

## بررسی تغییر شکل تونل‌ها در خاک ماسه‌ای با میان لایه‌های رسی توسط سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

سجاد قلی‌پور<sup>۱</sup>، حبیب شاه‌نظری\*<sup>۲</sup> و حمیدرضا رازقی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

بررسی رفتار خاک در برابر احداث تونل یکی از مباحث مورد مطالعه در حوزه ژئوتکنیک است که میزان تغییر شکل‌های تونل و نشست زمین را به دست می‌دهد. در چند دهه اخیر و در بسیاری از مناطق شهری، تکنولوژی تونل سازی توسعه و گسترش قابل توجهی داشته است و تعداد زیادی تونل با ابعاد متفاوت در اعماق نسبتاً کم و با کاربری‌های مختلف ساخته شده‌اند. نشست بیش از حد ناشی از تونل سازی، به سازه‌ها و تأسیسات سطحی و زیرزمینی مجاور آسیب جدی می‌رساند. بنابر این بررسی رفتار خاک و تغییر شکل و اندرکنش تونل با خاک مجاور از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در مقاله حاضر مطالعه‌ای بر روی رفتار تونل در خاک ماسه‌ای با میان لایه‌های رسی شیب‌دار با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی توسط سانتریفیوژ ژئوتکنیکی و همچنین مدل‌سازی عددی انجام گرفته است. مجموعه‌ای از ۱۵ آزمایش توسط دستگاه سانتریفیوژ مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران انجام و تغییر شکل‌های تونل در حالت‌های مختلف قرارگیری میان لایه‌های رسی شیب‌دار بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری میان لایه رسی در خاک ماسه‌ای تغییر شکل‌های قائم و افقی تونل را به ترتیب به طور متوسط ۲۳۰ و ۱۴۰ درصد افزایش داده است.

**واژگان کلیدی:** سانتریفیوژ، تونل، تغییر شکل، میان لایه رسی.

### ۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، تکنولوژی تونل سازی گسترش قابل توجهی داشته و تعداد زیادی تونل در مناطق شهری با کاربری‌های مختلف ساخته شده است. حفاری‌های زیرزمینی باعث تغییر تنش در محل خاک‌های اطراف تونل شده و در نتیجه تغییر شکل رخ می‌دهد. اگر این تغییر شکل‌ها در فرایند ساخت کنترل نشوند، حرکت‌های پیشرونده خاک باعث آسیب جدی به زیرسازه‌های مدفون مجاور و سازه‌های روزمینی می‌گردد. به همین دلیل بررسی رفتار خاک و تغییر شکل و اندرکنش تونل با خاک مجاور از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

هزینه انجام آزمایش‌ها در مقیاس واقعی خیلی گران، ساختشان مشکل و تکرارپذیریشان سخت است. همچنین عیب مدل‌های آزمایش شده در شتاب ۱g این است که تنش‌های در محل به طور واقعی شبیه‌سازی نمی‌شوند. مدل‌سازی توسط سانتریفیوژ یک ابزار مناسب برای ایجاد تنش‌های ثقلی در مدل‌های کوچک و ارائه مدل واقعی از تنش‌های در محل بوده و نتایج آزمایش‌ها، داده‌های با ارزشی را برای مدل‌سازی عددی فراهم می‌نماید. جهت تعیین ابعاد مدل متناسب با ابعاد پروتوتایپ و مقدار شتاب اعمالی به نمونه، مطابق آنالیز ابعادی

باید نسبت بی‌بعد  $\phi_1 = \frac{EI/b}{GD^3}$  در مدل و پروتوتایپ ثابت نگه داشته شود تا مدل‌سازی صحیح باشد [۲].

بررسی‌های فیزیکی متعددی در ارتباط با حرکت‌های خاک وابسته به ایجاد تونل در خاک‌ها انجام گرفته است. یک سری از مدل‌های تونل در ماسه خشک توسط اتکینسون و دیگران (۱۹۷۷) توصیف شد. یک تونل با قطر ۶۰ میلی‌متر در شتاب ۷۵g که متناظر با تونل پروتوتایپ به قطر ۴/۵ متر بود، آزمایش شدند. بر اساس نتایج مشاهده گردید که حداقل فشار نگهدارنده مورد نیاز برای جلوگیری از گسیختگی خیلی کوچک بوده و جز برای حالت‌های با نسبت‌های خیلی کوچک، مستقل از مقدار پوشش خاک است [۳].

