طیف پاسخ زلزله‌های میدان نزدیک با احتساب اثر محتوای فرکانسی بر رفتار خاک CH/SC با ملاحظه سرعت موج برشی صحرایی و آزمایشگاهی

عطا آقایی‌آرایی، ناهید عطارچیان*، احمدرضا قدرتی قزاانی،
حسین حداد، امیرسعید سلامت، حسین حسنی؛
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

تاریخ: دریافت ۹۷/۰۱/۱٤ پذیرش ۹۷/۰۷/۰۸

چکیده

در تحلیل خطی معادل یک‌بعدی که به‌طور وسیع در برآورد اثر شرایط محلی ساختگاه به‌کار می‌رود، عموماً رفتار خاک مستقل از فرکانس بارگذاری زلزله فرض می‌شود. این در حالی است که مدول برشی (G) و نسبت میرایی (D)، متأثر از فرکانس بارگذارند. در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل خطی معادل، طیف پاسخ شتاب در سه سطح خطر (PGA=0.1g, 0.35g, 1g) برای دو ستون خاک CH/SC به‌ارتفاع ۳۰ و ٦۰ متری تحت اثر مؤلفه‌های هشت رکورد زلزله میدان نزدیک استخراج شده است. علاوه بر منحنی‌های رفتاری متداول، در مدل‌سازی رفتار خاک از منحنی‌های رفتاری مستخرج از روش آزمون مشخصات دینامیکی تحت اثر فرکانس‌های بارگذاری ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ Hz و در سطوح تنش محدودکننده ۱، ۲ و ۵ kg/cm^2 نیز استفاده شده است. طی انجام ۱۷۲۸ تحلیل خطی معادل، مقادیر طیف پاسخ شتاب، ضریب بزرگ‌نمایی طیف و نسبت شتاب طیفی استخراج شده است. براساس نتایج حاصل، ملحوظ کردن اثر فرکانس بارگذاری در منحنی رفتاری مصالح بر مقدار پاسخ شتاب طیفی، نسبت شتاب طیفی و ضریب شکل طیف مؤثر است. در هر دو حالت ستون خاک ۳۰ و ٦۰ متری، افزایش فرکانس بارگذاری منجر به کاهش نسبت شتاب طیفی و متوسط ضریب بزرگ‌نمایی طیف، خصوصاً در دوره‌های کوتاه می‌شود.

*نویسنده مسئول n.attarchian@bhrc.ac.ir

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

مقایسهٔ متوسط ضریب شکل حاصل از تحلیل‌ها با، ضریب شکل (B) طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ نشان می‌دهد که به‌منظور احتساب اثر فرکانس غالب زلزله‌های میدان نزدیک لازم است در خاک نوع I و IV مقدار T_s طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران به‌ترتیب به مقدار ۰/۵ و ۱ ثانیه افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: طیف پاسخ شتاب، زلزله میدان نزدیک، نسبت میرایی، مدول برشی، فرکانس بارگذاری، دستگاه سه‌محوری دینامیکی.

مقدمه

تحلیل خطی معادل یک‌بعدی پاسخ زمین به‌طور وسیع برای بررسی اثرات محلی ساختگاه در هنگام زلزله استفاده می‌شود [۱]، [۲]. عمده محدودیت این روش، در نظر نگرفتن اثر فرکانس بر منحنی رفتاری مصالح (G/G_{max}-γ و D-γ) است. روش‌های معادل خطی وابسته به فرکانس برای رفع این محدودیت و هم‌چنین شبیه‌سازی بهتر رفتار غیرخطی خاک به‌کار می‌روند [۳]، [٤]، [۵]، [٦]. به‌دلیل کاهش سریع دامنهٔ کرنش برشی با افزایش فرکانس بارگذاری، یوشیدا[1] و همکاران بر ضرورت در نظر گرفتن اثر فرکانس در تحلیل‌های معادل خطی تأکید کرده‌اند [۵]. هم‌چنین آزمایش‌های سه‌محوری دینامیکی انجام شده روی مصالح خاکی مؤید تأثیر فرکانس بارگذاری بر مقادیر مدول برشی و خصوصاً نسبت میرایی است [۷]، [۸]، [۹]. در پژوهش انجام شده به‌وسیلهٔ ژانگ[2] و همکاران [۷] روی مصالح ماسه‌ای و ریزدانه، با تغییر فرکانس بارگذاری از ۰/۵ به ۱ Hz (تنش محدودکنندهٔ $1\ kg/cm^2$)، نسبت میرایی در کرنش‌های کوچک از ۱ به ۵ درصد افزایش می‌یابد. داده‌های موجود در ادبیات فنی برای مصالح ریزدانه و خاک ماسه‌ای در کرنش‌های برشی کوچک، محدود و ناواضح است. وابستگی مدول برشی و نسبت میرایی به فرکانس در کرنش‌های کوچک در پژوهش‌های منگ[3] [۱۰] و پارک[4] و هشاش[5] [۱۱] بررسی شده است. طبق نتایج حاصل از بررسی‌های منگ [۱۰] در نظر نگرفتن اثر فرکانس بارگذاری بر رفتار مصالح، خصوصاً میرایی و تبدیل

1. Yoshida
2. Zhang
3. Meng
4. Park
5. Hashash

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

آن به عددی ثابت کوچک (زیر ۲٪ در کرنش کوچک کم‌تر از 10^{-5} با وجود میرایی تا ۵٪)، موجب تخمین دست‌پایین ظرفیت خاک در زایل کردن انرژی زلزله، در محدوده‌های فرکانسی کوچک می‌شود. نتایج پژوهش‌هایپارک و هشاش [۱۱] نشان می‌دهد اعمال اثر فرکانس در کرنش‌های کوچک، برای زلزله‌های کوچک و بزرگ به‌ترتیب به‌میزان ۲۰٪ و ۱۰٪ بر مقدار طیف پاسخ مؤثر است. در کرنش‌های بزرگ، اثر محتوای فرکانسی بر رفتار مصالح تاکنون بررسی نشده است. اخیراً تحلیل‌هایی برای به‌دست آوردن طیف پاسخ زمین در لایه‌های آبرفتی تحت اثر موج برشی افقی برای تعدادی مؤلفهٔ عمود بر صفحه گسل زلزله میدان واقعی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر محتوای فرکانسی زلزله‌ها بر طیف پاسخ زمین حائز اهمیت است [۱۲]، [۱۳]. پژوهش‌های انجام شده روی خاک‌های درشت‌دانه سنگریزه‌ای با در نظرگیری اثر محتوای فرکانسی نشان می‌دهد، که انتخاب رفتار دینامیکی مصالح تحت فرکانس بارگذاری مناسب در تطابق نسبی با فرکانس غالب زلزله اهمیت بسیاری دارد، به‌طوری‌که در نظرگیری اثر محتوای فرکانسی باعث بیش‌تر شدن دوره متناظر T_s استاندارد ۲۸۰۰ [۱٤] برای خاک نوع II از ۰/۵ ثانیه به ۰/۷۵ ثانیه می‌شود [۸]، [۱۵]. در این پژوهش علاوه بر منحنی‌های رفتاری متداول، از منحنی‌های رفتاری مستخرج از آزمون‌های انجام شده به‌سیلهٔ قدرت غازانی [۱٦] برای مصالح خاکی تحت اثر فرکانس‌های بارگذاری ۰/۵ تا ۱۰ Hz در کرنش‌های کم‌تر از ۰/۱٪ استفاده شده است. نتایج این پژوهش‌ها حاکی از اهمیت اثر فرکانس بارگذاری بر رفتار دینامیکی مصالح است [۱٦]. با وجود شناسایی تأثیر فرکانس بارگذاری بر منحنی رفتار دینامیکی مصالح خاکی، تاکنون از این نتایج برای استخراج طیف پاسخ شتاب به‌کمک روش تحلیل یک‌بعدی استفاده نشده است. در این پژوهش اثر فرکانس بارگذاری بر منحنی رفتار دینامیکی مصالح ملحوظ شده و در استخراج طیف‌های پاسخ مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، بر اساس نتایج منحنی‌های رفتاری موجود برای خاک CH/SC در سطوح فرکانس بارگذاری ۰/۵ تا ۱۰ Hz، طیف پاسخ شتاب ۸ زلزله میدان نزدیک در سطوح مختلف خطر لرزه‌ای با استفاده از روش تحلیل یک‌بعدی خطی معادل استخراج شده است. در آیین‌نامه‌های ساختمانی فعلی، ۳۰ متر بالایی نهشته سطحی خاک که روی پوسته با امپدانس بالا قرار می‌گیرد، در ارزیابی رفتار لرزه‌ای پاسخ زمین مهم فرض می‌شود. با توجه

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

به گودبرداری‌های فعلی که دارای عمقی حدود ۳۰ متر هستند، مناسب است رفتار ستون خاک با اعماق بیش‌تر هم مدنظر قرار گیرد. در این مقاله تحلیل‌ها برای ۲ ستون خاک با عمق ۳۰ و ٦۰ متر انجام شده است.

مشخصات مصالح استفاده شده

مصالح استفاده شده در این پژوهش متعلق به گمانهٔ BH14 شهر پردیس است [۱۷]. مطابق روش طبقه‌بندی متحد نشانه مصالح CH/SC است. مشخصات این مصالح شامل جنس، درصد عبوری از الک‌ها، G_s، دامنهٔ خمیری، سرعت‌های موج V_s و V_p صحرایی و ضریب پواسون در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر لایه‌های سطحی، خاک دست‌نخورده بررسی شده از نوع I استاندارد ۲۸۰۰ [١٤] طبقه‌بندی می‌شود. نمونه‌های آزمایش شده تحت شرایط رطوبت طبیعی از مصالح خاکی گمانه‌های حفر شده در شهرهای استان سمنان و تهران بازسازی شده‌اند و تحت شرایط تنش محدودکننده مختلف، بارگذاری سیکلی شدند. به‌منظور تعیین منحنی‌های (G/G_{max}-γ و D-γ) تحت اثر فرکانس-های بارگذاری ۰/۵ تا Hz ۱۰ آزمون مشخصات دینامیکی روی مصالح بازسازی شده با مشخصات مشابه مصالح جدول ۱ انجام شده است. نتایج آزمون مشخصات دینامیکی روی نمونه‌های بازسازی شده در ادامه ارائه شده است.

