بررسی بزرگ‌نمایی امواج زلزله ناشی از تپه ذوزنقه‌ای شکل در حالت یک‌بعدی و دوبعدی در حوزهٔ زمان

آرش شارقی*؛ دانشگاه ارومیه، دانشکدهٔ فنی و مهندسی
مسعود عامل‌سخی؛ دانشگاه صنعتی قم، دانشکدهٔ فنی و مهندسی
عبدالله سهرابی‌بیدار؛ دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکدهٔ زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۹۱/۱۰/۳ **پذیرش** ۹۲/٦/٦

چکیده

بررسی حرکات نیرومند زمین تا زمانی که ارتعاشات ناشی از آن به سازه برسد از دو دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک (تحلیل ساخت‌گاه) و مهندسی زلزله (تحلیل رفتار زمین)، اهمیت فراوان دارد. متداول‌ترین روش‌های ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای بر تحلیل‌های دینامیکی یک‌بعدی متکی هستند که سطح زمین را افقی فرض می‌کنند، درحالی‌که در بسیاری از مناطق به‌دلیل وجود توپوگرافی‌های متفاوت، پاسخ‌های گوناگونی در سطح زمین در اطراف ناهمواری دریافت می‌شود. در این پژوهش از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC دوبعدی برای تحلیل تپه‌ای ذوزنقه‌ای شکل با ضرایب شکل مختلف استفاده شده است. این ناهمواری‌ها تحت رکوردهای زلزله حوزهٔ دور قرار گرفته و بزرگ‌نمایی‌های مربوط به‌صورت بی‌بعد با نتایج حاصل از تحلیل‌های یک‌بعدی مقایسه شده‌اند. بررسی نتایج این دو روش آنالیز در نقاط مختلف بر روی ناهمواری و اطراف آن، بیانگر تفاوت‌های چشم‌گیری است که ضرورت تحلیل‌های دوبعدی در زمینه ژئوتکنیک لرزه‌ای را آشکار می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: امواج لرزه‌ای، توپوگرافی، تأثیر ساختگاه، بزرگ‌نمایی.

* **نویسنده مسئول** arash_shareghi@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

مقدمه

زلزله‌ها وقایع طبیعی هستند که صدمات مالی و جانی چشم‌گیری به جامعه وارد می‌کنند. از این رو مهندسان بسیاری برای شناسایی هرچه بیش‌تر این پدیده طبیعی برآمدند، ولی آن‌چه که مبرهن است عدم قطعیت‌هایی است که هر تحقیق مهندسی گامی در راستای کاهش آن برمی‌دارد. جنبهٔ ژئوتکنیکی زلزله‌ها موضوعی است که مهندسان در چند دههٔ اخیر به آن توجه کرده‌اند. در این میان توپوگرافی سطحی و زیرسطحی از جمله عواملی به‌شمار می‌آیند که بر بزرگ‌نمایی مشخصه‌های حرکتی زمین و محتوای فرکانسی زلزله ثبت شده در سطح زمین تأثیر می‌گذارند.

با وجود این، اغلب آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای موجود، اثرات ساخت‌گاه را به‌صورت یک‌بعدی بررسی کرده و در طراحی سازه‌ها استفاده می‌کنند [۱]، [۲]، [۳]. بر اساس مشاهدات فراوان از تأثیر دوبعدی ساخت‌گاه‌ها بر رکوردهای ثبت شده، دانشمندان تحقیقات بسیاری را به‌منظور شناخت هرچه بیش‌تر تغییر ماهیت امواج تحت تأثیر توپوگرافی‌های گوناگون انجام داده‌اند. بوشون[۱] (۱۹۷۳) اولین محققی بود که به تأثیر تپه‌های نیم‌سینوسی بر پاسخ لرزه‌ای زمین را توجه کرد. وی در تحقیقات خود ناهمواری‌هایی از نوع تپه را با ضرایب شکل گوناگون، تحت امواج SH بررسی کرد [٤]. ژلی[۲] (۱۹۸۸) و همکاران اثر لایه‌بندی زیرسطحی و ناهمواری‌های هم‌جوار تپه‌ای نیم‌سینوسی با ضریب شکل ثابتی را تحت امواج مهاجم SH بررسی کردند [۵]. سانچز–سسما[۳] (۱۹۹۱–۱۹۹۳) و همکاران اولین گروهی بودند که تأثیر تپه-های نیم‌بیضی را بر پاسخ لرزه‌ای زمین تحت هر دو موج SV, P بررسی کردند (٦]، [۷]. پدرسون[٤] و همکاران تپه‌های دوبعدی نیم‌بیضی را تحت زوایای هجوم و آزیموت مختلف در یک نسبت شکل و با یک ضریب پواسون بررسی کردند [۸]. سانچز–سسما (۱۹۸۷) اولین محققی بود که به بررسی تپه‌های تیز گوشه یا همان مثلثی شکل تحت امواج مهاجم SH پرداخت [۹]. بعدها نوکزو[۵] (۱۹۹۷) و همکاران پاسخ لرزه‌ای تپه‌های ذوزنقه‌ای شکل را تحت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

امواج مهاجمSV با یک ضریب شکل و یک زاویهٔ یال و یک ضریب پواسون بررسی کرد [۱۰].

۱. Bouchon ۲. Geli ۳. Sanchez-Sesma ٤. Pedersen ٥. Moczo

کمالیان و همکاران (۲۰۰۷) اولین گروهی بودند که بررسی‌های پارامتریک گسترده‌ای را به‌منظور بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی [۱۱] و ذوزنقه‌ای شکل [۱۲] در برابر امواج مهاجم SV, P انجام دادند.بوکوولاس[۱] (۲۰۰۵) و همکاران به ارزیابی پاسخ لرزه‌ای شیب‌ها تحت امواج مهاجم SV پرداختند. ایشان در بررسی‌هایشان به تأثیر هندسه شیب و فرکانس موج مهاجم توجه کردند [۱۳]. گتمیری و همکاران (۲۰۰۷) انواع مختلف توپوگرافی(تپه، دره و شیب) را تحت امواج مهاجم SV ارزیابی کردند [۱٤]، اما در مورد بررسی توپوگرافی تحت رکورد زلزله، پژوهش*ای* پارامتریک خاصی تاکنون انجام نگرفته است و آن‌چه انجام شده، محدود به بررسی مکان‌های خاص، تحت رکوردهای واقعی زلزله است. به‌طور مثال گازتاس[۲] (۲۰۰۲) و همکاران ناهمواری‌های منطقهٔ آدمس[۳] در آتن یونان را با استفاده از داده‌های صحرایی به‌دست آمده مدل کردند و پاسخ رکورد زلزله اعمال شده به آن را در نقاط مختلف توپوگرافی با یک‌دیگر ارزیابی کردند [۱٥]. چانگ گوک[٤] (۲۰۰۸) و همکاران به منطقه‌ای با نام گیونگجو[٥] در کشور کره توجه کردند. به‌منظور بررسی اثر توپوگرافی، دو پروفیل عرضی از محل بررسی شده انتخاب کردند و با استفاده از داده‌های صحرایی موجود، نتایج تحلیل‌های یک‌بعدی و دوبعدی را با هم مقایسه کردند [۱٦].

در این مقاله بزرگ‌نمایی مشخصه‌های حرکتی زمین در تپه ذوزنقه‌ای با ضریب شکل‌های مختلف تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف زلزله حوزه دور در حالت تحلیل یک‌بعدی و دوبعدی با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند.

طرح کلی پژوهش‌ها

اصول اولیهٔ هر پژوهشی قبل از بحث و بررسی نتایج، صحت‌سنجی نرم‌افزارهای استفاده شده و روش‌های مدل‌سازی است. در پژوهش‌های پیش‌رو از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC

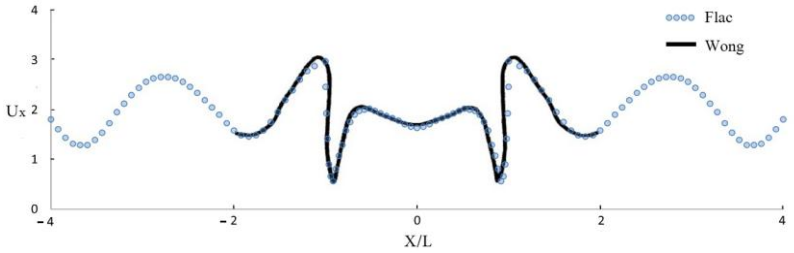
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

که به‌طور صریح[٦] اقدام به تحلیل مسئله می‌کند، استفاده شده است. لازم به ذکر است که در حل مسائل دینامیکی اگـرچه روش صریح مشکلات مـدل‌سازی مخصوص بـه‌خود را دارد اما

۱. Bouckovalas ۲. Gazetas ۳. Adames ٤. Chang-Guk
٥. Gyeongju ٦. Explicit

جواب دقیق‌تری می‌دهد. به‌منظور صحت‌سنجی روش کار عددی، در محیط این نرم‌افزار، دره‌ای نیم‌دایره به شعاع ۲۵ متر در محیط ویسکوالاستیک در حالت بدون میرایی بررسی شد. مشخصات مصالح استفاده شده عبارتند از: سرعت موج برشی $Vs=500 m/s$، ضریب پواسون $\nu=1/3$ و چگالی $\rho=2000\ kg/m^3$. سپس مدل ساخته شده تحت تابش قائم موج ریکر SV با نسبت طول موج $R=2/\lambda$ قرار گرفت. اعمال نیروی دینامیکی به‌صورت تاریخچهٔ شتاب، سرعت یا جابه‌جایی امری مرسوم در تحلیل‌های دینامیکی است، ولی در این پژوهش به‌منظور جلوگیری از بازتاب مصنوعی موج در سطوح مرزی از تنش به‌عنوان محرک دینامیکی استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج حاصل از حل تحلیلی ونگ[1] (۱۹۸۲) مقایسه شد و چنان‌که در شکل۱ مشاهده می‌شود این دو مطابقت خوبی با هم دارند [۱۷].



