

## تأثیر وجود سنگ بستر بر ارتعاشات ناشی از خطوط زیرزمینی در تونل‌های تک و دوقلو

رامین حیدری\*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
مرتضی اسماعیلی، استاد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
مرتضی قارونی نیک، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: r\_heidary@rail.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۴

### چکیده

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر ارتعاشات ناشی از خطوط زیرزمینی، وجود سنگ بستر زیر لایه خاکی است. امواج منتشر شده از تونل با رسیدن به مرز لایه بستر و بازگشت مجدد آنها به داخل لایه بالایی باعث تغییر در پاسخ محیط می‌شود. در این مقاله، با استفاده از مدل‌های المان محدود دوبعدی با در نظر گرفتن لایه خاکی بالای سنگ بستر، به بررسی تأثیر این پارامتر بر ارتعاشات رسیده به سطح زمین در تونل‌های تک و دوقلو پرداخته شده است. با در نظر گرفتن مدول‌های الاستیسیته مختلف در محدوده مدول الاستیسیته خاک و سنگ برای لایه بالایی و سنگ بستر، تأثیر این پارامتر بر ارتعاشات دریافت شده در سطح زمین تعیین شده است. در نهایت، با افزایش عمق سنگ بستر، تأثیر آن در عمق‌های مختلف بررسی شده و با استفاده از پوش رسم شده، تأثیر آن در فواصل مختلف از تونل نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته خاک لایه بالایی نسبت به مدول الاستیسیته سنگ بستر تأثیر بیشتری بر نتایج تعیین شده دارد. برای تونل تک و تونل‌های دوقلو، تأثیر وجود سنگ بستر در فواصل دور بیشتر بوده و باعث تغییر نتایج به دست آمده در بالای تونل و در فاصله ۳۰ متری از تونل به ترتیب حدود ۲ dB و ۷ dB نسبت به محیط هموزن می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: سنگ بستر، تونل دوقلو، ارتعاشات تونل مترو، روش المان محدود

## ۱. مقدمه

یکی از مباحث مورد بررسی در مهندسی ژئوتکنیک بررسی اثر ساختگاه است. اثر ساختگاه یکی از عوامل تأثیرگذار بر پاسخ ارتعاشی سطح زمین است. منبع ارتعاش در این موارد، عوامل طبیعی مانند زلزله یا عوامل انسانی مانند ارتعاشات ناشی از حرکت قطار می‌باشد. سنگ بستر، یکی از اجزای تشکیل دهنده ساختگاه محل بوده که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پاسخ سطح زمین ناشی از ارتعاشات داشته باشد. تعاریف مختلفی برای سنگ بستر وجود دارد که بسته به نوع مسئله متفاوت است. از دیدگاه زمین شناسی، سنگ بستر عبارت است از سنگ‌های تحکیم یافته قدیمی‌تر که زیر لایه‌های تحکیم نیافته قرار دارد و از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک، سنگ بستر، سطحی است که ظرفیت باربری برای احداث سازه‌های بزرگ را داشته باشد. برای تعیین عمق سنگ بستر از روش‌های ژئوفیزیک مناسب استفاده می‌گردد (مسلانی، ۱۹۸۷؛ روست و همکاران، ۱۹۹۵).

مطالعات مختلفی برای تأثیر سنگ بستر بر عواملی چون پاسخ لایه بالایی بر امواج زلزله (چائو و همکاران، ۱۹۹۱) و طراحی پی در سد سازی و پی ماشین‌آلات (گرتاس، ۱۹۸۳) انجام شده است. در زمینه بررسی تأثیر وجود لایه‌بندی بر ارتعاشات حاصل از عبور قطار می‌توان به جونز و هانت (۲۰۱۱) اشاره نمود که به بررسی تأثیر شیب لایه‌بندی در تونل‌های تک پرداخته‌اند و عنوان شده که وجود شیب تا ۵ درجه در لایه‌بندی، حدود ۱۰ dB تغییر در نتایج ایجاد می‌کند. حسین و همکاران (۲۰۱۴) برای بررسی مدل  $PiP^1$  و کارایی آن در محیط لایه‌ای، به مقایسه نتایج حاصل از المان مرزی و مدل  $PiP$  پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد در صورتی که فاصله مرز لایه‌بندی از تونل بیشتر از دو برابر قطر تونل باشد، مدل  $PiP$  نتایج قابل قبولی برای محیط با لایه‌بندی به دست می‌دهد. یانگ و همکاران (۲۰۰۷) در قسمتی از کار خود

به بررسی تأثیر وجود سنگ بستر در اعماق مختلف در تونل‌های تک پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق سنگ بستر مقدار تشدید اولیه افزایش می‌یابد. همچنین، با کاهش عمق سنگ بستر، وجود تشدید دوم نمایان‌تر می‌گردد. کوروسی و همکاران (۲۰۱۱) در قسمتی از کار خود به بررسی تأثیر وجود لایه‌بندی محیط برای خطوط روزمینی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد تا فرکانس حدود ۱۰ Hz بزرگی تابع انتقال<sup>۲</sup> در محیط هموزن بیشتر از محیط لایه‌ای است و برای فرکانس‌های بیشتر، این رفتار عکس می‌گردد. در فرکانس‌های زیاد، به دلیل وجود میرایی، مقادیر به دست آمده برای هر دو محیط یکسان است.

با توجه به موارد بیان شده، وجود مرز لایه‌بندی و تغییر جنس لایه خاکی نتایج به دست آمده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، در صورتی که تغییر قابل توجهی در جنس لایه‌ها (لایه خاک بالای لایه سنگ) اتفاق افتد، امکان تغییر قابل ملاحظه نتایج وجود دارد. یکی از مواردی که وجود سنگ بستر قادر به تغییر پاسخ لایه بالایی می‌باشد، تأثیر آن بر امواج ناشی از عبور قطار در تونل‌های زیرزمینی است. با توجه به اینکه مقاومت و جنس سنگ بستر با لایه خاکی بالای آن کاملاً متفاوت است، با رسیدن امواج ناشی از عبور قطار در تونل‌های مترو به مرز این لایه، برگشت امواج تا حد زیادی اتفاق می‌افتد. بسته به عمق و جنس سنگ بستر، تأثیر آن متفاوت خواهد بود. بر این اساس، بررسی تأثیر این پارامترها بر ارتعاشات خطوط زیرزمینی ضروری است. در این مقاله، با در نظر گرفتن مدول‌های الاستیسیته متفاوت برای خاک و سنگ بستر و همچنین تغییر عمق قرارگیری سنگ بستر، به بررسی هر کدام از این پارامترها پرداخته شده است. مسئله بیان شده در تونل‌های تک و دوقلو مورد بررسی قرار گرفته است. از نرم افزار المان محدود Midas GTS NX برای انجام تحلیل‌ها استفاده

<sup>1</sup>- Pip in Pip

<sup>2</sup>- Transfer function

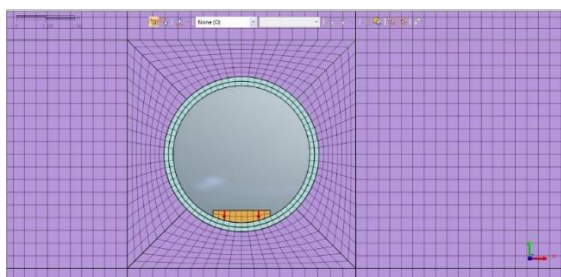
## ۲. روش تحقیق

در این مقاله، مدول الاستیسیته انتخاب شده برای خاک و سنگ به صورت جدول ۱ است که سعی شده محدودیتهای مربوط به مدول الاستیسیته خاک و سنگ را شامل گردد. بارگذاری انجام شده به صورت بار نقطه‌ای حاصل از یک واگن قطار است که دارای بار محوری ۱۴ تن بوده و با سرعت ۹۰ km/h در حال حرکت می‌باشد. قابل ذکر است که بار محوری و سرعت در نظر گرفته شده بیشترین مقدار بار محوری و سرعت حرکت قطار مترو در ایران می‌باشد. شمای بارگذاری انجام شده و مدل مورد بررسی در نرم‌افزار عددی، به همراه بارگذاری اعمال شده بر فونداسیون کف تونل، به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

