

## تحلیل ریسک دینامیکی تونل‌های بزرگ مقطع با استفاده از روش ماتریس احتمال - اثر (مورد مطالعاتی: تونل راه آهن کوهین محور قزوین - رشت)

رضا میکائیل<sup>۱\*</sup>؛ عرفان شافعی<sup>۲</sup>؛ سعید حسنی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن و مواد دانشگاه صنعتی ارومیه

۲- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی ارومیه

۳- کارشناس ارشد مهندسی معدن

### چکیده

امروزه به دلیل رشد روزافزون جمعیت تردهای شهری و بین شهری در حال افزایش است و همین عامل باعث به کارگیری تونل‌های ریلی و آسفالته برای کاهش ترافیک‌ها، سوخت‌های مصرفی و غیره شده است. تونل راه آهن کوهین که در قسمت غربی رشته کوه البرز و در محور قزوین- رشت قرار دارد یکی از تونل‌های بزرگ مقطع بین شهری کشور است. پرواضح است که در اهمیت جلوگیری از خسارت‌های مالی و جانی در چنین سازه‌هایی، سازه علاوه بر تحمل بارهای استاتیکی باید قادر به تحمل بارهای دینامیکی همچون زلزله نیز باشد. به دلیل این که بارهای دینامیکی وارد بر تونل باعث ایجاد ریسک‌های متفاوتی در مقاطع مختلف تونل می‌شوند، در این تحقیق مقاطع با روباره‌های ۶، ۱۵، ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ متری از تونل کوهین به منظور تعیین بیشینه ریسک در اثر بارهای دینامیکی ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفتند. این مقاطع ابتدا به وسیله روش‌های تحلیلی در شرایط لغزش کامل و بدون لغزش تحت بارهای دینامیکی ایجاد شده توسط دو گسل زلزله خیز زنجان و شمال قزوین به صورت دینامیکی تحلیل شدند. سپس ریسک مقاطع با استفاده از روش ماتریس احتمال- اثر مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد بیشترین ریسک در مقاطع با روباره‌های ۶، ۸۰ و ۱۰۰ متری ایجاد می‌شود.

### واژگان کلیدی

تونل راه آهن، تحلیل دینامیکی، مدیریت ریسک، روش احتمال- اثر، تونل راه آهن کوهین

### ۱- مقدمه

زیان شود [۱] و یا می‌توان احتمال عدم حفظ و نگهداری در برابر یک رویداد خطرناک تلقی کرد [۲] هم‌چنین طبق تعریفی دیگر، ریسک یک رویداد یا شرایط دارای غیرقطعی است که اگر اتفاق بیفتد تأثیر مثبت یا منفی بر روی اهداف پروژه خواهد داشت [۳] و [۴]. اقتصاددان‌ها از واژه‌های ریسک و عدم قطعیت، برای معرفی سطح اطلاعات و دانش خود از رویدادها استفاده می‌کنند. عدم قطعیت به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن نه تنها مجموعه رویدادهای ممکن، بلکه احتمال آن‌ها نیز نامشخص است [۵].

در سال‌های اخیر و به ویژه در بسیاری از زمینه‌های علوم مهندسی تحلیل ریسک پروژه‌های اجرائی گسترش فراوانی یافته است. به طوری که می‌توان ریسک‌های ایجاد شده در پروژه‌ها را یکی از پارامترهای اجرائی شدن آن‌ها دانست. تاکنون تعاریف بسیاری برای ریسک ارائه شده است که چند مورد از آن را می‌توان به صورت زیر بیان کرد: ریسک، بر اساس استاندارد مدیریت ریسک (PMBOK) عدم قطعیتی است که می‌تواند تأثیر نامطلوبی داشته و در نهایت منجر به خسارت یا

\* ارومیه، کیلومتر دوم جاده بند، دانشگاه صنعتی ارومیه، کد پستی: ۵۷۱۶۶-۱۷۱۶۵ صندوق پستی: ۴۱۹-۵۷۱۵۵ تلفن ثابت: ۰۴۴۳۱۹۸۰۳۱۴ تلفن همراه: ۰۹۱۱۳۲۷۸۶۳۴  
نمبر: ۰۴۴۳۱۹۸۰۲۵۱ آدرس پست الکترونیکی: Reza.mikaeil@uut.ac.ir

استفاده کرد.

در چند دهه اخیر در رابطه با تحلیل‌های دینامیکی و هم‌چنین تعیین ریسک‌های بسیاری از پروژه‌ها از زوایای مختلف کارهای بسیاری صورت گرفته است. حمدی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی و تحلیل دینامیکی تونل‌ها با استفاده از روش‌های عددی پرداختند. آن‌ها در طی این تحقیق دریافتند که بیشترین جابجایی در پوشش تونل‌ها تحت بارهای دینامیکی ناشی از زلزله در حد وسط زمان رخداد زلزله می‌باشد [۸]. فابوزی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی دینامیکی و تحلیل نیروهای داخلی در پوشش تونل و دیواره دیافراگم ایستگاه مترو در کشور ایتالیا پرداختند [۹]. باوو و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی رفتار دینامیکی تونل‌های قطار شهری در زمین‌های روانگرا پرداختند [۱۰]. سالمی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به تحلیل دینامیکی پوشش‌های بتنی مسلح تونل‌های دوقلوی تبریز با تلفیق روش‌های عددی و الگوریتم ژنتیک پرداختند [۱۱]. زهفروش و ناصری در سال ۲۰۱۸ به بررسی رفتار دینامیکی تاج تونل خط ۲ قطار شهری تبریز تحت تأثیر امواج لرزه‌ای ناشی از زلزله با استفاده از روش عددی اجزای محدود پرداختند. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که رفتار تونل در صورت اعمال روباره نسبت به حالت فاقد روباره حساسیت به لایه‌بندی خاک نداشته و میزان تغییر شکل تاج تونل در تمامی توده خاک نزدیک به هم می‌باشد [۱۲].

تحلیل ریسک دینامیکی در سازه‌های تونلی به دلیل اهمیت ویژه آن‌ها در برابر وقوع زلزله و برآورد مقدار خسارت منتهی به بسیار مهم بوده لذا می‌بایست براساس مدل رفتار خمشی و برشی سازه بررسی و تحلیل جامع‌تری نسبت به گذشته صورت پذیرد. لذا در این راستا نوآوری تحقیق حاضر به صورت بررسی پارامترهای رفتاری سازه تونل‌ها و ریسک دینامیکی آن‌ها با در نظر گرفتن دو معیار مقاومت خمشی و برشی در برابر زلزله ارائه می‌شود. همان‌طور که واضح است، تحلیل ریسک دینامیکی یک سازه با نمایان کردن تأثیر تمام نیروهای وارد شده بر سازه می‌تواند موجب تمایز توجه به مقاطع مختلف سازه‌ها شده و در نتیجه اقدامات لازم در موارد نیاز برای مقاطع حساس، به منظور کاهش ریسک، انجام شود.

## ۲- معرفی ساختگاه تونل راه‌آهن کوهین

تونل راه‌آهن کوهین در قطعه اول راه‌آهن قزوین- رشت- بندرانزلی که در قسمت غربی رشته‌کوه البرز احداث شده است،

آنجایی که مدیریت ریسک پروژه به افزایش احتمال و تأثیر وقایع مثبت و کاهش احتمال و تأثیر وقایع منفی در پروژه است می‌توان فرآیند مدیریت ریسک را از دیدگاه PMBOK در شش مرحله؛ ۱- برنامه‌ریزی مدیریت ریسک ۲- شناسایی ریسک ۳- تجزیه و تحلیل کیفی ریسک ۴- تجزیه و تحلیل کمی ریسک ۵- برنامه‌ریزی پاسخ به ریسک ۶- بازبینی و کنترل ریسک خلاصه کرد [۲].

همان‌طور که مشخص است اگر ریسک صفر باشد، آینده به‌طور کامل قابل پیش‌بینی خواهد بود و یا اگر بتوان ریسک را در یک موقعیت معین کاهش داد، آینده قابل پیش‌بینی‌تر و قابل کنترل‌تر می‌شود. در صنعت تونل‌سازی، ارزیابی و تعیین ریسک قبل و بعد از ساخت تونل از جمله مراحل کلیدی مدیریت پروژه است. مطالعات صورت گرفته در مدیریت ریسک قبل از ساخت و در حین اجرای تونل نشان می‌دهد که ریسک‌های ناشی از عوامل اقتصادی و تعهدات ضمانت‌ها می‌تواند به ترتیب بیشترین و کمترین رتبه ریسک را در پروژه‌های تونل‌سازی به خود اختصاص دهند [۶].

