نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دوازدهم/ شماره سی و هشتم / پاییز ۱۴۰۴
Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
12th Year/ No. 38/ December 2025

ارزیابی عملکرد روش‌های انتخاب شتاب‌نگاشت در کاهش پراکندگی نتایج تحلیل دینامیکی سد خاکی همگن

اشکان قلی‌پور نوروزی[1*]
ناصر پورسعید[2]
صادق صادقی[3]

چکیده

تحلیل دینامیکی سدهای خاکی، به علت تعداد بالای المان‌ها و رفتار غیرخطی مصالح، بسیار زمان‌بر است. همچنین با توجه به ماهیت تصادفی زلزله، استفاده از چند شتاب‌نگاشت برای افزایش دقت تحلیل‌ها ضروری است، ولی این امر موجب افزایش پراکندگی نتایج می‌شود. در مهندسی زلزله روش‌هایی برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها ارائه شده که می‌توانند با افزایش شباهت طیف پاسخ رکوردها با طیف طرح، پراکندگی نتایج را کاهش دهند. در این تحقیق، عملکرد چهار روش میانگین انحراف طیفی، سازگاری طیفی، توازن طیفی و شدت طیفی در کاهش پراکندگی نتایج تحلیل دینامیکی دو سد خاکی همگن با ارتفاع ۱۵ و ۳۰ متر ارزیابی شده است. برای این منظور، از میان ۱۵۰ شتاب‌نگاشت، در هر روش، ۱۰ رکورد با بیشترین مشابهت طیفی انتخاب شد و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی با فرض تکیه‌گاه گیردار و ساخت مرحله‌ای انجام گردید. نتایج نشان دادند که در سد ۱۵ متری، روش سازگاری طیفی، کمترین دامنه‌ی تغییرات (۳/۶۶ سانتی‌متر) و ضریب تغییرات (۱/۰۵) را دارد. در سد ۳۰ متری، روش‌های شدت طیفی و میانگین انحراف طیفی، به ترتیب، با ضریب تغییرات ۱/۷۳ و ۱/۷۹، بهترین عملکرد را داشتند. این نتایج، بیانگر تأثیر زمان تناوب سازه بر کارایی روش انتخاب شتاب‌نگاشت است.

واژه‌های کلیدی

سد خاکی همگن، تحلیل دینامیکی سد، انتخاب شتاب‌نگاشت، شاخص‌های شباهت طیف پاسخ، پراکندگی نتایج تحلیل

[1*] استادیار، گروه عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. ashkan.gholipoornoroozi@iau.ir
[2] دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.
[3] مربی، گروه عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

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

مقدمه

با توجه به ابعاد بزرگ سد و همچنین رفتار غیرخطی مصالح لازم، زمان انجام این تحلیل بسیار زیاد بوده و هزینه‌ی محاسبات را بشدت افزایش می‌دهد (چاکرابورتی[1]، ۲۰۱۸). همچنین دقت نتایج تحلیل دینامیکی سدهای خاکی، به شتاب‌نگاشت‌های انتخابی وابسته است (تروپینو[2] و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین لازم است به کمک روش‌هایی با هزینه‌ی کم، شتاب‌نگاشت‌هایی انتخاب شوند که نتایج حاصل از آنها دارای کمترین پراکندگی بوده و همچنین بتوان تعداد شتاب‌نگاشت‌های لازم برای انجام تحلیل دینامیکی را کاهش داد (چاکرابورتی، ۲۰۱۸)، (داردانلی و پیپیتون[3]، ۲۰۱۷)، (فورسلینی[4]، ۲۰۲۰).

اثر زلزله به دو روش خطی یا غیر خطی تحلیل می‌شود (جیا و جیا[5]، ۲۰۱۸). روش‌های خطی عبارتند از تحلیل استاتیکی معادل، تحلیل دینامیکی طیفی و تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی. همچنین روش‌های غیرخطی، شامل تحلیل استاتیکی غیر خطی و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیر خطی هستند (وانگ[6] و همکاران، ۲۰۱۸)، (اسفه و کاینیا[7]، ۲۰۲۰). تجربیات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های شبه استاتیکی مانند تحلیل استاتیکی معادل در سدهای خاکی چندان قابل اعتماد نیست (فورسلینی، ۲۰۲۱). به منظور برطرف کردن نواقص روش شبه استاتیک، توصیه شده است که این روش با تحلیل دینامیکی ترکیب شود (وکچتی[8] و همکاران، ۲۰۱۹). میزان دقت نتایج یک تحلیل دینامیکی، به عوامل متعددی بستگی دارد که یکی از مهمترین آنها، نحوه‌ی انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها می‌باشد (کویزل[9] و همکاران، ۲۰۱۹). یک شتاب‌نگاشت علاوه بر سازگاری با ویژگی‌های لرزه‌خیزی ساختگاه باید بتواند بیشترین تأثیر را بر روی سازه‌ی مورد نظر بگذارد. از سوی دیگر، زلزله یک رویداد کاملاً تصادفی است که هرگز عیناً تکرار نخواهد شد. بنابراین استفاده از یک شتاب‌نگاشت منطقی نبوده و بایستی از چند شتاب‌نگاشت استفاده شود. تاکنون روش‌های متنوعی برای غربالگری شتاب‌نگاشت‌ها به منظور تحلیل دینامیکی سازه‌ها ارائه شده است که از جمله‌ی آنها می‌توان روش‌های طیف خطر یکنواخت، طیف میانگین شرطی، مؤلفه‌ی اپسیلون، میانگین انحراف طیفی، سازگاری طیفی و شاخص تغییر مکان طیفی غیرارتجاعی را نام برد (سوکو[10] و همکاران، ۲۰۱۰).

در سال ۲۰۰۷، بری و تراواسارو[11] یک روش ساده برای پیش‌بینی جابه‌جایی‌های انحرافی شیب تحت زلزله‌ی رخ داده ارائه دادند. مدل لرزه‌ای برای ۱۶ حالت سد خاکی و خاکریز صحت‌سنجی شده است (بری و تراواسارو ۲۰۰۷).

در سال ۲۰۰۸، گازتاس[12] و همکاران، اثرات زمین لرزه‌های نزدیک گسل بر لغزش سیستم را مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه به صورت عددی و به وسیله‌ی یک بلوک بتنی بر روی سطوح افقی و مایل و تحت زلزله‌های Northridg، Kobe، Kocaeli، Chi-Chi، و Aegion انجام شده است. نتایج نشان دادند که ممکن است مرز بالایی جابه‌جایی‌های ناشی از لغزش، تحت زلزله‌های نزدیک گسل، از مقادیر به دست آمده از برخی نمودارهای طراحی در دسترس تجاوز نماید (گازتاس و همکاران، ۲۰۰۸).

در سال ۲۰۱۱، وانگ[13] روش انتخاب و اصلاح زلزله برای دستیابی به خصوصیات طیف پاسخ را بررسی و یک روش جدید ارائه نمود. در این پژوهش، آنالیز عددی یک قاب بتنی ۲۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که الگوریتم در نظر گرفته شده در محاسبات بسیار مؤثر بوده است (وانگ، ۲۰۱۱).

