

اثر سختی لایه‌های خاک بر الگوی تنش در حضور پوشش بتنی تونل‌های انتقال آب

مهدی پنجمی^{۱*}بهمن انصاری^۲جعفر عسگری مارنانی^۳علی انصاری^۴

چکیده:

در این مقاله با استفاده از روش عددی اجزای مرزی نیم‌صفحه که پیش‌تر برای محیط تک لایه خاک پیشنهاد شده بود، جهت مدل‌سازی پوشش تونل‌های مدفون انتقال آب در محیط‌های لایه‌های خاک استفاده شده است. در استفاده از روش مذکور تنها نیاز است تا مرز تونل و مرز مشترک لایه‌های خاک گسسته سازی شوند. با ارائه فرمول‌بندی روش مزبور و صحت‌سنجی نتایج حاصل در مقایسه با ادبیات فنی، رفتار یک تونل تحت فشار مدفون در خاک دولایه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا اثر تغییر مشخصات مصالح لایه‌ها از قبیل مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بر توزیع تنش در سطح زمین و پیرامون تونل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل، سهولت و دقت بالای روش اجزای مرزی نیم‌صفحه را برای مدل‌سازی تونل‌های با پوشش بتنی مستقر در خاک‌های لایه‌ای نشان می‌دهد. استفاده از این روش برای تحلیل سازه‌های مدفون و ارائه الگوی تنش، پیرامون تدقیق و تصحیح آیین‌نامه‌های موجود توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی:

اجزای مرزی نیم‌صفحه، مدل‌سازی عددی، حفرات پوشش‌دار، تونل‌های انتقال آب، خاک‌های لایه‌ای.

۱. استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، m.panji@iauz.ac.ir

۲. کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان

۳. استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

۴. کارشناس مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مقدمه

مرزهای محیط تحت مطالعه گسسته سازی شود. تاریخچه روش اجزای مرزی و ریاضیات پایه مربوط به آن در نوشته (چنگ و چنگ^۸ ۲۰۰۵) در دسترس است. روش اجزای مرزی از لحاظ فرمول‌بندی به دو نوع محیط کامل و نیم‌صفحه قابل تقسیم است. در فرمول‌بندی محیط کامل تمامی مرزهای محیط تحت آنالیز مستلزم به مش بندی است. محققان زیادی با استفاده از این روش به تحلیل مسائل مختلف ژئوتکنیکی پرداخته‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به (کراچ و استارفیلد^۹ ۱۹۸۳)، (زیائو و کارتر^{۱۰} ۱۹۹۳)، (وو و همکاران^{۱۱} ۲۰۱۵) و (پنجی و همکاران ۲۰۱۶، ۱۳۹۱، ۲۰۱۱) اشاره کرد.

از طرف دیگر در روش اجزای مرزی نیم‌صفحه به دلیل استفاده از روش تصویر منبع (دافی^{۱۲} ۲۰۰۱)، اثر مرز صاف سطح زمین به‌عنوان یک سطح تنش آزاد در فرمول‌بندی اقتناع شده و دیگر نیاز به گسسته‌سازی این مرز نیست. در این روش تنها مرزهایی که تحت قیود خاصی هستند، لازم است گسسته سازی شوند. علاوه بر این، الزام به بسته شدن محیط در یک فاصله خیلی دور از طرفین دامنه مورد بررسی از بین می‌رود که این مزیت موجب افزایش چشمگیر دقت و سهولت در محاسبات می‌شود. مدل‌سازی بار نقطه‌ای مؤثر در فضای نیم‌صفحه اولین بار توسط (مندلین^{۱۳} ۱۹۴۸) صورت گرفت. (تالاس و بریبا^{۱۴} ۱۹۸۰) با استفاده از روش مندلین، حل‌های اساسی این روش را برای مسائل همگن الاستیک ارائه کردند. (یی و ساوادا^{۱۵} ۱۹۸۹) برخی ویژگی‌های فرمول‌بندی روش اجزای مرزی نیم‌صفحه را برای مسائل دوبعدی ارائه کردند. (دامیر و مهتا^{۱۶} ۱۹۸۷) و (پن و همکاران^{۱۷} ۱۹۹۷) اجزای مرزی نیم‌صفحه را برای محیط‌های غیر ایزوتروپ ارائه کردند. (دونگ و لو^{۱۸} ۲۰۱۳) در تحلیل محیط‌های مشتمل بر ناهمگنی در ابعاد نانو از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه بهره گرفتند. (پنجی و همکاران ۱۳۹۵) به کمک روش اجزای

سازه‌های زیرزمینی و بازشدگی‌های زیرسطحی نقش اساسی در تولید، ذخیره و انتقال منابع مختلف انرژی نظیر آب و برق از واحدهای تولیدکننده مانند سدها را بر عهده‌دارند. لوله‌های زیرزمینی و کانال‌های مدفون انتقال آب یکی از مهم‌ترین این سازه‌ها هستند. به دست آوردن الگوی دقیق تنش ناشی از آن‌ها در محیط خاک به‌خصوص در زمان احداث سازه‌های سطحی از قبیل ساختمان نیروگاه و سد در مجاورت آن‌ها از لحاظ مهندسی ضروری به نظر می‌رسد. در حالت کلی روش‌های گوناگونی جهت تحلیل تنش لوله‌های مدفون وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های تحلیلی، شبه تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی اشاره کرد. روش‌های عددی در مهر و موم‌های اخیر به دلیل پیشرفت قابل‌توجه رایانه‌ها از کارایی بیشتری نسبت به سایر روش‌های برخوردار شده‌اند. روش‌های رایج عددی با توجه به فرمول‌بندی به دو دسته روش‌های دامنه‌ای و مرزی قابل تقسیم هستند. در روش‌های دامنه‌ای که از آن جمله می‌توان به روش اجزای محدود^۱ و روش تفاضل محدود^۲ اشاره کرد، با گسسته سازی دامنه به المان‌های کوچک و برقراری معادلات تعادل برای هر المان، مجهولات موردنیاز قابل محاسبه هستند. محققان بی‌شماری با استفاده از روش‌های مزبور به مدل‌سازی ابنیه ژئوتکنیکی مدفون پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به (مورا و شهروور^۳ ۲۰۰۲)، (آگارد و بارد^۴ ۲۰۰۱) و (گارتر و کافمن^۵ ۲۰۱۳) اشاره کرد. هرچند روش‌های دامنه‌ای از دقت بالایی در تحلیل محیط‌های بسته برخوردارند، لیکن به دلیل افزایش حجم المان و به‌تبع آن افزایش زمان تحلیل و فرض مرزهای مجازی در تحلیل محیط‌های نیمه نامحدود^۶ و نامحدود کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند؛ بنابراین روش‌های مرزی نظیر روش اجزای مرزی^۷ معرفی شده‌اند. در این روش تنها نیاز است تا

