

## تحلیل عددی سیستم نگهداری منفصل (سگمنتال) تحت بار زلزله

روح اله بصیرت<sup>۱\*</sup>، حسین سالاری راد<sup>۲</sup> و حامد ملاداودی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۱۷	<p>امروزه در اکثر تونل‌های حفر شده با TBM، از پوشش بتنی پیش ساخته شده (سگمنتال) به عنوان سیستم نگهداری استفاده می‌شود. از طرفی، مکانیزم عملکرد درزه‌های بین دو سگمنت در برابر بارهای لرزه‌ای شناخته نشده است.</p> <p>در این مقاله به بررسی و مطالعه عددی تأثیر زلزله بر روی سیستم نگهداری سگمنتال و نیروهای حاصله عمودی و برشی در سطح تماس بین قطعات پرداخته شده است. بدین منظور از اطلاعات تونل انتقال آب کرج به تهران (امیرکبیر) و از نرم‌افزار دوبعدی UDEC استفاده شده است. در ابتدا پوشش سگمنتال تحت دو شرایط لغزش کامل و بدون لغزش بررسی شد و نیروهای حاصل برشی و نرمال درزه‌های بین دو سگمنت تحلیل شد. در نهایت تأثیر سختی درزه‌های بین دو سگمنت مطالعه شد. نتایج نشان دادند که با افزایش خواص مقاومتی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) بین پوشش سگمنتال و محیط نیروها بر روی درزه‌های بین دو سگمنت افزایش یافته و با افزایش سختی بین درزه‌ها، نیروهای نرمال و برشی بر روی درزه‌ها افزایش و جابجایی‌های نرمال و برشی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش صلبیت سیستم نگهداری، انعطاف‌پذیری پوشش با محیط اطراف کاهش یافته و در نتیجه تنش‌ها افزایش و جابجایی‌ها کاهش خواهند یافت، بطوریکه تنش در پوشش سگمنتال ۱۰٪ کاهش و کرنش ۲۵٪ نسبت به پوشش یکپارچه افزایش می‌یابد.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵	
<p><b>واژگان کلیدی:</b></p> <p>سیستم نگهداری منفصل، پوشش سگمنتال، بار زلزله، تحلیل دینامیکی، شرایط لغزش کامل، شرایط بدون لغزش.</p>	

### ۱- مقدمه

مختلف جهان به این روش ساخته می‌شوند. یکی از مزایای این ماشین‌ها اجرای سیستم نگهداری تونل به صورت همزمان است. در این روش، تونل معمولاً با استفاده از قطعات پیش ساخته بتنی (سگمنت‌ها) نگهداری می‌شود. این قطعات همزمان با حفاری و پیشروی در تونل توسط خود ماشین نصب می‌شوند. نکته قابل توجه در مورد این قطعات، نحوه اتصال بین آن‌ها می‌باشد، زیرا میزان سختی بین این قطعات تأثیر بسزایی در تغییر شکل‌ها و نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل دارد.

تاکنون روش‌های مختلفی برای تحلیل دینامیکی سیستم‌های نگهداری تونل‌ها در برابر بار دینامیکی

امروزه طراحی تونل‌ها در برابر بارگذاری‌های استاتیکی با دقت بالایی انجام می‌شود. با استفاده از روش‌های عددی پیشرفته، شبیه‌سازی همه مراحل ساخت و ساز و مدل‌سازی شرایط مرزی پیچیده تونل‌ها فراهم شده است. هنوز افزایش تنش در پوشش تونل‌ها در خلال بارگذاری زلزله با دقت مشابه بارگذاری استاتیکی برآورد نشده است [۱]. یکی از روش‌های متداول حفر تونل‌های طویل و عمیق، حفاری با استفاده از ماشین‌های حفار T.B.M است. امروزه این روش حفاری به علت کارایی بهتر و مزایای بیشتر، مورد توجه قرار گرفته است. بسیاری از تونل‌های

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: r.basirat@modares.ac.ir

۱. دانشجوی دکترای مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی

۲. استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

۳. استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

تونل‌های آزادراه منجیل-رودبار ارائه کردند [۱۴-۱۲]. نتایج آن‌ها نشان داد که روش ارائه شده، روشی سریع، مناسب و قابل اطمینان برای تحلیل پوشش تونل‌ها می‌باشد. با این وجود هنوز تأثیر درزه‌های واقع در پوشش سگمنتال در تغییرات تنش‌ها و کرنش‌ها و توزیع نیروها و جابجایی‌ها بر روی این درزه‌ها به طور واضح مشخص نشده است. در این مقاله نیز، به بررسی اثر درزه‌های بین سگمنت در توزیع نیروها و جابجایی‌های نرمال و برشی تحت بارگذاری زلزله توسط روش اجزای محدود پرداخته شده است.

## ۲- طراحی درزه بین سگمنت در تونل‌ها

در روش‌های آنالیز تغییرشکل‌های حلقوی تونل مقطع پوشش تونل پیوسته فرض می‌شود. در صورتی که حفر تونل با ماشین‌های تونلسازی (TBM) اجرا می‌شود، پوشش تونل معمولاً به شکل سگمنت نصب می‌شود. این سگمنت‌ها معمولاً با بولت به یکدیگر متصل می‌شوند. درزه بین سگمنت‌ها باید به گونه‌ای طراحی شود که تغییرشکل‌های زمین را در خود جای دهد. در طراحی درزه بین دو سگمنت ممکن است رفتار الاستیک یا رفتار غیرالاستیک با دقت بیشتر فرض شود، در این صورت اندرکنش بین زمین و پوشش نیز در نظر گرفته شود [۲].

بین سگمنت‌ها درزه طولی و بین رینگ‌های متوالی درزه‌های محیطی ایجاد می‌گردد. درزه‌های طولی و محیطی سبب انتقال نیروهای محوری، نیروهای برشی و گشتاور بین سگمنت‌ها و رینگ‌ها می‌گردند [۱۵].

## 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 طراحی و اجرا شده است. شعاع این تونل ۱/۹۵ متر و ضخامت پوشش بتنی مورد استفاده در این تونل برابر ۲۵ سانتیمتر می‌باشد [۱۶]. بیشتر واحدهای سنگی مسیر تونل دارای منشأ آذرآواری هستند. طول زیادی از مسیر از سنگ‌های آذرین که شامل مونزودیوریت، مونزوگابرو، میکروگابرو و برش لاوایی آندزیتی می‌شوند، تشکیل یافته است [۱۷].

مقطع تحلیل شده در ۲۶۰۰ کیلومتر در واحد سنگی 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.

