

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی اثر حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل منفرد و دوقلو بر تغییرات پاسخ لرزه‌ای سطح زمین می‌پردازد. برای این منظور با انتخاب یک رویکرد عددی تفاضل محدود اعتبارسنجی شده، ابتدا تأثیر پارامترهای مهم تأثیرگذار بر مسئله از جمله عمق تونل، انعطاف‌پذیری پوشش تونل، محتوای فرکانسی تحریک و فاصله تونل‌ها، مطالعه شده است. در ادامه بر مبنای شتاب‌نگاشت‌های واقعی زلزله، اثر حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل بر طیف پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج با طیف پاسخ در شرایط میدان آزاد مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که وجود سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل تأثیر محسوس بر تغییر پاسخ سطح زمین دارد به طوری که می‌تواند تا حدود دو برابر موجب بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین نسبت به حالت میدان آزاد شود. این موضوع به خصوص در مورد سازه‌های زیرزمینی دوقلوی سطحی مشهودتر است.

کلمات کلیدی: سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل، بزرگنمایی لرزه‌ای، طیف پاسخ زمین، تونل دوقلو، تفاضل محدود، مطالعه پارامتری

ارزیابی الگوی بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین در ساختگاه‌های واقع بر سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل

حمید علی‌الهی (نویسنده مسؤول)

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان،
h.alielahi@iazu.ac.ir

محمد سعید رضانی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک،
دانشگاه خوارزمی

۱- مقدمه

در سالیان گذشته (از دهه ۷۰ تا کنون) مطالعات بسیاری در ارتباط با تأثیر حفرات زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای زمین صورت گرفته است. در اکثر این مطالعات با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی، تفرق امواج حجمی (طولی و برشی) مورد بررسی قرار گرفته است [۶-۱۴]. در این ارتباط کریچلو [۱۵] با استفاده از مدل اجزای محدود دو بعدی (FEM)، تأثیر حفرة‌های زیرزمینی توپر را بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین تحت تأثیر امواج لرزه‌ای قائم (SH) بررسی نمود. این محقق نشان داد که مکان، شکل، اندازه و عمق سازه‌های زیرزمینی، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لوکو و دی بارز [۱۶] در سال ۱۹۹۴ با استفاده از روش محاسبه‌ی انتگرال مرزی غیرمستقیم و بر مبنای توابع گرین ویسکوالاستیک، به بررسی تفرق امواج هارمونیک فشاری، برشی و رابلی توسط یک حفرة استوانه‌ای بدون پوشش^۱ پرداختند. در این راستا حفرة در محیط نیم فضا، در معرض امواج مهاجم با زاویه تابش قائم و مایل نسبت به محور حفرة قرار گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر محسوس عمق مدفون

امروزه مشاهده می‌شود که در کلان‌شهرها نمی‌توان مشکلات حمل‌ونقل و ترافیک را بر روی سطح زمین حل نمود. تجربیات گذشته نشان داده‌اند که استفاده از سازه‌های زیرزمینی بهترین و سریع‌ترین راه‌حل برای حمل‌ونقل شهری در مناطق پرجمعیت است. لذا امروزه سازه‌های زیرزمینی از جمله تونل‌ها، ایستگاه‌های مترو و پارکینگ‌های زیرزمینی، زیرساخت‌های حیاتی بسیاری از کلان‌شهرها را به خود اختصاص داده‌اند. برای مدت‌ها باور بر این بوده است که تونل‌های زیرزمینی سازه‌هایی امن هستند و عملکرد مناسبی از خود در زلزله‌ها نشان خواهند داد، در حالی که در زلزله‌های اخیر، موارد زیادی از تخریب این سازه‌ها گزارش شده است [۱-۳]. این امر به خصوص در مورد سازه‌های زیرزمینی کم‌عمق مشهودتر بوده است. در این بین آنچه بیش از همه نظر محققین را به خود جلب کرده است، تخریب و آسیب‌های وارده بر سازه‌های ساخته شده بر روی سطح زمین بوده که این موضوع ناشی از بزرگنمایی پاسخ سطح زمین تحت تأثیر حضور این فضا‌های زیرزمینی می‌باشد [۴-۵].

در این راستا مطالعات آزمایشگاهی اندکی در ارتباط با اثر سازه‌های زیرزمینی بر پاسخ زمین صورت گرفته است. در این ارتباط اخیراً بازیار و همکاران [۲۲-۲۳] با استفاده از یک سری آزمایش‌های فیزیکی ستریوژیوژ، اثر حضور یک تونل منفرد را بر تغییرات پاسخ شتاب در سطح زمین ارزیابی نمودند. نتایج این تحقیقات نشان داد حضور تونل مترو در خاک‌های مختلف، محدوده‌ی فرکانسی متفاوتی از سازه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد که ترکیب دو پارامتر سرعت موج برشی محیط و اندازه‌ی سازه‌ی زیرزمینی، محدوده‌ی فرکانسی تحت تأثیر تونل در سطح زمین را مشخص می‌نماید.

علی‌رغم اینکه تحقیقات گذشته نقش حضور حفرات و سازه‌های زیرزمینی بر تغییرات پاسخ سطح زمین را مشخص می‌کنند ولی تاکنون در این راستا مطالعه پارامتری جامعی در ارتباط با تأثیر سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل انجام نگرفته است. همچنین در مطالعات پیشین اثر حضور سازه‌های زیرزمینی دوقلو بر الگوی پاسخ سطح زمین مورد ارزیابی قرار نگرفته است. از طرف دیگر، بررسی آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای نشان می‌دهد که در هیچ‌کدام از آیین‌نامه‌ها به اثرات وجود تونل‌ها بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و لحاظ نمودن این اثرات در طراحی لرزه‌ای سازه‌های روی سطح زمین اشاره‌ای نشده است.

در این تحقیق با انتخاب یک رویکرد تفاضل محدود به کمک نرم‌افزار 2D FLAC، تغییرات الگوی بزرگنمایی سطح زمین در ساختگاه‌های واقع بر سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل منفرد و دوقلو مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه با استفاده از شتاب‌نگاشت واقعی زلزله‌ها، تأثیر حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل بر طیف پاسخ سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- معرفی روش انجام مطالعات پارامتری

در این مطالعه با استفاده از تحلیل پارامتری اثرات پارامترهای همچون عمق تونل، انعطاف‌پذیری پوشش تونل، محتوای فرکانسی تحریک ورودی و فواصل افقی تونل‌های دوقلو بر

حفره بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین است. رودریگز-کاستلانوس [۱۷] با استفاده از روش اجزای مرزی غیرمستقیم (IBEM)، تفرق امواج الاستیک در اثر ترک‌ها و حفره‌های زیرزمینی را در فضای دوبعدی مورد بررسی قرار دادند. هندسه مورد مطالعه این محققین شامل ترک‌های صفحه‌ای و بیضوی و حفره‌های نیم‌دایره‌ای بوده است. نتایج این محققین نشان داد که حداکثر پاسخ‌ها به تشدید ناحیه قرار گرفته بین سطح بالای ترک‌ها و سطح زمین وابسته است. این محققین اشاره کردند که تشدید این ناحیه با فرکانس غالب ارتباط پیدا کرده و مقدار این فرکانس وابسته به نسبت عمق حفره از سطح زمین است. در سال ۲۰۰۷ یوتامیترا و همکاران [۱۸] با استفاده از رویکرد عددی مبتنی بر روش تفاضل محدود، تأثیرات یک تونل دایره‌ای شکل با پوشش را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه پارامتری این محققین شامل اثرات ویژگی خاک، فرکانس تحریک، قطر تونل، عمق ساخت تونل و همچنین انعطاف‌پذیری نسبی پوشش تونل بوده است.

اسمرزینی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از یک روش تحلیلی تأثیر حفره‌های زیرزمینی دایره‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را مطالعه کردند. محیط خاک در این تحقیق همگن و همسان و با رفتار ویسکو الاستیک خطی فرض شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که حداکثر بزرگنمایی زمانی اتفاق می‌افتد که موج به صورت قائم تابانده شود و بتواند فرکانس طبیعی سیستم را تحریک نماید. همچنین در محدوده دوره تناوب (پریود) ۰/۰۵ تا ۰/۲ ثانیه، وجود سازه زیرزمینی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین دارد. علی‌الهی و همکاران [۲۰-۲۱] با استفاده از روش اجزای مرزی در حوزه‌ی زمان (BEM)، یک محیط الاستیک خطی که در بردارنده‌ی حفره‌هایی با هندسه‌های متفاوت می‌باشد را تحت تأثیر امواج مهاجم برشی (SV) و فشاری (P) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیقات نشان داد که حضور تونل، موجب بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در پریودهای بی‌بُعد بالاتر و سبب کوچک‌نمایی لرزه‌ای پاسخ‌ها در پریودهای بی‌بُعد پایین‌تر نسبت به سطح آزاد زمین می‌شود.

ذکر است که دوره تناوب (پریود) بی‌بعد معکوس بسامد (فرکانس) بی‌بعد بوده که نشان‌دهنده‌ی نسبت طول موج امواج مهاجم به ضلع تونل است.

$$\eta = \frac{2a}{\lambda} = \frac{2af}{C_s} \quad (1)$$

همچنین نسبت انعطاف‌پذیری پوشش تونل (J) در واقع نشان‌دهنده‌ی نسبت سختی پوشش سازه (لاینینگ) به سختی محیط اطراف (خاک) می‌باشد [۲۴]. زمانی که مقدار آن کمتر از واحد باشد، بدین مفهوم است که پوشش سازه نسبت به محیط اطراف صلب‌تر است که در این شرایط سازه‌ی زیرزمینی تغییر شکل‌های کمتری از خود نسبت به محیط پیرامونش نشان خواهد داد. با افزایش مقدار J از صلیب پوشش تونل کاسته می‌شود تا جایی که در شرایط عدم وجود پوشش مقدار این پارامتر بی‌بعد به سمت بی‌نهایت (∞) میل می‌کند [۲۴].