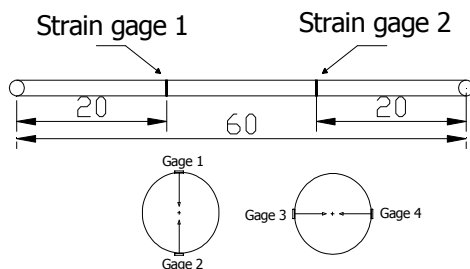
نمونه دیگری از آزمایش‌های سانتریفیوژ جهت مطالعه ناپایداری تونل در خاک رس نرم توسط میر (۱۹۷۹) انجام شده است. نتایج این تحقیق نشانگر آن است که مکانیزم گسیختگی در رس نرم به سمت بالا و بیرون از تونل تا چندین برابر قطر تونل پیشروی کرده و این یک نشست عریضی را بر سطح زمین ایجاد می‌نماید [۴].

## ۲-۲- فاکتور مقیاس N

جهت ارضای مقادیر تنش خاک مورد نیاز روی مدل و همچنین با توجه به ابعاد جعبه، فاکتور مقیاس هندسی در این سری آزمایش‌ها برابر ۱۰۰ انتخاب شده و همه آزمایش‌ها در شتاب ۱۰۰g انجام گرفتند.

## ۲-۳- مدل تونل

برای انجام این آزمایش‌ها از جعبه‌ای به ابعاد ۲۰ سانتی‌متر (عرض)، ۱۴٫۵ سانتی‌متر (ارتفاع) و ۶۰ سانتی‌متر (طول) استفاده گردید. مدل مورد استفاده جهت تونل یک لوله برنجی جدار نازک به قطر داخلی ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۰٫۷۵ میلی‌متر بود که چهار عدد کرنش‌سنج در دو مقطع از لوله مطابق شکل (۱) بر روی لوله نصب شده بود. همچنین تونل واقعی مدل‌سازی شده از جنس بتن مسلح با ضخامت جداره ۱۲ سانتی‌متر و به قطر داخلی ۳ متر با شتاب هدف ۱۰۰g در نظر گرفته شد. روی مجموعه تونل و کرنش‌سنج، ابتدا از یک لایه نازک رزین RTV سیلیکون گریس استفاده شد (شکل (۲)).



شکل ۱- کرنش‌سنج‌های نصب شده در مقاطع مورد نظر



شکل ۲- مدل تونل آماده شده جهت آزمایش

## ۲-۴- نوع و مشخصات مصالح

مصالح استفاده شده برای آزمایش‌ها شامل ماسه ریز لای‌دار (ماسه هفت باغ ماهان کرمان) و رس (رس سد ماملو) بوده که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است:

چمبون و کورته (۱۹۹۴) با استفاده از آزمایش‌های سانتریفیوژ مطالعه‌ای بر روی مدل‌های تونل در ماسه خشک انجام دادند. آنها فشارهایی را که در آن پایداری سینه کار از دست رفته و حرکت‌هایی از زمین که پس از ناپایداری وابسته به گسیختگی تونل در عمق‌های مختلف مشاهده شده، بررسی کردند. سه نوع تونل مختلف با قطرهای ۵، ۱۰ و ۱۳ متر مطابق با شتاب‌های ۵۰g، ۱۰۰g و ۱۳۰g توسط دستگاه سانتریفیوژ در خاک ماسه‌ای آزمایش شد. با انجام آزمایش‌های مختلف مشخص گردید که کاهش فشار نگهدارنده تا یک مقدار مشخص، باعث می‌شد میزان تغییر شکل مدل تونل و خاک اطراف افزایش یابد و نهایتاً گسیختگی رخ بدهد [۵].

Thorpe [۶] تغییر شکل‌های زمین در طول ایجاد تونل در ماسه را توسط مدل‌سازی سانتریفیوژ ژئوتکنیکی بررسی کرد. یک لوله تو خالی فولادی به قطر ۱۰۲ میلی‌متر و طول ۱۹۰ و ضخامت ۱۰ میلی‌متر به عنوان مدل استفاده شد. آزمایش‌ها در نمونه ماسه خشک با دانسیته نسبی ۸۰٪ برای نسبت‌های  $\frac{C}{D}$  برابر ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ در شتاب ۵۰g انجام گرفت. در این آزمایش‌ها پیشروی جابجایی خاک با کاهش فشار بالون بررسی شد و نتایج بدست آمده نشان دادند که وقتی فشار سینه تونل کاهش می‌یابد، بالای سینه کار نسبت به پایین آن بیشتر به سمت داخل جابجایی دارد.

