

پاسخ دینامیکی تونل‌های دایره‌ای بدون پوشش تحت تأثیر انفجار داخلی

محمد رحیمیان^{۱*}، بابک امیدوار^۲، بنیامین کیومرثی^۳ و علیرضا صناعی‌ها^۳

^۱استاد دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲استادیار دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

^۳دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۱/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۱/۲۵، تاریخ تصویب ۸۸/۸/۱۰)

چکیده

امروزه سازه های زیرزمینی با توجه به شرایط گسترش و توسعه شهرها، به طور فزاینده‌ای ساخته شده و مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. در این شرایط قرار گرفتن دو تونل در کنار یکدیگر نه تنها دور از ذهن نیست، بلکه به وفور مشاهده می‌شود. در این مقاله ابتدا در باره روش المان مرزی در دامنه زمانی توضیح داده شده است و سپس به بررسی پارامتری پاسخ دینامیکی تونل های بدون پوشش دایره‌ای تحت تأثیر انفجار داخلی در دو حالت، تغییر پارامتر عمق یک تونل تحت تأثیر انفجار و تغییر پارامتر فاصله افقی دو تونل کم عمق تحت تأثیر انفجار پرداخته شده است. پاسخ های مورد بررسی، نتایج مربوط به تغییر مکان شعاعی گره ها و تنش های محیطی هستند. پاسخ های بدون بعد به دست آمده، اهمیت تأثیر پارامترهای هندسی بر تونل بدون پوشش تحت تأثیر انفجار داخلی را به تصویر می‌کشد و راهنمایی مناسب برای طراحی مکانی تونل‌های کم عمق تحت تأثیر انفجار داخلی به دست می‌دهد.

واژه های کلیدی: روش المان مرزی، تونل های بدون پوشش دایره‌ای، انفجار داخلی، تونل کم عمق

مقدمه

زیرزمینی وجود نداشته و شبکه های بزرگ و گسترده تونل های آب و فاضلاب شهری در حال احداث هستند. در حال حاضر در کشورهای توسعه یافته در برخی موارد، فضاهای زیرزمینی به عنوان گزینه ای مناسب برای ایجاد فضاهای تفریحی، فرهنگی و ورزشی مطرح است.

با توجه به گسترش روز افزون استفاده از تونل ها، طراحی ایمن تونل ها اهمیت خاصی پیدا می‌کند. از جمله مواردی که باید در طراحی در نظر گرفته شود، در نظر گرفتن اثرات زلزله و انفجار می‌باشد. از این‌رو تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام شده است. بته و همکاران [۱] با استفاده از برنامه SAP IV تأثیر تغییر پارامتر عمق بر تونل‌های دایره ای بدون پوشش را بررسی کردند. منولیس و بسکوز [۲] فرمول بندی یک روش المان مرزی در حوزه تبدیل یافته لاپلاس را ارائه دادند، که قابلیت محاسبه تمرکز تنش در تونل‌های دایره‌ای عمیق در محیط الاستیک و ویسکوالاستیک را دارد.

همچنین تحقیقات زیادی درباره تأثیر امواج زلزله بر تونل‌ها انجام شد. گلازانوف و شندروف [۳] تفرق امواج صفحه‌ای توسط تونل‌های دایره ای در محیط الاستیک همگن را بررسی کردند. بارون و ماتیو [۴] نیز تفرق امواج

فضاهای زیرزمینی برای مقاصد مختلف و در دامنه ابعاد بسیار وسیعی ساخته می‌شود، از حفاری برای کشف نفت تا حفره‌های زیرزمینی بزرگ مانند مغارها و حفره‌هایی که برای نگهداری مصالح حفر می‌شوند، بخصوص تونل هایی که به طور فزاینده برای فاضلاب های شهری و همچنین متروها در شهرهای بزرگ ساخته می‌شوند. با توجه به شرایط اقلیمی و جغرافیایی کشور و توسعه و گسترش شهرها و مراکز صنعتی، تونل و فضاهای زیرزمینی برای استفاده‌های حمل و نقل داخل و خارج از شهر، انتقال آب و فاضلاب، لوله رانی بدون حفاری سطحی برای انتقال مواد سوختنی و انرژی از قبیل نفت و گاز، احداث فضاهای زیرزمینی استراتژیکی و دفاعی، تولید برق، ایستگاه‌های مترو و پارکینگ به طور فزاینده ای در حال مطالعه، ساخت و یا بهره برداری هستند. اغلب شهرهای بزرگ دنیا توانایی و گنجایش داشتن حمل و نقل روی سطحی را نداشته و در نتیجه به سیستم های زیرزمینی از قبیل مترو روی آورده و بدون دست‌خوردگی در سطح زمین، با احداث خطوط متعدد مترو شبکه وسیعی از حمل و نقل را در شهرها ایجاد کرده اند. برای انتقال آب و فاضلاب نیز مشابه حمل و نقل، گزینه ای به جز استفاده از مجاری

به دست می آید. سپس با استفاده از اصل برهم نهی می توان جواب مسئله اصلی را به دست آورد. حل مسئله در فضای فرکانسی، مستلزم به دست آوردن پاسخ مسئله در فضای فرکانسی برای تواترهای مختلف است. شکل معادلات حاکم در فضای فرکانسی بسیار شبیه به فرم استاتیکی آن است. در نهایت برای به دست آوردن جواب مسئله اصلی، باید از تبدیل معکوس استفاده کرد. برای حالت هایی که با مسائل غیر خطی سر و کار داشته باشیم، مثلاً هنگامی که شرایط مرزی مسئله یا هندسه مسئله تغییر می کند و یا حالاتی که مصالح رفتار غیر خطی نشان دهند، دیگر نمی توان از اصل برهم نهی استفاده کرد و حل مسئله در فضای زمانی الزامی است [۱۵]. فرض اساسی در این تحقیق الاستیک بودن محیط است. بنابراین کلیه روابط تئوری الاستیسیته در مورد آن صادق است و برای هر محیط تنها به جرم حجمی (ρ) و ضرایب لامه (μ, λ) یا ضرایب الاستیسیته و پواسون (ν, E) نیاز است. همچنین فرض می شود که سازه زیرزمینی در هر عمقی می تواند قرار داشته باشد. به بیان بهتر برنامه مورد نظر می تواند تونل ها را در محیط بی نهایت یا نیمه بی نهایت مدل کند. برای سهولت و کاهش حجم محاسبات و با توجه به ماهیت مسئله فرض می شود که حالت کرنش مسطح برقرار است و بنابراین مسئله از حالت سه بعدی به حالت دو بعدی تبدیل می شود. لازم به توضیح است که حل دوبعدی مسئله انفجار کاربردهای مختلفی در بررسی انفجار لوله های گاز داخل تونل های مستقیم طولانی، انفجار تونل های معادن، بارگذاری دینامیکی حاصل از افزایش ناگهانی فشار مایع داخل تونل ها و حفره ها و نشت و انفجار گاز در یک تونل طولانی دارد.

