

## بررسی رفتار تونلها در برابر زلزله

محبوبه میرزایی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله / ساسان عشقی، استادیار پژوهشکده مهندسی سازه /

اکبر واتقی، استادیار پژوهشکده مهندسی سازه پژوهشگاه

### ۱- چکیده

مدرن را تشکیل می دهند و جزء شریانهای حیاتی مهم هر کشور محسوب می شوند. این سازه‌ها در موارد بسیاری مانند زیرگذرها، متروها، تونل‌های انتقال آب و موارد مشابه کاربرد وسیعی دارند. تونلها باید در برابر بارهای وارده مقاومت کافی داشته، بتوانند بعد از وقوع زلزله قابل بهره‌برداری باشند. از این رو، ایمنی آنها، بویژه به هنگام وقوع زلزله امری لازم و حیاتی است.

تونلها به عنوان گروهی از سازه‌های زیرزمینی مشخصات منحصر به فردی دارند که رفتار آنها را از اکثر سازه‌های روزمینی متمایز می کند. این مشخصات عبارتند از:

- به طور کامل در سنگ یا خاک مدفون می باشند.

- عموماً طول زیادی دارند.

در حقیقت تونلها سازه‌های خطی هستند، که طول آنها بسیار بزرگتر از ابعاد مقطع آنها می باشد. دو مورد از متداولترین تونلها از لحاظ اجرا عبارتند از:

۱- تونل‌های حفر شده (Bored or Mined Tunnel): با توجه

به توسعه فنآوری، عموماً حفاریها در این روش توسط ماشین‌های حفاری تونل (Tunnel Boring Machine)

زلزله‌خیزی کشور ایران و نیاز به گسترش و حفظ شبکه‌های راه در مناطق کوهستانی آن و لزوم احداث تونل‌های شهری (برای تردد وسائل نقلیه و یا مترو)، تحقیق بر روی رفتار لرزه‌ای تونلها را ضروری می سازد. بدین منظور، در این مقاله بر اساس ادبیات فنی موجود، ابتدا رفتار تونلها تحت اثر زلزله بررسی شده است. سپس، عوامل مؤثر در آسیب پذیری لرزه‌ای تونلها معرفی و طبقه‌بندی گردیده‌اند.

با توجه به اینکه تونلها مشخصات منحصر به فردی دارند که رفتار آنها را از اکثر سازه‌های روزمینی متمایز می کند و با عنایت به لزوم ایمنی آنها، بویژه به هنگام وقوع زلزله روشهای محاسبه پاسخ لرزه‌ای آنها، مزایا و محدودیتهای هر یک از روشهای مذکور نیز در این مقاله ارائه گردیده است.

**کلید واژه‌ها:** اثر زمین لرزه بر تونلها، رفتار لرزه‌ای تونلها، روشهای تحلیل لرزه‌ای تونلها

### ۲- مقدمه

امروزه تونلها، بخش عمده‌ای از سازه‌های زیربنایی شهرهای

### ۳- رفتار لرزه‌ای تونل‌ها در زلزله‌های اخیر در جهان

آسیب‌های ناشی از زلزله‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد:

۱- آسیب‌های ناشی از گسیختگی زمین (روانگرایی، ناپایداری

شیب، گسلش، جابه‌جایی گسل)؛

۲- آسیب‌های ناشی از تکان زمین.

آسیب‌های ناشی از تکان زمین، به ارتعاشات تولید شده

توسط عبور امواج لرزه‌ای از پوسته زمین مربوط می‌شود و معمولاً

شدت تکان با فاصله از منطقه گسیختگی کاهش می‌یابد.

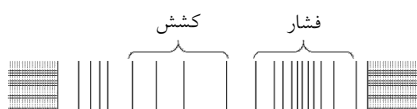
پاسخ سازه‌های زیرزمینی به امواج لرزه‌ای، در قالب سه نوع

تغییر مکان بیان می‌گردد (شکل ۲):

۱- کشش، فشار محوری و خمش طولی؛

۲- تغییر شکل بیضوی (تونل‌های مدور)؛

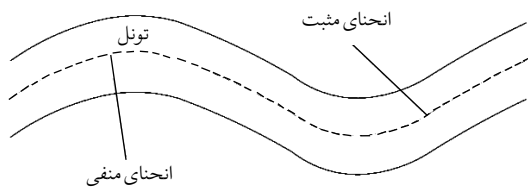
۳- تغییر شکل دورانی یا گهواره‌ای (تونل‌های مستطیلی).



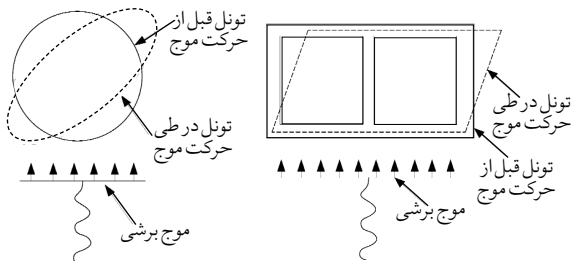
تونل



کشش و فشار محوری



خمش طولی



تغییر شکل دورانی یا گهواره‌ای تونل مستطیلی

تغییر شکل بیضوی تونل مدور

شکل (۲): اشکال مختلف تغییر مکان تونل بر اثر بارهای لرزه‌ای [۱]

صورت می‌گیرد. این ماشین‌ها به طور کلی قادر به حفاری مقاطع

مدور می‌باشند؛ اما در این روش می‌توان از مقاطع دیگری مانند

مستطیلی، نعل اسبی یا دیگر اشکال استفاده کرد. این روش در

دو حالت زیر اجرا می‌شود (شکل ۱، الف):

- عمق حفاری تونل زیاد و خاکبرداری برای رسیدن به

عمق مورد نظر ضروری باشد.

- در مسیر اجرای تونل، سازه‌های زیادی روی زمین وجود

داشته باشد.

۲- تونل‌های کند و پوش (Cut and Cover Tunnels): در

این روش ابتدا حفاری در محل انجام می‌شود، سپس سازه‌که

در محل دیگری ساخته شده است، در داخل گود حفاری شده

قرار می‌گیرد و سرانجام روی سازه با خاک پوشانده می‌شود. این

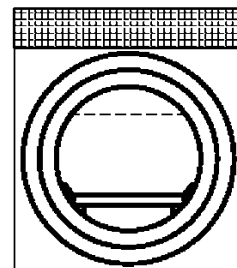
روش، معمولاً برای تونل‌های با مقطع مستطیلی به کار می‌رود و

مورد استفاده آن صرفاً در مواردی است که عمق حفاری کم بوده

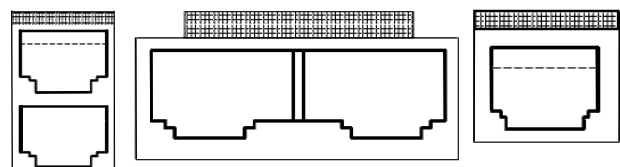
و سربار وارده بر سازه حداکثر ۱۵ متر باشد. به عنوان مثال،

می‌توان به ایستگاه‌های زیرزمینی، سازه‌های ورودی به سازه‌های

زیرزمینی و بزرگراه‌ها اشاره نمود (شکل ۱، ب).