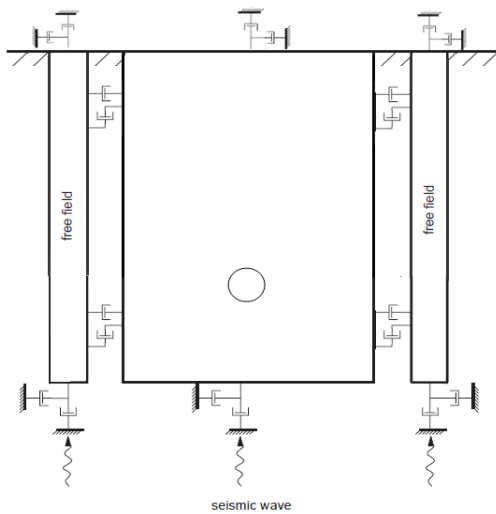
محققین مختلف ارائه شده است. این روش‌ها به سه دسته شبه استاتیکی، تحلیلی و عددی تقسیم بندی می‌شوند [۲]. روش‌های شبه استاتیکی و تحلیلی با در نظر گرفتن فرضیات ساده شده شامل محیط همگن، الاستیک و پوشش یکپارچه ارائه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به روش‌های ونگ (۱۹۹۳)، پارک (۲۰۰۹) و... اشاره نمود [۳ و ۴]. بصیرت و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از روش‌های تحلیلی به بررسی پایداری سیستم نگهداری تونل انتقال آب امیرکبیر پرداختند [۵]. آن‌ها همچنین، اندرکنش پوشش تونل با محیط اطراف را بررسی کردند. آن‌ها روش‌های تحلیلی را با در نظر گرفتن دو حالت کلی بدون لغزش و لغزش کامل در نرم افزار UDEC مقایسه کردند. نتایج حاصل، تطابق خوبی بین روش‌های تحلیلی و عددی نشان داد [۶]. در مورد تحلیل دینامیکی پوشش سگمنتال می‌توان به مطالعات لو و همکاران (۲۰۰۷) اشاره کرد. آن‌ها با مدل‌سازی عددی نشان دادند، سختی متفاوت بین قطعات و درزه‌های پوشش تأثیر قابل توجهی بر نیروهای داخلی پوشش دارد [۷]. چو و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش شبه استاتیکی و با استفاده از نرم افزار Plaxis طراحی پوشش سگمنتال تونل مترو دهلی را انجام دادند [۸]. چن و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از المان استراکچر در نرم افزار FLAC2D به تحلیل دینامیک تونل Taipei Rail Transit تحت بار زلزله پرداختند. آن‌ها برای در نظر گرفتن اثر درزه‌های سگمنت، از ممان اینرسی موثر به جای ممان اینرسی پوشش استفاده کردند [۹]. دو و همکاران (۲۰۱۴) روش هایپراستاتیکی را برای بررسی رفتار پوشش سگمنتال تونل‌ها با در نظر گرفتن اثر درزه‌های سگمنت به صورت غیرمستقیم با بکار گرفتن فاکتور کاهش صلبیت خمشی پوشش بهبود بخشیدند [۱۰]. این محققین همچنین با استفاده از روش عددی المان محدود برای پوشش سگمنتال تونل‌ها، روش هایپراستاتیکی را توسعه دادند. نتایج عددی آن‌ها نشان داد که روش توسعه داده شده می‌تواند به صورت موثر برای تخمین رفتار پوشش سگمنتال تونل‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. حسنی و بصیرت (۲۰۱۶) با استفاده از روش هایپراستاتیکی در نظر گرفته شده و ساده سازی روش دو و همکاران (۲۰۱۴) با تلفیق روش‌های تحلیلی ونگ (۱۹۹۳) و سایر روش‌ها، روش ساده‌ای را جهت در نظر گرفتن بار زلزله در پوشش تونل‌ها در فضای دو بعدی و سه بعدی با مطالعه موردی

#### ۴- تحلیل دینامیکی

پس از تحلیل استاتیکی لازم است تا تغییراتی در مدل به وجود آید تا آماده مدل سازی دینامیکی شود. این تغییرات شامل اعمال شرایط مرزی جدید، اعمال بارگذاری دینامیکی و تبدیل میرایی سیستم استاتیکی به میرایی رایلی است.

در زمان وقوع زلزله امواج حجمی از منبع به تمام جهات منتشر می شود. هنگامی که این امواج به مرز لایه ها و ناپیوستگی ها می رسند، دچار انعکاس و انکسار می شوند. با توجه به این که سرعت عبور امواج در لایه های نزدیک به سطح معمولاً کمتر از لایه های زیرین است، انکسار رخ می دهد. این پدیده سبب می گردد که جهت انتشار امواج زلزله در لایه های افقی سطحی به صورت عمودی باشد [۲۰]. بر اساس این واقعیت بارگذاری لرزه ای به صورت یک موج صفحه ای برشی در نظر گرفته شده که از پای مدل در جهت قائم منتشر می شود (شکل ۱).

با توجه به موارد ذکر شده، شرایط مرزی جدید (مرزهای جاذب یا ویسکوز) به مدل اعمال شد که در شکل ۱ مشاهده می شود.



شکل ۱- شرایط مرزی و بارگذاری لرزه ای مدل ایجاد شده در نرم افزار UDEC

#### ۴-۱- بارگذاری لرزه ای

در این مقاله از رکورد زلزله بلده که در فاصله ای نزدیک به تونل مورد مطالعه بوده، برای بارگذاری لرزه ای استفاده شده است [۲۱]. وجود مرزهای ویسکوز در پای مدل سبب می گردد که اعمال تاریخچه سرعت به طور مستقیم امکان پذیر نباشد. از این رو لازم است تا تاریخچه سرعت به تاریخچه

جدول ۱- خواص مقاومتی توده سنگ برای مقطع مورد نظر بر اساس مطالعات مشاور طرح [۱۷]

پارامتر	نشانه	واحد	مقدار
دانسیته	$\gamma$	kg/m <sup>3</sup>	۲۷۰۰
مدول دگرشکلی	$E_s$	GPa	۶
ضریب پواسن	$\nu$	-	۰/۲۵
چسبندگی	C	MPa	۱/۳۵
زاویه اصطکاک داخلی	$\phi$	درجه	۴۹/۶

مقطع حفاری شده این تونل به صورت دایره ای است. از پوشش سگمنتال با شش قطعه سگمنت (۵+۱) به عنوان سیستم نگهداری استفاده شده است. خصوصیات پوشش سگمنتال در جدول ۲ آورده شده است. پارامترهای قطعات بتنی پیش ساخته از مطالعات مشاور طرح و پارامترهای سطح تماس بین سگمنت و محیط اطراف و بین دو سگمنت به طور عمده از منابع [۱۸] و [۱۹] استخراج شده است به طوری که مقداری ما بین حالت کامل و بدون لغزش (معادل با حالت واقعی) که در ادامه توضیح خواهد داده شد، انتخاب شده اند.

