



بررسی عملکرد لرزه ای سد خاکی با پوسته رس مسلح

رضا نورزاد^۱، مهدی امیدوار^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران مجتمع فنی و مهندسی نوشیروانی دانشگاه مازندران

۲- کارشناس ارشد ژئوتکنیک

آدرس پست الکترونیکی مولف رابط: mnoorzad@nit.ac.ir

خلاصه

یکی از نگرانی‌های استفاده از خاک مسلح مربوط به عملکرد این سازه‌ها در برابر تکان‌های ناشی از زلزله است. در پژوهش حاضر جهت بررسی رفتار سد خاکی مسلح تحت بارگذاری زلزله، تحلیل تنش- کرنش غیرخطی با استفاده از روش تفاضلات محدود و نرم افزار FLAC انجام گردید. نتایج این پژوهش نشان داد تسلیح سبب کاهش قابل توجه تغییرشکل‌های افقی و قائم تاج سد می‌گردد. همچنین مشاهده شد که کرنش‌های بیشینه سد تحت بارگذاری زلزله در اثر تسلیح کاهش یافت. از دیگر نتایج این پژوهش این بود که در اثر تسلیح، مقادیر دامنه تاریخچه شتاب‌های تاج سد افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: سد خاکی، ژئوتکستایل، خاک چسبنده، خاک مسلح، تحلیل دینامیکی

مقدمه

استفاده از خاک چسبنده مسلح در سازه‌های ژئوتکنیکی مانند دیوار نگهدارنده و شیروانی خاکی در سال‌های اخیر به سرعت گسترش پیدا کرده است. در نتیجه این گسترش، روش‌های مختلفی جهت تحلیل و طراحی سازه‌های خاک مسلح توسعه یافته‌اند. حجم زیادی از پژوهش‌های انجام شده بر روی خاک مسلح به توسعه روش‌های تحلیل و طراحی این سازه‌ها بر پایه روش‌های حدی اختصاص یافته است [۱ و ۲ و ۳]. روش‌های حدی با توجه به سادگی، زمان کم انجام محاسبات و مطابقت نسبتاً خوب با واقعیت گسترش زیادی در تحلیل و طراحی سازه‌های خاک مسلح پیدا کردند. اما فرضیات ساده کننده و در نظر نگرفتن جنبه‌های مهمی از رفتار خاک مسلح مانند رفتار حد فاصل خاک و تسلیح کننده و الگوی تغییرشکل‌های این سازه‌ها سبب کاهش مقبولیت روش‌های حدی در ارزیابی رفتار خاک مسلح شده است [۴]. روش اجزاء محدود به کمک الگوهای رفتاری مناسب می‌تواند رفتار سازه‌های خاک مسلح را بهتر بررسی نماید. از این روش در بسیاری از پژوهش‌ها استفاده گردید و اطلاعات خوبی از رفتار این سازه‌ها بدست آمد [۵ و ۶]. از روش تفاضلات محدود نیز بطور موثری در برخی پژوهش‌ها بر روی خاک مسلح استفاده شده است [۷].

در پژوهش حاضر تحلیل دینامیکی بر روی سد خاکی مسلح انجام گردید. تحلیل‌ها به روش تنش موثر و دینامیکی غیر خطی کامل صورت گرفت. به این منظور از نرم‌افزار تفاضلات محدود FLAC استفاده شد. رفتار حد فاصل خاک و تسلیح‌کننده نیز در الگوسازی در نظر گرفته شد. با اعمال شتاب نگاشت زلزله‌های واقعی، رفتار سد و تسلیح‌کننده تحت بارگذاری دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با تغییر دو پارامتر ارتفاع سد و فاصله قائم لایه‌های تسلیح‌کننده، اثر پارامترهای مذکور بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی مسلح ارزیابی شد. در ادامه روش‌های الگوسازی مورد استفاده به همراه نتایج حاصل از تحلیل‌های پارامتری معرفی و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الگوسازی عددی سد خاکی مسلح در FLAC

به منظور انجام تحلیل دینامیکی از نرم‌افزار تفاضلات محدود FLAC در پژوهش حاضر استفاده شد. از الگوی رفتاری کشسان-خمیری کامل مور کولن برای الگوسازی پی و خاکریز سد استفاده گردید. همچنین مصالح خاکریز در تحلیل دینامیکی تابع الگوی Byrne در نظر گرفته شد. الگوی مذکور یک

^۱ استادیار دانشگاه

^۲ کارشناس ارشد



الگوی تولید فشار آب حفره‌ای اضافی تحت بارگذاری دینامیکی است. استفاده همزمان از دو الگوی مور کولن و Byrne امکان الگوسازی بهتر رفتار مصالح خاکریز سد تحت بارگذاری دینامیکی را فراهم می‌سازد.

جهت الگوسازی ژئوتکتستایل از جزء سازه‌ای یک بعدی کابل موجود در نرم افزار FLAC استفاده گردید. اندرکنش خاک و ژئوتکتستایل با استفاده از جزء تزریق شبیه‌سازی شد. تزریق در واقع نقش حد فاصل را ایفا می‌نماید و ویژگی‌های آن بر اساس ویژگی‌های حد فاصل خاک و ژئوتکتستایل بافته نشده موجود در متون فنی انتخاب گردید.

