



بررسی تأثیر حفره‌های زیرزمینی بر پاسخ سطح زمین به روش عددی و مقایسه آن با نتایج تجربی (مطالعه موردی تونل‌های متروی کرج) محمدجواد کاظمینی¹، ابراهیم حق شناس^{2*}، محسن کمالیان²

پذیرش مقاله: 92/05/02

دریافت مقاله: 91/09/21

چکیده

مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر حفرات زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای زمین بیشتر بر روش‌های تحلیلی متمرکز بوده که ضعف اصلی آن‌ها، ساده نمودن بیش از حد مسئله به لحاظ هندسه حفره و مشخصات مصالح است. لذا نیاز به مطالعات وسیع‌تر در این زمینه با استفاده از مدل‌سازی عددی و همچنین روش‌های تجربی و به‌ویژه با در نظر گرفتن حفرات زیرزمینی واقعی ضروری است. در پژوهش حاضر این مهم با مطالعه بر روی تونل در دست احداث خط دوی پروژه‌ی قطار شهری کرج مدنظر قرار گرفت. یازده محل در مجاورت این تونل و ایستگاه‌های مربوط به آن انتخاب گردید و برای آن‌ها با استفاده از برداشت‌های خردلرزه‌سنجی، نسبت‌های طیفی خردلرزه‌ها بین نقاطی در سطح زمین و نقاط مرجع در کف تونل محاسبه گردید. برای چهار محل مطالعه به روش عددی اجزا محدود نیز صورت گرفت. نتایج مطالعات تجربی در کاظمینی و همکاران (2015) ارائه گردیده است. هدف مقاله حاضر ارائه نتایج به دست آمده از روش عددی و مقایسه آن با نتایج تجربی است. نتایج نشان می‌دهند، حفره‌های زیرزمینی بر پاسخ‌های به دست آمده در سطح زمین تأثیر قابل توجهی داشته، به‌طوری‌که حضور آن‌ها باعث افزایش بزرگنمایی در بازه‌های فرکانسی کوچک و بزرگ‌شده و با افزایش ابعاد حفره و نزدیک‌تر شدن به محور حفره مقادیر بزرگنمایی بیشتری قابل مشاهده است.

کلید واژه‌ها: حفرات زیرزمینی، پاسخ لرزه‌ای، روش عددی، روش تجربی، خردلرزه، بزرگنمایی

1. دانش‌آموخته دکتری گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

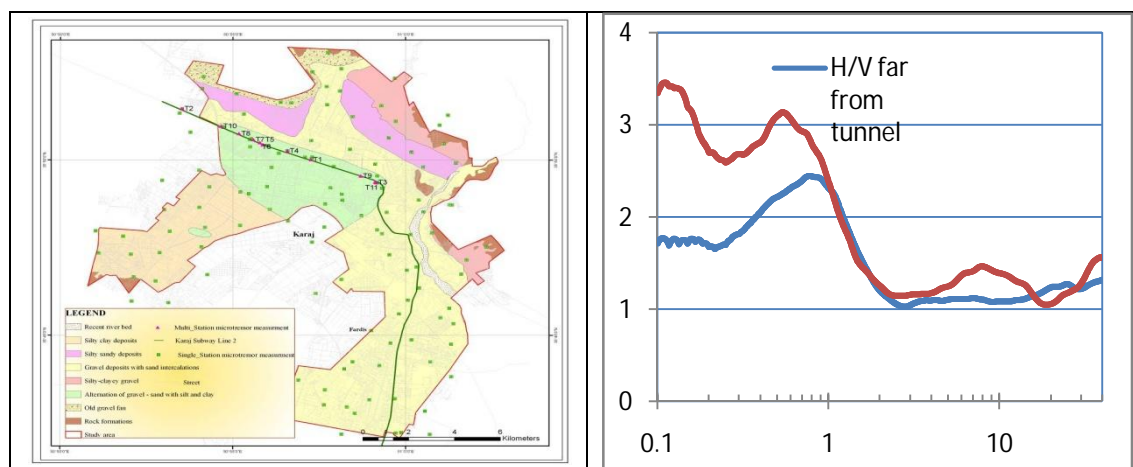
2. پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی، تهران، ایران، haghshen@iiees.ac.ir

* مسئول مکاتبات

1. مقدمه

ایستگاه در سطح زمین و یک ایستگاه مرجع در کف تونل صورت گرفت (Kazemeini et al., 2014). پردازش داده‌ها با استفاده از روش نسبت طیفی H/V و نسبت طیفی سطح به کف تونل نشان دهنده تغییرات عمده‌ای در پاسخ سطح زمین در مجاورت حفره‌های زیرزمینی است که وابستگی زیادی به ابعاد و فاصله از محور حفره دارند. مقایسه این نتایج با محدود مطالعات تجربی انجام شده توسط پژوهشگران دیگر (Lombardo et al., 2010, Sgarlato et al., 2011) حاکی از روند مشابهی بود. برخلاف بررسی‌ها به روش تجربی که بسیار نوپا هستند، روش‌های عددی از سال 1982 تاکنون در کانون توجه قرار گرفته است. روش‌های عددی به دلیل امکان مدل‌سازی شرایط پیچیده هندسی و زیرسطحی، دقت بیشتری نسبت به روش‌های تحلیلی دارند. از جمله مطالعات انجام شده به روش عددی می‌توان به (Crichlow, 1982, Rodriguez-Castellunos et al., 2005, Yiouta-Mitra et al., 2012, H. Alielahi et al., 2007) اشاره کرد.

