

بررسی تأثیر عمق سطح آب زیرزمینی بر ارتعاشات حاصل از حرکت قطارهای مترو

با استفاده از مدل سازی عددی (مطالعه موردی در اهواز)

رسول مهدی زاده¹

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-خاک و پی دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده:

استفاده از قطارهای زیرزمینی مترو به عنوان وسیله‌ای سریع و مطمئن، می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای کاهش ترافیک شهری و حمل و نقل سریع مسافران باشد. از طرفی حرکت متروها با سرعت مناسب در حد فاصل بین ایستگاه‌ها موجب ایجاد ارتعاشات هر چند خفیف، اما گاهی اوقات آزار دهنده برای افراد ساکن در حریم خطوط مترو می‌شود. این ارتعاشات که یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های مربوط به مناطق نزدیک به سیستم‌های حمل و نقل می‌باشد، می‌تواند باعث ارتعاش ساختمان‌ها و نیز شنیده شدن صداهای ناهنجار و آزار دهنده در فضای داخلی ساختمان‌ها گردد.

پارامترهای بسیار زیادی در میزان ارتعاشات ایجاد شده در اثر حرکت قطارهای زیرزمینی دخیل هستند که آگاهی از اینکه هر یک از آنها چگونه بر ماهیت این ارتعاشات تأثیر گذارند، در پیش بینی و کاهش این ارتعاشات بسیار موثر است. در این تحقیق با استفاده از مدل سازی عددی، تأثیر عمق سطح آب زیرزمینی بر ارتعاشات حاصل از حرکت قطارهای مترو در ساختار زمین شناسی اهواز به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با وجود تأثیر قابل توجه عمق سطح آب زیرزمینی بر ارتعاشات ایجاد شده، رابطه منظم و قانون‌مندی در این رابطه وجود ندارد.

کلید واژه‌ها: ارتعاشات مترو، عمق سطح آب زیرزمینی، مدل عددی

¹ mehdizadeh250@gmail.com

۱. مقدمه

یکی از مهمترین نکات قابل توجه در زمان بهره‌برداری از خطوط مترو، آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از ارتعاشات و نوفه‌های حاصل از حرکت مترو و همچنین مخاطرات ژئوتکنیکی این ارتعاشات در خاک‌های سست و ساختمان‌های قدیمی و فرسوده می‌باشد.

ارتعاشات و لرزشهای زمین در اثر عبور قطارهای مترو در خاک‌های سست، پتانسیل بروز پدیده‌ی نشست را در این خاک‌ها بالا می‌برد که خود می‌تواند منجر به بروز مشکلات ژئوتکنیکی گردد. از سوی دیگر به دلیل متناوب بودن عبور قطارها، علی‌رغم پایین بودن میزان کرنش‌های ایجاد شده در محیط، می‌تواند در دراز مدت سبب ایجاد پدیده‌ی خستگی در مصالح ساختمانی گشته و پتانسیل خطر را بالا ببرد.

از دیدگاه تأثیر ارتعاشات بر زندگی بشر نیز، حضور ارتعاشات متناوب در محیط، سلامت روحی افراد را به خطر انداخته، منجر به افسردگی و خستگی طولانی می‌شود.

ارتعاشات ایجاد شده ناشی از حرکت قطارهای مترو در محدوده ۸۰-۱ Hz و اصوات ناشی از این ارتعاشات در محدوده ۲۰۰-۱۰۰۰ Hz قرار دارند (گوپتا^۱، ۲۰۰۷، ص ۶۰۸). آزردهی ناشی از این ارتعاشات زمانی اتفاق می‌افتد که ارتعاشات به مقدار کمی از محدوده‌ی آستانه احساس تجاوز نمایند. آن حدی از ارتعاشات که باعث آزردهی و رنجش انسان می‌گردد بسیار پایین‌تر از حدی است که باعث تخریب و آسیب دیدگی ساختمان‌های معمولی گردد (سازمان حمل و نقل آمریکا^۲، ۲۰۰۶).

