تحلیل دینامیکی اندرکنش روکش بتنی و بخش سنگ‌ریزه‌ای سدهای سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی

علی‌محمد رجبی*، دانشگاه تهران، گروه زمین‌شناسی مهندسی
علیرضا سجده، دانشگاه قم، دانشکدهٔ مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ٩٦/٠١/١٦ پذیرش ٩٧/٠٦/٠٦

چکیده

سدهای سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی به‌دلیل نداشتن وابستگی زیاد به بستر و شکل دره و نیز تکنولوژی ساده‌ترساخت، در سال‌های اخیر بیش از انواع دیگر سدها مورد توجه قرارگرفته است. رفتار این نوع سازه‌ها تحت بارگذاری زلزله به عوامل زیادی مانند روکش بتنی و اصطکاک آن با سنگ‌دانه‌ها و شرایط تکیه‌گاهی آن بستگی دارد و برای تعیین دقیق این رفتار نیاز به تحقیقات عددی با انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچهٔ زمانی است. در این پژوهش با مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار آباکوس، رفتار لرزه‌ای سدهای سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی با در نظر گرفتن پارامترهای ذکر شده بررسی شده است. به این منظور دو رکورد از زلزله‌های نزدیک گسل انتخاب شده و تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضریب اصطکاک روکش بتنی، جذب انرژی به‌میزان اندکی افزایش می‌یابد. هم‌چنین با مقیدکردن روکش بتنی به بخش سنگ‌ریزه‌ای تفاوت چشم‌گیری در تاریخچهٔ تغییرمکان نسبی تاج سد مشاهده می‌شود و در این شرایط تغییرمکان تاج سد در هر دو رکورد کاهش می‌یابد. در شرایط مقیدکردن روکش بتنی به بخش سنگ‌ریزه‌ای، جذب انرژی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته و روکش بتنی در انتهای رکورد دچار خرابی کامل شده است. به‌علاوه با افزایش تراز آب، تغییرشکل تاج سد در جهت اعمال رکورد زلزله افزایش چشم‌گیری نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که در حالت پر، بیشینه تغییرمکان نسبت به حالت خالی به‌طور میانگین ۳۰٪ افزایش یافته است.

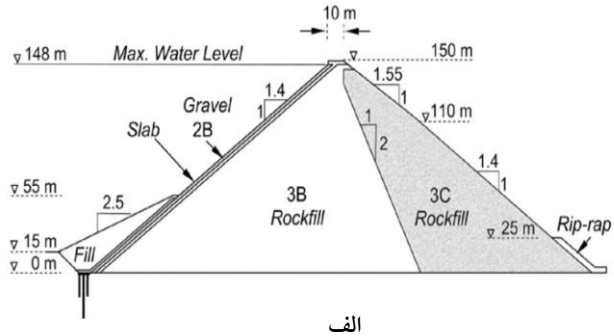
واژه‌های کلیدی: سد سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی، تحلیل دینامیکی، اجزای محدود، اندرکنش، تراز آب.

*نویسنده مسئول amrajabi@ut.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

مقدمه

سدهای سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی به‌دلیل نداشتن وابستگی زیاد به بستر و شکل دره و نیز تکنولوژی ساده‌ترساخت، در سال‌های اخیر بیش از انواع دیگر سدها مورد توجه قرارگرفته است. در این راستا سدهای سنگ‌ریزه‌ای به دلیل پایداری بیش‌تر بدنه و در دسترس بودن مصالح سنگی، جای‌گزین مناسبی برای سدهای خاکی محسوب می‌شوند. از طرف دیگر از آن‌جاکه نفوذپذیری مصالح سنگی بسیار بیش‌تر از سایر مصالح است، از این‌رو، روش‌های مختلفی برای آب‌بندی این نوع سدها به‌کارگرفته می‌شود. یکی از این روش‌ها استفاده از پوشش نفوذناپذیر بتن‌آرمه در بالادست این سدها است. این نوع خاص سدهای سنگ‌ریزه‌ای به‌نام سدهای سنگ‌ریزه‌ای با رویهٔ بتنی (CRFD[1]) نامیده می‌شوند [۱]، [۲]. مصالح بدنه سدهای سنگ‌ریزه‌ای با رویهٔ بتنی مانند سدهای خاکی محدوده وسیع‌تری از دانه‌بندی را تشکیل می‌دهد. با این تفاوت که ابعاد دانه‌های آن نسبت به بدنهٔ سدهای خاکی درشت‌تر است. در این نوع سدها شیب بالادست و پایین‌دست معمولاً تندتر از سدهای خاکی انتخاب می‌شود زیرا پایداری بیش‌تری نسبت به سدهای خاکی دارند. بنابراین حجم مصالح خاکی و سنگی مصرفی در آنها کم‌تر است. عنصر نفوذناپذیر دراین نوع سدها رویهٔ بتنی است و به‌دلیل اهمیت عملکردش باید مورد توجه ویژه قرار گیرد. در شکل ۱ مقطع و نمای سد مسوچورا در یونان به‌عنوان نمونه‌ای از سدهای سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی نشان داده شده است [۳]، [٤].



الف

1. Concrete-Faced Rockfill Dams

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]



شکل ۱. الف) مقطع و ب) نمای سد مسوچورای یونان به‌عنوان نمونه‌ای از سدهای سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی [٤]

