

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

مطالعه حاضر تأثیر فضای زیرزمینی با هندسه سه‌بعدی بر پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین را بررسی می‌کند. در این تحقیق از کد تفاضل محدود 3D FLAC استفاده شده است که با مطالعات پیشین صحت‌سنجی گردیده است. امواج SV هارمونیک با فرکانس‌های مختلف در تحلیل‌ها به کار گرفته شده‌اند. پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین در حضور فضای سه‌بعدی با پاسخ میدان آزاد مقایسه شده و نتایج به صورت ضریب بزرگ‌نمایی در سطح زمین ارائه گردیده است. از مطالعات پارامتری نتیجه‌گیری شد که ضریب بزرگ‌نمایی در سطح زمین به شدت تحت تأثیر ابعاد فضای زیرزمینی یا پارامتر نسبت طول به عرض (L/W) قرار دارد که در آن L و W به ترتیب طول و عرض فضای زیرزمینی هستند. الگوهای بزرگ‌نمایی و مقادیر آن‌ها برای مدل‌های با نسبت L/W مختلف کاملاً متفاوت است. پریود بدون بعد (λ/D) و هندسه فضای زیرزمینی (L/W) دو پارامتر کلیدی در بررسی تأثیرات فضای زیرزمینی بر تحلیل‌های پاسخ سایت لرزه‌ای هستند. برای $\lambda/D=3$ حداکثر بزرگ‌نمایی در $L/W=1$ رخ داد؛ اما برای $\lambda/D=8$ حداکثر بزرگ‌نمایی در $L/W=10$ رخ داد. به طور کلی، با افزایش λ/D حداکثر بزرگ‌نمایی در L/W ‌های بالاتر رخ می‌دهد. مقادیر مختلفی برای نسبت بزرگ‌نمایی برای مقادیر مختلف L/W به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که دو بعدی در نظر گرفتن فضای زیرزمینی با هندسه سه‌بعدی باعث کم یا بیش برآورد بزرگ‌نمایی‌ها در سطح زمین می‌شود. الگوی بزرگ‌نمایی برای هندسه سه‌بعدی با هندسه دو بعدی کاملاً متفاوت است؛ بنابراین لازم است هندسه سه‌بعدی را در بررسی تأثیر فضاها یا سازه‌های زیرزمینی بر سطح زمین در هنگام زلزله در نظر گرفت.

واژگان کلیدی: فضای زیرزمینی، سه‌بعدی، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، ضریب بزرگ‌نمایی، الگوی بزرگ‌نمایی، تحلیل عددی.

الگوی بزرگ‌نمایی لرزه‌ای ساختگاه ناشی از فضای زیرزمینی سه‌بعدی تحت تأثیر امواج SV

عماد محمد علیزاده سامانی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

مسعود رابطی مقدم (نویسنده مسئول)

استادیار، دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران، rabeti@yu.ac.ir

ام‌البنین پیرسبزی

دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

امیرحسین اقلیدس

دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۱- مقدمه

تأثیر می‌گذارند. باین حال، برای فضاها یا سازه‌های دو بعدی، به این مسئله به‌خوبی در ادبیات فنی پرداخته شده است اما مطالعات محدودی اثر فضاها یا سه‌بعدی، مانند ایستگاه‌های مترو را بر سایت‌های مجاور در حین زلزله بررسی کردند.

لی (Lee, 1988) در مطالعه‌ای پراکنندگی و شکست امواج الاستیک سه‌بعدی در یک نیم‌فضای همگن، الاستیک و ایزوتروپیک را به دلیل وجود یک حفره کروی مدفون، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

دی باروس و لوکو (De Barros & Locu, 1993) در

امروزه، توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی در مناطق شهری با جمعیت بالا اجتناب‌ناپذیر است. تأثیر فضاها یا سازه‌های زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین و ساختمان‌های روی زمین توجه مهندسان ژئوتکنیک را به خود جلب کرده است. مطالعات نشان داده‌اند که وجود یک حفره یا سازه در زیر زمین بر پاسخ لرزه‌ای زمین مجاور تأثیر گذاشته و پاسخ میدان آزاد را تغییر می‌دهد. آنها دریافتند که پارامترهایی مانند عمق تونل، شکل تونل، انعطاف‌پذیری پوشش، نوع و زاویه موج ورودی، ضریب پواسون و سختی خاک و سنگ به‌طور مستقیم بر پاسخ‌ها در سطح زمین

در پریودهای کوتاه کاهش می‌دهند. این تأثیر با افزایش عمق مدفون کاهش می‌یابد و تونل‌های مربعی جابه‌جایی‌های بیشتری ایجاد می‌کنند. طراحی لرزه‌ای باید اثر تونل‌های زیرزمینی را به‌ویژه در تونل‌های کم‌عمق در نظر بگیرد.

علی‌الهی و رمضان (Alielahi & Ramezani, 2016) در مطالعه‌ای تأثیر تحلیل الگوی تغییرات ضریب بزرگ‌نمایی (AR)^۳ سطح زمین از طریق مطالعه عددی به روش تفاضل محدود (FDM)^۴ و با بهره‌گیری از نرم‌افزار فلک دو بعدی مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش آنها بر ساختگاه‌هایی متمرکز بود که شامل سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل به صورت منفرد و دوقلو بودند. همچنین، با به کارگیری شتاب‌نگاشت‌های واقعی زلزله، اثر وجود این سازه‌های زیرزمینی بر طیف پاسخ سطح زمین مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های این تحقیق نشان می‌دهد که حضور سازه‌های زیرزمینی جعبه‌ای شکل تغییرات چشمگیری در پاسخ لرزه‌ای سطح زمین ایجاد می‌کند. این پژوهش به‌طور خاص، نشان می‌دهد که این سازه‌ها قادرند پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را تا دو برابر حالت میدان آزاد تقویت کنند. این تأثیر در مورد سازه‌های زیرزمینی دوقلو که در نزدیکی سطح زمین قرار دارند، به مراتب برجسته‌تر و قابل توجه‌تر بود.

علی‌الهی و آدم پیرا (Alielahi & Adampira, 2016) در مطالعه‌ای با استفاده از روش المان مرزی به بررسی اثرات لرزه‌ای دو بعدی ناشی از حفرات زیرزمینی کم‌عمق در حوزه‌ی زمان پرداخته و به تحلیل توابع بزرگ‌نمایی لرزه‌ای و ارائه برآوردهایی از طیف‌های پاسخ لرزه‌ای سطح زمین با استفاده از داده‌های زلزله پرداختند. حفرات مدفون با سه شکل هندسی (دایره‌ای، مربعی و نعل‌اسبی) با مساحت یکسان در یک نیم‌صفحه‌ی دو بعدی تحت شرایط کرنش صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. امواج SV ورودی به صورت عمودی منتشر می‌شوند. نتایج نشان داد که حضور حفرات سطحی بر بزرگ‌نمایی لرزه‌ای تأثیر دارد و این اثر نباید نادیده گرفته شود. اثر حفره‌ها بیشتر در فرکانس‌های بالاتر و در عمق‌های کم تونل قابل مشاهده است. با افزایش عمق دفن تونل، اثر آن بر پاسخ سطح زمین کاهش می‌یابد. وانگ و

مطالعه‌ای پاسخ هارمونیک سه‌بعدی در مجاورت یک حفره استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای، مدفون شده در یک نیم‌فضای لایه‌ای ویسکوالاستیک که تحت تأثیر امواج P، SV، SH و ریلی با زاویه‌ای مایل به محور حفره قرار دارد را ارزیابی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که نتایج برای وقوع امواج مایل به‌طور قابل توجهی از نتایج دو بعدی که برای وقوع افقی عمود بر محور حفره به دست می‌آید، متفاوت است.

لوکو و دی‌باروس (Locu & De Barros, 1994) در مطالعه‌ی خود تأثیر تونل بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را بررسی کردند. آنها یک حفره با هندسه‌ی دایره‌ای را مدل‌سازی کرده و تأثیر امواج ورودی SV و P را بر آن تحلیل نمودند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش عمق حفره، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین کاهش یافته و تأثیر حضور حفره بر این پاسخ کمتر می‌شود. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2015) در مطالعه‌ای پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در بالای منطقه استخراج شده را با استفاده از مدل‌های FLAC 3D^۱ مورد بررسی قرار دادند. مطالعه عددی نشان داد که پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در بالای منطقه استخراج شده کوچک‌تر از پاسخ لرزه‌ای منطقه‌ای است که دورتر از منطقه استخراج شده قرار دارد و پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در یک بازه خاص بالای لایه زغال‌سنگ بکر بزرگ‌تر از منطقه‌ای است که دورتر از منطقه استخراج شده قرار دارد. این نتایج با آسیب‌های سطحی در معدن ژائوگژوانگ در زلزله تانگ‌شان هم‌خوانی داشت. علی‌الهی و همکاران (Alielahi et al., 2015) با استفاده از روش المان مرزی (BEM)^۲ به بررسی بزرگ‌نمایی لرزه‌ای در بالای تونل‌های بدون پوشش تحت امواج SV و P پرداخته‌اند. تونل مدفون بدون پوشش را در محیط الاستیک خطی تحلیل کرده‌اند. آنها اثرات اندازه، عمق دفن و شکل تونل بر پاسخ سطح زمین را تحلیل کرده و روابطی برای ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای و طراحی اولیه ارائه داده‌اند. این مطالعه پارامترهایی مانند نسبت عمق تونل به شعاع، مقطع ناقص و طول موج امواج ورودی را بررسی کرده است. نتایج نشان داد که تونل‌ها بزرگ‌نمایی لرزه‌ای را در پریودهای بلند افزایش داده و

روی سطح زمین تحت امواج SH عمودی و افقی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، یک مدل از تونل‌های خطی دو بعدی بلند در نظر گرفته شد که در یک نیم‌صفحه الاستیک همگن خطی جای گذاری شده است و برای تحلیل آن از روش اجزای مرزی در حوزه زمان استفاده شده است. در این تحقیق، پنج نوع مقطع تونلی شامل دایره‌ای، بیضی، نعل اسب، مربعی و مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا اثرات هندسی مختلف بر پاسخ سطح زمین از نظر دامنه جابه‌جایی نرمال‌شده و نسبت بزرگ‌نمایی مورد ارزیابی قرار گیرد. علاوه بر این، زاویه برخورد موج و فرکانس پاسخ نیز در تغییر الگوی پاسخ سطح زمین مورد توجه قرار گرفته است. نتایج در قالب نمودارهای پوششی، تصاویر لحظه‌ای و نمودارهای دو بعدی و سه‌بعدی برای نمایش در حوزه‌های زمان و فرکانس ارائه شده‌اند. یافته‌ها نشان دادند که پاسخ لرزه‌ای سطح زمین به شدت تحت تأثیر هندسه تونل‌ها قرار دارد، به‌طوری‌که تغییرات هندسی تونل‌ها می‌تواند الگوی لرزه‌ای سطح زمین را تغییر دهد و باعث جابه‌جایی جهت جبهه موج شود. علی‌الهی و فیضی (Alielahi & Feizi, 2021) در مطالعه‌ای با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS (به روش اجزای محدود^۵) به بررسی اندرکنش خاک، تونل‌های زیرزمینی و سازه‌های سطحی تحت تأثیر امواج SV پرداخته و اثرات پارامترهای بدون بعد بر جابه‌جایی جانبی و انحراف سازه‌های سطحی را بررسی کردند. مدل سازه خاکی از معیار تسلیم موهر-کولمب برای شبیه‌سازی تونل دایره‌ای و سازه‌های سطحی با تعداد طبقات و فاصله‌های مختلف استفاده کرده و با نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ (Abuhajar et al., 2015) صحت‌سنجی شد. اثرات عمق تونل، فاصله سازه از تونل و تعداد طبقات را بر جابه‌جایی جانبی و انحراف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد تونل‌های زیرزمینی پاسخ لرزه‌ای را در فرکانس‌های کوتاه افزایش و در فرکانس‌های بلند کاهش می‌دهند. کاهش عمق تونل باعث بزرگ‌نمایی بیشتر می‌شود. اثر اندرکنش خاک-تونل-سازه بر جابه‌جایی و انحراف سازه‌های سطحی به ویژگی‌های خاک، خصوصیات تونل، تعداد طبقات و حرکت ورودی بستگی دارد و

