نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دهم / شماره سی و ششم / زمستان ۱۴۰۲

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant
10th Year/ No. 36/ March 2024

تحلیل پایداری سدهای بتنی وزنی تحت زلزله‌های دور و نزدیک از گسل با استفاده از روش اجزاء محدود و تعادل حدی

رسول جانی*[۱]
آرش اثنی عشری[۲]

چکیده

کنترل پایداری سدهای بتنی وزنی یکی از مهمترین موارد در آنالیز و طراحی به شمار می‌رود. تاکنون روش‌های متنوعی جهت بررسی پایداری سدهای بتنی وزنی ارائه شده است که از مهمترین و پرکاربردترین آنها، می‌توان به روش‌های تعادل حدی و اجزاء محدود اشاره نمود. در این مطالعه، پایداری سدهای بتنی وزنی با ارتفاعات مختلف به روش تعادل حدی و روش اجزاء محدود دو بعدی و سه بعدی برای پنج طیف زلزله مورد بررسی قرار گرفت. متفاوت بودن نتایج دو روش فوق در حصول برخی پارامترها از جمله میزان لغزش، مدول الاستیسیته و توزیع تنش کف سد، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج، حاکی از محافظه کارانه بودن روش تعادل حدی نسبت به روش اجزاء محدود می‌باشد، بطوریکه آستانه‌ی لغزش در روش تعادل حدی با شتاب بیشینه ۰/۲g و در روش اجزاء محدود با شتاب بیشینه ۰/۳g اتفاق می‌افتد. تحلیل‌های سه بعدی برای تحلیل تغییر شکل و توزیع تنش کششی در کف سد حاکی از بالابودن میزان لغزش و تنش در مقطع میانی سد و تفاوت فاحش آن با قسمت‌های کناری دارد. تعبیه درز قائم در سد، بسته به طیف زلزله و میزان شتاب بیشینه، می‌تواند تنش را تا پانزده‌درصد کاهش دهد و احتمال ترک خوردگی را کاهش دهد، اما موجب تغییرات قابل توجهی در لغزش بخش‌های مختلف سد نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی

سدهای وزنی، پاسخ لرزه ای،تحلیل پایداری،اجزاء محدود،تعادل حدی

[۱]* استادیار گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران - مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. jani@iaut.ac.ir

[۲] کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز، ایران

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

مقدمه

ساخت سد، یکی از راه‌های تأمین آب مورد نیاز جهت مصارف کشاورزی، صنعتی، آب آشامیدنی و غیره می‌باشد. از گذشته‌های دور تاکنون، سدها با توجه به شرایط موجود و نوع نیاز، با اهداف متفاوت و در انواع مختلف ساخته شده‌اند. سد وزنی، سازه‌ای بتنی است که به کمک وزن خود در برابر بارهای وارده مقاومت می‌کند. این نوع سدها به طور معمول، دارای مقطع هندسی مستقیم و بدون انحنا می‌باشند و به دلیل سهولت طراحی و اجرا از انواع رایج سدها به شمار می‌روند (کورن[1] و همکاران،۱۹۸۸). در طراحی سدهای بتنی وزنی، تعیین بارهای مورد نیاز برای تحلیل تنش و پایداری، ضروری است. مطابق آیین‌نامه گروه مهندسین ارتش امریکا[2] سال ۱۹۹۵، بارهای وزن، فشار آب بالادست و پایین‌دست، فشار برکنش، درجه حرارت، فشار رسوب، فشار یخ، فشار باد، فشار موج و نیروهای زلزله در طراحی تأثیرگذار باشند. در میان موارد ذکر شده برخی از بارها دارای اهمیت بیشتری می‌باشند و در نظر گرفتن اثر آن‌ها در تحلیل و طراحی ضروری است، در حالی که برخی موارد دیگر دارای اهمیت کمتری می‌باشند و تنها در موارد خاص مورد توجه قرار می‌گیرند. بخاطر خسارات مالی و جانی شدید سدها، ایمنی سدها مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرد. کنترل پایداری در سدها، معمولاً به دو صورت بررسی پایداری کلی و موضعی انجام می‌پذیرد. پایداری موضعی، تأثیرات نیروهای وارد بر بدنه‌ی سد را که سبب ایجاد تنش‌های موضعی و ایجاد ترک در بدنه سد می‌گردد، بررسی می‌کند. از طرف دیگر در پایداری کلی، برهم‌کنش نیروهای محرک و مقاوم تأثیرگذار در واژگونی و لغزش، ارزیابی می‌شود. شیوه مرسوم جهت تحلیل تنش‌ها در سدها استفاده از روش تعادل حدی و اجزاء محدود است.

روش تعادل حدی، با فرض سد به صورت یک جسم صلب، لغزش و واژگونی در طول کف آن یا درزهای اتصال و یا در طول سطوح بحرانی در فونداسیون را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این روش، برای بررسی اثر نیروی زلزله، مطابق آیین‌نامه USACE از روش ضریب لرزه‌ای استفاده می‌شود. در این روش که با عنوان تحلیل شبه استاتیکی شناخته می‌شود، نیروی زلزله، به صورت یک نیروی اینرسی که به صورت استاتیکی به سازه اعمال شده است عمل می‌کند (آئین‌نامه گروه مهندسین ارتش آمریکا، ۱۹۹۵).

روش اجزاء محدود، یک روش مدرن محاسباتی جهت حل مسائل پیچیده مهندسی می‌باشد و با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری امکان تحلیل‌های پیچیده را فراهم می‌آورد. این روش کمک شایانی به حل مسائل مربوط به تحلیل سازه‌های پیچیده، متشکل از مصالح مختلف و دارای شرایط مرزی متفاوت که حل آنها به روش‌های متداول بسیار مشکل است، می‌نماید.

ژنگ[3] و همکارانش در سال ۲۰۱۳، پایداری یک سد بتنی وزنی را به دو روش تعادل حدی و ذخیره‌ی مقاومت مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، با استفاده از یک مثال، ابتدا ضریب اطمینان پایداری سد با روش‌های تعادل حدی و اجزاء محدود با اعمال ضرایب ذخیره‌ی مقاومت محاسبه و مقایسه شده‌اند. در ضمن روند خرابی تدریجی فونداسیون نیز بررسی شده است. مطابق نتایج به دست آمده در این مطالعه، ضریب اطمینان حاصل از هر دو روش، الزامات آیین‌نامه‌ای را برآورد می‌کند. جمیل و بوعالم[4]، ۲۰۱۵ تأثیر شرایط سطح تماس سد-فونداسیون بر روی عملکرد لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی را مورد بررسی قرار دادند. بعد از مقایسه‌ی جابجایی و تنش‌های به وجود آمده با ضرایب اصطکاک مختلف، نتیجه گرفتند که لغزش سد بر روی فونداسیون، به مقدار ضریب اصطکاک بستگی دارد و به وجود آمدن جابجایی لغزشی موجب کاهش تنش‌ها در سد می‌شود. پایداری سدهای بتنی غلتکی با ارتفاع ۲۰۰ متری در سال ۲۰۱۶ توسط شا[5] و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. آنها به این نتیجه رسیدند که خرابی سطح فونداسیون ابتدا در پنجه‌ی سد اتفاق می‌افتد و خرابی سطح لایه‌های نزدیک به فونداسیون از سمت پایین‌دست آغاز می‌شود و در لایه‌های بالایی سد، خرابی مشاهده نمی‌شود. شریف پور و فرخ[6]، ۱۳۹۵ از روش کاهش مقاومت در اجزاء محدود برای بررسی پایداری سد بتنی وزنی استفاده کردند و با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف در کف سد و پی با سه نوع هندسه بدنه و پی سد، نشان دادند که عواملی مثل هندسه‌ی کف سد و ناپیوستگی در پی و پارامترهای ژئوتکنیکی، باعث می‌شود تا میزان ضرایب

[1] Corn
[2] US Army Crops of Engineerg
[3] Zhang
[4] Djamel & Boualem
[5] Sha
[6] Sharifpour & Farrokh

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

اطمینان متفاوتی داشته باشیم و ساده‌سازی آن‌ها در طراحی موجب خطا در تحلیل پایداری سدهای بتنی وزنی می‌شود. الشدادی و حامدی[1] در سال ۲۰۱۷ جهت ارزیابی پایداری سدهای کوچک بتنی وزنی، رفتار سد را در شرایط مختلف با استفاده از نرم افزار آباکوس در حالت دوبعدی در قالب دو آئین نامه مورد بررسی قرار دادند و در هندسه و مشخصات تعریف شده، سدها پایداری خود را نشان دادند.