هدف از تحقیق حاضر، بررسی رفتار تونل و تغییر شکل‌های مربوطه در حالت‌های متفاوت لایه‌های خاک بود که با استفاده از ابزارگذاری انجام شده بر روی مدل تونل، میزان تغییر شکل تونل در حالت‌های مختلف قرارگیری میان لایه‌های خاک رسی به دست آمدند. در این تحقیق ۱۵ آزمایش با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ بر روی مدل‌های تونل انجام گرفت. برای مدل‌سازی آزمایشگاهی از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده شد [۱].

## ۲-۲- مدل‌سازی سانتریفیوژ

### ۲-۱- دستگاه سانتریفیوژ مکانیک خاک

به منظور بررسی تغییر شکل تونل‌ها در خاک‌های ماسه‌ای با میان لایه‌های رسی، تعدادی آزمایش در مرکز سانتریفیوژ مکانیک خاک دانشگاه علم و صنعت انجام گرفت. مشخصات دستگاه سانتریفیوژ شامل سبد با ابعاد ۲۰×۶۰×۲۰ سانتی‌متر، شعاع دوران یک متر و امکان ایجاد شتاب گریز از مرکز برابر ۲۰۰g با ۶۲ کیلوگرم وزن می‌باشد.



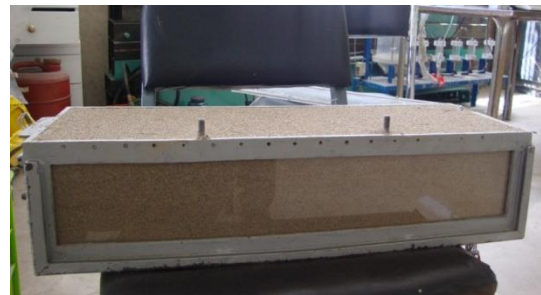
شکل ۵- نمایی از شیب ایجاد شده در میان لایه رسی

جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

Material	Unit	Sand	Clay
USCS	-	SM	CL
$\omega$ opt	-	9.8	15.8
$\gamma$ max	KN/m <sup>3</sup>	16.7	18.2
$\gamma$ min	KN/m <sup>3</sup>	12.9	-
LL	-	-	31.62
PI	-	-	12.62

## ۲-۵- آماده‌سازی و ساخت نمونه‌ها

جهت انجام آزمایش‌ها از جعبه‌ای به ابعاد  $۶۰ \times ۲۰ \times ۱۴,۵$  سانتی‌متر مطابق شکل (۳) استفاده شده که درون آن مدل تونل در ارتفاع ۲ سانتی‌متری از کف جعبه قرار گرفته است. قبل از ریختن خاک بر روی مدل ابتدا فشاری به اندازه  $۱۵۰ \text{ kPa}$  درون لوله دمیده شده و شیر بسته شد. جهت آزاد سازی فشار لوله در شتاب ماکزیمم  $۱۰۰ \text{ g}$  از یک سیستم کنترل از راه دور استفاده گردید. با استفاده از روش ریزش ماسه، خاک طوری در جعبه در لایه‌های ۲ سانتی‌متری ریخته شد، تا این که نمونه‌ای با تراکم یکسان در تمامی نقاط و با دانسیته مورد نیاز حاصل گردید. جهت بررسی میان لایه‌های رسی در ارتفاع‌های مختلف از تونل، لایه‌های رسی به ضخامت ۲ سانتی‌متر بر روی ماسه ریخته و سطح آن صاف و سپس بقیه جعبه با ماسه پر شد و سطح نهایی آن نیز صاف و پس از بستن درب جعبه و محکم کردن آن، جعبه جهت آزمایش به سبد دستگاه منتقل شد. شکل (۴) نمایی از شیب ایجاد شده در میان لایه رسی و شکل (۵) نیز نمونه‌ای کامل از آن را پس از آماده‌سازی نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمونه‌ای کامل پس از آماده‌سازی



شکل ۴- مدل تونل جای گرفته درون جعبه

## ۲-۶- روش انجام آزمایش‌ها

پس از آماده‌سازی نمونه، مجموعه جعبه به همراه متعلقات آن، با دقت و به آرامی درون سبد دستگاه قرار گرفته و پس از آن با وصل کردن کانال‌های دیتالاگر با افزایش سرعت دوران موتور، شتاب‌دهی انجام شد، با تنظیم فرکانس Inverter دستگاه، شتاب را در گام‌های  $۱۰ \text{ g}$  تا سقف  $۱۰۰ \text{ g}$  بالا برده و در هر مرحله برای رسیدن به حالت پایدار جهت ثبت نتایج، شتاب برای مدتی ثابت نگه داشته شد.