در سال ۲۰۱۷، وانگ و همکاران مناسبات تقاضای لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی در معرض پس‌لرزه را مورد بررسی قرار دادند. در همین راستا، به دلیل تفاوت در خصوصیات زلزله‌ها، آنها ۲۰ رکورد زلزله را به عنوان زلزله‌ی اصلی و پس‌لرزه در

[1] Chakraborty, S.
[2] Tropeano, G.
[3] Dardanelli, G., & Pipitone, C.
[4] Forcellini, D.
[5] Jia, J., & Jia
[6] Wang, J.
[7] Esfeh, P. K., & Kaynia, A. M.
[8] Vecchietti, A.
[9] Caviezel, A.
[10] Socco, L.
[11] Bray, J. D., & Travasarou, T.
[12] Gazetas, G.
[13] Wang, G.

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

نظر گرفتند. در این پژوهش، به بررسی آسیب سازه‌ای، پاسخ جابه‌جایی و انرژی میرایی پرداخته شده است. نتایج نشان دادند که پس‌لرزه‌ها آسیب‌های وارده‌ی اولیه به سازه را افزایش می‌دهند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

در سال ۲۰۱۶، آلیبرتی[1] و همکاران، رفتار لرزه‌ای سد سان-پیرتو را با بکارگیری جابه‌جایی‌های شبه استاتیک ساده شده و تحلیل دینامیکی دو بعدی با استفاده از کد کامپیوتر FLAC 2D V.7.0 و دو مجموعه از حرکات ورودی به جهت محدوده‌ی امنیت جانی و محدوده‌ی فروپاشی ارزیابی نمودند. نتایج نشان دادند که در همه‌ی تحلیل‌ها، جابه‌جایی-های دائمی محتمل کوچکتر از ۵۰ سانتی‌متر و با مؤلفه‌ی عمودی در تاج سد در حدود ۱۶ سانتی‌متر است که از مقدار خدمت‌رسانی سد کوچکتر است (آلیبرتی و همکاران، ۲۰۱۶).

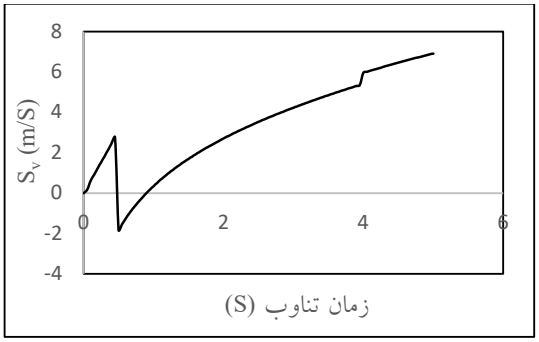
بررسی مطالعات پیشین (پراساد[2]، ۲۰۰۹)، (تانچیساوات[3] و همکاران، ۲۰۱۶)، (کازل[4]، ۲۰۱۰)، (یی[5] و همکاران، ۲۰۱۹)، (دی سارنو و پوگلیس[6]، ۲۰۲۰) و (وون تان[7]، ۱۹۸۸)، نشان می‌دهد که تحلیل دینامیکی سدهای خاکی از موضوعات مورد توجه پژوهشگران است. همان‌طور که اشاره شد، تاکنون روش‌های متعددی برای غربالگری شتاب‌نگاشت‌ها در تحلیل دینامیکی سازه‌ها ارائه شده‌اند که هریک دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. وجه مشترک این روش‌ها، تلاش برای کاهش پراکندگی نتایج تحلیل تحت رکوردهای مختلف زلزله است. مرور منابع نشان می‌دهد که ارزیابی این روش‌ها، عمدتاً محدود به سازه‌هایی مانند ساختمان‌های بتنی بوده و تاکنون ارزیابی جامع آنها برای سدهای خاکی، به ویژه از نوع همگن، انجام نشده است. این در حالی است که سدهای خاکی، به دلیل ویژگی‌هایی مانند تغییر در مدول برشی و میرایی مصالح در هنگام زلزله، دارای رفتار دینامیکی متفاوتی نسبت به سایر سازه‌ها هستند و این موضوع می‌تواند بر عملکرد روش‌های انتخاب شتاب‌نگاشت تأثیرگذار باشد. از این‌رو، هدف اصلی این پژوهش، مقایسه و ارزیابی عملکرد چهار روش پرکاربرد انتخاب شتاب‌نگاشت، شامل میانگین انحراف طیفی، سازگاری طیفی، توازن طیفی و شدت طیفی در کاهش پراکندگی نتایج تحلیل دینامیکی دو سد خاکی همگن با ارتفاع‌های مختلف است. همچنین، با بررسی تأثیر ویژگی دینامیکی سد (مانند زمان تناوب)، تلاش شده است مبنایی برای انتخاب هدفمند روش غربالگری مناسب در تحلیل دینامیکی سدهای خاکی ارائه گردد.

روش کار

مطالعه‌ی حاضر، از نوع مطالعات تحلیلی بود که در سال ۱۳۹۹ (مطابق با ۲۰۲۱-۲۰۲۰ میلادی) انجام پذیرفت. این مطالعه به طور کلی در ۷ مرحله، شامل تهیه‌ی طیف طرح استاندارد، محاسبه‌ی زمان تناوب سدهای خاکی، انتخاب شتاب‌نگاشت‌های اولیه، به دست آوردن طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها، مقایسه‌ی طیف پاسخ شتاب‌نگاشت و طیف طرح استاندارد، انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی و تعیین پراکندگی داده‌ها انجام شد.

تهیه‌ی طیف طرح استاندارد

در این تحقیق، از طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم برای ساختگاه نوع II و با خطر نسبی زلزله‌ی متوسط استفاده شد. با توجه به اینکه در روش شدت طیفی سطح زیر منحنی طیف سرعت ملاک عمل است، طیف طرح سرعت با انتگرال‌گیری از طیف شتاب به دست آمد. طیف مذکور در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): طیف طرح سرعت استاندارد مورد استفاده در این تحقیق

[1] Aliberti, D.
[2] Prasad, B. B.
[3] Tanchaisawat, T.
[4] Kausel, E.
[5] Ye, S.
[6] Di Sarno, L., & Pugliese, F.
[7] Von Thun, J. L.

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

محاسبه‌ی زمان تناوب سدهای خاکی

زمان تناوب سدهای خاکی مورد مطالعه، با استفاده از معادلات ارائه شده توسط مهدی‌زاده و قنبری[1]، ۲۰۱۲ محاسبه گردید. آنها با استفاده از روش تحلیل جرم گسترده و استفاده از تابع شکلی مثلثاتی به فرم ارائه شده در رابطه‌ی (۱)، معادله‌ی (۲) را برای محاسبه‌ی زمان تناوب سدهای خاکی همگن ارائه نمودند. در این رابطه، H ارتفاع سد و V_s سرعت موج برشی است.

$$\psi = 1 - cos\frac{\pi x}{2H} \quad (۱)$$

$$T = 2.34\frac{H}{V_s} \quad (۲)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۲ و در نظرگرفتن V_s برابر ۵۰۰ و مقادیر ۱۵ و ۳۰ متر برای ارتفاع سد، زمان تناوب سدهای خاکی مورد مطالعه، به ترتیب، برابر با ۰/۰۷ و ۰/۱۴ ثانیه خواهد بود.