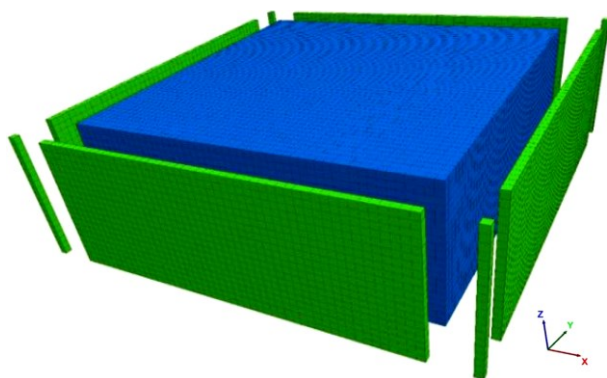
همکاران (Wang et al., 2017) در مطالعه‌ای تأثیر ایستگاه مترو بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و سازه‌های مجاور را از طریق مطالعه عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه‌گیری کردند که تأثیر سازه‌های زیرزمینی بر ویژگی‌های دینامیکی جرم خاک اطراف به ابعاد سازه زیرزمینی بستگی دارد. پاسخ لرزه‌ای بین ایستگاه مترو و زمین مجاور برای ایستگاه مترویی با ابعاد کوچک ناچیز است، اما در رابطه با سازه‌های زیرزمینی در مقیاس بزرگ، آنها توصیه کردند که تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود. وانگ و همکاران (Wang et al., 2020) در مطالعه‌ای یک مدل المان محدود دینامیک کاملاً سه‌بعدی (3D) توسعه دادند تا اثرات یک گسل را بر رفتارهای لرزه‌ای غارهای زیرزمینی ارزیابی کنند. اثرات پارامترهای گسل (مانند زاویه برخورد، ضخامت گسل، مقاومت برشی گسل)، وضعیت‌های تنش درجا و شدت زلزله بر پاسخ لرزه‌ای غارهای زیرزمینی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که زمانی که جهت گسل موازی با محور طولی غار باشد و زاویه برخورد بین گسل و محور عمودی در مقطع عرضی غار حدود ۴۰ درجه باشد، غار در ناپایدارترین حالت خود قرار دارد. علاوه بر این، احتمال ریزش غار زمانی که شتاب بحرانی زمین حدود $0.3g$ باشد، بیشتر است. جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2021) در مطالعه‌ای پراکندگی امواج لرزه‌ای توسط یک تونل سه‌بعدی در کوه را با استفاده از روش المان مرزی غیر مستقیم (IBEM) بررسی کردند. تأثیر فرکانس و زاویه برخورد امواج P یا SV بر جابه‌جایی‌های سطح کوه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که توزیع فضایی دامنه جابه‌جایی تحت موج P و SV تفاوت قابل توجهی دارد. به‌ویژه، وجود تونل حفاری شده در کوه تأثیر زیادی بر جابه‌جایی‌های سطحی کوه دارد. وجود تونل در کوه ممکن است باعث بزرگ‌نمایی بیشتر جابه‌جایی سطحی شود که برای پروژه‌های کوهستانی نامطلوب است. پنچی و مجتبی‌زاده حسنلویی (Panji & Mojtazadeh-Hasanlouei, 2021) در مطالعه‌ای اثرات هندسی تونل‌های دوگانه سطحی با مقاطع عرضی مختلف بر حرکات لرزه‌ای در جهت مخالف صفحه‌ای بر

فاصله سازه از محور تونل تأثیر بیشتری نسبت به عمق دارد. مطالعه بر لزوم گنجاندن این اندرکنش در دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای تأکید دارد. گائو و همکاران (Gao et al., 2022) با استفاده از نرم‌افزار المان محدود، تأثیر موقعیت مرز خاک-سنگ بر پاسخ لرزه‌ای ایستگاه مترو را بررسی کردند. مدل شامل خاک ریز، رس، سنگ هوازده و به‌شدت هوازده بود و شرایط مختلف سایت با نسبت‌های امپدانس $0/104$ تا $0/313$ شبیه‌سازی شد. خاک با مدل خطی معادل و سنگ به‌صورت الاستیک خطی مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که مرز خاک-سنگ تأثیر زیادی بر پاسخ لرزه‌ای دارد و نزدیکی آن به دال میانی ایستگاه بحرانی‌ترین حالت است. خاک نرم‌تر نیز اثرات لرزه‌ای را تشدید می‌کند. پنجی و همکاران (Panji et al., 2022) در مطالعه‌ای رفتار لرزه‌ای سطح زمین در یک محیط الاستیک و همگن با حضور تونل‌های زیرزمینی نعل‌اسبی شکل و بدون پوشش، تحت اثر امواج برشی SH با زاویه انتشار مایل، با بهره‌گیری از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه زمان (BEM) مورد مطالعه قرار گرفت که در این تحلیل از موجک ریکر به‌عنوان شکل موج ورودی بهره‌برده شد. به‌علاوه، تحلیلی مقایسه‌ای بین مقاطع دایره‌ای و نعل‌اسب به‌منظور ارزیابی تأثیر شکل هندسی بر الگوی پاسخ لرزه‌ای انجام گردید. نتایج حاکی از آن است که وجود حفره‌های زیرسطحی، به‌ویژه با شکل نعل‌اسب، به‌طور قابل توجهی بر تغییرات الگوهای لرزه‌ای و وضعیت‌های بحرانی سطح زمین تأثیر می‌گذارد. این روش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مفید برای مهندسان ژئوتکنیک به‌منظور طراحی مدل‌های ساده و کارآمد زیرزمینی برای تحلیل پاسخ‌های دینامیکی در شرایط مختلف پیشنهاد گردد. فیضی و همکاران (Feizi et al., 2022) در مطالعه‌ای، با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 2D، به بررسی تونل‌های جعبه‌ای شکل (تک و دوقلو) بر تشدید حرکت زمین در هنگام زلزله پرداخته‌اند. جهت شبیه‌سازی خاک از نیم‌فضای ویسکوالاستیک استفاده شده است و همچنین برای اعمال تحریک لرزه‌ای، از موج ریکر و هفت شتاب‌نگاشت واقعی استفاده شده است. پارامترهایی مانند عمق تونل، فاصله بین

تونل‌ها، سختی پوشش و فرکانس موج ورودی مورد بررسی قرار گرفت. در تحلیل‌ها با استفاده از طیف پاسخ فوریه ضریب بزرگ‌نمایی به دست آمد. تحلیل‌ها در حالت‌های مختلف تونل‌ها بررسی شده‌اند: تونل تک، تونل‌های دوقلوی افقی متصل، تونل‌های دوقلوی افقی جدا از هم، تونل‌های دوقلوی عمودی متصل، تونل‌های دوقلوی عمودی جدا از هم. نتایج نشان داد که تشدید لرزه‌ای به‌ویژه در تونل‌های دوقلوی کم‌عمق افقی جدا از هم بسیار قابل توجه است، اما با افزایش پارامتر عمق و سختی پوشش تونل مشاهده شد که تشدید لرزه‌ای کاهش می‌یابد. بررسی طیف پاسخ سایت که بر اساس شتاب‌نگاشت‌های واقعی بود، نتایج این پژوهش را تأیید کرد. لی و همکاران (Li et al., 2023) در مطالعه‌ای با استفاده از آزمایش میز لرزه به بررسی الگوی بزرگ‌نمایی حرکت زمین ناشی از تونل‌های ساخته‌شده با دستگاه TBM^6 که از مرز خاک-سنگ عبور می‌کنند، پرداختند. نسبت انعطاف‌پذیری (F) که نسبت سختی برشی زمین به سختی عرضی تونل است، برای توصیف اندرکنش زمین-تونل استفاده شد. آزمایش‌ها نشان داد که تونل‌ها حرکت زمین را به‌ویژه در فرکانس‌های پایین ($10-20$ هرتز) بزرگ‌نما می‌کند و این اثر در حضور تغییرات سختی دو بعدی (لایه‌های نرم-سخت) شدیدتر می‌شود.

علی‌الهی و همکاران (Alielahi et al., 2023) در مطالعه‌ای تحلیل تأثیر تعامل امواج ریلی با حفره‌های زیرزمینی بر روی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و الگوی تقویت شده آن با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه تأثیر پارامترهای مؤثر مانند عمق دفن حفره، فاصله از محور حفره و فرکانس ورودی بدون بعد بررسی شد. نتیجه این پژوهش بر روی پارامترها نشان داد که دامنه حرکت زمین در حضور یک حفره نسبت به شرایط میدان آزاد بیشتر است. همچنین نتایج دیگر این پژوهش نشان داد که حفره‌های زیرزمینی با عمق کم موجب تقویت بیشتری در امواج لرزه‌ای نسبت به حفره‌های عمیق‌تر می‌شوند. با فاصله گرفتن از منبع امواج، شدت پاسخ در نقاط مختلف کاهش می‌یابد. به دلیل رفتار پیچیده تعامل امواج

بر ثانیه، ۳۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۳۳ فرض شدند. فضای زیرزمینی با شکل مکعبی در عمق مشخصی از سطح زمین در نظر گرفته شد. شکل (۱) مسئله مدل‌سازی شده در FLAC 3D را نشان می‌دهد. جهت محوره‌های اصلی در شکل ارائه شده است که در آن عمق مدل در جهت محور Z قرار دارد.



شکل (۱): مدل سه‌بعدی مسئله در FLAC 3D.

با توجه به قوانین انتشار موج در تحلیل‌های دینامیکی، حداکثر اندازه‌ها در مدل برابر با ۲ متر در نظر گرفته شد. میرایی رایلی با نسبت ۰/۰۰۱ در فرکانس طبیعی سیستم (۵ هرتز) به مدل اعمال شد. دو نوع مرز جاذب^۷ در تحلیل‌های دینامیکی استفاده شد که به‌عنوان شرایط مرزی پیش‌فرض در FLAC 3D تعریف شدند. مرز جاذب «میدان آزاد» به مرزهای جانبی مدل اعمال شد، همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود تا امواج برخوردی که از طرفین جانبی به داخل مدل بازتاب می‌شوند، جذب شوند. مرز جاذب «مرز آرام» نیز به صفحه پایین مدل (صفحه XY) اعمال شد تا امواج منتشر شده رو به پایین را جذب کند و میرایی تشعشعی را شبیه‌سازی کند. حرکت ورودی به‌صورت موج برشی SV هارمونیک در جهت افقی در کف مدل اعمال شد.

همچنین موج برشی SV به‌صورت تنش در راستای محور X و از کف مدل به سیستم اعمال می‌شود. رابطه (۱) تاریخچه زمانی تنش برشی اعمال‌شده را نشان می‌دهد. در این رابطه، ρ چگالی محیط، C_s سرعت موج برشی در محیط، و $V(t)$ تاریخچه زمانی سرعت موج ورودی است.

$$\sigma_s(t) = -2 (\rho \cdot C_s) V(t) \quad (1)$$

رایلی با حفره‌ها، دامنه موج در سمت راست حفره کمتر از سمت چپ آن است. همچنین، با افزایش فرکانس ورودی بی‌بعد، الگوهای جابه‌جایی سطحی و انتشار امواج به‌طور فزاینده‌ای پیچیده می‌شود، درحالی‌که شدت جابه‌جایی‌های حداکثری کاهش می‌یابد. ژو و همکاران (Zhu et al., 2024) در مطالعه‌ای تأثیر بزرگ‌نمایی حرکت زمین ناشی از تونل‌های دایره‌ای موازی مدفون در خاک اشباع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حضور این تونل‌ها می‌تواند تغییرات چشمگیری در حرکت آزاد میدان، از نظر شدت و توزیع آن، ایجاد کند.

نظر به مطالعات اندک در زمینه تأثیر فضای زیرزمینی سه‌بعدی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، مطالعه حاضر سعی دارد تا با استفاده از یک سری مطالعه عددی سه‌بعدی، تأثیر فضای زیرزمینی با شکل مکعبی را بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین بررسی کند. با تعریف یک پارامتر جدید، L/W (که در آن L و W به ترتیب طول و عرض فضای زیرزمینی هستند)، هندسه فضای زیرزمینی به‌طور متغیر از یک فضای کامل سه‌بعدی ($L/W=1$) تا یک فضای دو بعدی ($L/W=12.5$) در نظر گرفته شد و اثر این تغییرات بر پاسخ‌های لرزه‌ای سایت بررسی گردید. در تحلیل‌های دینامیکی، مدل تحت تأثیر امواج برشی SV درون صفحه‌ای که به‌صورت عمودی منتشر می‌شوند، قرار گرفت. نتایج به‌صورت بزرگ‌نمایی و کاهش بزرگ‌نمایی پاسخ‌ها در سطح زمین نسبت به میدان آزاد از طریق نمودارهای دو بعدی و سه‌بعدی ارائه شده است.

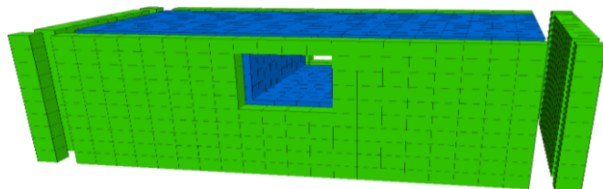
۲- مدل‌سازی عددی

به‌منظور بررسی تأثیر فضای زیرزمینی سه‌بعدی بر پاسخ‌های سطح زمین، مسئله با استفاده از کد تفاضل محدود FLAC 3D مدل‌سازی شد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، مدلی با طول ۱۰۰ متر، عرض ۱۰۰ متر و ارتفاع ۴۰ متر به‌عنوان محیط مدل‌سازی در نظر گرفته شد. جنس محیط سنگی در نظر گرفته شد که به‌عنوان ماده الاستیک رفتار می‌کند. سرعت موج برشی، چگالی و ضریب پواسون سنگ به ترتیب برابر با ۸۰۰ متر

۳- راستی آزمایشی مدل عددی

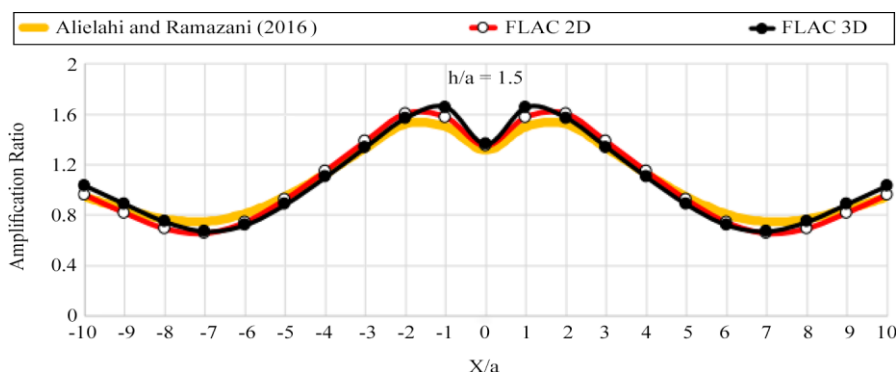
شبهه‌سازی شده است. شکل (۲) یک حفره به شکل جعبه را نشان می‌دهد که در $h/a = 1/5$ قرار دارد و در FLAC 3D مدل‌سازی شده است.

