مقایسهٔ روش‌های مختلف تحلیل پاسخ لرزه‌ای زمین‌های نرم مستعد روان‌گرایی در برابر زلزله‌های میدان دور و نزدیک

محمد آدم‌پیرا ؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، گروه عمران، تهران، ایران،
حمید علی‌الهی*، مهدی پنجی، حمید کوهساری؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه ارشد خاک و پی

تاریخ: دریافت ۹۲/۶/۲۶ **پذیرش** ۹۴/۳/۲۶

چکیده

با توجه به اهمیت روزافزون زمین‌شناسی محلی و شرایط زمین‌ریخت‌شناسی بر پاسخ لرزه‌ای زمین، در این مقاله به‌بررسی جزئیات مربوط به اثر وجود لایه‌های روان‌گرا بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین می‌پردازیم. به‌منظور بررسی تفاوت روش‌های مختلف تحلیل پاسخ زمین، ابتدا تحلیل بر مبنای روش معادل‌خطی مبتنی بر مدل تنش کل در حوزهٔ فرکانس و سپس بر اساس روش غیرخطی با مدل‌های تنش کل، تنش مؤثر و اعمال افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای در حوزهٔ زمان انجام شده است. در این راستا از ویرایش پنجم نرم‌افزار DEEPSOIL بر مبنای جدیدترین دستاوردها و تکنیک‌های مختلف در هردو حوزهٔ حل، استفاده شده است. محل بررسی شده برای انجام این تحقیق، پروژهٔ بندر LNG عسلویه واقع در جنوب ایران است. با توجه به پژوهش‌های رایج لرزه‌خیزی انجام شده و عدم ثبت داده‌های واقعی زلزله میدان نزدیک در محل پروژه به‌ویژه برای گسل محتمل آن، از روش شبیه‌سازی مصنوعی زلزله برای گسل مولد استفاده شده‌است. همین‌طور بر اساس بررسی‌های عرف لرزه‌خیزی در محل، سه زلزله میدان دور نیز برای انجام تحلیل‌های پاسخ زمین انتخاب شده‌اند. سپس به‌منظور درک

* **نویسنده مسئول** h.alielahi@iazu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

بهتر از پاسخ‌های به‌دست آمده، طیف پاسخ‌های حاصل با طیف طرح شتاب ارائه شده در برخی از آیین‌نامه‌های معتبر مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثر پالس در مؤلفهٔ افقی شتاب در جهت عمود بر راستای گسل برای زلزله‌های میدان نزدیک، پاسخ سطح زمین و محتوای فرکانسی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طوری‌که پاسخ‌های به‌دست آمده در سطح زمین در حوزهٔ زمان با توجه به در نظر گرفتن ماهیت رفتار غیرخطی خاک و اعمال افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای با مقایسهٔ پاسخ‌ها در حوزهٔ فرکانس مبتنی بر روش معادل‌خطی، تفاوت‌های زیادی دارند.

واژه‌های کلیدی: زلزله میدان نزدیک، زلزله میدان دور، پاسخ لرزه‌ای ساختگاه، روش معادل‌خطی، روش غیرخطی، فشار آب حفره‌ای، روان‌گرایی.

مقدمه

در حال حاضر، اهمیت زمین‌شناسی محلی و شرایط زمین‌ریخت‌شناسی بر پاسخ لرزه‌ای زمین واقعیتی پذیرفته شده است. در واقع، در اکثر ساختگاه‌های موجود اختلاف غالب بین خواص مکانیکی و فیزیکی رسوبات آبرفتی و سنگ بستر واقع در زیر آن‌ها، پدیده‌ای به‌نام "اثرات ساختگاهی" را به‌وجود می‌آورد که به‌موجب آن تقویت و یا تضعیف امواج لرزه‌ای و هم‌چنین تغییر محتوای فرکانسی نسبت به حرکت مرجع سنگی در سطح زمین پدیدار می‌شود. بررسی‌های انجام شده به‌وسیلهٔ محققان مختلف نشان داده است که در هر رویداد لرزه‌ای، اثرات ساختگاهی تأثیر مستقیم بر پاسخ سازه‌ها دارند [۱]. به‌همین منظور روش تحلیل یک‌بعدی پاسخ ساختگاه به‌طور گسترده برای تعیین کمیت اثرات خاک‌های رسوبی بر حرکت‌های انتشار یافته در زمین، در تحقیقات آکادمیک و عملی استفاده می‌شود. از طرف دیگر دو نکتهٔ اصلی در زلزله‌هایی که منجر به روان‌گرایی خاک می‌شوند وجود دارد: ۱. وقوع روان‌گرایی ممکن است موجب تغییرشکل و یا گسیختگی زمین شود، ۲. امواج لرزه‌ای در اثر روان‌گرا شدن و یا نرم‌شدگی لایه‌های رسوبی تعدیل می‌شوند که هردوی این رخدادها اثرات نامطلوبی بر پاسخ زمین دارند. تاکنون محققان بسیاری اثر نرم‌شدگی و رفتار غیرخطی خاک بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را در ساختگاه‌ها و در طی زلزله‌های مختلف بررسی کرده‌اند. زوراپاپل و ووستیک (۱۹۹٤) طیف فوریه حرکات اندازه‌گیری شده زمین را در ساختگاه ناحیهٔ روانگرای وایلدلایف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

در طی زمین‌لرزه‌های سوپراستیشن هیلز محاسبه کردند [۲]. یانگ و همکارانش (۲۰۰۲)، تحلیل‌های عددی متعددی با تمرکز بر خاک‌های رسوبی روان‌گرا شده پورت آیلند (کوبه، ژاپن)، با هدف روشن شدن اثرات روان‌گرایی لایه‌های خاک بر پاسخ زمین انجام داده‌اند و نشان دادند که دامنه و محتوای فرکانسی حرکات افقی به‌شدت وابسته به سطح لرزش و رفتار غیرخطی خاک است [۳]. یاد و کارتر (۲۰۰۵) در پژوهشی جامع حرکات ثبت شدهٔ زمین را در چهار ساختگاه با قابلیت روان‌گرایی بررسی کردند [٤] و با طیف‌های طراحی ارائه شده در آیین‌نامه‌های مختلف از جمله AASSTO (LRFD) [٥] مقایسه کردند. همین‌طور، فورستر و مدرسی(۲۰۰۷) در قالب کاری تحقیقاتی دو مدل عددی را برای ساختگاه‌های واقعی تیشور آیلند و پورت آیلند با استفاده از مدل Cyber Quake شبیه‌سازی کردند [٦].

یکی دیگر از تحقیقاتی که اخیراً انجام شده است مربوط به پژوهش‌های ژنگ و لونا در سال ۲۰۱۱ است [۷]. آن‌ها با استفاده از مدل غیرخطی خاک به بررسی اثر لایه‌های رسوبی عمیق و روان‌گرا بر تحلیل پاسخ لرزه‌ای زمین پرداخته و ساختگاه لرزه‌ای نیومادرید را با استفاده از مدل پیشنهادی خود تحلیل کردند. شدت زلزله، افزایش فشار آب حفره‌ای، روان‌گرایی و اثر زلزله میدان نزدیک از جمله مباحثی هستند که در بارهٔ آن‌ها تحقیق شده است. به‌همین ترتیب استیفن کرامر و همکاران (۲۰۱۱) با نگاهی ویژه به مسئلهٔ روان‌گرایی و اثر آن بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، ساختگاه ناحیهٔ روانگرای وایلدلایف را در طی زلزله سوپراستیشن هیلز بازبینی و بررسی کردند [۸].

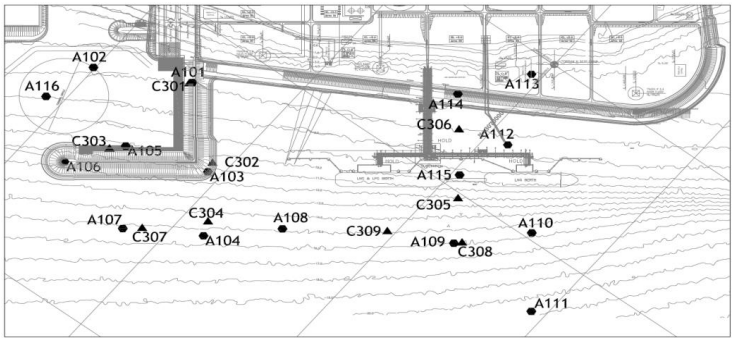
در این تحقیق به مقایسهٔ تحلیل یک بعدی پاسخ زمین تحت اثر امواج لرزه‌ای میدان دور و میدان نزدیک می‌پردازیم، ابتدا بر مبنای روش معادل‌خطی مبتنی بر مدل تنش کل در حوزهٔ فرکانس بررسی شده است و سپس بر اساس روش غیرخطی با مدل‌های تنش کل، تنش مؤثر و اعمال افزایش فشار آب حفره‌ای در حوزهٔ زمان، با بهره‌گیری از ویرایش پنجم نرم‌افزار DEEPSOIL [۹] تحقیق شده است. محل بررسی شده برای انجام این تحقیق به‌عنوان پروژهٔ واقعی و مطالعهٔ موردی، پروژهٔ بندر LNG عسلویه واقع در جنوب ایران است که بر اساس تحقیقات انجام شده، از لحاظ لرزه‌خیزی و استعداد روان‌گرایی جزء مناطق ویژه محسوب

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

می‌شود [۱۰]. از طرفی با توجه به ثبت نشدن داده‌های واقعی زلزله میدان نزدیک در محل پروژه به‌ویژه برای گسل محتمل آن، از روش شبیه‌سازی مصنوعی زلزله برای گسل مولد استفاده شده است. در این راستا سه زلزلهٔ میدان دور مستخرج از بررسی‌های عرف لرزه‌خیزی نیز بررسی و تحلیل شدند. هم‌چنین در انتها به‌منظور ارزیابی جای‌گاه تحلیل‌های انجام شده نسبت به طیف‌های ارائه شده در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای متعارف، مقایسه‌ای بین طیف‌های به‌دست آمده با آیین‌نامه‌های مرسوم ساختمانی انجام شده است.