شکل ۱. صحت‌سنجی نتایج تحلیلی نرم‌افزار FLAC برای توپوگرافی دره (R=۲۵، λ/R=۲ موج قائم SV)

در شکل ۱ محور قائم بیان‌گر نسبت حداکثر پاسخ مؤلفهٔ افقی جابه‌جایی دره در نقاط مختلف بر حداکثر دامنهٔ جابه‌جایی موج ریکر است. محور افقی نیز بیان‌گر نسبت بی‌بعد شده فاصلهٔ نقاط از مرکز دره (X) بر نصف عرض دره (L) است.

توپوگرافی مورد نظر در این مقالهٔ تپه‌ای ذوزنقه شکل است که تحت انتشار امواج زلزله در راستای قائم قرار گرفته است. رکوردهای استفاده شده، چنان‌که در جدول ۱ مشاهده می‌شود

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

مربوط به نگاشت‌های حوزهٔ دور هستند. مشخصاتی که برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها در نظر گرفته شده شامل بزرگای زلزله M=٦-٧/٥ ، فاصلهٔ D>٢٠km و PGA=٠/٨٠-١/٨٦ m/s^2 است. لازم به ذکر است که تمامی رکوردها مربوط به شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در سنگ بستر هستند (Vs>٧٦٠ m/s).

١. Wong

جدول١. رکوردهای استفاده شده در تحلیل دینامیکی تپه ذوزنقه‌ای شکل [١٨]

NO.	Record ID	Earthquake	Station/ Component	Distance (km)	PGA (m/s^2)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
١	P٠٨٥٤	**Landers** ١٩٩٢/٠٦/٢٨ ١١:٥٨	Amboy ٩٠	٦٩/٢	١/٤٠	١٨/٥٩	٦/٨١
٢	P٠٧٨٧	**Loma Prieta** ١٩٨٩/١٠/١٨ ٠٠:٠٥	So. San Francisco, Sierra Pt. ٢٠٥	٦٨/٢	٠/٨٠	٩/٤١	١/٩٦
٣	P٠٨٨٥	**Northridge** ١٩٩٤/٠١/١٧ ١٢:٣١	٠Lake Hughes #9	٢٦/٨	١/٧٠	٥/٩٩	١/٩٥
٤	P٠٩١٥	**Northridge** ١٩٩٤/٠١/١٧ ١٢:٣١	LA - Wonderland Ave ١٨٥	٢٢/٧	١/٧٠	١٣/٧١	٢/٠٣
٥	P٠٩٢٦	**Northridge** ١٩٩٤/٠١/١٧ ١٢:٣١	Mt Wilson - CIT SeisSta ٠	٣٦/١	١/٨٦	٧/٨٠	٠/٥٥
٦	P٠٩٨١	**Northridge** ١٩٩٤/٠١/١٧ ١٢:٣١	Leona Valley #3 ٩٠	٣٧/٨	٠/٨٣	٦/٨٩	١/٨٨
٧	P١٠١١	**Northridge** ١٩٩٤/٠١/١٧ ١٢:٣١	San Gabriel - E. Grand Ave. ١٨٠	٤١/٧	١/٤٣	٧/٣٣	١/٣٣
٨	P٠٥١٤	**N. Palm Springs** ١٩٨٦/٠٧/٠٨ ٠٩:٢٠	Anza - Red Mountain ٣٦٠	٤٥/٦	١/٠٥	٣/٣٧	٠/٤٣
٩	P٠٥٣٨	**N. Palm Springs** ١٩٨٦/٠٧/٠٨ ٠٩:٢٠	Silent Valley - Poppet F ٠	٢٥/٨	٠/٩٦	٢/٨٣	٠/٤٧
١٠	P٠٠٧٧	**San Fernando** ١٩٧١/٠٢/٠٩ ١٤:٠٠	٢١Lake Hughes #9	٢٣/٥	٠/٨٨	٥/٤٩	٠/٦٢
١١	P٠٦٦٦	**Whittier Narrows** ١٩٨٧/١٠/٠١ ١٤:٤٢	Mt Wilson - CIT SeisSta ١٠	٥٨/٣	١/١٠	٦/١٩	١/٤١
١٢	P٠٢٦٩	**Victoria, Mexico** ١٩٨٠/٠٦/٠٩ ٠٣:٢٨	SAHOP Casa Flores ٩٠	٢١/٢	١/٤٦	٤/٧٣	٠/٢٣

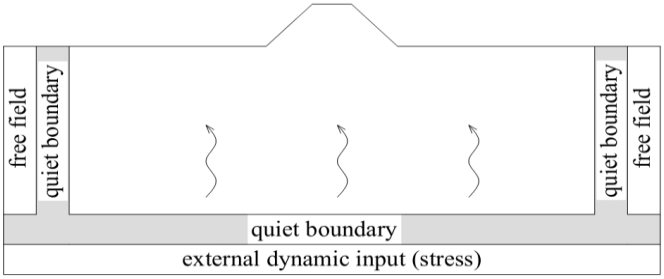
با توجه به این‌که اکثر تپه‌های طبیعی از جنس سنگ هستند، در این مقاله نیز مصالح سنگی با مشخصاتی از قبیل چگالی ρ=٢٠٠٠ kg/m^3، مدول الاستیسیته E=٤٠٠٠MPa و ضریب پواسون ν=٠/٤ به توپوگرافی مدل شده، اختصاص داده شد. هندسهٔ تپه در ٤ ضریب شکل ٠/١ ، ٠/٣ ، ٠/٥ و ٠/٧ با شیب ٤٥ درجه در نظر گرفته شد. منظور از ضریب شکل تپه ذوزنقه‌ای، نسبت ارتفاع تپه به نصف عرض آن است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

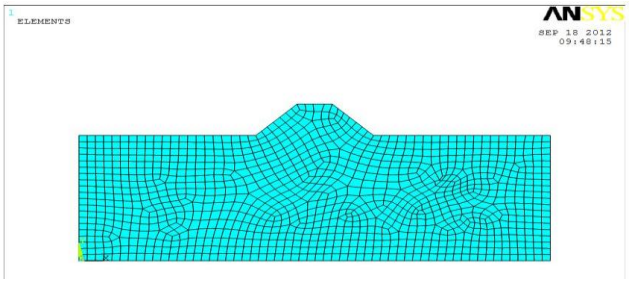
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

مرزهای مدل به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که شرایط محیط نیمه بینهایت را ایجاد کنند. فاصلهٔ مرزها از ناهمواری نیز طوری انتخاب شده که میرایی مرزهای جاذب تأثیری در نتایج نقاط مورد نظر نداشته باشد. تمامی رکوردهای زلزله به صورت تاریخچه زمانی تنش از سنگ بستر به مدل اعمال می‌شود تا از انعکاس کاذب امواج در سطوح اعمالی جلوگیری شود (شکل ۲).

میرایی استفاده شده در بخش دینامیکی مدل از نوع رایلی با نسبت میرایی ۰/۰۵ =ξ است و مقدار فرکانس اختصاص داده شده به آن نیز از آنالیز مودال انجام شده برای هر تپه‌ای با ضریب شکل مشخص در نرم‌افزار ANSYS به‌دست آمده است. به‌عنوان مثال شکل ۳ مدل تپه‌ای با ضریب شکل ۰/۷ در محیط نرم‌افزار ANSYS است.