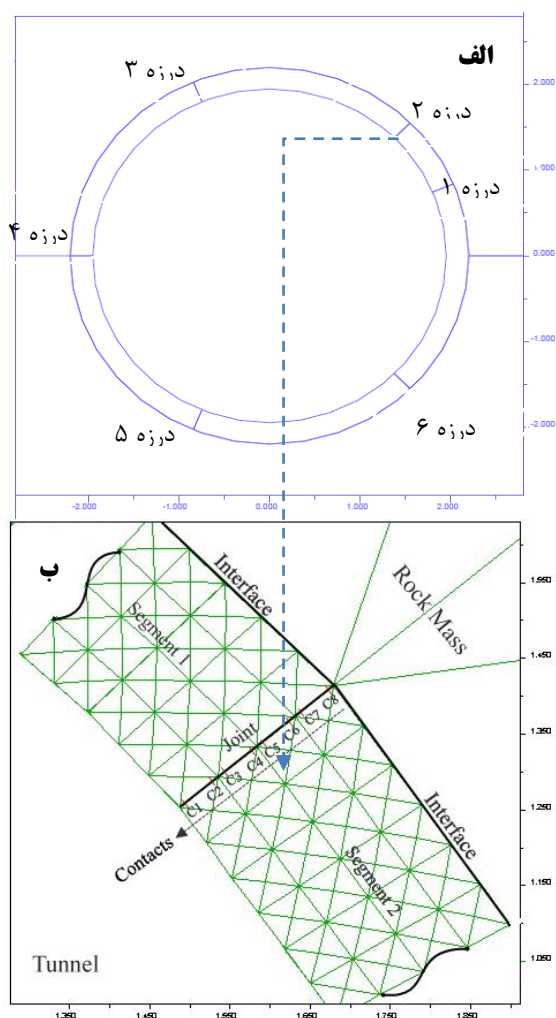
جدول ۲- پارامترهای پوشش سگمنتال

پارامتر	نشانه	واحد	مقدار
دانسیته	$\gamma$	kg/m <sup>3</sup>	۲۵۰۰
مدول الاستیسیته	$E_s$	GPa	۳۰/۲
ضریب پواسن	$\nu$	-	۰/۲
چسبندگی	C	MPa	۵/۵
زاویه اصطکاک داخلی	$\phi$	درجه	۵۵
مقاومت فشاری	$c\sigma$	MPa	۴۰
مقاومت کششی	$\sigma_t$	MPa	۳/۲

پارامترهای سطح تماس بین دو سگمنت				پارامترهای سطح تماس بین سگمنت و محیط اطراف			
$\phi$	C	$K_s$	$K_n$	$\phi$	C	$K_s$	$K_n$
°	MPa	GPa/m	GPa/m	°	MPa	GPa/m	GPa/m
۴۵	۰/۷۵	۱۲/۵۸	۱۶/۷	۳۵	۰/۶	۲/۴	۴

$K_n$ : سختی نرمال درزه،  $K_s$ : سختی برشی درزه  
C: چسبندگی و  $\phi$ : زاویه اصطکاک داخلی درزه

تماس (چسبندگی تا ۱۰ برابر چسبندگی در حالت واقعی مطابق جدول ۲ و زاویه اصطکاک زیاد حدود ۶۰ درجه) و حالت لغزش کامل با در نظر گرفتن خواص مقاومتی بسیار کم برای سطح (چسبندگی کم نزدیک به صفر و زاویه اصطکاک کم حدود ۱۰ درجه) مدل سازی شده است. با استفاده از نقاط پایش بر روی سطح تماس بین دو سگمنت، این دو حالت بررسی می شود. لازم به ذکر است که این دو حالت (بدون لغزش و لغزش کامل) در مقاله بصیرت و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از نرم افزار UDEC مقایسه و اعتبارسنجی شده است. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که روش عددی با روش های تحلیلی در هر دو حالت بدون لغزش و لغزش کامل مطابقت خوبی دارند [۶]. لذا در این مقاله، از ذکر اعتبارسنجی مدل عددی، صرف نظر شده است.



شکل ۳- المان بندی و محل المان های تماسی درزه ۲

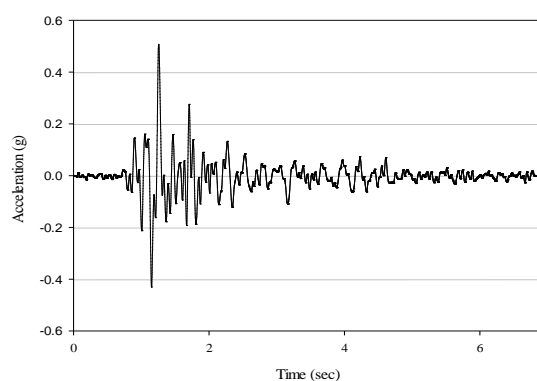
شکل (۴) تاریخچه های تنش نرمال و شکل (۵) تاریخچه های تنش برشی بر روی المان تماسی میانی واقع بر درزه های پوشش سگمنتال را در دو حالت بدون لغزش و لغزش

تنش تبدیل گردد. با فرض موج صفحه ای این تبدیل به صورت زیر انجام می شود [۱۸]:

$$\sigma_{xy} = -2 \cdot \rho \cdot C_s \cdot V \quad (1)$$

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 می شود.

در شکل (۲) شتابنگاشت اصلاح شده مربوط به این زلزله نشان داده شده است. موج زلزله با تبدیل شتابنگاشت به تاریخچه سرعت و سپس تبدیل به تنش برشی به پایین مدل اعمال شده است.



