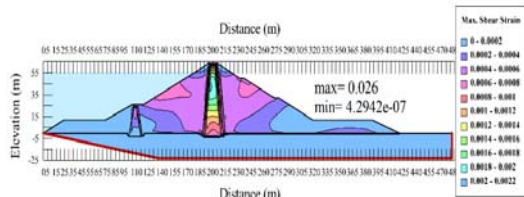
شکل ۲۷. کرنش برشی رخ داده در سد تحت اثر زلزله بروجرد با افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر



شکل ۲۸. کرنشی برشی رخ داده در سد تحت اثر خرم‌آباد

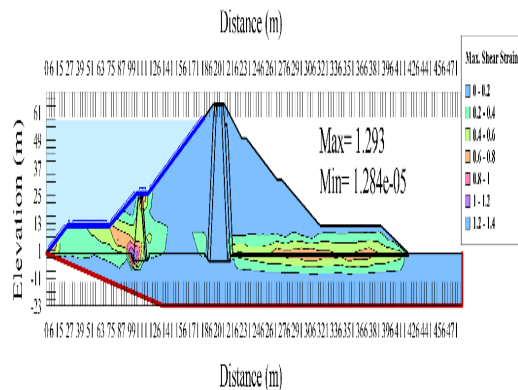


شکل ۲۹. کرنشی برشی رخ داده در سد تحت اثر خرم‌آباد با افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر



شکل ۳۰. کرنش برشی رخ داده در سد تحت اثر زلزله سرپل‌ذهاب

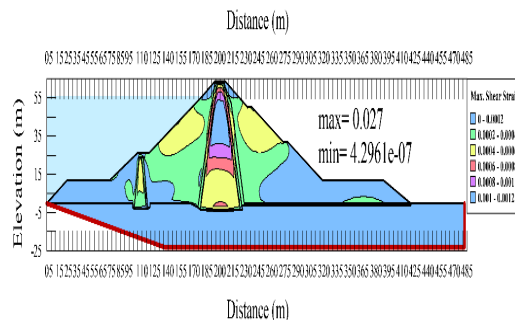
در شکل‌های ۲۶ تا ۳۱ کرنش‌های برشی بیشینه سد در ارتفاع ۶۸ متر برای عرض اصلی هسته سد و افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر تحت اثر زلزله‌های بروجرد، خرم‌آباد و سرپل‌ذهاب ارائه شده است. مطابق با شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که ماکزیم مقدار کرنش برشی در پوسته بالادست سد رخ داده است. همچنین از مقایسه مقادیر کرنش برشی چنین برداشت می‌شود که با افزایش عرض هسته تحت اثر زلزله بروجرد مقدار کرنش برشی ماکزیم از ۱/۲۹۳ به ۱/۴۱۶، تحت اثر زلزله خرم‌آباد از ۲/۲۵۰ به ۲/۸۷۸ و تحت اثر زلزله سرپل‌ذهاب از ۰/۲۶ به ۰/۲۷ افزایش یافته است. در واقع افزایش عرض هسته منجر به افزایش کرنش برشی به میزان ۹/۰۸ درصد برای زلزله بروجرد، ۲۴/۴۹ درصد برای زلزله خرم‌آباد و ۳/۷۷ درصدی برای زلزله سرپل‌ذهاب شده است و به نظر می‌رسد عملکرد این سد با این افزایش عرض هسته مطلوب نباشد.



شکل ۲۶. کرنشی برشی رخ داده در سد تحت اثر زلزله بروجرد

شده است. مطابق با جدول ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع هسته سد از ۶۸ به ۷۳ متر، ضریب ایمنی لرزه‌ای شیب بالادست به میزان ۶/۱۱ درصد و در شیب پایین دست به میزان ۱۰/۷۵ درصد کاهش می‌یابد. از مقایسه جداول ۲ و ۴ چنین برداشت می‌شود که افزایش عرض و ارتفاع هسته، باعث کاهش ضریب ایمنی لرزه‌ای می‌گردد.

