

تحلیل دینامیکی تونل‌های دایروی شهری و اثر عوامل محیطی بر رفتار متفاوت این

سازه‌ها

یادداشت فنی

وهاب بشارت؛ جعفر بلوری بزازی*

۱- دکترای تخصصی عمران؛ گرایش خاک؛ دانشکده مهندسی؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- دانشیار؛ گروه مهندسی عمران؛ دانشکده مهندسی؛ دانشگاه فردوسی مشهد

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۱/۱۷؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی	چکیده
تونل‌های دایروی تحلیل دینامیکی PLAXIS مدول برشی دینامیکی میرایی	تونل‌های زیرزمینی با مقطع دایروی امروزه کاربرد زیادی در زمینه حمل و نقل دارند. یکی از بارزترین کاربردهای آن، متروهای شهری است که با کمک ماشین‌های حفر تونل (TBM) ایجاد می‌گردد. بررسی رفتار اینگونه سازه‌ها در برابر زلزله در زمان بهره‌برداری امری است که بایستی حتماً در هنگام طراحی مد نظر قرار گیرد. در این تحقیق، ابتدا به چگونگی انتخاب پارامترهای دینامیکی خاک همچون مدول برشی دینامیکی و نیز میرایی پرداخته و نحوه انجام تحلیل دینامیکی تونل‌های دایروی توسط مدول عددی توضیح داده شده است. تحلیل دینامیکی برای تونلی خاص برای دو مدل رفتاری خطی ارتجاعی و نیز موهر کلمب انجام گرفته و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. در تحلیل‌های انجام شده برای در نظر گرفتن اثرات تغییر شکل‌ها و تغییرات تنش در محیط اطراف در اثر حفاری تونل، مراحل حفاری و تغییرات در پوشش تونل نیز وارد مدل شده و در انتها، تحلیل دینامیکی انجام گرفته است. در این بررسی، به پاسخ دینامیکی متفاوت این تونل‌ها در پارامترهای مختلف خاک پرداخته شده و اثرات تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک، مدول برشی حداکثر و نیز میرایی خاک در حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- پیشگفتار

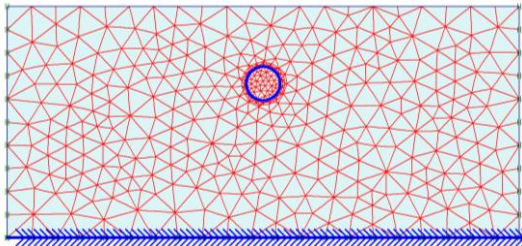
می‌باشد، بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که جهت تحلیل تغییر مکان تونل از روشهای شبه استاتیکی یا شبه دینامیکی بطوریکه تغییر مکان‌ها یا تاریخچه تغییر مکانها به صورت استاتیکی به سیستم خاک-سازه اعمال شده استفاده کرد. تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی می‌تواند جهت تصحیح کردن مدول در زمان مورد نیاز استفاده شود مخصوصاً زمانی که بعضی از قسمت‌های تونل تحت بار زلزله، پاسخ دینامیکی داشته باشد [1]. تاریخچه زمانی حرکات زمین که برای تحلیل دینامیکی استفاده می‌شود بایستی جهت هماهنگی با طیف پاسخ طرح مورد نظر بدست آید و همچنین خصوصیات آن بایستی نمایانگر شرایط سایت و

روشهای متفاوت و گوناگونی برای بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های مدفون دایروی وجود دارد. روش تحلیل شبه استاتیکی که بر پایه روابط حل بسته ارتجاعی استوار است یکی از متداول‌ترین روش‌هاست. این روش که بر پایه روابط موجود بر نسبت سختی خاک و سازه تونل استوار است دارای محدودیت‌هایی بوده و عموماً در پروژه‌ها به عنوان روشی جهت ارزیابی اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی دیگر از روش‌های تحلیل تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی، روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی است. بطور کلی اینرسی تونل در مقایسه با محیط احاطه کننده کوچک

* مشهد؛ میدان آزادی؛ دانشگاه فردوسی؛ دانشکده مهندسی؛ گروه مهندسی عمران؛ کدپستی: ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴؛ شماره‌ی تلفن: ۰۳۰۰۰۳۸۸۰۳۸۸۱(+); رایانامه:

bolouri@um.ac.ir

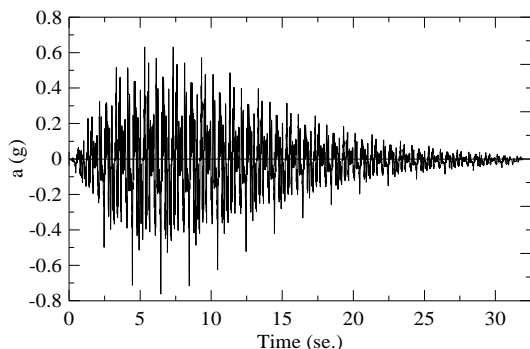
تونلی با قطر ۶/۶ متر و ضخامت ۳۰ سانتیمتر در عمق ۱۵ متری از سطح قرار گرفته است. جهت جلوگیری از بازگشت امواج، خصوصیت مرزهای جاذب به مرزهای قائم اختصاص داده شده است. نمای کلی از این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای کلی مدل تونل در تحلیل عددی به همراه نحوه المان بندی

۲-۲- بارگذاری

یکی از نکات مهم که در تحلیل‌های دینامیکی باید مورد توجه قرار گیرد، نحوه اعمال بارگذاری دینامیکی است. این بارگذاری معمولاً بصورت اعمال یک زلزله در تراز سنگ بستر میسر است. برای اعمال زلزله معمولاً از شتابنگاشت استفاده می‌شود بدین معنی که تغییرات شتاب یک زلزله نسبت به زمان به عنوان ورودی زلزله به سنگ بستر که همان تراز صلب انتهایی مدل می‌باشد اعمال می‌شود. در اینجا از تاریخچه زمانی بدست آمده از تحلیل سایت متروی تبریز جهت مدلسازی زلزله در مدل عددی استفاده شده که برای تحلیل دینامیکی موجود، ۱۰ ثانیه اول این شتابنگاشت مورد استفاده قرار گرفته است. این شتابنگاشت در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- تاریخچه زمانی شتاب مورد استفاده در مدل عددی