شبهه‌سازی برای دو مدل با عمق‌های مختلف فضای زیرزمینی h/a برابر $1/5$ و $2/10$ انجام شد. ضریب بزرگ‌نمایی (AR) به‌دست‌آمده در مدل‌سازی عددی در FLAC 2D و FLAC 3D با مطالعه علی‌الهی و رضانی (Alielahi & Ramezani, 2016) مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل‌های (۳) و (۴) دیده می‌شود؛ مدل عددی سه‌بعدی نتایج مدل دو بعدی و همچنین نتایج حاصل از مطالعه علی‌الهی و رضانی (Alielahi & Ramezani, 2016) را به‌طور مناسبی مدل‌سازی می‌کند.

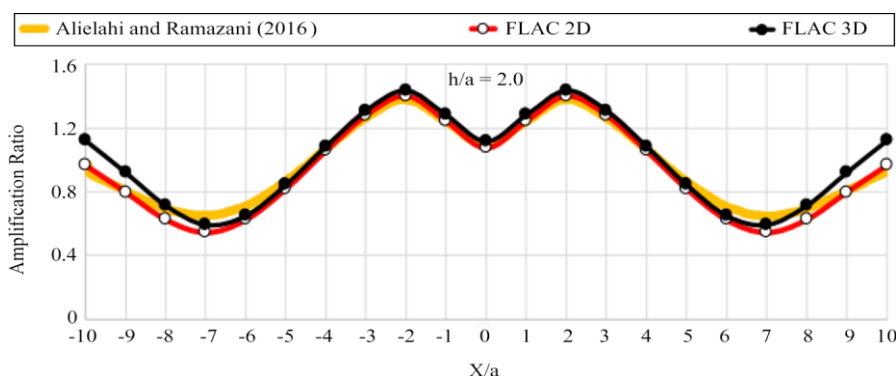


شکل (۲): مدل علی‌الهی و رضانی (Alielahi & Ramezani, 2016)، شبهه‌سازی شده در FLAC 3D.

مطالعه حاضر تأثیر فضاهای زیرزمینی سه‌بعدی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را بررسی می‌کند. تاکنون، اکثر پژوهشگران فضاها یا سازه‌های دو بعدی را در مطالعات خود در نظر گرفته‌اند و تنها مطالعات محدودی به فضاهای سه‌بعدی پرداخته‌اند. مطالعات علی‌الهی و رضانی (Alielahi & Ramezani, 2016) برای راستی آزمایشی مدل عددی انتخاب شدند. این مطالعات در فضای دو بعدی انجام شده‌اند. به‌منظور شبهه‌سازی فضای زیرزمینی با شرایط دو بعدی در FLAC 3D، طول فضای زیرزمینی در جهت Y تا مرزهای میدان آزاد گسترش داده شد. نتایج مدل سه‌بعدی در FLAC 3D با مدل دو بعدی در FLAC 2D مقایسه شد تا صحت شبهه‌سازی مدل‌های مطالعات قبلی در فضای سه‌بعدی تأیید شود. علی‌الهی و رضانی (Alielahi & Ramezani, 2016) تأثیر فضای زیرزمینی جعبه‌ای شکل را بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین تحت تحریک امواج قائم SV با استفاده از مطالعات عددی بررسی کردند. باین‌حال، مطالعه آنها در فضای دو بعدی انجام شده بود، درحالی‌که مطالعه حاضر، مدل آنها در FLAC 2D و FLAC 3D



شکل (۳): ضریب بزرگ‌نمایی در مقابل X/a برای $h/a = 1.5$ و $\lambda/D = 6.25$.



شکل (۴): ضریب بزرگ‌نمایی در مقابل X/a برای $h/a = 2$ و $\lambda/D = 6.25$.

فضای مورد نظر افزایش می‌یابد و این فضا از هندسه سه‌بعدی فاصله گرفته و به تدریج به فضایی دو بعدی تبدیل می‌شود که در $L/W = 12/5$ کاملاً به یک فضای دو بعدی تبدیل می‌شود.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای فضای زیرزمینی در نظر گرفته شده در مطالعه پارامتری.

L (m)	۸	۱۶	۲۴	۴۰	۸۰	۱۰۰
W = H (m)	۸	۸	۸	۸	۸	۸
L/W	۱	۲	۳	۵	۱۰	$12/5$

(مدل دو بعدی 2D)

* در $L/W = 12.5$ فضای زیرزمینی در طول کامل مدل گسترش یافته است تا یک فضای دو بعدی (2D) را شبیه‌سازی کند.

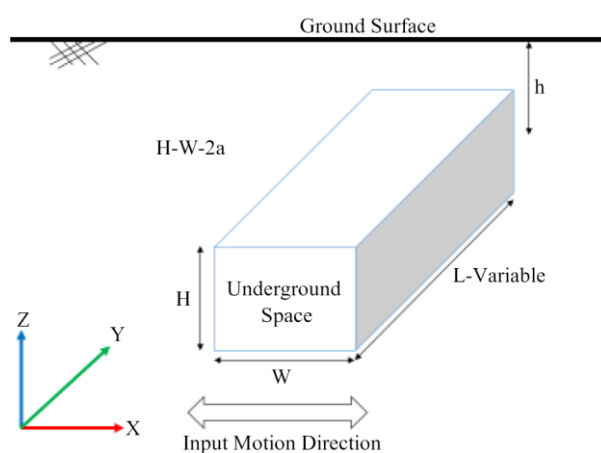
شکل (۶) فضای زیرزمینی با نسبت L/W را در محیطی سنگی با طول و عرض و ارتفاع ۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر نشان می‌دهد. حرکت ورودی به مدل در جهت X از طریق صفحه XY در کف مدل اعمال شد. این حرکت یک موج SV هارمونیک با فرکانس‌های مختلف بود. به منظور بررسی تأثیر فرکانس بر پاسخ‌های لرزه‌ای، پی‌یود بی‌بعد (λ/D) تعریف شد و مقادیر آن بر اساس مطالعات رابطی مقدم و بازیار (Rabati Moghadam & Baziar, 2016) در مطالعات پارامتری برابر ۳، ۴، ۶ و ۸ در نظر گرفته شد. λ طول موج و D قطر فضای زیرزمینی است. فضای زیرزمینی به عنوان فضایی بدون پوشش و در عمق $h/a = 1/5$ در نظر گرفته شد که در آن h/a عمق بی‌بعد است. بر اساس مطالعات رابطی مقدم و بازیار (Rabati Moghadam & Baziar, 2016) اگر نسبت عمق تونل به مقداری بیش از ۳ افزایش یابد، پتانسیل بزرگ‌نمایی در سطح زمین حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد کمتر خواهد بود. پارامتر عمق تأثیر قابل توجهی دارد، اما با افزایش عمق، اثر آن به تدریج کاهش می‌یابد. از این رو، با در نظر گرفتن این روند، نسبت عمق $1/5$ به عنوان مقدار پیش فرض در این مطالعه انتخاب شده است.

تأثیر فضای زیرزمینی با مقادیر مختلف L/W بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در بخش بعدی برای مقادیر مختلف λ/D ارائه و بحث شده است.

نتایج صحت‌سنجی نشان‌دهنده دقت و صحت شبیه‌سازی عددی است. در بخش بعدی، مطالعه پارامتری جامعی به منظور بررسی تأثیر فضای زیرزمینی سه‌بعدی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین انجام گرفته و نتایج آن ارائه شده است. فضای زیرزمینی به شکل جعبه‌ای و بدون پوشش در محیط سنگی در نظر گرفته شده است.

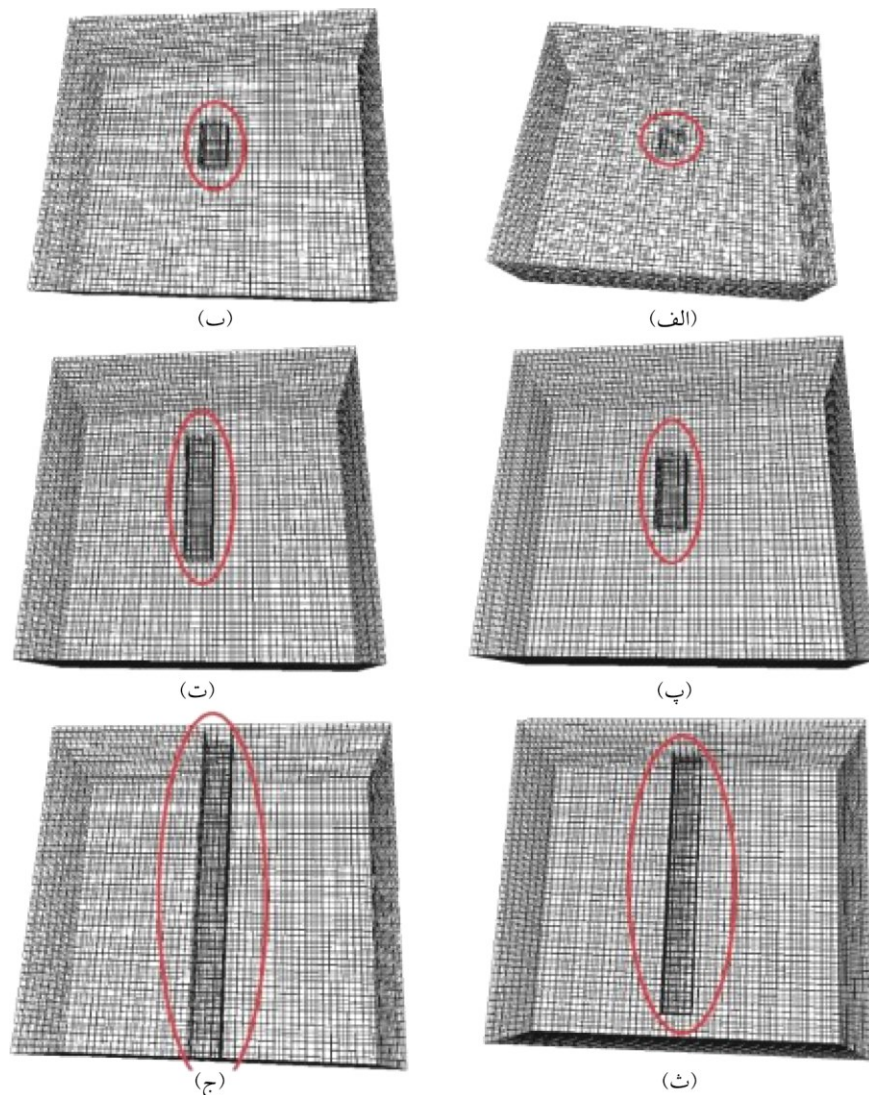
۴- مطالعه پارامتری

در مطالعه حاضر، یک فضای زیرزمینی سه‌بعدی در نظر گرفته شده است تا تأثیر اثر آن بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین نسبت به پاسخ میدان آزاد بررسی شود. طبق شکل (۵)، فضای زیرزمینی مطالعه شده طول L را در امتداد محور Y، عرض W را در امتداد محور X و ارتفاع H را در امتداد محور Z دارد. مقادیر W و H در طول مطالعه پارامتری ثابت در نظر گرفته شده و برابر با ۸ متر فرض شدند. باین حال، طول فضای زیرزمینی (L) متغیر در نظر گرفته شده است. یک پارامتر بدون بعد برای در نظر گرفتن تغییرات طول فضای زیرزمینی تعریف شد که نسبت طول (L/W) نامیده می‌شود. به منظور بررسی تأثیر هندسه فضای زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، پارامتر نسبت طول (L/W) از ۱ تا $12/5$ متغیر در نظر گرفته شده است که در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۵): طرح شماتیک پارامترهای فضای زیرزمینی.

نسبت L/W را بر ۱، فضای زیرزمینی توخالی مکعبی با ابعاد $L = W = H = 8$ متر را شبیه‌سازی می‌کند که به عنوان فضای سه‌بعدی کامل نامیده شده است. با افزایش نسبت L/W ، طول



شکل (۶): موقعیت فضای زیرزمینی در مدل عددی در نظر گرفته شده: (الف) $L/W = 1$ ، (ب) $L/W = 2$ ، (پ) $L/W = 3$ ، (ت) $L/W = 5$ ، (ث) $L/W = 10$ و (ج) $L/W = 12.5$ (مدل دو بعدی 2D).

مختلف L/W ، $h/a = 1/5$ و $\lambda/D = 3$ به صورت طیف رنگی نمایش داده شده است. محل فضای زیرزمینی در پلان توسط یک کادر سفیدرنگ در شکل مشخص شده است. حداکثر و حداقل مقادیر نسبت بزرگ‌نمایی کنار هر شکل نوشته شده است. از آنجاکه ابعاد مدل در پلان ۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر است، فواصل بدون بعد X/a و Y/a بین $-12/5$ و $12/5$ تغییر می‌کند ($-12/5 \leq X/a \leq 12/5$ و $-12/5 \leq Y/a \leq 12/5$)، که در آن a نصف ارتفاع فضاهای زیرزمینی است.