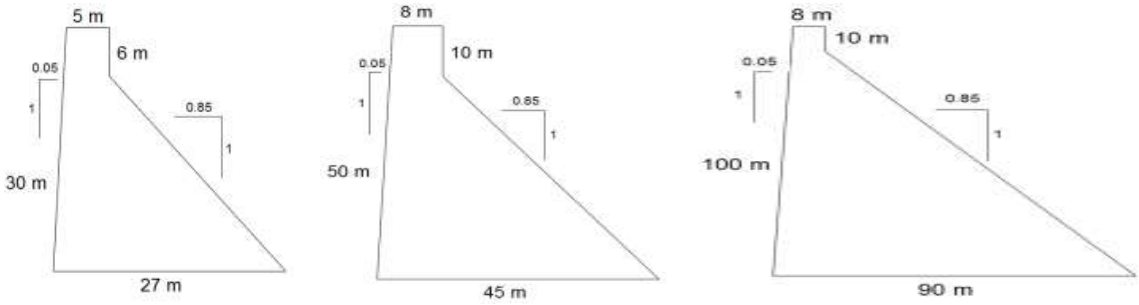
برای مطالعه بیشتر می‌توان به قنات[2](۲۰۰۴)، لمباردی[3] (۲۰۰۷)، ونگ[4] و همکاران (۲۰۰۹)، چن[5] و دو (۲۰۱۱)، ژیانگ[6] و دو (۲۰۱۲)، گنجی[7] و عالم باقری (۲۰۱۷)، فرینها[8] و همکاران (۲۰۲۲)، مزگی و میوبی[9] (۲۰۲۲)، رسیو[10] و همکاران (۲۰۲۱) و مرادی[11] و همکاران (۲۰۲۱) اشاره نمود.

در بسیاری از مطالعاتی که به روش اجزا محدود بر روی سدهای بتنی وزنی صورت می‌گیرد فرض‌های ساده کننده‌ای در نظر گرفته می‌شود که ممکن است به دور شدن از شرایط واقعی مسئله منجر شود. با توجه به دشوار و زمان‌بر بودن مدل‌سازی سه‌بعدی، در عمده مطالعات صورت گرفته بر روی سدهای بتنی وزنی، مدل دوبعدی ملاک بررسی پایداری بوده است، در حالی‌که در این حالت امکان در نظر گرفتن اثر مواردی همچون عرض دره، شیب دره و درزهای قائم وجود ندارد. همچنین در بسیاری از مطالعات اجزا محدود اندرکنش سد- فونداسیون به صورت مناسب تعریف نمی‌شود که علاوه بر این که موجب دور شدن نتایج از حالت واقعی می‌شود، امکان بررسی لغزش سد بر روی فونداسیون نیز میسر نخواهد بود. در این تحقیق، سعی خواهد شد تا با مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی اجزا محدود و با تعریف اندرکنش‌ها به صورت مناسب، مطالعه‌ای جامع بر روی پایداری سدهای بتنی وزنی انجام گیرد و با مقایسه‌ی نتایج با یکدیگر و همچنین با نتایج روش تعادل حدی، تأثیر فرضیات مختلف بر نتایج حاصل از این روش‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

برای بررسی پایداری سدهای بتنی در برابر لغزش و واژگونی نیز می‌توان از روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی استفاده نمود. در این تحقیق، پایداری سدهای بتنی وزنی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور مورد بررسی قرار گرفته است. از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS جهت مدلسازی و تحلیل سازه استفاده شده و نتایج تأثیر زلزله‌های نزدیک و دور گسل بر روی سد مورد بررسی قرار گرفته است. این نرم افزار در سال ۱۹۷۸ توسط پاول سورنس، بنگت کارلسون و دیوید[12] هیبیت ایجاد شده است که توانایی انجام تحلیل های سازه ای، حرارتی، الکتریکی و غیره رادارد (عالم باقری و سید کاظمی، ۱۳۹۳) .

مواد و روش‌ها

برای بررسی پایداری سدهای بتنی وزنی، به روش اجزاء محدود و مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن با روش تعادل حدی و بررسی تأثیر فرضیات مختلف بر نتایج به دست آمده، مدل-های مختلفی با مشخصات هندسی متفاوت ایجاد شده است. در این مطالعه، به منظور بررسی مناسب‌تر، سه سد با ارتفاع ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متر در چند بخش مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مشخصات هندسی این سدها در شکل (۱) قابل مشاهده است.



شکل (۱): مشخصات هندسی مدل‌های مورد مطالعه

[1] Al-Shadeedi & Hamdi
[2] Ghanaat
[3] Lombardi
[4] Wang
[5] Chen & Du
[6] Jiang & Du
[7] Ganji & Alembagheri
[8] Farinha
[9] Mazighi & Mihoubi
[10] Rocio
[11] Moradi
[12] Hibbitt, Karlsson & Sorensen,

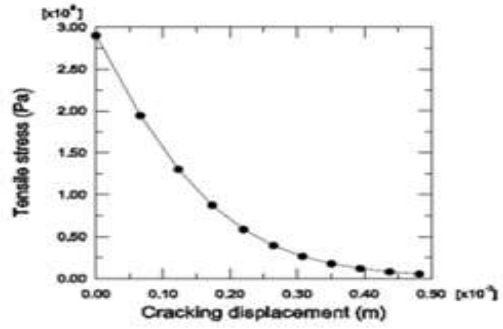
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

در این مطالعه، چگالی بتن سد ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته آن ۱۸ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر ۰/۲ در نظر گرفته شده است. به منظور حذف اثر موج‌های برگشتی از مرز، فونداسیون بدون جرم فرض شده است، مدول الاستیسیته فونداسیون، ۱۶ گیگاپاسکال (جز در بخشی که تأثیر تغییرات مدول الاستیسیته فونداسیون بر پایداری مورد بررسی قرار می‌گیرد) و ضریب پواسون آن ۰/۲ در نظر گرفته شده است. چگالی آب، ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول بالک آن ۲/۰۷ گیگاپاسکال لحاظ شده است. موج دریاچه در انتهای دور جذب شده و بازگشت داده نمی‌شود، فشار سطح آزاد آب نیز صفر در نظر گرفته شده است (زینی زاده و میرزا بزرگ[1]،۲۰۱۲). برای در نظر گرفتن اثر اصطکاک، مشخصات درز بین سد و فونداسیون با زاویه‌ی اصطکاک ۴۰ درجه و چسبندگی صفر تعریف شده است.

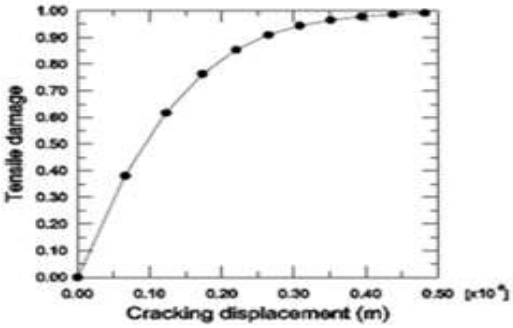
روش خرابی پلاستیک با توجه به تطبیق مناسب با نتایج آزمایشگاهی، روش مناسبی برای مدل کردن رفتار غیرخطی بتن محسوب می‌شود. در شکل(۲) و ۳) به ترتیب نمودارهای مقدار کاهش مقاومت کششی با افزایش عرض ترک و پارامتر خرابی برحسب افزایش عرض ترک نشان داده شده است. مقاومت فشاری و کششی بتن به ترتیب ۱۶ و ۲/۳ مگاپاسکال فرض شده است. پارامترهای تعریف شده جهت انجام تحلیل غیرخطی، در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱) پارامترهای مدل خرابی پلاستیک بتن

زاویه اتساع	خروج از مرکزیت	fb_0/fc_0	اصلاح شکست	ویسکوالاستیک
۳۶/۳۱	۰/۱	۱/۱۶	۰/۷	۰



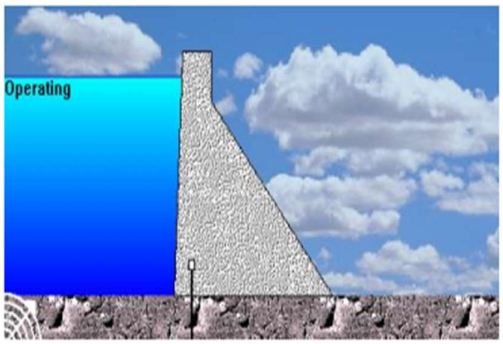
شکل (۲): نمودار تنش- بازشدگی ترک مدل خرابی پلاستیک



شکل (۳): نمودار خرابی کششی بتن با افزایش عرض ترک

مدل‌های تعادل حدی

در این مطالعه، بررسی پایداری سد با استفاده از روش تعادل حدی، با ایجاد مدل‌هایی در نرم‌افزارهای کادم[2] و آراس‌دم[3] انجام می‌گیرد. بنابراین، مدل‌هایی با مشخصاتی که ذکر شد، در نرم‌افزارهای کادم و آراس‌دم نیز ایجاد شده‌اند. نرم افزار کآدم یک برنامه کامپیوتری است که توسط لکلرک[4] و همکاران در سال ۲۰۰۳ برای ارزیابی رفتار سازه‌ای و ایمنی سدهای بتنی وزنی بر اساس روش ثقلی طراحی شده است. سدها با مشخصات هندسی نشان داده شده در شکل (۱) در نرم‌افزارهای کادم و آراس‌دم مدل‌سازی شده‌اند. همانگونه که ذکر شد، سطح آزاد آب دریاچه در بالادست برای مدل‌های ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری به ترتیب ۲۷، ۴۵ و ۹۵ متر تعریف شده‌اند و فشار برکنش طبق ضوابط USACE 1995 و با فرض ضریب تأثیر زهکشی ۰/۵ به مدل‌ها اعمال شده است. جهت تحلیل زلزله، ضرایب زلزله با اعمال ضریب کاهشی ۳/۲ به بیشینه شتاب افقی و قائم در مدلسازی در نظر گرفته شده است. مدل ۵۰ متری ایجاد شده در این نرم‌افزار به عنوان نمونه در شکل‌های (۴) نشان داده شده است.