شهر کرج در استان البرز و در همسایگی پایتخت بر روی پهنه وسیعی از رسوبات آبرفتی در جنوب رشته کوه‌های البرز قرار دارد. این شهر همانند شهر تهران توسط تعداد زیادی گسل فعال و لرزه زا احاطه شده است (شکل 1). برداشت‌های تک ایستگاهی و چند ایستگاهی خردلرزه به طور گسترده در بخش‌های مختلف شهر از جمله در مجاورت تونل‌ها و ایستگاه‌های خط دوی مترو انجام شده است (حق شناس و همکاران، 2013). بررسی نسبت‌های طیفی مؤلفه افقی به قائم (HVSr) در سطح شهر نشان می‌دهد قله‌های طیفی عمدتاً در فرکانس‌های پایین (کمتر از یک هرتز) رخ داده، در صورتی که در مجاورت تونل‌ها و ایستگاه‌های مترو علاوه بر این قله‌ها، قله‌هایی دیگر در فرکانس‌های بالا (8-12 هرتز) نیز ظاهر می‌شوند (Kazemeini et al., 2015) (شکل 1). به منظور بررسی دقیق‌تر این پدیده، برداشت‌های چند ایستگاهی خردلرزه‌ها در یازده سایت مجاور تونل با نصب یکسری



شکل 1. سمت چپ: موقعیت برداشت‌های تک ایستگاهی خردلرزه سنجی در سطح شهر (حق شناس و همکاران 2013) به همراه برداشت‌های چند ایستگاهی در امتداد خط 2 متروی در حال احداث کرج؛ T1 تا T11 (Kazemeini et al., 2015). مدل‌سازی عددی در محل‌های T1، T2، T4 و T9 انجام شده است. سمت راست مقایسه میانگین منحنی‌های نسبت طیفی HVSr برای نقاط دور و نزدیک تونل مترو.

مشخص شده با اندیس T1، T2، T4 و T9 ارائه می‌گردد. این محل‌ها در نمایش شکل‌ها و نمودارها در بخش‌های بعدی

در مقاله حاضر نتایج بررسی‌های عددی انجام شده در چهار محل از یازده محل نشان داده شده در (شکل 1) (محل‌های

آبرفت‌ها (200 تا 400 متر) در بخش‌های مرکزی است که با نزدیک شدن به ارتفاعات شمالی و جنوبی از این ضخامت کاسته می‌شود. وضعیت پروفیل زیرسطحی برای 4 محل مطالعه شده در شکل 2 نشان داده شده است.

