بررسی تأثیر آب‌گیری مخزن در انتخاب ضریب شبه‌استاتیکی سدهای خاکی

محمد داودی*؛ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشکدهٔ مهندسی ژئوتکنیک
علی قنبری؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ *فنی و مهندسی*،
سعید عابدینی؛ شرکت سپاسد (تابان)، لرستان

تاریخ: دریافت ۸۹/۸/۸ **پذیرش** ۹۲/۱۰/۹

چکیده

تحلیل شبه‌استاتیکی، از روش‌های متداول در طراحی سدهای خاکی است و کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD)، استفاده از این روش را پیش از انجام تحلیل‌های دینامیکی نهایی توصیه کرده است. در این تحقیق، با استفاده از مشخصات مصالح سد مسجدسلیمان تحلیل‌های استاتیکی، شبه‌استاتیکی و دینامیکی انجام شده و با استفاده از نتایج تحلیل‌های دینامیکی ضریب اطمینان دینامیکی و شبه‌استاتیکی بحرانی‌ترین گوه مستعد لغزش محاسبه شده است. تغییر مکان ماندگار بحرانی‌ترین گوه لغزشی محاسبه شده و سپس ضرایب اطمینان محاسبه شده در مراحل قبل با یک‌دیگر مقایسه شد و برای ترازهای مختلف آب مخزن، ضریب شتاب افقی متغیر در ارتفاع سد با استفاده از روشی پیشنهادی بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: سدهای خاکی، ضریب شتاب افقی، تحلیل شبه‌استاتیکی، تحلیل دینامیکی

* **نویسنده مسئول** m-davood@iiees.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

مقدمه

سابقهٔ تحلیل شبه‌استاتیکی سازه‌های خاکی به اوایل دههٔ ۱۹۲۰ میلادی برمی‌گردد. در این روش، اثرات تحریک زلزله به‌صورت نیروهای افقی $F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$ و قائم $F_V = \frac{a_V W}{g} = k_V W$ مؤثر بر تودهٔ لغزشی معادل‌سازی می‌شود. در این روابط a_h و a_v دامنهٔ شتاب‌های شبه‌استاتیکی افقی و قائم، k_h و k_v ضرائب افقی و قائم زلزله و W وزن تودهٔ لغزشی است. از آن‌جا که مقادیر شتاب‌های شبه‌استاتیکی تابع شدت پیش‌بینی شدهٔ حرکات زمین نیز است، با بررسی تاریخچهٔ پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، نظرات محققان مختلف را در مورد نحوهٔ انتخاب ضریب شتاب افقی می‌توان به دو گروه تقسیم کرد:

الف) نظراتی که این ضریب را برای تمام ارتفاع بدنه سد یک‌سان فرض می‌کنند. در این راستا، جانسن بر مبنای نواحی چهارگانهٔ خطر زلزله در آمریکا، ضریب لرزه‌ای را از ۰/۰۵ تا ۰/۲ پیشنهاد کرده است [۱]. پایک بر اساس بررسی‌های سید و مکدیسی که مبتنی بر روش نیومارک است، با فرضیات منطقی در بارهٔ بزرگی زلزله و شتاب حداکثر، گرافی برای تخمین ضریب زلزله در خاکریزهای با ارتفاع حداکثر ۲۵۰ فوت (۷٦ متر) ارائه کرد. این گراف تا حدودی مبتنی بر میزان تغییر شکل‌های مجاز است و بر اساس آن برای زلزله به بزرگی ۸/۲ ریشتر، اگر تحلیل شبه‌استاتیکی با شتاب افقی معادل نصف شتاب حداکثر انجام شود، خرابی رخ نمی‌دهد. این ضریب برای زلزله‌های با بزرگای کم‌تر، به نسبت کاهش می‌یابد. در این روش برای تمام ضرایب شتاب افقی، مقدار ضریب اطمینان قابل قبول، معادل یک بیان شده است [۲]. انستیتو تکنولوژی کانپور هند مقدار ضریب لرزه‌ای آنالیز شبه‌استاتیک را برابر $\frac{ZIS}{3}$ بیان کرده است. در این رابطه، Z ضریب لرزه‌خیزی منطقه در آیین‌نامهٔ هندوستان، I ضریب اهمیت خاکریز و S نیز ضریبی تجربی است که بیان‌گر میزان تشدید جنبش زمین، از روی سنگ بستر تا پنجهٔ سد یا خاکریز است [۳].

ب) نظراتی که ضریب شتاب افقی را در ارتفاع سد متغیر در نظر می‌گیرند. در این راستا، کریشنا استفاده از منحنی‌هایی که بر اساس معادهٔ گوتنبرگ و ریشتر تهیه شده‌اند را توصیه کرده است. بر این اساس برای تعیین حداکثر شتاب زمین لازم است که حداکثر بزرگای محتمل و فاصلهٔ ساختگاه از کانون سطحی زلزله برآورد شود، سپس می‌توان حداکثر شتاب زمین را بر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

حسب درصدی از شتاب ثقل قرائت کرد. وی برای به‌دست آوردن عکس‌العمل سد، استفاده از منحنی‌های هاوزنر را که بر اساس اندازه‌گیری واقعی عکس‌العمل سد نسبت به زلزله ثبت شده در کالیفرنیای آمریکا تهیه شده‌اند، پیشنهاد می‌کند. در این روش بر اساس زمان تناوب و نسبت میرایی بحرانی، شتاب عکس‌العمل در تاج سد تعیین شده و برای زلزله‌های مختلف اصلاح می‌شود. این شتاب در بالای سد منظور شده و به‌سمت قاعده بر اساس جدول ۱ کاهش پیدا می‌کند. در جدول مذکور، H ارتفاع سد و Z عمق نقطهٔ بررسی شده از مبدأ تاج سد است [٤].

