

### چکیده

در این مقاله، الگوی بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین همگن و همسان در حضور تونل‌های زیرزمینی نعل‌اسبی شکل بدون پوشش تحت امواج مهاجم مایل SH ارائه شده است. از روش عددی اجزای مرزی نیم‌صفحه<sup>۱</sup> در حوزه‌ی زمان که قادر است مش‌بندی را تنها بر روی مرز پیرامون حفره متمرکز سازد، برای مدل‌سازی و تحلیل لرزه‌ای بهره گرفته شده است. از مشخصات هندسی تونل خط دوم متروی کرج برای مطالعات پارامتریک استفاده شده است. موج مهاجم از نوع موجک ریکر<sup>۲</sup> با مشخصات مفروض در نظر گرفته شده است. نسبت عمق تونل، موقعیت افقی آن و زاویه‌ی موج مهاجم از جمله پارامترهایی هستند که مورد حساسیت‌سنجی قرار گرفته‌اند. از مقایسه‌ی نتایج حاصل با دستاوردهای تحلیلی دیگر محققان، دقت مطلوب روش پیشنهاد شده در مدل‌سازی تونل‌های نعل‌اسبی مبین شد. همچنین مشاهده شد که حضور تونل‌های زیرزمینی در عمق‌ها و موقعیت‌های مختلف بر روی شکل‌گیری الگوی متفاوت پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مؤثر است. استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان برای مدل‌سازی سازه‌های زیرزمینی، جایگزین با دیگر روش‌های عددی پیشین و بهره‌گیری از نتایج حاصل جهت تکمیل و تدقیق آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود توصیه می‌شود.

**واژگان کلیدی:** تونل زیرزمینی نعل‌اسبی، اجزای مرزی نیم‌صفحه، حوزه‌ی زمان، الگوی بزرگنمایی، موج SH.

## الگوی بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل زیرزمینی نعل‌اسبی تحت امواج مهاجم SH

مه‌دی پن‌جی (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان،

زنجان، ایران

m.panji@iauz.ac.ir

امیرعباس فخرآور

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان،

زنجان، ایران

### ۱- مقدمه

زیرسطحی و تعیین پاسخ سطح زمین به روش‌های مختلف اشاره شده است. هرچند در بررسی اثرات ساختگاه در حضور تونل‌های زیرزمینی مطالعات تجربی چون اسگارلاتو و همکاران [۱] و کاظمینی و همکاران [۲] به چشم می‌خورد؛ اما به‌طور کلی روش‌های تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی به سه دسته روش تحلیلی، نیمه‌تحلیلی و عددی قابل تقسیم‌بندی است [۳].

اگرچه در روش‌های تحلیلی یا نیمه‌تحلیلی دقت پاسخ‌ها بیشتر و تقریب استفاده شده در مسئله کمتر است ولی مدل‌ها محدود به یک سری هندسه‌های ساده یا غیرمرکب می‌شوند. اولین بار آسانو در سال ۱۹۶۰ [۴] و پس از آن داتا در سال ۱۹۷۴ [۵] اثرات توپوگرافی را تحت امواج هارمونیک SH با استفاده از روش‌های تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. با گسترش روش‌های

بررسی عوامل مخرب در طی وقوع پدیده‌ی زلزله همواره از موضوعات قابل توجه محققان بوده است. در این میان اثرات محلی ساختگاه یکی از تعیین‌کننده‌ترین پارامترها در زلزله می‌باشد که اهمیت و پیچیدگی آن، محققان را به بررسی جامع‌تر این مسئله سوق می‌دهد. از یک سو توسعه‌ی صنعت حمل‌ونقل و از سوی دیگر بافت شهرهای بزرگ، اهمیت حضور سازه‌ها و تونل‌های زیرزمینی از قبیل تونل‌های مترو را دو چندان ساخته است؛ بنابراین شناخت رفتار سطح‌زمین در حضور بازشدگی‌های زیرزمینی از جمله مطالعات پیشگام در احداث هرگونه سازه‌های سطحی محسوب می‌شود. در این راستا مدل‌سازی ساده و دقیق این قسم عوارض زیرسطحی همواره از نیازهای مبرم به شمار می‌رود. در ادبیات فنی برای تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی

ارزیابی پایداری ایستگاه مولد برق هوزیان تأثیر مغارها را در رفتار محیط پیرامون آن بررسی کردند.

هرچند روش‌های حجمی<sup>۶</sup> از یک سو از دقت مناسب و سهولت در فرمول‌بندی برخوردارند و از سوی دیگر دامنه‌ی وسیعی از مسائل را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند، اما در بررسی مسائل با مرزهای نامحدود و نیمه نامحدود شامل حجم محاسباتی بالا و پیچیدگی در مدل می‌شوند؛ بنابراین عرصه برای حضور روش‌های مرزی محیا می‌شود. در این روش‌ها که روش اجزای مرزی<sup>۷</sup> (BEM) از نام‌آشناترین آنهاست، تنها مرزهای پیرامون جسم مش‌بندی می‌شوند. گرچه روش‌های مرزی شامل محدودیت‌هایی از قبیل عدم توسعه‌ی کافی برای تحلیل محیط‌های غیرخطی و مسائل پلاستیک می‌شود، ولیکن با توجه به اقناع خودکار شرایط تشعشع امواج در بی‌کران در بطن فرمول‌بندی، از جمله روش‌های مناسب در تحلیل دینامیکی خطی به حساب می‌آید [۲۹]. روش اجزای مرزی برای مدل‌سازی حفرات زیرسطحی و تونل‌های زیرزمینی تحت امواج لرزه‌ای به کار گرفته شده است. لوکو و دباروس [۳۰]، یو و دراوینسکی [۳۱]، پاروانووا و همکاران [۳۲] و لیو و لیو [۳۳] با استفاده از روش اجزای مرزی محیط کامل در حوزه‌ی فرکانس تأثیر حفرات زیرسطحی را بر روی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین نشان دادند. بنیتز و همکاران [۳۴] پاسخ سطح زمین را در حضور حفرات چندگانه به کمک روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی فرکانس تعیین نمودند. به جهت برخوردار شدن مزایایی چون تحلیل غیرخطی مسائل مختلف در ترکیب با دیگر روش‌های عددی، حصول پاسخ‌های حقیقی و تحلیل مسائل با هندسه‌ی وابسته به زمان، روش اجزای مرزی به حوزه‌ی زمان نیز توسعه داده شده است. روش اجزای مرزی محیط کامل در حوزه‌ی زمان توسط تاکمیا و فوجیوارا [۳۵] و کمالیان و همکاران [۳۶-۳۹] در تحلیل عوارض توپوگرافی سطحی و علی‌الهی و همکاران [۴۰] برای حفرات زیرسطحی به کار گرفته شده است. روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان توسط محققانی چون رایس و سد

بسط تابع موج و باقیمانده‌های وزن‌دار<sup>۳</sup>، این روش‌های تحلیلی مورد استفاده اکثر محققان قرار گرفت که از آن جمله می‌توان به گیمر [۶]، لی و تریفوناک [۷]، چن [۸]، داتا و شاه [۹]، لی و منوگیان [۱۰]، منوگیان [۱۱]، لیانگ و همکاران [۱۲]، یی و همکاران [۱۳]، آمورونونگپایون و همکاران [۱۴] و گائو و همکاران [۱۵] در تحلیل تونل‌های زیرزمینی تحت امواج مهاجم SH اشاره کرد. از دیگر روش‌های تحلیلی مورد استفاده محققان، روش مختصات چند قطبی است که از مطالعات انجام گرفته با این روش می‌توان از پژوهش وانگ و لیو [۱۶] و شی و همکاران [۱۷] نام برد. در این میان مطالعات تحلیلی انجام شده توسط لی و همکاران [۱۸] و اسمرزینی و همکاران [۱۹] به کمک بسط تابع بسط، لیو و لین [۲۰] و تسائور و چانگ [۲۱] با استفاده از روش تطابق ناحیه‌ای قابل ذکر می‌باشد.

از سوی دیگر روش‌های عددی حجمی در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی و تعیین پاسخ سطح زمین در حضور تونل‌های زیرزمینی توسعه داده شده است. لی و روو [۲۲] با استفاده از روش اجزای محدود<sup>۴</sup> (FEM) تغییر مکان سطح زمین را در فرآیند حفاری تونل نشان دادند. مولینرو و همکاران [۲۳] با مدل‌سازی دینامیکی به وسیله‌ی روش اجزای محدود به بررسی اثر جریان آب بر رفتار تونل پرداختند. یوتامیترا و همکاران [۲۴] به کمک روش اختلاف محدود<sup>۵</sup> (FDM) اهمیت حضور سازه‌های زیرزمینی را بر روی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و سازه‌های رو سطحی مجاور بررسی کردند. بشارت و همکاران [۲۵] به کمک روش اختلاف محدود اثر حضور سازه‌های زیرزمینی را طی وقوع زلزله با در نظر گرفتن تونل صدر نیایش به‌عنوان مطالعه موردی، ارزیابی نمودند. با مدل‌سازی عددی و در نظر گرفتن تونل متروی کرج به‌عنوان مطالعه موردی، دهقان و همکاران [۲۶] به تحلیل پایداری آن با استفاده از روش تحلیل برگشتی پرداختند. شن و همکاران [۲۷] سازوکار آسیب‌های لرزه‌ای و پارامترهای تغییر شکل دینامیکی تونل‌های کوهستانی را پس از زلزله ونچوان نشان دادند. سو و همکاران [۲۸] با

$$\mu \frac{\partial u(x,y,t)}{\partial n} \Big|_{y=0} = 0 \quad (2)$$

که در این معادلات  $c$  سرعت موج برشی،  $u(x,y,t)$  و  $b(x,y,t)$  به ترتیب تغییر مکان و نیروهای حجمی خارج از صفحه در مختصات  $(x,y)$  و زمان  $t, \mu$ ، مدول برشی و  $n$  بردار نرمال سطح زمین می‌باشد. از حل منفرد معادله (۱) و با در نظر گرفتن شرایط مرزی (۲) حل اساسی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان حاصل خواهد شد [۴۵]. لازم به ذکر است برای اعمال شرایط مرزی از روش تصویر منبع موج بهره گرفته شده است [۴۴-۴۵]. معادله‌ی انتگرال مرزی در حوزه‌ی زمان نیز از انتگرال‌گیری معادله‌ی باقیمانده‌های وزن‌دار با چشم‌پوشی از جملات حجمی و شرایط اولیه و با در نظر گرفتن اصول پراکنش امواج در یک نیم‌صفحه به صورت زیر به دست می‌آید [۵۱-۵۳]:

$$c(\xi)u(\xi, t) = \int_{\Gamma} \left\{ \int_0^t \left[ (u^*(x, t; \xi, \tau) \cdot q(x, \tau)) - (q^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u(x, \tau)) \right] d\tau \right\} d\Gamma(x) + u^{ff}(\xi, t) \quad (3)$$

