

تحلیل لرزه‌ای تونل‌های مستطیلی ساخته‌شده به روش حفر و پوشش، اندرکنش تونل و زمین

علی لکی روحانی*، شبنم ولی اسکویی

دانشکده فنی (گروه عمران)، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۸ بهمن ۱۳۹۲
بازنگری: ۴ آبان ۱۳۹۳
پذیرش: ۲۴ دی ۱۳۹۳
ارائه آنلاین: ۶ مهر ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

تحلیل لرزه‌ای
روش حفر و پوشش
تونل مستطیلی
نشست سطحی زمین

چکیده: یکی از روش‌های حفر و ساخت تونل، روش حفر و پوشش است که در آن، حفاری از سطح زمین شروع و سپس کف دیواره‌ها و سقف بتنی تونل در عمق مورد نظر ساخته می‌شود. در این روش خاص، مقطع تونل دیگر دایره‌ای نیست و مستطیلی می‌شود. هدف این مقاله به طور ویژه تحلیل لرزه‌ای تونل‌های مستطیلی است. برای یک شتابنگاشت خاص، هندسه تونل، عمق روباره و شرایط زمین، سه دسته از عوامل تأثیرگذار بر روی رفتار دینامیکی تونل‌ها هستند. برای این منظور و با کمک روش عددی، مدل‌هایی دو بعدی از این نوع تونل‌ها در شرایط کرنش مسطح ساخته و تحلیل شدند. مطابق با نتایج بدست‌آمده، بیشینه نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل و تمرکز تنش، در گوشه‌های مقطع تونل مستطیلی ایجاد می‌شوند. در حالت لرزه‌ای، نیروهای داخلی ایجاد شده در پوشش تونل نسبت به حالت استاتیکی تا چندین برابر افزایش می‌یابند. همچنین در این وضعیت، پروفیل نشست سطحی زمین نامتقارن شده و مقدار نشست نسبت به حالت استاتیکی افزایش می‌یابد. در صورتی که در مدل‌های دو بعدی در تونل‌های با عرض زیاد یک ستون در وسط قرار داده شود، نشست زمین، لنگر خمشی و نیروی برشی نسبت به تونل تک‌دهانه با ابعاد یکسان کمتر خواهد شد.

۱- مقدمه

با افزایش دانش مهندسی در زمینه فضاهای زیرزمینی در دو دهه گذشته، پیشرفت چشمگیری در توسعه شریان‌های زیرزمینی بدست آمده است. یکی از این شریان‌های اصلی، تونل‌های زیرزمینی هستند. روش حفر و پوشش یکی از روش‌های ساخت تونل است. کارایی این روش زمانی است که در وهله اول تونل سطحی باشد و در وهله بعد محدودیتی در روی سطح زمین از جهت حفاری وجود نداشته باشد. در آن صورت، حفاری از روی سطح زمین آغاز شده و یک دال بتنی ضخیم در عمق مورد نظر به عنوان کف تونل و سپس دیواره‌ها و سقف بتنی ساخته می‌شود و در نهایت نیز با خاک‌ریزی بر روی آن، تونل در زمین مدفون می‌گردد. بنابراین، شکل تونل دارای مقطعی مستطیلی خواهد بود.

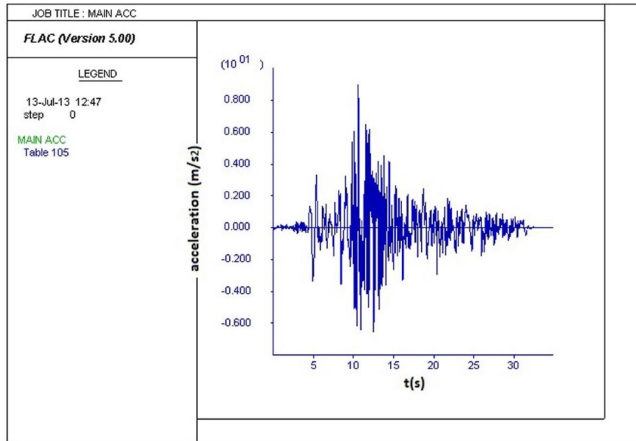
تا قبل از زلزله‌های به وقوع پیوسته در دو دهه اخیر، تصور بر این بود که تونل‌ها سازه‌های پایداری هستند [۴]. لازم به ذکر است در صورتی که تونلی دارای مقطع دایره‌ای باشد و در محیط همگن و الاستیک و در عمق زیاد حفر شود، این تصور تا حدودی درست است و می‌توان گفت که از یک پایداری نسبی برخوردار است. اما در صورتی که هر یک از شرایط فوق وجود نداشته باشد، در آن صورت تحلیل رفتار استاتیکی و دینامیکی تونل از اهمیت

ویژه‌ای خواهد داشت. مفهوم پایداری در این‌جا از دو جهت معنا دارد: در وهله اول تغییر شکل‌های ایجاد شده در زمین در محدوده مجاز باشند و در وهله بعدی، نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل به نحوی نباشند که موجب شکست پوشش و گسیختگی آن شوند.

تغییر شکل‌های بیضی‌شده تونل‌های دایروی و یا تا شدگی تونل‌های مستطیلی در اثر تنش‌های برشی در محیط را می‌توان با مدل‌های مختلفی تحلیل کرد؛ از مدل‌های شبه‌استاتیکی خطی تا تحلیل‌های پیچیده غیرخطی و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه. تحلیل‌های شبه‌استاتیکی ساده‌شده می‌توانند اندرکنش خاک و سازه را در نظر بگیرند و یا نگیرند. صرف نظر کردن از اندرکنش خاک و سازه، به معنی آن است که سازه تونل از تغییر شکل میدان آزاد زمین پیروی می‌کند [۵،۹]. لازم به ذکر است که این ساده‌سازی منجر به نتایج غیرمطمئن می‌شود؛ به ویژه هنگامی که سازه از محیط پیرامون خود انعطاف‌پذیرتر باشد [۶]. به همین دلیل، چندین روش تحلیلی و عددی برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در مدل‌های ساده‌شده پیشنهاد شد که اغلب آن‌ها، در ارتباط با تونل‌های دایروی کاربرد دارند [۵،۹]. در مورد تونل‌های مستطیلی (که موضوع بحث این مقاله هستند)، چندین روش نیز ارائه شده است [۱۰-۱۲]. فرضیات مشترک بین تمامی تحلیل‌های ساده‌شده عبارتند از:

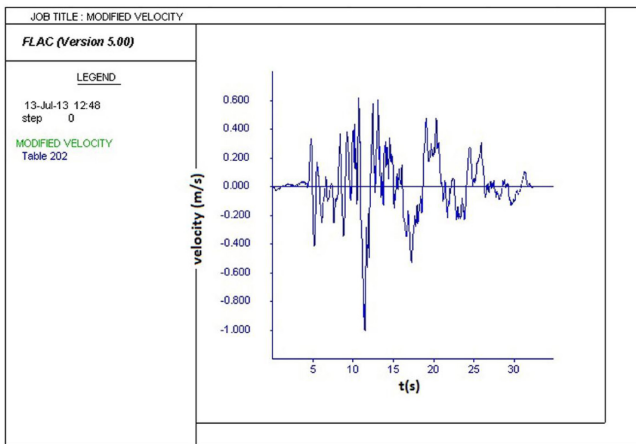
الف) در نظر گرفتن شرایط کرنش مسطح برای مدل

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rou001@znu.ac.ir



شکل ۱: شتاب نگاشت زلزله ورودی

Fig. 1. Input motion, time acceleration



شکل ۲: تابع سرعت نگاشت بعد از اصلاح خط پایه

Fig. 2. Input motion, time velocity

۲-۲- هندسه مدل

هندسه مدل شامل محیطی به عرض و عمق ۱۵۰ متر است. با توجه به ارزیابی حساسیت انجام شده بر روی اندازه مش در اطراف تونل و در ناحیه‌ای به عرض ۳۰ متر و عمق ۵۰ متر، اندازه مش‌ها کمی کوچکتر از سایر قسمت‌ها انتخاب شده است (شکل ۳).

۲-۳- مشخصات مکانیکی خاک استفاده شده در مدلسازی

رفتار محیط الاستو-پلاستیک با معیار گسیختگی موهر-کولمب در نظر گرفته شده است. برای مدول برشی دینامیکی محیط، داریم [۳]:

$$G_s = \frac{3230(2.97 - e)^2}{1 + e} \sqrt{\sigma_0} \quad (1)$$

که در آن، G_s و σ_0 برحسب کیلو پاسکال و e نسبت تخلخل خاک است.

ب) فرض تغییر شکل‌های الاستیک خطی برای سازه و زمین

پ) فرض تحلیل شبه‌استاتیکی

لازم به ذکر است که به جز روش پیشنهادی وانگ^۱ (۱۹۹۳)، برخی از روابط تحلیلی ساده شده [۶، ۱۱، ۱۲] عمق روباره زیادی را برای تونل لحاظ کرده‌اند و همچنین فرض کرده‌اند که در فصل مشترک خاک و سازه (جدار تونل)، لغزش وجود ندارد.

مقاله دیگری نیز که اخیراً منتشر شده است [۲]، شامل نتایج ارزیابی‌های انجام شده بر روی تونل‌های دایروی و مستطیلی است. در این مقاله، دو حالت برای سطح مشترک خاک و سازه در نظر گرفته شده است: یا کاملاً پیوسته و مقید و یا بدون اصطکاک. اما همچنان فرض شده که تونل در عمق زیاد در زمین مدفون است و خاک رفتاری کاملاً الاستیک دارد.