جدول ۱. مقادیر ضرایب تقلیل شتاب تاج [٤]

Z/H	۰/۰	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۹	۱
شتاب ماکزیمم نسبی	۱	۰/۹۹	۰/۸۷	۰/٦٧	۰/٤١	۰/۱۳	۰

استاندارد طراحی لرزه‌ای سدهای خاکی ژاپن برای طراحی سدهای خاکی همگن، سنگ‌ریزه‌ای و ناحیه‌بندی شده با ارتفاع کم‌تر از ۱۰۰ متر روش شبه‌استاتیک اصلاح شده را پیشنهاد کرده است. مطابق این روش، برای بررسی پایداری مقطع اصلی، ضریب لرزه‌ای برای هر گوه لغزشی یک عدد ثابت است و از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه است:

$$K_h = K_f\,(2.5 - 1.85(\frac{y}{h})) \qquad (0 < \frac{y}{h} \le 0.4) \tag{۱}$$

$$K_h = K_f\,(2 - 0.6(\frac{y}{h})) \qquad (0.4 < \frac{y}{h} \le 1) \tag{۲}$$

که h ارتفاع خاک‌ریز، y فاصله عمودی بین تاج و انتهای گوه لغزشی و K_f ضریب لرزه‌ای طراحی در پی است. در این آیین‌نامه بیان شده که اگر شرایط غیرمعمولی در وضعیت نیروهای لرزه‌ای، توپوگرافی، پی، سازه و یا مصالح وجود داشته باشد، لازم است از روش‌های دیگر نظیر تحلیل دینامیکی استفاده شود [۵].

کمک‌پناه و معقولی مقدار ضریب لرزه‌ای را برای پایداری شیب‌های طبیعی، بر اساس درصدی از نسبت شتاب محتمل (شتاب محتمل تقسیم بر شتاب ثقل)، به‌صورت رابطهٔ (۳) پیشنهاد کردند:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

K_h= (ضریب اهمیت) ×(ضریب نوع خاک) ×(ضریب عمق سنگ بستر) × (شتاب محتمل زلزله) / g (۳)

که در این رابطه، هرکدام از ضرایب با استفاده از روابط جداگانه‌ای معرفی شده‌اند [٦].

در سال ۲۰۰۸ قنبری و همکاران برای بررسی اثر انعطاف‌پذیری سدهای خاکی در انتخاب دقیق‌تر ضریب شتاب افقی، روی سد مسجدسلیمان؛ به‌عنوان بلندترین سد خاکی ایران؛ تحلیل‌های شبه‌استاتیکی و دینامیکی تحت دو زلزلهٔ منجیل و قاین انجام دادند. در ادامه با مقایسهٔ ابتکاری تاریخچهٔ زمانی ضرایب اطمینان گوه‌های مستعد لغزشی حاصل از تحلیل دینامیکی با ضرایب اطمینان حاصل از تحلیل شبه‌استاتیکی و با توجه به تغییر مکان ماندگار گوه لغزشی، ضریب شتاب افقی متغیر در ارتفاع را در سد مذکور معرفی کردند و با تکرار بررسی‌ها در سدهایی با ارتفاع‌های مختلف، نتایج را توسعه دادند [۷]. در ادامهٔ بررسی مذکور، تحقیق حاضر [۸] به‌گونه‌ای پایه‌گذاری شد که دقت روش شبه‌استاتیکی با استفاده از تحلیل دینامیکی در وضعیت‌های مختلف آب مخزن ادامه یابد و نتایج بررسی‌های انجام شده با دقت بیش‌تری استخراج شود.

روش استفاده شده برای تعیین ضریب شتاب افقی

در تحقیق حاضر، ضریب شتاب افقی در ارتفاع سد بر اساس تجارب حاصل از تحلیل دینامیکی سدهای مختلف و نحوهٔ تغییر منحنی‌های بزرگ‌نمایی شتاب طبق رابطهٔ (٤) پیشنهاد می‌شود [۸].

$$K_h(z) = K_{hB}.(1+\beta.Z) \qquad (٤)$$

که در این رابطه، β بیان‌گر میزان تغییر شتاب در ارتفاع سد است و باید مستقیماً از نتایج تحلیل دینامیکی به‌دست آید. در واقع، پارامتر مذکور اثرات هندسهٔ سد و رفتار انعطاف‌پذیر بدنهٔ سد در بزرگ‌نمایی ضریب لرزه‌ای پایه را بیان می‌کند و به‌طور معمول بین صفر تا ۱/۵ متغیر است. در رابطهٔ $Z=\frac{y}{h}$، که بیان‌گر موقعیت نقطهٔ مورد نظر در ارتفاع سد است، مرکز مختصات برای پارامتر y روی پایهٔ سد تعریف شده است و h نیز ارتفاع بخش غیرمدفون سد در نظر گرفته شده است. با توجه به توضیحات مذکور، حداکثر ضریب لرزه‌ای در تاج ، ۲/۵ برابر ضریب شتاب افقی در پایهٔ سد به‌دست می‌آید که در آیین‌نامه‌های مختلف مانند آیین‌نامهٔ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

طراحی سدهای خاکی مقاوم در برابر زلزله در کشور ژاپن نیز این مقدار (حداکثر شتاب تاج به شتاب پایه) برابر ۲/۵ منظور شده است.

در رابطهٔ مذکور، ضریب شبه‌استاتیکی شتاب افقی در پایهٔ سد (K_{hB}) که وابسته به شرایط لرزه‌خیزی ساختگاه و اثرات پی سد است، به‌صورت رابطهٔ (۵) معرفی می‌شود.

$$K_{hB} = \alpha A \tag{۵}$$

در این رابطه، پارامتر A معادل حداکثر شتاب مبنای طراحی (MDE) با دورهٔ بازگشت ٤۷۵ سال است و α ضریب شتاب مبنای طرح است که با توجه به اثرات ساختگاه از ۰/۳ تا ۰/٦ تغییر می‌کند.

محاسبهٔ پارامتر α در سه مرحله انجام می‌شود: در مرحلهٔ اول، لازم است تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان گوهٔ لغزشی که از تحلیل دینامیکی به‌دست آمده است با ضریب اطمینان حاصل از تحلیل شبه‌استاتیکی مقایسه شود. برای انجام این کار، تحلیل دینامیکی با شتاب نگاشت‌های مقیاس شده به مقادیر مختلف PGA انجام شده و مقدار تغییر مکان گوه از روش نیومارک محاسبه می‌شود تا زلزله‌ای که حداکثر تغییر مکان مجاز ۳۰ سانتی‌متر را در گوه لغزشی ایجاد می‌کند تعیین شود و تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان گوه لغزشی در این حالت محاسبه و معادل ضریب اطمینان شبه‌استاتیکی یک فرض شود. در واقع با انجام محاسبات مذکور، پارامتر واسطهٔ λ به گونه‌ای محاسبه می‌شود که تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان را به یک عدد ثابت تبدیل کند. در این جا لازم است به این نکته اشاره شود که استفاده از معیار تغییر مکان مجاز ۳۰ سانتی‌متر برای گوه لغزشی دارای ضریب اطمینان یک بر اساس نتایج تحقیقاتی است که اخیراً در این زمینه انجام شده است [۹].

