

بررسی اندرکنش سیستم نگهداری تونل‌ها با محیط اطراف تحت بارگذاری لرزه‌ای

روح اله بصیرت^۱؛ حسین سالاری راد^{۲*}؛ حامد ملاداوودی^۳

۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲ استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳ استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۰۲/۱۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۱۲/۲۴

واژگان کلیدی	چکیده
اندرکنش سیستم نگهداری بارگذاری لرزه‌ای لغزش کامل و بدون لغزش تونل بارگذاری زلزله	امروزه با پیشرفت فن آوری، امکان طراحی و ساخت دقیق تر سازه‌های زیرزمینی فراهم شده است. با این وجود، آنالیز سازه‌های زیرزمینی به دلیل اندرکنش با محیط نامحدود خاکی یا سنگی اطراف، بسیار پیچیده بوده و نسبت به دیگر سازه‌ها تحقیقات کمتری بر روی آن‌ها صورت گرفته است. در کشور لرزه خیزی همچون ایران برای پیشگیری از پیامدهای ناگوار در اثر زلزله بایستی بررسی و مطالعات جدی‌تری بر روی رفتار دینامیکی این قبیل سازه‌ها انجام داد. در این مقاله ابتدا دو روش تحلیلی برای بررسی رفتار فضای زیرزمینی تحت بار لرزه‌ای ارائه شده است. سپس پاسخ پوشش یکپارچه تحت شرایط لغزش کامل و بدون لغزش از روش‌های تحلیلی و عددی با در نظر گرفتن اندرکنش پوشش و محیط اطراف بررسی شده است. نتایج نشان دادند که تنش‌ها در پوشش یکپارچه در شرایط بدون لغزش تا ۲٫۷ برابر بیشتر از شرایط لغزش کامل است. همچنین مقدار کرنش‌های پوشش یکپارچه در حالت لغزش کامل بیشتر است. نتایج روش عددی نیز مطابقت خوبی با روش‌های تحلیلی داشتند.

۱- مقدمه

صورت الاستیک و همگن فرض شده است. پاسخ سیستم نگهداری تونل در برابر بارهای لرزه‌ای، تابعی از نسبت انعطاف‌پذیری، نسبت قابلیت فشرده‌شدن سازه، فشار برجای روابره (ν/h) و متغیرهای دیگر می‌باشد. نسبت انعطاف‌پذیری (F) و نسبت قابلیت فشرده‌شدن (C) که از کمیت‌های موثر در روابط هستند، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C = \frac{E_s (1 - \nu_t^2) r}{E_t t (1 + \nu_s) (1 - 2\nu_s)} \quad (1)$$

$$F = \frac{E_s (1 - \nu_t^2) r^3}{6E_t I (1 + \nu_s)} \quad (2)$$

در روابط بالا، E_t مدول الاستیسیته پوشش، ν_t نسبت

فضاهای زیرزمینی مخصوصاً تونل‌ها نقش اساسی در پیشرفت مناطق شهری دارند. گروه انجمن بین‌المللی تونل اولین تیم تحقیقاتی بود که به بررسی طراحی‌های موجود و روش‌های تحلیلی برای سازه‌های زیرزمینی پرداخت. به عبارت دیگر مطالعات اخیر بر روی آسیب‌پذیری تونل‌ها با زلزله‌های میدان نزدیک و آسیب‌لرزه-ای در سازه‌های زیرزمینی تمرکز یافت (Hashash, 2001). تاکنون روش‌های تحلیلی مختلفی برای تحلیل دینامیکی پوشش یکپارچه ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش ونگ (Wang, 1993)، پنزین (Penzien, 2000)، پوبت و همکاران (Bobet et al., 2003) و پارک و همکاران (Park et al., 2009) اشاره کرد. در این روش‌ها محیط اطراف و پوشش تونل به

* تهران، خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، طبقه‌ی پنجم، اتاق ۶، کدپستی: ۱۵۹۱۶۲۴۲۱۱؛ شماره‌ی تلفن:

۰۶۴۵۴۲۹۴-۰۲۱ آدرس پست الکترونیک: hsalari@aut.ac.ir

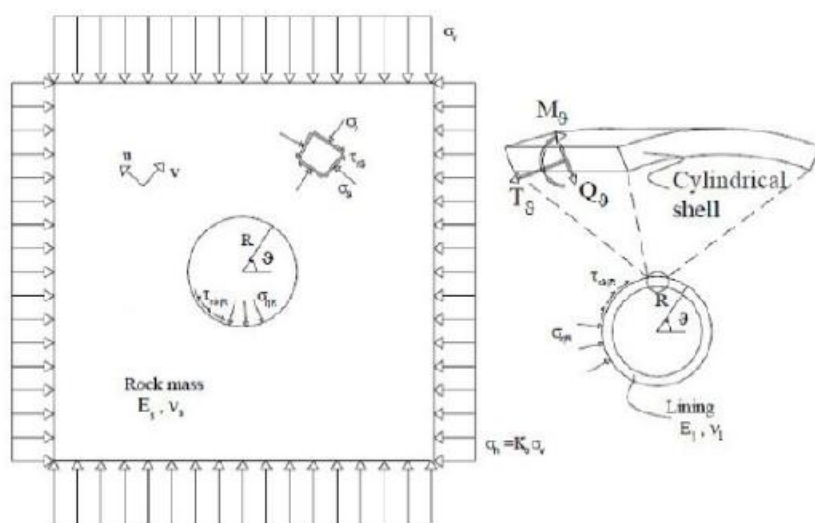
۲- روش‌های تحلیلی برای تحلیل دینامیکی

پوشش تونل‌ها

روش‌های تحلیلی برای تحلیل دینامیکی پوشش تونل‌ها در ادامه تشریح شده است.

۱-۲- روش ونگ

روش تحلیلی ونگ (Wang, 1993) بر اساس حل روابط ایری برای پوشش دایروی در شرایط استاتیکی به دست می‌آید. سپس با جایگزین کردن پار زلزله به صورت تنش برشی خالص $(\gamma)_{max}$ ، روابط مربوط به تغییر شکل، نیروی محوری و ممان خمشی در پوشش بدست می‌آیند. شکل ۱ تیروها را در پوشش تونل نشان می‌دهد. روابط برای دو حالت لغزش کامل و بدون لغزش نوشته شده است.



شکل ۱: نیروی محوری، نیروی برشی و ممان خمشی در پوشش (Corigliano, 2007)

که در آن:

$$K_1 = \frac{12E_s(1-\nu_s)}{2F+5-6\nu_s} \quad (5)$$

در روابط مزبور T نیروی محوری در پوشش، M ممان خمشی در پوشش و θ زاویه المان مورد بررسی بر روی پوشش با جهت محور x ‌ها است.