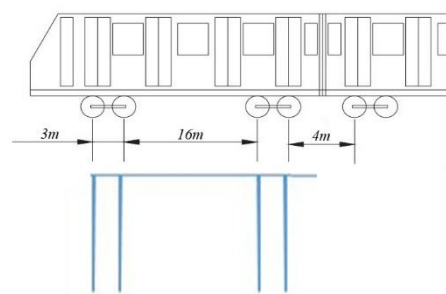
شده است. مدل‌ها با فرض کرنش صفحه‌ای به صورت دو بُعدی تحلیل شده‌اند. هدف این پژوهش، تعیین عمقی است که با قرار گرفتن سنگ بستر در آن عمق، تأثیر آن بر ارتعاشات ناشی از خطوط ریلی زیرزمینی از بین می‌رود. به عبارت دیگر، با توجه به مدول الاستیسیته سنگ بستر و لایه خاک بالای آن و همچنین فاصله از تونل، عمقی تعیین می‌شود که در آن عمق، وجود سنگ بستر تأثیری بر پاسخ محیط اطراف تونل ناشی از ارتعاشات خطوط زیرزمینی نداشته باشد. بنابراین، می‌توان از در نظر گرفتن سنگ بستر که در عمقی بیشتر از عمق تعیین شده قرار گرفته، صرف‌نظر نمود.

جدول ۱. مدول الاستیسیته در نظر گرفته شده برای خاک لایه بالایی و سنگ بستر

مدول الاستیسیته خاک (MPa)	مدول الاستیسیته سنگ بستر (GPa)
۲۵	۲۰
۶۰	۸۰
۱۰۰	۱۵۰



شکل ۲. شمای تونل، فونداسیون کف تونل و بار اعمال شده



شکل ۱. بار دینامیک قطار (سرعت ۹۰ km/h)

است، از در نظر گرفتن ریل و تراورس در کف تونل صرف‌نظر شده و بارگذاری مستقیماً بر فونداسیون کف تونل با فاصله عرض خط، اعمال می‌گردد. برای تونل‌های دو قلو، بارگذاری بیان شده در کف هر دو تونل وارد شده

از آنجایی که ارتعاشات قائم مدنظر بوده، به منظور جلوگیری از پیچیدگی نتایج، بارگذاری به صورت قائم در کف تونل اعمال می‌گردد. همچنین، از آنجایی که هدف مقاله بررسی ارتعاشات در محیط اطراف تونل

تحقیق، برای حالت اولیه، نتایج حاصل از محیط بدون وجود سنگ بستر در نظر گرفته شده و برای حالت ثانویه، نتایج به دست آمده در سطح زمین با وجود سنگ بستر در اعماق مختلف در نظر گرفته شده است.

ابتدا، با در نظر گرفتن محیط به صورت هموژن و بدون وجود سنگ بستر، با مدول الاستیسیته بیان شده برای خاک در جدول ۱، ارتعاشات در سطح زمین تعیین می‌گردد. سپس، با در نظر گرفتن سنگ بستر در عمق ۱۵ متری (۳ متر پایین‌تر از کف تونل) نتایج مقادیر ثانویه در سطح زمین به دست می‌آید. در ادامه، با افزایش عمق سنگ بستر برابر با قطر تونل در هر مرحله، ارتعاشات در سطح زمین محاسبه شده و با توجه به رابطه (۱)، IG در هر مرحله محاسبه می‌گردد.

### ۳. توصیف و صحت‌سنجی مدل عددی

به دلیل ماهیت دینامیک مسئله، امواج ایجاد شده در تونل و محیط اطراف منتشر می‌گردد. برخورد امواج به مرزهای مدل و بازگشت آنها، بر صحت نتایج به دست آمده تأثیرگذار خواهد بود. برای حذف امواج در محل برخورد آنها با مرزهای مدل عددی، از مرز جذب<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. در این حالت، میراگرها به صورت عمود و مماس بر المان‌های مرزی قرار گرفته و امواج برشی و فشاری رسیده به مرز را جذب کرده و از بازگشت آنها به داخل محیط جلوگیری می‌کنند. نیروهای مماسی و عمودی انتقال یافته به وسیله میراگرها با توجه به رابطه (۲) تعیین می‌گردد (لیسمر و کولمایر، ۱۹۶۹):

$$F_n = -\rho V_p U_n \quad (2)$$

$$F_t = -\rho V_s U_t$$

که  $\rho$  دانسیته،  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت موج برشی و سرعت موج فشاری در محیط و  $U_n$  و  $U_t$  سرعت حرکت ذره در جهت مماسی و عمودی در مرز مدل می‌باشد.

که سرعت و مقدار یکسانی دارند. به عبارت دیگر، در تونل‌های دوقلو، هر دو واگن به طور همزمان از کنار یکدیگر عبور می‌کنند. مشخصات خاک لایه بالایی، سنگ بستر و پوشش تونل در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات مصالح در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی عددی (شو و همکاران، ۲۰۱۵)

وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته	خاک لایه بالایی
۲۰۰۰	۰/۳	جدول ۱	سنگ بستر
۲۱۰۰	۰/۳	جدول ۱	پوشش تونل
۲۵۰۰	۰/۲	۳۰ GPa	

شعاع تونل‌ها ۳ متر و ضخامت پوشش تونل ۰/۲ متر فرض شده است. همچنین، در تونل‌های دوقلو، فاصله تونل‌ها ۱۰ متر بوده و در کلیه مدل‌ها، تونل در عمق ۹ متری از سطح زمین قرار گرفته است. نتایج به صورت حداکثر سرعت ذرات PPV<sup>۱</sup> در تمامی نقاط سطح زمین تعیین شده است. نتایج به دست آمده تا فاصله ۳۰ متری از تونل مشخص شده تا تأثیر سنگ بستر در فواصل دور از تونل نیز بررسی گردد.

برای بررسی نتایج به دست آمده، از مفهوم IG<sup>۲</sup> استفاده شده است که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد (حسین، ۲۰۰۴).

$$IG = 20 \log \left( \frac{x_2}{x_1} \right) \quad (1)$$

که  $x_2$  مقدار PPV به دست آمده در حالت ثانویه بوده که نتایج حاصل بعد از اعمال تغییرات در مدل است و  $x_1$  مقدار PPV در حالت اولیه است که نتایج حاصل از تحلیل در حالت بدون اعمال تغییر است. با توجه به هدف

<sup>3</sup>- Viscous boundary

<sup>1</sup>- Peak Particle Velocity

<sup>2</sup>- Insertion Gain

مدل در بحث انتشار امواج مرتبط با طول موج رایلی در محیط می‌باشد که از رابطه کلی (۴) پیروی می‌کند (کولمیر و لیسمر، ۱۹۷۳).

$$g \leq X \lambda_{\min} \quad (4)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{V_s}{f_{\max}}$$

که  $f_{\max}$  حداکثر فرکانس مورد بررسی و  $g$  اندازه مش‌بندی است. برای  $X$  مقادیر متفاوتی توسط محققین پیشنهاد شده است. با توجه به پیشنهاد شو و همکاران (۲۰۱۶) مقدار  $X$  برابر  $\frac{1}{3}$  در نظر گرفته شده است. بنابراین، با استفاده از سرعت موج برشی در محیط و با در نظرگیری حداکثر فرکانس  $80 \text{ Hz}$ ، اندازه مش  $0.3$  متر به دست آمده که با تحلیل حساسیت و افزایش اندازه مش تا  $0.5$  متر تأثیری بر نتایج مشاهده نشده است. بنابراین، اندازه مش  $0.5$  متر برای انجام تحلیل‌ها استفاده شده است.