## ۳- نتایج آزمایش‌ها

در این تحقیق چند نوع آزمایش با هدف بررسی سه پارامتر شامل دانسیته نسبی، عمق و شیب قرارگیری میان لایه رسی در ارتفاع انجام گرفت، طوری که سه حالت قرارگیری میان لایه خاک رسی در ارتفاع، با چهار زاویه مختلف در حالت دانسیته نسبی متوسط بررسی گردیده که یکی از حالت‌ها به طور شماتیک در شکل (۶) به طور نمونه برای زاویه  $۱۰$  درجه نسبت به افق مشاهده می‌شود. بررسی لایه در ارتفاع بدین صورت می‌باشد که لایه در امتداد تونل، مماس بر تاج تونل و ۲ سانتی‌متر بالای تاج تونل واقع شده که هر کدام در  $۴$  زاویه صفر،  $۱۰$ ،  $۲۰$  و  $۳۰$  درجه بررسی شدند. البته جهت بررسی اثر دانسیته نسبی بر تغییر شکل‌های مدل تونل، سه آزمایش مختلف نیز در دانسیته‌های نسبی بخش ماسه‌ای، حالت سست ( $۰,۳۰$ )، متوسط ( $۰,۵۵$ ) و متراکم ( $۰,۸۰$ ) انجام گرفت. تغییر شکل‌های تونل برای دو حالت تغییر شکل قائم و افقی بررسی شده که در حالت تغییر شکل قائم، قطر اولیه تونل کم و در تغییر شکل افقی قطر تونل افزایش یافته است. در گراف‌های ارائه شده، نمودار تغییر شکل قائم تونل اندازه کاهش قطر و نمودار تغییر شکل افقی اندازه افزایش شعاع تونل را نشان می‌دهد.

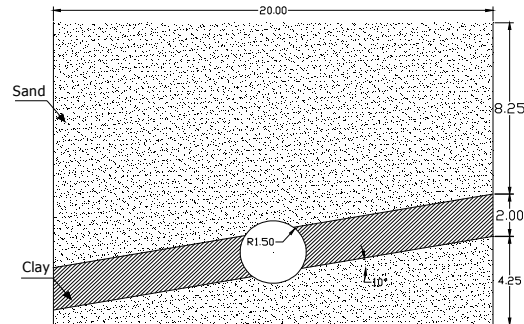
شکل خاک باید کمتر گردد ولی سربار لوله نیز زیاد شده و تغییر شکل بوجود آمده در خود لوله نیز افزوده می‌شود. شاید بتوان گفت که با افزایش دانسیته نسبی، اثر وزن و سربار خاک بر اثر افزایش مدول الاستیسیته خاک غلبه کرده و تغییر شکل به دست آمده در لوله بیشتر می‌گردد.

### ۳-۲- تأثیر عمق قرار گیری میان لایه بر تغییر شکل‌ها

در اشکال (۷) تا (۱۰) نمودارهای تغییر شکل قائم تونل و در جدول (۳) مقادیر تغییر شکل‌های قائم و افقی در حالتی که میان‌لایه‌های رسی شیب‌دار با زوایای مختلف در اعماق متفاوت قرار گرفته‌اند، ارائه شده است. یادآوری می‌گردد که مقادیر تغییر شکل‌ها بر اساس اندازه واقعی تونل و در ابعاد پروتوتایپ ذکر شده‌اند. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، در همه حالات با افزایش شتاب تغییر شکل‌های تونل در هر دو جهت افقی و قائم افزایش می‌یابد، که نسبت افزایش تغییر شکل‌های قائم به افقی بیشتر می‌باشد. با توجه به حجم بالای نمودارها، نمودارهای تغییر شکل قائم در این بخش ارائه نشده ولی در جدول به تفکیک ارائه شده است (روند تغییرات در هر دو حالت یکی است).

ماکزیمم تغییر شکل‌های به دست آمده برای حالتی است که میان‌لایه رسی در امتداد تونل واقع شده است و کمترین آن در حالتی است که لایه در بالای تونل و به فاصله ۲ سانتی‌متری واقع شده است. همچنین هر چه میان‌لایه رسی به سمت اعماق سطحی حرکت می‌کند، تغییر شکل‌های مذکور کمتر می‌شود. نتایج به دست آمده نشان دادند که حداکثر تغییر شکل قائم و افقی تونل به ترتیب حدود ۲۳ و ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. برای مقایسه بهتر در جدول (۳) خلاصه نتایج تغییر شکل‌های قائم و افقی به صورت خلاصه شده ارائه شده است.