میرایی در خاک به دلیل لغزش ذرات بر روی یکدیگر و اتلاف انرژی ناشی از آن، طبیعتی هیسترسیس دارد. وقتی رفتار مصالح بر اساس الگوی رفتاری مور-کولن باشد، تغییرشکل‌های خمیری ناشی از بارگذاری دینامیکی سبب اتلاف انرژی می‌شود. برای سیکل‌های تنش در محدوده کشسان اتلاف انرژی در FLAC توسط میرایی رایله حاصل می‌شود. این میرایی از دو جزء ویسکوز جرم و سختی تشکیل شده است که بترتیب تابعی از سرعت ذرات و نرخ کرنش می‌باشند. میزان انرژی اتلاف شده توسط هر یک از این دو جزء وابسته به فرکانس است. اما با انتخاب محدوده فرکانسی مشخصی، می‌توان میرایی رایله را تقریباً به صورت مستقل از فرکانس به مسئله اعمال و اثرات وابسته به فرکانس را رفع نمود. این فرکانس که فرکانس مرکزی نام دارد، در محدوده میانی فرکانس طبیعی سازه و فرکانس بارگذاری قرار می‌گیرد و به همراه درصد میرایی به عنوان پارامترهای میرایی اعمال می‌گردند [۸ و ۹]. برای بدست آوردن فرکانس طبیعی سازه ابتدا تحلیل دینامیکی بدون اعمال میرایی انجام می‌شود و با انجام تبدیل فوری بر روی پاسخ سد، فرکانس طبیعی بدست می‌آید. برای انتخاب مقدار میرایی نیز با دانستن محدوده کرنش‌های موجود در مسئله می‌توان از منحنی‌های میرایی در برابر کرنش استفاده نمود. برای این منظور لازم است ابتدا تحلیل دینامیکی بدون میرایی انجام گردد و با ثبت تاریخچه تنش برشی در برابر کرنش برشی برای چند نقطه از سد، بیشینه کرنش‌های کشسان بدست آید و با استفاده از این کرنش، مقدار متناظر میرایی انتخاب گردد. البته کرنش بدست آمده از این روش کرنش بیشینه است و Kramer [۱۰] توصیه می‌کند ضریبی از این کرنش بیشینه، یعنی ۰.۶۵٪ آن به عنوان کرنش یکنواخت معادل حاصل از بارگذاری انتخاب گردد. روش مذکور تنها تلاشی در جهت انتخاب منطقی‌تر درصد میرایی می‌باشد. در اغلب تحلیل‌های عددی موجود در متون فنی مقدار میرایی بین پنج تا ده درصد انتخاب می‌گردد [۱۱ و ۱۲].

ویژگی‌های الگوهای عددی سد خاکی مسلح – روش‌های الگوسازی

به منظور بررسی اثر تسلیح با ژئوتکتستایل بر رفتار سد خاکی تحت بارگذاری زلزله، در پژوهش حاضر تحلیل پارامتری با در نظر گرفتن پارامترهای بارگذاری دینامیکی، ارتفاع سد و فاصله قائم تسلیح انجام گردید. ابتدا یک الگوی پایه برای هر ارتفاع ساخته شد و سپس با تغییر تنها یک پارامتر، اثر آن بر رفتار سد تحت اثر زلزله ارزیابی گردید. در این بخش جزئیات تشکیل الگوها به همراه پارامترهای انتخاب شده برای قسمت‌های مختلف ارائه می‌شود. هندسه سد توسط ناحیه‌های چهارضلعی تشکیل گردید. ناحیه در واقع به محدوده تشکیل شده توسط هر چهار گره شبکه تقاضات محدود اطلاق می‌گردد. ابعاد ناحیه‌ها باید به شکلی تعیین گردد که امکان عبور صحیح موج از الگو تحت بارگذاری دینامیکی فراهم گردد. برای ابعاد انتخاب شده برای ناحیه‌های شبکه تقاضات محدود، فرکانس بیشینه‌ای وجود دارد که می‌توان از الگو بشکل صحیح عبور داد. Kuhlemeyer and Lysmer [۱۳] رابطه زیر را بین فرکانس بیشینه مجاز و ابعاد ناحیه‌ها پیشنهاد نمودند:

$$f = \frac{C_s}{\Delta l \times 10} \quad (1)$$

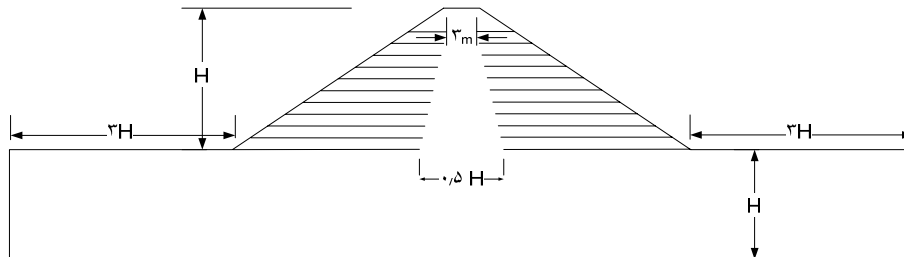
در رابطه فوق f بیشترین فرکانس قابل عبور از الگو، C_s سرعت موج برشی و Δl بزرگترین بعد ناحیه‌ها است. با توجه به مصالح سد خاکی، کمترین سرعت انتشار موج برشی مربوط به خاکریز و برابر $39/4 \text{ m/s}$ می‌باشد. بنابراین با انتخاب ناحیه‌های مربعی با بعد $0/5 \text{ m}$ ، بیشترین فرکانسی که می‌توان از الگو بشکل صحیح عبور داد بر اساس رابطه (۱) برابر $7/9$ هرتز به دست می‌آید. اما شتاب‌نگاشت زلزله‌های واقعی ممکن است شامل امواجی با فرکانس‌های بالاتر باشد. بنابراین لازم است تاریخچه شتاب زلزله‌های ورودی، برای حذف مولفه‌های فرکانسی بالای $7/9 \text{ Hz}$ اصلاح گردد. این امر توسط فیلتر نمودن انجام می‌گردد. البته بارگذاری‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر برای فرکانس‌های بالای پنج هرتز فیلتر شدند زیرا بر اثر بارگذاری دینامیکی مصالح دچار کاهش سختی می‌شوند و در نتیجه سرعت موج برشی در آنها کاهش می‌یابد.