شکل ۲- تاریخچه زمانی اصلاح شده شتاب زلزله بلده

#### ۲-۴- مدل سازی پوشش سگمنتال

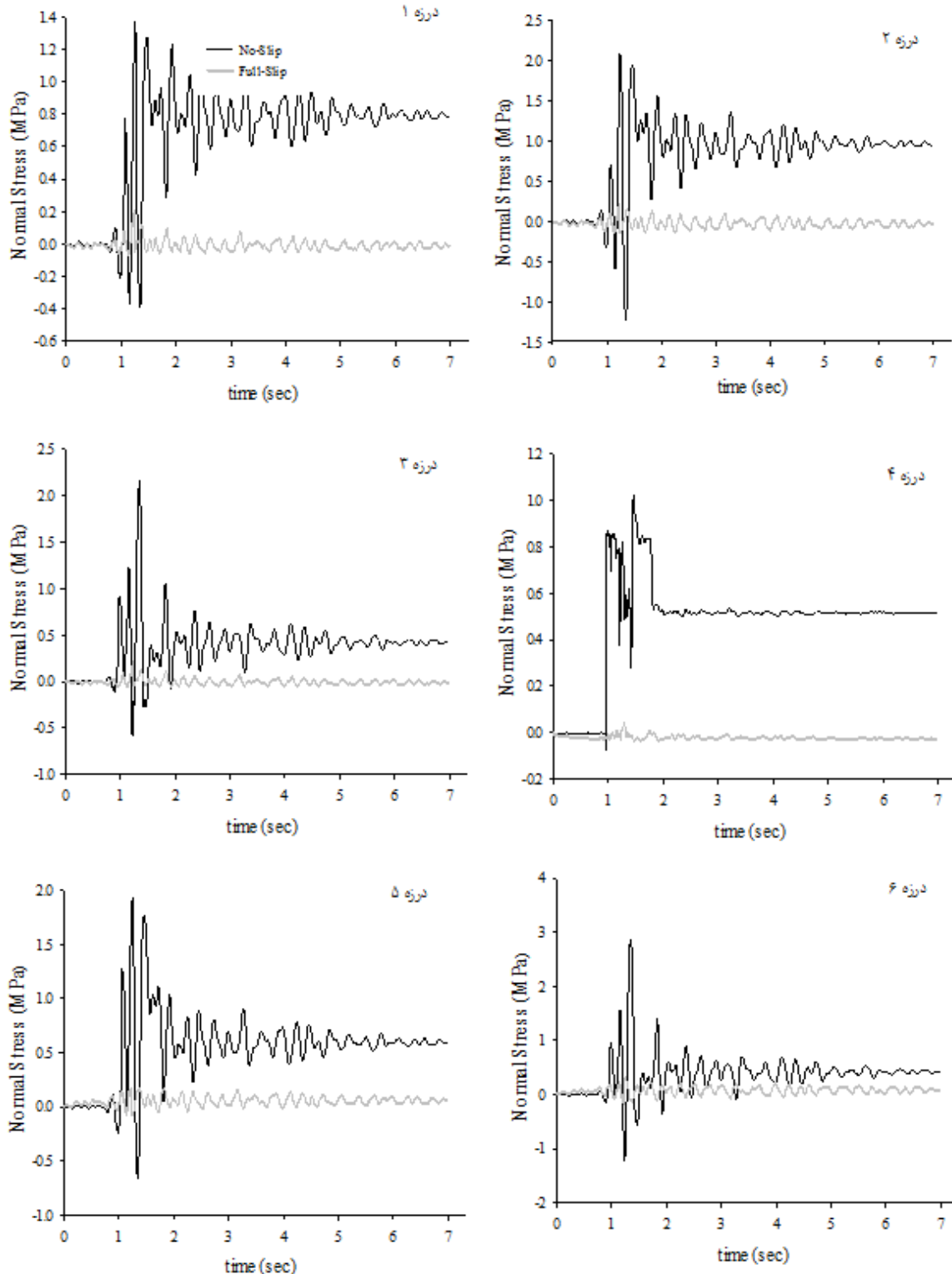
در شکل (۳) نحوه قرار گیری سگمنت ها و شماره گذاری درزه ها به ترتیب از ۱ تا ۶ نشان داده شده است. با توجه به ضخامت ۲۵ سانتیمتری سگمنت ها، ابعاد المان ها در این منطقه طوری در نظر گرفته شده است که ۴ المان در این ناحیه قرار بگیرد. بنابراین تعداد ۸ المان تماسی در سطح تماس بین دو سگمنت وجود دارد که دو تای آن ها در سطح داخلی و خارجی (سمت توده سنگ) و بقیه مابین این دو درزه شماره ۲) نحوه نام گذاری المان تماسی ها در شکل ۳- الف و چگونگی المان بندی و محل المان تماسی ها در شکل (۳-ب) نشان داده شده است.

#### ۳-۴- بررسی حالت بدون لغزش و لغزش کامل در سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف

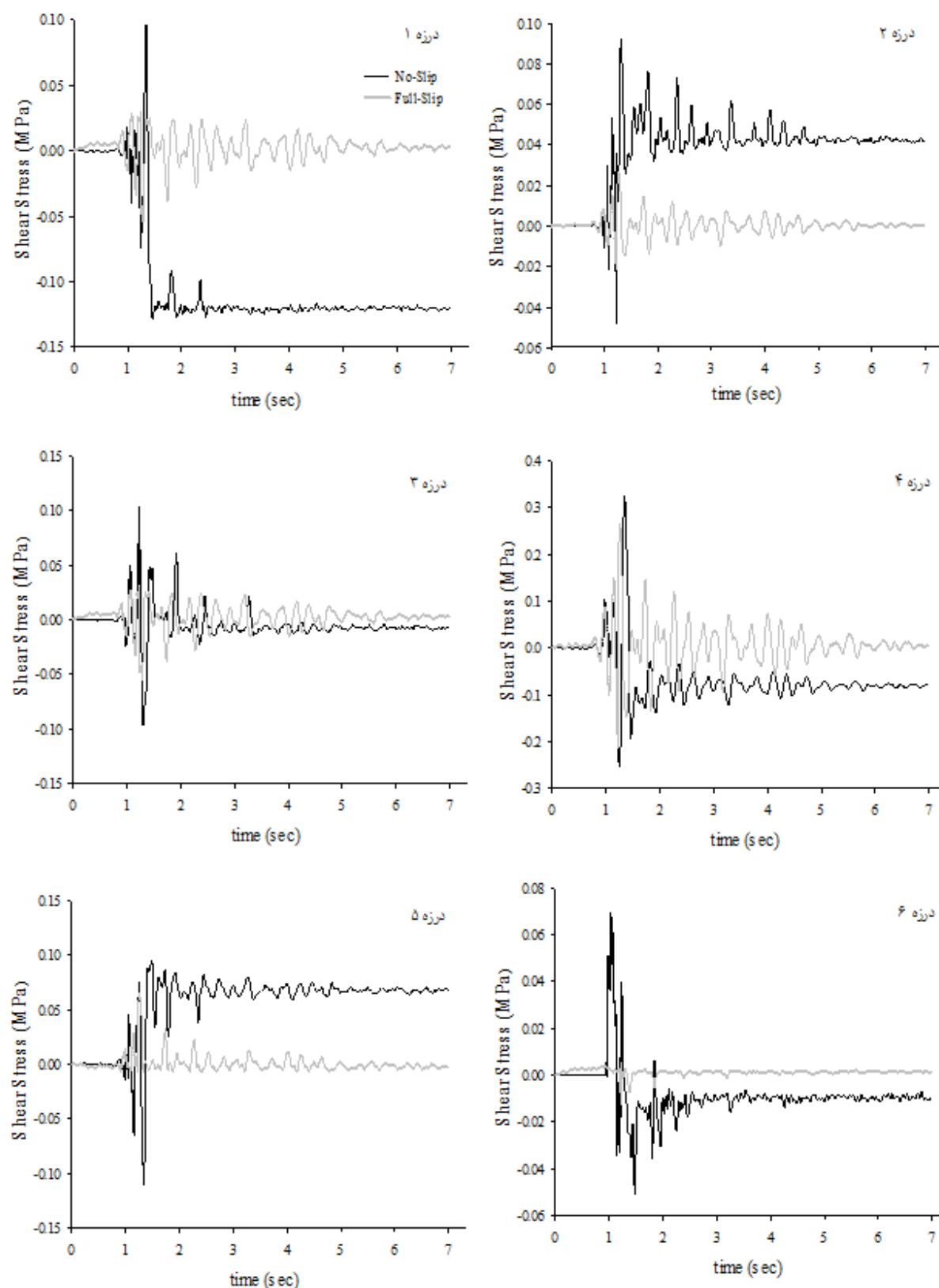
برای بررسی نیروهای ناشی از بارگذاری لرزه ای در پوشش سگمنتال، ابتدا دو حالت برای سطح تماس بین پوشش و محیط اطراف در نظر گرفته شده است. حالت بدون لغزش با در نظر گرفتن خواص مقاومتی بسیار زیاد برای سطح