در خصوص مطالعات ریسک بعد از ساخت تونل، می‌توان به یکی از موارد کلیدی در این زمینه که همان تحلیل ریسک لرزه‌ای تونل، اشاره کرد. بر مبنای اطلاعات ثبت شده، سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های سطحی از آسیب‌پذیری بسیار کمتری در برابر زلزله برخوردار بوده و حتی بسیاری از تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی، در برابر زلزله‌های بزرگ مقاومت کرده‌اند. البته در این میان نیز می‌توان به خسارات قابل توجه وارد شده به سازه‌های زیرزمینی طی زلزله‌هایی نظیر کوبه ژاپن در سال ۱۹۹۵ و چی-چی تایوان در سال ۱۹۹۹ اشاره کرد؛ که خساراتی از قبیل ترک خوردن و پوسته‌شدن پوشش، ناپایداری دهانه، هجوم آب زیرزمینی، تغییر شکل و جابه‌جایی پوشش، سقوط سنگ، ترک برداشتن کف و برش خوردن پوشش مشاهده شد [۷]. بنابراین می‌توان گفت که تونل‌ها به‌طور مطلق در برابر زلزله مصون نیستند. در این میان گروهی از سازه‌ها همچون تونل‌های راه و راه‌آهن، ایستگاه‌های مترو، نیروگاه‌های برق آبی زیرزمینی و غیره که شریان‌های حیاتی جامعه محسوب می‌شوند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و تحلیل پایداری و مقاوم‌سازی آن‌ها در مناطق لرزه‌خیز امری ضروری است. در تحلیل دینامیکی سازه‌ها می‌بایست از روش‌های تحلیلی مناسب برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی سازه در برابر بارهای دینامیکی

### ۳-۲- مشخصات زلزله ایجادشده

مطالعات لرزه‌خیزی منطقه نشان می‌دهد که بیش‌ترین شتاب افقی در سطح زمین (در سطح  $MCE$ ) برابر با  $0.48g$  و سرعت انتشار موج  $S$  نیز برابر با  $228/62$  سانتی‌متر بر ثانیه است. به دلایل ذکرشده، تحلیل دینامیکی تونل کوهین تحت  $MCE$  که در گسل شمال قزوین با  $50$  کیلومتر فاصله از تونل دارای بزرگای گشتاور  $6/8$  و در گسل زنجان با  $125$  کیلومتر فاصله دارای بزرگای گشتاور  $7/2$  بود، در نظر گرفته شد [۱۳].

### محاسبه کرنش برشی ایجاد شده توسط گسل‌های قزوین و زنجان

با توجه به توضیحات داده‌شده در بخش معرفی ساختگاه، نوع زمین محدوده تونل کوهین در رده‌ی خاک‌های سفت قرار می‌گیرد و در نتیجه، نسبت سرعت زمین به شتاب زمین ( $\frac{V_m}{a_m}$ ) با استفاده از جدول ۱ محاسبه شد (جدول ۳). مشخصات مربوط به پارامترهای مورداستفاده در مقاله در بخش فهرست نمادها نشان داده‌شده است.

جدول ۱: نسبت بیشینه سرعت زمین به بیشینه شتاب زمین در

#### سطح سنگ و خاک [۷]

نسبت بیشینه سرعت زمین ( $cm/s$ )			بزرگای گشتاور ( $Mw$ )	نوع زمین
به بیشینه شتاب زمین ( $g$ )	فاصله منبع تا ساختگاه ( $Km$ )			
	۲۰-۵۰	۵۰-۱۰۰		
۸۶	۷۶	۶۶	۶/۵	سنگ
۹۷	۱۰۹	۹۷	۷/۵	
۱۵۲	۱۴۰	۱۲۷	۸/۵	
۱۰۹	۱۰۲	۹۴	۶/۵	خاک
۱۵۵	۱۲۷	۱۴۰	۷/۵	
۱۹۳	۱۸۸	۱۸۰	۸/۵	
۱۴۲	۱۳۲	۱۴۰	۶/۵	خاک
۲۰۱	۱۶۵	۲۰۸	۷/۵	
۲۵۱	۲۴۴	۲۶۹	۸/۵	

هم‌چنین با استفاده از جدول ۲ و گزاره‌ی (۱) شتاب افقی زمین در عمق‌های مختلف تونل محاسبه و با استفاده از گزاره‌ی (۲) و گزاره‌ی (۳) نیز کرنش‌های برشی تحت دو گسل نام‌برده در عمق‌های مختلف تعیین شد (جدول ۳).

با طول و مقطعی معادل با  $1635$  متر و  $120$  مترمربع قرار دارد. قطعه اول این راه‌آهن از ایستگاه سیاه چشمه در  $15$  کیلومتر راه‌آهن قزوین- زنجان با ارتفاع  $1250$  متر نسبت به سطح دریا شروع شده و در راستای شمالی- جنوبی تا نقطه‌ای با مختصات  $49^{\circ}32'22''$  طول شرقی و  $36^{\circ}12'22''$  عرض شمالی که دارای ارتفاعی برابر با  $1300$  متر از سطح آب‌های آزاد است، ادامه می‌یابد [۱۳].

بررسی‌های محلی صورت گرفته در محدوده ساختگاه تونل کوهین اثری از گسل در این منطقه را نشان نمی‌دهد ولی طبق نقشه سائزموکتونیک و نقشه زمین‌شناسی تاکستان می‌توان گسل‌های اصلی منطقه را در دو دسته کلی شرقی- غربی و شمال‌غربی- جنوب‌شرقی در نظر گرفت. در این تحقیق نزدیک‌ترین گسل‌های شمال قزوین و زنجان به خاطر اهمیت و کاربرد در تحلیل‌ها که به ترتیب با فاصله  $50$  و  $125$  کیلومتری از تونل کوهین قرار دارند [۱۳]، برای ارزیابی این تونل موردبررسی قرار گرفته‌اند.

### ۳- تحلیل دینامیکی تونل راه‌آهن کوهین

در بین بارهای دینامیکی مؤثر بر روی تونل‌ها، بارهای وارده از طرف زلزله از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ اما با این حال سازه زیرزمینی به دلیل درگیری کامل با محیط نسبت به سازه‌های سطحی که فقط از سطح تحتانی خود با زمین در تماس هستند، مقاومت بیشتری در مقابل زلزله از خود نشان می‌دهند. از آنجایی که نزدیک‌ترین گسل‌ها، به عبارت دیگر نزدیک‌ترین نقاط زلزله‌خیز به تونل کوهین دو گسل شمال قزوین و زنجان هستند، در این تحقیق هفت مقطع از تونل تحت بیشینه زلزله قابل‌انتظار ( $MCE$ ) از طرف این دو گسل با روش اندرکنش زمین- سازه در دو حالت لغزش کامل و بدون لغزش موردبررسی قرار گرفته است.

### ۳-۱- روش اندرکنش زمین- سازه

در این روش نسبت سختی سازه جایگزین توده زمین حذف‌شده از محیط می‌شود که می‌توان تقریب خوبی از اندرکنش زمین- سازه و ارتعاشات اعمال‌شده از طریق امواج زلزله را به دست آورد [۷] که در بخش تحلیلی این روش از روابط ارائه‌شده  $Wang$  و  $Penzien$  در شرایط لغزش کامل و بدون لغزش استفاده‌شده است (جدول ۹).

جدول ۲: نسبت شتاب در عمق به نسبت شتاب در سطح [۷]

RDS	H(m)	ردیف
۱	≤ ۶	۱
۰/۹	۶-۱۵	۲
۰/۸	۱۵-۳۰	۳
۰/۷	≥ ۳۰	۴

$$a_s = RDS \times a_{max} \quad (۱)$$

$$V_s = \frac{V_m}{a_m} a_s \quad (۲)$$

$$\gamma_{max} = \frac{V_s}{C_s} \quad (۳)$$

جدول ۳: کرنش برشی محاسبه شده برای عمق‌های مختلف تونل کوهین تحت زلزله گسل شمال قزوین و زنجان

نام گسل	H (m)	$V_m/a_m$ ((cm/s)/g)	$a_s$ (g)	$V_s$ (cm/s)	$\gamma_{max}$
شمال قزوین	≤ ۶	۱۰۹/۵	۰/۴۸۰	۵۲/۵۶۰	۰/۰۰۲۳۰
	۶-۱۵	۱۰۹/۵	۰/۴۳۲	۴۷/۳۰۴	۰/۰۰۲۰۷
	۱۵-۳۰	۱۰۹/۵	۰/۳۸۴	۴۲/۰۴۸	۰/۰۰۱۸۴
	≥ ۳۰	۱۰۹/۵	۰/۳۳۶	۳۶/۷۹۲	۰/۰۰۱۶۱
زنجان	≤ ۶	۱۴۱/۲	۰/۴۸۰	۶۷/۷۷۶	۰/۰۰۲۹۶
	۶-۱۵	۱۴۱/۲	۰/۴۳۲	۶۰/۹۹۸	۰/۰۰۲۶۷
	۱۵-۳۰	۱۴۱/۲	۰/۳۸۴	۵۴/۲۲۱	۰/۰۰۲۳۷
	≥ ۳۰	۱۴۱/۲	۰/۳۳۶	۴۷/۴۴۳	۰/۰۰۲۰۷

برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر در استفاده از روابط ارائه شده، باید یکی از مصالح (بتن یا فولاد) را به کمک روش تبدیل مقاطع به جنس ماده دیگر تبدیل کرد [۱۳] که در این تحقیق فولاد به جنس بتن تغییر داده شد. در روش تبدیل مقاطع به خاطر تغییر نکردن ممان اینرسی در واحد طول، تغییرات طول ضلع‌ها در عرض مقطع اعمال می‌شود ولی در این بخش از طرفی به دلیل منظم بودن شکل مقطع عرضی و متقارن بودن تعداد و شماره آرماتورها در واحد عرض مقطع نسبت به مرکز سطح مقطع عرضی و از طرف دیگر به دلیل بزرگ بودن طول تونل نسبت به طول مقاطع موردنظر، تغییر مساحت مقطع مصالح به صورت قطری توسط گزاره‌ی (۴) و گزاره‌ی (۵) محاسبه شد (طول مقاطع در محاسبات یک متر در نظر گرفته شده است).

$$\sum A_s = 2n \times A_s \quad (۴)$$

$$t' = t + \frac{(\frac{E_c}{E_s} - 1)(\sum A_s)}{b_w} \quad (۵)$$

نحوه محاسبه کرنش بحرانی ( $\epsilon_{II}$ )

کرنش بحرانی پوشش با استفاده از گزاره‌ی (۶) محاسبه شد.

$$\epsilon_u = \frac{f'_c}{E_c} \quad (۶)$$

### ۳-۳- مشخصات ژئومکانیکی زمین

مشخصات ژئومکانیکی منطقه نیز طبق مطالعات انجام شده به صورت جدول ۴ است [۱۳].