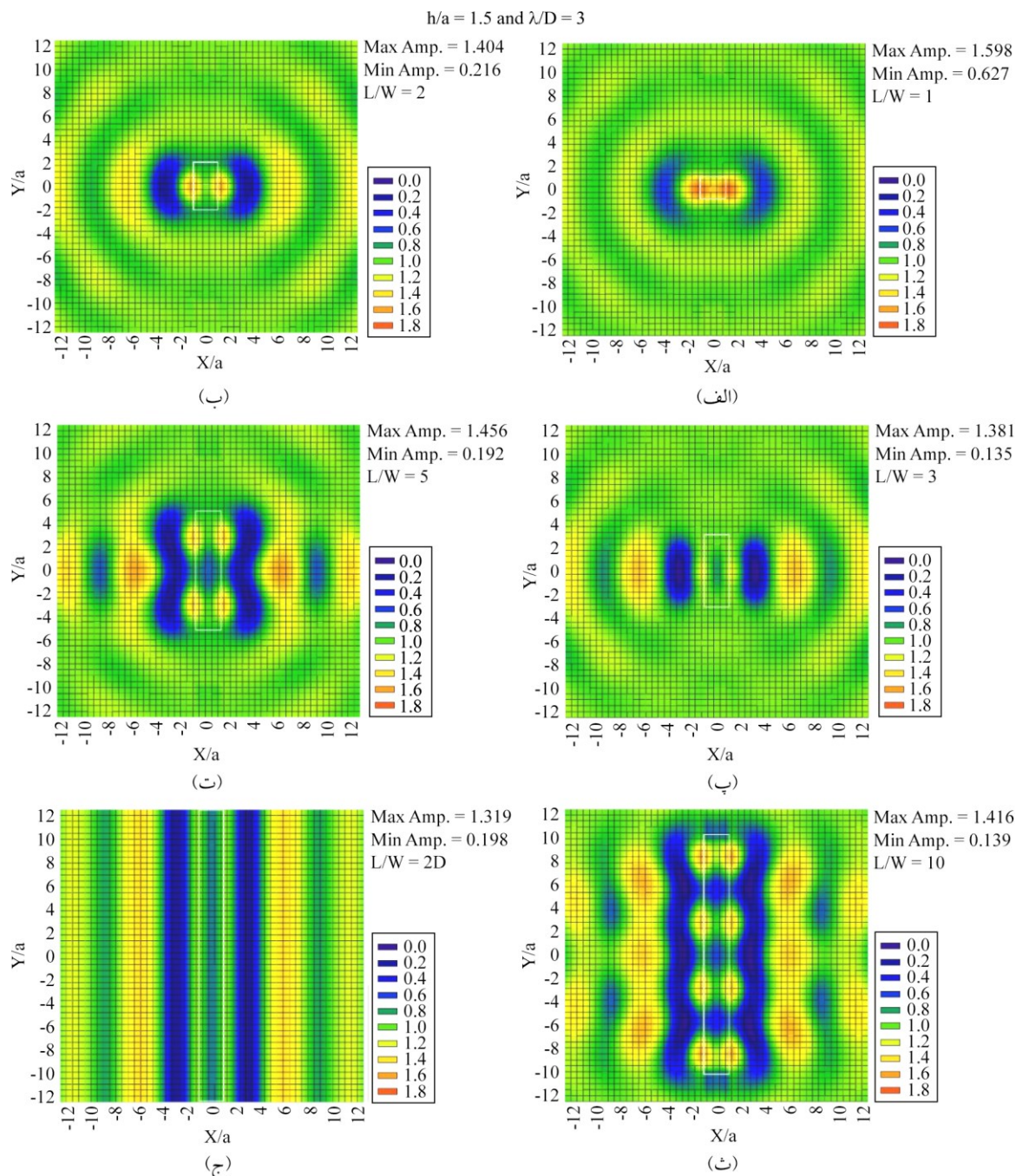
طیف‌های رنگی مختلف نمایانگر بزرگ‌نمایی یا کاهش پاسخ‌ها در سطح زمین در مدل حاوی فضای زیرزمینی نسبت به میدان آزاد است.

منظور نسبت بزرگ‌نمایی در این بخش نسبت بیشینه جابه‌جایی افقی در راستای ارتعاش در مدل دارای فضای زیرزمینی به مقدار متناظر آن در مدل میدان آزاد، به عنوان ضریب بزرگ‌نمایی در نظر گرفته شده است. این ضریب معیاری برای ارزیابی تأثیر حضور سازه بر پاسخ دینامیکی محیط اطراف بوده و بیانگر میزان تغییر در جابه‌جایی ناشی از اندرکنش سازه و محیط خاکی تحت تحریکات لرزه‌ای است.

۴-۱- تأثیر $L/W = 3$ بر ضریب بزرگ‌نمایی پاسخ سطح

زمین در $\lambda/D = 3$

در شکل (۷)، الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین برای مقادیر



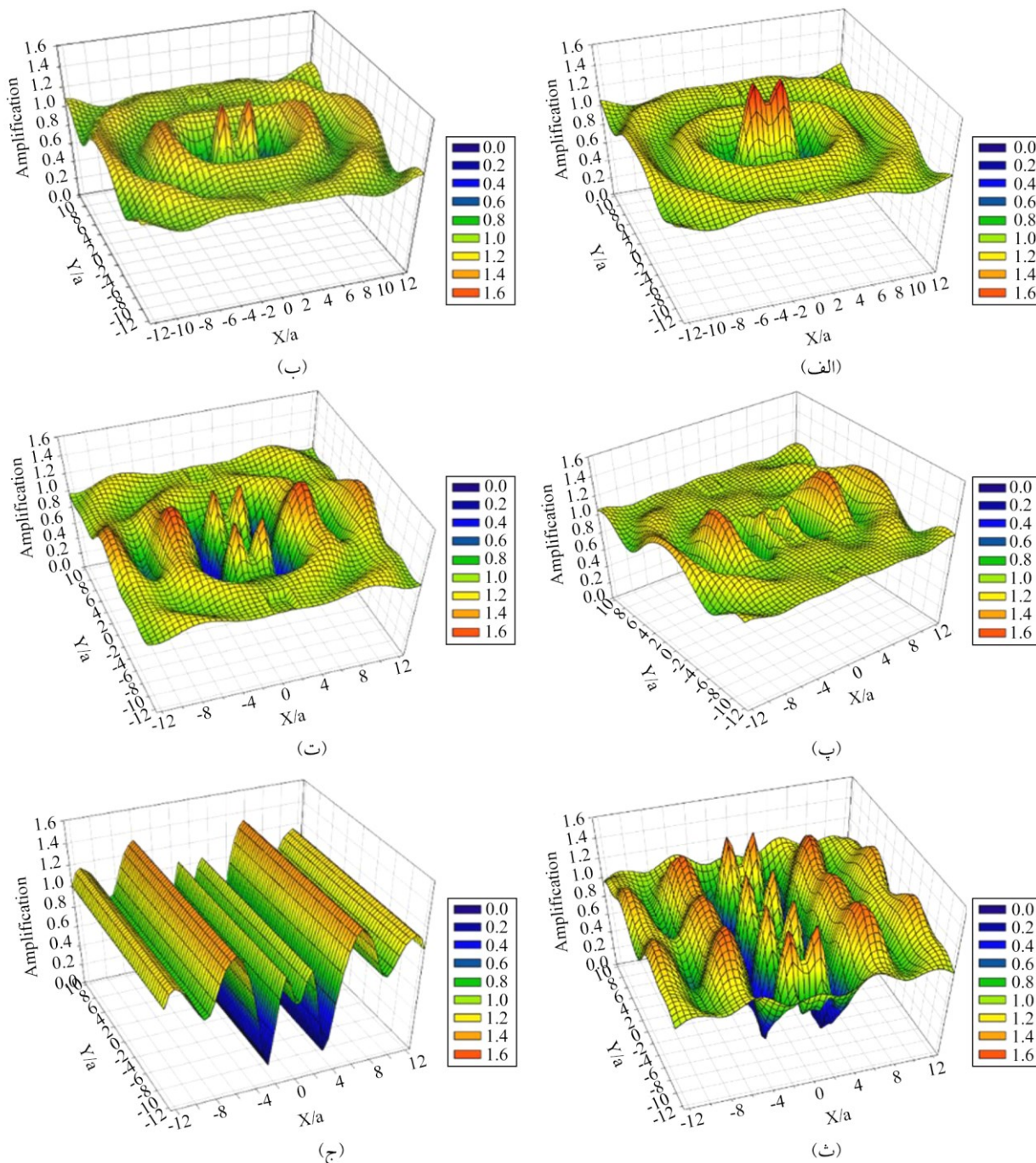
شکل (۷): الگوهای بزرگ‌نمایی در صفحه XY در سطح زمین برای $\lambda/D = 3$ (الف) $L/W = 1$ ، (ب) $L/W = 2$ ، (پ) $L/W = 3$ ، (ت) $L/W = 5$ ، (ث) $L/W = 10$ و (ج) $L/W = 2D$.

شکل (۷-ج) است. بنابراین، تفاوت بزرگ‌نمایی بین فضای دو بعدی و سه‌بعدی، در این مطالعه بیش از ۲۰ درصد است. این بدان معناست که ابعاد فضای زیرزمینی مستقیماً بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین تأثیر می‌گذارد. از شکل به‌وضوح دیده می‌شود که الگوهای بزرگ‌نمایی برای مقادیر مختلف L/W کاملاً متفاوت است. در L/W برابر ۱، ۲، ۳ و ۵ الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین

شکل (۶) تأثیر فضای زیرزمینی با طول‌های مختلف بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در صفحه XY را نشان می‌دهد. فضای زیرزمینی با $L/W = 1$ ، یک فضای کامل سه‌بعدی، بیشترین مقدار بزرگ‌نمایی برابر با ۱/۵۹۸ را دارد، مطابق با شکل (۷-الف). کمترین بزرگ‌نمایی برابر با ۱/۳۱۹ مربوط به فضای زیرزمینی با بیشترین L/W یعنی مدل دو بعدی ($L/W=2D$)، طبق

زیرزمینی با مقادیر مختلف L/W در شکل (۸) ترسیم شده است. نوسانات نسبت بزرگ‌نمایی در بالای فضای زیرزمینی و اطراف آن در سطح زمین به خوبی در شکل نمایش داده شده است. در فاصله‌های زیاد از فضای زیرزمینی، نسبت بزرگ‌نمایی به $1/0$ می‌رسد و اثر فضای زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین از بین می‌رود. این همچنین نشان می‌دهد که دامنه انتخابی مدل عددی مناسب است.

به صورت شعاعی از محل فضای زیرزمینی تغییر می‌کند و برای مقادیر بالاتر L/W (۱۰ و $12/5$)، با بزرگ‌تر شدن طول فضای زیرزمینی، الگو به صورت خطی تغییر می‌کند. همچنین، با بزرگ‌تر شدن ساختار زیرزمینی، مناطقی که تحت تأثیر حضور آن قرار می‌گیرند، گسترده‌تر می‌شوند. نمودارهای سه‌بعدی الگوی بزرگ‌نمایی در حضور فضای



شکل (۸): نمودارهای 3D از ضریب بزرگ‌نمایی در صفحه XY در سطح زمین برای (الف) $L/W = 1$ ، (ب) $L/W = 2$ ، (پ) $L/W = 3$ ، (ت) $L/W = 5$ ، (ث) $L/W = 10$ و (ج) (مدل $L/W = 12.5(2D)$).

مربوط به فضای زیرزمینی با $L/W = 2$ است که برابر با $1/87$ می‌باشد. باین حال، برای $\lambda/D = 3$ ، بالاترین نسبت بزرگ‌نمایی برابر با $1/598$ بوده که به مدل با $L/W = 1$ مربوط می‌شد. کمترین نسبت بزرگ‌نمایی به فضای زیرزمینی با بیشترین L/W ، یعنی مدل دو بعدی، مربوط است که برابر با $1/3$ بوده و همانند شکل (۷) می‌باشد.

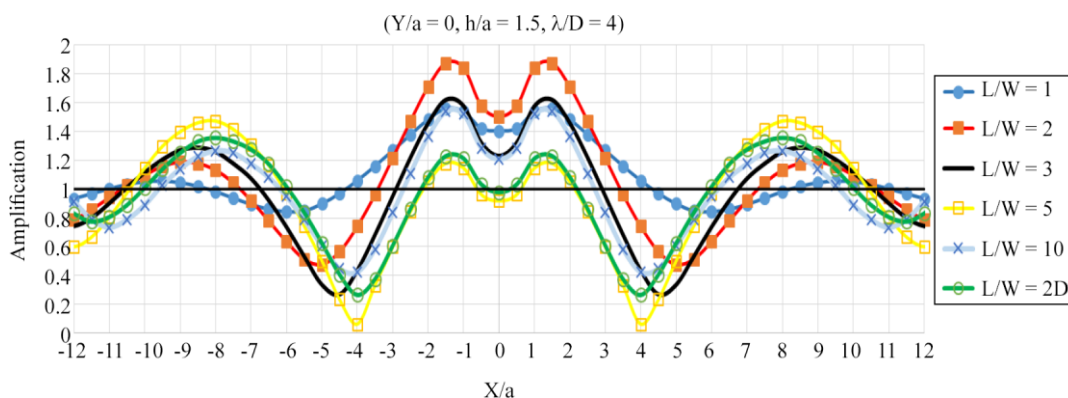
در نسبت‌های L/W برابر ۱، ۲، ۳ و ۵، الگوی بزرگ‌نمایی در سطح زمین به صورت شعاعی از محل فضای زیرزمینی توزیع شده است، اما برای مقادیر بالاتر L/W (۱۰ و $12/5$)، با افزایش طول فضای زیرزمینی، الگو به صورت خطی درمی‌آید. بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی در سطح زمین به دلیل وجود فضای زیرزمینی در تمام مقادیر L/W مشاهده می‌شود که بر نقش فضاهای زیرزمینی در پاسخ لرزه‌ای زمین مجاور تأکید دارد. بیشترین نسبت کوچک‌نمایی برابر با $0/06$ برای فضای زیرزمینی با $L/W = 5$ به دست آمده است نمودارهای سه‌بعدی الگوی بزرگ‌نمایی ضریب بزرگ‌نمایی ناشی از فضای زیرزمینی با مقادیر مختلف L/W در شکل (۱۱) برای $\lambda/D = 4$ ترسیم شده است. بیشترین بزرگ‌نمایی در مدل با $\lambda/D = 2$ رخ داده است. مشابه نتایج به دست آمده برای $\lambda/D = 3$ در $\lambda/D = 4$ الگوی بزرگ‌نمایی پیچیده بوده و به شدت به هندسه فضای زیرزمینی وابسته است. توزیع شعاعی الگو برای مقادیر پایین L/W آشکار است، اما برای مقادیر بالاتر L/W ، با افزایش طول فضای زیرزمینی، الگو از حالت شعاعی به صورت خطی در آمده است.

اشکال پیچیده الگوهای بزرگ‌نمایی نشان‌دهنده تأثیر هندسه فضای زیرزمینی است، به طوری که الگو برای $L/W = 1$ با فضای زیرزمینی به شکل دو بعدی ($L/W = 12/5$) کاملاً متفاوت است. با تبدیل فضای زیرزمینی به فضای سه‌بعدی، مقادیر و الگوهای بزرگ‌نمایی بسیار متفاوت از فضایی با هندسه دو بعدی هستند. برای $L/W = 12/5$ (مدل $2D$)، الگوی بزرگ‌نمایی مستقل از Y/a است، اما برای مقادیر دیگر L/W ، الگو به شدت وابسته به Y/a است. به وضوح می‌توان دید که در تحلیل‌های اثرات سایت، در نظر گرفتن شکل واقعی فضای زیرزمینی یا سازه‌ها حیاتی است. بعد سوم فضای زیرزمینی یا سازه‌ها در تأثیر آن‌ها بر پاسخ زمین مجاور تعیین کننده است.

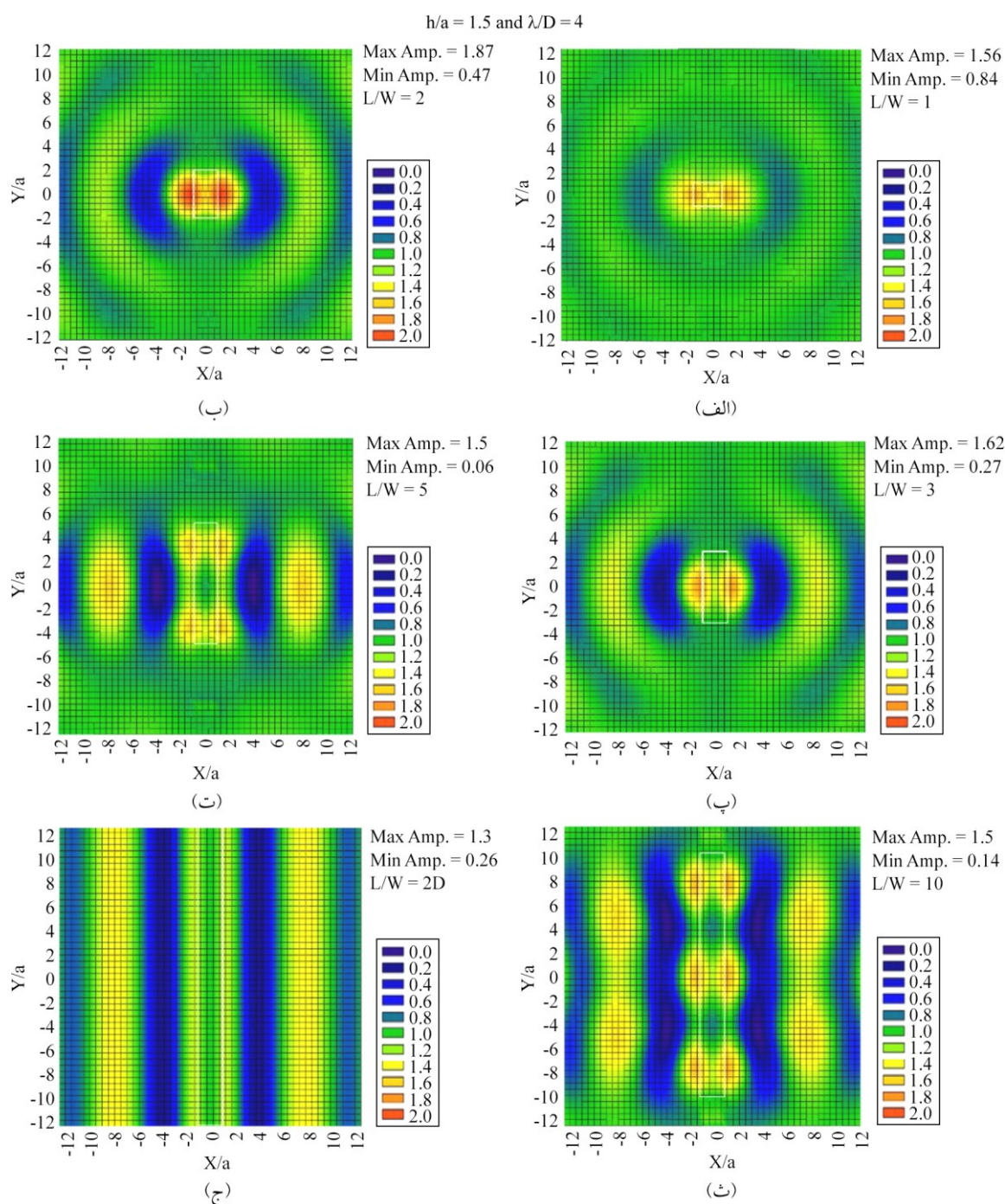
شکل (۹) نسبت بزرگ‌نمایی را در مقابل مقادیر مختلف X/a در مرکز مدل ($Y/a = 0$) برای مقادیر مختلف L/W نشان می‌دهد که معمولاً در تحلیل‌های دو بعدی استفاده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تأثیر L/W بر نسبت بزرگ‌نمایی قابل توجه است. ساده‌سازی مدل‌های سه‌بعدی با هندسه دو بعدی، تأثیر آن بر زمین مجاور در طول زلزله را به درستی نشان نمی‌دهد.

۴-۲- تأثیر نسبت L/W بر ضریب بزرگ‌نمایی سطح زمین در $\lambda/D = 4$

شکل (۱۰) تأثیر فضای زیرزمینی با نسبت‌های مختلف L/W بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در صفحه XY را با اعمال موج SV هارمونیک با $\lambda/D = 4$ نشان می‌دهد. بیشترین ضریب بزرگ‌نمایی



شکل (۹): ضریب بزرگ‌نمایی در مقابل X/a در $Y/a = 0$ برای مقادیر مختلف L/W .

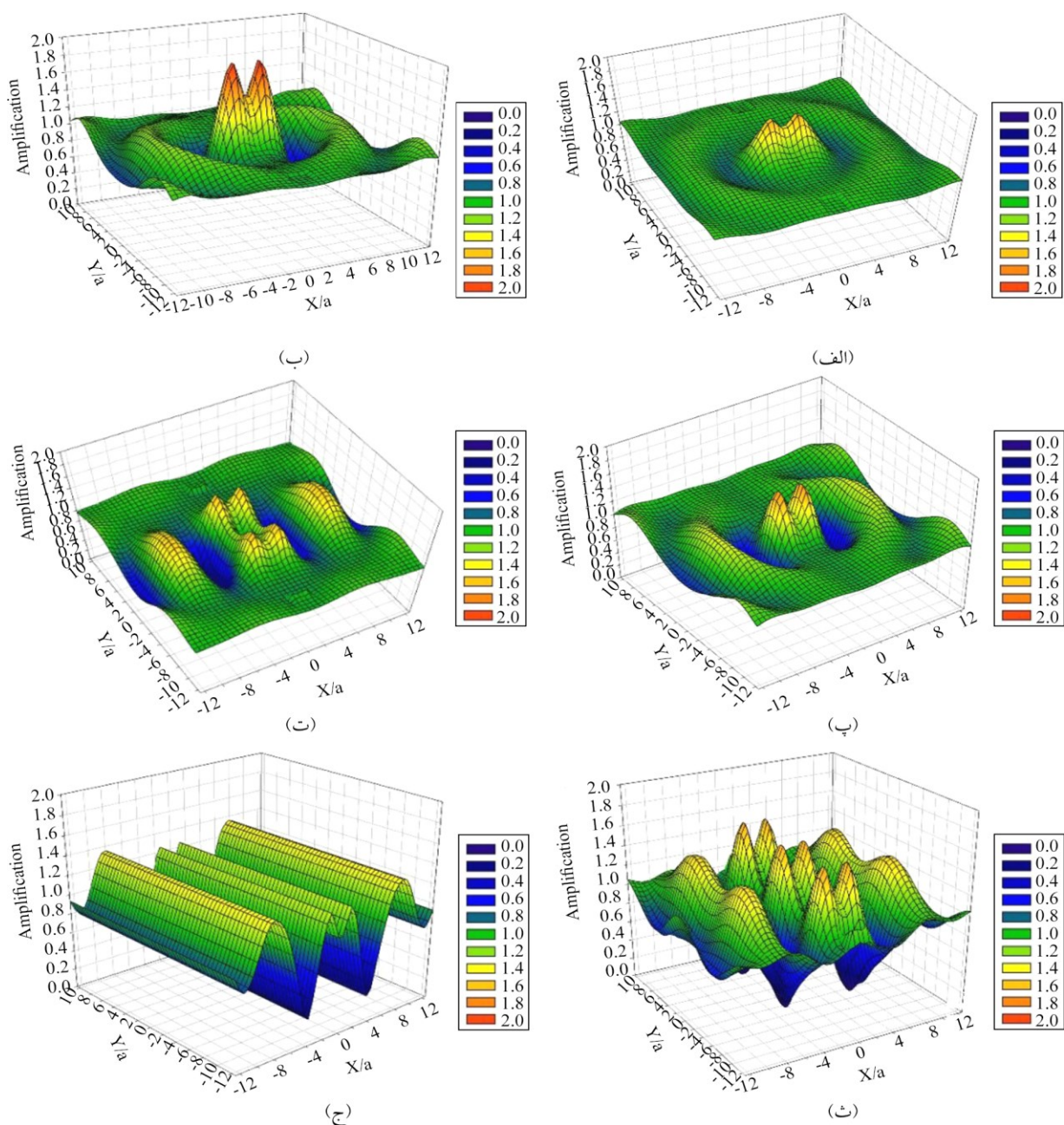


شکل (۱۰): پلان الگوی ضریب بزرگنمایی در سطح زمین. (الف) $L/W = 1$ ، (ب) $L/W = 2$ ، (پ) $L/W = 3$ ، (ت) $L/W = 5$ ، (ث) $L/W = 10$ و (ج) $L/W = 20$.

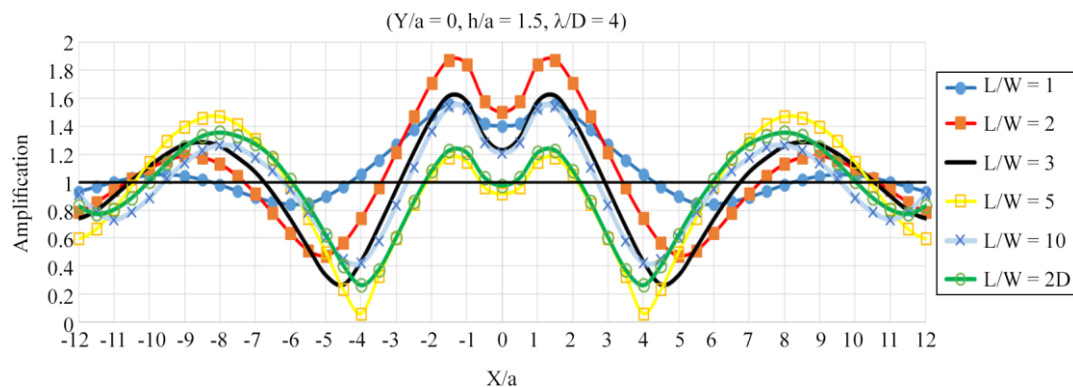
قابل توجهی بر الگوی بزرگنمایی و مقادیر آن در سطح زمین دارد.

شایان ذکر است که چنین نموداری برای مقادیر دیگر Y/a با نمودار به دست آمده برای $Y/a = 0$ متفاوت خواهد بود که در تحلیل های دو بعدی نادیده گرفته می شود.

شکل (۱۲) نسبت ضریب بزرگنمایی را در مقابل X/a در مرکز مدل ($Y/a = 0$) برای مقادیر مختلف L/W که معمولاً در تحلیل های دو بعدی استفاده می شود، نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، حداکثر بزرگنمایی در مدلی با $L/W = 2$ رخ داده است. به عنوان نتیجه اصلی، پارامتر سه بعدی (L/W) تأثیر



شکل (۱۱): نمودار سه‌بعدی الگوهای بزرگ‌نمایی در صفحه XY در سطح زمین برای $\lambda/D = 4$ (الف) $L/W = 1$ ، (ب) $L/W = 2$ ، (پ) $L/W = 3$ ، (ت) $L/W = 5$ ، (ث) $L/W = 10$ و (ج) $L/W = 2D$.