ب- حالت بدون لغزش

برای این حالت روابط به صورت زیر ارائه شده است:

الف- حالت لغزش کامل

در این حالت پارامترهای طراحی لازم در حالت لغزش پوشش جداره مانند بیشترین مقدار نیروی محوری (T) و ممان خمشی (M) پوشش جداره از روابط زیر محاسبه می‌شوند (Wang, 1993):

$$T = \frac{1}{6} K_1 \frac{E_s}{(1+\nu_s)} r^2 \gamma_{max} \cos 2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (3)$$

$$M = \frac{1}{6} K_1 \frac{E_s}{(1+\nu_s)} r^2 \gamma_{max} \cos 2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (4)$$

جایجایی پوشش تونل را محاسبه کردند. بر طبق این روش در شرایط بدون لغزش داریم:

$$\frac{T}{G_s \gamma_{\max} r} = -\frac{4(1-\nu_s)}{\Delta'} \left[F \left(\frac{1-\nu_s}{2} \right) C \right] \cos 2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (9)$$

$$\frac{M}{G_s \gamma_{\max} r^2} = -\frac{4(1-\nu_s)}{\Delta'} \left[1 + \left(\frac{1-\nu_s}{2} \right) C \right] \cos 2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (10)$$

که در آن:

$$\Delta' = F \left[(3-2\nu_s) + (2\nu_s) C \right] + C \left[(3+6\nu_s) + (3-2\nu_s) C \right] \quad (11)$$

و در شرایط لغزش کامل خواهیم داشت:

$$\frac{T}{G_s \gamma_{\max} r} = -\frac{4(1-\nu_s)}{(2F+5-6\nu_s)} \cos 2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (12)$$

$$\frac{M}{G_s \gamma_{\max} r^2} = -\frac{4(1-\nu_s)}{(2F+5-6\nu_s)} \cos 2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (13)$$

و در نهایت تنش در پوشش تونل برابر است با:

$$\sigma = \frac{T}{A_i} + \frac{Mt}{2I_i} \quad (14)$$

۳- معرفی تونل مورد مطالعه و مشخصات مقطع

مورد بررسی

تونل انتقال آب از سد امیر کبیر به تصفیه خانه شماره ۶ تهران به منظور تامین آب شرب تهران از سد امیر کبیر طراحی و اجرا شده است. شعاع این تونل ۱٫۹۵ متر و ضخامت پوشش یکنی مورد استفاده در این تونل برابر ۲۵ سانتیمتر است (Sahel, 2009a).

بیشتر واحدهای سنگی مسیر تونل دارای منشأ آذرآواری هستند. بخش بزرگی از مسیر از سنگ‌های آذرین که شامل مونزویدوریت، مونزوگابرو، میکروگابرو و پرش لاولی آندزیتی می‌شوند، تشکیل یافته است (Sahel, 2009b).

مقطع مورد نظر در کیلومتر ۲۶۰۰ انتخاب شده است. ارتفاع روباره در این مقطع برابر ۴۰ متر می‌باشد. مشخصات فیزیکی و مکانیک سنگی این مقطع در جدول زیر آورده شده است. پارامترهای پوشش تونل در جدول ۲ آورده شده است. همچنین مقدار نسبت تنش افقی به قائم برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

$$T = K_2 \tau_{\max} r = K_2 \frac{E_s}{2(1+\nu_s)} \gamma_{\max} \cos 2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (6)$$

$$M = \frac{1}{6} K_1 \frac{E_s}{(1+\nu_s)} r^3 \gamma_{\max} \cos 2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (7)$$

که در آن:

$$K_2 = 1 + \frac{F[(1-2\nu_s)(1-2\nu_s C)] - \frac{1}{2}(2\nu_s + 3)}{F[(3-2\nu_s) + (1-2\nu_s C)] + C \left[\frac{5}{2}\nu_s + 6\nu_s + 6 - 8\nu_s \right]} \quad (8)$$

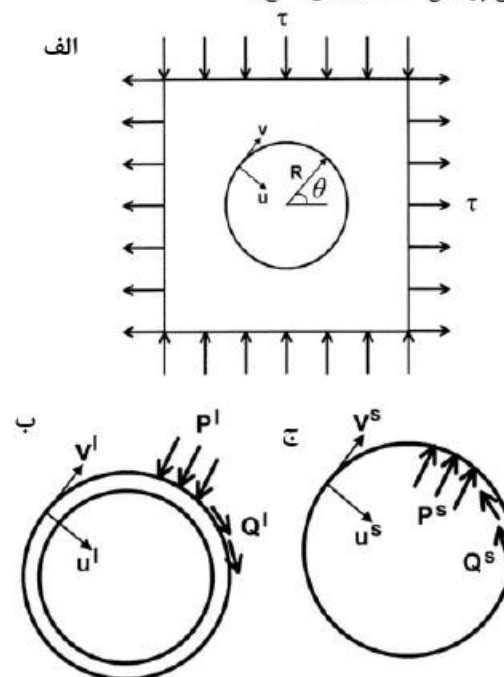
۲-۲- راه حل بارک

بارک و همکاران برای راحتی تحلیلی، شرایط بارگذاری را مطابق شکل ۲ به سه مورد تفکیک کردند (Park et al, 2009):

الف) یک حفره استوانه‌ای مدور با بارگذاری خارجی (شکل ۲-الف)

ب) یک پوشش استوانه‌ای مدور با تنش‌هایی در سطح میانی پوشش-خاک (شکل ۲-ب)

ج) یک حفره استوانه‌ای مدور با تماس تنش‌ها در سطح میانی پوشش-خاک (شکل ۲-ج).



شکل ۲: شرایط بارگذاری در روش بارک (Park et al, 2009)

سپس با استفاده از اصل جمع آثار و با تعادل نیروهای اندرکنش و سازگاری جایجایی‌ها در فصل مشترک، نیروها و

۴- تحلیل استاتیکی

بدون شک انجام تحلیل دینامیکی سازه‌های زیرزمینی مانند تونل‌ها در گذر از انجام تحلیل استاتیکی میسر می‌گردد. این به آن معنا است که پایان مرحله بارگذاری استاتیکی، نقطه شروع بارگذاری دینامیکی خواهد بود. در واقع نتایج تحلیل دینامیکی زمانی قابل استفاده خواهد بود که مدل استاتیکی آن قادر به شبیه سازی صحیح شرایط و به تعادل رسیده باشد.

