

## تأثیر زلزله بر سازه های زیرزمینی و طراحی نگهداری بر اساس بارهای دینامیکی

کامران عبادی<sup>۱\*</sup>، مهدی امیرافشاری<sup>۲</sup>

۱- عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان  
 ۲- عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب  
 (\*#عهده دار مکاتبات - kamranebadi@gmail.com)

### چکیده

با گسترش جمعیت و پیشرفت جوامع، ایجاد تونل در کلان شهرها ضرورت یافته است. احداث تونل های راه و همچنین مترو کمک شایانی به کاهش ترافیک نموده و تونل های انتقال آب، نیاز کلان شهرها به آب را برطرف ساخته یا در سدها به کار گرفته می شوند. تونل ها نیز مانند هر سازه دیگری تحت تأثیر بارها و تنش های گوناگون قرار دارند. به طور کلی، بارهای وارده بر تونل ها شامل بارهای استاتیکی و دینامیکی می باشد که می بایست در طراحی تونل ها مورد توجه قرار گیرند. در این مقاله وضعیت پایداری تونل انتقال آب جیرفت ارزیابی شده است. ابتدا تنش های اولیه محاسبه شده و سپس بر اساس روابط کرش (Kirsch) تنش های ثانویه ناشی از بارهای استاتیکی در جداره و تاج تونل محاسبه گردیده اند. سپس با استفاده از روش تحلیل لرزه ای بر اساس «تغییر شکل زمین آزاد» کرنش های سطح زمین که از ارتعاشات زلزله احتمالی ناشی می شوند، بدون در نظر گرفتن اندرکنش بین پوشش بتنی تونل و توده سنگ محاسبه شده است. پس از محاسبه کرنش، با استفاده از روش ساده شده «حل شکل های بسته» (Closed form solutions) و روابط وانگ (Wang) و پنزی (Penzien) مقادیر نیروهای ناشی از زلزله، یعنی نیروی محوری و لنگر خمشی وارده به مقطع تونل با در نظر گرفتن اندرکنش پوشش بتنی و توده سنگ اطراف محاسبه شده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که بارهای ناشی از امواج زلزله می تواند پایداری سازه های زیرزمینی، به ویژه تونل ها را تحت تأثیر قرار دهد.

**واژگان کلیدی:** تونل انتقال آب، تغییر شکل زمین آزاد، ارتعاشات زلزله، پوشش بتنی.

### ۱- مقدمه

بررسی وضعیت پایداری تونل ها و سایر سازه های زیرزمینی در اثر ارتعاشات، یکی از مسائل مهمی است که در هنگام طراحی باید به آن دقت ویژه ای شود. صرف نظر از هزینه سنگین ساخت و اجرای تونل ها، چنانچه به مکانیزم های ارتعاشات توجه نشود، در صورت وقوع زلزله تونل ها دستخوش آسیب هایی می شوند که هزینه تعمیرات آنها نسبتاً سنگین خواهد بود. اصولاً ارتعاشات فقط بر اثر زلزله ایجاد نمی شوند، هر چند که زلزله سهم بیشتری در این ارتعاشات را دارا می باشد ولی حرکت قطارها در تونل های مترو و یا حرکت ماشین آلات در سطح زمین یا داخل تونل های راه ارتعاشاتی را به همراه دارد که در صورت عدم در نظر گرفتن آنها خسارت هایی از قبیل نشست سطح زمین را به دنبال خواهیم داشت. این خسارات نه تنها هزینه های سنگینی را به دنبال دارد، بلکه جان افراد را نیز به مخاطره می اندازد.

### ۲- امواج زلزله

انرژی آزاد شده در زلزله، به صورت امواج در زمین پراکنده گردیده و باعث تحریک سازه های دور از کانون زلزله می شود. بررسی این امواج به صورت کلی، امری است بسیار دشوار که در عمل برای سهولت، امواج به یکسری امواج

ساده‌تر تجزیه می‌گردند. امواج زلزله از نوع امواج الاستیک هستند و بر حسب کرنش ایجاد کننده به دو نوع حجمی (مانند امواج فشاری و برشی) و سطحی (مانند امواج لای و ریلی) تقسیم می‌گردند.