نتایج آزمایش‌های خصوصیات دینامیکی مصالح

۳ نمونه از مصالح با مشخصات جدول ۱ بازسازی شده و تحت شرایط هم‌سان در تنش‌های محدودکنندهٔ ۱، ۲ و ۵ kg/cm^2 در کرنش‌های کم‌تر از ۰/۱٪ تحت اثر فرکانس‌های بارگذاری ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و Hz ۱۰، مطابق استاندارد ASTM D3999 [۱۸] آزمایش شده‌اند [١٦]. ساخت نمونه‌های دست‌خورده براساس وزن مخصوص خشک صحرایی، بعد از مرطوب شدن با رطوبت بهینه انجام شده است. همهٔ نمونه‌ها با قطر ۲۰ سانتی‌متر و با ارتفاع ٤۰ سانتی‌متر تهیه و آزمایش شدند. نتایج مدول برشی حداکثر (G_{max}) و سرعت موج برشی آزمایشگاهی در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس مقادیر سرعت موج برشی، مصالح نمونه‌های بازسازی شده، از نوع III استاندارد ۲۸۰۰ [١٤] طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۲).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

جدول ۱. مشخصات مصالح CH/SC و سرعت موج برشی صحرایی، خاک نوع I آیین نامه ۲۸۰۰

نشانه مصالح	CH/SC	
نام گمانه	BH14	
شهر	پردیس	
درصد گذشته از ۴/۷۵mm	۹۷	
درصد گذشته از الک 200#	۵۵	
PI	۷۰	
γ_d (gr/cm^3)	۱/۴۹	
درصد رطوبت (%)	۲۷/۰	
Gs	۲/۵۰	
e نظیر γ_d حداکثر	۰/۶۴۶	
ابعاد نمونه‌ها (cm)	۲۰×۴۰	
ضریب پواسون	۰/۳۷	
عمق (متر)	Vp(m/s)	Vs(m/s)
۱	۳۳۱	۱۵۰
۲	۶۱۸	۲۹۹
۳	۸۵۲	۴۲۷
۴	۹۷۹	۵۰۴
۵	۸۲۶	۴۶۵
۶	۹۳۱	۵۳۷
۷	۹۲۷	۵۲۵
۸	۱۰۵۶	۵۹۶
۹	۱۱۱۳	۶۴۲
۱۰	۱۰۹۷	۶۴۸
۱۱	۱۰۰۴	۵۷۷
۱۲	۱۳۱۶	۸۱۳
۱۳	۱۳۳۰	۷۵۶
۱۴	۱۶۳۸	۹۸۰
۱۵	۱۵۹۱	۹۸۳
۱۶	۱۵۶۹	۹۴۰
۱۷	۱۷۶۵	۱۰۹۶
۱۸	۱۸۰۰	۱۱۶۱
۱۹	۱۴۸۳	۹۰۲
۲۰	۱۳۲۷	۸۲۸

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

۲۱	۱۲۷۷	۷٦٦
۲۲	۱۳۱۱	۸۲۹
۲۳	۱۸٤۱	۱۱۰٤
۲٤	۱۹۸۹	۱۲٤۲
۲۵	۱۹۹۰	۱۲٤۳
۲٦	۲۲۱۱	۱٤۲۰
۲۷	۲۲۱۲	۱٤۲۰
۲۸	۲۳۷۰	۱٤۸٤
۲۹	-	-
۳۰	-	-

جدول ۲. نتایج G_{max} و سرعت موج برشی، نمونه‌های بازسازی شده از مصالح CH/SC، خاک نوع IV آیین نامه ۲۸۰۰

σ'_3 kg/cm^2)	Loading frequency (Hz)	Measured G_{max} (kg/cm^2)	Vs (m/s)
۱	۰/۵	۳٤٦	۱۵۲
	۱	۳۷۱	۱۵۸
	۲	٤۱٤	۱٦۷
	۵	٤٦۷	۱۷۷
	۱۰	۵۲۱	۱۸۷
۲	۰/۵	٤٦۰	۱۷٦
	۱	٤۷۵	۱۷۹
	۲	۵۰۲	۱۸٤
	۵	۵٦٤	۱۹۵
	۱۰	٦۲۹	۲۰۵
۵	۰/۵	۵٦۵	۱۹۵
	۱	٦۲۱	۲۰٤
	۲	٦۵۵	۲۱۰
	۵	۷۰٦	۲۱۸
	۱۰	۸۰۰	۲۳۲

روی نمونهٔ بازسازی شده آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده نیز انجام شده و مقاومت برشی زهکشی نشده C_u بین ۳۵ تا kPa ۵۰ برآورد شده است [۱٦]. بر اساس معیار مقاومت برشی زهکشی نشده، مصالح بازسازی شده از نوع IV استاندارد ۲۸۰۰ [۱٤] ایران است. از این‌رو در قسمت مقایسه و تحلیل نتایج، برای این نوع خاک برای اطمینان مقایسه با طیف طرح خاک نوع IV استاندارد ۲۸۰۰ [۱٤] انجام شده است.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

نتایج آزمون‌های مشخصات دینامیکی شامل مقادیر مدول برشی، نسبت مدول برشی و نسبت میرایی در سیکل ۱۰ام، به‌ترتیب در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ ارائه شده است. مطابق [۱۹]، [۲۰] منحنی‌های رفتاری مصالح (G/G_{max} - γ و D - γ) چندان متأثر از دست‌خوردگی نمونه نیستند، از این‌رو در این پژوهش برای هر دو حالت صحرایی و آزمایشگاهی (خاک نوع I و IV) از منحنی‌های رفتاری به‌دست آمده برای مصالح CH/SC با اعمال G_{max} مربوط استفاده شده است. به‌منظور مقایسه منحنی‌های رفتاری به‌دست آمده با منحنی‌های رفتاری متداول در روش‌های تحلیل خطی معادل برای مصالح ریزدانه، منحنی‌های پیشنهادی Vucetic و Dobry [۲۱] در شکل‌های ۲ و ۳ درج شده است. مطابق نتایج حاصل، با افزایش فرکانس بارگذاری و تنش محدود کننده، مقدار مدول برشی افزایش می‌یابد (شکل ۱).

مطابق شکل ۲، مقدار نسبت G/G_{max} در کرنش معین، با افزایش فرکانس بارگذاری کاهش می‌یابد. هم‌چنین ملاحظه می‌شود که، رابطهٔ پیشنهادی Vucetic و Dobry [۲۱] خصوصاً در فرکانس‌های بارگذاری بالا، مقدار نسبت G/G_{max} را دست بالا تخمین می‌زند. مطابق شکل ۳ مقدار نسبت میرایی شدیداً متأثر از فرکانس بارگذاری است و با افزایش فرکانس بارگذاری، میرایی مصالح افزایش می‌یابد. این روند در همهٔ سطوح تنش محدودکننده، مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود که منحنی پیشنهادی Vucetic و Dobry [۲۱] خصوصاً در فرکانس‌های بارگذاری بالا، مقدار نسبت میرایی را دست پایین تخمین می‌زند. مطابق شکل ۳ مقدار نسبت میرایی در کرنش برشی معین تحت اثر فرکانس بارگذاری Hz ۰/۵ حدوداً نزدیک به محدودهٔ پیشنهادی Vucetic و Dobry [۲۱] است، در صورتی‌که در فرکانس‌های بارگذاری بالا (۵ و ۱۰ Hz) مقدار نسبت میرایی کاملاً در بالای محدوده پیشنهادی منحنی‌های Vucetic و Dobry [۲۱] قرار می‌گیرند.

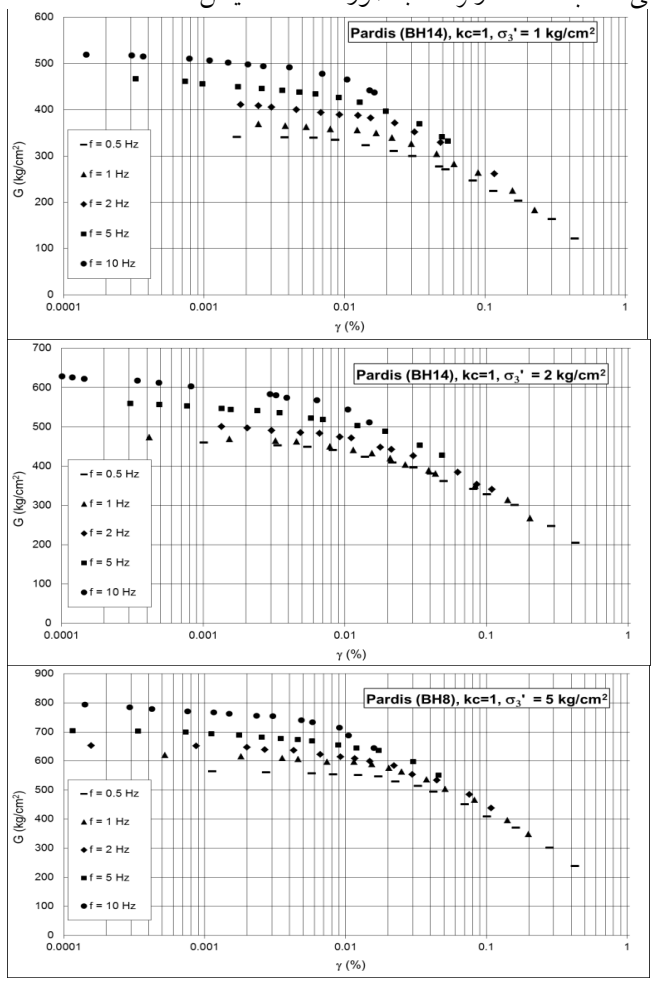
مشخصات زلزله‌های میدان نزدیک به‌کار رفته در تحلیل‌ها

مشخصات ۸ زلزله میدان نزدیک استفاده شده در تحلیل‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. علت انتخاب زلزله‌های میدان نزدیک و خصوصاً مؤلفه عمودی آن حرکت پالسی در طیف سرعت است. هم‌چنین محتوای فرکانسی این رکوردها کم‌تر تحت تأثیر مسیر قرار می‌گیرد و با توجه عوامل مختلف، مثل ظاهر شدن گسلش در سطح و یا پنهان بودن آن‌ها، دارای دوره پالس سرعت متفاوت (۰/٤ تا ۱۰ ثانیه برای زلزله‌های میدان نزدیک بررسی شده) است [۲۲].