شکل۲. شرایط مرزی و اعمال تنش از سنگ بستر



شکل۳. مدل ایجادشده برای آنالیز مودال در ANSYS

هنگام انتشار موج در محیط در هنگام تحلیل دینامیکی ممکن است تحت شرایط ناخواسته مدل‌سازی، اغتشاشات عددی رخ دهد. مقدار فرکانس اعمال شده به محیط و سرعت موج بر دقت عددی شرایط انتقال موج تأثیرگذار است. به‌منظور رسیدن به‌دقت کافی لازم است شرط توصیه شده توسط لیسمر[1] و کوهل‌میر[2] (۱۹۷۳) اقناع شود [۱۹]. لازم به ذکر است علاوه بر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

رابطهٔ مذکور، در این تحقیق آنالیز حساسیت بر روی تأثیر ابعاد دیگر مش‌بندی نیز انجام گرفت که در نهایت همان رابطه ارائه شده بهترین معیار انتخاب شد. این دو محقق پیشنهاد کرده‌اند ابعاد زون‌های موجود در محیط باید از این رابطه پیروی کند:

$$\Delta l < \lambda/8 \qquad (۱)$$

۱. Lysmer ۲. Kuhlemeyer

در این رابطه Δl اندازه بزرگ‌ترین زون و λ طول موج هنگام رخداد بیش‌ترین فرکانس در محیط است.

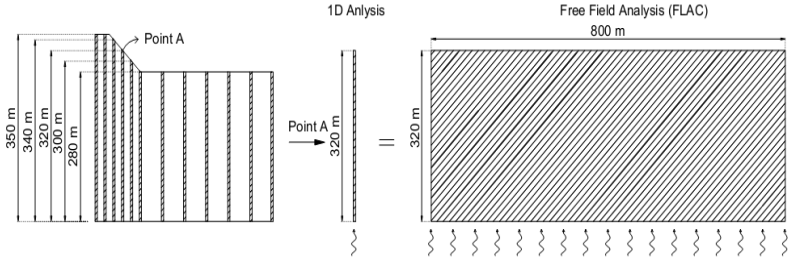
مدل یک بعدی

اکثر پژوهش*های* گذشته تنها اثر بزرگ‌نمایی توپوگرافی را بررسی کرده‌اند. این دسته پژوهش‌ها به ضرورت بررسی توپوگرافی‌ها به‌عنوان عاملی که باعث تغییر محتوای امواج رسیده به زمین می‌شوند توجه کرده‌اند. در این تحقیق علاوه بر بررسی مقدار بزرگ‌نمایی تپه، به تفاوت‌های حاصل از بررسی یک‌بعدی و دوبعدی آن پرداخته می‌شود. تمامی تپه‌ها در محیط FLAC۲D مدل شده‌اند. برای مدل‌سازی محیط یک‌بعدی نیز از همین نرم‌افزار استفاده شده است. منظور از محیط یک‌بعدی در اینجا، مدل میدان آزاد[۱] برابر ارتفاع ساخت‌گاهی با ارتفاع نقاطی است که در توپوگرافی در نقاط مختلف تپه قرار دارند (شکل٤). به‌طور مثال نقطهٔ A روی تپه‌ای با ضریب شکل ۰/۷ است. برای بررسی پاسخ این نقطه به‌صورت یک‌بعدی باید پروفیلی به ارتفاع نقطه A از سنگ بستر را در نظر گرفت. به‌منظور مدل‌سازی پروفیل یک‌بعدی نقطهٔ A با استفاده از نرم‌افزار FLAC۲D ، یک مدل میدان آزاد به عرض همان ساخت‌گاه دوبعدی و به ارتفاعی معادل با ارتفاع پروفیل یک بعدی نقطه A ایجاد شد. زلزله‌های مختلف به این مدل میدان آزاد وارد شده و پاسخ‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی از یک نقطه در سطح زمین برداشت شدند

.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]



شکل ٤. مدل میدان آزاد در نرم‌افزار FLAC۲D

۱. Free Field

این روند برای تمام نقاط روی و اطراف تپه انجام شده و پاسخ‌های تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی در نظر گرفته شدند. مقادیر مربوط به حداکثر شتاب (سرعت و جابه‌جایی) در سطح زمین ($PGA_{response}$) به مقادیر مربوط به حداکثر شتاب (سرعت و جابه‌جایی) هر زلزله ورودی ($PGA_{Incident}$) تقسیم شده است که در این مقاله با عنوان بزرگ‌نمایی بیان می‌شود و در شکل۵ برای نقاط مختلف روی تپه‌ای به ضریب شکل ۰/۷ بر حسب فاصله‌های متفاوت از مرکز تپه رسم شدند.

چنان‌که در شکل ۵ مشخص است زلزله‌های مختلف، بزرگ‌نمایی‌های متفاوتی را در سطح زمین ایجاد می‌کنند. از طرفی این پراکندگی موجود در نمودارهای بزرگ‌نمایی شتاب بیش‌تر از سرعت، و در سرعت نیز بیش‌تر از جابه‌جایی است. بنا بر این نمودارهای بزرگ‌نمایی شتاب به خصوصیات زلزله اعمالی حساسیت بیش‌تری نشان می‌دهند و در حوزهٔ زمان در صورتی که هدف استخراج مقدار بزرگ‌نمایی شتاب معادل برای تپه ذوزنقه‌ای باشد باید زلزله‌های ورودی را با معیارهای بهتری انتخاب کرد و یا با روش‌های مقیاس‌سازی بهتری اصلاح کرد تا پراکندگی نتایج کاهش یابد.

به‌منظور بررسی تغییر نسبت میرایی بر بزرگ‌نمایی مؤلفه‌های افقی زمین، در شکل ٦ تپه‌ای با ضریب شکل ۰/۷ با نسبت‌های میرایی صفر، ۲، ۵ و ۱۰ درصد تحت زلزله ویکتوریا[1] قرار می‌گیرد. مشخص است که با کاهش نسبت میرایی بزرگ‌نمایی‌ها افزایش می‌یابند تا این‌که در نسبت میرایی صفر درصد به عدد ۲ می‌رسند. نکته قابل توجه این است که اگر برای تمامی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

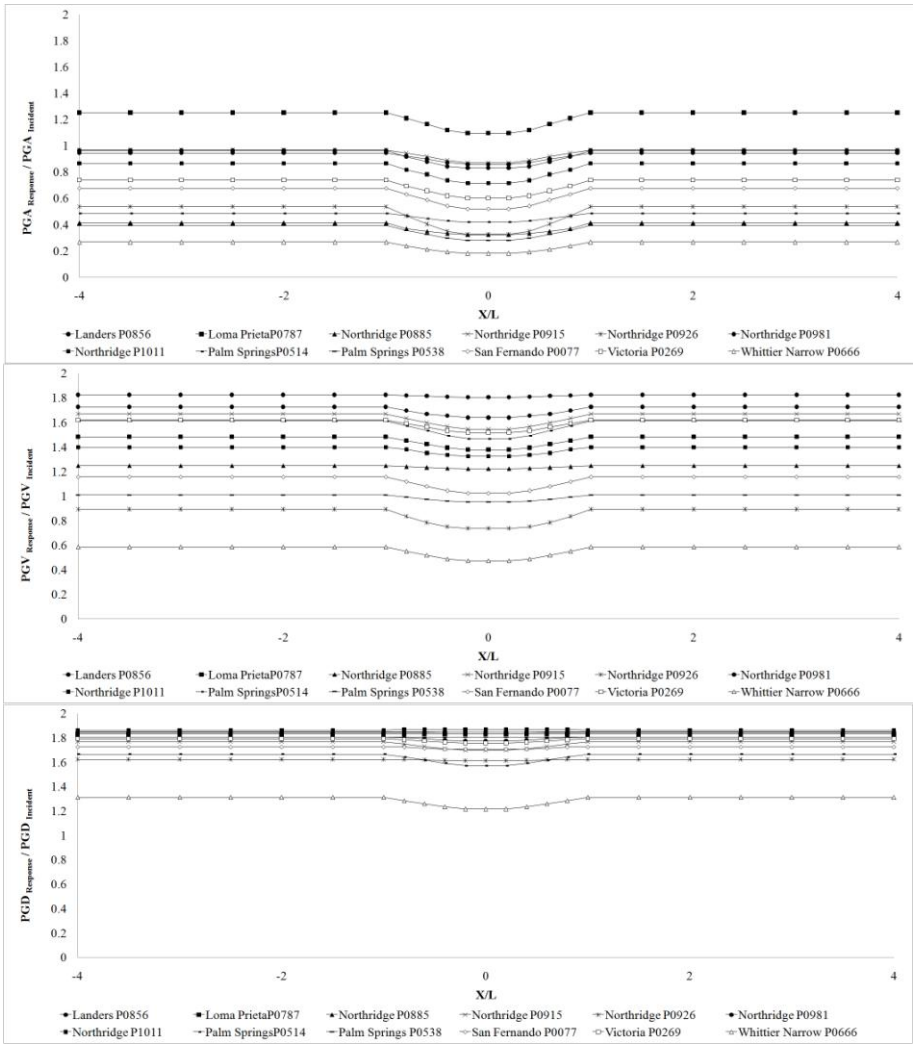
رکوردهای زلزله این کار انجام گیرد، در نسبت میرایی صفر درصد مقادیر بزرگ‌نمایی شتاب، سرعت و جابه‌جایی، چنان‌که از حل تحلیلی انتظار می‌رود به عددی حدود ۲ می‌رسند. این در حالی است که با افزایش میرایی تفاوت میان بزرگ‌نمایی‌های مؤلفه‌های حرکتی برای زلزله‌های مختلف بیش‌تر می‌شود. این مطلب مؤید آن است که تأثیر میرایی برای زلزله‌های مختلف، متفاوت است. هم‌چنین از مقایسهٔ نتایج میرایی‌های مختلف بر مؤلفه‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی می‌توان دریافت که تأثیر میرایی بر مؤلفه شتاب بیش‌تر از سرعت و بر سرعت نیز بیشتر از جابه‌جایی است. چنان‌که در شکل ٦ مشخص است در میرایی‌های غیر از صفر درصد،