### ۳- چگونگی پدیدار شدن امواج الاستیک

همان‌گونه که در بالا نیز به آن اشاره شد، امواج زلزله از نوع امواج الاستیک هستند. چنانچه به نقطه‌ای از یک قطعه سنگ نیرویی اثر کند که این نیرو از حد الاستیک آن سنگ تجاوز ننماید، تغییر شکل بسیار کمی در محل اثر نیرو پدیدار می‌شود که این تغییر به نقطه مجاور منتقل شده و به همین ترتیب به سایر نقاط انتشار می‌یابد. اگر دامنه ارتعاشات (یعنی مقدار لحظه‌ای تغییر مکان ذره در حال ارتعاش از حالت تعادل) برابر  $u$  باشد، بر اساس قانون دوم نیوتن خواهیم داشت:

$$\sum dF = m \frac{d^2u}{dt^2} \quad (1)$$

که در رابطه فوق،  $m$  جرم ذره در حال ارتعاش می‌باشد (دانشجو، ۱۳۷۸).

### ۴- سرعت انتشار و جذب امواج در سنگ‌ها

ماهیت انتشار امواج الاستیک در سنگ‌ها به وسیله مشخصاتی از قبیل: سرعت انتشار امواج، ضریب جذب امواج صوتی، دامنه موج و ضریب بازتاب و شکست امواج در سطح فصل مشترک دو محیط سنگی تعیین می‌شود. سرعت امواج طولی و عرضی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (3)$$

در روابط فوق  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت امواج طولی (اولیه) و امواج عرضی (ثانویه) می‌باشند (بر حسب متر بر ثانیه).  $E$  مدول الاستیسیته،  $\nu$  ضریب پواسون،  $g$  شتاب گرانش زمین و  $\lambda$  ضریب ثابت ماده (ثابت لامه) می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (4)$$

سرعت امواج طولی همواره بیشتر از سرعت امواج عرضی می‌باشد. لازم به ذکر است که میزان این اختلاف به ضریب پواسون سنگ بستگی دارد، یعنی:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (5)$$

این نسبت در سنگ‌های دگرگونی و آذرین بلوری بین  $1/7$  تا  $1/9$  است، در صورتی که برای سنگ‌های رسوبی از  $1/4$  تا  $1/5$  و برای سنگ‌های ضعیف و سست به  $0/5$  می‌رسد. سرعت انتشار امواج سطحی، کمتر از سرعت انتشار امواج حجمی است، به طوری که سرعت انتشار امواج «لای» برابر است با:

لازم به ذکر است که سرعت انتشار امواج الاستیک عملاً بستگی به ارتعاش آن‌ها ندارد. شدت امواج الاستیک (موج حاصل از زلزله) در سنگ‌ها با افزایش فاصله از منبع تولید کاهش می‌یابد و این کاهش ناشی از دو علت می‌باشد: اول جذب بخشی از انرژی الاستیک و تبدیل آن به حرارت به علت اصطکاک بین ذرات ارتعاش کننده و دوم پخش

انرژی صوتی در جهت‌های مختلف به علت ناهمگنی سنگ (وجود خلل و فرج و شکستگی‌ها). دامنه ارتعاش امواج زلزله با افزایش فاصله طبق رابطه زیر کاهش می‌یابد:

$$u = u_0 e^{-\xi \varepsilon} \quad (۶)$$

که در رابطه فوق  $\xi$  ضریب جذب و بر حسب  $\frac{1}{m}$  منظور می‌گردد. مقدار ضریب جذب هم بستگی به خواص سنگ از قبیل خواص الاستیسیته، خواص حرارتی و ضریب اصطکاک داخلی و هم بستگی به فرکانس ارتعاشات دارد. واضح است که هرچه تونل از مرکز زلزله دورتر باشد آسیب وارده به تونل کمتر خواهد بود. افت انرژی در امواج سطحی متناسب با عکس فاصله و در امواج حجمی متناسب با عکس مجذور فاصله می‌باشد (دانشجو، ۱۳۷۸).

