

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^{۱*}؛ سید امین اصغری پری^۲؛ ساسان معتقد^۲؛ سید علی اصغری پری^۱

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران؛ دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الاتبیا

۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الاتبیا

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۵/۱۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2017.4653.1276

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در بررسی حاضر، تاثیر نقش 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 تاثیر نیروهای زلزله برخوردارند 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.</p>	<p>تونل دایره‌ای تغییر شکل بیضوی آنالیز لرزه‌ای خاک همگن آباکوس</p>

۱- پیش‌گفتار

تعداد تونل‌ها در طی دهه‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته است. تعدادی از تونل‌های ساخته شده، در نواحی لرزه خیز بنا شده‌اند. سه نوع از تغییر شکل‌ها، پاسخ تونل به زمین لرزه را طبقه بندی می‌کنند:

۱- تغییر شکل‌های فشاری و کششی محوری

۲- تغییر شکل‌های خمشی طولی

۳- تغییر شکل‌های بیضوی یا تخم مرغی

(Qwen & Scholl, 1981)

پارامتری که بیشترین تاثیر را بر پوشش تونل تحت بارهای لرزه ای دارد، به استثنای مواردی که تونل مستقیماً تحت اثر گسلش دچار تغییر شکل برشی شود، تغییر شکل‌های

بیضوی یا تخم مرغی است (Penzien, 2000).

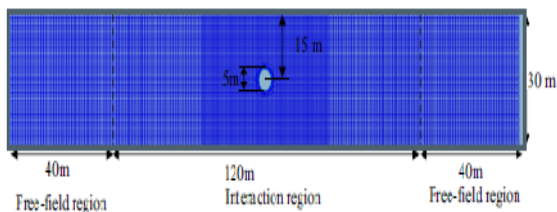
مطالعات انجام شده بیان گر آن است که زمانی که تغییر شکل بیضوی در اثر انتشار امواج طولی یا مورب است، آنگاه امواج برشی منتشر شده ناشی از زلزله، عامل اصلی ایجاد این تغییر شکل‌ها است (Wang, 1993). راه حل‌های تحلیلی ساده شده برای بدست آوردن پاسخ لرزه ای تونل‌ها ابزار مناسبی برای طراحی اولیه است، به نحوی که این روش‌های 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 حل‌های تحلیلی به عنوان یک روش تقریبی شبیه سازی غیر خطی بودن خاک،

۲- مدل‌های عددی

۱-۲- مدل اجزا محدود

شبکه‌ی اجزا محدود، یک توده‌ی خاک با ضخامت ۳۰ متر در شرایط کرنش صفحه‌ای همراه با ۳۱۲۲۶ المان مستطیلی ۴ گره‌ای را در یک سنگ بستر صلب شبیه‌سازی می‌کند (شکل ۱). برای مدل‌سازی اجزا محدود از برنامه‌ی *Abaqus* استفاده می‌شود.



شکل ۱- شبکه اجزاء محدود

از آنجا که تونل‌های نسبتاً کم عمق تا حدودی آسیب پذیرتر از تونل‌های عمیق تحت بارگذاری لرزه‌ای هستند پس مرکز تونل در عمق ۱۵ متری سطح زمین قرار دارد. همچنین قطر تونل دایره‌ای به اندازه‌ی ۵ متر تعریف شده است. پوشش تونل به صورت دایره‌ی پیوسته و نفوذ ناپذیر با رفتار الاستیک خطی که از ۷۲ تا المان تیر دو گره‌ای ساخته شده، مدل می‌شود. اجازه‌ی 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 تماسی بین خاک و پوشش برای جابجایی وجود ندارد، در این مقاله بررسی نمی‌شود.

مدل فقط انتشار عمودی امواج برشی در لایه‌های ویسکو الاستیک قرار گرفته روی بستر سنگ سخت را در نظر می‌گیرد. درجات آزادی در مرزهای کف به صورت کاملاً مهار شده است، زیرا جابجایی‌ها نسبت به پایه محاسبه شده اند. مدل اجزا محدود از یک ناحیه‌ی مرکزی برای شبیه‌سازی اندرکنش تونل و زمین و نیز دو ناحیه‌ی جانبی که پاسخ سطح آزاد زمین را شبیه‌سازی می‌کند، تشکیل شده است. در سطح آزاد زمین تمام گره‌ها در عمق‌های یکسان دارای جابجایی افقی یکسانی هستند و جابجایی