که در این معادله  $u^*$  حل اساسی تغییر مکان نیم‌صفحه در موقعیت  $x$  و زمان حاضر  $t$  تحت یک پالس واحد خارج از صفحه در موقعیت  $\xi$  و زمان  $\tau$  می‌باشد.  $q^*$  حل اساسی تنش نیم‌صفحه حاصل از مشتق حل اساسی تغییر مکان نسبت به امتداد قائم را مبین می‌سازد.  $u$  و  $q$  به ترتیب مقادیر تغییر مکان و تنش مرزی،  $c(\xi)$  زاویه‌ی شکست مرزی و  $\Gamma(x)$  نشانگر مرز محیط مورد نظر است.  $u^{ff}$  حرکت آزاد سطح زمین در شرایط همسان و همگن می‌باشد که شرایط مرزی را نیز اقلان می‌کند. برای حل معادله (۳) لازم است محور زمان و مرز هندسی جسم گسسته شوند. با گسسته‌سازی محور زمان از  $0$  تا  $t$  به  $N$  بازه مساوی با حد فاصل  $\Delta t$  و با مد نظر قرار دادن تغییرات خطی در هر بازه زمانی، اثر انتگرال در بازه زمان بر حل‌های اساسی به صورت تحلیلی قابل بررسی است. از همپوشانی گره‌های زمانی مجاور و حذف جملات منفرد ظاهری جبهه‌ی موج برای معادله فوق خواهیم داشت:

[۴۱]، بلیچکو و چانگ [۴۲]، هیرای [۴۳] و پنجمی [۴۴] پیشنهاد شده و توسط پنجمی و همکاران [۴۵-۴۸] در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی سطحی و زیرسطحی مرکب مورد استفاده قرار گرفته است. چنانچه مروری بر ادبیات فنی نشان داد هنوز تأثیر تونل‌های زیرزمینی نعل‌اسبی بر روی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مورد حساسیت‌سنجی دقیق قرار نگرفته است؛ بنابراین، در این مقاله محققان بر آن شدند تا با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان به تعیین الگوی بزرگنمایی پاسخ سطح زمین در حضور حفرات نعل‌اسبی بدون پوشش در برابر امواج مهاجم مایل SH بپردازند. در این میان مشخصات هندسی تونل خط دوم متروی کرج که پیش‌تر توسط دهقان و همکاران [۲۶] و کاظمینی و همکاران [۲] به ترتیب تحت تحلیل استاتیکی و تجربی قرار گرفت، به عنوان مطالعه‌ی پارامتریک در نظر گرفته شده است. ابتدا ضمن صحت‌سنجی برخی از نتایج حاصل با پاسخ‌های تحلیلی در دسترس، پاسخ سطح زمین و الگوی بزرگنمایی حاصل در حضور تونل متروی کرج در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس ارائه شده است. در این راستا زاویه‌ی موج مهاجم، فرکانس بی‌بعد<sup>۸</sup> پاسخ، عمق استقرار تونل و موقعیت افقی استقرار آن به عنوان پارامترهای مزبور مورد بررسی قرار گرفته است. سهولت در مدل‌سازی سازه‌های زیرزمینی واقعی و دقت مناسب پاسخ‌ها در استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان و استخراج برخی گراف‌ها و جداول پیرامون تکمیل و تدقیق آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود، از اهداف بارز این تحقیق به شمار می‌رود.

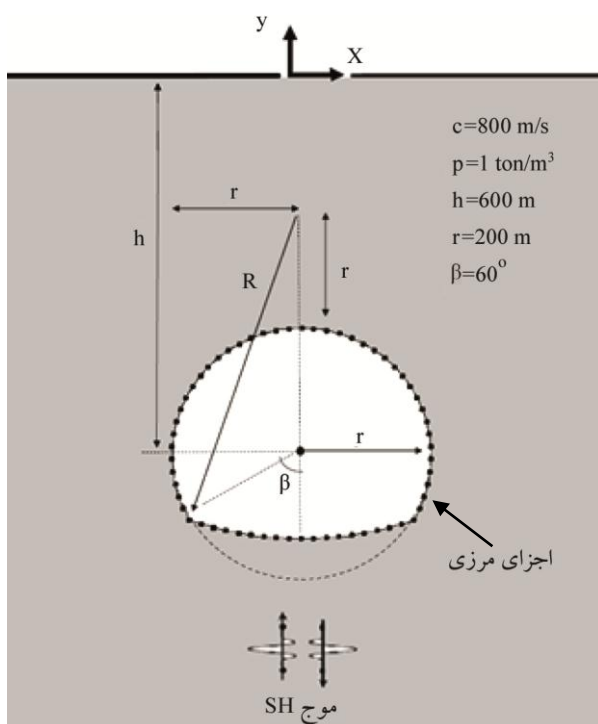
## ۲- اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان

معادله اسکالر دو بعدی موج و شرایط مرزی حاکم بر سطح زمین برای یک محیط الاستیک خطی همگن و همسان به ترتیب مطابق زیر معرفی می‌شود [۴۹-۵۰]:

$$\frac{\partial^2 u(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x,y,t)}{\partial y^2} + b(x,y,t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x,y,t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

### ۳- صحت‌سنجی

پس از عددی سازی فرمول‌بندی ارائه شده در فوق در یک الگوریتم جامع موسوم به داس بم (DASBEM)<sup>[۴۴]</sup>، پیرامون اعتبارسنجی، از یک تونل نعل‌اسبی تحت امواج مهاجم SH مطابق شکل (۱) استفاده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود برای مدل‌سازی این تونل به کمک روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان تنها گسسته‌سازی مرز پیرامون آن کفایت می‌نماید.



شکل (۱): مدل شماتیک مش‌بندی شده حفره‌ی نعل‌اسبی با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان.

با توجه به اینکه مسئله‌ی مزبور اخیراً توسط گائو و همکاران [۱۵] به صورت تحلیلی حل شده‌است، لذا این مطالعه به‌عنوان پنج‌مارک مورد بررسی قرار گرفته است. موج مهاجم ورودی از نوع تابع موجک ریکر و از جنس حرکت آزاد سطح زمین فرض شده‌است. در شکل (۲) نمونه‌ای از موج ورودی محرک برای یک نقطه از دیواره‌ی حفره در حوزه‌ی زمان نشان داده شده است.

تابع موجک ریکر با در نظر گرفتن اثر اختلاف فاز حاصل از عمق استقرار گره مرزی و انعکاس از سطح زمین به‌صورت زیر

$$c(\xi)u^N(\xi) = \quad (۴)$$

$$\sum_{n=1}^N \int_{\Gamma} \left\{ [U_1^{N-n+1}(x, \xi) + U_2^{N-n}(x, \xi)]q^n(x) - [Q_1^{N-n+1}(x, \xi) + Q_2^{N-n}(x, \xi)]u^n(x) \right\} d\Gamma(x) + u^{ff.N}(\xi, t)$$

که در این معادله  $U_1^{N-n+1} + U_2^{N-n}$  و  $Q_1^{N-n+1} + Q_2^{N-n}$  به ترتیب هسته‌های دینامیکی نیم‌صفحه تغییر مکان و تنش برای معادله‌ی اسکالر موج هستند که توسط پنجی و همکاران [۴۵، ۴۸] به صورت حل بسته ارائه شده است. همچنین  $u^{ff.N}$  تغییر مکان میدان آزاد سطح زمین در گام زمانی  $N$  و  $u^N$  و  $q^N$  نیز به ترتیب بردارهای تغییر مکان و تنش گره‌های مرزی می‌باشند. با گسسته‌سازی مرز هندسی جسم به وسیله‌ی اجزای ایزوپارامتریک درجه دو و انجام انتگرال‌گیری عددی گوس و لگاریتمی ویژه به ترتیب برای انتگرال‌های غیرمنفرد و منفرد، معادله (۴) به شکل ماتریسی زیر به دست می‌آید:

$$\sum_{n=1}^N H^{N-n+1}\{u^n\} = \sum_{n=1}^N G^{N-n+1}\{q^n\} + \{u^{ff.N}\} \quad (۵)$$

در این معادلات ماتریس‌های  $H^{N-n+1}$  و  $G^{N-n+1}$  به ترتیب از انتگرال‌گیری عددی هسته‌های نیم‌صفحه تنش و تغییر مکان بر روی اجزای مرزی به دست می‌آیند. پس از اعمال شرایط مرزی حاکم در گره‌ها و آرایش ستون‌های متناظر با مقادیر مجهول مرزی در سمت چپ معادله فوق، برای شکل قابل حل آن می‌توان نوشت:

$$[A_1^1]\{X^N\} = [B_1^1]\{Y^N\} + \{R^N\} + \{u^{ff.n}\} \quad (۶)$$

در این معادله  $X^N$  و  $Y^N$  به ترتیب بیانگر مقادیر مجهول و معلوم مرزی و  $R^N$  اثر تاریخیچه زمانی لحظات پیشین گره زمانی  $N$  مطابق زیر می‌باشد:

$$\{R^N\} = \sum_{n=1}^{N-1} (G^{N-n+1}\{q^n\} - H^{N-n+1}\{u^n\}) \quad (۷)$$

با حل معادله (۶) و تعیین همه‌ی پاسخ‌ها، با برابر واحد قرار دادن زاویه شکست مرزی در معادله (۳)، تغییر مکان هر نقطه‌ی درونی از محیط نیم‌صفحه از آن جمله سطح صاف زمین قابل استخراج می‌باشد.

موجک ریکر به ترتیب ۳ هرتز، ۲/۴ ثانیه و ۰/۰۱ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در حوزه‌ی فرکانس نتایج بر حسب فرکانس بی‌بعد قابل ارائه می‌باشد، لذا برای این پارامتر خواهیم داشت:

$$\eta = \frac{\omega r}{\pi c} \quad (11)$$

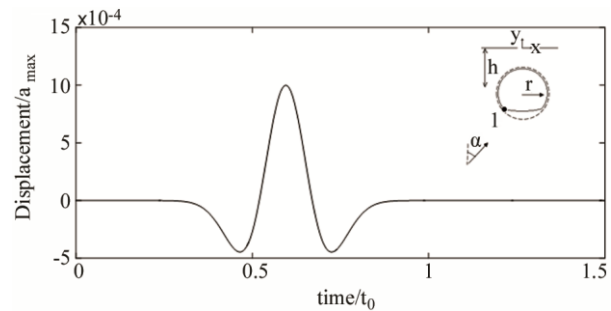
به طوری که  $\eta$  فرکانس بی‌بعد،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای موج مهاجم،  $r$  شعاع حفره و  $c$  سرعت موج برشی است. شکل (۳) پاسخ نرمال شده (نسبت دامنه فوریه پاسخ به دامنه فوریه موج مهاجم) سطح زمین و مجاور آن را به ترتیب در فرکانس‌های بی‌بعد ۱ و ۴ و حتی زوایای مختلف موج مهاجم SH، در مقایسه با نتایج تحلیلی گائو و همکاران [۱۵] نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود نتایج از دقت مطلوب برخوردار است.

#### ۴- مطالعه‌ی پارامتریک

به‌عنوان مطالعه پارامتریک از مشخصات هندسی تونل نعل‌اسبی بدون پوشش متروی کرج [۲۶] شامل ۴ کمان دایره‌ای با شعاع‌های متفاوت مطابق شکل (۴) در نظر گرفته شده است. چنانچه مشاهده می‌شود تمامی پارامترهای طول نسبت به شعاع  $r$  بی‌بعد شده است. در ادامه ضمن ارائه متدولوژی تحقیق، برخی از پاسخ‌های حاصل از مطالعه‌ی پارامتریک در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس نشان داده شده است.