فرمول بندی روش المان مرزی در فضای زمانی

در این قسمت خلاصه ای از فرمول بندی روش المان مرزی در دامنه زمانی ارائه می شود. روش المان مرزی استفاده شده در این تحقیق با استفاده از حل اساسی استوکس در محیط بی نهایت الاستودینامیک با فرض خطی و همگن بودن محیط به دست آمده است. در حل مسائل الاستودینامیک، معادله حاکم بر محیط معادله ناویر است [۱۶].

$$(\lambda + \mu)u_{i,jj} + \mu u_{j,ii} + \rho b_j = \rho \ddot{u}_j \quad (1)$$

فشاری توسط تونل های دایره ای با استفاده از روش تبدیل انتگرالی در فضای بی نهایت را بررسی کردند. استاموس و بسکوز [۵] پاسخ لرزه ای تونل های بلند در محیط نیمه بی نهایت و فضای سه بعدی را بررسی کردند. تمرکز تنش در مرز تونل های دایره ای تحت تأثیر امواج زلزله توسط اسماعیلی، وهدانی و نورزاد [۶] بررسی شد. در این تحقیق پاسخ دینامیکی تونل های دارای پوشش بر اثر امواج هارمونیک بررسی شد. تونل های دایره ای عمیق با دیواره و بدون دیواره تحت اثر امواج زلزله با استفاده از روش المان مرزی در فضای فرکانسی در پایان نامه کارشناسی ارشد چشمه کانی [۷] بررسی شد. در ادامه پژوهش ها کرمانی [۹] با استفاده از روش المان مرزی و المان محدود به بررسی پاسخ تونل های عمیق با دیواره و بدون دیواره در برابر تحریک دینامیکی در فضای زمانی و در محیط دو بعدی پرداخت. عبدی [۱۰] همین تحقیق را در مورد تونل های کم عمق انجام داد. در رابطه با این موضوع، مقاله ای با عنوان تحلیل اندرکنش تونل های کم عمق بر یکدیگر با استفاده از ترکیب روش های المان محدود و المان-مرزی در فضای زمانی ارائه شد [۱۱]. با استفاده از برنامه تهیه شده توسط امیدوار، داریوندی [۱۲]، اندرکنش ترک ها در محیط بی نهایت و دو بعدی در فضای زمانی را بررسی کرد. همچنین درخشان [۱۳] و محمدنژاد [۱۴] به ترتیب درباره اثر توپوگرافی و توپوگرافی سطحی بر بزرگنمایی امواج زلزله در محیط سه بعدی مطالعه کردند. همان طور که در ادبیات مشاهده می شود، مطالعاتی که در مورد امواج زلزله انجام شده، به مراتب بیش از مطالعات انجام گشته در زمینه انفجار است. از این رو، در ادامه کارهای انجام شده در این تحقیق، بررسی پارامتری اثر انفجار بر تونل های کم عمق و عمیق بدون جدار مورد توجه قرار گرفته است. مسائل دینامیکی شیوه های حل متفاوتی دارند. این مسائل را می توان در فضای فرکانسی حل کرد. در این روش زمان از معادله حاکم بر مسئله حذف می شود و به جای آن زمان به یک پارامتر اضافه تبدیل می شود. به عنوان مثال با استفاده از تبدیل فوریه، متغیر مستقل زمان t از مسئله حذف می شود و پارامتر تواتر ω به مسئله اضافه می شود. در واقع هنگامی که مسئله در حوزه خطی باشد و بتوان از اصل برهم نهی استفاده کرد، بارگذاری به یک سری بارهای هارمونیک تقسیم می شود و تحت این بارهای هارمونیک پاسخ مسئله

مرز و انتگرال گیری [۸] به صورت زیر در می آید:

$$[F]^{mm} \{u\}^m = [G]^{mm} \{t\}^m + \sum_{n=1}^{m-1} ([G]^{mm} \{t\}^n - [f]^{mm} \{u\}^n) \quad (۵)$$

$\{u\}^m$ و $\{t\}^m$ شامل مقادیر گرهی تغییر مکان ها و بردارهای تنش در گام زمانی nm است. $[F]^{mm}$ و $[G]^{mm}$ به پاسخ های اساسی و توابع انتربلاسیون بستگی دارد. بالانویس mn بر این نکته تأکید دارد که ماتریس به تفاضل بین گامهای زمانی m و n بستگی دارد. ستون های ماتریس های $[F]^{mm}$ و $[G]^{mm}$ با توجه به شرایط مرزی جا به جا می شود تا ماتریس های $[A]^{mm}$ و $[B]^{mm}$ حاصل شود. ماتریس $[A]^{mm}$ در بردار مجهولات تغییر مکان و بردار تنش $[x]^m$ ضرب می شود و ماتریس $[B]^{mm}$ در بردار مقادیر مرزی معلوم $[y]^m$ ضرب می شود:

$$[A]^{mm} \{x\}^m = [B]^{mm} \{y\}^m + \sum_{n=1}^{m-1} ([G]^{mm} \{t\}^n - [f]^{mm} \{u\}^n) \quad (۶)$$

در هر گام زمانی فقط ماتریس های متناظر با حداکثر تفاضل $m-n$ محاسبه می شود و بقیه ماتریس ها با توجه به خاصیت انتقال زمان در گام های قبل حساب شده است. ماتریس های $[A]^{mm}$ و $[B]^{mm}$ فقط در گام اول محاسبه می شوند، زیرا در همه گام ها یکی هستند، $[A]^{mm} = [A]$ و $[B]^{mm} = [B]$ معادله ماتریسی (۵) را به فرم ساده تر زیر می توان نوشت:

$$[A] \{x\}^m = \{f\}^m \quad (۷)$$

که در آن $\{f\}^m$ بردار معلومی است که اثر تاریخچه زمانی گام های قبلی را بر گام فعلی و اثر بارگذاری های گام فعلی را شامل می شود.

$$\{f\}^m = [B] \{y\}^m + \sum_{n=1}^{m-1} ([G]^{mm} \{t\}^n - [f]^{mm} \{u\}^n) \quad (۸)$$

معادله ماتریسی (۷) باید گام به گام حل شود، تا در هر گام زمانی، مقادیر مجهول تغییر مکان و بردار تنش مرزی در هر گام حاصل شود.