در سال‌های اخیر تحلیل پایداری در بیش‌تر سدهای سنگ‌ریزه‌ای با رویه بتنی به‌وسیلهٔ طراحان انجام نشده است و شیب‌های جانبی صرفاً بر پایهٔ تجارب و بدون محاسبه انتخاب شده است. بر اساس یک قاعده کلی شیب جانبی را می‌توان برابر با شیب پایدار خاک‌ریزی از مصالح بدنه و عمدتاً در حدود ۱:۱/۳ تا ۱:۱/٤ (افقی: قائم) انتخاب کرد. پایداری این سدها در برابر بارگذاری زلزله از جمله موضوعاتی است که اخیرا به‌وسیلهٔ محققان مختلف بررسی شده است. روشی مناسب برای بررسی رفتار این سدها، استفاده از روش اجزای محدود است. بررسی‌های محققان گذشته نشان می‌دهد که شبیه‌سازی اجزای محدود می‌تواند رفتار سدهای سنگ‌ریزه‌ای با پوشش بتنی را به‌نحو مناسبی پیش‌بینی کند [٥]، [٦]. ژانگ[1] و ژانگ (۲۰۰۹) مدل‌سازی عددی اندرکنش خاک–سازه را در یک سد سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی بررسی کردند [٦]. در این پژوهش به‌منظور شبیه‌سازی جداشدگی دو سطح و تماس مجدد روکش بتنی با سطح سنگ‌ریزه‌ای سد، یک المان تماسی با تعریف خرابی الاستیک–پلاستیک[2] در فرایند مدل‌سازی منظور شده است. آن‌ها یک المان تماسی با تعریف خرابی الاستیک–پلاستیک[3] برای شبیه‌سازی جداشدگی دو سطح و تماس مجدد روکش بتنی با سطح سنگ‌ریزه‌ای سد را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که اندرکنش در نظر

1. Zhang
2. Elastic-plastic-failure
3. Elastic-plastic-failure

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

گرفته شده تأثیر چشم‌گیری بر دقت شبیه‌سازی سد دارد [٦]. لیو و همکاران (۲۰۱٤) با انجام آزمایش میزلرزه‌ای روی مدل بزرگ مقیاس سد سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی، چهار روش مقاوم‌سازی شامل: مقاوم‌سازی ناحیهٔ بالایی با ژئوگرید، محافظت از سطح شیب بخش پایین دست با بلوک سنگی، جای‌گزینی ناحیهٔ بالایی سد با مصالح سنگ‌ریزه‌ای همراه با تزریق سیمان و جای‌گزینی ناحیهٔ بالایی سد با لایه بتنی را بررسی کردند [۷]. نتایج نشان داد روش‌های مقاوم‌سازی استفاده شده می‌تواند یک‌پارچگی سد را افزایش داده و تغییرشکل‌ها را به‌طور چشم‌گیری کاهش دهد [۷]. بین و همکاران (۲۰۱۲) شبیه‌سازی سه‌بعدی سد سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی زیپینگ‌پو چین را با استفاده از مدل پلاستیسیته عمومی شده در حین ساخت انجام دادند [۸]. نتایج نشان داد مدل شبیه‌سازی شده انطباق مناسبی با مقادیر حاصل از رفتارنگاری سد دارد. پژوهش‌های مشابهی نیز به‌وسیلهٔ سایر محققان انجام شده است [۹]، [۱۰].

شبیه‌سازی دقیق رفتار سد در نرم‌افزار آباکوس[1] [۱۱]، نیازمند مدل‌سازی دقیق هندسه، مصالح، بارگذاری، شرایط تکیه‌گاهی، اندرکنش‌های موجود و مش‌بندی با ابعاد مناسب است. معمولاً در بررسی‌های مشابه، به بررسی رفتار سد در بارگذاری استاتیکی بسنده شده است [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]. سالمی و میرقاسمی (۱۳۹۳)، تماس بین رویهٔ بتنی و سنگ‌ریزهٔ بستر آن، هم‌چنین تماس دال‌های بتنی مجاور را در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی کردند. رفتار بتن تحت بارگذاری سد الاستوپلاستیک فرض شد و از مدل رفتاری موهر-کولمب برای مصالح سنگ‌ریزه‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد با تعریف سطوح تماس توزیع متفاوتی از تنش در رویهٔ بتنی و شتاب در تاج سد ایجاد می‌شود [۱۵].

با توجه به این‌که در پژوهش‌های پیشین، اثر آب پشت سد در تحلیل‌های لرزه‌ای کم‌تر بررسی شده است، در این پژوهش در نظر است ضمن مدل‌سازی دینامیکی در محیط نرم‌افزار آباکوس، رفتار یک سد سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی بررسی شده و اندرکنش بین رویهٔ بتنی و بخش سنگ‌ریزه‌ای سد و نیز تأثیر تغییر تراز آب در پایداری سد در شرایط دینامیکی بررسی شود.

1. Abaqus V. 6.14.2

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

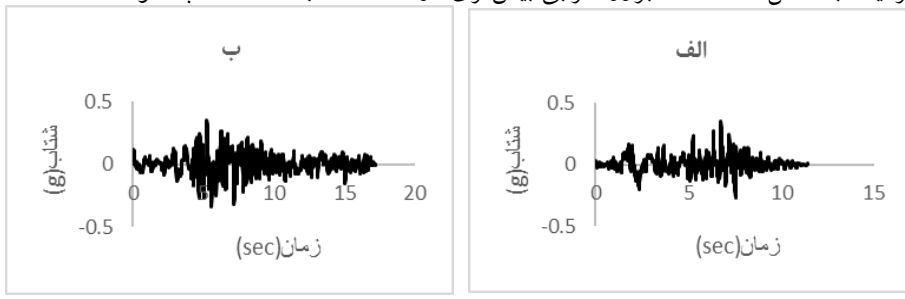
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

روش تحقیق

در این پژوهش، رفتار یک سد سنگ‌ریزه‌ای با روکش بتنی در بارهای ناشی از زلزله بررسی شده است. به این منظور از زلزله‌های نزدیک گسل با عمق کانونی کم‌تر از ۱۵کیلومتر استفاده شده است. هم‌چنین به‌منظور بررسی رفتار سد در مقابل بارهای دینامیکی، اندرکنش بین رویهٔ بتنی و بخش سنگ‌ریزه‌ای سد بررسی شده و در نهایت پارامترهایی از قبیل تغییرمکان، انرژی جذب شده و برش تکیه‌گاهی بررسی شده‌اند. بر این اساس، در این پژوهش ضمن استفاده از روش اجزای محدود و شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار آباکوس، ابتدا با بهره‌گیری از نتایج تحقیقات قبلی و تحلیل مودال و تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاش سد با استفاده از دو زلزله مبنا، صحت‌سنجی مدل انجام شده است. سپس اندرکنش روکش بتنی و بخش سنگ‌ریزه‌ای سد و هم‌چنین تأثیر تغییر تراز آب در پایداری سد تحت بارگذاری دینامیکی بحث و بررسی شده است.