انتخاب شتاب‌نگاشت‌های اولیه

برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌های اولیه، از استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم استفاده شد که در آن توصیه شده است برای انتخاب شتاب‌نگاشت، اثر بزرگا، فاصله از گسل و ساز و کار چشمه‌ی لرزه‌زا در نظر گرفته شود، مدت زمان زلزله، حداقل برابر ۱۰ ثانیه، یا ۳ برابر زمان تناوب اصلی سازه، هر کدام بزرگتر بود، باشد و لایه‌بندی، ویژگی‌های زمین‌شناسی، تکنونیکی و لرزه‌شناسی تا حد امکان مشابهت داشته باشند.

به دست آوردن طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها

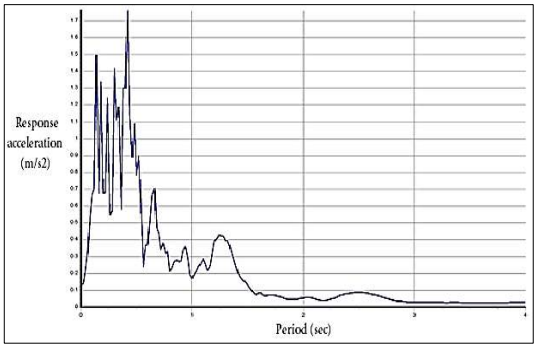
به منظور به دست آوردن طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها، از نرم‌افزار Seismosignal استفاده گردید. در این بخش از تحقیق، شتاب‌نگاشت‌های ارائه شده در جدول (۱) در نرم‌افزار Seismosignal فراخوانی شده و سپس طیف پاسخ شتاب و سرعت با میرایی صفردرصد به دست آمد.

جدول(۱): مجموعه‌ی شتاب نگاشت‌های اولیه

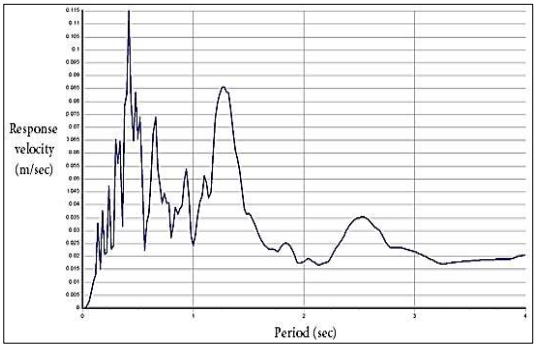
بزرگا (ریشتر)	>6.5
نوع گسل	همه
فاصله از گسل (km)	50
سرعت موج برشی (m/s)	500

مقایسه‌ی طیف پاسخ شتاب‌نگاشت و طیف طرح استاندارد

در این تحقیق، میزان شباهت دو طیف پاسخ طرح و شتاب‌نگاشت، با استفاده از ۴ روش میانگین انحراف طیفی، سازگاری طیفی، توازن طیفی و شدت طیفی تعیین گردید. با توجه به محاسبات زیاد و تکراری مورد نیاز برای مقایسه‌ی طیف پاسخ شتاب‌نگاشت با طیف طرح، بازه‌ی زمانی ۰/۲T تا ۱/۵T برای روش‌های میانگین انحراف طیفی، سازگاری طیفی، توازن طیفی، و بازه‌ی ۰/۲ تا ۲/۵ ثانیه برای روش شدت طیفی، برای انجام محاسبات برنامه‌ای در نرم‌افزار صفحه‌ی گسترده Excel تهیه گردید. نمونه‌ای از طیف پاسخ شتاب و طیف پاسخ سرعت در این برنامه، به ترتیب، در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. شایان ذکر است در روش‌های شدت و توازن طیفی که نیاز به محاسبه‌ی سطح زیر نمودار طیف پاسخ است، سطح زیر منحنی با استفاده از روش ذوزنقه محاسبه شده است.



شکل(۲): نمونه‌ای از طیف پاسخ شتاب



شکل(۳): نمونه‌ای از طیف پاسخ سرعت

[1] Mahdizadeh, M., & Ghanbari, A.

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

انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی

پس از محاسبه‌ی شاخص‌های تعیین مشابهت دو طیف طرح و پاسخ، از بین ۱۵۰ شتاب‌نگاشت مرحله‌ی اول برای هر یک از ۴ روش میانگین انحراف طیفی، سازگاری طیفی، توازن طیفی و شدت طیفی، ۱۰ شتاب‌نگاشت که بیشترین میزان مشابهت را با طیف طرح داشتند، انتخاب شدند (در مجموع ۴۰ شتاب‌نگاشت). سپس هریک از سدهای مورد مطالعه پس از مدل‌سازی ساخت مرحله‌ای برای هر مجموعه از شتاب‌نگاشت‌ها، تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی شده و جابه‌جایی بیشینه‌ی تاج سد برای هر مجموعه استخراج شد. مشخصات مصالح بدنه‌ی سد در **جدول (۲)** ارائه شده است. لازم به ذکر است، به علت ابعاد بزرگ سد و پی و همچنین افزایش بسیار زیاد زمان انجام تحلیل، از اندرکنش بین پی و بدنه‌ی سد چشم‌پوشی شده و پی سد صلب فرض شده است.

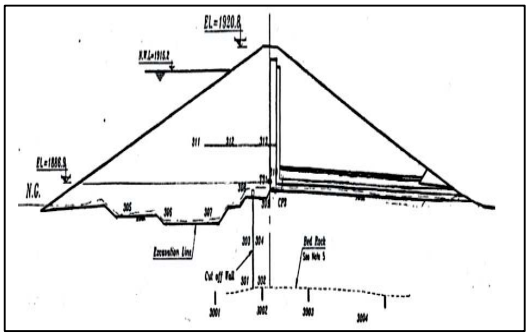
جدول (۲): مشخصات مصالح سدهای خاکی مورد مطالعه

پارامتر	واحد	مقدار
مدول الاستیسیته	MPa	20
نسبت‌پواسون	--	0.3
چسبندگی	kPa	70
زاویه‌ی اصطکاک داخلی	درجه	25
زاویه‌ی اتساع	درجه	0

صحت‌سنجی

اطمینان از صحت نتایج در هر تحلیل عددی، یکی از مهمترین مراحل انجام تحلیل است. در این تحقیق، به منظور ارزیابی صحت مدل‌سازی عددی، نتایج نشست قائم حاصل از تحلیل برای سد کلان ملایر، با داده‌های ابزار دقیق مقایسه شده است. با این حال، به دلیل نبود داده‌های ثبت شده برای تغییرمکان افقی و بزرگ‌نمایی شتاب در ارتفاع سد، امکان صحت‌سنجی این پارامترها فراهم نبود. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی، فرضیات واقع‌بینانه از جمله ساخت مرحله‌ای، مشخصات ژئوتکنیکی واقعی و شرایط مرزی مناسب لحاظ شده و رفتار مشاهده شده از نظر الگوی تغییرمکان، با رفتار واقعی سازه سازگار بوده است. با توجه به محدودیت‌های ابزار دقیق در سدهای موجود، بررسی دقیق‌تر بزرگ‌نمایی شتاب و جابجایی‌های افقی می‌تواند به عنوان پیشنهاد مطالعات آتی در نظر گرفته شود.