نتیجه به دست آمده دور از انتظار نمی‌باشد و با توجه به این که تغییر شکل خاک بر تغییر شکل لوله اثر می‌گذارد و هر چه میان‌لایه رسی در تراز پایین‌تری از سطح قرار داشته باشد به دلیل سربار موجود تغییر شکل میان‌لایه نیز زیاد شده و در نتیجه تغییر شکل لوله نیز افزایش می‌یابد. البته با توجه به این که تغییر شکل میان‌لایه رسی از خاک ماسه بیشتر می‌باشد، در حالتی که میان‌لایه رسی در امتداد تونل قرار می‌گیرد، به دلیل افزایش تغییر شکل خاک رس، بیشترین تغییر شکل لوله در این حالت به دست آمده است.



شکل ۶- نمونه‌ای از حالت قرارگیری میان لایه

### ۳-۱- تأثیر دانسیته نسبی بر تغییر شکل‌های تونل

تعداد سه آزمایش با تغییر دانسیته نسبی ماسه در حالت بدون میان‌لایه رسی، جهت مقایسه نتایج و نیز بررسی پارامتر دانسیته انجام گرفت. با افزایش شتاب تغییر شکل‌های افقی و قائم تونل افزایش یافته که تغییر شکل قائم تونل بیشتر از تغییر شکل افقی بود، که کاملاً منطقی و مورد انتظار است.

مطابق نتایج به دست آمده در جدول (۲) مشاهده شد که تغییر شکل‌های قائم و افقی نسبت به حالتی که میان‌لایه رسی حضور داشت، به مراتب مقادیر کمتری را که ماکزیمم آن به ترتیب ۷ و ۴ میلی‌متر بود، بدست دادند. همچنین در حالتی که دانسیته نسبی از ۰/۳ به ۰/۵۵ رسید، با افزایش تنش سربار متناظر مقادیر تغییر شکل قائم حدود ۱۰٪ افزایش و زمانی که به ۰/۸ رسید، درصد افزایش تغییر شکل قائم به حدود ۴۵٪ رسید.

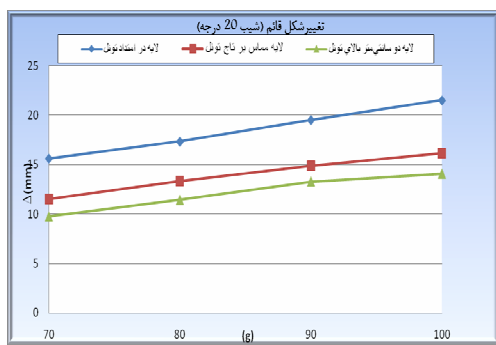
### جدول ۲- نتایج تغییر شکل‌های ثبت شده در حالت بدون حضور میان‌لایه برای دانسیته‌های مختلف بخش ماسه‌ای

دانسته نسبی	تنش سربار متناظر (kpa)	تغییر شکل قائم (mm)	تغییر شکل افقی (mm)
۰/۳۰	۱۳۰ (kpa)	۵/۱	۲/۷
۰/۵۵	۱۴۰ (kpa)	۵/۷	۳/۲
۰/۸۰	۱۵۰ (kpa)	۷/۱	۴/۳

نتیجه مشاهده شده را این‌طور می‌توان توجیه نمود که چون حجم جعبه و ارتفاع سربار بر روی تاج تونل (حدود ۹/۵ متر) ثابت می‌باشد، در نتیجه با افزایش دانسیته نسبی و تراکم خاک ریخته شده، چگالی و وزن خاک قرار گرفته در جعبه نیز افزوده می‌شود و در نتیجه مقدار تنش سرباری که بر روی مدل لوله قرار می‌گیرد (مطابق با جدول (۲))، در این حالت بیشتر بوده و تغییر شکل به وجود آمده در مدل نیز بیشتر می‌شود. با افزایش دانسیته نسبی مدول الاستیسیته خاک نیز افزایش یافته و تغییر