تنش‌ها مربوط به حالت بارگذاری دینامیکی خالص می‌باشد و مقدار استاتیکی از آن کم شده است و تمامی تاریخچه‌ها از صفر شروع شده‌اند.

کامل در حالت دینامیکی خالص نشان می‌دهد (شماره بندی درزه‌ها مطابق شکل ۳ می‌باشد). نکته‌ای که در اینجا باید ذکر کرد این است که در شکل‌های (۴) و (۵) تاریخچه



شکل ۴- تاریخچه تنش نرمال بر روی ۶ درزه در دو حالت بدون لغزش و لغزش کامل

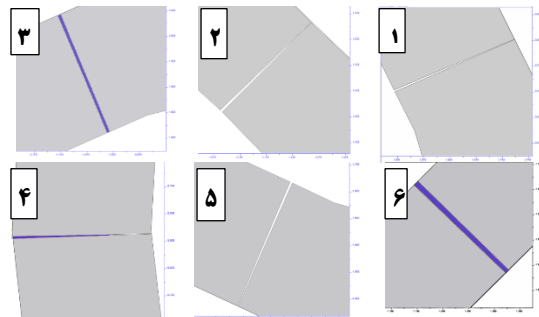
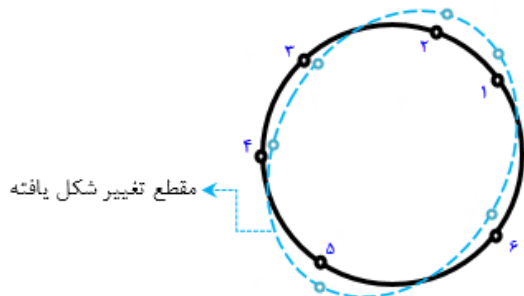


شکل ۵- تاریخچه تنش برشی بر روی ۶ درزه در دو حالت بدون لغزش و لغزش کامل

نگهداری با محیط اطراف بیشتر از حالت لغزش کامل و در نتیجه انعطاف پذیری آن کمتر است، در نتیجه تنش‌های بیشتری در آن ایجاد می‌گردد.

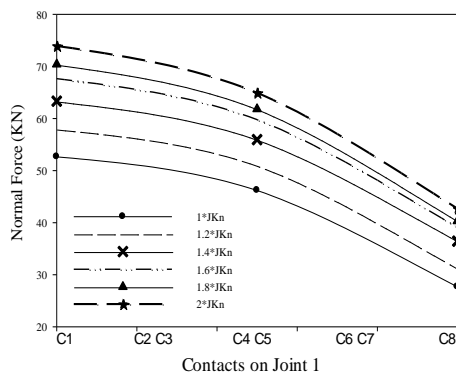
چنان چه مشاهده می‌شود در همه درزه‌ها مقدار تنش نرمال و برشی در حالت بدون لغزش بیشتر از حالت لغزش کامل است. چرا که در حالت بدون لغزش سختی سیستم

نرمال ۰/۳۷ میلیمتر (۲۷ درصد) کاهش یافته است. چرا که با افزایش سختی نرمال، نیروی بیشتری برای ایجاد جابجایی نرمال به اندازه واحد لازم است.



شکل ۶- باز و بسته شدن درزه‌های پوشش سگمنتال تحت بار زلزله در زمان ۱/۳۲ ثانیه

از طرفی با توجه به اشکال (۹) و (۱۰)، تغییرات نیرو و جابجایی برشی با افزایش سختی نرمال خیلی کم می‌باشد، به طوری که با افزایش دو برابری سختی نرمال به طور متوسط نیروی برشی تقریباً ۰/۵ کیلو نیوتن و جابجایی برشی ۰/۰۱ میلیمتر (۳ درصد) تغییر یافته است. در اینجا تنها تغییرات نیرو و جابجایی برشی بر روی درزه (۱) نشان داده شده است. اختلاف نیروها در امتداد عرضی درزه‌های سگمنت، موجب اختلاف مقدار جابجایی‌ها در این امتداد می‌شود. این اختلاف جابجایی‌ها، نشان‌دهنده چرخش درزه‌های بین دو سگمنت است.



شکل ۷- تاثیر سختی نرمال درزه‌ها بر روی نیروی نرمال

همچنین مطابق شکل (۴) تاریخچه تنش‌های نرمال درزه‌های ۱ و ۲ رفتاری مشابه درزه ۵ و درزه ۳ رفتاری مشابه درزه ۶ دارد (به شکل ۳-الف مراجعه شود). به عبارت دیگر درزه‌های متقابل رفتاری مشابه دارند. همچنین در هر دو حالت بدون لغزش و لغزش کامل، مقدار تنش‌های برشی کمتر از تنش‌های نرمال است و این امر باعث می‌شود درزه‌های بین دسگ بیشتر تحت فشار و کشش و کمتر تحت برش قرار بگیرند.