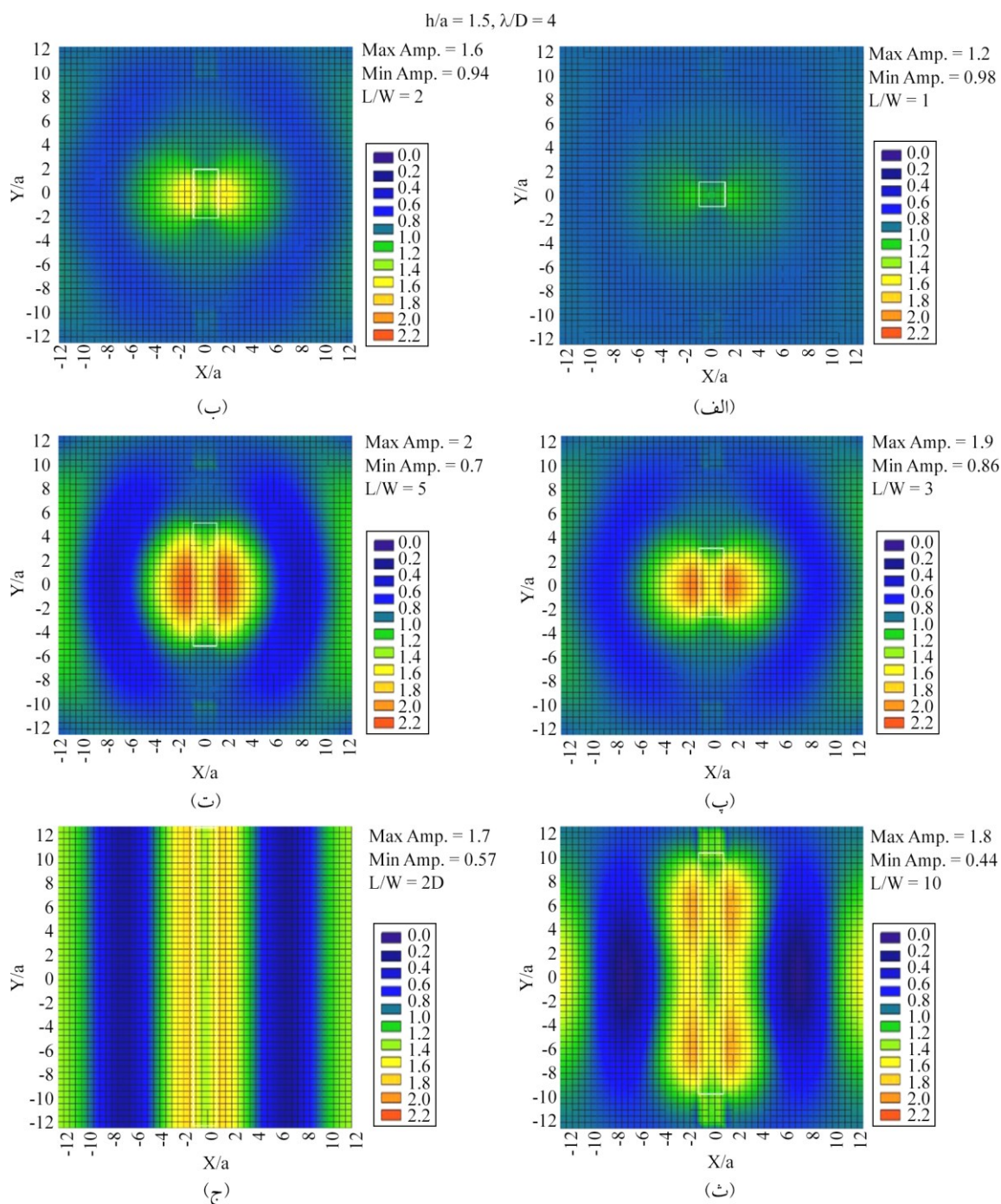


شکل (۱۲): نمودار الگوی ضریب بزرگ‌نمایی در مقابل X/a در $Y/a = 0$ برای مقادیر مختلف L/W .

۳-۴- تأثیر نسبت L/W بر ضریب بزرگ‌نمایی: $\lambda/D = 6$

باین حال، برای $\lambda/D = 3$ و ۴، بالاترین نسبت بزرگ‌نمایی در مقادیر دیگری از L/W به دست آمد. پایین‌ترین نسبت بزرگ‌نمایی مربوط به فضای زیرزمینی با $L/W = 1$ ، مدل کامل سه‌بعدی، معادل ۱/۲ است. تأثیر L/W بر بزرگ‌نمایی‌ها باعث ایجاد تفاوت تقریباً دو برابری در نسبت‌های بزرگ‌نمایی سطح زمین شد.

شکل (۱۳) تأثیر فضای زیرزمینی با نسبت‌های مختلف L/W را بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در صفحه XY نشان می‌دهد، با اعمال موج SV هارمونیک با $\lambda/D = 6$ حداکثر بزرگ‌نمایی مربوط به فضای زیرزمینی با $L/W = 5$ است که برابر با ۲/۰ است.

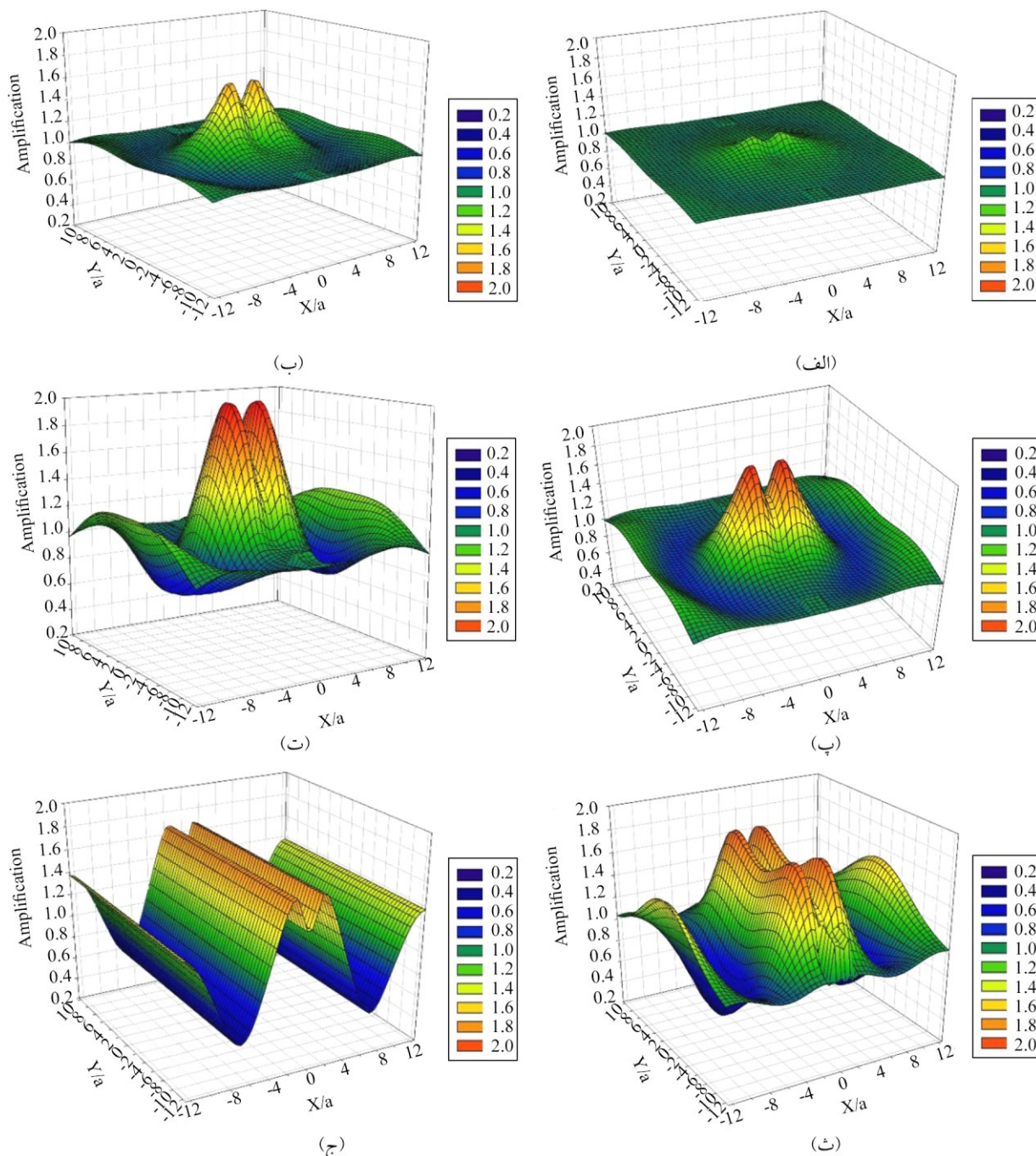


شکل (۱۳): پلان ضریب بزرگ‌نمایی در سطح زمین در $h/a = 1/5$ و $\lambda/D = 6$ (الف) $L/W = 1$ ، (ب) $L/W = 2$ ، (پ) $L/W = 3$ ، (ت) $L/W = 5$ ، (ث) $L/W = 10$ و (ج) $L/W = 2D$.

در صورتی که طول فضای زیرزمینی بزرگ‌تر می‌شود، الگوی بزرگ‌نمایی از یک الگوی سه‌بعدی به یک الگوی دو بعدی تبدیل می‌شود. بزرگ‌نمایی و کاهش بزرگ‌نمایی در سطح زمین به دلیل فضای زیرزمینی در تمام مقادیر L/W رخ می‌دهد که نقش فضاهای زیرزمینی را در پاسخ لرزه‌ای زمین‌های مجاور تأکید می‌کند. حداکثر نسبت کوچک‌نمایی برابر با $0/44$ برای فضای زیرزمینی با $L/W = 10$ به دست آمد.

الگوهای ضریب بزرگ‌نمایی در قالب نمودارهای سه‌بعدی در شکل (۱۴) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که نتایج به‌دست آمده برای $\lambda/D = 3$ و $\lambda/D = 4$ نشان می‌دهند، الگوی بزرگ‌نمایی پیچیده است و به‌شدت به هندسه فضای زیرزمینی وابسته است. با مقایسه الگوهای بزرگ‌نمایی برای $\lambda/D = 6$ با $\lambda/D = 3$ و $\lambda/D = 4$ ، می‌توان نتیجه

در صورتی که طول فضای زیرزمینی بزرگ‌تر می‌شود، الگوی بزرگ‌نمایی از یک الگوی سه‌بعدی به یک الگوی دو بعدی تبدیل می‌شود. بزرگ‌نمایی و کاهش بزرگ‌نمایی در سطح زمین به دلیل فضای زیرزمینی در تمام مقادیر L/W رخ می‌دهد که نقش فضاهای زیرزمینی را در پاسخ لرزه‌ای زمین‌های مجاور تأکید می‌کند. حداکثر نسبت کوچک‌نمایی برابر با $0/44$ برای



شکل (۱۴): نمودار سه‌بعدی الگوهای بزرگ‌نمایی در صفحه XY در سطح زمین برای $\lambda/D = 6$ (الف) $L/W = 1$ ، (ب) $L/W = 2$ ، (پ) $L/W = 3$ ، (ت) $L/W = 5$ ، (ث) $L/W = 10$ و (ج) $L/W = 2D$.

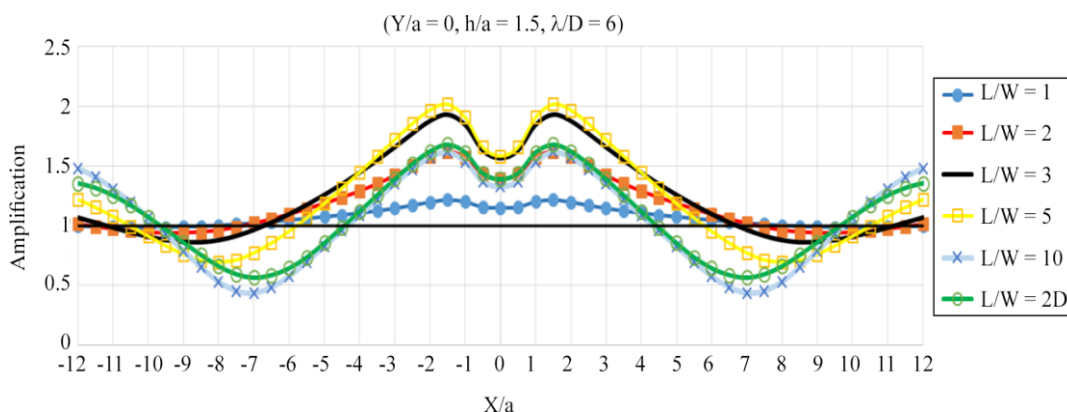
به محض افزایش λ/D حداکثر بزرگ‌نمایی در مدل‌هایی با L/W بالاتر رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، به محض بزرگ‌تر شدن فضای زیرزمینی، بزرگ‌نمایی بیشتری در پریودهای بالاتر حرکت ورودی رخ می‌دهد. برای $\lambda/D = 3$ ، حداکثر بزرگ‌نمایی در $L/W = 1$ به دست آمد، در عین حال برای $\lambda/D = 8$ ، حداکثر بزرگ‌نمایی در $L/W = 10$ رخ داد. همان‌طور که از شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود، فضای زیرزمینی سه‌بعدی کامل برای این پریود بدون بعد تأثیری بر سطح زمین ندارد و بزرگ‌نمایی در سطح زمین حدود $1/0$ است که نشان می‌دهد مدل مانند مدل میدان آزاد عمل می‌کند؛ زیرا طول موج بلندتر می‌شود و فضای زیرزمینی با $L/W = 1$ توسط موج شناسایی نمی‌شود. این موضوع در نمودارهای سه‌بعدی بزرگ‌نمایی‌ها که در شکل (۱۷) نشان داده شده، بیشتر نمایان است. برای این مقدار از λ/D با وجود مدل سه‌بعدی با $L/W = 1$ ، مدل دو بعدی تأثیر زیادی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین دارد. مقادیر بالای بزرگ‌نمایی‌ها و کاهش بزرگ‌نمایی‌ها به دلیل فضای زیرزمینی دو بعدی در سطح زمین رخ می‌دهد. دوباره می‌توان بر این نکته تأکید کرد که پریود بدون بعد (λ/D) و هندسه فضای زیرزمینی (L/W) دو پارامتر کلیدی در بررسی اثرات فضای زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین هستند. شکل (۱۸) نسبت بزرگ‌نمایی را در مقابل X/a در مرکز مدل ($Y/a = 0$) برای مقادیر مختلف L/W نشان می‌دهد که معمولاً در تحلیل‌های دو بعدی استفاده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر بزرگ‌نمایی در مدلی با $L/W = 10$ رخ داده است.