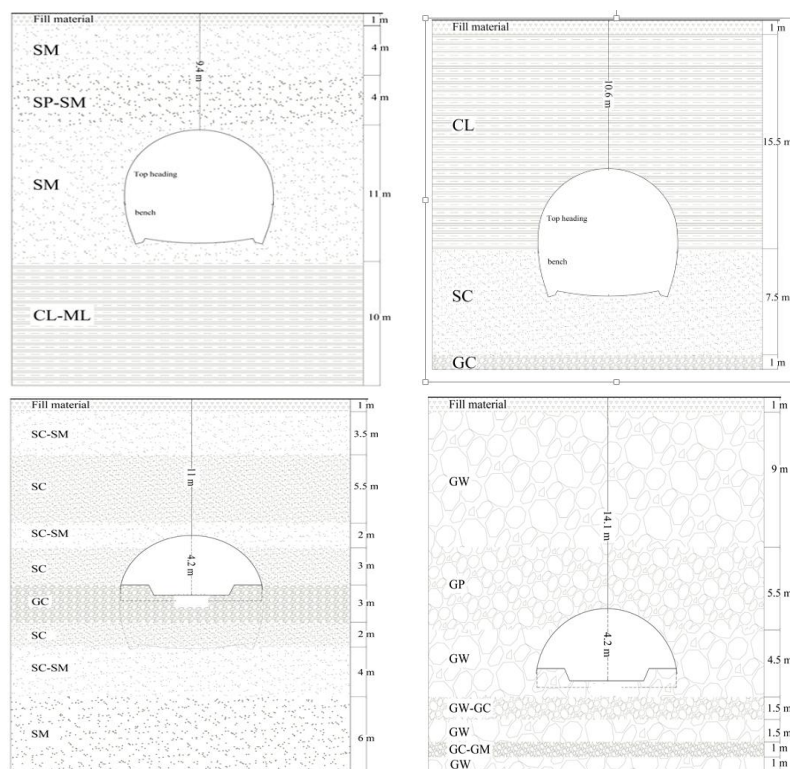
3. روش تحلیل عددی

تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) انجام گرفته است. این نرم‌افزار با استفاده از روش عددی اجزا محدود (FEM) مجهولات مورد نظر را محاسبه می‌کند. روش اجزا محدود مسائل فیزیکی را توسط معادلات دیفرانسیل حل می‌کند که در آن به منظور مدل‌سازی مسئله از تعداد زیادی المان و گره، استفاده می‌شود. سپس یک تقریب اولیه برای حل به صورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول به صورت خطی یا مرتبه دوم زده می‌شود و پس از تعیین شدن مرتبه تقریب اولیه، معادله حاکم در هر گره نوشته می‌شود. پس از استخراج معادلات جبری و حل دستگاه معادلات، سایر کمیت‌ها از روی مقادیر گروهی محاسبه می‌شوند. مدل رفتاری مورد استفاده در تحلیل‌ها الاستیک خطی بوده و از روش حل دینامیکی ضمنی (Implicit) در حوزه زمان استفاده شده است. یکی از مزایای این روش امکان استفاده از المان‌های نیمه بی‌نهایت برای مدل‌سازی خاک می‌باشد. بر این اساس پیکره مدل ساخته شده در نرم‌افزار به دو بخش محدود (Finite) و نامحدود (Infinite) تقسیم شده است. ابعاد مدل طوری انتخاب شده تا بتوان اثرات مرزی را بر نتایج تحلیل‌ها کاهش داد. بر این اساس برای کلیه محل‌ها عمق مدل 200 متر و طول مدل در بخش محدود 400 متر و در بخش نامحدود 200 متر در نظر گرفته شده است (شکل 3).

مقاله با اندیس‌های N1، N2، N4 و N9 مشخص شده‌اند. بررسی‌های عددی در این چهار محل با استفاده از روش عددی اجزا محدود، انجام شده و در انتها نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از روش تجربی مقایسه شده‌اند.

2. معرفی خصوصیات ژئوتکنیکی محل‌های مورد مطالعه

شهر کرج بر روی رسوبات آبرفتی جوان کواترنری سرچشمه گرفته از ارتفاعات البرز بنا شده است. به منظور بررسی وضعیت ژئوتکنیکی در این شهر از گزارش ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر کرج (حقوق شناس و همکاران، 2013) و نیز گزارش‌های حفاری‌های ژئوتکنیکی انجام شده قبلی، به ویژه مطالعات مربوط به خطوط متروی کرج، انجام شده توسط پیمانکاران مختلف و همچنین بازدیدهای میدانی از مسیر تونل در دست احداث و ترانسه‌های حفاری شده در مسیر استفاده شده است. بر اساس جمع‌بندی از این اطلاعات مشخص می‌گردد آبرفت‌های کرج به ترتیب از شمال به جنوب و از شرق به غرب دستخوش تغییراتی قابل ملاحظه در دانه‌بندی و خصوصیات مکانیکی هستند که به این ترتیب باعث شده است محل‌های مورد بررسی از نظر ویژگی‌های ژئوتکنیکی متنوع باشند و هر چه از شرق به غرب نزدیک می‌شویم از اندازه دانه‌ها و تراکم لایه‌ها کاسته شود. به طوری که متراکم‌ترین و درشت‌ترین دانه‌بندی در سایت N9 و نرم‌ترین و ریزترین دانه‌بندی در سایت N2 مشاهده می‌شود. در سایت N1، بجز 15 متر اول، وضعیت خاک همچون سایت N9 است. پروفیل خاک در سایت N4 عمدتاً ماسه‌ای به همراه درصد‌های مختلفی از رس و سیلت با تراکم متوسط می‌باشد. از نظر ضخامت آبرفت و عمق سنگ بستر زمین‌شناسی بررسی اطلاعات موجود نشان دهنده ضخامت زیاد این

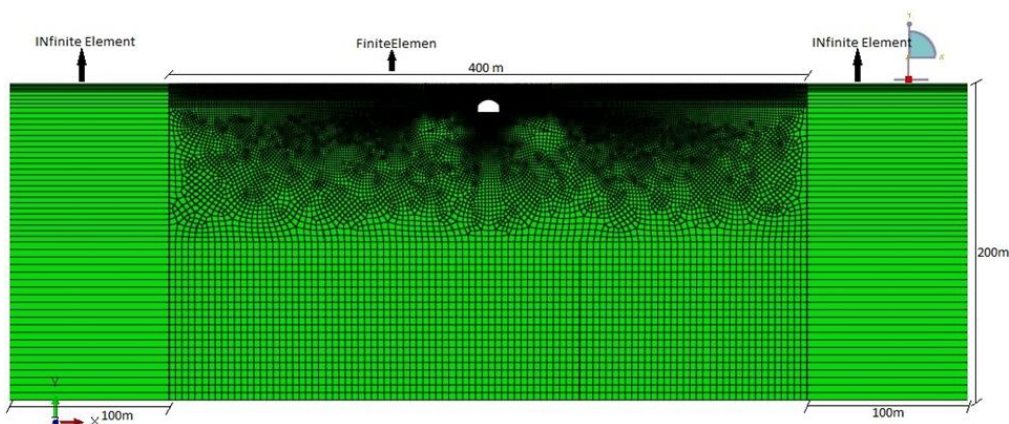


شکل 2. مقایسه پروفیل‌های زیرسطحی مقاطع انتخابی، بالا سمت راست: مقطع ژئوتکنیکی محل N1، بالا سمت چپ: مقطع ژئوتکنیکی محل N2، پایین سمت راست: مقطع ژئوتکنیکی محل N9، پایین سمت چپ: مقطع ژئوتکنیکی محل N4

بودن پروژه این امکان فراهم گردید که در مطالعات تجربی، اندازه‌گیری‌های خردلرزه‌سنجی در ابعاد و اشکال مختلفی از تونل انجام گردد (Kazemini et al., 2015). همین روند در مدل‌سازی عددی نیز بکار گرفته شد، حتی سختی پوشش نگهدارنده حفره‌ها بر اساس شرایط واقعی به مدل اعمال شده است. بر این اساس پاسخ زمین در فواصل مختلف از محور تونل در سطح زمین و نقاطی در کف تونل برای اشکال و ابعاد مختلف تونل محاسبه گردید. مشخصات مربوط به شکل و ابعاد تونل در هر کدام از محل‌های مورد مطالعه در جدول 1 ارائه شده است و شکل هندسی شماتیک هر کدام از اشکال سه‌گانه تونل مورد اشاره در این جدول و ابعاد متناظر با آن‌ها در شکل 4 نشان داده شده‌اند.