^{۱۰} Xiao & Carter

^{۱۱} Wu et.al

^{۱۲} Duffy

^{۱۳} Mindlin

^{۱۴} Telles & Brebbia

^{۱۵} Ye & Sawada

^{۱۶} Dumir & Mehta

^{۱۷} Pan et.al

^{۱۸} Dong & Lo

^۱ Finite element method

^۲ Finite difference method

^۳ Mroueh & Shahrouh

^۴ Augarde & Burd

^۵ Garner & Coffman

^۶ Semi-infinite

^۷ Boundary element method

^۸ Cheng & Cheng

^۹ Crouch & Starfield

انتگرال مرزی

انتگرال مرزی در روش اجزای مرزی نیم‌صفحه مشابه انتگرال مرزی محیط کامل است (بربیا و دومینگیوز^۲ ۱۹۹۲):

$$c_{ij}u^i = \int_{\Gamma} u_{ij}^* p_j d\Gamma - \int_{\Gamma} p_{ij}^* u_j d\Gamma \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق u_{ij}^* و p_{ij}^* به ترتیب بیانگر حل‌های اساسی نیم‌صفحه برای مؤلفه‌های تغییر مکان و نیروهای سطحی بوده و u و p نیز به ترتیب مقادیر تغییر مکان و نیروهای سطحی در مرز Γ را نشان می‌دهند. c_{ij} مقادیر ثابتی هستند که با توجه به زاویه‌ی شکست مرزی قابل تعیین می‌باشند (بربیا و دومینگیوز ۱۹۹۲، کاتسکادلیس^۲ ۲۰۰۲). با برقراری انتگرال فوق برای تمامی مرزهای مرتبط با قیود در جسم می‌توان کلیه مجهولات اعم از تغییر مکان‌ها و نیروهای مرزی را تعیین نمود. درنهایت برای هر نقطه‌ی درونی، تغییر مکان و تنش با استفاده از روابط زیر قابل تعیین است:

$$u^i = \int_{\Gamma} u_{ij}^* p_j d\Gamma - \int_{\Gamma} p_{ij}^* u_j d\Gamma \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \int_{\Gamma} u_{ijk}^* p_k d\Gamma - \int_{\Gamma} p_{ijk}^* u_k d\Gamma \quad (3)$$

به‌طوری‌که در رابطه‌ی فوق σ_{ij} مبین تنش‌های درونی در نقطه‌ی i ام و در امتداد j ام، u_{ijk}^* و p_{ijk}^* نیز به ترتیب نشانگر حل‌های اساسی نیم‌صفحه تنش برای مؤلفه‌های تغییر مکان و نیروهای سطحی بوده که از جمع حل اساسی محیط کامل تنش و بخش تکمیلی آن به دست می‌آیند (تالاس و بربیا ۱۹۸۰).

گسسته سازی انتگرال مرزی

از گسسته سازی مرزهای تحت قیود با N المان درجه‌ی دو، معادله‌ی انتگرال (۱) به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$c_{ij}u^i = \sum_{k=1}^N \int_{\Gamma_k} u_{ij}^* p_j d\Gamma_k - \sum_{k=1}^N \int_{\Gamma_k} p_{ij}^* u_j d\Gamma_k \quad (4)$$

مرزی نیم‌صفحه مدلی برای تحلیل لوله‌های زیرزمینی تحت فشار در یک محیط تک‌لایه و تحلیل حفرات زیرسطحی ارائه کردند. همچنین پنچی و همکاران توانستند روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه زمان را برای تحلیل لرزه‌ای مسائل مختلف توسعه دهند.

ادبیات فنی نشان می‌دهد، هنوز روش اجزای مرزی نیم‌صفحه برای مدل‌سازی تونل‌های زیرزمینی پوشش‌دار مدفون در محیط‌های لایه‌ای خاک توسعه داده نشده است. با توجه به اهمیت احداث تونل‌های زیر زمینی برای مصارف مختلف نظیر سدسازی و با عنایت به ناهمگنی محیط خاک در واقعیت، نیاز به توسعه این روش برای تحلیل سازه‌های مزبور احساس می‌شود. لذا در این مقاله فرمول‌بندی کامل روش اجزای مرزی نیم‌صفحه برای مدل‌سازی تونل‌های مدفون زیرزمینی مستقر در یک محیط خاک دولایه ارائه شده است. سپس طی یک مطالعه عددی اثر فاکتور سختی لایه‌ها نظیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بر الگوی تنش در سطح زمین و دیواره تونل ارائه شده است. نمایش سادگی و دقت روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در مدل‌سازی تونل‌های زیرزمینی مدفون در خاک‌های لایه‌ای از مهم‌ترین اهداف مقاله حاضر است.

۲- روش اجزای مرزی نیم‌صفحه

حل‌های اساسی

به‌منظور استخراج فرمول‌بندی روش اجزای مرزی نیم‌صفحه نیاز است شرایط مرزی تنش آزاد مرز بینهایت (سطح زمین) در حل معادله‌ی تعادل اقناع گردد. از حل هم‌زمان معادلات مزبور حل‌های اساسی نیم‌صفحه به دست می‌آید (تالاس و بربیا^۱ ۱۹۸۰، پنچی و همکاران ۱۳۹۴).

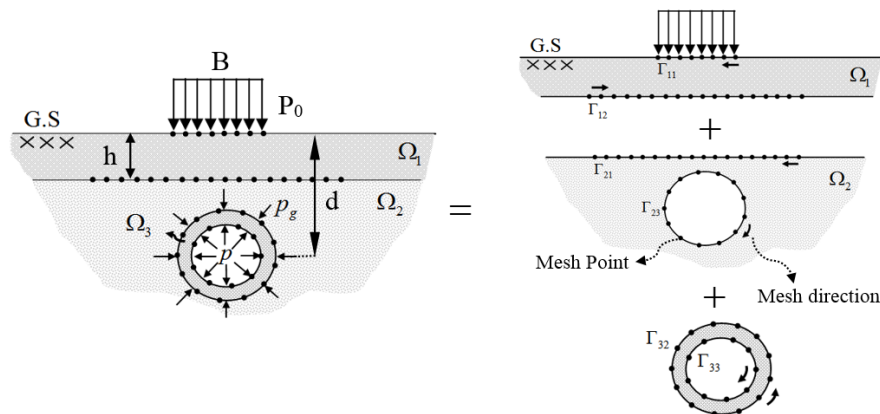
^۲. Katsikadelis

^۱. Telles & Brebbia

^۲. Brebbia C.A. Dominguez J

مدل سازی تونل مدفون در خاک دولایه

برای مدل سازی تونل مدفون در خاک دولایه به کمک روش اجزای مرزی نیم صفحه، لازم است محیط مسئله به سه ناحیه مجزا تقسیم شود (شکل ۱). محیط اول (Ω_1) شامل سطح زمین و مرز مشترک دولایه خاک است. محیط دوم (Ω_2) یک دامنه نیم صفحه شامل مرز مشترک دولایه و مرز میانی تونل بوده و محیط سوم (Ω_3) تنها شامل تونل و پوشش آن است. پس از برقراری معادلات انتگرالی برای هر یک از این سه محیط و تشکیل فرم ماتریسی آنها می بایست با توجه به شرایط سازگاری و پیوستگی در وجوه میانی ماتریس های حاصل از تک تک زیر دامنه ها در یک ماتریس واحد سرهم سازی شوند.



