نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۶- شماره‌ی۱/تابستان ۱۳۹۶

مدلسازی عددی پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای کم عمق در زمین‌های لایه‌ای همگن با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و مقایسه نتایج آن با روش‌های تحلیلی

علی روزی طلب[1*]؛ سید امین اصغری پری [2]؛ ساسان معتقد[2]؛ سید علی اصغری پری[1]

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران؛ دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا
۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۵/۱۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹
شناسه دیجیتال (DOI):10.22044/tuse.2017.4653.1276

واژگان کلیدی
تونل دایره‌ای
تغییر شکل بیضوی
آنالیز لرزه‌ای
خاک همگن
آباکوس

چکیده

در بررسی حاضر، تاثیرنقش لایه بندی زمین بر پاسخ لرزه ای لاینینگ تونل های با مقطع دایره ای مورد بررسی قرار گرفته است. تلاش های زیادی در زمینه ی مطالعه ی پاسخ لرزه ای زمین های متجانس و همگن صورت گرفته است. مدل اجزاء محدود کرنش صفحه ای، در یک مقطع عرضی انتخابی از تونل دایره ای قرار گرفته در یک زمین متشکل از دو (یا چند) لایه ی همگن، برای مشخص کردن تاثیر لایه بندی زمین بر پاسخ لرزه ای تونل ها در تاج تونل و همچنین در کف آن ساخته و نتایج آن بررسی شده است. نتایج مشخص می کند که شرایط لایه بندی زمین، علی الخصوص تعداد لایه ها، نقش مهمی در شرایط تاثیرنیروهای زلزله برخورنده به لاینینگ تونل ایفا می کند. مدل ها ثابت می کند که زمانی که تونل به طور کامل در یکی از دو لایه ی خاک همگن متوالی قرار گرفته باشد، نیروی لرزه ای ایجاد شده در لاینینگ تونل در مقایسه با حالتی که فقط یک لایه خاک داشته باشیم، بسیار متفاوت است. همچنین اگر تونل از درون هر دو لایه ی همگن بگذرد، بیشترین شدت نیروی وارد بر پوشش تونل زمانی اتفاق می افتد که لایه ی خاک همگن پایینی میزان سختی بالایی داشته باشد.

۱- پیش‌گفتار

تعداد تونل‌ها در طی دهه های اخیر رشد قابل توجهی داشته است. تعدادی از تونل های ساخته شده، در نواحی لرزه خیز بنا شده اند. سه نوع از تغییر شکل ها ،پاسخ تونل به زمین لرزه را طبقه بندی می‌کنند:

۱- تغییر شکل های فشاری و کششی محوری
۲- تغییر شکل های خمشی طولی
۳- تغییر شکل‌های بیضوی یا تخـــم مرغی *(Qwen & Scholl, 1981)*

پارامتری که بیشترین تاثیر را بر پوشش تونل تحت بارهای لرزه ای دارد، به استثنای مواردی که تونل مستقیما تحت اثر گسلش دچار تغییر شکل برشی شود، تغییر شکل‌های بیضوی یا تخم مرغی است *(Penzien, 2000)*.

مطالعات انجام شده بیان گر آن است که زمانی که تغییر شکل بیضوی در اثر انتشار امواج طولی یا مورب است، آنگاه امواج برشی منتشر شده ناشی از زلزله، عامل اصلی ایجاد این تغییر شکل‌ها است *(Wang, 1993)*. راه حل های تحلیلی ساده شده برای بدست آوردن پاسخ لرزه ای تونل ها ابزار مناسبی برای طراحی اولیه است، به نحوی که این روش های حل، محاسبات سریع و آسانی جهت تعیین نیروی زلزله طرح در طراحی پوشش در برابر نیروهای محوری و لنگر خمشی فراهم می‌کنند.

استفاده از خواص خطی معادل در راه حل های تحلیلی به عنوان یک روش تقریبی شبیه سازی غیر خطی بودن خاک،

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه شاهرود؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه‌ی سوم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۰۰۳۰۰؛ دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۰۰۲۸۰؛ رایانامه: jalalisme@shahroodut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

می تواند به عنوان طراحی اولیه لرزه ای در محاسبات تونل ها بکار برده شود *(Amorosi & Boldini, 2009)*. تلاش فراوانی برای بسط راه حل های تحلیلی فرم بسته ی ساده برای پیش بینی نیرو و گشتاور در پوشش تونل های دایره ای تحت تغییر شکل های بیضوی القایی انجام شده است. فرض این راه حل‌ها این است که محیط، الاستیک خطی و همگن است و تغییر شکل بیضوی تحت شرایط کرنش صفحه ای شبه استاتیکی دو بعدی نتیجه می شود.

این مطالعه دو ضعف مهم در روش های حل شکل بسته را مورد بحث قرار می دهد:

۱- راه حل های تحلیلی، اندرکنش بین پوشش و خاک را شبه استاتیکی و بدون لحاظ اندرکنش اولیه در نظر می گیرند. همچنین دیگر فرض این راه حل‌ها آن است که نیروی برشی به صورت شبه استاتیکی با لحاظ نمودن ثابت کرنش برشی و عمق به سطح وارد می‌شود*(Kontoe, et al., 2009)*. تحلیل های دینامیکی انجام شده در این مقاله که انتشار قائم امواج برشی قرار گرفته در لایه ویسکو الاستیک همگن روی سنگ بستر سخت را شبیه سازی کرده است، نشان دهنده ی افزایش مقدار کرنش برشی با افزایش عمق از سطح است *(Bobet, 2003)*.

