[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

تولید زلزله‌های مصنوعی غیریک‌نواخت در یال دره‌های دوبعدی مثلثی با در نظرگیری اثرات توپوگرافی

سید محمدعلی صدرالدینی، نوید هادیانی؛
دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹٦/۱۱/۰۸ پذیرش ۹۷/۰۷/۰۸

چکیده

نتایج حاصل از پژوهش‌های متعددی نشان داده است که در خلال وقوع یک زلزله مشخصات لرزه‌ای حرکت زمین در فواصل نزدیک به ابعاد سازه‌های مهندسی طویل به‌طور چشم‌گیری تغییر می‌یابد. تعیین دقیق مشخصات حرکت زمین در نقاط واقع بر یال دره‌ها به‌دلیل قرارگیری تکیه‌گاه‌های سازه‌های طویلی مانند سدها و پل‌ها روی آن‌ها اهمیت خاصی در مهندسی زلزله دارد. هدف این مقاله تولید زلزله‌های مصنوعی غیریک‌نواخت در یال دره‌های مثلثی با درنظرگیری اثرات توپوگرافی دره است. به‌منظور تولید زلزله‌های مصنوعی غیریک‌نواخت از روش بازنمایش طیفی که یکی از پرکاربردترین روش‌های موجود در زمینهٔ تولید تاریخچه‌های زمانی غیریک‌نواخت است، استفاده می‌شود. در اکثر پژوهش‌های موجود در ادبیات فنی توابع نبود انسجام لرزه‌ای برای ساختگاه‌های مسطح ارائه شده‌اند،از این‌رو، نمی‌توانند الگوی مناسبی برای تولید زلزله‌های مصنوعی در سازه‌های طویلی مانند پل‌ها و سدها که تکیه‌گاه‌های آن‌ها درون عوارض توپوگرافی دره قرار دارند باشند. به‌منظور درنظرگیری اثرات توپوگرافی ابتدا الگوی تقویت طیفی امواج لرزه‌ای در عارضهٔ دره از طریق انجام تحلیل دینامیکی تاریخچهٔ زمانی به‌وسیلهٔ برنامه Flac2D به‌دست آمده و سپس از توابع تقویت به‌دست آمده در تولید رکوردهای متغیر در یال دره استفاده می‌شود. مقایسهٔ مشخصات رکوردهای تولید شده با توابع تقویت دره نشان می‌دهد روش پیشنهادی این مقاله به‌طور موفقیت‌آمیزی قادر به تولید تحریکات غیریک‌نواخت تکیه‌گاهی در یال دره است.

واژه‌های کلیدی: اثر توپوگرافی، دره مثلثی، تقویت طیفی، زلزله مصنوعی، تحریکات چند تکیه‌گاهی

* **نویسنده مسئول** Ali.sadreddini@gmail.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

مقدمه

بررسی رکوردهای حاصل از نصب آرایه‌های متمرکز لرزه‌نگاری به‌خوبی روشن ساخته است که حرکات زمین در خلال وقوع یک زلزله معین یکسان نیست و تغییرات مکانی چشم‌گیری در دامنه و فاز ارتعاشات دارند. بر این اساس، در هنگام زلزله و بسته به وسعت سازه و پی پیرامون آن و نیز وجود جنس‌های مختلف مصالح پی، اثر مسیر عبورموج تأثیر نبود انسجام و شرایط مختلف محلی ساختگاه، تحریک‌های ورودی نسبت به یک‌دیگر متفاوت است، از این‌رو فرض تحریک یکنواخت دارای تقریب است. به‌طورکلی عبارت تغییرات مکانی حرکات زمین به تفاوت‌های موجود در دامنه و فاز ارتعاشات حرکات زمین در موقعیت‌های مکانی مختلف اطلاق می‌شود که توصیف و بازسازی مشخصات آن با تحلیل اطلاعات ثبت شده در آرایه‌های متراکم لرزه‌نگاری میسر شده است. با توجه به تغییرات مکانی حرکات زمین‌لرزه، اعمال تحریک دینامیکی یک‌نواخت در امتداد تکیه‌گاه‌های سازه‌های طویل مانند سدها و پل‌ها تلقی غیرواقع‌بینانه از تحریک واقعی این سازه‌ها در حین وقوع زلزله است. در حال حاضر تعداد آیین‌نامه‌ها و استانداردهایی که موضوع اثر تحریکات متغیر تکیه‌گاهی را در نظر گرفته باشند بسیار اندک است، به‌گونه‌ای که در بسیاری از آیین‌نامه‌های موجود و استفاده شده در سراسر جهان حتی کوچک‌ترین اشاره‌ای نیز به این امر نشده است.

متداول‌ترین روش‌هایی که در ادبیات فنی برای تولید تاریخچه‌های زمانی متغیر استفاده شده‌اند شامل روش‌های باز نمایش طیفی[1] [۱]، [۲]، تجزیهٔ چولسکی ماتریس کوواریانس[2] [۳]، [٤]، تقریب تابع انسجام به‌وسیلهٔ سری‌های فوریه [٥]، [٦]، تکنیک آرما[3] [۷] و روش‌های تولید مشروط رکورد زلزله[4] [۸] هستند. از میان روش‌های مذکور دو روش باز نمایش طیفی و تجزیه ماتریس کوواریانس مقبولیت ویژه‌ای در بین محققان زلزله دارند و در تحقیقات متعددی برای تولید تاریخچه‌های زمانی متغیر به‌کار گرفته شده‌اند. در ادامهٔ جزئیات این دو روش بررسی شده است.

1. Spectral Representation Method
2. Covariance Matrix Decomposition
3. ARMA, Auto-regressive-moving-average
4. Conditional Simulation methods

بازنمایش طیفی فرآیندهای گاووسی برای اولین بار به‌وسیلهٔ رایس [۱] در سال ۱۹٤٤ ارائه شد. او دو رابطهٔ تحلیلی را برای بازنمایش طیفی فرآیندهای گاووسی مانا معرفی کرد که یکی از روابط به‌دلیل خاصیت ارگودیک فرآیندهای تصادفی تولید شده بیش‌تر مورد توجه محققان قرار گرفته است. این رابطه عبارت است از:

$$f(t) = \sqrt{2}\sum_{k=1}^{K} C_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \qquad (۱)$$

$$C_k = \sqrt{2S(\omega_k)\Delta\omega} \qquad (۲)$$

در روابط مذکور $f(t)$ فرآیند تصادفی تولید شده، $S(\omega_k)$ مقدار تابع چگالی طیفی در فرکانس گسسته ω_k ، $\Delta\omega$ گام فرکانسی و ϕ_k تعداد K زوایهٔ فاز تصادفی با توزیع نرمال در محدودهٔ $[0,2\pi)$ است. شینوزوکا [۹]، [۱۰]، از این روش برای تولید و شبیه‌سازی فرآیندهای تصادفی استفاده کرد. این روش به‌وسیلهٔ شینوزوکا و دئوداتیس [۱۱]، [۱۲] در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹٦ به‌طور جامع بررسی شد. با توجه به این‌که روابط اولیه ارائه شده در این روش بازنمایش شامل مجموع تعداد زیادی از توابع مثلثاتی بودند، از این‌رو، تلاش‌هایی برای بهبود محاسبات الگوریتم روش طیفی آغاز شد. در این رابطه یانگ (۱۹۷۲) [۱۳] و شینوزوکا (۱۹۷٤) [۱٤] استفاده از تبدیلات فوریه را در زمینه کاربرد روش بازنمایش طیفی گسترش دادند. گریگوری (۱۹۹۳) [۱۵] دو مدل متفاوت از روش بازنمایش طیفی را مقایسه کرد.