شکل (۱): مدل سازی تونل مدفون در خاک دولایه با استفاده از روش اجزای مرزی نیم صفحه

در این رابطه Γ_k معرف مرز المان k ام است. در نهایت می توان فرم ماتریسی معادله ی انتگرال مرزی را به صورت زیر تعیین کرد:

$$H.U = G.P \quad (5)$$

که در این رابطه U و P به ترتیب نماینده ی تغییر مکان و نیروهای سطحی مرزی بوده و H و G با توجه به روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$H_{ij} = \int_{\Gamma} p_{ij}^* d\Gamma \quad (6)$$

$$G_{ij} = \int_{\Gamma} u_{ij}^* d\Gamma \quad (7)$$

تونل (Γ_{23}) می باشد. در نهایت برای محیط سوم (Ω_3) معادلات انتگرال مرزی به صورت زیر نوشته شود:

$$\begin{bmatrix} H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{32} \\ u_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{32} \\ p_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در آن (H_{32} و G_{32}) و (H_{33} و G_{33}) به ترتیب معرف ماتریس های مرزی برای مرز میانی (Γ_{32}) و درونی (Γ_{33}) تونل است. به منظور استخراج فرم ماتریسی معادلات در حالت کلی لازم است تا شرایط پیوستگی و سازگاری در مرز مشترک دولایه خاک (Γ_{21}) و وجه میانی تونل (Γ_{32}) برقرار شود. این شرایط برای مرزهای مذکور به فرم ریاضی زیر قابل نوشتن هستند:

$$\begin{cases} u_{12} = u_{21} \\ p_{12} + p_{21} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

معادلات انتگرال مرزی برای محیط Ω_1 در فرم ماتریسی به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

بطوری که در رابطه ی فوق (H_{11} و G_{11}) و (H_{12} و G_{12}) به ترتیب معرف ماتریس های حاصل از معادلات انتگرال مرزی حاکم بر مرز سطح زمین (Γ_{11}) و مرز مشترک دولایه (Γ_{12}) می باشد. به طور مشابه برای محیط Ω_2 فرم ماتریسی به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\begin{bmatrix} H_{21} & H_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{21} \\ u_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{21} & G_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{21} \\ p_{23} \end{bmatrix} \quad (9)$$

در رابطه ی فوق (H_{21} و G_{21}) و (H_{23} و G_{23}) به ترتیب مبین ماتریس های حاکم بر مرز مشترک دولایه (Γ_{21}) و وجه میانی

راستی آزمایی

به‌منظور تحلیل یک محیط دولایه خاک شامل لوله مدفون دایره‌ای، یک الگوریتم رایانه‌ای مبتنی بر زبان برنامه‌نویسی متلب^۱ تهیه شده است. برای صحت‌سنجی این الگوریتم از نتایج تحلیلی ارائه شده توسط (پولوس و دیویس^۲ ۱۹۹۱) و (لی و وانگ^۳ ۲۰۰۸) استفاده شده است. (پولوس و دیویس ۱۹۹۱) پاسخ تحلیلی برای تنش‌های یک محیط دولایه خاک تحت بارگذاری سطحی ارائه کردند. در این مطالعه لایه دوم کاملاً صلب بوده و اثرات بار سطحی بر تنش‌های قائم لایه اول مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور مدل‌سازی این مسئله به کمک روش اجزای مرزی نیم‌صفحه، مدول الاستیک لایه دوم بسیار بالا در نظر گرفته شده تا شرایط صلبیت را اقلان کند (حدود 200Gpa). همچنین برای از بین بردن اثر لوله بر صحت‌سنجی، لوله زیرزمینی به عمق ۵۰ متری لایه دوم منتقل شده تا اثرات ناشی از آن بر تنش‌های لایه اول حداقل گردد. نتایج مقایسه مدل تحلیلی و عددی برای تنش‌های قائم بی‌بعد لایه اول در شکل (۲) نشان داده شده است (این تنش‌ها در شکل با $Ist=(3.14*\sigma_x)/P$ مشخص شده‌اند). چنانچه مشاهده می‌شود همخوانی مناسبی بین پاسخ‌های تحلیلی و نتایج حاصل برقرار است. لازم به ذکر است برای تهیه مدل حاضر به کمک اجزای مرزی نیم‌صفحه تنها از ۱۰۰ المان درجه دو استفاده شده است؛ این در صورتی است که در مطالعه‌ی (پنجی و همکاران ۲۰۱۶) برای مدل‌سازی محیط تک‌لایه با حفره بدون پوشش به کمک اجزای مرزی محیط کامل لازم شد تا بیش از ۲۰۰ المان درجه دو مدنظر قرار بگیرد.

$$\begin{cases} u_{23} = u_{32} \\ p_{23} + p_{32} = p_g \end{cases} \quad (12)$$

بطوریکه p_g معرف تنش‌های ثقی مؤثر بر وجه میانی تونل است. با توجه به معادلات (۸) تا (۱۲) معادله‌ی سرهم شده برای خاک دولایه شامل تونل مدفون مطابق زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & 0 & 0 \\ 0 & H_{21} & H_{23} & 0 \\ 0 & 0 & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \\ u_{23} \\ u_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & -G_{21} & G_{23} & 0 \\ 0 & 0 & -G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \\ p_{23} \\ p_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p_g \end{bmatrix} \quad (13)$$

درنهایت با اعمال شرایط مرزی حاکم بر مرزهای آزاد جسم (Γ_{11} و Γ_{33}) فرم قابل حل معادله‌ی (۱۳) به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & 0 & 0 & -G_{12} & 0 \\ 0 & H_{21} & H_{23} & 0 & G_{21} & -G_{23} \\ 0 & 0 & H_{32} & H_{33} & 0 & G_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \\ u_{23} \\ u_{33} \\ p_{12} \\ p_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & G_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ p_g \end{bmatrix} \quad (14)$$