## ۵- عوامل ایجاد خسارت

عوامل ایجاد خسارات ناشی از زلزله بر تونل‌ها به سه دسته کلی تقسیم می‌شود:

الف) لغزش گسل

ب) شکست زمین

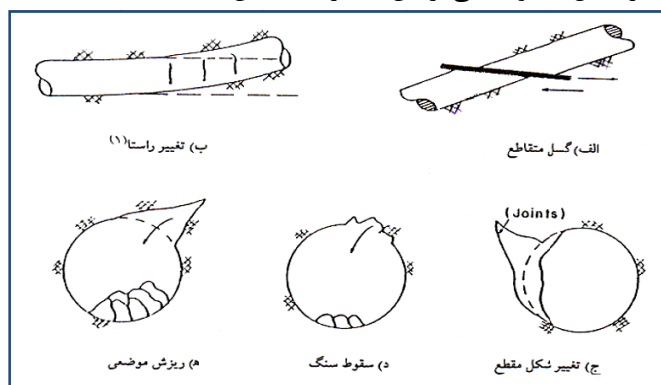
پ) ارتعاشات زمین

### الف- لغزش گسل

در این حالت خرابی زمانی رخ می‌دهد که تونل از منطقه گسلی عبور کند. در چنین وضعیتی، خرابی به ناحیه گسلی محدود شده و خسارت ممکن است از ترک خوردگی جزئی پوشش تونل تا ریزش کامل سقف و دیواره‌های تونل تغییر کند. به این علت که تونل‌ها سازه‌های خطی و طولی هستند بنابراین، در طول مسیر خود ممکن است با گسل‌هایی در تقاطع باشند که این امر موجب افزایش آسیب پذیری تونل‌ها می‌شود. بنابراین می‌بایست ساخت‌گاهی که برای ساخت یک تونل انتخاب می‌شود از لحاظ وجود گسل، نوع گسل، تعداد گسل‌های فعال و همچنین نوع حرکت این گسل‌ها مورد ارزیابی کامل و دقیق قرار گیرد.

### ب- شکست زمین

شکست زمین ممکن است منجر به پدید آمدن لغزش توده سنگ یا خاک، روانگرایی، فرونشست و پدیده‌هایی از این قبیل گردد. شکست زمین با ایجاد ناپیوستگی در سنگ‌ها باعث کاهش مقاومت و چسبندگی در سنگ شده و ریزش و لغزش قطعات سنگ را به همراه دارد. روانگرایی نیز زمانی رخ می‌دهد که تونل در رسوبات سست (حاوی درصد بالایی ماسه و سیلت) حفر شده باشد. این نوع آسیب بیشتر در رابطه با تونل‌های مترو که داخل رسوبات منفصل حفر شده‌اند دیده می‌شود. در شکل ۱ نمونه‌هایی از این خسارات نمایش داده شده است.



شکل ۱: نمونه‌هایی از خسارات ناشی از شکست زمین

### ج- ارتعاشات زمین

ارتعاشات زمین که معمولاً توسط زلزله ایجاد می‌شوند، صدمات سنگینی را به ورودی و خروجی تونل‌ها وارد می‌کنند. پاسخ تونل به ارتعاشات زمین (ناشی از زلزله) به متغیرهایی از قبیل شکل، ابعاد، عمق حفاری و خواص محیط در بر گیرنده تونل وابسته می‌باشد.