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

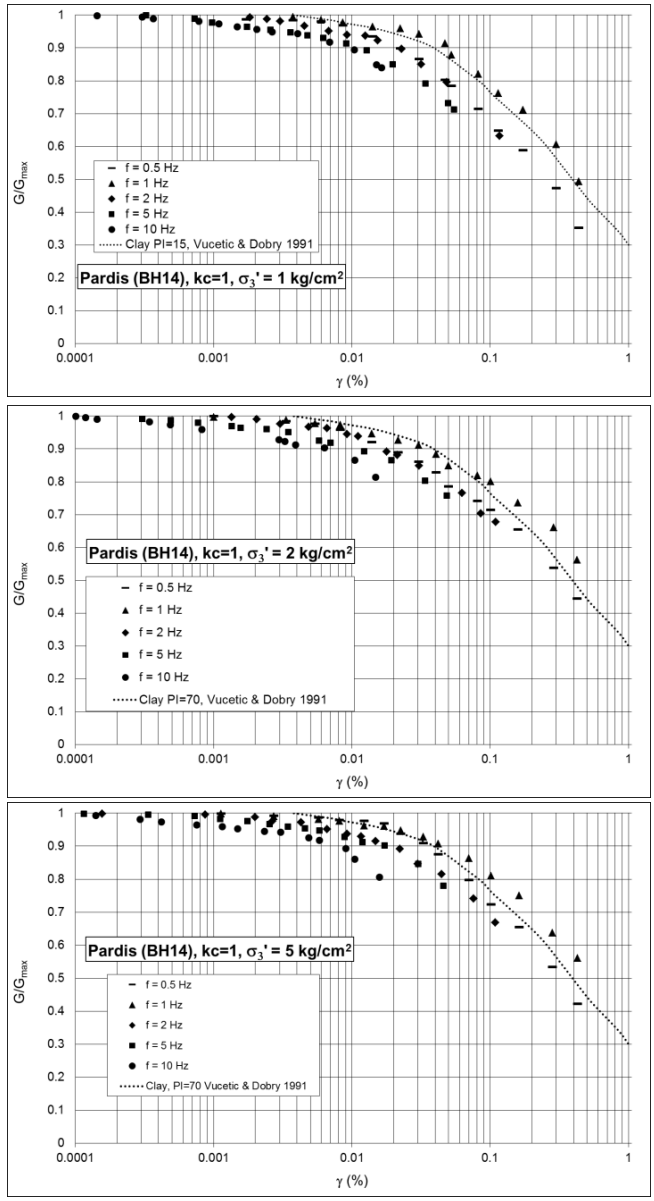
فرکانس غالب زلزله‌های بررسی شده بین ۱ تا ۱۳ Hz است (جدول ۳). مطابق جدول ٤ و براساس پژوهش‌های لرزه‌زمین ساخت انجام شده برای تعدادی از شهرهای ایران [۲۳] شتاب حرکت افقی زمین روی سنگ‌بستر برای دورهٔ بازگشت ٤۷۵ سال، بین ۰/۱۳g تا ۰/٦٦g است. میزان شتاب‌نگاشت زلزله‌های میدان نزدیک به‌کار رفته در تحلیل‌ها بین ۰/۳٤g تا ۱g است. تحلیل‌ها برای سه سطح خطر زلزله ۰/۱g، ۰/۳۵g، و ۱g صورت گرفته است و تاریخچهٔ زمانی شتاب‌نگاشت زلزله‌ها به‌صورت ساده مقیاس شده‌اند.



شکل ۱. نتایج G-γ نمونه مصالح CH/SC بازسازی شده (مصالح گمانه BH14 پردیس)

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

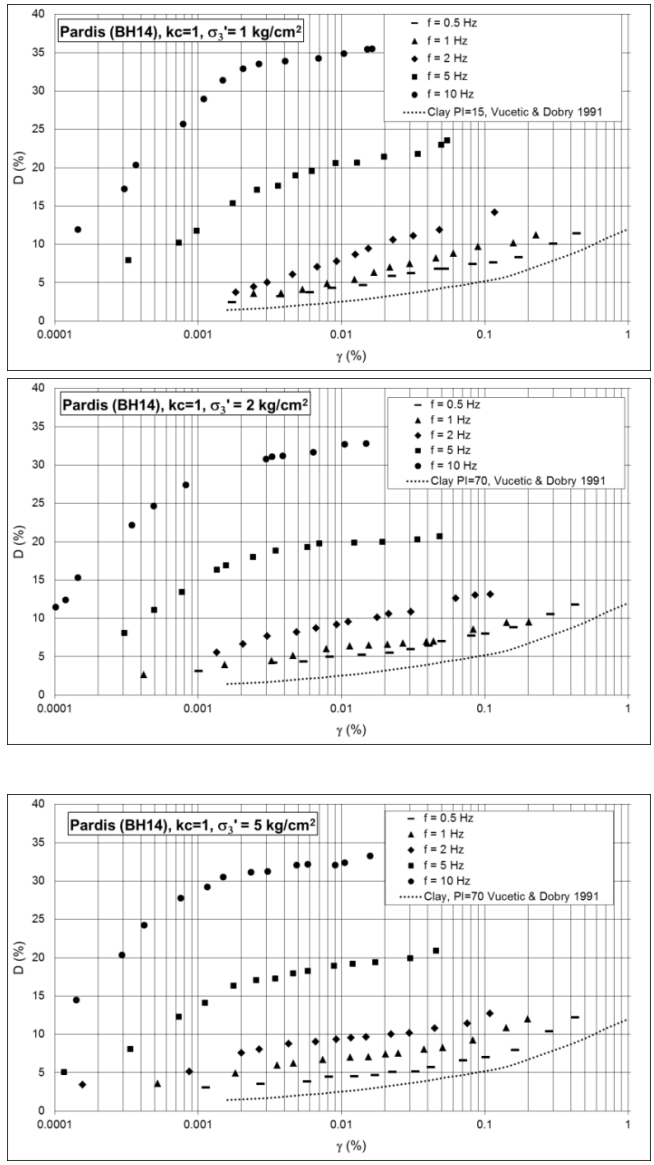
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]



شکل ۲. مقایسهٔ منحنی پیشنهادی Vucetic و Dobry [۲۱] با نتایج G/Gmax-γ نمونه مصالح CH/SC بازسازی شده

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]



شکل ۳. مقایسهٔ منحنی پیشنهادی Vucetic و Dobry [۲۱] با نتایج D-γ نمونه مصالح CH/SC بازسازی شده

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

جدول ۳. مشخصات زلزله های میدان نزدیک به‌کار رفته در تحلیل های پاسخ زمین [۲٤]

** (s) زمان دوام/ تعداد سیکل معادل در $0.65\tau_{max}$/ (Hz)فرکانس غالب/ (g)حداکثر شتاب		
مولفه عمود بر گسل (L)	مولفه موازی گسل (T)	مولفه عمودی (V)
۰٫۹٦۸g/۱٫۵۰۸Hz/۳/۱٦	۰٫۹۰۲g/۱٫٤۲٤Hz/۲/۱۳	۰٫۷۲٤g/۲٫۷۷٤Hz/۲/۸
۰/۸۲۱g/۲٫۰۲٤Hz/۵/۱۹	۰/۵۹۹g/۲٫۰۰۷Hz/۷/۱۵	۰/۳٤۳g/۳٫٦۰٦Hz/۱۳/۱٦
۰/۸۵۲g/۳٫۸٤۱Hz/۱۱/۳٤	۰/۸۳٦g/٤٫۰۰۰Hz/۱۳/۳۲	۰/٦۸۹g/۷٫۱۱۲Hz/۱۱/۲۷
۰/۷۲۱g/۹٫٤۲۲Hz/۲۱/۱٦	۰/۷۸۵g/۱۰٫٤۸۲Hz/۱۵/۱٦	۰/۸۱۹g/۱۳٫۰۰۷Hz/۲٦/۱٦
۰/۸۳۸g/۲٫۲۸۲Hz/٦/۱۳	۰/٤۷٤g/۳٫٦۵۰Hz/۱۷/۱۳	۰/۸۵۲g/۷٫۸۸٦Hz/۹/۱۱
۰/۷۹۹g/٤٫۸٦۲Hz/۱۵/۲٦	۰/٦۳٦g/۵٫۰۷۷Hz/۱۳/۲۳	۰/۹۹۹g/۸٫۳۷۸Hz/۱۱/۲۳
۰/۵۱۵g/۱٫۳۹٦Hz/۲/۱۳	۰/٤۹٦g/۲٫۲٤۹Hz/٤/۱۳	۰/۲٤۸g/۵٫۵٤٦Hz/۸/۱۲
۰/۵۳۵g/۲٫۱۵٦Hz/٤/۱٤	۰/۳٤۸g/۱٫۹۲۸Hz/۱۳/۱٤	۰/۳۵۷g/۸٫٤۳۵Hz/۱۰/۱۲
۰/۷۵٦g/۳٫٤۳٦Hz/۸/۱۹	۰/٦۳٤g/۳٫۸۵۲Hz/۱۰/۱۷	۰/٦۲۹g/۷٫۰۹۳Hz/۱۱/۱٦

نام زلزله	بزرگا	عمق کانونی (km)	نام ایستگاه	فاصله تا رومرکز(km)	Vs(30) در ایستگاه ثبت رکورد (m/s)*
چی چی ۲۰-۰۹-۱۹۹۹	۷٫٦۲	٦٫۸	CWB 99999 CHY080	۲٫٦۹	۵۳۳
کوبه ۱٦-۰۱-۱۹۹۵	٦٫۹	۱۷٫۹	JMA 99999 KJMA	۰٫۹٦	۳۱۲
طبس ۱٦-۰۹-۱۹۷۸	۷٫۳۵	۵٫۸	9101 Tabas	۲٫۰۵	۷۹۷
لندرز ۲۸-۰٦-۱۹۹۲	۷٫۲۸	۷٫۰	Lucerne Valley (LCN)	۲٫۱۹	٦۸٤
نورتریج ۱۷-۰۱-۱۹۹٤	٦٫٦۹	۱۷/۵	Rinaldi Receiving Station (RRS)	٦٫۵۰	۲۸۲
بم ۲٦-۱۲-۲۰۰۳	٦٫۷	۵	Farmandari	کمتر از ۱	٤۲۲
ارزیجان ۱۳-۰۳-۱۹۹۲	٦٫۹	۹	Erzincan (ERZ)	٤٫۳۸	۲۷۵
دوزجه ۱۲-۱۱-۱۹۹۹	۷٫۱	۱۰	Duzce (DZC)	٦٫۵۸	۲۷٦
متوسط مقادیر [(s) زمان دوام/ تعداد سیکل/ (Hz)فرکانس غالب/ (g)حداکثر شتاب]					

*Average Vs(30) =378 m/s, **Based on threshold acceleration of 0.05g,

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

جدول ٤. شتاب حرکت افقی زمین نسبت به شتاب ثقل (g) روی سنگ بستر تعدادی از شهرهای کشور [۲۳]

شهر	دوره بازگشت (سال)			
	۷۵	٤۷۵	۹۷۵	۲٤۷۵
سمنان	۰/۱۷–۰/۲۲	۰/۲۵–۰/۳۱	۰/۲۹–۰/۳۵	۰/۳۳–۰/٤۰
سرخه	۰/۲۰–۰/۲۲	۰/۲۹–۰/۳۱	۰/۳۳–۰/۳۵	۰/۳۸–۰/٤۰
شاهرود	۰/۱۷–۰/۲٤	۰/۲۵–۰/۳٤	۰/۲۹–۰/۳۸	۰/۳٤–۰/٤٤
بسطام	۰/۲٤	۰/۳٤	۰/۳۸	۰/٤٤
پردیس	۰/۱۹–۰/۳۱	۰/۲۷–۰/٤۳	۰/۳۰–۰/٤۸	۰/۳٤–۰/۵٤
شیراز	۰/۱۳–۰/۲۳	۰/۲۳–۰/٤۳	۰/۲۷–۰/۵۳	۰/۳۲–۰/٦۲
بم	۰/۱٦–۰/۳٦	۰/۲۵–۰/٤۸	۰/۳۱–۰/٤۸	۰/۳٦–۰/٤۸
بستک	۰/۱۵۳	۰/۲۹۲	۰/۳٦۲	۰/٤٦۹
مهدی‌شهر	۰/۲	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۳۷