می‌تواند به عنوان طراحی اولیه لرزه‌ای در محاسبات تونل‌ها بکار برده شود (Amorosi & Boldini, 2009). تلاش فراوانی برای بسط راه حل‌های تحلیلی فرم بسته‌ی ساده برای پیش بینی نیرو و گشتاور در پوشش تونل‌های دایره‌ای تحت تغییر شکل‌های بیضوی القایی انجام شده است. فرض این راه‌حل‌ها این است که محیط، الاستیک خطی و همگن است و تغییر شکل بیضوی تحت شرایط کرنش صفحه‌ای شبه‌استاتیکی دو بعدی نتیجه می‌شود.

این مطالعه دو ضعف مهم در روش‌های حل شکل بسته را مورد بحث قرار می‌دهد:

۱- راه حل‌های تحلیلی، اندرکنش بین پوشش و خاک

را شبه‌استاتیکی و بدون لحاظ اندرکنش اولیه در نظر می‌گیرند. همچنین دیگر فرض این راه‌حل‌ها آن است که نیروی برشی به صورت شبه‌استاتیکی با لحاظ نمودن ثابت کرنش برشی و عمق به سطح وارد می‌شود (Kontoe, et al., 2009). تحلیل‌های دینامیکی انجام شده در این مقاله که انتشار قائم امواج برشی قرار گرفته در لایه ویسکو الاستیک همگن روی سنگ بستر سخت را شبیه‌سازی کرده است، نشان دهنده‌ی 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 حل‌های تحلیلی، روش محاسبه‌ای برای محاسبه‌ی سختی بین دو لایه‌ی متوالی بدست نمی‌دهد. به همین دلیل پاسخ لرزه‌ای در تونل‌های دایره‌ای پیچیده‌تر می‌شود و استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای پیش بینی رفتار تونل‌ها به عنوان مهم‌ترین 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 لرزه‌ای موجود در پوشش تشدید می‌شوند.

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، مخصوصاً 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 نمی‌شود.
- در جهت پوشش گذاری، اتصال کامل بین بین خاک و پوشش در نظر گرفته می‌شود 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 می‌شود. 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 گرفته‌اند. 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.

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 کاملاً 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. نهایتاً با توجه به نسبت بین حداقل سرعت موج $V_{min} = 46 \frac{m}{s}$ و بیشترین فرکانس موج ورودی $f_{max} = 10 \text{ Hz}$ ، 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 شده‌اند. خواص مواد در جدول ۱ 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

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

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

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

۲-۴- شبیه سازی عددی و آنالیز دینامیکی بر

اساس روش انتگرال گیری 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 لرزه ی ورودی برای تحریک یکسان تمام فرکانس‌ها، جهت انجام تحلیل اتخاذ شده است (شتاب حداکثری برابر با ۱ متر 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 $\alpha=0$ و $\beta=0.25$ و $\gamma=0.5$ مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- نتایج و بحث

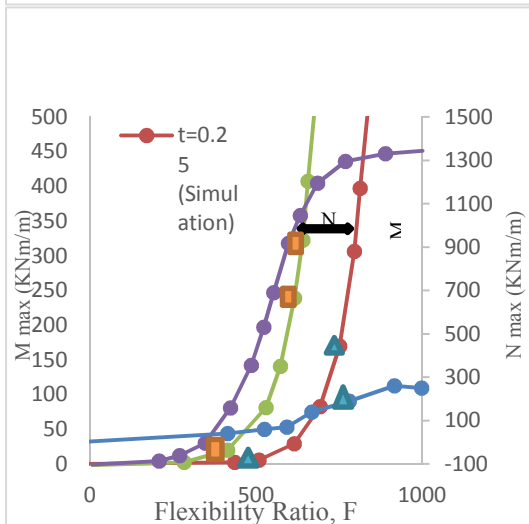
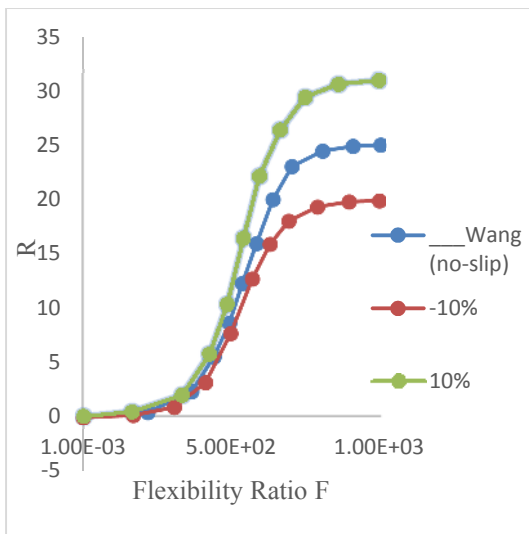
۳-۱- زمین تک لایه ای