۱. Victoria

در ارتفاع تپه، بزرگ‌نمایی کاهش می‌یابد. علت این است که چون روش تحلیل به‌صورت میدان آزاد است بنا بر این با افزایش ارتفاع ساخت‌گاه، تأثیر میرایی بر امواج افزایش یافته و در نهایت موجب می‌شود کاهش بیش‌تری در مقادیر بزرگ‌نمایی ایجاد شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

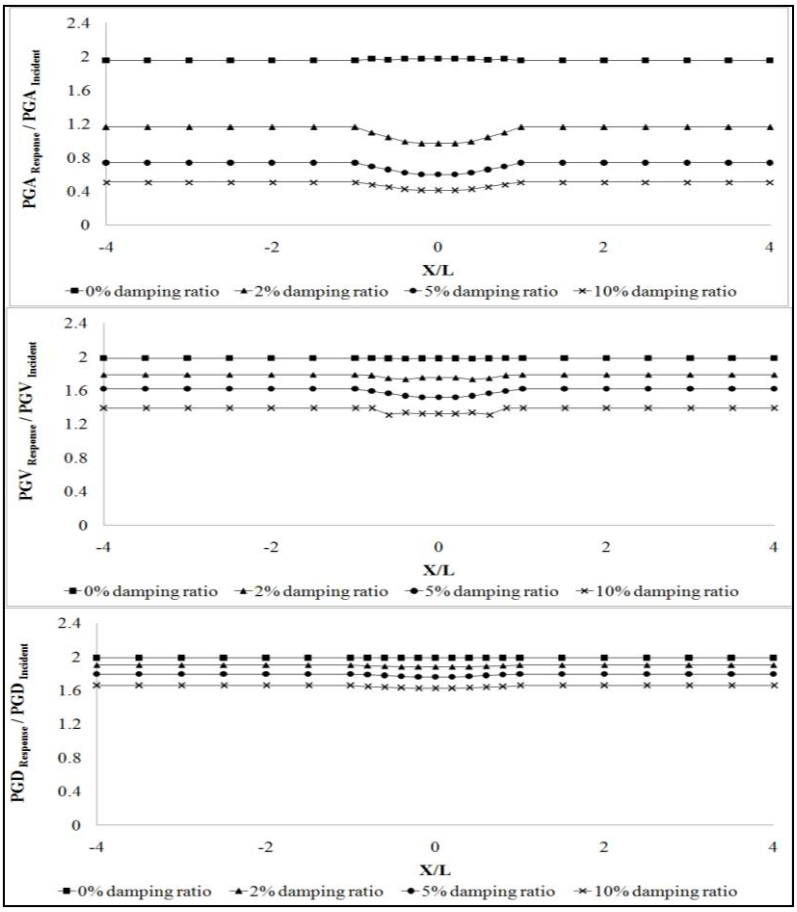
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]



شکل ۵. مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی شتاب، سرعت و جابه‌جایی به‌دست آمده از تحلیل میدان آزاد(1D) تپه‌ای با ضریب شکل ۰/۷در فاصله‌های بی‌بعد شده از مرکز تپه برای ۱۲ رکورد زلزله با نسبت میرایی ۵٪

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]



شکل ٦. تأثیر نسبت میرایی بر تپه‌ای با ضریب شکل ۰/۷ تحت زلزل ویکتوریا

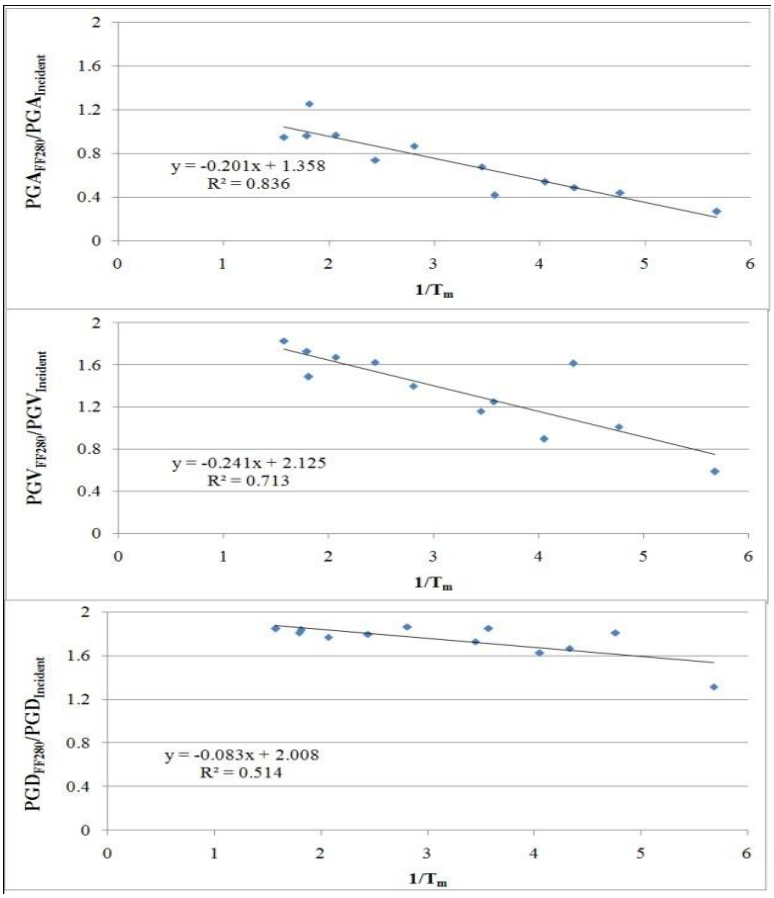
شکل ۷ بزرگ‌نمایی زلزله‌های مختلف برای مشخصه‌های حرکتی زمین را در مقابل معکوس پریود میانگین (T_m) با نسبت میرایی ۵ درصد نشان می‌دهد. پریود میانگین بهترین مشخصه محتوای فرکانسی زلزلهاست [۲۰] که با استفاده از رابطهٔ ۲ محاسبه می‌شود:

$$T_m = \frac{\sum \frac{c_i^2}{f_i}}{\sum c_i^2} \qquad (۲)$$

که در اینجا c_i دامنه فوریه و f_i تبدیل فوریه فرکانسی گسسته در بازه ۰/۲۵ تا ۲۰ هرتز است. رابطهٔ ۲ بیان‌گر مشخصه‌ای است که در آن نقش فرکانس‌های پایین‌تر پررنگ‌تر است. از مقایسهٔ خطوط رگرسیون مربوط به نمودارهای بزرگ‌نمایی شتاب، سرعت و جابه‌جایی چنین

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

استنتاج می‌شود که مقدار پراکندگی داده‌های مربوط به زلزله‌های مختلف در نمودار مربوط به بزرگ‌نمایی شتاب، کم‌ترین مقدار را دارد، بنا بر این خط رگرسیون مربوط به بزرگ‌نمایی شتاب نمایان‌گر بهتری از وضعیت نزولی داده‌ها نسبت افزایش $1/T_m$ است. هم‌چنین نتیجه مهم دیگری که از شکل ۷ به‌دست می‌آید این است که با افزایش مقدار معکوس پریود میانگین، تأثیر میرایی بر امواج زلزله بیش‌تر شده و به‌ازای یک نسبت میرایی ثابت، دامنه حرکتی آن کاهش بیش‌تری می‌یابد.



شکل ۷. نسبت بزرگ‌نمایی شتاب، سرعت و جابه‌جایی حاصل از تحلیل میدان آزاد برای ساخت‌گاهی با ارتفاع ۲۸۰ متر از سنگ بستر در مقابل معکوس پریود میانگین با نسبت میرایی ۵٪

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

بنا بر این با توجه به شکل‌های ٦ و ۷ می‌توان دریافت که تفاوت موجود در بزرگ‌نمایی‌های مشخصه‌های حرکتی زمین (شتاب، سرعت و جابه‌جایی) برای یک ساخت‌گاه مشخص با نسبت میرایی ۵ درصد به ازای زلزله‌های مختلف، به محتوای فرکانسی هر زلزله وابسته است.