جدول ۴: مشخصات ژئومکانیکی ساختگاه تونل کوهین

ردیف	پارامتر	یکا	مقدار
۱	$E_m$	Pa	۳۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۲	$V_m$	ندارد	۰/۴
۳	$G_m$	Pa	۱۰۷,۰۰۰,۰۰۰

### ۳-۴- مشخصات پوشش‌های مورد استفاده در مقاطع

#### مختلف تونل راه آهن کوهین

پوشش مورد استفاده در تونل راه آهن کوهین در مقاطع مختلف آن نیز مطابق با جدول ۱۰ است. همچنین روابط و فرضیات مورد استفاده در پارامترهای محاسبه شده‌ی جدول ۱۰ به صورت زیر است:

نحوه محاسبه ضخامت تبدیل یافته (C)

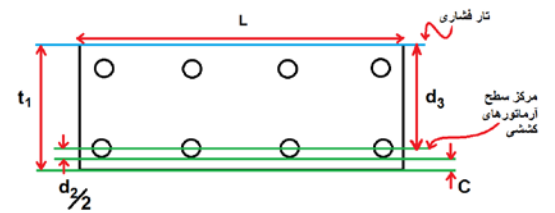
روابط Wang و Penzien برای پوشش‌هایی از یک جنس (با یک نوع مدول الاستیسیته و یک نوع ضریب پواسن) ارائه شده‌اند، در حالی که پوشش مورد استفاده در تونل کوهین توسط آرماتورهای (فولاد) مسلح شده است. به همین دلیل،

نحوه محاسبه فاصله دورترین تار فشاری از مرکز سطح

آرما تور کششی طولی ( $d_3$ )

با توجه به شکل ۴ فاصله دورترین تار فشاری از مرکز سطح آرما تور کششی طولی با استفاده از گزاره‌ی (۷) محاسبه شد [۱۴].

$$d_3 = t - \left(\frac{d_2}{2} + C\right) \quad (7)$$



شکل ۱: فاصله دورترین تار فشاری از مرکز سطح آرما تور کششی

نحوه محاسبه نسبت سطح مقطع خاموت‌ها به فاصله آن‌ها

$$\left(\frac{A_p}{S}\right)$$

به دلیل عدم دسترسی به قطر و فاصله خاموت‌ها با استفاده از گزاره‌ی (۸)، نسبت سطح مقطع خاموت‌ها به فاصله آن‌ها تخمین زده شد [۱۴].

$$\frac{A_{v \min}}{S} = 0.06 \sqrt{f'_c} \frac{b_w \times 10^6}{f_y} \quad (8)$$

نحوه محاسبه مقاومت برشی آرما تورهای مورد استفاده در

پوشش ( $V_s$ )

برای محاسبه مقاومت برشی آرما تورهای مورد استفاده در

پوشش نیز گزاره‌ی (۹) مورد استفاده قرار گرفت [۱۴].

$$V_s = \phi_s \frac{A_p}{S} f_y d_3 \quad (9)$$

نحوه محاسبه مقاومت برشی بتن مورد استفاده در پوشش ( $V_c$ )

مقاومت برشی بتن مورد استفاده در پوشش نیز توسط گزاره‌ی (۱۰) محاسبه شد [۱۴].

$$V_c = 0.2 \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \times 10^3 \quad (10)$$

در گزاره‌ی (۹) و گزاره‌ی (۱۰) دو پارامتر  $\phi_s$  و  $\phi_c$  برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته شدند.

نحوه محاسبه مقاومت برشی پوشش ( $V_{II}$ )

در نهایت نیز مقاومت برشی نهایی پوشش از مجموع مقاومت برشی بتن و آرما تورهای مورد استفاده در پوشش طبق گزاره‌ی (۱۱) محاسبه شد [۱۴].

$$V_u = V_c + V_s \quad (11)$$

### ۳-۵- تحلیل دینامیکی تونل راه آهن کوهین

انتخاب مقاطع برای تحلیل دینامیک و ریسک دینامیکی باید به گونه‌ای صورت می‌گیرد که تحلیل انجام شده برای این مقاطع قابل تعمیم به کل تونل باشد. در نتیجه مقاطع به کمک دو پارامتر مؤثر اصلی یعنی نوع پوشش در مقاطع مختلف و بیشینه شتاب زمین در عمق‌های مختلف زمین انتخاب شد (جدول ۵).

جدول ۵: نحوه تعیین مقاطع مورد بررسی در تونل راه آهن کوهین

ردیف	پارامتر	یکا	مشخصات مقاطع			
۱	H	m	۳۰ تا ۴۰	۴۰ تا ۶۰	۶۰ تا ۸۰	۸۰ تا ۱۰۰
۲	$a_m$	g	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷
۳	نوع پوشش	—	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳	نوع ۴
۴	نام مقطع	—	S-3	S-4	S-5	S-6

مقطع S-1 تا S-4 روند کاهشی خود را حفظ کرده و از مقطع S-4 تا S-7 بر این مقدار افزوده شده است. دلیل این امر را می‌توان به ثابت بودن ضخامت پوشش از مقطع S-1 تا S-4 به همراه افزایش روباره از ۱۰ متر به ۴۰ متر و سپس افزایش ضخامت پوشش از مقطع S-4 تا S-7 هم‌زمان با افزایش روباره از ۴۰ متر به ۱۰۰ متر مرتبط دانست. در ابتدای تونل چون

پس از تعیین مقادیر اولیه، بارهای وارد بر مقاطع با استفاده از روش‌های Wang و Penzien در شرایط لغزش کامل و بدون لغزش تحت تأثیر دو گسل شمال قزوین و زنگان محاسبه شد (جدول ۱۱ و جدول ۱۲). نکته قابل توجه در این بخش روند کاهشی مقدار جابه‌جایی پوشش از مقطع S-1 تا S-7 می‌باشد. این در حالی است که مقادیر لنگر خمشی وارده به تونل از

Penzien تفاوت چندانی وجود ندارد ولی نیروهای محوری محاسبه شده در شرایط بدون لغزش با استفاده از روش Wang نسبت به شرایط لغزش کامل این روش، ۱۹ تا ۴۱ برابر افزایش را نشان می دهد که علت این افزایش در نظر گرفته شدن نسبت تراکم پذیری و انعطاف پذیری پوشش نسبت به روش ارائه شده توسط Penzien است [۷].

	Section	Applied Loads		Computed Strength	
		P (KN)	Mx (KN-m)	P (KN)	Mx (KN-m)
Wang	S-1	37	225	44	264
	S-2	34	202	44	264
	S-3	30	180	44	264
	S-4	26	157	44	264
Penzien	S-1	37	225	44	264
	S-2	34	202	44	264
	S-3	30	180	44	264
	S-4	26	157	44	264

Program completed as requested.

شکل ۲: مقاومت نهایی و ضریب اطمینان محاسبه شده برای پوشش تا عمق ۴۰ متری تحت زلزله گسل قزوین در شرایط لغزش کامل با استفاده از نرم افزار PCAcol

	Section	Applied Loads		Computed Strength	
		P (KN)	Mx (KN-m)	P (KN)	Mx (KN-m)
Wang	S-1	48	290	44	264
	S-2	43	261	44	264
	S-3	39	232	44	264
	S-4	34	203	44	264
Penzien	S-1	48	290	44	264
	S-2	43	261	44	264
	S-3	39	232	44	264
	S-4	34	203	44	264

Program completed as requested.

شکل ۳: مقاومت نهایی و ضریب اطمینان محاسبه شده برای پوشش تا عمق ۴۰ متری تحت زلزله گسل زنجان در شرایط لغزش کامل با استفاده از نرم افزار PCAcol

	Section	Applied Loads		Computed Strength	
		P (KN)	Mx (KN-m)	P (KN)	Mx (KN-m)
Wang	S-1	1552	225	2238	325
	S-2	1397	202	2238	325
	S-3	1242	180	2238	325
	S-4	1087	157	2238	325
Penzien	S-1	75	224	89	268
	S-2	67	202	89	268
	S-3	60	179	89	268
	S-4	52	157	89	268

Program completed as requested.

شکل ۴: مقاومت نهایی و ضریب اطمینان محاسبه شده برای پوشش تا عمق ۴۰ متری تحت زلزله گسل قزوین در شرایط بدون لغزش با استفاده از نرم افزار PCAcol

تغییرات لنگر خمشی وارده متناسب به ضخامت جداره نبوده (از مقدار ۲۲۴ کیلونیوتن متر تا ۱۵۷ کیلونیوتن متر علیرغم ثابت بودن ضخامت) لذا تغییرات چشمگیری در تغییر شکل تونل (از ۳/۲۲ سانتی متر تا ۲/۲۵ سانتی متر) دیده می شود. ولی در ادامه تونل به دلیل افزایش ضخامت جداره هم زمان با افزایش روباره و لنگر خمشی منتهجه (۱۵۷ کیلونیوتن متر تا ۳۴۳ کیلونیوتن متر)، مقدار تغییر شکل منتهجه سازه در بازه محدودی (از ۲/۲۵ سانتی متر تا ۲/۱۸ سانتی متر) متغیر است.