تأیید نتایج

تغییر مکان شعاعی تونل دایره ای تحت انفجار داخلی

در این مسئله یک انفجار ناگهانی داخلی در مرکز یک تونل دایره ای به شعاع $R = ۰.۳۸۱$ m در عمق زیادی از سطح زمین رخ می دهد، که در شکل (۱-الف) ملاحظه می شود. در نتیجه این انفجار، تنش شعاعی

این معادله، معادله حاکم بر رفتار یک جسم الاستیک ایزوتروپ با حجم V و سطح Γ است. در این معادله λ و μ ضرایب لامه، u تغییر مکان، b نیرو در واحد حجم و ρ چگالی مصالح است. با تعریف سرعت انتشار موج فشاری (طولی) به شکل $C_1^2 = (\lambda + 2\mu) / \rho$ و موج برشی به شکل $C_2^2 = \mu / \rho$ رابطه (۱) را می توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$(C_1^2 - C_2^2) u_{i,jj} + C_2^2 u_{j,ii} + b_j = \ddot{u}_j \quad (۲)$$

حال دامنه V را که در قسمت قبل فرض گردید، با سطح Γ در نظر بگیرید. تغییر مکان در نقطه x' را در زمان t به وسیله قضیه تقابل دینامیکی [۱۷] به صورت انتگرالی زیر می توان نشان داد [۱۸]:

$$c_{ij}(x') u_i(x', t) = \int_{\Gamma} \int_0^t [U_{ij}(x, t; x', \tau) t_i(x, \tau) - T_{ij}(x, t; x', \tau) u_i(x, \tau)] d\tau d\Gamma(x) + \rho \int_V \int_0^t [U_{ij}(x, t; x', \tau) b_i(x)] d\tau dV(x) + \rho \int_V \left[\frac{\partial u_i(x, 0)}{\partial t} U_{ij}(x, t; x', 0) + u_i(x, 0) \frac{\partial U_{ij}(x, t; x', 0)}{\partial t} \right] dV(x) \quad (۳)$$

که در آن عبارت پرش است و مقادیر زیر را می گیرد:

(الف) δ_{ij} هنگامی که x' داخل حجم V باشد؛

(ب) $0.5 \delta_{ij}$ هنگامی که x' روی مرز هموار Γ باشد؛

(ج) 0 هنگامی که x' خارج حجم V و سطح Γ باشد.

که در روابط بالا هسته های $U_{ij}(x, t; x', \tau)$ و $T_{ij}(x, t; x', \tau)$ پاسخ های اساسی در محیط نامحدود بوده و به ترتیب تغییر مکان و بردار تنش را در نقطه دامنه x در زمان t در اثر بار واحد اعمال شده در نقطه چشمه x' در زمان قبلی τ نمایش می دهد. این رابطه برای محیط های الاستو دینامیک خطی کاربرد دارد و میرایی تشعشعی با ارضاء شرط سامرفیلد در آن لحاظ شده است. اگر نیروی حجمی وجود نداشته باشد و جسم در ابتدا ساکن باشد، فقط انتگرال روی مرز باقی می ماند:

$$c_{ij}(x') u_i(x', t) = \int_{\Gamma} \int_0^t [U_{ij}(x, t; x', \tau) t_i(x, \tau)] d\tau d\Gamma(x) - \int_{\Gamma} \int_0^t [T_{ij}(x, t; x', \tau) u_i(x, \tau)] d\tau d\Gamma(x) \quad (۴)$$

این معادله در کنار حل اساسی مبنای روش المان مرزی در دامنه زمانی است [۸]. حل اساسی معادله فوق را می توان در مرجع [۸ و ۱۸] ملاحظه کرد. شکل ماتریسی معادله حرکت برای n گام زمانی با استفاده از المان بندی

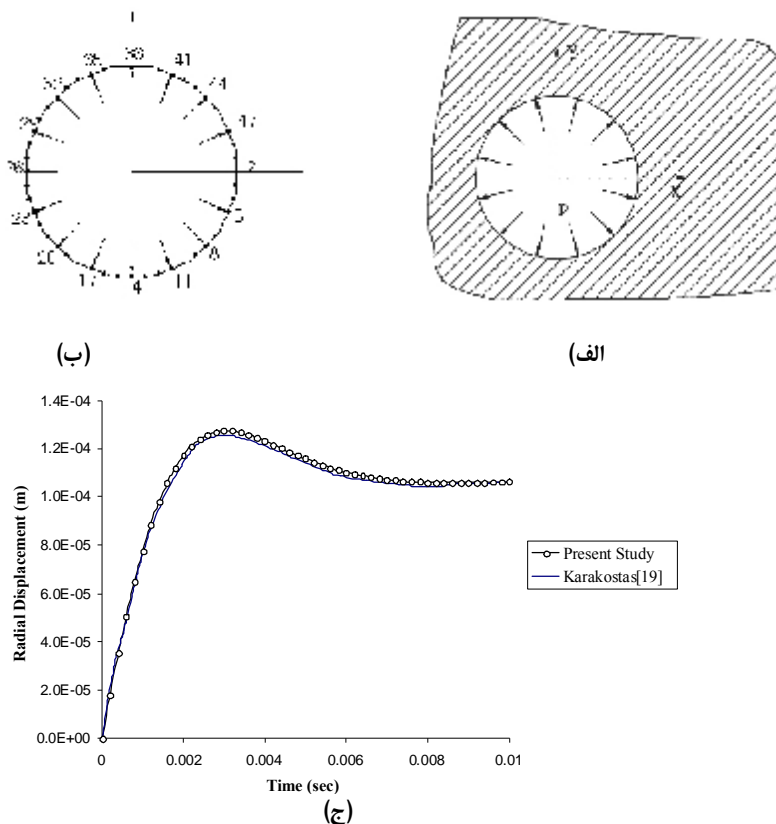
شعاع $R = ۴/۶۵ E -۴ m$ در محیط نیم بی نهایت با مدول الاستیسیته $E = ۲/۰۷ E ۱۱ Pa$ ، ضریب پواسون $\nu = ۰/۴۴$ و $\rho = ۸/۴۸ E ۴ Ns^2/m^4$ در نظر گرفته می شود. حفره در معرض بارگذاری ناگهانی که به صورت فشار ناگهانی داخلی به اندازه $P_0 = ۶/۹ E ۴ Pa$ مانند شکل (۲) اعمال می شود. این مساله کرنش سطح توسط کونتونی و همکاران (۱۹۸۷) به وسیله روش المان مرزی مستقیم به همراه تبدیل لاپلاس حل شده است. همچنین نتایج مربوط به محیط بی نهایت که در عمق $H = ۴۰ R$ حاصل می شود، توسط چو و کونینگ (۱۹۶۶) به وسیله روش مشخصه، همچنین به وسیله روش FEM توسط فو (۱۹۷۰) و منصور و بریبا (۱۹۸۴) به وسیله روش المان مرزی مستقیم در حوزه زمانی به دست آمده است. شکل (۳-الف) و (۳-ب) تاریخچه زمانی تنش محیطی در نقطه A و در اعماق مختلف H از سطح زمین را نشان می دهد.