پژوهش حاضر، به تحلیل لرزه‌ای تونل‌های سطحی مستطیلی می‌پردازد و هدف از آن، بررسی رفتار لرزه‌ای تونل تحت شرایط مختلفی است که تونل در آن شرایط ساخته می‌شود. ابعاد تونل و عمق قرارگیری تونل، دو عامل اصلی در نشست سطحی زمین و همچنین نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل هستند که در این مقاله به آن‌ها پرداخته شده است. تونل در شرایطی در زمین ایجاد می‌شود که زمین دارای تنش‌های اولیه باشد و بنابراین، عامل دیگری که در این مقاله مورد بحث قرار گرفته، تأثیر عامل نسبت تنش‌های افقی و قائم در زمین است. همچنین از آنجایی که فرض شده است که تونل به روش حفر و پوش احداث شده، بنابراین جنس خاک پیرامون و بالای تونل متفاوت از محیط اصلی است که این مسئله نیز در نیروهای ایجاد شده در پوشش و نشست سطحی زمین مؤثر بوده و مورد بررسی قرار گرفته است. مدلسازی با استفاده از نرم‌افزار FLAC به صورت دوبعدی و در شرایط کرنش مسطح انجام شده است. فرض شده که محیط از خاک ماسه‌ای با مدل رفتاری الاستو پلاستیک کامل و معیار خرابی موهر-کولمب^۲ است. در ادامه مقاله، چگونگی مدلسازی موج ورودی برای انجام تحلیل لرزه‌ای با شتابنگاشت انتخابی زلزله طیس آورده شده و پس از آن، نحوه تعیین مشخصات مکانیکی زمین و مؤلفه‌های دینامیکی مدل (شامل میرایی و غیره) مشخص شده است. پس از آن، نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۲- مدلسازی عددی

۲-۱- مدلسازی موج ورودی

شتابنگاشتی که برای انجام تحلیل‌ها استفاده شده، شتابنگاشت زلزله طیس با بیشینه شتاب $0.83g$ و مدت زمان $32/82$ ثانیه است. با استفاده از برنامه نوشته شده در قالب دستورات توابع FISH، شتاب نگاشت اصلاح شده و سرعت‌های ناشی از رکورد شتاب زلزله، بدست آورده می‌شوند (شکل‌های ۱ و ۲).

¹ J. N. Wang

² Mohr- Coloumb

جدول ۲: مشخصات مکانیکی خاک بدست‌آمده از روابط

Table 2. The mechanical properties of soil obtained from the relations

مقدار	مشخصه
$5/5 \times 10^5$	G_s (کیلو پاسکال)
$1/4 \times 10^6$	E_s (کیلو پاسکال)
$9/2 \times 10^5$	K_s (کیلو پاسکال)

انجام و پوشش تونل نصب می‌شود. برای پوشش از عنصر Liner (که قادر به تحمل نیروهای محوری، خمشی و برشی بوده)، استفاده شده است. مشخصات هندسی مقطع پوشش بتنی تونل که در مدلسازی بکار رفته، در جدول ۳ آورده شده است.

۲-۵- مدلسازی دینامیکی

عوامل میرایی رایلی^۱ از بیشترین سطح کرنش الاستیک میرایی چرخه‌ای بدست می‌آیند. این مؤلفه‌ها منطبق بر سطح کرنش یکنواخت خطی 0.065 درصد (۶۵ درصد متوسط کرنش‌های الاستیک بیشینه در مدل) هستند. به عقیده کرامر (۱۹۹۶)، کرنش‌های معادل و یا مؤثر در ۶۵ درصد کرنش بیشینه رخ می‌دهد. میرایی از رابطه ۳ بدست می‌آید [۳]:

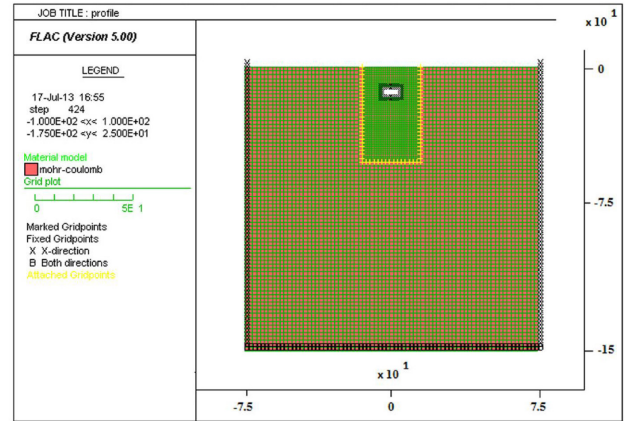
$$\xi = \frac{50 - 0.087 \sigma_0}{38} (73.3 F - 53.3) \gamma^{0.3} \quad (3)$$

(1.01 - 0.046 log N)

که در آن، ξ درصد میرایی، σ_0 تنش مؤثر، γ درصد کرنش برشی، F ضریب کرویت دانه‌های خاک و N تعداد چرخه‌های کرنش اعمال شده هستند. سرعت موج برشی از رابطه ۴ بدست می‌آید [۷]:

$$C_s = \sqrt{\frac{G_s}{\gamma_s}} \quad (4)$$

که در آن، γ_s وزن مخصوص خاک بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و G_s



شکل ۳: نمونه مدل عددی تونل مستطیلی و محیط پیرامون

Fig. 3. The numerical model of rectangular tunnel and surrounding

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (2)$$

در این رابطه، σ_1 تنش مؤثر قائم و σ_3 تنش مؤثر افقی برحسب کیلو پاسکال است. مشخصات فرض شده و بدست‌آمده برای محیط خاکی به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده‌اند که در آن‌ها، ν_s ضریب پواسون، e نسبت تخلخل، C چسبندگی و γ_s وزن مخصوص خاک، K_0 ضریب فشار جانبی خاک، E_s مدول الاستیسیته و K_s مدول بالک (حجمی) خاک است.

۲-۴- مدلسازی اولیه و برقراری تعادل استاتیکی

بعد از معرفی مشخصات مصالح، شرایط مرزی به مدل اعمال می‌شود. مرز افقی پایین در هر دو جهت x و y و مرزهای قائم جانبی، تنها در جهت x ثابت می‌شوند. بعد از اعمال شرایط مرزی، مسئله به صورت الاستیک و تحت شرایط تعادل اولیه حل می‌شود (لازم به ذکر است که در این مرحله، هیچ‌گونه حفاری انجام نمی‌شود). بعد از فراهم‌شدن تعادل اولیه، حفاری تونل

جدول ۱: مشخصات فرض شده برای محیط خاکی

Table 1. The properties assumed for the soil environment

مقدار	مشخصه
۰/۲۵	ν_s
۰/۳	e
۳۵	ϕ (درجه)
صفر	C (کیلوگرم بر متر مربع)
۲۱۰۰	γ_s (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰/۴	K_0

جدول ۳: مشخصات پوشش بتنی تونل

Table 3. Parameters of concrete lining

مقدار	نشانه	مشخصه
۲۵۰۰	γ_c	وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)
$2/48 \times 10^7$	E_c	مدول الاستیسیته (کیلو پاسکال)
۰/۲	ν_c	ضریب پواسون
۱	t	ضخامت (متر)

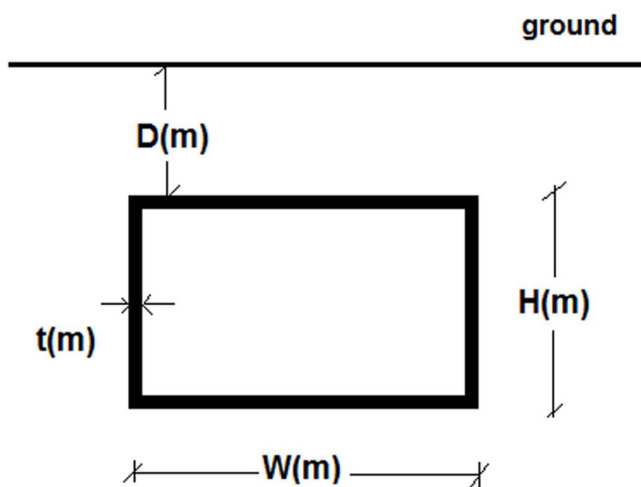
¹ Rayleigh damping factors

بر روی این دو مشخصه انجام شده که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد. در این مقاله، در هر جا که سخن از نیروهای داخلی پوشش است، منظور بیشترین نیروی داخلی ایجاد شده در پوشش خواهد بود.

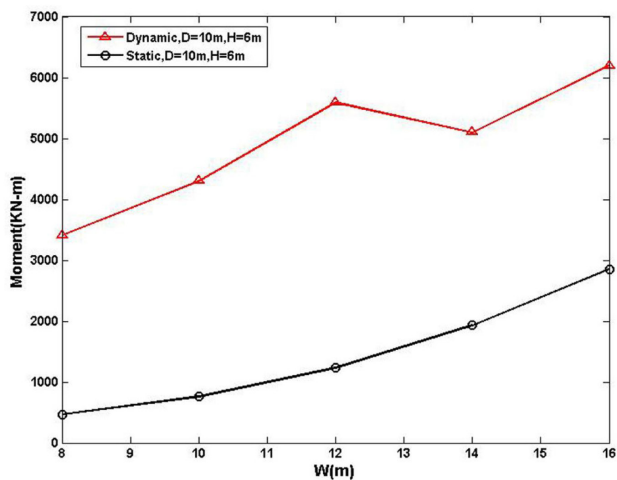
۳-۱- تأثیر هندسه تونل بر رفتار لرزه‌ای

۳-۱-۱- اثر تغییر عرض

برای بررسی تأثیر عرض تونل بر مقادیر نیروهای داخلی و همچنین پروفیل نشست، مدل‌هایی با عرض متفاوت (شکل ۵) ساخته می‌شوند که نتایج تحلیل این مدل‌ها در جدول و نمودارهای زیر مشخص است. مطابق با این نتایج، نیروهای داخلی پوشش بتنی با بالا رفتن عرض تونل



شکل ۵: نمایش مؤلفه‌های استفاده شده در تونل مستطیلی
Fig. 5. Demonstration of the parameters used in the rectangular tunnel



شکل ۶: تغییرهای لنگر خمشی پوشش در مقابل تغییر عرض تونل
Fig. 6. Variations in the bending moment of the lining with changes in the tunnel width

جدول ۴: نسبت میرایی و سرعت موج برشی بدست آمده از روابط
Table 4. Damping ratio and shear velocity obtained from relations

مقدار	مشخصه
۱۰	ξ (درصد)
۵۱۱	C_s (متر بر ثانیه)

بر حسب پاسکال است. بر این اساس، مقادیر سرعت موج برشی و میرایی محیط مطابق با جدول ۴ بدست می‌آید.

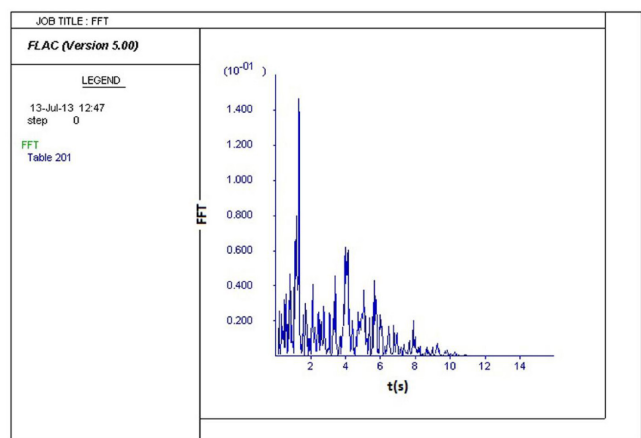
بسامد مرکزی، همان بسامد غالب است که از روی تابع فوریه^۱ (شکل ۴) بدست می‌آید و مقدار آن در حدود ۱ تا ۱/۵ هرتز بوده که در مدلسازی‌ها ۱/۳ هرتز انتخاب شده است.