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 پذیری F ، و حداکثر مقدار کرنش برشی ناحیه ی 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 های 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 $d=5\ m$ و $E=500\ MPa$ و $tE=10\ MPa$ و فرض عدم لغزش زمین و پوشش)

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 می‌کند. بنظر می‌رسد که تحلیل دینامیکی، تغییر شکل‌های بزرگتری را نسبت به تغییر شکل ناشی از نیروی برشی استاتیکی نتیجه می‌دهد، البته با این فرض که کرنش برشی سطح آزاد یکسان (γ_{ff}) ، برای خاک سخت نمود بیشتری دارد $E_m = 500 \text{ MPa}$. تفاوت‌های میان پاسخ‌های لرزه‌ای پوشش تونل، ناشی از منحنی جابجایی سطح آزاد است. در حالی که تحلیل استاتیکی تغییرات خطی جابجایی با عمق وارد را نشان می‌دهد، تحلیل دینامیکی یک پروفیل منحنی گونه برای جابجایی به دست می‌دهد.

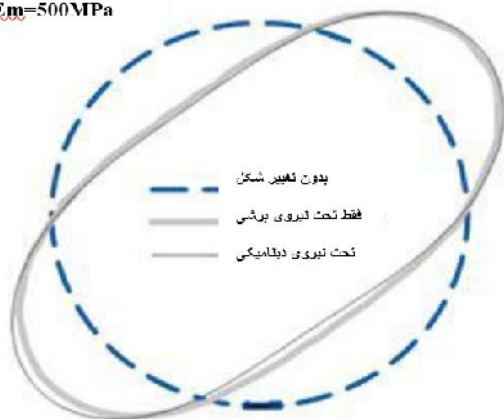
پاسخ مدل بدست آمده با تحلیل دینامیکی، با حل ونگ مقایسه شده است (شکل ۴) (Wang, 1993). پاسخ مدل عموماً مشابه تحلیل ونگ است. برای $F < I$ ، مدل عددی و حل ونگ به خوبی منطبق هستند، در حالی که برای $F > I$ پاسخ مدل عددی نسبت به حل ونگ کمی کمتر از R و M_{max} ، اما کمی بالاتر از N_{max} است.

مقادیر γ از تقسیم مقدار جابجایی سطح

آزاد بین نواحی تاج و جبهه‌ی کنار تونل بر مقدار قطر تونل به دست می‌آید. برای مشخص کردن اثر تفاوت سختی بین لایه‌های 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. عموماً پاسخ مدل از روش حل ونگ تبعیت می‌کند (شکل ۲). مثلاً برای $F < I$ ، یعنی حالتی که تونل از زمین سخت‌تر است، پاسخ‌ها تقریباً منطبق بر همدیگرند. در حالی که برای $F > I$ پاسخ‌های مدل به مقادیرهای بزرگتری از R (۱۰٪) و مقادیر کوچکتر از M_{max} (۲۵٪) نسبت به مقادیر حاصل از روش ونگ می‌رسد. این تاثیر در نتیجه‌ی مجاورت مرزهای مدل مخصوصاً 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 شبیه‌سازی عددی و حل تحلیلی مقادیر یکسان به دست می‌دهند.