شکل ۳ وضعیت جابجایی‌ها و شکل ۴ وضعیت تنش را در پوشش یکپارچه نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، تنش به صورت یکنواخت در پوشش ایجاد شده است که مقدار حداکثر آن برابر ۵٫۲۳ مگاپاسکال است. مقدار جابجایی حداکثر بعد از اعمال سیستم نگهداری ۰٫۲۷ میلیمتر است.

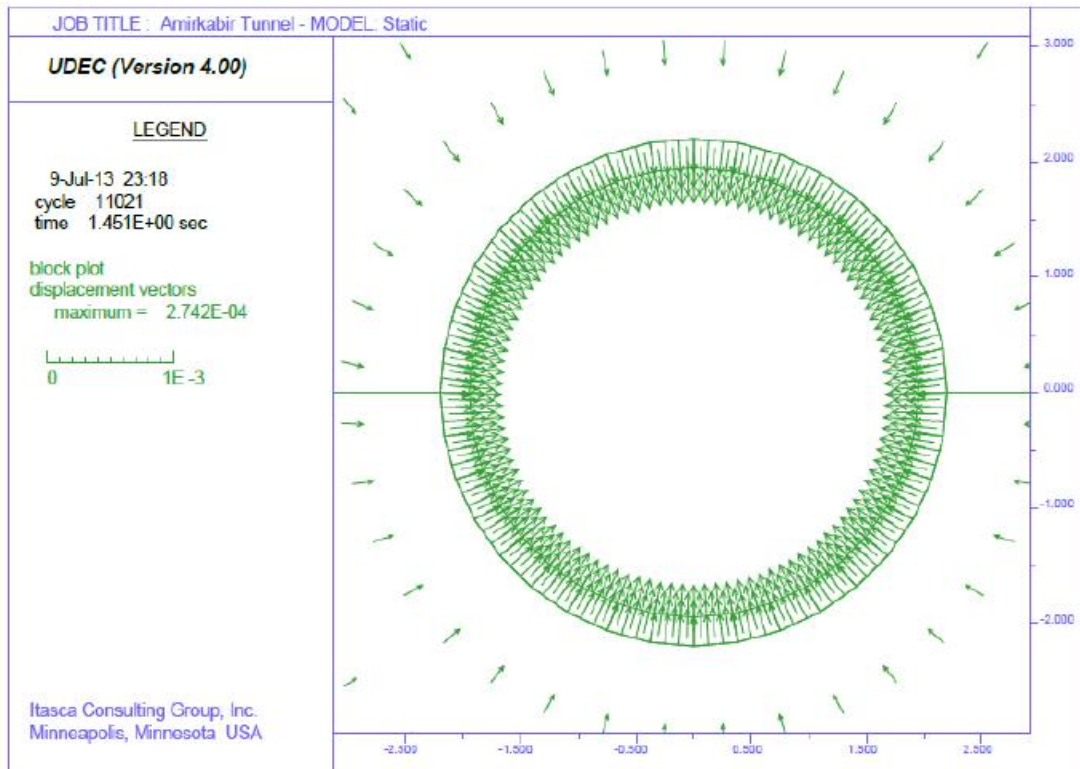
جدول ۱: خواص مقاومتی توده سنگ برای مقطع مورد نظر بر

اساس مطالعات مشاور طرح (Sahel, 2009b)

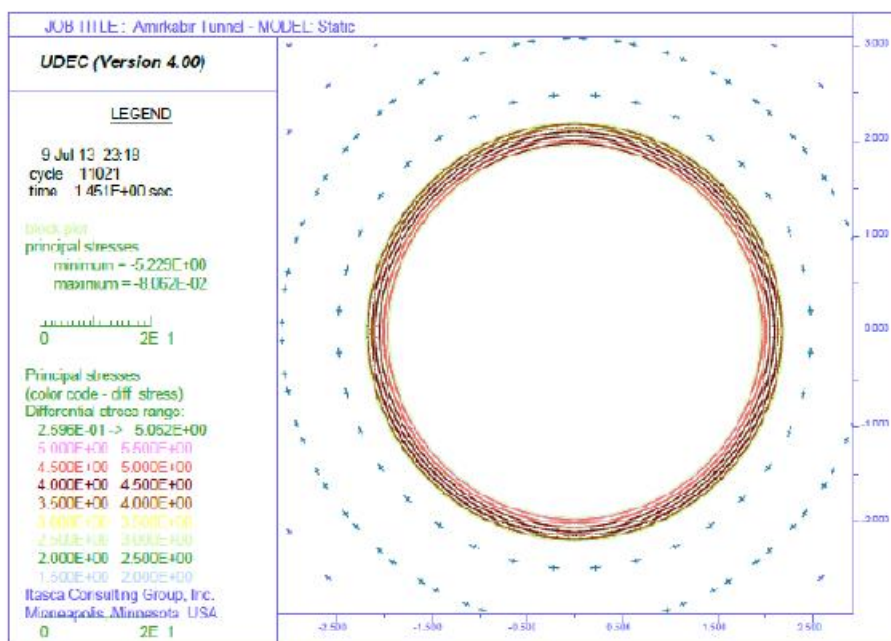
پارامتر	واحد	مقدار
دانسیته (γ)	Kg/m^3	۲۷۰۰
مدول الاستیسیته (E_s)	GPa	۶
ضریب پواسن (ν_s)	-	۰٫۲۵
چسبندگی (C)	MPa	۱٫۳۵
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	درجه	۴۹٫۶

جدول ۲: پارامترهای پوشش تونل

پارامتر	واحد	مقدار
مدول الاستیسیته (E_t)	GPa	۳۰٫۲
ضریب پواسن (ν)	-	۰٫۲
ضخامت (t)	cm	۲۵

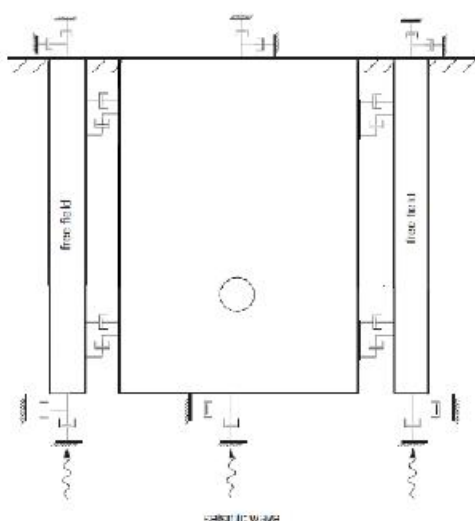


شکل ۳: وضعیت جابجایی در حالت استاتیکی



شکل ۴: وضعیت تنش در پوشش تونل در حالت استاتیکی

آید تا آماده مدل‌سازی دینامیکی شود. این تغییرات شامل اعمال شرایط مرزی جدید، اعمال پارگذاری دینامیکی و تبدیل میرایی سیستم استاتیکی به میرایی رایلی است. یا توجه به موارد ذکر شده، شرایط مرزی جدید به مدل اعمال شد که در شکل ۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۵: شرایط مرزی و پارگذاری لرزه‌ای مدل ایجاد شده در نرم افزار UDEC