پس از آن که میرایی محیط تعیین شد، شرایط مرزی دینامیکی به سامانه اعمال خواهد شد. برای این منظور، شرایط مرزی میدان آزاد برای مرزهای کناری اعمال می‌شود و برای مرزهای پایینی نیز ضروری است تا مرز آرام به محیط اعمال شود تا اثر انعکاس امواج به کمترین مقدار برسد. با تعریف مرز ویسکوز، ضروری است تا مدل موج به صورت تنش برشی باشد [۷]. با اعمال موج تنش، حل مسئله به صورت دینامیکی آغاز می‌شود.

۳- تحلیل نتایج

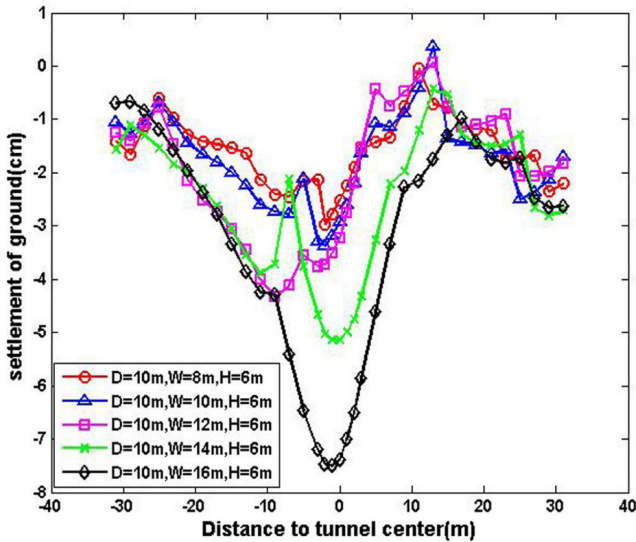
قبل از مدلسازی، صحت‌سنجی کاملی انجام می‌شود که به منظور رعایت اختصار در این مقاله آورده نشده است [۱]. در بین خروجی‌های مختلفی که از تحلیل عددی یک تونل استخراج می‌شوند، بیشترین نیروی‌های ایجاد شده در پوشش بتنی و پروفیل نشست زمین دارای اهمیت ویژه‌ای هستند (اندرکنش بین سازه و زمین). از این رو، مطالعه کاملی بر روی عوامل تأثیرگذار

^۱ Fourier function



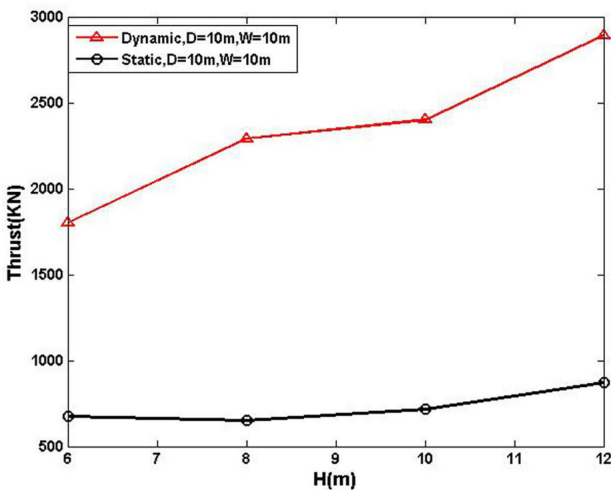
شکل ۴: تابع فوریه تاریخچه زمانی شتاب

Fig. 4. Fourier function Acceleration time history



شکل ۹: پروفیل‌های نشست سطحی زمین برای عرض‌های مختلف تونل در حالت لرزه‌ای

Fig. 9. The ground surface settlement profiles for different widths of the tunnel in the seismic state



شکل ۱۰: تغییرهای نیروی محوری پوشش با تغییر ارتفاع تونل
Fig. 10. Variations in the thrust force of the lining with changes in the tunnel depth

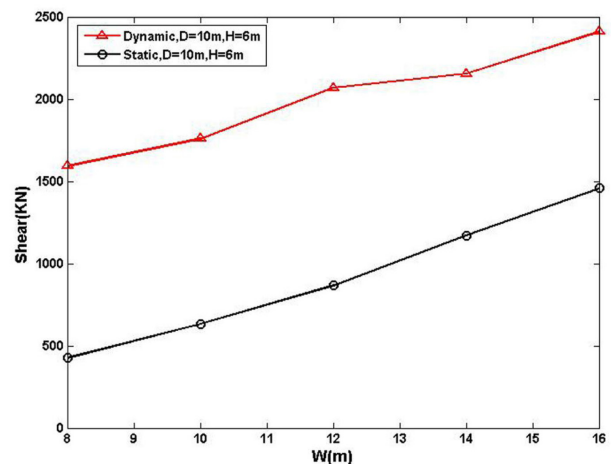
۳-۱-۲ اثر تغییر ارتفاع

در این قسمت، اثر تغییر ارتفاع تونل بر روی رفتار دینامیکی تونل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج تحلیل‌ها برای مدل‌هایی با ارتفاع مختلف در ادامه آورده شده است.

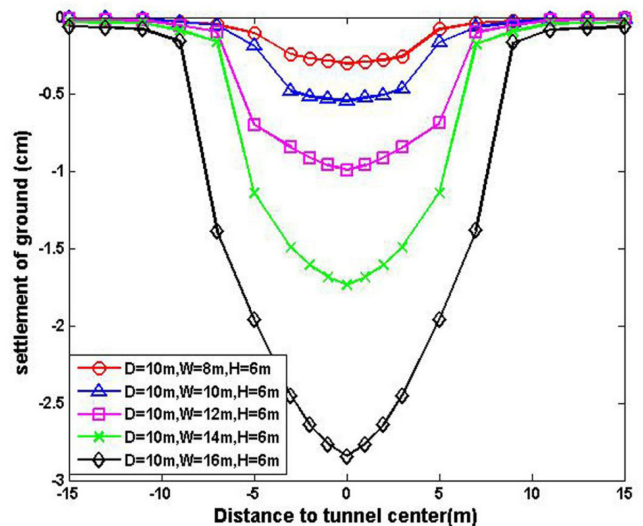
با افزایش ارتفاع تونل، نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی افزایش می‌یابد. اما نرخ افزایش در حالت دینامیکی بسیار بیشتر از حالت

مستطیلی افزایش می‌یابد. در حالت دینامیکی، نیروهای داخلی چندین برابر نیروهای داخلی حالت استاتیکی می‌شوند و در مورد لنگر خمشی، بیشترین افزایش وجود خواهد داشت که لنگر حالت دینامیکی به بیش از ۷ برابر حالت استاتیکی خواهد رسید. اما نسبت نیروها در حالت دینامیکی به استاتیکی با افزایش عرض تونل کاهش می‌یابد.

بدیهی است که حجم توده حفاری شده با افزایش عرض تونل افزایش می‌یابد و نشست سطح زمین نیز بیشتر می‌شود. همچنین پروفیل نشست سطح زمین در حالت دینامیکی نامنظم می‌شود.

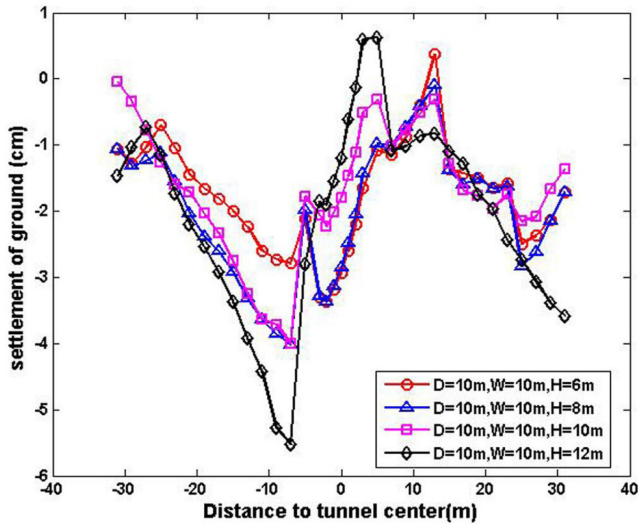


شکل ۷: تغییرهای نیروی برشی پوشش با تغییر عرض تونل
Fig. 7. Variations in the shear force of the lining with changes in the tunnel width



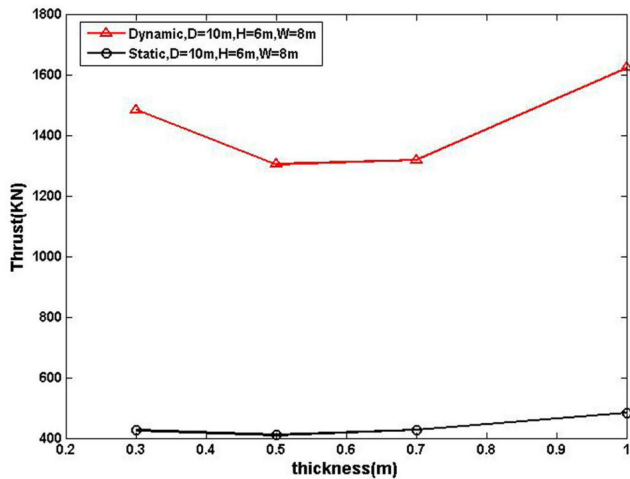
شکل ۸: پروفیل‌های نشست سطحی زمین برای عرض‌های مختلف تونل در حالت استاتیکی

Fig. 8. The ground surface settlement profiles for different widths of the tunnel in the static state



شکل ۱۳: پروفیل‌های نشست سطحی زمین برای ارتفاع‌های مختلف تونل در حالت لرزه‌ای

Fig. 13. The ground surface settlement profiles for different depth of the tunnel in the seismic state



شکل ۱۴: تغییرهای نیروی محوری پوشش با تغییر ضخامت پوشش

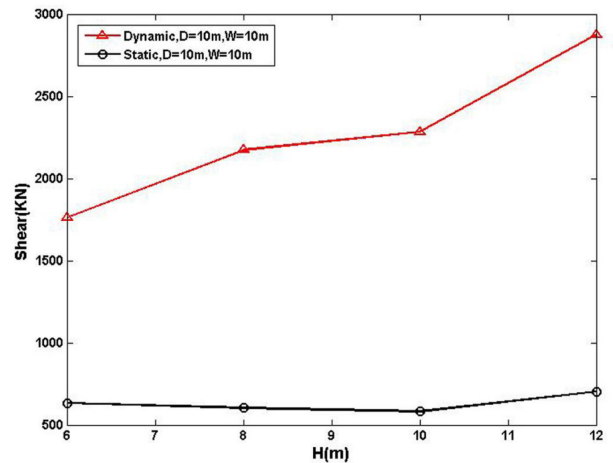
Fig. 14. Variations in the thrust force of the lining with changes in the tunnel width

مطابق با نتایج بدست آمده و همان‌طور که در نمودارها نیز مشاهده می‌شود، سختی پوشش با افزایش ضخامت پوشش بیشتر می‌شود و در نتیجه، انرژی جذب‌شده توسط پوشش بیشتر و نیروها نیز افزایش می‌یابند. نرخ افزایش نیروها در حالت دینامیکی بیشتر از استاتیکی است. نشست سطح زمین در حالت استاتیکی در زیر و مجاورت تونل، با کاهش

استاتیکی است. با افزایش ارتفاع تونل، نشست بیشینه زمین در امتداد محور تونل در حالت استاتیکی کاهش می‌یابد. اما مقدار نشست با فاصله از محور افزایش خواهد یافت.