$\sigma_{rr} = ۰/۱ Mpa$ در محیط تونل به وجود می آید. مشخصات خاک احاطه کننده تونل شامل $\mu = ۲۷۰ Mpa$ ، $\rho = ۲۰۰۰ kg/m^3$ و $\lambda = ۱۸۰ Mpa$ ، سرعت های انتشار موج طولی $C_1 = ۵۶۱ m/s$ و سرعت انتشار موج برشی $C_2 = ۲۷۰ m/s$ می شود. زمان کل این آزمون $۰/۰۱ s$ است. همان طور که در آینده خواهیم دید، شرایط اخیر (تونل در محیط بی نهایت) در عمق $۵۰ m$ از سطح زمین نیز برقرار است.

در این مثال مشخصات هندسی و مکانیکی مطابق با مرجع [۱۹] و برای مقایسه با آن مرجع انتخاب شده است. برای مدل سازی، این تونل به ۱۶ المان مساوی تقسیم شده است (شکل ۱-ب) و مسئله در ۲۰ گام زمانی حل شده است. همان طور که دیده می شود، نتایج حاصل از کار اخیر با نتایج منولیس و کاراکوستاس [۱۹] تطبیق خوبی دارند. (شکل ۱-ج).

تنش محیطی در تونل تحت بارگذاری ضربه ای به صورت پله ای

برای مقایسه نتایج با مراجع یک حفره استوانه ای با



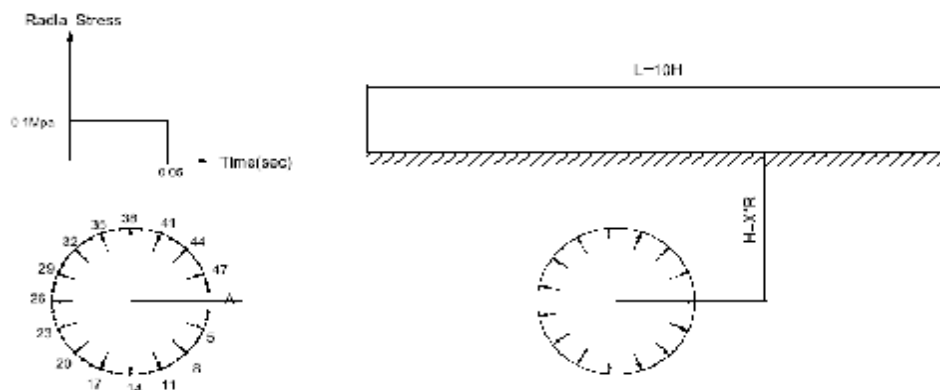
شکل ۱: تونل دایره ای تحت اثر انفجار ناگهانی: (الف) هندسه (ب) المان بندی (ج) تغییر مکان شعاعی.

احاطه کننده تونل مطابق بخش قبل است. زمان مورد بررسی ۰/۰۵ s است. این زمان به ۵۰ گام زمانی تقسیم شده است. با آنالیز حساسیت بر روی طول مورد نیاز زمین برای مدل کردن، طول $H = 10$ برای زمین انتخاب شد. برای المان بندی زمین و تونل به ترتیب از ۱۱ و ۱۶ المان سه گرهی ناپیوسته استفاده شده است. در شکل (۲) هندسه و المان بندی و شماره گره های اختصاص داده شده به این تونل همچنین بارگذاری مورد نظر مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه تغییر مکان شعاعی گره ۳۸ بیشترین تأثیر را از تغییرات سطح زمین می‌پذیرد، تغییر مکان شعاعی بدون بعد این گره را بررسی می‌کنیم. همچنین تنش محیطی بدون بعد گره ۲ در طول زمان، با توجه به مقدار حداکثر آن مورد توجه قرار می‌گیرد. در این تحقیق بارگذاری وارده، تغییر مکان های شعاعی و همچنین تنش محیطی بدون بعد شده است.