شرایط ژئوتکنیکی پروژه LNG- مطالعه موردی

جانمایی محل پروژه و محل گمانه‌های حفاری شده در پژوهش‌های ژئوتکنیکی پروژهٔ بندر LNG واقع در منطقهٔ تمبک (قسمت ساحلی جنوب غربی ایران) در شکل ۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) در تمامی گمانه‌های حفر شده (۱۶ گمانه) بر اساس استاندارد ASTM D1586-92 انجام شده است. بر اساس اطلاعات به‌دست آمده، بافت ژئوتکنیکی لایه‌های بستر دریا شامل دو لایهٔ اصلی است. پارامترهای ژئوتکنیکی و مشخصات لایه‌های خاک به‌دست آمده از بررسی‌های ژئوتکنیکی انجام شده در محل، مطابق با جدول ۱ است.



شکل ۱. محل گمانه‌های حفاری شده در محل پروژه LNG

یکی از مشخصات اصلی لایه‌های خاک که مستقیماً در تحلیل‌های پاسخ ساختگاهی دخالت دارد سرعت موج برشی متوسط در هر لایهٔ خاک است. با در نظر گرفتن مشخصات پروفیل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

خاک مطابق جدول ۱، از روابط پیشنهادی بین عدد نفوذ استاندارد (SPT) و سرعت موج برشی (Vs) برای لایه‌های اول و دوم که به‌ترتیب لی (۱۹۹۰) [۱۱] و رولینز (۱۹۹۸) ارائه کردند [۱۲]، بدین‌صورت استفاده شده است:

(۱) خاک‌های سیلتی $V_s = 106 \times N^{0.32}$

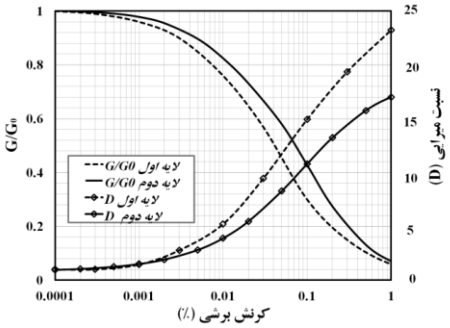
(۲) خاک‌های شنی $V_s = 132 \times N^{0.32}$

با توجه به‌این‌که روابط استفاده شده در این تحقیق از منابع معتبر با مجموعه آزمایش‌های مختلف استخراج شده است، اما به‌دلیل اطمینان از مقادیر سرعت موج برشی به‌دست آمده، صرفاً به نتایج این روابط اکتفا نشده و معقولیت سرعت موج برشی به‌دست‌آمده مخصوصاً برای لایهٔ شنی با مقادیری که محققان دیگر ارائه کرده‌اند [۱۳]، [۱٤] و در نتیجه مناسب‌ترین رابطه و سرعت موج برشی برای هر لایه با توجه به شرایط اقلیمی محل، انتخاب شده است. در این روابط N تعداد ضربات SPT معادل برای هر لایه و Vs سرعت موج برشی معادل در آن لایه است. با بررسی لوگ گمانه‌ها، سرعت موج برشی متوسط در لایهٔ اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۲۰۹ m/s و ٤٦۰ m/s به‌دست می‌آید. هم‌چنین برای تعیین تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی خاک با کرنش برشی، مطابق با جدول ۱ برای لایهٔ اول از منحنی پیشنهادی سید و ادریس [۱۵] و برای خاک‌های درشت دانه‌ی لایهٔ دوم از منحنی رولینز و همکاران [۱۲] استفاده شده که در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های خاک در پروژه LNG

پارامتر	واحد	لایه اول	لایه دوم
عمق	m	۱۳/۵-۰	> ۱۳/۵
طبقه‌بندی	-	ML	GC-GM
تراکم نسبی	%	۳۰	> ۷۵
مقدار ریزدانه	%	۷۱	۲۵
وزن مخصوص خشک	ton/m^3	۱/٤٦	۲/۰٤
وزن مخصوص اشباع	ton/m^3	۱/۹	۲/۳

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]



شکل ۲. منحنی تغییرات مدول برشی و ضریب میرایی لایه‌های خاک برحسب کرنش برشی

تحلیل خطر لرزه‌ای

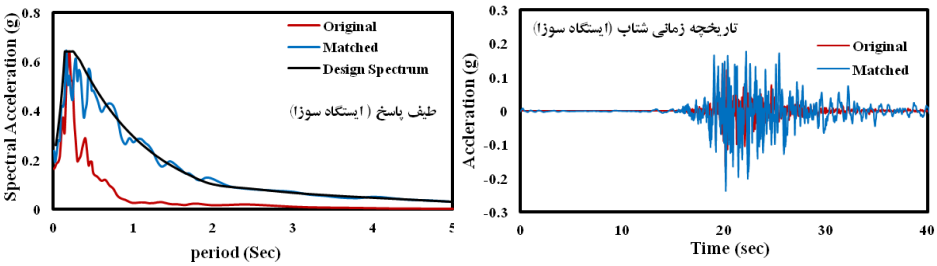
شتاب نگاشت‌ها یا تاریخچه‌های زمانی شتاب معمولاً بیان‌کننده حرکات زمین به‌صورت ثبت شتاب مطابق با زمان هستند. تاریخچه‌های زمانی شتاب باید به‌صورتی توسعه و مقیاس شوند که طیف پاسخ آن‌ها سازگار با طیف طرح ساختگاه باشند. هم‌چنین تاریخچهٔ زمانی منتخب باید دارای مدت حرکات شدید مناسب با زلزله طرح باشد. در این راستا دو روش اولیه برای ایجاد تاریخچه زمانی شتاب وجود دارد: ۱. انتخاب مجموعه‌ای از شتاب‌های ثبت شده و در صورت نیاز اصلاح آن‌ها. ۲. ایجاد تاریخچهٔ شتاب مصنوعی. در این مقاله از روش اول برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مربوط به زلزلهٔ میدان دور حاصل از بررسی‌های لرزه‌خیزی محل و از روش دوم برای تعیین شتاب‌نگاشت مربوط به زلزلهٔ میدان نزدیک گسل مولد استفاده شده است. بر اساس شرایط ذکر شده و با استفاده از پایگاه‌های لرزه‌نگاری ایران نظیر پایگاه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و هم‌چنین پژوهش‌های لرزه‌خیزی انجام شده در محل پروژه، سه زلزلهٔ میدان دور با مقدار شتاب حداکثر ثبت شده برابر ۰/۲۷g روی سنگ بستر لرزه‌ای و با دوره بازگشت ٤۷۵ سال، انتخاب شده که مشخصات این زلزله‌ها در جدول ۲ آورده شده است. شایان ذکر است که با توجه به محتوای لرزه‌ای و منابع در دسترس، در پژوهش‌های لرزه‌خیزی منطقه از دو رابطهٔ استهلاکی کامپل و بزرگنیا (۲۰۰۰) [۱٦] و IPSN/R.F.S.I.2.c (۱۹۹۹) [۱۷] بهره گرفته شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

جدول ۲. مشخصات زلزله های ثبت شده انتخابی در پژوهش‌های لرزه‌خیزی منطقه

نام ایستگاه	مشخصات زلزله			
	نام	زمان	بزرگا (M_s)	شماره استاندارد رکورد
سوزا	قشم	۲۰۰۵/۱۱/۲۷	۵/۹	۳۹۱۵/۰۷
آوج	چنگوره	۲۰۰۲/۰۶/۲۲	٦/۲	۲۷٤۹/۰۱
بندرعباس	قشم	۲۰۰۵/۱۱/۲۷	۵/۹	۳۹۱۷