هندسه الگوهای پایه شامل طول، عرض و ژرفای پی، ارتفاع سد، شیب بالادست و پایین‌دست سد خاکی، ارتفاع آزاد، عرض تاج و نحوه چینش ژئوتکتستایل در پوسته سد می‌گردد که در ادامه به نحوه انتخاب هر یک پرداخته خواهد شد.

به منظور بررسی اثر ارتفاع سد، از سه ارتفاع $1/5$ ، $2/5$ و $4/0$ متر در تحلیل‌ها استفاده گردید. سه فاصله قائم $1/5$ و $1/0$ متر برای ژئوتکتستایل مورد بررسی قرار گرفت. فرض شد پی سد آبرفتی است و ژرفایی معادل ارتفاع سد در تحلیل‌ها لحاظ شد. عرض پی در الگوی عددی از پاشنه و پنجه خاکریز سه برابر ارتفاع سد انتخاب گردید. طول سد با توجه به اینکه در اغلب دره‌ها با افزایش ارتفاع سد، طول تاج سد نیز افزایش می‌یابد، برای سه ارتفاع $1/5$ ، $2/5$ و $4/0$ متر به ترتیب 100 ، 200 و 300 متر انتخاب گردید. دلیل تعیین طول تاج سد امکان محاسبه حجم عملیات خاکی و در نتیجه تعیین زمان احداث لایه‌های خاکریز سد می‌باشد. هندسه سد خاکی مسلح مورد استفاده در تحلیل پارامتری در شکل (۱) به‌طور شماتیک نشان داده شده است. همان‌گونه

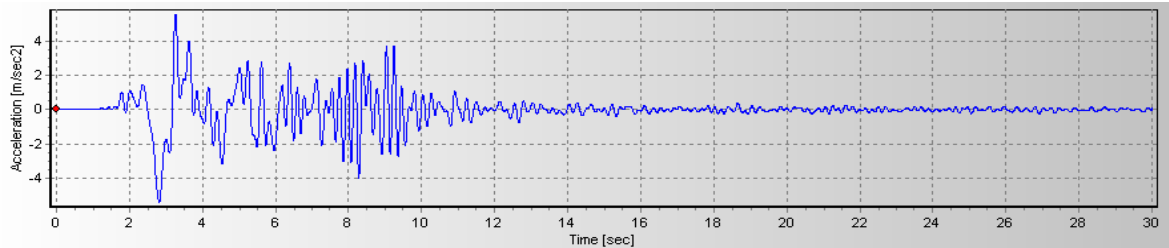
که ملاحظه می‌شود، پوسته بالادست و پایین‌دست سد توسط ژئوتکستایل مسلح گردید در حالی که ناحیه میانی سد جهت ایجاد آب‌بندی به صورت غیر مسلح باقی ماند.

جهت انتخاب شیب بالادست و پایین‌دست سد خاکی، در ابتدا شیب اولیه برای هر ارتفاع بر اساس مقادیر معمول انتخاب گردید و سپس با انجام تحلیل تنش-تنجش آزمایشی بر روی سد خاکی با شیب‌های مذکور و ارزیابی تغییرشکل‌های افقی و قائم خاکریز، شیب نهایی انتخاب شد. لازم به تذکر است در انجام هر یک از تحلیل‌های آزمایشی مذکور، کلیه مراحل الگوسازی و بارگذاری شامل تولید تنش‌های اولیه در پی، ساخت مرحله‌ای، نخستین آگیری و تراوش پایا از تراز میانی، مشابه روال مورد استفاده در الگوهای نهایی انجام گردید. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، شیب بدنه بالادست و پایین‌دست سد با ارتفاع ۱۵، ۲۵ و ۴۰ متر، به ترتیب برابر ۳، ۲/۵ و ۳/۵ افقی به یک قائم تعیین شد.

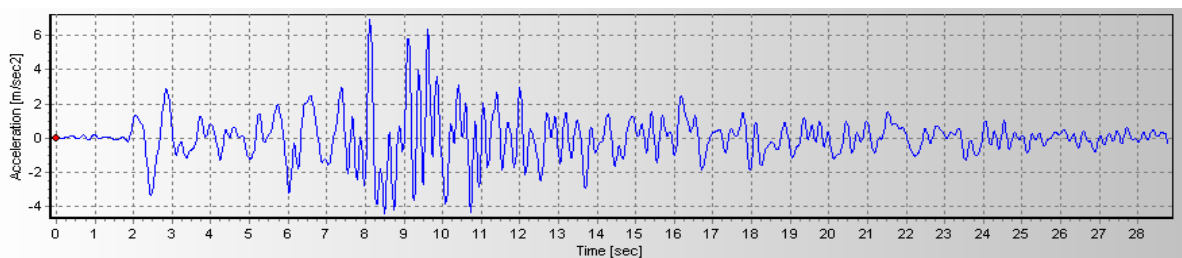


شکل ۱: شکل الگوی پایه سد خاکی با پوسته رس مسلح

شتاب‌نگاشت زلزله‌های بم و طیس به‌عنوان بارگذاری دینامیکی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. تاریخچه شتاب زلزله‌های بم و طیس پس از فیلتر نمودن و حذف فرکانس‌های بالای ۵ هرتز به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) ترسیم شده است.