#### ۴-۱- متدولوژی مطالعه

برای مطالعه‌ی پارامتریک، مطابق شکل (۴) تونل مزبور با شعاع ( $r$ ) برابر ۲۰۰ متر در عمق متغیر مدفون ( $h$ ) مدل‌سازی شده است. پارامترهای نسبت عمق  $DR=h/r$  و نسبت موقعیت افقی  $LR=b/r$  تعریف شده است. مقادیر ۱/۲۵، ۲/۵، ۳/۷۵ و ۵ برای نسبت عمق، مقادیر ۰، ۱، ۲ و ۴ برای نسبت موقعیت افقی و مقادیر ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه برای زاویه‌ی موج مهاجم در نظر گرفته شده است. پیرامون حصول پاسخ‌های دقیق، فاصله



شکل (۲): مشخصات موج مهاجم SH از نوع موجک ریکر در نقطه‌ی ۱ قابل ارائه تونل.

قابل ارائه می‌باشد [۴۵]:

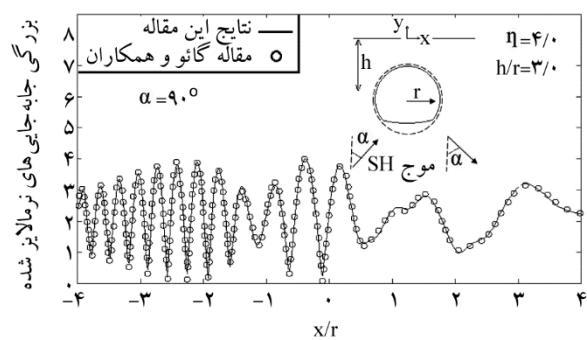
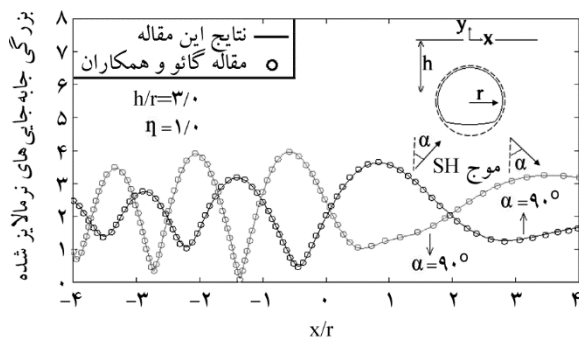
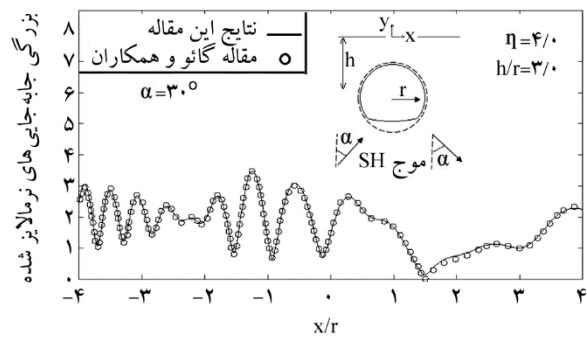
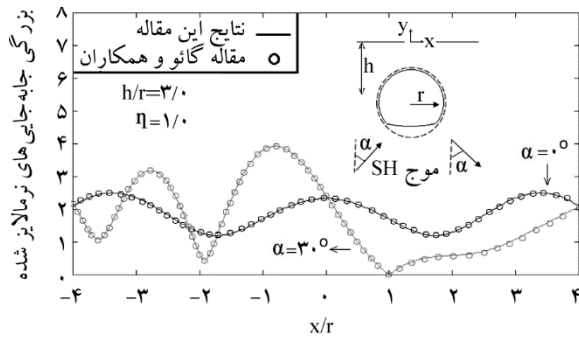
$$u^{ff}(y,t) = a_{max} \cdot \left( \left[ 1 - 2 \left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc.} \right)^2 \right] e^{-\left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc.} \right)^2} + \left[ 1 - 2 \left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref.} \right)^2 \right] e^{-\left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref.} \right)^2} \right) \times H\left(t - \frac{|y|}{c}\right) \quad (8)$$

در این معادله  $a_{max}$  دامنه‌ی حداکثر تاریخچه زمانی،  $f_p$  فرکانس غالب موج ورودی،  $H$  تابع هویساید<sup>۱</sup>،  $\alpha^{inc.}$  و  $\alpha^{ref.}$  نیز به ترتیب اختلاف فاز موج مهاجم و انعکاس یافته مطابق زیر است:

$$\alpha^{inc.} = c(t - t_0) + |y| \quad (9)$$

$$\alpha^{ref.} = c(t - t_0) - |y| \quad (10)$$

به طوری که  $t_0$  زمان متناظر با دامنه‌ی حداکثر تاریخچه زمانی موج می‌باشد. شایان ذکر است برای احراز شرایط مرزی تنش آزاد سطح صاف زمین، لازم است تابع موج ورودی (معادله ۸) شامل دو مؤلفه موج مستقیم و انعکاس یافته باشد. با توجه به مقادیر مفروض در شکل (۱) برای حفره‌ی مورد مطالعه، فاصله‌ی در محدوده‌ی مورد بررسی ( $-4r \leq x \leq 4r$ ) ۶۰ نقطه درونی گره‌های پیرامون حفره ۲۰ متر فرض شده و بر روی سطح زمین تعریف شده است. این مسئله با ۲۰۰ گام زمانی ۰/۰۲۵ ثانیه حل شده است. مقدار فرکانس غالب، پارامتر شیفیت زمانی و حداکثر دامنه



شکل (۳): پاسخ سطح زمین حاصل از مطالعه‌ی عددی حاضر در مقایسه با نتایج تحلیلی گائو و همکاران [۱۵] برای فرکانس‌های بی‌بعد ۱ و ۴ تحت امواج مهاجم SH با زوایای مختلف.

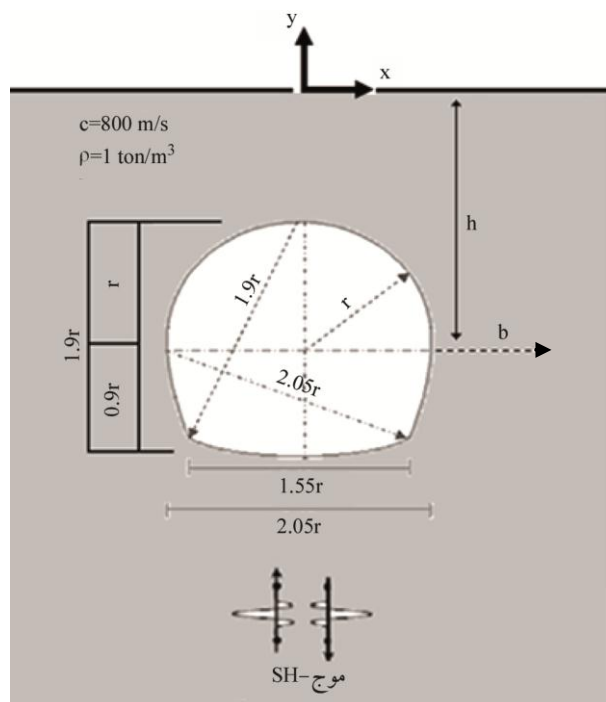
زمین و مؤلفه‌ی بزرگنمایی مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات مصالح نیز مطابق شکل (۴)، برای سرعت موج برشی و دانسیته به ترتیب ۸۰۰ متر بر ثانیه و ۱ تن بر متر مکعب فرض شده است.

#### ۴-۲- اثر نسبت عمق

برای بررسی پارامتر نسبت عمق چهار مقدار متفاوت مطابق فوق تحت بررسی قرار گرفت که در هر عمق، امواج مهاجم SH در زوایای مختلف به تونل تابانده شده است.

#### ۴-۲-۱- پاسخ در حوزه‌ی زمان

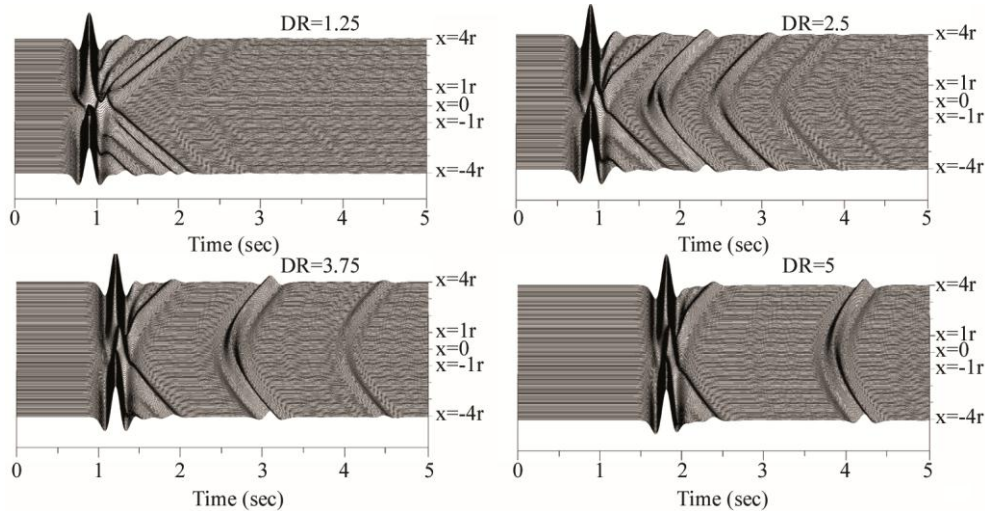
در شکل (۵) اثر نسبت عمق در الگوی کلی پاسخ تاریخیچه زمانی سطح زمین نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در کمترین نسبت عمق، آشفستگی و تفرق روی سطح زمین بالای حفره بیشتر از اعماق دیگر می‌باشد. در عمق مزبور، آشفستگی بحرانی تقریباً در مدت کوتاهی اتفاق افتاده و سپس دامنه‌ی



شکل (۴): مشخصات هندسی تونل متروی کرج و حومه [۲۶].

گره‌ها برابر ۵ متر و گام زمانی ۰/۰۲۵ ثانیه در تحلیل لحاظ شده است. مطالعه‌ی پارامتریک برای تعیین پاسخ نرمال شده سطح





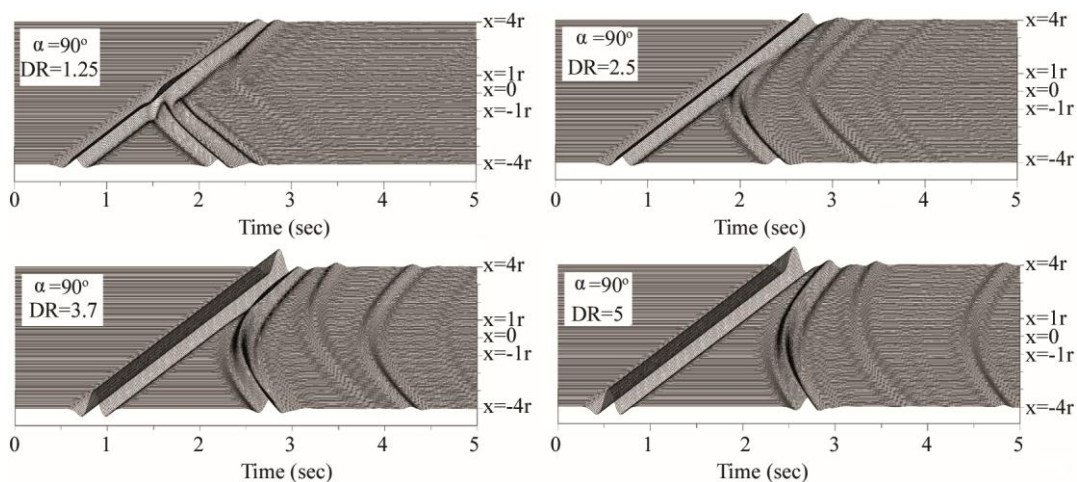
شکل (۵): الگوی کلی پاسخ تاریخیچه زمانی سطح زمین ناشی از حضور تونل نعل‌اسبی در اعماق مختلف در برابر هجوم امواج قائم SH، ( $\alpha=0^\circ$ ).