الف: تونل حفر شده مدور



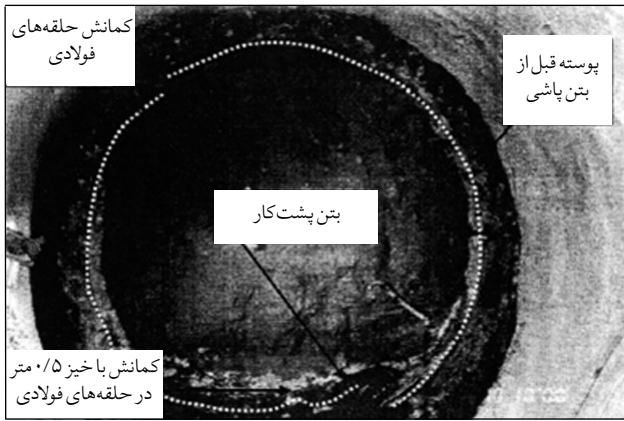
تونل کند و پوش  
نوع ۳

تونل کند و پوش نوع ۲

تونل کند و پوش نوع ۱

ب: تونل‌های کند و پوش

شکل (۱): انواع مقاطع تونلها [۱]



تصویر (۱): آسیب وارده به لوله های آلامد [۱]

### ۳-۲- زلزله ۱۹۹۴ نورتریج - ایالات متحده

متروی لوس آنجلس در چندین مرحله ساخته شده که بعضی از آنها در حین زلزله سال ۱۹۹۴ نورتریج (Northridge) در حال بهره برداری بودند. پوشش بتنی تونل های حفر شده بعد از زلزله سالم باقی ماندند؛ در حالی که لوله های آب، پلهای بزرگراهها و ساختمانها آسیب دیدند؛ اما زلزله به سیستم مترو هیچ آسیبی نرسانده بود.

### ۳-۳- زلزله ۱۹۹۵ کوبه- ژاپن

زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه- ژاپن باعث فروریزیهای عمده در ایستگاه زیرزمینی دایکای در کوبه گردید [۳]. این ایستگاه در سال ۱۹۶۲ ساخته شده و در طرح آن ملاحظات خاص لرزه ای در نظر گرفته نشده بود. خرابی ایجاد شده در ستونهای مرکزی ایستگاه در شکل (۳) نشان داده شده است که این امر همراه با خرابی دال سقف و نشست خاک روی آن در حدود ۲/۵ متر بوده است.

در حین زلزله، دیوارهای عرضی در قسمت انتهایی ایستگاه و در جاهایی که عرض ایستگاه عوض شده بود، همانند دیوار برشی عمل کردند. به همین دلیل در این نواحی، دیوارها متحمل ترکهای قابل توجه و ستونهای داخلی دچار خسارات زیادی در طول حرکات افقی شدند [۴].

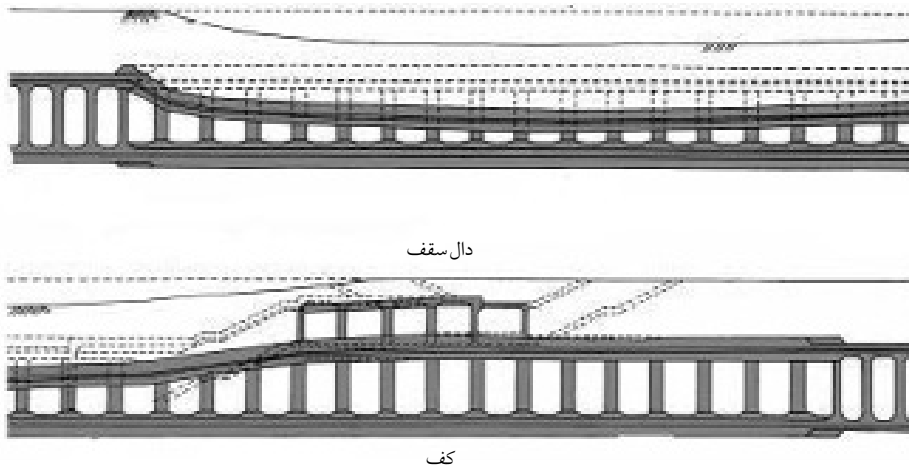
در مناطقی که دیوار عرضی وجود نداشت، ستونها متحمل

تغییر شکل محوری یا خمشی زمانی ایجاد می شود که امواج زلزله به موازات محور تونل به آن برخورد کنند؛ اما تغییر شکل بیضوی و گهواره ای زمانی اتفاق می افتد که امتداد انتشار موج و امتداد تونل بر هم عمود باشند [۲]. در زلزله های سده بیستم تونلهای متعددی آسیب دیده اند که فقط به ذکر رفتار لرزه ای در تعدادی از زلزله های بیست ساله اخیر جهان در قسمتهای بعد اشاره شده است.

### ۳-۱- زلزله ۱۹۸۹ لوماپریتا - ایالات متحده

سیستم بارت (Bay Area Rapid Transit) سیستم حمل و نقل ریلی در منطقه Bay از خلیج سانفرانسیسکو می باشد که برای زلزله طراحی و اجرا شده است. این سیستم از اولین سازه های زیرزمینی بود که در سال ۱۹۶۹ توسط کاوزل (Kuesel) برای مقابله با اثرهای زلزله طراحی گردید. در زلزله ۱۹۸۹ لوماپریتا، تأسیسات بارت هیچ آسیبی را متحمل نشدند و ۲۴ ساعت بعد از زلزله، خدمت رسانی را از سر گرفتند. این موضوع بیانگر این مطلب است که این سیستم در مقابل نیروهای زلزله بخوبی طراحی شده بود. در این سیستم، درزهای لرزه ای خاصی به منظور تحمل جابه جاییهای نامساوی در برجهای تهویه طراحی شده بود که بسیار خوب عمل کردند [۱].

لوله های آلامد نیز یک زوج تونلهای لوله ای مستغرق هستند که جزیره آلامد را به اوکلند در ناحیه خلیج سانفرانسیسکو متصل می کنند. این تونلها جزء گروهی از تونلهای مستغرق اولیه بودند که ملاحظات طراحی لرزه ای در آنها انجام نشده بود. در طول زلزله لوماپریتا، برجهای تهویه دچار ترکهای سازه ای شدند و مقداری محدود هم نشست آب به داخل تونل مشاهده شد. علاوه بر آن، در لایه های سست فوقانی تونل هم، روانگرایی مشاهده شد (تصویر ۱).