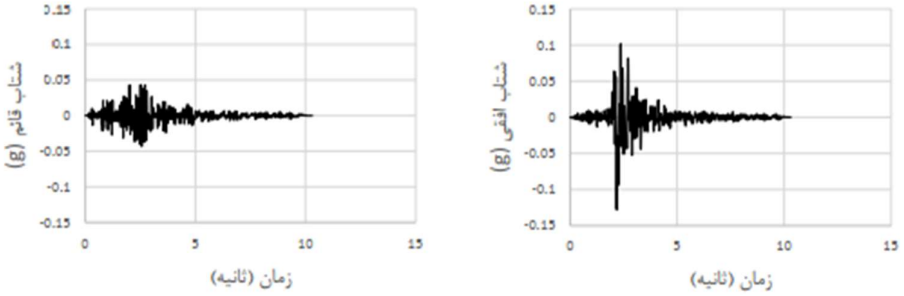
شکل (۴): مدل سد ۵۰ متری ایجاد شده در نرم‌افزار کادم

[1] Zeinizadeh & Mirzabozorg
[2] CADAM
[3] RS-DAM
[4] Leclerce

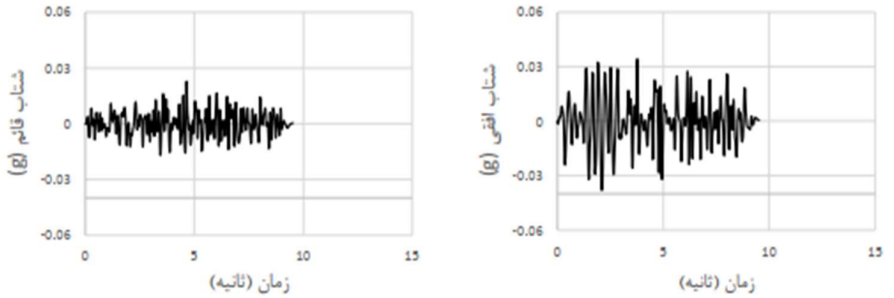
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

معرفی زلزله‌های استفاده شده

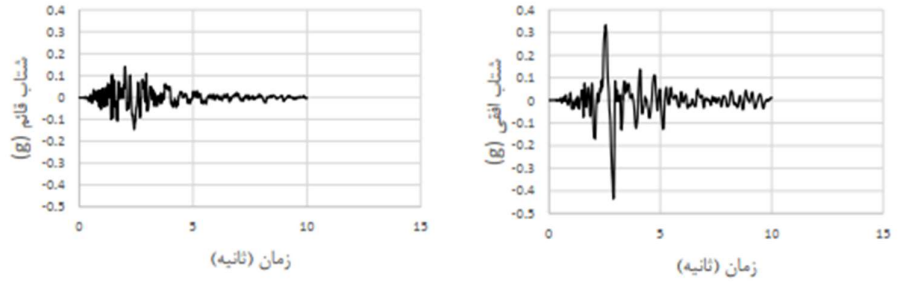
در بخش‌های مختلف این مطالعه، از شتابنگاشت‌های اصلاح شده پنج زلزله آنزا (۱۹۸۰) ثبت شده در ایستگاه پینیون فلت، سن‌فرناندو (۱۹۷۱) ثبت شده در ایستگاه کولتن، کویوت لیک (۱۹۷۹) ثبت شده در ایستگاه گیلروی اری، ماموت لیکس (۱۹۸۰) ثبت شده در ایستگاه ماموت لیکس و نورترن کالیف (۱۹۷۵) ثبت شده در ایستگاه پترولیا استفاده شده که در شکل‌های (۵) تا (۹) نشان داده شده‌اند. با توجه به زمانبر بودن تحلیل، برای برخی از زلزله‌ها، بخش بحرانی زلزله به مدل‌ها اعمال شده است. طیف شتاب این پنج زلزله نیز در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. این شتابنگاشت‌ها در هر بخش مطابق با هدف مورد نظر، به مقادیر متفاوتی مقیاس شده‌اند، که در هر بخش به آن اشاره خواهد شد.



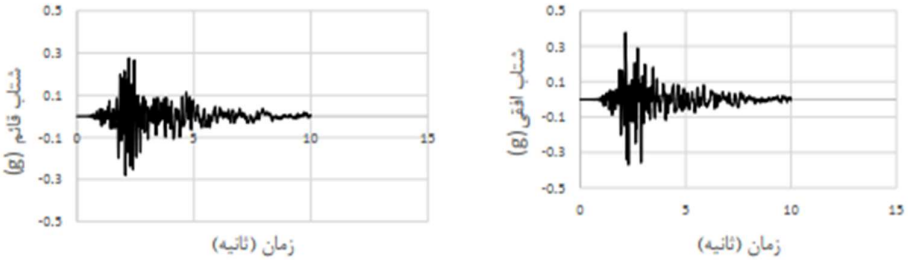
شکل (۵): شتاب‌نگاشت مؤلفه افقی و قائم زلزله آنزا



شکل (۶): شتاب‌نگاشت مؤلفه افقی و قائم زلزله سن فرناندو

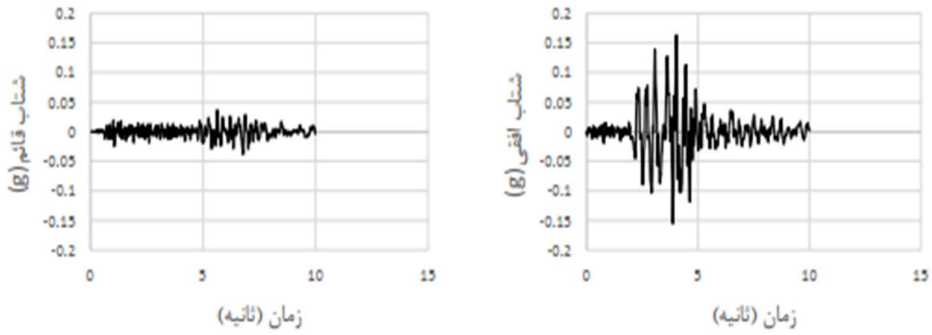


شکل (۷):شتاب نگاشت مؤلفه افقی و قائم زلزله کویوت لیک

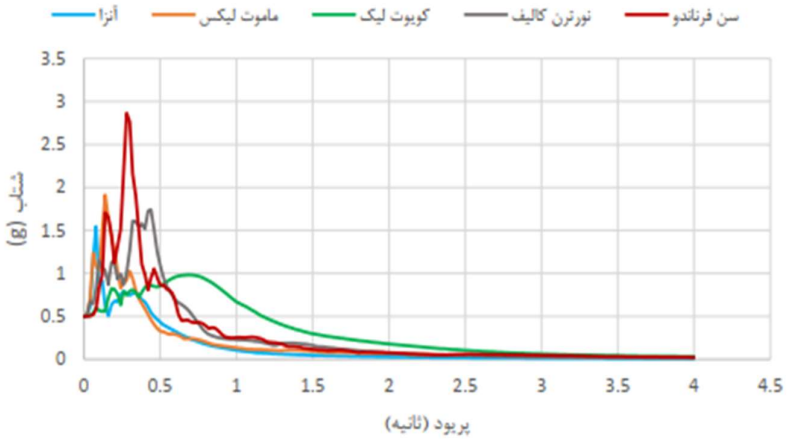


شکل (۸): شتاب نگاشت مؤلفه افقی و قائم زلزله ماموت لیکس

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۹): شتاب نگاشت مؤلفه افقی و قائم زلزله نورترن کالیف



شکل (۱۰): طیف شتاب زلزله‌ها

صحت سنجی

جهت حصول اطمینان از صحت عملکرد مدلسازی اجزا محدود در مطالعه حاضر، مدل مورد بررسی در مطالعه چوپرا و ژنگ[1]، ۱۹۹۱ با روند مدلسازی مورد استفاده در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۱) نتایج دو مدل را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، روند و مقدار نتایج دارای تطبیق مناسبی با یکدیگر می‌باشند و می‌توان اشاره کرد که مدلسازی ارائه شده در مطالعه پیش رو قابل اطمینان می‌باشد.