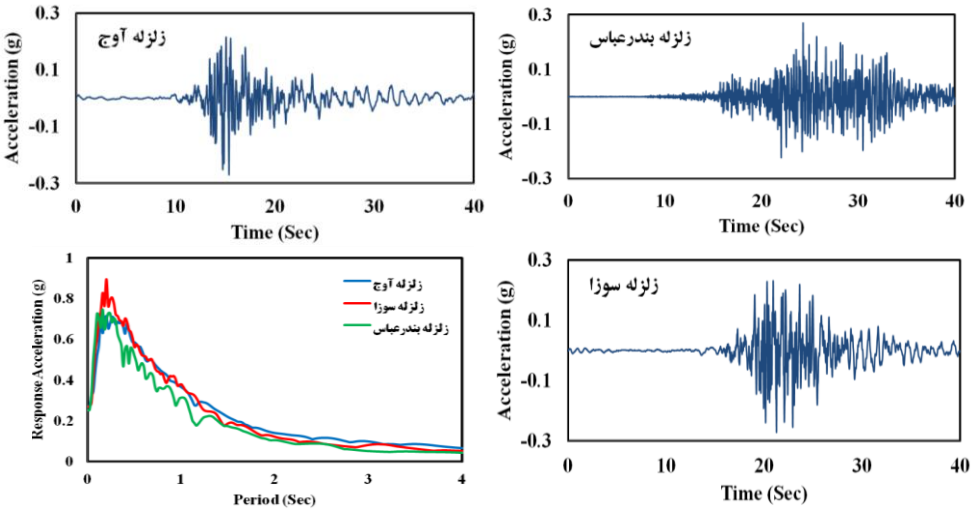
قابل توجه است که مراحل مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده شامل پنج مرحله است که عبارتند از: ۱. تبدیل حداکثر شتاب سطح زمین به مقادیر برآورد شده برای سطوح مختلف طراحی، ۲. تولید طیف‌های فوریه و پاسخ شتاب‌نگاشت‌های انتخابی بر مبنای میرایی ۵٪، ۳. تعیین نسبت طیف طرح و طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها برای هر دامنهٔ فرکانسی، ٤. ضرب نسبت به‌دست آمده در طیف تبدیل فوریه، ۵. استخراج معکوس طیف تبدیل فوریه. شکل ۳ نمونه‌ای از انجام مقیاس شتاب‌نگاشت زلزله سوزا را به‌عنوان نمونه نمایش می‌دهد. چنان‌که مشخص است. تطابق مطلوبی بین طیف پاسخ شتاب‌نگاشت انتخابی و طیف طرح پیشنهادی در تمامی محدوده‌های پریودیک مشاهده می‌شود.



شکل ۳. تاریخچهٔ زمانی شتاب و طیف پاسخ مقیاس شده زلزلهٔ سوزا برای ساختگاه بندر LNG

لازم به ذکر است که اثرات و ویژگی‌های خاص زلزله‌های میدان نزدیک نظیر پالس دورهٔ بلند و تغییرمکان‌های ماندگار در این‌گونه پژوهش‌های لرزه‌خیزی لحاظ نمی‌گردد. شکل ٤ تاریخچه‌های شتاب را برای سه زلزلهٔ نام بردهٔ هم‌پایه شده آوج، بندرعباس و سوزا به‌همراه طیف پاسخ شتاب آن‌ها بر سنگ بستر با میرایی ۵٪ نمایش می‌دهد. در تحلیل لرزه‌ای پاسخ ساختگاه عموماً مدت زمان مؤثر زلزله ۵ تا ۹۵ درصد شدت آریاس (D5-95%) مد نظر قرار می‌گیرد. از این رو در این تحقیق نیز مدت زمان مؤثر زلزله تحلیل شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]



شکل ٤. تاریخچه‌های زمانی شتاب سه زلزلهٔ آوج، بندرعباس، سوزا و طیف پاسخ شتاب آن‌ها بر سنگ بستر با میرایی ۵٪

از طرفی جنبش زمین در نزدیک گسل خصوصیات ویژه‌ای دارد که با حرکات زمین در مناطق دور از گسل متفاوت است. حرکات زمین در مناطق نزدیک گسل شدیداً تحت تأثیر مکانیزم شکست، برای گسترش گسلش نسبت به ساختگاه و تغییرمکان ماندگار زمین قرار دارد. کاهش فاصلهٔ رومرکزی نه‌تنها بیشینهٔ شتاب سطح زمین را افزایش خواهد داد بلکه خصوصیات فرکانسی حرکت آزاد زمین را نیز در جهت تقویت فرکانس‌های کوچک متأثر می‌سازد [۱۸]، [۱۹]. در زمین‌لرزه‌های میدان‌نزدیک به‌دلیل فاصلهٔ کوتاه بین منبع تولید موج (محل شکست گسل) و محل دریافت آن و در نتیجه نبود زمان کافی برای میرا شدن فرکانس‌های بالا، تاریخچه‌های زمانی شتاب دارای محتوای فرکانسی زیاد هستند. امروزه انواع زلزله‌های نزدیک گسل (با و بدون پالس پریود بلند) بر اساس وجود مشخصه پالس پریود بلند به انواع زلزله‌های میدان نزدیک دسته‌بندی می‌شوند [۲۰]. شایان ذکر است در این مقاله منظور از زلزله میدان نزدیک، زلزلهٔ نزدیک گسلی است که حاوی مشخصه پالس پریود بلند (در اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده[1]) است. با توجه به این‌که در این تحقیق، حرکات ثبت شدهٔ واقعی نیرومند زمین برای زلزلهٔ میدان نزدیک محتمل ایجاد شده با گسل مولد- از نوع امتداد لغز- در دسترس

1. Forward directivity

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

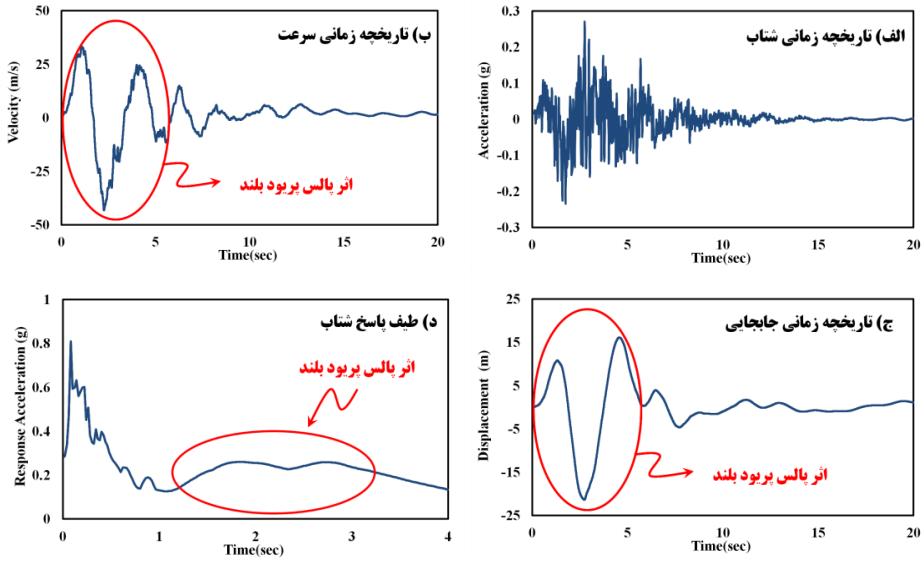
نیست و به‌علت در نظر نگرفتن اثرات خاص زلزله‌های میدان‌نزدیک در بررسی‌های لرزه‌خیزی عرف مهندسی بر مبنای روابط کاهندگی، از روش تولید زلزلهٔ مصنوعی و از مدل شبیه‌سازی شدهٔ پیشنهادی بور (۲۰۰۳) [۲۱] استفاده شده است. در حرکات نیرومند زمین در حوزهٔ نزدیک گسل، بیش‌تر انرژی الاستیک به‌طور منسجم در قالب یک پالس دورهٔ بلند و شدید در آغاز ثبت داده‌های تاریخچه زمانی، به نمایندگی از اثر تجمعی تمام ارتعاشات لرزه‌ای ارسالی از گسل نمایان می‌شود. این پدیده، زمانی که جهت لغزش نقاط صفحهٔ گسل به‌سمت ساختگاه باشد، به‌ویژه در مؤلفهٔ عمود بر راستای گسل برجسته‌تر است. مواردیس و همکاران (۲۰۰۳) [۲۲] مدلی تحلیلی ساده و در عین‌حال مؤثر برای ارائهٔ حرکات نیرومند زمین در حوزهٔ نزدیک پیشنهاد دادند. از این رو در این تحقیق برای تولید اثر پالس دوره بلند از توصیهٔ مواردیس و همکاران (۲۰۰۳) بهره گرفته شده است. پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی زلزلهٔ مصنوعی به‌طورخلاصه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول۳. داده‌های مدل زلزله میدان نزدیک

	پارامترهای ورودی	مقادیر داده‌ها
داده‌های مدل تصادفی	M_o گشتاور لرزه‌ای	٦/٥ ×۱۰۲۲ Nm
	V_s سرعت موج برشی در سنگ بستر ساختگاه	۳/٥ km/s
	ρ_s چگالی سنگ بستر	۲/ ۸ gr/cm3
	R کوتاهترین فاصله بین منبع و ساختگاه	٥ km
	T_{gm}مدت حرکت نیرومند زمین	۱٥ s
داده‌های زلزله	دوره بازگشت	٤٧٥ years
	بزرگای زلزله	٦/٥
	فاصله رومرکزی	٥ km
	عمق زلزله	۱۱ km
	فاصله کانونی زلزله	۱۲ km
داده‌های پالس	ν زاویه فاز پالس	۱۳٤^{o}
	γ خصوصیت نوسانی سیگنال	۱/٥
	t_0 زمان تغییر	٥ s

در شکل ٥ نیز تاریخچهٔ شتاب، سرعت، تغییرمکان و طیف پاسخ به‌دست‌آمده از تحلیل حرکات نیرومند زمین شبیه‌سازی شده با میرایی ٥٪ و برای دورهٔ بازگشت ٤٧٥ سال به‌ترتیب

نشان داده شده‌اند. چنان‌که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، طیف‌پاسخ در محدودهٔ پریودیک ۱ تا ٤ ثانیه یک افزایش ناگهانی دارد که اثر پالس دوره بلند را نشان می‌دهد.