۱. مشخصات زلزله‌های درنظرگرفته شده

در شکل ۲ رکورد زلزله‌های طبس (سال ۱۳۵۷ با بزرگای ۷/٤ در مقیاس ریشتر) و سان فرناندو (سال ۱۳٤۹ با بزرگای ٦/٦ ریشتر) نشان داده شده است. رکوردها با استفاده از برنامه سایزموسیگنال[1] نرمالیزه شده و زمان مؤثر رکورد تعیین و اعمال شده است. با توجه به زمان-بر بودن و محدودیت فرایند مدل‌سازی سعی شده تا رکوردهایی با ماهیت ضربه‌ای و از نوع نزدیک به گسل که احتمال بروز خرابی بیش‌تری در سد داشته باشند، انتخاب شود.



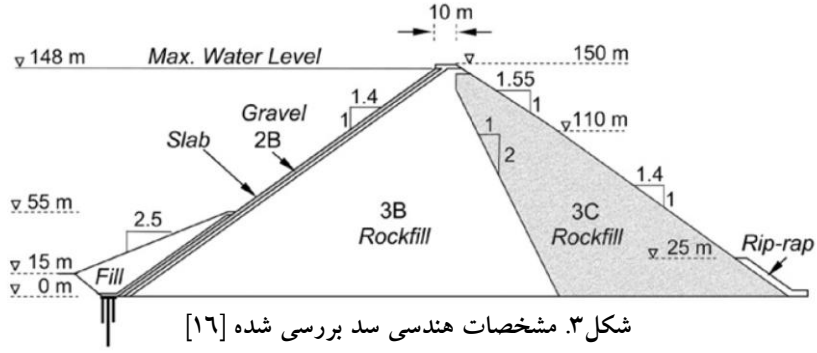
شکل۲. تاریخچهٔ رکورد شتاب نرمالیزه شده با شتاب g۰/۳۵. برای زلزله‌های الف) سان فرناندو، ب) طبس

1. Seismosignal

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

۲. صحت‌سنجی

در این پژوهش صحت‌سنجی مدل با استفاده از نتایج بررسی داکولاس(۲۰۱۲) [١٦] روی سد مسوچورا در یونان، انجام شده است. در پژوهش مذکور مدل‌سازی سد انجام گرفته و فرکانس ۱۰ مود اول استخراج شده است. مقادیر این مودها در مقالهٔ حاضر برای انجام صحت‌سنجی با استفاده از تحلیل مودال در نرم‌افزار اباکوس استفاده شده است. شکل ۳ مشخصات هندسی مقطع سد را نشان می‌دهد.



شکل۳. مشخصات هندسی سد بررسی شده [١٦]

سد موردنظر با اجرای یک به‌یک لایه‌ها شامل لایهٔ بتنی و لایه‌های 2B، 3B و 3C (شکل ۳) و هم‌چنین آرماتورهای داخل لایهٔ بتنی سد، مدل شده است. مشخصات مصالح بتن با استفاده از معادلهٔ رفتاری پلاستیسیته آسیب دیده، تعریف شده است. مطابق مقادیر ذکر شده در مقالهٔ مرجع داکولاس (۲۰۱۲) [١٦]، چگالی بتن برابر۲۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. هم‌چنین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن به‌ترتیب برابر با ۲۵، ۳ و ۲۹۰۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون آن ۰/۲ در نظر گرفته شده است. در این پژوهش هم‌چنین برای شبیه‌سازی روکش بتنی از المان‌های پوسته‌ای چهارگرهی و برای تعریف مشخصات مصالح سنگ‌ریزه از مدل رفتاری دراکر پراگر استفاده شده است. چگالی و ضریب پواسون برای لایه‌های 2B، 3C و 3B به‌ترتیب ۲۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۳۵ مطابق مقادیر ذکر شده در مقالهٔ مرجع، در نظر گرفته شده است. مقادیر مدول برشی برای این لایه‌ها، به‌ترتیب برابر با ۸/۹۳ ، ۲/۸۹ و ۳/۸۵ گیگاپاسکال منظور شده است. به‌منظور انجام شبیه‌سازی، قسمتی که سازه سد به تکیه‌گاه سنگی اطراف و کف متصل شده است به‌عنوان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

تکیه‌گاه درنظر گرفته شده و تنها بخش سنگ‌ریزه‌ای و بتنی سد شبیه‌سازی شده است. براین اساس با فرض صلب بودن بستر سنگی، نیازی به درنظر گرفتن پی سد وجود ندارد. این روش در اغلب مقالات موجود در ادبیات تحقیق به‌کار گرفته شده است. تمامی سطوح زیرین در محل بستر سد به‌عنوان تکیه‌گاه گیردار در نظر گرفته شده‌اند تا حالت واقعی را که سد به سنگ بستر و تگیه‌گاه متصل می‌شود، شبیه‌سازی کند. اندرکنش لایه‌های سد به‌صورت بستن درجات آزادی متناظر سطوح تماس انجام شده است. برای تعریف اندرکنش لایهٔ بتنی و سد از تعریف اندرکنش مماسی و نرمال سطح به سطح با ضریب اصطکاک ۰/۵ استفاده شده است. در مرحلهٔ بعد مش‌بندی با استفاده از المان های پوسته‌ای چهارگرهی، المان سه‌بعدی شش وجهی هشت‌گرهی و المان‌های هرمی چهارگرهی انجام شده است. برای تعریف میرایی مصالح، از میرایی رایلی استفاده شده است. هم‌چنین طول مورد نیاز برای دریاچه مخزن سد، طول مؤثر بوده است و با انجام چندین تحلیل به‌دست آمده است. به‌طوری که حداقل طول لازم برای دریاچه مخزن سد به‌دست آید و تعداد المان ها در مدل عددی بیش از مقدار لازم نباشد.