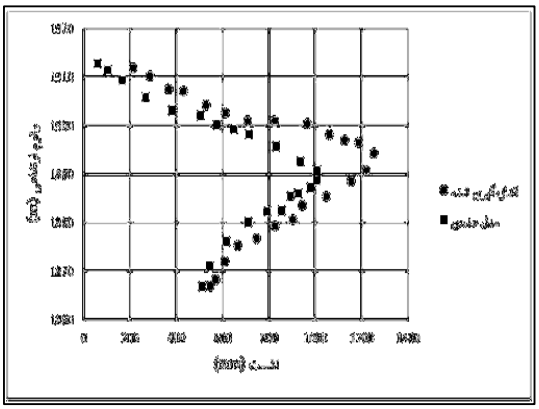
بنابراین، در این تحقیق، برای ارزیابی صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی سدهای خاکی مورد مطالعه، سد کلان ملایر در نرم‌افزار Plaxis مدل‌سازی شده و مقادیر نشست در محور میانی سد محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق مقایسه شده است. سد کلان ملایر، در ۱۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان ملایر در استان همدان و ۱۱۰۰ متری پایین‌دست و شمال روستای پاتیه قرار دارد. این سد، از نوع خاکی همگن با زهکش دودکشی میانی و به ارتفاع ۱۷ متر از بستر طبیعی رودخانه می‌باشد. حداکثر تراز نهایی تاج ۱۹۲۰ متر و حجم بدنه نزدیک به ۳/۵ میلیون مترمکعب است. مقطع این سد در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل(۴): مقطع سد کلان ملایر

برای مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی با خروجی ابزار دقیق، از محور I3002 در ۴/۲۵ متری بالادست محور مرکزی استفاده شده است. رفتار مصالح بدنه و پی، با استفاده از مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک ایده‌آل موهر-کولمب مدل‌سازی شد. گرچه مدل‌های پیشرفته‌تری مانند Hardening Soil یا مدل‌های وابسته به کرنش برای شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار غیرخطی مصالح وجود دارند، اما هدف این تحقیق، تمرکز بر مقایسه‌ی نسبی عملکرد روش‌های انتخاب شتاب‌نگاشت در کاهش پراکندگی پاسخ دینامیکی بوده است. از آنجا که کلیه‌ی تحلیل‌ها تحت شرایط ثابت انجام شده‌اند، استفاده از مدل رفتاری ساده‌ی موهر-کولمب، مانعی در دستیابی به هدف پژوهش ایجاد نمی‌کند. نشست محاسبه شده در محور I3002 به همراه خروجی‌های ابزار دقیق، در شکل (۵) نشان داده شده است.

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



شکل(۵): مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی با خروجی ابزار دقیق

سدهای خاکی با ریختن و متراکم نمودن مصالح در لایه‌های نازک افقی به صورت مرحله‌ای ساخته می‌شوند. بنابراین، در این تحقیق سدهای خاکی نیز به صورت ساخت مرحله‌ای در ۷ لایه، با ضخامت حداکثر ۶ متر مدل‌سازی شدند. همانگونه که در شکل() قابل مشاهده است، رفتار پیش‌بینی شده با استفاده از مدل عددی، در تطابق با رفتار واقعی بوده و این مسئله صحت نتایج تحلیل عددی را اثبات می‌کند. لازم به ذکر است دلیل اختلاف نتایج، چشم پوشی از مدل‌سازی فیلتر و تخمین ابعاد هندسی سد است.

تعیین پراکندگی داده‌ها

عموماً برای توصیف جامعه‌ها و نمونه‌ها، خلاصه‌سازی صورت می‌گیرد. آماره‌های خلاصه را می‌توان در دو دسته‌ی آماره‌های گرایش به مرکز (Central tendency statistics) و آماره‌های پراکندگی (spread Statistics of) طبقه‌بندی نمود. آماره‌های دسته‌ی اول، گرایش اندازه‌گیری‌های نمونه را به یک مقدار مرکزی و آماره‌های دسته‌ی دوم، به طور متوسط، تصویری از تفاوت هر مشاهده با مقدار مرکزی را نشان می دهند. با توجه به موضوع پژوهش، معیارهای پراکنش از کاربرد بیشتری برخوردارند. از این روی، در ادامه به معرفی مهمترین این آماره‌ها پرداخته شده است.

دامنه‌ی تغییرات در یک نمونه، نفاضل بزرگترین و کوچکترین مقدار در بین داده‌ها است.

واریانس نمونه عبارت است از مجموع توان دوم انحراف از میانگین، تقسیم بر $(n-1)$ که با S^2 نمایش داده می‌شود (رابطه‌ی ۳).

$$S^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2/(n-1) \qquad (۳)$$

انحراف از معیار، جذر مثبت واریانس بوده که در واقع معیاری برای میزان تفاوت داده‌ها با میانگین داده‌ها است.

ضریب تغییرات (پراکندگی)، شاخصی است که برای اندازه‌گیری توزیع پراکندگی داده‌ها به کار می‌رود. این پارامتر، میزان پراکندگی را به ازای یک واحد از میانگین بیان می‌کند. ضریب تغییرات (CV)، به صورت نسبت انحراف از معیار به میانگین تعریف می‌شود (رابطه‌ی ۴).

$$CV = \frac{S}{average} \qquad (۴)$$

به منظور بررسی عملکرد روش‌های تعیین شباهت طیف پاسخ شتاب‌نگاشت با طیف طرح، از آماره‌های پراکنش، شامل دامنه‌ی تغییرات، واریانس و ضریب تغییرات استفاده شده است.

یافته‌ها

شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس تعیین میزان مشابهت طیف پاسخ زلزله با طیف طرح به روش میانگین انحراف طیفی، در **جدول**(جدول (۳) نشان داده شده‌اند. همچنین مقادیر میانگین انحراف طیفی این شتاب‌نگاشت‌ها، در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول(۳): شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس روش میانگین انحراف طیفی (PEER NGA-West2 Database [PEER, 2013])

شماره شتاب‌نگاشت	محل وقوع و ایستگاه	تاریخ وقوع
41	Taiwan SMART1(45)	1986.11.14
61	Loma Prieta	1989.10.18
63	Loma Prieta, Golden Gate Bridge, 270	1989.10.18
64	Loma Prieta, Golden Gate Bridge, 360	1989.10.18
73	Loma Prieta, SF-Cliff House, 90	1989.10.18
78	Loma Prieta, SF-Presidio, 0	1989.10.18
79	Loma Prieta, SF-Presidio, 90	1989.10.18
87	Landers, Amboy, 0	1992.06.28
88	Landers, Amboy, 90	1992.06.28
91	Landers, Fort Irwin, 90	1992.06.28

جدول(۳): مقادیر میانگین انحراف طیفی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده براساس روش میانگین انحراف طیفی

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

(PEER NGA-West2 Database [PEER, 2013])