شکل ۵. الف) تاریخچهٔ زمان شتاب، ب) تاریخچهٔ زمان سرعت، ج) تاریخچهٔ زمان جابه‌جایی، د) طیف پاسخ شتاب زلزله میدان نزدیک بر سنگ بستر با میرایی ۵٪

روش‌های تحلیل پاسخ زمین

تحلیل‌های معادل‌خطی، تحلیل‌های خطی در حوزهٔ فرکانس هستند که تنها تقریبی از رفتار واقعی غیرخطی خاک هستند و از روندی بازگشتی برای رسیدن به خصوصیات خاک سازگار با تغییر شکل برشی لایه‌های خاک استفاده می‌کنند. در این روش که بر اساس رفتار ویسکوالاستیک خاک پایه‌گذاری شده است، همراه با تغییرات خواص خاک، آنالیز خطی گام به گام آن‌قدر تکرار می‌شود تا حل مسئله در حالت سازگاری کرنش‌ها به‌دست آید. از طرفی برای ساختگاه‌های مستقر بر خاک‌های نرم یا ساختگاه‌های در معرض حرکات قوی لرزه‌ای، نتایج حاصل از روش معادل خطی با مشاهدات واقعی تطابق خوبی ندارد [۱]. در واقع رفتار خاک تحت بارگذاری سیکلیک (چرخه‌ای)، اغلب غیرخطی و وابسته به‌عوامل مختلفی مانند دامنهٔ بارگذاری، تعداد سیکل‌ها، نوع خاک و فشار محصور برجا است. بنابراین در نظرگرفتن

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

رفتار خاک به‌صورت غیرخطی در تحلیل پاسخ هر ساختگاهی به‌ویژه در ساختگاه‌های نرم با پتانسیل لرزه‌خیزی زیاد ضروری به‌نظر می‌رسد. در هر حال دیدگاه معادل خطی نیز برای تخمین معقول پاسخ خاک تحت تحریک زلزله با توجه به‌سادگی استفاده از آن و محافظه‌کارانه بودن آن در محاسبات مقادیر بزرگ‌نمایی امواج اهمیت کاربردی ویژه‌ای دارد. از این رو در این تحقیق به‌منظور انجام تحلیل‌های غیرخطی از مدل ارائه شده هشاش و فیلیپس به‌نام MRDF-UIUC موجود در نرم افزار DEEPSOIL استفاده شده است [۱]، [۹].

تحلیل در حوزهٔ زمان به دو دسته تحلیل به‌روش تنش مؤثر و تنش کل قابل تقسیم است که به‌طورکلی تحلیل تنش مؤثر پاسخ لرزه‌ای خاک در مقایسه با تحلیل تنش کل دارای این ویژگی‌ها است [۲۳]:

۱. تولید اضافه فشار آب حفره‌ای با زمان با استفاده از تاریخچهٔ زمانی تنش و یا کرنش برشی قابل پیش‌بینی است.
۲. خواص مصالح در هر لحظه با توجه به کرنش موجود (غیرخطی) و تنش مؤثر تغییر می‌کند.
۳. افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای در محاسبات بزرگ‌نمایی در نظر گرفته می‌شود.

در این راستا، علی‌الهی و همکاران (۱۳۹۲) نیز با مدل کردن پروفیل خاک ماسه‌ای آزمایش سانتریفیوژ (مدل شماره یک VELACS) با این نرم‌افزار، توانستند فشار آب حفره‌ای به‌وجود آمده در آن را با کیفیت مطلوبی مورد صحت‌سنجی قرار دهند [۲٤]. از جمله پارامتر مهم در تحلیل‌های غیرخطی پاسخ ساختگاه، انتخاب ضخامت زیرلایه‌ها در هنگام مجزاسازی ستون خاک است. به‌طورکلی فرکانس حداکثر انتشار یافته در تحلیل غیرخطی یک لایه خاک از معادلهٔ (۳) محاسبه می‌شود.

$$f_{\max} = \frac{V_s}{4H} \qquad (۳)$$

که در این رابطه V_S بیان‌گر سرعت موج برشی و H ضخامت لایهٔ خاک است. بر مبنای توصیه‌های موجود در ادبیات فنی، حداکثر فرکانس برای لایهٔ معرفی شده در نرم‌افزار نباید کم‌تر از ۲۵ تا ۳۰ هرتز باشد [۱]. بنابراین در این مقاله به‌منظور دست‌یابی به فرکانس توصیه شده از ۱۱ زیرلایه برای تحلیل غیرخطی استفاده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

مدل تولید فشار آب حفره‌ای

چنان‌که ذکر شد، برخلاف روش‌های معادل‌خطی، روش‌های غیرخطی را می‌توان بر حسب تنش‌های مؤثر فرموله کرد تا امکان مدل کردن نحوهٔ تولید، توزیع مجدد و چگونگی از بین رفتن فشار منفذی در خلال و پس از لرزش‌های زلزله فراهم گردد. در نرم‌افزار DEEPSOIL به‌منظور مدل‌سازی افزایش فشار آب منفذی، از روش انرژی استفاده می‌شود [۲۵]. مدل‌ها برپایهٔ انرژی بیانات تجربی هستند که r_u را به انرژی مستهلک شده در واحد حجم خاک (انرژی واحد) مرتبط می‌کند. این مدل‌ها عموماً به‌صورت معادلهٔ (٤) ارائه می‌شوند.

$$r_u = \alpha W_N^{\beta} \qquad (٤)$$

در این رابطه r_u ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای، α و β پارامترهای منحنی تطابق یا کالیبراسیون هستند و W_N انرژی مستهلک شده در هر N سیکل است. برای بارگذاری کلی، افزایش W_N با شرایط تنش و افزایش کرنش در رابطه است. این قابلیت اجازه می‌دهد تا مدل‌های فشار منفذی بر پایهٔ انرژی در نرم‌افزارهای تحلیل پاسخ ساختگاه پیاده‌سازی شوند [۱]. مدل GMP که گرین و همکاران (۲۰۰۰) [۲٦] پیشنهاد کردند، حالتی ویژه از مدل بر اساس انرژی است که ابتدا بریل و دیویس (۱۹۸۵) [۲۵] ارائه کرده بود. می‌توان از رابطهٔ (۵) پیشنهادی گرین [۲٦] که در برنامه DEEPSOIL گنجانده شده است، برای محاسبه اضافه فشار آب منفذی استفاده کرد.

$$r_u = \sqrt{\frac{W_s}{PEC}} \le 1 \qquad (۵)$$

که در آن Ws انرژی مستهلک شده در واحد حجم خاک تقسیم بر فشار محدود کنندهٔ مؤثر اولیه (انرژی واحد نرمالیزه شده) و PEC یک پارامتر تنظیمی با عنوان ظرفیت شبه‌انرژی[1] است. انرژی مستهلک شدهٔ Ws می‌تواند با معادلهٔ (٦) محاسبه شود.

$$W_s = \frac{1}{2\sigma'_0}\sum_{i=1}^{n-1}(\tau_{i+1}+\tau_i)*(\gamma_{i+1}-\gamma_i) \qquad (٦)$$

که σ'_0 تنش قائم مؤثر اولیه و n تعداد افزایش بار برای آغاز روان‌گرایی است. τ_i و τ_{i+1} تنش‌های برشی در افزایش بار i و i+1 کرنش‌های برشی مربوط به افزایش بار i و i+1 هستند.

1. Pseudo energy Capacity

پولیتو و همکاران (۲۰۰۸) [۲۷] رابطهٔ تجربی بین PEC، تراکم نسبی (D_r) و درصد ریزدانه خاک (FC) را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بر ماسه- سیلت‌های غیرپلاستیک که مخلوطی از ماسه‌های تمیز و سیلت‌های خالص بودند، ارائه کردند. رابطهٔ تجربی پیشنهادی آن‌ها به‌صورت معادلهٔ (۷) تعریف شده است:

$$\ln(PEC) = \begin{cases} FC < 35\% : \exp(c_3.D_r) + c_4 \\ FC \geq 35\% : c_1 FC^{c_2} + \exp(c_3.D_r) + c_4 \end{cases} \quad (۷)$$

که در آن c_1=-0.597، c_2=0.312، c_3=-0.0139 و c_4=-1.021 هستند. استفاده از این رابطهٔ تجربی اجازهٔ استفاده از مدل GMP به‌طور مستقیم در نرم‌افزار تحلیل غیرخطی پاسخ ساختگاه را می‌دهد. در این مقاله با توجه به در اختیار داشتن تراکم نسبی (D_r) و شاخص ریزدانگی (FC) پروفیل خاک (جدول ۱)، از مدل GMP موجود در نرم‌افزارDEEPSOIL استفاده شده است.