در مرحلهٔ دوم، تحلیل دینامیکی سد با زلزله طرح انجام می‌شود و بر اساس الگوریتم ذکر شده در مرحلهٔ اول، تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان به عدد ثابت تبدیل می‌شود. از طرف دیگر با انجام تحلیل شبه‌استاتیکی با K_hهای مختلف، ضرایب اطمینان گوهٔ مورد نظر محاسبه می‌شود. از مقایسهٔ نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی و شبه‌استاتیکی، ضریب افقی زلزله (نشان داده شده در سمت راست شکل۱) به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که ضریب اطمینان حاصل از دو روش یک‌سان شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

در مرحلهٔ سوم، با مساوی قرار دادن مساحت حاصل از توزیع شتاب افقی متناظر با ضریب اطمینان مذکور (مساحت مستطیل) با توزیع خطی شتاب افقی پیشنهادی در این تحقیق (مساحت ذوزنقه) و با استفاده از مقدار معلوم β، پارامتر α مطابق شکل ۱ محاسبه می‌شود.

مشخصات مدل عددی

در تحقیق حاضر، سد سنگ‌ریزه‌ای مسجدسلیمان با ارتفاع ۱۷۷ متر از پی سنگی، طول تاج ٤۹۲ متر، هستهٔ رسی قائم و پوستهٔ سنگ‌ریزه‌ای، که بر روی رودخانهٔ کارون بنا شده، به‌عنوان مطالعهٔ موردی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis مدل شد [۱۰]. مدل عددی سد مذکور، با ۱۷۷۱ گره، ۸۲٦ المان، ضخامت فونداسیون ۳ برابر ارتفاع سد و بحرانی‌ترین گوه لغزشی در شکل ۲ به نمایش در آمده است. همان گونه که در شکل ۲ الف مشاهده می‌شود، مخزن سد در حالت پر مدل شده است لیکن در تحقیق حاضر، تأثیر مخزن فقط به‌صورت تغییر تنش مؤثر در پوستهٔ بالادست و هستهٔ سد لحاظ شده و از تأثیر نیروهای هیدرودینامیک مخزن صرف‌نظر شده است.

برای مدل‌سازی بدنهٔ سد از مدل موهر کلمب و برای فونداسیون سنگی از مدل الاستیک خطی استفاده شده است. مشخصات استاتیکی مصالح استفاده شده در مدل شامل دانسیته ρ، ضریب پواسون υ، چسبندگی C، زاویهٔ اصطکاک داخلی ϕ، زاویه اتساع Ψ و مدول یانگ E مطابق جدول ۲ معرفی شده است [۱۱]. برای مصالح لازم به ذکر است مقادیر پارامترهای مصالح بدنه سد مسجدسلیمان بر اساس تحقیق صورت گرفته در مرجع ۱۱ انتخاب شده است. در این تحقیق، پارامترهای استاتیکی و دینامیکی خاک بر مبنای گزارش ارائه شده از طرف مهندسین مشاور طراح سد (مشارکت نیپون-کوئه ژاپن، لامایر آلمان و مشانیر ایران) انتخاب شده و بر اساس نتایج آزمایش‌های فیلد تدقیق شده است.

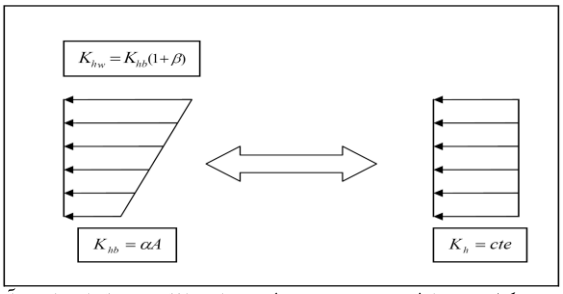
نتایج تحلیل‌های استاتیکی و شبه‌استاتیکی و دینامیکی

با انجام تحلیل استاتیکی، ضریب اطمینان گوه مستعد لغزش برابر ۱/٦۵ محاسبه شد. هم‌چنین تحلیل‌های شبه‌استاتیک مدل سد مسجدسلیمان با استفاده از مقادیر ضریب شتاب

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

افقی مختلف انجام گرفت. نتایج ضریب اطمینان گوه مستعد لغزش در تحلیل شبه‌استاتیکی در جدول ۳ قابل مشاهده است. جهت انتخاب پارامترهای مقاومتی مورد نیاز در تحلیل دینامیکی، پارامتر چسبندگی ۱/۵ برابر حالت استاتیکی و زاویهٔ اصطکاک ۲ واحد کم‌تر از حالت استاتیکی معرفی شده است [۱۲].

برای برآورد پارامترهای میرایی رایلی مورد نیاز تحلیل دینامیکی، فرکانس‌های اول و دوم مودی بدنهٔ سد بر اساس نتایج بررسی‌های قبلی [۱۳] معادل ٤ /۱ و۱/۹ هرتز انتخاب شد و با فرض نسبت میرایی ۵ درصد، مقادیر α=۰/۵ و β =۰/۰۰۵ به‌دست آمد.



شکل ۱. تناظر بین توزیع خطی شتاب افقی و مقدار ثابت آن

جدول۲. پارامترهای استفاده شده در تحلیل استاتیکی سد مسجدسلیمان [۱۱]