در روش‌های موجود در ادبیات فنی برای تولید رکوردهای متغیر صرفاً به اثرات نبود انسجام و انتشار امواج توجه شده است و از اثرات خاک محلی و توپوگرافی ساختگاه صرف‌نظر شده است. مهم‌ترین دلیل در نظرنگرفتن اثرات توپوگرافی به نوع ساختگاه شبکه‌های لرزه‌نگاری باز می‌گردد. توضیح این‌که اکثر داده‌های استفاده شده در استخراج الگوی تغییرات مکانی حرکات زمین از آرایه‌های لرزه‌نگاری مستقر در ساختگاه‌های مسطح به‌دست آمده و محتوای فرکانسی حرکات در نقاط مختلف آن ثابت فرض شده است. چنین فرضی امکان در نظرگیری یک تابع چگالی طیفی ثابت در ایستگاه‌های مختلف ثبت رکورد و هم‌چنین در محدودهٔ ابعاد سازه‌های مهندسی را میسر می‌سازد.

از طرفی بر پایه پژوهش‌های متعدد انجام شده، پدیدهٔ تقویت امواج لرزه‌ای در لایه‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

سطحی خاک و نقاط واقع بر عوارض توپوگرافی روسطحی نشان داده شده است [١٦]، [١٧]. در بین عوارض مختلف توپوگرافی بررسی الگوی بزرگ‌نمایی امواج در اثر برخورد با توپوگرافی دره اهمیت ویژه‌ای دارد. چنین پژوهش‌هایی در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت بررسی‌های عددی شتاب بیش‌تری دارشته و محققان مختلفی به استخراج روابط کاربردی پاسخ لرزه‌ای دره‌های دو و سه‌بعدی پرداخته‌اند [١٨].

کایسر و همکاران (٢٠١٤) [١٩] با استفاده از داده‌های آرایه‌های لرزه‌نگاری نصب شده روی چهار عارضهٔ توپوگرافی اثرات ساختگاه و تقویت امواج لرزه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد در ایستگاه‌های مختلف شتاب حداکثر افقی و قائم زمین به‌طور متوسط به‌اندازهٔ ۲/۷ تا ۳/۷ برابر تغییر می‌کند. جونگ و برادلی (۲۰۱۷) [۲۰] با استفاده از روش تحلیل یک‌بعدی اجزاء محدود غیرخطی به اثرات ساختگاه سطحی دره هیتکت در خلال زلزله‌های سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ کانتربری پرداختند. نتایج پژوهش‌ها در توافق با حرکات ثبت شده تقویت دامنهٔ حرکات در محدودهٔ وسیعی از بازهٔ فرکانسی را نشان داد. سلطانی و باقرپور [۲۱] با استفاده از روش اجزاء محدود تأثیر دره‌های توخالی بر تقویت و تضعیف امواج لرزه‌ای را بررسی کردند.

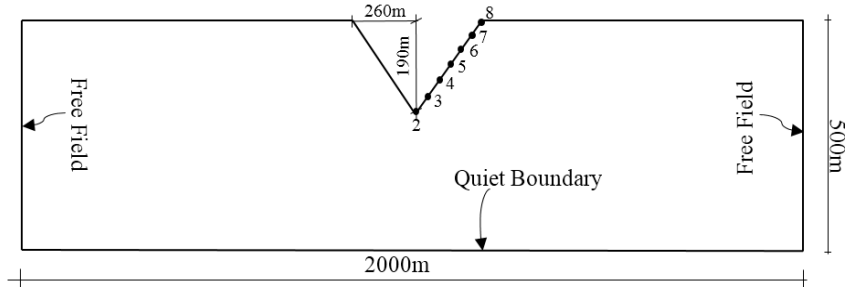
در این پژوهش ابتدا توابع تقویت طیفی نقاط واقع بر یال دره از طریق انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچهٔ زمانی به‌دست می‌آیند. سپس از توابع تقویت طیفی به‌دست آمده در فرآیند تولید رکوردهای متغیر تکیه‌گاهی استفاده می‌شود. بر این اساس در تولید رکوردهای متغیر در نقاط واقع بر یال دره علاوه بر اثر نبود انسجام و عبور موج، اثرات تقویت توپوگرافی نیز منظور می‌شود.

مدل‌سازی عددی

در اولین بخش از بررسی‌های انجام شده در این تحقیق پاسخ لرزه‌ای یک درهٔ مثلثی از طریق انجام تحلیل‌های تاریخچهٔ زمانی بررسی شده است. بدین‌منظور از برنامهٔ تفاضل محدود Flac2D [۲۲] استفاده شده است. برای به‌دست آوردن توابع تقویت امواج لرزه‌ای، از نسبت طیف پاسخ شبه‌شتاب در نقاط واقع بر یال دره به طیف پاسخ شبه‌شتاب در قعر دره به‌عنوان تابع تقویت طیفی استفاده شده است. از توابع تقویت طیفی محاسبه شده در این بخش در فرآیند تولید رکوردهای متغیر تکیه‌گاهی استفاده می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

در شکل ۱ ابعاد هندسی مدل عددی استفاده شده در این تحقیق نشان داده شده است. در انتخاب ابعاد هندسی دره از شکل ساده شده دره سدمسجد سلیمان استفاده شده است [۲۳]. به‌منظور پردازش نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی و تولید رکوردهای متغیر تکیه‌گاهی تعداد ٦ نقطه بر یال دره با فاصله‌های یک‌سان شامل ایستگاهای ۲ تا ۸ ، مطابق شکل ۱ انتخاب شده‌اند.



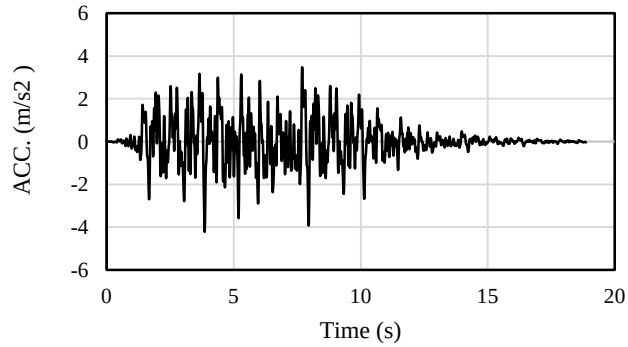
شکل ۱. ابعاد هندسی مدل عددی دره و موقعیت ایستگاه‌های بررسی شده بر یال دره

در انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچهٔ زمانی این بخش از یک زلزله مصنوعی مطابق شکل ۲ که بر اساس طیف پاسخ پیشنهادی مشاور سد [٢٤] و با استفاده از روش بازنمایش طیفی شینوزوکا و دئوداتیس [۱۱]، [۱۲]، تولید شده است، استفاده می‌شود. در شکل ۳ طیف پاسخ هدف با طیف پاسخ زلزله مصنوعی تولید شده مقایسه شده است. به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود سازگاری بسیار خوبی بین مقادیر طیفی طرح و زلزله تولید شده وجود دارد.