تحلیل پاسخ زمین در ساختگاه پروژه LNG

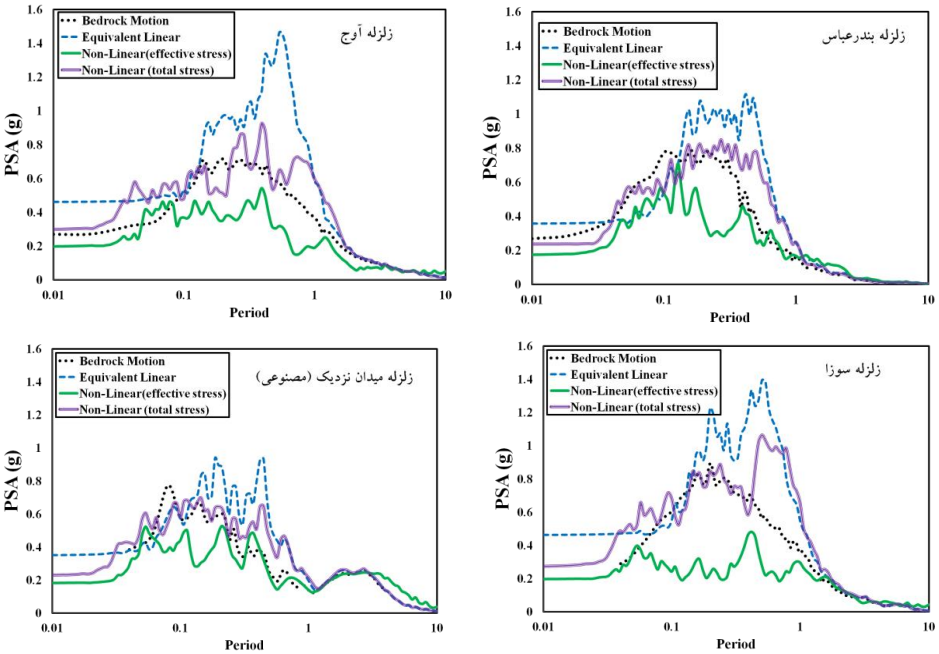
در شکل ٦ نتایج تحلیل غیرخطی پاسخ ساختگاه مبتنی بر تنش کل، تنش مؤثر و تحلیل معادل‌خطی در قالب طیف پاسخ سطح زمین نشان داده شده و با مقادیر سنگ بستر لرزه‌ای مقایسه شده است. در همهٔ شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل‌ها، طیف پاسخ سطح زمین حاصل از تحلیل غیرخطی به‌روش تنش مؤثر در دوره‌های کم‌تر از یک ثانیه، برخلاف تحلیل معادل‌خطی و حتی غیرخطی تنش کل، نسبت به طیف پاسخ سنگ بستر کاهش بسیاری داشته است که بی‌شک کاهش مقادیر طیف پاسخ، حاکی از کاهش شدت زلزله و کاهش بیشینه شتاب سطح زمین است.

نتایج تحلیل‌های مبتنی بر روش تنش کل

بر اساس نتایج به‌دست آمده از شکل ٦ مشاهده می‌شود که تفاوت تحلیل‌های مبتنی بر تنش کل (معادل خطی و غیرخطی تنش کل) تنها در محدودهٔ دوره‌ای کم‌تر از یک ثانیه مشهود است، که البته تحلیل غیرخطی به‌روش تنش کل نسبت به‌روش معادل خطی مقادیر بزرگ‌نمایی کم‌تری را نشان می‌دهد. براساس تحلیل‌های انجام شده، بیشینه شتاب به‌دست آمده بر سطح زمین برای تحلیل‌های غیرخطی مبتنی بر تنش کل برابر با بازهٔ ۰/۲۳g تا ۰/۲۷gحاصل شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

است. این در حالی است که بیشینه شتاب حاصل در تحلیل‌های معادل خطی برابر با بازهٔ ۰/۳۵g تا ۰/٤٦g است.



شکل ٦. مقایسهٔ شتاب طیفی تحلیل پاسخ زمین به‌دست آمده و طیف پاسخ سنگ بستر لرزه‌ای در زلزله‌های میدان دور و میدان نزدیک تحلیل‌های مبتنی بر روش تنش مؤثر

در تحلیل‌های معادل خطی فرض بر آن است که مدول برشی و نسبت میرایی در تمامی سطوح کرنش، ثابت و برابر با مقادیر حاصل از یک سطح کرنش مؤثر وابسته به بزرگای زلزله است. بر طبق گفته‌های پیشین بدیهی است که رفتار واقعی خاک غیر از این است. در واقع مدول برشی و نسبت میرایی هردو تابع‌کرنش برشی بوده است و با افزایش کرنش‌های برشی، مدول برشی کاهش یافته و در نتیجه سختی خاک نیز کاهش می‌یابد. این عمل باعث می‌شود تا دامنهٔ حرکت لرزه‌ای افزایش یابد. از طرفی نسبت میرایی در کرنش‌های برشی بالا افزایش یافته و در نتیجه دامنهٔ حرکات لرزه‌ای کاهش می‌یابد. معمولاً آثار ناشی از افزایش نسبت میرایی بر آثار ناشی از کاهش مدول برشی خاک برتری و چیرگی دارد [۲۸]، [۲۹]. به‌همین دلیل رفتار غیرخطی خاک باعث می‌شود تا اولاً دورهٔ طبیعی خاک افزایش یابد و ثانیاً مقدار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

دامنهٔ حداکثر پاسخ لرزه‌ای کاهش یابد. بنابراین این اختلاف ناشی از ذات آنالیز خطی تحلیل‌های به‌روش معادل‌خطی است.

نتایج تحلیل‌های مبتنی بر روش تنش مؤثر

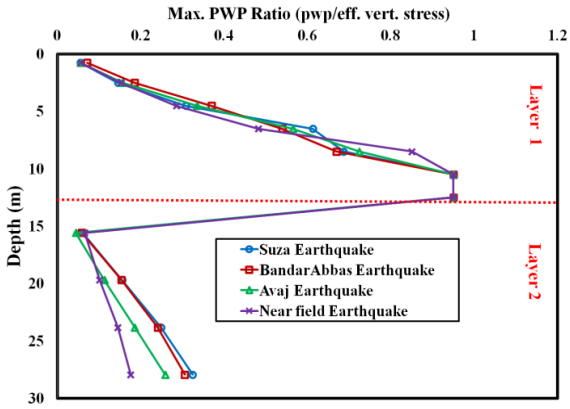
از طرف دیگر، بررسی دقیق نمودارهای مربوط به شکل‌های ٦ و ۷ نشان می‌دهند که وجود فشار آب حفره‌ای و در نظر گرفتن آن در تحلیل اثرات ساختگاهی- حل غیرخطی به‌روش تنش مؤثر- موجب کاهش چشم‌گیر شدت زلزله و هم‌چنین مقادیر طیف پاسخ می‌شود. این امر به‌ویژه در خاک‌های با قابلیت روان‌گرایی اهمیت بیش‌تری دارد و از بیش تخمینی مقادیر زلزله در سطح زمین، به‌ویژه در دوره‌های پایین (سازه‌ها با دوره کوتاه)، جلوگیری خواهد کرد. براساس تحلیل انجام شده، بیشینه شتاب سطح زمین برای تحلیل‌های غیرخطی مبتنی بر تنش مؤثر برابر با بازه‌ی ۰/۱۷g تا ۰/۱۹g به‌دست آمده است.

شکل ۷ تغییرات بیشینه ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای ($r_u = \Delta u / \sigma'_0$) در عمق پروفیل خاک را برای زلزلهٔ میدان نزدیک شبیه‌سازی شده و زلزله‌های میدان دور نمایش می‌دهد. تغییرات ناگهانی r_u در عمق ۱۳/۵ متری نشان‌دهندهٔ تغییرات خواص دینامیکی و مشخصات لایه‌های خاک است. چنان‌که ملاحظه می‌شود، در کمی بالاتر از مرز بین دو لایه حداکثر مقدار r_u به ۰/۹۵ می‌رسد که حاکی از استعداد زیاد روان‌گرایی در لایهٔ اول است. با توجه به مستعد بودن لایهٔ اول برای ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای، r_u در این لایه بالا رفته و کم‌کم با نزدیک شدن به سطح زمین این ضریب کاهش یافته و در اعماق پایین‌تر لایهٔ اول، این لایه همانند لایه‌ای با میرایی زیاد عمل می‌کند.

در شکل ۸ به‌ترتیب بیشینهٔ شتاب (PGA) به‌دست آمده در سطوح مختلف لایه‌های خاک (از سنگ بستر تا سطح خاک) بر مبنای تحلیل‌های معادل خطی و غیرخطی به دو روش تنش کل و تنش مؤثر، مقایسه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود کاهش بیشینهٔ شتاب روی سطح زمین در تحلیل غیرخطی مبتنی بر تنش مؤثر به‌وجود آمده است. نکتهٔ قابل توجه کاهش محسوس بیشینهٔ شتاب در مرز اصلی دو لایه از خاک‌ها با خواص متفاوت است. به‌عبارتی با کاهش تراکم و سختی خاک در لایهٔ اول و هم‌چنین با اضافه فشار آب حفره‌ای ناگهانی در مرز

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

دو لایه، بیشینهٔ شتاب موج لرزه‌ای در لایهٔ اول نسبت به لایهٔ زیرین افت به‌سزایی داشته و از شدت لرزش در لایهٔ اول کاسته شده است. این روند در تحلیل به‌روش تنش مؤثر به‌وضوح قابل مشاهده است. به‌عبارت دیگر در مدل مبتنی بر تنش مؤثر، لایهٔ مستعد ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای همانند لایه با میرایی زیاد عمل کرده و موجب کاهش چشم‌گیری در بیشینهٔ شتاب سطح زمین می‌شود [٤]، [۸].