جدول ۳- مقادیر تغییر شکل‌ها در حالت وجود میان لایه

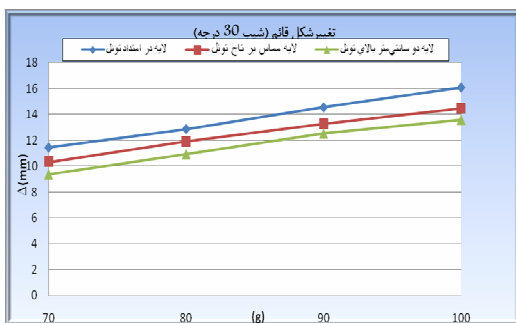
تغییر شکل قائم (mm)																
شیب لایه	0				10				20				30			
g	100	90	80	70	100	90	80	70	100	90	80	70	100	90	80	70
امتداد تونل	10	11.3	12.9	14.3	16.1	18.6	20.9	23	15.6	17.3	19.5	21.5	11.4	12.9	14.5	16.1
تاج تونل	8.3	9	10	11	8.3	9.4	10.9	12.1	11.5	13.3	14.9	16.2	10.3	11.9	13.2	14.5
بالای تونل	6.4	7.9	9	9.7	7.5	8.8	9.8	11.1	9.8	11.4	13.3	14.1	9.4	10.9	12.5	13.6
تغییر شکل افقی (mm)																
شیب لایه	0				10				20				30			
g	100	90	80	70	100	90	80	70	100	90	80	70	100	90	80	70
امتداد تونل	4.2	4.8	5.5	6.1	8.8	9.9	11.3	12.8	6.9	7.7	8.7	10	5.3	5.9	6.9	7.5
تاج تونل	3.3	3.5	3.8	4.2	3.4	3.8	4.3	4.8	5.5	6.4	7	8.1	4.8	5.4	6	6.9
بالای تونل	2.7	3.1	3.6	4	3.4	4.1	4.6	5	4.6	5.2	5.9	6.4	4.6	5.4	5.8	6.4
تغییر شکل قائم (mm)																
شیب لایه	0				10				20				30			
g	100	90	80	70	100	90	80	70	100	90	80	70	100	90	80	70
امتداد تونل	10	11.3	12.9	14.3	16.1	18.6	20.9	23	15.6	17.3	19.5	21.5	11.4	12.9	14.5	16.1
تاج تونل	8.3	9	10	11	8.3	9.4	10.9	12.1	11.5	13.3	14.9	16.2	10.3	11.9	13.2	14.5
بالای تونل	6.4	7.9	9	9.7	7.5	8.8	9.8	11.1	9.8	11.4	13.3	14.1	9.4	10.9	12.5	13.6
تغییر شکل افقی (mm)																
شیب لایه	0				10				20				30			
g	100	90	80	70	100	90	80	70	100	90	80	70	100	90	80	70
امتداد تونل	4.2	4.8	5.5	6.1	8.8	9.9	11.3	12.8	6.9	7.7	8.7	10	5.3	5.9	6.9	7.5
تاج تونل	3.3	3.5	3.8	4.2	3.4	3.8	4.3	4.8	5.5	6.4	7	8.1	4.8	5.4	6	6.9
بالای تونل	2.7	3.1	3.6	4	3.4	4.1	4.6	5	4.6	5.2	5.9	6.4	4.6	5.4	5.8	6.4



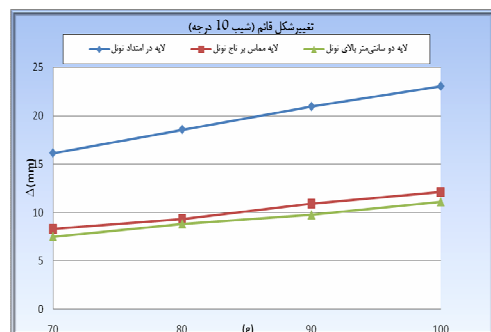
شکل ۹- نمودار تغییر شکل قائم در ارتفاع‌های مختلف برای شیب ۲۰ درجه



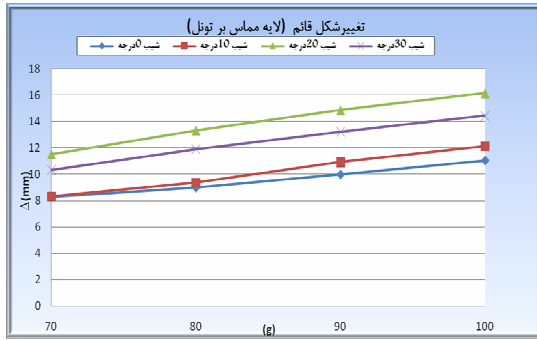
شکل ۷- نمودار تغییر شکل قائم در ارتفاع‌های مختلف برای شیب صفر درجه