در ادامه نتایج تغییر شکل افقی، نشست سد و کرنش برشی بیشینه تحت اثر زلزله بروجرد برای افزایش ارتفاع هسته و مقایسه آن با افزایش عرض هسته در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۳۱. کرنش برشی رخ داده در سد تحت اثر زلزله سرپل ذهاب با افزایش عرض هسته به میزان چهارده متر

در ادامه نتایج تحلیل دینامیکی سد با افزایش ارتفاع از ۶۸ متر به ۷۳ متر و مقایسه آن با نتایج تحلیل دینامیکی افزایش عرض به میزان چهارده متر در حالت مخزن پر ارائه

جدول ۴. مقایسه ضرایب ایمنی لرزه‌ای برای افزایش ارتفاع هسته

شیب	حالت تحلیل	ارتفاع (متر)	ضریب ایمنی
بالادست	مخزن پر	۶۸	۰/۹۰۰
بالادست	مخزن پر	۷۳	۰/۸۴۵
پایین دست	مخزن پر	۶۸	۱/۰۷۹
پایین دست	مخزن پر	۷۳	۰/۹۶۳

جدول ۵. مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی تحت اثر زلزله بروجرد

ارتفاع (متر)		افزایش عرض هسته (متر)		
۶۸	۷۳	صفر	چهارده	
۶/۵۲۶	۹/۴۳۲	۷/۵۲۰	۶/۴۰۰	تغییر شکل افقی
۰/۱۵۲	۰/۱۹۹	۰/۱۸۳	۰/۲۱۶	نشست سد
۱/۳۲۳	۱/۵۰۷	۱/۲۹۳	۱/۴۱۶	کرنش برشی

سد بر مقادیر کرنش برشی نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع هسته، مقادیر کرنش برشی ۱۳ درصد افزایش یافته و با افزایش عرض هسته مقادیر کرنش برشی فقط ۹/۰۸ درصد افزایش یافته است. به‌طور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش عرض هسته نسبت به افزایش ارتفاع هسته مقرون به صرفه‌تر است و در این حالت، سد عملکرد بهتری دارد.

از مقایسه نتایج جدول فوق چنین نتیجه می‌شود که تغییر شکل افقی سد با افزایش ارتفاع هسته، ۳۶/۴۲ درصد افزایش یافته در صورتی که با افزایش عرض هسته مقدار تغییر شکل افقی سد حدود ۲۴/۴۹ درصد کاهش یافته است. مقایسه مقادیر نشست سد در دو حالت مذکور نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع سد باعث افزایش ۲۶/۷۸ درصدی نشست سد شده و افزایش عرض هسته باعث افزایش ۱۶/۵۴ درصدی نشست سد شده است. در نهایت مقایسه اثر تغییر ارتفاع و تغییر عرض هسته

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر تغییر عرض هسته سد خاکی مروک بر نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی سد و مقایسه آن با نتایج افزایش ارتفاع هسته سد تحت اثر شتاب افقی $0.1g$ ، در مرحله آبگیری مورد بررسی قرار گرفت که اهم نتایج حاصل از آن به شرح زیر می باشد:

-افزایش ارتفاع هسته، سبب افزایش تغییر شکل افقی سد تحت اثر نیروی زلزله شده است؛ به گونه ای که با افزایش ارتفاع هسته، نشست سد تحت اثر زلزله بروجرد، به میزان $26/78$ درصد روند افزایشی داشته است.

-افزایش ضخامت و ارتفاع هسته، سبب افزایش نشست دینامیکی سد شده است.

-تحت اثر اعمال زلزله خرم آباد، میزان نشست رخ داده در سد، نسبت به سایر موارد بیشتر است؛ این در صورتی است که، نشست سد تحت اثر زلزله خرم آباد برای ضخامت ثابت هسته $2/353$ متر و با افزایش ضخامت هسته به میزان 14 متر، نشست رخ داده در سد $2/579$ متر نتیجه شده است.

-ضرایب ایمنی لرزه ای بالادست و پایین دست سد در حالت مخزن پر در اثر افزایش ارتفاع سد، اعدادی کمتر از 1 را نتیجه داده اند که عملاً ناپایداری سد را نشان می دهد.