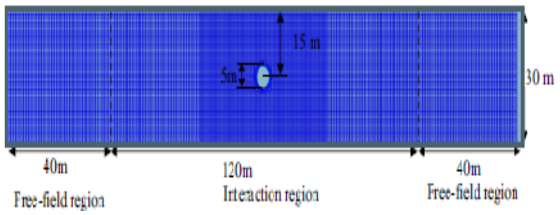
۲- زمانی که محیط اطراف تونل شامل خاک ته نشین شده‌ی طبیعی باشد اغلب لایه بندی آن به صورت افقی است، اما راه حل های تحلیلی، روش محاسبه ای برای محاسبه ی سختی بین دو لایه ی متوالی بدست نمی دهد. به همین دلیل پاسخ لرزه ای در تونل های دایره ای پیچیده‌تر می‌شود و استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای پیش بینی رفتار تونل‌ها به عنوان مهم ترین روش جایگزین افزایش می‌یابد*(Hoeg, 1968)*.

این پژوهش پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای ساخته شده توسط ماشین *TBM* در خاک‌های دو لایه قرار گرفته در عمق کم را بررسی می‌کند. هدف اصلی این مقاله تعیین این است که تحت چه شرایطی نیروی لرزه ای موجود در پوشش تشدید می‌شوند.

۲- مدل‌های عددی

۲-۱- مدل اجزا محدود

شبکه‌ی اجزا محدود، یک توده ی خاک با ضخامت ۳۰ متر در شرایط کرنش صفحه ای همراه با ۳۱۲۲۶ المان مستطیلی ۴ گره‌ای را در یک سنگ بستر صلب شبیه سازی می‌کند (شکل ۱). برای مدل سازی اجزا محدود از برنامه‌ی *Abaqus* استفاده می‌شود.



شکل ۱- شبکه اجزاء محدود

از آنجا که تونل‌های نسبتا کم عمق تا حدودی آسیب پذیرتر از تونل های عمیق تحت بارگذاری لرزه ای هستند پس مرکز تونل در عمق ۱۵متری سطح زمین قرار دارد. همچنین قطر تونل دایره ای به اندازه ی ۵ متر تعریف شده است. پوشش تونل به صورت دایره ی پیوسته و نفوذ ناپذیر با رفتار الاستیک خطی که از ۷۲ تا المان تیر دو گره ای ساخته شده، مدل می شود. اجازه ی حرکت نسبی در سطح مشترک پوشش تونل و خاک داده نمی‌شود علت این کار ساده کردن شرایط مدل‌سازی مساله بوده است *(Penzien & Wu, 1998)*. همچنین فرض پوشش با لغزش زیاد که در آن مقاومت مماسی بین خاک و پوشش برای جابجایی وجود ندارد، در این مقاله بررسی نمی‌شود.

مدل فقط انتشار عمودی امواج برشی در لایه های ویسکو الاستیک قرار گرفته روی بستر سنگ سخت را در نظر می‌گیرد. درجات آزادی در مرزهای کف به صورت کاملا مهار شده است، زیرا جابجایی‌ها نسبت به پایه محاسبه شده اند. مدل اجزا محدود از یک ناحیه ی مرکزی برای شبیه سازی اندرکنش تونل و زمین و نیز دو ناحیه ی جانبی که پاسخ سطح آزاد زمین را شبیه سازی می‌کند، تشکیل شده است. در سطح آزاد زمین تمام گره ها در عمق های یکسان دارای جابجایی افقی یکسانی هستند و جابجایی

Archive of SID
www.SID.ir

عمودی مقید شده است. گزینه ی اخیر به منظور تنظیم کردن حرکت گره ها با حرکات ناحیه ی عمل آزاد زمین که ناشی از انتشار عمودی امواج برشی القایی است، می باشد.

ناحیه‌ی بر هم کنش جایی است که خاک و تونل بر هم اثر می‌کنند. بنابراین درجه آزادی حرکتی در گره ها در دو جهت قائم و افقی کاملا آزاد می باشد.

بزرگترین اندازه‌ی المان‌ها در جهت انتشار موج به نحوی که کمتر از یک دهم (۰/۱) طول موج حداقل باشند، در شبیه سازی محاسبه شده است. نهایتا با توجه به نسبت بین حداقل سرعت موج $V_{min} = 46\ \frac{m}{s}$ و بیشترین فرکانس موج ورودی $f_{max} = 10\ Hz$، اندازه‌ی المان‌ها ۵۰ سانتی‌متر انتخاب شده است.

۲-۲- خواص مصالح

زمین و تونل هردو با استفاده از مدل الاستیک خطی تک فازی شبیه سازی شده اند. خواص مواد در جدول۱ آورده شده است. خواص مصالح زمین حاکی از آن است که خاک از درجه بندی نرم تا سفت متغیر است. نسبت انعطاف پذیری تونل و زمین (F) از ۰/۶ تا ۶/۰ متغیر است. پارامترهای مکانیکی در تونل سپرگذاری شده مدل از خواص پوشش های بتنی مسلح رایج گرفته شده است.