شماره شتاب‌نگاشت	محل وقوع و ایستگاه	تاریخ وقوع
22	Irpinia Italy-01, Arienzo, 0	1980.11.23
24	Irpinia Italy-01, Arienzo, UP	1980.11.23
30	Irpinia Italy-01, Tricarico, UP	1980.11.23
31	Ierissos Greece, Ierissos, NS	1983.08.06
54	Loma Prieta, Bear Valley #7 Pinnacles, UP	1989.10.18
68	Loma Prieta, Hayward City Hall- North, UP	1989.10.18
83	Loma Prieta, SF-Telegraph Hill, UP	1989.10.18
101	Landers, Silent Valley- Poppet Flat, UP	1992.06.28
113	Northridge-01, Mojave -Oak Creek Canyon, UP	1994.01.17
125	Northridge-01, Riverside Airport, UP	1994.01.17

rec no	δ_i
88	0.416533
87	0.467616
63	0.498785
79	0.506146
73	0.618478
91	0.663636
61	0.666106
41	0.68293
64	0.701309
78	0.712474

شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس تعیین میزان مشابهت طیف پاسخ زلزله با طیف طرح به روش سازگاری طیفی، در

شماره شتاب‌نگاشت	محل وقوع و ایستگاه	تاریخ وقوع
22	Irpinia Italy-01, Arienzo, 0	1980.11.23
24	Irpinia Italy-01, Arienzo, UP	1980.11.23
30	Irpinia Italy-01, Tricarico, UP	1980.11.23
31	Ierissos Greece, Ierissos, NS	1983.08.06
54	Loma Prieta, Bear Valley #7 Pinnacles, UP	1989.10.18
68	Loma Prieta, Hayward City Hall- North, UP	1989.10.18
83	Loma Prieta, SF-Telegraph Hill, UP	1989.10.18
101	Landers, Silent Valley- Poppet Flat, UP	1992.06.28
113	Northridge-01, Mojave -Oak Creek Canyon, UP	1994.01.17
125	Northridge-01, Riverside Airport, UP	1994.01.17

) نشان داده شده‌اند. همچنین مقادیر میانگین انحراف طیفی این شتاب‌نگاشت‌ها، در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول (۵): شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس روش سازگاری طیفی

(PEER NGA-West2 Database [PEER, 2013])

جدول(۴): مقادیر شاخص سازگاری طیفی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس روش سازگاری طیفی

(PEER NGA-West2 Database [PEER, 2013])

rec no	D_{ms}
125	0.039291
83	0.039794
30	0.040853
22	0.042574
68	0.042768
31	0.043894
101	0.044256
54	0.044464
24	0.04492
113	0.045533

شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس تعیین میزان مشابهت طیف پاسخ زلزله با طیف طرح به روش شدت طیفی، در جدول (۷) نشان داده شده‌اند. همچنین مقادیر RSI این شتاب‌نگاشت‌ها در **جدول (۶)** ارائه شده است.

جدول (۵): شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس روش شدت طیفی

(PEER NGA-West2 Database [PEER, 2013])

شماره شتاب‌نگاشت	محل وقوع و ایستگاه	تاریخ وقوع
150	Kocaeli-Turkey, Fatih, 0	1999.08.17
78	Loma Prieta, SF-Presidio, 0	1989.10.18
41	Taiwan SMART1(45), SMART1-E02, NS	1986.11.14
63	Loma Prieta, Golden Gate Bridge, 270	1989.10.18
79	Loma Prieta, SF-Presidio, 90	1989.10.18
88	Landers, Amboy, 90	1992.06.28
73	Loma Prieta, SF-Cliff House, 90	1989.10.18
64	Loma Prieta, Golden Gate Bridge, 360	1989.10.18
87	Landers, Amboy, 0	1992.06.28

جدول (۶): مقادیر RSI شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس روش شدت طیفی

(PEER NGA-West2 Database [PEER, 2013])

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

شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس تعیین میزان مشابهت طیف پاسخ زلزله با طیف طرح به روش توازن طیفی، در جدول (۷) نشان داده شده‌اند. همچنین مقادیر شاخصی ارزیابی این شتاب‌نگاشت‌ها، در جدول(۸) ارائه شده است.

جدول (۷): مقادیر RSI شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس روش شدت طیفی (PEER NGA-West2 Database [PEER, 2013])

RSI	rec no
0.633547	63
0.475742	79
0.432602	88
0.418422	73
0.401458	64
0.3726	87
0.372161	150
0.353441	78
0.346022	91
0.340756	41

جدول(۸): مقادیر شاخص شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بر اساس روش توازن توصیفی (PEER NGA-West2 Database [PEER, 2013])

شاخص	rec no
0.274003	63
0.449217	79
0.383244	88
0.234042	73
0.511155	64
0.321294	87
0.654621	150
0.237493	78
0.31304	91
0.364185	41

مقایسه‌ی شتاب‌نگاشت‌های به دست آمده از هریک از روش‌ها نشان می‌دهد که دو روش میانگین انحراف طیفی و سازگاری طیفی، نتایج کاملاً متفاوتی را ارائه می‌دهند، ولی روش شدت طیفی در ۷ مورد از ۱۰ مورد شتاب نگاشت، با روش میانگین انحراف طیفی مطابقت دارد. بنابراین انتظار می‌رود که میزان پراکندگی نتایج این دو روش یکسان باشد. این موضوع در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. روش توازن طیفی در ۴ مورد از ۱۰ مورد، با روش میانگین انحراف طیفی مشترک است. این در حالی است که هر دو روش توازن و شدت طیفی، هیچ شتاب‌نگاشت مشترکی با روش سازگاری طیفی ندارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دو روش میانگین

شماره شتاب‌نگاشت	محل وقوع و ایستگاه	تاریخ وقوع
89	Landers, Amboy, UP	1992.06.28
120	Northridge-01, Rancho Palos Verdes-Luconia, 5	1994.01.17
40	Taiwan SMART1(45), SMART1 -E02, EW	1986.11.14
90	Landers, Fort Irwin, 0	1992.06.28
150	Kocaeli-Turkey, Fatih, 0	1999.08.17
64	Loma Prieta, Golden Gate Bridge, 360	1989.10.18
79	Loma Prieta, SF-Presidio, 90	1989.10.18
88	Landers, Amboy, 90	1992.06.28
41	Taiwan SMART1(45), SMART1 -E02, NS	1986.11.14
87	Landers, Amboy, 0	1992.06.28

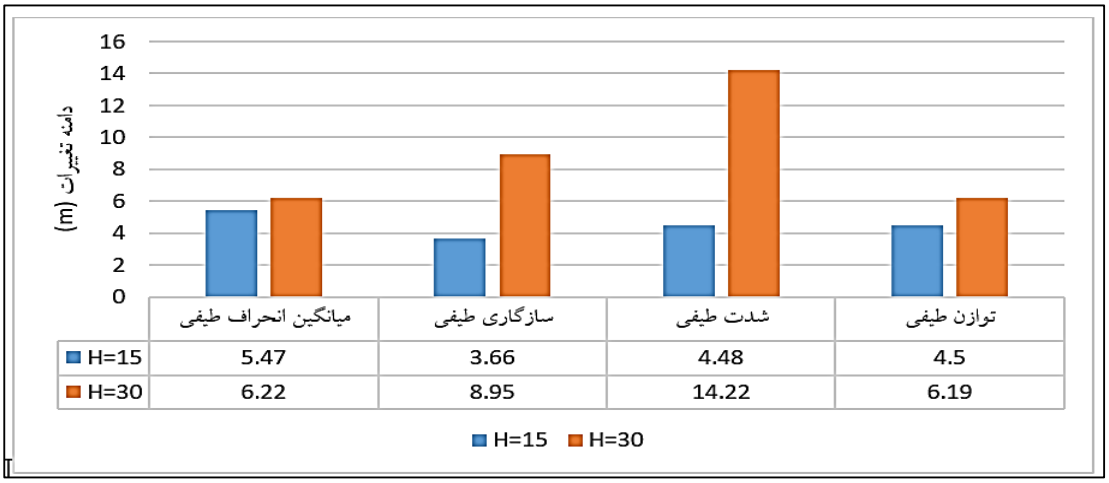
انحراف طیفی و سازگاری طیفی، روش‌های اصلی انتخاب شتاب‌نگاشت هستند.