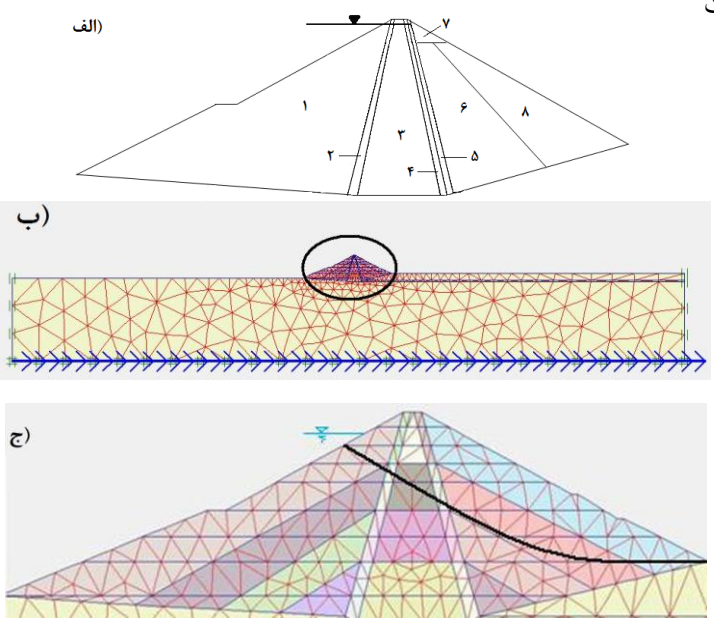
مصالح		ρ (Kg/m^3)	υ	C(N/m^2) ۱۰^5	ϕ (deg)	Ψ (deg)	E (۱۰^{8}N/m^2) عمق(m) ۱۲	۳۱	٤۳	۹۳	۱٤۸
هسته	اشباع(۳)	۲۲۰۰	۰/۳٤	۰/٤	۱۹	۰	–	۰/۳	–	۰/۷	۱/۲
پوسته	خشک (۷و۸)	۲۲۰۰	۰/٤	۰/۰۰۲	٤۵	۲۲	۰/۸٦	–	۰/۸٦	۱/۱۳	۱/٤۳
	خشک (٦)	۲۲۰۰	۰/۳۸	۰/۰۰۲	۳۷	۱۸	–	–	۰/٦۷	۰/۹۵	۱/۲٤
	اشباع(۱)	۲۳۵۰	۰/٤	۰/۰۰۲	٤۵	۲۲	–	۰/٦٤	–	۱/۰۹	۱/۳۳
فیلتر	مرطوب (٤و۵)	۲۲۰۰	۰/۳٦	۰/۰۰۲	٤۰	۰	–	۰/۷	–	۱/۰٦	۱/۵۵
	اشباع(۲)	۲۳۵۰	۰/۳٦	۰/۰۰۲	٤۰	۰	–	۰/٤۹	–	۰/۹٤	۱/٤٤
سنگ بستر		۲۵۰۰	۰/۳	–	–	–	۱۰				

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

جدول ۳. نتایج ضرایب اطمینان گوه مستعد لغزش با شتاب‌های افقی مختلف در تحلیل شبه‌استاتیکی

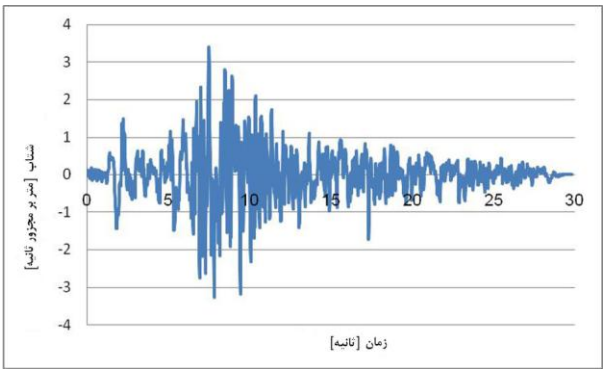
k_h	۰/۱	۰/۱۳	۰/۲	۰/۲۹
ضریب اطمینان	۱/٤۸	۱/۲۹	۱/۱۹	۱/۰۱

با توجه به قرارگیری سد مسجدسلیمان در حوزهٔ نزدیک گسل اندیکا، در پژوهش حاضر از دو نگاشت مشهور زلزله حوزهٔ نزدیک طبس و چی‌چی به‌عنوان محرک ورودی در تحلیل دینامیکی استفاده شد. تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت‌های مذکور در شکل‌های ۳ و ٤ نشان داده شده است. با اعمال شتاب‌نگاشت‌های مذکور، تاریخچهٔ زمانی ضرایب اطمینان گوه مستعد لغزشی در تحلیل دینامیکی مطابق شکل‌های ۵ و ٦ محاسبه شد. لازم به ذکر است با توجه به افزایش ضریب اطمینان در طول زلزله و نیاز به انجام محاسباتی که در ادامه بیان می‌شود، تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان با اعمال فیلتر بالاگذر (۰/۲هرتز) و تصحیح خط مبنا اصلاح شده است

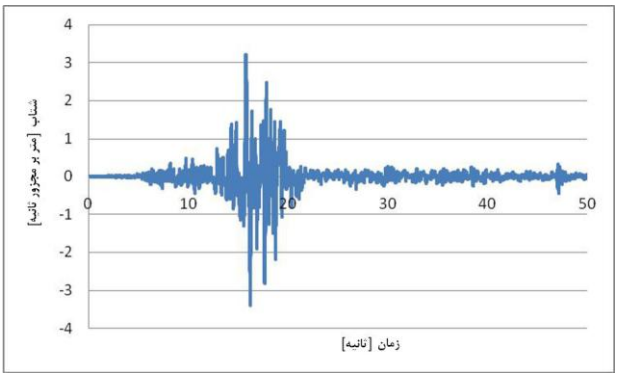


شکل ۲.الف) مقطع سد مسجدسلیمان به همراه نواحی مختلف مصالح ب) شبکهٔ اجزا محدود بدنه و فونداسیون سد مسجدسلیمان ج) قسمت بزرگ شدهٔ بدنهٔ سد و بحرانی‌ترین گوه مستعد لغزش

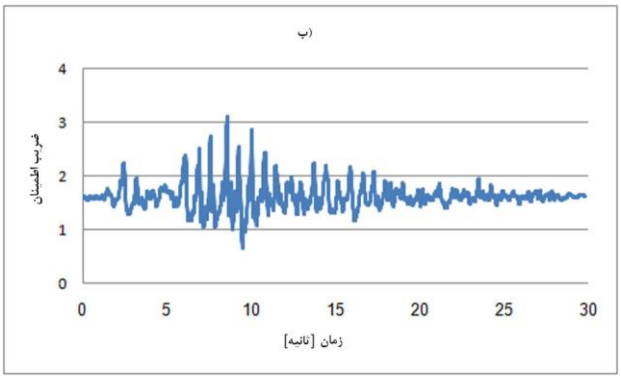
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]