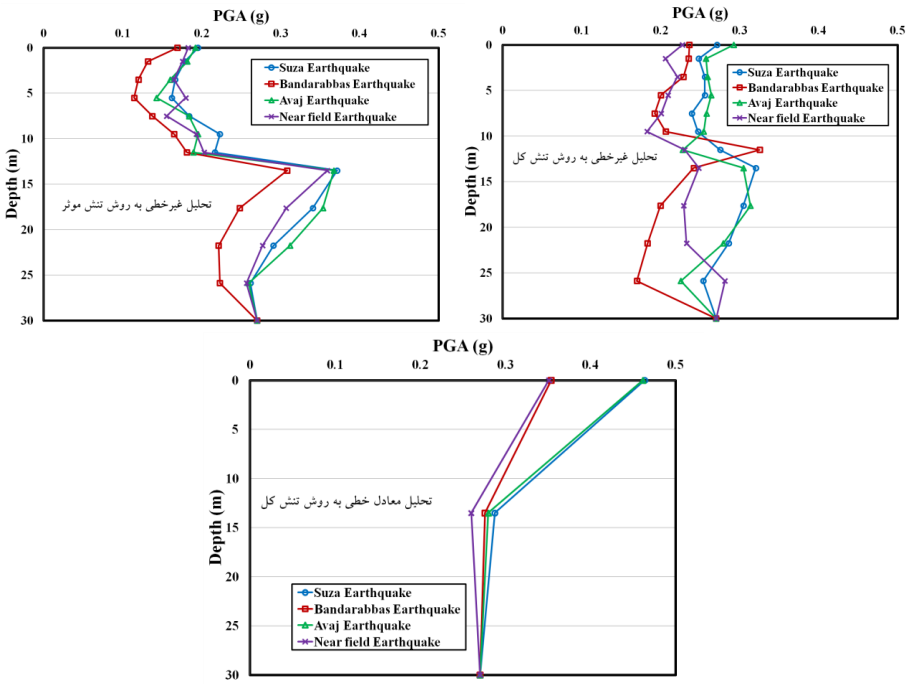


شکل ۷. تغییرات بیشینهٔ ضریب فشار آب حفره‌ای حاصل از تحلیل غیرخطی مبتنی بر تنش مؤثر در عمق خاک

نتایج تحلیل زلزله‌ی میدان نزدیک

با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل زلزله میدان نزدیک مطابق شکل ٦، پالس دورهٔ بلند به‌عنوان مشخصهٔ زلزله‌های میدان نزدیک در فاصلهٔ دوره‌ای ۱ تا ٤ ثانیه در اثر اعمال اثرات ساختگاهی به‌روش تحلیل‌های مبتنی بر تنش کل دست‌خوش تغییرات چندانی نشده است، از این رو، می‌توان به این نکته اشاره کرد که این محدوده با استدلال بر نتایج حاصل از تحلیل معادل‌خطی و غیرخطی تنش کل، بیش‌تر از این‌که تحت تأثیر ویژگی‌های بزرگ‌نمایی خاک باشد، تحت تأثیر ویژگی‌های چشمه‌ی لرزه‌ای بوده است. در شکل ۹، طیف پاسخ زمین در اثر اعمال زلزلهٔ میدان نزدیک در زیر لایه‌های پروفیل خاک (از سنگ بستر تا سطح خاک) بر اساس تحلیل غیرخطی مبتنی بر تنش مؤثر ارزیابی شده است. با مشاهدهٔ شکل ۹ کاملاً واضح

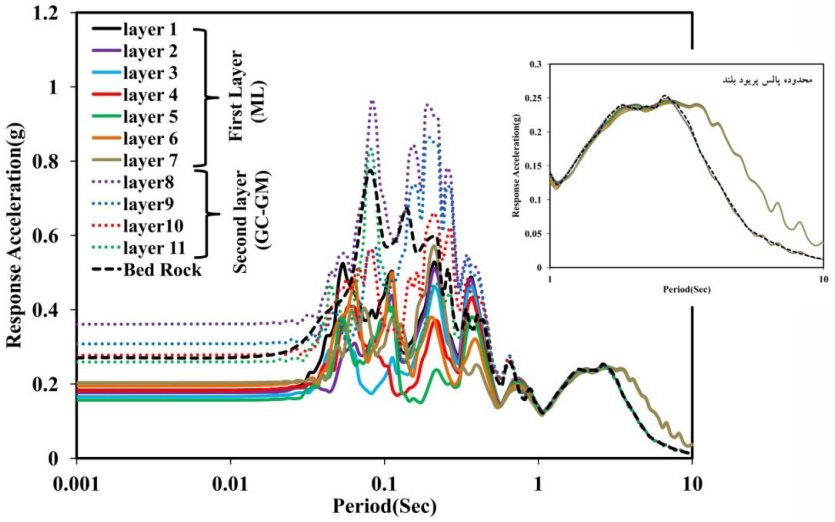
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]



شکل ۸. مقایسهٔ مقادیر بیشینهٔ شتاب زلزله (PGA) در اعماق مختلف ساختگاه مبتنی بر تحلیل‌های معادل خطی و غیر خطی به‌روش‌های تنش کل و مؤثر

است که در لایهٔ دوم پروفیل خاک با مشخصات (GC-GM) بزرگ‌نمایی لرزه‌ای به‌ویژه در دوره‌های کوتاه رخ داده است، به‌طوری‌که بیش‌ترین بزرگ‌نمایی در ابتدای این لایه ایجاد شده است و در دوره‌های بلند، تغییرات چندانی در بزرگ‌نمایی لرزه‌ای مشاهده نمی‌شود. تمامی کوچک‌نمایی لرزه‌ای ناشی از اثرات ساختگاهی پروفیل خاک مختص به تأثیر لایهٔ اول (ML) است. نکتهٔ قابل ذکر در این شکل رفتار طیف پاسخ زمین در محدودهٔ دوره‌ای ۱ تا ٦ ثانیه است. پالس دورهٔ بلند، در تحلیل‌های غیرخطی نشان می‌دهد که در زیرلایه‌ها رفتار ثابتی داشته و تنها در هنگام تغییر خواص دینامیکی لایه‌های پروفیل خاک دست‌خوش تغییرات شده است. در نتیجه می‌توان اشاره کرد که تغییرات عمق لایه‌ها در محدودهٔ پالس دوره بلند بر طیف پاسخ اثرگذار نیست و طیف پاسخ در این محدوده دوره‌ای تنها تحت تأثیر تغییرات خواص دینامیکی لایه‌های پروفیل خاک است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

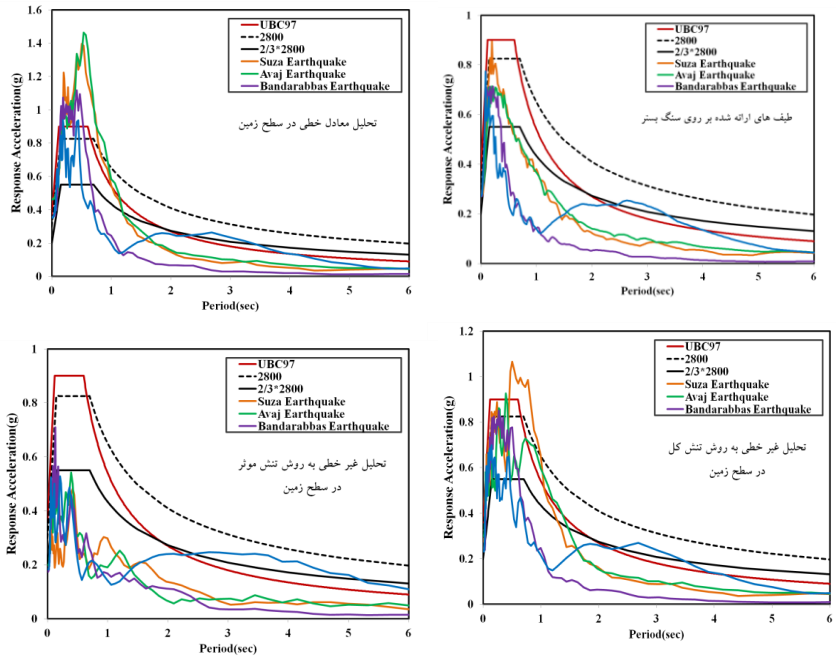


شکل ۹. مقایسهٔ طیف پاسخ زمین در زیرلایه‌های پروفیل خاک (از سنگ بستر تا سطح خاک) در تحلیل غیرخطی مبتنی برتنش مؤثر