به طور کلی عوامل مختلفی در بروز خسارت مؤثر می‌باشند، به گونه‌ای که در بررسی‌های آماری و مطالعات موردی، پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که عموماً در اعماق بیش از ۵۰ متر خسارت خیلی کم و در اعماق بیش از ۳۰۰ متر نباید انتظار خسارت‌های سنگین را داشت. در اعماق کمتر از ۵۰ متر و تونل‌های سطحی احتمال بروز خسارت بسیار زیادتر است. از عوامل مؤثر دیگر فاصله کانون زلزله تا تونل، شتاب زلزله و شدت یا بزرگی زلزله است. زلزله‌های به فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر از تونل خسارت‌های مشخصی را نشان داده‌اند ولی درصد خسارات به نحو محسوسی با افزایش فاصله کاسته می‌شود (دانشجو، ۱۳۷۸). این نتیجه گیری دقیقاً مشابه سازه‌های سطحی می‌باشد. اگر چنانچه تونل فقط با توجه به وزن روباره، فشارهای جانبی و وزن خود سازه طراحی گردد بدیهی است که تحمل بارهای وارده ناشی از ارتعاشات زلزله را نخواهد داشت که این مسئله نیز از عوامل مؤثر در بروز خسارت می‌باشد.

### ۶- تغییر شکل تونل‌ها در اثر ارتعاشات زلزله

تغییر شکل‌های ایجاد شده در تونل‌ها شامل سه نوع محوری، انحنایی و حلقوی می‌باشد. تغییر شکل محوری با کرنش‌های فشاری و کششی همراه بوده و با عبور موج در طول محور تونل، جابجایی انجام می‌گیرد. تغییر شکل‌های انحنایی باعث ایجاد انحناهای مثبت و منفی در امتداد تونل می‌گردند. در انحنای مثبت جدار تونل در قسمت فوقانی دچار فشردگی و در قسمت تحتانی دچار کشیدگی می‌شود. تغییر شکل‌های حلقه‌ای نیز در اثر برخورد امواج به صورت عمودی یا تقریباً عمودی نسبت به محور تونل ایجاد می‌گردند. این حالت تنها زمانی که طول موج لرزه‌ای کمتر از شعاع تونل باشد ایجاد می‌شود (وفائیان، ۱۳۷۶).

تغییر شکل انحنایی را می‌توان این گونه تفسیر کرد: تیری را در نظر بگیرید که تحت خمیدگی خالص قرار گرفته است، اگر چنین تیری را تحلیل نماییم خواهیم دید که قسمت فوقانی تیر دچار فشردگی و قسمت تحتانی تیر دچار کشیدگی می‌شود که اگر بارگذاری ادامه یابد تیر از قسمت تحتانی دچار انفصال و شکست می‌گردد. برخورد امواج ناشی از ارتعاشات زلزله، تنش‌هایی را به همراه دارد که یکی از این تنش‌ها، تنش کششی می‌باشد. از مکانیک سنگ می‌دانیم بوجود آمدن تنش‌های کششی در سنگ باعث کاهش مقاومت برشی در سنگ گردیده و نیز باعث می‌شود که سیستم‌های نگهداری (به خصوص نگهدارنده‌های فعال مثل پیچ سنگ‌ها) دیگر توانایی باربری سنگ را نداشته باشند و در نهایت تونل دچار ریزش گردد. عمدتاً ایمنی سازه‌های زیرزمینی در برابر زلزله بیشتر از سازه‌های سطحی (ساختمان‌ها، سدها، سیلوها، پل‌ها و ...) می‌باشد، زیرا امواج زلزله در سطح زمین اثر مخرب تری را روی سازه‌ها ایجاد می‌کنند، ولی با این وجود همان گونه که در قسمت قبل نیز بدان اشاره شد، تونل‌ها از خطر ارتعاشات زلزله مصون نیستند و می‌بایست نسبت به این ارتعاشات مورد ارزیابی قرار گیرند.