محیط لرزه ای آن باشد [2]. استفاده از روش تحلیل دینامیکی مستلزم زمان و هزینه زیادی است که در مواردی که پروژه از اهمیتی خاص برخوردار است از آن استفاده می‌شود. همچنین در اکثر موارد با توجه به اینکه پارامترهای موثر در این تحلیل‌ها به صورت واضح قابل تعریف نبوده و وابسته به کاربر می‌باشد، تحلیل‌های عددی میبایست در کنار تحلیل‌های حل بسته صورت پذیرند. در این خصوص نیز تحقیقاتی توسط محققین صورت پذیرفته است. پاکباز و یاریوند در تحقیقی با استفاده از نرم افزار CA2 به مقایسه نتایج تحلیل‌ها در دو روش حل بسته و تاریخچه زمانی پرداخته و برپایه نتایج تحلیل تاریخچه زمانی، رابطه مقادیر نگرخمش ایجاد شده ناشی از بارهای لرزه ای اصلاح گردیده است. تحلیل الاستوپلاستیک پاسخ لرزه ای تونل‌ها در خاک‌های نرم نیز با استفاده تاریخچه زمانی شتاب توسط نرم افزار اجزاء محدود PECPLAS که دارای امکانات ویژه‌ای جهت مسائل ژئوتکنیک از جمله به کارگیری روابط ساختاری پیشرفته خاک و استفاده از مدل یکپارچه برای تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی و نیز المان تماسی برای اندرکنش دینامیکی خاک و سازه می‌باشد، انجام گردیده است. در این تحقیق نیز اثرات پارامترهای تاثیر گذار بر نتایج تحلیل که در تحلیل‌های حل بسته قابل ارزیابی نمی‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر با توجه به استفاده روز افزون از مدل‌های عددی در اکثر پروژه‌های ژئوتکنیکی، نحوه تحلیل کامل دینامیکی در نرم افزار PLAXIS با توجه به محدودیت‌های موجود ارائه شده و سپس نحوه تغییرات پارامترهای زلزله، خاک و هندسه مدل بر روی نتایج تاثیر گذار بر طراحی تونل بررسی می‌شود. برخی از این پارامترها در روابط حل بسته موجود که در ارزیابی و تحلیل تونل‌ها استفاده میشوند وارد نشده، لذا شناخت رفتار این پارامترها حین تحلیل‌های دینامیکی تونل می‌تواند به اعتبار نتایج روابط حل بسته کمک نماید [3] تا [7].

۲- هندسه مدل، بارگذاری و روش تحلیل

۲-۱- هندسه مدل

برای ایجاد یک مدل جهت تحلیل دینامیکی از هندسه ای با ابعاد ۴۰×۱۰۰ متر برای عرض و ارتفاع استفاده شده که

۳-۲- روش تحلیل

جهت تحلیل دینامیکی تونل از نرم افزار *PLAXIS V8.2* که بر پایه تئوری اجزاء محدود استوار می‌باشد استفاده شده است. در این تحقیق ابتدا تونل مبنا که مشخصات آن از تونل متروی تبریز گرفته شده تحلیل شده و سپس بر روی پارامترهای موثر خاک و سازه آنالیز حساسیت انجام گرفته است. در تحلیل تونل مبنا و نیز سایر تحلیل‌ها ابتدا مراحل حفاری، بر اساس روش ساخت با ماشین حفار تونل (*TBM*) مدل شده آنگاه پس از مرحله تخصیص خصوصیات دینامیکی به مصالح، شتابنگاشت مربوطه به مدل اعمال و تحلیل دینامیکی انجام شده است.

۳- خصوصیات مصالح

با توجه به نوع تحلیل، خصوصیات مصالح به دو گروه استاتیکی و دینامیکی تقسیم شده است. خصوصیات استاتیکی مصالح که در تحلیل مراحل استاتیکی حفاری استفاده شده مشابه خصوصیات مصالح متروی تبریز می‌باشد (جدول ۱). خصوصیات دینامیکی آن با توجه به روش گام به گام تراز کرنش محاسبه و اعمال گردیده است. خواص پوشش نهایی تونل که از جنس بتن می‌باشد نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات استاتیکی مصالح به کار رفته در مدل

<i>Plaxis</i>				
نام مصالح	مدل رفتاری	γ	E	ضریب پواسون
بتن	خطی	24	2.48×10^7	0.20
خاک		20.5	2.70×10^3	0.32

اهمیت و نحوه توزیع خسارت هنگام وقوع زلزله در سازه‌های مدفون وابسته به پاسخ خاک بوده که عمدتاً توسط خواص مکانیکی خاک کنترل می‌گردد. خواص خاک که کرنش‌های کم را تحت تأثیر قرار می‌دهند شامل سختی، میرایی، ضریب پواسون و دانسیته می‌باشند، که از آن میان میرایی و مدول برشی از اهمیت ویژه برخوردار بوده و در ادامه به اختصار، چگونگی تعیین آنها شرح داده شده است.

۳-۱- مدول برشی (G)

مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که سختی خاک به وسیله دامنه کرنش سیکلی، تخلخل، تنش اصلی موثر متوسط، دامنه خمیری، ضریب پیش تحکیمی و تعداد سیکل‌های بارگذاری تحت تأثیر قرار می‌گیرد. شیب در مبدأ منحنی تنش-کرنش مدول برشی بیشینه (G_{max}) نامیده می‌شود.