در تونل‌های دایره‌ای شکل با در نظرگیری رفتار الاستیک، مقدار پارامتر نسبت انعطاف‌پذیری پوشش با استفاده از رابطه‌ی تحلیلی زیر قابل محاسبه است [۲۴]:

$$J = \frac{E_{soil}(1 - \nu_{lining}^2)R^3}{6E_{lining}I(1 + \nu_{soil})} \quad (2)$$

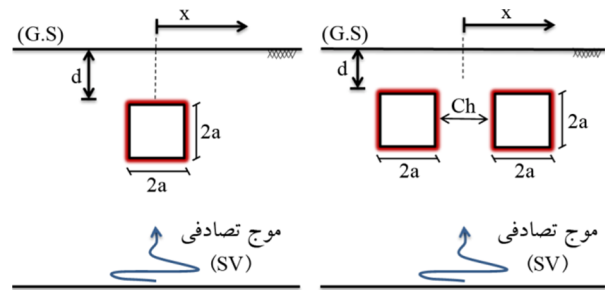
در رابطه‌ی (۲) E_{soil} و E_{lining} به ترتیب مدول الاستیسیته خاک و مصالح پوشش تونل می‌باشد. ν_{soil} و ν_{lining} به ترتیب ضریب پواسون مصالح خاک و پوشش تونل است. همچنین R به ترتیب شعاع و ممان اینرسی مقطع تونل می‌باشند. همچنین برای تونل‌های مستطیلی ساده که ممان اینرسی پوشش آنها در سقف I_W و اضلاع کناری I_R است، رابطه‌ی زیر توسط محققین ارائه شده است [۲۴]. در این رابطه، H و W به ترتیب عرض و ارتفاع سازه‌ی زیرزمینی می‌باشند.

$$J = \frac{G_{soil}}{24} \left(\frac{H^2W}{EI_W} + \frac{HW^2}{EI_R} \right) \quad (3)$$

در این مطالعه به منظور انجام مطالعات پارامتری، ابتدا تحریک ورودی اعمال شده به سیستم به صورت موجک ریکر [۲۵] در نظر گرفته شده و سپس در گام بعد، از هفت

الگوی بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته است. مقادیر بزرگنمایی^۲ از تقسیم طیف فوریه پاسخ تغییر مکان افقی سطح زمین در حضور سازه‌ی زیرزمینی به تغییر مکان افقی سطح زمین در شرایط میدان آزاد^۳ به دست آمده است.

شکل (۱) هندسه کلی مساله تحت هجوم امواج مهاجم از نوع برشی (SV) را نشان می‌دهد. اندازه اضلاع سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل معادل $2a$ و عمق آنها d در نظر گرفته شده است. همچنین پارامتر Ch نشان‌دهنده‌ی فواصل افقی تونل‌های دوقلو از یکدیگر می‌باشد. در جدول (۱)، محدوده‌ی تغییرات پارامترهای بی‌بعد دخیل در مساله ارائه شده است. این پارامترهای بی‌بعد شامل نسبت عمق سازه‌ی زیرزمینی (d/a)، نسبت فاصله از مرکز تقارن تونل‌ها در سطح زمین (x/a)، فرکانس بی‌بعد (η)، نسبت انعطاف‌پذیری پوشش سازه زیرزمینی (J) و نسبت فاصله افقی تونل‌های دوقلو (Ch/a) می‌باشند.



شکل (۱): هندسه کلی مساله تحت هجوم امواج مهاجم SV

جدول (۱): تغییرات پارامترهای بی‌بعد جهت مطالعه پارامتری

مقادیر	پارامتر بی‌بعد
$d/a = 0.5, 1, 2, 4$	نسبت عمق
$-1 < x/a < 1$	نسبت فاصله سطحی
$0 < \eta < 20$	فرکانس بی‌بعد
$J = 150, 00, 00$	نسبت انعطاف‌پذیری پوشش سازه
$Ch/a = 1, 2, 4, 8$	نسبت فاصله تونل‌های دوقلو

در این تحقیق منظور از فرکانس بی‌بعد، نسبت حداکثر ضلع سازه‌ی زیرزمینی جعبه‌ای شکل ($2a$) به طول موج تحریک (λ) می‌باشد که مطابق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود. در این رابطه f فرکانس تحریک و C_s سرعت موج برشی محیط است. لازم به

انتشار یافته در محیط انتخاب شده است $(\Delta l < \frac{\lambda}{10})$. جهت مدلسازی پوشش (لاینینگ) تونل‌ها از المان سازه‌ای لاینر^۵ استفاده شده و اندرکنش بین این المان و خاک اطراف با استفاده از المان رابط اتصال^۶ مدل شده است که اجازه هیچ گونه لغزشی را بین این دو محیط نمی‌دهد [۲۶]. سرعت موج برشی، چگالی خاک و ضریب پواسون خاک به ترتیب ۴۰۰ متر بر ثانیه، ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۳۳ در نظر گرفته شده‌اند. از آنجا که تحریک ورودی به صورت تنش به بستر مدل اعمال شده است، از مرز آرام^۷ (جاذب انرژی) برای مدلسازی کف استفاده شده است. همچنین در مرزهای کناری مدل، از مرز میدان آزاد^۸ استفاده شده تا به خوبی از برگشت امواج به داخل مدل جلوگیری به عمل آید. مرز میدان آزاد در واقع شامل یک ستون خاک با عرض واحد می‌باشد که رفتار محیط جانبی بی‌نهایت خارج از مدل را شبیه‌سازی می‌نماید [۲۶]. رابطه‌ی (۵) تاریخچه زمانی تنش برشی اعمال شده به سیستم را نشان می‌دهد. در این رابطه ρ جرم مخصوص، C_s سرعت موج برشی و V_s تاریخچه‌ی زمانی سرعت موج ورودی می‌باشد [۲۸].

$$\sigma_s = -2(\rho \cdot C_s) V_s \quad (5)$$

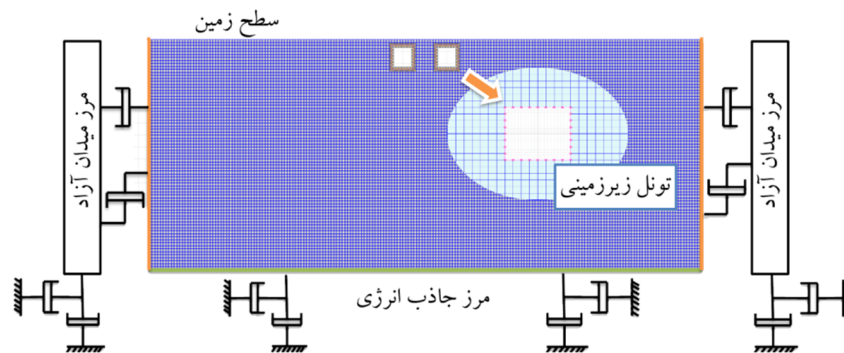
اکثر مطالعات لرزه‌ای صورت گرفته در ارتباط با تونل‌های جعبه‌ای شکل، متمرکز بر عملکرد لرزه‌ای خود سازه بوده و مطالعات محدودی در ارتباط با تأثیر این سازه‌ها بر پاسخ سطح زمین انجام پذیرفته است. با در نظرگیری این محدودیت، نتایج به دست آمده از رویکرد محاسباتی لوکو و دی بارز [۱۶] و

شتاب‌نگاشت واقعی زلزله سازگار شده به طیف آیین‌نامه اروپایی^۴ به منظور دستیابی به مقادیر طیف پاسخ زمین در اثر حضور سازه‌های زیرزمینی بهره گرفته شده است. در معادله‌ی (۴) رابطه موجک ریکر آورده شده است. در این رابطه، f_p فرکانس غالب و A_{max} دامنه حداکثر تاریخچه زمانی و t_0 نشان‌دهنده‌ی نقطه‌ی زمانی ایجاد حداکثر مقدار موجک ریکر می‌باشد. در تحقیق حاضر مقادیر f_p ، A_{max} و t_0 به ترتیب ۵ هرتز، ۱ میلی‌متر و ۰/۴۷۵ ثانیه اختیار شده است.

$$f(t) = A_{max} [1 - 2(\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2] e^{-(\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2} \quad (4)$$

۳- مدل عددی و اعتبارسنجی آن

به منظور صحت‌سنجی مدلسازی عددی برای انجام مطالعات پارامتری، در این بخش پس از معرفی مدل عددی به اعتبارسنجی آن پرداخته شده است. در این راستا به منظور مدلسازی عددی از نرم‌افزار FLAC دوبعدی مبتنی بر روش تفاضل محدود استفاده شده است [۲۶]. در شکل (۲) نحوه‌ی مدل‌سازی تونل‌های زیرزمینی نشان داده شده است. در تمامی تحلیل‌ها رفتار خاک به صورت ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده و از المان‌های چهار وجهی با رفتار کرنش صفحه‌ای جهت شبکه‌بندی (مش‌بندی) محیط استفاده شده است. همچنین میرایی خاک به صورت رایلی و با نسبت دو درصد در نظر گرفته شده است. اندازه مش‌ها به قدر کفایت کوچک انتخاب شده‌اند تا بتوانند انتشار امواج را به خوبی شبیه‌سازی نمایند. برای این منظور بر اساس توصیه کولمیر و لایسمر [۲۷] ابعاد المان‌ها کوچک‌تر از یک‌دهم طول موج برشی



شکل (۲): نحوه مدلسازی عددی مسئله در محیط نرم‌افزار FLAC 2D

این محققین می‌باشد. برای این منظور با در نظر گیری دو مقدار متفاوت برای نسبت انعطاف‌پذیری پوشش تونل ($J = 5$) و ($J = 150$)، نتایج اعتبارسنجی در شکل (۳) برای نسبت عمق $d/a = 2$ و فرکانس بی‌بعد $\eta = 0.2$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو مقایسه تطابق مناسبی بین نتایج مشاهده می‌شود.

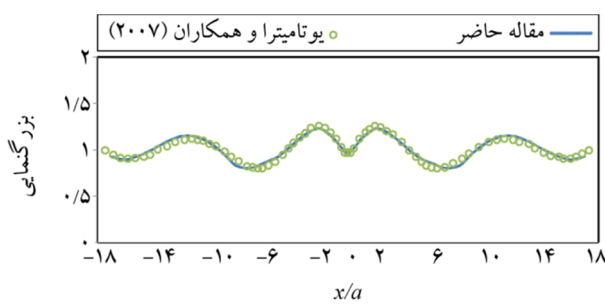
۴- نتایج تحلیل‌های پارامتریک

در بخش حاضر، ابتدا شکل کلی الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور سازه‌های زیرزمینی منفرد و دوقلو مورد بررسی قرار گرفته و سپس تأثیر پارامترهای مختلف از جمله عمق تونل، انعطاف‌پذیری پوشش تونل، محتوای فرکانسی تحریک و فاصله تونل‌ها، مطالعه شده است.