از آنجا که یکی از اهداف مطالعه حاضر مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج بررسی‌های تجربی صورت گرفته در همین نقاط بوده است، پارامترهای ژئوتکنیکی و بارگذاری استفاده شده در مدل‌سازی تا حد امکان از داده‌های واقعی مستخرج از منابع ذکر شده در بخش 1، متناسب با محدوده مورد مطالعه انتخاب شده‌اند. بر این اساس برای اعمال بار دینامیکی ورودی به کف مدل ساخته شده، از نگاهت یک زلزله ثبت شده در ایستگاهی مستقر بر رخنمون‌های سنگی شمال شهر کرج (حق‌شناس و همکاران، 1392) استفاده شده است. کانون این زلزله در منطقه چالوس بوده و بزرگی آن 4/2 ریشتر است.

روش ساخت تونل در پروژه متروی شهر کرج روش حفاری مرحله‌ای NATM بوده است و با توجه به در دست اجرا

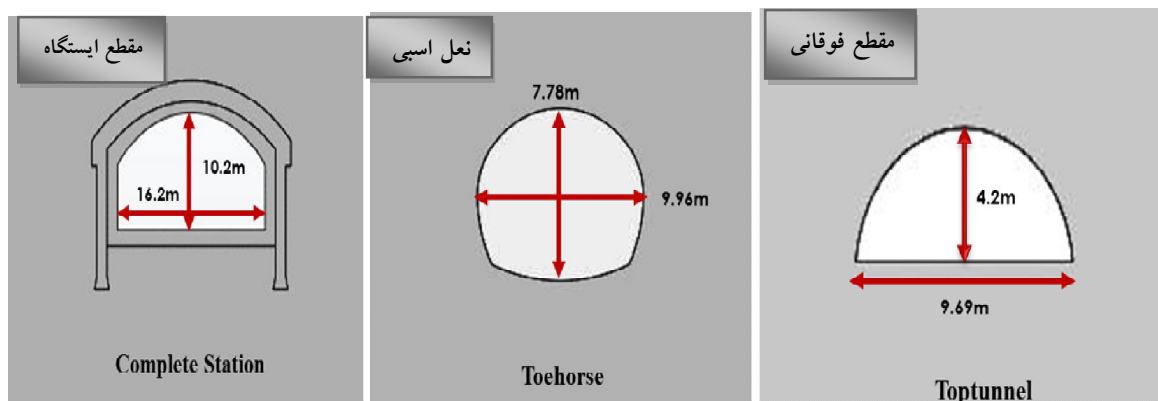


شکل 3. پیکره و ابعاد مدل دوبعدی مورد استفاده در نرم‌افزار آباکوس به منظور تحلیل عددی اثر حفره بر پاسخ لرزه‌ای زمین

جدول 1. اشکال حفره مطالعه شده در هریک از چهار محل انتخاب شده برای مدل‌سازی عددی

N9		N4		N2		N1		نام محل
CS	TH	CS	TT	TH	TT	TH	TT	شکل حفره

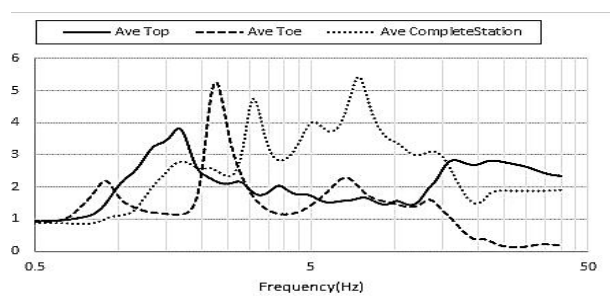
TT: مقطع فوقانی (Top-tunnel); TH: نعل اسبی (Toe-horse); CS: ایستگاه کامل (Complete Station)



شکل 4. شکل هندسی شماتیک هرکدام از اشکال سه‌گانه تونل مورد اشاره در جدول 1 و ابعاد متناظر با آن‌ها