شکل (۱۱): مقایسه نتایج صحت سنجی

نتایج و بحث

بررسی اثر ماهیت زلزله بر پایداری سدهای بتنی وزنی

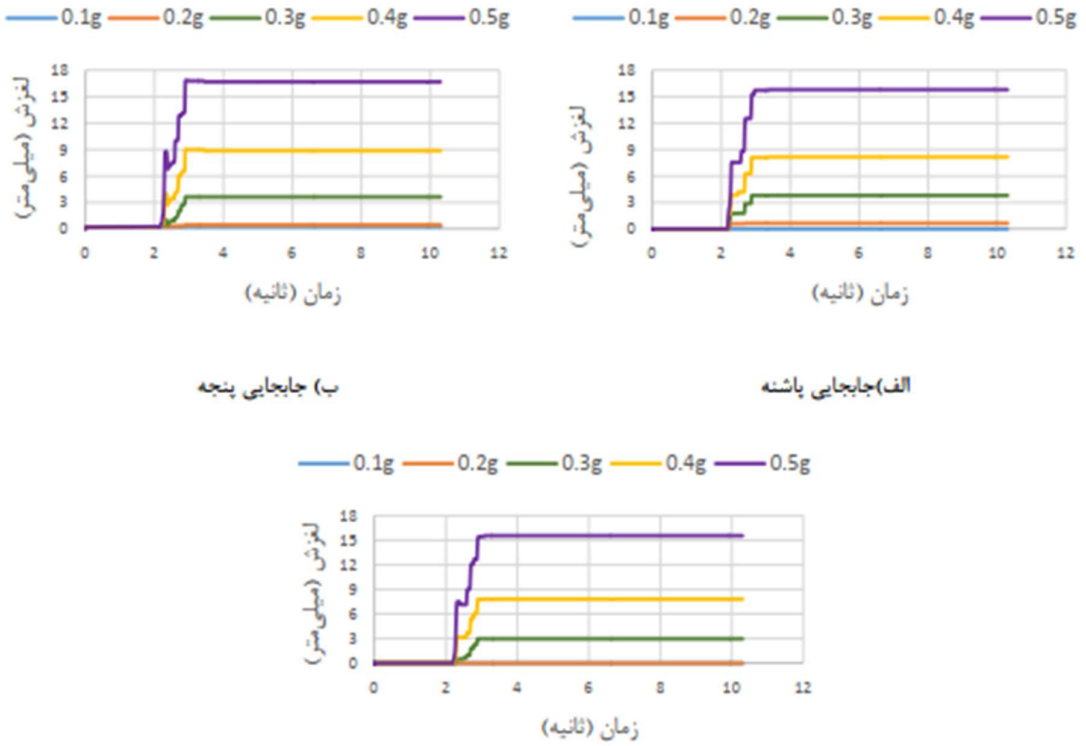
به منظور بررسی پایداری سد، جابجایی پاشنه، پنجه و نقطه‌ی میانی که تقریبا در وسط محل تماس سد و فونداسیون قرار دارد، نسبت به نقاط متناظر آنها در فونداسیون، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودارهای جابجایی پاشنه، پنجه و نقطه میانی سد بر روی فونداسیون تحت اثر زلزله آنزا، در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطورکه در شکل (۱۲-الف) و (۱۲-ب) مشاهده می‌شود، برای زلزله با بیشینه شتاب افقی ۰/۲g مقدار بسیار اندکی جابجایی در پاشنه و پنجه سد نسبت به فونداسیون دیده می‌شود. در حالی که، با توجه به شکل (۱۳-پ) مشاهده می‌شود که نقطه میانی سد، تحت اثر زلزله با بیشینه شتاب افقی ۰/۲g، نسبت به فونداسیون جابجا نشده است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که تحت زلزله با بیشینه شتاب افقی ۰/۲g لغزش کامل سد بر روی فونداسیون رخ نداده است و جابجایی برخی نقاط سد نسبت به فونداسیون، موضعی بوده

[1] Chopra & Zhang

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

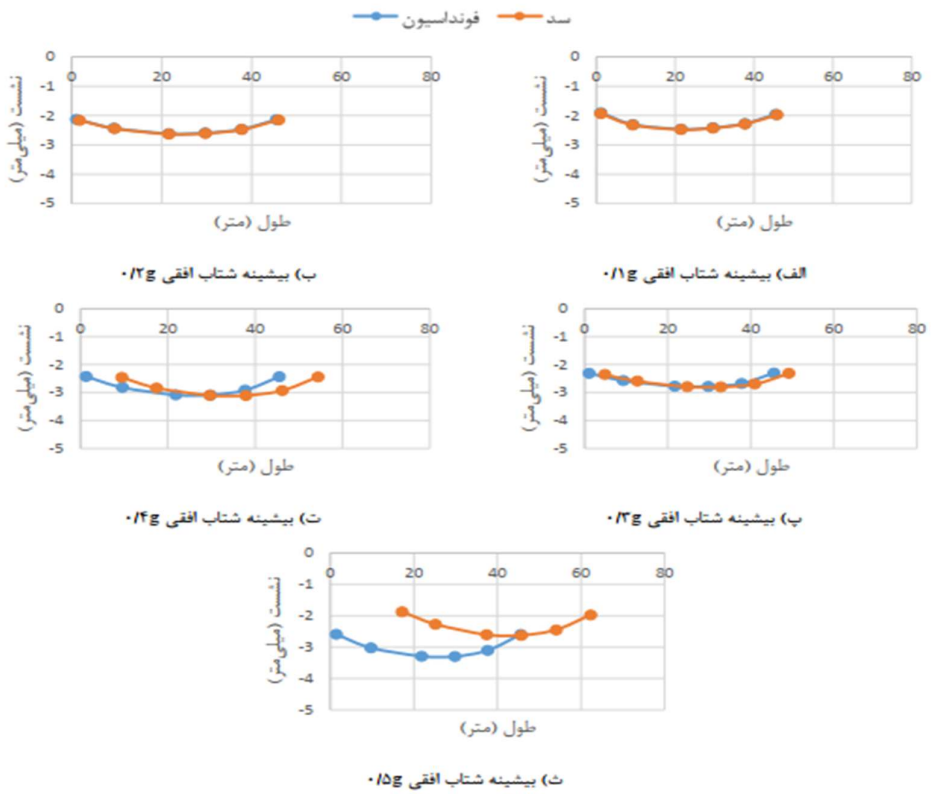
و نشان‌دهنده لغزش کلی سد نسبت به فونداسیون نیست. همچنین مطابق انتظار، با شدت گرفتن زلزله، میزان جابجایی پاشنه، پنجه و نقطه‌ی میانی سد نسبت به فونداسیون افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر، هر چه بیشینه شتاب زلزله بزرگتر باشد، لغزش سد بر روی فونداسیون بیشتر خواهد بود. بر اساس نتایج، تحت اثر زلزله آنزا با بیشینه شتاب افقی ۰/۳g سد بر روی فونداسیون لغزیده است.