دامنه‌ی تغییرات جابه‌جایی بیشینه‌ی تاج سد برای هر یک از سدهای ۱۵ و ۳۰ متری محاسبه شد. در سد با ارتفاع ۱۵ متر، روش سازگاری طیفی کمترین دامنه‌ی تغییرات و در سد با ارتفاع ۳۰ متر، روش میانگین انحراف طیفی کمترین دامنه‌ی تغییرات را دارد. بنابراین می‌توان بیان نمود که بر اساس معیار دامنه‌ی تغییرات، دو روش سازگاری و میانگین انحراف طیفی، بهترین عملکرد در کاهش پراکندگی نتایج را داشته و عملکرد مطلوب آنها به ارتفاع سد نیز وابسته است. در دو سد مورد مطالعه، صرفاً ارتفاع سد متفاوت بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد روش‌های تعیین مشابهت طیف پاسخ و طیف طرح در کاهش پراکندگی نتایج، به زمان تناوب سد نیز بستگی دارد (جدول (۹)، شکل ()).

جدول (۹): دامنه‌ی تغییرات جابجایی بیشینه‌ی تاج سد

ارتفاع سد	روش تعیین شباهت طیف پاسخ و طیف طرح			
	میانگین انحراف طیفی	سازگاری طیفی	شدت طیفی	توازن طیفی
15	4.57	3.66	4.48	4.50
30	6.22	8.95	14.22	6.19

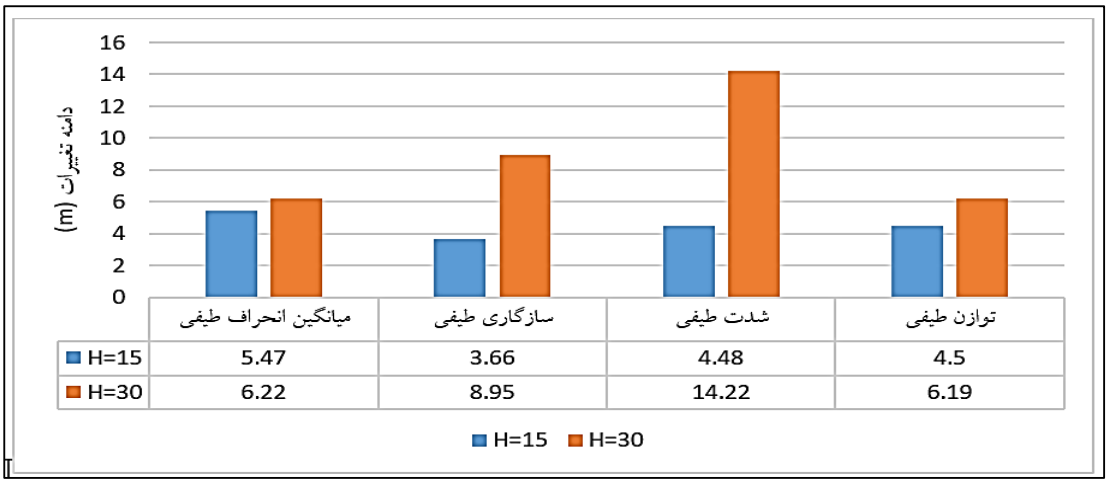
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]



شکل (۶): نمودار دامنه‌ی تغییرات جابجایی بیشینه‌ی تاج سد

جدول (۱۰): دامنه‌ی تغییرات جابجایی بیشینه‌ی تاج سد

)، واریانس جابه‌جایی بیشینه‌ی تاج سد را برای شتاب‌نگاشت‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین نمودار میله‌ای این تغییرات در شکل (۷) رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که بر اساس معیار واریانس داده‌ها در سد با ارتفاع ۱۵ متر، روش سازگاری طیفی بهترین عملکرد را دارد. این در حالی است که با افزایش ارتفاع سد به ۳۰ متر، این روش ضعیف‌ترین عملکرد را خواهد داشت. بنابراین می‌توان بیان نمود که اثر زمان تناوب بر پراکندگی نتایج بسیار چشمگیر خواهد بود. در سد با ارتفاع ۳۰ متر، بهترین عملکرد، متعلق به روش شدت طیفی و میانگین انحراف طیفی است که با توجه به تعداد زیاد شتاب‌نگاشت مشترک بین آنها، این نتیجه قابل پیش‌بینی بود.



شکل (۶): نمودار دامنه‌ی تغییرات جابجایی بیشینه‌ی تاج سد

جدول (۱۰): دامنه‌ی تغییرات جابجایی بیشینه‌ی تاج سد

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

به منظور مقایسه‌ی روش‌های مذکور با یکدیگر، پراکندگی داده‌ها با استفاده از تابع STDEV در اکسل محاسبه شده و در

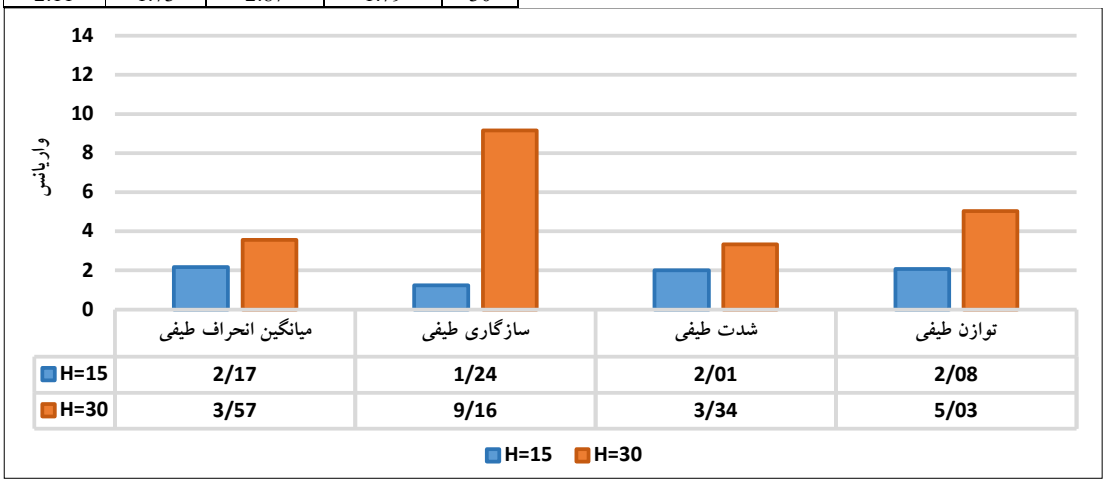
) و به صورت نمودار میله‌ای در **شکل**() نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که در سد با ارتفاع ۱۵ متر، روش سازگاری طیفی از کمترین پراکندگی و در سد با ارتفاع ۳۰ متر، دو روش میانگین انحراف

طیفی و شدت طیفی، از عملکرد مطلوبی در کاهش پراکندگی نتایج برخوردارند.