۵- بارگذاری لرزه‌ای

۵-۱- تدوین تاریخچه زلزله طراحی

بایستی اذعان داشت که هر زلزله حرکات منحصر به فردی را بوجود می‌آورد که مشخصات آن وابسته به عوامل متعددی از جمله مکانیزم گسیختگی در منبع زلزله، محیط انتشار امواج و ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختگاه است. بنابراین لازم است تا پس از مشخص شدن توان لرزه‌خیزی ساختگاه در طی تحلیل خطر زلزله، تاریخچه زمانی آن به گونه‌ای تدوین گردد که بیشترین انطباق را با شرایط لرزه‌زمین ساخت منطقه داشته باشد (Kramer, 1996).

در این مقاله از رکورد زلزله پلده که در فاصله‌ای نزدیک به تونل مورد مطالعه بوده، استفاده شده است. این زلزله در سال ۱۳۸۳ در حد فاصل پلده و مرزن‌آباد به وقوع پیوسته است. موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران مختصات و مرکز آن را در ۵۱/۵۷ درجه طول شرقی و ۳۶/۲۸ درجه عرض شمالی و بزرگای آن را $5.5 M$ گزارش و در فاصله ۶۹ کیلومتری شمال تهران و ۱۴۰ کیلومتری جنوب غربی ساری گزارش نموده است (شیکه شتابنگاری زلزله ایران).

۵-۲- مدل دینامیکی اجزای مجزا

پس از تحلیل استاتیکی لازم است تا تغییراتی در مدل به وجود

۵-۳- بارگذاری لرزه‌ای

در زمان وقوع زلزله امواج حجمی از منبع به تمام جهات منتشر می‌شود. هنگامی که این امواج به مرز لایه‌ها و ناپیوستگی‌ها می‌رسند، دچار انعکاس و انکسار می‌شوند. یا توجه به این که سرعت عبور امواج در لایه‌های نزدیک به سطح معمولاً کمتر از لایه‌های زیرین است، انکسار رخ می‌دهد. این پدیده سبب می‌گردد که جهت انتشار امواج زلزله در لایه‌های افقی سطحی به صورت عمودی باشد (Kramer, 1996). بر اساس این واقعیت بارگذاری لرزه‌ای به صورت یک موج صفحه-ای برشی در نظر گرفته شده که از پای مدل در جهت قائم منتشر می‌شود (شکل ۵).

وجود مرزهای ویسکوز در پای مدل سبب می‌گردد که اعمال تاریخچه سرعت به طور مستقیم امکان پذیر نباشد. از این رو لازم است تا تاریخچه سرعت به تاریخچه تنش تبدیل گردد. یا فرض موج صفحه‌ای این تبدیل به صورت زیر انجام می‌شود (Itasca, 2004):

$$\sigma_{xy} = -2 \cdot \rho C_s V \quad (15)$$

ضریب ۲ به این دلیل است که نیمی از ورودی تنش در محل مرزهای ویسکوز جذب شده و تنها نیمی از آن مقدار واقعی بار دینامیکی است که به مدل اعمال می‌شود.

تاریخچه‌های اصلاح شده سرعت برای زلزله‌های مینای طرح (DBE) و زلزله معتبر پیشینه (MCE) مطابق شکل ۶ به دست می‌آید. سطح خطر در زلزله مینای طرح بر اساس ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال که معادل دوره بازگشت ۴۷۵ سال است، تعیین می‌شود و سطح خطر در زلزله معتبر پیشینه بر اساس ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال که معادل دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال است، تعیین می‌شود. پیشینه شتاب افقی برای بارگذاری لرزه‌ای DBE برابر ۰٫۳۵g و برای بارگذاری لرزه‌ای MCE برابر ۰٫۴۲g است.

۵-۴- تحلیل دینامیکی پوشش یکپارچه

در این قسمت، تاثیر سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف بررسی شده است. سطح تماس بین پوشش و محیط به سه صورت زیر مدل‌سازی شده است:

الف) حالت بدون لغزش: یا در نظر گرفتن خواص خیلی

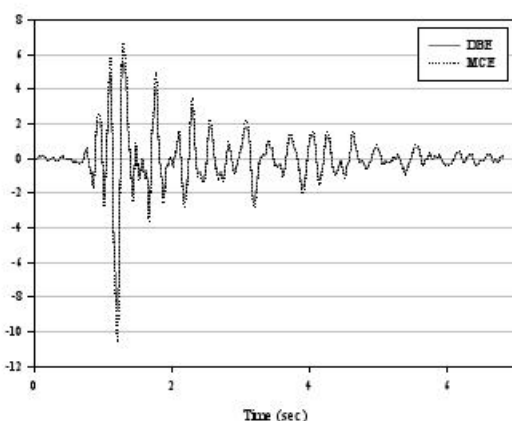
بالا (چسبندگی و زاویه اصطکاک زیاد) برای سطح تماس

ب) حالت لغزش کامل: یا در نظر گرفتن خواص خیلی

پایین (چسبندگی و زاویه اصطکاک کم) برای سطح تماس

ج) حالت واقعی: این حالت با در نظر گرفتن خواص

سطح تماس ما بین حالت لغزش کامل و بدون لغزش مدل-سازی شده است.