تغییرشکل سطح تماس سد و فونداسیون در پایان زلزله آنزا در شکل (۱۳) قابل مشاهده است. در این نمودارها، محور قائم نشست محل تماس سد و فونداسیون را بر حسب میلی‌متر نشان می‌دهد. نقاط نشان داده شده در این نمودارها، همان گره‌های مشخص شده در شکل (۱۴-ب) می‌باشند که برای ملموس بودن تغییر مکان نقاط، جابجایی آنها بر حسب میلی‌متر روی محور افقی نمایش داده شده است. به عبارت دیگر میزان لغزش نقاط با ضریب ۱۰۰۰ بزرگنمایی شده است. شایان ذکر است که نقاط مشخص شده روی فونداسیون نیز نقاطی هستند که در ابتدا و پیش از اعمال بارها، دقیقاً در تماس با همان نقاط بدنه سد بوده‌اند. با توجه به شکل (۱۳) می‌توان به این نکته پی برد که تحت اثر زلزله با بیشینه شتاب افقی ۰/۲g لغزش سد بر روی فونداسیون صورت نگرفته و فقط نقاط پاشنه و پنجه سد، اندکی نسبت به فونداسیون جابجا شده‌اند. این در حالی است که تحت اثر زلزله آنزا با بیشینه شتاب افقی ۰/۳g و بیشتر، لغزش سد بر روی فونداسیون رخ داده است، که این پدیده در شکل (۱۲) نیز قابل رؤیت بود. بهمین ترتیب در شکل (۱۴) حداکثر لغزش نقطه میانی سد نسبت به فونداسیون تحت اثر زلزله‌های مختلف با بیشینه شتاب‌های متفاوت نشان داده شده است. همانطور که در این شکل پیداست، میزان لغزش سد بر روی فونداسیون تحت اثر زلزله‌های مختلف، تفاوت بسیار زیادی دارد. همانطور که در شکل مشخص است و مطابق آنچه پیش از این مشاهده شد، هر چه شدت یک زلزله افزایش می‌یابد میزان لغزش سد بر روی فونداسیون نیز بیشتر می‌شود، البته این روند برای دو زلزله مختلف می‌تواند متفاوت باشد. به طور مثال میزان لغزش سد بر روی فونداسیون تحت اثر زلزله سن‌فرناندو با بیشینه شتاب افقی ۰/۴g بیشتر از میزان لغزش سد بر روی فونداسیون تحت اثر هر یک از زلزله‌های دیگر با بیشینه شتاب افقی ۰/۳g است. بنابراین ماهیت زلزله، تأثیر قابل توجهی بر میزان لغزش به وجود آمده دارد.

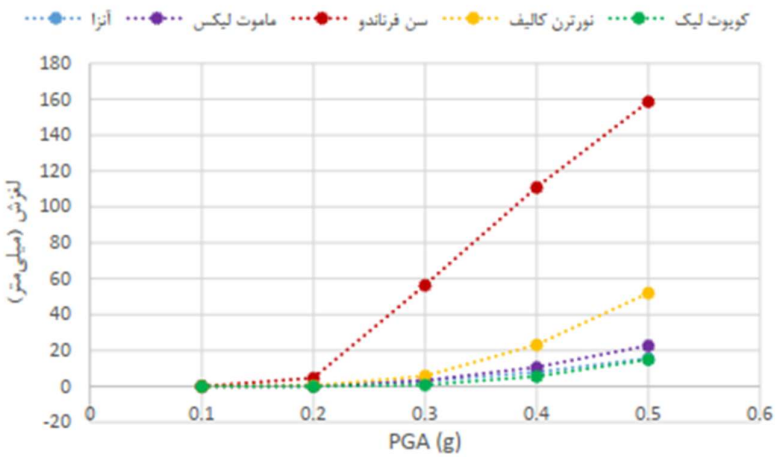


شکل (۱۲): لغزش نقاط در سطح مشترک سد-فونداسیون تحت زلزله آنزا با بیشینه‌ی شتاب‌های متفاوت

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۱۳): تغییرشکل سطح تماس سد و فونداسیون تحت زلزله آنزا



شکل (۱۴): حداکثر لغزش نقطه میانی سد تحت اثر زلزله‌ها

جابجایی تاج سد نسبت به کف فونداسیون

در شکل (۱۵) جابجایی تاج سد نسبت به کف فونداسیون در هنگام وقوع زلزله‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل مشخص است که با افزایش شدت زلزله، میزان نوسان تاج سد نسبت به کف فونداسیون افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تحت اثر زلزله‌های مختلف، نوع و میزان نوسان متفاوت است. چنان که مشخص است نوسان تاج سد نسبت به فونداسیون در طول زمان زلزله حول خطوط مختلف رخ داده است که این روند برای زلزله‌های مختلف متفاوت است.

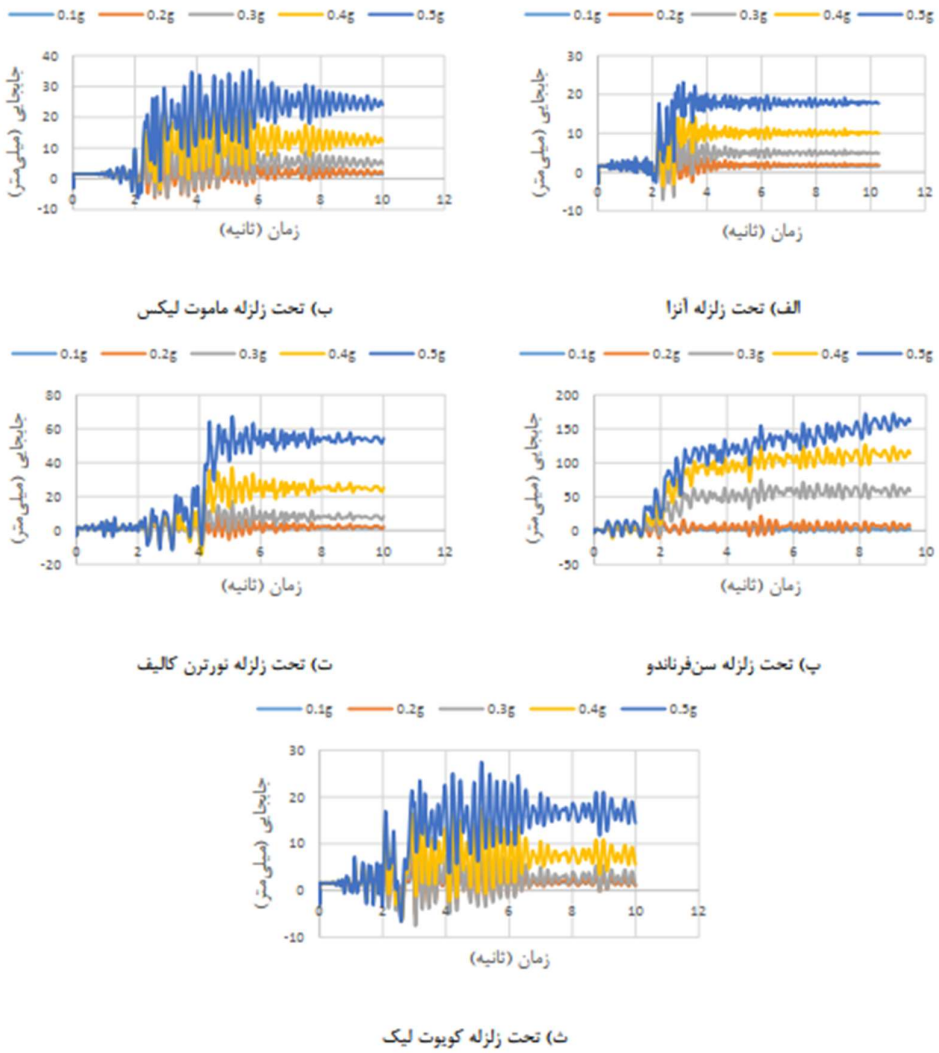
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

نتایج روش تعادل حدی

با توجه به این که نرم‌افزار کادم جهت تحلیل زلزله تنها PGA زلزله را به عنوان ورودی دریافت می‌کند، بالتبع نتایج حاصل از آن برای هر پنج زلزله یکسان است. اما نرم‌افزار آراس‌دم قابلیت تحلیل تاریخچه زمانی را داراست. شکل (۱۶) لغزش سد در طول وقوع زلزله‌های مختلف تحت تحلیل تعادل حدی در برنامه آراس‌دم و جدول (۲) ضریب اطمینان در برابر لغزش حاصل از دو نرم‌افزار کادم و آراس‌دم را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به دست آمده از نرم‌افزار آراس‌دم، سد برای هر پنج زلزله تا ۰/۳g پایدار است و روند لغزش تحت اثر زلزله‌های مختلف متفاوت است. در کادم تا ۰/۲g پایدار است بعبارتی روش تعادل حدی محافظه کارانه عمل می‌کند.