جدول ۱- خصوصیات مصالح

	زمین	پوشش تونل
مدول یانگ (مگا پاسکال)	۱۰-۵۰-۱۰۰ ۲۵۰-۵۰۰-۱۰۰۰	۲۴۸۰۰
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۲
جرم واحد حجم	۲	۲/۵

۲-۳- تحلیل‌های عددی با استفاده از فرضیات روش فرم بسته

روش حل فرم بسته ی ونگ در بسیاری موارد برای پیش بینی پاسخ لرزه ای مقطع عرضی تونل استفاده شده و در این پژوهش نیز به عنوان مرجع استفاده شده است. این راه حل محاسبه، مخصوصا در تعیین اندرکنش خاک و سازه بر اساس فرضیات زیر استفاده می‌شود:

- زمین نامحدود، الاستیک خطی، همگن و محیطی ایزوتروپیک است.
- تونل دایره ای و با ضخامت پوشش یکنواخت و بدون هیچ ناپیوستگی است. ضخامت پوشش تونل نسبت به قطر آن بسیار کم است و پوشش تونل رفتار الاستیک خطی دارد.
- شرایط کرنش مسطح برای خاک و پوشش فرض شده است.
- اثر زمان ساخت سازه‌ها در نظر گرفته نمی شود.
- در جهت پوشش گذاری، اتصال کامل بین خاک و پوشش در نظر گرفته می شود و در جهت عمود بر آن فقط اتصال کامل میان خاک و سپر پوشش (بدون لغزش) لحاظ شده است *(Sedarat, et al., 2009)*.

عملکرد لرزه‌ای تونل توسط دسته ای از نیروهای استاتیکی که در اثر حرکات القایی زمین ناشی از انتشار عمودی موج های برشی عمودی به وجود می‌آید، معرفی می شود. روش حل مبسوط در ضمیمه‌ی الف به طور خلاصه شده آمده است.

در شبیه سازی عددی، بار برشی از طریق اعمال نیروها به گره‌های بالای مدل وارد شده است. تغییر شکل‌ها و نیروهای پوشش در بخش سوم مقاله آنالیز و مورد بررسی قرار گرفته اند. مدول یانگ زمین در جهت لحاظ کردن محدوده‌ی وسیعی از نسبت های انعطاف پذیری به صورت پارامتریک تغییر کرده است. جدول ۲ نسبت‌های انعطاف پذیری به کار رفته در این کار را نشان داده است.

Arrive of SID
www.SID.ir

جدول ۲- پارامترهای خاک، ضخامت پوشش و مقادیر نسبت انعطاف پذیری

		نسبت انعطاف پذیری F					
مدول یانگ خاک (مگاپاسکال)		۱۰	۵۰	۱۰۰	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰
ضخامت پوشش	$t=0.25\ m$	۰٫۶	۲٫۹۸	۵٫۹۶	۱۴٫۸۹	۲۹٫۷۸	۵۹٫۵۵
	$t=50\ m$	-	۰٫۰۷۴	-	-	۳٫۷۲	-

۲-۴- شبیه سازی عددی و آنالیز دینامیکی بر اساس روش انتگرال‌گیری مستقیم

تحلیل مستقیم دینامیکی اجزا پیوسته با استفاده از روش اجزا محدود برای محاسبه ی نیروهای لرزه ای و تغییر شکل‌های وارده بر تونل دایره‌ای انجام شده بود. یک واحد کوچک ضربه به عنوان لرزه‌ی ورودی برای تحریک یکسان تمام فرکانس‌ها، جهت انجام تحلیل اتخاذ شده است(شتاب حداکثری برابر با ۱متر بر مجذور ثانیه در فاصله های زمانی ۰٫۲ ثانیه، و شتاب صفر برای سایر لحظات).

ضریب میرایی رایلی به اندازه ی ۵ درصد ضریب میرایی ویسکوز در فرکانس پایه ی سیستم در نظر گرفته شده است. در تمام تحلیل ها گام زمانی برابر ۰٫۰۱ ثانیه و ضرایب میرایی برابر با α=۰ و β=۰٫۲۵ و γ =۰٫۵ مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- نتایج و بحث