شکل ۲: شتاب‌نگاشت زلزله بم



شکل ۳: شتاب‌نگاشت زلزله طیس

پارامترهای فیزیکی و مکانیکی پی و بدنه سد بر اساس مقادیر موجود در جدول (۱) انتخاب گردید. این پارامترها مربوط به حالت زهکشی شده می‌باشند زیرا تحلیل‌ها به روش تنش موثر انجام گردید. همچنین پارامترهای مربوط به ژئوتکستایل در جدول (۲) آمد.



جدول ۲: پارامترها ژئوتکتستابل

پارامتر	مقدار
ضریب کشسان (E) - Mpa	1.7×10^7
مقاومت کششی* - KN/m	۱۵
سطح مقطع** - m ²	۰/۰۰۵
محیط پیرامونی - m	۲/۰۱
جرم واحد طول - Kg/m	۰/۳

* مقدار کوچک (۱۰ N) برای مقاومت فشاری جهت جلوگیری از ناپایداری عددی پیشنهاد می‌شود
** این مقدار حاصل ضرب طول یک متر ژئوتکتستابل در ضخامت آن می‌باشد

جدول ۱: پارامترهای فیزیکی و مکانیکی پی و خاکریز

پارامتر	پی	بدنه سد
وزن مخصوص خشک (γ) - Kg/m ³	۱۹۰۰	۱۶۶۰
ضریب کشسان (E) - MPa	۵۰	۷
ضریب پواسون (ν)	۰/۳	۰/۳۵
زاویه اصطکاک داخلی (φ')	۳۵	۲۸
چسبندگی (c') - KPa	۳	۱۰
تخلخل (m)	۰/۳	۰/۳۷
ضریب نفوذپذیری (k) - m/sec	10^{-8}	10^{-9}
عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده (N1-60)	--	۲۵

پیش از اعمال زلزله به سد، تحلیل استاتیکی برای رسیدن به وضعیت تراوش پایا از تراز مخزن پر انجام گردید. بنابراین ابتدا تنش‌های پی توسط یک تابع Fish مناسب و با استفاده از ضریب k_0 برای تنش‌های افقی تولید شد. سپس ساخت سد به صورت مرحله‌ای صورت گرفت. در این مرحله خاکریز به ۱۰ لایه تقسیم گردید و با توجه به طول سد، حجم خاکریزی برای هر لایه تعیین شد و تحلیل ترکیبی در مدتی برابر با زمان احداث هر لایه انجام گردید. در پایان ساخت مرحله‌ای سد، بارگذاری آب به بالادست سد اعمال گردید و تحلیل تراوش برای رسیدن به حالت تراوش پایا انجام شد. پس از رسیدن به وضعیت تراوش پایا تحلیل استاتیکی به پایان رسید و سد برای انجام تحلیل دینامیکی آماده شد.

پس از انجام مراحل تحلیل استاتیکی، تحلیل دینامیکی انجام گردید. در این مرحله الگوی Byrnie به مصالح خاکریز اعمال شد. محاسبات جریان در طول بارگذاری زلزله غیرفعال بود و با انتخاب مقدار واقعی برای ضریب حجمی آب، اجازه تولید فشار آب حفره‌ای در اثر تغییر حجم حفرات داده شد. محاسبات در حالت تنش‌های بزرگ انجام گردید تا امکان مشاهده شکل تغییر یافته سد پس از بارگذاری دینامیکی فراهم باشد. مرز آزاد به مرزهای کناری پی اعمال گردید و در کف الگو از مرز آرام استفاده شد. میرایی رایله بر اساس روش بیان شده انتخاب شد و در فرکانس مرکزی مناسب به مصالح اعمال گردید. از آنجاییکه اعمال تاریخچه شتاب یا سرعت به مرز آرام سبب بی‌اثر شدن مرز آرام می‌گردد، بنابراین تاریخچه شتاب زلزله‌ها ابتدا به تاریخچه تنش برشی تبدیل شد و سپس بصورت شرط مرزی به کف پی اعمال شد. در نهایت تحلیل دینامیکی به مدتی برابر با زمان وقوع زلزله انجام شد. در پایان هر تحلیل، نتایج هم برای خاکریز و پی، و هم برای ژئوتکتستابل استخراج و ثبت گردید. در بخش بعد این نتایج مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