مشخصات تحلیل‌ها

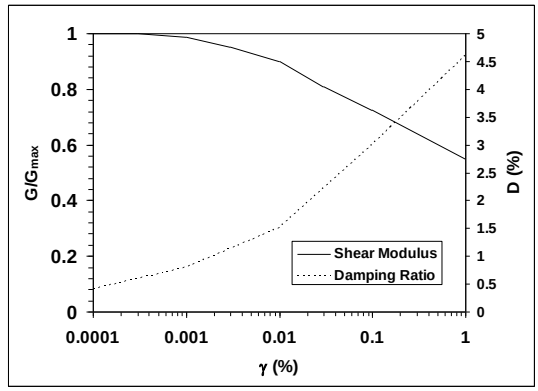
تحلیل یک‌بعدی برای سه مؤلفهٔ ۸ شتاب‌نگاشت زلزله با استفاده از نرم‌افزار EERA [۲۵] انجام شدند. انواع حالات در نظر گرفته شده در تحلیل‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. مجموعاً ۱۷۲۸ تحلیل یک‌بعدی خطی معادل انجام شده است. ۵ حالت مختلف منحنی‌های رفتاری مصالح CH/SC تحت اثر فرکانس‌های بارگذاری ۰/۵، ۱، ۲، ۵، و ۱۰ به همراه منحنی رفتاری مبنا (فارغ از اثر فرکانس) در تحلیل‌ها استفاده شده است. برای منحنی رفتاری مبنا (فارغ از اثر فرکانس) از مقادیر نسبت میرایی و نسبت مدول برشی و Vucetic و Dobry [۲۱] استفاده شده است. ضخامت لایه‌خاک در سطح زمین بین ۱/۵ تا ۲ متر و در اعماق بیش‌تر در حدود ۳ متری در نظر گرفته شده است. منحنی رفتاری مصالح متناسب با عمق خاک و سطح تنش انتخاب شده است. در همهٔ تحلیل‌ها برای سنگ بستر از منحنی نسبت مدول برشی و میرایی–کرنش برشی Idriss [۲]استفاده شده است (شکل٤). تحلیل‌ها برای میرایی ۵٪ انجام شده است.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

جدول ۵. تنوع مشخصات و حالات در نظر گرفته شده در انجام تحلیل‌های یک‌بعدی خطی معادل

عمق پروفیل خاک	تعداد شتاب نگاشت ها	مؤلفه‌های زلزله	نوع خاک و سرعت موج برشی	سطوح خطر PGA	حالات فرکانس (منحنی‌های رفتاری مصالح)
۲ حالت	۸	۳ مؤلفه	۲ حالت (I و IV)	۳ سطح	٦ حالت
۳۰ و ٦۰ متری		Longitudinal Transverse Vertical	صحرایی و آزمایشگاهی	۰/۱g، ۰/۳g و ۱g	۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ Hz و حالت بدون اثر فرکانس



شکل ٤. منحنی‌های رفتار دینامیکی سنگ بستر [۲]

نتایج تحلیل‌ها

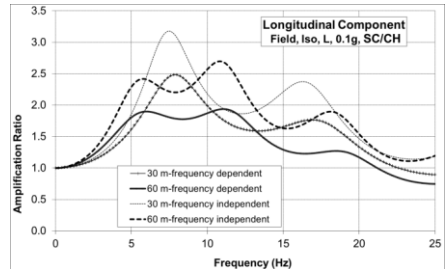
برای انواع حالات بررسی شده در تحلیل‌ها، طیف پاسخ شتاب، مقادیر ضریب بزرگ‌نمایی طیف، ضریب شکل طیف و نسبت شتاب طیفی در سطح زمین استخراج و بررسی شده است. در ادامه مقادیر متوسط طیف پاسخ شتاب حاصل از تحلیل رکوردها با طیف طرح نظیر در استاندارد ۲۸۰۰ [١٤] و UBC97 [٢٦] مقایسه شده است.

۱. مقایسهٔ مقدار متوسط ضریب بزرگ‌نمایی در حالت وابسته و غیروابسته به فرکانس

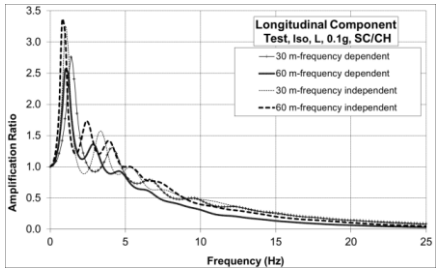
در شکل ۵ تغییرات متوسط ضریب بزرگ‌نمایی نسبت به فرکانس برای مؤلفهٔ عمود به گسل (L) زلزله‌های میدان نزدیک، تحت اثر ۳ سطح شتاب حداکثر (PGA) و برای دو نوع خاک I و IV ارائه شده است. نتایج برای دو ستون خاک ۳۰ و ٦۰ متری در حالتی که اثر فرکانس بارگذاری بر منحنی رفتاری مصالح در نظر گرفته شده و در حالت غیروابسته به اثر فرکانس ارائه شده است. مطابق شکل ۵ در هر دو نوع خاک I و IV و برای هر دو حالت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

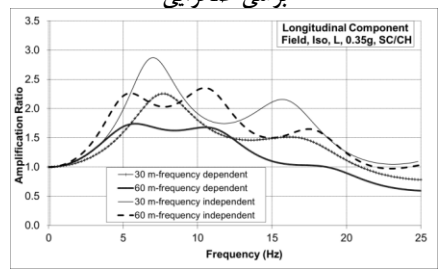
ستون خاک ۳۰ و ٦۰ متری، لحاظ کردن اثر فرکانس بارگذاری بر منحنی رفتاری مصالح، موجب کاهش متوسط ضریب بزرگ‌نمایی می‌شود. هم‌چنین در نظر گرفتن اثر فرکانس بر منحنی رفتاری مصالح خصوصاً در خاک نوع IV منجر به افزایش فرکانس نظیر بیشینه ضریب بزرگ‌نمایی می‌شود.



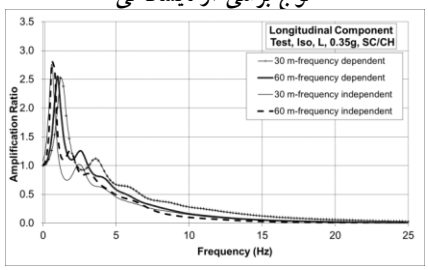
الف) PGA=0.1g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



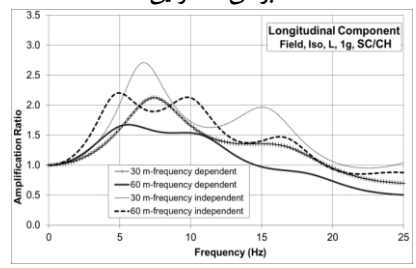
ب) PGA=0.1g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی



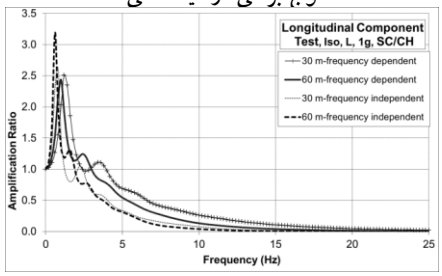
ج) PGA=0.35g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



د) PGA=0.35g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی



ه) PGA=1g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



ی) PGA=1g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

شکل ۵. متوسط ضریب بزرگنمایی مؤلفه L زلزله‌ها در ستون خاک ۳۰ و ٦۰ در حالت وابسته و غیر وابسته به فرکانس

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

مطابق شکل ۵ الف، ج و د با افزایش شتاب مبنای ورودی در خاک نوع I، مقدار متوسط ضریب بزرگ‌نمایی کاهش می‌یابد. این در حالی که است که برای خاک نوع IV افزایش شتاب مبنای ورودی از ۰/۱g به ۰/۳۵g موجب کاهش متوسط ضریب بزرگ‌نمایی شده، اما افزایش شتاب مبنای ورودی از ۰/۳۵g به ۱g تأثیر چندانی بر کاهش متوسط ضریب بزرگ‌نمایی ندارد. ملاحظه می‌شود که در خاک نوع I در نظر گرفتن ارتفاع بیش‌تر برای ستون خاک موجب کاهش متوسط ضریب بزرگ‌نمایی می‌شود در حالی که برای خاک نوع IV مقدار متوسط ضریب بزرگ‌نمایی در ستون خاک ۶۰ متری بیش‌تر از ستون خاک ۳۰ متری است.

مطابق شکل ۵ در خاک نوع IV با افزایش فرکانس، متوسط ضریب بزرگ‌نمایی کاهش می‌یابد (از فرکانس ۲ Hz به بالا متوسط ضریب بزرگ‌نمایی به‌شدت کاهش می‌یابد). در حالی که در خاک نوع I در محدودهٔ نسبتاً وسیعی از فرکانس (۵ تا ۱۵ Hz) متوسط ضریب بزرگ‌نمایی چشم‌گیر است. چنان‌که انتظار می‌رود، مطابق شکل ۵ کاهش سرعت موج برشی (تغییر نوع خاک از I به IV) باعث افزایش مقادیر ضریب بزرگ‌نمایی شده و فرکانس نظیر حداکثر بزرگ‌نمایی با تغییر نوع خاک از I به IV کاهش می‌یابد.

۲. بررسی لحاظ کردن اثر فرکانس بارگذاری بر طیف پاسخ شتاب

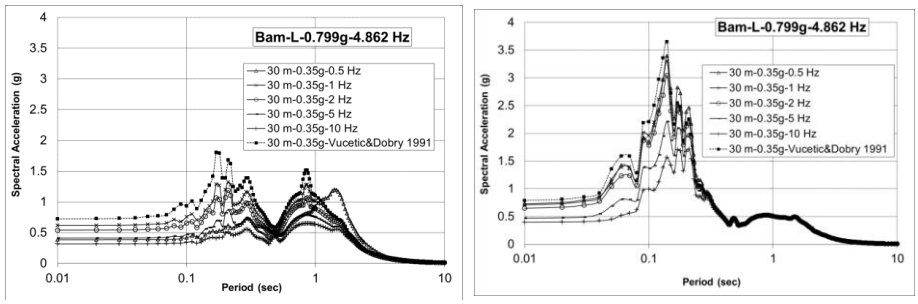
در شکل ۶ طیف‌های پاسخ شتاب مؤلفهٔ عمود بر گسل (L) زلزله بم برای بیشینه شتاب ورودی ۰/۳۵g با استفاده از منحنی‌های رفتاری مصالح تحت اثر فرکانس بارگذاری ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در دورههای کوتاه، حداکثر پاسخ شتاب طیفی متعلق به طیفی است که با استفاده از منحنی رفتاری Vucetic و Dobry [۲۱] و فارغ از اثر فرکانس بارگذاری بر منحنی رفتاری مصالح، استخراج شده است. مطابق شکل ۶ برای هر دو نوع خاک I و IV در نظر گرفتن اثر فرکانس بر منحنی رفتاری مصالح در دورههای کوتاه، موجب کاهش پاسخ شتاب طیفی و در دورههای بلند موجب افزایش پاسخ شتاب طیفی مؤلفهٔ عمود بر گسل زلزله بم می‌شود. مقایسهٔ طیف پاسخ شتاب خاک‌های نوع I و IV در شکل ۶ نشان می‌دهد که با کاهش سرعت موج برشی، مقدار حداکثر شتاب طیفی کاهش می‌یابد. ملاحظه می‌شود، مقدار طیف شتاب در دوره صفر برای خاک نوع IV کم‌تر از مقادیر نظیر برای خاک نوع I است. مطابق شکل ۶ ب برای خاک نوع IV و با استفاده از

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

منحنی رفتاری مصالح تحت اثر فرکانس بارگذاری Hz ۰/۵، طیف شتاب در دوره ۱/٤ ثانیه، دارای اکسترمم نسبی است.