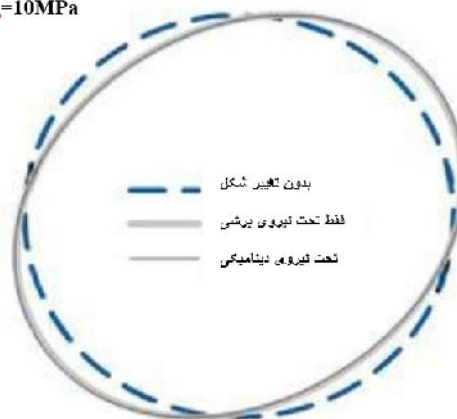
$F=29.8$

$E_m=500\text{MPa}$



$F=0.6$

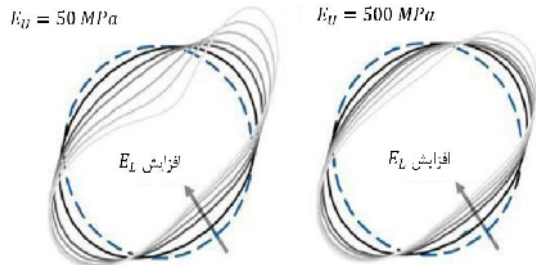
$E_m=10\text{MPa}$



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

مدلسازی عددی پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای کم عمق در زمین‌های لایه‌ای همگن با استفاده از نرم‌افزار...: ص ۱۷-۲۶

$E_U = 500 \text{ MPa}$ محاسبه شده است.



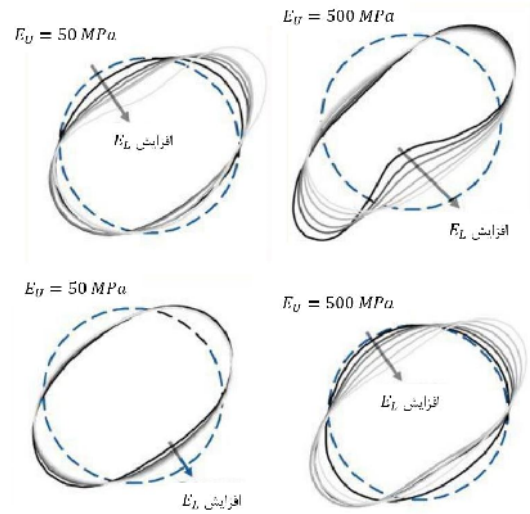
شکل ۵- تغییر شکل کف، جبهه ی میانی و تاج (لایه ی بالا $E_L=10, 50, 100$ و $E=500$ مگاپاسکال، لایه ی پایینی $1000, 500, 250$ و کرنش برشی برابر 0.001 و ضریب تشدید 3.00)

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 شکل‌ها در همسایگی لایه ی محیطی بیشتر می شود. در حالتی که تونل از هر دو لایه‌ی خاک بگذرد، تغییر شکل پوشش نسبتاً 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، تقریباً نسبت به مقادیر بالاتر سختی E_U بی تاثیر است.



شکل ۴- پاسخ دینامیکی (قطر تونل $d=5\text{m}$ و $E=10$ MPa تا $E=500$ 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 25 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 (17.5 متر عمق).
 ۲. مرکز تونل: سطح مشترک لایه از مرکز تونل می گذرد (15 متر عمق).
 ۳. تاج تونل: سطح مشترک لایه از تاج تونل می گذرد (عمق 12.5 متر).
- تفاوت سختی لایه ها، منتج از خواص 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 مقادیری ثابت و برای زمین های نرم برابر $E_U = 50 \text{ MPa}$ و در زمین های سخت

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 می‌شود، در حالی که حداکثر نیروی محوری تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. وقتی که لایه‌ی پایینی سخت تر است ($E_L > E_U$)، نیروهای پوشش تقریباً مشابه حالتی است که پوشش تک لایه ای است.