همچنین برای تعیین ضریب اطمینان ایجاد شده در هر یک از مقاطع حین وقوع حادثه علاوه بر مقاومت نهایی برشی محاسبه شده در بخش قبل، مقاومت های نهایی نیروی محوری و گشتاور خمشی هر یک از مقاطع با استفاده از نرم افزار V2.20 PCAcol تعیین شد (شکل ۵ تا شکل ۱۱). در انتها نیز ضریب اطمینان هر یک از مقاطع در شرایط مختلف محاسبه و برای مقایسه نتایج در نمودار ۱ رسم شد. در این نمودار مشخصات شرایط مقاطع به صورت مخفف نوشته شده است. به طور مثال نمودار با مشخصات ۶۰WQN نشان دهنده نتیجه محاسبات انجام شده برای مقطعی در عمق ۶۰ متری که با استفاده از رابطه Wang و تحت زلزله گسل شمال قزوین در شرایط بدون لغزش است. همان طور که نتایج نشان می دهد ورودی و خروجی تونل تحت نیروی محوری و گشتاور خمشی وارده از طرف زلزله کمترین ایمنی را دارد. به طور کل می توان گفت با افزایش عمق تونل ایمنی در مقابل نیروهای محوری و گشتاور خمشی افزایش می یابد که این رفتار نمودار نمایانگر کاهش بارهای وارده با کاهش شتاب افقی زمین و افزایش ضخامت پوشش است. همچنین نیروی برشی در مقطع S-4 از طرفی به دلیل پایین بودن ضخامت پوشش نسبت به مقاطع S-5، S-6 و S-7 و هم از طرف دیگر به دلیل پایین بودن شتاب افقی زمین در این عمق نسبت به مقاطع S-1، S-2، S-3 کمترین مقدار را دارد. به طوری که مشاهده می شود، نیروی برشی از مقطع S-4 به سمت مقاطع S-1 و S-7 نیز به ترتیب به خاطر بیشینه بودن شتاب افقی زمین و افزایش ضخامت پوشش کاهش یافته است.

همان طور که انتظار می رود مقاطع تونل تحت گسل زنجان به دلیل بالا بودن بزرگای زلزله نسبت به گسل شمال قزوین دارای ایمنی کمتری است. طبق نتایج به دست آمده، بین بارهای وارده در شرایط لغزش کامل و بدون لغزش با استفاده از روش

	fault	way	Applied Loads		Computed Strength	
			P (KN)	Mx (KN-m)	P (KN)	Mx (KN-m)
Full-slip	q	w	53	318	89	536
		p	53	318	89	536
	Z	w	68	410	89	536
		p	68	410	89	536
NO-slip	q	w	1117	318	1878	536
		p	106	317	180	539
	Z	w	1440	410	1878	536
		p	136	408	180	539

Program completed as requested.

شکل ۷: مقاومت نهایی و ضریب اطمینان محاسبه شده برای پوشش در عمق ۶۰ تا ۸۰ متری تحت زلزله گسل زنجان و قزوین در شرایط لغزش کامل و بدون لغزش با استفاده از نرم‌افزار PCAcol

	Section	Applied Loads		Computed Strength	
		P (KN)	Mx (KN-m)	P (KN)	Mx (KN-m)
Wang	S-1	2002	290	2238	325
	S-2	1802	261	2238	325
	S-3	1601	232	2238	325
	S-4	1401	203	2238	325
Penzien	S-1	96	289	89	268
	S-2	87	260	89	268
	S-3	77	231	89	268
	S-4	67	202	89	268

Program completed as requested.

شکل ۵: مقاومت نهایی و ضریب اطمینان محاسبه شده برای پوشش تا عمق ۴۰ متری تحت زلزله گسل زنجان در شرایط بدون لغزش با استفاده از نرم‌افزار PCAcol

	fault	way	Applied Loads		Computed Strength	
			P (KN)	Mx (KN-m)	P (KN)	Mx (KN-m)
Full-slip	q	w	57	343	108	642
		p	57	343	108	642
	Z	w	74	442	108	642
		p	74	442	108	642
NO-slip	q	w	1121	343	1885	574
		p	114	341	211	632
	Z	w	1445	442	1885	574
		p	147	440	211	632

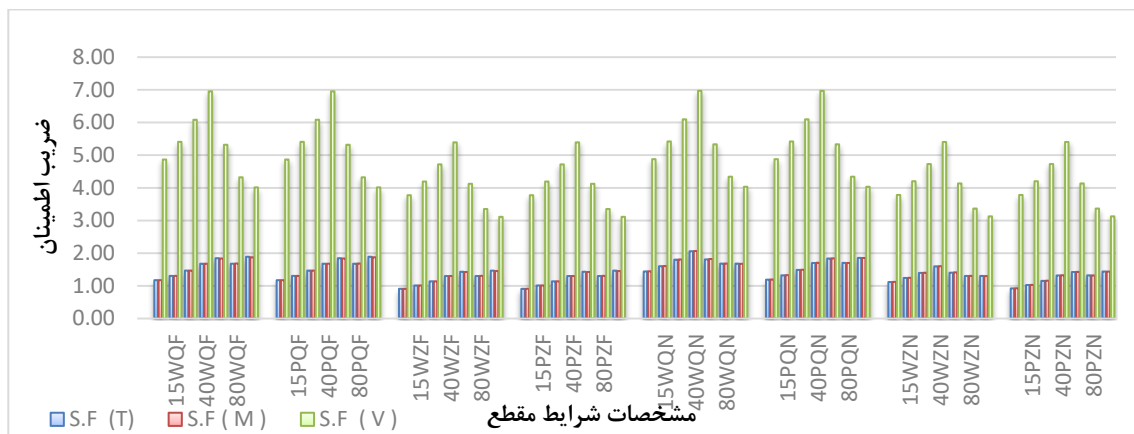
Program completed as requested.

شکل ۸: مقاومت نهایی و ضریب اطمینان محاسبه شده برای پوشش در عمق ۸۰ تا ۱۰۰ متری تحت زلزله گسل زنجان و قزوین در شرایط لغزش کامل و بدون لغزش با استفاده از نرم‌افزار PCAcol

	fault	way	Applied Loads		Computed Strength	
			P (KN)	Mx (KN-m)	P (KN)	Mx (KN-m)
Full-slip	q	w	33	198	61	364
		p	33	198	61	364
	Z	w	43	255	61	364
		p	43	255	61	364
NO-slip	q	w	1096	198	1983	361
		p	66	198	121	364
	Z	w	1413	255	1983	361
		p	85	255	121	364

Program completed as requested.

شکل ۶: مقاومت نهایی و ضریب اطمینان محاسبه شده برای پوشش در عمق ۴۰ تا ۶۰ متری تحت زلزله گسل زنجان و قزوین در شرایط لغزش کامل و بدون لغزش با استفاده از نرم‌افزار PCAcol



نمودار ۱: ضرایب اطمینان محاسبه شده برای مقاطع در شرایط مختلف

سطح احتمال خواهد بود. در نتیجه، در این حالت تغییرات میزان ریسک ایجاد شده در هر مقطع به‌طور واضحی به تغییرات میزان شدت خطر ایجاد شده معطوف خواهد شد. شدت خطر ایجاد شده در مقاطع نیز به‌وسیله ضرایب اطمینان حاصل از وقوع حادثه محاسبه شد (جدول ۱۴). به‌طوری‌که ابتدا ضریب اطمینان کل که در مقطع موردنظر برابر با مجموع هرکدام از ضرایب اطمینان دینامیکی  $T$ ،  $M$  و  $V$  به نسبت میزان تأثیرشان در شدت خطر بود (گزاره‌ی (۱۲)، محاسبه و

#### ۴- تحلیل ریسک دینامیکی تونل راه‌آهن کوهین

برای تعیین ریسک طبق روش ماتریس احتمال - اثر از دو پارامتر شدت وقوع حادثه و احتمال وقوع حادثه استفاده شد. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، به‌دلیل نزدیک بودن مقاطع به یکدیگر نسبت به فاصله آن‌ها از دو گسل شمال قزوین و زنجان (مرکز کانونی زلزله)، احتمال وقوع حادثه نیز برای تمامی مقاطع یکسان و به‌دلیل وقوع حادثه برابر با بیش‌ترین

جدول ۶: تأثیر پارمترهای  $T$ ،  $M$  و  $V$  بر شدت خطر

$S.F_V$	$S.F_M$	$S.F_T$	
۶/۹۷	۲/۰۷	۲/۰۶	بیشترین ضریب اطمینان
۳/۱۱	۰/۹۱	۰/۹۱	کمترین ضریب اطمینان
۳/۸۶	۱/۱۶	۱/۱۵	اختلاف ضریب اطمینانها
	۶/۱۷		مجموع اختلاف ضریب اطمینانها
۶۲/۵۶	۱۸/۸۰	۱۸/۶۴	تأثیر (وزن) پارامتر (%)

سپس با توجه به کلاس تعریف شده در جدول ۷ میزان شدت خطر ایجاد شده در شرایط و مقاطع مختلف تعیین شد. جدول ۷ با توجه به شرایط متوسط تونل که محدودیت عرض ترک در آن ۰/۳۵ میلی متر است، کلاس بندی شده است. همچنین میزان تأثیر یا وزن هر یک از ضرایب اطمینان ( $T$  یا  $M$  و یا  $V$ ) نیز از اختلاف بیشینه تغییرات ضریب اطمینان ( $T$  یا  $M$  و یا  $V$ ) نسبت به مجموع اختلاف بیشینه تغییرات ضریب اطمینان  $T$ ،  $M$  و  $V$  محاسبه شد (جدول ۶) که به عنوان مثال گزاره‌ی (۱۳) برای محاسبه وزن ضریب اطمینان نیروی محوری نشان داده شده است.