شکل (۳): نحوه ایجاد خرابی در ایستگاه زیرزمینی دایکای در زلزله ۱۹۹۵ کوبه، ژاپن [۳]

تونل از روش کند و پوش استفاده شده بود. در این روش، برای حفاری گودال و پایداری دیوار حفاری شده از سپرهای فولادی استفاده می شود. به دلیل وجود این سپرهای فولادی، فاصله کمی بین دیوار سپری و مقطع جداره تونل به وجود می آید. در نتیجه، تراکم خاکریز بسیار مشکل و حتی ناممکن می شود. به همین دلیل، فشار خاک اطراف به طور کامل بر روی سازه تونل وارد شده و رفتار این مقطع مثل یک سازه آزاد بوده که فشارهای خاک اطراف قادر به ایجاد تکیه گاههای خارجی برای آن نبوده اند و نتوانسته اند تغییرشکلهای تونل را مهار کنند. البته لازم به ذکر است که فرضیه تأثیر فشار خاک اطراف بر روی کنترل تغییرشکل تونلها اثبات نشده است.

### ۳-۴ - زلزله ۱۹۹۹ چی چی تایوان

زلزله چی چی به بزرگای  $M=7.3$  در سال ۱۹۹۹ در مرکز تایوان رخ داد. در این منطقه، تونلهای با مقطع نعل اسبی احداث شده بود که در سنگ قرار داشتند. بر اثر زلزله مذکور، اکثر تونلها دچار خرابی قابل ملاحظه ای نشدند. بیشترین صدمه به سازه های ورودی تونلها وارد شده بود که آن هم به دلیل ناپایداری شبیهها بوده است (تصویر ۲).

خرابیهای قابل توجهی شدند و این امر موجب به وجود آمدن ترکهایی به عرض ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلیمتر در جهت طولی در دال های سقف شد. لازم به ذکر است جداشدگی قابل توجهی در بعضی درزهای انقطاع و ترکهای جزئی در دال کف به وجود آمد و مقداری هم نشت آب به داخل تونل مشاهده شد.

در مورد خاک روی سازه هم این نظریه وجود دارد که این خاک می تواند در میزان خرابی مؤثر باشد؛ زیرا نیروی اینرسی مقطع را افزایش می دهد.

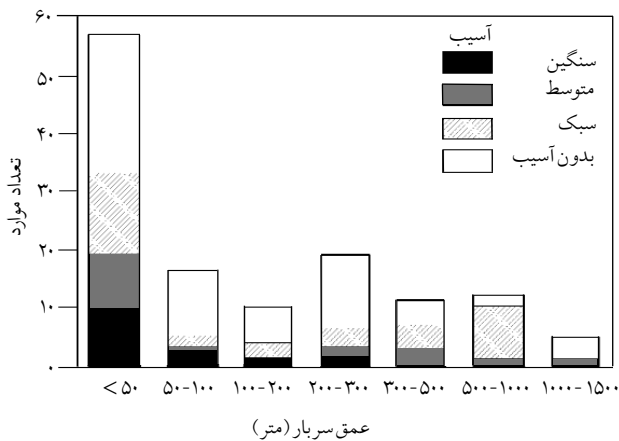
شرکت EQE در سال ۱۹۹۵ [۱] بر پایه مطالعات انجام شده در ایستگاه دایکای کوبه اعلام کرد که تغییر شکل دال کف در این محل باروشهای زیر می توانست محدود شود:

۱- دیافراگم های تکیه گاهی توسط دیوارهای کناری حمایت شوند.

۲- فشار خاک اطراف تونل به دیواره های می توانست مانع از خرابی دال کف شود؛ زیرا این فشار می تواند به عنوان نیروی مقاوم در برابر تغییر شکل مقطع عمل کند.

البته در سازه مذکور، این دو مورد کاربرد نداشته اند؛ زیرا عملکرد دیافراگمی کف بویژه در طول تونل، از آنچه که پیش بینی می شد کمتر بود. علاوه بر آن، در هنگام ساخت

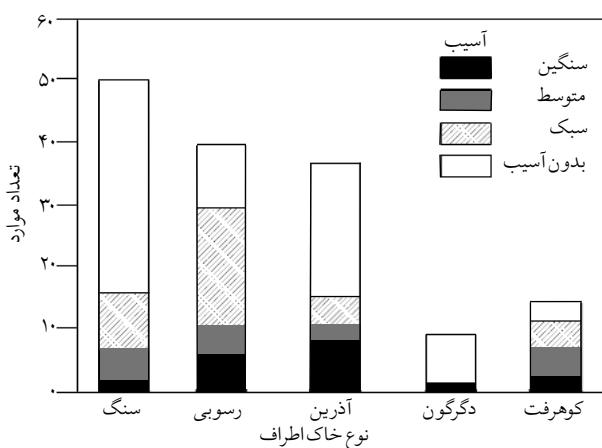
تونلهای کم عمق در خلال زلزله امن تر هستند [۶]. اثرهای عمق مصالح سر بار در شکل (۴) نشان داده شده است. آسیبهای وارد بر تونلها، با افزایش عمق سر بار کاهش می یابد [۷].



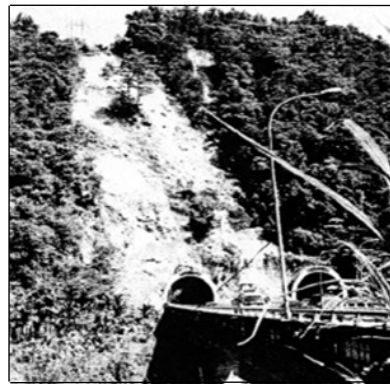
شکل (۴): اثرهای عمق دفن [۸]

#### ۴-۲- نوع سنگ (خاک)

بر طبق مطالعات ونگ، با افزایش مقاومت خاک یا سنگ، آسیب وارده به تونلها تحت تأثیر زلزله کمتر می شود [۸]. توزیع آسیب به عنوان تابعی از نوع مواد اطراف باز شوهای زیر زمینی در شکل (۵)، نشان داده شده است. در این شکل، اطلاعاتی که مشخصه سنگ دارند، برای همه معادن عمیقی که شرایط محیطی آن مشخص نیست استفاده می شود. همچنین لازم به ذکر است که اطلاعات موجود، آسیب بیشتری را برای تأسیسات زیر زمینی ساخته شده در خاک نسبت به سنگ نشان می دهند.