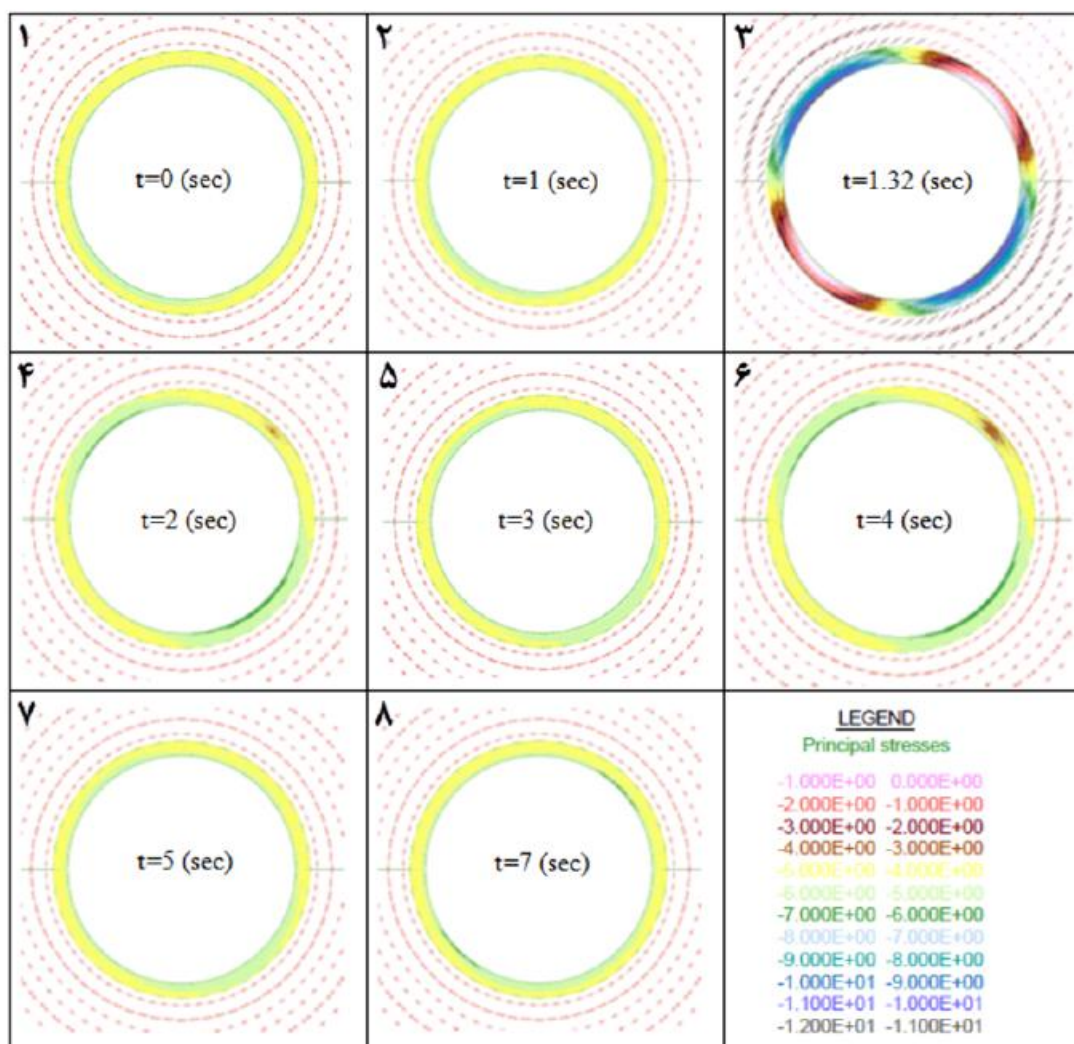


شکل ۶: تاریخچه زمانی اصلاح شده سرعت برای بارگذاری‌های لرزه‌ای DBE و MCE

۵-۴-۱- بررسی تغییرات تنش

در بررسی تغییرات تنش، پس از اتمام بارگذاری لرزه‌ای مشاهده شد که حالت تنش در اطراف فضای حفاری و در پوشش یکپارچه تغییر چندانی نکرده است، بلکه فقط مقدار تنش‌ها تغییر یافته است. شکل ۷-۱ تا ۷-۸ تغییرات تنش تغییرات تنش در اطراف فضای حفاری در هر یک ثانیه و همچنین زمان اوج بارگذاری در حالت واقعی نشان می‌دهد.

همان طوری که در شکل نشان داده شده است، وضعیت تنش در پایان بارگذاری لرزه‌ای DBE (شکل ۷-۸) تغییر چندانی نکرده است و تنها مقدار آن از ۵٫۲۳ مگاپاسکال به ۶٫۲۲ مگاپاسکال افزایش یافته است. اوج بارگذاری در فاصله زمانی ۱٫۲ تا ۱٫۵ ثانیه اتفاق افتاده است (شکل ۷-۳). مقدار حداکثر تنش در زمان ۱٫۳۲ ثانیه برابر ۱۱٫۵۹ مگاپاسکال بوده است که این بازه در واقع منطبق بر حرکات نیرومند بارگذاری لرزه‌ای است. در این ثانیه وضعیت تنش به شدت تغییر یافته است و نسبت به حالت استاتیکی و اوایل و اواخر بارگذاری لرزه‌ای تغییر محسوس یافته است، به طوری که در یک قسمت تنش حداکثر و در نقاط دیگر تنش حداقل شده است که این تفاوت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی را نشان می‌دهد.

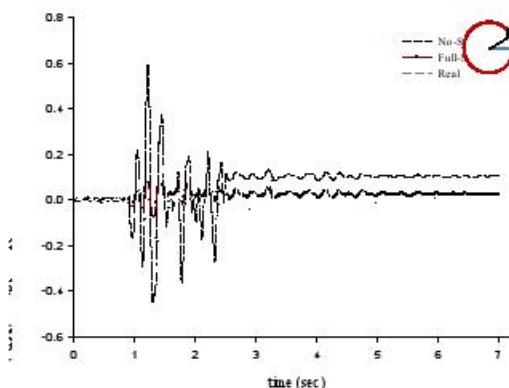


شکل ۷: تغییرات تنش در پوشش یکپارچه تحت بارگذاری لرزه‌ای DBE در حالت واقعی در طول بارگذاری

این حالت ما بین این دو حالت است. همچنین با توجه به شکل ۸ تنش باقیمانده در انتهای بارگذاری لرزه‌ای، در حالت بدون لغزش از دو حالت دیگر بیشتر می‌باشد. پیشنه تنش نرمال در سطح تماس در سه حالت لغزش کامل، واقعی و بدون لغزش به ترتیب برابر با ۷۸، ۲۶۰ و ۶۵۲ کیلوپاسکال می‌باشد. از آن جاییکه خواص سطح تماس پوشش و محیط اطراف در حالت بدون لغزش بیشتر از دو حالت دیگر است، بنابراین انعطاف پذیری سیستم نگهداری با محیط اطراف کمتر و سختی آن بیشتر از حالات دیگر است. لذا تنش ایجاد شده در حالت بدون لغزش در سطح تماس و در نهایت در پوشش تونل بیشتر از حالات دیگر خواهد بود.