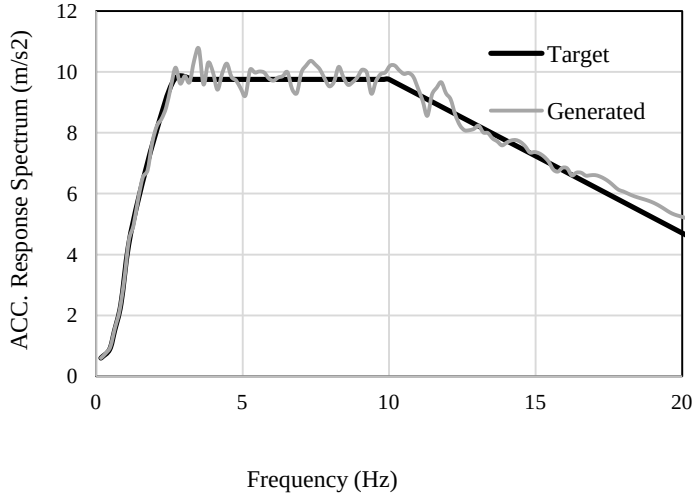
برای تهیهٔ مدل عددی دقیق، مشخصات مصالح بر پایه نتایج پژوهش‌های جامعی [۲۳] که به‌منظور شناسایی مشخصات دینامیکی دو سد خاکی بزرگ در کشور انجام گرفته است، به‌دست آمده‌اند. در تحقیق مذکور، برای تدقیق مشخصات مصالح، تحلیل‌های عددی با استفاده از سه نوع پارامتر مصالح انجام گرفته است. در اولین تلاش، از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیشنهادی مشاور طرح استفاده شده و سپس با اعمال تصحیحات به‌دست آمده از آزمایش‌های ژئوسایزمیک سطحی انجام شده در نقاط مختلف بدنه و تکیه‌گاه‌های سد و هم‌چنین استفاده از نتایج آزمایش‌های ژئوفیزیک درون‌چاهی در دیگر سدهای دنیا، مقادیر اصلاح یافته پارامترهای مصالح سرعت موج برشی V_S، دانسیته ρ، ضریب پواسونυ، مدول برشی حداکثر G_0 و مدول الاستیک E_0 مطابق جدول ۱ معرفی شده‌اند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]



شکل ۲. تاریخچهٔ زمانی محرک ورودی برای انجام تحلیل دینامیکی دره



شکل۳. مقایسهٔ طیف پاسخ هدف۱ با طیف پاسخ زلزله مصنوعی تولید شده ۲

در روش‌های عددی، حداکثر ابعاد مش‌بندی با توجه به محتوای فرکانسی حرکت ورودی زلزله تعیین می‌شود، توضیح این‌که این ابعاد به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که از انتقال صحیح امواج لرزه‌ای اطمینان حاصل شود. با توجه به سرعت موج برشی (Cs =۱۳۰۰ m/s) بر اساس رابطهٔ ۳ اگر بزرگ‌ترین بعد مش ۱۰ متر انتخاب شود حداکثر فرکانسی که به‌درستی می‌تواند مدل باشد ۱۳ هرتز است. قبل از اعمال بارگذاری دینامیکی با کاربرد فرکانس‌های

1. Target Response Spectrum
2. Generated

بیش‌تر از رکوردهای استفاده شدهٔ فیلتر می‌شوند.

$$f = \frac{C_s}{(5to10)\Delta l} = \frac{1300}{100} = 13Hz \qquad (۳)$$

جدول ۱. پارامترهای فونداسیون سد مسجدسلیمان [۲۳]

$E_0 *10^9 (N/m^2)$	$G_0 *10^9 (N/m^2)$	υ	$\rho\ (kg/m^3)$	$V_s (m/s)$
۱۰/۹۲	٤/۲	۰/۳	۲۵۰۰	۱۳۰۰

برای جلوگیری از خطای انعکاس امواج به‌داخل مدل از طرف مرزهای جانبی، توصیه می‌شود فونداسیون از طرفین به‌اندازهٔ سه برابر ارتفاع عارضه ادامه یابد. راه حل دیگر برای محو امواج برگشتی به داخل مدل استفاده از مرزهای میدان آزاد است (شکل ۱). در صورت استفاده از این مرزها، می توان ابعاد فونداسیون را از طرفین مدل کوچک کرد. در این پژوهش شرایط مرزی اعمال شده برای تحلیل دینامیکی، کابرد مرزهای میدان آزاد در دو طرف پی است. عملکرد میدان آزاد، بهبود مدل‌سازی شرایط مرزی با جلوگیری از انعکاس امواج رسیده به نقاط مرزی است.

برای جلوگیری از انعکاس امواج منتشر شده رو به پایین از مرز پایین مدل، در روش‌های عددی توصیه می‌شود ضخامت فونداسیون به‌اندازهٔ سه برابر ارتفاع بدنهٔ سد مدل‌سازی شود تا امواج منعکس شده میرا شوند. راه حل دیگر در برنامه FLAC استفاده از مرزهای آرام برای جذب این امواج است (شکل ۱). استفاده از مرزهای آرام در مرز پایین فونداسیون، علاوه بر جذب امواج رو به‌پایین، می‌تواند در کاهش ابعاد فونداسیون نیز مفید باشد.

پاسخ شتاب و توابع تقویت طیفی دره

در شکل ٤ تاریخچه‌های زمانی و مقادیر حداکثر پاسخ شتاب (PGA) در هر کدام از ایستگاه‌های واقع بر یال دره به‌عنوان اولین خروجی حاصل از انجام تحلیل دینامیکی دره

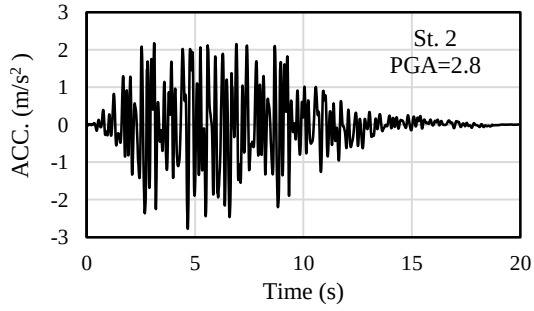
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

نشان داده شده‌اند. مقادیر حداکثر پاسخ شتاب در ایستگاه ۲ واقع در قعر دره (St.2) دارای کم‌ترین مقدار و در ایستگاه ۸ واقع در لبهٔ دره (St.8) دارای بیش‌ترین مقدار است. این رفتار خصوصیت تقویت شتاب دره را به‌خوبی روشن می‌سازد.