پارامترهای بسیار زیادی در میزان ارتعاشات ایجاد شده در اثر حرکت قطارهای زیرزمینی دخیل هستند، از جمله نوع و شرایط ریل، سرعت قطار، نوع سازه تونل، جنس و خواص ژئوتکنیکی خاک محل، عمق بستر سنگی و... (سازمان حمل و نقل آمریکا، ۲۰۰۶). بعلاوه تنوع و گستردگی زیاد در هندسه و سایر پارامترهای مؤثر در این قضیه استفاده از روش‌های تحلیلی که با اعمال مفروضات ساده کننده‌ای به حل مساله می‌پردازد بسیار دشوار بوده و نیز بسته به میزان مفروضات ساده کننده‌ای که برای هندسه و سایر پارامترهای مسأله لحاظ شده‌اند خطای نتایج حاصله بالا خواهد بود.

با دقت در نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی انجام شده در طول مسیر متروی شهر اهواز، مشاهده می‌گردد که عمق سطح آب زیرزمینی در اکثر نقاط طول مسیر بسیار کم است. همچنین با توجه به تغییرات عمق سطح آب در طی فصول مختلف سال، لازم است که اثرات این متغیر بر میزان ارتعاشات منتقل شده به سطح زمین در حین عبور قطار، مورد ارزیابی قرار گیرد. لذا در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی عددی، تأثیر عمق سطح آب زیرزمینی بر ارتعاشات حاصل از حرکت قطارهای مترو در ساختار زمین شناسی اهواز به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، از نرم افزار ژئوتکنیکی *plaxis v8* که یک نرم‌افزار اجزا محدود دو بعدی می‌باشد استفاده گردیده و در آن، تونل، بار قطار و خاک اطراف تونل و سایر جزئیات در حالت دو بعدی و به صورت کرنش مسطح شبیه‌سازی شده است.

۲. معرفی پروژه قطار شهری اهواز

مسیر خط ۱ قطار شهری اهواز بطول تقریبی ۲۳ کیلومتر، شمال شرقی شهر را با عبور از بخش مرکزی شهر و رودخانه کارون به جنوب غربی شهر متصل می‌نماید. این مسیر از نیروگاه زرگان در بخش شمالی آغاز شده و با حرکت در مسیر بلوار پاسداران و عبور از میدان‌های فرودگاه، دروازه، دانشگاه و کارگر در پارکینگ جنوبی خاتمه می‌یابد. عمق تونل در طول مسیر حدود ۱۲ متر از سطح زمین و قطر تونل ۶ متر می‌باشد. شمایی از مسیر متروی شهر اهواز در شکل (۱) نمایش داده شده است.

اطلاعات مربوط به مشخصات زمین‌شناسی در مسیر مترو بر مبنای گزارشات ژئوتکنیک شرکت کیسون (مجری طرح) تامین شده است. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته می‌توان از دیدگاه زمین‌شناسی، مسیر متروی شهر اهواز را به دو بخش

¹ Gupta, S. et al.

² US Department of Transportation

تقسیم نمود. بخش اول، مربوط به نیمه شمالی مسیر بوده که متشکل از لایه‌های ریزدانه رسی و سلیتی در لایه‌های فوقانی بوده و سنگ بستر که متشکل از مارن‌های قرمز رنگ و لای سنگ و ماسه‌سنگ است در عمق بسیار کمی قرار دارد. بخش دوم مربوط به نیمه جنوبی مسیر می‌باشد که به علت عملکرد گسل اهواز، سنگ بستر افتادگی قابل توجهی داشته و در این بخش تا عمق حدود ۴۰ متر، سنگ بستر در زیر آبرفت‌های جوان و بعضاً کم تراکم قرار می‌گیرد.

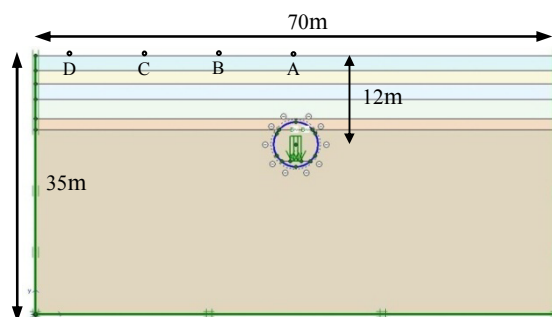


شکل شماره ۱: شمایی از مسیر متروی شهر اهواز

۳. مدل سازی عددی در نرم افزار plaxis

گام اول در یک مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار پلاکسیس، تعیین ابعاد مدل مورد نظر می‌باشد. بدیهی است که برای حصول نتایج با دقت بالا لازم است که تونل و سایر اجزاء سازه‌ای و نیز خاک تا فاصله بی‌نهایت از تونل در مدل وارد گردد. ولی از آنجا که انجام محاسبات و آنالیزها بر روی مدل مورد نظر با استفاده از کامپیوتر انجام می‌گیرد، لذا به علت محدودیت در توانایی و سرعت کامپیوتر باید خاک اطراف تونل را تا محدوده معینی در مدل وارد کرده و تأثیر فضای خارج از این محدوده را از طریق شرایط مرزی در مدل اعمال کنیم.