نتایج تحلیل‌ها

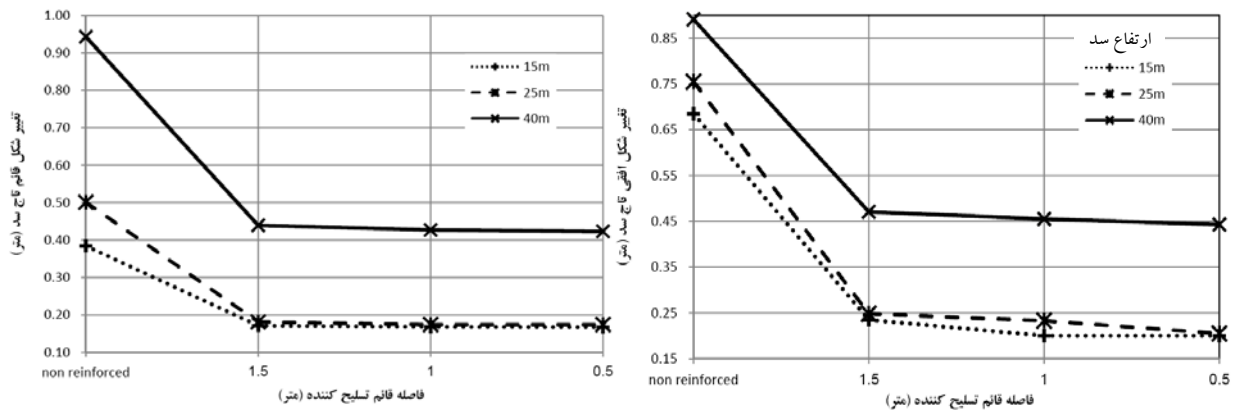
هدف از پژوهش حاضر و الگوهای شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار FLAC در بخش قبل تشریح گردید. تاریخچه شتاب دو زلزله بم و طیس برای انجام تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شد. سد خاکی مسلح با سه ارتفاع ۱۵، ۲۵ و ۴۰ متر و سه فاصله قائم ژئوتکتستابل ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر مورد بررسی قرار گرفت. مجموعاً ۲۴ تحلیل دینامیکی انجام شد تا اثر دو پارامتر مذکور بر رفتار دینامیکی سد تعیین گردد. در این قسمت نتایج تحلیل‌ها ارائه می‌شود.

تغییر شکل‌های تاج سد

به منظور بررسی اثر تسلیح بر تغییر شکل‌های سد، تاریخچه جابه‌جایی نقطه میانی تاج سد نسبت به جابه‌جایی افقی و قائم نقطه متناظر آن در کف پی توسط یک تابع Fish ساده ثبت گردید و با تاریخچه جابه‌جایی افقی و قائم سد غیر مسلح مقایسه شد. شکل‌های (۴) و (۵) مقادیر نهایی تغییر شکل‌های افقی و قائم هر یک از الگوها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تسلیح سبب کاهش قابل ملاحظه تغییر شکل‌های افقی و قائم سد گردید. تغییر شکل‌های افقی در اثر تسلیح به ترتیب برای سه ارتفاع سد ۱۵، ۲۵ و ۴۰ متر مورد بررسی، به میزان ۰/۵۵، ۰/۴۵ و ۰/۴۵ متر نسبت به خاکریز غیر مسلح کاهش یافت و تغییر شکل‌های قائم به ترتیب به میزان ۰/۳۳، ۰/۳۹ و ۰/۵۲ متر کاهش نشان داد. میزان کاهش تغییر شکل‌های افقی و قائم تاج سد در اثر تسلیح، نسبت به خاکریز غیر مسلح بر حسب درصد ارتفاع سد در شکل‌های (۶) و (۷) ترسیم شده است. بیشترین کاهش تغییر مکان

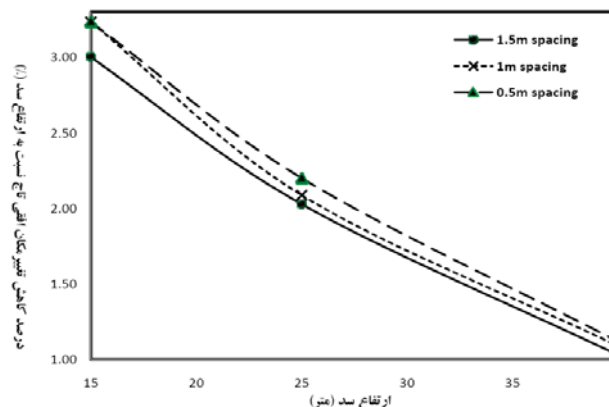


نسبی افقی تاج برای سد با سه ارتفاع ۱۵، ۲۵ و ۴۰ متر به ترتیب برابر ۳/۳۵، ۲/۰۹ و ۱/۱۵ درصد ارتفاع سد، و بیشترین کاهش تغییرمکان نسبی قائم تاج برای سه ارتفاع بیان شده به ترتیب برابر ۲/۱۸، ۱/۵۵ و ۱/۳۰ درصد ارتفاع سد حاصل گردید. اگرچه تسلیح به طور کلی سبب کاهش قابل ملاحظه تغییرشکل های تاج سد می گردد، اما مشاهده شد که بیشترین تاثیر تسلیح در سد با ارتفاع کمتر رخ داد و با افزایش ارتفاع سد از تاثیر مثبت ژئوتکستایل کاسته شد. این موضوع هم در مورد تغییرشکل های افقی وهم در مورد تغییرشکل های قائم صادق است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تسلیح سد با ارتفاع کمتر موثرتر می باشد.