نسبت جذر میانگین مربعات[1] RMS پاسخ شتاب نقاط مختلف یال به RMS شتاب قعر دره (ایستگاه ۲) به‌عنوان شاخص دیگری از تقویت امواج زلزله، در جدول ۲ نشان داده شده است. بررسی نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد تقویت چشم‌گیری در قدرت زلزله در نقاط نزدیک به لبه دره رخ داده است.

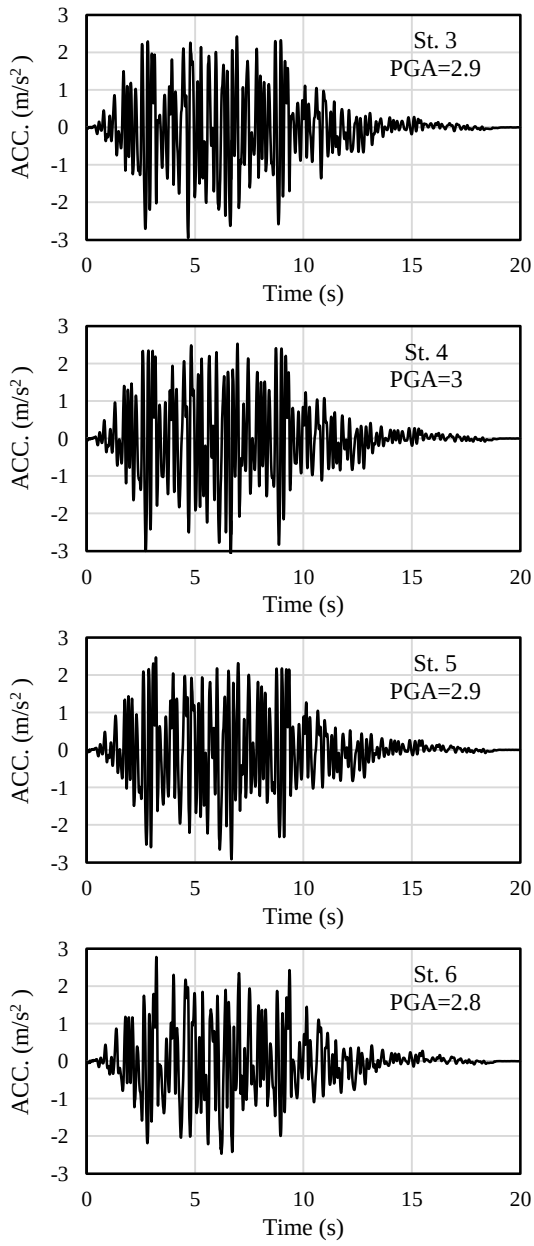
در شکل ۵ توابع تقویت طیفی در نقاط مختلف واقع بر یال دره نشان داده شده‌اند. مقادیر مذکور از تقسیم طیف پاسخ شبه شتاب نقاط مختلف به طیف پاسخ شتاب قعر دره (ایستگاه۲) به‌دست آمده‌اند. استفاده از نسبت‌های طیف پاسخ شبه شتاب به‌عنوان توابع تقویت طیفی باعث حذف اثرات مربوط به مسیر و منبع لرزه‌ای خواهد شد. به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود در تمامی نقاط مقدار حداکثر تقویت قله اول در فرکانس ۱/۱۵ هرتز رخ داده است که می‌تواند به‌خوبی نمایان‌گر فرکانس اصلی عارضه دره باشد.

بیش‌ترین مقدار تقویت طیفی مربوط به ایستگاه ۸ (St.8) واقع در لبه دره است. با حرکت از لبهٔ دره به‌سوی قعر دره مقادیر تقویت به‌تدریج کاهش یافته و در ایستگاه ۳ به حداقل مقدار خود می‌رسد. اگرچه در ایستگاه‌های ۳، ٤ و ۵ که نزدیک به قعر دره هستند قله دوم تقویت طیفی در فرکانس حدوداً ۵ هرتز مشاهده می‌شود لیکن با نزدیک شدن به لبهٔ دره (نقطهٔ ۸) قله دوم حذف شده و تقویت چشم‌گیری در فرکانس‌های بالاتر مشاهده نمی‌شود.