### ۷- تحلیل ارتعاشات ناشی از زلزله احتمالی - تونل انتقال آب جیرفت

در این مقاله وضعیت پایداری تونل انتقال آب جیرفت ارزیابی شده است. ابتدا تنش‌های اولیه محاسبه شده و سپس بر اساس روابط کِرش (Kirsch) تنش‌های ثانویه ناشی از بارهای استاتیکی در جداره و تاج تونل محاسبه گردیده‌اند. سپس با استفاده از روش تحلیل لرزه‌ای بر اساس «تغییر شکل زمین آزاد» (Free-field deformation) کرنش‌های سطح زمین که از ارتعاشات زلزله احتمالی ناشی می‌شوند، بدون در نظر گرفتن اندرکنش بین پوشش بتنی تونل و توده سنگ محاسبه شده است. پس از محاسبه کرنش، با استفاده از روش ساده شده «حل شکل‌های بسته»

(Closed form solutions) و روابط وانگ (Wang) و پنزی (Penzien) مقادیر نیروهای ناشی از زلزله، یعنی نیروی محوری و لنگر خمشی وارده به مقطع تونل با در نظر گرفتن اندرکنش پوشش بتنی و توده سنگ اطراف محاسبه شده است.

### الف- مشخصات فنی تونل انتقال آب جیرفت و توده سنگ

تونل انتقال آب جیرفت در عمق ۸۰ متری از سطح زمین مستقر گردیده، شعاع حفاری تونل ۲/۳ متر و شعاع پوشش بتنی (lining) ۲ متر می باشد. وزن مخصوص توده سنگ ناحیه ۰/۰۲۷ مگانیوتن بر مترمکعب، نسبت پواسون توده سنگ ۰/۳ و نسبت پواسون بتن مصرفی در تونل ۰/۲ می باشد. مدول الاستیسیته سنگ  $0.1 \times 10^5$  مگاپاسکال و بتن  $0.2 \times 10^5$  مگاپاسکال می باشد (طاهری و یزدان ستا، ۱۳۸۷).

### ب- محاسبه تنش های اولیه و ثانویه

تنش های اولیه قبل از احداث تونل و تنش های ثانویه بعد از احداث تونل محاسبه شده اند. تنش های ثانویه مماسی، شعاعی و برشی در جداره و تاج تونل مورد محاسبه قرار گرفته اند. روابط در قسمت ذیل تعریف شده و نتیجه محاسبات در جداول ۱ و ۲ نمایش داده شده اند.

- روابط تنش های اولیه:

$$\sigma_V = \gamma \cdot h \quad (7)$$

$$k = 0.25 + 7E(0.001 + \frac{1}{h}) \quad (8)$$

$$\sigma_H = k \cdot \sigma_V \quad (9)$$

جدول ۱: محاسبه تنش های اولیه

تنش قائم (مگاپاسکال)	K	تنش افقی (مگاپاسکال)
۲/۱۶	۰/۳۴	۰/۷۴

در روابط فوق:  $\sigma_V$  تنش قائم بر حسب مگاپاسکال،  $\gamma$  وزن مخصوص توده سنگ بر حسب مگانیوتن بر مترمکعب،  $h$  عمق نقطه مورد نظر از سطح زمین بر حسب متر،  $k$  ضریب تناسب بین تنش افقی و تنش قائم بدون واحد (رابطه Sheary)،  $E$  مدول الاستیسیته توده سنگ بر حسب گیگاپاسکال و  $\sigma_H$  تنش افقی بر حسب مگاپاسکال.  
- روابط تنش های ثانویه (Kirsch):

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_V}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_H - \sigma_V}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_H + \sigma_V}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_V}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (11)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_V - \sigma_H}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (12)$$

در روابط فوق:  $\sigma_r$  تنش ثانویه شعاعی،  $\sigma_\theta$  تنش ثانویه مماسی و  $\tau_{r\theta}$  تنش ثانویه برشی همگی بر حسب مگاپاسکال.  $a$  بزرگترین شعاع تونل بر حسب متر،  $r$  فاصله نقطه مورد نظر تا مرکز تونل و  $\theta$  زاویه نقطه مورد نظر از خط افق در خلاف جهت حرکت عقربه های ساعت بر حسب درجه.