کوچک‌ترین نسبت عمق یعنی  $1/25$ ، پاسخ‌ها در محدوده‌ی بالای حفره به سمت دامنه بحرانی نزدیک می‌شوند. بدیهی است این روند با افزایش زاویه موج و فرکانس بی‌بعد، سرعت و شدت بیشتر به خود می‌گیرد. نکته‌ی قابل توجه این است که با کاهش عمق، پاسخ سطح زمین علاوه بر حداکثر بزرگی، مقدار کمینه را نیز تجربه می‌کند، به طوری که پاسخ‌ها در نقاطی از سطح زمین به صفر نزدیک می‌شوند. همچنین در حالت موج مهاجم قائم اثر ایزولاسیون حفرات زیرزمینی در اعماق کم بیشتر نمایان می‌شود، به نحوی که با افزایش عمق تونل دامنه‌ی پاسخ‌ها بر روی سطح زمین بالای تونل افزایش می‌یابد.

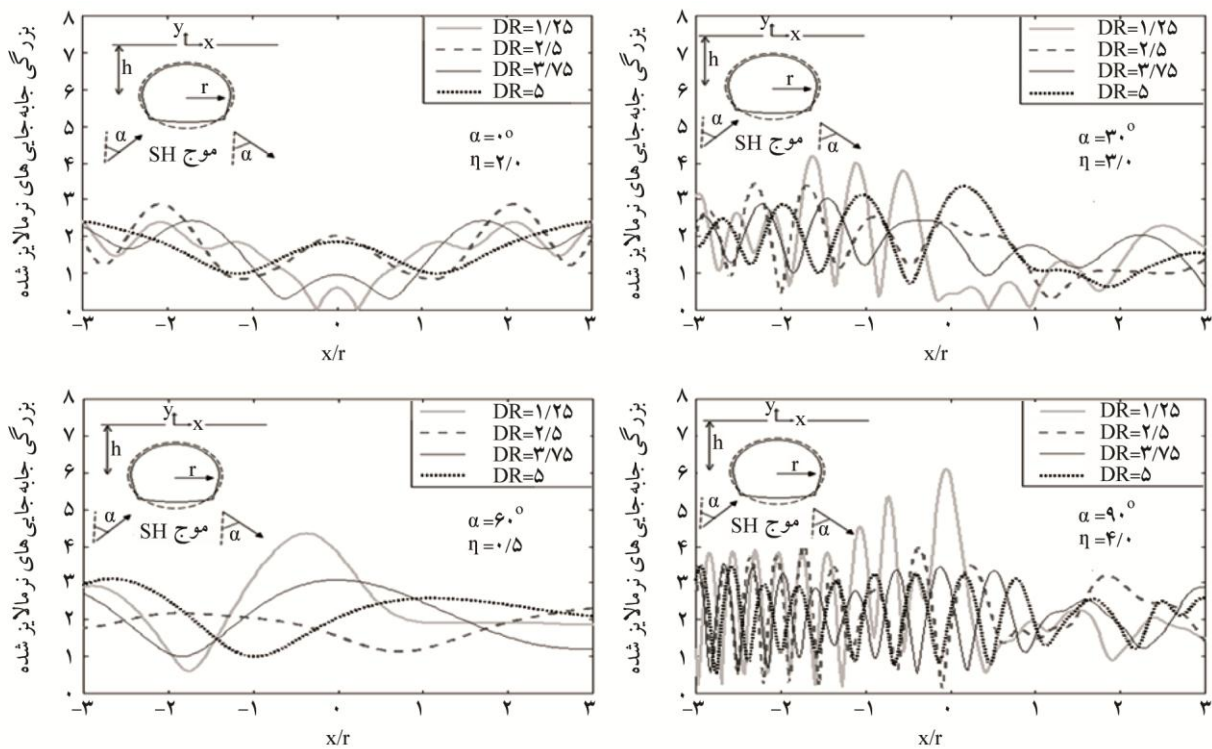
پاسخ به سرعت همگرا می‌شود. به طور کلی با افزایش عمق، تمرکز تفرق امواج بر روی سطح زمین کمتر شده و به اصطلاح توزیع می‌شوند. شایان ذکر است همان‌طور که در شکل (۶) نیز مشاهده می‌شود موضوع مزبور با افزایش زاویه‌ی موج مهاجم نیز صادق است.

#### ۴-۲-۲- پاسخ در حوزه‌ی فرکانس

در شکل (۷) پاسخ سطح زمین در زوایا و فرکانس‌های بی‌بعد مختلف نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش عمق از دامنه نوسانات کاسته شده به طوری که در



شکل (۶): الگوی کلی پاسخ تاریخیچه زمانی سطح زمین ناشی از حضور تونل نعل‌اسبی در اعماق مختلف در برابر هجوم امواج افقی SH.



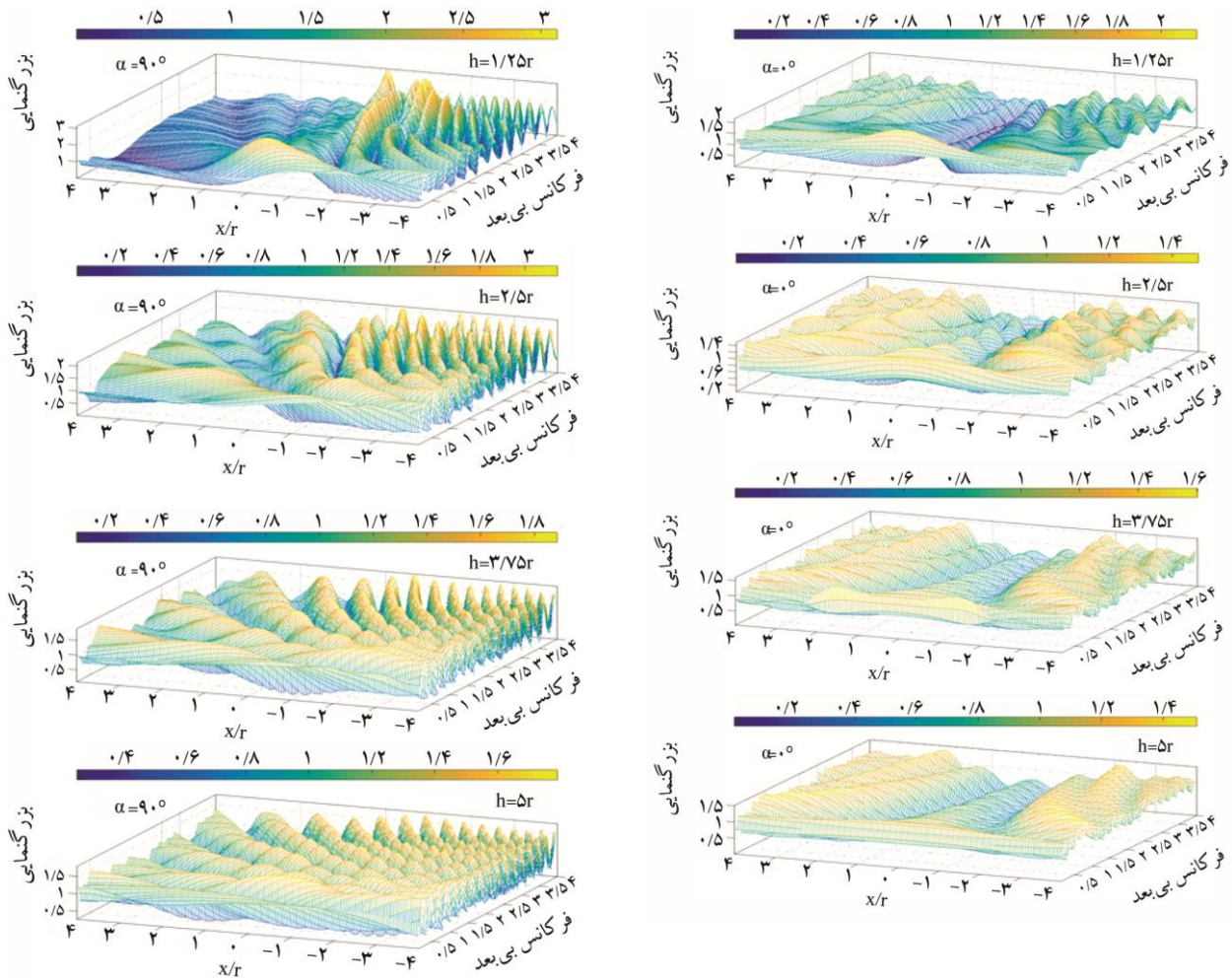
شکل (۷): تأثیر نسبت عمق بر روی پاسخ سطح زمین تحت زوایای مختلف هجوم موج.

عمق تعداد نوسانات بیشتر را نمایان می‌سازد. همچنین با افزایش فرکانس، ضمن افزایش بزرگنمایی، تونل نعل‌اسبی پاسخ بحرانی را تجربه می‌کند. البته در این حالت نیز همانند موج قائم افزایش عمق، از میزان حداکثر بزرگنمایی پاسخ می‌کاهد.

در شکل (۱۰) بزرگنمایی نقطه‌ای بالای تونل بر روی سطح زمین برحسب پریرود بی‌بعد<sup>۱۲</sup> ( $T=1/\eta$ ) برای نسبت عمق‌ها و زوایای مختلف به تصویر کشیده شده است. با توجه به رغبت دانش مهندسی به مشاهده پاسخ در محدوده‌ی پریرودیک  $0/25$  تا  $8/33$  که متناظر با طول موج‌هایی با  $0/25$  تا  $8/33$  برابر عرض تونل هستند، آنچه در وهله اول رخ می‌دهد افزایش نوسان پاسخ است که همسو با عمیق‌تر شدن دره اتفاق می‌افتد. نکته‌ی جالب که در تمام شکل‌ها و زوایه‌ها به چشم می‌خورد بزرگنمایی حداکثر است که برای کمترین نسبت عمق حاصل شده است. آنچه بدیهی است تعداد نوسانات با افزایش پریرود بی‌بعد کم شده و پاسخ‌ها در انتها به سمت بزرگنمایی واحد همگرا می‌شوند.