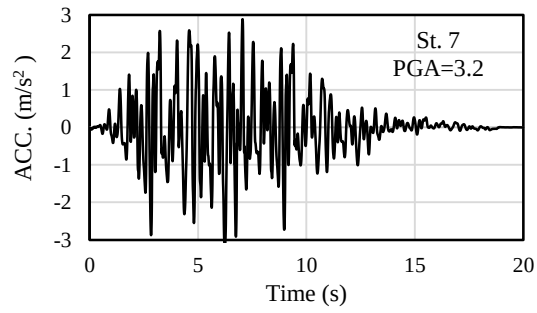


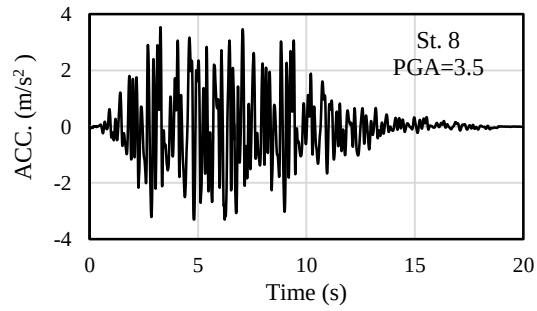
1. Root Mean Square

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

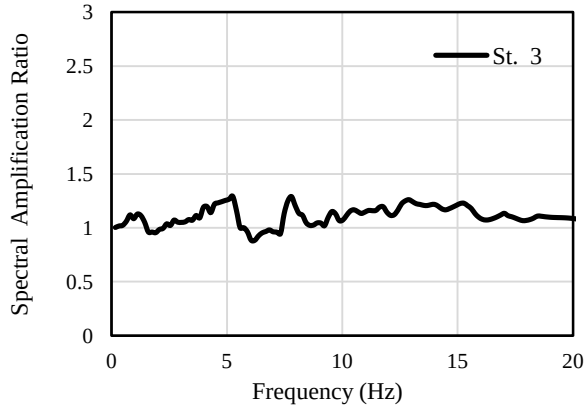


[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

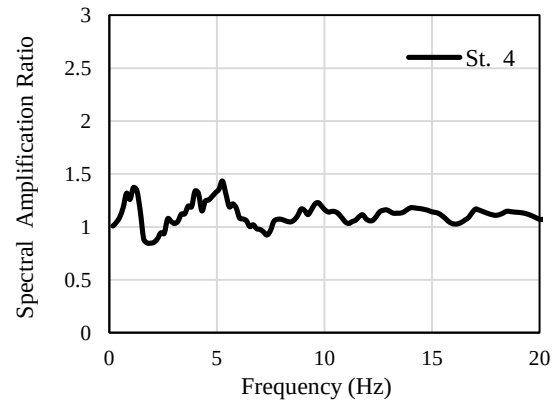


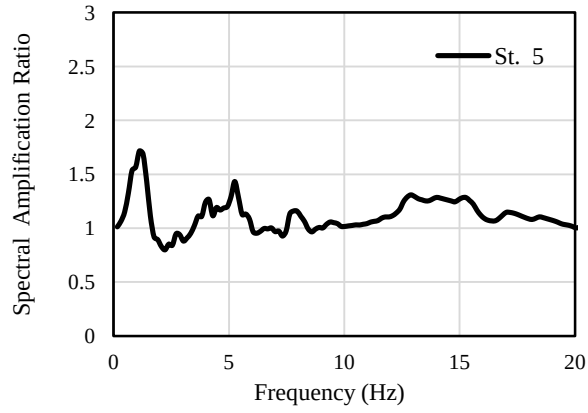


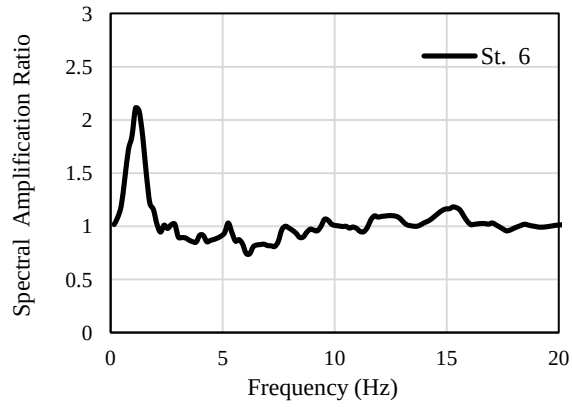
شکل٤. تاریخچه زمانی پاسخ‌های شتاب در ایستگاه‌های مختلف واقع بر دره



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

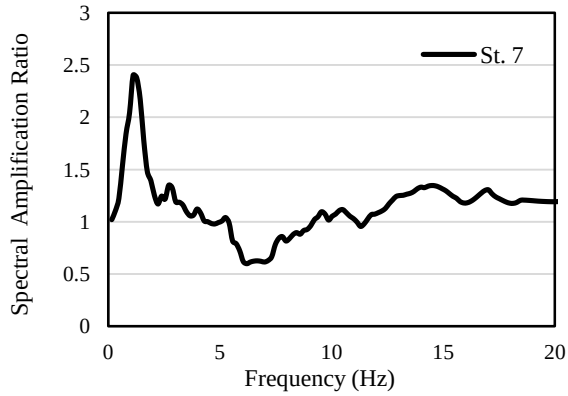


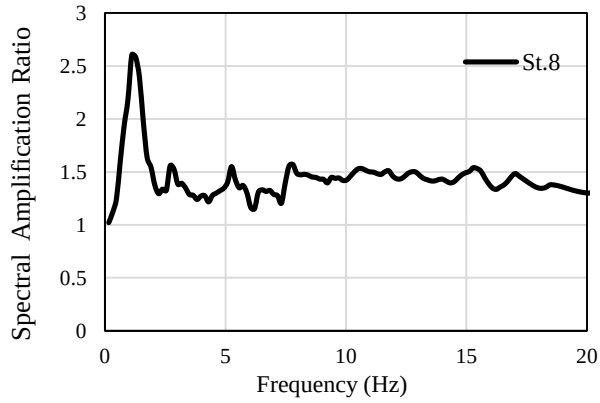




[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]





شکل۵. توابع تقویت طیفی در ایستگاه‌های مختلف واقع بر یال دره

جدول ۲. مقادیر نسبت شدت RMS پاسخ شتاب نقاط مختلف یال دره به‌شدت RMS قعر دره

St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8
۱	۱/۰۸	۱/۱	۱/۱	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/٤۲

تولید زلزله‌های مصنوعی منطبق بر توابع تقویت طیفی

در این تحقیق روابط مربوط به‌روش بازنمایش طیفی شینوزوکا و دئوداتیس [۱۱]، [۱۲] که یک روش پذیرفته شده برای تولید تاریخچه‌های زمانی متناسب با طیف پاسخ هدف است برای درنظرگیری اثرات توپوگرافی دره توسعه داده می‌شود. روش مذکور یکی از معتبرترین

و پرکاربردترین روش‌های موجود در زمینه تولید تاریخچه‌های زمانی متغیر است. از مزایای عمده این روش سرعت محاسباتی بالا، عدم نیاز به تولید طیف فرکانس-عدد موج و هم‌چنین امکان تولید تاریخچه‌های زمانی متناسب با شرایط محلی ساختگاه از طریق تعریف طیف قدرت کانایی- تاجیمی و یا طیف پاسخ متناسب با ساختگاه در ایستگاه‌های مختلف است. بر اساس این روش مؤلفه‌های ماتریس چگالی طیفی متقاطع بین دو ایستگاه j,k بدین‌صورت تعریف می‌شوند [۱۲]:

$$S_{jk}{}^{0}(\omega,t) = A_j(\omega,t)A_k(\omega,t)\sqrt{S_j(\omega)\,S_k(\omega)}\,\Gamma_{jk}(\omega) \quad j,k = 1,2,3,... \quad (٤)$$

در روابط مذکور، $A_j(\omega,t)$ توابع پوش، $S_j(\omega)$ تابع چگالی طیفی در ایستگاه j و $\Gamma_{jk}(\omega)$ تابع نبود انسجام لرزه‌ای بین نقاط j و k است. تابع نبود انسجام لرزه‌ای در حالت کلی دارای دو ترم انسجام تأخیر و اثر عبور موج است. در این تحقیق رابطهٔ ٤ برای درنظرگیری توابع تقویت طیفی نقاط مختلف بر یال دره که در بخش به‌دست آمده‌اند، به‌صورت رابطهٔ (۵) تعمیم داده شده است.