جدول(۱۱): دامنه‌ی تغییرات جابجایی بیشینه‌ی تاج سد

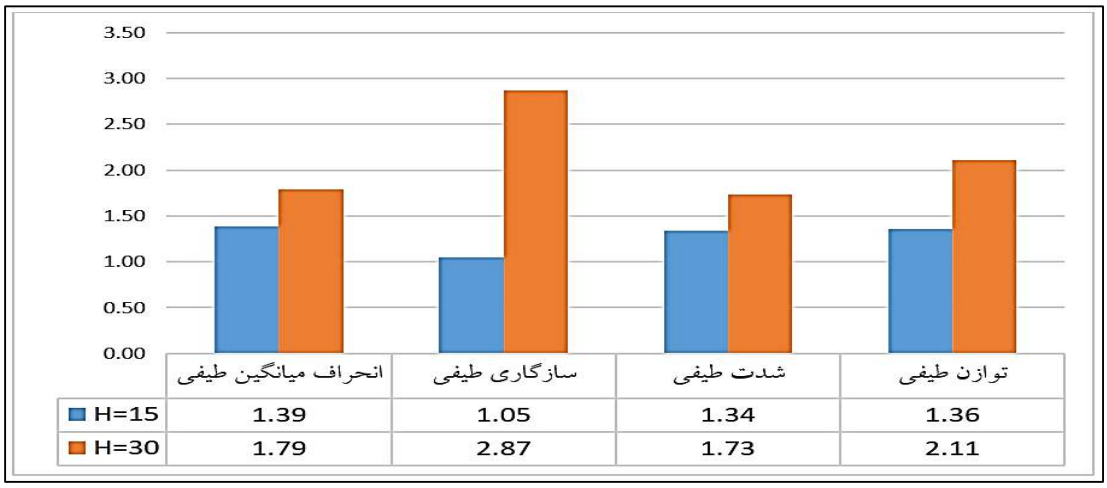
روش تعیین شباهت طیف پاسخ و طیف طرح				ارتفاع سد
میانگین انحراف طیفی	سازگاری طیفی	شدت طیفی	توازن طیفی	
1.39	1.05	1.37	1.36	15
1.79	2.87	1.73	2.11	30

شماره شتاب‌نگاشت	محل وقوع و ایستگاه	تاریخ وقوع
15	Irpinia Italy-01, Arienzo,	1980.11.23
22	2.17	2.08
30	3.57	5.03
24	Irpinia Italy-01, Arianzo, UP	1980.11.23
30	Irpinia Italy-01, Tricarico, UP	1980.11.23
31	Ierissos Greece, Ierissos, NS	1983.08.06
54	Loma Prieta, Bear Valley #7 Pinnacles, UP	1989.10.18
68	Loma Prieta, Hayward City Hall- North, UP	1989.10.18
83	Loma Prieta, SF-Telegraph Hill, UP	1989.10.18
101	Landers, Silent Valley- Poppet Flat, UP	1992.06.28
113	Northridge-01, Mojave -Oak Creek Canyon, UP	1994.01.17
125	Northridge-01, Riverside Airport, UP	1994.01.17



شکل (۷): نمودار میله‌ای واریانس جابجایی بیشینه‌ی تاج سد

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



شکل (۸): پراکندگی نتایج هر یک از روش‌های ۴گانه‌ی مورد بررسی

بحث و بررسی نتایج

در این پژوهش، پس از معرفی انواع روش‌های انتخاب شتاب‌نگاشت، با استفاده از طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، برای ساختگاه نوع II، ۱۵۰ شتاب‌نگاشت زلزله بر اساس چهار مؤلفه‌ی نوع خاک، گسل، فاصله از گسل و بزرگای زلزله، از سایت Peer دریافت شد. سپس در ادامه با استفاده از هر یک از ۴ روش میانگین انحراف طیفی، سازگاری طیفی، توازن طیفی و شدت طیفی، ۱۰ شتاب‌نگاشت (در مجموع، ۲۷ شتاب‌نگاشت با حذف شتاب‌نگاشت‌های یکسان) انتخاب گردید. پس از آن، برای دو سد خاکی همگن با ارتفاع ۱۵ و ۳۰ متر، تحت ۲۷ شتاب‌نگاشت مختلف، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی انجام شده و جابه‌جایی تاج سد به عنوان شاخص پراکندگی نتایج محاسبه شد.

مقایسه‌ی پراکندگی جابه‌جایی‌های ۴ روش با یکدیگر نشان می‌دهد که کاهش پراکندگی نتایج، به زمان تناوب سازه نیز بستگی دارد. بنابراین ارائه‌ی روشی که بتواند در تمامی حالات کمترین میزان پراکندگی نتایج را منجر شود، وجود ندارد. با این وجود، برای سد خاکی با ارتفاع ۱۵ متر، روش سازگاری طیفی بهترین عملکرد را در کاهش پراکندگی نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی داشته و عملکرد روش‌های میانگین انحراف طیفی و شدت طیفی در سدهای با ارتفاع ۳۰ متر بسیار مناسب است.

با توجه به نتایج به دست آمده، به نظر می‌رسد در سدهای کوتاه‌تر (زمان تناوب کمتر)، روش سازگاری طیفی که بر انطباق دقیق‌تری بین طیف پاسخ و طیف طرح تمرکز دارد، باعث کاهش بهتر نوسانات پاسخ دینامیکی می‌شود. در مقابل، برای سدهای بلندتر که اثر مودهای بالاتر مهم‌تر می‌شود، روش‌هایی مانند شدت طیفی و میانگین انحراف طیفی که پاسخ طیفی را در بازه‌های وسیع‌تری ارزیابی می‌کنند، نتایج پایدارتری ارائه می‌دهند. این تفاوت عملکرد را می‌توان به وابستگی شدت ارتعاشات سازه به محتوای فرکانسی رکوردها و نزدیکی آن به فرکانس‌های طبیعی سد نسبت داد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد چهار روش غربالگری شتاب‌نگاشت در کاهش پراکندگی نتایج تحلیل دینامیکی سدهای خاکی همگن بررسی شد. تحلیل‌ها نشان داد:

- در سد ۱۵ متری، روش سازگاری طیفی بهترین عملکرد را داشت، به طوری که ضریب تغییرات جابجایی تاج تنها ۱/۰۵ و واریانس آن ۱/۲۴ ثبت شد.
- در سد ۳۰ متری، دو روش شدت طیفی و میانگین انحراف طیفی پراکندگی کمتری ایجاد کردند؛ ضریب تغییرات آنها به ترتیب ۱/۷۳ و ۱/۷۹ بود.

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

- روش توازن طیفی در هر دو ارتفاع، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سایر روش‌ها داشت. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع سد (یا زمان تناوب آن)، عامل مهمی در انتخاب روش مناسب شتاب‌نگاشت است. به عبارت دیگر، هیچ روشی مطلقاً برتری ندارد و باید متناسب با ویژگی سازه تصمیم‌گیری شود.