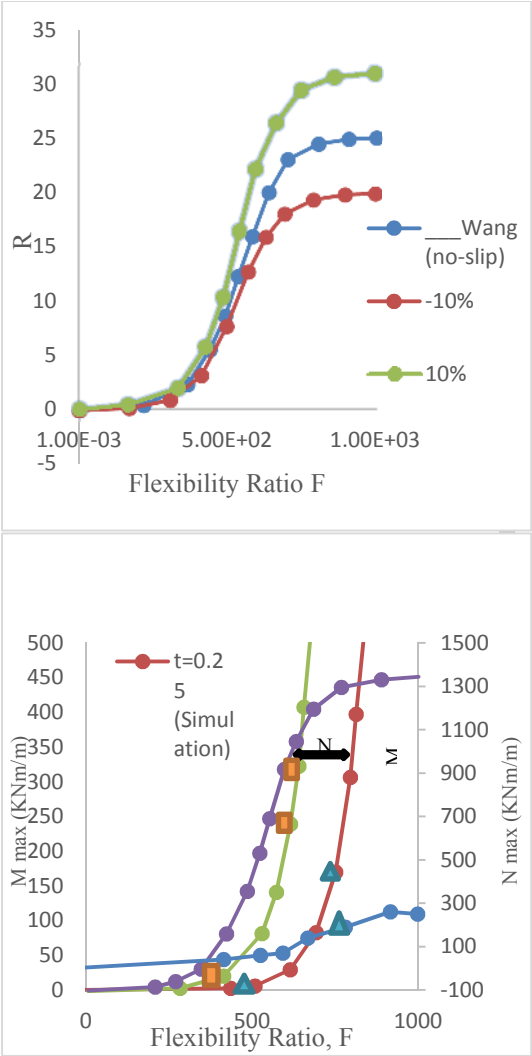
۳-۱- زمین تک لایه ای

۳-۱-۱- تحلیل نتایج نیروی برشی استاتیکی

پارامترهای اصلی که بر بارهای محاسبه شده با راه حل های تحلیلی حاکم هستند عبارتند از:تراکم پذیری C، نسبت های انعطاف پذیریF، و حداکثر مقدار کرنش برشی ناحیه‌ی آزاد γ است.

برای مقایسه ی مدل عددی با راه حل تحلیلی ونگ، نیروی برشی استاتیکی از طریق اعمال یک بار استاتیکی افقی در گره ها ی سطح، بر مدل وارد می شود.

شکل ۲ نتایج آنالیزهای عددی و تحلیلی در مورد مقایسه ی نتایج حداکثر لنگر خمشی، حداکثر نیروی محوری و تغییر شکل پوشش تونل (R)، در زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور افقی را با یکدیگر مقایسه کرده است.



شکل ۲- نیروی برشی استاتیکی (قطر تونل d=5m و E=10 MPa تا E=500 MPa و فرض عدم لغزش زمین و پوشش)

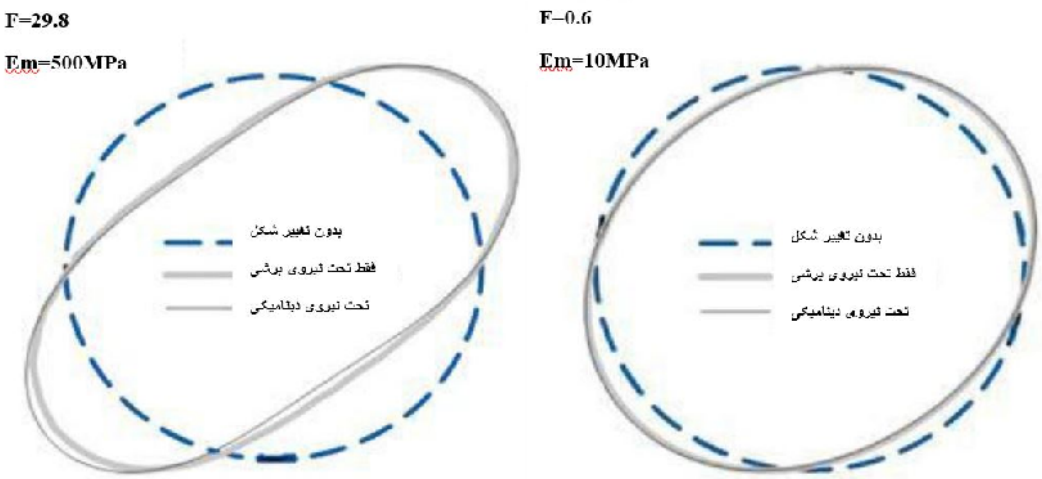
www.SID.ir

مقادیر γ از تقسیم مقدار جابجایی سطح آزاد بین نواحی تاج و جبهه ی کنار تونل بر مقدار قطر تونل به دست می‌آید. برای مشخص کردن اثر تفاوت سختی بین لایه های زمین و نیز موقعیت سطح مشترک آنها با تونل در این مقاله مقیاسی برابر 10^{-3} برای پاسخ مدل اعمال شده است تا γ_{ff} مقداری یکسان در تمام محاسبات داشته باشد. عموما پاسخ مدل از روش حل ونگ تبعیت می کند (شکل ۲). مثلا برای $F<1$، یعنی حالتی که تونل از زمین سخت تر است، پاسخ ها تقریبا منطبق بر همدیگرند. در حالی که برای $F>1$ پاسخ های مدل به مقدارهای بزرگتری از R (~ ٪۱۰) و مقادیر کوچکتر از M_{max} (~ ٪۲۵) نسبت به مقادیر حاصل از روش ونگ می رسد. این تاثیر در نتیجه ی مجاورت مرزهای مدل مخصوصا سطح آزاد در بالای مدل و کف صلب در پایین مدل است، در حالی که روش حل ونگ از فرض یک فضای نامحدود مشتق شده است. M_{max} حاصل از شبیه سازی عددی و حل تحلیلی مقادیر یکسان به دست می‌دهند.