شکل (۵): اثرهای نوع خاک اطراف تونل [۸]



تصویر (۲): گسیختگی شیب در ورودی تونل، زلزله چی چی تایوان [۱]

#### ۳-۵- زلزله ۱۹۹۹ دوزجه (ترکیه)

تونلهای دوقلوی بولو (Bolu) بخشی از یک پروژه ۱/۵ میلیارد دلاری هستند که هدف آنها توسعه حمل و نقل در کوههای غرب بولو بین استانبول و آنکارا بوده است. این تونلها با استفاده از روش جدید اجرای تونل استرالیایی (New Austrian Tunnelling Method) اجرا شده اند. در این روش، فرایینی (Monitoring) مداوم همگرایی جداره اولیه انجام شد و سپس اجزای تکیه گاهی به منظور دستیابی به یک سیستم پایدار بنا شدند. در زلزله ۱۲ نوامبر ۱۹۹۹ هر دو تونل در ۳۰۰ متری سمت دهانه شرقی خود تخریب شدند. در زمان زلزله، ۸۰۰ متر از مقطع تونل حفاری شده بود و ۳۰۰ متر از مقطع، تنها با بتن غیر مسلح پوشانده شده بود. به عبارت دیگر، مقطعی که بوسیله شاتکریت و بولت های مهاری، پوشش و محافظت شده بود، بر اثر زلزله تخریب نشد [۵].

#### ۴- عوامل مؤثر در آسیب پذیری لرزه ای تونلها

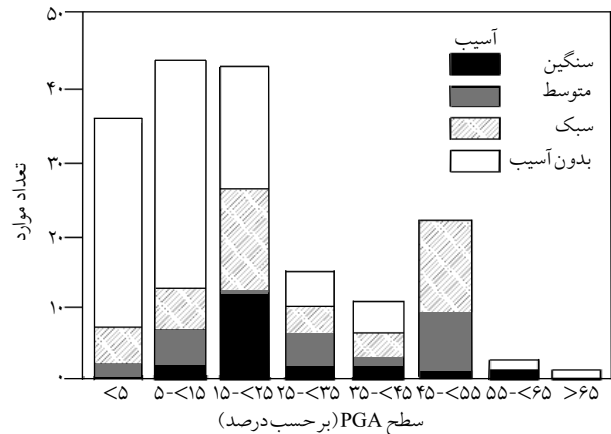
آسیب پذیری لرزه ای تونلها را می توان به شش عامل عمق مصالح سر بار، نوع سنگ (خاک)، بیشینه شتاب زمین، بزرگای زلزله، فاصله مرکز زلزله با تونل و نوع پوشش نسبت داد.

#### ۴-۱- عمق مصالح سر بار

طبق مطالعات داودینگ و رزن (۱۹۷۸)، تونلهای عمیق از

#### ۴-۳- اثرهای مقادیر شتاب بیشینه زمین

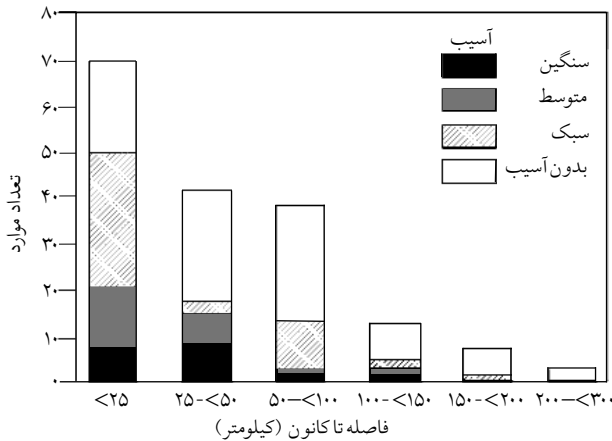
بر پایه مطالعات داودینگ و ژن [۶] هیچ آسیبی در تونلهای پوشش دار و بدون پوشش تا شتاب  $0.19 \text{ g}$  ملاحظه نگردید. آسیبهای کم، شامل ترک در آجر یا بتن یا سقوط سنگهای سست در تعدادی از موارد بین شتاب  $0.25 \text{ g}$  تا  $0.4 \text{ g}$  ملاحظه شد. بر اثر جنبش زمین تا شتاب  $0.5 \text{ g}$  هیچ واژگونی، ملاحظه نشد. ارتباط بین شتاب بیشینه زمین (PGA) و تعداد موارد آسیب دیده در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): میزان تأثیر مقادیر بیشینه شتاب زمین بر تونلها [۸]

#### ۴-۵- فاصله کانونی

بر طبق تحقیقات ونگ [۸]، با افزایش فاصله تا مرکز زمین لرزه، شدت تکانها کاهش می یابد. این مسأله، به کاهش آسیبهای منجر می شود. توزیع آسیب با فاصله کانونی در شکل (۸) نشان داده شده است. این شکل میبین آن است که آسیبهای با کاهش فاصله کانونی، افزایش می یابند و تونلها هنگامی که در فاصله ۲۵ تا ۵۰ کیلومتری از کانون زلزله واقع می شوند، آسیب پذیرتر هستند.



شکل (۸): تأثیر زلزله بر تونلها بر حسب فاصله آنها تا مرکز زلزلهها [۸]

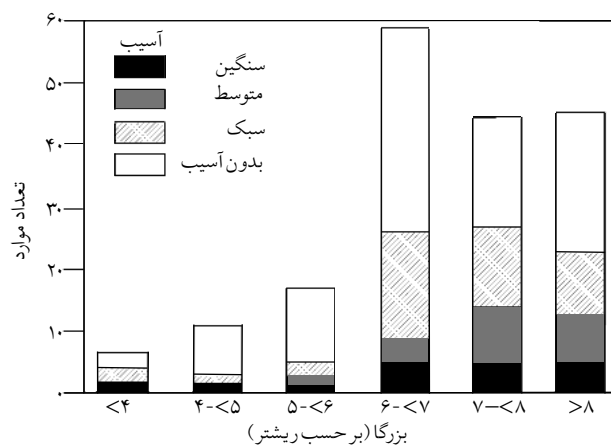
#### ۴-۶- نوع پوشش تونل

اثر نوع پوشش تونل در شکل (۹)، نشان داده شده است. اطلاعات آماری نشان داده شده در شکل مذکور، میبین آن است که نسبت موارد آسیب دیده تونلهای پوشش دار بتنی مسلح از موارد تونلهای بدون پوشش، کمتر است. شارما و جاد [۹] دلیل آن را به شرایط ضعیف زمین و نیاز ابتدایی آنها به پوشش نسبت دادند. ریچاردسون و بلجواز در سال ۱۹۹۲ [۸] دو نکته دیگر را پیشنهاد کردند:

- آسیب به صورت ترک یا فلوله کن شدن در بتن، در تونلهای پوشش دار، نسبت به تونلهای بدون پوشش بیشتر است.
- احتمال بیشتری وجود دارد که تونلهای روکش دار، به عنوان آسیب دیده طبقه بندی شوند که به دلیل هزینه زیاد اجرا و اهمیت آن می باشد.

#### ۴-۴- بزرگای زمین لرزه

اطلاعات موجود برای آسیبهای مربوط به بزرگای زمین لرزه در شکل (۷)، نشان داده شده است. شکل مذکور نشان می دهد که بیش از نیمی از آسیبهای گزارش شده، مربوط به بزرگای ۷ و بیشتر می باشد.