بطوریکه:

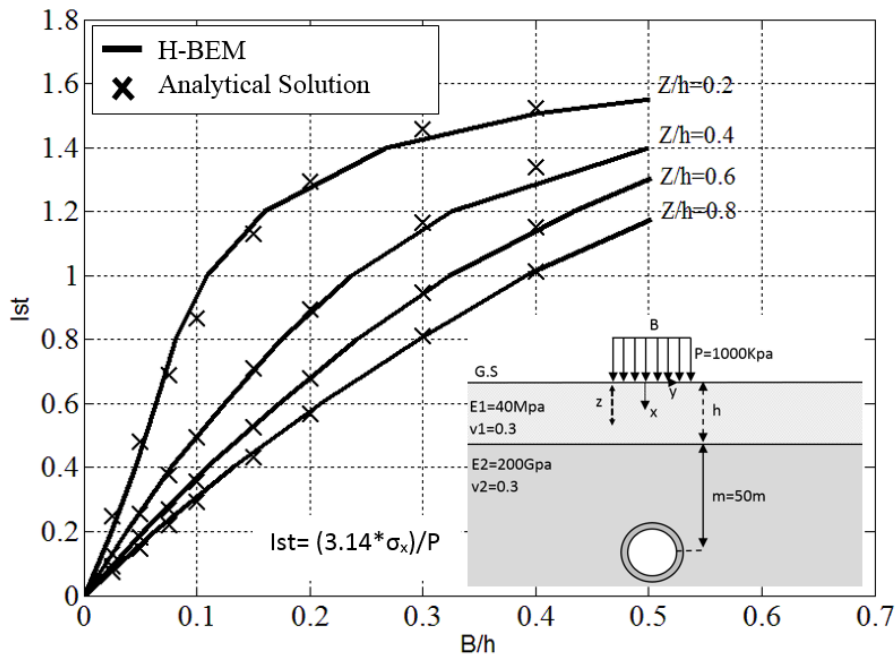
$$AX = F \quad (15)$$

در رابطه‌ی قبل X مبین بردار مجهولات مرزی و A ضرایب متناظر با این مقادیر می‌باشند. همچنین در این رابطه F معرف بردار حاصل از مقادیر معلوم مرزی است.

^۲. Li & Wang

^۱. Matlab

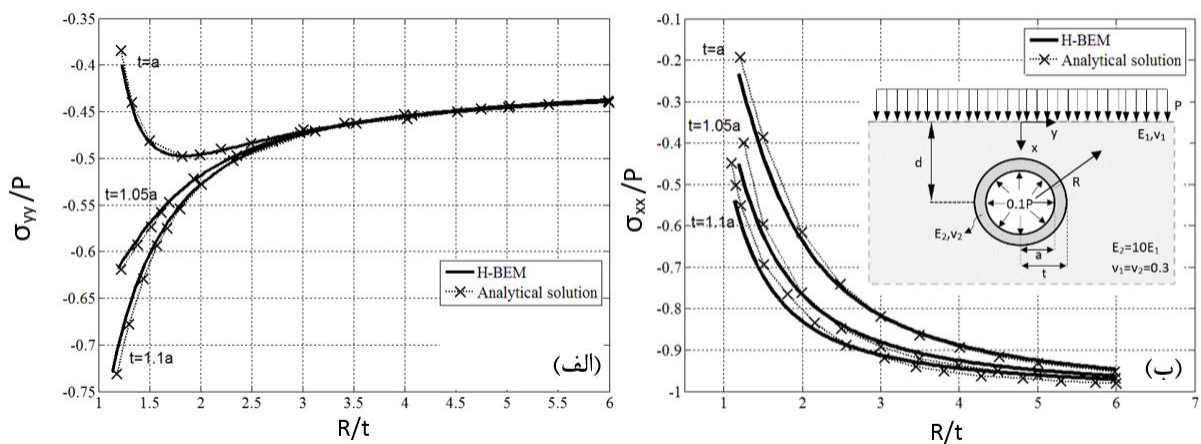
^۲. Poulos & Davis



شکل (۲): مقایسه‌ی پاسخ تحلیلی [۲۸] و نتایج مطالعه‌ی حاضر برای لوله مدفون عمیق

از مرکز تونل (R) با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی (مطالعه حاضر) مقایسه شده است. همان‌طور که در این اشکال به خوبی مشخص است، روش اجزای مرزی نیم‌صفحه از دقت مناسبی در قیاس با پاسخ‌های تحلیلی برخوردار است.

اخیراً حفرات پوشش‌دار تحت فشار توسط (لی و وانگ^۱ ۲۰۰۸) مورد مطالعه قرار گرفته است. این محققان با به‌کارگیری توابع پتانسیل روابط تحلیلی برای تنش‌های افقی و قائم دیواره این حفرات ارائه کرده‌اند. در شکل (۳-الف) و (۳-ب) به ترتیب پاسخ‌های تحلیلی برای تنش‌های افقی و قائم برحسب فاصله



شکل (۳): مقایسه‌ی پاسخ‌های تحلیلی [۲۹] و نتایج مطالعه‌ی حاضر برای الف: تنش‌های افقی در دیواره (x=d, y>t) و ب: تنش‌های قائم تاج (x<d-t, y=0) برای حفرة پوشش‌دار دایره‌ای، برحسب فاصله از مرکز حفرة

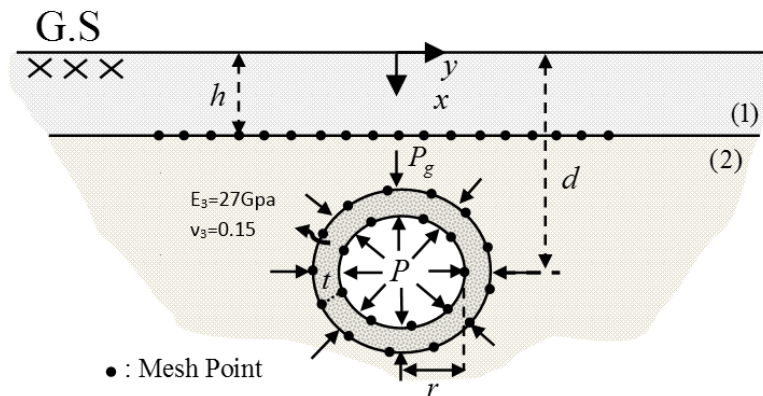
مطالعه‌ی عددی

مشترک بین دولایه خاک با ۶۰ المان درجه دوم گسسته سازی شده است. برای مدل‌سازی اثرات بار ثقلی یک‌بار خارجی (P_g) بر مرز میانی تونل به شکل زیر وارد شده است (شکل (۴)):

$$P_g = \gamma_1 h + \gamma_2 (d - h) \quad (16)$$

که در رابطه فوق γ_1 و γ_2 به ترتیب معرف وزن مخصوص لایه اول و دوم، h ضخامت لایه اول و d عمق تونل دایره‌ای است (شکل ۴). لازم به توضیح است که در مدل‌سازی عددی به منظور لحاظ داشتن p_g وزن مخصوص لایه اول $\gamma_s = 15 \text{ KN/m}^2$ و وزن مخصوص لایه دوم برابر $\gamma_h = 19 \text{ KN/m}^2$ در نظر گرفته شده است.