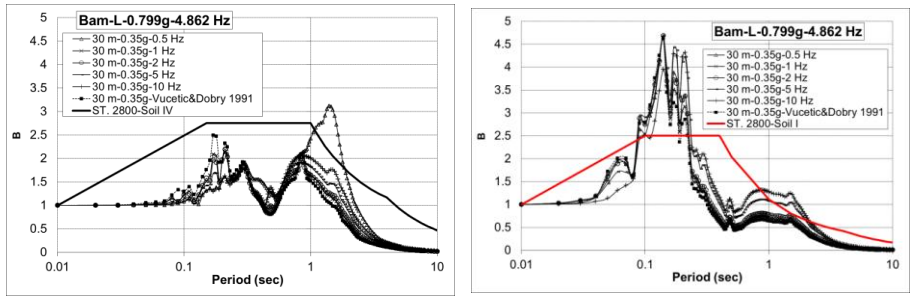
برای مقایسهٔ بهتر تغییرات پاسخ شتاب با دوره در شکل ۷، ضریب شکل طیف مؤلفهٔ عمود بر گسل (L) زلزله بم در دو نوع خاک I و IV استخراج شده و با ضریب شکل (B) طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] برای خاک نظیر مقایسه شده است. مطابق شکل ۷ در نظر گرفتن اثر فرکانس بر منحنی رفتاری مصالح در دورههای کوتاه، موجب کاهش ضریب شکل طیف و در دورههای بلند، موجب افزایش ضریب شکل طیف می‌شود.



الف) ستون ۳۰ متری خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی

ب) ستون ۳۰ متری خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

شکل ٦. طیف‌های پاسخ شتاب مؤلفهٔ L زلزله بم (PGA=0.35g) با استفاده از منحنی‌های رفتاری متاثر از اثر فرکانس



الف) ستون ۳۰ متری خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی

ب) ستون ۳۰ متری خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

شکل ۷. مقایسهٔ ضریب شکل طیف مؤلفه L زلزله بم (PGA=0.35g) حاصل از کاربرد منحنی‌های رفتاری متاثر از اثر فرکانس با ضریب شکل طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

مطابق شکل ۷ در محدودهٔ شتاب ثابت طیف خاک نوع I، شتاب پاسخ طیفی بیش‌تر از شتاب طیف طرح است. هم‌چنین برای خاک نوع IV دوره نظیر حداکثر پاسخ شتاب طیفی نسبت به دورهٔ نظیر آغاز شاخه نزولی طیف طرح افزایش یافته است (شکل ۷). به‌عبارت دیگر در خاک نوع IV ضریب شکل طیف در محدودهٔ شتاب ثابت به‌خوبی حداکثر شتاب پاسخ طیفی را پوشش داده است. شایان ذکر است که مقدار T_s برای خاک نوع III برابر ۰/۷ ثانیه است. در صورت مبنا قرار دادن مقاومت برشی زهکشی نشده C_u در طبقه‌بندی، خاک از نوع IV و مقدار T_s برابر ۱ ثانیه است. از این رو در مقایسه‌ها (شکل ۷ ب)، از طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ برای خاک نوع IV استفاده شده است. مطابق شکل ۷ ملاحظه می‌شود که احتساب اثر فرکانس بارگذاری موجب افزایش مقدار T_s در طیف پاسخ شتاب برای هر دو خاک نوع I و IV می‌شود. ملاحظه می‌شود که در صورت مبنا قرار دادن خاک نوع III، مقدار T_s=۰/۷ نمی‌تواند پوشش‌دهندهٔ بزرگ‌نمایی پاسخ شتاب باشد. از این‌رو مبنا قرار دادن مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده C_u در طبقه‌بندی نوع خاک فرض منطقی و نزدیک به واقعی است. به‌نظر می‌رسد برای احتساب اثر میدان نزدیک لازم است در هر دو نوع خاک I و IV مقدار T_s افزایش یابد.

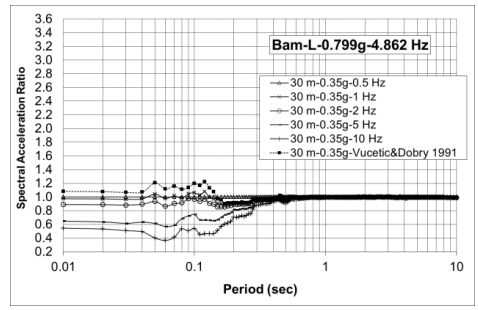
۳. بررسی لحاظ کردن اثر فرکانس بارگذاری بر نسبت شتاب طیفی

به‌منظور بررسی اثر ملحوظ کردن فرکانس بارگذاری بر پاسخ شتاب طیفی، در شکل ۸ تغییرات نسبت شتاب طیفی مؤلفهٔ عمود بر گسل زلزله بم به شتاب طیفی مصالح با فرکانس بارگذاری Hz ۰/۵ برای هر دو نوع خاک I و IV نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در هر دو نوع خاک I و IV در نظر گرفتن اثر فرکانس بارگذاری بر رفتار مصالح منجر به کاهش نسبت شتاب طیفی خصوصاً در دوره‌های کوتاه می‌شود. ملاحظه می‌شود که در خاک نوع I، در صورت استفاده از مقادیر میرایی و نسبت مدول برشی Vucetic و Dobry [۲۱] در محدودهٔ دورهٔ ۰/۱ ثانیه، نسبت شتاب طیفی بیش ۱ و برای سایر منحنی‌های رفتاری مصالح نسبت شتاب طیفی کم‌تر از ۱ است. هم‌چنین در خاک نوع I در نظر گرفتن اثر فرکانس بارگذاری بر رفتار مصالح، در دوره‌های بالاتر از ۰/۷ ثانیه نسبت شتاب طیفی چندان محسوس نیست. مطابق شکل ۸ ب مشاهده می‌شود که در خاک نوع IV، در صورت استفاده

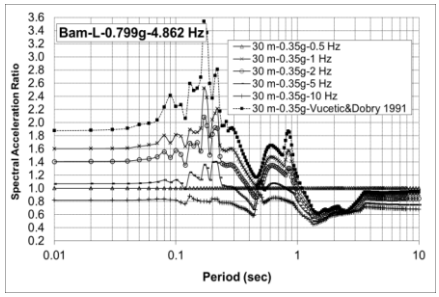
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

از مقادیر میرایی و نسبت مدول برشی Vucetic و Dobry [۲۱] نسبت شتاب طیفی به حداکثر ۳/۵ می‌رسد. برای سایر منحنی‌های رفتاری تحت اثر فرکانس بارگذاری ۱ تا Hz ۵، نسبت شتاب طیفی بزرگ‌تر از ۱ است. در خاک نوع IV مقدار نسبت شتاب طیفی در دوره ۱/٤ ثانیه به حداقل مقدار خود می‌رسد.



الف) ستون ۳۰ متری خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



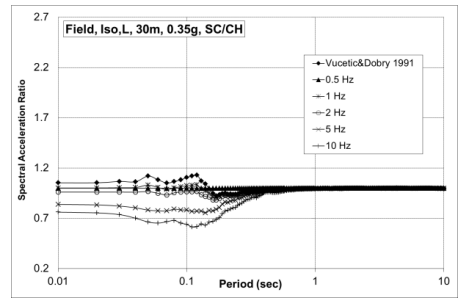
ب) ستون ۳۰ متری خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

شکل ۸. تغییرات نسبت شتاب طیفی مؤلفهٔ L زلزله بم (PGA=0.35g) به شتاب طیفی مصالح با فرکانس بارگذاری ۰/۵

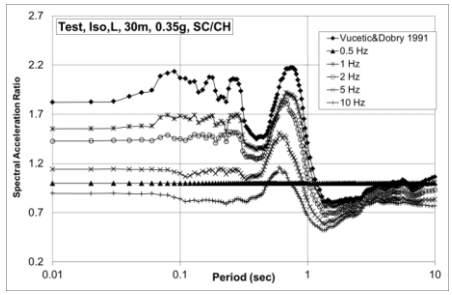
در شکل ۹ متوسط تغییرات نسبت شتاب طیفی مؤلفهٔ عمود بر گسل (L) زلزله‌های میدان نزدیک بررسی شده به شتاب طیفی حاصل از کاربرد منحنی رفتاری مصالح با فرکانس بارگذاری Hz ۰/۵ برای هر دو نوع خاک I و IV نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در هر دو نوع خاک I و IV در نظر گرفتن اثر فرکانس بارگذاری بر رفتار مصالح منجر به کاهش متوسط نسبت شتاب طیفی مؤلفه‌های L خصوصاً در دوره‌های کوتاه می‌شود. در خاک نوع I، در صورت استفاده از مقادیر میرایی و نسبت مدول برشی Vucetic و Dobry [۲۱] در محدودهٔ دورهٔ ۰/۱ ثانیه، متوسط نسبت شتاب طیفی بیش ۱ است. اما برای سایر منحنی‌های رفتاری مصالح نسبت شتاب طیفی کم‌تر از ۱ است. مطابق شکل ۹ الف در خاک نوع I اثر فرکانس بارگذاری در منحنی رفتاری مصالح، در دوره‌های بالاتر از ۰/٦ ثانیه چندان محسوس نیست. مطابق شکل ۹ ب مشاهده می‌شود که در خاک نوع IV، در صورت استفاده از مقادیر میرایی و نسبت مدول برشی Vucetic و Dobry [۲۱] متوسط نسبت شتاب

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

طیفی به حداکثر ۲/۲ می‌رسد. برای سایر منحنی‌های رفتاری تحت اثر فرکانس بارگذاری ۱ تا ۵ Hz، نسبت شتاب طیفی بزرگ‌تر از ۱ است.