شکل (۷): میزان تأثیر زلزلههای با بزرگاهای مختلف بر تونلها [۸]

## ۵- روشهای تحلیل لرزه‌ای تونلها

انواع تغییرشکل‌های تونل تحت امواج لرزه‌ای به تغییرشکل‌های خمشی، تغییرشکل‌های بیضوی و تغییرشکل‌های گهواره‌ای تقسیم می‌شود. در قسمتهای بعد روشهای محاسبه پاسخ سازه به امواج لرزه‌ای بررسی شده است.

### ۵-۱- روشهای محاسبه تغییرشکل‌های خمشی

در این بخش، برای محاسبه تغییرشکل‌های خمشی، دو روش تغییرشکل میدان آزاد و روش برهم‌کنش خاک و سازه بررسی شده است.

#### ۵-۱-۱- روش تغییرشکل میدان آزاد

در این روش با صرف نظر از برهم‌کنش سازه زیرزمینی با محیط اطراف، تغییرشکل پدید آمده در توده زمین در حالت میدان آزاد، بر اثر امواج لرزه‌ای به سازه زیرزمینی اعمال می‌گردد و بدون در نظر گرفتن اثر تفرق موج و برهم‌کنش خاک و سازه بر پایه تئوری انتشار امواج در محیط‌های پیوسته، کشسان، همگن و همسان، حرکت میدان آزاد محیط به دست آورده می‌شود [۱۰].

در روش مذکور، شکل تمامی امواج، هارمونیک فرض شده و کرنشهای زمین با فرض اینکه جهت انتشار امواج با محور سازه در پلان، زاویه برخورد (q) می‌سازد، محاسبه می‌گردند. با استفاده از این روش، کرنشهای محوری زمین (میدان آزاد) و انحنای ناشی از انتشار امواج برشی و امواج راییلی به صورت تابعی از زاویه برخورد (q) مطابق جدول (۱) بیان می‌گردند. بحرانی‌ترین زاویه برخورد و حداکثر مقدار کرنش نیز در جدول ارائه شده است. در جدول مذکور، q زاویه برخورد موج زلزله با محور تونل،  $V_s$  سرعت مؤثر عبوری برای موج برشی،  $V_R$  سرعت مؤثر عبوری برای موج راییلی،  $C_s$  سرعت مؤثر عبور برای موج برشی،  $C_R$  سرعت مؤثر عبور برای موج راییلی،  $A_s$



شکل (۹): تأثیر زلزله بر تونلها بر حسب نوع پوشش آنها [۸]

مهمترین نتایج حاصل از مطالعات عموم محققان

عبارتند از:

۱- سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های سطحی به طور محسوسی آسیب کمتری متحمل می‌شوند.

۲- آسیبهای گزارش شده با افزایش عمق کاهش می‌یابند. به نظر می‌رسد تونلهای عمیق نسبت به تونلهای کم عمق، در هنگام وقوع زلزله امن‌تر و قابل اعتمادتر هستند.

۳- می‌توان انتظار داشت که تأسیسات زیرزمینی ساخته شده در خاک آسیب بیشتری را نسبت به سازه‌های ساخته شده در سنگ تحمل می‌کنند.

۴- تونلهای تزریقی و پوشش دار، امن‌تر از تونلهای بدون پوشش در خلال زلزله هستند.

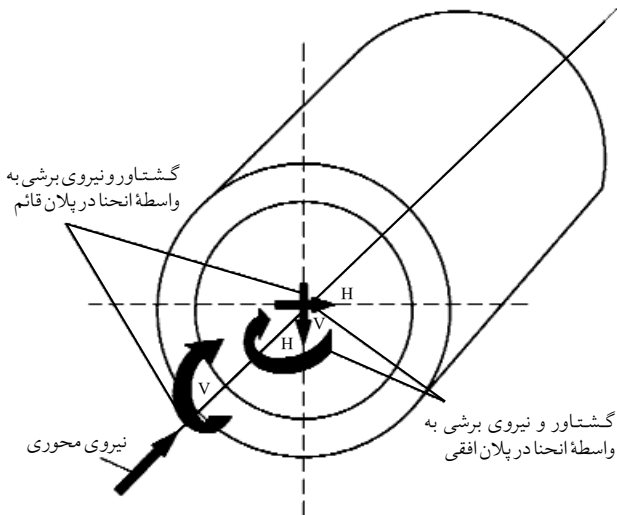
۵- شدت آسیبهها به PGA و PGV بستگی دارد.

۶- دوام جنبش حرکات قوی در خلال زلزله بیشترین اهمیت را دارد.

۷- حرکات با فرکانس بالا ممکن است موجب قله‌کن شدن موضعی بتن یا سنگ در طول سطح ضعیف آنها شود.

۸- اگر طول امواج بین ۱ تا ۴ برابر قطر تونل باشد حرکات تونل ممکن است تقویت شود.

تحت اثر خمشی محوری و کرنشهای برشی ناشی از حرکات طولی خمشی و برشی زمین قرار می‌گیرد.



شکل (۱۰): نیروهای مربوط به تغییرشکل‌های محوری و خمشی [۱]

### ۵-۲- محاسبه تغییر شکل بیضوی روی تونلها

برای محاسبه این نوع تغییر شکل، روشهای تغییر شکل برشی میدان آزاد و برهم کنش خاک و سازه مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۵-۲-۱- تغییر شکل برشی میدان آزاد

تغییر شکل‌های برشی زمین که توسط عبور امواج برشی ایجاد می‌شوند، بحرانی‌ترین و غالبترین مد حرکت لرزه‌ای در بیشتر موارد هستند که موجب تغییر شکل بیضوی یک تونل مدور می‌شوند. برای یک تونل عمیق واقع در خاک یا سنگ نسبتاً همگن، یک تخمین منطقی از تغییر شکل سازه در جدول (۱) ارائه شده است. در این حالت، حداکثر کرنش برشی میدان آزاد، به صورت رابطه‌های (۱) و (۲) بیان می‌شود:

$$C_s = \sqrt{G_m / \rho} \quad (1)$$

$$\gamma_{max} = V_s / C_s \quad (2)$$

در این روابط،  $C_s$  سرعت موج برشی عبوری مؤثر،  $\rho$  چگالی جرمی زمین و  $V_s$  سرعت حداکثر ذره است. برای تطبیق تغییر شکل برشی میدان آزاد با تغییر شکل زمین دو حالت پیشنهاد می‌شود (شکل ۱۱، الف و ب).

شتاب بیشینه ذره برای موج برشی و  $A_R$  شتاب بیشینه ذره برای موج رایی می‌باشد. به دلیل اینکه امواج طولی (p) در طراحی مورد نظر، تعیین کننده نمی‌باشند، از ارائه روابط مربوط به آن خودداری شده است. شایان ذکر است در این روش تخمین بالایی از کرنشها بر اثر امواج به دست می‌آید (حالت بحرانی) و معمولاً نیاز به داده‌های کمتر و قابل دسترسی می‌باشد (حداقل اطلاعات).