در این بخش به عنوان مطالعه‌ی پارامتریک یک تونل دایره‌ای مدفون در خاک دولایه مدل‌سازی شده و تأثیر سختی لایه‌ها بر تغییرات تنش‌های سطح زمین و دیواره پوشش تونل مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخصات هندسی لایه‌های خاک و تونل در شکل (۴) نشان داده شده است. ضخامت لایه اول $h=4\text{m}$ و جنس پوشش تونل از نوع بتنی با مشخصات $E=27\text{Gpa}$ و $\nu=0.15$ با ضخامت $t=1\text{mm}$ شعاع داخلی آن $r=0.5\text{m}$ در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی فشار داخلی تونل یک فشار یکنواخت به شدت $P=1000\text{Kpa}$ به مرز داخلی تونل اعمال شده است. به منظور دستیابی به دقت مناسب، مرز تونل و پوشش آن مجموعاً با ۶۰ المان درجه دوم و مرز

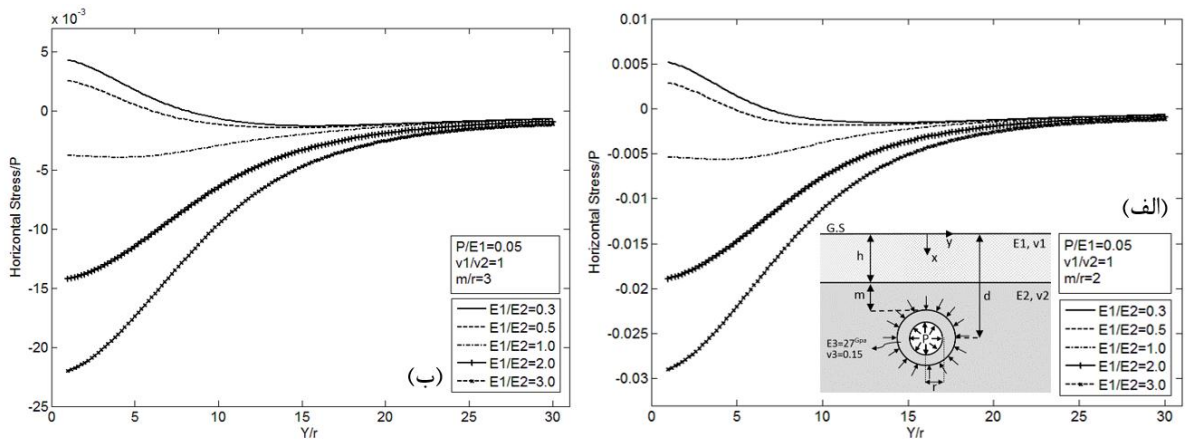


شکل (۴): مشخصات محیط خاک لایه‌ای مشتمل بر تونل انتقال آب مدفون

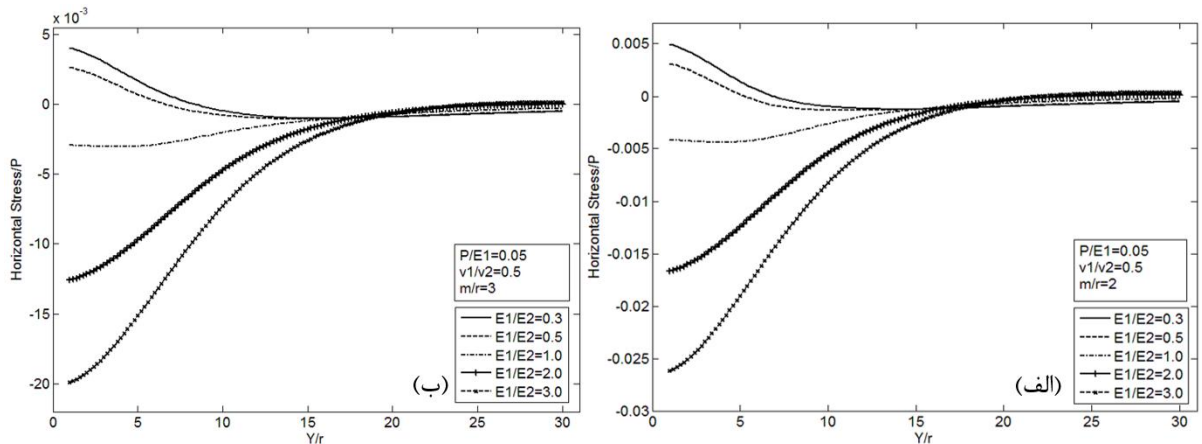
اثر سختی لایه‌ها

مرکز تونل به صفر همگرا شده‌اند. از دیگر پارامترهای مورد ارزیابی در این تحقیق، اثر ضریب پواسون است. همان‌طور که در اشکال دیده می‌شود در یک سختی و عمق ثابت تونل، با افزایش نسبت ν_1/ν_2 (ν_1 ضریب پواسون لایه اول و ν_2 ضریب پواسون لایه دوم) مقدار تنش‌های افقی سطح زمین افزایش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش عمق تونل از سطح زمین اثرات تنشی آن نیز کاهش یافته و این امر به خوبی در اشکال قابل مشاهده است.