برای صحت‌سنجی مدل عددی، از مقادیر اندازه-گیری شده میدانی و مدل عددی ساخته شده از متروی شهر تورین<sup>۱</sup>، بین ایستگاه ریوولی<sup>۲</sup> و راکونینی<sup>۳</sup> (ایلو و همکاران، ۲۰۰۸) استفاده شده است. ارتعاشات در سطح زمین و بالای تونل اندازه‌گیری شده‌اند. محقق، با مدل-سازی دوبعدی شرایط محیط در نرم‌افزار FLAC 2D نیز ارتعاشات در سطح زمین را تعیین نموده است. مؤلف، با استفاده از نرم‌افزار استفاده شده در این مقاله و ساخت مدل مشابه دوبعدی، سرعت ذرات در سطح زمین را تعیین نموده که مقادیر به دست آمده در جدول ۳ نشان داده شده است.

میرایی محیط با استفاده از میرایی رایله بیان شده است که ترکیب خطی از ماتریس سختی و ماتریس جرم می‌باشد:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

که  $M$  ماتریس جرم،  $K$  ماتریس سختی و  $C$  ماتریس میرایی است. در این رابطه،  $\beta$  و  $\alpha$  ضرایب ماتریس سختی و جرم می‌باشند که با مشخص بودن نرخ میرایی و دو مقدار برای فرکانس طبیعی محیط تعیین می‌شوند. نرخ میرایی در نظر گرفته شده برای خاک محیط اطراف تونل  $0.02$  است.

از آنجایی که تحلیل‌ها به صورت دینامیک انجام می‌شوند و بحث انتشار امواج در محیط وجود دارد، ابعاد مدل باید به گونه ای انتخاب شود که کمترین بازتاب موج از مرزها اتفاق بیفتد. همچنین، به دلیل زمان‌بر شدن محاسبات، ابعاد نباید خیلی بزرگ باشند. رابطه (۳) برای تعیین کمترین فاصله مرز مدل از محل اعمال بار پیشنهاد شده است (لیانو، ۲۰۰۲).

$$l_{\min} = \frac{C_{\max}}{2f_{\min}} \quad (3)$$

که  $C_{\max}$  سرعت موج برشی در لایه و  $f_{\min}$  کمترین فرکانس مورد بررسی می‌باشد. با توجه به بیشترین سرعت موج برشی به دست آمده از مشخصات مصالح خاکی جدول ۱ و در نظر گرفتن فرکانس  $2 \text{ Hz}$  به عنوان کمترین فرکانس مورد بررسی، فاصله از محل اعمال بار  $31$  متر تعیین شد. بنابراین، طول مدل  $70$  متر و عمق مدل  $50$  متر در نظر گرفته شده است.

اندازه مش تأثیر به‌سزایی در صحت نتایج دارد و هر چه مش ریزتر باشد نتایج به دست آمده صحیح‌تر می‌باشند (شو و همکاران، ۲۰۱۵). از طرفی، با در نظر گرفتن مش ریز، تعداد معادلات و زمان محاسبات افزایش می‌یابد که با سیستم‌های معمولی، به دلیل حافظه کم، محاسبات انجام‌پذیر نخواهد بود. ابعاد المان‌بندی برای

<sup>۲</sup>- Racconigi

<sup>۱</sup>- Turin

<sup>۲</sup>- Rivoli

تونل با مدول الاستیسیته مختلف خاک در تونل‌های تک و دوقلو نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، با کاهش مدول الاستیسیته، ارتعاشات در سطح زمین افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با نرم‌تر شدن محیط اطراف تونل، مقدار ارتعاشات در سطح زمین افزایش می‌یابد. این روند در تونل‌های تک و دوقلو مشابه می‌باشد. PPV به دست آمده در تونل‌های دوقلو به دلیل بارگذاری انجام شده در هر دو تونل بیشتر از تونل‌های تک است.

روند تغییرات نسبت به فاصله از تونل در دو حالت تونل تک و تونل دوقلو متفاوت است. در تونل‌های تک، مقدار ارتعاشات در بالای تونل کمتر از دو طرف تونل بوده، ولی در تونل‌های دوقلو، مقدار PPV به دست آمده در مرکز حد فاصل دو تونل و در سطح زمین بیشتر از بقیه نقاط می‌باشد. در تونل‌های دوقلو مشابه تونل تک، PPV به دست آمده در سطح زمین نسبت به مرکز مدل متقارن است. از آنجایی که کلیه مدل‌های مورد بررسی نسبت به تونل متقارن هستند، این روند در بقیه نتایج نیز دیده می‌شود.

### جدول ۳. مقایسه مقادیر به دست آمده از تست

#### میدانی و مدل عددی

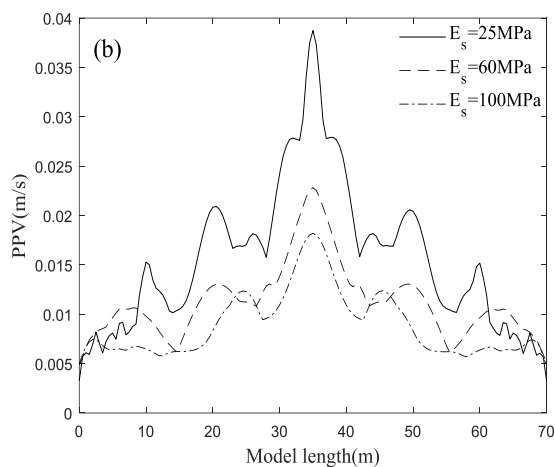
مقادیر سرعت ذرات در سطح زمین بالای تونل) ( $\times 10^{-4} \text{ cm/s}$ )		
مطالعه	تست میدانی (ایلو و همکاران، ۲۰۰۸)	مدل عددی دو بعدی (ایلو و همکاران، ۲۰۰۸)
حاضر	۵	۲/۲
۶/۸		

همان طور که مشاهده می‌گردد، همخوانی خوبی بین مقادیر به دست آمده از تست میدانی و مدل عددی وجود دارد. اختلاف موجود بین مقادیر می‌تواند به دلیل ماهیت سه‌بعدی مسئله بوده که به صورت مدل دو بعدی بررسی شده است.