شکل ۳. شتاب‌نگاشت مقیاس شده زلزله طبس



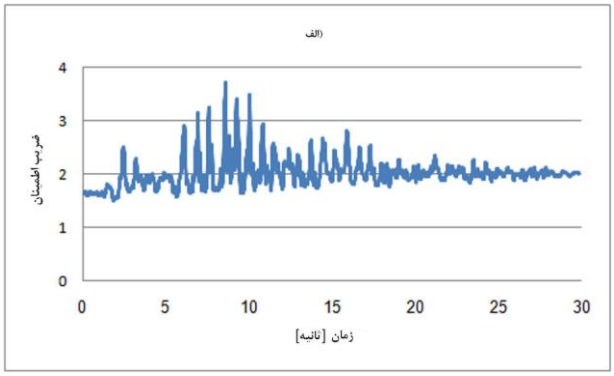
شکل ٤. شتاب‌نگاشت مقیاس شده زلزله چی‌چی



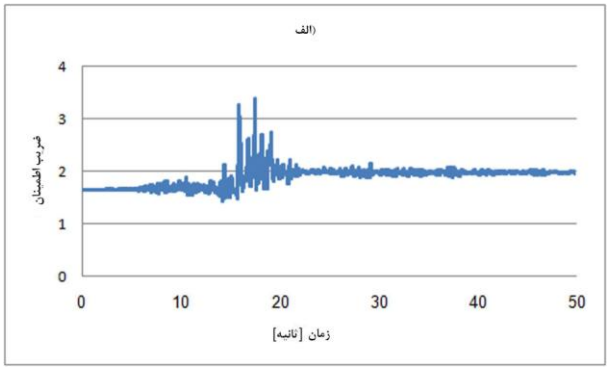
شکل ۵. تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان گوه مستعد لغزش در حالت تحریک با زلزله طبس

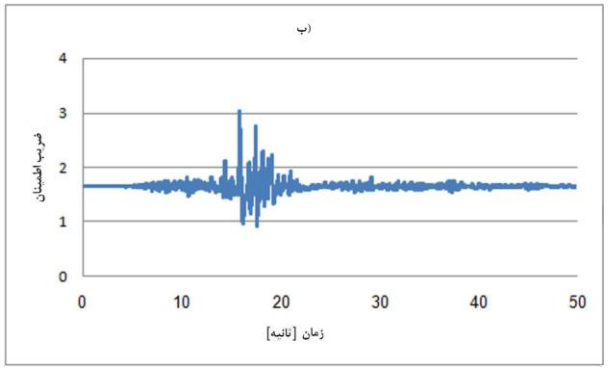
الف) قبل از اعمال فیلتر بالاگذر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]



شکل ۵. تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان گوه مستعد لغزش در حالت تحریک با زلزله طبس
ب) پس از اعمال فیلتر بالاگذر





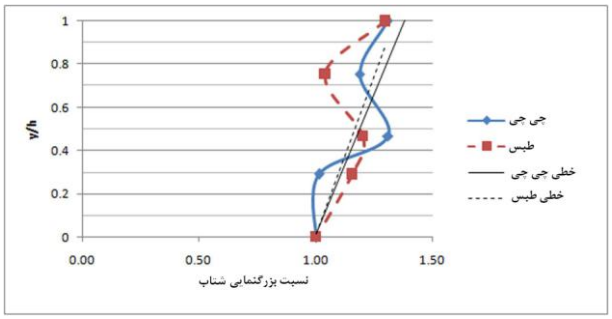
شکل ٦. تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان گوه مستعد لغزش در حالت تحریک با زلزله چی چی
الف) قبل از اعمال فیلتر بالاگذر ب) پس از اعمال فیلتر بالا گذر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

روند محاسبه ضریب β

با توجه به توضیحات ارائه شده برای رابطهٔ ٤، پارامتر β نحوهٔ توزیع شتاب در ارتفاع سد را مشخص می‌کند. بنا بر این در این قسمت با انجام تحلیل دینامیکی، منحنی تغییرات دامنه شتاب در قسمت میانی هسته مطابق شکل ۷ محاسبه شد. با فرض خطی بودن شتاب حداکثر در ارتفاع، چنان‌که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقدار نسبت شتاب حداکثر در تاج به شتاب حداکثر در پایهٔ سد برای زلزله‌های طبس و چی‌چی به‌ترتیب برابر ۱/۳٤و۱/۳۸ به‌دست می‌آید. بنا بر این مقدار β را در مدل عددی مذکور می‌توان به‌صورت میانگین برابر ۰/۳٦ در نظر گرفت.

در ادامه، برای تعیین اثر تغییرات تراز آب مخزن در مقدار پارامتر β، محاسبات تحلیل دینامیکی در ٦ تراز مختلف آب مخزن تکرار و نتایج محاسبات به‌صورت شکل ۸ استخراج شد. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش سطح آب مخزن تا اواسط ارتفاع سد، پارامتر β کاهش و با افزایش بیش‌تر ارتفاع آب به‌تدریج افزایش می‌یابد. روند مذکور را می‌توان به‌صورت یک معادلهٔ درجه دو با ضریب هم‌بستگی R^2=۰/۸۵ بیان کرد.



شکل ۷. تغییرات شتاب حداکثر در ارتفاع سد (عبوری از مرکز هسته) با اعمال زلزله طبس و چی‌چی

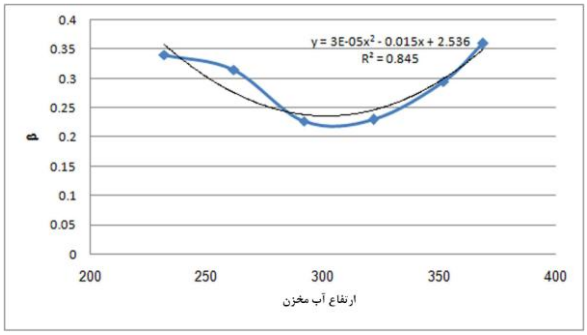
روند محاسبهٔ ضریب α

با توجه به توضیحات ارائه شده برای رابطهٔ (۵)، در مرحلهٔ اول محاسبهٔ پارامتر α، برای یافتن زلزله‌ای که تغییر مکان مجاز را در گوهٔ مورد نظر ایجاد می‌کند و به‌منظور بررسی تأثیر بزرگی زلزله در نتایج تحلیل، شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در آنالیزهای دینامیکی به مقادیر g

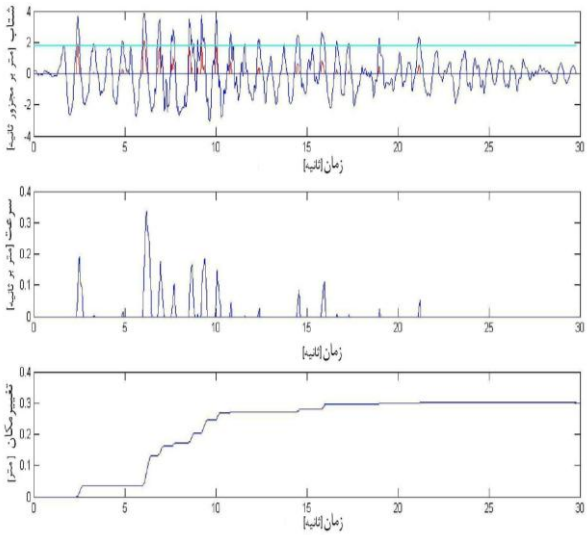
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