۳-۱-۲-تحلیل دینامیکی

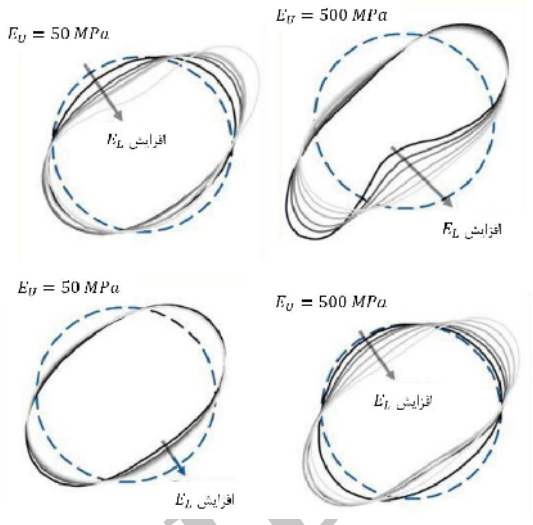
شکل ۳، تغییر شکل مدل حاصل از نیروی برشی استاتیکی را با تغییر شکل حاصل از تحلیل دینامیکی بررسی و مقایسه می کند. بنظر می رسد که تحلیل دینامیکی، تغییر شکل های بزرگتری را نسبت به تغییر شکل ناشی از نیروی برشی استاتیکی نتیجه می دهد، البته با این فرض که کرنش برشی سطح آزاد یکسان (γ_{ff})، برای خاک سخت نمود بیشتری دارد. $E_m = 500\ MPa$ تفاوت های میان پاسخ های لرزه‌ای پوشش تونل، ناشی از منحنی جابجایی سطح آزاد است. در حالی که تحلیل استاتیکی تغییرات خطی جابجایی با عمق وارد را نشان می دهد، تحلیل دینامیکی یک پروفیل منحنی گونه برای جابجایی به دست می دهد.

پاسخ مدل بدست آمده با تحلیل دینامیکی، با حل ونگ مقایسه شده است (شکل ۴) *(Wang, 1993)*. پاسخ مدل عموما مشابه تحلیل ونگ است. برای $F<1$، مدل عددی و حل ونگ به خوبی منطبق هستند، در حالی که برای $F>1$ پاسخ مدل عددی نسبت به حل ونگ کمی کمتر از R و M_{max}، اما کمی بالاتر از N_{max} است.



شکل ۳- حالت تغییر شکل یافته برای خاک تک لایه (کرنش برشی سطح آزاد = 10^{-3} ، با ضریب تشدید ۳۰۰)

www.SID.ir



شکل ۴- پاسخ دینامیکی(قطر تونل d=5m و E=10 MPaتا E=500 MPa و فرض عدم لغزش زمین و پوشش): نتایج حل روش ونگ در مقابل نتایج روش عددی

۳-۲- زمین دو لایه ای

در این قسمت پاسخ لرزه ای تونل دایره ای در زمین شامل دو لایه افقی ارائه شده است. ضخامت پوشش برابر ۲۵ سانتیمتر است. تاثیر محل تلاقی لایه ها و تونل با لحاظ کردن موارد زیر مشخص شده است:

۱. کف تونل: سطح مشترک لایه ها از کف تونل می گذرد (۱۷,۵متر عمق).

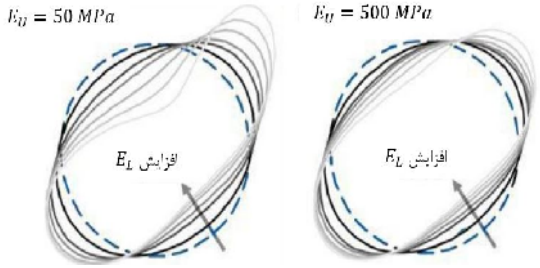
۲. مرکز تونل: سطح مشترک لایه از مرکز تونل می گذرد (۱۵متر عمق).

۳. تاج تونل: سطح مشترک لایه از تاج تونل می گذرد (عمق ۱۲,۵متر).

تفاوت سختی لایه ها ، منتج ازخواص الاستیک هر دو لایه است. نتایج هر سه مطالعه ی موردی توسط شکل‌های مشابه جهت مقایسه بینابین ارائه شده است.

۳-۲-۱- بررسی تغییر شکل‌های ایجاد شده در مدل

شکل ۵ حالت تغییر شکل یافته‌ی مدل برای محدوده های مدول یانگ نشان داده شده در جدول ۱ (E_L)، برای لایه ی پایین را نشان می دهد. همچنین برای لایه ی بالایی مدول یانگ برای هر دو حالت مطالعه مقداری ثابت و برای زمین های نرم برابر $E_U = 50\ MPa$ و در زمین های سخت $E_U = 500\ MPa$ محاسبه شده است.