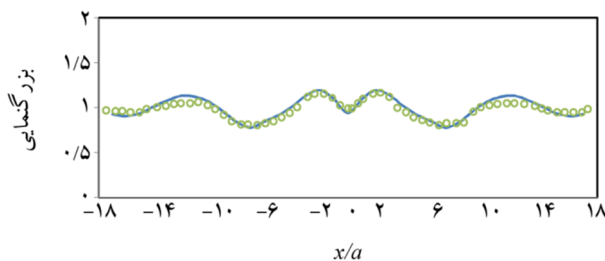
۴-۱- الگوی بزرگنمایی در سطح زمین تحت تأثیر حضور سازه‌های زیرزمینی منفرد

در شکل (۴) با در نظر گیری یک مقدار ثابت برای انعطاف‌پذیری پوشش تونل ($J = 150$)، نحوه‌ی شکل‌گیری الگوی بزرگنمایی در سطح زمین ناشی از حضور تونل منفرد

همچنین رویکرد عددی یوتامیترا و همکاران [۱۸] مبنای اعتبارسنجی این تحقیق قرار گرفته است. همان‌طور که در مقدمه شرح داده شد، لوکو و دی بارز با استفاده از روش محاسبه‌ی انتگرال مرزی غیرمستقیم و بر مبنای توابع گرین ویسکوالاستیک، تفرق امواج هارمونیک توسط یک حفره‌ی استوانه‌ای بدون پوشش را بررسی نمودند [۱۶]. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج این محققین، پارامترهای نسبت عمق، فرکانس بی‌بعد و نسبت انعطاف‌پذیری به ترتیب $d/a = 1/5$ ، $\eta = 0.5$ و $J = \infty$ انتخاب شده است. نتایج این مقایسه در شکل (۳) برای پاسخ لرزه‌ای تغییر مکان بی‌بعد شده نسبت به حداکثر دامنه موج ورودی، در سطح حفره و سطح زمین ارائه شده است. همچنین یوتامیترا و همکاران [۱۸] به‌منظور بررسی اثر سازه‌های زیرزمینی بر بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین، مجموعه‌ای از تحلیل‌های عددی دینامیکی کرنش مسطح را انجام داده‌اند که در آن یک تونل دایره‌ای شکل در یک محیط نیم‌صفحه‌ی ویسکوالاستیک تحت اثر موج هارمونیک برشی (SV) قرار گرفته است. دلیل انتخاب مدل یوتامیترا و همکاران، در نظر گیری اثر حضور پوشش تونل در نتایج تحقیقات

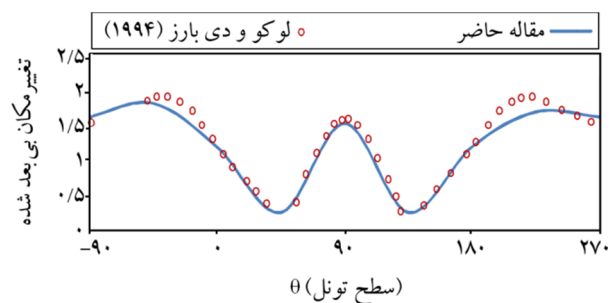


(الف) تونل با پوشش منعطف ($J = 150$)

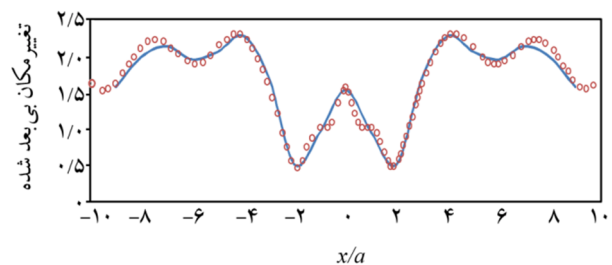


(ب) تونل با پوشش صلب ($J = 5$)

شکل (۴): مقایسه نتایج مدل عددی با مطالعات یوتامیترا و همکاران [۱۸] ($\eta = 0.2$, $d/a = 2$)



(الف) پاسخ روی سطح حفره

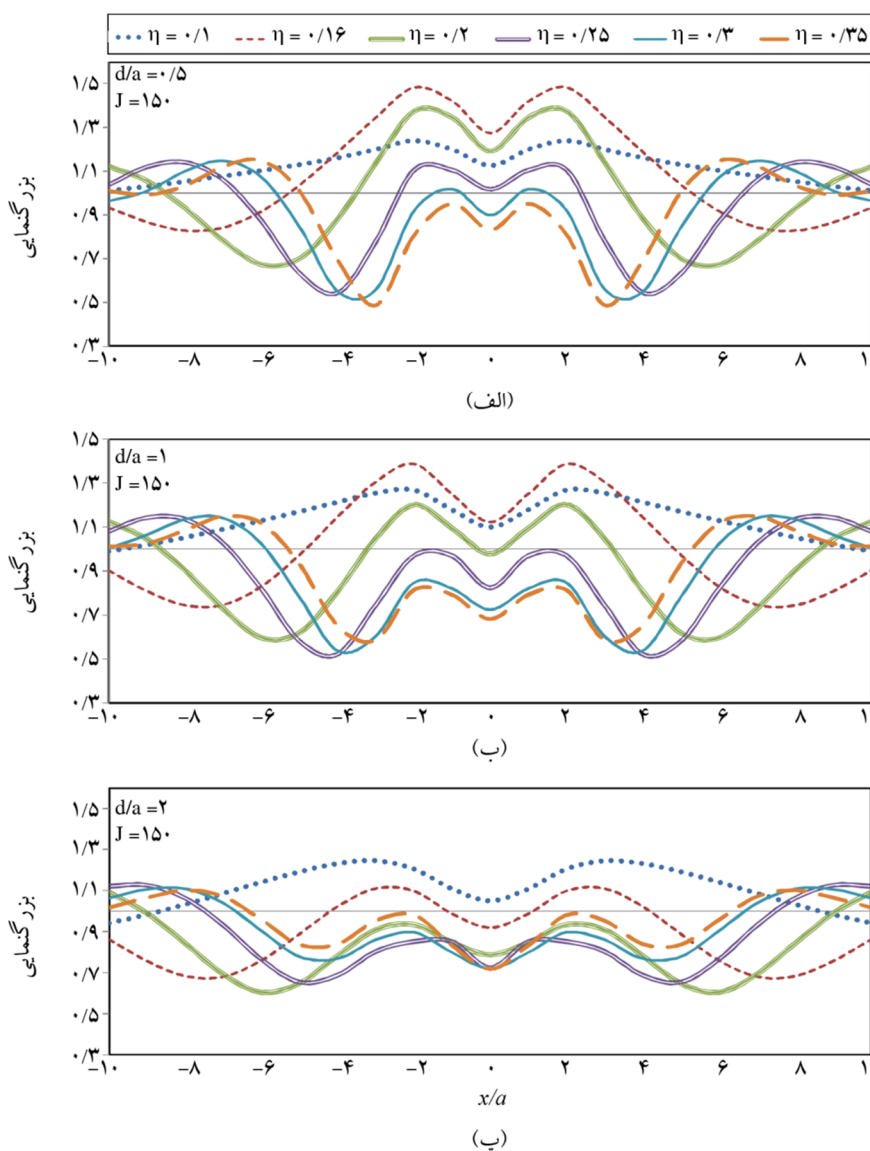


(ب) پاسخ روی سطح زمین

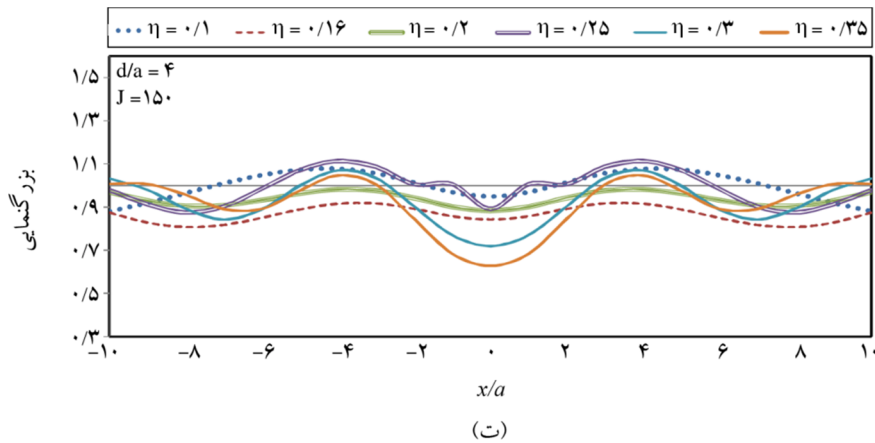
شکل (۳): مقایسه نتایج مدل عددی با مطالعات لوکو و دی بارز [۱۶] ($J = \infty$, $\eta = 0.5$, $d/a = 1/5$)

برای $1/5$ برابر نسبت به میدان آزاد رسیده است شکل (۵-الف). برای نسبت عمق‌های $(d/a=1)$ و $(d/a=1/5)$ بزرگنمایی حداکثر به ترتیب در محدوده‌ی $(1/5 < x/a < 2/5)$ و $(2/5 < x/a < 3/5)$ رخ داده و مقدار آن به ترتیب $1/5$ و $1/3$ می‌باشد، شکل‌های (۵-ب) و (۵-پ). با عمیق‌تر شدن تونل نسبت به سطح زمین $(d/a=4)$ ، مقادیر بزرگنمایی لرزه‌ای به‌طور محسوسی کاهش می‌یابند. در این شرایط بیشترین مقدار بزرگنمایی $1/1$ حاصل شده که در فواصل دورتر از مرکز سازه‌ی زیرزمینی و در محدوده‌ی $(1/5 < x/a < 2/5)$ در سطح زمین روی داده است، شکل (۵-ت). در واقع با نزدیک‌تر شدن تونل‌ها به سطح زمین

جعبه‌ای شکل در اعماق مختلف با فرکانس‌های بی‌بعد متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوی بزرگنمایی به‌گونه‌ای است که همواره در مرکز سطح زمین $(x/a=0)$ ، پاسخ‌ها از کناره‌های تونل کمتر بوده به‌طوری‌که در این نقطه، در برخی فرکانس‌ها کوچک‌نمایی و در برخی دیگر بزرگنمایی ایجاد شده است. همچنین حداکثر مقادیر بزرگنمایی با فاصله گرفتن از مرکز تقارن تونل و در کناره‌های تونل در سطح زمین روی می‌دهد. در شرایطی که سازه زیرزمینی بسیار سطحی است $(d/a=0/5)$ ، بیشترین بزرگنمایی در محدوده‌ی $(1 < x/a < 2)$ پدیدار شده است و مقدار آن در بیشترین حالت تا