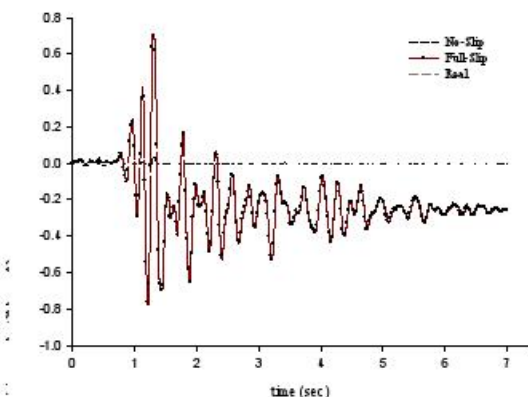
با ثبت تاریخچه زمانی می‌توان از چگونگی تغییرات تنش‌های نرمال و برشی در سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف در سه حالت بیان شده اطلاعات بهتری کسب کرد. شکل ۸ تاریخچه تغییرات تنش نرمال در روی سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف در سه حالت مختلف بارگذاری لرزه‌ای DBE نشان می‌دهد. در همه نمودارها مقادیر استاتیکی اولیه از آن‌ها کاسته شده است و مقادیر و تاریخچه‌ها مربوط به بارگذاری لرزه‌ای است. همانطوری که از این شکل پیداست، تنش نرمال ایجاد شده در حالت بدون لغزش بیشتر از حالت لغزش کامل است. همچنین حالت واقعی نیز ما بین دو حالت دیگر قرار گرفته است، چرا که خواص سطح تماس در

برشی بر روی سطح تماس را نشان می‌دهد. همان طوری که از اشکال پیداست، جایجایی نرمال و برشی در سطح تماس در حالت لغزش کامل بیشتر از حالت بدون لغزش است و حالت واقعی نیز مابین این دو حالت قرار گرفته است. به عبارت دیگر با افزایش خواص سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف، تنش‌های ناشی از بارگذاری لرزه‌ای افزایش و در نهایت جایجایی‌ها کاهش یافته است. همچنین مقدار بیشینه جایجایی‌ها نیز در بازه زمانی ۱٫۲ تا ۱٫۵ ثانیه و مطابق با بازه زمانی اوج بارگذاری اتفاق افتاده است.

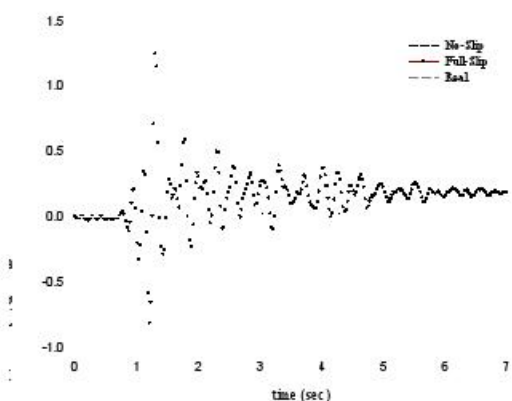


شکل ۸: تاریخچه تنش نرمال در سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف در سه حالت بدون لغزش، واقعی و لغزش کامل

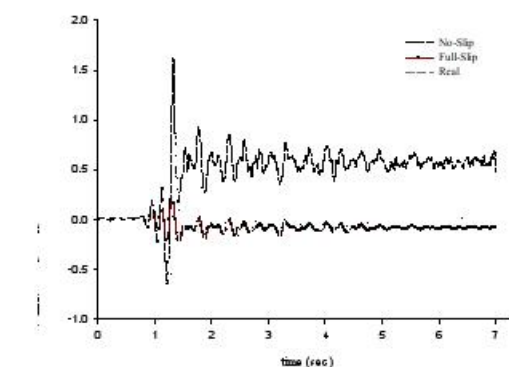
این موضوع برای تنش برشی ایجاد شده در سطح تماس نیز صادق است. شکل ۹ تاریخچه تنش برشی در سطح تماس را در سه حالت ذکر شده نشان می‌دهد. مطابق شکل، تنش برشی ایجاد شده همانند تنش نرمال برای سه حالت مختلف عمل کرده است. مقدار بیشینه تنش برشی در این حالت نیز در بازه زمانی ۱٫۲ تا ۱٫۵ ثانیه اتفاق افتاده است و سپس تغییرات تنش برشی کاهش یافته و در نهایت به یک مقدار تقریباً ثابتی رسیده است.



شکل ۹: تاریخچه تنش برشی در سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف در سه حالت بدون لغزش، واقعی و لغزش کامل



شکل ۱۰: تاریخچه جایجایی نرمال در سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف در سه حالت بدون لغزش، واقعی و لغزش کامل



شکل ۱۱: تاریخچه تنش برشی در سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف در سه حالت بدون لغزش، واقعی و لغزش کامل

۵-۴-۲- بررسی تغییرات جایجایی

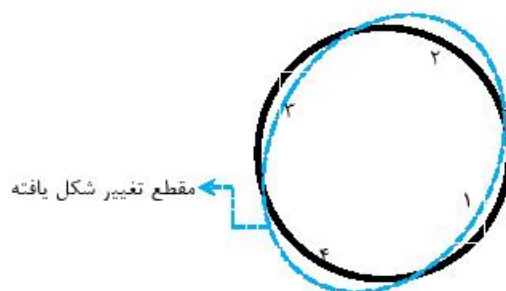
با ثبت تاریخچه جایجایی نرمال و برشی در سطح تماس پوشش و محیط اطراف برای سه حالت بیان شده، می‌توان اطلاعات بهتری در پاره تغییرات جایجایی بدست آورد. شکل ۱۰ تغییرات جایجایی نرمال و شکل ۱۱ تغییرات جایجایی

بررسی تغییرات جایجایی
با ثبت تاریخچه جایجایی نرمال و برشی در سطح تماس پوشش و محیط اطراف برای سه حالت بیان شده، می‌توان اطلاعات بهتری در پاره تغییرات جایجایی بدست آورد. شکل ۱۰ تغییرات جایجایی نرمال و شکل ۱۱ تغییرات جایجایی