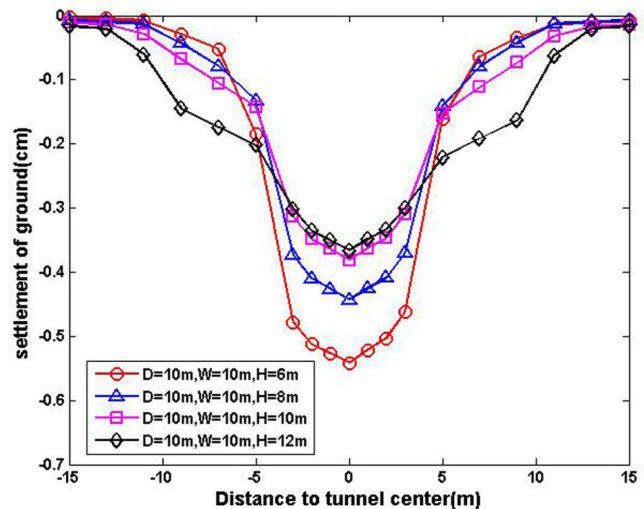
۳-۱-۳ اثر تغییر ضخامت پوشش بتنی تونل

ضخامت پوشش بتنی دیگر مؤلفه مؤثر بر مقادیر نیروها و نشست سطحی زمین بوده که در این قسمت، نتایج مربوط به آن آورده شده است. برای بررسی اثر ضخامت پوشش، تونلی با ابعاد ۸ در ۶ متر در عمق ۱۰ متری لحاظ می‌شود.



شکل ۱۱: تغییرهای نیروی برشی پوشش با تغییر ارتفاع تونل

Fig. 11. Variations in the shear force of the lining with changes in the tunnel depth



شکل ۱۲: پروفیل‌های نشست سطحی زمین برای ارتفاع‌های مختلف تونل در حالت استاتیکی

Fig. 12. The ground surface settlement profiles for different depth of the tunnel in the static state

جدول ۵: تغییرهای نیروی محوری پوشش با تغییر عرض تونل

Table 5. Variations in the thrust force of the lining with changes in the tunnel width

W (متر)	H (متر)	D (متر)	t (متر)	نیروی محوری استاتیکی (کیلو نیوتون)	نیروی محوری دینامیکی (کیلو نیوتون)	نسبت نیروی محوری دینامیکی به استاتیکی
۸	۶	۱۰	۱	۴۸۴	۱۶۲۲	۳/۳
۱۰	۶	۱۰	۱	۶۷۶	۱۸۰۵	۲/۷
۱۲	۶	۱۰	۱	۸۹۶	۲۱۶۵	۲/۴
۱۴	۶	۱۰	۱	۱۲۰۳	۲۲۳۰	۱/۹
۱۶	۶	۱۰	۱	۱۴۹۱	۲۵۰۸	۱/۷

جدول ۶: جدول تغییرهای لنگر خمشی پوشش با تغییر ارتفاع تونل

Table 6. Variations in the bending moment of the lining with changes in the tunnel depth

W (متر)	H (متر)	D (متر)	t (متر)	لنگر خمشی استاتیکی (کیلو نیوتون متر)	لنگر خمشی دینامیکی (کیلو نیوتون متر)	نسبت لنگر خمشی دینامیکی به استاتیکی
۱۰	۶	۱۰	۱	۷۶۲	۴۳۰۰	۵/۶
۱۰	۸	۱۰	۱	۷۷۳	۵۵۶۱	۷/۱
۱۰	۱۰	۱۰	۱	۸۲۱	۶۲۶۳	۷/۶
۱۰	۱۲	۱۰	۱	۱۰۳۱	۸۱۹۷	۸

جدول ۷: جدول تغییرهای نیروی برشی پوشش با تغییر ضخامت پوشش

Table 7. Variations in the shear force of the lining with changes in the lining thickness

W (متر)	H (متر)	D (متر)	t (متر)	نیروی برشی استاتیکی (کیلو نیوتون)	نیروی برشی دینامیکی (کیلو نیوتون)	نسبت نیروی برشی دینامیکی به استاتیکی
۸	۶	۱۰	۰/۳	۳۹۶	۹۹۱	۲/۵
۸	۶	۱۰	۰/۵	۳۹۲	۱۱۱۶	۲/۸
۸	۶	۱۰	۰/۷	۴۰۳	۱۱۸۲	۲/۹
۸	۶	۱۰	۱	۴۲۷	۱۵۹۵	۳/۷

نتیجه بدست آمده از مقایسه دو حالت، قابل توجه است. مقدار نیروی برشی، لنگر خمشی و نشست در مورد تونل دو دهانه کمتر از تونل تک دهانه با ابعاد مشابه است. اما نیروی محوری در حالت استاتیکی در تونل دو دهانه بیشتر از تک دهانه شده است.

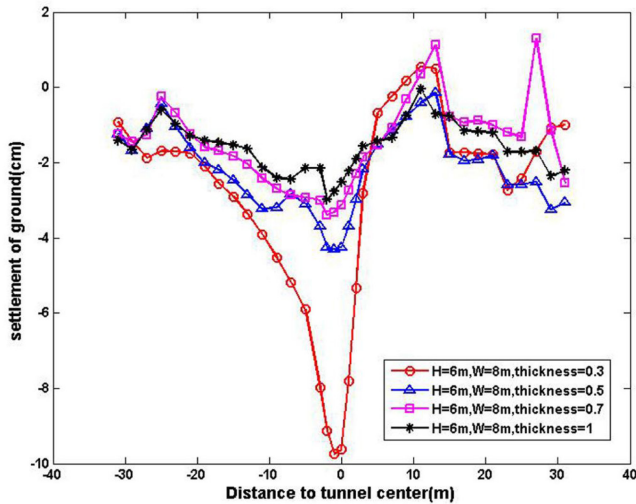
۳-۲- اثر ناهمگونی محیط پیرامون تونل بر رفتار لرزه‌ای

در تونل زنی به روش حفر و پوش، جنس خاک اطراف (به دلیل دست خوردگی و بالای تونل به دلیل حفاری و خاکریزی مجدد) متفاوت از خاک محیط اصلی می شود. برای بررسی تأثیر این ناهمگونی بر روی نیروهای ایجاد شده در پوشش بتنی تونل، مدلی با مقطع مربع به ضلع ۱۰ متر و عمق قرارگیری ۱۰ متر در نظر گرفته می شود. مشخصات لایه‌های

ضخامت پوشش افزایش می یابد. در حالت دینامیکی نیز اگرچه توزیع نشست سطحی زمین نامتقارن می شود، اما نشست با کاهش ضخامت پوشش افزایش می یابد. در این مدل ها نیز همانند مدل های قبل نشست، حالت دینامیکی چند برابر حالت استاتیکی است.

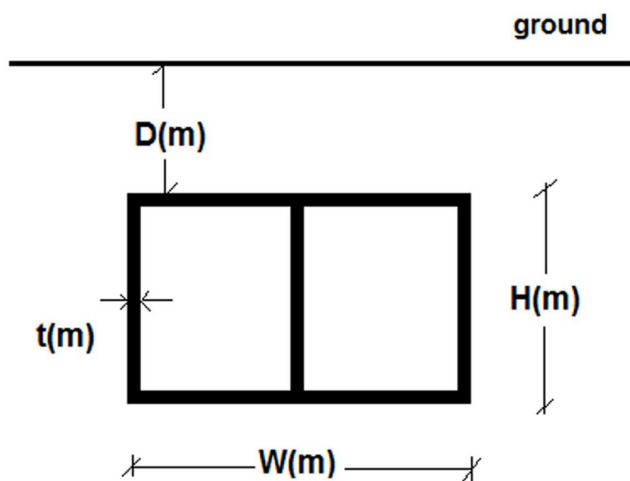
۳-۱-۴ مقایسه تونل دو دهانه با تونل تک دهانه با ابعاد یکسان

گاهی عرض تونل به اندازه‌ای زیاد است که ترجیح داده می شود تا تونل در وسط نیز دارای دیوار بتنی شده تا از خیز بیش از حد تیر فوقانی تونل جلوگیری شود (شکل ۱۸). در این قسمت، تونل های دو دهانه با عرض های ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متری با تونل تک دهانه مشابه خود مورد مقایسه قرار می گیرند و نتایج آن، در ادامه ارائه شده اند.



شکل ۱۷: پروفیل‌های نشست سطحی زمین برای ضخامت‌های مختلف پوشش تونل در حالت لرزه‌ای

Fig. 17. The ground surface settlement profiles for different thickness of the tunnel lining in the seismic state



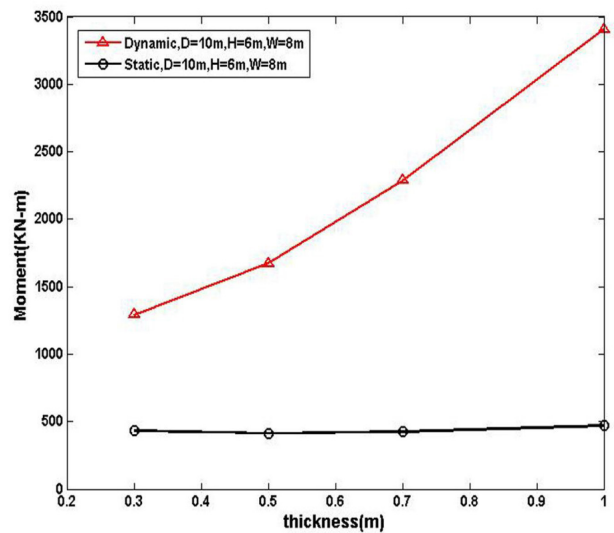
شکل ۱۸: تونل مستطیلی با یک دیوار در وسط (دو دهانه)
Fig. 18. Rectangular tunnel with a wall in the middle (two spans)

مطابق با نتایج بدست‌آمده و در حالت کلی، نیروهای ایجاد شده در پوشش بتنی تونل به شرطی که خاک پیرامون تونل نسبت به خاک اصلی مدول الاستیسیته کمتری داشته باشد، کمتر از حالت خاک همگن است و نشست سطحی زمین در این حالت، نسبت به خاک همگن بیشتر می‌شود.