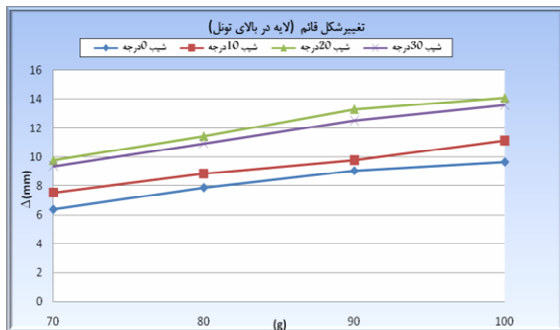
شکل ۱۰- نمودار تغییر شکل قائم در ارتفاع‌های مختلف برای شیب ۳۰ درجه



شکل ۸- نمودار تغییر شکل قائم در ارتفاع‌های مختلف برای شیب ۱۰ درجه



شکل ۱۲- نمودار تغییر شکل قائم در شیب‌های مختلف برای میان لایه مماس بر تونل

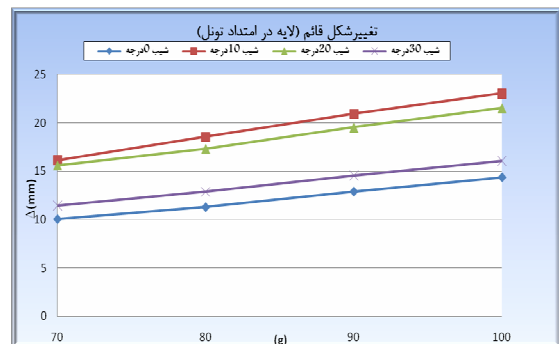


شکل ۱۳- نمودار تغییر شکل قائم در شیب‌های مختلف برای میان لایه در بالای تونل

### ۳-۳- تأثیر شیب قرارگیری میان لایه بر تغییر شکل‌ها

نمودارهای تغییر شکل‌های قائم تونل در حالتی که پارامتر شیب میان لایه‌ها تغییر می‌کند، در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) و مقادیر تغییر شکل‌های قائم و افقی برای مقایسه بهتر در جدول (۴) ارائه شده است. نمودارها و مقادیر جدول نشان می‌دهند، در حالتی که میان لایه رسی در امتداد تونل قرار می‌گیرد، با افزایش شیب میان لایه از ۱۰ درجه به ۳۰ درجه مقدار تغییر شکل‌های تونل هم در حالت افقی و هم در حالت قائم کاهش می‌یابد. میزان کاهش تغییر شکل قائم از شیب ۱۰ درجه به شیب ۲۰ درجه حدود ۵ درصد و از زاویه ۱۰ درجه به ۳۰ درجه حدود ۴۰٪ می‌باشد. ولی برای دو حالت دیگر قرارگیری میان لایه، می‌توان گفت که عکس حالت فوق مشاهده شده است. به طوری که با افزایش شیب میان لایه تغییر شکل‌ها افزایش یافته است. این توضیح که درصد افزایش از شیب ۱۰ تا ۳۰ درجه برای تغییر شکل‌های قائم و افقی ۲۵ و ۲۰ درصد می‌باشد.

نتیجه به دست آمده را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که، با توجه به این که هر چه تراز میان لایه به سطح نزدیک‌تر می‌شود، تغییر شکل تونل کمتر به دست می‌آید و این که بیشترین تغییر شکل به دست آمده در حالتی است که میان لایه در امتداد تونل قرار می‌گیرد، می‌توان نتایج مشاهده شده را به این نحو توجیه کرد که، در حالتی که میان لایه در امتداد تونل هست با افزایش شیب یک سمت به سطح نزدیک‌تر شده و سمت دیگر به کف تونل متمایل می‌گردد و قسمتی از دیواره‌های تونل به جای خاک رس سست با خاک ماسه متراکم‌تر احاطه می‌گردد و در نتیجه با افزایش شیب میان لایه، تغییر شکل تونل در این حالت کاسته می‌شود. ولی در دو حالت دیگر به علت این که لایه‌ها سطحی می‌باشند، با افزایش شیب یک سمت میان لایه به طرف پایین متمایل شده و در حالت امتداد تونل قرار می‌گیرد، بنابر این تغییر شکل‌ها به طور جزئی افزایش نشان می‌دهند.