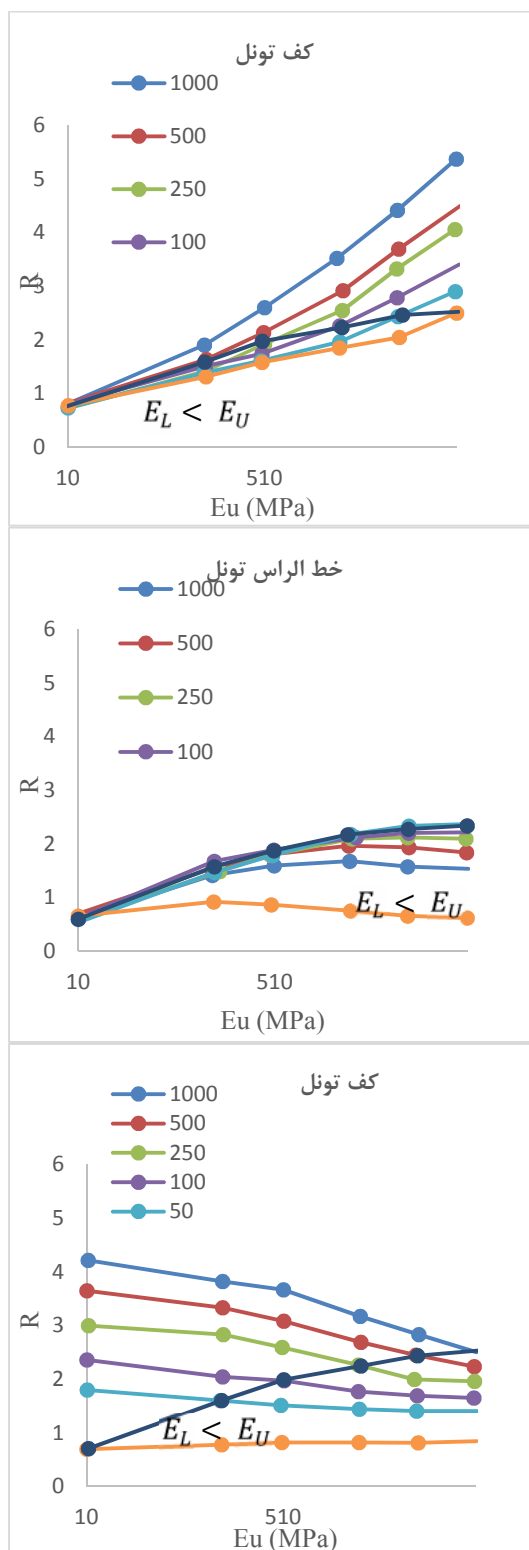
صرفنظر از این که کدام لایه سخت تر است، حداکثر لنگر خمشی بیشتر از حالتی است که پوشش تک لایه ای است، به استثنای حالتی که لایه‌ی پایینی خیلی نرم است ($EL = 10MPa$).

برای تاج تونل، وقتی که لایه‌ی پایینی، لایه‌ی 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 ملاحظه‌ای بیشتر از زمانی است پوشش تک لایه ای است. وقتی که لایه‌ی بالاتر سخت تر است، ($EL < EU$)، نیروهای پوشش تونل نسبت به سختی لایه‌های بالاتر غیر حساسند.