با انجام تحلیل فرکانسی سد، مشخصات ۱۰ مود اول آن استخراج شده است. نتایج حاصل از این تحلیل برای۱۰ مود اول در جدول ۱ نشان داده شده است

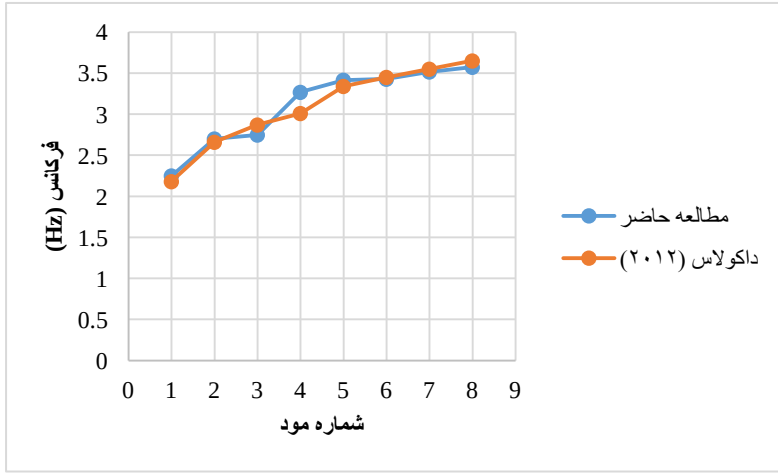
جدول۱. نتایج تحلیل مودال سد مورد نظر، استخراج شده از نرم‌افزار آباکوس

شماره مد	مقادیر ویژه	فرکانس		جرم نرمال شده
		(رادیان / زمان)	(سیکل/ زمان)	($\times 10^{8}$)
۱	۵/۰۶۱۳	۲/۲۴۹۷	۰/۳۵۸۰۶	۱۹/۳۱
۲	۷/۲۹۰۰	۲/۷۰۰۰	۰/۴۲۹۷۲	۱۱/۵۲
۳	۷/۵۵۲۷	۲/۷۴۸۲	۰/۴۳۷۳۹	۱۵/۴۴
۴	۱۰/۶۸۰	۲/۲۶۸۱	۰/۵۲۰۱۳	۱۲/۶۹
۵	۱۱/۶۶۷	۳/۴۱۵۸	۰/۵۴۳۶۴	۷/۴۷
۶	۱۱/۷۵۰	۳/۴۲۷۸	۰/۵۴۵۵۵	۸/۱۱
۷	۱۲/۳۶۳	۳/۵۱۶۱	۰/۵۵۹۶۱	۱۰/۹۶
8	۱۲/۷۷۰	۳/۵۷۳۵	۰/۵۶۷۶۴	۱۱/۸۳
۹	۱۴/۵۴۹	۳/۸۱۴۳	۰/۶۰۷۰۶	۲۲/۷۶
۱۰	۱۶/۷۵۶	۴/۰۹۳۴	۰/۶۵۱۴۸	۱۳/۸۵

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

شکل٤ نتاج صحت‌سنجی یا به‌عبارتی، مقایسه نتایج فرکانس مودهای ارتعاش طبیعی اول تا دهم حاصل از تحلیل عددی در این پژوهش و نتایج داکولاس (٢٠١٢) را نشان می‌دهد. مطابق شکل ٤ انطباق مناسبی میان نتایج این دو پژوهش وجود دارد. بیش‌ترین میزان اختلاف مربوط به مود چهارم و برابر ١٠٪ است.



شکل٤. مقایسهٔ نتایج حاصل از پژوهش حاضر و داکولاس (٢٠١٢) برای فرکانس مودهای ارتعاش طبیعی اول تا دهم

پس از اطمینان از دقت نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی، تأثیر اندرکنش بین روکش بتنی و بخش سنگ‌ریزه‌ای سد و هم‌چنین تراز آب روی رفتار سد بررسی شده است. تحلیل دینامیکی‌غیرخطی با در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ انجام شده و بار وارده به نمونه‌ها، در گام اول وزن سد و در گام بعد تاریخچهٔ شتاب زلزله‌های طبس و سان فرناندو در نظرگرفته شده است.

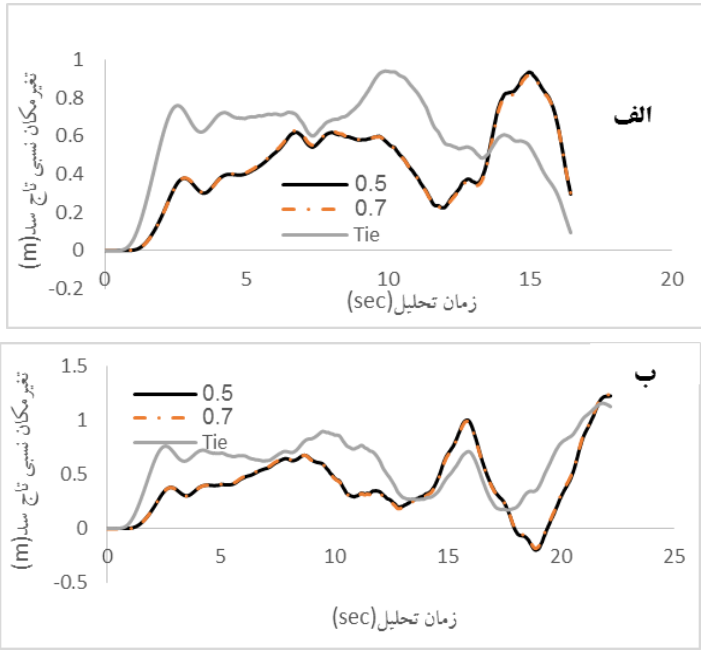
نتایج و بحث

١. اندرکنش بین روکش بتنی و بخش سنگ‌ریزه ای سد

چنان‌که پیش‌تر ذکر شد به‌منظور بررسی اندرکنش بین روکش بتنی و بخش سنگ‌ریزه‌ای بر رفتار سد، دو رکورد زلزله به سد وارد شده و تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده است. شکل ٥ هریک از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

رکورد های بررسی شده را در شرایط ضریب اصطکاک بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگ‌ریزه‌ای برابر با ۰/۵، ۰/۷ و هم‌چنین در حالت قید کامل روکش سد به بخش سنگ‌ریزه‌ای را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در ۵ ثانیه اول تحلیل، بار وزن سازه به آن اعمال شده و بعد از آن در حالی که بار وزن بر روی سازه وجود دارد، رکورد زلزله به‌صورت شتاب به تکیه‌گاه‌های سازه وارد شده است.