شکل ۱۱- نمودار تغییر شکل قائم در شیب‌های مختلف برای میان لایه در امتداد تونل

جدول ۴- مقادیر تغییر شکل قائم و افقی در لایه‌های مختلف

تغییر شکل قائم (mm)												
	لایه امتداد تونل				لایه تاج تونل				لایه بالای تونل			
g	100	90	80	70	100	90	80	70	100	90	80	70
0	10	11.3	13	14.3	8.3	9	10	11	6.4	7.9	9	9.7
10	16.1	18.6	21	23	8.3	9.4	11	12.1	7.5	8.8	9.8	11.1
20	15.6	17.3	20	21.5	12	13	15	16.2	9.8	11	13.3	14.1
30	11.4	12.9	15	16.1	10	12	13	14.5	9.4	11	12.5	13.6
تغییر شکل افقی (mm)												
	لایه امتداد تونل				لایه تاج تونل				لایه بالای تونل			
g	100	90	80	70	100	90	80	70	100	90	80	70
0	4.2	4.8	5.5	6.1	3.3	3.5	3.8	4.2	2.7	3.1	3.6	4
10	8.8	9.9	11	12.8	3.4	3.8	4.3	4.8	3.4	4.1	4.6	5
20	6.9	7.7	8.7	10	5.5	6.4	7	8.1	4.6	5.2	5.9	6.4
30	5.3	5.9	6.9	7.5	4.8	5.4	6	6.9	4.6	5.4	5.8	6.4

## ۴- جمع‌بندی و نتیجه گیری

تونل هست، نسبت به حالتی که نزدیک سطح نمونه می‌باشد

به طور متوسط ۶۰٪ به دست آمد.

۵. در حالتی که میان‌لایه رسی شیب‌دار در امتداد عرضی تونل

قرار گرفت، تغییر شکل‌های تونل در حالت متناظر کمی

کمتر (حدود ۱۵ درصد) به دست آمدند.

تعداد ۱۵ آزمایش با چهار نوع شیب مختلف برای میان‌لایه‌های رسی درون خاک ماسه‌ای در سه عمق متفاوت، توسط دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیک انجام گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان موارد زیر را به عنوان نتیجه‌گیری کلی ارائه نمود:

۱. ماکزیمم مقدار تغییر شکل قائم و افقی برای حالت بدون

میان‌لایه رسی، به ترتیب ۷ و ۴ میلی‌متر به دست آمد، در

حالی که برای حالت با میان‌لایه رسی ۲۳ و ۱۲ میلی‌متر

حاصل شد، می‌توان نتیجه گرفت که در حالتی که یک

میان‌لایه رسی در درون خاک ماسه‌ای حضور داشته باشد، به

طور متوسط تغییر شکل‌های قائم و افقی نسبت به حالت

بدون حضور میان‌لایه به ترتیب حدود ۲۲۵ و ۱۸۰٪ افزایش

نشان می‌دهد.

۲. در کلیه شیب‌ها و حالات مختلف قرارگیری میان‌لایه خاک

رسی، تغییر شکل‌های قائم و افقی تونل در حالتی ماکزیمم

مقدار را به دست دادند که میان‌لایه در امتداد و راستای تونل

قرار داشت.

۳. در حالتی که میان‌لایه رسی در امتداد و راستای تونل قرار

داشت، با افزایش شیب میان‌لایه‌ها تغییر شکل‌ها حدود ۳۵

الی ۴۰ درصد کاهش نشان دادند ولی برای دو حالت دیگر با

افزایش شیب میان‌لایه‌ها تغییر شکل‌ها نیز حدود ۲۰ الی

۲۵٪ افزایش یافتند.

۴. به طور کلی هر چه میان‌لایه خاک رسی از تاج تونل به سمت

سطح نمونه نزدیک می‌شود، تغییر شکل تونل نیز کاسته

می‌شود که این کاهش برای حالتی که میان‌لایه در امتداد

## ۵- مراجع

[۱] قلی‌پور، س.، "بررسی تغییر شکل و پایداری تونل‌ها در

خاک‌های ماسه‌ای لایه‌ای شیب‌دار"، پایان‌نامه‌ی

کارشناسی ارشد، گرایش خاک و پی، دانشگاه علم و

صنعت ایران، تهران، ۱۳۸۹.

[2] Taylor, R. N., "Geotechnical Centrifuge Technology", Blackie Academic & Professional, 1995.

[3] Atkinson, J. H., Potts, D. M., Schofield, A. N., "Centrifugal Models Tests on Shallow Tunnels in Sand", Tunnels and Tunnelling, 1977, Vol. 9, No. 1, pp. 59-64.

[4] Mair, R. J., "Centrifugal Modelling of Tunnelling Construction in Soft Clay", PhD Thesis, University of Cambridge, UK, 1979.

[5] Chambon, P., Corté, J. F., "Shallow Tunnels in Cohesionless Soil: Stability of the Tunnel Face", Journal of Geotechnical Engineering (ASCE), 1994, Vol. 120, No. 7, July pp. 1148- 1165.

[6] Thorpe, J. P., "Ground Movements During Tunnelling Sand", Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2007.