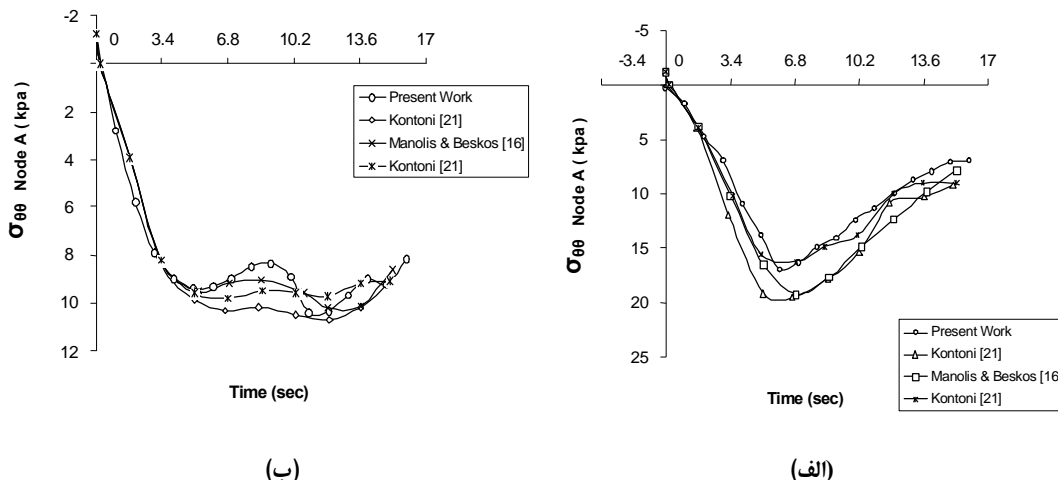
با افزایش عمق در $H = 40R$ تنش محیطی گره A مانند مقادیر آن در محیط بی‌نهایت است. مقادیر مربوط به تنش محیطی در این عمق در شکل (۴) مشاهده می‌شود. برای مدل‌سازی تونل مربوط به آن از ۱۶ المان سه گرهی غیر پیوسته استفاده شده است. برای مدل‌سازی زمین نیز از ۱۱ المان مرزی به طول $L = 10H$ استفاده شده است. در مطالعه حاضر انتگرال‌گیری نسبت به زمان، تحلیلی انجام شده و در انتگرال‌گیری نسبت به مکان نیز از روش تحلیلی - عددی جداسازی قسمت منفرد، استفاده شده است. این موضوع سبب افزایش دقت، نسبت به سایر مراجع نشان داده شده، می‌شود.

تغییر پارامتر عمق یک تونل تحت بارگذاری ضربه‌ای به صورت پله‌ای

در این قسمت پاسخ تونلی با شعاع $R = 0.381$ m با تغییر پارامتر عمق را بررسی می‌کنیم. مشخصات خاک

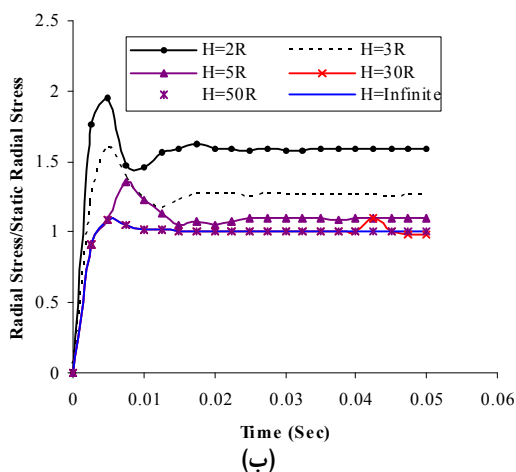
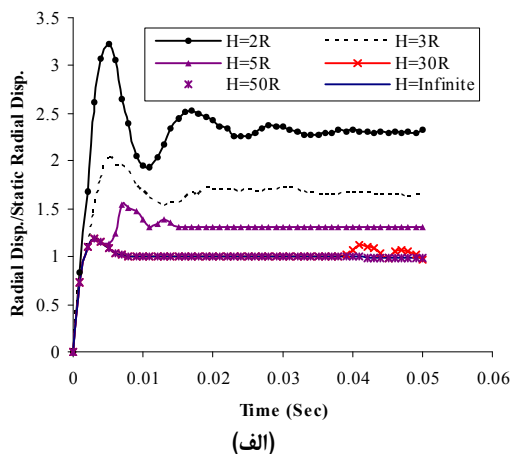


شکل ۲: هندسه و المان بندی مسئله.



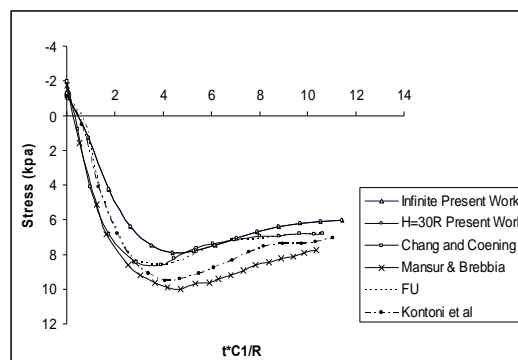
شکل ۳: تنش محیطی نقطه A در طول زمان در عمق $H=2R$ از سطح زمین (الف) در عمق $H=5R$ از سطح زمین. (ب)

در مقیاس کوچک‌تری، گره ۱۴ منجر شود، که اثرات این تغییر را می‌توان بر دامنه تغییر مکان مشاهده کرد، به طوری که حداکثر دامنه تغییر مکان بدون بعد گره ۳۸ وقتی که تونل در عمق ۲R قرار دارد، برابر مقدار نظیر وقتی که تونل در محیط بی نهایت قرار دارد است (شکل ۵-الف).



شکل ۵: الف) تغییر مکان محیطی بدون بعد گره ۳۸ در طول زمان (ب) تنش محیطی بدون بعد گره ۲۶ و ۲ در طول زمان.

در مورد گره ۱۴، این تأثیر باعث کاهش دامنه نوسان شده است. این موضوع به سبب کاهش سختی عمودی محیط در جهت مثبت است. با توجه به اینکه تغییر مکان گره ۱۴ منفی است، کاهش سختی باعث کاهش تغییر این مکان می‌شود. شکل‌های مربوط به تنش محیطی گره ۲ نیز، بیانگر کاهش تنش محیطی گره ۲ با افزایش پارامتر عمق هستند، به طوری که تنش محیطی حداکثر این گره در عمق $H = 2R$ حدود $1/8$ برابر مقدار نظیر مربوط به محیط بی نهایت است (شکل ۵-ب). برای اینکه درک



شکل ۴: تنش محیطی نقطه A در طول زمان در محیط بی نهایت.

تغییر مکان‌های شعاعی نسبت به تغییر مکان شعاعی یک تونل در محیط بی نهایت تحت بارگذاری نظیر به صورت استاتیکی، بدون بعد شده است و تنش‌های محیطی نسبت به تنش محیطی تونل ذکر شده بدون بعد شده است.

نتایج تحلیل

برای بررسی تغییرات مربوط به پارامتر عمق از نرم L_2 [۲۰] به عنوان معیاری منطقی استفاده می‌کنیم:

$$L_2 = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (U_{iH} - U_{i\infty})^2} \quad (9)$$

در این رابطه N تعداد گام‌های زمانی، U_{iH} تغییر مکان شعاعی در عمق H و گام زمانی i است و $U_{i\infty}$ تغییر مکان شعاعی در فضای بی نهایت و گام زمانی i است. در جدول (۱) تشابه رفتار تغییر مکان شعاعی بدون بعد عمق با محیط بی نهایت مقایسه شده است.