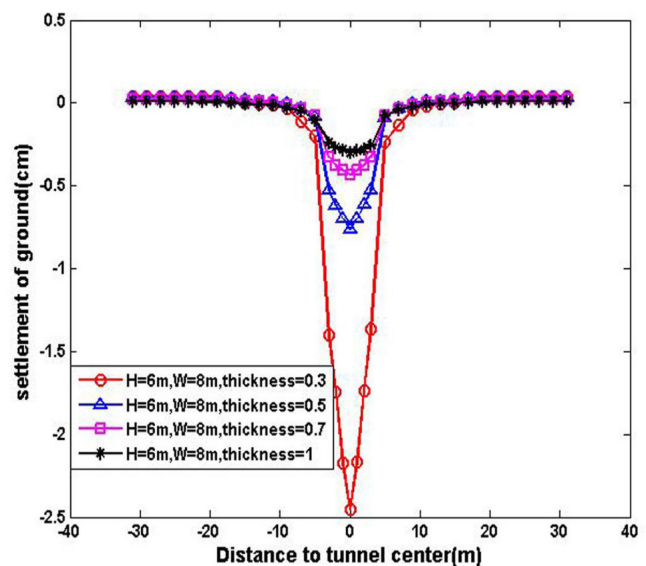
۳-۳- اثر عمق تونل

عمق تونل رابطه‌ای مستقیم با وزن سربار وارده بر روی تونل دارد. در

خاک به این صورت است که برای لایه بالا در خاک دو لایه، از خاکی با مدول الاستیسیته کمتر استفاده شده است. مشخصات لایه‌های خاک مطابق با جدول ۸ برای خاک تک‌لایه و جدول ۹ برای خاک دو لایه است. در این دو جدول، e نسبت تخلخل خاک بوده و مشخصات لایه‌بندی خاک پیرامون تونل و ابعاد در نظر گرفته شده مطابق با شکل ۲۴ است. نتایج تحلیل‌ها در جدول‌ها و نمودارهای زیر آورده شده‌اند.

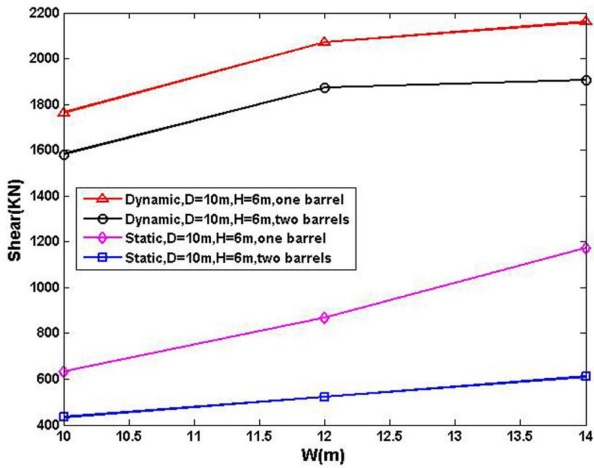


شکل ۱۵: تغییرهای لنگر خمشی با تغییر ضخامت پوشش تونل
Fig. 15. Variations in the bending moment with changes in the lining thickness



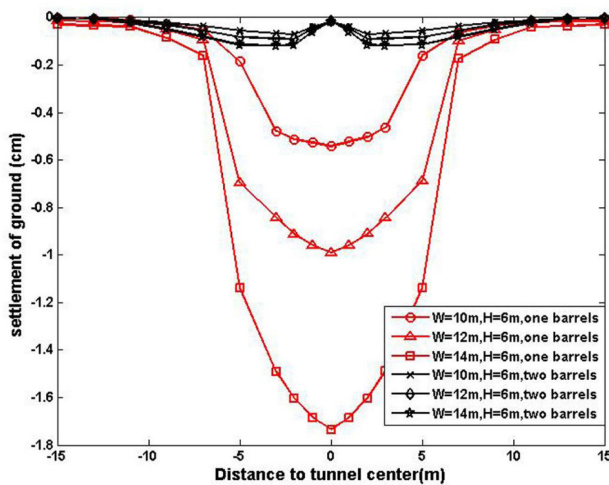
شکل ۱۶: پروفیل‌های نشست سطحی زمین برای ضخامت‌های مختلف پوشش تونل در حالت استاتیکی

Fig. 16. The ground surface settlement profiles for different thickness of the tunnel lining in the static state



شکل ۲۱: تغییرهای نیروی برشی پوشش در مقابل تغییر عرض تونل؛ مقایسه تونل تک‌دهانه با تونل دو دهانه با ابعاد کلی یکسان

Fig. 21. Variations in the shear force of the lining versus change tunnel width, comparison single span tunnel with two spans tunnel with the same area



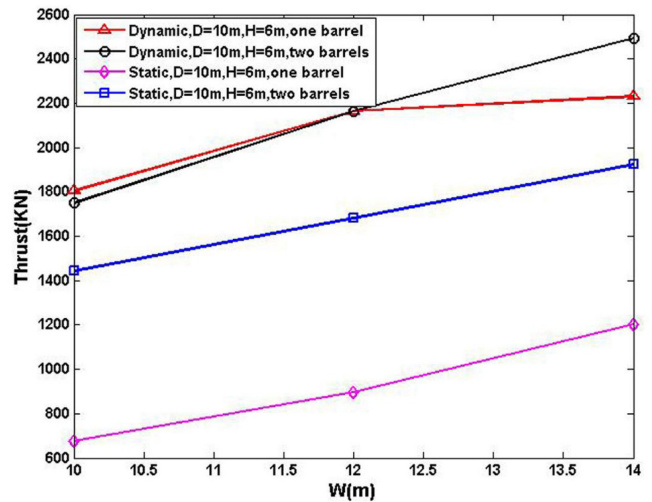
شکل ۲۲: پروفیل‌های نشست سطحی زمین برای تونل تک‌دهانه و دو دهانه و برای عرض‌های مختلف در حالت استاتیکی

Fig. 22. The ground surface settlement profiles for single span and two spans tunnel and for different thickness of the tunnel lining in the static state

برشی افزایش می‌یابد و نرخ افزایش در حالت دینامیکی بیشتر از حالت استاتیکی است. با افزایش عمق قرارگیری تونل، مقدار نشست زمین افزایش می‌یابد. همچنین پروفیل نشست در حالت لرزه‌ای نامنظم می‌شود. با افزایش عمق قرارگیری تونل در حالت دینامیکی، موقعیت رخداد نشست بیشینه به امتداد محور تونل نزدیک می‌شود.

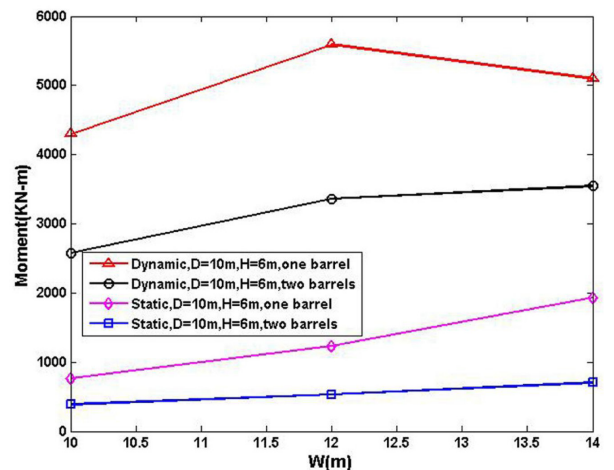
این‌جا برای بررسی اثر عمق قرارگیری تونل، تونل‌هایی با عمق ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۴ و ۳۰ متر در نظر گرفته می‌شوند. نتایج تحلیل‌ها در جدول‌ها و نمودارهای زیر آورده شده‌اند.

با افزایش عمق قرارگیری تونل، نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی



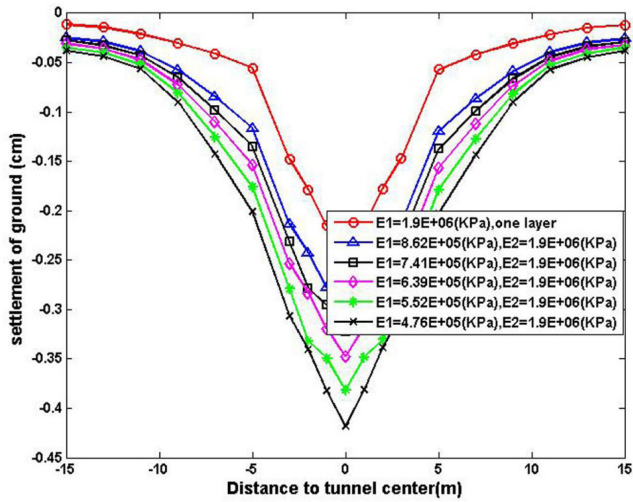
شکل ۱۹: تغییرهای نیروی محوری ایجاد شده در پوشش در مقابل تغییر عرض تونل؛ مقایسه تونل تک‌دهانه با تونل دو دهانه با ابعاد کلی یکسان

Fig. 19. Variations in the thrust force of the lining versus change tunnel width, comparison single span tunnel with two spans tunnel with the same area



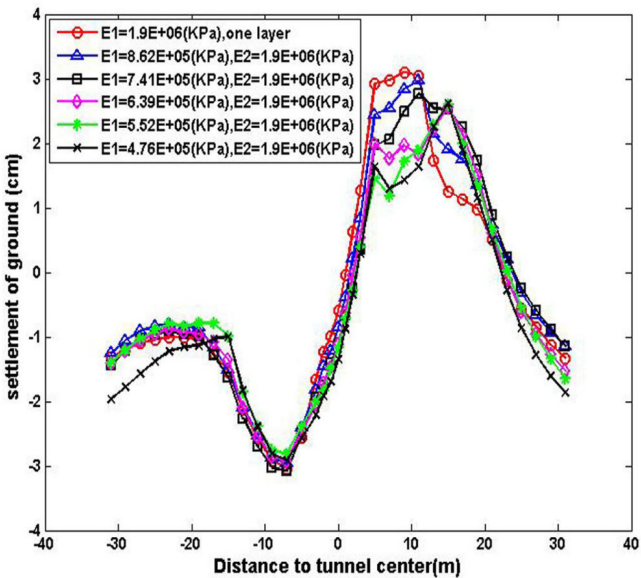
شکل ۲۰: تغییرهای لنگر خمشی پوشش در مقابل تغییر عرض تونل؛ مقایسه تونل تک‌دهانه با تونل دو دهانه با ابعاد کلی یکسان