۳-۲- مدول برشی بیشینه (G_{max})

هنگامیکه اندازه‌گیری سرعت موج برشی ممکن نباشد، G_{max} را می‌توان از روابط مختلف تخمین زده شود. به عنوان مثال رابطه زیر برای تعیین مدول برشی حداکثر ماسه پیشنهاد شده است [8].

$$G_{max} = \frac{3230(2.97 - e)^2}{1 + e} \bar{\sigma}_o^{1/2} \quad (1)$$

در این رابطه e تخلخل ماسه و $\bar{\sigma}_o$ میزان تنش موثر متوسط در وسط لایه می‌باشد. با توجه به خصوصیات خاک عنوان شده در تونل مبنا خواهیم داشت:

$$\bar{\sigma}_o = \gamma h = 20.5 \times 15 = 307 \text{ kN/m}^2$$

$$G_{max} = \frac{3230(2.47 - 0.7)^2}{1 + 0.7} \times (307)^{1/2} = 140058 \text{ (kN/m}^2)$$

پس از تعیین مدول برشی بیشینه باید مدول برشی را در کرنش‌های برشی معین محاسبه نمود. رابطه زیر که بر اساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده تغییرات تنش برشی را به کرنش‌های برشی نسبت می‌دهد [7].

$$\tau = \frac{\gamma}{1/G_{max} + \gamma/\tau_{max}} \quad (3)$$

$$G_{max} = \frac{\tau_{max}}{\gamma_r} \quad (4)$$

که در آن τ تنش برشی، γ کرنش برشی نسبی، γ_r کرنش برشی مبدأ و τ_{max} حداکثر تنش برشی در لحظه گسیختگی است.

اکنون با توجه به روابط فوق مدول برشی خاک تونل مبنا برای کرنش‌های مختلف محاسبه می‌گردد. باید اشاره کرد، از آنجا که میزان کرنش برشی حداکثر ایجاد شده در محیط،

معادل خطی γ به صورت ضریب میرایی منطبق با اتلاف انرژی منحنی هیستریزیس یک سیکل، در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که تراز کرنش محاسبه شده به مقادیر خواص خطی معادل بستگی دارد به منظور اطمینان از اینکه خواص استفاده شده در تحلیل با تراز کرنش محاسبه شده سازگاری دارد، کاربرد یک روند آزمون و خطا و تکراری ضروری است. مراحل این روند که در مورد تونل مبنا نیز برای نمونه اجرا خواهد شد به صورت زیر است.

۱- تخمین اولیه G متناظر با همان تراز کرنش، برای هر لایه.

۲- محاسبه پاسخ زمین شامل تاریخچه زمانی کرنش برشی بر اساس مقدار G تخمین زده شده.

۳- محاسبه کرنش برشی موثر از کرنش برشی حداکثر در تاریخچه زمانی کرنش برشی [9].

$$\gamma_{ave} = R_{\gamma} \cdot \gamma_{max} \quad (5)$$

در این رابطه R_{γ} نسبت کرنش برشی مؤثر یا میانگین به کرنش برشی حداکثر است. R_{γ} به بزرگای زلزله بستگی داشته و از رابطه ۶ قابل محاسبه است [9]. در این رابطه M بزرگی زلزله می‌باشد.

$$R_{\gamma} = \frac{M - 1}{10} \quad (6)$$

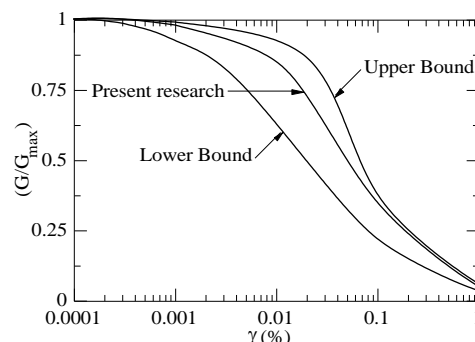
۴- با استفاده از کرنش برشی مؤثر محاسبه شده در مرحله ۳، مقادیر مدول برشی جدید از روی نمودار تغییرات نسبت مدول برشی، برای تکرار بعدی انتخاب می‌شوند. گامهای ۲ تا ۴ تا زمانی که اختلاف میان مقادیر محاسبه شده مدول برشی در دو تکرار متوالی کمتر از مقدار معینی در لایه شود، تکرار می‌گردد. اگر چه همگرایی مطلق اتفاق نمی‌افتد ولی معمولاً پس از ۳ تا ۵ بار تکرار اختلاف کمتر از ۵ تا ۱۰ درصد خواهد شد که قابل قبول می‌باشد [9].

بعد از چهار مرحله تکرار، مقدار مدول برشی برابر 44818 kN/m² شده که با کرنش 0.162% سازگاری دارد.

۳-۳- میرایی

یکی دیگر از پارامترهای دینامیکی مهم خاک، میرایی می‌باشد. از نظر تئوری هیچگونه استهلاک انرژی در کرنش‌های کمتر از کرنش برشی سیکلی خطی آستانه اتفاق

وابسته به خصوصیات خاک و نیز شتابنگاشت اعمالی به محیط می‌باشد لذا این مقدار متغیر بوده و تابعی از مدول برشی است. به عبارتی مدول برشی به کرنش برشی وابسته بوده و کرنش برشی نیز به طور متقابل به مدول برشی وابسته می‌باشد [9]. این موضوع در منحنی‌های تغییرات مدول برشی نسبت به کرنش قابل مشاهده می‌باشد.