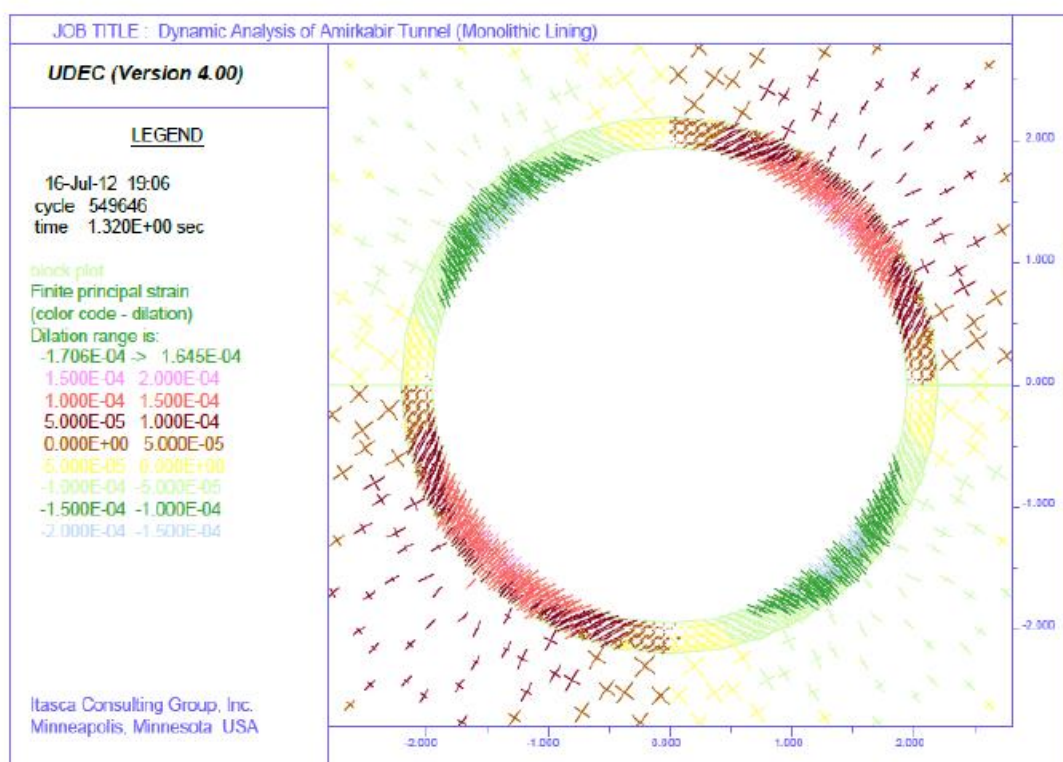
۵-۴-۳- تغییر شکل پوشش یکپارچه
در پاسخ لرزه‌ای مقاطع عرضی تونل‌ها بسته به شکل تونل دو

با توجه به شکل دایره‌ای تونل مورد بررسی، تغییرشکل بیضوی می‌بایست در آن مشاهده شود. در این حالت نقاط متقابل، رفتارهای متشابهی از خود نشان می‌دهند. به عبارت دیگر اگر نقاط ۱ و ۳ تحت کشش قرار بگیرند، نقاط ۲ و ۴ تحت فشار قرار خواهند گرفت. شکل ۱۳ وضعیت کرنش‌های ناشی از بارگذاری لرزه‌ای در پوشش یکپارچه و در زمان ۱٫۳۲ ثانیه را نشان می‌دهد. در این زمان بیشینه کرنش در پوشش ایجاد شده است. بر اساس این شکل می‌توان بیضوی شدن پوشش را توجیه کرد، چرا که در دو ربع اول و سوم کرنش‌ها مثبت (کشش) و در دو ربع دیگر کرنش‌ها منفی (فشاری) هستند. به عبارت دیگر در دو قطر متعام، کرنش‌های نرمال اعمالی از نظر جهت متفاوت هستند، لذا تونل به شکل بیضوی تغییرشکل می‌دهد.

نوع تغییرشکل اتفاق می‌افتد. در تونل‌های مستطیلی شکل کج‌شدگی و در تونل‌های دایره‌ای شکل، بیضوی شدن اتفاق می‌افتد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲: تغییرشکل بیضوی تونل‌های دایره‌ای شکل

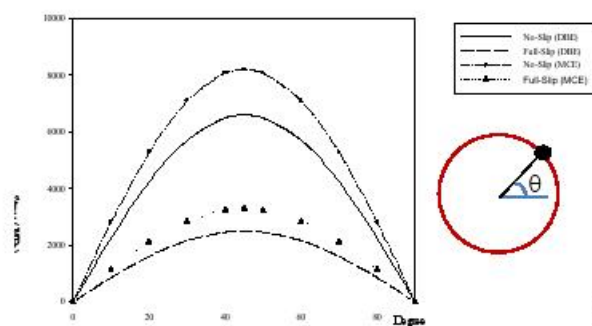


شکل ۱۳: وضعیت کرنش در پوشش یکپارچه تحت بارگذاری لرزه‌ای و در زمان ۱٫۳۲ ثانیه

مقایسه شدند. تنش بیشینه محاسبه شده توسط روش‌های مذکور برای دو نوع بارگذاری لرزه‌ای *MCE* و *DBE* در جدول ۳ مقایسه شده است. همچنین وضعیت تنش‌ها در ربع اول

۴-۴-۵- مقایسه نتایج روش تحلیلی و عددی برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی عددی، این نتایج با روش‌های تحلیلی ونگ (۱۹۹۳) و پارک (۲۰۰۹) مورد اشاره،

با افزایش خواص سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف (از حالت لغزش کامل تا بدون لغزش)، مقدار تنش بیشینه در پوشش افزایش و مقدار کرنش بیشینه کاهش یافته است. همچنین حالت واقعی نیز ما بین این دو حالت قرار گرفته است. به این موضوع نیز محققین مختلفی از جمله (Park et al, 2009)، (Hashash et al, 2005) و (Corigliano et al, 2011) نیز اشاره شده است. دلیل این افزایش تنش و کاهش کرنش مرتبط با سختی سیستم نگهداری و در نهایت انعطاف پذیری آن با محیط اطراف است. با افزایش انعطاف پذیری سیستم نگهداری نسبت به محیط اطراف، تنش ناشی از بارگذاری لرزه‌ای در پوشش کمتر اما کرنش و جابجایی ایجاد شده در آن بیشتر است.