Fig. 20. Variations in the bending moment of the lining versus change tunnel width, comparison single span tunnel with two spans tunnel with the same area



شکل ۲۵: پروفیل‌های نشست سطحی زمین در خاک تک لایه و دو لایه در حالت استاتیکی

Fig. 25. The ground surface settlement profiles for single-layer and two-layers soil in the static state



شکل ۲۶: پروفیل‌های نشست سطحی زمین در خاک تک لایه و دو لایه در حالت لرزه‌ای

Fig. 26. The ground surface settlement profiles for single-layer and two-layers soil in the seismic state

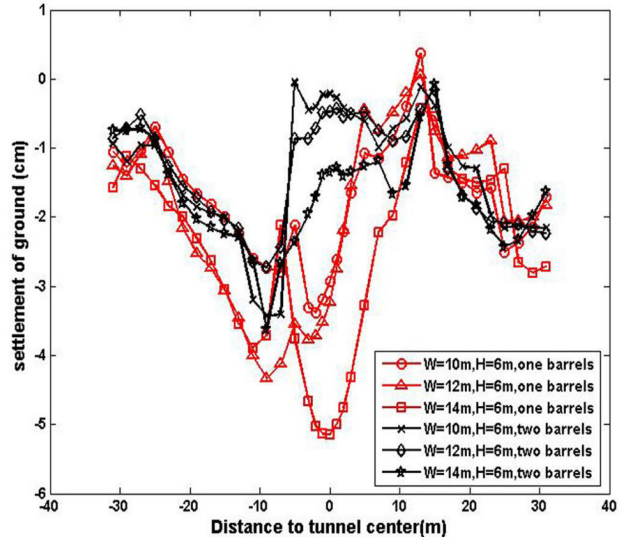
ارائه شده در جدول ۱ است. در این حالت، چندین مدل با مقادیر مختلف K_0 ساخته شده و تحلیل می شوند.

مطابق با نتایج بدست آمده، با افزایش ضریب فشار جانبی خاک از ۰/۴ تا

۳-۴- اثر ضریب فشار جانبی زمین

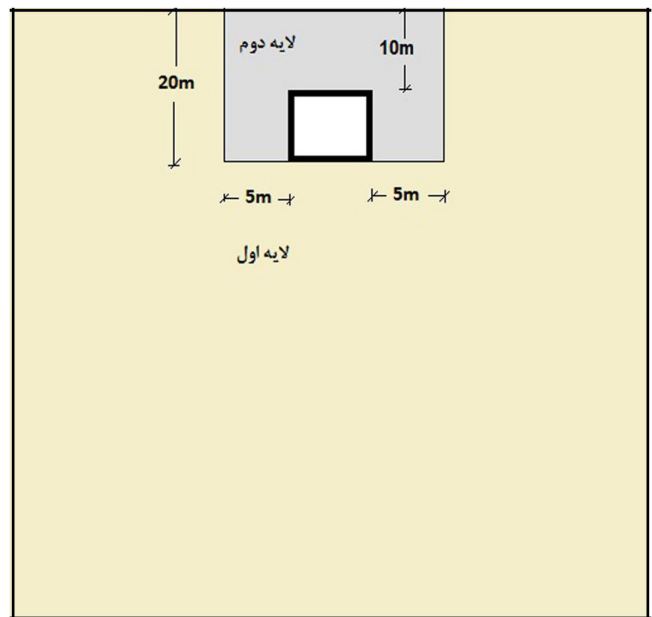
برای بررسی اثر نسبت تنش‌های برجا، تونلی با عرض و ارتفاع یکسان ۱۰ متر و در عمق ۱۵ متری لحاظ می شود. مشخصات خاک همان مشخصات

۱ In-Situ Stress



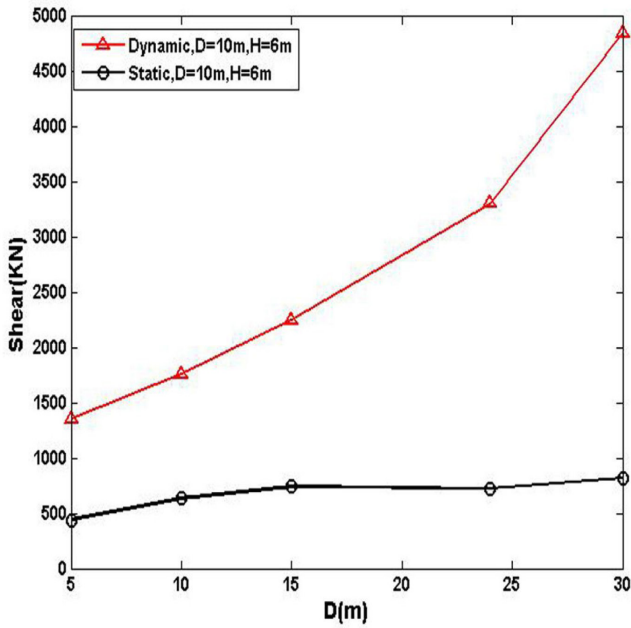
شکل ۲۳: پروفیل‌های نشست سطحی زمین برای تونل تک دهانه و دو دهانه و برای عرض‌های مختلف در حالت لرزه‌ای

Fig. 23. The ground surface settlement profiles for single span and two spans tunnel and for different width of the tunnel in the seismic state



شکل ۲۴: طرحواره‌ای از نمایش لایه بندی خاک پیرامون تونل

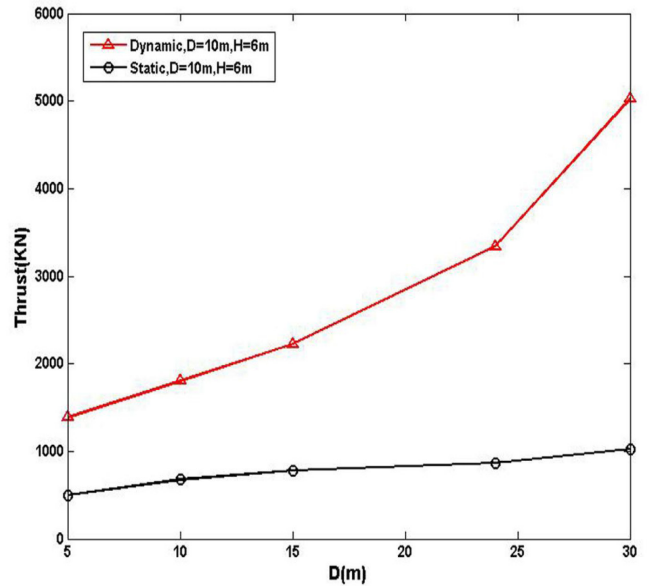
Fig. 24. Plane of soil layering around the tunnel



شکل ۲۹: تغییرهای نیروی برشی پوشش در مقابل تغییرهای عمق تونل

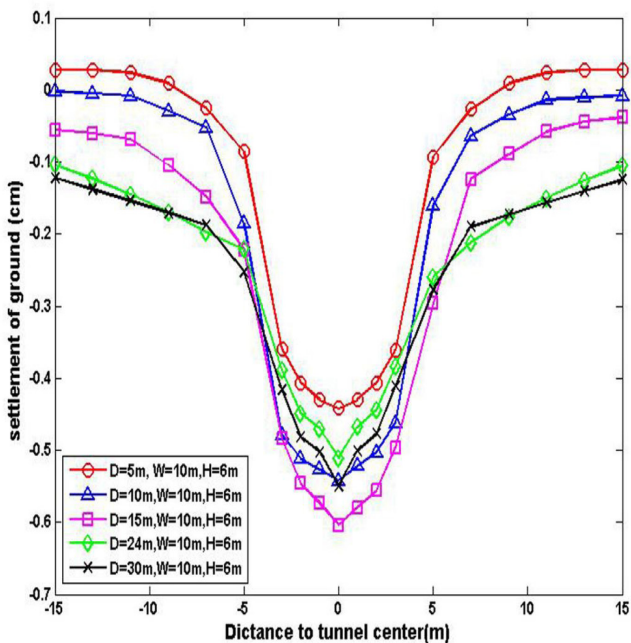
Fig. 29. Variations in the shear force of the lining versus change tunnel depth

۱/۳، نیروی محوری و نیروی برشی در حالت استاتیکی و دینامیکی کاهش می‌یابند. همچنین نشست با افزایش ضریب فشار جانبی زمین کاهش خواهد یافت.



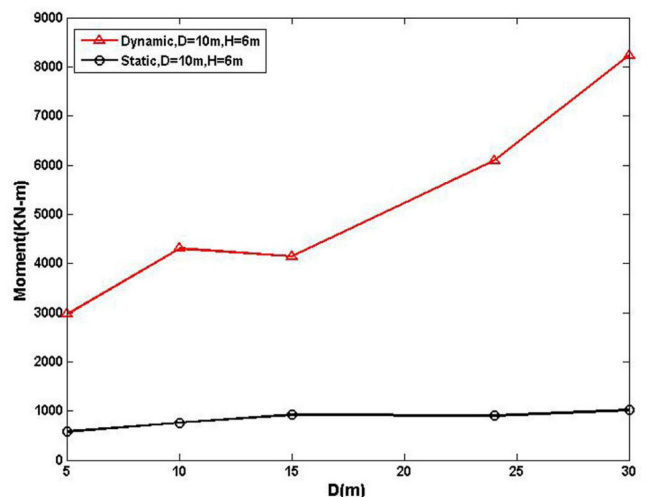
شکل ۲۷: تغییرهای نیروی محوری پوشش در مقابل تغییرهای عمق تونل

Fig. 27. Variations in the thrust force of the lining versus change tunnel depth



شکل ۳۰: پروفیل نشست سطحی زمین برای عمق‌های مختلف تونل در حالت استاتیکی

Fig. 30. The ground surface settlement profiles for different depth of the tunnel in the static state