بر این اساس ابعاد مدل $70m$ در $35m$ انتخاب گردید. همچنین عمق تونل $12m$ متر از سطح زمین و قطر تونل در طول مسیر $6m$ متر می‌باشد. شکل شماتیک مدل انتخابی در شکل (۲) نمایش داده شده است.

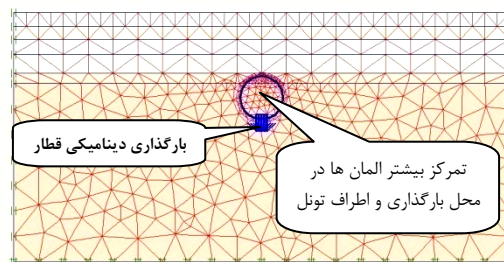


شکل شماره ۲: شمایی مدل سازی در نرم افزار

در مرحله بعد با استفاده از ابزار موجود در نرم افزار، به ترسیم هندسه مقطع مورد نظر در حالت کرنش مسطح^۱ می‌پردازیم. بدین منظور با استفاده از ابزار *Geometry line* محدوده کلی خاک و نیز مرز بین لایه‌های خاک را ترسیم می‌کنیم. همچنین

^۱ plain strain

با استفاده از ابزار رسم تونل در محل مورد نظر تونلی به قطر ۶ متر و در کف تونل نیز یک لایه بتنی به ضخامت ۷۰ سانتی متر ترسیم می‌نماییم. نرم افزار به طور خودکار در مرز مشترک خاک و تونل از المان‌های فصل مشترک^۱ استفاده می‌نماید. در مطالعات دینامیکی علاوه بر شرایط مرزی استاتیکی، بازتاب ارتعاشات در اثر برخورد با مرزهای مدل نیز مطرح می‌گردد. برای رفع این مشکل، علاوه بر دور کردن تکیه‌گاه‌ها می‌توان از المان‌های مرزی جاذب ارتعاش استفاده نمود. مرزهای جاذب با استفاده از تعدادی میراگر که در کنار فنرهای تکیه‌گاه‌های استاتیکی قرار می‌گیرند، مدل می‌شوند. پس از اتمام مراحل ترسیمی مدل مشخصات لایه‌های خاک و نیز مصالح پوشش تونل و نیز لایه بتنی کف تونل را تعریف و به هر یک از آنها اختصاص می‌دهیم. در این تحقیق از معیار موهر کلمب به عنوان معیار گسیختگی خاک استفاده گردید. لاگ گمانه مورد استفاده در این تحقیق، مربوط به ایستگاه کارگر، در بخش پیوست ارائه شده است. در این نرم افزار ایجاد مش بندی اجزاء محدود به طور اتوماتیک ایجاد می‌گردد و محل قرارگیری و ابعاد دقیق جزءها توسط کاربر قابل تعریف نیست ولی می‌توان با افزایش تمرکز یا توسعه اجزاء در محل‌های مورد نظر، مش بندی مطلوبی ایجاد نمود. همچنین نرم افزار *plaxis* بر اساس هندسه و شرایط تابع بارگذاری، بازه‌های زمانی انجام آنالیز دینامیکی را به گونه‌ای تعیین می‌نماید که ضابطه گذردهی امواج در تحلیل ارضا گردد. در این تحقیق المان‌های مثلثی ۱۵ گرهی مورد استفاده قرار گرفت و نیز برای تعیین حد بهینه ابعاد المان‌ها به طوری که هم جواب‌های به دست آمده از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و نیز زمان انجام آنالیز کامپیوتری به حداقل ممکن کاهش یابد، بدین صورت عمل شد که مدل با چهار وضعیت مش بندی، آنالیز و ارتعاشات سطحی زمین ارزیابی گردید. مشاهده شد که جواب‌های بدست آمده با المان‌های بسیار ریز و ریز، بسیار نزدیک به هم بوده و از آن پس، با ریزتر کردن المان‌ها تغییر چندانی در نتایج ایجاد نگردید.