شکل ۱۵: وضعیت تنش در پوشش یکپارچه تحت بارگذاری لرزه‌ای DBE و MCE

جدول ۴: مقادیر تنش و کرنش بیشینه ناشی از بارگذاری لرزه‌ای DBE و MCE

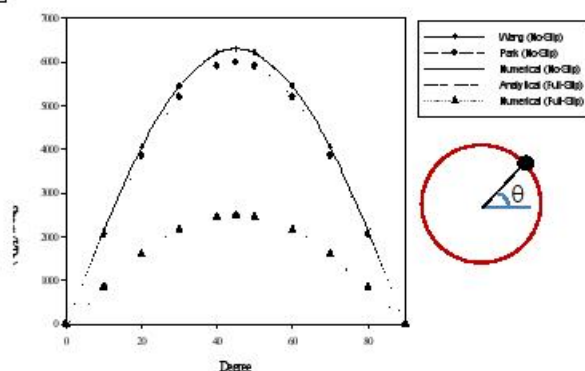
نوع بارگذاری لرزه‌ای	بدون لغزش	واقعی	لغزش کامل
تنش DBE (MPa)	۶۶۱	۵۳۱	۲۵۰
تنش MCE (MPa)	۸۳۱	۶۳۴	۲۳۹
کرنش DBE (× ۱۰ ^{-۴})	۱/۵۷	۲/۰۴	۲/۶۲
کرنش MCE (× ۱۰ ^{-۴})	۲/۰۳	۲/۵۱	۲/۷۳

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و مطالعه عددی تاثیر زلزله بر روی پوشش یکپارچه و تاثیر سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف در هنگام بارگذاری لرزه‌ای پرداخته شد. بر اساس تحلیل دینامیکی انجام شده، نتایج روش‌های

پوشش یکپارچه در اشکال ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. از آنجایی که نتایج روش‌های تحلیلی برای حالت بدون لغزش یکسان محاسبه شد، تنها یک روش از آن‌ها در اشکال آورده شده است.

مطابق اشکال ۱۴ و ۱۵، نتایج مدل‌سازی عددی مطابقت خوبی با روش‌های تحلیلی نشان می‌دهد. نتایج محاسبات بر اساس روش ونگ (۱۹۹۳) اختلاف کمتری نسبت به روش پارک (۲۰۰۹) با نتایج مدل‌سازی عددی در حالت بدون لغزش دارد (حدود ۴٫۵ درصد برای بارگذاری DBE و ۷٫۷ درصد برای بارگذاری MCE). این اختلاف ناشی از فرضیات ساده‌کننده‌ای است که در روش‌های تحلیلی در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر بار ورودی لرزه‌ای به صورت یک موج تنش یرشی ساده در نظر گرفته شده است، در حالی که در مدل‌سازی عددی از یک شتاب‌نگاشت واقعی استفاده شده است.



شکل ۱۴: وضعیت تنش در پوشش یکپارچه در دو حالت بدون لغزش و لغزش کامل تحت بارگذاری لرزه‌ای DBE

در شکل ۱۵ وضعیت تنش در دو حالت بارگذاری لرزه‌ای DBE و MCE با هم مقایسه شده‌اند. مطابق شکل، مقدار تنش در پوشش یکپارچه در حالت بارگذاری لرزه‌ای MCE بیشتر از DBE است، چرا که شتاب بیشینه و در نتیجه تنش ورودی به مدل بیشتر است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش شتاب بیشینه زلزله از ۰٫۳۵g تا ۰٫۴۲g (یعنی ۰٫۷g)، تنش ایجاد شده در پوشش ناشی از بارگذاری لرزه‌ای، به مقدار ۱٫۶ مگاپاسکال در حالت بدون لغزش و ۰٫۸ مگاپاسکال در حالت لغزش کامل افزایش می‌یابد.

جدول ۴ مقدار تنش و کرنش بیشینه ناشی از دو نوع بارگذاری لرزه‌ای DBE و MCE را نشان می‌دهد. طبق جدول

تحلیلی ونگ و پارک و روش عددی مطابقت خوبی تحت شرایط لغزش کامل و بدون لغزش در حالت پوشش یکپارچه داشتند.

تنش‌های اصلی ناشی از پارگذاری لرزه‌ای تا ۲٫۷ برابر در حالت بدون لغزش بیشتر از حالت لغزش کامل در پوشش یکپارچه است.

تنش‌های نرمال و برشی در روی سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف در شرایط بدون لغزش بیشتر از شرایط لغزش کامل و پارک و روش عددی مطابقت خوبی تحت شرایط لغزش کامل و بدون لغزش در حالت پوشش یکپارچه داشتند.

یا توجه به شکل دایره‌ای تونل مورد بررسی، تغییرشکل بیضوی در آن مشاهده شد. به عبارت دیگر در دو قطر متعام، کرنش‌های نرمال اعمالی از نظر جهت متفاوت بوده و لذا تونل به شکل بیضوی تغییرشکل می‌دهد.

۷- منابع‌ها

- Hashash, Y. M. A., Hook, J., Schmidt, B., Yao, J. (2001). Seismic Design and Analysis of Underground Structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 16(4): p. 247-293.
- Wang, J.N. (1993). Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach. New York, Monograph 7: Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc.
- Penzien, J. (2000). Seismically Induced Racking of Tunnel Linings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 29: p. PP:683-691.
- Bobet, A. (2003). Effect of Pore Water Pressure on Tunnel Support During Static and Seismic Loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 18(4): p. 377-393.
- Park, K.H., Tantayopin, K., Tontavanich, B., Owatsiriwong, A. (2009). Analytical Solution for Seismic-Induced Ovaling of Circular Tunnel Lining Under No-Slip Interface Conditions: a Revisit. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 24(2): p. 231-235.
- Hashash, Y.M.A., Park, D., Yao, J.I.C. (2005). Ovaling Deformations of Circular Tunnels Under Seismic Loading, an Update on Seismic Design and Analysis of Underground Structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 20(5): p. 435-441.
- Corigliano, M.(2007). Seismic Response of Deep Tunnels in Near-Fault Conditions, in Politecnico di Torino: Italy. p. 222.
- Sahel Consulting Company (2009a), *Earthquake Risk Analysis and Seismotectonics Report of Amirkabir Water Conveyance Tunnel Project*, No. 6, Tehran (Piece K "-BR).
- Sahel Consulting Company (2009b), *Geology Report of Amirkabir Water Conveyance Tunnel Project*, No. 6, Tehran (Piece K "-BR).
- Kramer, S., (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. 653.
- Ministry of Housing and Urban Development, www.bhrc.ac.ir/Portal/ismn.

Itasca Group Consulting, (2004). UDEC version 4.1 User's manual.

Corigliano, M., Scandella, L., Lai, C.G., Paolucci, R. (2011). Seismic Analysis of Deep Tunnels in Near Fault Conditions: A case Study in Southern Italy. Original Research Paper. Bull Earthquake Eng.