$$S.F_U = \alpha_T \times S.F_T + \alpha_M \times S.F_M + \alpha_V \times S.F_V \quad (12)$$

$$\alpha_T = \frac{\Delta S.F_T}{(\Delta S.F_T + \Delta S.F_M + \Delta S.F_V)} \quad (13)$$

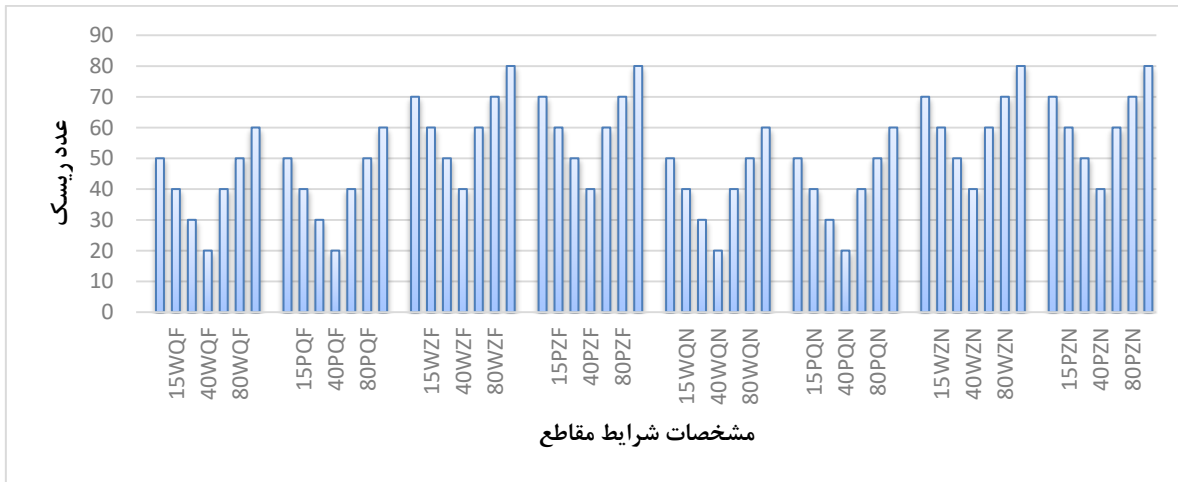
جدول ۷: کلاس بندی سطوح شدت خطر براساس عرض ترک ایجاد شده

شرح		رتبه (امتیاز)	سطح آسیب دیدگی
عرض ترک بر روی دیواره‌ی تونل	ضریب اطمینان ایجاد شده		
$0.350 \text{ mm} < W$	$S.F_U < 1$	۱۰	خرابی کامل
$0.200 \text{ mm} < W \leq 0.350 \text{ mm}$	$1 \leq S.F_U < 1.75$	۹	بسیار گسترده
$0.135 \text{ mm} < W \leq 0.200 \text{ mm}$	$1.75 \leq S.F_U < 2.59$	۸	گسترده
$0.120 \text{ mm} < W \leq 0.135 \text{ mm}$	$2.59 \leq S.F_U < 2.92$	۷	نسبتاً گسترده
$0.105 \text{ mm} < W \leq 0.120 \text{ mm}$	$2.92 \leq S.F_U < 3.33$	۶	متوسط
$0.095 \text{ mm} < W \leq 0.105 \text{ mm}$	$3.33 \leq S.F_U < 3.68$	۵	نسبتاً متوسط
$0.085 \text{ mm} < W \leq 0.095 \text{ mm}$	$3.68 \leq S.F_U < 4.12$	۴	نسبتاً کم
$0.075 \text{ mm} < W \leq 0.085 \text{ mm}$	$4.12 \leq S.F_U < 4.68$	۳	کم
$0.065 \text{ mm} < W \leq 0.075 \text{ mm}$	$4.68 \leq S.F_U < 5.38$	۲	بسیار کم
$W \leq 0.065 \text{ mm}$	$5.38 \leq S.F_U$	۱	بدون آسیب

تونل تحت امواج زلزله گسل زنگان وجود دارد (جدول ۱۴ پیوست و نمودار ۲). برای جلوگیری و یا کاهش این ریسک ایجاد شده در تونل می توان پوشش مقاطع نام برده را با تقویت موضعی به دلیل کاهش هزینه و مناسب با توجه به عدم ضخامت پوشش، هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ فنی در مقابل امواج زلزله های وارده به طور قابل توجهی مستحکم کرد.

نتایج به دست آمده نشان می دهد که دهانه و مرکز تونل نسبت به سایر مقاطع دارای بیشترین ریسک هستند که عامل اصلی ایجاد ریسک بالا در این مقاطع را می توان به ترتیب به بالا بودن بیشینه شتاب افقی و افزایش ضخامت پوشش نسبت داد. با توجه به نمودار ۲ و جدول ۸ سطح ریسک مقاطع S-6، S-1 و S-7 تحت امواج زلزله گسل زنگان در کلاس بسیار بالا قرار می گیرد که نشان دهنده افزایش امکان از دست دادن این مسیر ریلی به خاطر بالا بودن ریسک های ایجاد شده در چند مقطع





نمودار ۲: عدد ریسک به دست آمده برای مقاطع در شرایط مختلف حین وقوع حادثه

افقی زمین بعد از مقطع  $S-4$  (با افزایش عمق) ثابت است. با توجه به نتایج به طور کامل روشن است که با افزایش ضخامت پوشش انعطاف پذیری و تراکم پذیری کاهش یافته و در نتیجه شدت آسیب پذیری بالا می‌رود که در این باره توصیه می‌شود در ساخت پوشش‌های نگهدارنده از بتن‌هایی با مقاومت فشاری بالا و مدول الاستیسیته پایین استفاده شود.

۳- اگرچه در هنگام وقوع حادثه ضریب اطمینان نیروی برشی پوشش دارای بازه تغییرات بسیار زیادی است ولی به طور کل قابلیت تحمل نیروهای برشی از طرف زلزله را دارد.

۴- همان‌طور که نشان داده شد، بیشترین ریسک ایجاد شده در مقاطع  $S-1$ ،  $S-6$  و  $S-7$  تحت تأثیر لرزش‌های حاصل از گسل زنگان رخ می‌دهد. همچنین کمترین ریسک نیز در مقطع  $S-4$  تحت تأثیر لرزش‌های حاصل از گسل شمال قزوین ایجاد می‌شود.

۵- با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل ریسک، حساس‌ترین مقاطع به راحتی قابل تشخیص است که در نتیجه آن می‌توان با کاهش هزینه‌های مستحکم سازی غیرضروری برای برخی مقاطع فقط مقطع‌ها و محدوده‌های پرریسک را به صورت موضعی تقویت کرد.

#### ۶- مراجع

- [۱] صیادی، ا.، منجزی، م.، و شریفی، م. (۱۳۹۲). ارائه رویکردی جهت ارزیابی ریسک در معادن روباز با استفاده از روش FAHP و Fuzzy TOPSIS. نشریه علمی-پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۴۵-۵۸.

جدول ۸: سطح بندی ریسک‌های ایجاد شده

سطح ریسک	بازه ریسک ایجاد شده	
	کران بالا	کران پایین
بسیار بالا	۱۰۰	۶۴
بالا	۶۴	۴۲
نسبتاً بالا	۴۲	۳۰
متوسط	۳۰	۲۰
نسبتاً پایین	۲۰	۱۶
پایین	۱۶	۹
خیلی پایین	۹	صفر

۱۰۰	۹۰	۸۱	۴۹	۴۲
۹۰	۶۴	۴۵	۳۶	۲۵
۸۱	۴۵	۳۰	۲۰	۱۶
۴۹	۲۶	۲۰	۹	۴
۴۲	۲۵	۱۶	۴	۱

#### ۵- نتیجه گیری

با توجه به تحلیل‌های انجام شده در قسمت بارهای دینامیکی و ریسک‌های ایجاد شده می‌توان نتایج را به صورت زیر جمع بندی کرد:

۱- ضریب اطمینان مقطع دهانه نشان می‌دهد که بتن در مقاطع و شرایط  $6WZF$ ،  $6PZF$  و  $6PZN$  به طور کل در مقابل نیروی محوری و گشتاور خمشی تسلیم شده و از بین می‌رود ولی پوشش به دلیل مسلح بودن خاصیت برشی خود را حفظ کرده و گسیخته نمی‌شود.

۲- همان‌طور که مشاهده شد، ضخامت پوشش از مقطع  $S-4$  به بعد با فاصله از دهانه تونل افزایش می‌یابد در حالی که شتاب

[9] Fabozzi, S., Licata, V., Autuori, S., Bilotta, E., Russo, G., & Silvestri, F. (2017). Prediction of the seismic behavior of an underground railway station and a tunnel in Napoli (Italy). *Underground Space*, 2(2), 88-105.

[10] Bao, X., Xia, Z., Ye, G., Fu, Y., & Su, D. (2017). Numerical analysis on the seismic behavior of a large metro subway tunnel in liquefiable ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 66, 91-106.

[11] Salemi, A., Mikaeil, R., & Haghshenas, S. S. (2018). Integration of finite difference method and genetic algorithm to seismic analysis of circular shallow tunnels (Case study: Tabriz urban railway tunnels). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(5), 1978-1990.

[۱۲] زهرفروش ک.، ناصری ع. (۱۳۹۷). بررسی رفتار لرزه‌ای تاج تونل تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک با رویکرد اجزاء محدود. فصلنامه علمی - تخصصی رویکردهای نوین در مهندسی عمران. شماره ۳. ۷۰-۹۰.