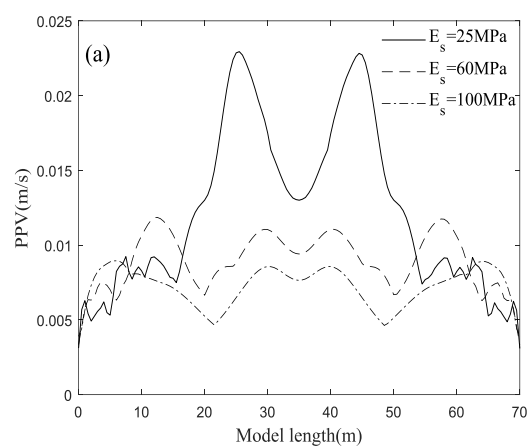
### ۴. بحث و بررسی نتایج عددی

#### ۴-۱. محیط هموزن با مدول الاستیسیته متفاوت

در شکل ۳، نتایج حاصل از محیط هموزن در اطراف



(ب)



(الف)

شکل ۳. PPV به دست آمده برای خاک با مدول الاستیسیته متفاوت در (الف) تونل تک و (ب) تونل دوقلو

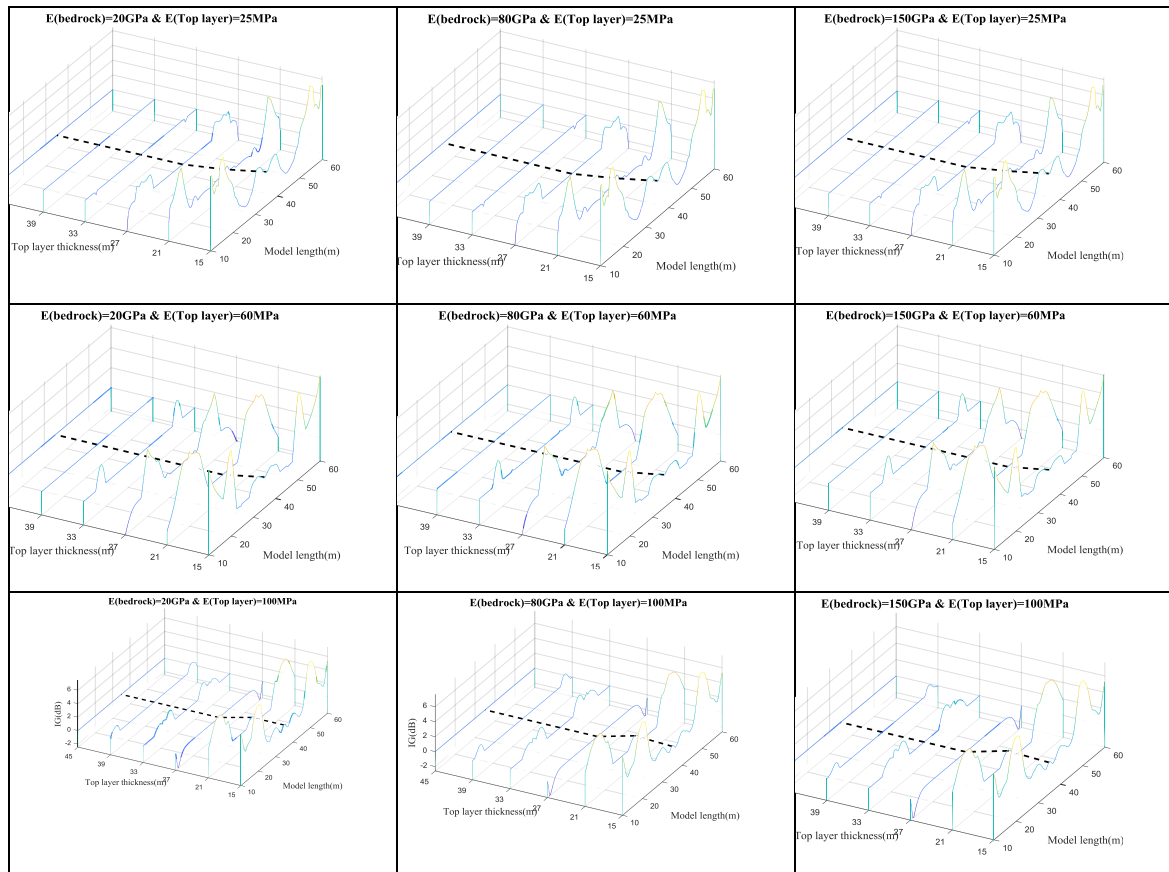
## ۲-۴. تأثیر وجود سنگ بستر در حوزه زمان

مقدار IG هم در بالای تونل و هم در فاصله دور از تونل به مقدار صفر نزدیک می‌گردد که به معنای کاهش تأثیر وجود سنگ بستر می‌باشد. در صورت صفر شدن IG، اثر وجود سنگ بستر از بین رفته و نتایج به دست آمده با محیط هموزن تفاوتی ندارد.

تقارن نتایج به دست آمده در سطح زمین که قبلاً نیز بیان شد، با وجود سنگ بستر از بین نرفته و نتایج نشان‌دهنده تقارن در پاسخ به دست آمده در سطح زمین می‌باشد. قابل ذکر است که در صورت شیب‌دار بودن سنگ بستر، تقارن نشان داده شده از بین می‌رود و نتایج در دو طرف تونل با یکدیگر متفاوت خواهد بود. همچنین، در بیشتر موارد، همان‌طور که انتظار می‌رود، وجود سنگ بستر باعث افزایش ارتعاشات در سطح زمین می‌گردد (IG مثبت) که دلیل آن بازگشت امواج از بستر سنگی می‌باشد که در شکل ۵ به وضوح نشان داده شده است.

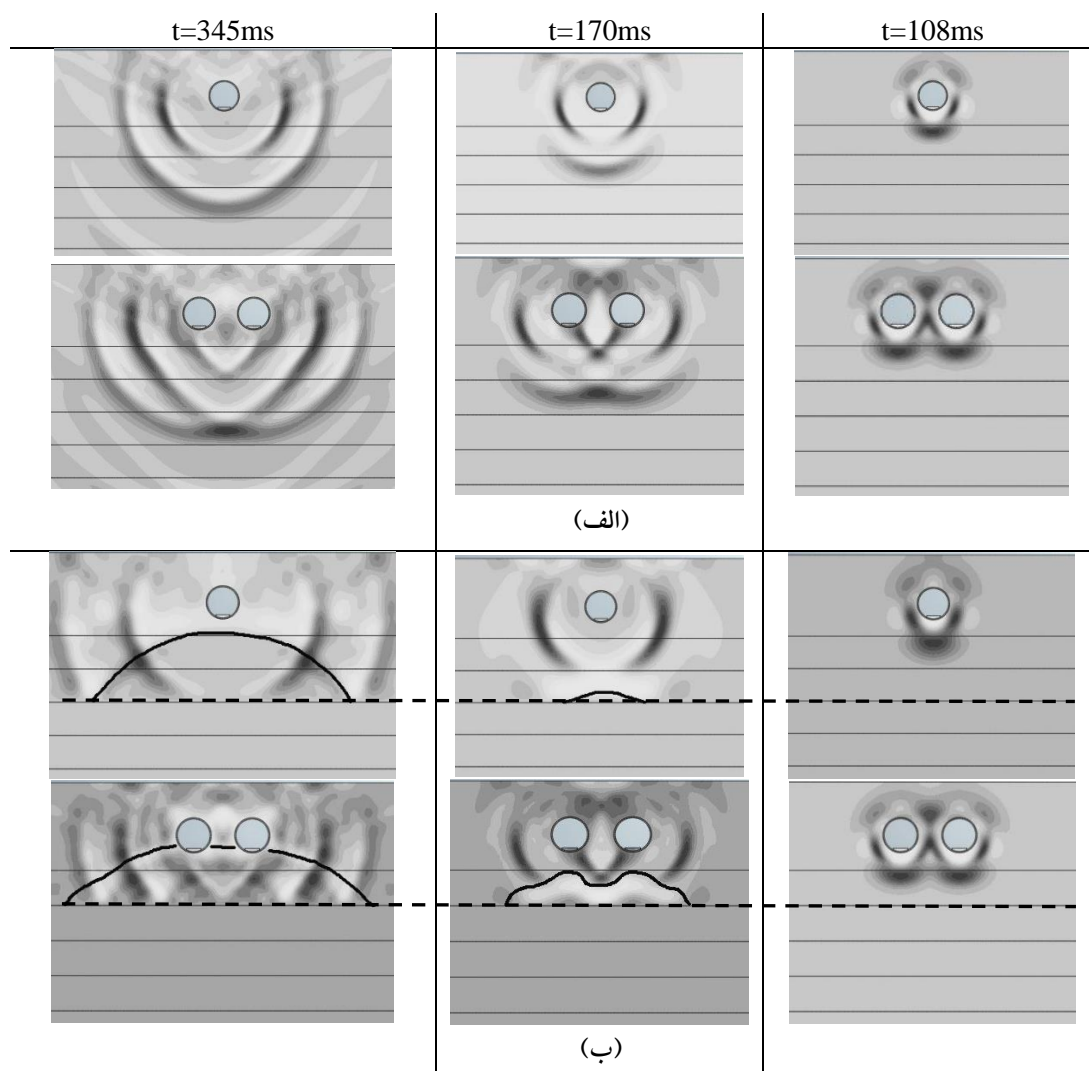
در شکل ۴، IG تعیین شده در تونل‌های تک برای اعماق مختلف سنگ بستر نشان داده شده است. برای تمامی ترکیب‌های مدول الاستیسیته لایه بالایی و سنگ بستر در نظر گرفته شده در جدول ۱، تحلیل‌ها انجام شده و ترکیب در نظر گرفته شده برای هر مجموعه نمودارها در بالای هر شکل آورده شده است. برای تونل‌های دوقلو نیز همین روند تکرار شده است.