شکل شماره ۳: المان بندی مدل در حالت ریز

در آخرین مرحله از ساخت مدل عددی، وضعیت سطح آب زیر زمینی و تنش‌های مؤثر اولیه در خاک را تعریف می‌نماییم. بدین منظور با ترسیم سطح آزاد آب زیر زمینی و انجام آنالیز فشار آب، یک توزیع هیدرواستاتیکی برای فشار حفره‌ای در زیر سطح آب زیر زمینی ایجاد می‌گردد. همچنین با استفاده از ابزار *General Initial stress* تنش‌های موجود در مدل که مربوط به قبل از انجام حفاری تونل و بارگذاری مدل می‌باشد محاسبه می‌شود.

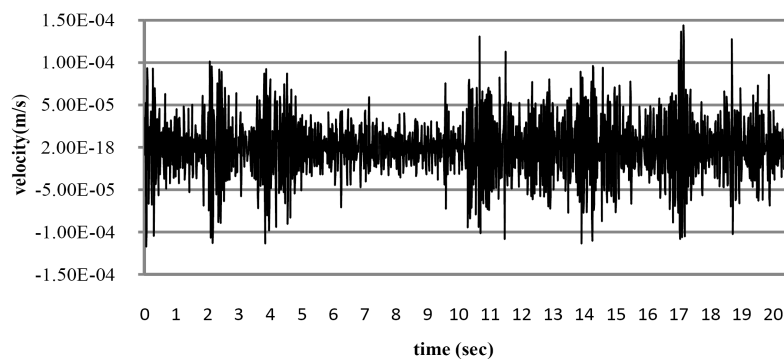
۴. آنالیز مدل

از آنجا که قصد داریم مدل ایجاد شده تا حد امکان به شرایط واقعی پروژه شبیه باشد لذا لازم است که قبل از انجام آنالیز دینامیکی، شرایط ایجاد شده در زمین، در اثر حفاری تونل مترو را در مدل اعمال کنیم. به عبارت دیگر حفاری تونل در زمین باعث ایجاد یک سری تغییر شکل‌ها و تنش‌ها در محیط اطراف تونل می‌شود که لحاظ نمودن آنها در مدل دینامیکی منجر به حصول نتایجی واقعی‌تر می‌شود. بنابراین در بخش آنالیز مدل، دو فاز محاسباتی تعریف خواهیم نمود. فاز اول، آنالیز

¹ interface

الاستوپلاستیک مربوط به حفاری و نصب پوشش بتنی تونل و فاز دوم، آنالیز دینامیکی مربوط به زمان عبور قطار از داخل تونل می‌باشد.

در این تحقیق از نگاشت ارتعاشی که در مجاورت ریل در نزدیکی یکی از ایستگاه‌های خط متروی تهران (ایستگاه حسن آباد) اندازه‌گیری شده، پس از پردازش و تصحیح، نگاشت حاصل به عنوان بار دینامیکی ورودی در تحلیل دینامیکی استفاده شده است. قابل ذکر است که در زمان انجام این تحقیق پروژه قطار شهری اهواز در مراحل اولیه اجرایی قرار دارد و اطلاعات دقیقی پیرامون نوع واگن‌ها، سیستم ریل و بستر زیرین ریل در دسترس نمی‌باشد و با وجود تفاوت‌های احتمالی بین مشخصات اجرایی این دو پروژه، استفاده از این نگاشت ارتعاشی نسبت به سایر روش‌های تقریبی از دقت بالاتری برخوردار است. در واقع در این روش تمامی مکانیزم‌هایی که باعث ایجاد ارتعاش در حین عبور قطار می‌شوند از قبیل سرعت قطار، درزهای ریل، زبری سطح ریل و چرخ‌ها، شکل هندسی ریل و چرخ‌ها، ضربات ناشی از ترمز گرفتن قطار و غیره، در نگاشت ثبت شده دخیل هستند لذا استفاده از این نگاشت ارتعاشی به عنوان بار ورودی تحلیل دینامیکی زمین، نسبت به روش‌های دیگر از دقت بالاتری برخوردار بوده و شرایط واقعی‌تری برای ارزیابی ارتعاشات و تحلیل دینامیکی فراهم می‌کند. این نگاشت که به مدت ۲۰/۴۸ ثانیه می‌باشد در شکل (۴) نمایش داده شده است.