شکل ۵- تغییر شکل کف،جبهه ی میانی و تاج (لایه ی بالا E=50 و ۵۰۰ مگاپاسکال،لایه ی پایینی EL=10, 50, 100, 250, 500 1000 *MPa*, و کرنش برشی برابر ۰,۰۰۱ و ضریب تشدید ۳۰۰)

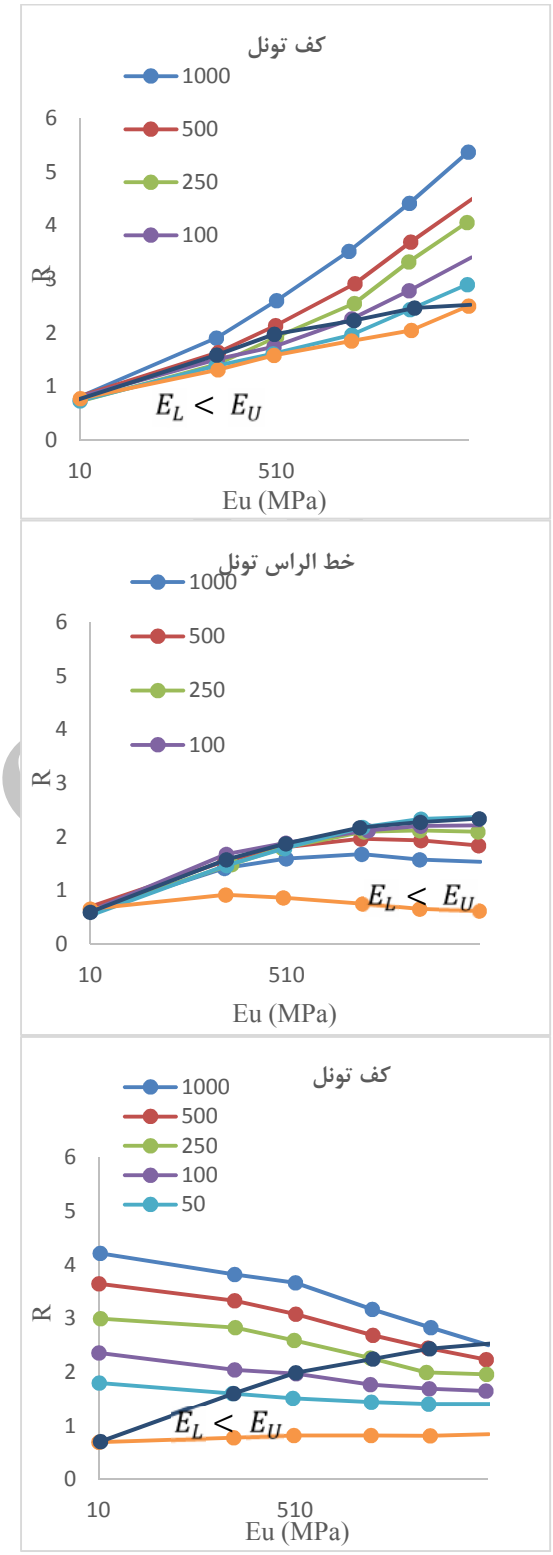
تغییر شکل‌های بزرگتر زمانی اتفاق می افتد که تونل فقط از یک لایه بگذرد، مانند حالات کف و تاج تونل و محیط اطراف نیز از جنس نرم باشد. در این شرایط تغییر شکل ها در همسایگی لایه ی محیطی بیشتر می شود. در حالتی که تونل از هر دو لایه‌ی خاک بگذرد، تغییر شکل پوشش نسبتا یکنواخت تر می باشد، مگر در حالتی که سختی لایه ها تفاوت‌های خیلی بیشتری با هم داشته باشد.

۳-۲-۲- تغییر شکل طبیعی پوشش تونل

شکل ۶ تغییر شکل طبیعی پوشش *(R)* ، را که به صورت نسبت میان تغییر شکل پوشش و کرنش قطری نظیر آن برای یک مقطع عرضی دایره ای برای زمین حفاری نشده تعریف شده است، نشان می دهد.

در مقایسه با حالت تک لایه ای، زمانی که لایه محاط بر تونل از لایه ی مرزی سخت تر باشد برای R مقادیر بزرگتری اتفاق می افتد. وقتی که تونل از درون هر دو لایه ی خاک عبور کند، مقادیر R از پاسخ پوشش تک لایه ای برای حالت $E_L > E_U$ تبعیت می کند، ولی در غیر این صورت مقادیر R کمتری به دست می آید. برای محدوده ی سختی کمتر لایه ها، مقادیر R بدست آمده، تقریبا نسبت به مقادیر بالاتر سختی E_U بی تاثیر است.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۶- تغییر شکل های طبیعی اتفاق افتاده برای کف، مرکز و سقف تونل

۳-۲-۳- نیروهای پوشش

شکل ۷ نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل در حالت زمین دو لایه ای را با حالت زمین تک لایه ای با همدیگر مقایسه می‌کند. برای پوشش کف تونل، نیروی پوشش زمانی که لایه‌ی بالایی سخت تر باشد مقداری بیشتر خواهد بود ($E_L < E_U$). در این حالت حداکثر لنگر خمشی در مقایسه با زمین حالت تک لایه تا ۵ برابر بیشتر می شود، در حالی که حداکثر نیروی محوری تا ۴۰ درصد افزایش می یابد. وقتی که لایه ی پایینی سخت تر است ($E_L > E_U$)، نیروهای پوشش تقریبا مشابه حالتی است که پوشش تک لایه ای است.