جدول (۲): ضریب اطمینان در برابر لغزش به روش تعادل حدی

PGA زلزله	کادم	آراس‌دم				
		آنزا	ماموت لیکس	سن- فرناندو	نورترن کالیف	کویوت لیک
۰/۱g	۱/۴۲	۱/۶۴	۱/۶۵	۱/۶۴	۱/۶۸	۱/۶۴
۰/۲g	۱/۱۴	۱/۲۸	۱/۲۶	۱/۲۷	۱/۳۳	۱/۲۸
۰/۳g	۰/۹۴	۱/۰۵	۱/۰۰	۱/۰۳	۱/۱۰	۱/۰۵
۰/۴g	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۸۱	۰/۸۷	۰/۹۴	۰/۸۸
۰/۵g	۰/۶۵	۰/۷۶	۰/۶۷	۰/۷۴	۰/۸۲	۰/۷۶



الف) تحت زلزله آنزا

ب) تحت زلزله ماموت لیکس

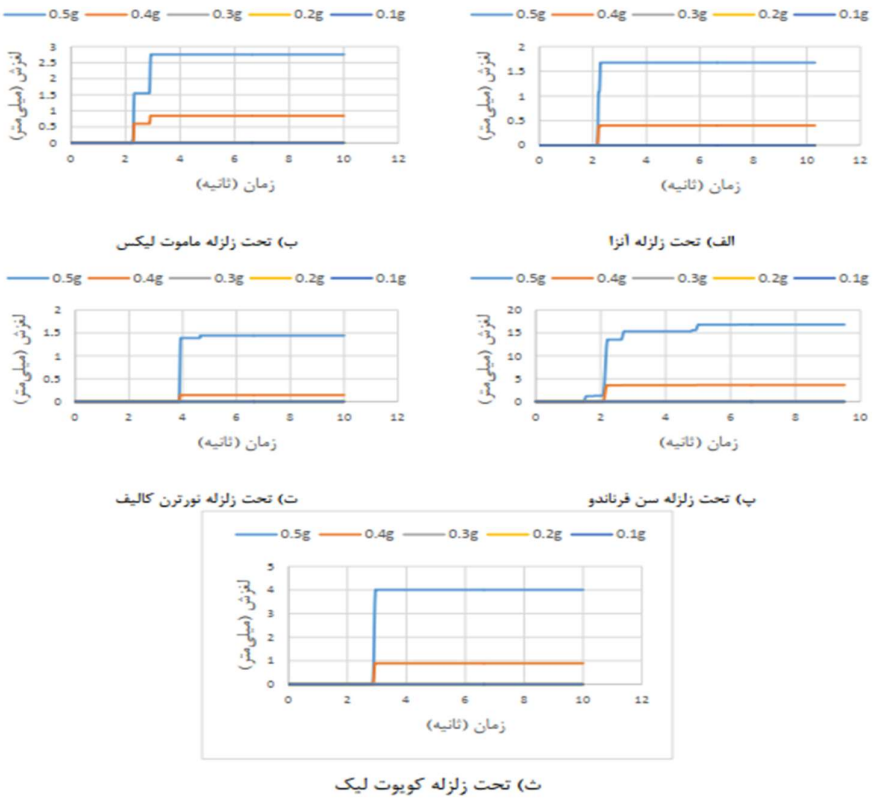
پ) تحت زلزله سن‌فرناندو

ت) تحت زلزله نورترن کالیف

ث) تحت زلزله کویوت لیک

شکل (۱۵):جابجایی تاج سد نسبت به کف فونداسیون

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

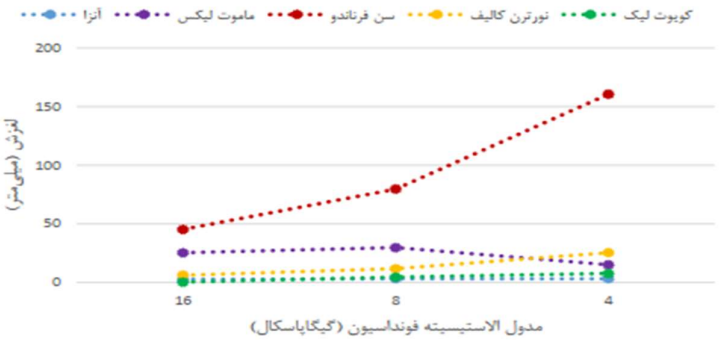


شکل (۱۶): لغزش سد تحت اثر زلزله‌های متفاوت در آراس‌دم

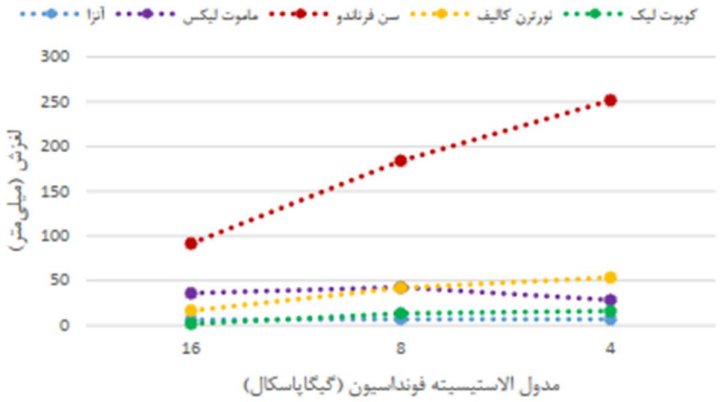
بررسی تأثیر مدول الاستیسیته فونداسیون در تحلیل پایداری

همانطورکه پیش از این ذکر شد، بررسی پایداری سدهای بتنی وزنی بر اساس روش تعادل حدی و مطابق ضوابط و آیین‌نامه‌های موجود، با فرض صلب بودن سد انجام می‌شود. همچنین در تحلیل‌های تعادل حدی، مشخصات فونداسیون وارد محاسبات نمی‌شود. در این بخش جهت بررسی تأثیر تفاوت مدول الاستیسیته فونداسیون بر لغزش سد، سه مدل ۳۰ متری، ۵۰ متری و ۱۰۰ متری که در بخش‌های قبل معرفی شدند، با در نظر گرفتن سه مدول الاستیسیته متفاوت برای فونداسیون، تحت اثر پنج زلزله معرفی شده در شکل‌های (۱۷) تا (۲۲) مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در شکل‌های فوق نمودار مربوط به حداکثر میزان لغزش سد بر روی فونداسیون، تحت اثر زلزله‌های مختلف بر روی مدل-های با فونداسیون با مدول الاستیسیته متفاوت نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقدار متفاوت لغزش سد بر روی فونداسیون‌های با مدول الاستیسیته متفاوت تحت اثر زلزله‌های مختلف به طور ملموس‌تری قابل مشاهده است و به وضوح مشاهده می‌شودکه روند مشخصی میان تغییرات مدول الاستیسیته فونداسیون و میزان لغزش تحت اثر زلزله وجود ندارد.

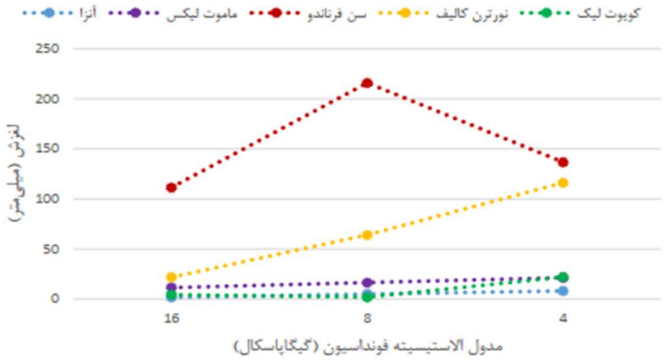
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



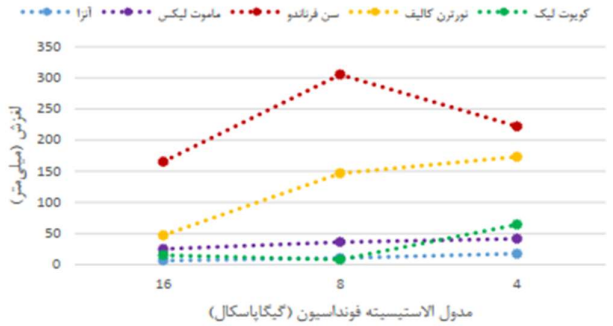
شکل (۱۷): حداکثر لغزش سد ۳۰ متری بر روی فونداسیون‌های متفاوت تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA=0.4g



شکل (۱۸): حداکثر لغزش سد ۳۰ متری بر روی فونداسیون‌های متفاوت تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA=0.5g

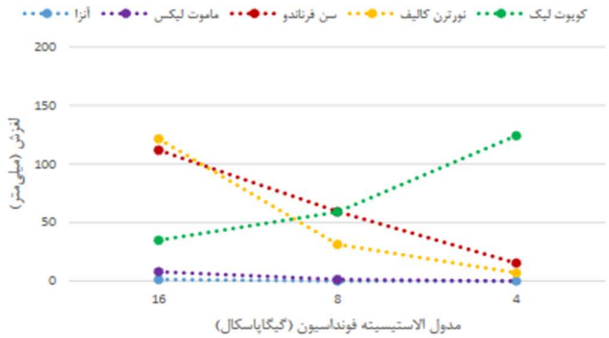


شکل (۱۹): حداکثر لغزش سد ۵۰ متری بر روی فونداسیون‌های متفاوت تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA=0.4g