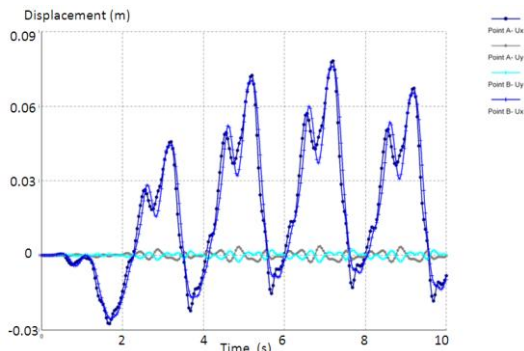


شکل ۳- منحنی تغییرات نسبت مدول برشی بر حسب تغییرات کرنش برشی در خاک تونل مبنا

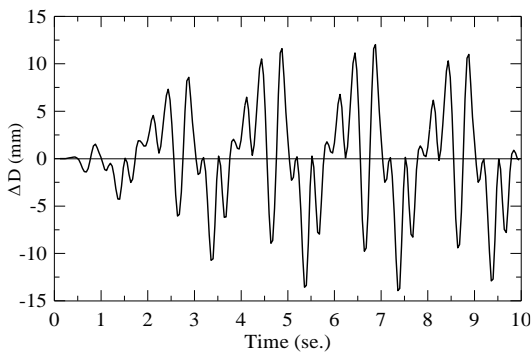
تغییرات G/G_{max} (نسبت مدول برشی) بر حسب کرنش برشی بر اساس روابط ۳ و ۴ در شکل ۳ نشان داده شده است. حد بالا و پایین این تغییرات برای خاکهای ماسه‌ای که توسط سید و ادریس بر اساس نتایج آزمایشات بدست آمده در این شکل نیز ارائه شده است [10]. در اینجا نیز با تطبیق دادن خاک تونل مبنا توسط روابط هاردین با منحنی‌های سید و ادریس، منحنی حد بالای محققین فوق به عنوان مدل رفتاری مدل برشی بر حسب کرنش برشی انتخاب می‌گردد.

با توجه به کرنش‌ها، مدول برشی واقعی خاک قابل محاسبه می‌باشد. روش‌های متفاوت برای محاسبه مدول برشی موجود است. یک روش در نظر گرفتن میزان G ثابت برای لایه خاک می‌باشد که به روش رفتار خطی خاک موسوم است. از آنجا که رفتار غیرخطی خاک بخوبی شناخته شده است لذا جهت تعیین پاسخ منطقی زمین در مسائل عملی روش خطی باید اصلاح گردد. از طرفی رفتار واقعی غیرخطی هیستریزیس تنش-کرنش خاکهای بارگذاری شده بصورت سیکلی را می‌توان با در نظر گرفتن خواص معادل خطی خاک تعیین نمود. مدول برشی معادل خطی G ، عموماً بصورت مدول برشی سکانت و نیز ضریب میرایی

با هم می‌باشد بدین معنی که تحت اثر زلزله تونل و خاک باهم و یکسان حرکت می‌کند اما تغییر مکان نسبی، حرکت یک نقطه نسبت به نقطه‌ی دیگر از تونل می‌باشد که نیروهای پوشش نهایی تونل نیز در اثر همین تغییر مکان ایجاد می‌شوند.



شکل ۴- تغییر مکان کلی نقاط روی قطر تونل در دو راستای X و Y



شکل ۵- تغییر قطر تونل در راستای ۴۵ درجه نسبت به زمان در بارگذاری دینامیکی

شکل ۵ تفاضل تغییر مکان‌های دو نقطه‌ی A و B در راستای قطر و با زاویه ۴۵° نشان داده شده است. بدیهی است حداکثر مقدار مثبت مشاهده شده در شکل فوق بیانگر حداکثر افزایش قطر ایجاد شده در پوشش نهایی در راستای مربوطه و حداکثر مقدار منفی ایجاد شده بیانگر حداکثر کاهش قطر تولید شده در همان راستا می‌باشد.

حال مقادیر نیروها و لنگر ایجاد شده در پوشش نهایی تونل که فقط توسط بارگذاری دینامیکی ایجاد شده، در دو حالت مدل رفتاری خطی و مدل رفتاری موهر کولمب قابل محاسبه خواهد بود.

نمی‌افتد، ولی شواهد تجربی نشان می‌دهد که حتی در کرنش‌های بسیار کوچک هم مقداری استهلاك انرژی وجود داشته و بنابراین میرایی هرگز صفر نخواهد شد. جهت محاسبه‌ی میرایی در تونل مینا، می‌توان همانند پارامتر مدول برشی از روش Hardin جهت محاسبه‌ی D_{max} استفاده کرد. سپس منحنی تغییرات میرایی را با توجه به تغییرات کرنش برشی ترسیم کرده و با منحنی‌های ارائه شده توسط Seed و Idriss با توجه به آزمایشات و روابط، مطابقت داد [11]. اما استفاده از این روش مستلزم صرف وقت زیاد می‌باشد زیرا در روند تکراری عنوان شده برای پارامتر مدول برشی، باید همزمان روند همگرایی میرایی نیز بررسی شود. جهت سادگی و سهولت کار و نیز از آن جهت که در اکثر طراحی‌های صورت گرفته از روش مدل خطی میرایی استفاده می‌شود، در این جا نیز از یک میرایی یکسان که برابر $\xi = 5\%$ می‌باشد در طراحی تونل مینا استفاده می‌شود. خصوصیات دینامیکی مورد استفاده در تحلیل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- خصوصیات دینامیکی مصالح به کار رفته در مدل عددی

نام مصالح	مدل رفتاری	γ kN/m^3	$E_{dynamic}$ kN/m^2	ν	ξ (%)
خاک	خطی	20.5	118.3×10^3	0.32	5

۴- نتایج تحلیل دینامیکی

۴-۱- تحلیل دینامیکی تونل مینا

برای بررسی بهتر رفتار پوشش نهایی تونل در حین زلزله، تغییر مکانها و تغییر قطرها در پوشش نهایی بررسی می‌شود. بدین منظور دو نقطه در راستای قطر با زاویه ۴۵ درجه با محور افقی جهت مشاهده حداکثر تغییر مکان ها انتخاب می‌گردد. همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود روند کلی حرکت این دو نقطه مشابه هم می‌باشد، اما تغییر مکان این دو نقطه الزاماً با هم برابر نیست. تغییر مکانها در مرحله‌ی دینامیکی ترسیم شده و فقط ناشی از اعمال بارگذاری دینامیکی است. بطور کلی تغییر مکان یک نقطه را می‌توان به دو قسمت تغییر مکان کلی و تغییر مکان نسبی تقسیم کرد. تغییر مکان کلی در حقیقت، حرکت صلب خاک و تونل