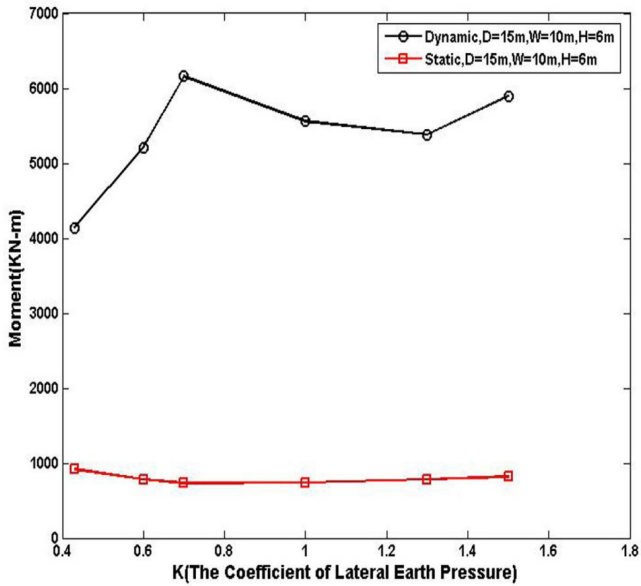


شکل ۲۸: تغییرهای لنگر خمشی پوشش در مقابل تغییرهای عمق تونل

Fig. 28. Variations in the bending moment of the lining versus change tunnel depth

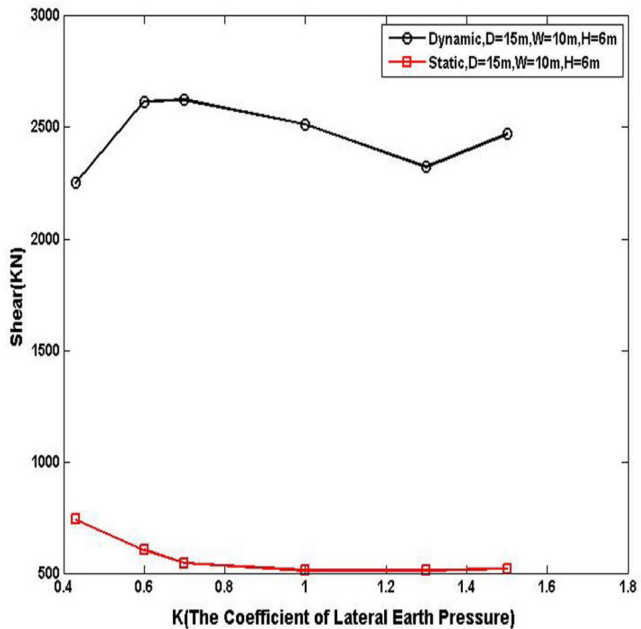
۳-۵- محل رخداد بیشترین نیروها در پوشش تونل در حالت استاتیکی و لرزه‌ای

در شکل ۳۷، محل رخداد بیشترین نیروهای داخلی ایجاد شده در پوشش



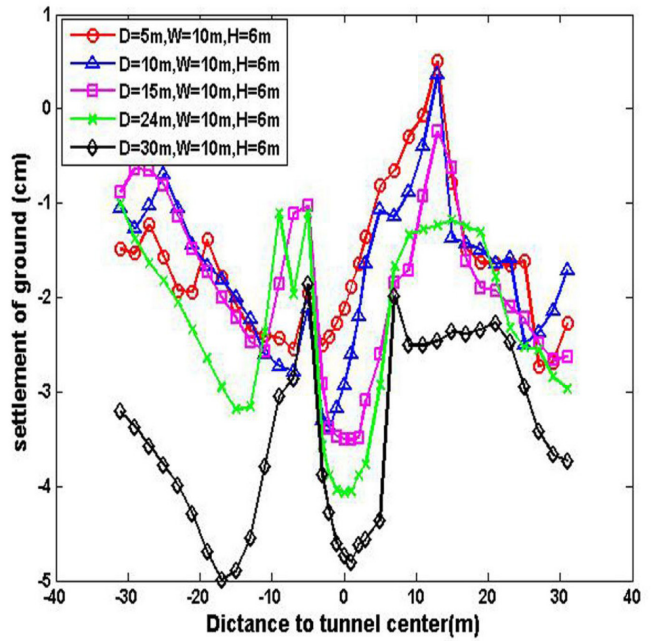
شکل ۳۳: تغییرهای لنگر خمشی با تغییر ضریب فشار جانبی زمین

Fig. 33. Variations in the bending moment with changes the earth lateral pressure coefficient



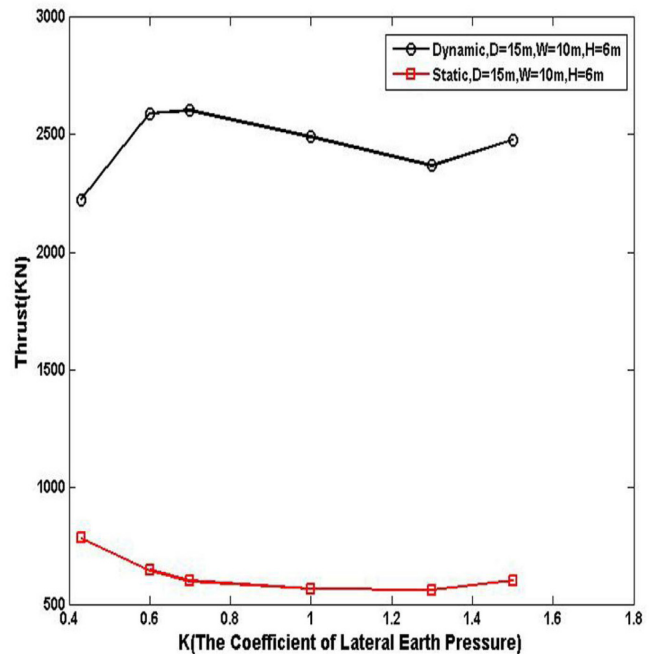
شکل ۳۴: تغییرهای نیروی برشی با تغییر ضریب فشار جانبی زمین

Fig. 34. Variations in the shear force with changes the earth lateral pressure coefficient



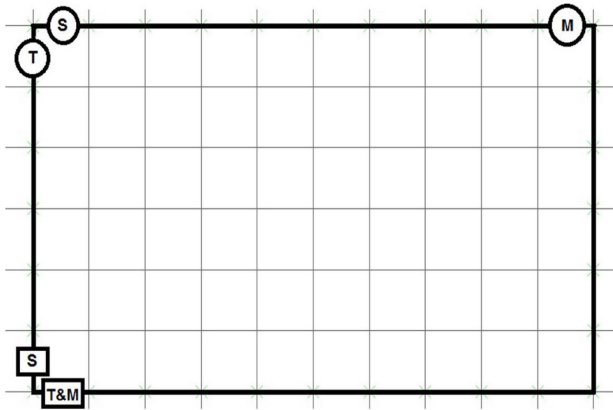
شکل ۳۱: پروفیل نشست سطحی زمین برای عمق‌های مختلف تونل در حالت لرزه‌ای

Fig. 31. The ground surface settlement profiles for different depth of the tunnel in the seismic state



شکل ۳۲: تغییرهای نیروی محوری با تغییر ضریب فشار جانبی زمین

Fig. 32. Variations in the thrust force with changes the earth lateral pressure coefficient



شکل ۳۷: محل رخداد بیشترین نیروهای داخلی در حالت استاتیکی و لرزه‌ای (تونل به ابعاد ۶ در ۱۰ متر)
 Fig. 37. Place of occurrence the maximum internal forces in the static and the seismic state (tunnel dimensions $6 \times 10 \text{ m}^2$)

جدول ۸: مشخصات خاک برای حالتی که محیط همگن باشد (تکلایه).

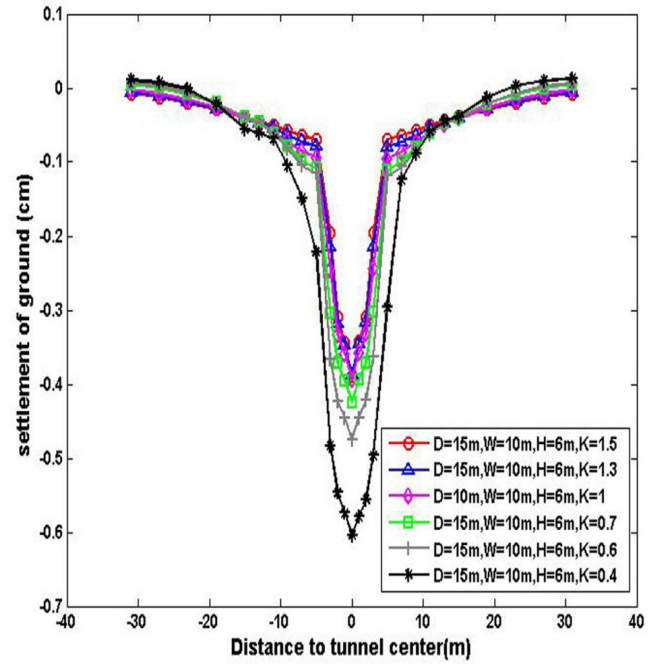
Table 8. The properties for the homogenous soil (single layer)

مقدار	مشخصه
$1/6 \times 10^6$	K (کیلو پاسکال)
$7/3 \times 10^5$	G (کیلو پاسکال)
$1/9 \times 10^6$	E (کیلو پاسکال)
0.12	e

بتنی تونل نشان داده شده است. این نیروها در حالت استاتیکی با شکل دایره و در حالت لرزه‌ای با شکل مربع مشخص شده‌اند. همچنین نیروی محوری با حرف T ، لنگر خمشی با حرف M و نیروی برشی با حرف K مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین تمرکز نیروها در کنج‌ها است که این موضوع، به دلیل اثر شعاع انحنا بر روی توزیع تنش پیرامون تونل دور از انتظار نیست. بنابراین لازم است تا در تونل‌هایی با مقطع مستطیلی، ضخامت پوشش در کنج‌ها متناسب با تمرکز نیرو و افزایش نیروها افزایش یابد.