IG مثبت به معنای افزایش PPV به دست آمده در بالای تونل با وجود سنگ بستر می‌باشد و برعکس. همان‌طور که مشاهده می‌شود، IG به دست آمده در فواصل دور از تونل بیشتر از مقدار به دست آمده در بالای تونل می‌باشد. این یعنی که وجود سنگ بستر در فواصل دور از تونل تأثیر بیشتری بر مقادیر ارتعاشات به دست آمده در سطح زمین دارد. البته با افزایش عمق سنگ بستر،



شکل ۴. IG تعیین شده برای ترکیب‌های مختلف مدول الاستیسیته سنگ بستر و لایه بالایی در تونل تک

تأثیر وجود سنگ بستر بر ارتعاشات ناشی از خطوط زیرزمینی در تونل‌های تک و دوقلو

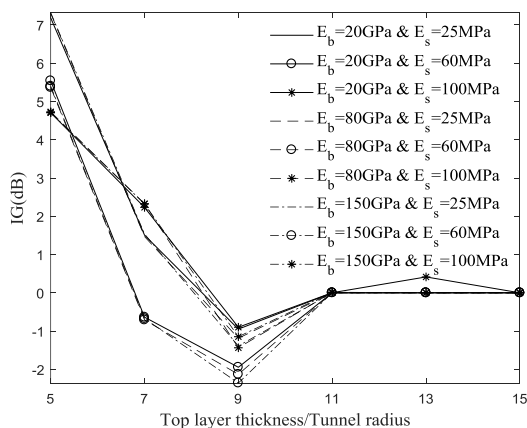


شکل ۵. تغییرات سرعت ذرات در طول زمان برای تونل تک و دوقلو: الف) محیط هموزن و ب) وجود سنگ بستر

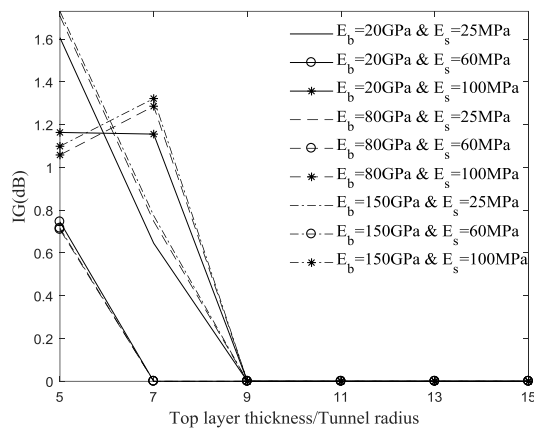
به دست آمده در بالای تونل حدود ۲ dB و در فاصله ۳۰ متری حدود ۷ dB می‌باشد که نشان دهنده تأثیر وجود سنگ بستر در فواصل دور از تونل است.

همین امر باعث تأثیر بیشتر سنگ بستر در فواصل دورتر از تونل می‌گردد. برای مشاهده بهتر نتایج به دست آمده، مقادیر IG تعیین شده در حالت‌های مختلف در بالای تونل و در فاصله ۳۰ متری از تونل در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین IG





(ب)



(الف)

شکل ۶. IG به دست آمده برای حالت‌های مختلف سنگ بستر و لایه بالایی در تونل تک: الف) بالای تونل، ب) فاصله ۳۰ متری از تونل

۲۵ MPa بیشتر از باقی موارد می‌باشد. ولی وقتی ضخامت لایه بالایی به ۷ برابر شعاع تونل می‌رسد، IG به دست آمده برای خاک با مدول الاستیسیته ۱۰۰ MPa بیشتر از باقی موارد است. روند مشاهده شده در بالای تونل و فاصله ۳۰ متری از تونل تقریباً مشابه است. دلیل این امر، علاوه بر متفاوت بودن سرعت موج در لایه بالایی با مصالح مختلف، نزدیک شدن فرکانس طبیعی لایه بالایی به فرکانس غالب بارگذاری (۱۰ Hz) نیز می‌باشد. فرکانس طبیعی لایه خاکی به ضخامت و سرعت موج برشی (که مرتبط به مدول برشی است) وابسته است. بنابراین، با تغییر ضخامت لایه خاکی، مصالحی که باعث ایجاد فرکانسی نزدیک به فرکانس غالب بارگذاری می‌شود، تفاوت بیشتری را نسبت به حالت هموزن نشان می‌دهد که به معنای مقادیر بیشتر IG است.

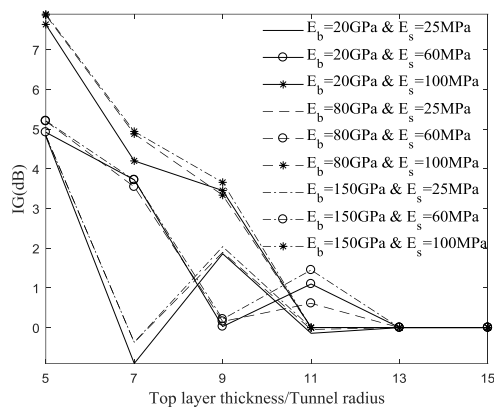
فرایند توضیح داده شده در بالا برای تونل‌های دوقلو نیز انجام شده است. نتایج به دست آمده در بالای تونل و در فاصله ۳۰ متری از تونل در شکل ۷ نشان داده شده است.

طبق نتایج شکل ۶، روند کلی تغییرات IG به صورت کاهشی است و با افزایش عمق سنگ بستر میزان IG نیز کاهش می‌یابد. وقتی عمق سنگ بستر از ۹ برابر شعاع تونل بیشتر می‌شود، برای نقاط بالای تونل تک، تأثیر آن از بین می‌رود. ولی در فاصله ۳۰ متری از تونل، وجود سنگ بستر در این عمق و حتی اعماق بیشتر هنوز مشاهده می‌گردد.