$$\sigma = \frac{T}{A} \pm \frac{M}{2I} \quad (7)$$

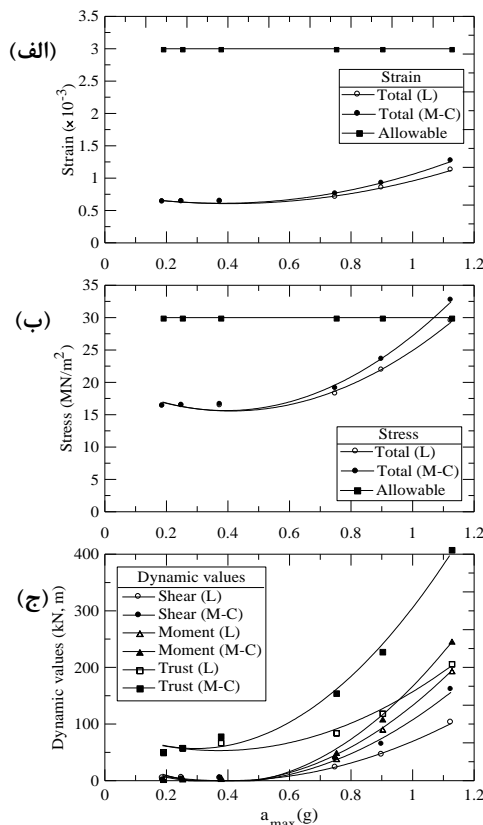
$$\varepsilon \approx \frac{1-\nu^2}{E} \sigma \quad (8)$$

از مقایسه مقادیر جدول مشخص می‌شود که مقادیر حاصل از معیار موهر کولمب همواره بیشتر از مقادیر حاصل از مدل رفتاری خطی است. این اختلاف در تغییر قطر تونل هم مشاهده می‌شود.

در جدول ۳، T نیروی محوری، V نیروی برشی، M لنگر خمشی ایجاد شده در پوشش تونل و ΔD تغییر قطر تونل تحت فقط بارگذاری دینامیکی است. پارامترهای ε و σ نیز به ترتیب معرف کرنش و تنش ایجاد شده در پوشش تونل تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. علاوه بر مقادیر نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی، مقادیر تنش و کرنش ایجاد شده در پوشش نهایی تونل نیز ارائه گردیده است که از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند.

جدول ۳- نتایج بدست آمده از تحلیل تونل مبنا

	مرحله دینامیکی				مرحله استاتیکی + دینامیکی	
	T (kN)	V (kN)	M (kN.m)	ΔD (m)	σ (kN/m ²)	ε
مدل خطی	85.5	23.13	32.28	0.0139	18208	0.00071
مدل موهر کولمب	155.4	38.48	50.9	0.0159	19523	0.00076



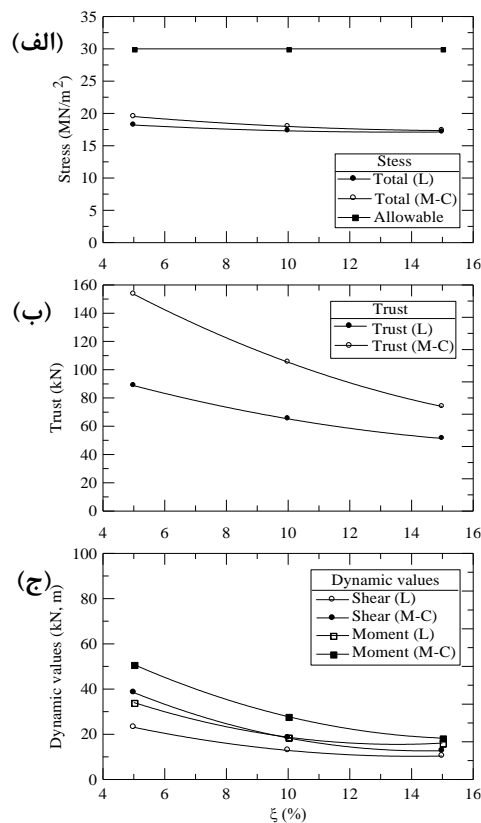
شکل ۶- اثر تغییر شتاب حداکثر در شتابنگاشت در نتایج تحلیل- (الف) کرنش، (ب) تنش، (ج) نیروهای دینامیکی

۲-۴- بررسی اثر تغییرات شتاب حداکثر شتابنگاشت بر پوشش نهایی تونل

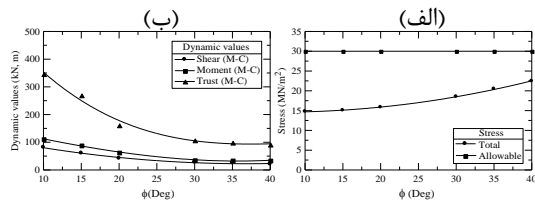
یکی از عواملی که در رفتار دینامیکی سازه‌های زیرزمینی اثر می‌گذارد، حداکثر شتاب اعمالی در اثر اعمال یک شتابنگاشت می‌باشد. برای اینکه اثر این عامل مشخص شود، شتابنگاشت با ضرایب $0.25, 0.33, 0.5, 1, 1.2$ و 1.5 مقیاس شده و در تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است. ایمنی پوشش نهایی تونل در این تحلیل‌ها در هنگام زلزله با مقایسه تنش و کرنش مجاز بتن با مقادیر محاسبه شده توسط روابط ۷ و ۸ ارزیابی کرد [12].

همانگونه که از شکل ۶ مشاهده می‌شود هر چه ضریب مقیاس بزرگتر می‌شود شیب نمودار تغییرات نیز بیشتر می‌شود. این بدان معنی است که اثر ضریب مقیاس در مقادیر بالاتر بیشتر است. با دقت در نمودار مربوط به تنش، مشاهده می‌شود که بعد از شتاب حداکثر $1.05g$ در تحلیل موهر کولمب ($M-C$)، مقدار تنش حاصله از تنش مجاز بتن فراتر خواهد رفت و این بدان معنی است که بیشترین مقدار شتاب حداکثر برای ایجاد شرایط امن برای تونل مبنا $a_{max}=10.3 \text{ m/s}^2$ می‌باشد، این در حالی است که کرنش‌های به وجود آمده در پوشش نهایی تونل تا کرنش مجاز بتن فاصله زیاد دارد.