جدول ۲: محاسبه تنش‌های ثانویه

تنش‌ها (مگاپاسکال)			محل محاسبه
برشی	مماسی	شعاعی	
صفر	۵/۷۴	صفر	جداره تونل
صفر	۰/۰۶	صفر	تاج تونل

### ج- تحلیل لرزه‌ای تونل

کرنش‌های سطح زمین که از بروز زلزله احتمالی ایجاد می‌شوند ابتدا توسط «تغییر شکل زمین آزاد»، یعنی بدون در نظر گرفتن اندرکنش بین پوشش بتنی و توده سنگ اطراف، مورد محاسبه قرار می‌گیرند. پس از محاسبه کرنش توسط روش ساده شده «حل شکل‌های بسته» و روابط وانگ و پنزین این بار با در نظر گرفتن اندرکنش پوشش بتنی و توده سنگ اطراف در دو شرایط لغزش کامل و بدون لغزش نیروی محوری و لنگر خمشی وارد بر مقطع تونل مورد ارزیابی واقع می‌شود. اندرکنش بین پوشش بتنی و توده سنگ توسط دو نسبت تراکم پذیری و انعطاف پذیری در محاسبات اعمال می‌شود. لغزش کامل در شرایطی رخ می‌دهد که سازه تونل از صلبیت بالایی نسبت به توده اطراف خود برخوردار بوده و در یک محیط نرم مدفون باشد و یا اینکه شدت زلزله بسیار بالا باشد (وفائیان، ۱۳۷۶ و عباسی و رحمان‌نژاد، ۱۳۸۵).

برای محاسبه کرنش محوری تونل از رابطه ساده شده نیومارک استفاده خواهد شد:

$$\varepsilon^{ab} = \pm \frac{V_s}{C_s} \sin \varphi \cos \varphi \pm \frac{a_s r}{C_s^2} \cos^3 \varphi \quad (13)$$

در رابطه فوق:  $\varepsilon^{ab}$  کرنش محوری تونل،  $V_s$  حداکثر سرعت امواج برشی بر حسب متر بر ثانیه،  $C_s$  سرعت مؤثر انتشار امواج برشی بر حسب متر بر ثانیه،  $\varphi$  زاویه انتشار امواج برشی بر حسب درجه،  $a_s$  حداکثر شتاب امواج برشی بر حسب متر بر مجذور ثانیه و  $r$  شعاع تونل بر حسب متر.

### د- روابط مورد استفاده در تحلیل لرزه‌ای

- روابط پنزین در شرایط لغزش کامل:

$$\alpha^n = \frac{12E_1 I (5-6\nu_m)}{d^3 G_m (1-\nu_f^2)} \quad (14)$$

$$R^n = \frac{4(1-\nu_m)}{\alpha^n + 1} \quad (15)$$

$$\gamma_{\max} = \frac{V_s}{C_s} \quad (16)$$

$$\Delta d_{\text{lining}}^n = R^n \frac{\gamma_{\max} d}{2} \quad (17)$$

$$T(\theta) = \frac{12E_1 I \Delta d_{\text{lining}}^n}{d^3 (1-\nu_f^2)} \cos^2 \left( \theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (18)$$

$$M(\theta) = \frac{6E_1 I \Delta d_{\text{lining}}^n}{d^2 (1-\nu_f^2)} \cos^2 \left( \theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (19)$$

- روابط پنزین در شرایط بدون لغزش:

$$\alpha = \frac{24E_1I(3-4\nu_m)}{d^3G_m(1-\nu_1^2)} \quad (20)$$

$$R = \frac{4(1-\nu_m)}{\alpha+1} \quad (21)$$

$$\Delta d_{\text{lining}} = R \frac{\gamma_{\text{max}}d}{2} \quad (22)$$

$$T(\theta) = \frac{24E_1I\Delta d_{\text{lining}}}{d^3(1-\nu_1^2)} \cos^2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (23)$$

$$M(\theta) = \frac{6E_1I\Delta d_{\text{lining}}}{d^2(1-\nu_1^2)} \cos^2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (24)$$