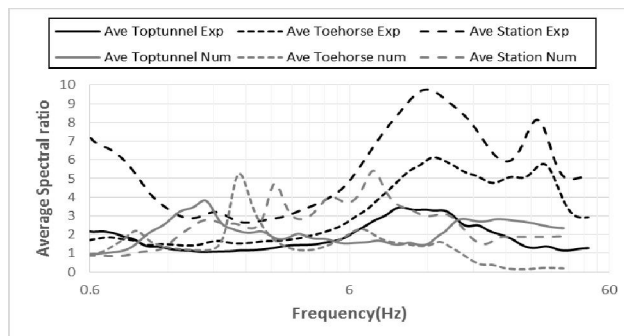
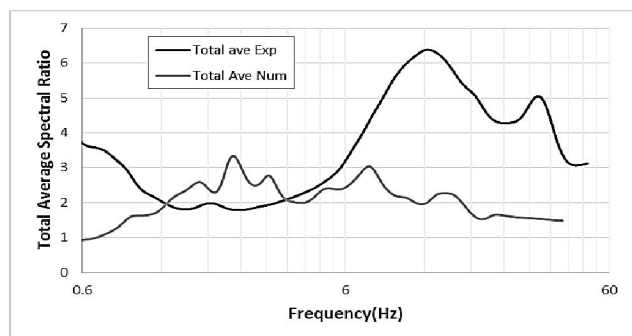
می‌شوند. پس از متوسط‌گیری داده‌ها در شرایط مختلف، مجدداً روند فوق‌الذکر قابل مشاهده است. لازم به ذکر است تمامی حفره‌های مورد بررسی در پروژه متروی کرج، در یک عمق قرار گرفته‌اند و صرفاً با افزایش ابعاد از مقطع فوقانی و نعل اسبی به مقطع ایستگاه کامل $1/5$ متر از مقدار روباره کاسته می‌شود. بر اساس نقشه‌های موجود از ادارات مرتبط، در راستای چیدمان دستگاه‌ها و اندازه‌گیری‌های خردلرزه‌ای هیچ‌گونه ترانشه، رودخانه، قنات و خطوط تأسیسات شهری موجود نبوده و مشاهده نشده است.

برای مشاهده تأثیر تونل بر پاسخ ساختگاه، در ابتدا هر یک از پارامترها به تنهایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بدین معنا که به منظور بررسی تأثیر افزایش ابعاد حفره، محل و فاصله از محور حفره و برای بررسی تأثیر فاصله از محور حفره، محل و ابعاد حفره یکسان در نظر گرفته شده‌اند. روندی که در هر یک از نمودارها مشاهده شده است، نشان می‌دهد با افزایش ابعاد حفره مقادیر بزرگنمایی در فرکانس‌های بالا، افزایش یافته و با افزایش فاصله از محور حفره، مقادیر بزرگنمایی کاهش می‌یابند به طوری که به پاسخ میدان آزاد نزدیک



شکل 5. مقایسه نسبت‌های طیفی میانگین سطح به کف در سه شکل مختلف تونل ذکر شده به دست آمده از مدل‌سازی عددی

در بررسی نتایج به روش تجربی همانند روش عددی، شاهد افزایش بزرگنمایی با افزایش ابعاد هستیم (شکل 6- سمت راست). با وجود مطابقت روند تأثیر افزایش ابعاد در هر دو روش برخی تفاوت‌ها نیز قابل مشاهده هست. همان‌طور که در (شکل 6- سمت چپ) ملاحظه می‌شود، بزرگی قله‌های نسبت طیفی و فرکانس متناظر با آن در دو روش متفاوت می‌باشند. بدین معنا که بزرگی قله نسبت طیفی در روش تجربی $6/5$ و فرکانس متناظر با آن 12 هرتز است، در صورتی که در روش عددی بزرگی آن $3/5$ و فرکانس متناظر با آن $2/4$ هرتز است. اگرچه در روش عددی نیز می‌توان قله‌هایی با بزرگی 3 و $2/2$ در فرکانس‌های متناظر 8 و 14 هرتز را مشاهده کرد.



شکل 6. مقایسه نتایج به روش عددی و تجربی: سمت راست: مقایسه نسبت‌های طیفی میانگین با افزایش ابعاد در مطالعات عددی و تجربی و مشاهده روند افزایشی قله‌ها با بزرگ‌تر شدن ابعاد، سمت چپ: میانگین‌گیری مجدد از نسبت‌های طیفی میانگین در دو روش عددی و تجربی به منظور مشاهده تفاوت‌های میان آن‌ها. (*Exp*: نتایج تجربی، *Num*: نتایج عددی)

در بخش‌های بعدی مقاله رابطه پاسخ ساختگاه به دست آمده از تحلیل عددی با پارامترهای مختلف ابعاد تونل، فاصله از محور تونل و نیز وضعیت ژئوتکنیکی محل‌ها، مورد بررسی قرار می‌گیرد و همزمان با نتایج به دست آمده از روش تجربی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های خرد لرزه‌سنجی مقایسه می‌گردد.

4. بررسی تأثیر ابعاد حفره‌های زیرزمینی:

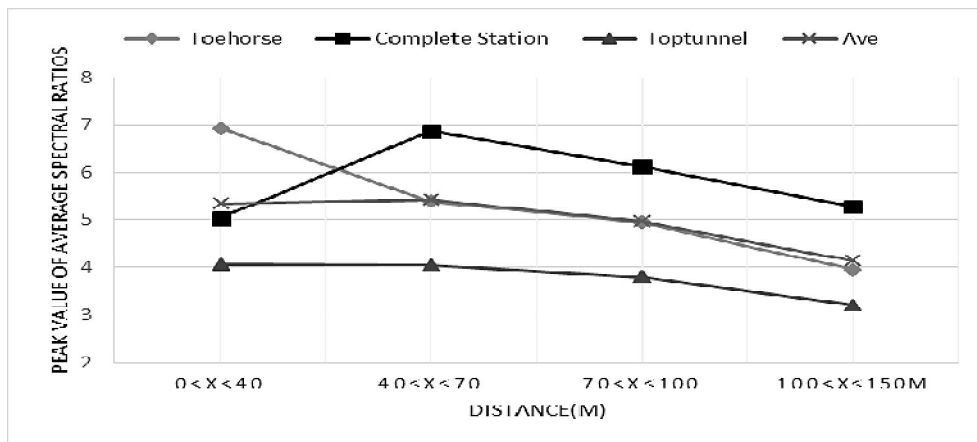
به منظور بررسی رابطه پاسخ ساختگاه با ابعاد تونل میانگین نسبت‌های طیفی نقاط سطح زمین به نقطه کف تونل در ابعاد سه‌گانه، مورد اشاره در بخش قبل، در شکل 5 مقایسه شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده افزایش دامنه بزرگنمایی، بزرگ‌تر شدن فرکانس غالب و پهن‌تر شدن قله‌ها با افزایش ابعاد از شکل مقطع فوقانی (Toptunnel) به شکل‌های نعل اسبی (Toehorse) و ایستگاه کامل (Completestation) است. این افزایش دامنه بزرگنمایی برای تمامی نقاط سطحی محاسبه شده و در فواصل مستقر در شعاع تأثیر حفره و نیز در شرایط مختلف ژئوتکنیکی قابل مشاهده است. به دلیل آنکه افزایش ابعاد در پروفیل‌های مختلف ژئوتکنیکی و در شعاع تأثیر حفره، منجر به افزایش بزرگنمایی می‌شود، لذا در مقاله نتایج میانگین نسبت‌های طیفی نشان داده شده است.