اینگونه عنوان کرد با اینکه افزایش ϕ باعث کاهش نیروهای دینامیکی می‌شود اما الزاماً باعث کاهش نیروهای کلی نشده بلکه باعث افزایش نیروهای وارده می‌شود. برای بررسی بیشتر، تحلیل‌های فوق برای تونل در عمق ۷ متر نیز تکرار شده تا اثر عمق دفن تونل نیز بر تغییرات پارامتر زاویه اصطکاک داخلی مشخص گردد. نتایج حاصل در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۷- اثر تغییرات میرایی بر نتایج تحلیل برای دو مدل رفتاری خاک- (الف) تنش، (ب) نیروی محوری، (ج) نیروی برشی و لنگر خمشی



شکل ۸- اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر نتایج تحلیل در عمق دفن ۱۵ متری- (الف) تنش، (ب) نیروهای دینامیکی

همانطور که در دو نمودار تنش و کرنش مشاهده می‌شود، مقادیر نتایج تحلیل در شتاب‌های کمتر اختلاف چندانی بین روش‌های خطی (L) و موهر کولمب نشان نمی‌دهد در حالی که هرچه مقادیر شتاب بیشتر می‌شود اختلاف نتایج دو مدل رفتاری نیز بیشتر می‌شود.

۴-۳- بررسی تغییرات خصوصیات خاک بر رفتار لرزه‌ای تونل

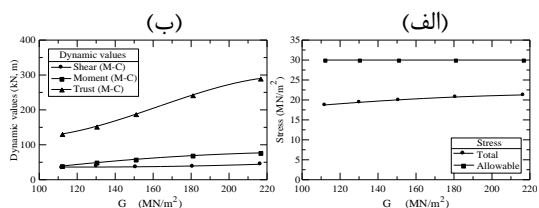
۴-۳-۱- تاثیر پارامتر میرایی خاک بر نتایج تحلیل

برای بررسی اثر تغییرات میرایی خاک بر رفتار سازه‌ای تونل، نسبت‌های میرایی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ انتخاب شده است. اختلاف نتایجی بین روش موهر کولمب و خطی وجود دارد که این اختلاف مقدار ثابتی نیست و می‌توان گفت هر چه ضریب میرایی افزایش یابد مقادیر نیروهای داخلی پوشش تونل نیز با کاهش مواجه می‌شوند. این مطلب در مورد تغییر قطر ایجاد شده در پوشش نهایی نیز با شدت بیشتری ملاحظه می‌شود و این بدان علت است که هر چه میرایی سیستم افزایش یابد، انرژی بیشتری در سیستم، مستهلک شده در نتیجه نیروهای وارد بر سازه تونل از طرف خاک نیز کاهش می‌یابد. نتایج در شکل ۷ ارائه شده است.

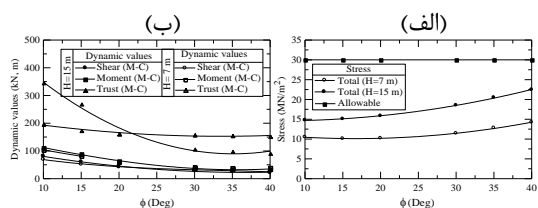
۴-۳-۲- تاثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر مقادیر تحلیل

پارامتر مهم دیگر مقاومتی خاک، زاویه اصطکاک داخلی آن می‌باشد. تحلیل برای زاویه اصطکاک‌های 10° ، 20° ، 25° ، 30° و 35° انجام گرفته که در کلیه موارد چسبندگی خاک 20 kN/m^2 در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل در شکل ۸ ارائه شده است.

ملاحظه می‌شود که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، نیروهای دینامیکی حاصل در پوشش نهایی تونل کاهش می‌یابد. علت این کاهش، افزایش مقدار G_{max} به ازای افزایش ϕ و در نتیجه افزایش سختی خاک می‌باشد. وضعیت تغییرات تنش و کرنش کل، بگونه‌ای دیگر است که نشان دهنده افزایش این مقادیر به ازای افزایش مقادیر ϕ خواهد بود. این بدان علت است که افزایش مقادیر ϕ باعث شده که نتایج خروجی تحلیل عددی در مورد نیروهای استاتیکی با افزایش روبرو شده در نتیجه نیروهای کلی ناشی از تمام مراحل تحلیل نیز افزایش یابد و باعث افزایش تنش و کرنش کل نیز گردد. با توجه به موارد عنوان شده می‌توان



شکل ۱۰- اثر تغییرات مدول برشی حداکثر بر نتایج تحلیل-الف (تنش ، ب) نیروهای دینامیکی



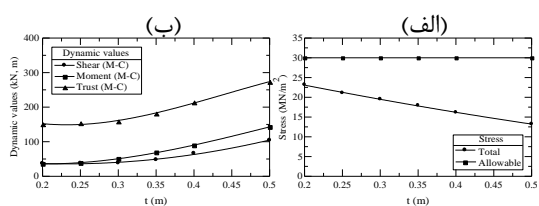
شکل ۹- اثر عمق دفن تونل بر نتایج تحلیل در تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک-الف (تنش ، ب) نیروهای دینامیکی

۴-۴ بررسی تغییرات هندسه و موقعیت تونل بر

رفتار لرزه ای آن

۴-۴-۱ ضخامت پوشش نهایی

ضخامت تونل که از پارامترهای سازه‌ای می‌باشد، بر اساس نیروهای استاتیکی و نیز دینامیکی اعمال شده محاسبه می‌گردد. بطور کلی به نظر می‌رسد که هر چه ضخامت پوشش نهایی بیشتر باشد، این پوشش توان تحمل نیروی بیشتری را دارد. برای این منظور از مدل تونل مبنا برای پوشش نهایی با ضخامت‌های ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتیمتر جهت تحلیل حساسیت استفاده شده است.