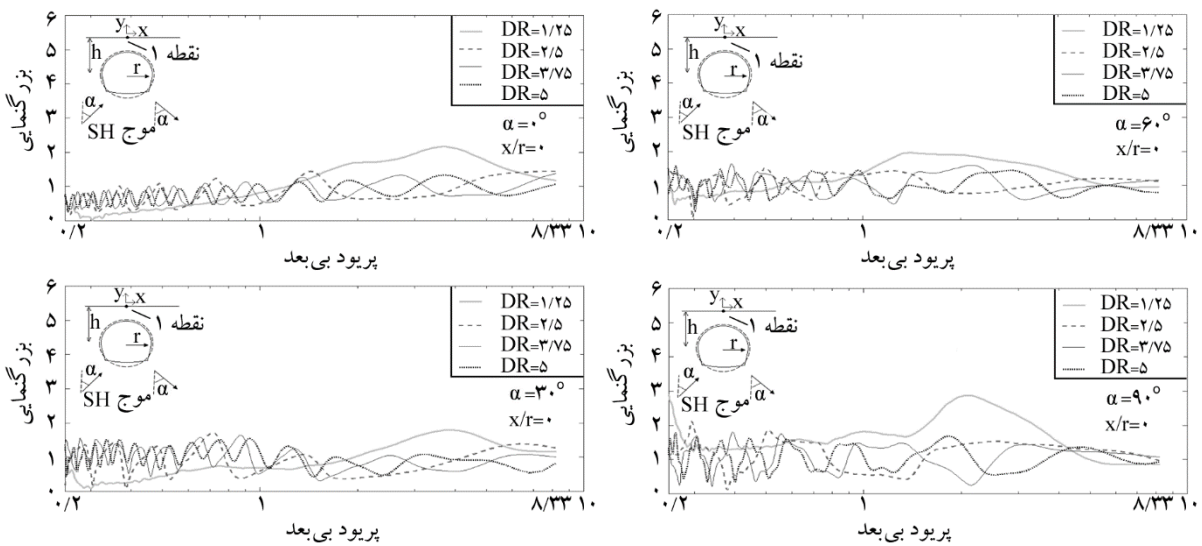
در شکل‌های (۸) و (۹) اثر نسبت عمق در الگوی کلی بزرگنمایی سطح زمین برای دو زاویه‌ی مختلف موج مهاجم نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود تحت هجوم امواج قائم با افزایش عمق از میزان حداکثر بزرگنمایی کاسته شده به طوری که دقیقاً بالای دیواره‌های چپ و راست تونل روی سطح زمین ( $r$  و  $-r$ ) کوچک‌نمایی به چشم می‌خورد. این در حالی است که بالای مرکز تونل روی سطح زمین پاسخ‌ها با بزرگنمایی روبه‌رو هستند. در واقع هر چه از امتداد مرکز تونل روی سطح زمین به سمت امتداد‌های سمت چپ و راست آن حرکت می‌شود از میزان بزرگنمایی کاسته شده و مجدداً با افزایش روبه‌رو می‌شود. نکته‌ی جالب دیگر این است که با افزایش فرکانس بی‌بعد در دیواره‌ی کناری تونل ( $r$  و  $-r$ ) بزرگنمایی روند نزولی و با افزایش عمق از تعداد نوسانات پاسخ کاسته می‌شود. در شکل (۹) که موج مهاجم به صورت افقی وارد می‌شود، برخلاف هجوم امواج قائم، افزایش





شکل (۹): الگوی کلی بزرگنمایی سطح زمین  $(-4r \leq x \leq 4r)$  برحسب فرکانس بی‌بعد برای تونل نعل‌اسبی در اعماق مختلف تحت هجوم امواج افقی SH.

شکل (۸): الگوی کلی بزرگنمایی سطح زمین  $(-4r \leq x \leq 4r)$  برحسب فرکانس بی‌بعد برای تونل نعل‌اسبی در اعماق مختلف تحت هجوم امواج قائم SH.



شکل (۱۰): اثر نسبت عمق بر روی بزرگنمایی سطح زمین برحسب پرورد بی‌بعد در نقطه‌ی  $x/r=0$  در زوایای مختلف موج مهاجم.

### ۳-۴- اثر نسبت موقعیت افقی<sup>۱۳</sup>

موقعیت افقی مختلف نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با تغییر مکان تونل در امتداد افق از میزان تمرکز تفرق امواج کاسته می شود. همسو با جابه جایی تونل، انکسار امواج ناشی از سقف تونل و در پی آن محبوس شدگی به وقوع پیوسته به نحوی تغییر مکان یافته که با شیفت تونل تا دو برابر قطرش در محدوده ی مفروض بر روی سطح زمین تنها اثر امواج انعکاس یافته به چشم می خورد.

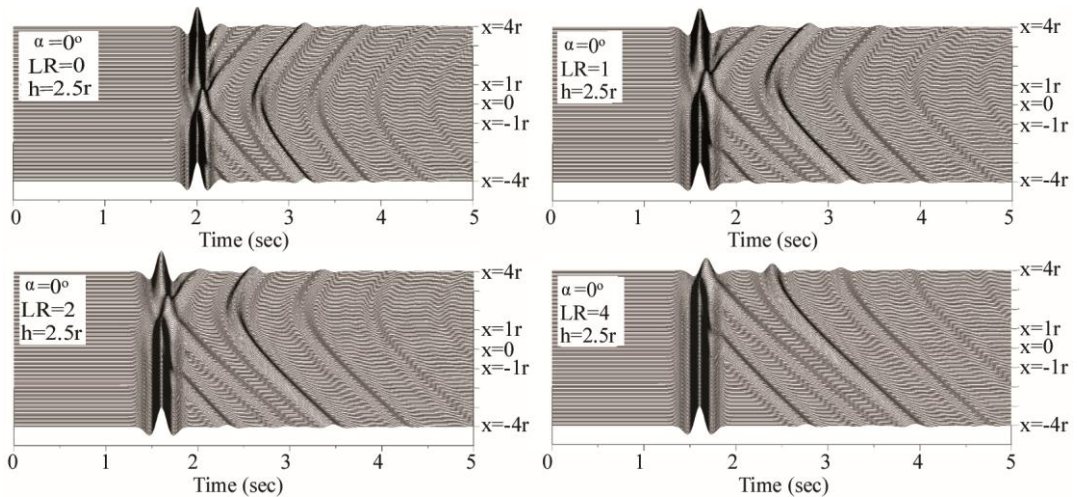
با انتقال تونل در راستای افق و در یک عمق ثابت همخوان با تونل متروی کرج ( $DR=2.5$ )، پارامتر نسبت موقعیت افقی ( $LR$ ) تعریف شد [۲۶ و ۴۶]. برای بررسی این پارامتر چهار موقعیت افقی مفروض ( $0, 1, 2, 4$ ) تحت بررسی قرار گرفت. شکل های (۱۱) تا (۱۵) تأثیر موقعیت افقی را بر پاسخ سطح آزاد زمین نمایش می دهند.

### ۳-۴-۲- پاسخ در حوزه ی فرکانس

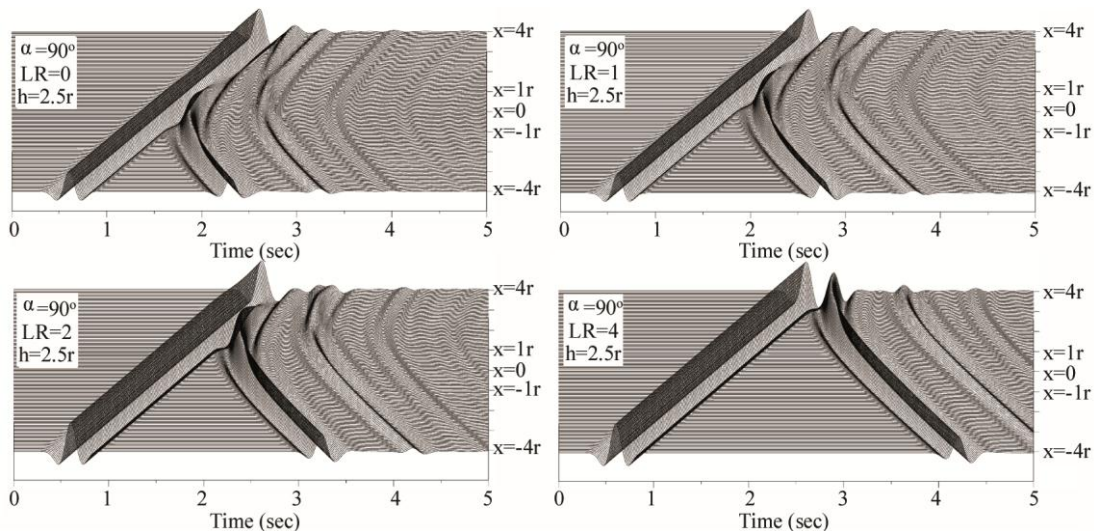
در شکل های (۱۳) و (۱۴) تأثیر نسبت موقعیت افقی تونل بر الگوی کلی بزرگنمایی سطح زمین در محدوده ی مفروض

### ۳-۴-۱- پاسخ در حوزه ی زمان

در شکل های (۱۱) و (۱۲) الگوی کلی پاسخ تاریخیچه زمانی سطح زمین به ترتیب برای امواج مهاجم قائم و افقی در نسبت



شکل (۱۱): الگوی کلی پاسخ تاریخیچه زمانی سطح زمین در حضور تونل نعل اسبی برای نسبت موقعیت افقی متفاوت تحت هجوم امواج قائم SH.

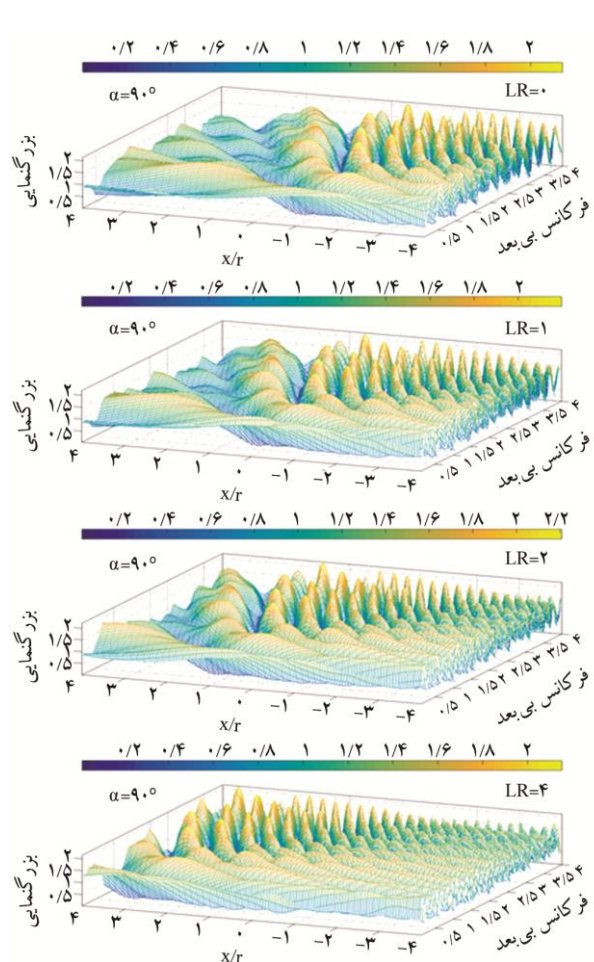


شکل (۱۲): الگوی کلی پاسخ تاریخیچه زمانی سطح زمین در حضور تونل نعل اسبی برای نسبت موقعیت افقی متفاوت تحت هجوم امواج افقی SH.