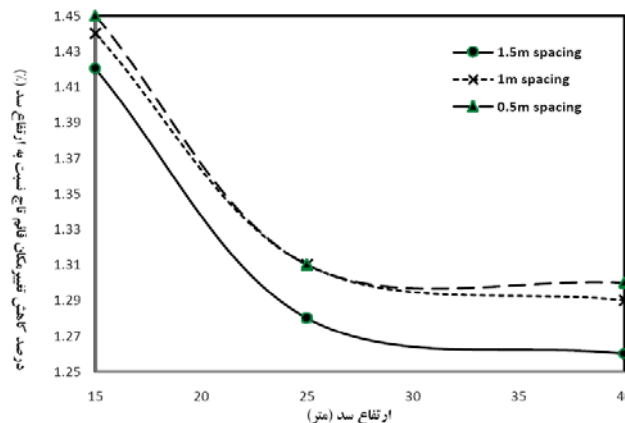


شکل ۵: میزان تغییر شکل های قائم تاج سد تحت زلزله طبرس

شکل ۴: میزان تغییر شکل های افقی تاج سد تحت زلزله طبرس



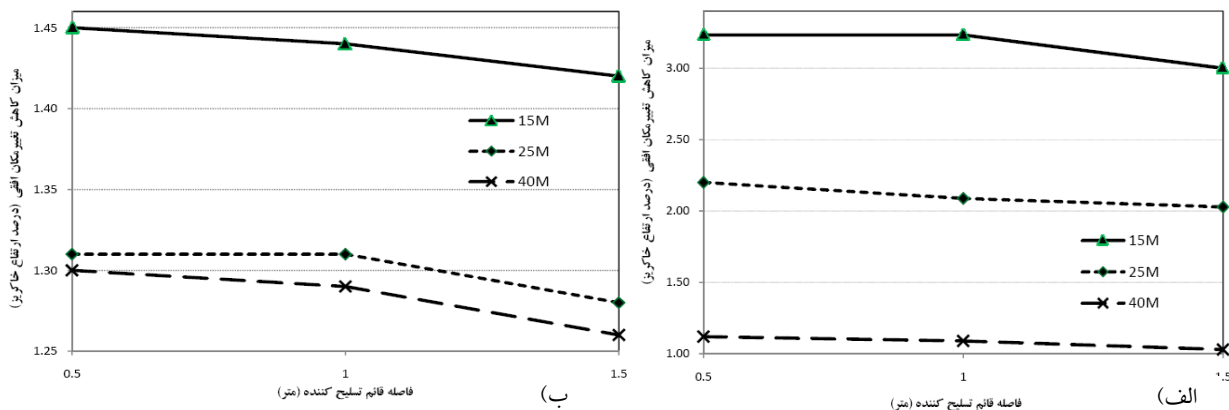
شکل ۶: اثر افزایش ارتفاع سد بر میزان کاهش تغییرمکان افقی تاج خاکریز مسلح در مقایسه با خاکریز غیر مسلح تحت زلزله طبرس



شکل ۷: اثر افزایش ارتفاع سد بر میزان کاهش تغییرمکان قائم تاج خاکریز مسلح در مقایسه با خاکریز غیر مسلح تحت زلزله طبرس



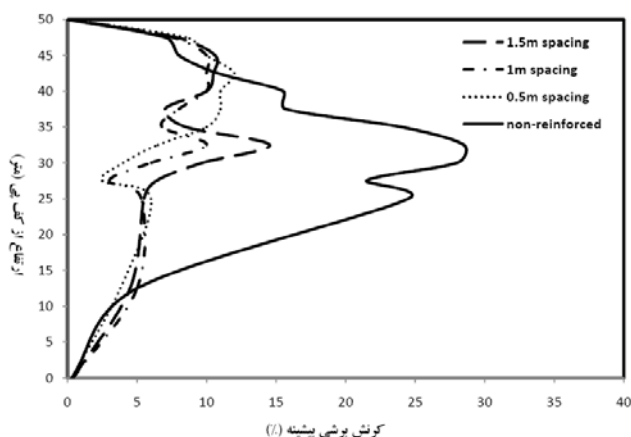
شکل (۸) اثر فاصله قائم تسلیح کننده بر میزان کاهش تغییرمکان افقی و قائم تاج خاکریز مسلح در مقایسه با خاکریز غیر مسلح را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها دیده می‌شود که تسلیح با هر سه فاصله قائم مورد بررسی سبب کاهش قابل ملاحظه تغییرشکل‌های افقی و قائم گردید. بار دیگر دیده می‌شود که تسلیح سد با ارتفاع کمتر تاثیر بیشتری بر کاهش تغییرشکل‌ها دارد.



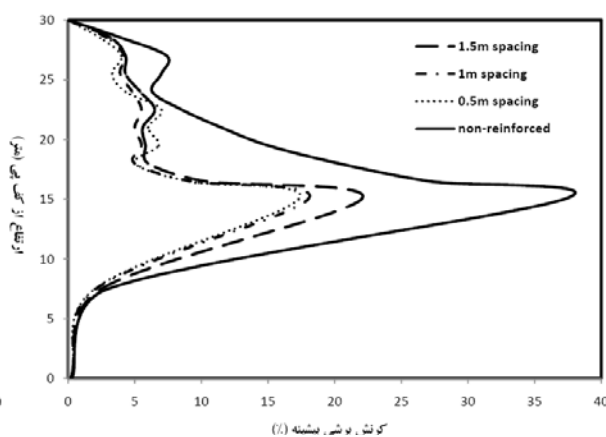
شکل ۸: الف) اثر فاصله قائم تسلیح کننده بر میزان کاهش تغییرمکان افقی تاج خاکریز مسلح در مقایسه با خاکریز غیر مسلح تحت زلزله طبس ب) اثر فاصله قائم تسلیح کننده بر میزان کاهش تغییرمکان قائم تاج خاکریز مسلح در مقایسه با خاکریز غیر مسلح تحت زلزله طبس