شکل ۱۱- اثر تغییرات ضخامت پوشش نهایی بر نتایج تحلیل-الف (تنش ، ب) نیروهای دینامیکی

در نمودار مربوط به تنش و کرنش کل در شکل ۱۱ نشان داده شده است که با افزایش ضخامت که باعث افزایش ممان اینرسی پوشش نهایی گردیده، مقادیر تنش و کرنش نیز کاهش می‌یابد. اما این موضوع در ارتباط با نیروهای دینامیکی سازگار نیست به این معنی که هر چه ضخامت پوشش نهایی افزایش یابد، درصد جذب انرژی دینامیکی نیز افزایش یافته و نیروهای به وجود آمده در پوشش نهایی نیز افزایش می‌یابند. با استفاده از این مطلب می‌توان عنوان کرد که همواره افزایش ضخامت پوشش نهایی تونل باعث بهبود وضعیت ناشی از نیروهای دینامیکی نمی‌شود، بلکه وضعیت این نیروها را بحرانی‌تر می‌نماید. نکته دیگر که می‌توان از روی نمودارهای نیروی دینامیکی به آن اشاره کرد این است

همانطور که مشاهده می‌شود درصد تغییرات نیروها و لنگر در حالت عمق دفن ۷ متر نسبت به ۱۵ متر کمتر است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که هر چه عمق دفن تونل کمتر و یا به عبارتی تونل سطحی‌تر باشد، اهمیت و میزان تاثیر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی خاک کمتر خواهد بود بدین معنی که تغییرات زاویه اصطکاک در عمق‌های کم تاثیر زیادی بر مقادیر نیروهای ایجاد شده در تحلیل نخواهد داشت. این مطلب را می‌توان این گونه توضیح داد که هرچه تونل سطحی‌تر باشد در حقیقت تنش نرمال اعمالی به پوشش نهایی کمتر شده در نتیجه جمله $\sigma_n \tan \phi$ اثر کمتری نسبت به جمله C در معادله مقاومت برشی دارند ($\tau = \sigma_n \tan \phi + C$).

۴-۳-۳ تاثیر انتخاب مدول برشی مناسب بر تنش‌های ایجاد شده در تونل

یکی از پارامترهای مهم در تحلیل دینامیکی مدول برشی است که این مدول با توجه به تراز کرنش برشی موجود و نیز مدول برشی حداکثر که تابع خصوصیات خاک است محاسبه می‌گردد. در این جا سعی می‌شود تا تغییرات نتایج تحلیل بر اثر تغییر G_{max} بررسی گردد. جهت این منظور تغییرات ϕ از 10° تا 40° و e را از 0.5 تا 0.8 را در آنالیز حساسیت G_{max} لحاظ کرده که نتیجه آن تغییرات مدول برشی حداکثر از 216439 kN/m^2 تا 111917 kN/m^2 می‌شود. نتایج حاصل از این تحلیل در شکل ۱۰ ارائه شده است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش G_{max} مقادیر نیروهای داخلی تونل نیز افزایش می‌یابند بطوریکه با $1/93$ برابر کردن مقدار G_{max} ، نیروی محوری $2/21$ برابر نیروی برشی $1/29$ برابر و لنگر خمشی $1/97$ برابر شده است.

دفع تونل همواره میزان تنش و کرنش کلی پوشش نهایی افزایش می‌یابد بطوریکه نمودار تغییرات تنش نشان می‌دهد که از عمق ۲۷ متری به بعد تنش کل از تنش مجاز بتن بیشتر شده است بدین معنی که برای اعماق بیشتر باید از ضخامت‌های بیشتری جهت پوشش نهایی استفاده کرد اما کرنش حداکثر با کرنش مجاز 0.003 بتن فاصله زیادی دارد. در نمودار تغییرات نیروهای دینامیکی، رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود بطوریکه در اثر افزایش عمق دفن همواره مقادیر نیروهای دینامیکی کاهش می‌یابند، بدین معنی که هر چه تونل عمق دفن بیشتری داشته باشد به علت افزایش تنش‌های جانبی و سختی خاک، متحمل نیروهای دینامیکی کمتری می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

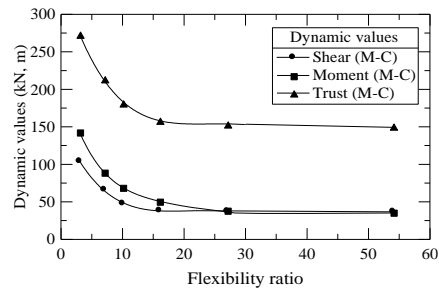
با توجه به مطالب عنوان شده در فوق که بر پایه‌ی تحقیقات و مطالعات بر روی تونل مبنا و نیز خاکهای مختلف با روش‌های تحلیلی و عددی انجام شده می‌توان به موارد زیر به عنوان نتیجه‌گیری اشاره کرد.

۱- با مشاهده‌ی نتایج تحلیل برای دو مدل رفتاری موهر کلمب و خطی ارتجاعی در حالت تغییرات شتاب حداکثر، مشخص گردید که برای مدل مبنای این محاسبات تا حدود $a_{max}=0.5g$ اختلافی بین نتایج تحلیل مشاهده نمی‌شود ولی با افزایش a_{max} این اختلاف بیشتر می‌شود. نتایج تحلیل برای دو مدل رفتاری موهر کولمب و خطی ارتجاعی در آنالیز حساسیت نسبت میرایی نشان می‌دهد که اختلاف موجود بین دو روش با افزایش ξ کاهش می‌یابد بطوریکه بیشترین اختلاف در $\xi = 0.5$ می‌باشد.