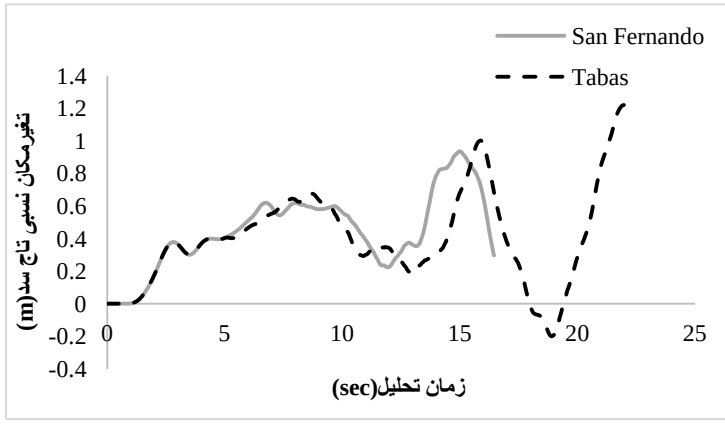
شکل۵. تغییرمکان افقی تاج سد نسبت به کف آن تحت زلزله‌های الف) سان فرناندو، ب) طبس، به‌ازای ضرایب اصطکاک بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگ‌ریزه‌ای برابر با ۰/۵، ۰/۷و قید کامل روکش بتنی به بخش سنگ‌ریزه‌ای

مطابق شکل ۵، افزایش ضریب اصطکاک بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگ‌ریزه‌ای از ۰/۵ به ۰/۷ تأثیری بر تغییرمکان تاج سد در جهت اعمال بار زلزله نداشته است. با این حال وقتی روکش بتنی به بخش سنگ‌ریزه‌ای متصل شده است، تفاوت چشم‌گیری در تاریخچهٔ تغییرمکان نسبی تاج سد مشاهده می‌شود. در تمامی موارد، تغییرمکان ناشی از وزن سد با متصل کردن روکش بتنی به بخش سنگ‌ریزه‌ای افزایش یافته است. دلیل این موضوع را می‌توان عدم امکان جدایی روکش از بخش سنگ‌ریزه‌ای زیرین و در نتیجه نشست همراه با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

این بخش دانست که باعث می‌شود بخش بتنی تاج سد در حالتی که به بخش زیرین اتصال کامل پیدا کرده است، تغییر مکان بیش‌تری را تجربه کند. با این حال پس از اعمال بار زلزله، تغییر مکان تاج سد در حالت اتصال روکش به بخش سنگ‌ریزه‌ای، بدون امکان لغزش و جداشدگی در هر دو رکورد کاهش یافته است. در شکل ٥ در همه حالات در انتهای نمودارها تغییرمکان به صفر نرسیده است. دلیل این موضوع اعمال زلزله در زمان مؤثر و حذف ٥ درصد انرژی اول و آخر آن است. از طرف دیگر، در ارتعاش آزاد پس از مدتی تغییرمکان به‌سمت تغییرمکان نهایی و ماندگار سازه میل می‌کند. در این پژوهش، به‌دلیل حجم بسیار بالای تحلیل و زمان‌بر بودن آن، امکان بررسی رفتار در بخش ارتعاش آزاد وجود نداشته است و بنابراین نمی‌توان تغییرمکان‌های به‌وجود آمده در انتهای تحلیل را تغییرشکل ماندگار دانست. شکل ٦ تغییرمکان نسبی تاج سد

شکل ٦. تغییرمکان افقی تاج نسبت به کف سد تحت زلزله‌های انتخابی (سان فرناندو و طبس)



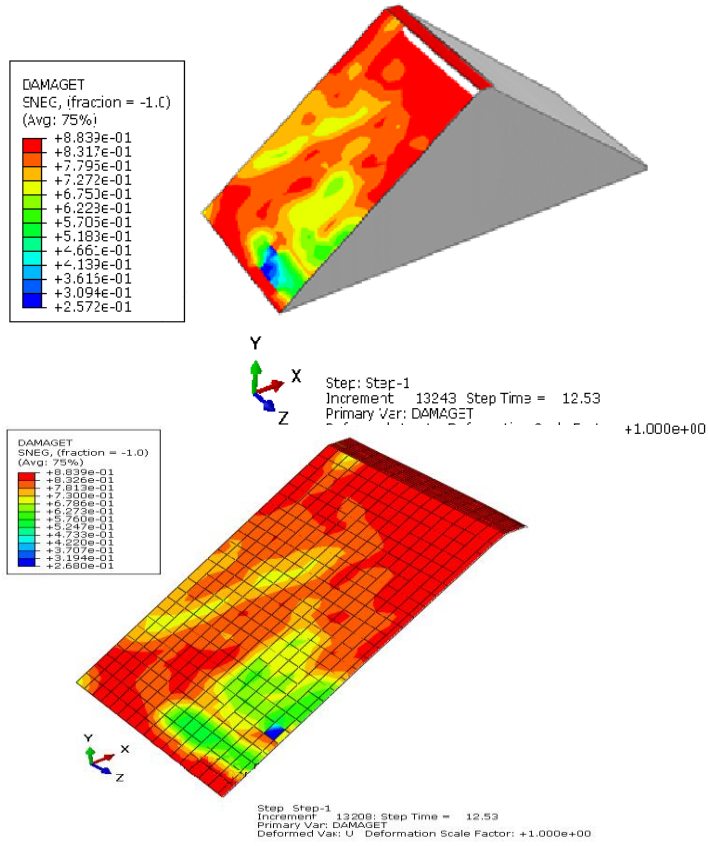
را برای دو زلزله وارد شده با ضریب اصطکاک بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگ‌ریزه‌ای برابر با ٠/٥ نشان می‌دهد. مطابق شکل ٦، بیش‌ترین میزان تغییرمکان مربوط به زلزله طبس و سپس سان‌فرناندو است. هم‌چنین محتوای انرژی بالای رکورد طبس در ایجاد تغییرمکان بزرگ‌تر نسبت به سایر رکوردها مؤثرتر بوده است.