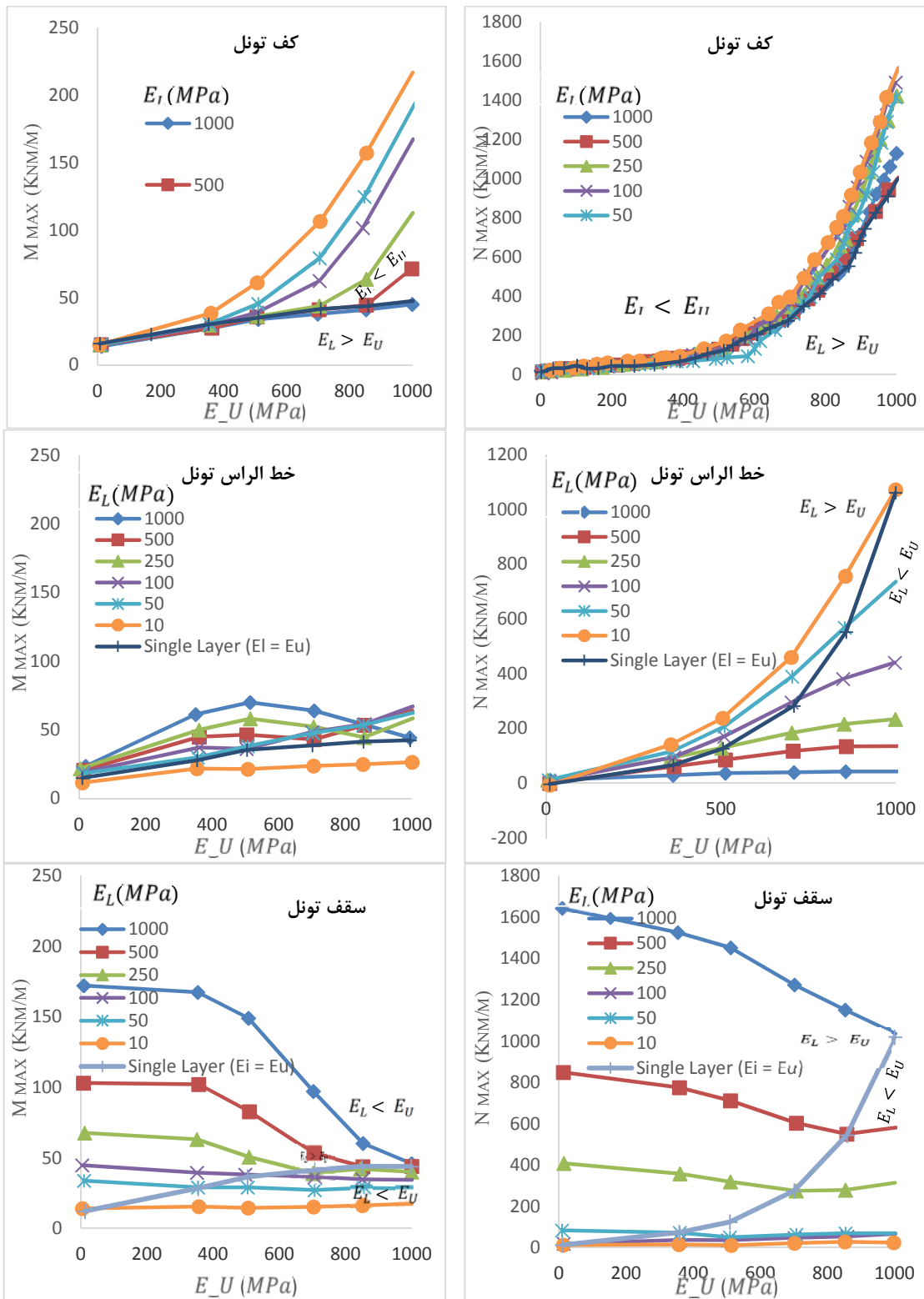
۴- نتیجه‌گیری

اثر طبقه بندی خاک ته نشین شده و تاثیر طیف‌های مختلف سختی آن بر پاسخ لرزه‌ای در تونل‌های دایره‌ای 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 نسبتاً مشابه با حل ونگ که بر اساس بارگذاری برش ساده‌ی استاتیکی است، بدست می‌دهد. تحلیل زمین دو لایه ای نشان داد که طبقه بندی نقش مهمی در نیروهای لرزه‌ای پوشش دارد. در کل هنگامی که تونل بطور کامل فقط در یکی از لایه‌ها محاط شده باشد، مثل زمانی که سطح مشترک لایه‌ها در سقف یا کف تونل باشد، زمانی که لایه‌ی محیطی نرم‌تر باشد افزایش قابل توجهی در بارهای لرزه‌ای اتفاق می‌افتد. در وضعیت عکس، نیروهای لرزه‌ای پوشش از حالت زمین تک لایه ای کمتر یا برابر هستند.



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



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

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

$$R = \frac{\Delta D_1}{\Delta D_{ff}} = \pm \frac{1}{3} K_1 F \gamma_{ff}$$

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

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

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

E_L و E_m به ترتیب مدول یانگ محیط و پوشش هستند. ν_l و ν_m نسبت‌های 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_1 تغییر شکل پوشش است. ΔD_{ff} کرنش قطری مطابق با آن برای یک مقطع عرضی دایره‌ای برای زمین پیوسته و حفر نشده است.

وقتی تونل از دو لایه می‌گذرد، حداکثر لنگر خمشی عموماً بیشتر می‌شود. در حالی که حداکثر نیروی محوری فقط اگر لایه‌ی پایینی سخت‌تر باشد، زیاد می‌شود. استفاده از خواص خطی معادل در حل‌های تحلیلی به عنوان یک روش تقریبی در شبیه‌سازی غیرخطی بودن خاک می‌تواند با موفقیت به عنوان طراحی لرزه‌ای مقدماتی تونل‌های دایره‌ای به کار برود. برای طراحی با جزئیات، تحلیل اجزا محدود زمان‌مند، باید یک مدل تشکیل‌شده‌ی مقتضی که می‌تواند جنبه‌های مهم رفتار خاک را تحت بارگذاری لرزه‌ای کنترل کند و نیز باید توانایی شبیه‌سازی خاکبرداری و ساخت تونل‌داری باشد، را بکار گرفت.

پیوست الف: راه‌حل‌های 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 بیان می‌کند (Wang, 1993):

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

۵- مراجع

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

مدلسازی عددی پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای کم عمق در زمین‌های لایه‌ای همگن با استفاده از نرم‌افزار... : ص ۱۷-۲۶

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