(۵)

$$S_{jk}{}^{0}(\omega,t) = AM_j(\omega,t)AM_k(\omega,t)A_j(\omega,t)A_k(\omega,t)\sqrt{S_j(\omega)\,S_k(\omega)}\,\Gamma_{jk}(\omega) \quad j,k = 1,2,3,...$$

در این رابطه توابع AM_j و AM_k توابع تقویت طیفی نقاط j و k نسبت به قعر دره (ایستگاه ۲) هستند. در شبیه‌سازی فرآیند پیشای نامانای $f_j(t)$ با توابع پوش یک‌نواخت (تابعی فقط بر حسب زمان) ، مؤلفه‌های ماتریس پایین مثلثی $H_{jm(}\omega_l,t)$ حاصل از تجزیه چولسکی ماتریس چگالی طیفی متقاطع در هر لحظه t به‌دست امده و سپس در رابطهٔ (٦) جای‌گذاری می‌شود:

(٦)

$$f_j(t) = 2\sum_{m=1}^{j}\sum_{l=1}^{N}\left| H_{jm}(\omega_l,t)\right|\sqrt{\Delta\omega}\cos\left[\omega_l t - \theta_{jm}(\omega_l,t) + \phi_{ml}\right] \quad j,k = 1,2,3,...$$

$$\theta_{jk}(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{Im}[H_{jk}(\omega)]}{\mathrm{Re}[H_{jk}(\omega)]}\right) \quad (۷)$$

$$\omega_l = l\,\Delta\omega \quad l = 1,2,\ldots,N$$

$$\Delta\omega = \frac{\omega_u}{N} \quad \omega_u = N\Delta\omega \quad (۸)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

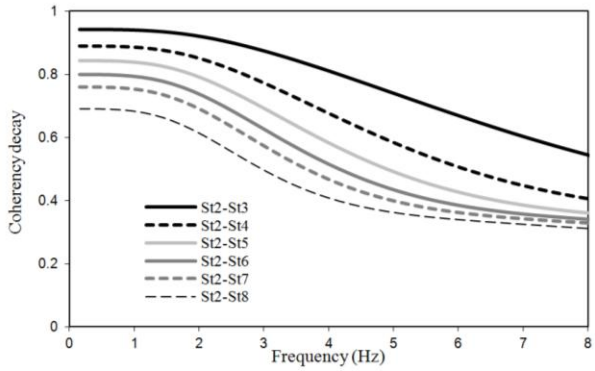
در روابط مذکور $\omega\Delta$ گام فرکانسی، j ایستگاه تولید رکورد، N تعداد نمونه‌های فرکانسی، ω_u فرکانس قطع، ϕ_{ml} زوایای فاز تصادفی مستقل با توزیع یک‌نواخت در محدودهٔ $[0,2\pi]$ و $f_j(t)$ فرآیند تصادفی مانای تولید شده در ایستگاه j است.

مدل انسجام استفاده شده در این بخش، مدل هاریچاندران–و نمارک [۲۵] است که مبنای تحقیقات متعددی در گذشته و حال بوده و امکان مقایسه نتایج با پژوهش‌های مشابه را میسر می‌سازند. این مدل یک مدل مستقل برای انتشار بوده است و بر اساس داده‌های آرایه اسمارت–۱[1] بدین‌شرح استخراج شده است.

$$|\gamma(\upsilon,f)| = A\exp\left[-\frac{2\upsilon}{\alpha\theta(f)}(1-A+\alpha A)\right]+(1-A)\exp\left[-\frac{2\upsilon}{\theta(f)}(1-A+\alpha A)\right] \quad (۹)$$

$$\theta(f) = k\left[1+(f/f_0)^b\right]^{-1/2} \quad (۱۰)$$

یکی از مزیت‌های این مدل، قابلیت انطباق و امکان محاسبه پارامترهای آن بر اساس زلزله‌های ثبت شده مختلف است. در رابطهٔ مذکور υ فاصلهٔ بین ایستگاهی، f فرکانس و پارامترهای A,α,k,b ثوابت مدل است و در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. در شکل ٦ افت انسجام حاصل از مدل مذکور برای ایستگاهای مختلف نسبت به ایستگاه ۲ واقع در قعر دره نشان داده شده است. زلزله‌های مصنوعی متغیر منطبق بر توابع تقویت طیفی دره، طیف پاسخ هدف و توابع افت انسجام در ایستگاه‌های مختلف بر یال دره در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.



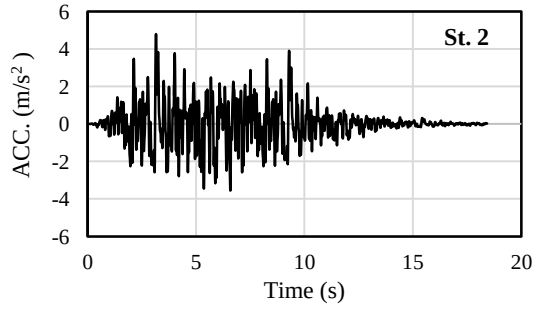
شکل ٦. افت انسجام لرزه‌ای بر حسب فرکانس بین ایستگاه‌های مختلف و ایستگاه ۲

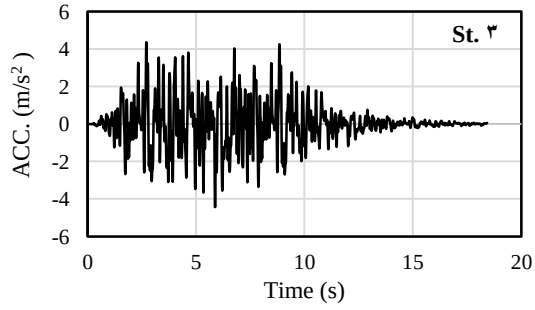
1. Smart-1Array

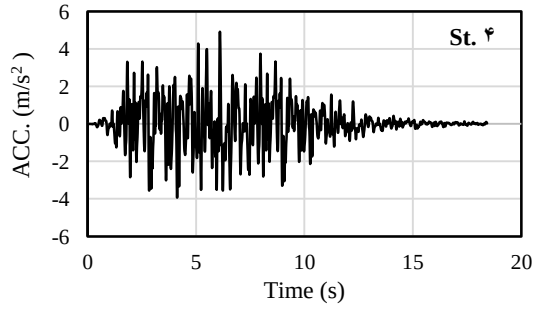
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

جدول ۳. مقادیر پارامترهای مدل انسجام هاریچاندران [۲۵]

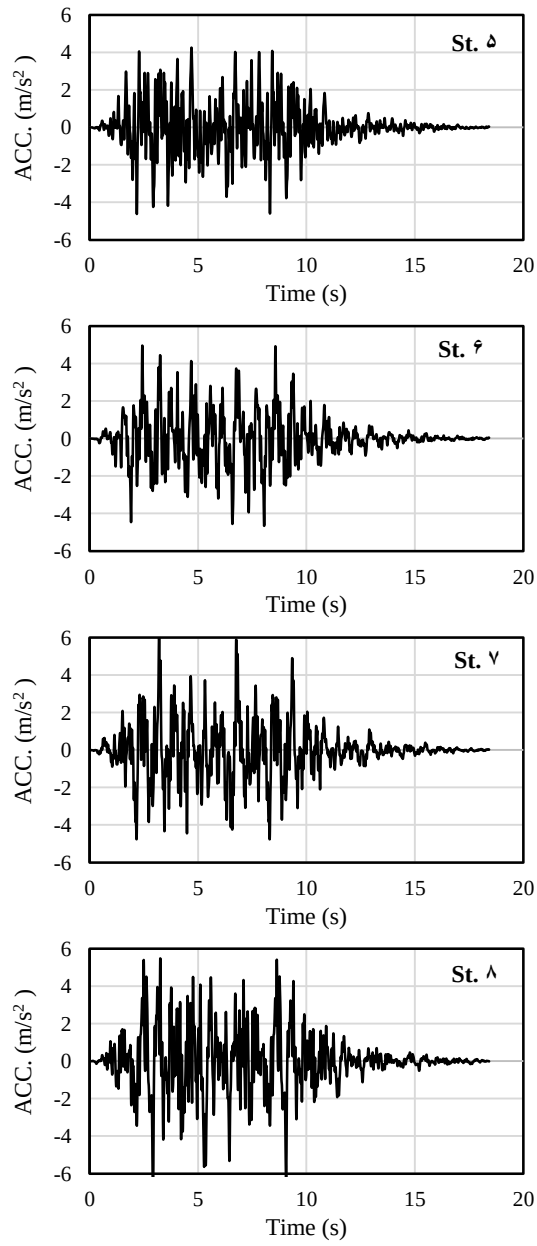
A	α	k	ω_0	b
۰/٦٢٦	۰/۰۲۲	۱۹۷۰۰	۱۲/٦۹	۳/٤۷