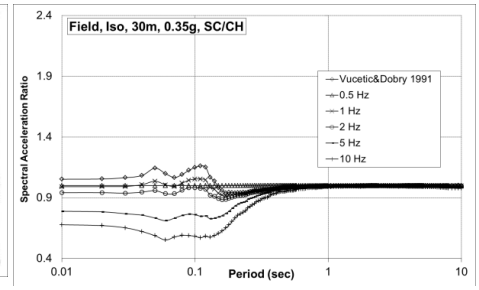


الف) ستون ۳۰ متری خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی

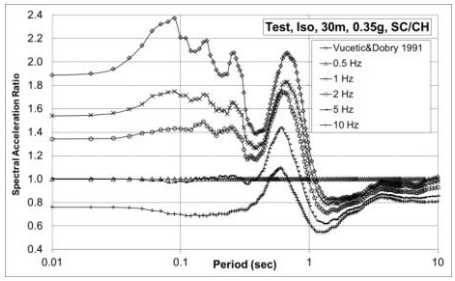


ب) ستون ۳۰ متری خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

شکل ۹. متوسط تغییرات نسبت شتاب طیفی مؤلفهٔ L زلزله‌های میدان نزدیک (PGA=0.35g) به شتاب طیفی مصالح با فرکانس بارگذاری ۰/۵



الف) ستون ۳۰ متری خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



ب) ستون ۳۰ متری خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

شکل ۱۰. متوسط تغییرات نسبت شتاب طیفی هر سه مؤلفه زلزله‌های میدان نزدیک (PGA=0.35g) به شتاب طیفی مصالح با فرکانس بارگذاری ۰/۵ Hz

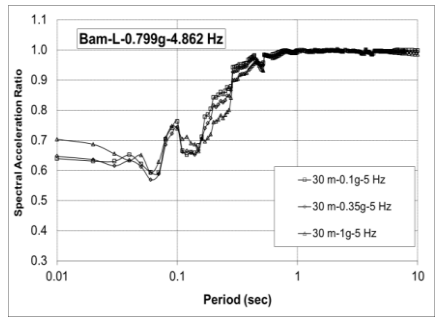
در شکل ۱۰ متوسط تغییرات نسبت شتاب طیفی هر سه مؤلفه زلزله‌های میدان نزدیک بررسی شده به شتاب طیفی مصالح با فرکانس بارگذاری ۰/۵ HZ برای هر دو نوع خاک I و IV نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که برای متوسط تغییرات نسبت شتاب طیفی هر سه مؤلفه نیز، در هر دو نوع خاک I و IV با افزایش فرکانس بارگذاری، نسبت شتاب طیفی کاهش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که، روند تغییرات متوسط نسبت شتاب طیفی هر سه مؤلفه زلزله‌های میدان نزدیک (شکل ۱۰) مشابه روند تغییرات متوسط نسبت شتاب طیفی مؤلفه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

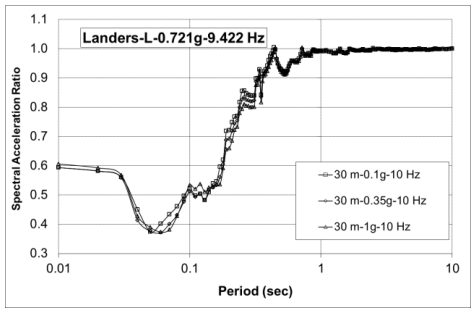
عمود به گسل (L) زلزله‌های میدان نزدیک (شکل ۹) است. از این‌رو از تکرار نتایج خودداری می‌شود.

٤. بررسی لحاظ کردن اثر فرکانس غالب زلزله بر نسبت شتاب طیفی

به‌منظور بررسی اثر تطابق فرکانس غالب زلزله با فرکانس بارگذاری منحنی رفتاری مصالح خاکی، نسبت شتاب طیفی مؤلفهٔ عمود بر گسل (L) زلزله بم و لندرز (رکورد LCN) برای ستون ۳۰ متری خاک نوع I تحت حداکثر شتاب مبنای سنگ بستر ۰/۱g، ۰/۳۵g و ۱g استخراج و در شکل ۱۱ ارائه شده است. فرکانس غالب مؤلفهٔ عمود بر گسل زلزله بم و لندرز (رکورد LCN) به‌ترتیب در حدود ٤/۹ Hz و ۹/٤ Hz است. در انجام تحلیل‌ها برای مؤلفهٔ عمود بر گسل زلزله بم و لندرز (رکورد LCN) به‌ترتیب از منحنی‌های رفتاری مصالح با فرکانس بارگذاری ۵ و ۱۰ Hz استفاده شده است. مطابق شکل ۱۱ در خاک نوع I در صورت تطابق فرکانس غالب زلزله با فرکانس بارگذاری منحنی رفتاری استفاده شده در تحلیل‌ها، در دوره‌های کوتاه نسبت شتاب طیفی کم‌تر از ۱ است. از دورهٔ ۱ ثانیه به بعد نسبت شتاب طیفی افزایش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که تغییر سطح خطر شتاب ورودی تأثیر محسوسی بر مقدار نتایج حاصل ندارد. به‌طورکلی انتخاب منحنی رفتاری مصالح متناسب با فرکانس غالب زلزله موجب کاهش نسبت شتاب طیفی، خصوصاً در دوره‌های کم می‌شود.



الف) زلزله بم با فرکانس غالب ٤/۹ Hz

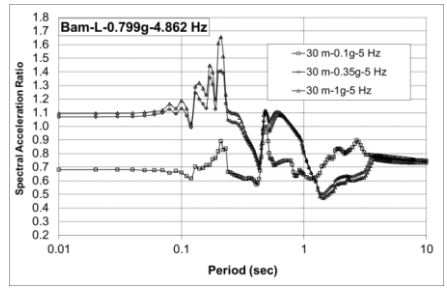


ب) زلزله لندرز (رکورد LCN) با فرکانس غالب ۹/٤ Hz

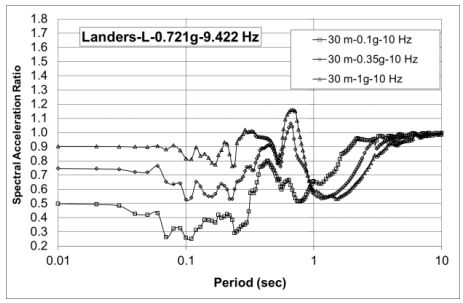
شکل ۱۱. تغییرات نسبت شتاب طیفی مؤلفه L زلزله لندرز (رکورد LCN) و بم (PGA=0.1, 0.35, 1g) به شتاب طیفی مصالح با فرکانس بارگذاری ۰/۵ Hz، ستون خاک ۳۰ متری نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

در شکل ۱۲ نسبت شتاب طیفی مؤلفهٔ عمود بر گسل (L) زلزله بم و لندرز (رکورد LCN) برای ستون ۳۰ متری خاک نوع IV تحت حداکثر شتاب مبنای سنگ بستر ۰/۱g، ۰/۳۵g و ۱g استخراج و ارائه شده است. مطابق شکل ۱۲ در خاک نوع IV در صورت تطابق فرکانس غالب زلزله با فرکانس بارگذاری منحنی رفتاری استفاده شده در تحلیل‌ها، برای هردو زلزله بم و لندرز (رکورد LCN) با افزایش سطح خطر لرزه‌ای نسبت شتاب طیفی افزایش می‌یابد. در سطوح کم خطر لرزه‌ای (۰/۱g) نسبت شتاب طیفی در هر دو زلزله بم و لندرز (رکورد LCN) برای دوره‌های کوتاه کم‌تر از ۱ است. در سطوح خطر لرزه‌ای زیاد و خیلی زیاد (۰/۳۵g و ۱g) در حالی که در زلزله لندرز (رکورد LCN) نسبت شتاب طیفی برای دوره‌های کوتاه کم‌تر از ۱ است برای زلزله بم، این مقدار بیش‌تر از ۱/۱ بوده و حتی به بیش از ۱/٦ نیز می‌رسد.



الف) زلزله بم با فرکانس غالب ٤/۹ Hz



ب) زلزله لندرز (رکورد LCN) با فرکانس غالب ۹/٤ Hz

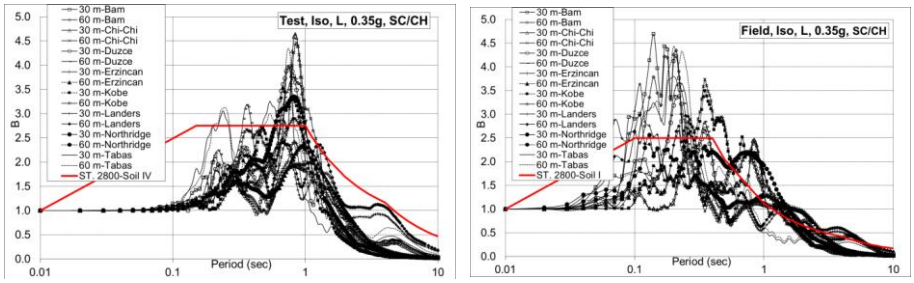
شکل ۱۲. تغییرات نسبت شتاب طیفی مؤلفه L زلزله لندرز (رکورد LCN) و بم (PGA=0.1, 0.35, 1g) به شتاب طیفی مصالح با فرکانس بارگذاری ۰/۵ Hz، ستون خاک ۳۰ متری نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

۵. بررسی لحاظ کردن اثر فرکانس غالب زلزله بر ضریب شکل طیف

در شکل ۱۳ ضریب شکل طیف برای مؤلفهٔ عمود بر گسل (L) همهٔ زلزله‌های میدان نزدیک برای شتاب حداکثر ورودی ۰/۳۵g در مقایسه با ضریب شکل طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] برای خاک نظیر نشان داده شده است. در استخراج طیف پاسخ زلزله‌ها، از منحنی رفتاری مصالح تحت اثر فرکانس بارگذاری متناسب با فرکانس غالب زلزله استفاده شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

است. ملاحظه می‌شود که برای هر دو نوع خاک I و IV، در صورت در نظر گرفتن اثر فرکانس بارگذاری و عمق، ضریب شکل طیف در دوره‌های متوسط (بین ۰/٤ تا ۱ ثانیه) بالاتر از ضریب شکل طیف استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] است. مطابق شکل ۱۳ الف در خاک نوع I ضرورت افزایش مقدار T_s در ضریب شکل طیف طرح به‌منظور احتساب اثر حوزه نزدیک، فرکانس بارگذاری و عمق کاملاً محسوس است. مطابق شکل ۱۳ ب ملاحظه می‌شود که مبنا قرار دادن مقاومت برشی زهکشی نشده C_u و مقایسه ضرایب شکل حاصل با ضریب شکل خاک نوع IV فرضی مناسب و منطقی می‌باشد. در خاک نوع III مقدار T_s برابر با ۰/۷ بوده است و به‌هیچ وجه با الگوی افزایش پاسخ طیفی در محدودهٔ ۰/۷ تا ۱/٤ ثانیه سازگار نیست. مطابق شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که مقدار T_s طیف شتاب پاسخ استخراج شده برای رکوردهای حوزه نزدیک در خاک نوع I و IV به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر از مقدار در نظر گرفته شده در طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ است. براساس نتایج حاصل لازم است به‌منظور احتساب اثر محتوای فرکانسی زلزله‌های میدان نزدیک مقدار T_s در خاک نوع I و IV افزایش یابد.