#### ۴-۴- بیضوی شدن پوشش سگمنتال

مقاطع عرضی تونل‌های دایروی در برابر بارهای دینامیکی تغییرشکل بیضوی دارند. در هنگام بیضوی شدن مقطع تونل، نقاط متقابل آن به طور مشابه رفتار می‌کنند. این رفتار برای پوشش سگمنتال نیز اتفاق می‌افتد. شکل (۶) بازشدگی و بسته شدن درزه‌های پوشش سگمنتال در زمان اوج بارگذاری ۱/۳۲ ثانیه و با پارامترهای واقعی مطابق جدول (۲) را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه درزه‌های ۱، ۲ و ۵ روبه‌روی هم و درزه‌های ۳، ۴ و ۶ نیز روبه‌روی هم هستند، این درزه‌ها رفتاری مشابه دارند.

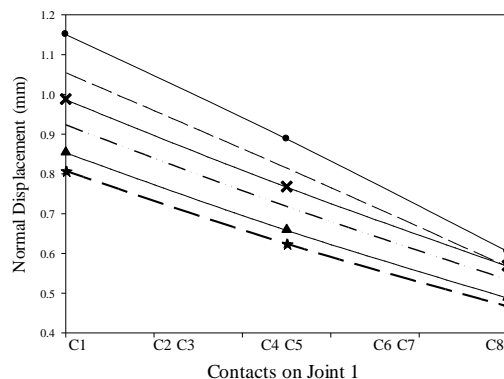
در زمان اوج بارگذاری (۱/۳۲ ثانیه) درزه‌های ۱، ۲ و ۵ تحت کشش قرار گرفته‌اند و در نتیجه بازشدگی در آن‌ها اتفاق می‌افتد. از طرفی درزه‌های ۳، ۴ و ۶ تحت فشار قرار گرفته و در نتیجه بسته شدگی در آن‌ها اتفاق افتاده است. این موضوع بیضوی شدن پوشش سگمنتال را توجیه می‌کند (شکل ۶).

#### ۴-۵- بررسی تأثیر سختی نرمال و برشی درزه‌ها

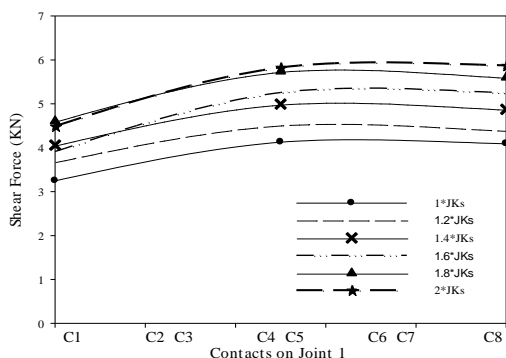
در این قسمت تأثیر سختی نرمال و برشی درزه‌های بین دو سگمنت بررسی شد. ابتدا سختی نرمال و سپس سختی برشی درزه بین دو سگمنت تا دو برابر افزایش داده شد. سپس نیروها و جابجایی‌های نرمال و برشی و توزیع آن‌ها بر روی امتداد عرضی درزه دو سگمنت در زمان اوج بارگذاری (۱/۳۲ ثانیه) مطالعه شد.

اشکال (۷) تا (۱۰) به ترتیب تاثیر سختی نرمال بر روی نیروها و جابجایی‌های نرمال و برشی واقع بر درزه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش سختی نرمال، نیروهای نرمال نیز در درزه‌ها افزایش و جابجایی نرمال کاهش یافته است، به طوری که به طور متوسط با افزایش دو برابری سختی نرمال، نیروی نرمال به طور متوسط ۱۶ کیلونیوتن (۲۳ درصد) افزایش و جابجایی

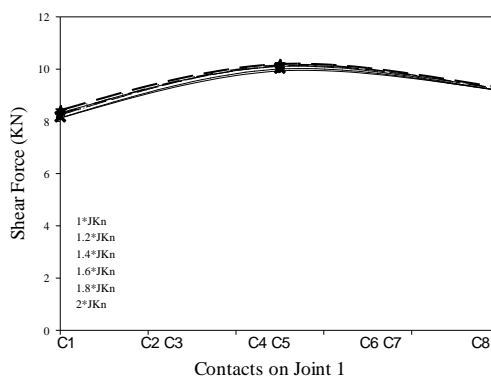
درصد) افزایش و جابجایی برشی ۰/۰۵ میلیمتر (۳۰ درصد) کاهش یافته است؛ چراکه با افزایش سختی برشی، مقدار نیروی برشی بیشتری برای جابجایی به اندازه واحد در جهت مماس سطح، لازم است. همچنین تغییرات سختی برشی تاثیر بسیار ناچیزی در تغییرات نیروها و جابجایی‌های نرمال بر روی درزه‌ها داشته است، به طوری-که با افزایش دو برابری سختی برشی، نیروهای نرمال ۰/۷۵ کیلو نیوتن (۱/۵ درصد) و جابجایی‌های نرمال حدود ۰/۰۱ میلیمتر (یک درصد) تغییر یافته است. در اینجا نیز تنها تغییرات نیرو و جابجایی نرمال بر روی دو درزه نشان داده شده است.



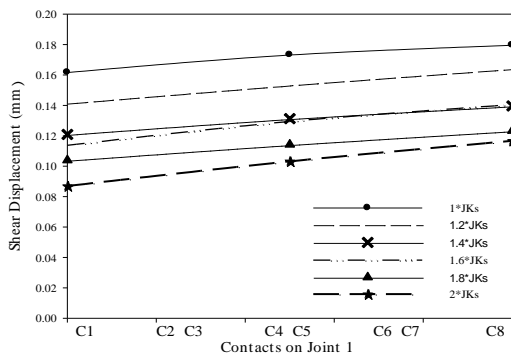
شکل ۸- تاثیر سختی نرمال درزه‌ها بر روی جابجایی نرمال در زمان ۱/۳۲ ثانیه



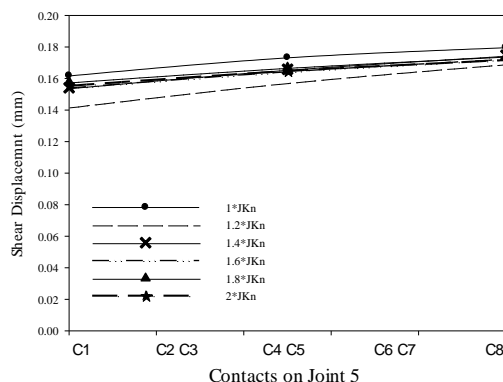
شکل ۱۱- تاثیر سختی برشی درزه‌ها بر روی نیروی برشی در زمان ۱/۳۲ ثانیه