کرنش‌های برشی بیشینه

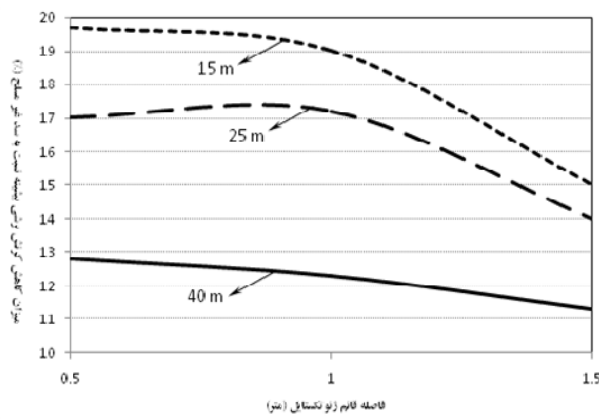
شکل‌های (۹) تا (۱۱) توزیع کرنش برشی بیشینه در ارتفاع هر یک از الگوهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. کرنش برشی بیشینه در هر سه ارتفاع مورد بررسی، با مسلح نمودن پوسته سد کاهش یافت. ملاحظه می‌گردد میزان کاهش کرنش‌های برشی بیشینه سد مسلح نسبت به سد غیر مسلح با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد و این روند با روند مشاهده شده در مورد تغییرشکل‌های تاج سد نیز مطابقت دارد. شکل (۱۲) میزان کاهش کرنش برشی بیشینه سد در اثر تسلیح را برای سه ارتفاع مورد بررسی نشان می‌دهد. در حالی که اختلاف میان کرنش برشی بیشینه سد غیر مسلح با هر یک از سدهای مسلح در هر ارتفاع قابل توجه می‌باشد، این اختلاف در مورد سدهای مسلح با فاصله قائم متفاوت لایه‌های تسلیح کمتر می‌باشد. بیشترین کاهش کرنش برشی بیشینه سد در اثر تسلیح برای سه ارتفاع ۱۵، ۲۵ و ۴۰ متر مورد بررسی به ترتیب برابر ۱۹/۷، ۱۸/۵ و ۱۲/۸ درصد به دست آمد. بنابراین تسلیح با تمامی فواصل قائم مورد بررسی در این پژوهش اثر قابل توجهی بر میزان کرنش‌های برشی بیشینه سد گذاشت. قابل ذکر است روال مذکور برای نتایج تحلیل دینامیکی تحت زلزله بم بطور مشابه به دست آمد.



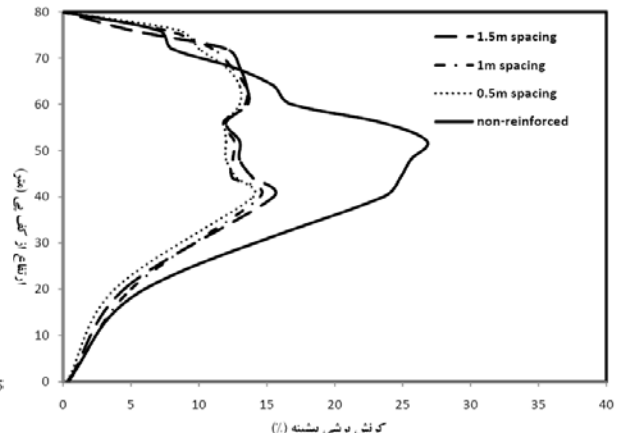
شکل ۱۰: توزیع کرنش برشی بیشینه در ارتفاع سد با ارتفاع ۲۵ متر تحت زلزله طبس



شکل ۹: توزیع کرنش برشی بیشینه در ارتفاع سد با ارتفاع ۱۵ متر تحت زلزله طبس



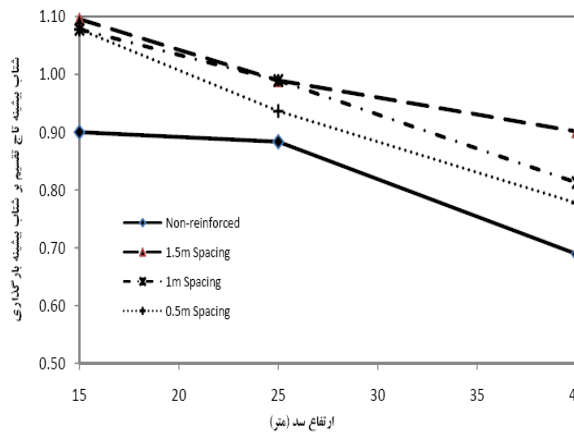
شکل ۱۲: ارتباط میان فاصله قائم تسلیح کننده و میزان کاهش کرنش های برشی بیشینه سد



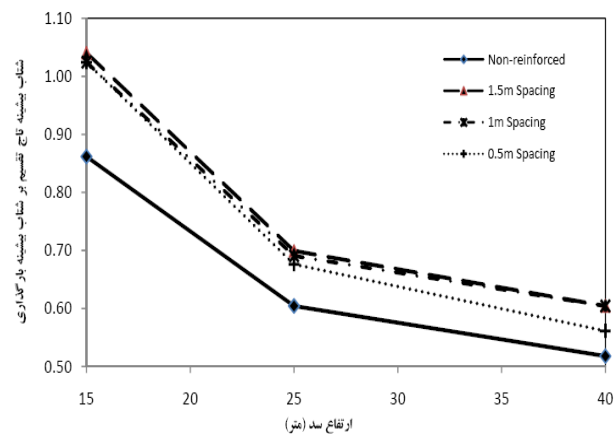
شکل ۱۱: توزیع کرنش برشی بیشینه در ارتفاع سد با ارتفاع ۴۰ متر تحت زلزله طبس