[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]



شکل ۷. تاریخچه زمانی زلزله‌های مصنوعی تولید شده روی ایستگاه‌های مختلف بر یال دره منطبق بر توابع تقویت طیفی دره

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

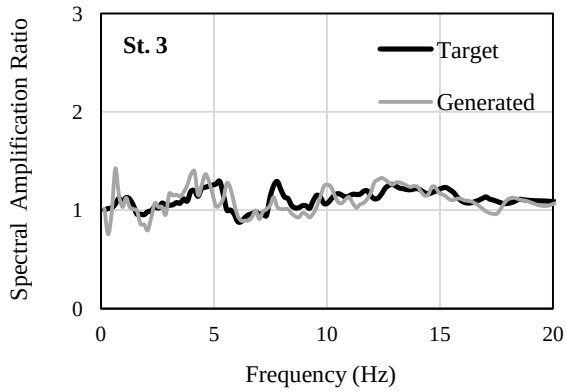
ارزیابی دقت الگوریتم استفاده شده

برای ارزیابی دقت و صحت روش پیشنهادی این مقاله، ابتدا نسبتهای شدت RMS شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده در نقاط مختلف دره به‌شدت RMS شتاب‌نگاشت‌های قعر دره (ایستگاه ۲) به‌دست آمده و در جدول ٤ نشان داده شده‌اند. با مقایسهٔ مقادیر جدول ٤ با جدول ۲ که مربوط به نسبت‌های شدت RMS پاسخ‌های شتاب حاصل از تحلیل دینامیکی هستند، به‌خوبی مشاهده می‌شود که رکوردهای تولید شده در این مقاله با دقت بسیار خوبی از الگوی تقویت امواج دره تبعیت می‌کند.

جدول ٤. مقادیر نسبت شدت RMS پاسخ شتاب نقاط مختلف یال دره به‌شدت RMS قعر دره

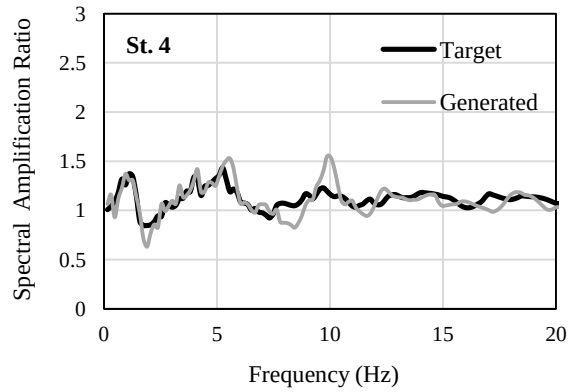
St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8
۱	۱/۰۹	۱/۱	۱/۱	۱/۱٦	۱/۲	۱/٤٦

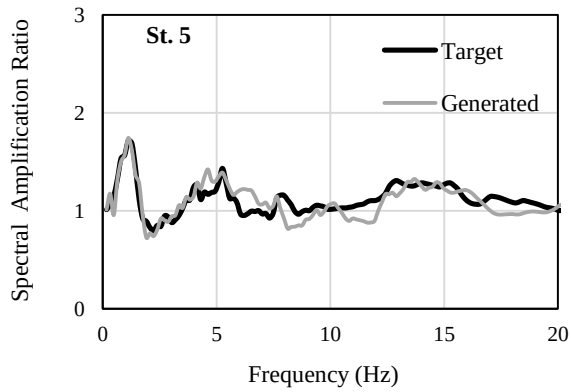
در شکل ۸ توابع تقویت طیفی شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده حاصل از تقسیم طیف پاسخ شبه‌شتاب نقاط مختلف به شتاب قعر دره نشان داده شده و با مقادیر تقویت طیفی هدف حاصل از تحلیل دینامیکی دره (شکل ۵) مقایسه شده‌اند. به‌طوری‌که مشاهده می‌شود سازگاری بسیار مناسبی بین الگوی تقویت امواج در دره و شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی از نظر دامنه تقویت طیفی و محتوای فرکانسی وجود دارد و شتاب‌نگاشت‌های تولید شده در نقاط مختلف یال به‌خوبی از الگوی تقویت طیفی دره تبعیت می‌کنند. این سازگاری با حرکت از قعر دره به‌سمت لبه دره و در محدودهٔ فرکانس اصلی دره برجسته‌تر می‌شود.

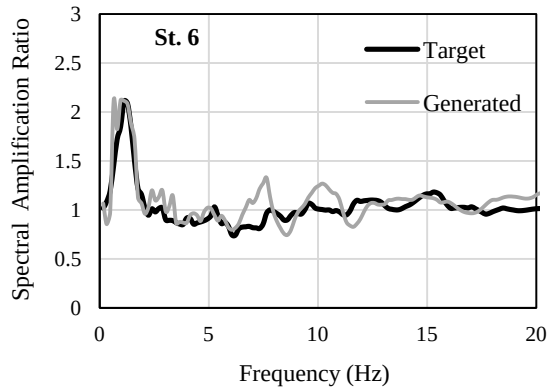


[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

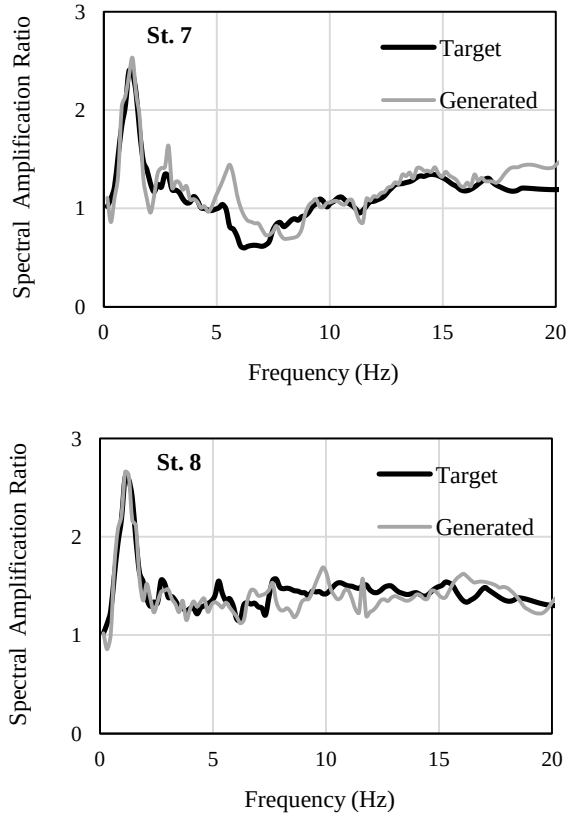
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]