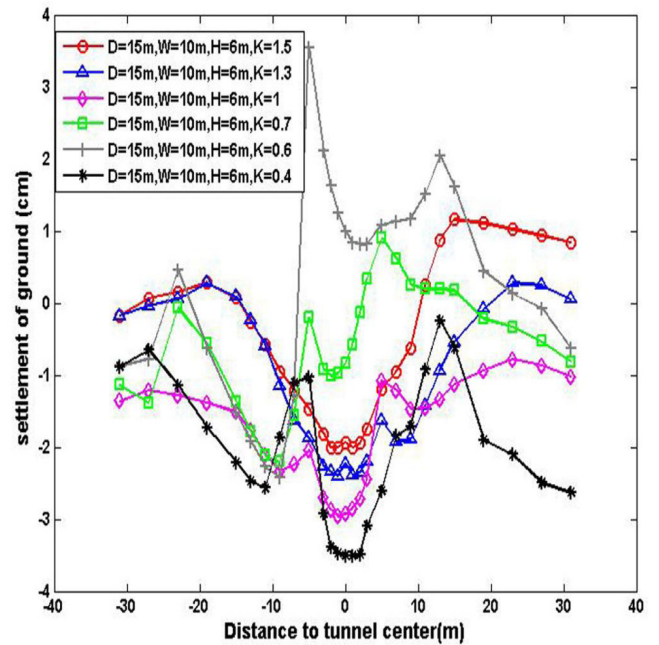
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تحلیل پاسخ لرزه‌ای تونل‌های سطحی مستطیلی پرداخته شده است و تأثیر عوامل مؤثر بر این پاسخ مورد بررسی قرار گرفته است؛ عواملی مانند ابعاد تونل، عمق تونل، مقدار نسبت تنش‌های برجا. از



شکل ۳۵: پروفیل نشست سطحی زمین برای ضرایب مختلف فشار جانبی زمین در حالت استاتیکی

Fig. 35. The ground surface settlement profiles for different earth lateral pressure coefficient in the static state



شکل ۳۶: پروفیل نشست سطحی زمین برای ضرایب مختلف فشار جانبی زمین در حالت لرزه‌ای

Fig. 36. The ground surface settlement profiles for different earth lateral pressure coefficient in the seismic state

جدول ۱۱: تغییرهای نیروهای داخلی پوشش با تغییر مدول الاستیسیته خاک در حالت لرزه‌ای

Table 11. Variations in the internal forces of the lining with changes the elasticity modulus of soil in the seismic state

خاک همگن (تک لایه)			
مدول الاستیسیته (کیلو پاسکال)	نیروی محوری (کیلو نیوتون)	لنگر خمشی (کیلو نیوتون متر)	نیروی برشی (کیلو نیوتون)
۱/۹×۱۰ ^۶	۲۰۷۰	۵۵۶۰	۱۹۳۰
خاک دو لایه			
مدول الاستیسیته (کیلو پاسکال)	نیروی محوری (کیلو نیوتون)	لنگر خمشی (کیلو نیوتون متر)	نیروی برشی (کیلو نیوتون)
۴/۸×۱۰ ^۵	۱۹۹۰	۵۴۷۰	۱۸۵۰
۵/۵×۱۰ ^۵	۲۰۲۰	۵۴۹۰	۱۸۸۰
۶/۴×۱۰ ^۵	۲۰۴۰	۵۵۵۰	۱۹۰۰
۷/۴×۱۰ ^۵	۲۰۵۰	۵۴۳۰	۱۸۹۰
۸/۶×۱۰ ^۵	۲۰۲۰	۵۵۴۰	۱۹۶۰

جدول ۹: مشخصات خاک در حالتی که محیط دو لایه باشد.

Table 9. The properties for the two layers soil

لایه دوم			
e	E (کیلو پاسکال)	G (کیلو پاسکال)	K (کیلو پاسکال)
۰/۳	۸/۶×۱۰ ^۵	۳/۳×۱۰ ^۵	۷/۲×۱۰ ^۵
۰/۴	۷/۴×۱۰ ^۵	۲/۹×۱۰ ^۵	۶/۲×۱۰ ^۵
۰/۵	۶/۴×۱۰ ^۵	۲/۵×۱۰ ^۵	۵/۳×۱۰ ^۵
۰/۶	۵/۵×۱۰ ^۵	۲/۲×۱۰ ^۵	۴/۶×۱۰ ^۵
۰/۷	۴/۸×۱۰ ^۵	۱/۸×۱۰ ^۵	۴×۱۰ ^۵
لایه اول (اصلی)			
e	E (کیلو پاسکال)	G (کیلو پاسکال)	K (کیلو پاسکال)
۰/۲	۱/۹×۱۰ ^۶	۷/۳×۱۰ ^۵	۱/۶×۱۰ ^۶

جدول ۱۰: تغییرهای نیروهای داخلی پوشش با تغییر مدول الاستیسیته خاک در حالت استاتیکی

Table 10. Variations in the internal forces of the lining with changes the elasticity modulus of soil in the static state

خاک همگن (تک لایه)			
مدول الاستیسیته (کیلو پاسکال)	نیروی محوری (کیلو نیوتون)	لنگر خمشی (کیلو نیوتون متر)	نیروی برشی (کیلو نیوتون)
۱/۹×۱۰ ^۶	۶۰۸	۸۱۸	۵۰۶
خاک دو لایه			
مدول الاستیسیته (کیلو پاسکال)	نیروی محوری (کیلو نیوتون)	لنگر خمشی (کیلو نیوتون متر)	نیروی برشی (کیلو نیوتون)
۴/۸×۱۰ ^۵	۵۸۰	۸۰۳	۴۶۸
۵/۵×۱۰ ^۵	۵۸۲	۸۰۴	۴۷۱
۶/۴×۱۰ ^۵	۵۸۶	۸۰۱	۴۷۲
۷/۴×۱۰ ^۵	۵۸۸	۸۰۲	۴۷۵
۸/۶×۱۰ ^۵	۵۸۹	۸۰۵	۴۸۰

استفاده شده و شتابنگاشت زلزله طیس به مدل اعمال شد. مطابق با نتایج بدست آمده:

الف) به صورت کلی، نیروها و لنگرهای ایجاد شده در پوشش بتنی تونل در حالت تحلیل‌های لرزه‌ای نسبت به حالت استاتیکی تا چند برابر افزایش می‌یابند.

ب) پروفیل نشست سطحی زمین در حالت لرزه‌ای، نامتقارن شده و مقدار نشست نسبت به حالت استاتیکی افزایش می‌یابد.

پ) با افزایش عرض تونل (هم در حالت استاتیکی و هم حالت لرزه‌ای)، مقادیر نیروهای داخلی پوشش افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع تونل نیز افزایش نیرو به وجود خواهد آمد. اما نرخ افزایش در حالت استاتیکی کمتر از حالت لرزه‌ای است.

ت) با افزایش ضخامت پوشش، نیروهای داخلی به دلیل افزایش سختی افزایش می‌یابند. اما نرخ افزایش در حالت استاتیکی بسیار کم است. همچنین نشست سطحی زمین با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد.

ث) در صورتی که یک ستون در وسط دهانه تونل برای تونلهایی با عرض زیاد (۱۰ متر و بیشتر) اضافه شود، آنگاه بیشترین نیروی محوری اتفاق افتاده در حالت استاتیکی در تونل دو دهانه (که محل رخدادش نیز در همین ستون وسط است)، بیشتر از تونل تک‌دهانه با ابعاد یکسان شده و نیروی محوری نیز در حالت لرزه‌ای برای هر دو تونل تقریباً یکسان می‌شوند. در ارتباط با لنگر خمشی و نیروی برشی (هم در حالت استاتیکی و

آن جایی که تونل‌های مستطیلی اغلب به روش حفر و پوش احداث می‌شوند و در این صورت جنس خاک پیرامون و بالای تونل متفاوت از خاک محیط اصلی می‌شود، بنابراین اثر این تغییر سختی خاک نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام تحلیل لرزه‌ای از مدل‌های دو بعدی با فرض کرنش مسطح

University, Carbondale, 1993.

- [4] Y. M. A., Hashash; J. J., Hook; B., Schmidt; J. I., Yao; Seismic Design and Analysis of Underground Structures, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 247-293, 2001.
- [5] A., Hendron; G., Fernandez; Dynamic and Static Design Considerations for Underground Chambers, Seismic Design of Embankments and Caverns, *American Society of Civil Engineers*, 1983.
- [6] H., Huo; A., Bobet; G., Fernandez; J., Ramirez; Analytical Solution for Deep Rectangular Structures Subjected to Far-field Shear Stresses, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 21, No. 6, pp. 613-625, 2006.
- [7] ITASCA, FLAC2D Version 5; Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions, *ITASCA Consulting Group Inc.*, 2005.
- [8] S. L., Kramer; Geotechnical Earthquake Engineering, *Prentice Hall, Upper Saddle River*, 1996.
- [9] J. L., Merritt; J. E., Monsees; A. J., Hendron; Seismic Design of Underground Structures, *Proceedings of the 1985 Rapid Excavation Tunneling Conference*, Vol. 1, pp. 104-131, 1985.
- [10] J., Penzien; C., Wu; Stresses in Linings of Bored Tunnels, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, No. 3, pp. 283-300, 1998.
- [11] J., Penzien; Seismically-induced Racking of Tunnel Linings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, No. 5, pp. 683-691, 2000.
- [12] J. N., Wang; Seismic Design of Tunnels: A State of the Art, Approach, Monograph, Monograph 7, Parsons, *Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc.*, New York, 1993.

هم لرزه‌ای)، وجود ستون وسط سبب تعدیل این نیروها تا حد بسیار مطلوبی می‌شود. همچنین وجود دیواره بتنی وسط تأثیر بسیار چشمگیری را در کاهش نشست سطحی زمین دارد.

ج) با افزایش عمق قرارگیری تونل، نیروهای داخلی پوشش در حالت لرزه‌ای افزایش می‌یابند. در حالت استاتیکی نیز این افزایش وجود دارد، اما با نرخ بسیار کم اتفاق می‌افتد.

چ) اگر خاک پیرامون تونل مدول الاستیسیته و سختی کمتری را نسبت به خاک اصلی داشته باشد، نیروهای ایجاد شده در داخل پوشش کمتر می‌شوند. زیرا نشست با کاهش سختی خاک قرار گرفته در بالای تونل بیشتر شده و در نتیجه، نیروی ایجاد شده در پوشش کمتر می‌شود.

ح) بیشینه نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل و تمرکز تنش، در گوشه‌های مقطع تونل مستطیلی ایجاد می‌شوند.

خ) نیروی برشی پوشش و نشست سطحی زمین با افزایش ضریب فشار جانبی خاک از $0/4$ تا $1/3$ ، در حالت استاتیکی و دینامیکی نیروی محوری، کاهش می‌یابند.

مراجع

- [1] S., Valioskooyi, A., Lakirouhani, Analytical and Numerical Solution of Tunnel Linings under Seismic Loading and Investigation about Parameters that Affecting on it (Case Study, Bangkok Subway Tunnel, *The 1st Iranian Conference on Geotechnical Engineering*, University of Mohaghegh Ardabili, 2013.
- [2] A., Bobet; Drained and Undrained Response of Deep Tunnels Subjected to Far-field Shear Loading, *Tunnelling and Underground Technology*, Vol. 25, No. 1, pp. 21-31, 2010.
- [3] B. M., Das; Principle of Soil Dynamics, *Southern Illinois*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A., Lakirouhani, Sh., Valioskooyi, "Seismic Analysis of Rectangular Tunnels (Cut and Cover Method), Soil-Structure Interaction". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(1) (2017) 149-163.

DOI: 10.22060/ceej.2015.420