تاریخچه شتاب تاج سد

با بررسی تاریخچه‌های شتاب حاصل از تحلیل‌های دینامیکی، شتاب بیشینه تاج نسبت به شتاب بیشینه بارگذاری برای هر یک از الگوها ثبت شد تا احتمال وقوع بزرگ‌نمایی یا کوچک‌نمایی شتاب و همچنین اثر فاصله تسلیح بر این شتاب‌ها بررسی گردد. این نتایج در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ترسیم شد. بر اساس نتایج می‌توان گفت در تمامی موارد، شتاب بیشینه تاج سد مسلح از شتاب بیشینه تاج سد غیر مسلح بیشتر می‌باشد. این مشاهده منطقی است، زیرا همان‌گونه که پیشتر بررسی شد، تغییر شکل‌های سد مسلح نسبت به سد غیر مسلح کاهش یافت بنابراین در طول بارگذاری زلزله رفتار مصالح خاکریز مسلح بیش از خاکریز غیر مسلح در محدوده کشسان قرار گرفت. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که در خاکریز مسلح بزرگ‌نمایی رخ دهد. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع سد نسبت شتاب بیشینه تاج به شتاب بیشینه بارگذاری کاهش می‌یابد. این مشاهده عمدتاً ناشی از میزان نسبتاً بالای میرایی و تسلیم مصالح می‌باشد.



شکل ۱۴: مقایسه شتاب بیشینه بارگذاری با شتاب بیشینه تاج سد تحت اثر زلزله بم



شکل ۱۳: مقایسه شتاب بیشینه بارگذاری با شتاب بیشینه تاج سد تحت اثر زلزله طبس

نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل‌های دینامیکی پژوهش حاضر نشان داد که سد خاکی با پوسته رس مسلح عملکرد خوبی در برابر زلزله از خود نشان می‌دهد. برخی از نتایج تحلیل‌ها را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:



- تسلیح سد با ژئوتکستایل سبب کاهش تغییرشکل‌های افقی و قائم تاج سد تحت اثر بارگذاری زلزله می‌گردد. بیشترین کاهش تغییرشکل‌های افقی و قائم در ارتفاع پایین‌تر مورد بررسی در این پژوهش رخ داد و با افزایش ارتفاع سد، میزان کاهش تغییرشکل‌های تاج سد نیز کاهش یافت. میزان کاهش تغییرمکان افقی و قائم تاج سد در اثر تسلیح به ترتیب حدود یک تا سه و یک تا دو درصد ارتفاع سد مشاهده گردید.
- تسلیح سبب کاهش کرنش برشی بیشینه سد در اثر بارگذاری زلزله می‌گردد. میزان کاهش کرنش برشی در مقایسه با سد غیر مسلح ۱۲ تا ۱۹ درصد به‌دست آمد.
- تسلیح سد با مصالح خاک چسبنده توسط ژئوتکستایل سبب افزایش شتاب‌های تاج سد نسبت به خاکریز غیر مسلح می‌گردد.

مراجع:

- 1- Zornberg, J.G., Sitar, N. and Mitchell, J.K. (1998) *Limit Equilibrium as Basis For Design of Geosynthetic Reinforced Slopes*, Journal of Geotech. And Geoenv. Engrng., Vol.124, No.8. pp 684-698.
- 2- Michalowski, R.L. (1998) *Limit Analysis in Stability Calculations of Reinforced Soil Structures*, Geotextiles and Geomembranes, Issue No.16, pp 311-331.
- 3- Srbulov, M. (2001) *Analysis of Stability of Geogrid Reinforced Steep Slopes and Retaining Walls*, Computers and Geotechnics, Issue No.28, pp 255-268.
- 4- Nova-Roessig, L. and Sitar, N. (1998) *Centrifuge Studies of the Response of Reinforced Soil Slopes*, Proceedings of the Third Geotechnical Engineering and Soil Dynamics Conference, Geotechnical Special Publication No. 75, ASCE, pp. 458-468.
- 5- Chalaturnyk, R.J., Chan, D.H.K. and Richards, E.A. (1990) *Stresses and Deformations in a Reinforced Soil Slope*, Can. Geotech. Journal, No.27, pp 224-232.
- 6- Kotake, N., Tatsuoka, F., Tanaka, T., Siddiquee, M.S.A. and Huang, C. (2004) *FEM Simulation of Failure of Reinforced Sand Subjected to Footing Load*, Geosynthetics Intl., 11, No. 1, pp.1-18
- 7- Holtz, R.D. and Lee, W.F. (2002) *Internal Stability Analysis of Geosynthetic Reinforced Retaining Walls*, FHWA, Final Research Report, Report no. WA-RD 532.1.
- 8- Itasca Consulting Group, (2001) *FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 4.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
- 9- Zhai, E., Roth, W., Dawson, E. and Davis, C. (2004) *Seismic Deformation Analysis of an Earth Dam – A Comparison Study Between Equivalent-Linear and Nonlinear Effective-Stress Approaches*, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 3298.
- 10-Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 653p.
- 11-Vieira, C.S., Lopes, M.L. and Caldeira, L.M.M.S. (2006) *Seismic Response of a Geosynthetic Reinforced Steep Slope Using FLAC*, Proceedings of 4th International Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Hart and Verona Eds., paper 05-06.
- 12-Bathurst, R.J. and Hatami, K. (1998) *Seismic Response Analysis of a Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Wall*, Geosynthetic International, Vol. 5, Nos. 1-2, pp. 127-166.
- 13-Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973) *Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems*, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol. 99, No. SM5, pp. 421-427.