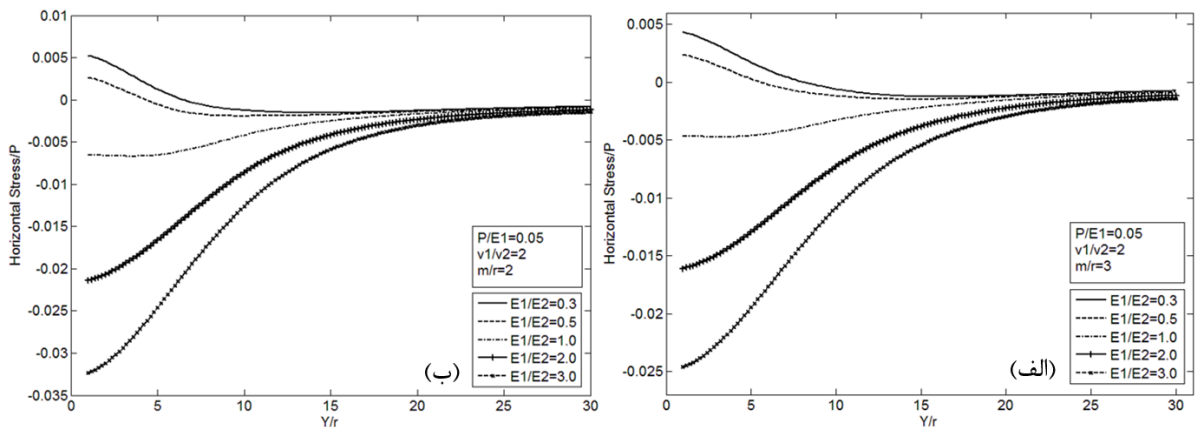
اشکال (۵) تا (۷) تنش‌های افقی سطح زمین را برای مقادیر مختلف سختی لایه‌ها، ضرایب پواسون و عمق مدفون تونل نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنش‌های سطح زمین با افزایش نسبت E_1/E_2 (E_1 مدول الاستیسیته لایه اول و E_2 مدول الاستیسیته لایه دوم) تغییر فاز داده و مادامی که لایه اول سخت‌تر از لایه دوم باشد مقادیر بیشتری نسبت به حالت عکس دارند. مقادیر این تنش‌ها برای حالات مختلف سختی در فاصله $Y=25r$ (شعاع داخلی لوله است) از



شکل (۵): تنش‌های افقی در سطح زمین برای $v_1/v_2=1$: الف: تونل در عمق $m=2r$: ب: تونل در عمق $m=3r$ (شعاع داخلی لوله است)



شکل (۶): تنش‌های افقی در سطح زمین برای $v_1/v_2=0.5$: الف: تونل در عمق $m=2r$: ب: تونل در عمق $m=3r$ (شعاع داخلی لوله است)



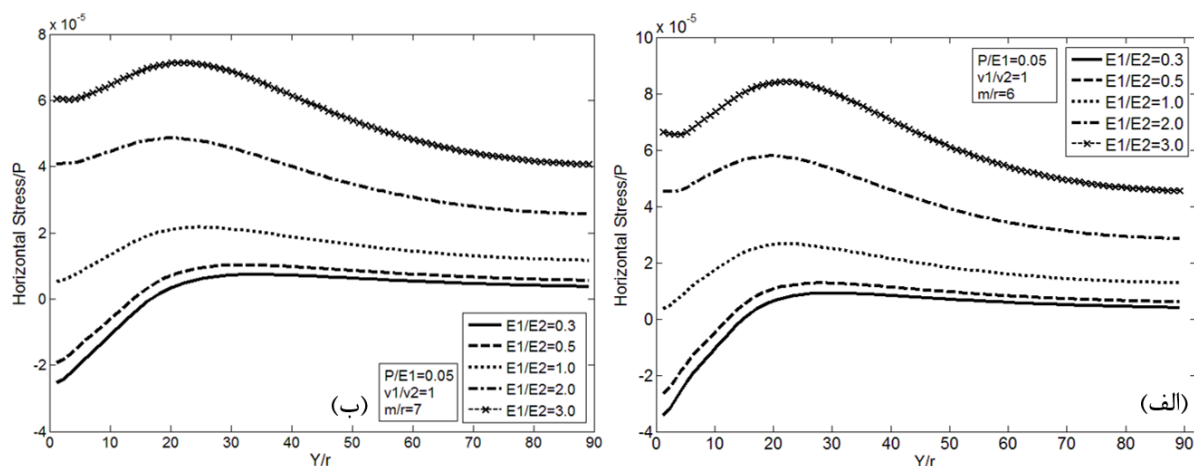
شکل (۷): تنش‌های افقی در سطح زمین برای $v_1/v_2=2$: الف: تونل در عمق $m=2r$: ب: تونل در عمق $m=3r$

عامل سختی لایه‌ها، ضریب پواسون و عمق احداث تونل مورد ارزیابی قرار گرفته است. چنانچه مشاهده می‌شود تنش افقی منتشر شده در دیواره تونل از شدت کمتر نسبت به تنش‌های سطحی برخوردار بوده و در فواصل دور نسبت به مرکز تونل به صفر همگرا می‌شود. همچنین با افزایش نسبت E_1/E_2

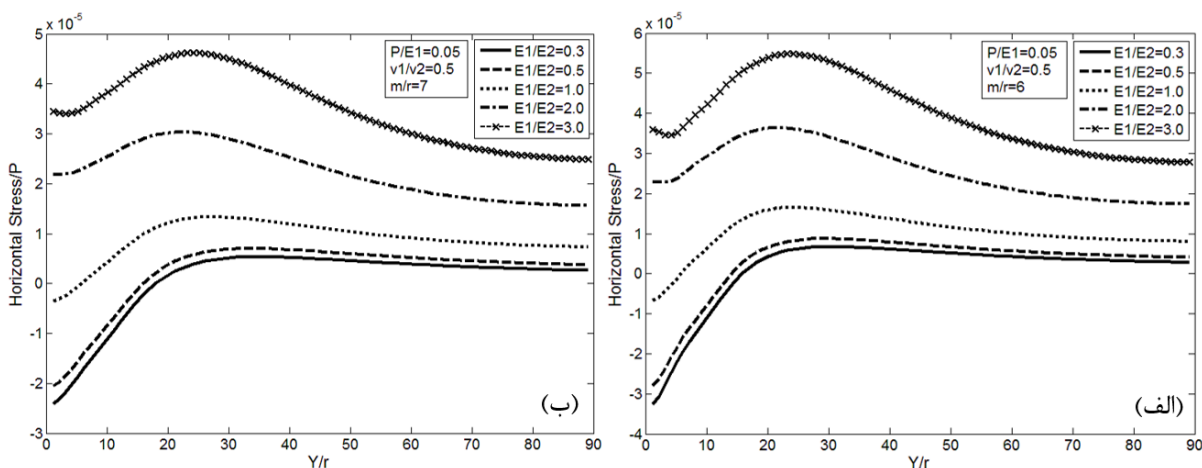
تنش‌های افقی (شعاعی) در دیواره تونل ($x=d, y>r$) در اشکال (۸) الی (۱۱) نشان داده شده است. در این اشکال از ۱۰۰ المان درجه دوم جهت گسسته‌سازی مرز مشترک دولایه و ۶۰ المان درجه دو جهت گسسته‌سازی مرز داخلی و خارجی تونل استفاده شده است و همانند تنش‌های سطح زمین سه