۰/۲ الی ۱g (با فاصلهٔ ۰/۰۵g) مقیاس و با هر کدام از شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده برای گوه مستعد لغزش یک تحلیل دینامیکی انجام شد. با استفاده از نتایج به‌دست آمده و به‌کمک رابطهٔ ٦، شتاب‌نگاشت متوسط گوه مستعد لغزش به‌دست آمد.

$$\bar{a}(t) = \frac{\sum a_i(t).A_i}{\sum A_i} \qquad (٦)$$



شکل ۸. تغییرات β با سطح آب مخزن

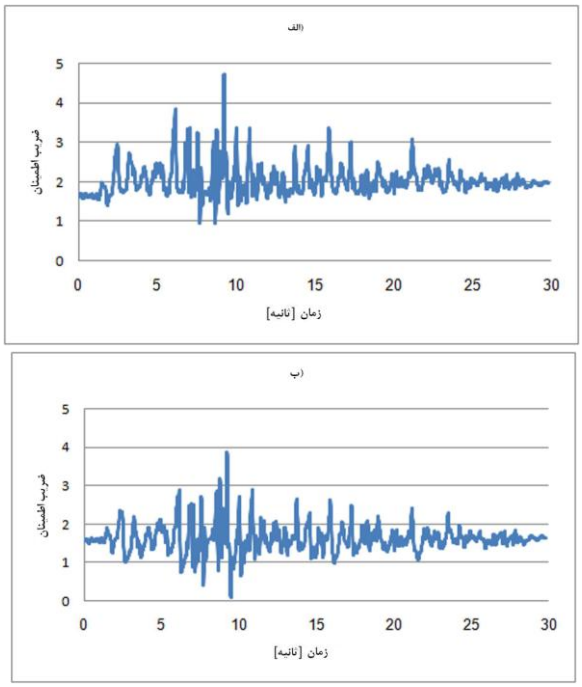


شکل ۹. نحوهٔ محاسبهٔ تغییرمکان ماندگار ۳۰ cm در گوه مستعد لغزش با اعمال: الف) زلزله طبس مقیاس شده به شتاب ۰/٦٤g ب) با اعمال زلزله چی چی مقیاس شده به شتاب ۰/۵۹g از بالا به پایین به‌ترتیب: تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییرمکان.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

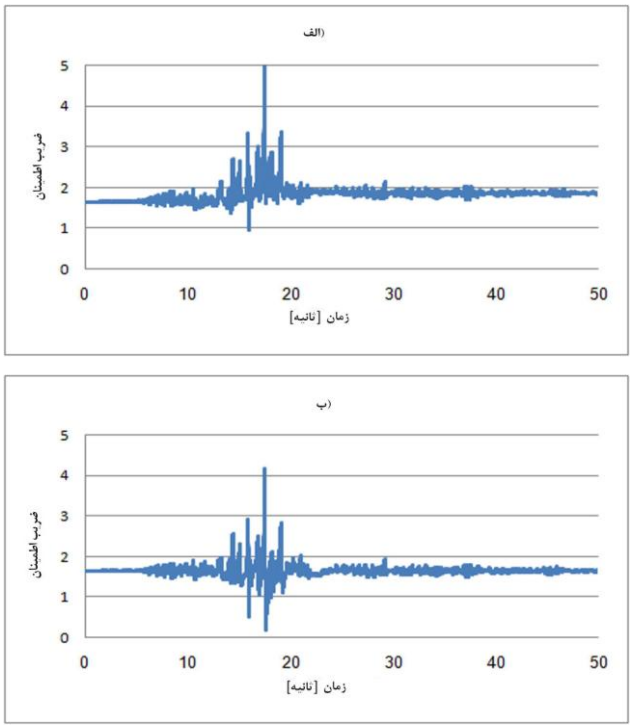
در این محاسبات گوۀ لغزشی به‌سطوح مختلف A_i تقسیم شد و $a_i(t)$ مقدار تاریخچۀ زمانی شتاب در مرکز هر سطح به‌دست آمد. با استفاده از روش بلوک لغزشی نیومارک و به‌کمک نرم‌افزار تهیه شده در محیط Matlab [۹]، تغییر مکان ماندگار گوه مستعد لغزش به‌روش نیومارک محاسبه شد. در شکل ۹ مقایسۀ شتاب‌نگاشت متوسط گوه با شتاب تسلیم، نحوۀ انتگرال‌گیری از مقادیر شتاب متوسط گوه و در نتیجه تغییرات سرعت و تغییر مکان ماندگار برای هر دو زلزلۀ طبس و چی‌چی ارائه شده است.

چنان‌که مشاهده می‌شود تغییر مکان مجاز ۳۰ سانتی‌متری گوۀ مستعد لغزش با اعمال زلزلۀ طبس در شتاب مقیاس شده به ۰/٦٤g و با اعمال زلزلۀ چی‌چی در شتاب مقیاس شده به g ۰/۵۹ حاصل شده است. با اعمال شتاب‌نگاشت‌های معادل تغییر مکان مجاز به مدل عددی، تاریخچۀ زمانی ضریب اطمینان گوۀ مستعد لغزش با استفاده از روابط مربوط مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ محاسبه شد.



شکل ۱۰. تاریخچۀ زمانی ضریب اطمینان معادل تغییر مکان مجاز گوه در زلزله طبس مقیاس شده به ٦٤g/ ۰الف) قبل از اعمال فیلتر بالاگذر ب) پس از اعمال فیلتر بالاگذر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]



شکل ۱۱. تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان معادل تغییر مکان مجاز گوه در زلزله چی چی مقیاس شده به ۰/۵۹g الف) قبل از اعمال فیلتر بالا گذر ب) پس از اعمال فیلتر بالاگذر

برای تبدیل ضرایب اطمینان گوه لغزشی در حالت دینامیکی به ضریب اطمینان معادل شبه‌استاتیکی از رابطهٔ ۷، تابع λ، استخراج شده و با اعمال این ضریب بر ضرایب اطمینان دینامیکی ناشی از شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده به MDE، ضریب اطمینان معادل به‌دست آمد.