[۱۳] مهندسین مشاور هزارراه. (۱۳۸۳). دومین گزارش تونل راه‌آهن کوهین محور قزوین-رشت-بندر انزلی.

[۱۴] دفتر مقررات ملی ساختمان. (۱۳۹۲). مبحث نهم مقررات ملی ساختمان طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه. تهران: نشر توسعه ایران.

[2] Drury, C. (2000). HAZUS99 Estimated Annualized Earthquake Losses For The United States. Washington: Federal Emergency Management Agency (FEMA 366).

[3] OSPMI. (2007). Project Risk Management Handbook (Second Edition, Rev 0 Ed.). Sacramento, California: Office of Statewide Project Management Improvement (OSPMI).

[4] PMBOK. (2008). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (Fourth Edition Ed.). USA: project management institute, Inc. doi: ISBN: 978-1-933890-51-7.

[5] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2007). Mechanized tunneling in urban areas: design methodology and construction control. (V. Guglielmetti, P. Grasso, A. Mahtab, & S. Xu, Eds.) United Kingdom: Taylor & Francis Group-CRC Press.

[6] Sayadi, A., Hayati, M., & Monjezi, M. (2011). Risk management in tunnel Construction using MADM techniques. *Industrial Management Journal*, 3(7), 99-116.

[7] Hashash, Y. M., Hook, J. J., Schmidt, B., & Yao, J. I.-C. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16, 247-293.

[8] Hamdy, H. A., Enieb, M., Khalil, A. A., & Ahmed, A. S. Seismic Analysis of Urban Tunnel Systems for the Greater Cairo Metro Line No. 4.

## ۷- فهرست نمادها

ردیف	نماد	واحد	شرح
۱۶	F	ندارد	ضریب انعطاف‌پذیری
۱۷	C	ندارد	ضریب تراکم‌پذیری
۱۸	$E_m$	Pa	مدول الاستیسیته محیط
۱۹	$V_m$	ندارد	ضریب پواسن محیط
۲۰	$G_m$	Pa	مدول برشی محیط
۲۱	$E_L$	Pa	مدول الاستیسیته پوشش
۲۲	$V_L$	ندارد	ضریب پواسن پوشش
۲۳	M	$M_W$	بزرگی زلزله
۲۴	H	m	ارتفاع روباره یا عمق تونل
۲۵	$a_{max}$	g	بیشترین شتاب افقی در سطح زمین
۲۶	RDS	ندارد	نسبت شتاب در عمق تونل به نسبت شتاب در سطح
۲۷	$a_s$	g	شتاب افقی در عمق موردنظر
۲۸	$V_m/a_m$	(m/s)/g	نسبت سرعت زمین به شتاب زمین
۲۹	$V_s$	m/s	حداکثر سرعت ذرات زمین در عمق موردنظر
۳۰	$C_s$	m/s	سرعت انتشار موج S
۳۱	$E_C$	Pa	مدول الاستیسیته بتن
۳۲	$E_s$	Pa	مدول الاستیسیته آرماتور
۳۳	n	ندارد	تعداد میگردهای عرضی (محیطی)

ردیف	نماد	واحد	شرح
۱	$\Delta d_{\text{lining}}$	m	جابه‌جایی قطری پوشش
۲	$\Delta d^n_{\text{lining}}$	m	جابه‌جایی قطری پوشش فقط تحت بارگذاری نرمال
۳	$\Delta d_{\text{free-field}}$	m	جابه‌جایی زمین در تونل بدون پوشش
۴	$P$ یا $T$	N	نیروی محوری
۵	M	N.m	نیروی خمشی
۶	V	N	نیروی برشی
۷	$T_{max}$	N	نیروی محوری ماکزیمم
۸	$M_{max}$	N.m	نیروی خمشی ماکزیمم
۹	$V_{max}$	N	نیروی برشی ماکزیمم
۱۰	$\gamma_{max}$	ندارد	کرنش برشی ماکزیمم
۱۱	r, d	m	قطر و شعاع تونل
۱۲	t	m	ضخامت پوشش
۱۳	I	$m^4$	ممان اینرسی پوشش (بر واحد عرض)
۱۴	$K_1$	ندارد	ضریب پاسخ پوشش تونل
۱۵	$K_2$	ندارد	ضریب پاسخ محوری تونل

نسبت سطح مقطع خاموت‌ها به فاصله آن‌ها	mm	$A_v/S$	۴۴
مقاومت برشی آرماتورهای مورد استفاده در پوشش	N	$V_s$	۴۵
ضریب جزئی ایمنی فولاد	ندارد	$\varphi_s$	۴۶
مقاومت برشی بتن مورد استفاده در پوشش	N	$V_c$	۴۷
ضریب جزئی ایمنی بتن	ندارد	$\varphi_c$	۴۸
مقاومت برشی پوشش	N	$V_u$	۴۹
ضریب اطمینان	ندارد	S.F	۵۰
ضریب اطمینان کل	ندارد	S.F <sub>U</sub>	۵۱
اختلاف ضریب اطمینان	ندارد	$\Delta S.F$	۵۲
تأثیر یا وزن پارامتر مورد نظر	ندارد	$\alpha$	۵۳
عرض ترک بر روی دیواره پوشش	mm	W	۵۴
عدد ریسک	ندارد	R <sub>SP</sub>	۵۵
شدت خطر ایجاد شده	ندارد	RS	۵۶

مورد استفاده در بالا یا پایین مقطع			
مساحت آرماتورهای عرضی (محیطی) مورد استفاده در پوشش	m <sup>2</sup>	$A_s$	۳۴
طول مقاطع مورد نظر	m	$b_w$	۳۵
ضخامت تبدیل یافته	m	$t'$	۳۶
مقاومت تراکمی بتن	Pa	$f'_c$	۳۷
کرنش بحرانی بتن	%	$\epsilon_u$	۳۸
ضخامت پوشش	m	C	۳۹
شماره میلگردهای عرضی (قطر میلگرد)	m	$d_2$	۴۰
فاصله دورترین تار فشاری از مرکز سطح آرماتور کششی طولی	m	$d_3$	۴۱
تنش تسلیم آرماتور مورد استفاده در پوشش	Pa	$f_y$	۴۲
مساحت کل آرماتورهای عرضی (محیطی) پوشش در هر متر از مقطع	m <sup>2</sup>	$\Sigma A_s$	۴۳

### ۸- پیوست‌ها

جدول ۹: روابط ارائه شده توسط Wang و Penzien [۷]

نوع شرایط زمین و پوشش

بدون لغزش	لغزش کامل	منبع
	$\frac{\Delta d_{lining}}{\Delta d_{free-field}} = \frac{2}{3} K_1 F$	
	$\Delta d_{free-field} = \frac{\gamma_{max} d}{2}$	
$T_{max} = \pm K_2 \frac{E_m r \gamma_{max}}{2(1 + V_m)}$	$T_{max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m r \gamma_{max}}{(1 + V_m)}$	Wang
$M_{max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m r^2 \gamma_{max}}{(1 + V_m)}$	$M_{max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m r^2 \gamma_{max}}{(1 + V_m)}$	
$K_1 = \frac{12(1 - V_m)}{2F + 5 - 6V_m}$ ، $F = \frac{E_m(1 - V_l^2) r^3}{6E_l I(1 + V_m)}$ ، $C = \frac{E_m(1 - V_l^2) r}{E_l t(1 + V_m)(1 - 2V_m)}$		
$K_2 = 1 + \frac{F[(1 - 2V_m) - (1 - 2V_m)C] - \frac{1}{2}(1 - 2V_m)^2 + 2}{F[(3 - 2V_m) - (1 - 2V_m)C] + C \left[ \frac{5}{2} - 8V_m + 6V_m^2 \right] + 6 - 8V_m}$		
$\alpha = \frac{24E_l I(3 - 4V_m)}{d^3 G_m(1 - V_l^2)}$	$\alpha^n = \frac{12E_l I(5 - 6V_m)}{d^3 G_m(1 - V_l^2)}$	Penzien
$R = \pm \frac{4(1 - V_m)}{\alpha + 1}$	$R^n = \frac{4(1 - V_m)}{\alpha^n + 1}$	
$\Delta d_{lining} = R \frac{\gamma_{max} d}{2}$	$\Delta d_{lining}^n = R^n \frac{\gamma_{max} d}{2}$	
$T_{max} = \pm \frac{24 E_l I \Delta d_{lining}}{d^3 (1 - V_l^2)}$	$T_{max} = \pm \frac{12 E_l I \Delta d_{lining}^n}{d^3 (1 - V_l^2)}$	
$M_{max} = \pm \frac{6 E_l I \Delta d_{lining}}{d^2 (1 - V_l^2)}$	$M_{max} = \pm \frac{6 E_l I \Delta d_{lining}^n}{d^2 (1 - V_l^2)}$	
$V_{max} = \pm \frac{24 E_l I \Delta d_{lining}}{d^3 (1 - V_l^2)}$	$V_{max} = \pm \frac{24 E_l I \Delta d_{lining}^n}{d^3 (1 - V_l^2)}$	