شکل٧ میزان خرابی کششی روکش بتنی در سه حالت بررسی شده (ضریب اصطکاک بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگ‌ریزه‌ای برابر با ٠/٥، ٠/٧ و هم‌چنین حالت قید کامل روکش

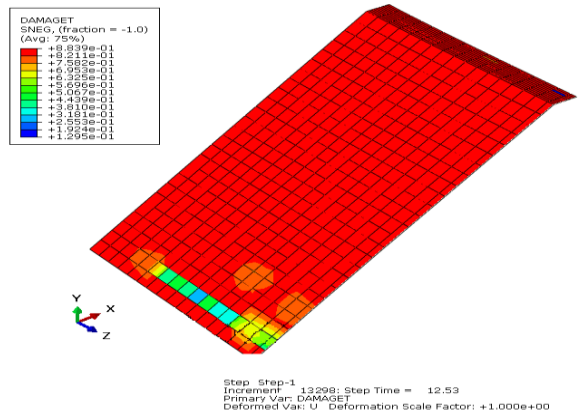
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

سد به بخش سنگ‌ریزه‌ای) را برای زلزله طبس نشان می‌دهد. برای سادگی، سد از وسط در جهت محور Z برش زده شده است. در شکل ۷، کمیت خرابی عددی بدون بعد است که مقدار آن از ۰ (بدون آسیب) تا ۱ (خرابی‌کامل) در تغییر است.

مطابق با شکل ۷، اگر ضریب اصطکاک بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگ‌ریزه‌ای ۰/۵ باشد کم‌ترین خرابی را نسبت به ضریب اصطکاک ۰/۷ و حالت مقید دارد. هم‌چنین حالت مقید دارای بیش‌ترین خرابی است. در این حالت چون اتصال بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگ‌ریزه‌ای کامل است، کل جابه‌جایی قسمت سنگ‌ریزه‌ای به رویهٔ بتنی منتقل شده و در نهایت باعث خرابی بیش‌تر قسمت رویهٔ بتنی نسبت به بقیه حالت‌ها می‌شود.



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]



شکل۷. مقایسهٔ خرابی کششی روکش بتنی در سه حالت؛ الف) ضریب اصطکاک ۰/۵، ب) ضریب اصطکاک ۰/۷، ج) حالت مقید

۲. تاثیر تراز آب پشت سد بر عملکرد آن

در این مرحله، تأثیر تراز آب واقع در پشت سد بر عملکرد آن تحت بار زلزله بررسی شده است. به این منظور مخزن سد در سه حالت خالی، نیمه پر و پر (۹۰ درصد ارتفاع سد) تحلیل شده است. هر یک از حالات بررسی شده، تحت رکورد زلزله‌های سان فرناندو و طبس بررسی شده‌اند (شکل ۸).

سیال آب با استفاده از معادله حالت Us-Up یعنی رابطهٔ فشار- حجم- انرژی داخلی هوگونیوت و مطابق با رابطهٔ (۱) تعریف شده و وسیکوزیته آب برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است.

$$U_S = C_0 + S.U_P \qquad (۱)$$

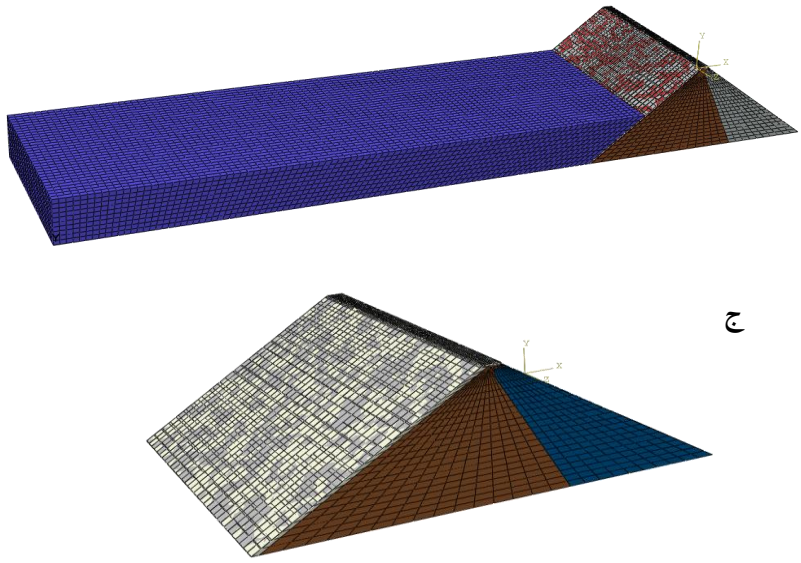
در این رابطه C_0 سرعت صوت در محیط، S ثابت تجربی و Up بیان‌گر سرعت ذرات سیال است. در این بررسی اندرکنش آب و روکش بتنی به‌صورت بدون اصطکاک شبیه‌سازی شده است. شکل ۹ رابطهٔ بین تغییر مکان نسبی تاج سد در سه حالت خالی، نیمه‌پر و پر را به‌ترتیب برای زلزله سان فرناندو وطبس نشان می‌دهد.



الف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

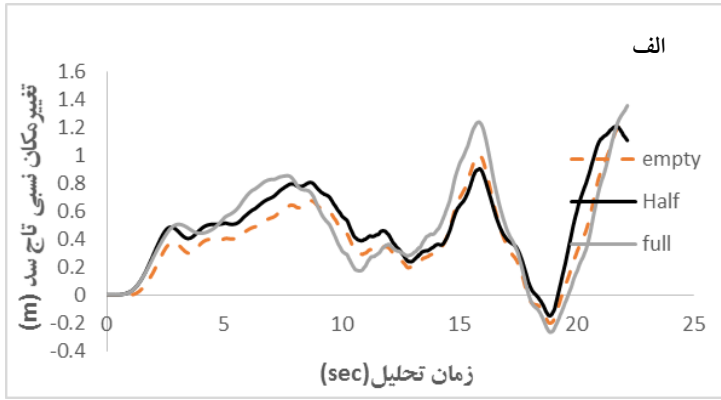


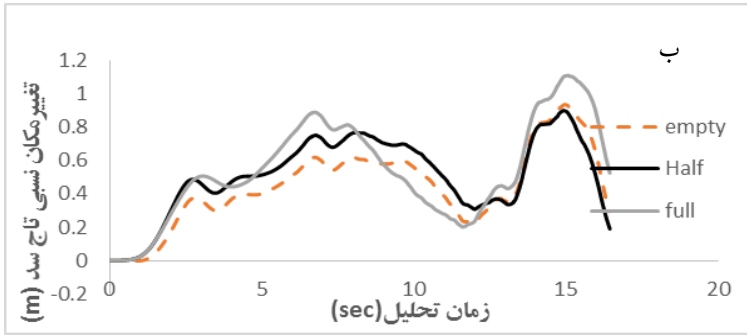
شکل۸. مدل‌های سد بررسی شده **در سه حالت؛ الف) پر، ب) نیمه‌پر، ج) خالی**