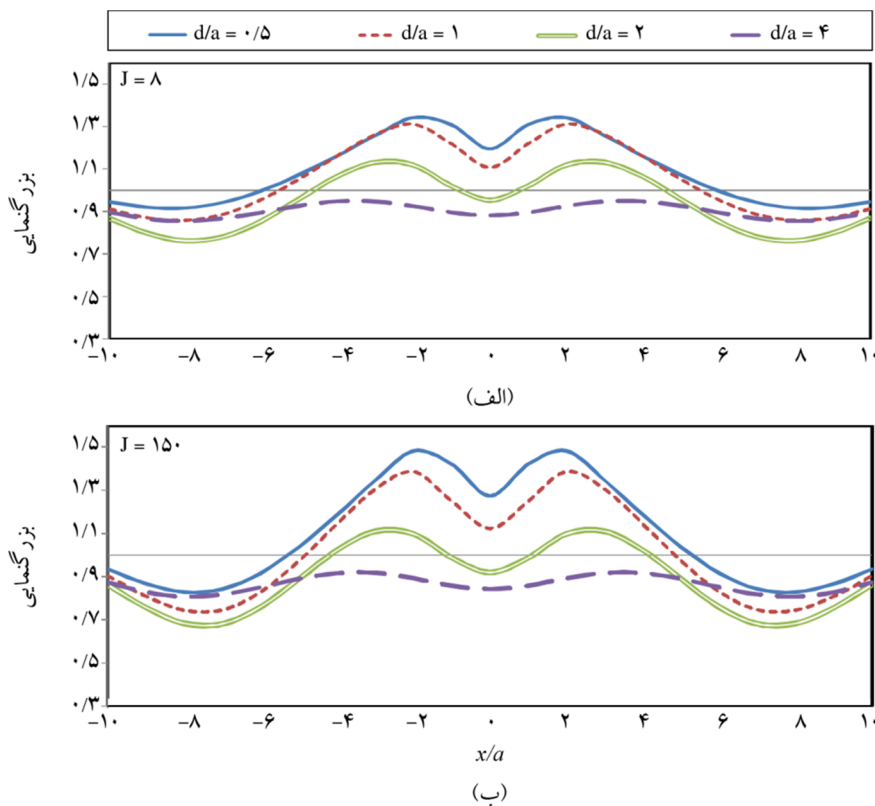
شکل (۵): تغییرات الگوی بزرگنمایی در سطح زمین تحت تأثیر حضور تونل منفرد برای نسبت اعماق مختلف



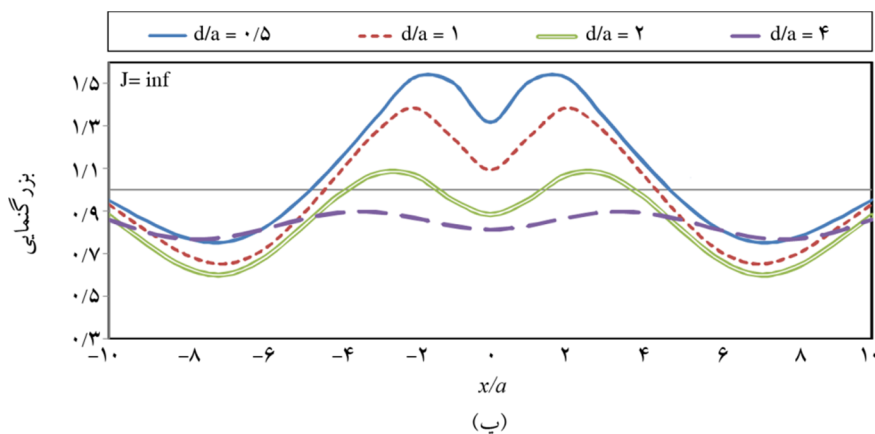
ادامه شکل (۵)

میزان ناحیه حبس امواج در بخش بالایی تونل و سطح زمین کمتر شده و پاسخ لرزه‌ای سطح زمین با شدت بیشتری تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ به عبارت دیگر فضای بخش بالایی تونل و سطح زمین و حبس امواج متفرق شونده در این ناحیه می‌تواند علت افزایش مقادیر بزرگنمایی امواج باشد. همچنین در فرکانس‌های بی‌بعد بالاتر از ۰/۲۵، اثر کوچک‌نمایی در پاسخ‌ها کاملاً مشهود می‌باشد؛ به عبارت دیگر در طول موج‌های بزرگ‌تر نسبت به ابعاد تونل

پاسخ‌های بیشتری در سطح زمین حاصل شده است [۱۹-۲۳]. به‌طور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهند که تأثیر حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل بر الگوی بزرگنمایی پاسخ در سطح زمین در محدوده‌ی $(10 \leq x/a < 10)$ قابل مشاهده بوده و در فواصل دور دست $(x/a > 10)$ پاسخ زمین به حالت میدان آزاد نزدیک می‌شود. سازه‌های جعبه‌ای شکل معمولاً در اعماق کم و به صورت سطحی ساخته می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود



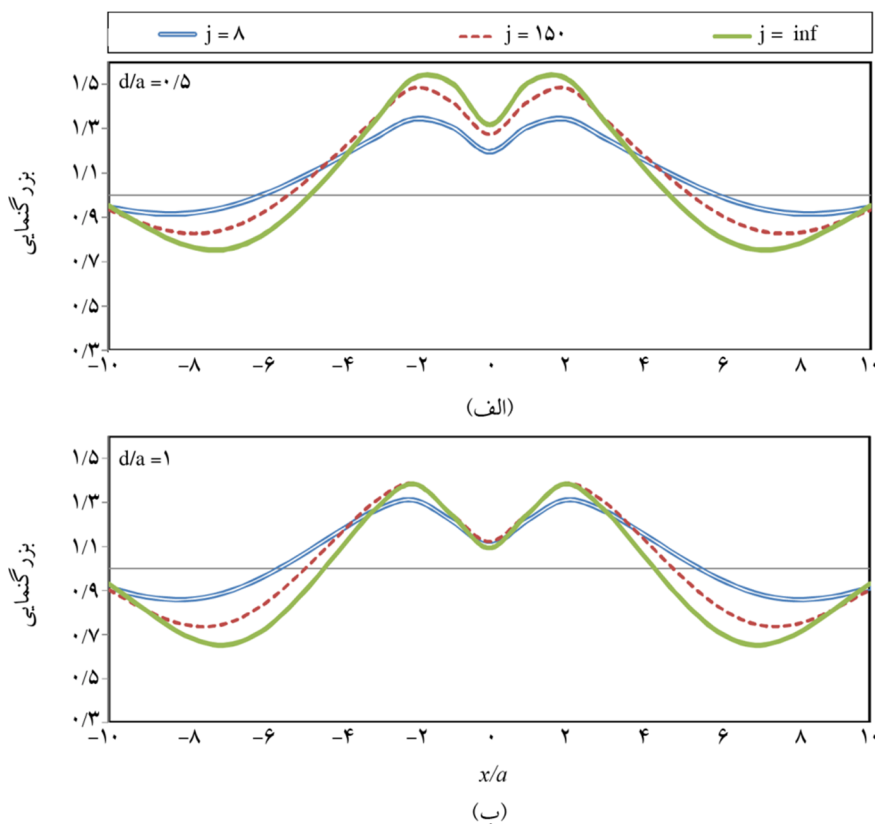
شکل (۶): اثر عمق سازه زیرزمینی بر تغییرات الگوی بزرگنمایی سطح زمین ($\eta=0.16$)



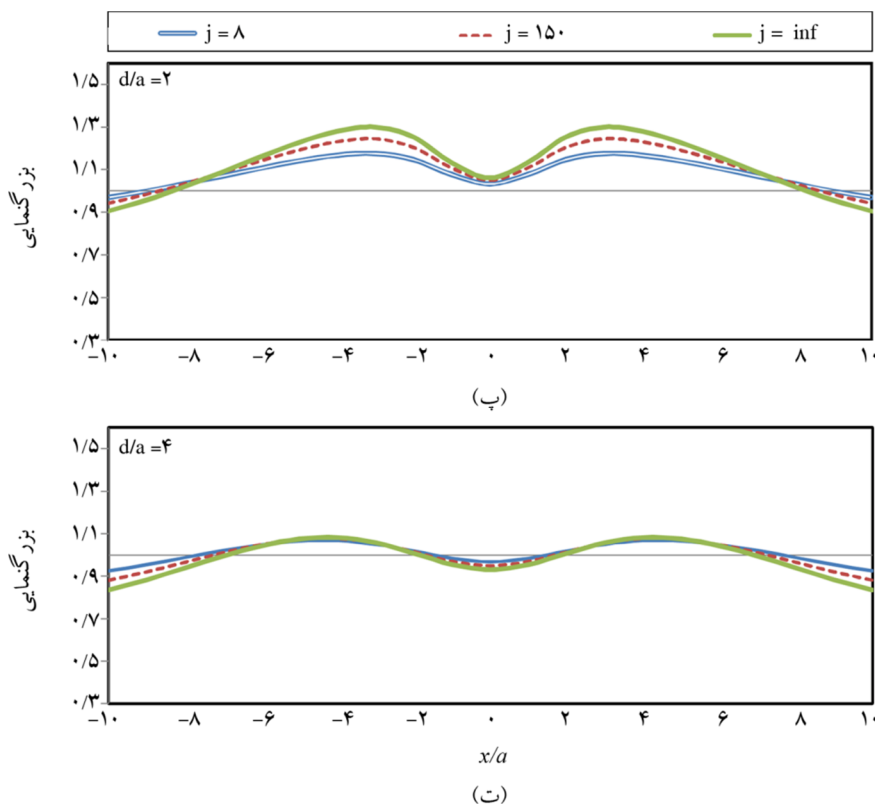
شکل ۶) ۱۵امه

تونل بر بزرگنمایی پاسخ سطح زمین ناچیز است. در شکل (۷) به بررسی اثر انعطاف پذیری پوشش تونل‌های زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین پرداخته شده است. در این راستا از سه مقدار متفاوت برای نسبت انعطاف‌پذیری پوشش $(J=8, 150, \infty)$ استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقادیر بزرگنمایی در حالت تونل بدون پوشش $(J = \infty)$

با سطحی‌تر شدن این سازه‌ها، مقدار بزرگنمایی در سطح زمین افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین بزرگنمایی برای نسبت عمق $(d/a = 0.5)$ پدیدار شده است. با افزایش عمق سازه‌ی زیرزمینی نه تنها از مقدار بزرگنمایی کاسته می‌شود بلکه محل حداکثر بزرگنمایی از مرکز تونل دورتر می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که برای تونل‌های با نسبت عمق $(d/a > 4)$ ، تأثیر حضور



شکل (۷): اثر انعطاف‌پذیری پوشش سازه زیرزمینی بر تغییرات الگوی بزرگنمایی سطح زمین $(\eta = 0.16)$



ادامه شکل (۷)

طبیعی سیستم (افزایش پی‌ریود طبیعی) می‌باشد. افزایش عمق تونل منجر به روی دادن حداکثر بزرگنمایی در فرکانس‌های کوچک‌تر شده که به معنی کاهش فرکانس طبیعی سیستم با افزایش عمق است. از طرفی تأثیر افزایش عمق سازه‌ی زیرزمینی بر کاهش مقدار بزرگنمایی نیز قابل مشاهده می‌باشد.