اثر سختی لایه‌های خاک بر الگوی تنش در حضور پوشش بتنی تونل‌های انتقال آب..... ۹

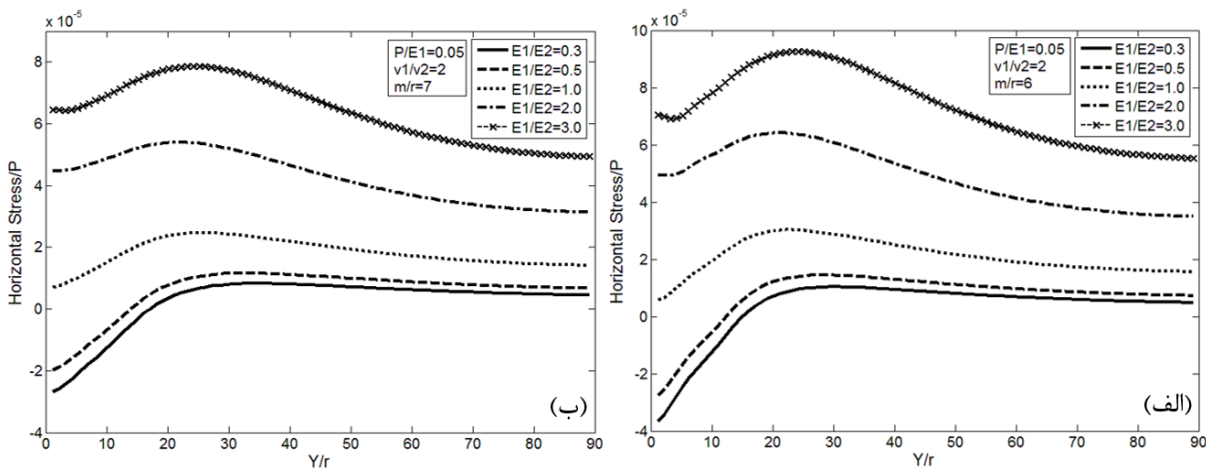
شدت این تنش‌ها افزایش می‌یابد. شایان ذکر است همواره افزایش در میزان پاسخ بدون تغییر در الگوی آن با افزایش نسبت v_1/v_2 و عمق تونل به چشم می‌خورد.



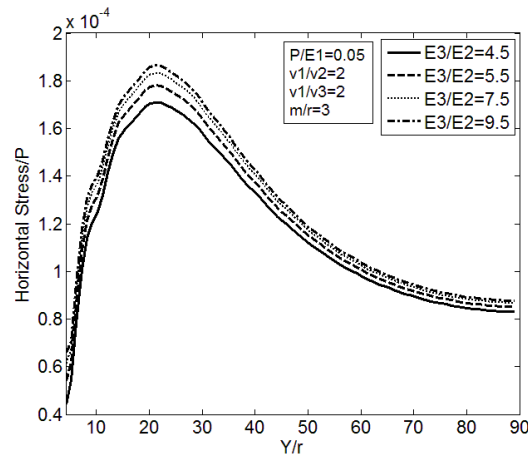
شکل (۸): تنش‌های افقی در دیواره تونل تحت فشار برای $v_1/v_2=1$ الف: تونل در عمق $m=6r$ ب: تونل در عمق $m=7r$



شکل (۹): تنش‌های افقی در دیواره تونل تحت فشار برای $v_1/v_2=0.5$ الف: تونل در عمق $m=6r$ ب: تونل در عمق $m=7r$



شکل (۱۰): تنش‌های افقی در دیواره تونل تحت فشار برای $v_1/v_2=2$ الف: تونل در عمق $m=6r$ ب: تونل در عمق $m=7r$



شکل (۱۱): اثر تغییرات سختی تونل بر تنش‌های افقی دیواره تونل تحت فشار برای تونل در عمق $m=3r$

نتیجه‌گیری

در این تحقیق فرمول‌بندی و نحوه‌ی به‌کارگیری روش اجزای مرزی نیم‌صفحه برای تحلیل لوله‌های مدفون در خاکه‌ای لایه‌ای ارائه شد. در این راستا با تهیه یک الگوریتم رایانه‌ای و انجام صحت‌سنجی‌های لازم، یک محیط دولایه‌ی خاک شامل یک تونل دایره‌ای مدفون در آن مورد توجه قرار گرفت. بررسی انجام‌شده نشان داد که دقت روش اجزای مرزی نیم‌صفحه به‌خصوص در تحلیل محیط‌های نیمه نامحدود لایه‌ای بسیار مناسب است. همچنین سهولت در مدل‌سازی در مقایسه با روش‌های سنتی مرزی از قبیل اجزای مرزی محیط کامل به سبب کاهش چشمگیر تعداد گره‌های مفروض مبین شد. در ادامه نیز اثر سختی لایه‌های خاک نظیر مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و عمق مدفون تونل بر الگوی تنش سطح زمین و دیواره تونل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از مطالعه عددی به‌صورت زیر قابل جمع‌بندی است:

- ۱- در یک خاک دولایه شامل تونل مدفون تحت فشار مستقر در لایه دوم، تنش افقی سطح زمین مادامی‌که سختی لایه اول از لایه دوم بیشتر باشد از نوع مثبت بوده و شدت آن نسبت به حالت عکس کمتر است.
- ۲- تنش القایی در سطح زمین ناشی از احداث تونل مدفون مستقر در لایه دوم در فاصله $Y=25r$ (شعاع تونل) از مرکز تونل به صفر همگرا می‌شود.

- ۳- متناظر با افزایش و کاهش ضریب پواسون لایه دوم نسبت به لایه اول، تنش افقی سطح زمین به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد.
- ۴- تنش افقی دیواره تونل نسبت به تنش سطح زمین از شدت کمتری برخوردار بوده و با افزایش نسبت $E1/E2$ افزایش می‌یابد.
- ۵- تأثیر ضریب پواسون بر شدت تنش‌های دیواره تونل مشابه سطح زمین بوده و با افزایش نسبت $v1/v2$ افزایش می‌یابد.