گرفت که اشکال الگوهای بزرگ‌نمایی بسیار متفاوت از یکدیگر هستند و نه تنها به هندسه فضای زیرزمینی بستگی دارند، بلکه تحت تأثیر پریود بدون بعد (λ/D) نیز قرار می‌گیرند. توزیع شعاعی الگو برای مقادیر پایین‌تر L/W واضح است، اما برای مقادیر بالاتر L/W ، همان‌طور که فضای زیرزمینی طولانی‌تر می‌شود، الگو خطی شده و شکل دو بعدی به خود می‌گیرد.

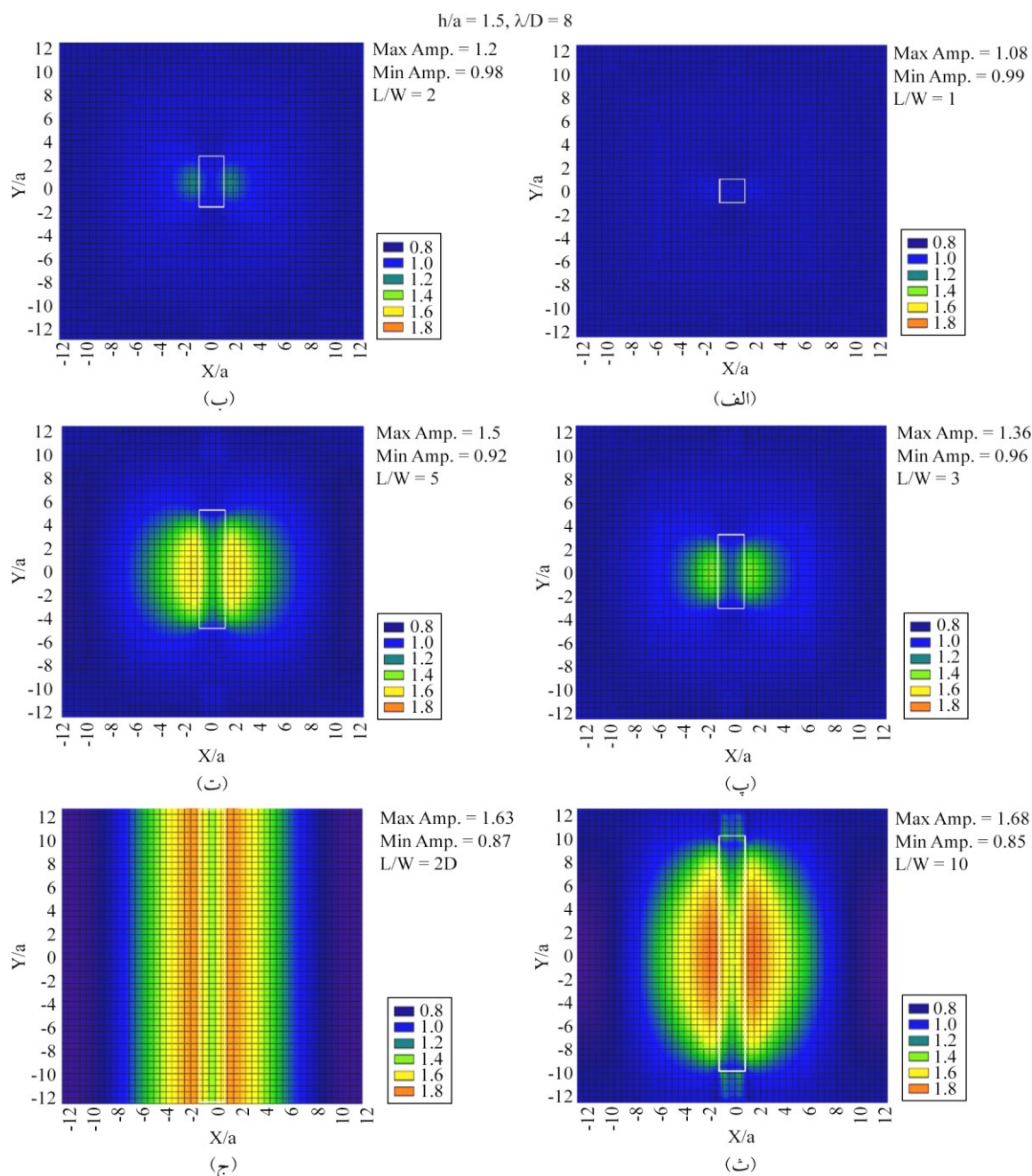
شکل (۱۵) نسبت بزرگ‌نمایی را در مقابل مقادیر مختلف X/a در مرکز مدل ($Y/a = 0$) برای مقادیر مختلف L/W نشان می‌دهد که معمولاً در تحلیل‌های دو بعدی استفاده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر بزرگ‌نمایی در مدلی با $L/W = 5$ رخ داده است. مدلی با $L/W = 1$ کمترین بزرگ‌نمایی‌ها را به دست می‌دهد و تأثیر آن محدود به $-6 \leq X/a \leq 6$ است. مدل‌هایی با مقادیر بالاتر L/W تأثیر بیشتری در فواصل وسیع‌تری از فضای زیرزمینی دارند.

۴-۴- تأثیر نسبت L/W بر ضریب بزرگ‌نمایی: $\lambda/D = 8$

شکل (۱۶) تأثیر فضای زیرزمینی با نسبت‌های مختلف L/W را بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در صفحه XY نشان می‌دهد، با اعمال یک موج هارمونیک با $\lambda/D = 8$ حداکثر بزرگ‌نمایی مربوط به فضای زیرزمینی با $L/W = 10$ است که برابر با $1/68$ است. کمترین بزرگ‌نمایی مربوط به فضای زیرزمینی با $L/W = 1$ ، مدل سه‌بعدی کامل، معادل $1/08$ است. با مقایسه نتایج به دست آمده از دیگر مقادیر λ/D می‌توان نتیجه گرفت که



شکل (۱۵): نمودار الگوی ضریب بزرگ‌نمایی در مقابل X/a در $Y/a = 0$ برای مقادیر مختلف L/W .

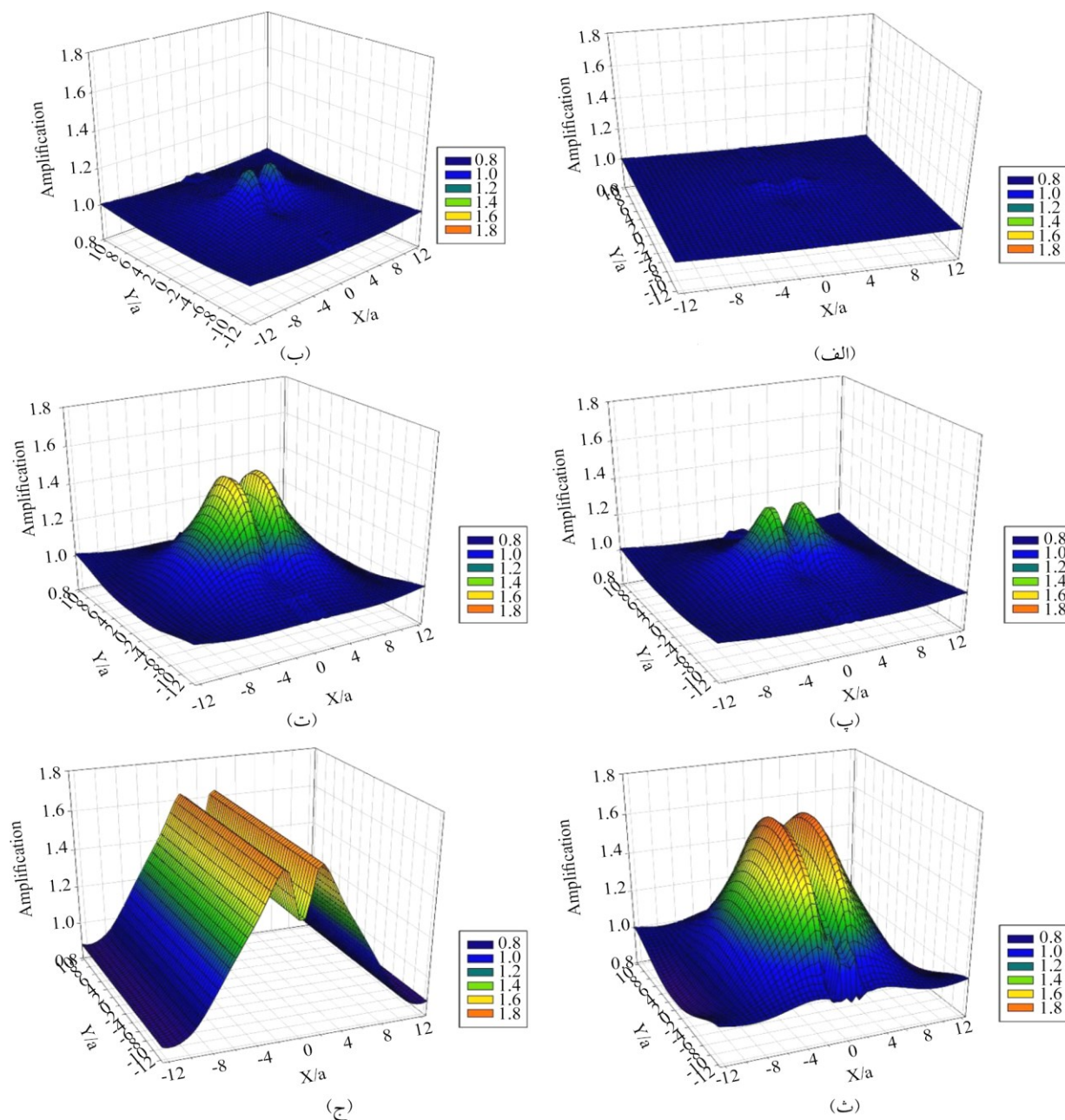


شکل (۱۶): پلان ضریب بزرگ‌نمایی در سطح زمین در $h/a = 1/5$ و $\lambda/D = 8$ (الف) $L/W = 1$ ، (ب) $L/W = 2$ ، (پ) $L/W = 3$ ، (ت) $L/W = 5$ ، (ث) $L/W = 10$ و (ج) $L/W = 2D$.

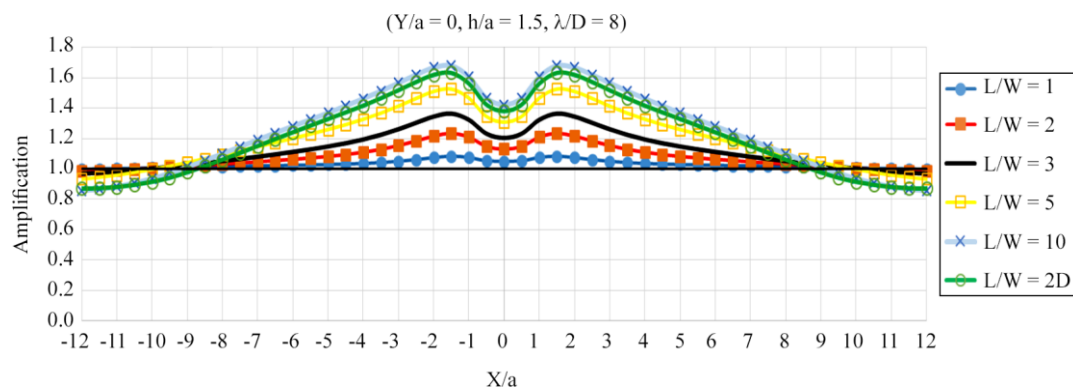
۴-۵- نتایج مطالعه پارامتری

در مطالعه حاضر الگوی ضریب بزرگ‌نمایی در سطح زمین در حضور فضای زیرزمینی سه‌بعدی با نسبت‌های مختلف L/W تحت موج SV به دست آمده است. حداکثر نسبت‌های بزرگ‌نمایی در جدول (۲) گردآوری شده است.

الگوی بزرگ‌نمایی مدل دو بعدی تقریباً برابر با بزرگ‌نمایی‌های مدل با $L/W = 10$ است که نشان می‌دهد برای $L/W = 10$ و مقادیر بالاتر، فضای زیرزمینی مانند مدل دو بعدی عمل می‌کند. مدلی با $L/W = 1$ کمترین بزرگ‌نمایی‌ها را به دست می‌دهد و تأثیر آن محدود به $-5 \leq X/a \leq 5$ است. برای این مقدار از λ/D ، مدل‌هایی با L/W بالاتر تأثیر بیشتری بر فواصل وسیع‌تری از فضای زیرزمینی دارند.



شکل (۱۷): نمودار سه بعدی الگوهای بزرگ نمایی در صفحه XY در سطح زمین برای $\lambda/D = 8$ (الف) $L/W = 1$ ، (ب) $L/W = 2$ ، (پ) $L/W = 3$ ، (ت) $L/W = 5$ ، (ث) $L/W = 10$ و (ج) $L/W = 20$.



شکل (۱۸): نمودار الگوی ضریب بزرگ نمایی در مقابل X/a در $Y/a = 0$ برای مقادیر مختلف L/W .

جدول (۲): ضریب بزرگنمایی به‌دست آمده در مطالعه پارامتری.