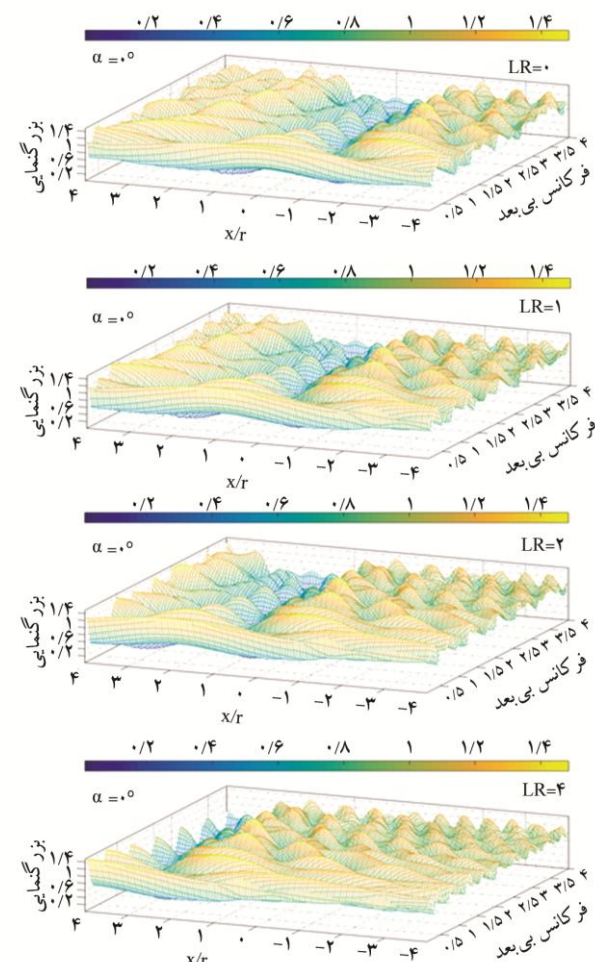
به مراتب بزرگ‌تر از دیواره‌ها نتیجه می‌شود. نتایج مذکور متناظراً برای شکل (۱۴) صادق نیست و در این محدوده با افزایش فرکانس بی‌بعد، بزرگنمایی با کاهش روبه‌رو است.

در شکل (۱۵) اثر نسبت موقعیت افقی بر روی الگوی بزرگنمایی سطح زمین برحسب فرکانس بی‌بعد در نقطه‌ی  $x/r=0$  تحت زوایای مختلف موج مهاجم نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش زاویه‌ی موج در محدوده‌ی فرکانس کم‌تر از واحد نه تنها بر روی تعداد نوسانات بلکه بر دامنه‌ی آنها نیز تأثیر گذاشته است. لازم به ذکر است در یک زاویه‌ی ثابت موج مهاجم، با افزایش نسبت افقی در دامنه‌ی بزرگنمایی حاصل تغییرات محسوس مشاهده نمی‌شود.

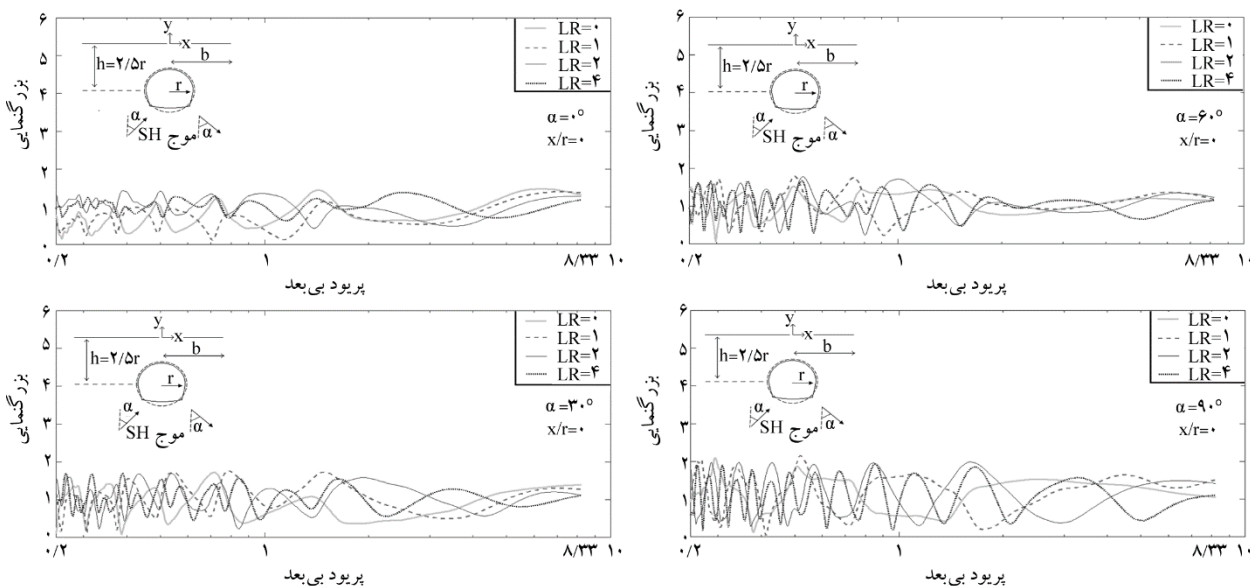


شکل (۱۴): تأثیر نسبت موقعیت افقی بر الگوی کلی بزرگنمایی سطح زمین  $(-4r \leq x \leq 4r)$  برحسب فرکانس بی‌بعد برای تونل نعل‌اسبی تحت هجوم امواج افقی SH.

$(-4r \leq x \leq 4r)$  نشان داده شده است. به‌طور کلی می‌توان اذعان داشت که با افزایش این نسبت تعداد نوسان افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش زاویه‌ی موج مهاجم نیز بر میزان بزرگنمایی می‌افزاید. نکته‌ی جالب قابل مشاهده در پاسخ‌ها مقدار حداکثر بزرگنمایی است که تقریباً در نسبت موقعیت‌های افقی مختلف یکسان است. شایان ذکر است وقتی موج مهاجم به‌صورت قائم وارد می‌شود (شکل ۱۳) همانند شکل (۸)، در امتداد دیواره‌های چپ و راست تونل بر روی سطح زمین ( $r$  و  $-r$ ) بزرگنمایی به طرز چشمگیر کاهش می‌یابد. این موضوع در حالی است که در امتداد مرکز تونل روی سطح زمین، پاسخ‌ها با بزرگنمایی



شکل (۱۳): تأثیر نسبت موقعیت افقی بر الگوی کلی بزرگنمایی سطح زمین  $(-4r \leq x \leq 4r)$  برحسب فرکانس بی‌بعد برای تونل نعل‌اسبی تحت هجوم امواج قائم SH.

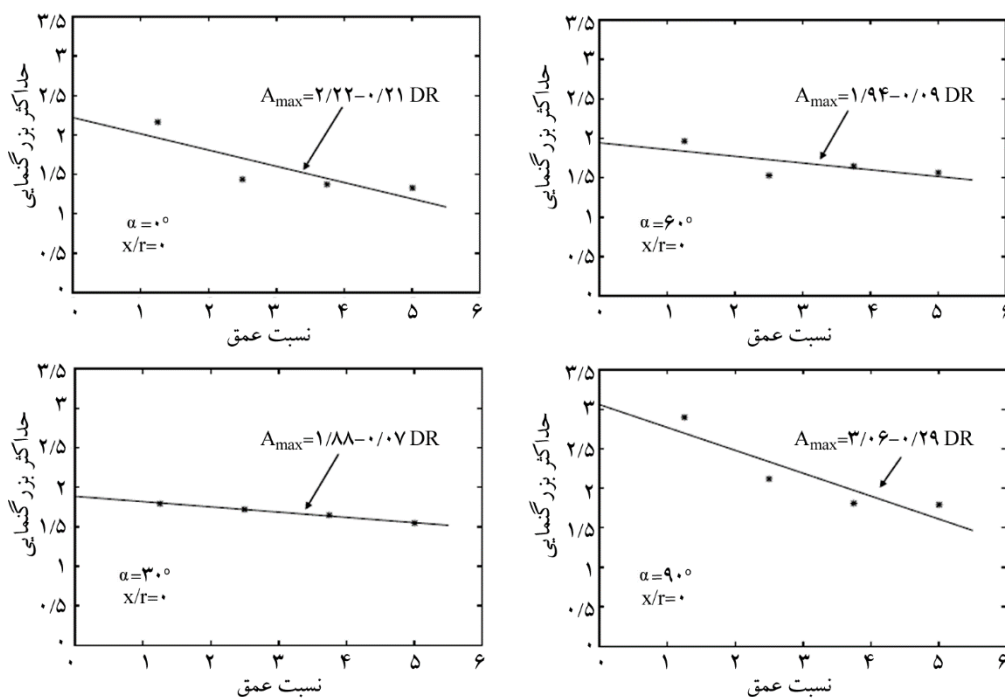


شکل (۱۵): تأثیر نسبت موقعیت افقی بر روی بزرگنمایی سطح زمین بر حسب پریود بی بعد در نقطه‌ی  $x/r=0$  برای زوایای مختلف موج مهاجم.

موج مهاجم افقی و موج مهاجم با زاویه‌ی  $30^\circ$  است. آنچه مسلم است افزایش عمق همواره با شیب منفی رخ داده و در کمینه‌سازی میزان بزرگنمایی سطح زمین مشارکت می‌نماید. آنچه که در شکل (۱۶) نشان داده شده به صورت جدول (۱) نیز در پریودهای بی بعد نظیر نمایش داده شده است.

#### ۴-۴- بزرگنمایی حداکثر

با برازش خطی از حداکثر بزرگنمایی حاصل در نسبت عمق‌های مختلف، شکل (۱۶) برای زوایای مختلف موج مهاجم در نقطه‌ی مرکزی سطح زمین به دست آمده است. چنانچه مشاهده می‌شود حداکثر و حداقل شیب خط به ترتیب متعلق به



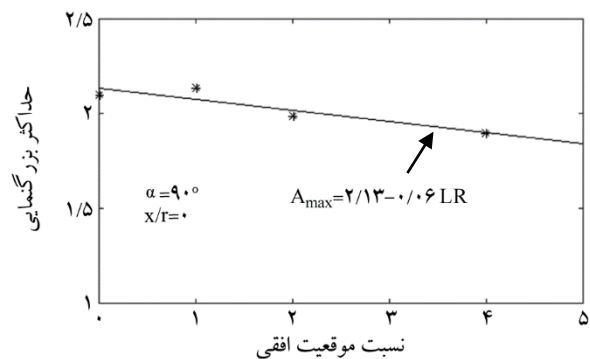
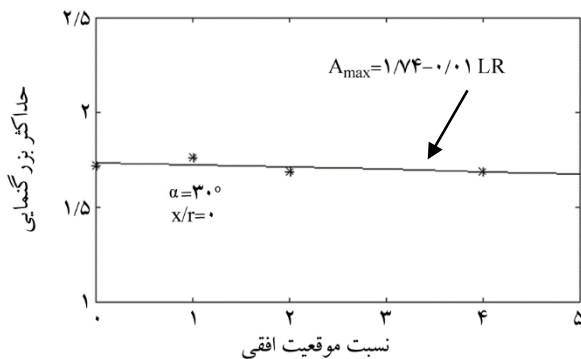
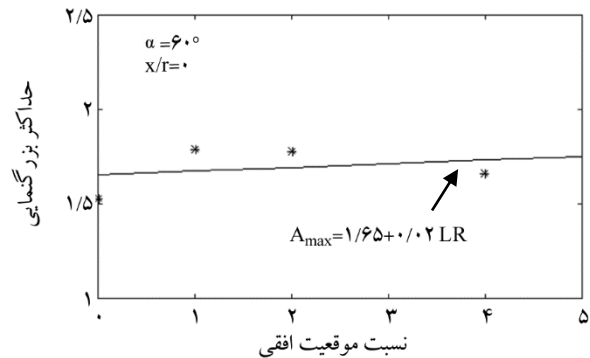
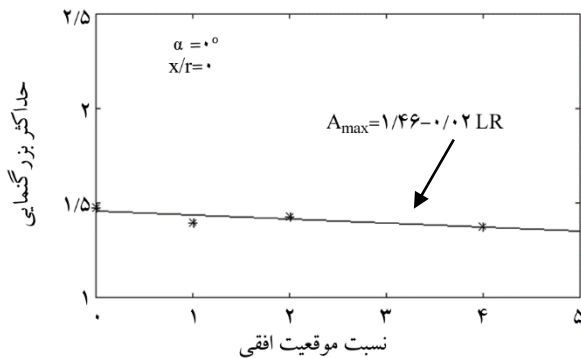
شکل (۱۶): برازش خطی از حداکثر بزرگنمایی بر حسب نسبت عمق برای زوایای مختلف موج مهاجم SH.