5. بررسی تأثیر فاصله از محور حفره

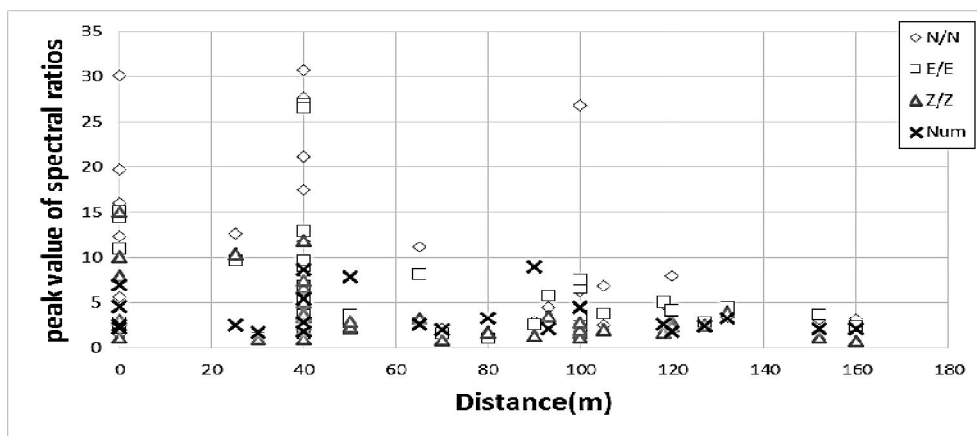
به منظور نشان دادن اثر فاصله در روش عددی، حداکثر مقادیر نسبت‌های طیفی میانگین نقاط سطحی به کف تونل در بازه فرکانسی بین 0/5 تا 15 هرتز استخراج و باهم مقایسه شده‌اند (شکل 7). این‌گونه نحوه ارائه نتایج به علت مشاهده تأثیر مشابه فاصله حفره در شرایط مختلف ژئوتکنیکی بوده است. نتیجه‌ای که از این مقایسه به دست می‌آید آن است که با افزایش فاصله، دامنه بزرگنمایی حداکثر به طور کاملاً واضحی کاهش یافته و پاسخ‌ها به پاسخ میدان آزاد نزدیک

می‌شوند. نتیجه مهم دیگر موقعیت مکانی حداکثر بزرگنمایی است که در فواصل کمتر از 40 متر و در بالای حفره قابل مشاهده است.

روند ملاحظه شده در روش عددی، در روش تجربی نیز وجود دارد. بدین معنا که با افزایش فاصله اثر حفره‌های زیرزمینی کاهش یافته و پاسخ آن‌ها به پاسخ میدان آزاد نزدیک می‌شود. علاوه بر این حداکثر بزرگنمایی در فواصل کمتر از 40 متر و روی حفره به وقوع پیوسته است (شکل 8).

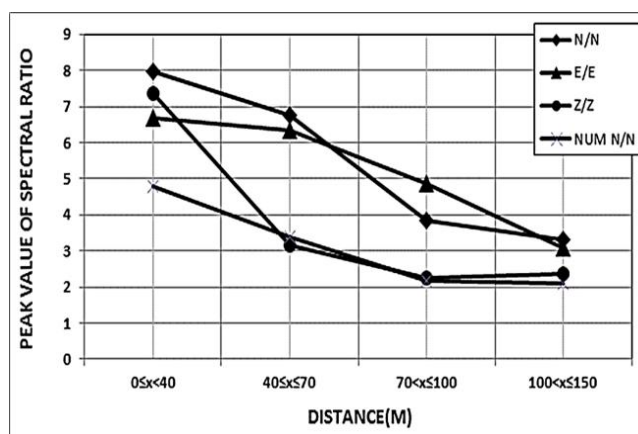
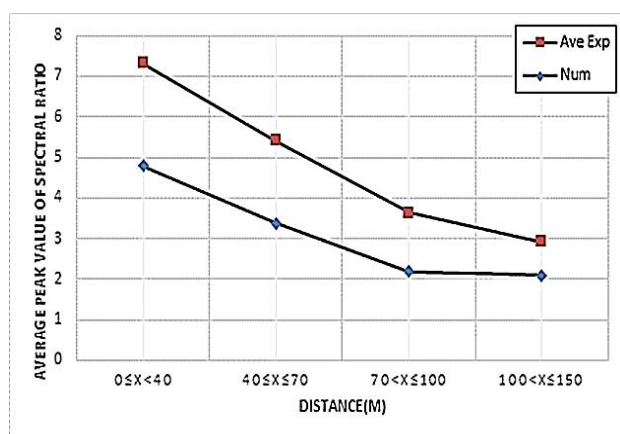