صرفنظر از این که کدام لایه سخت تر است، حداکثر لنگر خمشی بیشتر از حالتی است که پوشش تک لایه ای است، به استثنای حالتی که لایه ی پایین خیلی نرم است ($EL = 10MPa$) .

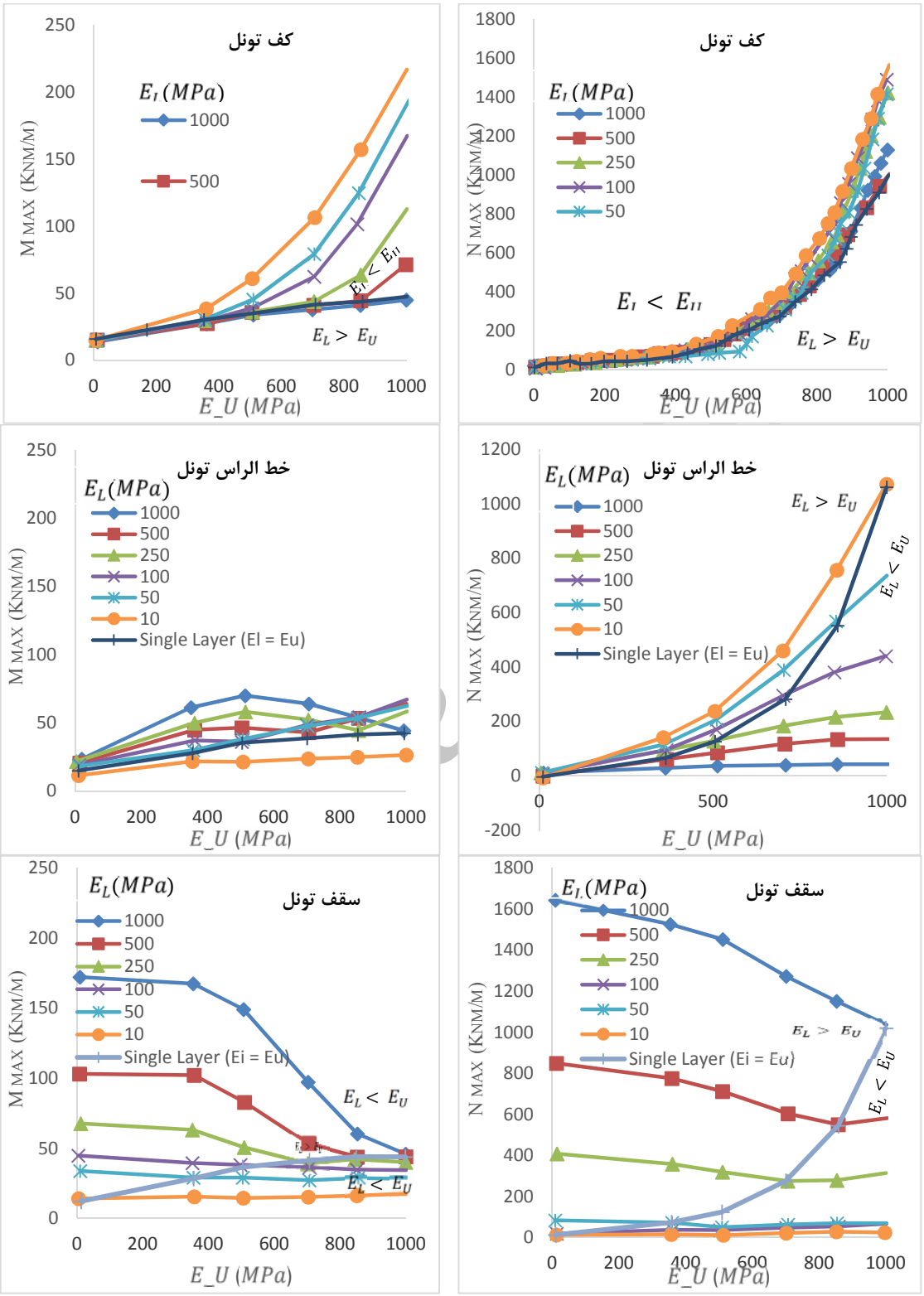
برای تاج تونل، وقتی که لایه ی پایینی، لایه ی سخت تر است($EL > EU$)، حداکثر نیروهای پوشش، وقتی که تفاوت در مقادیر سختی زیاد باشد (بیش از ۱۰۰ برابر بیشتر برای N_{max} و بیش از ۱۷٫۵ برابر برای M_{max})، بطور قابل ملاحظه ای بیشتر از زمانی است پوشش تک لایه ای است. وقتی که لایه ی بالاتر سخت تر است، ($EL < EU$)، نیروهای پوشش تونل نسبت به سختی لایه های بالاتر غیر حساسند.

۴- نتیجه گیری

اثر طبقه بندی خاک ته نشین شده و تاثیر طیف های مختلف سختی آن بر پاسخ لرزه ای در تونل های دایره ای با استفاده از تحلیل دینامیکی مورد تحقیق بوده است.