مدل دوبعدی

شتاب‌نگاشت‌های ۱۲ زلزله مختلف به تپه‌ای ذوزنقه‌ای با ضریب شکل‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ اعمال و در نقاط مختلفی بر روی تپه و اطراف آن، نگاشت‌های مربوط به جابه‌جایی، سرعت و شتاب محاسبه شده است. به‌عنوان نمونه شکل ۸ بیانگر مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی شتاب، سرعت و جابه‌جایی در فاصله‌های بی‌بعد شده از مرکز تپه برای ۱۲ رکورد زلزله برای تپه‌ای با ضریب شکل ۰/۷ است.

رکوردهایی که بزرگ‌نمایی شتاب بیش‌تری دارند نسبت به وجود ناهمواری حساس‌ترند، یعنی در پای تپه بزرگ‌نمایی حداقل کوچک‌تر و در بالای تپه، بزرگ‌نمایی حداکثر بیش‌تری مشاهده می‌شود، ولی زلزله‌هایی که بزرگ‌نمایی شتاب کم‌تری دارند نمودارهای بزرگ‌نمایی هموارتری ایجاد می‌کنند. این مطلب در مورد نمودارهای بزرگ‌نمایی سرعت و جابه‌جایی صادق نیست. نمودارهای بزرگ‌نمایی شتاب برای همهٔ رکوردها نشان می‌دهند که کوچک‌ترین بزرگ‌نمایی در اطراف توپوگرافی ذوزنقه‌ای با عرض تپه ۲۰۰ متر، در فاصله بی‌بعد ۱ الی۱/۵ از مرکز تپه رخ می‌دهد که علت اصلی آن تفرق امواج است. این در حالی است که بیش‌ترین بزرگ‌نمایی نیز مربوط به نقاط بالایی شیب در تپه می‌شود که علت اصلی آن را نیز می‌توان تمرکز امواج زلزله دانست.

نمودارهای بزرگ‌نمایی سرعت مانند نمودارهای شتاب به ناهمواری حساس نیستند و در مقایسه با آن‌ها هموارترند. بنا بر این تأثیر توپوگرافی روی شتاب بیش‌تر از سرعت است. مقادیر حداقل بزرگ‌نمایی در این نمودارها محدود به فاصله بی‌بعد ۱ الی ۲ از مرکز تپه می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

در این نمودارها مقدار حداقل بزرگ‌نمایی جابه‌جایی در فاصله بی‌بعد ۱/۵ الی ۲ از مرکز توپوگرافی برای تپه‌ای با مشخصات مذکور رخ می‌دهد و محل وقوع بیش‌ترین بزرگ‌نمایی نیز شبیه نمودارهای شتاب و سرعت است. افزایش ضریب شکل تپه از ۰/۱ تا ۰/۷ در حالت کلی باعث افزایش مقدار بزرگ‌نمایی شده ولی این روند افزایشی برای بزرگ‌نمایی‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی متفاوت است.

ترتیب قرارگیری زلزله‌ها در نمودارهای بزرگ‌نمایی شتاب، سرعت و جابه‌جایی شکل ۸ با هم متفاوت است، به‌عبارت دیگر زلزله‌ای که بزرگ‌ترین بزرگ‌نمایی شتاب را ایجاد کرده لزوماً بزرگ‌ترین بزرگ‌نمایی سرعت یا جابه‌جایی را ندارد یا زلزله‌ای که بزرگ‌ترین بزرگ‌نمایی سرعت را ایجاد کرده لزوماً بزرگ‌ترین بزرگ‌نمایی جابه‌جایی را نیز به خود اختصاص نمی‌دهد. از شکل ۸ می‌توان دریافت که میانگین بزرگ‌نمایی نمودارهای شتاب به‌ازای زلزله‌های متفاوت کم‌تر از سرعت، و سرعت نیز کم‌تر از جابه‌جایی است.

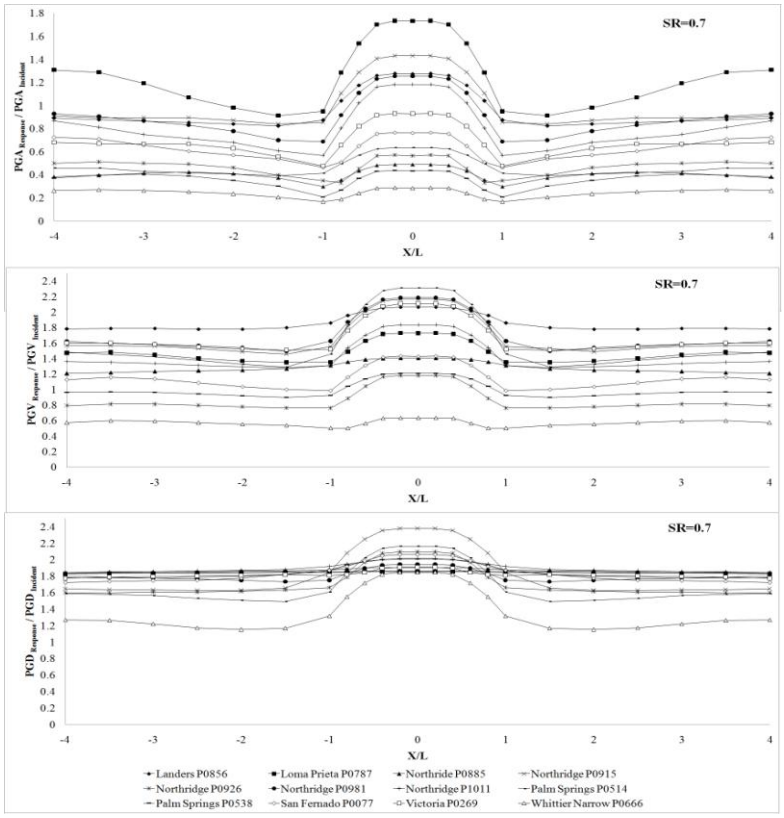
مقایسه نتایج تحلیل یک‌بعدی و دوبعدی

شکل ۹ مقایسه شماتیکی از نسبت بزرگ‌نمایی حاصل از تحلیل توپوگرافی به‌صورت دوبعدی بر تحلیل آن به‌صورت یک‌بعدی را برای زلزله‌های مختلف بر روی تپه‌ای با ضریب شکل‌های۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ نشان می‌دهد. قبلاً گفته شد که منظور از تحلیل یک‌بعدی این است که برای به‌دست آوردن تاریخچه شتاب (سرعت یا جابه‌جایی) در نقاط مشخص بر روی توپوگرافی و اطراف آن، ساختگاهی با همان ارتفاع از سنگ بستر مدل شده تا بدین‌ترتیب تأثیر افزایش ارتفاع در تپه در نظر گرفته شود. بدین ترتیب تنها تفاوتی که میان دو نتایج مشاهده می‌شود ناشی از اثر هندسه توپوگرافی بر محرک‌های لرزه‌ای ورودی است.

از مقایسهٔ نمودارهای شکل۹ این طور می‌توان دریافت که تمامی نتایج آنالیز میدان آزاد برای شتاب در نقاطی به فاصله ۱ تا ۲ برابر عرض تپه‌ای با مشخصات مذکور، کمی محافظه‌کارانه‌تر از نتایج آنالیز دوبعدی است. این در حالی است که در بازهٔ $-1 < X/L < 1$ تفاوت چشم‌گیری میان تحلیل میدان آزاد با تحلیل دو بعدی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]



شکل ۸. نمودارهای بزرگ‌نمایی مؤلفه‌های افقی شتاب، سرعت و جابه‌جایی در فاصله‌های بی‌بعد شده از مرکز تپه به‌ازای ۱۲ رکورد زلزله برای تپه‌ای با ضریب شکل ۰/۷ و نسبت میرایی ۵٪