جدول (۱): حداکثر بزرگنمایی بر حسب پریود بی‌بعد در زوایا و نسبت عمق‌های مختلف تونل.

$\alpha=90^\circ$		$\alpha=60^\circ$		$\alpha=30^\circ$		$\alpha=0^\circ$		زاویه‌ی موج مهاجم
بزرگنمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگنمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگنمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	بزرگنمایی حداکثر	پریود بی‌بعد	مشخصات نقاط نسبت عمق
۲/۸۷۲۰	۲/۱۰۱۰	۱/۹۶۲۰	۱/۳۸۸۰	۱/۷۹۵۰	۳/۹۰۱۰	۲/۱۶۵۰	۳/۷۲۴۰	
۲/۱۱۳۰	۰/۲۹۴۵	۱/۵۲۸۰	۰/۴۹۹۵	۱/۷۲۰۰	۰/۷۱۸۶	۱/۴۴۰۰	۱/۴۳۷۰	۲/۵۰
۱/۸۰۵۰	۰/۳۹۳۸	۱/۶۴۲۰	۰/۳۹۳۸	۱/۶۴۴۰	۰/۸۷۱۵	۱/۳۷۳۰	۸/۱۹۲۰	۳/۷۵
۱/۷۹۵۰	۰/۲۶۲۶	۱/۵۶۸۰	۰/۲۶۴۳	۱/۵۴۳۰	۰/۹۳۰۹	۱/۳۲۹۰	۳/۷۲۴۰	۵/۰۰

نامحسوس بزرگنمایی سطح زمین را نسبت به جابه‌جایی افقی تونل به تصویر می‌کشند. در جدول (۲) مقادیر نشان داده شده در شکل (۱۷) در پریودهای بی‌بعد متناظر برای زوایای مختلف موج مهاجم قابل مشاهده می‌باشد.

در شکل (۱۷) نیز برازش خطی از حداکثر بزرگنمایی حاصل بر حسب نسبت موقعیت افقی در زوایای مختلف موج مهاجم نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود برخلاف نسبت عمق، در این حالت شیب منفی نمودارها اندک بوده و تغییرات



شکل (۱۷): برازش خطی از حداکثر بزرگنمایی بر حسب نسبت عمق برای زوایای مختلف موج مهاجم SH.



جدول (۲): حداکثر بزرگنمایی بر حسب پرورد بی بعد در زوایا و نسبت موقعیت‌های مختلف تونل.

$\alpha=90^\circ$		$\alpha=60^\circ$		$\alpha=30^\circ$		$\alpha=0^\circ$		زاویه‌ی موج مهاجم
بزرگنمایی حداکثر	پرورد بی بعد	بزرگنمایی حداکثر	پرورد بی بعد	بزرگنمایی حداکثر	پرورد بی بعد	بزرگنمایی حداکثر	پرورد بی بعد	مشخصات نقاط
۲/۰۹۰۷	۰/۲۹۴۷	۱/۵۲۷۰	۰/۵۰۲۶	۱/۷۲۰۰	۰/۷۱۲۳	۱/۴۷۸۰	۶/۳۰۲۰	نسبت موقعیت افقی
۲/۱۳۸۰	۰/۵۱۸۵	۱/۷۸۸۰	۰/۵۰۲۶	۱/۷۶۳۰	۰/۷۸۱۷	۱/۳۹۵۰	۷/۴۴۷۰	۰/۰۰
۱/۹۸۵۰	۱/۶۰۶۰	۱/۷۷۷۰	۰/۵۳۱۹	۱/۶۸۸۰	۰/۵۳۸۹	۱/۴۲۸۰	۰/۳۹۰۱	۱/۰۰
۱/۸۹۸۰	۰/۲۶۱۷	۱/۶۶۳۰	۰/۵۲۸۵	۱/۶۹۱۰	۰/۳۸۸۳	۱/۳۷۳۰	۲/۴۸۲۰	۲/۰۰
								۴/۰۰

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تونل زیرزمینی نعل‌اسبی بدون پوشش برای تعیین پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و الگوی بزرگنمایی حاصل تحت امواج مهاجم SH مدلسازی شده و از مشخصات هندسی تونل خط دوم متروی کرج برای مطالعه‌ی پارامتریک بهره گرفته شد. از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان که پیشتر توسط مؤلفان پیشنهاد شده [۴۴-۴۸] برای مدلسازی تونل زیرزمینی مزبور استفاده شد. تمرکز مش‌بندی تنها بر روی پیرامون تونل و عدم نیاز به گسسته‌سازی سطح زمین، نه تنها دقت پاسخ‌ها را افزایش داده بلکه حجم ورودی و محاسبات را در تقابل با روش‌های اجزای مرزی محیط کامل کاهش داد [۳۶-۴۰]. از صحت‌سنجی نتایج حاصل با پاسخ‌های تحلیلی موجود در ادبیات فنی دقت مناسب روش پیشنهاد شده در مدلسازی تونل‌های زیرزمینی مبین گردید. نتایج حاصل از مطالعه‌ی پارامتریک برای نسبت‌های مختلف عمق، موقعیت افقی تونل و زاویه‌ی موج مهاجم به صورت زیر قابل جمع‌بندی است:

- ۱- با افزایش نسبت عمق تونل نه تنها تعداد نوسان پاسخ بلکه دامنه‌ی آن نیز با کاهش قابل توجه مواجه شد.
- ۲- با افزایش نسبت عمق تونل، لحظه‌ی همگرایی تاریخچه زمانی پاسخ سطح زمین در کلیه‌ی زوایای هجوم موج تقریباً ۳۰٪ به تأخیر افتاد. به طور مشابه این موضوع برای نسبت موقعیت افقی نیز برقرار گردید.

۳- از مشاهده‌ی الگوی کلی بزرگنمایی سطح زمین، اثر ایزولاسیون حضور تونل در جبهه‌ی مخالف موج به وضوح نمایان شد به طوری که در عمق حداقل و در هجوم موج افقی برای نقاط دور از جبهه نوسان اندک تجربه شد.

۴- مطابق آنچه در ادبیات فنی برای امواج درون صفحه اشاره شده است [۴۰]، برای امواج برون‌صفحه‌ی SH نیز صادق است به طوری که با افزایش طول موج مهاجم تا هشت برابر عرض تونل، تقریباً بزرگنمایی به سمت حرکت آزاد سطح زمین همگرا شد.

۵- از برازش خطی حداکثر بزرگنمایی مشاهده شد پارامتر نسبت عمق در قیاس با موقعیت افقی تونل در کاهش بزرگنمایی مؤثرتر است به نحوی که شیب نزولی نمودارها در تغییرات عمق بیشینه شدند.

### مراجع

1. 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.
2. Kazemeini, 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.

- Iguaçu, Brazil.
14. Amornwongpaibun, A., Luo, H., and Lee, V.W. (2016) Scattering of Anti-Plane (SH) Waves by a Shallow Semi-Elliptical Hill with a Concentric Elliptical Tunnel. *Journal of Earthquake Engineering*, **20**(3), 363-382.
  15. Gao, Y., Dai, D., Zhang, N., Wu, Y., and Mahfouz, A.H. (2016) Scattering of Plane and Cylindrical SH Waves by a Horseshoe Shaped Cavity. *Journal of Earthquake and Tsunami*, **11**(2), 1650011, 1-23.
  16. Wang, G. and Liu, D. (2002) Scattering of SH-wave by multiple circular cavities in half space. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **1**(1), 36-44.
  17. Shi, W.P., Liu, D.K., Song, Y.T., Chu, J.L., and Hu, A.Q. (2006) Scattering of circular cavity in right-angle planar space to steady SH-wave. *Applied Mathematics and Mechanics*, **27**(12), 1619-1626.
  18. Lee, V.W., Manoogian, M.E., and Chen, S. (2002) Antiplane SH-deformations near a surface rigid foundation above a subsurface rigid circular tunnel. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **1**(1), 27-35.
  19. Smerzini, C., Aviles, J., Paolucci, R., and Sánchez-Sesma, F.J. (2009) Effect of underground cavities on surface earthquake ground motion under SH wave propagation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **38**(12), 1441-1460.
  20. Liu, D.K. and Lin H. (2004) Scattering of SH-waves by an interacting interface linear crack and a circular cavity near bimaterial interface. *Acta Mechanica Sinica*, **20**(3), 317-326.
  21. Tsaur, D.H. and Chang, K.H. (2012) Multiple scattering of SH waves by an embedded truncated circular cavity. *J. Mar. Sci. Tech*, **20**(1), 73-81.
  22. Lee, K.M. and Rowe, R.K. (1991) An analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay tunnel. *Canadian Geotechnical Journal*, **28**(1), 25-41.
  23. Molinero, J., Samper, J., and Juanes, R. (2002) Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel
  3. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2013a) The literature review of seismic analysis of topographic features subjected to incident SH-waves. *IIEES Res. Bull.*, **15**(4), 21-35 (in Persian).
  4. Asano, S. (1960) Reflection and refraction of elastic waves at a corrugated boundary surface, Part I, The Case of Incidence of SH Wave. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **38**, 177-197.
  5. Datta, S.K. (1974) Diffraction of SH-waves by an elliptic elastic cylinder. *International Journal of Solids and Structures*, **10**(1), 123-133.
  6. Gamer, U. (1977) Dynamic stress concentration in an elastic half space with a semi-circular cavity excited by SH waves. *International Journal of Solids and Structures*, **13**(7), 675-681.
  7. Lee, V.W. and Trifunac, M.D. (1979) Response of tunnels to incident SH waves. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **105**(4), 643-659.
  8. Chen, Y.L. (1980) The analysis of elastic liner in a cylindrical tunnel subjected to SH-waves. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **3**(1), 21-29.
  9. Datta, S.K. and Shah, A.H. (1982) Scattering of SH waves by embedded cavities. *Wave Motion*, **4**(3), 265-283.
  10. Lee, V.W. and Manoogian, M.E. (1995) Surface motion above an arbitrary shape underground cavity for incident SH waves. *European Earthquake Engineering*, **8**(1), 3-11.
  11. Manoogian, M.E. (2000) Scattering and diffraction of SH waves above an arbitrarily shaped tunnel. *ISET Journal of Earthquake Technology*, **37**(1-3), 11-26.
  12. Liang, J., Luo, H., and Lee, V.W. (2010) Diffraction of plane SH waves by a semi-circular cavity in half-space. *Earthquake Science*, **23**(1), 5-12
  13. Yi, C., Zhang, P., Johansson, D., and Nyberg, U. (2014) Dynamic analysis for a circular lined tunnel with an imperfectly bonded interface impacted by plane SH-waves. *Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life*. Foz do