نسبت Amp_{max}/Amp_{min} در λ/D	بیشترین مقدار ضریب بزرگنمایی چه موقعی رخ می‌دهد	بیشترین مقدار ضریب بزرگنمایی	λ/D	L/W
۱/۲۱		۱/۶۰		۱
		۱/۴۰		۲
		۱/۳۸		۳
		۱/۴۶		۵
		۱/۴۲		۱۰
		۱/۳۲		۱۲/۵ - مدل دو بعدی
۱/۴۴	L/W = ۲	۱/۵۶	۴	۱
		۱/۸۷		۲
		۱/۶۲		۳
		۱/۵		۵
		۱/۵		۱۰
		۱/۳		۱۲/۵ - مدل دو بعدی
۱/۶۷	L/W = ۵	۱/۲	۶	۱
		۱/۶		۲
		۱/۹		۳
		۲		۵
		۱/۸		۱۰
		۱/۷		۱۲/۵ - مدل دو بعدی
۱/۵۶	L/W = ۱۰	۱/۰۸	۸	۱
		۱/۲۰		۲
		۱/۳۶		۳
		۱/۵۰		۵
		۱/۶۸		۱۰
		۱/۶۳		۱۲/۵ - مدل دو بعدی

ساختمان‌های زیرزمینی هنگام بررسی تأثیر آنها بر زمین‌های مجاور یا ساختمان‌های نزدیک در نظر گرفته شود. طبق جدول (۲)، پارامتر L/W منجر به نسبت ۱/۶۷ برابری حداکثر بزرگنمایی نسبت به حداقل کوچک‌نمایی می‌شود که اهمیت هندسه فضاهای زیرزمینی سه‌بعدی را در بزرگنمایی‌های ساختمانه نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

یک مطالعه عددی سه‌بعدی برای بررسی تأثیر فضای زیرزمینی سه‌بعدی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین تحت امواج SV انجام گرفت. به‌منظور در نظر گرفتن هندسه فضاهای زیرزمینی،

از این جدول می‌توان استنباط کرد که بزرگنمایی‌ها به پارامترهای بدون بعد L/W و λ/D وابسته هستند، بدین معنی که ابعاد فضای زیرزمینی و همچنین پریود موج ورودی (محتوی فرکانسی موج زلزله)، پارامترهای مهمی برای بزرگنمایی یا کوچک‌نمایی پاسخ میدان آزاد هستند. برای $\lambda/D = ۳$ حداکثر بزرگنمایی در $L/W = ۱$ رخ می‌دهد؛ درعین حال، برای $\lambda/D = ۸$ حداکثر بزرگنمایی در $L/W = ۱۰$ رخ می‌دهد. به‌طور کلی، با افزایش λ/D حداکثر بزرگنمایی در L/W بالاتر رخ می‌دهد. مقادیر مختلفی برای نسبت بزرگنمایی در مقادیر مختلف L/W به دست آمده است. این یافته تأکید می‌کند که باید ابعاد کامل

$L/W = 5$ ، 10 و $2D$ نیز بیشترین بزرگ‌نمایی در $\lambda/D = 6$ دیده شده است.

– نسبت L/W باعث ایجاد اختلافی حدود $1/7$ برابر بین حداکثر بزرگ‌نمایی و حداقل کوچک‌نمایی می‌شود که بیانگر اهمیت هندسه سه‌بعدی در بزرگ‌نمایی پاسخ ساختگاه است.

لازم به ذکر است نتایج حاصله در تحقیق حاضر برای یک فضای زیرزمینی بدون پوشش به جعبه‌ای شکل در یک محیط سنگی الاستیک تحت امواج SV هارمونیک که به صورت قائم تابیده شده است، به دست آمده‌اند. از آنجا که نسبت و الگوی بزرگ‌نمایی به شدت وابسته به شکل و اندازه حفره، ویژگی‌های موج برخوردی و خواص محیط اطراف است، این نتایج تنها برای شرایط بررسی شده در این مطالعه معتبر هستند.

References

مراجع

- Abuhajar, O., El Naggar, H., & Newson, T. (2015). Experimental and numerical investigations of the effect of buried box culverts on earthquake excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 130-148.
- Alielahi, H., & Adampira, M. (2016). Site-specific response spectra for seismic motions in half-plane with shallow cavities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80, 163-167.
- Alielahi, H., & Feizi, D. (2021). Numerical study on dynamic effects of soil-tunnel-structure interaction. *International Journal of Civil Engineering*, 19(11), 1339-1355.
- Alielahi, H., & Ramezani, M. S. (2016). Seismic site amplification pattern caused by underground box-shaped structures. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 3(1), 55-71.
- Alielahi, H., Kamalian, M., & 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.
- Alielahi, H., Nadernia, Z. A., & Entezari, M. M. (2023). A numerical study on effect of underground cavities on seismic ground response due to Rayleigh wave propagation. *SN Applied Sciences*, 5(2), 64.

یک پارامتر بدون بعد به نام L/W تعریف شد و تغییرات آن در الگوی بزرگ‌نمایی لرزه‌ای ساختگاه مورد بررسی قرار گرفت. پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین در حضور فضای زیرزمینی سه‌بعدی با پاسخ میدان آزاد مقایسه شد و نتایج به صورت الگوی بزرگ‌نمایی ارائه گردید. از نتایج مطالعات پارامتری، نتیجه‌گیری‌های زیر به دست آمد:

– ابعاد فضای زیرزمینی تأثیر مستقیم بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین دارند. الگوهای بزرگ‌نمایی برای مدل‌های با مقادیر مختلف L/W به طور کامل متفاوت از هم هستند. دامنه بزرگ‌نمایی‌ها و مقادیر آنها برای مدل‌های با مقادیر مختلف L/W متفاوت است.

– اشکال پیچیده الگوهای بزرگ‌نمایی حاصل شده، تأثیر به سزای هندسه فضای زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه را نشان می‌دهد.

– پیرو بدون بعد (λ/D) و هندسه فضای زیرزمینی (L/W) دو پارامتر کلیدی در بررسی تأثیرات فضای زیرزمینی بر تحلیل‌های پاسخ سایت لرزه‌ای هستند. برای $\lambda/D = 3$ حداکثر بزرگ‌نمایی در $L/W = 1$ رخ داد؛ اما برای $\lambda/D = 8$ حداکثر بزرگ‌نمایی در $L/W = 10$ رخ داد. به طور کلی، با افزایش λ/D حداکثر بزرگ‌نمایی در L/W ‌های بالاتر رخ می‌دهد. مقادیر مختلفی برای نسبت بزرگ‌نمایی برای مقادیر مختلف L/W به دست آمد.

– توزیع بزرگ‌نمایی برای مقادیر کوچک L/W به صورت شعاعی است و برای مقادیر بالاتر L/W به صورت خطی می‌شود. برای L/W برابر با ۱، ۲ و ۳، الگوی بزرگ‌نمایی شعاعی بوده، درحالی که در $L/W = 5$ ، 10 و $2D$ ، این الگو خطی شده است.

– در نسبت عمق $1/5$ و $\lambda/D = 3$ ، بیشترین بزرگ‌نمایی در $L/W = 1$ دیده شده و با افزایش نسبت طول، کاهش یافته است.

– با افزایش طول موج بی‌بعد در نسبت عمق $1/5$ ، بیشترین بزرگ‌نمایی در $L/W = 1$ مشاهده شده و سپس کاهش یافته است. در $L/W = 2$ ، مقدار حداکثر در $\lambda/D = 4$ و در $L/W = 3$ در $\lambda/D = 6$ رخ داده و برای $\lambda/D > 6$ کاهش یافته است. در

Numerical study on the seismic response of the underground subway station-surrounding soil mass-ground adjacent building system. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(4), 424-435.

Wang, X., Xiong, Q., Zhou, H., Chen, J., & Xiao, M. (2020). Three-dimensional (3D) dynamic finite element modeling of the effects of a geological fault on the seismic response of underground caverns. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 96, 1-10.

Zhang, X., Yang, X., Wang, Z., & Sasaki, K. (2015). *Numerical Simulation of Seismic Dynamic Response of Ground Surface Above Mined-Out Area*.

Zhu, J., Kontoe, S., Li, X., Liang, J., & Chen, S. (2024). Ground motion amplification by twin circular tunnels for obliquely incident seismic waves: Effects of saturated poroelastic soil parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 186, 108953.

De Barros, F. C. P., & Luco, J. E. (1993). Diffraction of obliquely incident waves by a cylindrical cavity embedded in a layered viscoelastic half-space. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 12(3), 159-171.

Feizi, D., Asgari Marnani, J., Alielahi, H., & Panji, M. (2022). Seismic ground amplification induced by box-shaped tunnels. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 21(3), 697-714.

Gao, Z., Zhao, M., Huang, J., Wang, W., & Du, X. (2022). Effect of soil-rock interface position on seismic response of subway station structure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 119, 104255.

Jiang, P. L., Jiang, H., Jiang, Y. S., Wang, D., Li, N., & Shi, Z. H. (2021). IBEM simulation of seismic wave scattering by a 3D tunnel mountain. *Shock and Vibration*, 2021(1), 6643971.

Lee, V. W. (1988). Three-dimensional diffraction of elastic waves by a spherical cavity in an elastic half-space, I: Closed-form solutions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7(3), 149-161.

Li, S., Cudmani, R., Xiao, M., Guo, Z., & Yuan, Y. (2023). Ground motion amplification pattern with TBM tunnels crossing soil-rock interface: Shaking table test. *Underground Space*, 12, 202-217.

Luco, J. E., & De Barros, F. C. P. (1994). Dynamic displacements and stresses in the vicinity of a cylindrical cavity embedded in a half-space. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23(3), 321-340.

Panji, M., & Mojtazadeh-Hasanlouei, S. (2021). Seismic ground response by twin lined tunnels with different cross sections. *SN Applied Sciences*, 3(9), 787.

Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., & Fakhravar, A. (2022). Seismic response of the ground surface including underground horseshoe-shaped cavity. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 9(3), 338-355.

Rabeti Moghadam, M., & Baziar, M. H. (2016). Seismic ground motion amplification pattern induced by a subway tunnel: Shaking table testing and numerical simulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83, 81-97.

Wang, G., Yuan, M., Ma, X., & Wu, J. (2017).

واژه نامه

۱- تحلیل لاگرانژی سریع
Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC)

محیط پیوسته

۲- روش المان مرزی
Boundary Element Method (BEM)

۳- ضریب بزرگ‌نمایی
Amplification Ratio (AR)

۴- روش تفاضل محدود
Finite Difference Method (FDM)

۵- روش اجزای محدود
Finite Element Method (FEM)

۶- دستگاه حفاری تونل
Tunnel Boring Machine (TBM)

۷- مرز جاذب
Absorbing Boundary

Seismic Site Amplification Pattern Due to a Three-Dimensional Underground Space Subjected to SV Waves

Emad Mohammad-Alizadeh Samani¹, Masoud Rabeti Moghadam^{2*}, Ommolbanin Pirsabzi³,
Amir Hossein Eghlidos³

1. M.Sc. Graduate, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

2. Assistant Professor, Ph.D. in Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran,
*Corresponding Author, email: rabeti@yu.ac.ir

3. M.Sc. Student, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Introduction

The present study investigates the effect of a three-dimensional (3D) underground space on the seismic response at the ground surface. The FLAC 3D finite difference code was used and verified against the previous studies. Harmonic SV waves with different frequencies were used in the analyses. The seismic response at the ground surface in the presence of the 3D space was compared to the free field response, and the results were presented in the form of an amplification ratio pattern. From the parametric studies, it was concluded that the amplification pattern at the ground surface is strongly influenced by the dimensions of the underground space, or length ratio (L/W) parameter, where L and W are the length and width of the underground space. The amplification patterns and their values are quite different for the models with different L/W . The results show that two-dimensional consideration of the 3D underground spaces causes more or less estimation of the amplifications at the ground surface. The amplification pattern for the three-dimensional geometry is quite different from two-dimensional geometry. Therefore, it is necessary to consider the three-dimensional geometry in investigating the effect of underground spaces or structures on the ground surface during earthquakes.

Methodology

This study examines the effect of 3D underground spaces on the seismic response of the ground surface. While previous research primarily focused on 2D models, this study validates the results of earlier work by Alielahi and Ramezani (2016) through both FLAC 2D and FLAC 3D simulations. The comparison confirms that the 3D model accurately predicts the 2D results. A comprehensive parametric analysis was then performed to investigate the influence of 3D underground box-shaped spaces, considering varying depths, on surface seismic response. The findings highlight the importance of accounting for 3D effects in seismic studies.

Results and Discussion

A three-dimensional numerical model was developed to investigate the effect of a three-dimensional box-shaped underground space on ground surface seismic responses under vertical SV waves. To account for the geometry of the underground space, a dimensionless parameter, L/W , was introduced, and its variations were examined in the seismic site amplification pattern. The seismic response at the ground surface in the presence of the three-dimensional space was compared with the free-field response, and the results were presented as an amplification pattern.

Summary and Conclusion

A 3D numerical model was developed to investigate the effect of a box-shaped underground space on the seismic response of the ground surface under vertical SV waves. A dimensionless parameter, L/W , was introduced to examine its impact on seismic amplification patterns. Key findings include:

1. The dimensions of the underground space directly affect the surface seismic response, with varying amplification patterns for different L/W values.
2. Complex amplification patterns reflect the influence of underground space geometry.
3. λ/D (dimensionless wavelength) and L/W are critical parameters. Maximum amplification occurs at $L/W = 1$ for $\lambda/D = 3$ and $L/W=10$ for $\lambda/D = 8$. Larger λ/D shifts amplification peaks to higher L/W values.
4. Larger underground structures affect broader regions.
5. Amplification distribution is radial for small L/W values and becomes linear as L/W increases.
6. Simplified 2D models cannot fully capture the effects of 3D underground spaces during earthquakes.

These conclusions apply to an unlined box-shaped cavity in an elastic rock medium under harmonic SV waves and are specific to the studied conditions.

Keywords: Three-Dimensional, Underground Space, Seismic Response of Ground Surface, Amplification Ratio, Amplification Pattern, Numerical Analysis.