۲- در آنالیز حساسیت پارامتر زاویه اصطکاک داخلی مشخص گردید که نرخ کاهش نیروهای دینامیکی با افزایش زاویه اصطکاک، با کاهش مواجه است و از $\phi = 30^\circ$ به بعد، تغییرات نیروی برشی و لنگر خمشی ناشی از بارگذاری دینامیکی تقریباً ثابت شده است. با بررسی تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در دو عمق ۱۵ و ۷ متری نیز مشخص گردید که هر چه عمق دفن تونل کمتر و

که روند این تغییرات در ضخامت‌های پایین ثابت می‌شود. برای درک بهتر این مطلب نمودار تغییرات نیروهای دینامیکی را بر حسب تغییرات نسبت انعطاف‌پذیری در شکل ۱۲ رسم گردیده است. نسبت انعطاف‌پذیری محاسبه شده از رابطه زیر بدست آمده است.

$$F = \frac{E_m(1-\nu_l^2)r^3}{6E_lI(1+\nu_m)} \quad (9)$$

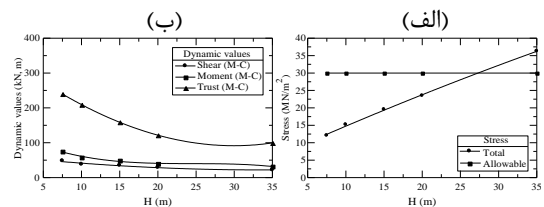


شکل ۱۲- اثر تغییرات نسبت انعطاف‌پذیری ناشی از ضخامت پوشش نهایی بر نتایج تحلیل

مشاهده می‌شود با افزایش نسبت انعطاف‌پذیری یعنی کاهش سختی پوشش نهایی، نرخ کاهش نیرو نیز کاهش می‌یابد و در یک نسبت انعطاف‌پذیری مانند $F=25$ روند تغییرات مستقل از تغییرات قطر تونل خواهد شد.

۴-۴-۲- اثر تغییرات عمق دفن تونل بر رفتار لرزه‌ای تونل

در این قسمت به بررسی تراز قرارگیری تونل و نتایج آن بر تحلیل دینامیکی پرداخته شده است. جهت بررسی، تونل‌های با عمق دفن $0.7/5$ ، 1.5 ، 2.0 و 3.5 ایجاد و تحلیل شده است. نتایج تحلیل در شکل ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۳- اثر تغییرات تراز قرارگیری تونل بر نتایج تحلیل- (الف) تنش، (ب) نیروهای دینامیکی

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش عمق

کاهش سختی پوشش، نرخ کاهش نیروهای دینامیکی نیز کاهش می‌یابد و در نسبت انعطاف‌پذیری $F=25$ روند تغییرات ثابت و مستقل از تغییرات قطر پوشش خواهد بود. تونل مبنا جهت عمق‌های ۷/۵، ۱۵، ۲۰ و ۳۵ متری مورد تحلیل قرار گرفت و مشخص گردید که همواره با افزایش عمق دفن تونل، مقادیر تنش و کرنش کلی افزایش می‌یابد بررسی مقادیر نیروهای دینامیکی در این تحقیق نشان می‌دهد که هر چه تونل عمیق‌تر باشد در برابر نیروهای زلزله امن‌تر است.

یا به عبارتی تونل سطحی‌تر باشد، درصد تغییرات و ارزش پارامتر زاویه اصطکاک داخلی خاک کمتر خواهد بود. علت این مطلب نیز کاهش مقدار σ_{II} از جمله $\tau = \sigma_{II} \tan\phi + c$ برای تونل‌های سطحی است.

۳- با مقایسه نتایج حاصل از آنالیز حساسیت بر روی پارامتر ضخامت پوشش، مشخص گردید که با افزایش ضخامت پوشش، نیروهای ایجاد شده در آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی نمودار تغییرات نیروهای دینامیکی ایجاد شده در پوشش نسبت به تغییرات نسبت انعطاف‌پذیری، مشخص گردید که با افزایش نسبت انعطاف‌پذیری یعنی

۶- منابع

- [1] Hashash Y. M. A., Hook J. J., Schmidt B. & Yao J. I. C. (2001), "Seismic Design and Analysis of Underground Structure", Tunneling and Underground Space Technology 16, 247-293.
- [2] FHWA, (2009). U.S. Department of Transportation Federal Highway administration, "Technical Manual for design and Construction of Road Tunnel". FHWA-NHI-09-010
- [3] Pakbaz M.C., Yareevand, A., (2005). "2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading", Tunnelling and Underground Space Technology 20, 411-417
- [4] Fakhimi, A.A., 1997. Theory and Manual of CA2 Software. Center for Housing and Building Research of Iran.
- [5] Shahrour, I., (1992). PECPLAS: Finite Element Software for the Resolution of Earthwork Problems. Actes du Colloque International Géotechnique & Informatique. Edition Presse ENPC, Paris. pp. 327-334.
- [6] Shahrour, F. Khoshnoudian, M. Sadek, H. Mroueh, (2010) Elastoplastic analysis of the seismic response of tunnels in soft soils, Tunnelling and Underground Space Technology
- [7] PLAXIS-B.V., (2002). PLAXIS: Finite element package for analysis of geotechnical structures, Delft, Netherland
- [8] Hardin B. O. & Dernevič, V. P. (1972), "Shear modulus and damping in soils: Design equation and curves". Journal of Soil Mech. and Found., ASCE 98 (SM7), 289-324.
- [9] Kramer S. (1996), "Geotechnical earthquake engineering", Prentice-Hall, Upper Saddle River.
- [10] Seed H.B. & Idriss, I. M. (1970), "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses", Report EERC, 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [11] Park, Kyung-Ho., Tantayopin K. & Tontavanich B. (2006), "Analytical Solutions for Seismic Design of Tunnel Lining in Bangkok MRT Subway", Proceedings of the International Symposium on Underground Excavation and Tunneling, Bangkok, Thailand, pp. 541-550.
- [12] Schnabel P. B., Lysmer J. & Seed B. H. (1972), SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, CA, USA.