-افزایش عرض هسته نسبت به افزایش ارتفاع هسته مقرون به صرفه تر است و در این حالت، سد عملکرد بهتری دارد.

-افزایش عرض و ارتفاع هسته سبب کاهش ضرایب اطمینان و پایداری سد شده است.

-افزایش عرض هسته، سبب افزایش کرنش برشی ماکزیمم می گردد؛ به طوری که با افزایش 14 متری ضخامت هسته، مقدار کرنش برشی سد مروک تحت اثر زلزله بروجرد، $9/08$ درصد افزایش یافته است.

-تغییر شکل افقی ناشی از اعمال نیروی زلزله به سد، تحت اثر افزایش ضخامت هسته روندی کاهشی دارد.

۶- پی نوشت ها

1. Sarmiento
2. Nasrollahi
3. Li
4. Hilbert-Huang Transform (HHT)
5. Andrianopoulos
6. Jabbari and Ostovar Kashkooli
7. Mouyeaux

۷- مراجع

- Andrianopoulos, K.I., Papadimitriou, A.G., Bouckovalas, G.D. and Karamitros, D.K. (2014). Insight into the Seismic Response of Earth Dams with an Emphasis on Seismic Coefficient Estimation. *Journal of Computers and Geotechnics*, 55, 195-210.
- Alicescu, V., Pierre Tournier, J., and Vannobel, P. (2010). Design and Construction of Nemiscau-1 Dam. *The First Asphalt Core Rockfill Dam in North-America*.
- Sadeghi, p. (2012). Investigating the Effect of Core Geometric Dimensions on the Static and Seismic Behavior of Earthen Dams with Asphalt Concrete Core during the Construction Period. Master's Thesis, *Hydraulic Structures*, Khaje Nasir Toosi University of Technology.
- Janjani, S. (2013). Deformation Analysis of Non-Homogeneous Vertical Core and Inclined Core Dams Under Static Loads. Master's thesis, *Soil and Foundation*, Arak University.
- Wang, W., and Hoeg, K. (2010). Cyclic Behavior of Asphalt Concrete Used as Impervious Core in Embankment Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, refere process.
- Ersayin, D. (2006). Studying Seepage in a Body of Earth-Fill Dam by (Artificial Neural Networks) ANNs. Thesis of the degree of Master of Science, *Izmir Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Turkey*.
- Sarmiento, N., Romo, M., Marinez, S., and Marengo, H. (2004). Seismic Behavior of Concrete-faced Rockfill Dams, Considering a Spatial Variation of Motions along the Rigid Base. *13th world Conference on Earthquake Engineering*, No.85.
- Nasrollahi, S.M. (2008). Determination of Excess Pore Pressure in Earth Dam after Earthquake. *Proceeding the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12-17, Beijing, China.
- Li, J. N. (2010). Numerical earthquake response analysis of the Liyutan earth dam in Taiwan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1269-1280.
- Ostovar Kashkouli, Y., and Jabari, M.M. (2018). Evaluation of the Results of Numerical Analysis and its Comparison with Precision Instrument Data using FLAC and Abaqus Commercial Codes, case study: (Rodbal Darab Dam). *the Third International Conference on*