۴-۲- الگوی بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین تحت تأثیر

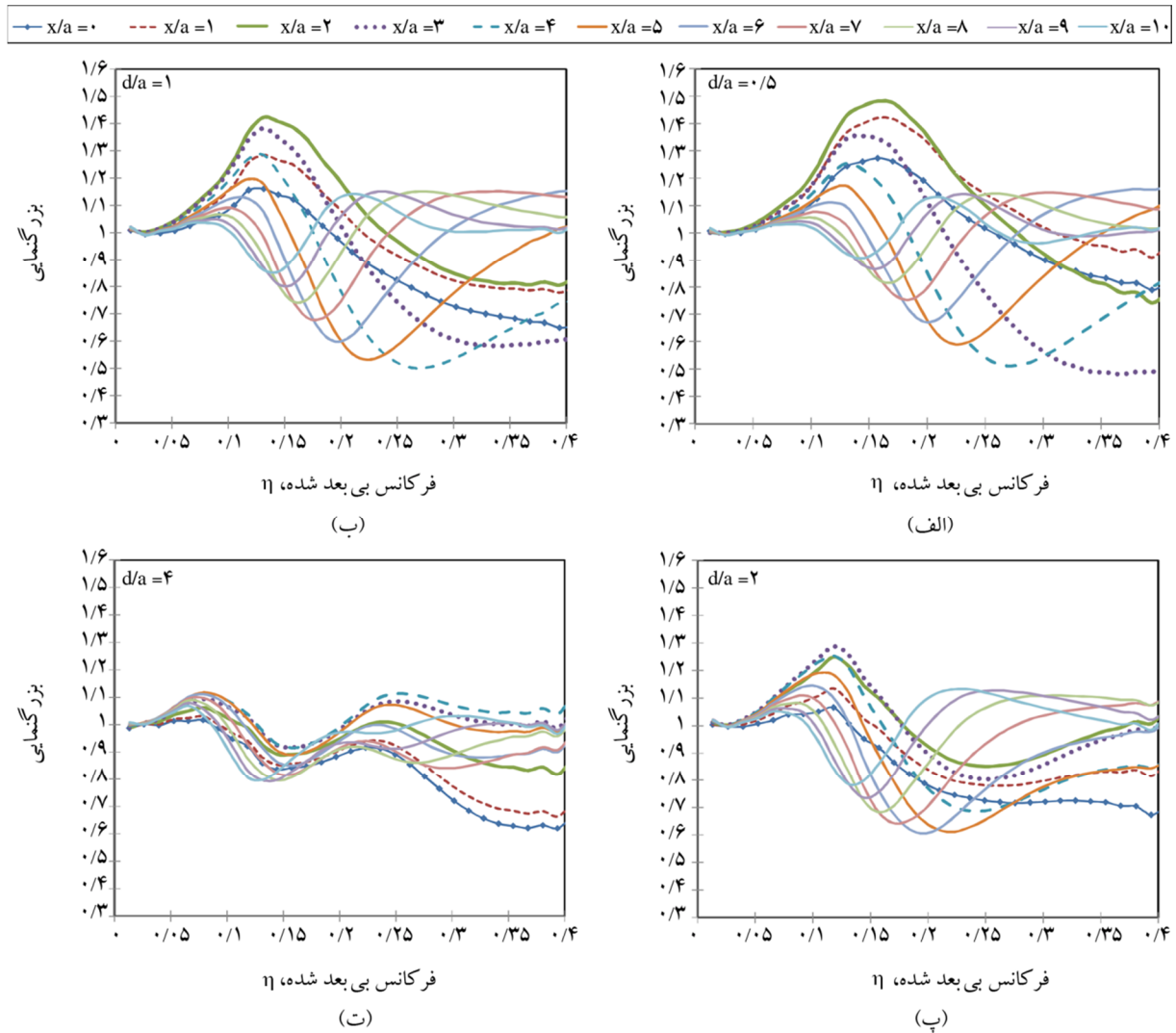
حضور تونل‌های دوقلو

شکل (۹) الگوی بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین تحت تأثیر حضور تونل‌های زیرزمینی دوقلو برای نسبت فواصل مختلف افقی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این شرایط الگوی بزرگنمایی کاملاً متفاوت از تونل منفرد می‌باشد به گونه‌ای که در بیشتر فرکانس‌ها، حداکثر بزرگنمایی در مرکز تقارن ($x/a = 0$)، ایجاد شده است. همچنین در مقادیر بزرگنمایی افزایش محسوسی نسبت به حالت حضور سازه زیرزمینی منفرد قابل مشاهده است. همچنین در محدوده‌ی فرکانس بی‌بعد

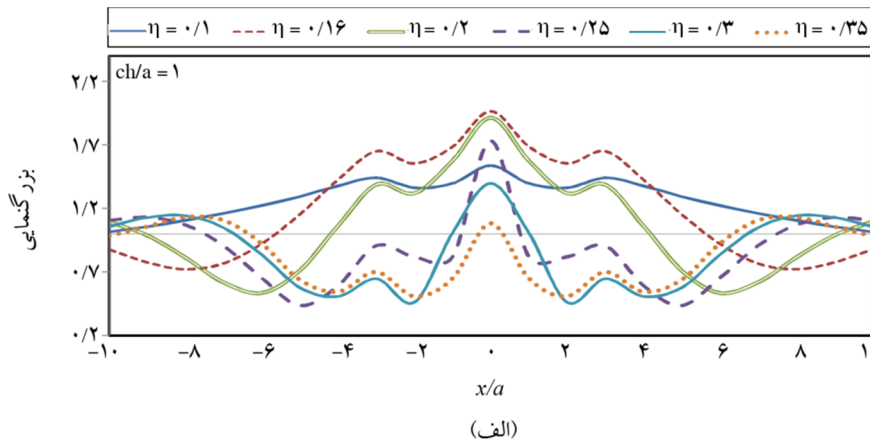
رخ داده و با کاهش انعطاف‌پذیری پوشش تونل، از مقدار بزرگنمایی کاسته می‌شود. این در حالی است که برای تونل‌های سطحی تر ($d/a = 0.5, 1$) اثر حضور پوشش تونل در تغییر مقدار بزرگنمایی مشهود بوده و با افزایش عمق تونل اثر آن کاهش می‌یابد به طوری که در حالت سازه‌ی زیرزمینی عمیق ($d/a = 4$)، تقریباً اثر حضور پوشش ناچیز و قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

همچنین در شکل (۸) نمودارهای تغییرات بزرگنمایی در حوزه‌ی فرکانس برای نقاط مختلف سطح زمین و برای نسبت عمق‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای تونل‌های سطحی ($d/a = 0.5, 1$)، بیش‌ترین بزرگنمایی‌ها در محدوده‌ی فرکانس بی‌بعد ($0.12 < \eta < 0.18$) روی داده است و مقدار آن در بیشترین حالت به $1/5$ می‌رسد. در واقع حضور سازه‌ی زیرزمینی موجب تغییر سختی سیستم و در نتیجه تغییر فرکانس طبیعی آن می‌شود. دلیل این موضوع کاهش سختی لایه‌ی خاک در اثر وجود حفره و در نتیجه‌ی کاهش فرکانس

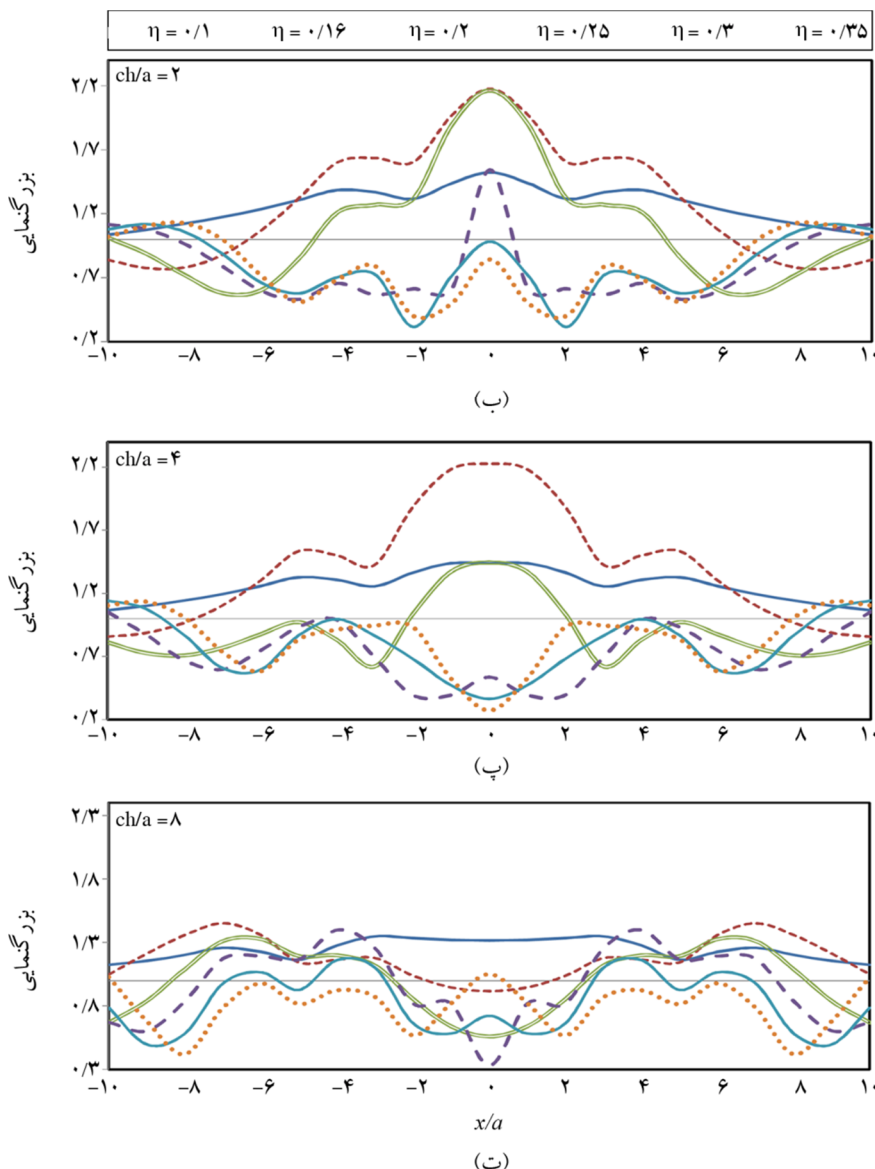
بالاتر از 0.3 ، اثر کوچک‌نمایی امواج را نیز می‌توان مشاهده نمود. نسبت به حالت منفرد، می‌تواند محدوده‌ی وسیع‌تری از سطح به‌طور کلی حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل دوقلو زمین را تأثیر قرار دهد.