جدول (۱): تغییر شکل‌های محوری و خمشی [۸]

انحنا	کرنش طولی (محوری)	نوع موج
$\frac{E_l}{E_r} = \frac{A_s}{C_s^2} \cos^3 q$	$e = \frac{V_s}{C_s} \sin q \cos q$	شکل عمومی
$\frac{E_l}{E_{r_{max}}} = \frac{A_s}{C_s^2} \text{ for } q=0$	$e_{max} = \frac{V_s}{2C_s} \text{ for } q=45$	مقدار بیشینه
$\frac{E_l}{E_r} = \frac{A_R}{C_R^2} \cos^2 q$	$e = \frac{V_R}{C_R} \cos^2 q$	شکل عمومی
$\frac{E_l}{E_{r_{max}}} = \frac{A_R}{C_R^2} \text{ for } q=0$	$e_{max} = \frac{V_R}{C_R} \text{ for } q=0$	مقدار بیشینه

#### ۵-۱-۲- روش برهم کنش خاک و سازه

زمانی که سازه تونل در راستای طولی خود نسبت به خاک اطرافش سخت باشد، به جای تبعیت از تغییر شکل‌های تحمیلی توسط زمین، در برابر آنها مقاومت می‌کند. تحلیل برهم کنش تونل و زمین که هم سختی تونل و هم سختی زمین را در نظر می‌گیرد، در یافتن پاسخ تونل در زمان زلزله نقش کلیدی دارد. با قابلیت‌های محاسباتی رایانه‌ها، امروزه این مسأله را می‌توان با استفاده از برنامه‌های پیچیده به صورت عددی حل نمود. البته برای مقاصد علمی و کاربردی یک راه حل ساده شده مطلوبتر می‌باشد.

در روش ساده شده، سیستم تونل-زمین به صورت یک سیستم ارتجاعی بر روی یک پی ارتجاعی شبیه‌سازی می‌شود (شکل ۱۰). در تحلیل، از اثرهای نیروهای اینرسی در برهم کنش صرف نظر می‌شود. در بارگذاری زلزله نیز مقطع عرضی تونل



از بررسی دو حالت مزبور، محققان نتایج زیر را ارائه نموده‌اند:

- هر دو اثر، برهم‌کنش تونل و محیط را نادیده می‌گیرند.
- مقادیر به دست آمده از زمین حفره‌دار بیشتر است.
- حالت زمین بدون حفره، زمانی مناسب است که سختی پیچشی تونل مساوی با سختی محیط اطراف باشد.
- حالت زمین حفره‌دار برای پوشش‌های با سختی کمتر از سختی محیط، مناسب است.

### ۵-۲-۲- برهم‌کنش پوسته و زمین

در این روش از فرم حل بسته (Closed Form Solution) برای تخمین برهم‌کنش خاک و سازه برای تونل‌های مدور استفاده می‌شود که بر دوفرض استوار است:

- زمین، نامحدود، کشسان، همگن و همسان است.
- رفتار مصالح پوشش تونل عموماً کشسان است و دیوارها تحت شرایط کرنش صفحه‌ای قرار دارند.

این روش به طور کامل در قسمت ۵-۱-۲ ارائه شده است.

### ۵-۳- محاسبه تغییر شکل گهواره‌ای روی تونل‌های مستطیلی

انواع روش‌های بررسی اثرهای حرکت دورانی بر روی تونل‌های با مقطع مستطیل عبارتند از:

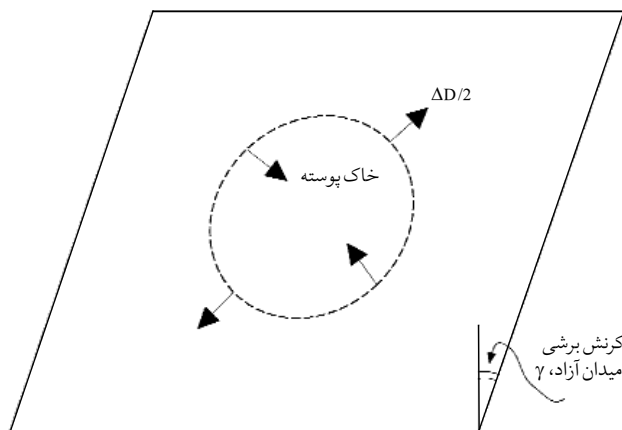
- فشار دینامیکی خاک؛
- تغییر شکل میدان آزاد؛
- برهم‌کنش خاک و تونل؛
- مدل قاب ساده شده.

### ۵-۳-۱- فشار دینامیکی خاک

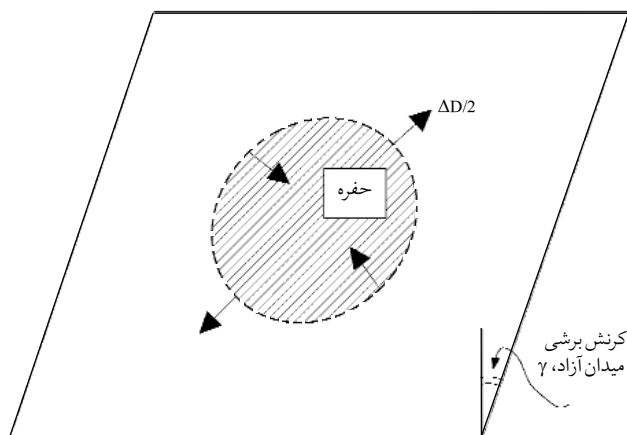
در این روش از دو نظریه استفاده می‌شود.

### ۵-۳-۱-۱- روش مونونوبه-اکابه

در این روش [۱] فرض بر آن است که فشار دینامیکی خاک توسط نیروی اینرسی خاک اطراف ایجاد می‌شود. کاربرد این روش در مقاطع U شکل و سازه‌های زیرزمینی کم عمق است.



الف: تغییر شکل برشی میدان آزاد زمین بدون حفره



ب: تغییر شکل برشی میدان آزاد زمین حفره‌دار

شکل (۱۱): تغییر شکل برشی میدان آزاد زمین حفره‌دار و زمین بدون حفره [۸]

### الف - زمین بدون حفره

در این حالت، زمین بدون حفره در نظر گرفته می‌شود. تغییرات قطر در این حالت، از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\Delta D/D = \pm \gamma_{\max} / 2 \quad (3)$$

در این رابطه،  $D$  قطر تونل و  $\gamma_{\max}$  کرنش برشی بیشینه میدان آزاد است.

### ب - زمین حفره‌دار

در این حالت زمین با حفره در نظر گرفته می‌شود و تغییرات قطر از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\Delta D/D = +2\gamma_{\max} (1 - \nu_m) \quad (4)$$

در این رابطه،  $\nu_m$  ضریب پواسون محیط است.