شکل 7. مقادیر حداکثر نسبت‌های طیفی میانگین در بازه فرکانسی بین 0/5 تا 15 هرتز در فواصل مختلف از محور حفره



شکل 8. مقایسه مؤلفه‌های حداکثر قله‌های نسبت طیفی در بازه فرکانسی بین 4 تا 20، برای مؤلفه‌های مختلف (N/N، E/E و Z/Z) به دست آمده از اندازه‌گیری تجربی با نتایج به دست آمده از تحلیل عددی. محاسبه در مدل‌سازی عددی تنها برای مؤلفه شمالی - جنوبی صورت گرفته است.

در مقادیر قله‌ها مشاهده می‌شود. بعلاوه کاهش واضح بزرگنمایی با افزایش فاصله در روش‌های عددی و تجربی و مقایسه نتایج با داده‌های خردلرزه‌سنجی خارج از محدوده حفره‌ها (حقوق‌شناس و همکاران، 2013)، می‌توان گفت به‌طور متوسط شعاع تأثیر حفره در محل‌های مختلف در حدود 150 متر است.



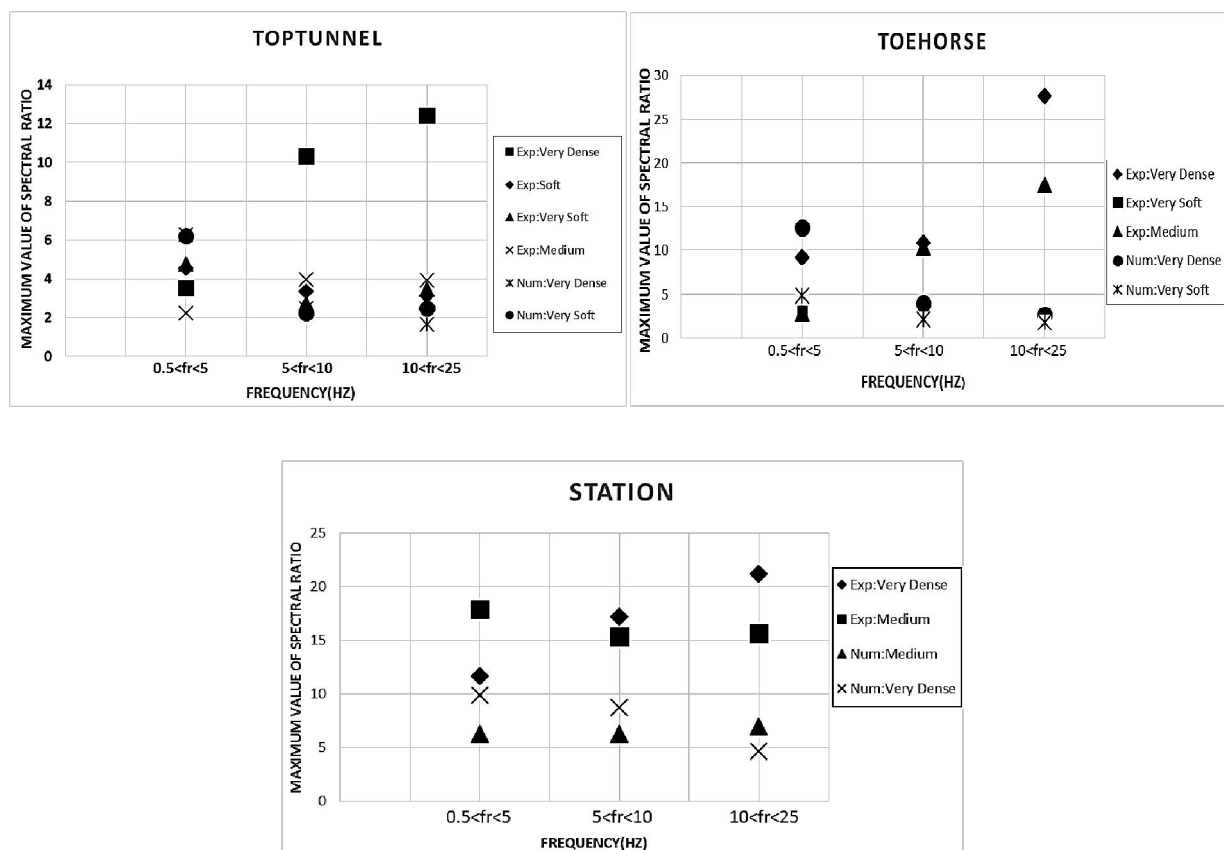
شکل 9. بررسی تأثیر فاصله از محور حفره در دو روش عددی و تجربی. سمت راست: مقایسه متوسط حداکثر قله‌های نسبت طیفی در بازه فرکانسی بین 4 تا 20 هرتز در برابر فاصله از محور حفره. سمت چپ: مقایسه متوسط داده‌های تجربی در راستاهای مختلف با راستای شمالی-جنوبی در روش عددی

اتفاق بیفتد. برای بررسی تأثیر خصوصیات ژئوتکنیکی در شرایط حضور حفره‌های زیرزمینی، حداکثر قله‌های نسبت طیفی به دست آمده از روش‌های عددی و تجربی در بازه‌های فرکانسی مختلف و در شرایط ژئوتکنیکی متفاوت، باهم مقایسه شده‌اند (شکل 10).