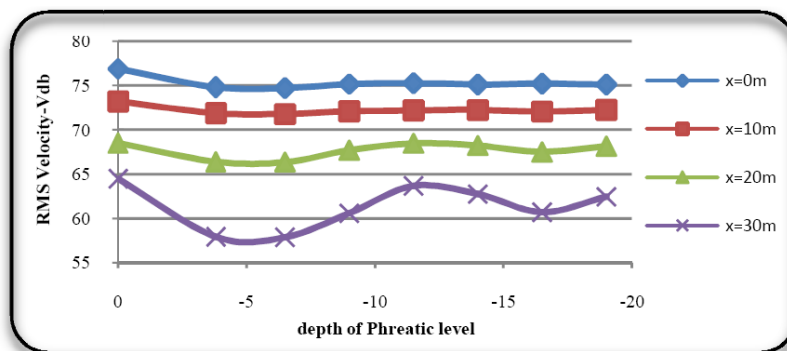
شکل شماره ۴: سطح ارتعاشات اندازه‌گیری شده در تراز ریل در حین عبور قطار در ایستگاه حسن آباد

فاز اول - حفاری تونل: در این فاز نوع آنالیز را از نوع پلاستیک (*plastic*) انتخاب نموده و با غیر فعال نمودن کلاسترهای مربوط به داخل فضای تونل عملیات حفاری تونل را شبیه سازی می‌نماییم. همچنین با کلیک بر روی پوشش بتنی تونل آن را فعال نموده و نیز فشار آب حفره‌ای در داخل تونل را صفر کرده و مجدداً یک آنالیز فشار آب حفره ای انجام می‌دهیم. در واقع در این مرحله، عملیات حفاری تونل، نصب پوشش بتنی، و اجرای دال بتنی کف تونل شبیه سازی می‌گردد.

فاز دوم - آنالیز دینامیکی مدل در حین عبور قطار: از آنجا که در این تحقیق تغییر مکان‌های ایجاد شده در مدل مربوط به آنالیز دینامیکی برای ما مهم است لذا قبل از شروع آنالیز فاز دوم، کلیه تغییر مکان‌های ایجاد شده در مدل در حین حفاری تونل را صفر می‌کنیم؛ هر چند تغییرات ایجاد شده در وضعیت تنش‌های موجود در مدل در حین فاز اول، کماکان در مدل باقی خواهند ماند. بدین ترتیب کلیه تغییر مکان‌های ایجاد شده در پایان آنالیز مدل مربوط به فاز دوم خواهد بود. همچنین در این مرحله، تابع بار دینامیکی قطار را که به مدت ۲۰/۴۸ ثانیه می‌باشد به مدل اعمال می‌گردد. با اتمام تعریف فاز دوم، مدل آماده تحلیل می‌باشد. قبل از شروع آنالیز چندین نقطه از مدل را بر خروجی گرفتن در آن نقاط انتخاب می‌کنیم. این نقاط در شکل (۲) نمایش داده شده است.

۵. بررسی تأثیر عمق سطح آب زیرزمینی بر ارتعاشات ایجاد شده در سطح زمین

در ایستگاه کارگر (N1) که عمق سطح آب زیرزمینی در زمان انجام آزمایش‌های زمین‌شناسی ۳/۶ متر بوده است، آنالیز دینامیکی مربوط به عبور قطار با سرعت ۸۰ (km/h) را به ازای اعماق مختلف سطح آب زیرزمینی تکرار نمودیم. مشخصات لایه‌های زمین شناسی و نیز وضعیت آب زیر زمینی این ایستگاه در پیوست ارائه شده است. شکل (۵) ارتعاشات سطح زمین در فواصل مختلف از محور ریل را به ازای اعماق مختلف سطح آب زیرزمینی نمایش می‌دهد. قابل ذکر است که در این مدل، تونل در عمق ۱۲ متری از سطح زمین قرار دارد.