$$\lambda.\ \overline{f}_S(t)_{30}=1 \qquad (۷)$$

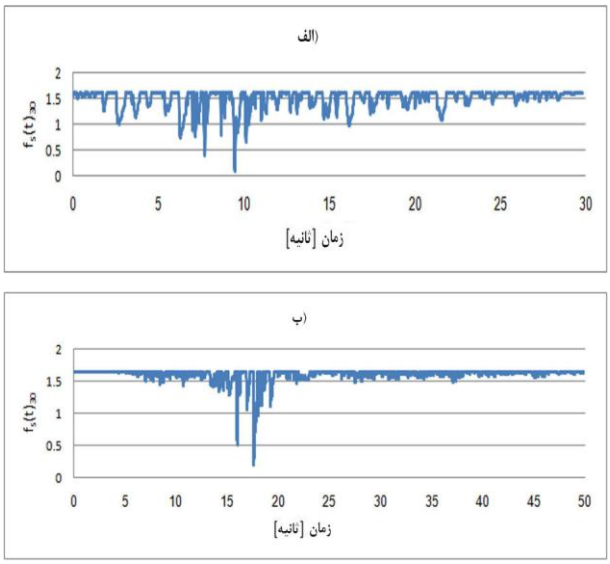
در رابطهٔ ۷، $f_S(t)_{30}$ تغییرات ضریب اطمینان گوه لغزشی بر اثر زلزله‌ای است که تغییر مکان ۳۰ سانتی‌متر را ایجاد می‌کند. از آن جا که در نمودار تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان دینامیکی، لحظاتی که مقدار مذکور به مقدار کم‌تر از ضریب اطمینان استاتیکی می‌رسد حائز اهمیت خاصی است از این رو، تابع f مطابق شکل ۱۲ برای در نظر گرفتن مقادیر کم‌تر از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

ضریب اطمینان استاتیکی (ضریب اطمینان در لحظه $t = 0$) به تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان اعمال شد. با به‌دست آوردن تابع $f_S(t)_{30}$ برای گوه مورد نظر در زلزله‌های طبس و چی‌چی، متوسط ضریب اطمینان $\overline{f}$ محاسبه شد و در نتیجه، مقادیر مختلف λ مطابق جدول ٤ به‌دست آمد. پس از استخراج ضریب λ و محاسبهٔ مقادیر $\overline{f}_S(t)$، ضریب اطمینان معادل دینامیکی S_E با استفاده از رابطهٔ ۸ مطابق جدول ٤ محاسبه شد. از آن‌جا که مقدار مذکور در گوهٔ بررسی شده برای دو زلزله، نزدیک به‌هم به‌دست آمد از این رو، متوسط این دو مقدار برابر ۱/۱۳۵ به‌عنوان ضریب اطمینان معادل دینامیکی سد مسجدسلیمان در دو زلزلهٔ بررسی شده منظور شد.

$$S_E = \lambda . \overline{f}_S(t) \qquad (۸)$$

در مرحلهٔ دوم محاسبهٔ پارامتر α، با مقایسهٔ مقادیر ضرایب اطمینان شبه‌استاتیکی (جدول۳) با ضریب اطمینان معادل دینامیکی ۱/۱۳۵، نزدیک‌ترین مقدار ضریب شتاب افقی برابر ۰/۲ به‌دست آمد.



شکل ۱۲. قسمتی از تاریخچهٔ زمانی ضریب اطمینان دینامیکی در نظر گرفته شده برای محاسبهٔ $\overline{f}$ با اعمال زلزله الف) طبس و ب) چی‌چی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

مطابق مرحلهٔ سوم، با مشخص شدن مقدار ضریب شتاب افقی ثابت در ارتفاع و هم‌چنین مقدار β، با برقراری تناظر یک‌به‌یک بین دو قسمت شکل ۱، مقدار α در پایهٔ سد برابر ۰/۵ محاسبه شد.

جدول ٤. ضرایب تبدیل λ و ضریب اطمینان معادل دینامیکی محاسبه شده در دو زلزلهٔ بررسی شده

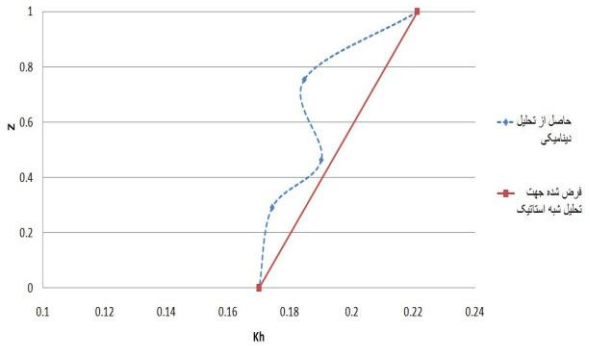
زلزله	$\overline{f}_S(t)_{30}$	λ	$\overline{f}_S(t)$	S_E
طبس	۱/۳۵	۰/۷٤	۱/٥٤	۱/۱٤
چی‌چی	۱/٤٦	۰/٦۸	۱/٦٥	۱/۱۳

به‌منظور بررسی دقت روش ارائه شده در تحقیق حاضر، نحوهٔ تغییرات خطی شتاب در ارتفاع سد (که مورد نیاز تحلیل شبه‌استاتیکی سدهای خاکی نیز است) با حالت واقعی تغییرات غیرخطی شتاب در ارتفاع سد (حاصل از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی) در ترازهای مختلف آب مخزن ارزیابی و مقایسه شد. به‌عنوان نمونه، چنان‌که در شکل ۱۳ برای تراز ۳٦۹ m آب مخزن مشاهده می‌شود در همهٔ ارتفاع‌های بررسی شده، مقادیر شتاب افقی زلزله حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی همواره کوچک‌تر از حالت خطی فرض شده است. به‌عبارت دیگر با اطمینان می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در روش مذکور (استفاده از تحلیل شبه‌استاتیکی با ضریب افقی متغیر خطی در ارتفاع) همواره طراحی سد به‌صورت دست بالا انجام می‌شود.