33. Liu, Z. and Liu, L. (2015) An IBEM solution to the scattering of plane SH-waves by a lined tunnel in elastic wedge space. *Earthquake Science*, **28**(1), 71-86.
34. Benites, R., Aki, K., and Yomogida, K. (1992) Multiple scattering of SH waves in 2-D media with many cavities. *Pure and Applied Geophysics*, **138**(3), 353-390.
35. Takemiya, H. and Fujiwara, A. (1994) SH-wave scattering and propagation analyses at irregular sites by time domain BEM. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(5), 1443-1455.
36. Kamalian, M., Gatmiri, B., and Sohrabi-Bidar, A. (2003) On time-domain two-dimensional site response analysis of topographic structures by BEM. *J. Seism. Earthq. Eng.*, **5**(2), 35-45.
37. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., and Gatmiri, B. (2006) Time-domain two dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid FE/BE method. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **26**(8), 753-765.
38. Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A., and Khalaj, A. (2007) Amplification pattern of 2D semi-sine shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves. *Commun. Numer. Methods Eng.*, **23**(10), 871- 887.
39. Kamalian, M., Jafari, M.K., Ghayamghamian, M.R., Shafiee, A., Hamzehloo, H., Haghshenas, E., and Sohrabi-Bidar, A. (2008) Site effect microzonation of Qom, Iran. *Engineering Geology*, **97**(1), 63-79.
40. Alielahi, H., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M.K., and Panji, M. (2013) Applying a time-domain boundary element method for study of seismic ground response in the vicinity of embedded cylindrical cavity. *International Journal of Civil Engineering*, **15**(1), 45-54.
41. Rice, J.M. and Sadd, M.H. (1984b) A note on computing elastodynamic full field displacements arising from subsurface singular sources. *Mech. Res. Comm.*, **11**(6), 385-390.
42. construction in fractured bedrocks. *Engineering Geology*, **64**(4), 369-386.
24. 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*, 1-10.
25. Besharat, V., Davoodi, M., and Jafari, M.K. (2012, September) Effect of underground structures on free-field ground motion during earthquakes. *15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal.
26. Dehghan, A.N., Shafiee, S.M., and Rezaei, F. (2012) 3-D stability analysis and design of the primary support of Karaj metro tunnel: Based on convergence data and back analysis algorithm. *Engineering Geology*, 141-149.
27. Shen, Y., Gao, B., Yang, X., and Tao, S. (2014) Seismic damage mechanism and dynamic deformation characteristic analysis of mountain tunnel after Wenchuan earthquake. *Engineering Geology*, **180**, 85-98.
28. Xu, N.W., Li, T.B., Dai, F., Li, B., Zhu, Y.G., and Yang, D.S. (2015) Microseismic monitoring and stability evaluation for the large scale underground caverns at the Houziyan hydropower station in Southwest China. *Engineering Geology*, **188**, 48-67.
29. Beskos, D.E. (1987) Boundary element methods in dynamic analysis. *Appl. Mech. Rev.*, **40**(1), 1-23.
30. Luco, J.E., and De Barros, F.C.P. (1994) Dynamic displacements and stresses in the vicinity of a cylindrical cavity embedded in a half-space. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**(3), 321-340.
31. Yu, M.C. and Dravinski, M. (2009) Scattering of a plane harmonic SH wave by a completely embedded corrugated scatterer. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, **78**, 196-214.
32. Parvanova, S.L., Dineva, P.S., Manolis, G.D., and Wuttke, F. (2014) Seismic response of lined tunnels in the half-plane with surface topography. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **12**(2), 981-1005.

- Dynamics*. Computational Mechanics Publications, Southampton, UK.
53. Ohtsu, M. and Uesugi, S. (1985) Analysis of SH wave scattering in a half space and its applications to seismic responses of geological structures. *Eng. Anal.*, **2**(4), 198-204.
42. Belytschko, T. and Chang, H.S. (1988) Simplified direct time integration boundary element method. *J. Eng. Mech.*, ASCE, **114**(1), 117-134.
43. Hirai, H. (1988) Analysis of transient response of SH wave scattering in a half space by the boundary element method. *Engineering Analysis*, **5**(4), 189-194.
44. Panji, M. (2013) *Seismic Analysis of Topographic Features due to Propagating Incident SH-Waves by Half-Plane Time-Domain BEM*. Ph.D. Dissertation, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran (in Persian).
45. Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J.A., and Jafari, M.K. (2013b) Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophysical Journal International*, **194**(3), 1849-1865.
46. Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J.A., and Jafari, M.K. (2014a) Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded truncated circular cavity: a time-domain half-plane BEM. *Int. J. Civil Eng.*, **12**(2), 193-206.
47. Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J.A., and Jafari, M.K. (2014b) Amplification pattern of semi-sine shaped valleys subjected to vertically propagating incident SH waves. *J. Computational Methods Eng.*, **32**(2), 87-111 (in Persian).
48. Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J.A., and Jafari, M.K. (2014c) Analyzing seismic convex topographies by a half-plane time-domain BEM. *Geophysical Journal International*, **197**(1), 591-607.
49. Morse, P.M. and Feshbach, H. (1953) *Methods of Theoretical Physics*. McGraw-Hill Book Company, McGraw-Hill Book Company, New York.
50. Eringen, A.C. and Suhubi, E.S. (1975) *Elastodynamics*. Academic Press, New York.
51. Brebbia, C.A. and Dominguez, J. (1989) *Boundary Elements, an Introductory Course*. Computational Mechanics Publications, Southampton, UK.
52. Dominguez, J. (1993) *Boundary Elements in*

### واژه‌نامه

Half-plane Boundary Element Method	۱- روش اجزای مرزی نیم‌صفحه
Ricker Wavelet	۲- موجک ریکر
Weighted Residual Method	۳- روش باقی‌مانده وزندار
Finite Element Method (FEM)	۴- روش اجزای محدود
Finite Difference Method (FDM)	۵- روش اختلاف محدود
Volumetric Methods	۶- روش‌های حجمی
Boundary Element Method (BEM)	۷- روش اجزای مرزی
Dimensionless Frequency	۸- فرکانس بی‌بعد
Dynamic Analysis of Structures by BEM	۹- داس‌بم
Heaviside Functions	۱۰- توابع هویساید
Depth Ratio	۱۱- نسبت عمق
Dimensionless Period	۱۲- پریود بی‌بعد
Horizontal Location Ratio	۱۳- نسبت موقعیت افقی

### فهرست علائم

$t\Delta$	گام زمانی
$n$	بردار نرمال عمود بر صفحه
$N$	تعداد گام زمانی
$\rho$	دانسیته خاک پیرامون تونل
$c$	سرعت موج برشی
$b$	محور جابه‌جایی تونل در راستای افق
$T$	پریود بی‌بعد
$A_{max}$	بزرگنمایی حداکثر

$u$	تغییر مکان مرزی
$u^*$	حل اساسی تغییر مکان نیم صفحه
$\alpha$	زاویه ی موج مهاجم
$\lambda$	طول موج مهاجم
$\eta$	فرکانس بی بعد پاسخ
$r$	شعاع تونل
$h$	عمق مدفون تونل
$DR$	نسبت عمق تونل
$a_{max}$	دامنه حداکثر موجک ریکر
$LR$	نسبت موقعیت افقی تونل
$q$	تنش مرزی
$q^*$	حل اساسی تنش نیم صفحه



## Amplification Pattern of Seismic Ground Surface in the Presence of Underground Horseshoe Tunnel Subjected to Incident SH-Wave

Mehdi Panji<sup>1\*</sup> and Amirabbas Fakhravar<sup>2</sup>

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Zanjan Branch, Zanjan, Iran, \*Corresponding Author, email: m.panji@iauz.ac.ir
2. M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Zanjan Branch, Zanjan, Iran

Throughout history, earthquake mitigation has always been of vital importance for the humans. Nowadays, by growing technology and computer sciences, several approaches including empirical, analytical and numerical methods are developed and used by researchers to attempt for reducing some possible damages of this phenomenon. Although the responses of analytical methods have high accuracy, various types of arbitrarily shaped topographic features cannot be applied for modeling in reality. It results in the development of numerical methods which have good flexibility. Technically speaking, numerical methods were generally divided into two types, volumetric and boundary methods. Although volumetric methods have advantages such as high accuracy, simple formulation and wide covering range of problems, they have high computations and complex models in the problems with infinite and semi-infinite boundaries. Thus, the field is prepared for the presence of boundary approaches such as Boundary Element Method (BEM). In this method, only the boundaries of the media need to be discretized in order to analyze an elastic continuous media. Considering the automatic satisfaction of the wave's radiation conditions in the formulation, it is an appropriate method for dynamic analysis.

Two BEM formulations have been proposed to be used in modeling, including full-plane and half-plane. In this paper, the half-plane time-domain BEM was applied to obtain the amplification pattern of the homogeneous ground surface in the presence of unlined horseshoe-shaped tunnels, subjected to propagating obliquely incident out-of-plane SH-waves. In the use of the proposed method, the boundary around the tunnel was only required to be discretized. The Ricker wavelet was assumed as incident wave function. The geometrical properties of the first part from second line of the Karaj metro tunnel were considered as the case study. A sensitivity analysis was carried out on the responses with considering some intended parameters including depth ratio, horizontal location ratio, and angle of incident wave. It should be noted that, to obtain acceptable responses and in order to achieve the dimensionless results, the scale of 50 times was applied in the modeling. The response of the ground surface and the amplification patterns were presented in the time/frequency domains and the synthetic seismograms were obtained.

The results showed that making the meshes to focus only on the tunnel surrounding boundary and leaving the discretized ground surface reduces not only the analysis time, but also the input data and calculations compared to traditional BEM approaches. The verification of the responses versus existing analytical results showed that the used method had great accuracy for modeling underground tunnels. Simple modeling of actual underground structures and obtaining accurate responses through the use of time-domain half-plane BEM were main purposes of this paper. Besides, the presence of metro tunnels was effective on the formation of different seismic patterns of ground surface. The general pattern of responses in the frequency domain showed that, when subjected to vertically propagating incident SH-waves, the isolation effect of the presence of the tunnel was quite pronounced on reducing the ground surface response.

**Keywords:** Half-Plane BEM, Time-Domain, Underground Horseshoe Tunnel, Karaj Metro, Amplification Pattern, Incident SH-Waves.