[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]



شکل ۸. مقایسهٔ توابع تقویت طیفی زلزله‌های مصنوعی تولید شده (Generated) با مقادیر تقویت طیفی اولیه (Target) در ایستگاه‌های مختلف واقع بر یال دره

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله تولید زلزله‌های مصنوعی منطبق بر توابع تقویت طیفی عارضه توپوگرافی دره است. به‌منظور دست‌یابی به الگوی تقویت امواج لرزه‌ای دره تحلیل دینامیکی تاریخچهٔ زمانی با استفاده از برنامه Flac2D انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که مقادیر حداکثر پاسخ شتاب در قعر دره دارای کم‌ترین مقدار و در لبهٔ دره دارای بیش‌ترین مقدار است. این رفتار خصوصیت تقویت شتاب دره را به‌خوبی روشن می‌سازد. هم‌چنین تقویت چشم‌گیری در قدرت زلزله در نقاط نزدیک به لبهٔ دره رخ داده است. در تمامی نقاط مقدار حداکثر تقویت طیفی دره در فرکانس ۱/۱۵ هرتز رخ داده است که می‌تواند به‌خوبی نمایان‌گر

فرکانس اصلی عارضه دره باشد. بیش‌ترین مقدار تقویت طیفی مربوط به لبه دره است. زلزله‌های مصنوعی تولید شده با استفاده از روش پیشنهادی این مقاله با دقت بسیار خوبی از الگوی تقویت دره تبعیت می‌کند. روش پیشنهادی این مقاله محدود به عارضه دره نیست و با توجه به این‌که در سال‌های اخیر توابع تقویت طیفی دیگر عوارض توپوگرافی مانند شیب‌ها و تپه‌ها بررسی شدهٔ میدانی و عددی متعددی قرار گرفته‌اند، از این‌رو، می‌توان از روش پیشنهادی این تحقیق می‌تواند به‌طور مؤثری در فرآیند تولید زلزله‌های مصنوعی غیر یک‌نواخت در تکیه‌گاه‌های سازه‌های مستقر روی آن‌ها استفاده کرد.

منابع

1. Rice S. O., "Mathematical analysis of random noise" Bell Syst. Tech. J., Vol. 23 (3) (1944) 282-332, and Vol. 24 (1) 46-156.
2. Shinozuka M., "Monte Carlo solution of structural dynamics", Comput. Struct., Vol. 2 (1972) 855-874.
3. Hao A., Oliveira C. S., Penzien J., "Multiple-station ground motion processing and simulation based on SMART-1 array data" Nucl. Eng. Des., Vol. 111 (1989) 293-310.
4. Zerva A., and Katafygiotis L. S., "Selection of simulation scheme for the nonlinear seismic response of spatial structures", Proc. of 4th Int. Colloquium on Computation of Shell and Spatial Structures, IASSIACM 2000, Chania, Greece (2000).
5. Ramadan O., Novak M., "Simulation of spatially incoherent random ground motions" J. Eng. Mech., Vol. 119 (1993) 997-1016.
6. Ramadan O., Novak M., "Simulation of multidimensional anisotropic ground motions" J. Eng. Mech., Vol. 120 (1994) 1773-1785.
7. Spanos P. D., Zeldin B. A., "Efficient iterative ARMA approximation of multivariate random processes for structural dynamics applications" Earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol. 25 (1996) 497-507.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

8. Vanmarcke E. H., Heredia-Zavoni E., Fenton G. A., "Conditional simulation of spatially correlated earthquake ground motion" J. Eng. Mech., Vol. 119 (1993) 2333-2352.
9. Shinozuka M., Jan C. M., "Digital simulation of random processes and its applications" J. Sound Vib., Vol. 25 (1972) 111-128.
10. Shinozuka, M., "Stochastic fields and their digital simulation, Stochastic Methods in Structural Dynamics", Martinus Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands (1987).
11. Shinozuka M., Deodatis G., "Simulation of stochastic processes by spectral representation" Appl. Mech. Rev., Vol. 44 (1991) 191-203.
12. Shinozuka M., Deodatsi G., "Simulation of multidimensional Gaussian stochastic fields by spectral representation" Appl. Mech. Rev., Vol. 49(1996) 29-53.
13. Yang J. N, "Simulations of random envelope processes" J. Sound Vib. Vol.25(1972) 73-85.
14. Shinozuka M., "Digital simulation of random processes in engineering mechanics with the aid of FFT technique, Stochastic Problems in Mechanics" ST Ariaratnam and HHE Leipholz(eds), Univ of Waterloo Press., 56 (1974).
15. Grigoriu M., "on the spectral representation method in simulation", Probab. Eng. Mech. Vol.8(1993) 75-90.
16. Razmkhah R., Kamalian M., Sadrolddini S. M. A., "Time Domain Modeling of Topographic Effects on the Seismic Response of Slopes" 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (2008) 2940-47.
17. Razmkhah A., Kamalian M., Sadroddini S. M. A., "Application of Boundary Element Method to Study the Seismic Response of Triangular

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.1.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.463]

Hills" 14th World Conf. on Earthq. Eng., Beijing, China, (12-17 October); (2008) 04-02-0068.

18. Razmkhah A., Kamalian M., Sadroddini S. M. A. "A Direct Boundary Element Method Applied to Study the Seismic Response of Triangular Valleys" 14th World Conf. on Earthq. Eng., Beijing, China (12-17 October) (2008) 04-02-0067.
19. Kaiser A. E., Massey A. E., Holden C., "Site amplification, polarity and topographic effects in the port Hills during the Canterbusy earthquake sequence", GNS Science Consultancy Report 2014/121, New Zealand, (2014).
20. Jeong S., Bradley B. A., "Amplification of strong ground motion at Heathcote Valley during the 2010-2011 Canterbury earthquake: observation and 1D site response analysis", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 100 (2017) 345-356
21. Soltani N., Bagheripour M. H, "Non-linear seismic ground response analysis considering two-dimensional topographic irregularities", Scientia Iranica, Vol. 25 (3) (2018) 1083-1093
22. Itasca Consulting Group., FLAC, 2011, "Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 7.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota" (2011).
23. Jafari M. K., Davoodo M., "Dynamic characteristics evaluation of Masjed Soleiman Dam using in situ dynamic tests", Canadian Geotechnical Journal,Vol. 43 (10) (2006) 997-1014.
24. Mahab-Godss Consulting Engineer, "Final Report of Seismic Hazard Analysis of Godar-E-Landar Site" (1994).
25. Harichandran R. S., Vanmarcke E. H., "Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 112 (2) (1986) 154-174.