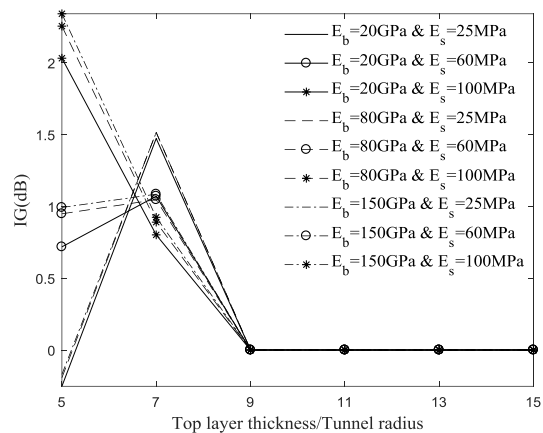
مطابق نتایج به دست آمده در شکل ۶، مدول الاستیسیته سنگ بستر تأثیر چندانی بر مقدار IG تعیین شده ندارد. ولی مدول الاستیسیته خاک تأثیر چشم‌گیری بر نتایج به دست آمده نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در حالتی که نسبت ضخامت لایه بالایی به شعاع تونل ۵ است، با تغییر مدول الاستیسیته خاک از ۲۵ به ۶۰ MPa، حدود ۰/۸ dB در بالای تونل و ۲dB در فاصله ۳۰ متری از تونل در مقادیر تعیین شده تغییر به وجود می‌آید.

تغییر مدول الاستیسیته خاک در ضخامت‌های مختلف برای لایه بالایی نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، وقتی ضخامت لایه بالایی ۵ برابر شعاع تونل است IG ایجاد شده برای خاک با مدول الاستیسیته

تأثیر وجود سنگ بستر بر ارتعاشات ناشی از خطوط زیرزمینی در تونل‌های تک و دوقلو



(ب)



(الف)

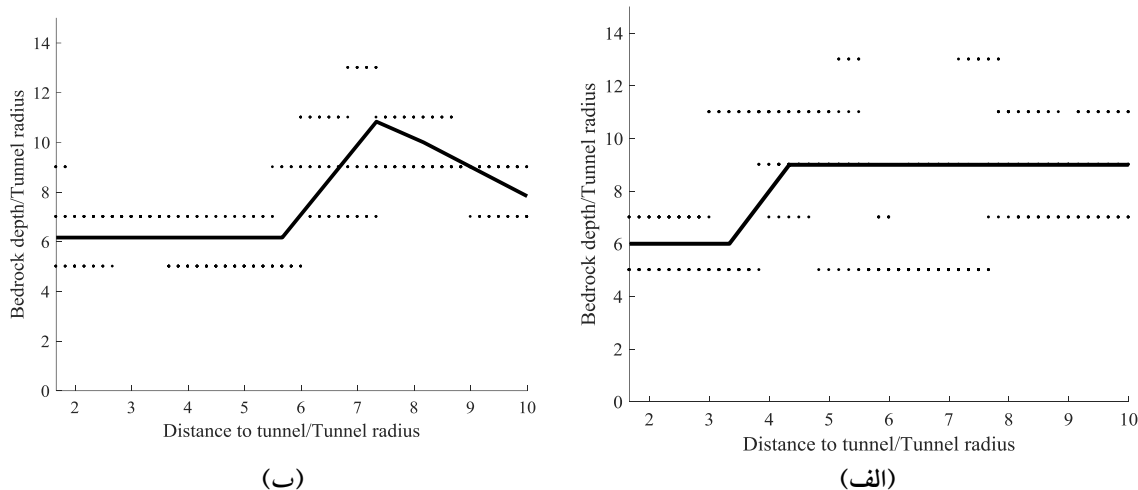
شکل ۷. IG به دست آمده برای حالت‌های مختلف سنگ بستر و لایه بالایی در تونل دوقلو: (الف) بالای تونل و (ب) فاصله ۳۰ متری از تونل

همان‌طور که قبلاً بیان شد، مدول الاستیسیته سنگ بستر تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد. بنابراین، با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته لایه بالایی و همچنین فاصله افقی از تونل در سطح زمین، عمق تأثیر سنگ بستر برای تونل تک و تونل دوقلو در شکل ۸ نشان داده شده است. به عبارت دیگر، با مشخص بودن مدول الاستیسیته لایه بالایی، در هر فاصله از تونل و بدون در نظر گرفتن مدول الاستیسیته سنگ بستر، عمقی که تأثیر سنگ بستر بر ارتعاشات ناشی از عبور قطار در تونل‌های تک و دوقلو کمتر از ۱ dB باشد، تعیین می‌گردد. بنابراین، در صورتی که عمق سنگ بستر بیشتر از (بالایی) پوش تعیین شده در شکل ۸ باشد، می‌توان از در نظر گرفتن آن در تحلیل‌ها خودداری نموده و محیط را به صورت هموزن و تک لایه فرض کرد. به عنوان مثال، با توجه به پوش به دست آمده برای تونل دوقلو، اگر عمق لایه بستر در محیط مورد بررسی بیشتر از ۶ برابر شعاع تونل باشد، برای بررسی ارتعاشات تا فاصله ۱۸ متری از تونل (۶ برابر شعاع تونل)، نیازی به در نظر گرفتن سنگ بستر در تحلیل‌ها نیست. زیرا تأثیر در نظر گرفتن آن در تحلیل‌ها کمتر از ۱ dB است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات IG به دست آمده برای تونل‌های دوقلو مشابه تونل تک می‌باشد. ولی مقادیر به دست آمده برای IG در تونل‌های دوقلو بیشتر از تونل تک است. بیشترین مقدار IG به دست آمده در بالای تونل حدود ۲/۵ dB و در فاصله ۳۰ متری از تونل حدود ۸ dB می‌باشد. بنابراین، قرار گرفتن تونل دوم در کنار تونل تک باعث افزایش تأثیر سنگ بستر بر ارتعاشات رسیده به سطح زمین می‌گردد. به عبارت دیگر، افزایش انرژی منبع ارتعاش باعث افزایش تأثیر سنگ بستر شده است.

در تونل‌های دوقلو، همانند تونل تک، مدول الاستیسیته سنگ بستر تأثیر چندانی بر نتایج ندارد. ولی مدول لایه بالایی تغییر قابل توجهی در نتایج ایجاد می‌کند. همچنین، در تونل‌های دوقلو، تأثیر مدول الاستیسیته لایه بالایی با تونل تک متفاوت می‌باشد. به عنوان مثال، وقتی لایه بالایی دارای ضخامت ۱۵ متر (۵ برابر شعاع تونل) است، در تونل تک، خاک با مدول الاستیسیته MPa ۲۵ بیشترین مقدار IG را نشان می‌دهد. ولی در تونل‌های دوقلو، لایه بالایی با همین ضخامت با مدول الاستیسیته MPa ۱۰۰ بیشترین IG را نشان می‌دهد. این رفتار ناشی از قرار گرفتن تونل دوم در کنار تونل اول و تأثیر دو منبع موج در کنار یکدیگر است.