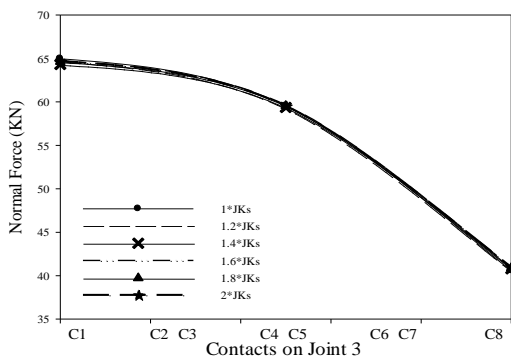
شکل ۹- تاثیر سختی نرمال درزه‌ها بر روی تنش برشی در زمان ۱/۳۲ ثانیه



شکل ۱۲- تاثیر سختی برشی درزه‌ها بر روی جابجایی برشی در زمان ۱/۳۲ ثانیه



شکل ۱۰- تاثیر سختی نرمال درزه‌ها بر روی جابجایی برشی در زمان ۱/۳۲ ثانیه

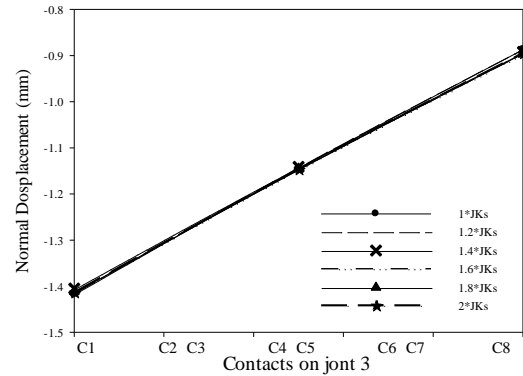


شکل ۱۳- تاثیر سختی برشی درزه‌ها بر روی نیروی نرمال در زمان ۱/۳۲ ثانیه

در مرحله بعد تاثیر سختی برشی بین درزه‌های بین دو سگمنت مطالعه شد. اشکال (۱۱) تا (۱۴) به ترتیب تاثیر سختی برشی بر روی نیروها و جابجایی‌های نرمال و برشی درزه‌های بین دو سگمنت را نشان می‌دهد. در این حالت نیز همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش سختی برشی، نیروهای برشی درزه‌ها افزایش و جابجایی‌های برشی کاهش یافته است، به طوری که به طور متوسط با افزایش دو برابری سختی برشی، نیروی برشی تقریباً ۱/۴ کیلو نیوتن (۲۳)

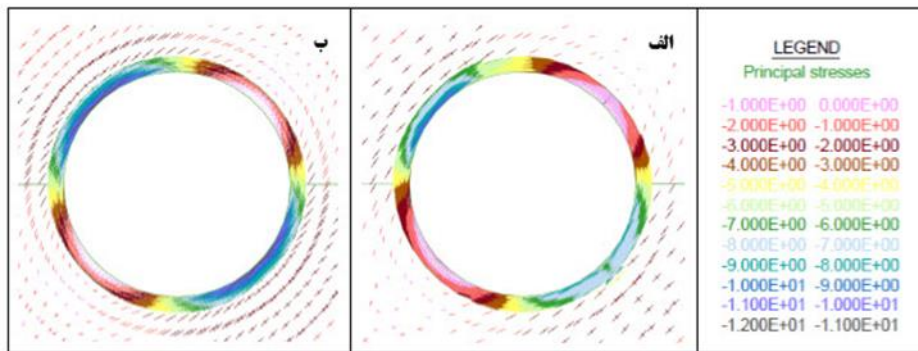


یکپارچه و سگمنتال تحت بارگذاری لرزه‌ای و در زمان ۱/۳۲ ثانیه نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، بیشینه تنش در پوشش یکپارچه (۱۱/۵۹ مگاپاسکال) بیشتر از بیشینه تنش در پوشش سگمنتال برابر با ۱۰/۳۳ مگاپاسکال است. بیشینه کرنش نیز در پوشش یکپارچه (۴- $10^{-4}$ ) کمتر از بیشینه کرنش در پوشش سگمنتال برابر (۴- $10^{-4}$  × ۲/۱۹) است. بنابراین جابجایی‌ها در پوشش سگمنتال بیشتر از حالت یکپارچه است. چرا که درزه‌های واقع در پوشش سگمنتال باعث کاهش صلبیت سیستم نگهداری نسبت به پوشش یکپارچه می‌شود. این امر موجب کاهش تنش و افزایش جابجایی در پوشش سگمنتال می‌شود. بر اساس نظر انجمن مهندسی عمران ژاپن، صلبیت پوشش سگمنتال حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد نسبت به پوشش یکپارچه کمتر می‌باشد [۲۲].

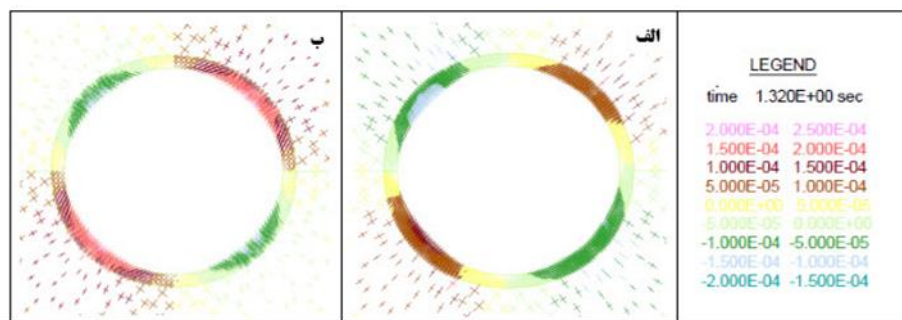


شکل ۱۴- تاثیر سختی برشی درزه‌ها بر روی جابجایی نرمال در زمان ۱/۳۲ ثانیه

۴-۶- مقایسه پوشش یکپارچه و پوشش سگمنتال در این قسمت وضعیت تنش و کرنش در پوشش یکپارچه و سگمنتال با یکدیگر مقایسه شدند. اشکال (۱۵) و (۱۶) به ترتیب وضعیت تنش و کرنش را در دو حالت پوشش



شکل ۱۵- وضعیت تنش بر حسب MPa: الف) پوشش یکپارچه ب) سگمنتال تحت بارگذاری دینامیکی DBE



شکل ۱۶- وضعیت کرنش: الف) پوشش یکپارچه ب) سگمنتال تحت بارگذاری دینامیکی DBE

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و مطالعه عددی تاثیر زلزله بر روی سیستم نگهداری سگمنتال و نیروهای حاصل نرمال و برشی در سطح تماس بین قطعات پرداخته شد. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار دو بعدی اجزای مجزا UDEC بخشی از تونل انتقال آب کرج به تهران (امیرکبیر) مورد تحلیل