جدول ۱: تأثیر تغییرات پارامتر عمق تونل بر نرم L_2 تغییر مکان گره ۳۸.

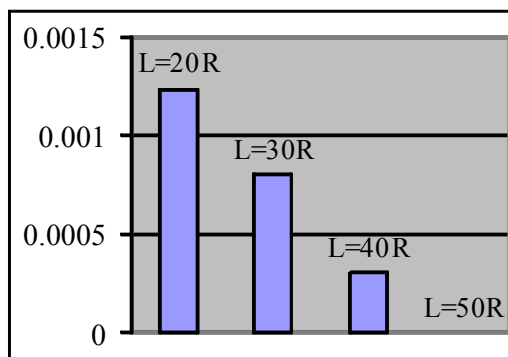
نرم L_2	عمق تونل از سطح زمین
0.005	$H = 30 R$
$10E-7$	$H = 40 R$
0.00	$H = 50 R$

با توجه به اینکه در محیط بی نهایت شرایط تغییر مکانی تمام گره‌ها مشابه یکدیگر و سختی محیط در تمام جهات یکسان است، با کاهش عمق شاهد تغییر عمده در سختی عمودی محیط خواهیم بود. از این رو انتظار می‌رود، این کاهش به تغییر شرایط در تغییر مکان گره ۳۸ و

حضور تونل دوم می پذیرد نیز مورد توجه است.

نتایج تحلیل

برای بررسی تغییرات مربوط به پارامتر فاصله از نرم L_2 به عنوان معیاری منطقی استفاده می کنیم (رابطه ۵). این معیار از مقایسه تغییر مکان شعاعی بدون بعد گره ۲۶ در هر گام زمانی در ارتفاع های متفاوت با تغییر مکان شعاعی بدون بعد گره مزبور در $L = \infty$ به دست آمده است (شکل ۷).

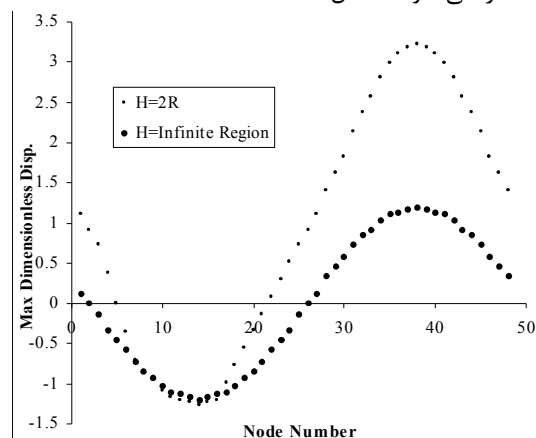


شکل ۷: نرم L_2 فواصل افقی مختلف نسبت به فاصله افقی $L = \infty$.

همان طور که در شکل (۹-الف) ملاحظه می شود بیشترین تأثیر کاهش پارامتر فاصله بر تغییر مکان شعاعی بدون بعد گره ۲۶ است و این تأثیر به صورت افزایش دامنه تغییر مکان نمود می یابد، به طوری که حداکثر تغییر مکان شعاعی بدون بعد گره ۲۶ در وضعیت $L = 2/5 R$ ، در حدود $2/15$ برابر مقدار نظیر وضعیت $L = \infty$ است. تنش محیطی بدون بعد گره ۱۴ نیز مطابق شکل (۹-ب) با کاهش پارامتر فاصله افقی افزایش می یابد، به طوری که حداکثر تنش محیطی بدون بعد گره ۱۴ در وضعیت $L = 2/5 R$ ، در حدود $1/5$ برابر مقدار نظیر وضعیت $L = \infty$ است.

حداکثر تغییر مکان بدون بعد گره های تونل در جهت افقی و قائم در دو وضعیت $L = 3R$ و $L = \infty$ به عنوان معیاری برای درک بهتر رفتار تونل با تغییر پارامتر ذکر شده مورد توجه قرار گرفته است (شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب). مقایسه سری های موجود در شکل الف مبین این مطلب است که وجود تونل بدون بارگذاری با کاهش پارامتر فاصله، باعث افزایش تغییر مکان بدون بعد افقی قسمت سمت چپ تونل می شود. به بیان دیگر با کاهش پارامتر فاصله، شاهد کاهش سختی افقی محیط و در نتیجه

بهتری از کاهش سختی ایجاد شده در جهت قائم با کاهش پارامتر عمق پیدا کنیم، حداکثر تغییر مکان بدون بعد گره های تونل در دو عمق مختلف نشان داده شده است. در این شکل کاهش قابل ملاحظه سختی قائم نسبی محیط در نیم دایره بالایی تونل با کاهش پارامتر عمق ملاحظه می شود. آنچه مسلم است اینکه با افزایش پارامتر عمق، سختی قائم نیم دایره بالا و پایین تونل با سرعتی بسیار کمتر از نیم دایره چپ و راست تونل، به یکدیگر همگرا می شوند (شکل ۶).



شکل ۶: حداکثر تغییر مکان بدون بعد گره های تونل در جهت قائم.

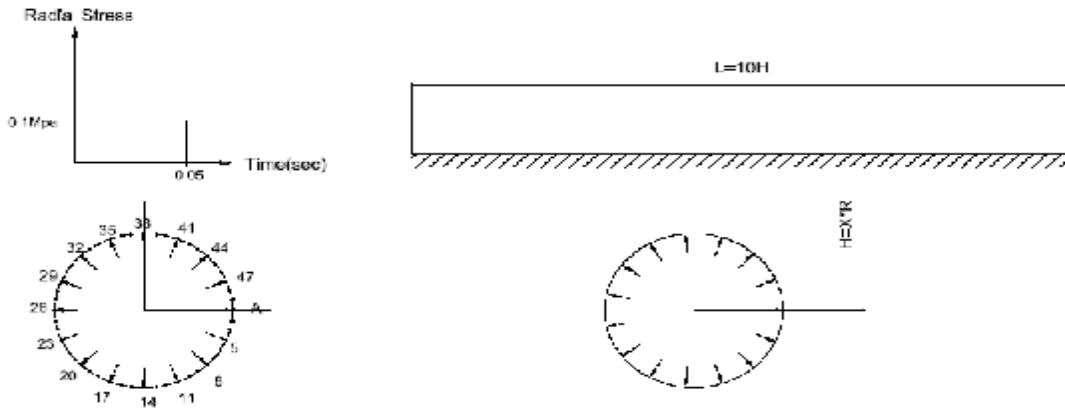
تغییر پارامتر فاصله افقی یک تونل تحت بارگذاری ضربه ای به صورت پله ای و تونل فاقد بارگذاری در عمق مشخص از سطح زمین

دو تونل با شعاع 0.381 m ، در عمق ثابت از سطح زمین موجود است، که یکی از تونل ها تحت بار ضربه داخلی به صورت پله ای و دیگری بدون بارگذاری است. همچنین تابع بارگذاری در طول زمان مورد نظر نیز مشخص است (شکل ۸).