بررسی آیین‌نامه‌های مرسوم لرزه‌ای

به‌منظور ارزیابی جای‌گاه تحلیل‌های انجام شده نسبت به طیف‌های ارائه شده در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، مقایسه‌ای بین طیف‌های به‌دست آمده با آیین‌نامه‌های UBC97 [۳۰] و آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ویرایش سوم (استاندارد ۲۸۰۰) [۳۱] انجام شده‌است. در آیین‌نامهٔ UBC97 اثر زلزلهٔ میدان نزدیک در قالب دو ضریب اصلاحی در نظر گرفته شده است که بر شتاب‌های طیفی دورهٔ کوتاه و دورهٔ بلند اعمال می‌شود. این در حالی است که استاندارد ۲۸۰۰ اثر ویژگی‌های زلزله‌های میدان نزدیک را در نظر نگرفته و برای هردو نوع زلزلهٔ میدان دور و نزدیک، طیف طرح شتاب یک‌سانی را ارائه کرده است. البته توجه به این نکته ضروری است که مقادیر استاندارد ۲۸۰۰ برای طراحی ساختمان‌های معمولی ارائه شده و برای طراحی سازه‌های خاص در مناطق ویژه و به‌خصوص بندرگاه‌ها، توصیهٔ این استاندارد استفاده از بررسی‌های خاص لرزه‌خیزی در منطقهٔ مورد نظر است. به هر حال در این آیین‌نامه ذکر شده است که مقادیر طیفی آن منطقه نباید از دو سوم مقادیر طیف طرح شتاب استاندارد این آیین‌نامه کم‌تر باشد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]



۱۰. مقایسهٔ شتاب‌های طیف تحلیل پاسخ زمین به‌روش معادل خطی، غیرخطی(تنش کل، تنش مؤثر) و طیف طراحی پاسخ ارائه شده در آیین‌نامه‌های ۲۸۰۰ و UBC97

طیف‌های به‌دست آمده از آیین‌نامه‌های مذکور و تحلیل‌های انجام شده به‌روش‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در استاندارد ۲۸۰۰، مقدار بیشینهٔ شتاب مبنای طرح توصیه شده برای منطقه پروژهٔ LNG برابر ۰/۳g (جزء مناطق با خطرپذیری زیاد) است و از نظر طبقه‌بندی نوع خاک نیز در گروه سوم جای دارد. هم‌چنین بر اساس آیین‌نامهUBC97 ضرایب اصلاحی مربوط به زلزله‌های میدان نزدیک N_v، N_a به‌ترتیب برابر با ۱/۲ و ۱، فاکتور نواحی لرزه‌ای (Z) برابر با بیشینهٔ شتاب محل بررسی شده و طبقه‌بندی نوع خاک نیز SD در نظر گرفته شده است.

با توجه به طیف‌های ارائه شده در شکل ۱۰، تفاوت چشم‌گیری بین طیف طرح شتاب استاندارد ۲۸۰۰ و UBC97 در محدودهٔ دوره‌ای ۰ تا ۱ ثانیه نسبت به طیف طرح شتاب به‌دست‌آمده بر سطح خاک بر مبنای تحلیل معادل‌خطی مشاهده می‌شود. این تفاوت هرچند در زلزلهٔ میدان نزدیک کم‌تر است اما نشان‌گر آن است که استفاده از تحلیل معادل خطی به‌ویژه در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

نواحی با قابلیت روان‌گرایی برای ارزیابی سازه‌های با دوره طبیعی ۰ تا ۱ ثانیه مناسب نیست. اما براساس تحلیل‌های غیرخطی، مقادیر طیف‌های آیین‌نامه‌ای در محدودهٔ دوره‌های بیش از ۱ ثانیه برای زلزله‌های میدان دور محافظه‌کارانه پیش‌بینی شده است.

با مشاهدهٔ تفاوت نتایج تحلیل تنش مؤثر و طیف‌های ارائه شدهٔ آیین‌نامه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که اثرات ساختگاهی، شتاب‌های طیفی را در دوره‌های کوتاه به‌شدت تحت تأثیر قرار داده و مقادیر آن‌ها را کاهش می‌دهند. هم‌چنین شتاب مبنای طرح ارائه شده برای این منطقهٔ خاص در هر دو آیین‌نامه در مقایسه با تحلیل‌های غیرخطی به‌صورت نسبی با ضریب اطمینان قابل قبولی در نظر گرفته شده است. از این رو، در مقایسه با تحلیل معادل‌خطی، شتاب مبنای طرح آیین‌نامه‌ها کم‌تر از بیشینهٔ شتاب به‌دست آمده است. با مقایسهٔ طیف‌های موجود در محدودهٔ دوره‌ای ۲ تا ٦ ثانیه می‌توان نتیجه گرفت که استاندارد ۲۸۰۰، نسبت به آیین‌نامهٔ UBC97 مقادیر بسیار محافظه‌کارانه‌ای برای دوره‌های بلند ارائه می‌دهد که اثرات پالس دورهٔ بلند زلزله میدان نزدیک را تحت پوشش قرار می‌دهد.

چنان‌که ذکر شد در مناطق با قابلیت روان‌گرایی، آیین‌نامه‌های ساختمانیِ UBC97 و استاندارد ۲۸۰۰ نیاز به تحلیل‌های ویژه ساختگاهی برای حصول طیف‌های پاسخ واقعی زمین دارند. به‌دلیل این‌که در این آیین‌نامه‌ها هیچ‌گونه اشاره‌ای به موضوع روان‌گرایی و اثر آن بر پاسخ لرزه‌ای زمین نشده است. تنها آیین‌نامه AASHTO 2010 [۳۲] در مبانی اثرات ساختگاهی خود به این نکته اشاره داشته است که در شرایط وقوع زلزله‌هایی با بزرگای زیاد، با توجه به بالا رفتن دوره و زمان لرزش شدید، اثرات ساختگاهی و روان‌گرایی هم‌زمان رخ داده و باید از روش غیرخطی در تحلیل پاسخ ساختگاه استفاده شود. نشریهٔ شمارهٔ (FHWA-NHI-11-032) اداره راه و ترابری امریکا۲۰۱۱ [۳۳] با توجه به پژوهش‌های متاسویچ (۱۹۹۳) به این نکته اشاره داشته است که تحلیل بر مبنای تنش مؤثر نسبت به تحلیل بر مبنای تنش کل، کاهش چشم‌گیری را در حداکثر شتاب سطح زمین و شتاب‌های طیفی در دوره‌های کم‌تر از یک در پی دارد و همین‌طور توصیه می‌کند که در مناطق با پتانسیل ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای، تأثیر این عامل در تحلیل‌های اثرات ساختگاهی در نظر گرفته شود. استاندارد و تفسیر فنی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

تسهیلات بندری ژاپن (OCDI 2009) [۳٤] نیز یادآور شده است که مقادیر پاسخ محاسبه شده در سطح زمین مبتنی برتحلیل تنش مؤثر در هنگام پدیدار شدن اضافه فشار آب حفره‌ای کاهش یافته و کم‌تر از مقادیر تحلیل تنش کل هستند. همین‌طور این آیین‌نامه به‌صورت مستقیم بیان داشته است که در صورت به‌وجود آمدن نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (r_u) بالاتر از ۰/۵ در لایه‌های پروفیل خاک، استفاده از تحلیل اثرات ساختگاهی مبتنی بر روش تنش مؤثر الزامی است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار یک بعدی DEEPSOIL، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تحلیل پاسخ زمین در دو حوزهٔ فرکانس و زمان با در نظر گرفتن بندر LNG به‌عنوان مطالعهٔ موردی، انجام شده است. بر اساس پژوهش مذکور این نتایج قابل استنتاج است:

- تحلیل پاسخ زمین به‌روش معادل‌خطی در حوزه فرکانس افزایش نسبی در بیشینهٔ شتاب سطح زمین(PGA) را نشان می‌دهد، در صورتی‌که تحلیل پاسخ زمین به‌روش غیرخطی در حوزهٔ زمان، کاهش نسبی در PGA سطح زمین را مبین می‌سازد که علت این اختلاف ناشی از ذات آنالیز خطی تحلیل‌های معادل‌خطی است.
- نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها به‌روش معادل‌خطی و غیرخطی مبتنی بر تنش کل بر روی سطح زمین نشان می‌دهد که در اغلب موارد شرایط ساختگاهی مورد نظر بر مقدار پالس دورهٔ بلند، که در فاصلهٔ دوره‌ای ۱ تا ٤ ثانیه نمایان شده است، تأثیر اندکی داشته است. این در حالی است که در تحلیل به‌روش غیرخطی مبتنی بر تنش مؤثر، اثرات ساختگاهی بر پالس دوره بلند به‌صورت یک شیفت دوره‌ای ایجاد شده بین فاصلهٔ دوره‌ای ۱ تا ٦ ثانیه نمایان شده است که از دید تحلیل‌های قبلی پنهان بوده است.
- بر خلاف حوزهٔ فرکانس، در حوزهٔ زمان می‌توان بر حسب تنش مؤثر نمودار تغییرات و افزایش اضافه فشار آب منفذی را در خلال و پس از زلزله مدل‌سازی کرد. برحسب نتایج مشاهده شده، در نظر گرفتن اضافه فشار آب حفره‌ای به‌صورت مستقیم در تحلیل اثرات ساختگاهی، تأثیر به‌سزایی در تمامی محدوده‌های دوره‌ای دارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

- با کاهش سختی و تراکم خاک در لایهٔ سطحی، فشار آب حفره‌ای افزایش یافته و از شدت زلزله کاسته شده است. به‌عبارتی لایهٔ سطحی سست در این ساختگاه به‌علت میرایی بالا نقش کاهندگی موج لرزه‌ای را داشته است.
- تفاوت طیف طرح شتاب استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه UBC97 در محدودهٔ دوره‌ای کوتاه نسبت به طیف طرح شتاب زلزلهٔ میدان نزدیک به‌دست‌آمده بر سطح خاک، اندک بوده است اما در محدودهٔ دوره‌ای بلند، مقادیر استاندارد۲۸۰۰ محافظه‌کارانه و در آیین‌نامه UBC97 دست‌کم پیش‌بینی شده است.