تأثیر وجود سنگ بستر بر ارتعاشات ناشی از خطوط زیرزمینی در تونل‌های تک و دوقلو



شکل ۸. عمق تأثیر سنگ بستر در فواصل مختلف از تونل: الف) تک و ب) دوقلو

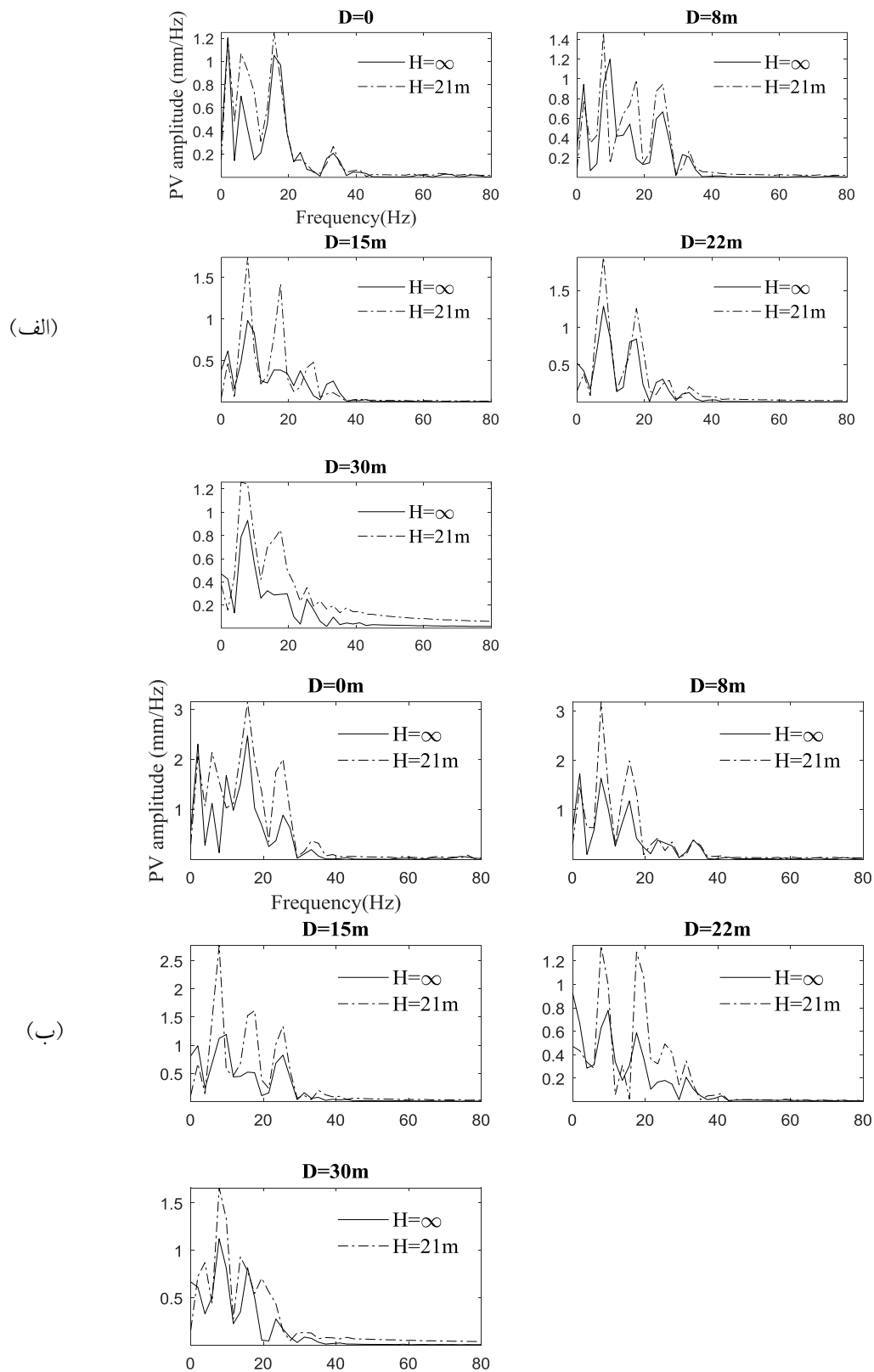
همان‌طور که مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن سنگ بستر، بزرگی نتایج در فرکانس‌های مختلف افزایش می‌یابد که در بخش قبلی نیز به آن اشاره شد. روند مشابه-ای برای تونل‌های دوقلو نیز دیده می‌شود. در تونل تک، با وجود سنگ بستر تشدید در فرکانس دوم نمایان‌تر شده است. همین امر برای فرکانس تشدید سوم در تونل‌های دوقلو نیز مشاهده می‌گردد. به عبارت دیگر، وجود سنگ بستر، محتوای فرکانسی پاسخ لایه بالایی را تغییر نمی‌دهد و فقط فرکانس‌های تشدید را نمایان‌تر می‌کند. در فرکانس‌های زیاد، به دلیل وجود میرایی، نتایج تعیین شده در هر دو حالت، با وجود سنگ بستر و محیط هموژن، یکسان بوده و اختلاف چندانی با هم ندارند.

### ۳-۴. تأثیر وجود سنگ بستر در حوزه فرکانس

با توجه به تاریخچه زمانی سرعت ذرات در نقاط مختلف سطح زمین و استفاده از انتقال فوریه<sup>۱</sup>، محتوای فرکانسی پاسخ به دست آمده در نقاط مختلف تعیین شده است. در شکل ۹، محتوای فرکانسی نقاط در سطح زمین با فواصل مختلف از تونل نشان داده شده است.  $H$  عمق سنگ بستر و  $D$  فاصله از مرکز تونل را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که شکل ۹ برای حالتی تعیین شده که مدول الاستیسیته خاک برابر  $60 \text{ MPa}$  و مدول الاستیسیته سنگ بستر برابر با  $80 \text{ GPa}$  است. همچنین، فرض شده است که سنگ بستر در عمق ۲۱ متری قرار دارد.

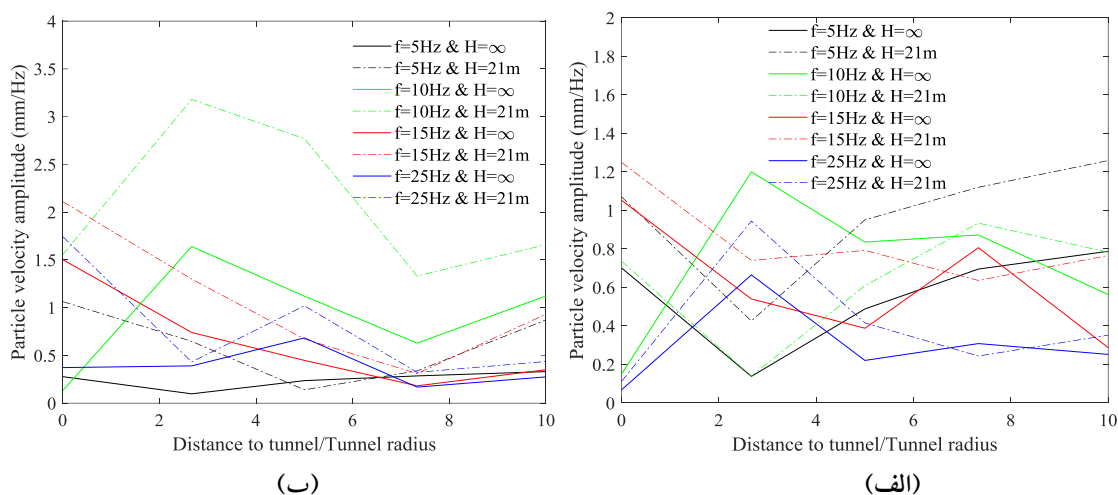
<sup>۱</sup> Fourier Transform

تأثیر وجود سنگ بستر بر ارتعاشات ناشی از خطوط زیرزمینی در تونل‌های تک و دوقلو



شکل ۹. محتوای فرکانسی سرعت حرکت ذرات در فواصل مختلف از تونل: الف) تونل تک و ب) تونل دوقلو

توزیع بزرگی تعیین شده در نقاط مختلف نسبت به فاصله از تونل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. خطوط بریده، نتایج را در صورت وجود سنگ بستر و خطوط توپر نتایج در محیط هموزن را نشان می‌دهد که برای فرکانس‌های مختلف رسم شده است.