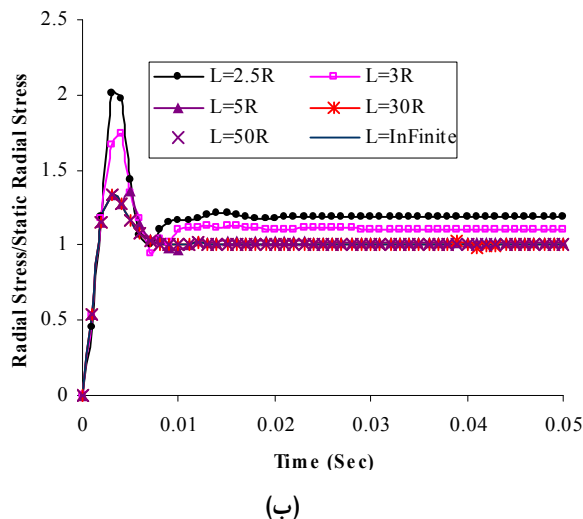
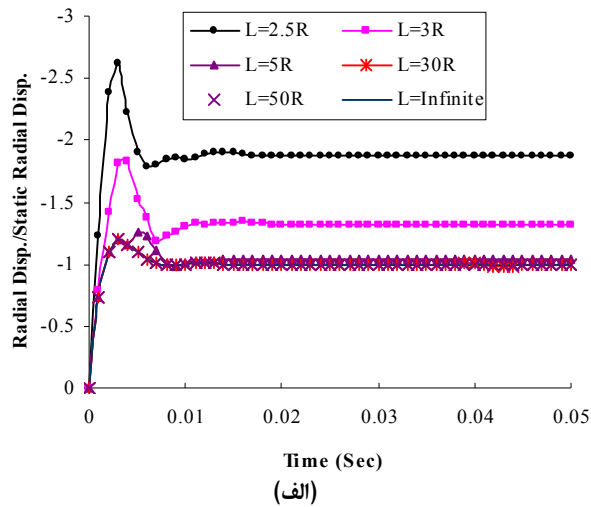
مشخصات خاک احاطه کننده تونل همانند مشخصات ذکر شده در بخش قبل است. همان طور که در شکل (۸) مشاهده می شود، دو تونل در عمق $H = 2R$ از سطح زمین قرار دارند. در این بخش تغییر پارامتر فاصله افقی دو تونل بررسی شدند. با توجه به اینکه تونل دوم بیشترین تأثیر را بر تغییر مکان شعاعی گره ۲۶ می گذارد، تغییر مکان شعاعی این گره در طول زمان مطلوب است. همچنین تنش محیطی گره ۱۴ که بیشترین تأثیر را از

می‌شویم، به طوری که این تاثیر در جهت کاهش تغییر مکان ذکر شده است.

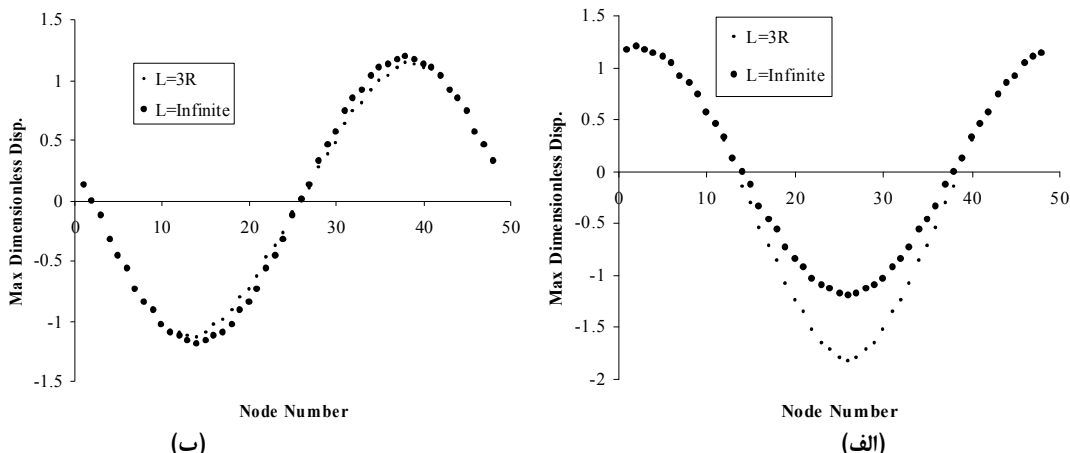
افزایش تغییر مکان‌ها در جهت وجود تونل خواهیم بود. همچنین با مراجعه به شکل (۱۰-ب) متوجه تأثیر اندک کاهش پارامتر فاصله بر تغییر مکان بدون بعد قائم



شکل ۸: هندسه، بارگذاری و المان بندی تونل‌ها با تغییر پارامتر فاصله افقی.



شکل ۹: (الف) تغییر مکان شعاعی بدون بعد گره ۲۶ (ب) تنش محیطی بدون بعد گره ۱۴.



شکل ۱۰: تغییر مکان بدون بعد حداکثر برای دو مقدار پارامتر فاصله افقی: (الف) در جهت افقی (ب) در جهت قائم.

است، در حدود $2/7$ برابر مقدار ذکر شده مربوط به وجود تونل در محیط بی‌نهایت است.

همچنین تنش محیطی دو نقطه پیرامونی که در امتداد قطر افقی قرار دارند، در عمق $H = 2R$ ، در حدود $1/8$ برابر مقدار ذکر شده در محیط بی‌نهایت است.