مطابق شکل ۹، برای هر دو زلزله، با افزایش تراز آب، تغییرشکل تاج سد در جهت اعمال رکورد زلزله نیز افزایش نسبتاً قابل ملاحظه‌ای داشته است، به‌گونه‌ای که در حالت پر، بیشینه تغییرمکان نسبت به حالت خالی حدود۵۰٪ افزایش نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ میزان خرابی پوشش بتنی در سه حالت سد خالی، نیمه‌پر و پر برای زلزله طبس با هم مقایسه شده است.

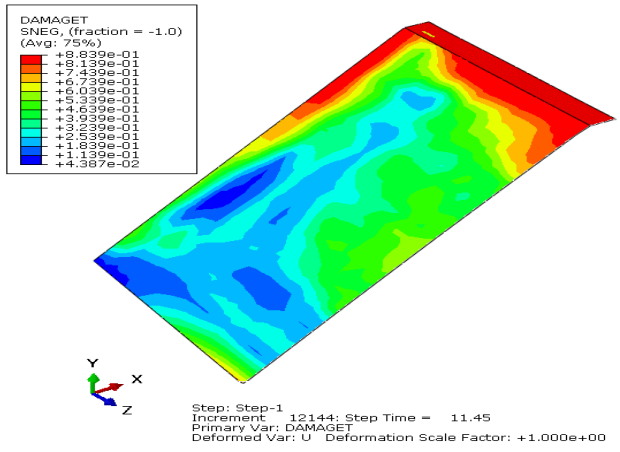
مطابق با شکل ۱۰، به‌دلیل عدم توزیع یکنواخت بار در ارتفاع روی روکش بتنی (که سخت‌ترین بخش سد است)، در حالت نیمه‌پر بیش‌ترین میزان خرابی در روکش‌بتنی سد اتفاق افتاده است. به‌عبارتی در حالت نیمه‌پر در حین بارگذاری زلزله، به‌دلیل فشار وارده از آب به سد در نیمی از ارتفاع سد، خط شکست از محل سطح آب اغاز شده و سپس انتشار یافته است. این موضوع باعث شده تا شکست بیش‌تری در رویهٔ بتنی در حالت نیمه‌پر اتفاق بیفتد. در حالت پر، هر چند نیروی کلی وارد به سد بیش‌تر است اما این نیرو به‌طور یکنواخت‌تری اعمال شده و در نتیجه تغییرشکل سد در حالت پر از حالت نیمه‌پر بیش‌تر است. به هرحال چنان‌که انتظار می‌رود میزان خرابی در حالت پر، به‌طور چشم‌گیری بیش‌تر از حالت سد خالی است

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]



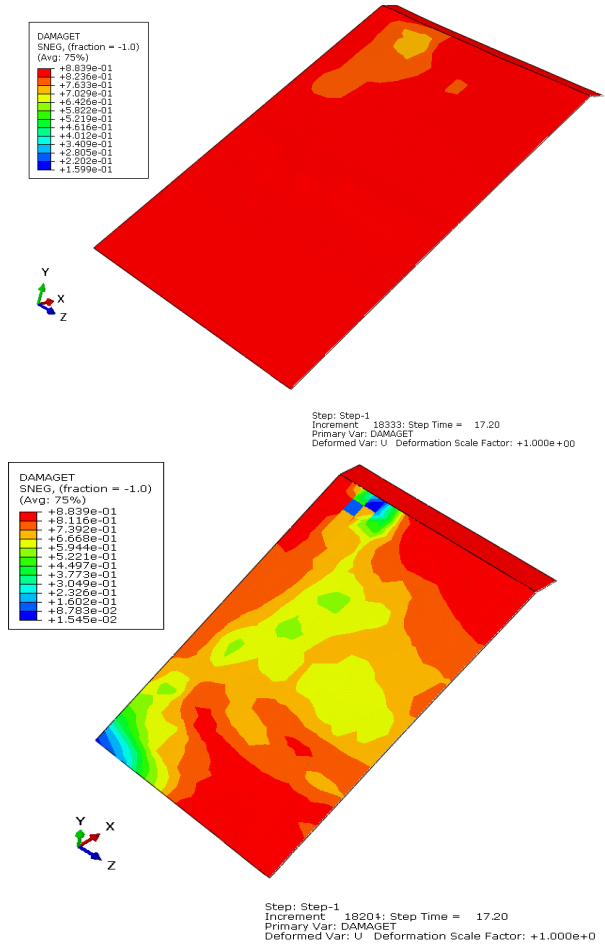


شکل۹. تغییرمکان نسبی تاج سد در سه حالت خالی، نیمه‌پر و پر برای زلزله‌های الف) طبس و ب) سانفرناندو



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]



شکل۱۰. مقایسهٔ خرابی روکش بتنی تحت زلزله طبس در سه حالت؛ الف) خالی، ب) نیمه پر و ج) پر

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، رفتار لرزه‌ای سدهای سنگ‌ریزه‌ای با روکش‌بتنی بررسی شده است. به این منظور، در ابتدا صحت‌سنجی با استفاده از نتایج تحقیقات قبلی انجام شده است. درگام بعد تحلیل دینامیکی غیرخطی با درنظرگرفتن تغییرشکل‌های بزرگ برای نمونه‌هایی که تحت رکورد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

شتاب زلزله قرار گرفته‌اند، انجام شده و نتایج بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، افزایش ضریب اصطکاک بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگ‌ریزه‌ای از ۰/۵ به ۰/۷تأثیر چشم‌گیری بر تغییرمکان تاج سد در جهت اعمال بار زلزله نداشته است. هم‌چنین با مقیدکردن روکش بتنی به بخش سنگ‌ریزه‌ای تفاوت چشم‌گیری در تاریخچهٔ تغییرمکان نسبی تاج سد مشاهده شده و هم‌چنین تغییرمکان ناشی از وزن سد افزایش یافته است. دلیل این موضوع را می‌توان عدم امکان جدایی روکش از بخش سنگ‌ریزه‌ای زیرین و در نتیجه نشست همراه با این بخش دانست که باعث می‌شود بخش بتنی تاج سد در حالتی که به بخش زیرین اتصال کامل پیدا کرده است تغییرمکان‌های بیش‌تری را تجربه کند. در بخش اعمال بار زلزله، تغییرمکان تاج سد در حالت متصل شده به بخش سنگ‌ریزه‌ای بدون امکان لغزش و جداشدگی در هر دو رکورد کاهش داشته است و با افزایش ضریب اصطکاک، میزان جذب انرژی به‌میزان اندکی (حدود ۸٪) افزایش یافته است. با این حال وقتی روکش بتنی به بدنه سنگ‌ریزه‌ای مقید شده، جذب انرژی به‌طور چشم‌گیری (حدود ۲۵ برابر) افزایش یافته است و در اغلب نقاط روکش بتنی در انتهای رکورد دچار خرابی کامل شده است. نتیجه این‌که هر چند افزایش جذب انرژی پدیدهٔ مطلوبی است، اما وقتی که روکش بتنی به بدنه سنگ‌ریزه‌ای مقید شده، با خرابی کامل روکش بتنی سد نفوذناپذیری خود را به‌طورکامل از دست داده و پیوستگی آن نیز به‌دلیل عدم بقای روکش بتنی به‌طور چشم‌گیری آسیب می‌بیند. بنابراین به‌نظر می‌رسد مقیدکردن روکش بتنی به بخش سنگ‌ریزه‌ای عمل مطلوبی نباشد. این پدیده در خصوص هر دو زلزله انتخاب شده در تحلیل (طبس و سان فرناندو) مشاهده شد. هم‌چنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش تراز آب، تغییرشکل تاج سد در جهت اعمال رکورد زلزله افزایش نسبتاً چشمگیری داشته است، به‌گونه‌ای که در حالت پر، بیشینه تغییرمکان نسبت به حالت خالی حدود ۵۰٪ افزایش یافته است. این در حالی است که بیش‌ترین آسیب روکش بتنی مربوط به حالت نیمه‌پر سد است. با توجه به قدرت آسیب بیش‌تر زلزله‌های نزدیک به گسل و ماهیت ضربه‌ای آنها، در این تحقیق تنها زلزله‌های نزدیک به گسل استفاده شده قرار گرفته است. بنابراین نتایج این پژوهش تنها در خصوص رفتار سد تحت زلزله‌های نزدیک به گسل معتبر است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

منابع

1. Bayraktar A., Haciefendioglu K., Muvafik M., "Asynchronous seismic analysis of concrete-faced rockfill dams including dam-reservoir interaction", Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 32, No. 5 (2005).
2. Bayraktar A., Kartal M. E., "Linear and nonlinear response of concrete slab on CFR dam during earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 30, No. 10 (2010).
3. Haeri S. M., Karimi M., "Three dimensional response of concrete faced rockfill dams to strong earthquakes considering dam-foundation interaction and spatial variable ground", 1st European conference on earthquake engineering and seismology, Vol. 43, No. 11 (2006) 143-154.
4. Bilici Y., Bayraktar A., Soyluk K., Haciefendioglu K., Ates S., Adanur S., "Stochastic dynamic response of dam–reservoir-foundation systems to spatially varying earthquake ground motions", Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 29, No. 3 (2009) 444-58.
5. Hunter G., Fell R., "Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dam", Geotechnical and Geoenviromental Engineering. Vol. 129, No. 10 (2003) 909-917.
6. Zhang G., Zhang J. M., "Numerical Modeling of Soil–Structure Interface of a Concrete-Faced Rockfill Dam", Computers and Geotechnics. Vol. 36, No. 5 (2009) 762-772.
7. Liu J., Liu F., Kong X., Yu L., "Large-Scale Shaking Table Model Tests of Aseismic Measures for Concrete Faced Rock-Fill Dams", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 61-62 (2014) 152-163.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]

8. Bin X., Zou D., Liu H., "Three-Dimensional Simulation of the Construction Process of the Zipingpu Concrete Face Rockfill Dam Based on a Generalized Plasticity Model", Computers and Geotechnics, Vol. 43, No. 3 (2012) 143-154.
9. Areias P. M. A., Belytschko T., "Analysis of Three-Dimensional Crack Initiation and Propagation Using the Extended Finite Element Method", International Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol. 63, No. 55 (2005) 760-788.
10. Han G., Kong X., Li J., "Dynamic experiments and numerical simulations of model concrete faced rockfill dams", 9th world conference on earthquake engineering. Japan Association for Earthquake Disaster Prevention, Tokyo (1988).
11. ABAQUS finite element software, Ver. 6.14.2, Simulia, (2014).
12. Atluri S. N., Shen S., "The Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) Method", Tech Science Press, USA, (2002).
13. Justo J. L., Segovia F., Jarmillo A., "Three dimensional joint elements applied to concrete-faced dams", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 19, No. 9 (1995) 615-36.
14. Udwadia F. E., Trifunac M. D., "Ambient Vibration Test of Full Scale Structures", 5th World Conf. On Earthquake Engineering. Rome, (1973).
١٥. سالمی س.، میرقاسمی ع. ا.، "بررسی اندرکنش رویهٔ بتنی با بستر سنگ‌ریزه‌ای در تحلیل دینامیکی سه‌بعدی سدهای سنگ‌ریزه‌ای با رویهٔ بتنی"، پنجمین کنفرانس ملی زلزله و سازه (١٣٩٣).
16. Dakoulas P., "Nonlinear seismic response of tall concrete-faced rockfill dams in narrow canyons", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 34, No. 1 (2012) 11-24.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.1.8]