جدول ۱۰: مشخصات پوشش مورد استفاده در مقاطع مختلف

ردیف	پارامتر	یکا	پوشش نوع ۱	پوشش نوع ۲	پوشش نوع ۳	پوشش نوع ۴
۱	$H$	$m$	۴۰ تا ۰	۶۰ تا ۴۰	۸۰ تا ۶۰	۱۰۰ تا ۸۰
۲	$V_L$	ندارد	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
۳	$E_C$	$Pa$	۲۳۳۹۲۸۱۹۴۱۱	۲۳۳۹۲۸۱۹۴۱۱	۲۳۳۹۲۸۱۹۴۱۱	۲۳۳۹۲۸۱۹۴۱۱
۴	$E_s$	$Pa$	$1/99955 \times 10^{11}$	$1/99955 \times 10^{11}$	$1/99955 \times 10^{11}$	$1/99955 \times 10^{11}$
۵	$t$	$m$	۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۵
۶	$t'$	$m$	۰/۴۳۸	۰/۴۷۴	۰/۵۵۹	۰/۵۷۴
۷	$d$	$m$	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۸	$I$	$m^4$	۰/۰۰۷۰۰	۰/۰۰۸۸۸	۰/۰۱۴۵۸	۰/۰۱۵۷۷
۹	$f_c$	$Pa$	۲۳۵۴۳۲۶۰/۷۴	۲۳۵۴۳۲۶۰/۷۴	۲۳۵۴۳۲۶۰/۷۴	۲۳۵۴۳۲۶۰/۷۴
۱۰	$\epsilon_u$	%	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰
۱۱	$f_y$	$Pa$	۳۹۲۳۸۷۶۷۹/۰۳	۳۹۲۳۸۷۶۷۹/۰۳	۳۹۲۳۸۷۶۷۹/۰۳	۳۹۲۳۸۷۶۷۹/۰۳
۱۲	$C$	$m$	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶
۱۳	$n$	ندارد	۸	۱۰	۸	۱۰
۱۴	$d_2$	$m$	۰/۰۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵
۱۵	$d_3$	$m$	۰/۳۴	۰/۳۲۷۵	۰/۴۲۷۵	۰/۴۲۷۵
۱۶	$\Sigma A_s$	$m^2$	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۹۸
۱۷	$A_v/S$	$mm$	۰/۷۴۱۹	۰/۷۴۱۹	۰/۷۴۱۹	۰/۷۴۱۹
۱۸	$V_s$	$N$	۸۴۱۳۶/۱۰	۸۱۰۴۲/۸۷	۱۰۵۷۸۸/۷۸	۱۰۵۷۸۸/۷۸
۱۹	$V_c$	$N$	۲۸۰۴۵۳/۶۸	۲۷۰۱۴۲/۸۸	۳۵۲۶۲۹/۲۶	۳۵۲۶۲۹/۲۶
۲۰	$V_u$	$N$	۳۶۴۵۸۹/۷۹	۳۵۱۱۸۵/۷۵	۴۵۸۴۱۸/۰۴	۴۵۸۴۱۸/۰۴

جدول ۱۱: بارهای وارده از طرف امواج زلزله به مقاطع در شرایط لغزش کامل

نام گسل	نوع روش	نام مقطع	جابه‌جایی پوشش (m)	نیروی محوری (N)	لنگر خمشی (N.m)	نیروی برشی (N)
شمال	Wang	S-1	۰/۰۳۲۲	۳۷۴۵۲/۱۸	۲۲۴۷۱۳/۰۸	-----
		S-2	۰/۰۲۸۹	۳۳۷۰۶/۹۶	۲۰۲۲۴۱/۷۷	-----
		S-3	۰/۰۲۵۸	۲۹۹۶۱/۷۴	۱۷۹۷۷۰/۴۶	-----
		S-4	۰/۰۲۲۵	۲۶۲۱۶/۵۳	۱۵۷۲۹۹/۱۵	-----
		S-5	۰/۰۲۲۴	۳۳۰۱۸/۰۰	۱۹۸۱۰۷/۹۹	-----
		S-6	۰/۰۲۱۹	۵۳۰۲۷/۳۵	۳۱۸۱۶۴/۰۷	-----
		S-7	۰/۰۲۱۸	۵۷۰۹۶/۶۵	۳۴۲۵۷۹/۸۸	-----
قزوین	Penzien	S-1	۰/۰۳۲۲	۳۷۴۵۰/۸۱	۲۲۴۷۰۴/۸۴	۷۴۹۰۱/۶۱
		S-2	۰/۰۲۹۰	۳۳۷۰۵/۷۳	۲۰۲۲۳۴/۳۶	۶۷۴۱۱/۴۵
		S-3	۰/۰۲۵۸	۲۹۹۶۰/۶۵	۱۷۹۷۶۳/۸۷	۵۹۹۲۱/۲۹
		S-4	۰/۰۲۲۵	۲۶۲۱۵/۵۶	۱۵۷۲۹۳/۳۹	۵۲۴۳۱/۱۳
		S-5	۰/۰۲۲۴	۳۳۰۱۶/۴۷	۱۹۸۰۹۸/۸۵	۶۶۰۳۲/۹۵
		S-6	۰/۰۲۱۹	۵۳۰۲۳/۴۱	۳۱۸۱۴۰/۴۹	۱۰۶۰۴۶/۸۳
		S-7	۰/۰۲۱۸	۵۷۰۹۲/۰۹	۳۴۲۵۵۲/۵۴	۱۱۴۱۸۴/۱۸

ادامه جدول ۱۲: بارهای وارده از طرف امواج زلزله به مقاطع در شرایط لغزش کامل

نام گسل	نوع روش	نام مقطع	جابه‌جایی پوشش (m)	نیروی محوری (N)	لنگر خمشی (N.m)	نیروی برشی (N)
زنجان	Wang	S-1	۰/۰۴۱۵	۴۸۲۹۴/۵۰	۲۸۹۷۶۷/۰۰	-----
		S-2	۰/۰۳۷۴	۴۳۴۶۵/۰۵	۲۶۰۷۹۰/۳۰	-----
		S-3	۰/۰۳۳۲	۳۸۶۳۵/۶۰	۲۳۱۸۱۳/۶۰	-----
		S-4	۰/۰۲۹۱	۳۳۸۰۶/۱۵	۲۰۲۸۳۶/۹۰	-----
		S-5	۰/۰۲۸۸	۴۲۵۷۶/۶۳	۲۵۵۴۵۹/۸۰	-----
		S-6	۰/۰۲۸۲	۶۸۳۷۸/۶۴	۴۱۰۲۷۱/۸۵	-----
		S-7	۰/۰۲۸۱	۷۳۶۲۶/۰۰	۴۴۱۷۵۵/۹۷	-----
Penzien	Wang	S-1	۰/۰۴۱۵	۴۸۲۹۲/۷۳	۲۸۹۷۵۶/۳۸	۹۶۵۸۵/۴۶
		S-2	۰/۰۳۷۴	۴۳۴۶۳/۴۶	۲۶۰۷۸۰/۷۴	۸۶۹۲۶/۹۱
		S-3	۰/۰۳۳۲	۳۸۶۳۴/۱۸	۲۳۱۸۰۵/۱۰	۷۷۲۶۸/۳۷
		S-4	۰/۰۲۹۱	۳۳۸۰۴/۹۱	۲۰۲۸۲۹/۴۷	۶۷۶۰۹/۸۲
		S-5	۰/۰۲۸۸	۴۲۵۷۴/۶۷	۲۵۵۴۴۸/۰۱	۸۵۱۴۹/۳۴
		S-6	۰/۰۲۸۲	۶۸۳۷۳/۵۷	۴۱۰۲۴۱/۴۳	۱۳۶۷۴۷/۱۴
		S-7	۰/۰۲۸۱	۷۳۶۲۰/۱۲	۴۴۱۷۲۰/۷۱	۱۴۷۲۴۰/۲۴