برای شرایطی که سازه نسبت به محیط اطراف خود انعطاف پذیر می باشد، با واقعیت تطابق بسیار خوبی دارد.

### ۵-۳-۳- برهم کنش خاک و تونل

هر چند حلهای بسته، در برهم کنش خاک و سازه برای تونلهای پوشش دار مدور عمیق کاربرد دارند، این روشها به واسطه تغییرات زیاد ویژگیهای هندسی، در تونلهای مستطیلی توصیه نمی شوند.

به دلیل اینکه تونلهای مستطیلی با روش کند و پوش در اعماق کم ساخته نمی شوند، زمین لرزه موجب می شود که تنشها و تغییرشکلهای زمین به صورت قابل توجهی با عمق تغییر کند؛ بنابراین روش مذکور در تونلهای مستطیلی توصیه نمی گردد. در صورتی که از این روش در تحلیل تونلهای مستطیلی استفاده شود، از تحلیل اجزای محدود توسط برنامه های Flush, Flac و ... استفاده می شود که عوامل مؤثر در پاسخ این روش، سختی نسبی خاک و تونل، هندسه تونل، جنبش ورودی زمین و عمق دفن تونل می باشد.

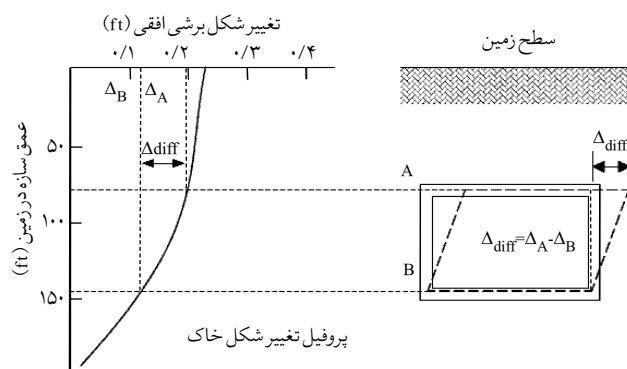
### ۵-۳-۴- مدل قاب ساده شده

در این روش پس از مشخص شدن شرایط زیرزمینی در محل حفر تونل و تعیین ویژگیهای خاک و یاسنگ، پارامترهای زلزله از جمله حداکثر زلزله طرح و زلزله سطح عملکرد تعیین می گردد. در مرحله بعد، طرحی اولیه از سازه بر اساس آیین نامه های طراحی صورت می گیرد و بر اساس ویژگیهای خاک و یاسنگ و نیز پارامترهای زلزله، تغییرشکلهای کرنشهای برشی میدان آزاد زمین در عمق مورد نظر، برآورد می گردد. سپس، سختی نسبی بین میدان آزاد و سازه تعیین می شود. سختی نسبی با فرمول  $F = \frac{GL}{SH}$  بیان می شود که S معکوس تغییرشکل گهواره ای، G مدول برشی، L طول تونل و H ارتفاع آن می باشد. در مرحله بعد، ضریب حرکت گهواره ای و تغییرشکل

در روش وود [۱] فرض می شود که صلبیت دیوار و شالوده نامحدود است. کاربرد این روش در سازه های تونلهای کند و پوش و در دیوارهای انتهایی ایستگاه مترو است؛ زیرا این دیوارها به صورت صلب رفتار می کنند. مقادیر به دست آمده از این روش ۱/۵ تا ۲ برابر روش مونونو به-اکابه می باشد. برای تونلهای مستطیلی منظم تحت شرایط کرنش صفحه ای این دو روش به نتایج غیر واقعی منجر می شود. لازم به ذکر است که این دو روش، برای تونلهای دارای پوشش با ضخامت زیاد استفاده نمی شود.

### ۵-۳-۲- تغییر شکل میدان آزاد

معمولاً یک سازه تونل مستطیلی با فرض اینکه مقداری از حرکت گهواره ای تحمیل شده روی سازه مساوی با تغییر شکل برشی میدان آزاد محیط اطراف است، طراحی می شود. با استفاده از روش حرکت گهواره ای میدان آزاد، یک پروفیل عمومی از تغییر شکل خاک میدان آزاد و تغییر اعوجاج نسبی ایجاد شده مورد استفاده در طراحی یک سازه مستطیلی غوطه ور در شکل (۱۲) نشان داده شده است. هنگامی که تغییر شکل ایجاد شده در زمین کوچک است (هنگامی که شدت تکانه ها کم است یا زمین خیلی سخت است)، روش تغییر شکل میدان آزاد، به صورت یک ابزار طراحی ساده و مؤثر به کار می رود. این روش،



شکل (۱۲): تغییر شکل میدان آزاد یک تونل مستطیلی [۱]

جدول (۲): مقایسه روشهای مختلف طراحی تونل [۸]

نوع روش	مزایا	معایب	کاربرد
فشار دینامیکی زمین	۱- استفاده از مطالعات گذشته ۲- استفاده از کمترین پارامترهای طراحی و حداقل خطا ۳- ضریب اطمینان بالاتر در برابر زلزله	۱- فقدان یک پایه تئوری قوی ۲- تغییر شکل دورانی اضافی برای تونلهای در عمق زیاد ۳- محدودیت کاربرد برای انواع خاصی از خاکها	در تونلهای با ضخامت کم خاک سربار
روش تغییر شکل میدان آزاد	۱- محافظه کارانه بودن روش برای تونلهای سخت تر از زمین اطراف آن ۲- سهولت نسبی جهت فرمولاسیون ۳- استفاده از مطالعات گذشته	۱- مناسب نبودن برای تونلهای شکل پذیرتر از زمین اطراف ۲- محافظه کارانه نبودن روش برای تونلهای انعطاف پذیرتر ۳- کاهش دقت نتایج با تغییر شرایط زمین	در تونلهایی با سختی برابر با سختی زمین اطراف
تحلیل اجزای محدود برهم کنش خاک و سازه	۱- بهترین حالت مدل کنند ۲- برهم کنش خاک و سازه ۳- تعیین پاسخ سازه ۴- قابلیت حل مشکلات برهم کنش با ترکیب هندسه تونل و شرایط خاک	۱- تحلیل های پیچیده و وقت گیر ۲- عدم قطعیت در ورودی حرکت لرزه ای	تمام شرایط
مدل تحلیلی قباب ساده شده	۱- تقریب مناسب از برهم کنش خاک و سازه ۲- سهولت نسبی جهت فرمولاسیون ۳- دقت منطقی در تعیین پاسخ	۱- کاهش دقت پاسخها با تغییر شرایط زمین	تمام شرایط