شکل شماره ۵: تغییرات میزان ارتعاشات سطح زمین به ازای اعماق مختلف سطح آب زیرزمینی
سرعت قطار = ۸۰ کیلومتر بر ساعت - (x = فاصله از محور ریل در سطح زمین)

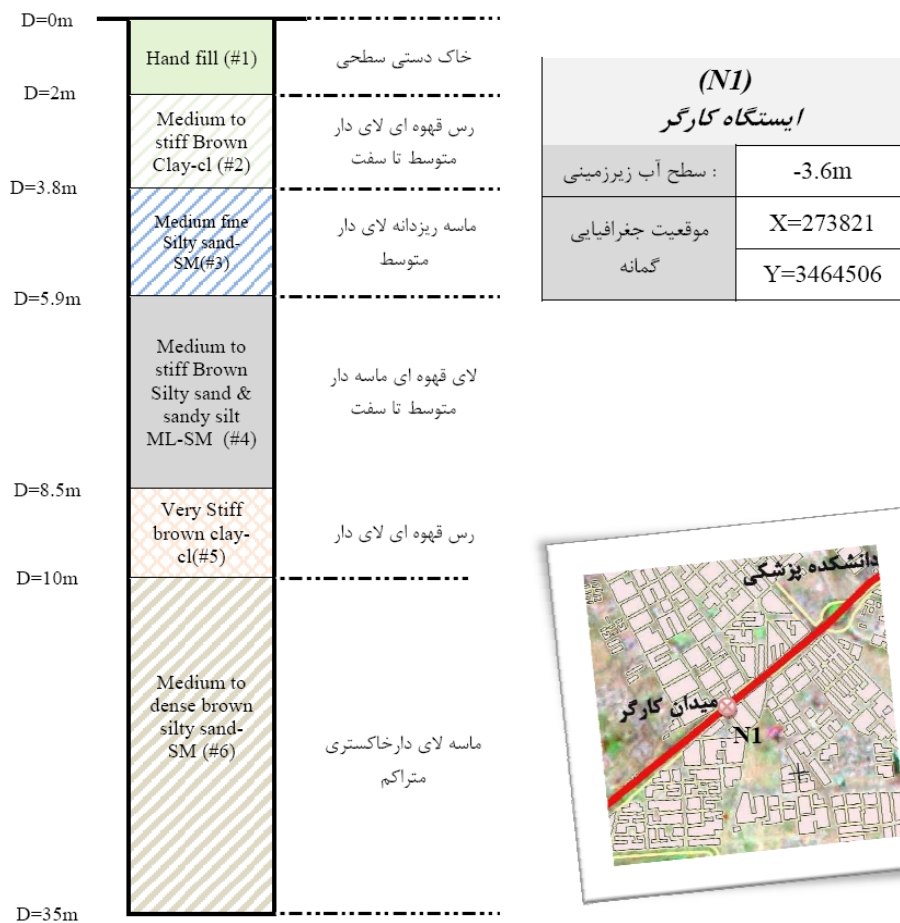
در نمودار فوق x فاصله از محور ریل در سطح زمین می باشد. این نقاط در شکل (۲) نیز نمایش داده شده‌اند. محور افقی عمق سطح آب زیرزمینی و محور قائم ارتعاشات ایجاد شده در سطح زمین بر مبنای سرعت RMS و بر حسب دسی بل می‌باشد. با دقت در نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که هیچ روند منظم و قانون‌مندی بین ارتعاشات سطح زمین و عمق سطح آب زیرزمینی وجود ندارد. ارتعاشات در فاصله ۳۰ متری از محور ریل، زمانی که عمق سطح آب زیر زمینی ۳/۸ متر بوده، ۵۷/۹ دسی‌بل ارزیابی شده است. با پایین رفتن سطح آب، ارتعاشات در این نقطه رو به افزایش نهاده به طوری که در عمق ۱۱/۵ متری، ارتعاشات در فاصله ۳۰ متری از محور ریل به ۶۳/۶۵ دسی‌بل رسیده است. با افزایش بیشتر عمق سطح آب زیرزمینی، مجدداً از میزان ارتعاشات سطح زمین کاسته شده است.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با وجود تأثیر قابل توجه عمق سطح آب زیرزمینی بر ارتعاشات ایجاد شده، رابطه منظم و قانون‌مندی در این رابطه وجود ندارد. لذا در ارزیابی دقیق ارتعاشات سطح زمین در حین عبور قطارهای زیرزمین مترو، لازم است که آب زیرزمینی به طور دقیق و به طور موردی در مدل سازی عددی اعمال شده و تأثیر آن مورد ارزیابی قرار گیرد.

۷. مراجع

1. Gupta, S. et al. (2007), [A comparison of two numerical models for the prediction of vibrations from underground railway traffic], *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, pp. 608–624
2. US Department of Transportation report (2006), [Transit Noise and Vibration Impact Assessment], FTA-VA-90-1003-06, Washington, DC 20503, USA.



شکل شماره ۶: لاگ گمانه در محل ایستگاه کارگر (N1)