پاسخ مدل زمین تک لایه ای بدست آمده با تحلیل دینامیکی، مبین آن است که نتایجی نسبتا مشابه با حل ونگ که بر اساس بارگذاری برش ساده ی استاتیکی است، بدست می دهد. تحلیل زمین دو لایه ای نشان داد که طبقه بندی نقش مهمی در نیروهای لرزه ای پوشش دارد. در کل هنگامی که تونل بطور کامل فقط در یکی از لایه ها محاط شده باشد، مثل زمانی که سطح مشترک لایه ها در سقف یا کف تونل باشد، زمانی که لایه ی محیطی نرمتر باشد افزایش قابل توجهی در بارهای لرزه ای اتفاق می افتد. در وضعیت عکس، نیروهای لرزه ای پوشش از حالت زمین تک لایه ای کمتر یا برابر هستند.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۷- نیروی پوشش در کف، مرکز و بالای تونل

www.SID.ir

وقتی تونل از دو لایه می گذرد، حداکثر لنگر خمشی عموما بیشتر می شود. در حالی که حداکثر نیروی محوری فقط اگر لایه ی پایینی سخت تر باشد، زیاد می‌شود. استفاده از خواص خطی معادل در حل های تحلیلی به عنوان یک روش تقریبی در شبیه سازی غیر خطی بودن خاک می تواند با موفقیت به عنوان طراحی لرزه ای مقدماتی تونل های دایره ای به کار برود. برای طراحی با جزئیات، تحلیل اجزا محدود زمان مند، باید یک مدل تشکیل شده ی مقتضی که می تواند جنبه های مهم رفتار خاک را تحت بارگذاری لرزه ای کنترل کند و نیز باید توانایی شبیه سازی خاکبرداری و ساخت تونل دارای باشد، را بکار گرفت.

پیوست الف: راه حل‌های تحلیلی روش ونگ

این ضمیمه معادله‌های بکار گرفته شده بوسیله‌ی روش تحلیلی ونگ برای محاسبه‌ی نیروی محوری N، لنگر خمشی M و تغییر شکل طبیعی پوشش R را برای فرض سطوح بدون لغزش به طور خلاصه بیـان می‌کنـد *(Wang, 1993)*:

$$M=-\frac{1}{6}K_1\frac{E_m}{(1+\upsilon_m)}\gamma_{ff}\cos 2\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right);$$

$$T=-K_2\frac{E_m}{2(1+\upsilon_m)}.r.\gamma_{ff}\cos 2\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right),$$

$$R=\frac{\Delta D_1}{\Delta D_{ff}}=\pm\frac{1}{3}K_1F\gamma_{ff}$$

$$K_1=\frac{12(1-\upsilon_m)}{2F+5-6\upsilon_m};$$

$$K_2=1+\frac{F(1-2\upsilon_m)(1-C)-0.5(1-2\upsilon_m)^2+2}{F[(3-2\upsilon_m)+(1-2\upsilon_m)C_j+C(2.5-8\upsilon_m+6{\upsilon_m}^2)+6-8\upsilon_m}$$

$$C=\frac{E_m(1-{\upsilon_l}^2)r}{E_l.t(1+\upsilon_m)(1-2\upsilon_m)};\ F=\frac{E_m(1-{\upsilon_l}^2)r^3}{6E_l(1+\upsilon_m)}$$

Em و E_L به ترتیب مدول یانگ محیط و پوشش هستند. ν_m و ν_l نسبت های پواسون در محیط و پوشش هستند. l لنگر داخلی برای عرض واحد و بصورت خطی و θ تغییر زاویه در پوشش تونل است. γ_{ff} حداکثر کرنش برشی منطقه آزاد عمل در سطحی از تونل است. ΔD_l تغییر شکل پوشش است. ΔD_{ff} کرنش قطری مطابق با آن برای یک مقطع عرضی دایره ای برای زمین پیوسته و حفر نشده است.

۵- مراجع

Amorosi, A. B. & Baldini, D. (2009). Numerical modelling of the transverse dynamic behavior of circular tunnels in clayey soils. Soil Dynamics and and Earthquake Engineering., 59-72.

Bobet, A. (2003). Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading. Tunnelling & Underground Space Technology., 77-93.

Hoeg, K. (1968). Stresses against underground structural cylinders. Soil Mech Found Div; ASCE.

Kontoe, S. A., Avgerinos, V. & Potts, D. M. (2009). Numerical validation of analytical solutions and their use for equivalent-linear seismic analysis of circular tunnels. Soil Dynamics and Earthquake Engineering., 06-19.

Owen, G. N., & Scholl, R. E. (1981). Earthquake engineering of large underground structures. Washington: Federal Highway Administration and National Science Foundation.

Penzien, J. (2000). Seismically induced racking of tunnel linings. International Journal of Earth Structures and Dynamics., 83-91.

Penzien, J. W., Wu, C. (1998). Stresses in linings of bored tunnels. International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics., 283-300.

Sedarat, H., Kozak, A., Hashash YMA., Shamsabadi, A., & Krimotat, A. (2009). Contact interface in seismic analysis of circular tunnels. Tunnelling & Underground Space Technology., 82-90.

Arhive of SID
www.SID.ir

Wang, J. N. (1993). Seismic design of tunnels: a state-of-the-art approach. (Monograph). NewYork: Parsons Brinckerhoff Quadeand Douglas Inc.

Arhive of SID

www.SID.ir