شکل (۸): تأثیر فرکانس بی‌بعد بر تغییرات پاسخ سطح زمین در نقاط مختلف ($J=150$)



شکل (۹): تغییرات الگوی بزرگنمایی در سطح زمین تحت تأثیر حضور سازه‌ی زیرزمینی دوقلو ($J=150$, $d/a=0.5$)

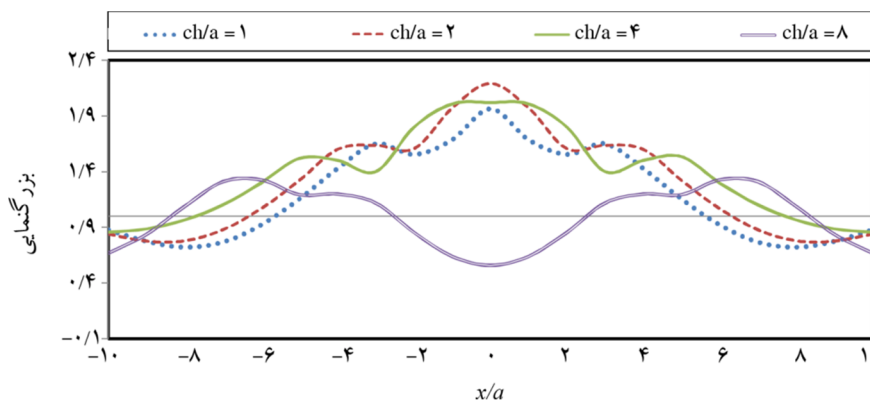


ادامه شکل (۹)

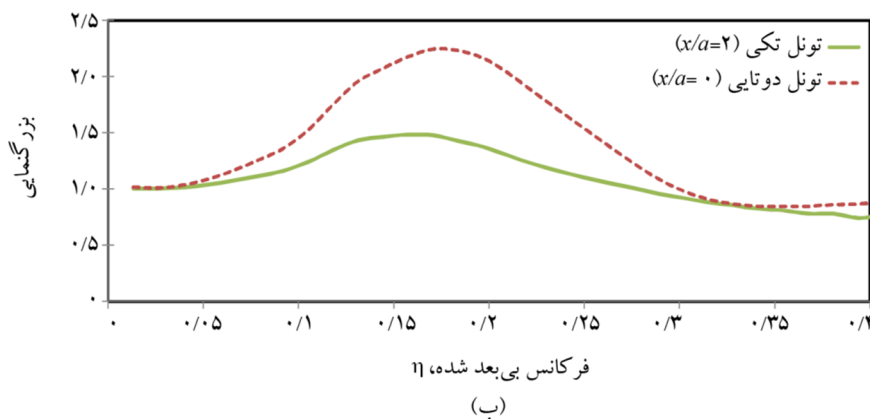
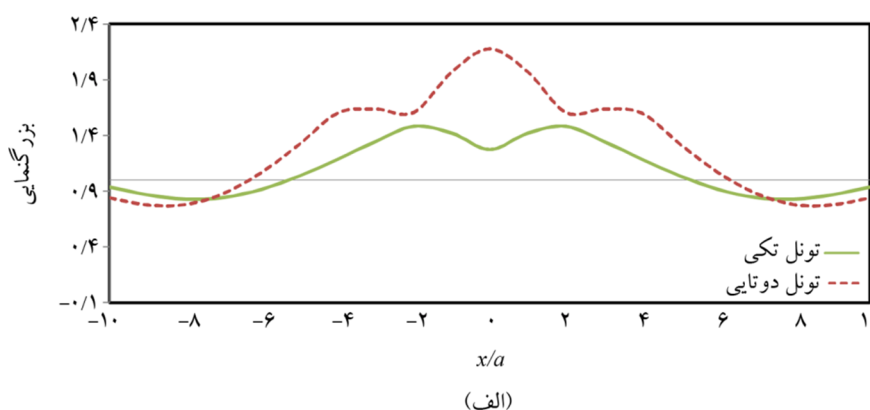
نظری اثر این سازه‌ها بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را به خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل رؤیت است با افزایش فواصل افقی تونل‌ها شکل الگوی بزرگنمایی به اطراف گسترش می‌یابد و در فواصل خیلی زیاد ($ch > 8a$) اثر اندرکنشی تونل‌ها نسبت به هم کمتر شده است و در نتیجه الگوی بزرگنمایی مشابه تونل منفرد خواهد شد.

همچنین نحوه تغییر بزرگنمایی برای سازه‌ی زیرزمینی منفرد و دوقلو در شکل (۱۱) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که قابل مشاهده است با دوقلو شدن تونل‌ها نه تنها الگوی بزرگنمایی تغییر می‌کند، بلکه مقدار آن نیز افزایش محسوسی می‌یابد.

در شکل (۱۰) نحوه‌ی تأثیرگذاری فواصل افقی تونل‌های دوقلو بر مقدار بزرگنمایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که قابل مشاهده است در حالتی که $ch = 2a$ (در فواصل نزدیک بین تونل‌ها)، بیشترین بزرگنمایی‌ها ایجاد شده است. در این حالت بیشترین پاسخ لرزه‌ای به بیش از دو برابر حالت میدان آزاد رسیده است. در واقع حضور تونل‌ها در نزدیکی یکدیگر سبب ایجاد یک فضای بزرگ‌تری برای حبس و پراکنش امواج در ناحیه‌ی بین بالای تونل‌ها و سطح زمین می‌شوند که موجب افزایش چشمگیر پاسخ‌های به‌دست آمده شده است. در حقیقت این مقدار بزرگنمایی، اهمیت در



شکل (۱۰): تأثیر فواصل افقی سازه‌های زیرزمینی دوقلو بر تغییرات پاسخ لرزه‌ای سطح زمین ($J=150$, $\eta=0.16$, $d/a=0.5$)



شکل (۱۱): مقایسه تأثیر تونل منفرد با دوقلو بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین با تغییرات فرکانس بی بعد ($Ch/a=2$, $J=150$, $\eta=0.16$, $d/a=0.5$)

۵- طیف پاسخ لرزه‌ای سطح زمین بر اساس زلزله‌های واقعی

شتاب‌نگاشت واقعی زلزله، تأثیر حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل بر طیف پاسخ لرزه‌ای سطح زمین ارزیابی شده است. با توجه به نامنظم بودن رکوردهای زلزله و محتوای فرکانسی متفاوت آنها، لازم است که قبل از انجام تحلیل‌های دینامیکی، طیف زلزله‌ها به یک طیف طرح خاص (به‌عنوان مثال طیف آیین‌نامه) سازگار شده تا از لحاظ محتوای فرکانسی یکپارچه و سازگار شوند. برای این منظور ابتدا رکوردهای زلزله

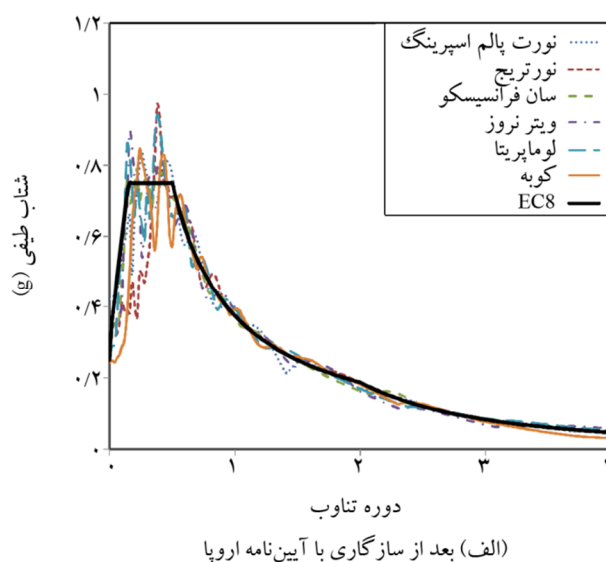
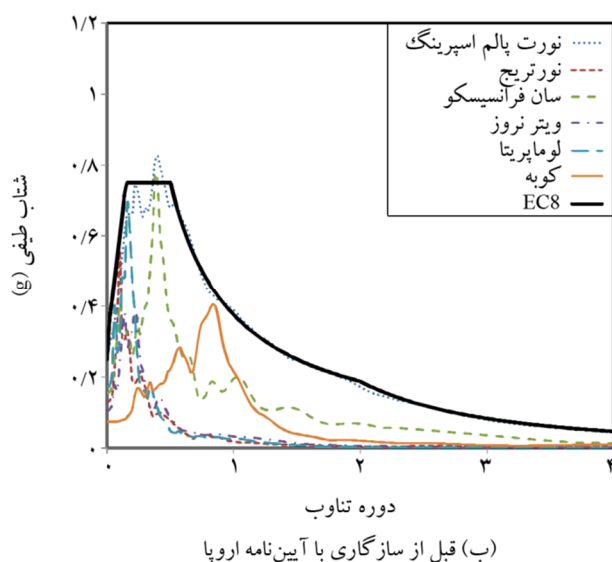
در بخش‌های قبل با در نظرگیری تحریک لرزه‌ای از جنس موجک ریکر، تأثیر پارامترهای مختلف بر الگوی بزرگنمایی در قالب مطالعه پارامتری نشان داده شد. از آنجا که طیف پاسخ مشکل از حداکثر پاسخ‌های یک سازه‌ی یک درجه آزاد با فرکانس‌های متفاوت می‌باشد، در بخش حاضر با انتخاب هفت