الف) ستون ۳۰ متری خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی

ب) ستون ۳۰ متری خاک نوع IV، مبنا سرعت برشی آزمایشگاهی

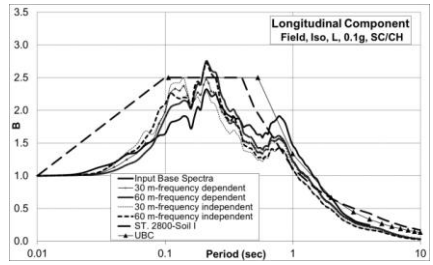
شکل ۱۳. ضریب شکل طیف مؤلفهٔ L زلزله ها (PGA=0.35g) در حالت وابسته به فرکانس

٦. مقایسهٔ مقدار متوسط ضریب شکل طیف با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ و UBC

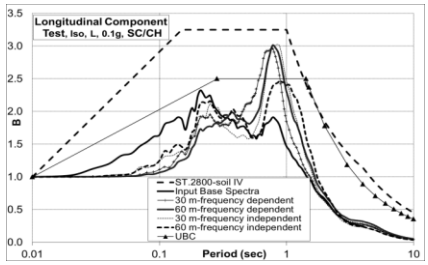
در شکل ١٤ و ١٥ متوسط ضریب شکل طیف برای مؤلفهٔ عمود بر گسل (L) و مؤلفه (T) همهٔ زلزله‌های میدان نزدیک تحت اثر ۳ سطح شتاب حداکثر (PGA) و برای ستون ۳۰ و ٦۰ متری دو نوع خاک I و IV در حالت وابسته و غیروابسته به فرکانس بارگذاری ارائه شده و با مقدار ضریب شکل طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] و آیین‌نامهٔ UBC97 [۲٦] برای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

خاک نظیر مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که تفاوت چندانی بین ضریب بازتاب مؤلفه‌های افقی زلزله های میدان نزدیک وجود ندارد و طیف پاسخ مؤلفهٔ عمود بر گسل برای جهت افقی، پوش تمام طیف‌ها است. چنان‌که در شکل ١٤ ملاحظه می‌شود در نظر گرفتن اثر فرکانس در منحنی رفتاری مصالح منجر به کشیده شدن طیف پاسخ شتاب به‌سمت دوره‌های بلندتر می‌شود. برای خاک نوع I مطابق شکل ١٤ الف، ج و ه در همهٔ سطوح خطر، افزایش T_s از مقدار ٠/٤ به مقدار ٠/٥ مشابه آیین‌نامهٔ UBC97 [٢٦] فرضی مناسب و منطقی برای پوشش قله ایجاد شده در شاخه نزولی طیف پاسخ شتاب است. ضریب بزرگ‌نمایی طیف استاندارد ٢٨٠٠ [١٥] برای خاک نوع IV در حالت خطر نسبی کم و متوسط برابر ٣/٢٥ و در حالت خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد برابر ٢/٧٥ است. چنان‌که در شکل ١٤ ب ملاحظه می‌شود در حالت خطر نسبی کم و متوسط، مقدار ضریب بزرگ‌نمایی خصوصاً در دوره‌های کوتاه نسبت به مقدار میانگین ضریب شکل‌های حاصل از تحلیل خطی معادل برای مؤلفهٔ عمود به گسل زلزله‌های میدان نزدیک بسیار دست بالا است. این در حالی است که برای حالت خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد، مقدار ضریب بزرگ‌نمایی دارای مقدار منطقی و مناسبی متناسب با میانگین ضریب شکل‌های حاصل از تحلیل خطی است (شکل ١٤ د و ی). مطابق شکل ١٤ د و ی مقدار T_s برابر با ١ ثانیه برای خاک نوع IV کم‌تر از مقدار دورهٔ نظیر قله مشاهده شده در شاخه نزولی طیف است. بدیهی است در صورت مبنا قرار دادن سرعت موج برشی و مقایسهٔ نتایج حاصل از تحلیل معادل خطی با ضریب شکل طیف خاک نوع III (با مقدار T_s برابر ٠/٧)، اثر میدان نزدیک مشاهده شده به‌هیچ وجه به‌وسیلهٔ طیف طرح آیین‌نامه پوشش نمی‌یابد.



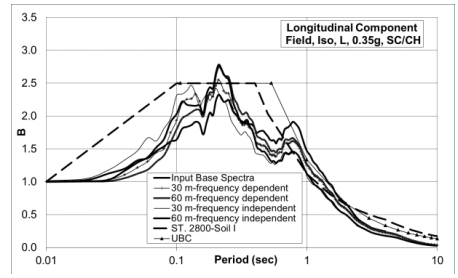
الف) PGA=0.1g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



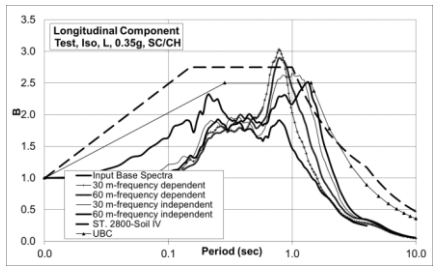
ب) PGA=0.1g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

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

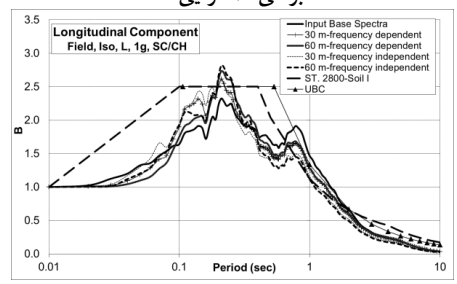
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]



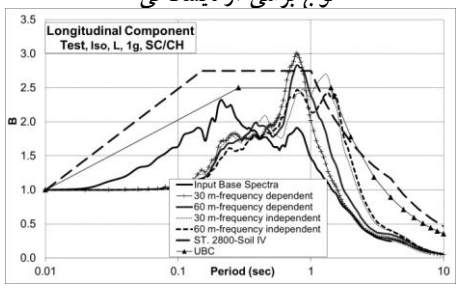
ج) PGA=0.35g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



د) PGA=0.35g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی



ه) PGA=1g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



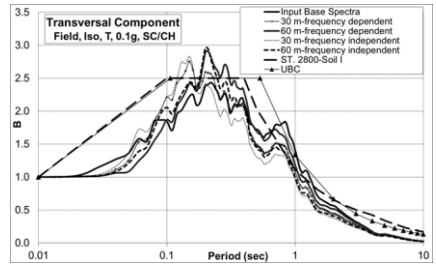
ی) PGA=1g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

شکل ١٤. مقایسه متوسط ضریب شکل طیف مؤلفه L زلزله‌ها در ستون خاک ۳۰ و ٦۰ متری در حالت وابسته و غیر وابسته به فرکانس با ضریب شکل طیف استاندارد ۲۸۰۰ و UBC97

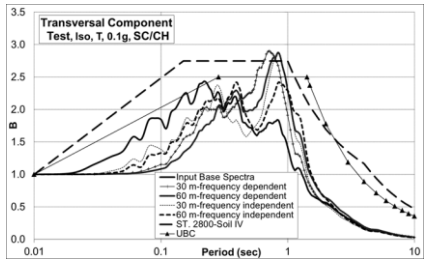
بر این اساس ملاحظه می‌شود که برای خاک‌های با متوسط سرعت موج برشی کم‌تر از ۲۲۰ متر بر ثانیه استفاده از مقاومت برشی زهکشی نشده C_u معیار منطقی‌تری برای گروه بندی نوع خاک است. بر اساس نتایج حاصل توصیه می‌شود در طیف طرح استاندارد برای خاک نوع IV حداکثر ضریب بزرگ‌نمایی در همهٔ سطوح خطر به عدد ۲/۷۵ محدود شده و مقدار T_s به ۱/٤ ثانیه افزایش یابد. در مورد مقادیر T_0 چنان‌چه مقادیر متوسط ضریب بازتاب، ملاک تصمیم‌گیری باشد، برای هر دو مؤلفهٔ افقی زلزله، مقادیر ارایه شده به‌وسیلهٔ UBC97 [٢٦] مناسب‌تر است. از این‌رو، با در نظرگیری زلزله‌های با فرکانس بالا، دورهٔ ۰/۱ ثانیه پیشنهاد می‌شود. نتایج تحلیل‌های انجام شده برای دو نوع خاک با منحنی رفتاری یکسان مصالح و سرعت‌های موج برشی متفاوت در آزمایشگاه و صحرا، نشان می‌دهد که ضریب شکل طیف وابسته به مقدار فرکانس بارگذاری در منحنی رفتاری مصالح است.

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

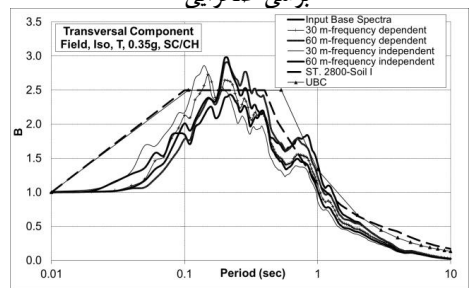
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]



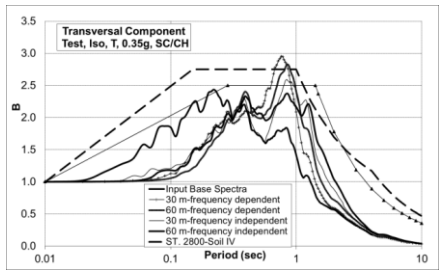
الف) PGA=0.1g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



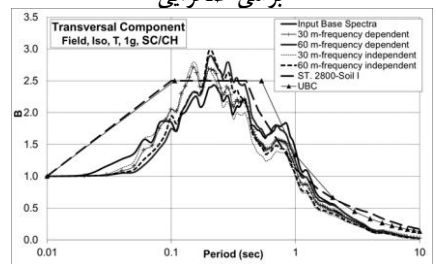
ب) PGA=0.1g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی



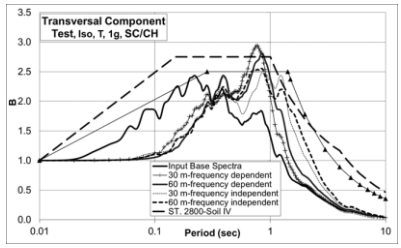
ج) PGA=0.35g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



د) PGA=0.35g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی



ه) PGA=1g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



ی) PGA=1g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

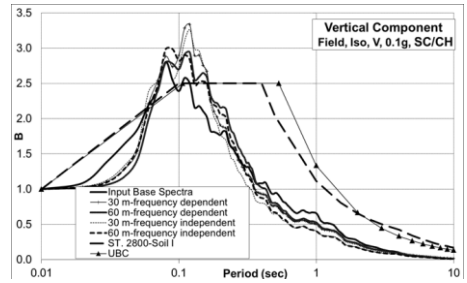
شکل ۱۵. مقایسه متوسط ضریب شکل طیف مؤلفهٔ T زلزله‌ها در ستون خاک ۳۰ و ۶۰ متری در حالت وابسته و غیر وابسته به فرکانس با ضریب شکل طیف استاندارد ۲۸۰۰ و UBC97

در نظرگیری ضریب زلزله قائم در طراحی اجزای غیرسازه‌ای برای مناطق میدان نزدیک اهمیت زیادی دارد، این ضریب در استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] به‌صورت درصدی از نیروی افقی زلزله در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱۶ مقدار متوسط ضریب شکل طیف مؤلفهٔ قائم (V) نشان داده شده است. مطابق نتایج شکل ۱۶ برای زلزله‌های با فرکانس بالا (مؤلفهٔ قائم

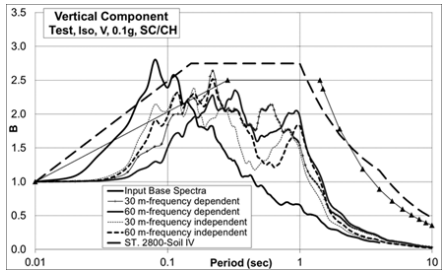
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

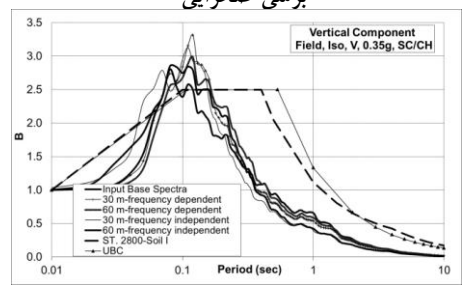
زلزله‌های میدان نزدیک) توصیه می‌شود که مقدار T_0 در انواع خاک به ۰/۱ ثانیه محدود شود. برای خاک نوع IV با در نظرگیری اثر محتوای فرکانسی و عمق، مقدار طیف برای مؤلفهٔ قائم زلزله‌ها بیش‌تر از مقادیر نظیر مؤلفه‌های افقی است. از این‌رو طیف ارائه شده به‌وسیلهٔ UBC97 [۲٦] برای مؤلفه قائم مناسب است.