قرار گرفت. نتایج بدست آمده از تحلیل‌های صورت گرفته به شرح زیر است:

- مقدار تنش نرمال و برشی در درزه‌های بین سگمنت‌ها در حالت بدون لغزش بیشتر از حالت لغزش کامل محاسبه شد (تا ۲/۷ برابر بیشتر). چرا که در حالت بدون لغزش سختی سیستم نگهداری

همچنین با افزایش سختی برشی، نیروهای برشی درزه‌ها افزایش و جابجایی‌های برشی کاهش یافت. بیشینه تنش در پوشش یکپارچه ۱۰٪ بیشتر و بیشینه کرنش حدود ۲۵٪ کمتر از پوشش سگمنتال محاسبه شد. چرا که درزه‌های واقع در پوشش سگمنتال باعث کاهش صلبیت سیستم نگهداری نسبت به پوشش یکپارچه که بدون درزه است، می‌شود و در نهایت باعث کاهش تنش و افزایش جابجایی در پوشش سگمنتال خواهد شد، که این امر عملکرد بهتر سیستم نگهداری سگمنتال را در برابر بار زلزله نشان می‌دهد.

با محیط اطراف بیشتر از حالت بدون لغزش و در نتیجه انعطاف پذیری آن کمتر خواهد بود و تنش‌های بیشتری در آن ایجاد می‌گردد.

- در برابر بارهای دینامیکی تونل‌های با پوشش سگمنتال نیز بیضوی می‌شوند. در این شرایط نقاط متقابل رفتاری متشابه از خود نشان دادند.
- با افزایش سختی نرمال، نیروهای نرمال نیز در درزه‌ها افزایش و جابجایی نرمال کاهش یافت، بطوریکه با افزایش ۱۰۰ درصدی سختی نرمال بین درزه‌ها، نیروی نرمال تا ۲۳٪ کاهش و جابجایی نرمال (باز و بسته شدن درزه‌های پوشش) ۲۷٪ کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [1] M. Corigliano, L. Scandella, C.G. Lai, R. Paolucci, "Seismic Analysis of Deep Tunnels in Near Fault Conditions: A case Study in Southern Italy", *Bulletin Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 4, 2011, pp 975–995.
- [2] Y.M.A. Hashash, J.J. Hook, B. Schmidt, J. I. C. Yao, "Seismic design and analysis of underground structures", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 16, No. 4, 2001, pp. 247–293.
- [3] J.N. Wang, *Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach*, New York, Monograph 7: Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc, 1993.
- [4] K.H. Park, K. Tantayopin, B. Tontavanich, A. Owatsiriwong, "Analytical solution for seismic-induced ovaling of circular tunnel lining under no-slip interface conditions: A revisit", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, No. 2, 2009, pp. 231–235.
- [۵] ر. بصیرت، ح. سالاری راد، ح. ملاداودی، "تحلیل دینامیکی سیستم نگهداری تونل‌ها تحت بار زلزله توسط روش‌های تحلیلی مطالعه موردی: تونل انتقال آب کرج"، دهمین کنفرانس ملی تونل، فضاهای زیرزمینی و اهداف هزاره سوم، ۱۳۹۲.
- [۶] ر. بصیرت، ح. سالاری راد، ح. ملاداودی، "بررسی اندرکنش سیستم نگهداری تونل‌ها با محیط اطراف تحت بار زلزله"، *مجله علمی پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی*، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۴، صفحه ۵۹–۷۰.
- [7] J.-F. Lu, D.-S. Jeng, and T.-L. Lee, "Dynamic response of a piecewise circular tunnel embedded in a poroelastic medium", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, No. 9, 2007, pp. 875–891.
- [8] W.L. Chow, T.S.K.e.a., "Design of Segmental Tunnel Lining in an Eartquake Zone", in *ITA-AITES World Tunnel Congress "Safe Tunnelling For The City and Environment"*, Budapest, 2009.
- [9] Ch. Shong-loong, M.W. Gui, "Seismic performance of tunnel lining of side-by-side and vertically stacked twin-tunnels", *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 18, No. 4, 2011, pp. 1226–1234.
- [10] N.A Do, D. Dias, P. Oreste, I. Djeran-Maigre, "The behaviour of the segmental tunnel lining studied by the hyperstatic reaction method", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 18, No. 4, 2014, pp. 489–510.
- [11] N.A. Do, D. Dias, P. Oreste, and D.I. Djeran-Maigre, "A new numerical approach to the hyperstatic reaction method for segmental tunnel lining", *International Journal of Numerical and analytical method in Geomechanics*, Vol. 38, No. 15, 2014, pp. 1617–1632.

- [12] R. Hassani, and R. Basirat, "Application of Hyperstatic Reaction Method for Designing of Tunnel Permanent Lining, Part I: 2D Numerical Modelling", *Civil Engineering Journal*, Vol. 2, No. 6, 2016, pp. 244–253.
- [13] R. Hassani, and R. Basirat, "Application of Hyperstatic Reaction Method for Designing of Tunnel Permanent Lining, Part II: 3D Numerical Modelling", *Civil Engineering Journal*, Vol. 2, No. 6, 2016, pp. 254–262.
- [14] R. Hassani, R. Basirat, and N. Mahmoodian, "Permanent Lining Design of Tunnels Junction using Hyperstatic Reaction Method", 3rd International conference on Architecture, structure and civil engineering, At Norway, Oslo, 2016.
- [15] R. Waal, *Steel fibre reinforced tunnel segments for the application in shield driven tunnel linings*, Delft University Press, 2000.
- [۱۶] گزارش لرزه زمین ساخت و تحلیل خطر زلزله پروژه تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه خانه شماره ۶ تهران قطعه (K"-BR)، شرکت مهندسی مشاوره ساحل، ۱۳۸۸.
- [۱۷] گزارش زمین شناسی تونل انتقال آب کرج به تهران، قطعه (K"-BR)، شرکت مهندسی مشاوره ساحل، ۱۳۸۸.
- [18] Itasca Consulting Group, UDEC version 4.1 User's manual, 2004.
- [19] G. Pariseau, *Design Analysis in Rock Mechanics*, Taylor & Francis e-Library, 2007, pp. 578.
- [20] S. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc, 1996.
- [21] [www.bhrc.ac.ir/Portal/ismn](http://www.bhrc.ac.ir/Portal/ismn). شبکه شتابنگاری زلزله ایران.
- [22] Y. Koyama, "Present status and technology of shield tunneling method in Japan", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 18, No. 2–3, 2003, pp. 145–159.