در روابط (۱۴) تا (۲۴):  $\alpha^n$  ضریب استفاده شده در محاسبات پوشش بتنی - توده سنگ نسبت به تونل فقط تحت بارگذاری نرمال،  $E_1$  مدول الاستیسیته بتن برحسب کیلوپاسکال،  $I$  ممان اینرسی پوشش بتنی نسبت به واحد عرض،  $\nu_m$  نسبت پواسون توده سنگ،  $\nu_1$  نسبت پواسون بتن،  $d$  قطر پوشش بتنی برحسب متر (منظور ضخامت بتن نمی باشد)،  $G_m$  مدول برشی توده سنگ برحسب کیلوپاسکال،  $\gamma_{\text{max}}$  حداکثر کرنش برشی خاک یا سنگ،  $\Delta d_{\text{lining}}^n$  تغییر شکل قطری تونل فقط تحت تأثیر بارگذاری نرمال،  $T(\theta)$  نیروی محوری وارد به مقطع تونل برحسب کیلو نیوتن تحت زاویه مدنظر و  $M(\theta)$  لنگر خمشی وارد به مقطع تونل برحسب کیلو نیوتن- متر تحت زاویه مد نظر (عباسی، رحمان نژاد، ۱۳۸۵).

- روابط وانگ در شرایط لغزش کامل:

$$C = \frac{E_m(1-\nu_1^2)r}{E_1t(1+\nu_m)(1-2\nu_m)} \quad (25)$$

$$F = \frac{E_m(1-\nu_1^2)r^3}{6E_1I(1+\nu_m)} \quad (26)$$

$$k_1 = \frac{12(1-\nu_m)}{2F+5-6\nu_m} \quad (27)$$

$$T_{\text{max}} = \frac{1}{6}k_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} r\gamma_{\text{max}} \quad (28)$$

$$M_{\text{max}} = \frac{1}{6}k_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} r^2\gamma_{\text{max}} \quad (29)$$

- روابط وانگ در شرایط بدون لغزش:

$$K_2 = 1 + \frac{F[(1-2\nu_m)-(1-2\nu_m)C] - \frac{1}{2}(1-2\nu_m)^2 + 2}{F[(3-2\nu_m)+(1-2\nu_m)C] + C\left[\frac{5}{2}-8\nu_m+6\nu_m^2\right] + 6-8\nu_m} \quad (30)$$

$$T_{\text{max}} = K_2 \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} r\gamma_{\text{max}} \quad (31)$$

در روابط (۲۵) تا (۳۱)؛ C نسبت تراکم پذیری،  $\Gamma$  شعاع پوشش بتنی بر حسب متر،  $t$  ضخامت پوشش بتنی بر حسب متر، F نسبت انعطاف پذیری،  $k_1$  ضریب واکنش پوشش بتنی در شرایط لغزش کامل،  $K_2$  ضریب واکنش پوشش بتنی در شرایط بدون لغزش،  $T_{max}$  حداکثر نیروی محوری وارد به مقطع تونل بر حسب کیلو نیوتن و  $M_{max}$  حداکثر لنگر خمشی وارد به مقطع تونل بر حسب کیلو نیوتن-متر. سایر پارامترها قبلا تعریف شده‌اند (عباسی و رحمان نژاد، ۱۳۸۵).

#### ۵- پارامترهای لحاظ شده در محاسبات تحلیل لرزه‌ای تونل

در تحلیل لرزه‌ای تونل انتقال آب جیرفت شدت زلزله  $7/5Mw$ ، فاصله از مرکز زلزله ۱۵ کیلومتر، نسبت حداکثر سرعت ذرات زمین (سانتیمتر بر ثانیه) به حداکثر شتاب ذرات (g) زمین با توجه به شدت و فاصله زلزله ۰.۹۷، حداکثر شتاب امواج برشی  $\frac{m}{s^2}$   $44/3$ ، زاویه انتشار امواج ۲۵ درجه، کرنش طولی تونل از رابطه نیومارک  $0/0003$  در نظر گرفته شده‌اند.