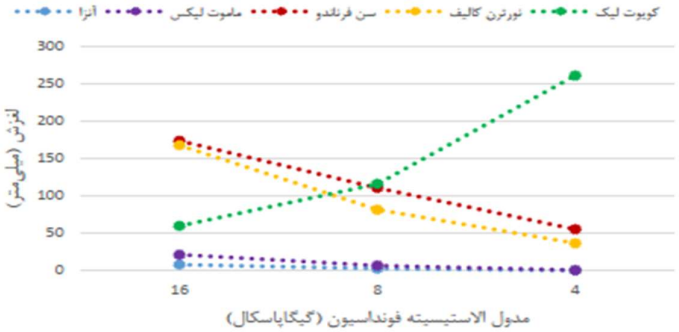


شکل (۲۰): حداکثر لغزش سد ۵۰ متری بر روی فونداسیون‌های متفاوت تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA=0.5g

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۲۱): حداکثر لغزش سد ۱۰۰ متری بر روی فونداسیون‌های متفاوت تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA=0.4g



شکل (۲۲): حداکثر لغزش سد ۱۰۰ متری بر روی فونداسیون‌های متفاوت تحت اثر زلزله‌های مختلف با PGA=0.5g

ضریب اطمینان در برابر لغزش

ضریب اطمینان در برابر لغزش برای مدل‌های مورد بررسی، به دست آمده از نرم‌افزارهای کادم و آراس‌دم، در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به این که در کادم تنها از بیشینه شتاب افقی جهت تحلیل تحت اثر زلزله استفاده می‌شود، تنها یک ضریب اطمینان برای هر مدل، از این نرم‌افزار به دست می‌آید. با توجه به این که ضرایب اطمینان برای همه مدل‌ها توسط نرم‌افزارهای کادم و آراس‌دم کمتر از یک به دست آمده است، می‌توان گفت مطابق نتایج این دو نرم‌افزار، همه مدل‌ها دچار لغزش شده‌اند.

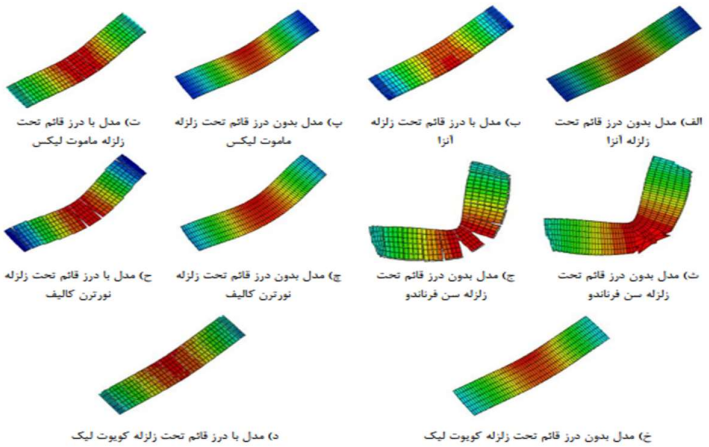
تغییرشکل کف سد مدل سه‌بعدی

تغییرشکل کف سد برای مدل سه‌بعدی ۵۰ متری با دره‌ی ۲۰۰ متری تحت اثر زلزله با بیشینه شتاب افقی ۰/۴g برای مدل‌های با و بدون درز قائم در شکل (۲۳) نشان داده شده است. تغییرشکل کف سد با مقیاس ۱۰۰۰ بزرگنمایی شده است، تا تفاوت‌ها ملموس شود. مطابق این شکل‌ها، تفاوت میان لغزش مقطع میانی سد و مقاطع کناری سد به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. همچنین بازشدگی در مدل‌های دارای درز قائم نیز، در این شکل مشخص است و اثر تفاوت ماهیت زلزله بر تغییرشکل و لغزش کف سد نیز به خوبی دیده می‌شود.

جدول (۳): ضریب اطمینان در برابر لغزش تحت اثر زلزله با بیشینه شتاب افقی ۰/۳g با کادم و آراس‌دم

ضریب اطمینان در برابر لغزش						
ارتفاع سد (متر)	کادم	آراس‌دم				
		آنزا	ماموت لیکس	سن-فرناندو	نورترن کالیف	کویوت لیک
۳۰	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۲
۵۰	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۱
۱۰۰	۰/۸۱	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۸۵

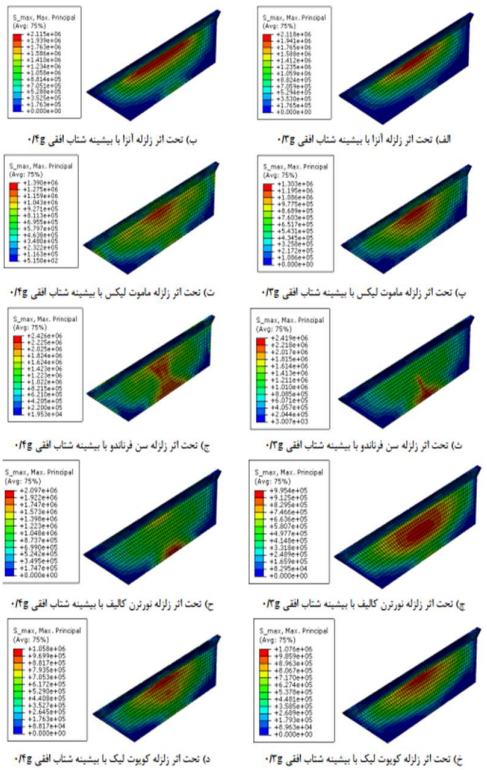
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



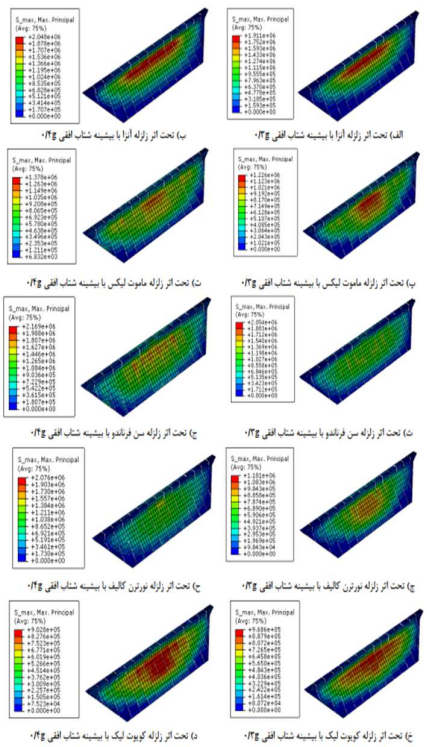
شکل (۲۳): تغییرشکل کف سد تحت اثر زلزله‌های مختلف با بیشینه شتاب افقی ۰/۴g در مدل ۵۰ متری-عرض دره ۲۰۰ متر

توزیع تنش کف سد مدل سه‌بعدی

در شکل‌های (۲۴) و (۲۵) توزیع تنش کششی اصلی برای مدل ۵۰ متری با دره ۲۰۰ متری برای دو حالت با درز قائم و بدون درز قائم قابل مشاهده می‌باشد. مطابق شکل (۲۴) مشاهده می‌شود که به طور کلی با افزایش شدت زلزله، میزان تنش‌ها در بدنه سد و به خصوص در مقاطع میانی و در بخش‌های نزدیک به کف سد، افزایش می‌یابد. بر اساس این شکل، در مواردی که مقدار لغزش بیشتری مشاهده شده بود، تنش‌ها نیز در بخش‌های میانی و نزدیک به کف سد مقادیر بزرگتری دارند. با مقایسه‌ی شکل‌های (۲۴) و (۲۵) می‌توان دریافت که وجود درزهای قائم موجب کاهش تنش-های به وجود آمده در سد و همچنین ایجاد تغییراتی در الگوی توزیع تنش می‌شود. در همه موارد مقادیر تنش ایجاد شده در مدل با درز قائم کمتر از تنش‌های ایجاد شده در مدل بدون درز قائم است.



شکل (۲۴): توزیع تنش کششی اصلی برای مدل ۵۰ متری با دره ۲۰۰ متری بدون درز قائم



شکل (۲۵): توزیع تنش کششی اصلی برای مدل ۵۰ متری با دره ۲۰۰ متری با درز قائم

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

نتیجه‌گیری

در این مطالعه که به بررسی پایداری سدهای بتنی وزنی اختصاص داشت، از دو روش تعادل حدی و اجزاء محدود استفاده شد و نتایج حاصل از آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفت و سعی شد بر روی مواردی که در روش تعادل حدی مورد توجه قرار نگرفته است و در روش اجزاء محدود امکان در نظر گرفتن آن‌ها وجود دارد، تمرکز شود. بنابراین در چند بخش تأثیر فرض صلبیت و انعطاف‌پذیری، ماهیت زلزله، تغییرات مدول الاستیسیته فونداسیون و مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی و نیز وجود درزهای اجرایی قائم بر پایداری سدهای بتنی وزنی مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفتند.