شکل ۱۰. تغییرات محتوی فرکانسی در فواصل مختلف از تونل: الف) تک و ب) دوقلو

### ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با در نظر گرفتن تونل‌های تک و دوقلو و همچنین وجود سنگ بستر در اعماق مختلف، تأثیر آن بر ارتعاشات در سطح زمین و در فواصل مشخص از تونل تعیین شده است. به طور خلاصه، نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- بدون وجود سنگ بستر و با در نظر گرفتن محیط هموزن، مقادیر تعیین شده در سطح زمین نسبت به مرکز تونل متقارن می‌باشد، که این روند هم در تونل‌های تک و هم در تونل‌های دوقلو مشاهده می‌شود. اگر سنگ بستر در نظر گرفته شده در محیط، بدون شیب باشد نیز همین روند قابل مشاهده است. با نرم‌تر شدن محیط اطراف تونل (کاهش مدول الاستیسیته خاک) ارتعاشات به دست آمده در سطح زمین افزایش می‌یابد.
- در حالتی که سنگ بستر در تحلیل‌ها در نظر گرفته شود، برای تونل تک، حداکثر IG تعیین شده برای نقاط سطح زمین در بالای تونل حدود ۲ dB و در فاصله ۳۰ متری از تونل حدود ۷ dB می‌باشد که نشان دهنده اهمیت تأثیر وجود سنگ بستر در فواصل دور از تونل می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، هم در تونل‌های تک و هم در تونل‌های دوقلو، فرکانس‌های زیاد در فواصل نزدیک‌تر جذب می‌شوند. ولی فرکانس‌های ۵ Hz و ۱۰ Hz همچنان در فاصله افقی بیش از ۶ برابر شعاع تونل دارای مقدار قابل توجهی هستند. طبق مطالعات پیشین، ارتعاشات ناشی از خطوط راه‌آهن برای فرکانس‌های کمتر از ۸۰ Hz قابل توجه می‌باشد. ارتعاشات با فرکانس‌های بیشتر جذب محیط شده و تأثیر چندانی بر پاسخ به دست آمده در سطح زمین ندارند.

روند تغییرات بزرگی به دست آمده در فواصل مختلف از تونل برای دو حالت وجود سنگ بستر و محیط هموزن تقریباً یکسان است. به عنوان مثال، برای فرکانس ۵ Hz تغییرات حالت بدون سنگ بستر و با وجود سنگ بستر مشابه بوده ولی مقدار بزرگی تعیین شده برای حالتی که سنگ بستر در نظر گرفته شده است بیشتر می‌باشد (نمودار بریده بالاتر از نمودار توپر حرکت می‌کند).

باعث افزایش دامنه در فرکانس‌های مختلف و نمایان‌تر شدن دامنه فرکانس‌های بالاتر (فرکانس تشدید دوم و سوم) می‌گردد. روند تغییرات دامنه به دست آمده در فرکانس‌های مختلف، نسبت به فاصله از تونل، برای حالتی که سنگ بستر در نظر گرفته شده و حالت محیط هموزن تقریباً مشابه است.

با فاصله گرفتن از تونل، دامنه ارتعاشات با فرکانس‌های بیشتر، سریع‌تر از فرکانس‌های کم، جذب می‌شود. ولی فرکانس‌های کم در فواصل دور از تونل دارای دامنه قابل ملاحظه‌ای می‌باشند.

این روند در تونل‌های دوقلو نیز مشاهده می‌شود و مقادیر تعیین شده در بالای دو تونل و فاصله دور از تونل‌ها با مقادیر تعیین شده در تونل تک اختلاف کمی دارد. به عبارت دیگر، وجود تونل دوم باعث افزایش اختلاف بین حالت هموزن و حالت لایه‌ای شده است؛ ولی این اختلاف قابل توجه نمی‌باشد.

• در اکثر موارد، وجود سنگ بستر، به دلیل بازگشت امواج، باعث افزایش ارتعاشات در سطح زمین شده است که این روند در دو حالت تونل تک و تونل‌های دوقلو مشاهده می‌شود.

• محتوای فرکانسی پاسخ به دست آمده در سطح زمین، با وجود سنگ بستر تغییر چندانی نمی‌کند و تنها

## ۶. منابع

- Aiello, V., Boiero, D., D'Apuzzo, M., Socco, L. V. and Silvestri, F. 2008. "Experimental and numerical analysis of vibrations induced by underground trains in an urban environment". *Struct. Control Health Monit.*, 15(3): 315-348.
- Chouw, N., Le, R. and Schmid, G. 1991. "Propagation of vibration in a soil layer over bedrock". *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 8(3): 125-131.
- Gazetas, G. 1983. "Analysis of machine foundation vibrations: State of the art". *Int. J. Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 2(1): 2-42.
- Hussein, M. F. M. 2004. "Vibration from underground railways". Vol. 11, University of Cambridge.
- Hussein, M. F. M., François, S., Schevenels, M., Hunt, H. E. M., Talbot, J. P. and Degrande, G. 2014. "The fictitious force method for efficient calculation of vibration from a tunnel embedded in a multi-layered half-space". *J. Sound Vib.*, 333(25): 6996-7018.
- Jones, S. and Hunt, H. 2011. "Effect of inclined soil layers on surface vibration from underground railways using the thin-layer method". *J. Eng. Mech.*, 137(12): 887-900.
- Kouroussis, G., Verlinden, O. and Conti, C. 2011. "Free field vibrations caused by high-speed lines: Measurement and time domain simulation". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 31(4): 692-707.
- Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer, J. 1973. "Finite element method accuracy for wave propagation problems". *J. Soil Mech. Found. Div.*, 99(5): 421-427.
- Liao, Z. P. 2002. "Introduction to wave motion theories in engineering". Academic Press, Beijing, China, pp. 136-285. (In Chinese).
- Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L. 1969. "Finite dynamic model for infinite media". *J. Eng. Mech. Div.*, 95(4): 859-878.
- Maslanyj, M. P. 1987. "Seismic bedrock depth measurements and the origin of George VI Sound, Antarctic Peninsula". *Bull. Brit. Antarct. Surv.*, 75: 51-65.
- Roesset, J. M., Stokoe, I. I., Kenneth, H. and Seng, C. R. 1995. "Determination of depth to bedrock from falling weight deflectometer test data". *Transport. Res. Record*, 1504.
- Xu, Q., Xiao, Z., Liu, T., Lou, P. and Song, X. 2015. "Comparison of 2D and 3D prediction models for environmental vibration induced by underground railway with two types of tracks". *Comp. Geotech.*, 68: 169-183.
- Xu, Q. Y., Ou, X., Au, F. T. K., Lou, P. and Xiao, Z. C. 2016. "Effects of track irregularities on environmental vibration caused by underground railway". *Eur. J. Mech.-A/Solids*, 59: 280-293.
- Yang, Y. B., Hung, H. H. and Hsu, L. C. 2007. "Ground vibrations due to underground trains considering soil-tunnel interaction". *Interac. Multiscale Mech.*, 1(1): 157-175.