۲- وقتی که دو تونل در فاصله افقی $L = 50R$ قرار دارند، تأثیری بر پاسخ یکدیگر ندارند. حداکثر تغییر مکان شعاعی بدون بعد نزدیک ترین نقطه تونل تحت بارگذاری با تونل بدون بارگذاری، وقتی که پارامتر فاصله افقی دو تونل در وضعیت $L = 2/5 R$ قرار دارد، در حدود $2/15$ برابر مقدار نظیر وضعیت $L = \infty$ است. همچنین تنش محیطی بدون بعد، پایین ترین نقطه تونل تحت بارگذاری، وقتی که پارامتر فاصله افقی دو تونل در وضعیت $L = 2/5 R$ قرار دارد، در حدود $1/2$ برابر مقدار نظیر وضعیت $L = \infty$ است.

از آنجا که در تحقیق اخیر نتایج به دست آمده بدون بعد هستند، بررسی این نتایج می‌تواند راهنمایی مناسبی برای طراحی مکانی تونل‌های بدون پوشش کم عمق باشد.

نتیجه گیری

مدل‌سازی آسان‌تر محیط‌های نامحدود توسط روش المان مرزی نسبت به سایر روش‌های عددی قابلیت کاربردی آن برای مدل کردن محیط‌های نامحدود را مشخص می‌کند. علاوه بر این کمتر شدن تعداد المان‌ها و کاهش ابعاد ماتریس‌ها منجر به سرعت بیشتر محاسبات می‌شود [۱۶]. بنابراین روش المان مرزی می‌تواند روش مناسبی برای مدل کردن تونل‌ها در محیط بی‌نهایت و نیمه بی‌نهایت باشد.

پارامترهایی که با هندسه محیط سر و کار دارند مانند: عمق تونل، فاصله افقی دو تونل، فاصله قائم دو تونل، شعاع تونل و هندسه محیط همگی پارامترهایی هستند که می‌توانند تأثیرات زیادی بر تغییر مکان‌ها و تنش‌های تونل تحت بارگذاری انفجار داشته باشند که در مقاله حاضر تأثیر دو پارامتر بررسی شد:

۱- با افزایش پارامتر عمق، در عمق $H = 50R$ رفتار تونل مشابه رفتار آن در محیط بی‌نهایت می‌شود. همچنین تغییر مکان شعاعی نقاطی از تونل که به سطح زمین نزدیک هستند، هنگامی که تونل در عمق $H = 2R$

مراجع

- 1 - Bathe, K. J., Wilson, E. L. and Peterson, F. E. (1973). *SAP IV, a structural analysis program for static and dynamic response of linear system*, University of California, Berkley.
- 2 - Manolis, G.D. and Beskos, D. E. (1983). "Dynamic response of lined tunnels by an isoparametric boundary element method." *Comput Methods Appl Mech Eng*, Vol. 36, PP. 291-307.
- 3 - Glazunov, V. E. and Shenderov, E. L. (1971). "Plane wave scattering by cylindrical cavity in isotropic elastic medium." *Sov Phys Acoust*, Vol. 17, PP. 141-143.

- 4 - Baron, M. L. and Matthews, A. T. (1961). "Diffraction of a pressure wave by a cylindrical cavity in a elastic medium." *J. Appl. Mech*, PP. 347-354.
- 5 - Stamos, A. A. and Beskos, D. E. (1996). "3-D seismic response analysis of long lines tunnels in half- space." *Soil Dynam, Earthquake Eng*, Vol. 16, PP. 111-118.
- 6 - Esmaeili, M., Vahdani, S. and Noorzad, A. (2006). "Dynamic response of lined circular tunnel to plane harmonic waces." *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 21, No. 5.
- 7 - Cheshmakani, S. (1996). *Evaluation of tunnel behavior under effect of earthquake*. M.Sc. Dissertation, Faculty of Engineering, University of Tehran.
- 8 - Omidvar, B. (2001). *Study of dynamic stability of cracked concrete dams using dual boundary element method in the time domain*. Ph.D. Dissertation, Faculty of Engineering, University of Tehran.
- 9 - Kermany, A. R. (2003). *Coupled BEM and FEM for dynamic analysis of tunnels in time domain*. M.Sc. Dissertation, Faculty of Engineering, University of Tehran.
- 10 - Abdi, O. R. (2004). *Study of dynamic response of near surface tunnels using coupled FEM and BEM in the time domain*. M.Sc. Dissertation, Faculty of Engineering, University of Tehran.
- 11 - Omidvar, B., Rahimian, M., Noorzad, A., Kyomarsy, B. and Abdi, O. R. (2006). "Analysis of tunnels interaction using FEM and BEM in the time domain." *7th Tunnel Conference of Iran*.
- 12 - Shoshtary-Darivandi, N. (2003). *Study of seismic interaction of cracks using BEM*. M.Sc. Dissertation, Faculty of Engineering, University of Tehran.
- 13 - Derakhshan, H. (2003). *Study of topographic effect on amplification of earthquake wave using BEM in the time domain*. M.Sc. Dissertation, Faculty of Engineering, University of Tehran.
- 14 - Mohammad nejad, T. (2005). *3D study of topographic effect on amplification of earthquake waves*. M.Sc. Dissertation, Faculty of Engineering, University of Tehran.
- 15 - Pao, Y. H. and Maw, C. C. (1973). *Diffraction of Elastic Waves in Dynamic Stress Concentrations*. Crane Russake, New York.
- 16 - Manolis, G. D. and Beskos, D. E. (1988). *Boundary Element Methods in Elastodynamics*. Unwin Hyman, London.
- 17 - Banerjee, P. K. and Butterfield, R. (1981). *Boundary Element Methods in Engineering Science*. McGraw-Hill, London.
- 18 - Dominguez, J. (1993). *Boundary Element In Dynamics*. Computational Mechanics Publications Southampton Boston.
- 19 - Karakostas, C. Z. and Manolis, G. D. (1999). "Dynamic response of unlined tunnels in soil with random properties." *Engineering Structures*, Vol. 18, No. 2, PP. 1013-1027.
- 20 - Bramble, J. H. and Zhang, X (2000). *The analysis of multigrid methods*. Handbook of Numerical Analysis, Vol. 7.
- 21 - Kontoni, D. P. N., Beskos, D. E. and Manolis, G. D. (1987). "Uniform half-plane elastodynamic problems by an approximate boundary element method." *Soil Dyn. Earthquake Engng*. Vol. 6, PP.227-238.