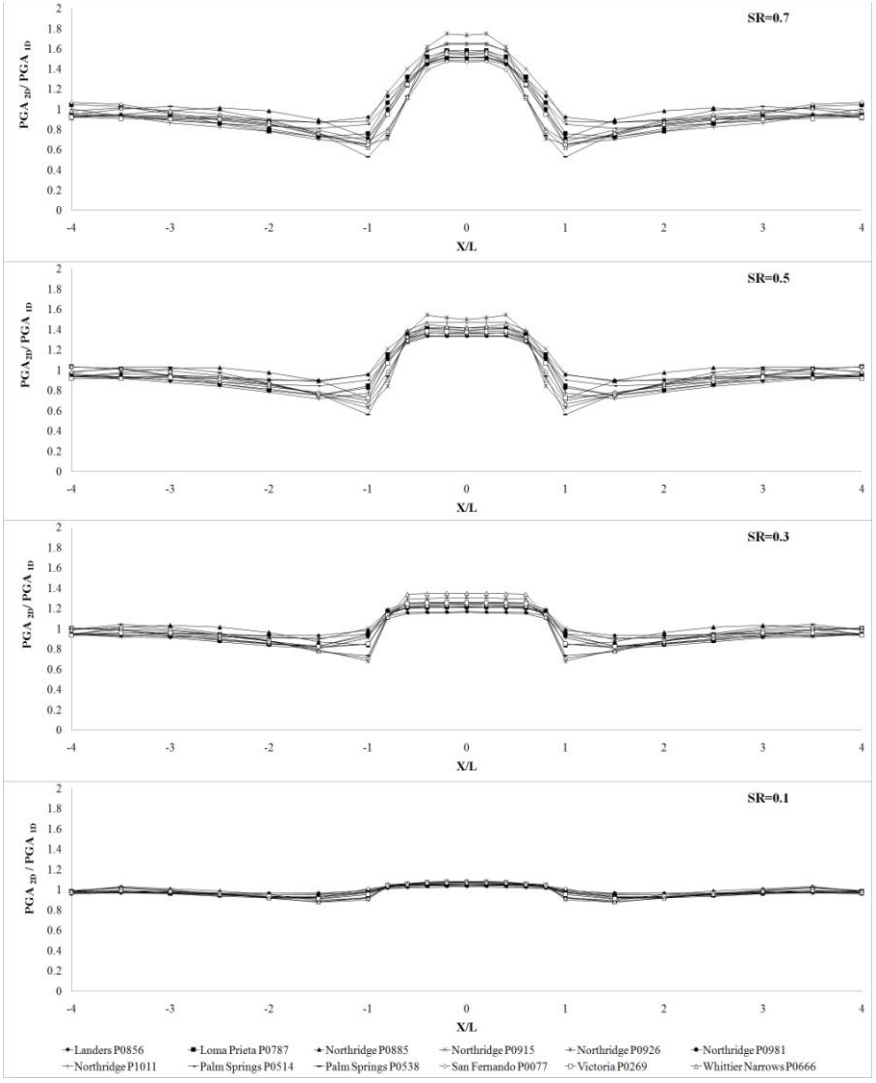
این بار نتایج تحلیل میدان آزاد، مقادیر بزرگ‌نمایی کم‌تری نسبت به تحلیل دوبعدی به‌دست می‌دهند. از این رو، استفاده از نتایج تحلیل دوبعدی در این ناحیه ضرورت پیدا می‌کند.

شکل ۱۰ نمودارهایی **برای** مقایسه نسبت سرعت‌ها در حالت تحلیل میدان آزاد و تحلیل دوبعدی ارائه می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که تفاوت عمده میان این دو روش، بررسی اثر توپوگرافی برای سرعت نیز بیش‌تر در همان محدوده خود تپه ($-1<X/L<1$) مطرح است، به‌جز رکوردهای معدودی که در نقاط دورتر اختلافاتی را ایجاد کرده‌اند.

مقایسهٔ میان بزرگ‌نمایی جابه‌جایی افقی حاصل از تحلیل میدان آزاد و تحلیل دوبعدی در شکل ۱۱ آمده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که در بعضی زلزله‌ها نتایج این دو تحلیل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

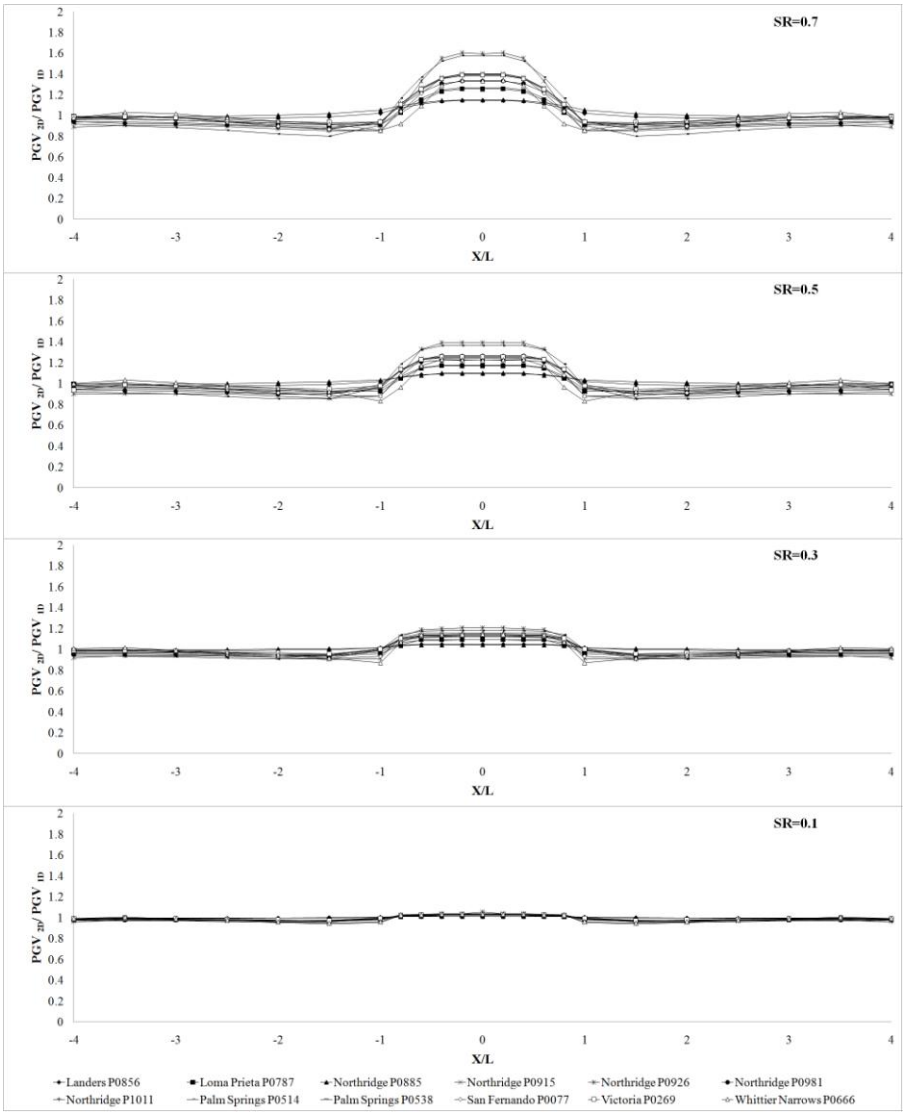
بر هم منطبق هستند ولی در بعضی دیگر تفاوت چشم‌گیری وجود دارد. محدوده‌ای که بیش‌ترین تغییرات بین دو روش تحلیل مشاهده می‌شود در فاصلهٔ X/L=۱ از هر طرف تپه است.



شکل۹. نسبت نتایج بزرگ‌نمایی شتاب حاصل از تحلیل دوبعدی بر یک‌بعدی برای ۱۲ زلزله متفاوت با نسبت میرایی ۵٪ بر روی تپه‌ای با ضریب شکل‌های مختلف در فاصله‌های بی‌بعد شده از مرکز تپه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

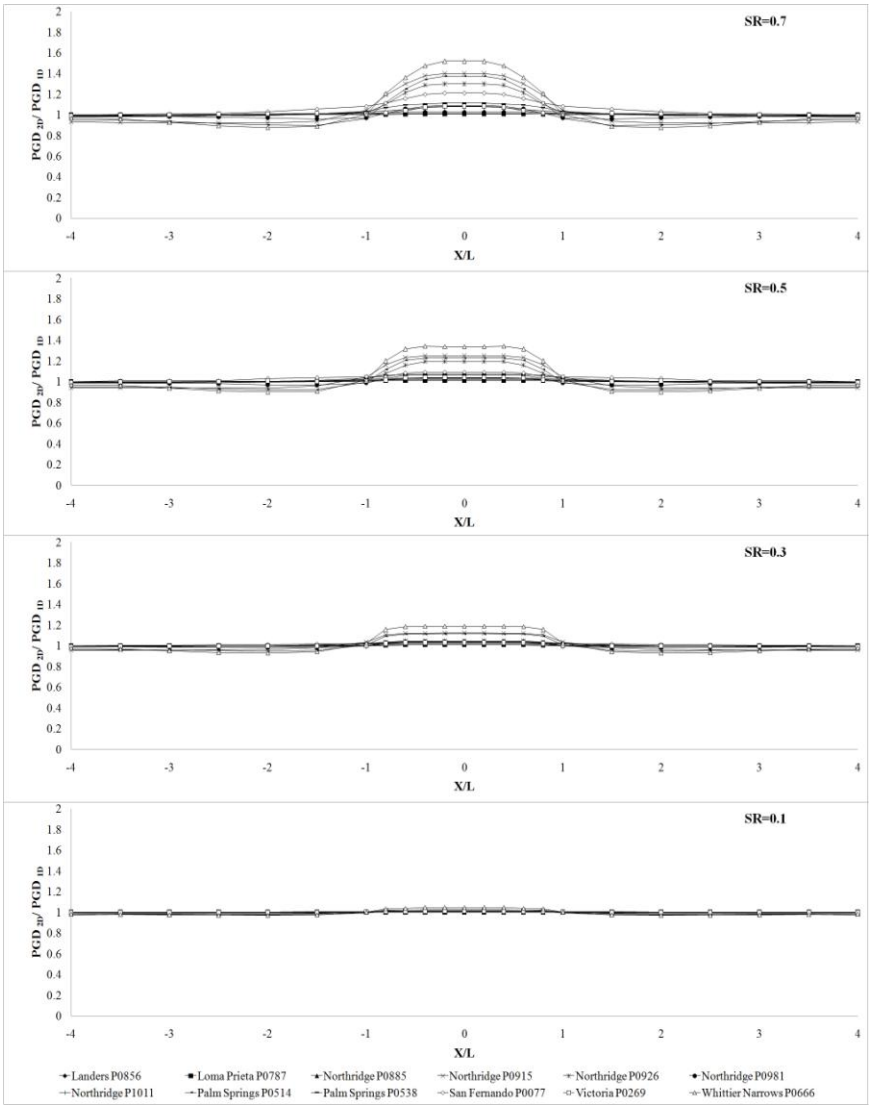
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]