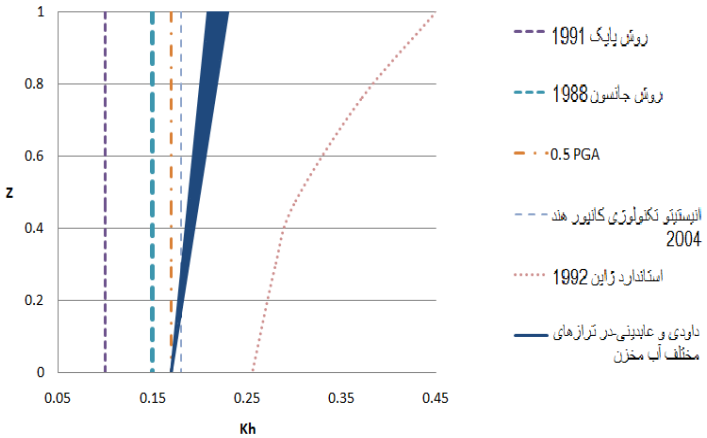
برای مقایسه بین نتایج حاصل از تحقیق حاضر با بررسی‌های دیگر محققان و آیین‌نامه‌های دنیا، همهٔ نتایج در شکل ۱٤ ترسیم شده است. براساس این شکل، تأثیر لحاظ کردن انعطاف‌پذیری بدنهٔ سد با توجه به ترازهای مختلف آب مخزن بر روی ضریب شتاب افقی زلزله قابل مشاهده است به‌طوری‌که مقادیر پیشنهادی، از مقدار ۰/۱۷ در ترازهای پایین بدنهٔ سد شروع می‌شود و در تراز تاج سد به حداکثر ۰/۲۳ می‌رسد. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود، پهنای باند ارائه شده در این تحقیق به‌گونه‌ای است که در ترازهای پایین بدنهٔ سد، تأثیر تغییرات تراز آب مخزن بر ضریب شتاب افقی زلزله ناچیز است در حالی‌که در ترازهای بالاتر، این تأثیر بیش‌تر است. مقایسهٔ نتایج این پژوهش با نتایج دیگران نیز نشان می‌دهد که در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری بدنهٔ سد، منجر به افزایش ضریب شتاب افقی در ترازهای بالاتر بدنهٔ سد می‌شود. بنا بر این، معیار ضریب شتاب ثابت در ارتفاع سد (که در طراحی‌های مرسوم سدهای خاکی به‌وفور استفاده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

می‌شود) باعث می‌شود گوه‌های مستعد لغزش واقع در ترازهای بالای سد، زمین‌لرزه‌های ضعیف‌تری طراحی کنند. در ادامهٔ این بررسی‌ها، تحلیل‌های مشابه روی سدهای با ارتفاع مختلف و با تعداد بیش‌تر نگاشت‌های زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در حال انجام است.



شکل ۱۳. ضریب شتاب افقی متغیر در ارتفاع سد مسجدسلیمان



شکل ۱٤. مقایسهٔ k_h به‌دست آمده در ترازهای مختلف بدنهٔ سد بر اساس معیار این تحقیق با معیارهای دیگر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر تغییرات تراز آب مخزن، لرزه‌خیزی ساختگاه، مشخصات هندسی و انعطاف‌پذیری سد به‌عنوان عوامل مؤثر در تعیین ضریب شتاب افقی در طراحی شبه‌استاتیکی سدهای خاکی بررسی شد. به‌این منظور با انجام تحلیل‌های استاتیکی و شبه‌استاتیکی، تحلیل دینامیکی سد مسجدسلیمان با استفاده از شتاب‌نگاشت زلزله‌های چی‌چی و طبس انجام شد. سپس ضریب اطمینان معادل دینامیکی بر اساس روش پیشنهادی و با محاسبهٔ تغییر مکان مجاز گوهٔ لغزشی با روش نیومارک به‌دست آمد و با مقدار شبه‌استاتیکی مقایسه شد. در ادامهٔ تحقیقات، ضریب شتاب افقی ثابت و متغیر در ارتفاع، در ترازهای مختلف آب مخزن به‌دست آمد و مشاهده شد با افزایش سطح آب مخزن تا اواسط ارتفاع سد، پارامتر β کاهش و با افزایش بیش‌تر ارتفاع آب به‌تدریج افزایش می‌یابد. با مقایسهٔ معیار ارائه شده در این پژوهش با معیارهای ارائه شده محققان دیگر و آیین‌نامه‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت روش پیشنهادی منجر به افزایش ضریب شتاب افقی در ترازهای بالاتر بدنهٔ سد می‌شود. بنا بر این، معیار ضریب شتاب ثابت در ارتفاع سد منجر خواهد شد گوه‌های مستعد لغزش واقع در ترازهای بالای سد، به زمین‌لرزه‌های ضعیف‌تری طراحی شوند. بدیهی است نتایج به‌دست آمده، صرفاً بر اساس تحلیل‌های دینامیکی و شبه‌استاتیکی سد مسجدسلیمان و با تعداد نگاشت‌های محدود زلزله به‌دست آمده است و توسعه و کاربردی کردن نتایج به حالت عمومی سدهای خاکی، نیاز به تحقیقات تکمیلی دارد.

منابع

1. Jansen R.B, "Advanced dam engineering", A Van Nostrand Reinhold Book (1988).
2. Pyke R., "Selection of Seismic Coefficients for Use in Pseudo-Static Slope Stability Analysis", Consulting Engineer, Lafayette (1991) from: www.tagasoft.com.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

3. Indian Institute of Technology Kanpur, "IITK-GSDMA Guidelines for Seismic Design of Earth Dam and Embankments" (2004).
4. Jai Krishna, "Earthquake Resistant Design of Earth Dam", Symp. on Earthquake Eng, University of Roorkee, Poorkee, U.P, India (1962).
5. "The Seismic design standard for embankment dam (Draft)", Japan (1992).
6. Komak-Panah A., Maagholy A., "determining the horizontal seismic coefficients in pseudo-static analysis of slops", Third Iranian international conference of Geotechnical Engineering and soil mechanics, Tehran (2002).
7. Ghanbari A., Davoodi M., Ahmadi B, "A new equation to calculate the seismic coefficient of pseudo-static analysis for Masjed Soleiman Dam", Dam Engineering, Volume XIX, Issue 2, Sept., (2008) 123-144.
8. Abedini S., "Using Dynamic Analysis of Embankment Dams for Developing the Pseudo Static Approach", MS thesis, Zanjan Islamic Azad University, Iran (2008).
9. Bray J.D. Rathje E.R., "Earthquake-induced displacements of solid-waste landfills", Jornal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, ASCE, 124(3) 242-253 (1998).
10. PLAXIS, Version 8.2, Reference Manual, Web:http:// *www.plaxis.nl.com*.
11. Davoodi M. "Dynamic characteristic evaluation of embankment dams by forced and ambient vibration tests", Ph.D. thesis, International Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, I.R. Iran (2003).
12. Braja M.D., "Foundamentals of Soil Dynamics", New York, Amsterdam Oxford (1985).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]

13. Davoodi M., Amel Sakhi M., Jafari M.K., "Comparing Classical and Modern Signal Processing Techniques in Evaluating Modal Frequencies of Masjed Soleiman Embankment Dam during Earthquakes". Asian Journal of Applied Sciences, 2 (1) (2009) 36-49.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.3.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2941]