مراجع

- ۱- پنچی م. عسگری مارناتی ج. علی الهی ح. کوهساری ح و آدم پیرا م. (۱۳۹۱)، "بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار تنشی تونل‌های کم‌عمق دوبعدی با استفاده از روش اجزای مرزی"، پژوهشنامه‌ی حمل و نقل، سال دهم، شماره اول، صفحات ۱۷ الی ۲۸.
- ۲- پنچی، مهدی و عسگری مارناتی، جعفر و انصاری، بهمن، (۱۳۹۴)، "تحلیل لوله‌های مدفون انتقال آب با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه"، نشریه سد و نیروگاه‌های برق آبی ایران، دوره دوم، شماره ۴، ص ۲۲-۳۳.
- ۳- پنچی، مهدی و انصاری، بهمن و عسگری مارناتی، جعفر، (۱۳۹۵)، "تحلیل تنشی تونل‌های سطحی در خاکه‌ای لایه‌ای با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه"، نشریه مهندسی زیرساخت‌های حمل‌ونقل، دوره دوم، شماره ۱، ص ۱۷-۳۲.

- 15- Loganathan N. Poulos H.G. (1998) Analytical prediction for tunneling induced ground movements in clays. *Journal of geotechnique and geoenvironment engineering*. Vol 124(9). pp 846-856.
- 16- Matlab Primer. (2014). The math works Inc, 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098. (www.mathworks.com).
- 17- Mindlin R.D. (1948). Stress distribution around a hole near the edge of a plate under tension. *Proc soc exp stress anal*. pp 56-68.
- 18- Mroueh H. Shahrour I. (2002). Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. Vol 26(3). pp 217-230.
- 19- Pan Emian Chen. Chao-Shi. Amadei Bemard. (1997). A BEM formulation for anisotropic half-plane problems. *Engineering analysis with boundary elements*. Vol 20(3). pp 185-195.
- 20- Panji M. Asgari Marnani J. Tavousi Tafreshi Sh. (2011). Evaluation of effective parameters on the underground tunnel stability using BEM. *Journal of Structural engineering and geotechnics*. Vol 1(2). pp 29-37.
- 21- Panji M. Kamalian M. Asgari Marnani J. Jafari M.K. (2013). Transient analysis of wave propagations problems by half-plane BEM. *Geophysical Journal International*. Vol 194. pp 1849-1865.
- 22- Panji M. Kamalian M. Asgari Marnani J. Jafari M.K. (2014). Analysing seismic convex topographies by a half-plane time-domain BEM. *Geophysical Journal International*. Vol 197(1). pp 591-607.
- 23- Panji M. Koohsari H. Adampira M. Alielahi H. Asgari Marnani J. (2016). Analyzing stability of shallow tunnels subjected to eccentric loads by boundary element method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. [doi:10.1016/j.jrmge.2016.01.006](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.01.006).
- 24- Poulos H.G. Davis E.H. (1991). *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. Center for geotechnical research. JOHN WILEY & SONS Inc. ISBN 0471695653.
- 25- Telles J.C.F. Brebbia C.A. (1980). Boundary element solution for half-plane problems. *International journal of solids*
- 4- Augarde C.E. Burd H.J. (2001). Three-dimensional finite element analysis of lined tunnels. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. Vol 25(3). pp 243-262.
- 5- Brebbia C.A. Dominguez J. (1992). *Boundary element introduction course*. Second edition. Southampton computational mechanics publications.
- 6- Cheng Alexander H.D. Cheng Daisy T. (2005). Heritage and early history of the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. Vol 29. pp 268-302.
- 7- Crouch S.L. Starfield A.M. (1983). *Boundary element method in solid mechanics*. Dept of civil and mineral engineering. university of Minnesota.
- 8- Dong C.Y. Lo S.H. (2013). Boundary element analysis of an elastic half-plane containing nanoinhomogeneities. *International journal of Computational Materials Science*. Vol 73, 33-40.
- 9- Duffy D.G. (2001). *Green's function with applications*. Chapman & Hall/CRC press. Boca Raton. FL.
- 10- Dumir P.C. Mehta A.K. (1987). Boundary element solution for elastic orthotropic half-plane problems. *Journal of computers and structures*. Vol 26. pp 431-438.
- 11- Garner Cyrus D. Coffman, Richard A. (2013). Subway tunnel design using a ground surface settlement profile to characterize an acceptable configuration. *Tunnelling and underground space technology*. Vol 35. pp 219-226.
- 12- Gioda G. Locatelli L. (1999). Back analysis of the measurements performed during the excavation of shallow tunnel in sand. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. Vol 23. pp 1407-1425.
- 13- Katsikadelis J.T. (2002). *Boundary element theory and applications*. National technical university of Athens. First edition. Elsevier Science.
- 14- Li S.C. Wang M.B. (2008). Elastic analysis of stress-displacement field for a lined circular tunnel at great depth due to ground loads and internal pressure. *Journal of tunnelling and underground space technology*. Vol 23. pp 609-617.

structures. Vol 12. pp 1149-1158.

- 26- Verruijt A. (1998). Deformations of an elastic half plane with a circular cavity. *International journal of solids structures*. Vol 35. pp 2795-2804.
- 27- Wu R. Xu J.H. Li C. Wang Z.L. Qin S. (2015). Stress distribution on mine roof with the boundary element method. *Engineering analysis with boundary elements*. Vol 50. pp 39-46.
- 28- Xiao B. Carter J.P. (1993). Boundary element analysis of anisotropic rock masses. *Engineering analysis with boundary elements*. Vol 11. pp 293-303.
- 29- Ye G.W. Sawada T. (1989). Some numerical properties of boundary element analysis using half-plane fundamental solutions in 2-d elastostatics. *Journal of computational mechanics*. Vol 4. pp 161-164

The effect of layered-soil stiffness on the stress pattern in presence of embedded water transmission tunnels

Mehdi Panji* ¹

Bahman Ansari ²

Jafar Asgari Marnani ³

Ali Ansari ⁴

Absatract

In this paper, an elastostatic half-plane boundary element method (BEM) formulation which was previously proposed by the authors for single layer soil was applied to analyze the stress behavior of underground pressure concrete tunnels, embedded in two-layer soils. In the use of this method, only the boundary of tunnel's lining and interfaces were required to be discretized. In this regard, first, a computer code was prepared based on a multi-region substructuring process in the BEM scheme. Then, the efficiency and applicability of the method as well as the prepared algorithm were verified by solving some practical examples and comparing the results with those of the published works. Finally, a parametric study was done to evaluate the effect of layers stiffness on the soil stress distribution. The studies showed that the half-plane BEM was in good agreement with the existing solutions and its capability was very favorable for elastostatic problems including semi-infinite domains. This method can be practically used for analyzing the embedded structures as well as presenting stress patterns in order to scrutinize and correction of existing codes.

Keywords:

Half-plane BEM, Lining, Layered soil, Numerical methods, Water transmission tunnels.

-
1. Assistance Professor; Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Zanzan Branch, Iran
 2. M.Sc. in Geotechnical Engineering, Islamic Azad University, Zanzan Branch, Iran
 3. Assistance Professor; Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Tehran Branch, Iran
 4. B.Sc. in Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran