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

على محمد رجبى \*، دانشگاه تهران، گروه زمين شناسى مهندسى عليرضا سجده، دانشگاه قم، دانشكدهٔ مهندسى عمران تاريخ: دريافت ٩٦/٠١/١٦ حكىده

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 تحلیل های دینامیکی تاریخچهٔ زمانی است. در این پژوهش با مدلسازی در محیط نرمافزار آباکوس، رفتار لرزمای سدهای سنگریزمای با روکش بتنی با در نظر گرفتن یارامترهای 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 می یابد. همچنین با مقیدکردن روکش بتنی به بخش سنگریزهای تفاوت چشمگیری در تاریخچهٔ تغییرمکان نسبی تاج سد مشاهده می شود و در این شرایط تغییرمکان تاج سد در هر دو رکورد کاهش می یابد. 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 یر، بیشینه تغییرمکان نسبت به حالت خالي بهطور ميانگين ٣٠٪ افزايش يافته است.

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

<sup>\*</sup>نویسنده مسئول amrajabi@ut.ac.ir

#### 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 بیش تر بدنه و در دسترس بودن مصالح سنگی، جایگزین مناسبی برای سدهای خاکی محسوب میشوند. از طرف دیگر از آنجاکه نفوذیذیری مصالح سنگی بسیار بیش تر از سایر مصالح است، از اینرو، روش های مختلفی برای آببندی این نوع سدها بهکارگرفته می شود. یکی از این روشها استفاده از پوشش نفوذناپذیر بتنآرمه در بالادست این سدها است. این نوع خاص سدهای سنگریزهای به نام سدهای سنگریزه ای با رویهٔ بتنی ('CRFD) نامیده می شوند [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 خاکم انتخاب می شود زیرا پایداری بیش تری 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].



1. Concrete-Faced Rockfill Dams



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 به وسیلهٔ 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 می توان برابر با شیب پایدار خاکریزی از مصالح بدنه و عمدتاً در حدود ۱:۱/۳ تا ۱:۱/۶ (افقی: قائم) انتخاب کرد. پایداری این سدها در برابر بارگذاری زلزله از جمله موضوعاتی است که اخیرا به وسیلهٔ محققان مختلف بررسی شده است. روشی مناسب برای بررسی رفتار این سدها، استفاده از روش اجزای محدود است. بررسیهای محققان گذشته نشان می دهد که شبیه سازی اجزای محدود می تواند رفتار سدهای سنگریزهای با پوشش بتنی را به نحو مناسبی پیش بینی کند [٥]، [٦]. روکش بتنی بررسی کردند [٦]. در این پژوهش به منظور شبیه سازی جداشدگی دو سطح و توانگ<sup>۱</sup> و ژانگ (۲۰۰۹) مدل سازی عددی اندرکنش خاک سازه را در یک سد سنگریزهای با تماس مجدد روکش بتنی با سطح سنگریزهای سده است. آنها یک المان تماسی با تعریف خرابی الاستیک-پلاستیک<sup>۲</sup> در فرایند مدل سازی منظور شده است. آنها یک المان تماسی با تعریف خرابی الاستیک-پلاستیک<sup>۳</sup> برای شبیه سازی جداشدگی دو سطح و خرابی الاستیک-پلاستیک<sup>۳</sup> برای شبیه سازی جداشدگی دو نظر با سطح سنگریزهای سد را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که اندرکنش در نظر

<sup>1.</sup> Zhang

<sup>2.</sup> Elastic-plastic-failure

<sup>3.</sup> Elastic-plastic-failure

گرفته شده تأثیر چشم گیری بر دقت شبیهسازی سد دارد [۲]. 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 روش های مقاومسازی استفاده شده میتواند یکپارچگی سد را افزایش داده و تغییرشکلها را به طور چشم گیری کاهش دهد [۷]. بین و همکاران (۲۰۱۲) شبیهسازی سه بعدی سد سنگریزهای با روکش بتنی زیپینگ پو 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. پژوهش های مشابهی نیز به وسیلهٔ سایر محققان انجام شده است [۹]. [۱].

شبیهسازی دقیق رفتار سد در نرمافزار آباکوس<sup>۱</sup> [۱۱]، نیازمند مدلسازی دقیق هندسه، مصالح، بارگذاری، شرایط تکیهگاهی، اندرکنشهای موجود و مشربندی با ابعاد مناسب است. معمولاً در بررسیهای مشابه، به بررسی رفتار سد در بارگذاری استاتیکی بسنده شده است [۱۲]، [۱۳]، [۱۵]. 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 پژوهش های پیشین، اثر آب پشت سد در تحلیل های لرزهای کم تر 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.

## روش تحقيق

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 کم تر از ۱۵کیلومتر استفاده شده است. همچنین به منظور 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 شبیه سازی در محیط نرمافزار آباکوس، ابتدا با بهره گیری از نتایج تحقیقات قبلی و تحلیل مودال و تعیین فرکانس های طبیعی ارتعاش سد با استفاده از دو زلزله مبنا، صحت سنجی 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.

## مشخصات زلزلههای درنظر گرفته شده

در شکل ۲ رکورد زلزلههای طبس (سال ۱۳۵۷ با بزرگای ۷/٤ در مقیاس ریشتر) و سان فرناندو (سال ۱۳٤۹ با بزرگای ۲/٦ ریشتر) نشان داده شده است. رکوردها با استفاده از برنامه سایزموسیگنال <sup>۱</sup> 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.



1. Seismosignal

### ۲. صحت سنجی

در این پژوهش صحتسنجی مدل با استفاده از نتایج بررسی داکولاس(۲۰۱۲) [۱٦] 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.



سد موردنظر با اجرای یک به یک لایه ها شامل لایهٔ بتنی و لایه های 2B، 2B 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) [۲۱]، چگالی بتن برابر ۲۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. همچنین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن به ترتیب برابر با ۲۵، ۳ و ۲۹۰۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون آن ۲/۰ در نظر گرفته شده است. در این پژوهش همچنین برای شبیهسازی روکش بتنی از المانهای پوسته ی چهارگرهی و برای خریف مشخصات مصالح سنگریزه از مدل رفتاری دراکر پراگر استفاده شده است. چگالی و ضریب پواسون برای لایه های 2B، 3C و 3B به ترتیب ۲۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲۰/۰ مطابق مقادیر ذکر شده در مقالهٔ مرجع، در نظر گرفته شده است. مطابق مقادیر مدول برشی برای این لایه ها، به ترتیب برابر با ۸/۹۳ ، ۲۸۹ و ۲۸۰۰ گیگاپاسکال منظور شده است. به منظور انجام شبیه سازی، قسمتی که سازه سد به تکیهگاه سنگی اطراف و کف متصل شده است. به عنوان 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 ۰/۰ استفاده شده است. در محل بعد مشربندی با استفاده از المان های پوستهای چهارگرهی، المان سهبعدی شش وجهی هشتگرهی و المانهای هرمی چهارگرهی انجام شده است. برای بعریف 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

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

شماره مد	مقادیر ویژہ	فر کانس		جرم نرمال شده
		(رادیان / زمان)	(سيكل/ زمان)	(×1• <sup>^</sup> )
١	٥/٠٦١٣	7/7290	•/٣٥٨٠٦	۱۹/۳۱
٢	٧/٢٩٠٠	۲/۷۰۰۰	•/2897	11/07
٣	V/00YV	٢/٧٤٨٢	•/٤٣٧٣٩	١٥/٤٤
٤	۱۰/٦٨٠	٢/٢٦٨١	۰/٥٢٠١٣	17/79
٥	11/777	3/2101	•/02772	٧/٤٧
٦	11/V0.	٣/٤٢٧٨	•/02000	٨/١١
٧	17/272	٣/٥١٦١	•/00971	۱۰/۹٦
8	17/77.	3/0700	•/07V7£	۱۱/۸۳
٩	12/029	٣/٨١٤٣	•/٦•٧•٦	77/77
١.	17/V07	٤/•٩٣٤	•/٦٥١٤٨	۱۳/۸٥

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

شکل ٤ نتاج صحتسنجی یا بهعبارتی، مقایسه نتایج فرکانس مودهای ارتعاش طبیعی اول تا دهم حاصل از تحلیل عددی در این پژوهش و نتایج داکولاس (۲۰۱۲) را نشان میدهد. مطابق شکل ٤ انطباق مناسبی میان نتایج این دو پژوهش وجود دارد. بیشترین میزان اختلاف مربوط به مود چهارم و برابر ۱۰٪ است.



شکل٤. مقایسهٔ نتایج حاصل از پژوهش حاضر و داکولاس (۲۰۱۲) 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.

نتايج و بحث

۱. 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 ۵ هریک از رکورد های بررسی شده را در شرایط ضریب اصطکاک بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگریزهای برابر با ۰/۰، ۷/۰ و همچنین در حالت قید کامل روکش سد به بخش سنگریزهای را نشان میدهد. لازم به ذکر است در ٥ 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، ۷/۰و قید کامل روکش بتنی به بخش سنگریزهای

مطابق شکل ۵، افزایش ضریب اصطکاک بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگریزهای از ۰/۰ 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 این بخش دانست که باعث می شود بخش بتنی تاج سد در حالتی که به بخش زیرین اتصال کامل پیدا کرده است، تغییر مکان بیش تری 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 ۵ 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 به سمت تغییرمکان نهایی و ماندگار سازه میل میکند. در این پژوهش، به دلیل حجم بسیار بالای تحلیل و زمان بر بودن آن، امکان بررسی رفتار در بخش ارتعاش آزاد وجود نداشته است و بنابراین نمی توان تغییرمکان های به وجود آمده در انتهای تحلیل را تغییر شکل 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 ۰/۵ 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.