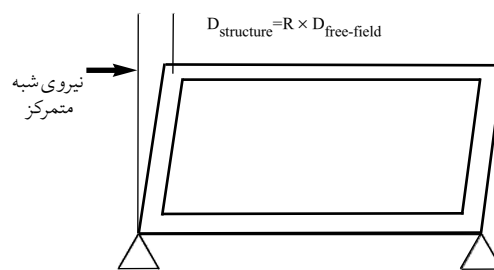
گهواره ای سازه تعیین می شود.  $R$  ضریب گهواره ای سازه است که به صورت  $R = \frac{D_s}{D_{free-field}}$  بیان می شود که در آن  $D_s$ ، تغییر شکل گهواره ای و  $D_{free-field}$  تغییر شکل برشی میدان آزاد می باشد. تغییر شکل گهواره ای اعمال شده بر اثر زلزله، در تحلیل قاب، مورد استفاده قرار می گیرد. در این حالت، مدل نیرویی شبه متمرکز برای سازه های مستطیلی دفن شده با عمق زیاد (شکل ۱۳) و مدل توزیع فشار شبه مثلثی برای تونلهای کم عمق (شکل ۱۴)، مورد استفاده قرار می گیرد. با اضافه نمودن نیروهای داخلی عضو ناشی از حرکت گهواره ای به دست آمده در مرحله قبل به سایر نیروهای مؤثر در بارگذاری، ترکیب نهایی بارگذاری مشخص خواهد شد. اگر نتایج این مرحله بیانگر عدم مقاومت کافی سازه در برابر ترکیب بار اعمال شده نباشد، باید تغییر شکل های دورانی اعضای سازه ای کنترل گردد تا تغییر شکل های پلاستیک ایجاد نشود.

پس از بررسی روشهای مختلف طراحی تونلها مقایسه این روشها از لحاظ مزایا و معایب و کاربرد هر کدام از آنها به صورت خلاصه در جدول (۲) ارائه شده است.

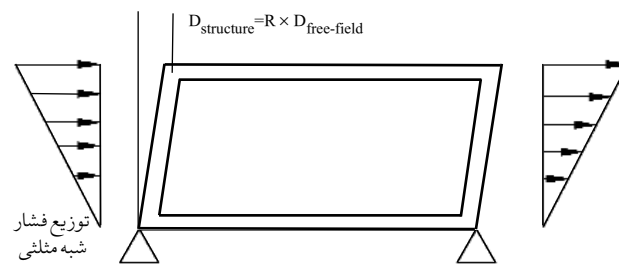
## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، پس از تقسیم بندی تونلها از نظر روشهای اجرا و ذکر رفتار لرزه ای تونلها در زلزله های اخیر جهان، به بررسی عوامل مهم (عمق مصالح سربار، نوع سنگ، بیشینه شتاب زمین، بزرگای زلزله، فاصله کانون زلزله تا تونل و نوع پوشش) در آسیب پذیری تونلها بر اساس مطالعات انجام شده توسط محققان پرداخته شده است.

با توجه به عملکرد تونلها در زلزله های گذشته، در نظر گرفتن برخی از ملاحظات ساده در طراحی و اجرای تونلها موجب عملکرد مطلوب آنها در برابر نیروهای حاصل از زلزله شده است؛ چنانکه در زلزله لوماپریتا ایجاد در زلزله ای در برجهای تهویه برای تحمل جابه جاییهای نامساوی به عملکرد مناسب تأسیسات «بارت» منجر شد. به صورتی که هیچ آسیبی



شکل (۱۳): نیروی شبه متمرکز برای تونل عمیق



شکل (۱۴): توزیع فشار شبه مثلثی برای تونل کم عمق [۱]

3. Uenishi, K., Sakurai, S. (2000). Characteristic of the vertical seismic waves associated with the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe), *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, vol. 29(6), 813- 821.

4. Uenishi, K., Shunsuke, S. (2001). *Wave-induced damage to underground structure* [Report of the Research Center For Urban Safety and Security]. Kobe University, vol. 5, 49-60.

۵- پهلوان، پوریا. (۱-۴ دی ۱۳۸۴). بررسی تأثیر زلزله بر سازه‌ها و تأثیرات زیرزمینی. مجموعه مقالات یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور (۲۰۷-۲۱۴). دانشگاه هرمزگان.

6. Dowding, C. Rozen, A. (1978, February). Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 104, No. 2, pp. 175-191.

7. Owen, G.N., Scholl, R.E. (1981). *Earthquake engineering of large underground structures.*, & *National Science Foundation*.

8. Jaw-Nan (Joe) Wang. (1993). *Seismic design of tunnels*. New York: Persons Brinkerhoff Inc.

9. Sharma, S. Judd. W.R. (1991). Underground opening damage from earthquakes. *Engineering Geology*, 30. Issue 3-4., 245-402.

۱۰- صدقیانی، محمدحسین. حبیب‌بیگی؛ فرزاد. (۷-۹ آبان ۱۳۸۰). بررسی روشهای تحلیل دینامیکی فضاهاى زیرزمینی مقاوم در برابر زلزله. مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس تونل ایران (۲۰۱-۲۰۷). تهران: دانشکده فنی دانشگاه تهران ▶

متحمل نشدند و ۲۴ ساعت بعد از وقوع زلزله خدمت‌رسانی را از سر گرفتند.

در ادامه تحقیق، روشهای محاسبه پاسخ لرزه‌ای تونلها به صورت مشروح توضیح و به مزایا، معایب و کاربردهای هر یک از روشهای مذکور، اشاره شد.

روشهای مختلفی همچون فشار دینامیکی زمین، تغییر شکل میدان آزاد، تحلیل اجزای محدود برهم‌کنش خاک و سازه و مدل تحلیلی قاب ساده شده در محاسبات لرزه‌ای تونلها کاربرد دارند که بررسی و مطالعه دقیقتر روشهای مذکور بیانگر این مطلب است. برای تحلیل و طراحی لرزه‌ای تونلها همواره نیاز به تحلیل‌های پیچیده نیست؛ بلکه استفاده از روشهای ساده شامل اثرهای برهم‌کنش خاک و سازه می‌تواند نتایج قابل قبولی ارائه دهد. بر این اساس مدل قاب ساده شده به دلیل تقریب مناسب از برهم‌کنش خاک و سازه، سهولت نسبی برای فرمولاسیون، دقت منطقی در تعیین پاسخ و کاربرد آن در تمام شرایط برای تونل‌های مستطیلی پیشنهاد و توصیه می‌گردد. علاوه بر آن، روش برهم‌کنش خاک و سازه، به واسطه تغییرات زیاد ویژگیهای هندسی در تونل‌های مستطیلی توصیه نمی‌شود و استفاده از این روش در تونل‌های مدور توصیه و پیشنهاد می‌گردد.

## ۷- مراجع

1. Hashash, Y. Jeffrey, M. A, Hook, J. Schmidt, B. (2001). *Seismic design and analysis of underground structure*. Tunneling and Underground Space Technology. 247-293.

۲- میرمیرانی، شهریار. (۷-۹ آبان ۱۳۸۰). بررسی تأثیر زلزله بر تونلها. مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس تونل ایران (۲۰۱-۲۰۷). تهران: دانشکده فنی دانشگاه تهران.