برخلاف انتظار حداکثر قله‌های نسبت طیفی در خاک‌های سخت و درشت‌دانه بزرگ‌تر از خاک‌های نرم و ریزدانه است. به عبارتی می‌توان گفت این نتیجه به دلیل تداخل و تفرق امواج در اثر حضور حفره در لایه‌های نزدیک سطح زمین است.

6. بررسی تأثیر حفره‌های زیرزمینی بر پاسخ سطح زمین در شرایط مختلف ژئوتکنیکی

بی‌تردید یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر مقادیر بزرگنمایی خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی است. همان‌طور که بحث شد، تأثیر حفره‌ها بر پاسخ سطح زمین با افزایش کاهش ابعاد و فاصله از محور حفره، تغییر می‌کند که مستقل از مشخصات پروفیل زیرسطحی است؛ اما مقادیر بزرگنمایی‌ها در سطح با شرایط مختلف ژئوتکنیکی تغییر می‌کند، به طوری که انتظار می‌رود در خاک‌های ریزدانه و نرم مقادیر بزرگنمایی بالاتری نسبت به خاک‌های درشت‌دانه و سخت



شکل 10. مقادیر حداکثر قله‌های نسبت طیفی در بازه‌های فرکانسی مختلف، دسته‌بندی شده بر اساس خصوصیات ژئوتکنیکی مختلف در سه شکل مقطع فوقانی، نعل اسبی و ایستگاه کامل

7. نتیجه‌گیری

به طوری که می‌توان از تأثیر حفره در فواصل بیش از 150 متر صرف‌نظر کرد. همچنین در ابعاد و فواصل مساوی، برخلاف انتظار، مقادیر بزرگنمایی در خاک‌های سخت و درشت‌دانه بزرگ‌تر از خاک‌های نرم و ریزدانه است. اختلاف‌های مشاهده شده در مقادیر بزرگنمایی و فرکانس‌های تشدید در دو روش عددی و تجربی بیشتر به ماهیت این روش‌ها باز می‌گردد. به عنوان مثال چگونگی انتشار امواج لرزه‌ای، ناشناخته بودن لایه‌های زیرسطحی در اعماق بیشتر از 40 متر، مدل رفتاری و دقت پارامترهای ورودی، فرضیات مدل‌سازی در روش عددی و وجود یکسری نویزها در روش تجربی، عواملی هستند که می‌توانند منجر به برخی از این اختلاف‌ها شده باشند.

بررسی عددی پاسخ ساختگاه صورت گرفته برای 4 محل در مجاورت تونل در دست‌ساخت متروی کرج و مقایسه آن با مطالعات تجربی در همین محل‌ها به‌طور کاملاً مشخصی تأثیر حضور حفره‌های زیرزمینی بر روی پاسخ ساختگاه را نشان می‌دهند. بزرگنمایی‌های مشاهده شده در شرایط مختلف ژئوتکنیکی تابع ابعاد و فاصله از محور حفره است. به طوری که با بزرگ‌تر شدن ابعاد حفرات، مقادیر بزرگنمایی در بازه‌های فرکانسی کوچک و بزرگ افزایش می‌یابند. بیشترین بزرگنمایی بر روی حفره و در فواصل کمتر از 40 متر قابل مشاهده بوده و با افزایش فاصله از محور حفره به‌طور واضحی کاهش یافته و پاسخ‌ها مشابه میدان آزاد خواهند شد،

منابع

- حقوق شناس، ا.، کامالیان، م.، داودی، م.، گریوانی، ه. و کاظمینی، م. ج.، 1392. ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر کرج، ایران. گزارش پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی.
- Alielahi, H., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M. K. and Panji, M., 2012. Applying a time-domain boundary element method for study of seismic ground response in the vicinity of embedded cylindrical cavity. *Iranian Journal of Civil Engineering, transaction B: Geotechnical Engineering*, 11(1): 45-54.
- Crichlow, J. M. 1982. The effect of underground structure on seismic motions of the ground surface. *Geophysical Journal International*, 70(3): 563-575.
- Hashash, Y., Hook, J. J. and Schmidt, B. 2001. Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(4): 247-293.
- Kazemini, M.J., Haghshenas, E. and Kamalian, M., 2015. Experimental evaluation of seismic site response over and nearby underground cavities: Study of subway tunnel in city of Karaj, Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 39(C2): 319-332.
- Lombardo, G. and Rigano, R., 2010. Local seismic response evaluation in natural and artificial cavities. *Proceedings 3 International Symposium "Karst Evolution in the South Mediterranean Area"*, 29-31 May 2009: Ragusa, Italy, *Speleologia Iblea C.I.R.S.*, 14, pp. 71-78.
- Rodríguez-Castellanos, A., Luzón, F. and Sánchez-Sesma, F. 2005. Diffraction of seismic waves in an elastic, cracked halfplane using a boundary integral formulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(11): 827-837.
- Sgarlato, G., Lombardo, G., and Rigano, R. 2011. Evaluation of seismic site response nearby underground cavities using earthquake and ambient noise recordings: A case study in Catania area, Italy. *Engineering Geology*, 122(3), 281-291.
- 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 Peaks in Geotechnics*.