لرزه‌ای ناشی از اعمال هفت زلزله‌ی انتخابی را نشان می‌دهد. در تمامی این نمودارها، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در حضور سازه زیرزمینی منفرد و دوقلو به خوبی قابل مقایسه با پاسخ میدان آزاد بوده که حاکی از افزایش قابل توجه پاسخ سطح زمین ناشی از حضور سازه‌ی زیرزمینی می‌باشد. همچنین تونل‌های دوقلو سبب ایجاد بزرگنمایی‌های بزرگ تری نسبت به تونل منفرد شده‌اند. حضور سازه‌ی زیرزمینی، محدوده‌ی دوره تناوب بی‌بعد ۰ تا ۲۰ را تحت تأثیر قرار داده است که متناظر با محدوده‌ی دوره تناوب ۰ تا ۱ ثانیه می‌باشد. همچنین در محدوده‌ی دوره تناوب بی‌بعد بالاتر از ۳۰ (متناظر با دوره تناوب ۱/۵ ثانیه)، حضور سازه‌ی زیرزمینی تأثیری بر پاسخ زمین نداشته است.

از پایگاه‌های ایستگاه‌های لرزه‌ای منطبق بر مشخصات لرزه‌ای خاک نوع ۱ گروه B آیین‌نامه اروپا انتخاب شده و سپس طیف زلزله‌های منتخب به طیف خاک نوع ۱ گروه B استاندارد این آیین‌نامه منطبق (سازگار) شده است. در جدول (۲) مشخصات زلزله‌های انتخابی نشان داده شده است. همچنین شکل (۱۲) طیف پاسخ شتاب زلزله‌های انتخاب شده، قبل و بعد از سازگاری^۸ با طیف استاندارد اروپا را نشان می‌دهد. در شکل (۱۳ الف تا ج)، طیف پاسخ شتاب سطح زمین در برابر دوره‌ی تناوب بی‌بعد (معکوس فرکانس بی‌بعد)، برای هفت شتاب‌نگاشت انتخابی در نقاط متناسب با حداکثر بزرگنمایی در سطح زمین ارائه شده است. همچنین شکل (۱۳ ح-ح) میانگین پاسخ

جدول ۲: مشخصات زلزله‌های انتخابی جهت بررسی تغییرات طیف پاسخ لرزه‌ای

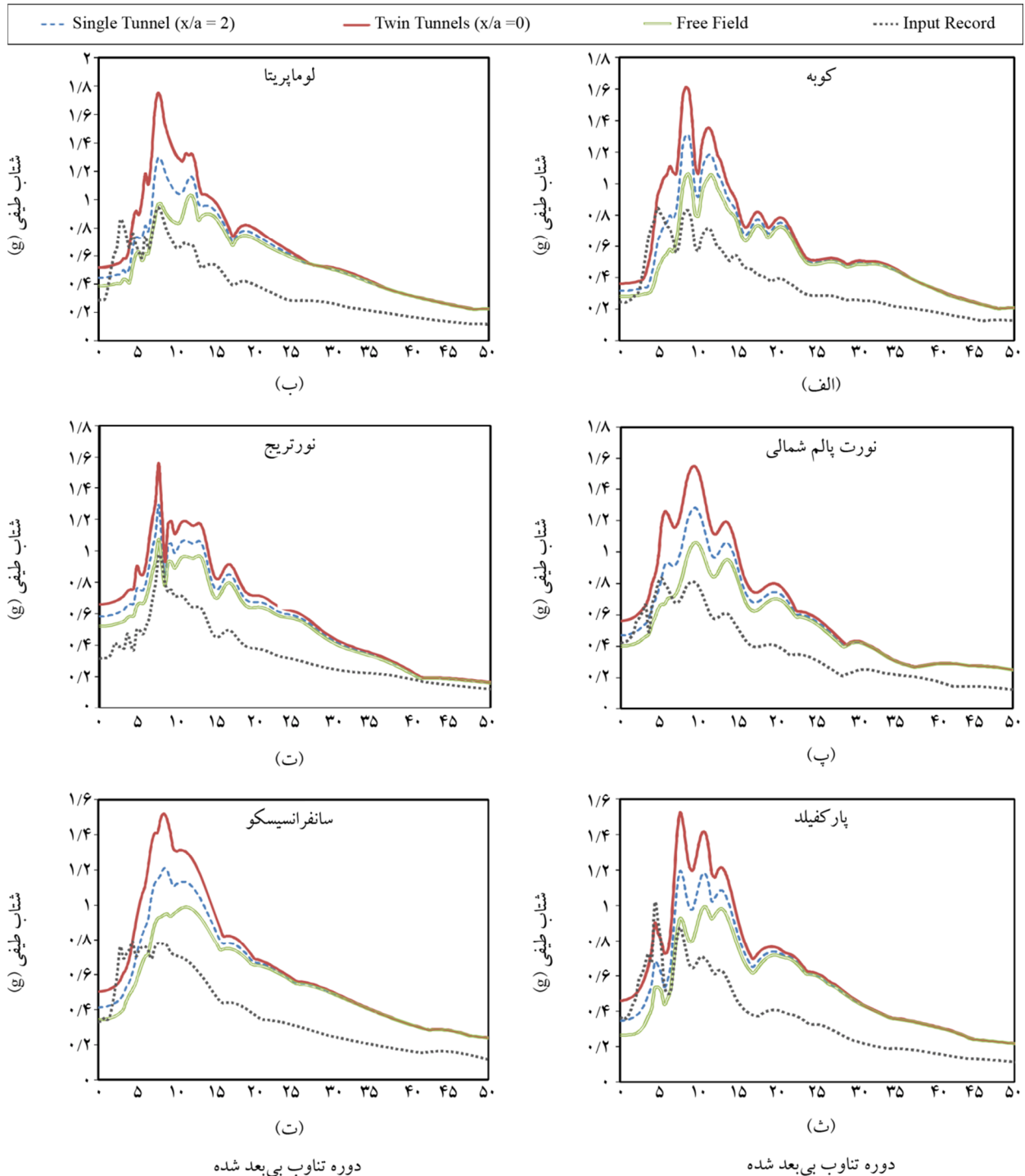
نام زلزله	نام ایستگاه	سال وقوع	فاصله از گسل (کیلومتر)	بزرگای زلزله (ریشتر)
کوبه	TOT	۱۹۹۵	۱۱۹	۶/۹
لوماپریتا	Gilory Station	۱۹۸۹	۹/۶۴	۶/۹۳
نورت پالم اسپرینگ	Silent Station Valley	۱۹۸۶	۱۹/۵	۶/۰۶
نورتریچ	Station Vasquez	۱۹۹۴	۲۷/۷	۶/۶۹
پارکفیلد	Temblorpre	۱۹۹۶	۱۱/۷	۶/۱۹
سان فرانسیسکو	gate Park Golden	۱۹۵۷	۱۱/۱۳	۵/۲۸
ویتر نروز	Station Mt Wilson	۱۹۸۷	۲۲/۴	۵/۹۹



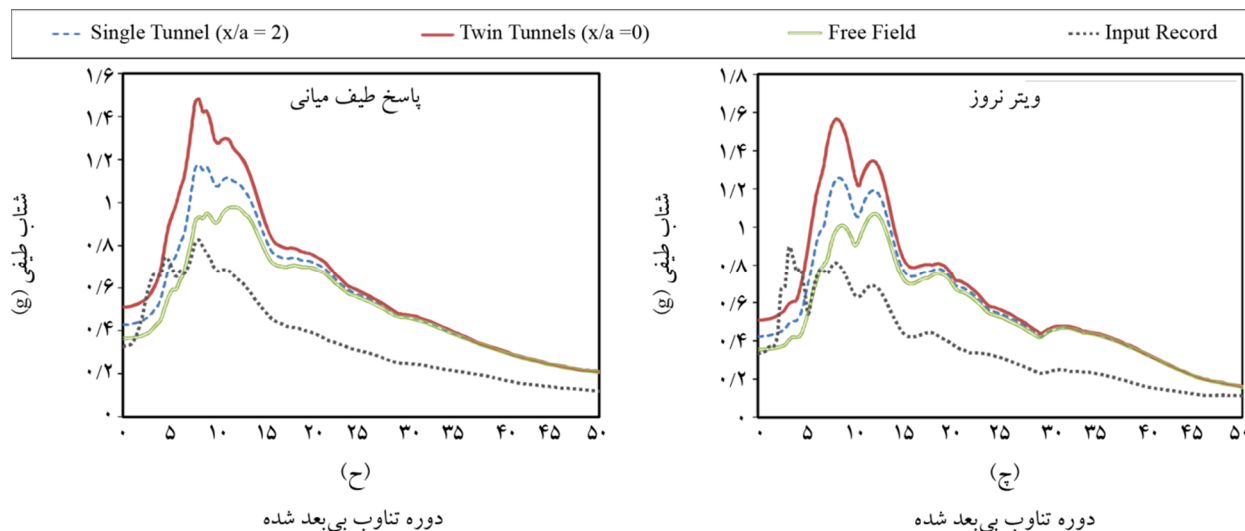
شکل (۱۲): طیف پاسخ شتاب زلزله‌های انتخاب شده به عنوان تحریک ورودی، قبل و بعد از سازگاری با طیف استاندارد اروپا (Eurocode) برای زمین نوع ۱ و گروه B

آیین‌نامه‌ها در نظر گرفته نشده است. در واقع در تمامی دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، اثر زمین به صورت یک‌بعدی بدون لحاظ نمودن وجود فضاهای زیرزمینی در طراحی‌های سازه‌های رو سطحی لحاظ می‌شود.

در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل کم‌عمق و به خصوص تونل‌های دوقلو می‌تواند اثر غیر قابل اغمازی بر بزرگنمایی پاسخ سطح زمین داشته باشند که این اثر در طیف طرح ساختگاه هیچ‌کدام از



شکل (۱۳): طیف پاسخ شتاب سطح زمین در برابر دوره‌ی تناوب بی‌بعد (معکوس فرکانس بی‌بعد)، برای هفت شتاب‌نگاشت انتخابی در نقاط متناسب با حداکثر بزرگنمایی در سطح زمین ($d/a = 0/5$ و $J = 150$)



ادامه شکل (۱۳)

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

۳. با سطحی تر شدن تونل‌ها نسبت به سطح زمین، ناحیه حبس امواج در بخش بالایی تونل و سطح زمین کوچک‌تر شده و به دلیل حبس امواج متفرق شونده در این ناحیه، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین با شدت بیشتری تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در نتیجه مقدار بزرگنمایی در سطح زمین افزایش می‌یابد. در مقابل، با افزایش عمق تونل نه تنها از مقدار بزرگنمایی کاسته می‌شود بلکه محل حداکثر بزرگنمایی نیز از مرکز تقارن دورتر می‌شود. همچنین با افزایش عمق تونل منجر به رخ دادن حداکثر بزرگنمایی در فرکانس‌های بعد کوچک‌تر می‌شود که به معنی کاهش فرکانس طبیعی سیستم با افزایش عمق سازه زیرزمینی می‌باشد.

۴. با کاهش انعطاف پذیری پوشش سازه‌ی زیرزمینی (لاینینگ)، از مقدار بزرگنمایی کاسته می‌شود. این در حالی است که برای تونل‌های سطحی تر ($d/a=0.5$) اثر حضور پوشش تونل در تغییر مقدار بزرگنمایی مشهود بوده و با افزایش عمق تونل اثر آن کاهش می‌یابد، به طوری که در حالت سازه‌ی زیرزمینی عمیق ($d/a=4$)، تقریباً اثر حضور پوشش ناچیز و قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

۵. بررسی اثر فواصل افقی تونل‌های دوقلو بر مقدار بزرگنمایی پاسخ‌ها نشان می‌دهد که در حالتی که فاصله‌ی تونل‌ها نزدیک

در این تحقیق، به کمک یک مدل عددی تفاضل محدود اعتبارسنجی شده، تأثیر سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل منفرد و دوقلو بر الگوی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در قالب یک مطالعه‌ی پارامتری مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه‌ی پارامتری شامل بررسی تغییرات عمق، انعطاف پذیری پوشش، محتوای فرکانسی تحریک و فاصله‌ی تونل‌های دوقلو می‌باشد. در ادامه با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های واقعی زلزله، تأثیر حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل بر طیف پاسخ سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱. تحت تأثیر حضور سازه‌ی زیرزمینی منفرد، پاسخ‌های به دست آمده در کناره‌های تونل نسبت به مرکز تونل در سطح زمین بیشتر بوده به طوری که در این نقطه، در محدوده‌ی فرکانس‌های بزرگ، کوچک‌نمایی رخ داده و در محدوده‌ی فرکانس‌های کوچک، بزرگنمایی روی می‌دهد.

۲. تحت تأثیر حضور تونل دوقلو الگوی بزرگنمایی نسبت به تونل منفرد تغییر می‌کند به گونه‌ای که در اکثر فرکانس‌ها حداکثر بزرگنمایی در مرکز تقارن ($x/a=0$) در سطح زمین ایجاد می‌شود. همچنین در مقایسه با حالت حضور تونل منفرد، مقدار بزرگنمایی‌ها افزایش محسوسی می‌یابند.

3. Youd, T.L. and Beckman, C.J. (1996) *Highway culvert performance during past earthquakes. National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo*. Technical Report NCEER-96-0015.
4. Gizzi, F.T. and Masini, N. (2006) Historical damage pattern and differential seismic effects in a town with ground cavities: a case study from Southern Italy. *Engineering Geology*, **88**, 41-58.
5. Grasso, S. and Maugeri, M. (2009) The road map for seismic risk analysis in a Mediterranean city. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **29**, 1034-1045.
6. Lee, V.W. (1977) On deformations near a circular underground cavity subjected to incident plane SH-waves. *Proceedings of the Application of Computer Methods in Engineering Conference*. Los Angeles, California, U.S.A., II, 951-62.
7. Lee, V.W. and Trifunac, M.D. (1979) Response of tunnels to incident SH-waves. *Journal of Engineering Mechanics Divison*, **105**(4), 643-59.
8. Lee, V.W. (1988) Three-dimensional diffraction of elastic waves by a spherical cavity in an elastic half-space. *International Journal of Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **7**(3), 149-161.
9. Lee, V.W. and Karl, J. (1993) Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities. *International Journal of Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **11**(8), 445-56.
10. Manoogian, M.E. and Lee, V.W. (1996) Diffraction of SH-waves by sub-surface inclusions of arbitrary shape. *Journal of Engineering Mechanics*, **122**, 122-129.
11. Lee, V.W., Chen, S., and Hsu, I.R. (1999) Antiplane diffraction from canyon above a subsurface unlined tunnel. *Journal of Engineering Mechanics*, **25**(6), 668-675.
12. Datta, S.K. and Shah, A.H. (1982) Scattering of SH waves by embedded cavities. *Wave Motion*, **4**(3), 265-283.
13. Alielahi, H., Kamalian, M., Adampira, M. (2016) A BEM investigation on the influence of underground cavities on the seismic response of

است، بیشترین بزرگنمایی‌ها قابل مشاهده است. در واقع حضور تونل‌ها در نزدیکی یکدیگر سبب ایجاد یک فضای بزرگ‌تری برای حبس و پراکنش امواج در ناحیه‌ی بین بالای تونل‌ها و سطح زمین می‌شود که موجب افزایش چشمگیر پاسخ‌های به‌دست آمده خواهد شد. همچنین با افزایش فاصله بین تونل‌ها، اثر اندرکنشی آنها نسبت به یکدیگر کمتر شده و الگوی بزرگنمایی مشابه تونل منفرد می‌باشد.

۶. طیف پاسخ لرزه‌ای سطح زمین ناشی از حضور سازه‌ی زیرزمینی منفرد و دوقلو، تحت تأثیر هفت رکورد زلزله ارائه شد. بررسی طیف‌ها نشان داد که حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل کم‌عمق و به‌خصوص تونل‌های دوقلو می‌تواند اثر چشم‌گیری بر بزرگنمایی پاسخ سطح زمین داشته باشند که این تأثیر به‌خصوص در محدوده‌ی دوره تناوب بین ۰ تا ۱ ثانیه محسوس‌تر است.

در انتها، مطالعه دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای نشان می‌دهد که در تمامی آنها اثر زمین به‌صورت یک‌بعدی و بدون لحاظ نمودن وجود فضاها و زیرزمینی در طراحی‌های سازه‌های رو سطحی در نظر گرفته می‌شود. از طرفی نتایج تحقیق حاضر و همچنین مطالعات گذشته اثر غیر قابل اغماض حضور سازه‌های زیرزمینی بر تغییر پاسخ سطح زمین را نمایان می‌سازند. لذا توصیه می‌شود که آیین‌نامه‌های ساختمانی و دستورالعمل‌های پهنه‌بندی لرزه‌ای به اثرات حضور سازه‌های زیرزمینی (به‌خصوص برای تونل‌های سطحی) در طراحی لرزه‌ای سازه‌های رو سطحی توجه ویژه‌ای داشته باشند.

مراجع

1. Nakamura, S., Yoshida, N., and Iwatate, T. (1996) *Damage to Daikai Subway Station During the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake and Its Investigation*. Japan Society of Civil Engineers, Committee of Earthquake Engineering, 287-295.
2. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., and Yao, J.I. (2001) Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **16**, 247-293

- tunnel on the ground surface acceleration. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **44**, 10-22.
23. Baziar, M.H., Ghalanderzadeh, A., and Rabeti Moghadam, M. (2015) Tehran subway tunnel effect on the seismic response of the ground surface with linear soil behavior: an experimental and numerical study. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **2**(3), 15-36.
24. Wang, J.N. (1993) *Seismic Design of Tunnels: A Simple State of the Art Design Approach*. Parsons Brinckerhoff Inc., New York.
25. Ricker, N. (1960) The form and laws of propagation of seismic wavelets. *Geophysics*, **18**(1), 10-40.
26. Itasca Consulting Group (2014) *FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 7.0 User's Guide*. Minneapolis, Itasca.
27. Kuhlemeyer R.L. and Lysmer J. (1973) Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, **99**(SM5), 421-427.
28. Kramer, L.S. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- canyons. *Acta Geotechnica*, **11**(2), 391-413.
14. Alielahi, H., Adampira, M. (2016) Effect of twin-parallel tunnels on seismic ground response due to vertically in-plane waves. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **85**, 67-83
15. Crichlow, J.M. (1982) The effect of underground structure on seismic motions of the ground surface. *Geophys J R Astron Soc*, **70**, 563-575.
16. Luco, J.E. and De Barros, F.C.P. (1994) Dynamic displacements and stresses in the vicinity of a cylindrical cavity embedded in a halfspace. *Earthquake Engineering Structural Dynamic*, **23**, 321-340.
17. Rodriguez-Castellanos, A., Sanchez-Sesma, F.J., Luzon, F., and Martin, R. (2006) Multiple scattering of elastic waves by subsurface fractures and cavities. *Bulletin of Seismological Society of America*, **96**(4A), 1359-1374.
18. Yiouta-Mitra, P., Kouretzis, G., Bouckovalas, G., and Sofianos, A. (2007) Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures. *Dynamic Response and Soil Properties*. Geo-Denver: New Peaksin Geotechnics.
19. Smerzini, C., Aviles, J., Sanchez-Sesma, F.J, and Paolucci, R. (2009) Effect of Underground Cavities on Surface Earthquake Ground Motion under SH Wave Propagation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**(12), 1441-1460.
20. Alielahi, H., Kamalian, M., and Adampira, M. (2015) Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically Propagating SV and P waves using BEM. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **71**, 63-79.
21. Alielahi, H. and Adampira, M. (2016) Site-specific response spectra for seismic motions in half-plane with shallow cavities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **80**, 163-167.
22. Baziar, M.H., Rabeti Moghadam, M., Kim, D.S., and Choo, Y.W. (2014) Effect of underground

اصطلاحات فنی

Lining	۱- پوشش
Amplification	۲- بزرگنمایی
Free-Field	۳- میدان آزاد
Eurocode	۴- آیین‌نامه اروپایی
Liner	۵- لاینر
Glued Interface	۶- رابط اتصال
Quiet Boundary	۷- مرز آرام (مرز جاذب)
Matching	۸- سازگاری