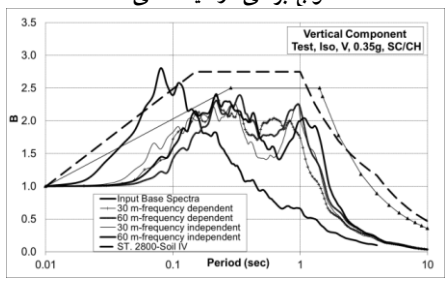
الف) PGA=0.1g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



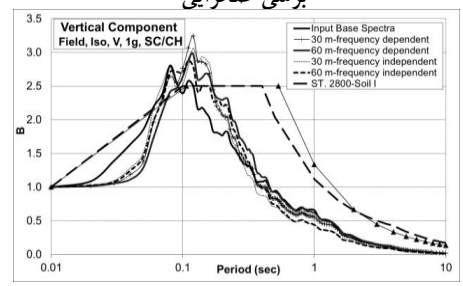
ب) PGA=0.1g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی



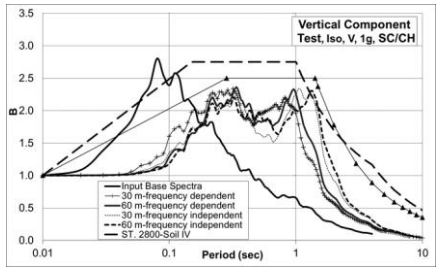
ج) PGA=0.35g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



د) PGA=0.35g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی



ه) PGA=1g، خاک نوع I، مبنا سرعت موج برشی صحرایی



ی) PGA=1g، خاک نوع IV، مبنا سرعت موج برشی آزمایشگاهی

شکل ١٦. مقایسه متوسط ضریب شکل طیف مؤلفه V زلزله‌ها در ستون خاک ۳۰ و ٦۰ متری در حالت وابسته و غیر وابسته به فرکانس با ضریب شکل طیف استاندارد ۲۸۰۰ و UBC97

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل خطی معادل، طیف پاسخ شتاب در سه سطح خطر ($PGA = 0.1g, 0.35g, 1g$) برای دو ستون خاک ۳۰ و ۶۰ متری تحت اثر مؤلفه‌های ۸ رکورد زلزله میدان نزدیک استخراج شده است. در طبقه‌بندی نوع خاک سرعت موج برشی صحرایی و آزمایشگاهی و معیار مقاومت برشی زهکشی‌نشده مورد توجه قرار گرفته است. به‌منظور احتساب اثر فرکانس بارگذاری بر رفتار مصالح، علاوه بر منحنی‌های رفتاری متداول، در مدل‌سازی رفتار خاک از منحنی‌های رفتاری مستخرج از روش آزمون مشخصات دینامیکی تحت اثر فرکانس‌های بارگذاری ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و Hz ۱۰ و در سطوح تنش محدودکننده ۱، ۲ و kg/cm^2 ۵ نیز استفاده شده است. مجموعاً ۱۷۲۸ تحلیل خطی معادل انجام شده و مقادیر طیف پاسخ شتاب، ضریب بزرگ‌نمایی طیف و نسبت شتاب طیفی استخراج شده است. نتایج تحلیل‌ها و بررسی‌های انجام شده بدین‌شرح است:

۱. در هر دو نوع خاک I و IV، لحاظ کردن اثر فرکانس بارگذاری در منحنی رفتاری مصالح به‌کار رفته در تحلیل‌ها، بر مقدار پاسخ شتاب طیفی، نسبت شتاب طیفی و ضریب شکل طیف حاصل مؤثر است. برای هر دو ستون خاک ۳۰ و ۶۰ متری، افزایش فرکانس بارگذاری منجر به کاهش نسبت شتاب طیفی و متوسط ضریب بزرگ‌نمایی طیف، خصوصاً در دوره‌های کوتاه می‌شود. از این‌رو توصیه می‌شود در بررسی‌های تحلیل پاسخ ساختگاه در انتخاب منحنی رفتاری مصالح (G/G_{max} - γ و D - γ) به اثر فرکانس بارگذاری توجه شود.

۲. مقایسه متوسط ضریب شکل طیف حاصل از تحلیل‌ها با ضریب شکل (B) طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ برای هر دو نوع خاک I و IV نشان می‌دهد که برای زلزله‌های میدان نزدیک، در نظر گرفتن اثر فرکانس غالب زلزله در انتخاب منحنی رفتاری مصالح، در دوره‌های کوتاه، موجب کاهش ضریب شکل طیف و در دوره‌های بلند، موجب افزایش ضریب شکل طیف می‌شود.

۳. مقایسه متوسط ضریب شکل حاصل از تحلیل‌ها با ضریب شکل (B) طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ نشان می‌دهد که به‌منظور احتساب اثر فرکانس غالب زلزله‌های میدان

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

نزدیک لازم است در خاک نوع I و IV مقدار T_s طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران به‌ترتیب به مقدار ۰/۵ و ۱ ثانیه افزایش یابد.

٤. در مورد مقادیر T_0 چنانچه مقادیر متوسط ضریب بازتاب، ملاک تصمیم‌گیری باشد، برای هر دو مؤلفهٔ افقی زلزله‌های با فرکانس بالا، دوره ۰/۱ ثانیه پیشنهاد می‌شود.

۵. در خاک‌هایی که متوسط سرعت موج برشی ۳۰ متر لایه سطحی زمین (V_{s30}) در حدود ۲۲۰ m/s است، توصیه می‌شود علاوه بر معیار سرعت، معیار مقاومت برشی زهکشی نشده (C_u) نیز مورد ملاحظه قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهد مبنا قرار دادن مقاومت برشی زهکشی نشده (C_u) منجر به طبقه‌بندی منطقی‌تر نوع خاک می‌شود.

منابع

1. Idriss I. M., Seed H. B., "Seismic response of horizontal soil layers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division", ASCE, 94 (4) (1968) 1003-1031.
2. Idriss I. M., "Response of soft soil sites during earthquakes. In Proceedings of the Symposium to Honor Professor H. B. Seed", Berkeley, May (1990) 273-289.
3. Sugito M., Goda H., Masuda T., "Frequency-dependent equ-linearized technique for seismic response analysis of multi-layered ground", Proceedings of JSCE, No.493/III-27 (1994) 49-58 (in Japanese).
4. Sugito M., "Frequency-dependent equivalent strain for equi-linearized technique. Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering", Balkena, Rotterdam, the Netherlands (1995) 655-660.
5. Yoshida N., Kobayashi S., Suetomi I., Miura K., "Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, 22 (3) (2002) 205-222.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

6. Assimaki D., Kausel E., "An equivalent linear algorithm with frequency and pressure-dependent moduli and damping for the seismic analysis of deep sites", Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 22 (9-12) (2002) 959-965.

7. Zhang J., Andrus R., Juang C. H., "Normalized shear modulus and material damping ratio relationships", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASEC. 130 (4) (2005) 453-464.

۸. آقایی‌آرایی ع.، رازقی ح.، هاشمی طباطبایی س.، قلندرزاده ع.، "ارزیابی اثر فرکانس بر مشخصات خاک‌های شنی"، گزارش گ-۶۳۰، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۹۱).

۹. آقایی آرایی ع.، هاشمی طباطبایی س.، قلندرزاده ع.، "مدول برشی و نسبت میرایی مصالح شنی"، گ-۵۴۸. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۹۰).

10. Meng J. "Earthquake ground motion simulation with frequency-dependent soil properties, Soil Dynamics and Earthquake Engineering", 27(3) (2007) 234-241.

11. Park D., Hashash Y. M. A., "Rate-dependent soil behavior in seismic site response analysis", Can. Geotechnical Journal. 45 (4) (2008) 454-469

12. Rodriguez-Marek A., Bray J. D., "Seismic site response for near-fault forward directivity ground motions", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 132 (12) (2006) 1611-1620.

13. Bray J. D., Rodriguez-Marek A., "Characteristics of forward-directivity ground motions in the near-fault region", Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 24 (11) (2004) 815-828.

۱۴. آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰.، ویرایش ٤. شمارهٔ نشر: ض-۲۵۳ (۱۳۹۳).

15. Razeghi H. R., Aghaei Araei A., Ghalandarzadeh A., Hashemi Tabatabaei S., "Rate-dependence of rockfill behavior on propagated near fault ground motions", Scientia Iranica, 21(4) (2014) 1263-1280.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]

١٦. قدرتی قزاانی ا.، "ارزیابی رفتار دینامیکی خاک مخلوط با استفاده از دستگاه سه‌محوری قطر بزرگ"، پایانامهٔ دکتری. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (١٣٩٦) ١٥٠.

١٧. آقایی آرایی ع. قدرتی قزاانی ا.، هاشمی طباطبایی س. قلندرزاده ع.، "ارزیابی رفتار دینامیکی مصالح خاکی با استفاده از دستگاه سه‌محوری بزرگ مقیاس"، پروژه تحقیقاتی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (١٣٩٤).

18. ASTM D3999, "Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus" (2011).

19. Ishihara K. G., "Soil behavior in Earthquake Geotechnics", Oxford Science Punlication. New York (1996).

20. Hatanaka M., Vchida A., "Effects of test methods on the cyclic deformation charachteristics of high quality undistribed gravel samples, static and dynamic properties of gravelly soils", Geotechnical Special publication 56 (1995) 136-151.

21. Vucetic M., Dobry R., "Effect of soil plasticity on cyclic response, Journal of Geotechnical Engineering, 117 (1991) 89-107.

22. Somerville P., "Magnitude scaling of near fault rupture directivity pulse", Physics of Earth and Planetary Interiors", 137 (1-4) (2003) 201-212.

٢٣. "پروژه‌های تحقیقاتی ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهرهای بم"، پردیس، سرخه، سمنان، شاهرود، بسطام، مهدیشهر و بستک (١٣٨٦-١٣٩٦)، مرکز تحقیقات راه، مسکن وشهرسازی.

24. "Pacific Earthquake Engineering Research Center", PEER strong motion database, [Online] (2008). Available: http://peer.berkeley.edu/smcat/.

25. Bardet J. P., Ichii K., Lin C. H., "EERA, Equivalent linear earthquake site response analysis of layered soils deposits", User's manual, University of Southern California, Department of Civil Engineering (2000).

26. The Uniform Building Code, UBC-97 (1997).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.7.4]