میزان لغزش نقاط مختلف کف سد با استفاده از روش اجزا محدود نشان داد که میزان لغزش سد تحت اثر زلزله‌های مختلف، متفاوت است، به طوری که حتی ممکن است تحت اثر یک زلزله با بیشینه‌ی شتاب مشخص، لغزشی رخ ندهد، در حالی که تحت اثر زلزله دیگری با همان مقدار بیشینه شتاب لغزش رخ دهد. این در حالی است که چنین تفاوتی در روش تعادل حدی دیده نمی‌شود و ماهیت زلزله بر نتایج مؤثر نیست.

اثر تغییر مدول الاستیسیته فونداسیون بر لغزش سد مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، مشخص شد که تفاوت زیادی بین لغزش سد بر روی فونداسیون‌های مختلف وجود دارد، در حالی که با توجه به فرضیات روش تعادل حدی و در نظر نگرفتن مدول الاستیسیته فونداسیون در محاسبات، این تفاوت قابل مشاهده نیست.

در روش تعادل حدی (مدل دوبعدی) تحلیل برخی مسائل بخاطر وجود تعدادی فرضیات امکان پذیر نیست. با روش اجزاء محدود به صورت دوبعدی و سه‌بعدی این امر میسر می گردد. نتایج نشان داد که میزان لغزش نقاط میانی در مدل سه‌بعدی و مدل دوبعدی بیشتر از میزان لغزش در نقاط کناری مدل سه‌بعدی است. همچنین با مقایسه نتایج مدل-های سه‌بعدی با مقطع یکسان و با عرض دره متفاوت مشاهده شد که لغزش در مدل‌های با عرض کمتر مقدار کوچکتری دارد. در بسیاری موارد، به ویژه در دره‌های تنگ-تر، ممکن است مدل‌های سه‌بعدی، لغزش به مراتب کمتری نسبت به مدل دوبعدی نشان دهند. بنابراین، مدلسازی سه-بعدی با تعریف دقیق ابعاد می‌تواند به طراحی اقتصادی‌تر سدهای بتنی وزنی کمک کند.

با تعریف درزهای قائم در مدل سه‌بعدی مشخص شد که وجود درزهای قائم موجب تغییرات قابل توجهی در لغزش بخش‌های مختلف سد نمی‌شود، اما منجر به کاهش تنش‌ها در بدنه‌ی سد بسته به ماهیت زلزله و بیشینه شتاب تا پانزده درصد می‌شود، به طوری که می‌تواند از ایجاد ترک‌خوردگی، جلوگیری کند. به طور کلی می‌توان گفت نتایج مدل دوبعدی محافظه‌کارانه‌تر می‌باشد و هر چند دید کلی نسبتاً خوبی به دست می‌دهد، اما جهت بررسی دقیق و در نظر گرفتن اثر عواملی همچون عرض دره و وجود درزهای قائم، مدلسازی سه‌بعدی مورد نیاز است.

مراجع

1. Alam Bagheri, M., Seyed Kazemi,M., (2014). Numerical modeling of Gravity concrete dams using ABAQUS software. Tehran, Simaye Danesh Publication.
2. Al-Shadeedi , M.B., Hamdi.E.J, (2017). Stability evaluation of small concrete gravity dams. Journal of engineering and sustainable development. 21(5):15-38.
3. Chopra, A. K., Zhang, L.,(1991). "Earthquake-induced base sliding of concrete gravity dams," Journal of Structural Engineering, 117(12): 3698-3719.
4. Chen, D., Du C.,(2011). "Application of strength reduction method to dynamic anti-sliding stability analysis of high gravity dam with complex dam foundation", Water Science and Engineering, 4: 212-224.
5. Corns, C.F., Tarbox, G.S., Schrader, E.K., (1988). Gravity dam design, in Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation, Springer US, pp. 466-492.
6. Djamel, O., Boualem, T., (2015). "effects of dam–foundation contact conditions on seismic performance of concrete gravity dams," Arabian Journal for Science and Engineering, 40(11): 3047-3056.
7. Farinha,M.L.B., Azevedo,N.M., Noemi,A.S.L., Almeida,J.R.D., Oliveira,S., (2022). Sliding stability assessment of concrete dams using a 3D discontinuum hydromechanical model following a discrete crack approach. Journal of getechnics. 2:133-157.
8. Jiang,S., Du, C., (2012). "Seismic stability analysis of concrete gravity dams with penetrated," Water Science and Engineering, 5(1):105-119.
9. Ghanaat, Y., (2004)."Failure modes approach to safety evaluation of dams," in 13th Conference on Earthquake Engineering, Vancouver.
10. Leclerce,M., Leger,P., Tinawi,R., (2003). Computer Aided Stabilty Analysis of Gravity

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

Dams-CADAM. Advances in Engineering Software,403-420.

11. Lombardi G., (2007)."3-D analysis of gravity dams," Lombardi Engineering Ltd, Switzerland.
12. Mazighi,H., Mihoubi,M.K., (2022).Damage of a concrete gravity dam under the effect of the hydrodynamic loads. 23 European Conference on Fracture - ECF23.1714-1720.
13. Moradi Kia,F., Ghafouri,H.R., Riyahi,M.M., (2021). Uncertainty analysis and risk identification of the gravity dam stability using fuzzy set theory. J. Hydraul. Struct., 2021; 7(4):76-92.
14. Rocio, L., Segura , B.M., Paultre, P., Padgett, J.E., (2021). Accounting for Uncertainties in the Safety Assessment of Concrete Gravity Dams: A Probabilistic Approach with Sample Optimization. Journal of water. 13,885: 1-19.
15. Sha S., Lei Z. and Zhang X.,(2016). "Study on failure mechanism of roller compacted concrete gravity dams by an isotropic damage model," in International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE).
16. Sharifpour,H., Farrokh,M. (2016).Investigation of the stability of concrete gravity dams using finite elements with strength reduction method, jornal of dam and hydroelectric powerplants, 3(9):12-25.
17. Ganji, H.T., Alembagheri, M., (2018) Stability of Monolithic Gravity Dam Located on Heterogeneous Rock Foundation. Arabian Journal for Science and Engineering,43:1777–1793.
18. U.S. Army Corps of Engineers., (1995). Gravity dam design, Engineer Manual 1110-2-2200, Washington, DC.
19. Wang D., Zhang L., Xu J., He M., Zhang W.,(2009). "Seismic stability safety evaluation of gravity dam with shear strength reduction method," Water Science and Engineering, 2:52-60.
20. Zhang,L., Pang D., Liu J., (2013). "Integral anti-slide stability analysis of RCC gravity dam," Applied Mechanics and Materials, Vols. 275-277, pp. 1480-1483.
21. Zeinizadeh, A., Mirzabozorg, H., (2012). "Geometric nonlinearity effect on seismic behavior of high arch dams," Journal of Civil Engineering Research, 2(1): 18-33.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دهم / شماره سی و ششم / زمستان ۱۴۰۲

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant
10th Year/ No. 36/ March 2024

Analysis of the stability of gravity concrete dams under earthquakes near and far from the fault using finite elements and limit equilibrium

Rasoul Jani[1]
Arash Esna Ashari[2]

Abstract

Controlling the stability of weighted concrete dams is one of the most important things in analysis and design. Until now, various methods have been presented to check the stability of weighted concrete dams, among the most important and widely used of them, limit equilibrium and finite element methods can be mentioned. In this study, the stability of weighted concrete dams with different heights was investigated using the limit equilibrium method and the two-dimensional and three-dimensional finite element method for five earthquake spectrums. The differences in the results of the above two methods were compared in obtaining some parameters such as slip rate, modulus of elasticity and stress distribution of the dam bottom. The results indicate that the limit equilibrium method is conservative compared to the finite element method, so that the sliding threshold occurs in the limit equilibrium method with a maximum acceleration of 0.2 g and in the finite element method with a maximum acceleration of 0.3 g. Three-dimensional analyzes for the analysis of deformation and distribution of tensile stress in the bottom of the dam indicate that the amount of slip and stress in the middle section of the dam is high and it is significantly different from the side parts. Installing a vertical seam in the dam, depending on the spectrum of the earthquake and the maximum acceleration, can reduce the stress by fifteen percent and reduce the possibility of cracking, but it does not cause significant changes in the sliding of different parts of the dam.

Keywords

Weight dams, Seismic response, Stability analysis, Finite elements, Limit equilibrium

[1]* Assistant Prof ,Department of Civil Engineering Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran . jani@iaut.ac.ir
Robotics and Soft Technologies Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
[2]Ms.c of Water Engineering and Hydrauic Structure, Department of Civil Engineering Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Received: 2023/09/14 Accepted: 2024/04/02

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]