$$V_s = \left( \frac{97}{9.81} \right) \times 3.44 = 34 \frac{cm}{s} = 0.34 \frac{m}{s}$$

#### ۸- نتایج تحلیل لرزه‌ای تونل

جدول ۳: نتایج تحلیل لرزه‌ای

بدون لغزش				لغزش کامل			
پنزین		وانگ		پنزین		وانگ	
لنگر خمشی (KN.m)	نیروی محوری (KN)	لنگر خمشی (KN.m)	نیروی محوری (KN)	لنگر خمشی (KN.m)	نیروی محوری (KN)	لنگر خمشی (KN.m)	نیروی محوری (KN)
۸۵/۲	۸۴/۲	۸۵/۲	۷۱۴	۸۵/۱	۴۲/۶	۸۵/۲	۶/۴۲

#### ۹- نتیجه گیری

همان‌گونه که از نتایج جدول ۳ واضح است، مقادیر نیروهای محوری و لنگر خمشی ناشی از ارتعاشات زلزله در روابط وانگ و پنزین در شرایط لغزش کامل یکسان هستند، همچنین مقادیر لنگر خمشی بدست آمده از روابط وانگ و پنزین در شرایط بدون لغزش یکسان می‌باشند، اما مقدار نیروی محوری بدست آمده از رابطه وانگ در شرایط بدون لغزش (۷۱۴ کیلو نیوتن) است که بسیار بیشتر از پاسخ رابطه پنزین (۸۴/۲ کیلو نیوتن) می‌باشد که علت این تفاوت در نظر گرفتن نسبت تراکم پذیری و انعطاف پذیری در روابط وانگ است. نسبت انعطاف پذیری نمایانگر توانایی پوشش بتنی در برابر ارتعاش حاصل از زلزله می‌باشد، در حقیقت میزان نسبی سختی تونل نسبت به محیط اطراف خود توسط نسبت‌های تراکم پذیری (C) و انعطاف‌پذیری (F) در روابط گنجانده شده‌است. هرچه نسبت انعطاف‌پذیری کمتر باشد، میزان انحراف و شکست در تونل بالا رفته و این امکان وجود دارد که تغییر شکل حاصل از شکست تونل تا سطح زمین ادامه یابد. در کل می‌توان این نتیجه را گرفت که پوشش بتنی تونل در مقاوم‌سازی سازه در برابر ارتعاشات زلزله بسیار مهم بوده و این مسئله به خوبی از روابط و محاسبات مشخص است.



### ۱۰- سپاسگزاری

این پژوهش مستخرج از طرح پژوهشی " تاثیر زلزله بر سازه های زیرزمینی و طراحی نگهداری بر اساس بارهای دینامیکی " می باشد که با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان انجام شده است، لذا بدینوسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان تقدیر و تشکر به عمل می آید.

### ۱۱- منابع

۱. دانشجو، ف.، ۱۳۷۸، مهندسی زلزله و آنالیز ریسک. انتشارات دانش فردا.
۲. وفائیان، م.، ۱۳۷۶، خواص مهندسی سنگها، تئوریها و کاربردهای اجرایی، نشر ارکان اصفهان، اصفهان، ۳۵۶-۳۵۵.
۳. طاهری، م. و یزدانستا، ج.، ۱۳۸۷، تحلیل لرزه ای تونل های زیرزمینی با مقطع دایره، دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه های برقابی.
۴. عباسی، س. و رحمان نژاد، ر.، ۱۳۸۵، ارائه نرم افزاری جهت محاسبه تونل های دایروی شکل، پنجمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، ۳۹۷.
5. Youssef, M.A. Hashash,; Jeffrey, J.Hook.; Birger Schmidt.; John I-chiang Yao, 2001, "Seismic Design and Analysis of Underground Structures", Tunneling and Underground Space Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, San Francisco, Ca, USA.