نکته قابل توجه این‌که، روش‌های مبتنی بر حل در حوزهٔ فرکانس ساده و انعطاف‌پذیر است و به‌منظور انجام محاسبات به ورودی‌های کمی نیازمند است و مقادیر محافظانه‌کارتری را ارائه می‌دهند. از این رو، روش‌های مبتنی بر حل در حوزهٔ فرکانس به‌طور گسترده برای تحلیل اثرات ساختگاه استفاده می‌شوند. اما باید توجه داشت که اساس محاسبات صورت گرفته در حوزهٔ فرکانس، خطی است. در نتیجه پاسخ‌های به‌دست آمده با این روش نمی‌تواند به‌عنوان پاسخ غیرخطی زمین تلقی شود. از طرف دیگر در استفاده از تحلیل‌های معادل‌خطی از بزرگ‌نمایی پاسخ زمین در دوره‌های بالا غافل می‌شویم، که برای سازه‌های بلند با دورهٔ بالا می‌تواند خطرناک باشد. با این حال توصیه می‌شود که تحلیل غیرخطی همیشه در موازات تحلیل معادل خطی به‌ویژه در خاک‌های نرم با پتانسیل افزایش اضافه فشارآب حفره‌ای و زلزله‌های قوی انجام گیرد.

قدردانی و تشکر

شادروان دکتر اسدا... نورزاد روش تولید زلزله مصنوعی میدان نزدیک را معرفی کرده است. هم‌چنین از آقای مهندس صادق صحراییان برای راهنمایی در تهیهٔ الگوریتم تولید پالس میدان نزدیک و هم‌چنین شرکت مهندسین مشاور ساحل برای انجام بررسی‌های ژئوتکنیک در محل پروژه، تقدیر و تشکر می‌کنیم.

منابع

1. Hashash Y.M.A., Grohalski D.R., Philips C.A., "Recent Advances in Non-Linear Site Response Analysis", 5th International Conference on

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, No.4, Sandiego, California (2010).

2. Zorapapel G.T., Vucetic M., "The Effects of Seismic Pore Water Pressure on Ground Surface Motion", Earthquake Spectra, EERI, 10 (2) (1994) 403-437.
3. Yang J., Sato T., Savidis S., Li X.S., "Horizontal and Vertical Components of Earthquake ground motions at Liquefiable Site", Soil Dyn. Earthquake Eng., 22 (2002) 229-240.
4. Youd T.L., Carter B., "Influence of Soil Softening and Liquefaction on Spectral Acceleration", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131(7) (2005) 811-825.
5. "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. (1998).
6. Foerster E., Modaressi H., "Nonlinear Numerical Method for Earthquake Site Response Analysis II-Case Studies" Bull Earthquake Eng 5 (2007) 325-345.
7. Zheng W., Luna R., "Nonlinear Site Response and Liquefaction Analysis in the New Madrid Seismic Zone", Geotech Geol Eng 29 (2011) 463-475.
8. Kramer S.L., Hartvigsen A.J., Sideras S.S., Ozener P.T., "Site Response Modeling in Liquefiable Soil Deposits", 4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, August 23-26, 2011 ,University of California Santa Barbara (2011).
9. Hashash Y.M.A., Groholski D.R., Phillips C.A., Park D, Musgrove M., DEEPSOIL 5.1, User Manual and Tutorial (2012).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

۱۰. وکیلی ر.، صادقی عبدالهی ع.، علی‌الهی ح.، نورزاد ع.، *بررسی روش‌های ارزیابی لرزه‌ای پتانسیل روان‌گرایی در مجاورت سازه‌های دریایی*، مجلهٔ مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی، سال سوم، شمارهٔ ۲، بهار (۱۳۸۹).

11. Lee S.H.H., "Regression Models of Shear Wave Velocities", J Chinese Institute of Engineers, No.13 (1990) 515-532.
12. Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., Daily W.D., "Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels", Journal of Geothecnical and Geoenvironmental Engineering, 124, No.5 (1998) 396-405.
13. Martin F., Kawase H., Modaressi-Farahmand Razavi A., "Nonlinear Soil Response of a Borehole Station Based on One-Dimensional Inversion during the 2005 Fukuoka Prefecture Western Offshore Earthquake", Bulletin of the Seismological Society of America (2010).
14. Zhaohui J.Y, Dutta U., GangXu KenanHazirbaba ElmerE Marx, "Numerical analysis of permafrost effects on the seismic site response"t Soil Dyn (2011).
15. Seed H.B., Idriss I.M., "Soil Module and Damping Factors for Dynamic Response Analyses", Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California (1970).
16. Campbell K.W., Bozorgnia, Y. "New empirical models for predicting nearsource horizontal, vertical and V IH response spectra: Implications for design", Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation (2000).
17. "IPSN Proposition de modification de la Regie Fondamentale 1.2.c. relative a la determination des mouvements sismiques a prendre en compte pour la sllrete des tranches nucleairescomportant un reacteur a

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

eau sous pression, applicables II l' ensemble des", Installations nucleaires de base en surface. Rapport IPSN DES nO 348 (1999).

۱۸. قائم مقامیان م.ر، خلیلی ب.، *تاثیر نوع گسل، بزرگای زلزله و اثر فاصله برای گسلش ناهمگن بر حرکات توانمند زمین در حوزهٔ نزدیک گسل*، پژوهش‌نامه زلزله‌شناسی و مهندس زلزله، شمارهٔ ۳۳ (۱۳۸۵) ۳۵-٤٦.

19. Somerville P.G., "Engineering Characterization of Near fault Ground Motion", NZSEE Conference (2005).

20. Hayden C.P., Bray J.D., Abrahamson N.A., "Selection of Near-Fault Pulse Motions", J. Geotech. Geoenviron. Eng. (ASCE), 140 (2014).

21. Boore D.M., "Simulation of Ground Motion using Stochastic Method", Journal of pure and applied Geophysics, 160 (2003) 635-676.

22. Mavroeidis G.P., Papageorgiou A.S., "A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions", Bulletin Seismological Society of America, No. 93 (2003) 1099-1131.

23. Towhata I., "Geotechnical Earthquake Engineering, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering", Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2008).

٢٤. علی‌الهی ح.، پنجی م.، آدم‌پیرا م. غبرائی لنگرودی م.، *بررسی اثرات ساختگاهی خاک‌های مستعد روان‌گرایی تحت اعمال زلزله‌های قوی*، هفتمین کنگرهٔملی مهندسی عمران، زاهدان، اردیبهشت (۱۳۹۲).

25. Berrill J.B., Davis R.O., "Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands: revised model, Soils Found", 25(2) (1985) 106-118.

26. Green R.A., Mitchell J.K., Polito C.P., "An Energy-Based Pore Pressure Generation Model for Cohesion less Soils", Proceedings: John Booker Memorial Symposium, Melbourne, Australia, November 16-17 (2000).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]

27. Polito C.P., Green R.A., Lee J.H., "Pore Pressure Generation Models for Sands and Silty Soils Subjected to Cyclic Loading", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134(10) (2008) 1490-1500.

28. Rogers A.M., Tinsiey J.C., Borcherdt R.D., " Predicting Relative Ground Response, Proc. Symposium on Seismic Hazards Ground Motions", Soil Liquefaction and Engineering Practice in Eastern North America (1987) 403-432.

۲۹. جعفری م.، کمالیان م.، *بررسی پدید تشدید در آبرفت تهران*، گزارش تحقیقات پژوهشگاه بین-المللی زلزله، جلد۳ (۱۳۷۲).

30. "Uniform Building Code (UBC)", International Conference of Building Officials (ICBO), Whittier, California (1997).

۳۱. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، *آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ، ویرایش سوم)*، وزارت مسکن و شهرسازی (۱۳۸٤).

32. AASHTO (Association of State Highway and Transportation Officials) "Guide Specification for Seismic Isolation Design", Third Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. (2010).

33. FHWA (Federal Highway Administration) "LRFD Seismic Analysis and Design of Transportation Geotechnical Features and Structural Foundations", FHWA-NHI-11-032, Washington, DC, March (2011).

34. Ports and Harbours Bureau, Ministry of Land, infrastructure, Transport and Tourism (MUT), National institute for Land and infrastructure Management & Port and Airport Research institute "Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan", Development Institute Of Japan The Overseas Coastal Area (2009).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.1.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3379]