شکل۷ میزان خرابی کششی روکش بتنی در سه حالت بررسی شده (ضریب اصطکاک بین رویهٔ بتنی و قسمت سنگریزهای برابر با ۰/۵، ۰/۷ و همچنین حالت قید کامل روکش 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 • (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 ۷/۱ 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 جابه جایی قسمت سنگریزهای به رویهٔ بتنی منتقل شده و در نهایت باعث خرابی بیشتر قسمت رویهٔ بتنی نسبت به بقیه حالتها می شود.



7.9



Step Step-1 Increment 13298: Step Time = 12.53 Primary Var: DAMAGET Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

شکل ۷. 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.

 $U_S = C_0 + S. U_P \tag{1}$ 

در این رابطه C<sub>0</sub> سرعت صوت در محیط، S ثابت تجربی و Up بیان گر سرعت ذرات سیال است. در این بررسی اندرکنش آب و روکش بتنی به صورت بدون اصطکاک شبیه سازی شده است. شکل ۹ رابطهٔ بین تغییر مکان نسبی تاج سد در سه حالت خالی، نیمه پر و پر را به ترتیب برای زلزله سان فرناندو وطبس نشان می دهد.



21.



شکل ۸ مدلهای سد بررسی شده در سه حالت؛ الف) پر، ب) نیمه پر، ج) خالی مطابق شکل ۹، برای هر دو زلزله، با افزایش تراز آب، تغییر شکل تاج سد در جهت اعمال رکورد زلزله نیز افزایش نسبتاً قابل ملاحظه ای داشته است، به گونه ای که در حالت پر، بیشینه تغییر مکان نسبت به حالت خالی حدود ۵۰٪ افزایش نشان می دهد. در شکل ۱۰ میزان خرابی پوشش بتنی در سه حالت سد خالی، نیمه پر 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 سخت ترین بخش سد است)، در حالت نیمه پر بیش ترین میزان خرابی در روکش بتنی سد اتفاق افتاده است. به عبارتی در حالت نیمه پر در حین بارگذاری زلزله، به دلیل 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 بیش تری در رویهٔ بتنی در حالت نیمه پر اتفاق بیفتد. در حالت پر، هر چند نیروی کلی وارد به سد بیش تر است اما این نیرو به طور یکنواخت تری اعمال شده و در نتیجه تغییر شکل سد در حالت پر، به طور چشم گیری بیش تر است. به هر حال چنان که انتظار می رود میزان خرابی در حالت پر، به طور چشم گیری بیش تر از حالت سد خالی است





Step: Step-1 Increment 18204: Step Time = 17.20 Primary Var: DAMAGET Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+0

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

نتيجه گيرى

در این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود و شبیهسازی با استفاده از نرمافزار آباکوس، رفتار لرزهای سدهای سنگریزهای با روکش بتنی 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 تغییر شکلهای بزرگ برای نمونههایی که تحت رکورد 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 ۰/۷ تأثیر چشمگیری بر تغييرمكان تاج سد در جهت اعمال بار زلزله نداشته است. همچنين با مقيدكردن روكش بتني 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 می توان عدم امکان جدایی روکش از بخش سنگریزهای زیرین و در نتیجه نشست همراه با این بخش دانست که باعث می شود بخش بتنی تاج سد در حالتی که به بخش زیرین اتصال کامل پیدا کرده است تغییرمکان های 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 سنگریزمای مقید شده، جذب انرژی به طور چشم گیری (حدود ۲۵ برابر) افزایش یافته است و در اغلب نقاط روکش بتنی در انتهای رکورد دچار خرابی کامل شده است. نتیجه این که 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 بەدلىل عدم بقاي روكش بتنى بەطور چشمگيرى أسيب مىبيند. بنابراين بەنظر مىرسد مقیدکردن روکش بتنی به بخش سنگریزهای عمل مطلوبی نباشد. این پدیده در خصوص هر دو زلزله انتخاب شده در تحليل (طبس و سان فرناندو) مشاهده شد. همچنين نتايج اين 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 نیمه پر سد است. با توجه به قدرت آسیب بیش تر زلزله های 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.

# منابع

- 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).
- 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).
- 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.
- 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.
- Hunter G., Fell R., "Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dam", Geotechnical and Geoenviromental Engineering. Vol. 129, No. 10 (2003) 909-917.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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).
- Atluri S. N., Shen S., "The Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) Method", Tech Science Press, USA, (2002).
- 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.
- Udwadia F. E., Trifunac M. D., "Ambient Vibration Test of Full Scale Structures", 5th World Conf. On Earthquake Engineering. Rome, (1973).

۱۵. 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 (۱۳۹۳).

 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.