شکل ۱۰. نسبت نتایج بزرگ‌نمایی سرعت حاصل از تحلیل دوبعدی بر یک‌بعدی برای ۱۲ زلزله متفاوت با نسبت میرایی ۵٪ بر روی تپه‌ای با ضریب شکل‌های مختلف در فاصله‌های بی‌بعد شده از مرکز آن

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]



شکل ۱۱. نسبت نتایج بزرگ‌نمایی جابه‌جایی حاصل از تحلیل دوبعدی بر یک‌بعدی برای ۱۲ زلزله متفاوت با نسبت میرایی ۵٪ بر روی تپه‌ای با ضریب شکل‌های مختلف در فاصله‌های بی‌بعد شده از مرکز تپه

به‌منظور بررسی پراکندگی نسبت نتایج تحلیل دوبعدی بر یک‌بعدی به ازای زلزله‌های مختلف، در جدول ۲ میانگین ضرایب تغییرات برای هر دسته نمودار در هر ضریب شکل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

به‌دست آمده است. چنان‌که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب شکل، پراکندگی نتایج افزایش یافته و در نتیجه تفاوت موجود بین دو روش تحلیل افزایش می‌یابد.

جدول ۲. میانگین ضریب تغییرات برای بزرگ‌نمایی مشخصه‌های حرکتی زمین حاصل از نسبت تحلیل دوبعدی به تحلیل میدان آزاد(1D) تپه‌ای ذوزنقه‌ای به ازای زلزله‌های مختلف

میانگین ضرایب تغییرات	ضریب شکل	نمودارهای بزرگ‌نمایی	شماره شکل
۰/۰۱۷۸	۰/۱	شتاب	۹
۰/۰۴۶۴	۰/۳		
۰/۰۶۱۲	۰/۵		
۰/۰۷۳۴	۰/۷		
۰/۰۱۰۶	۰/۱	سرعت	۱۰
۰/۰۳۲۴	۰/۳		
۰/۰۵۰۵	۰/۵		
۰/۰۶۰۲	۰/۷		
۰/۰۰۹۲	۰/۱	جابه‌جایی	۱۱
۰/۰۳۰۴	۰/۳		
۰/۰۴۹۶	۰/۵		
۰/۰۶۵۰	۰/۷		

شکل ۱۲ میانگین نمودارهای بزرگ‌نمایی را برای ۱۲ زلزله مختلف، با میانگین ضریب تغییراتی که در جدول ۲ آمده است برای مؤلفه‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی بیان می‌کند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد تأثیر توپوگرافی بر بزرگ‌نمایی شتاب نسبت به سرعت بیش‌تر است و بزرگ‌نمایی سرعت نیز از جابه‌جایی بیش‌تر است. هم‌چنین می‌توان دریافت که جابه‌جایی و تا حدی سرعت مؤلفه‌هایی هستند که تأثیر توپوگرافی بر روی آن‌ها در پای تپه و نقاط دورتر آن ناچیز است. درحالی که شتاب در پای تپه‌ای با ضریب شکل ۰/۷ و ابعادی مشابه آن‌چه که در این پژوهش بررسی شده، به‌دلیل تفرق امواج رسیده به سطح زمین مقدار کم‌تری را نسبت به پاسخ میدان آزاد دارد ولی در فاصلهٔ X/L=۱ تمامی مقادیر مؤلفه‌های افقی تحلیل دوبعدی بیش‌تر از تحلیل یک‌بعدی است.

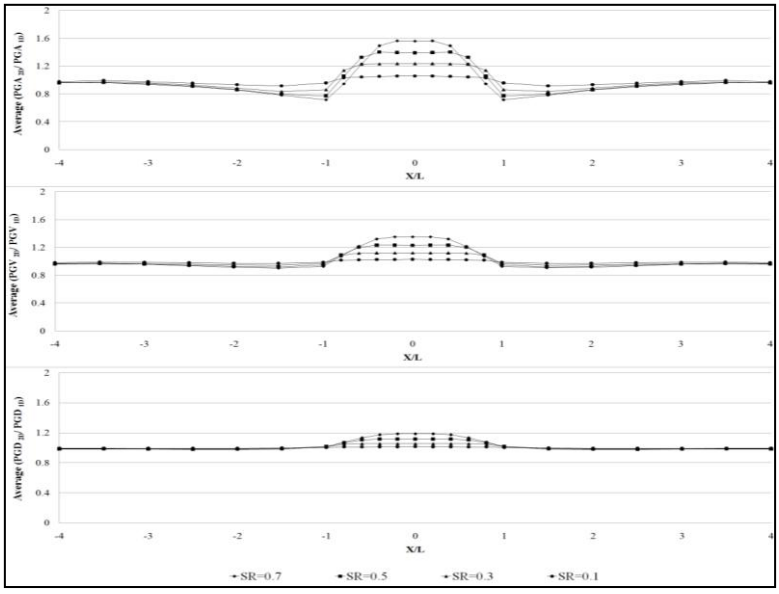
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

مقایسه نتایج این مطالعه با مقادیر توصیه شده آیین نامه‌ای

تاثیر ناهمواری‌های توپوگرافی بر حرکت سطح زمین در آیین‌نامه‌های معتبری نظیر UBC [۱]، NEHRP [۲] و IBC [۳] در نظر گرفته نشده است. در بین آیین‌نامه‌های معتبر طراحی لرزه‌ای در دنیا EC۸ [۲۱] و AFPS ۹۰ [۲۲] تنها آیین‌نامه‌هایی هستند که به اثرات ساخت‌گاهی ناشی از توپوگرافی توجه کرده‌اند. آیین‌نامهٔ AFPS ۹۰ فصلی جداگانه برای این موضوع در نظر گرفته است، در حالی که آیین‌نامهٔ EC ۸ تنها در قسمت پیشنهادهای نهایی و به‌صورت اجمالی توضیحاتی را در این زمینه ارائه کرده است.

شکل ۱۳ شماتیکی از مقایسهٔ نتایج تحلیل ناهمواری تپه ذوزنقه‌ای شکل حاصل از این بررسی را با نتایج حاصل از فرمول‌های تجربی آیین‌نامهٔ AFPS ۹۰ و توصیه‌های آیین‌نامهٔ ۸ EC ارائه می‌دهد. از آن‌جا که EC۸ برای شیب‌های ناشی از ناهمواری‌های دوبعدی توپوگرافی مانند تپه‌ها و پرت‌گاه‌های با ارتفاع بیش از ۳۰ متر ضرایبی را توصیه می‌کند، بنا بر این مقایسه نتایج برای سه ضریب شکل ۰/۷ ، ۰/۵ و ۰/۳ که ارتفاعی بیش‌تر از ۳۰ متر دارند ارائه شده‌اند.