عمده‌ی سدهای خاکی از نوع ناهمگن می‌باشند که بهتر است این ارزیابی برای این نوع از سدها نیز انجام شود که به دلیل کمبود وقت، این پژوهش به سدهای خاکی همگن که تعداد کمتری از سدها را پوشش می‌دهند، اختصاص داده شد. بررسی اثر هندسه و همچنین اندرکنش پی و سد و همچنین اندرکنش پی، بدنه و مخزن در عملکرد روش‌های انتخاب شتاب‌نگاشت می‌تواند مفید فایده باشد. امکان دارد بررسی عملکرد روش‌های انتخاب شتاب‌نگاشت در کاهش پراکندگی نتایج در بازه‌های مختلف زمان تناوب، منجر به ارائه‌ی رده‌بندی روش‌های مختلف تعیین مشابهت طیف پاسخ و طیف طرح و کاهش پراکندگی نتایج شود.

بررسی اثر جنس ساختگاه بر عملکرد روش‌های مذکور در کاهش پراکندگی نتایج و بررسی پراکندگی سایر شاخصه‌های عملکرد سد نیز به افزایش کارایی نتایج این تحقیق کمک می‌نماید.

مراجع

1-Aliberti, D., Cascone, E., & Biondi, G. (2016). “Seismic Performance of the San Pietro Dam”. In ProcediaEngineering (Vol. 158, pp. 362–367). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.456

2-Bray, J. D., & Travasarou, T., (2007), “Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

3-Caviezel, A., Demmel, S. E., Ringenbach, A., Bühler, Y., Lu, G., Christen, M., & Bartelt, P., (2019), “Reconstruction of four-dimensional rockfall trajectories using remote sensing and rock-based accelerometers and gyroscopes”, Earth Surface Dynamics.

4-Chakraborty, S., (2018), “A comprehensive seismic response and slope stability analysis framework for evaluating the stability of hydraulic-fill dams”.

5-Dardanelli, G., & Pipitone, C., (2017), “Hydraulic models and finite elements for monitoring of an earth dam, by using GNSS techniques”, Periodica Polytechnica Civil Engineering.

6-Di Sarno, L., & Pugliese, F., (2020), “Seismic fragility of existing RC buildings with corroded bars under earthquake sequences”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

7-Esfeh, P. K., & Kaynia, A. M., (2020), “Earthquake response of monopiles and caissons for offshore wind turbines founded in liquefiable soil”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

8-Forcellini, D., (2020), “Soil-structure interaction analyses of shallow-founded structures on a potential-liquefiable soil deposit”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

9-Forcellini, D., (2021), “Analytical fragility curves of shallow-founded structures subjected to soil-structure interaction (SSI) effects”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

10-Gazetas, G., Garini, E., & Georgarakos, T., (2008), “Effects of near-fault ground shaking on sliding systems”, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV.

11-Jia, J., & Jia, J., (2018), “Soil dynamics and foundation modeling”, Springer.

12-Kausel, E., (2010), “Early history of soil–structure interaction”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

13-Mahdizadeh, M., & Ghanbari, A., (2013), “Analytical estimation of free vibration frequency of earth dam with clay core on rigid foundation”, Proceedings of the 1st National Conference on Geotechnical Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran. (In Persian)

14-Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), (2013), “PEER NGA-West2 Ground Motion Database”, University of California, Berkeley, CA, USA. Available at: https://ngawest2.berkeley.edu

15-Prasad, B. B., (2009), “Fundamentals of soil dynamics and earthquake engineering”, PHI Learning Pvt. Ltd.

16-Socco, L. V., Foti, S., & Boiero, D., (2010), “Surface - wave analysis for building near-surface velocity models Established approaches and new perspectives”, Geophysics.

17-Tanchaisawat, T., Laosuwan, S., & Sitthivong, P., (2016), “Effects of Chiangrai earthquake to Mae Ngat dam from instrument interpretation and finite element simulation”, Japanese Geotechnical Society Special Publication.

18- Tropeano, G., Silvestri, F., & Ausilio, E., (2017), “An uncoupled procedure for performance assessment of slopes in seismic conditions”, Bulletin of Earthquake Engineering.

19-Vecchietti, A., Cecconi, M., Russo, G., & Pane, V., (2019), “Seismic vulnerability of a rockfill dam through different displacement-based approaches”, Journal of Earthquake Engineering.

20-Von Thun, J. L., (1988), “Earthquake engineering and soil dynamics II”, The Society.

21-Wang, G., (2011), “A ground motion selection and modification method capturing response spectrum characteristics and variability of scenario earthquakes”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

22-Wang, G., Wang, Y., Lu, W., Yan, P., Zhou, W., & Chen, M., (2017), “Damage demand assessment of mainshock-damaged concrete gravity dams subjected to aftershocks”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

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

23-Wang, J., Zhong, D., Adeli, H., Wang, D., & Liu, M., (2018), "Smart bacteria-foraging algorithm-based customized kernel support vector regression and enhanced probabilistic neural network for compaction quality assessment and control of earth-rock dam", Expert Systems.

24-Ye, S., Fang, G., & Zhu, Y., (2019), "Model establishment and response analysis of slope reinforced by frame with prestressed anchors under seismic considering the prestress", Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

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

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دوازدهم/ شماره سی و هشتم / پاییز ۱۴۰۴
Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
12th Year/ No. 38/ December 2025

Evaluation of the Performance of Accelerogram Selection Methods in Reducing the Dispersion of Dynamic Analysis Results in Homogeneous Earth Dam

Ashkan Gholipoor Noroozi[1]*
Naser Poursaeid[2]
Sadegh Sadeghi[3]

Abstract

Dynamic analysis of earth dams takes a long time because of the large number of elements considered, as well as the nonlinear behavior of materials. According to the random nature of the earthquake, the use of several strong ground motion records to increase the accuracy of the analyses is necessary, but this will increase the dispersion of results. In earthquake engineering, methods are proposed to select accelerograms which can reduce the dispersion of results by increasing the spectral similarity of records with design spectrum. In this study, the performance of four selected methods, namely mean spectral deviation, spectral adaptation, spectral equilibrium, and spectral intensity, was evaluated in respect of the reduction of dispersion of dynamic analysis results for two homogeneous earth dams, 15 m and 30 m in height. From a set of 150 accelerogram records, 10 records were chosen for each method based on the highest spectral conformity for direct nonlinear time history analysis with provision for staged construction and fixed-base boundary conditions. Results showed that for the 15-meter dam, the spectral-matching method had the lowest range of displacement variation (3.66cm) and coefficient of variation (1.05). All coefficients of variation showed that for a 30-meter dam, the highest efficiency was for the methods of spectral intensity and mean spectral deviation, whose coefficients of variation were 1.73 and 1.79, respectively. Thus, it can be assumed that the period of the structure plays a major role in the efficiency of accelerogram selection methodologies.

Keywords

Homogeneous earth dam, dynamic analysis of dam, ground motion selection, response spectrum similarity metrics, dispersion of analysis results

[1]* Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
Email: ashkan.gholipoornoroozi@iau.ir

[2] Phd student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
Email: Naserpoursaeid@sci.iaun.ac.ir

[3] Lecturer, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
Email: Sad.sadeghi@pci.iaun.ac.ir

Received: 2022/06/16 Accepted: 2025/10/15

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