جدول ۱۳: بارهای وارده از طرف امواج زلزله به مقاطع در شرایط بدون لغزش

نام گسل	نوع روش	نام مقطع	جابه‌جایی پوشش (m)	نیروی محوری (N)	لنگر خمشی (N.m)	نیروی برشی (N)
شمال قزوین	Wang	S-1	-----	۱۵۵۲۴۳۲/۲۴	۲۲۴۷۱۳/۰۸	-----
		S-2	-----	۱۳۹۷۱۸۹/۰۱	۲۰۲۲۴۱/۷۷	-----
		S-3	-----	۱۲۴۱۹۴۵/۷۹	۱۷۹۷۷۰/۴۶	-----
		S-4	-----	۱۰۸۶۷۰۲/۵۷	۱۵۷۲۹۹/۱۵	-----
		S-5	-----	۱۰۹۵۵۷۱/۸۲	۱۹۸۱۰۷/۹۹	-----
		S-6	-----	۱۱۱۶۹۸۵/۶۷	۳۱۸۱۶۴/۰۷	-----
		S-7	-----	۱۱۲۰۸۶۵/۸۵	۳۴۲۵۷۹/۸۸	-----
Wang	Penzien	S-1	۰/۰۳۲۱	۷۴۷۴۳/۵۷	۲۲۴۲۳۰/۷۱	۷۴۷۴۳/۵۷
		S-2	۰/۰۲۸۹	۶۷۲۶۹/۳۱	۲۰۱۸۰۷/۶۴	۶۷۲۶۹/۳۱
		S-3	۰/۰۲۵۷	۵۹۷۹۴/۸۶	۱۷۹۳۸۴/۵۷	۵۹۷۹۴/۸۶
		S-4	۰/۰۲۲۵	۵۲۳۲۰/۵۰	۱۵۶۹۶۱/۵۰	۵۲۳۲۰/۵۰
		S-5	۰/۰۲۲۳	۶۵۸۵۷/۵۷	۱۹۷۵۷۲/۷۱	۶۵۸۵۷/۵۷
		S-6	۰/۰۲۱۸	۱۰۵۵۹۵/۲۳	۳۱۶۷۸۵/۶۸	۱۰۵۵۹۵/۲۳
		S-7	۰/۰۲۱۷	۱۱۳۶۶۰/۷۸	۳۴۰۹۸۲/۳۵	۱۱۳۶۶۰/۷۸
زنجان	Wang	S-1	-----	۲۰۱۸۵۷/۸۳	۲۸۹۷۶۷/۰۰	-----
		S-2	-----	۱۸۰۱۶۷۲/۰۴	۲۶۰۷۹۰/۳۰	-----
		S-3	-----	۱۶۰۱۴۸۶/۲۶	۲۳۱۸۱۳/۶۰	-----
		S-4	-----	۱۴۰۱۳۰۰/۴۸	۲۰۲۸۳۶/۹۰	-----
		S-5	-----	۱۴۱۲۷۳۷/۳۷	۲۵۵۴۵۹/۸۰	-----
		S-6	-----	۱۴۴۰۳۵۰/۴۷	۴۱۰۲۷۱/۸۵	-----
		S-7	-----	۱۴۴۵۳۵۳/۹۶	۴۴۱۷۵۵/۹۷	-----
Penzien	Wang	S-1	۰/۰۴۱۴	۹۶۳۸۱/۶۶	۲۸۹۱۴۴/۹۹	۹۶۳۸۱/۶۶
		S-2	۰/۰۳۷۳	۸۶۷۴۳/۵۰	۲۶۰۲۳۰/۴۹	۸۶۷۴۳/۵۰
		S-3	۰/۰۳۳۱	۷۷۱۰۵/۳۳	۲۳۱۳۱۵/۹۹	۷۷۱۰۵/۳۳
		S-4	۰/۰۲۹۰	۶۷۴۶۷/۱۶	۲۰۲۴۰۱/۴۹	۶۷۴۶۷/۱۶
		S-5	۰/۰۲۸۸	۸۴۹۲۳/۱۸	۲۵۴۷۶۹/۵۵	۸۴۹۲۳/۱۸
		S-6	۰/۰۲۸۱	۱۳۶۱۶۴/۸۰	۴۰۸۴۹۴/۴۱	۱۳۶۱۶۴/۸۰
		S-7	۰/۰۲۸۰	۱۴۶۵۶۵/۳۲	۴۳۹۶۹۵/۹۶	۱۴۶۵۶۵/۳۲

جدول ۱۴: ضریب اطمینان محاسبه شده برای مقاطع در شرایط مختلف

بدون لغزش			لغزش کامل			نام مقطع	نوع روش	نام گسل
S.F <sub>V</sub>	S.F <sub>M</sub>	S.F <sub>T</sub>	S.F <sub>V</sub>	S.F <sub>M</sub>	S.F <sub>T</sub>			
۴/۸۸	۱/۴۵	۱/۴۴	۴/۸۷	۱/۱۷	۱/۱۷	S-1	Wang	شمال قزوین
۵/۴۲	۱/۶۱	۱/۶۰	۵/۴۱	۱/۳۱	۱/۳۱	S-2		
۶/۱۰	۱/۸۱	۱/۸۰	۶/۰۸	۱/۴۷	۱/۴۷	S-3		
۶/۹۷	۲/۰۷	۲/۰۶	۶/۹۵	۱/۶۸	۱/۶۸	S-4		
۵/۳۳	۱/۸۲	۱/۸۱	۵/۳۲	۱/۸۴	۱/۸۵	S-5		
۴/۳۴	۱/۶۸	۱/۶۸	۴/۳۲	۱/۶۸	۱/۶۸	S-6		
۴/۰۳	۱/۶۸	۱/۶۸	۴/۰۱	۱/۸۷	۱/۸۹	S-7		
۴/۸۸	۱/۲۰	۱/۱۹	۴/۸۷	۱/۱۷	۱/۱۷	S-1	Penzien	شمال قزوین
۵/۴۲	۱/۳۳	۱/۳۲	۵/۴۱	۱/۳۱	۱/۳۱	S-2		
۶/۱۰	۱/۴۹	۱/۴۹	۶/۰۸	۱/۴۷	۱/۴۷	S-3		
۶/۹۷	۱/۷۱	۱/۷۰	۶/۹۵	۱/۶۸	۱/۶۸	S-4		
۵/۳۳	۱/۸۴	۱/۸۴	۵/۳۲	۱/۸۴	۱/۸۵	S-5		
۴/۳۴	۱/۷۰	۱/۷۰	۴/۳۲	۱/۶۸	۱/۶۸	S-6		
۴/۰۳	۱/۸۵	۱/۸۶	۴/۰۱	۱/۸۷	۱/۸۹	S-7		
۳/۷۸	۱/۱۲	۱/۱۲	۳/۷۷	۰/۹۱	۰/۹۱	S-1	Wang	زنجان
۴/۲۰	۱/۲۵	۱/۲۴	۴/۱۹	۱/۰۱	۱/۰۱	S-2		
۴/۷۳	۱/۴۰	۱/۴۰	۴/۷۲	۱/۱۴	۱/۱۴	S-3		
۵/۴۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۵/۳۹	۱/۳۰	۱/۳۰	S-4		
۴/۱۴	۱/۴۱	۱/۴۰	۴/۱۲	۱/۴۲	۱/۴۳	S-5		
۳/۳۷	۱/۳۱	۱/۳۰	۳/۳۵	۱/۳۱	۱/۳۰	S-6		
۳/۱۳	۱/۳۰	۱/۳۰	۳/۱۱	۱/۴۵	۱/۴۷	S-7		
۳/۷۸	۰/۹۳	۰/۹۲	۳/۷۷	۰/۹۱	۰/۹۱	S-1	Penzien	زنجان
۴/۲۰	۱/۰۳	۱/۰۳	۴/۱۹	۱/۰۱	۱/۰۱	S-2		
۴/۷۳	۱/۱۶	۱/۱۵	۴/۷۲	۱/۱۴	۱/۱۴	S-3		
۵/۴۰	۱/۳۲	۱/۳۲	۵/۳۹	۱/۳۰	۱/۳۰	S-4		
۴/۱۴	۱/۴۳	۱/۴۲	۴/۱۲	۱/۴۲	۱/۴۳	S-5		
۳/۳۷	۱/۳۲	۱/۳۲	۳/۳۵	۱/۳۱	۱/۳۰	S-6		
۳/۱۳	۱/۴۴	۱/۴۴	۳/۱۱	۱/۴۵	۱/۴۷	S-7		

جدول ۱۵: شدت خطر محاسبه شده برای مقاطع در شرایط مختلف

بدون لغزش			لغزش کامل			نام مقطع	نوع روش	نام گسل
R <sub>Sp</sub>	□□	□.□□	R <sub>Sp</sub>	□□	□.□□			
۵۰	۵	۳/۵۹	۵۰	۵	۳/۴۹	S-1	Wang	شمال قزوین
۴۰	۴	۳/۹۹	۴۰	۴	۳/۸۷	S-2		
۳۰	۳	۴/۴۹	۳۰	۳	۴/۳۶	S-3		
۲۰	۲	۵/۱۳	۲۰	۲	۴/۹۸	S-4		
۴۰	۴	۴/۰۲	۴۰	۴	۴/۰۲	S-5		
۵۰	۵	۳/۳۵	۵۰	۵	۳/۳۳	S-6		
۶۰	۶	۳/۱۵	۶۰	۶	۳/۲۲	S-7		
۵۰	۵	۳/۵۰	۵۰	۵	۳/۴۹	S-1	Penzien	شمال قزوین
۴۰	۴	۳/۸۹	۴۰	۴	۳/۸۷	S-2		
۳۰	۳	۴/۳۷	۳۰	۳	۴/۳۶	S-3		
۲۰	۲	۵/۰۰	۲۰	۲	۴/۹۸	S-4		
۴۰	۴	۴/۰۲	۴۰	۴	۴/۰۲	S-5		
۵۰	۵	۳/۳۵	۵۰	۵	۳/۳۳	S-6		
۶۰	۶	۳/۲۲	۶۰	۶	۳/۲۲	S-7		

ادامه جدول ۱۶: شدت خطر محاسبه شده برای مقاطع در شرایط مختلف

بدون لغزش			لغزش کامل			نام مقطع	نوع روش	نام گسل
RSP	□□	□.□□	RSP	□□	□.□□			
۷۰	۷	۲/۷۹	۷۰	۷	۲/۷۰	S-1	Wang	زنجان
۶۰	۶	۳/۱۰	۶۰	۶	۳/۰۰	S-2		
۵۰	۵	۳/۴۸	۵۰	۵	۳/۳۸	S-3		
۴۰	۴	۳/۹۸	۴۰	۴	۳/۸۶	S-4		
۶۰	۶	۳/۱۱	۶۰	۶	۳/۱۲	S-5		
۷۰	۷	۲/۵۹	۷۰	۷	۲/۵۹	S-6		
۸۰	۸	۲/۴۴	۸۰	۸	۲/۴۹	S-7		
۷۰	۷	۲/۷۱	۷۰	۷	۲/۷۰	S-1	Penzien	
۶۰	۶	۳/۰۱	۶۰	۶	۳/۰۰	S-2		
۵۰	۵	۳/۳۹	۵۰	۵	۳/۳۸	S-3		
۴۰	۴	۳/۸۸	۴۰	۴	۳/۸۶	S-4		
۶۰	۶	۳/۱۲	۶۰	۶	۳/۱۲	S-5		
۷۰	۷	۲/۶۰	۷۰	۷	۲/۵۹	S-6		
۸۰	۸	۲/۵۰	۸۰	۸	۲/۴۹	S-7		