شکل۱۲. میانگین نسبت بزرگ‌نمایی مؤلفه‌های حرکتی زمین تحلیل دوبعدی به تحلیل یک‌بعدی برای تپهٔ ذوزنقه‌ای با ضریب شکل‌های مختلف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

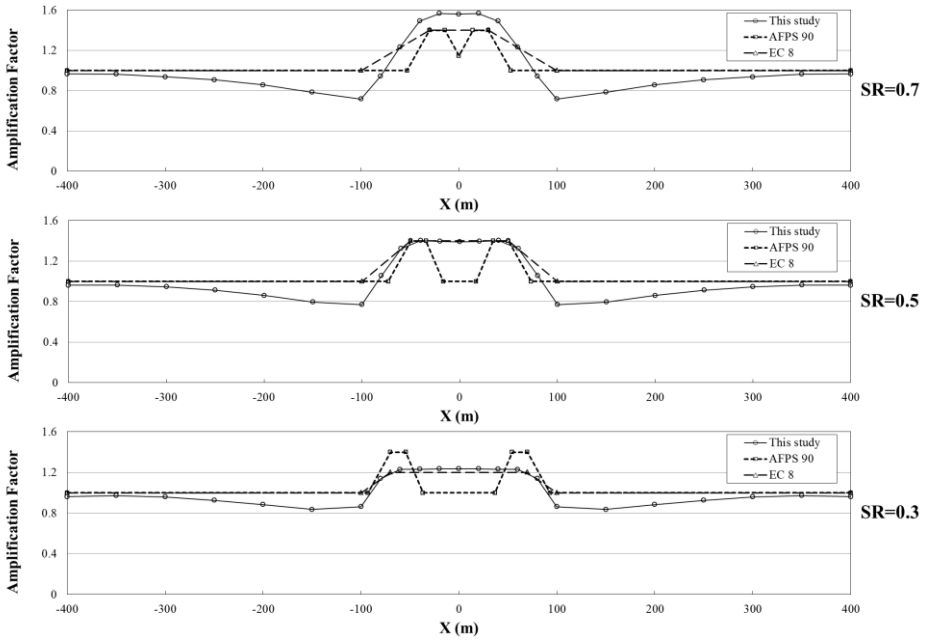
چنان‌که مشاهده می‌شود زمانی‌که ضریب شکل تپه ۰/۷ است تفاوت چشم‌گیری میان نتایج حاصل از سه روش مشاهده می‌شود. البته تا حدودی ضرایب بزرگ‌نمایی دو آیین‌نامه در قسمت‌های بالایی تپه با هم مطابقت دارند. در ضریب شکل ۰/۵ تطابق خوبی میان ضرایب شکل ناشی از سه روش در بالای تپه مشاهده می‌شود. البته در وسط تپه ضرایب به‌دست آمده از AFPS ۹۰ تفاوت چشم‌گیری با دیگر نتایج دارند. در ضریب شکل ۰/۳ تقریباً ضرایب بزرگ‌نمایی آیین‌نامهٔ EC۸ بر نتایج حاصل از این پژوهش منطبق است درحالی‌که آیین‌نامهٔ AFPS۹۰ ضرایب بیش‌تری را پیش‌بینی می‌کند.

نتیجه‌گیری

زمانی که نسبت میرایی مشخصی به یک ساخت‌گاه مشخص اختصاص داده می‌شود به‌ازای زلزله‌های مختلف، تأثیر میرایی متفاوت خواهد بود. به‌عبارت دیگر زمانی که نسبت میرایی صفر درصد به محیط اعمال شود، بزرگ‌نمایی مؤلفه‌های افقی شتاب، سرعت و جابه‌جایی به‌ازای تمامی زلزله‌ها به عددی حدود ۲ می‌رسد. حال آن‌که با افزایش نسبت میرایی، تفاوت میان نمودارهای بزرگ‌نمایی به‌ازای زلزله‌های مختلف افزایش می‌یابد. بنا بر این تأثیر میرایی بر زلزله‌ها به‌دلیل داشتن محتوای فرکانسی مختلفی که دارند متفاوت است و در نهایت بزرگ‌نمایی‌های مختلفی نیز در سطح زمین به وجود می‌آید. پس می‌توان گفت بزرگ‌نمایی‌های رخ داده در سطح زمین وابسته به فرکانس زلزله و میرایی محیط است. هم‌چنین میانگین بزرگ‌نمایی‌های مربوط به جابه‌جایی بیش‌تر از سرعت و بزرگ‌نمایی‌های سرعت نیز بیش‌تر از شتاب است. بنا بر این تأثیر میرایی بر شتاب، بیش‌تر از سرعت و تأثیر آن بر سرعت نیز بیش‌تر از جابه‌جایی است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]



شکل ۱۳. مقایسهٔ نتایج حاصل از تحلیل تپه ذوزنقه‌ای شکل با نمودارهای حاصل از فرمول‌های تجربی AFPS ۹۰ و ضرایب پیشنهادی ارائه شده در EC ۸

از نمودارهای مربوط به نسبت بزرگ‌نمایی ۲D, ۱D می‌توان دریافت که در فاصلهٔ X/L=۱ از مرکز تپه، اختلاف زیادی بین نتایج حاصل از دو تحلیل وجود دارد و استفاده از نتایج تحلیل دو بعدی در این محدوده برای تپه‌ای با ابعاد مشابه ضروری است. علت این امر تمرکز امواج در این ناحیه است که به‌دلیل ماهیت هندسی محیط دوبعدی ایجاد شده است. پدیدهٔ تفرق امواج نیز در پای تپه‌ها در تمامی نمودارها قابل مشاهده است که سبب شده آنالیز میدان آزاد کمی نتایج محافظه‌کارانه‌تری نسبت به نتایج تحلیل دوبعدی ارائه دهد.

از تحلیل آماری صورت گرفته می‌توان استنباط کرد که پراکندگی اکثر نتایج به‌ازای زلزله‌های مختلف برای بزرگ‌نمایی شتاب بیش‌تر از سرعت و برای بزرگ‌نمایی سرعت نیز بیش‌تر از جابه‌جایی است. هم‌چنین مقدار میانگین ضریب تغییرات با افزایش ضریب شکل به‌ازای تمامی مؤلفه‌ها روند افزایشی دارد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

منابع

1. International Council of Building Officials (UBC), Uniform Building Code (2000).
2. Building Seismic Safety Council (BSSC), Edition, The NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions (FEMA 368) (2003).
3. International Council of Building Officials (IBC), International Building Code (2012).
4. Bouchon M., "Effect of Topography on Surface Motion", Bull. Seism. Soc. Am., 63 (1973) 615-632.
5. Geli L., Bard P.V., Julien B., "The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A Review and New Results", Bull. Seism. Soc. Am., 78 (1988) 42-63.
6. Sanchez-Sesma F. J., Campillo M., "Diffraction of P, SV and Rayleigh Waves by Topographic Features: A Boundary Integral For-mulation", Bull. Seism. Soc. Am., 81 (1991) 234-2253.
7. Sanchez-Sesma F. J., Campillo M., "Topographic Effects for Incident P, SV and Rayleigh Waves", Tectonophysics, 218 (1993) 113-125.
8. Pedersen H. A., Sanchez-Sesma F. J., Campillo M., "Three-Dimensional Scattering by Two- Dimensional Topographies", Bull. Seism. Soc. Am., 84 (1994) 1169-1183.
9. Sanchez-Sesma F. J., "Site Effects on Strong Ground Motion", Soil Dyn. Earthquake Eng., 6 (1987) 124-132.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

10. Moczo P., Bystricky E., Kristek J., Carcione J. M., Bouchon M., "Hybrid Modeling of P-SV Seismic Motion at Inhomogenous Viscoelastic Topographic Structures", Bull. Seism. Soc. Am., 87 (1997) 1305-1323.
11. Kamalian M., Gatmiri B., Sohrabi-Bidar A., "Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves", Commun. Numer. Meth. Engng (2007) 23:871-887
12. Kamalian M., Jafari M. K., Dehghan K., Sohrabi-Bidar A., Razmkhah A., "Two-Dimensional Hybrid Response Analysis of Trapezoidal Shaped Hills in Time Domain", Advances in Boundary Element Techniques IV, (2003) 231-236.
13. Bouckovala, George D., Papadimitriou, Achilleas G., "Numerical Evaluation of Slope Topography Effects on Seismic Ground Motion", Soil Dynamic and Earthquake Engineering,25 (2005) 547-558.
14. Nguyen Kh., Gatmiri B., "Evaluation of Seismic Ground Motion by Topographic Irregularity", Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 27 (2007) 183-188.
15. Gazetas G., Kallou P. V., Psarropoulos P. N., "Topography and Soil Effects in the MS 5.9 Parnitha (Athens) Earthquake: The Case of Adámes", Natural Hazards, 27 (2002) 133-169.
16. Chang-Guk S., Choong-Ki Ch., "Assessment of Site Effects of a Shallow and Wide Basin Using Geotechnical Information-Based Spatial Characterization", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28 (2008) 1028-1044.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]

17. Wong H. L., "Effect of Surface Topography on the Diffraction of P, SV and Rayleigh Waves", Bull Seismol Soc Am, 72 (4) (1982) 1167-83.

18. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), [Online] www.peer.berkeley.edu.

19. Kuhlemeyer R. L., Lysmer J., "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", J. Soil Mech. & Foundations, Div. ASCE, 99(SM5) (1973) 421-427.

20. Rathje E. M., Abrahamson N. A., Bray J. D., "Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 2 (1998) 150-159.

21. Eurocode 8 (EC 8), Design of Structures for Earthquake Resistance.

22. Association Française du Génie Parasismique (AFPS), Recommandations AFPS 90, Vol. 1.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.2.4]