- Mazaheri, A. Alipour, R. and Shokri Darikvand, b. (2018). Numerical Investigation of Earthen Dam Behavior and its Comparison with Instrumentation Data (Case Study of Marvak Dam in Lorestan). *Civil and Environmental Researches*, 2, 153-164.
- Komasi, M. and Biranvand, b. (2018). Evaluation of the Pore Water Pressure of the Foundation and Core of Sivand Dam after the First Dewatering Period in Comparison with the Results of Instrumentation. *Iranian Dam and Electric Power Plant Quarterly*, 6(21), 1-14.
- Liu, C., Zhang, L., Bai, B., Chen, J. and Wang, J. (2012). Nonlinear Analysis of Stress and Strain for a Clay Core Rock-Fill Dam with FEM. *International Conference on Advances in Computational Modeling and Simulation*, Procedia Engineering, 31, 497-501.
- Vice President for Planning and Strategic Supervision, (2014). Seismic analysis and design guide for earthen and gravel dams. *Publication No. 624*.
- USBR, (1987). Static Deformation Analysis. *Design standard embankment dams*, 13(9).
- Ganbari, A. (2014). Engineering principles of earthen dams. Tehran: kharazmi University Publications, 343.
- Pasbani Khiavi, M., Ali Ghorbani, M., Ghaed Rahmati, A. (2021). Investigation of the effect of near and far earthquakes on the seismic response of weighted concrete dams controlled with rubber dampers. *Scientific-Research Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 9, No. 2, 215-229.
- Civil Engineering, Architecture and Urban Design*, Tabriz.
- Mouyeaux, C., Carvajal, P., Bressolette, L., Peyras, P.B., and Bacconnet, C. (2019). Probabilistic Analysis of Pore Water Pressures of an Earth Dam using a Random Finite Element Approach Based on Field Data. *Engineering Geology*, 259, 1-32. doi.1016/j.enggeo.2019.105190
- Pelecanos, L., Madabushi, G.P., and Zeybek, A. (2020). Seismic Response of Partially Saturated Soils beneath Shallow Foundation under Sequential Ground Motions. *Journal of Earthquake Engineering*, 18, 1987-2002.
- Noorzad, R. Shush Pasha, A. and Ghaseminejad, V. (2010). Dynamic Analysis of Earthen Dams According to the Seismic Features of Mazandaran Province. *8th International Congress of Civil Engineering*, Ferdowsi University of Mashhad.
- Samimi, A. Saba, H. and Yousefirad, M. (2011). Investigating the Effect of Damping in Horizontal and Vertical Displacement Compared to the Vertical Direction in the Seismic Analysis of Earthen Dams. *Regional Conference on Civil Engineering and Water and Energy Crisis*, Meshkin Shahr.

Investigating the Effect of Increasing the Thickness and Height of the Clay Core of the Earthen Dam on the Dynamic Behavior of the Dam (Case Study: Marvak Dam)

Fatemeh Saki, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

Ahmad Reza Mazaheri, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.

Masoud Ahmadi, Assistant Professor, Department of Geomechanical Engineering, Faculty of Earth Sciences, Arak University of Technology, Arak, Iran.

E-mail: a.mazaheri@abru.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

Dam building industry is considered as one of the first and most complex part of civil affairs and therefore it has always been one of the topics under the scrutiny of different societies. High dams have weaknesses against shear stresses. According to the results of the dynamic analysis, it is concluded that the seismic shocks caused by the earthquake cause the expansion of many large and small cracks in the upper areas of the core. Due to the fact that dams are usually built in mountainous areas, the existence of faults near and far from the axis of the dam is inevitable. Investigating the seismic potential of each fault in the far or near distance and the effect of the resulting earthquake on the stability of the dam is one of the main criteria for locating the axis of the dam. Therefore, the detailed investigation of the impact of earthquakes in far and near fields on the stability of dams is of special importance in dam design and stability evaluation of existing dams. Modeling in this research has been done using Geostudio (2018) finite element software. In order to perform dynamic analysis, the records of earthquakes in Borujerd, Khorramabad and Sarpul Zahab of Kermanshah have been used. According to the results of the quasi-static analysis of the Meruk dam, it was concluded that the increase in the core thickness has caused a decrease in the stability assurance factor of the dam; Also, the results of the dynamic analysis of the studied dam showed that the maximum settlement that occurred in the dam without increasing the core width under the effect of Borujerd, Khorramabad and Sarpul Zahab earthquakes was 0.18 meters, 2.35 meters, and 0.04 meters, respectively. Is; Meanwhile, under the effect of the mentioned earthquakes, with the increase of the core thickness by 14 meters, the maximum settlement of the dam has increased by 20, 9.33 and 22.22 percent, respectively.

Keywords: Marvak Dam, Dynamic Analysis, Quasi-Dynamic Analysis, Earthquake