

### تأثیر بارگذاری استاتیکی و شبه استاتیکی روباره بر جابجایی دیواره‌ی تونل

#### یادداشت فنی

محمد حاجی عزیزی<sup>۱\*</sup>؛ منصور مصلا نژاد<sup>۲</sup>؛ مسعود نصیری<sup>۳</sup>؛ یزدان شمس ملکی<sup>۴</sup>

۱-دانشیار؛ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، mhazizi@yahoo.com

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، mmosalla@shirazu.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک؛ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، m.nasiri.edu@gmail.com

۴- دانش آموخته دکتری ژئوتکنیک؛ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، yshamsmaleki@yahoo.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۵/۰۶

شماره صفحات: ۱۲۱ تا ۱۳۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2020.9331.1388

واژگان کلیدی	چکیده
تونل تنش-کرنش روش‌های عددی تحلیل شبه استاتیکی ارتفاع روباره	ارتفاع روباره تونل، تأثیر قابل توجهی در پایداری و یا ناپایداری تونل‌های سطحی دارد. در این پژوهش تأثیر ارتفاع روباره تونل سطحی در سنگ‌های مقاوم در حالت استاتیکی و شبه استاتیکی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. تحلیل تنش-کرنش برای تونل‌های سطحی در سنگ‌های مقاوم و در حالت شبه استاتیکی با استفاده از روش تفاضل محدود، موضوع جدیدی است که در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. با توجه به زلزله خیز بودن کشور ایران، تحلیل شبه استاتیکی تونل‌ها به جای تحلیل استاتیکی، ضرورت دارد و در این مقاله نتایج به‌دست آمده از تحلیل شبه استاتیکی نسبت به تحلیل استاتیکی قابل تأمل است. با توجه به سطحی بودن تونل، تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از کف تونل در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل استاتیکی علاوه بر روش تفاضل محدود ( $FLAC^{2D}$ ) به کمک روش اجزای محدود ( $PLAXIS^{2D}$ ) نیز، مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصل شده از هر دو روش از نزدیکی و تطابق قابل قبولی برخوردار می‌باشند. تغییر مکان افقی در کناره تونل در حالت شبه استاتیک در حدود ۵ برابر تحلیل استاتیک بدست آمده است و تغییر مکان قائم در تاج تونل در دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی تقریباً به یکدیگر نزدیکند. علت این نتایج را می‌توان این چنین توجیه کرد که شتاب افقی اعمال شده به تونل، تغییر مکان افقی کناره‌های تونل را تحت تأثیر خود قرار داده است و این شتاب افقی در تغییر مکان قائم تونل تأثیر قابل توجهی نداشته است.

زمین احداث شده‌اند؛ همچنین بخش‌هایی از مترو که نزدیک به ایستگاه‌ها هستند نیز، در قسمت‌های سطحی زمین واقع شده‌اند. مواردی که ذکر شد، جزو تونل‌های سطحی به حساب می‌آیند. اندازه ارتفاع روباره در تونل‌های سطحی، تأثیر قابل توجهی بر پایداری آن دارد، به ویژه اگر ساختمان‌های بلند مرتبه در نزدیکی‌های مسیر تونل واقع

#### ۱- مقدمه

امروزه در شهرهای بزرگ، عبور و مرور وسایل نقلیه با مشکل کمبود فضای تردد و وقت گیر بودن رفت و آمدها مواجه است. متروها و راه‌های زیرزمینی، از راهکارهای موثری هستند که می‌توانند مشکلات مذکور را تا حد زیادی بر طرف کنند. اغلب ایستگاه‌های مترو در قسمت‌های سطحی

\* کرمانشاه؛ تاق بستان؛ دانشگاه رازی؛ دانشکده مهندسی؛ گروه عمران؛ کد پستی: ۶۷۱۴۴۱۴۹۷۱؛ تلفن: ۰۸۳-۳۴۲۸۳۲۶۴؛ دورنگار ۰۸۳-۳۴۲۸۳۲۶۴

شده باشند. نشست زمین در اثر احداث تونل سطحی، مسئله‌ای معمول است، اما آنچه مهم است، این که این نشست‌ها در حد مجاز باشند؛ بنابراین تعیین مقدار تغییر مکان تاج تونل و فشار وارد بر نگهدارنده تونل جهت جلوگیری از نشست‌های بزرگ سطحی ضرورت دارد. بدون شک تغییر مکان تاج تونل و تأثیر آن بر سازه‌های مجاور، مساله بسیار مهمی است که در طراحی تونل مورد توجه قرار می‌گیرد. در تونل‌های سطحی، سطح گسیختگی می‌تواند از سقف تونل تا سطح زمین ادامه داشته باشد؛ بنابراین بررسی وضعیت سطح گسیختگی در تونل‌های سطحی می‌تواند مبنای خوبی برای طراحی سازه نگهدارنده تونل سطحی باشد. تحلیل پایداری تونل‌های سطحی، موضوع مهمی است که توسط محققان مختلف مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه منابعی بررسی می‌شود که مرتبط با ارتفاع روباره و تأثیر آن بر نگهدارنده تونل است.

به‌منظور کنترل اعتبار مکانیسم شکست و فشار بحرانی وارد بر نگهدارنده تونل، رابطه‌ای توسط سوبرا و همکاران (Soubra, et al., 2008) پیشنهاد گردید. آن‌ها نتیجه گرفتند که معیار انتخابی برای مکانیزم شکست بر مقادیر فشار بحرانی موثر است. چامبون و کورت (Chambon and Corté, 1994) بر اساس نتایج حاصل از آزمایش سانتریفیوژ نتیجه گرفتند که فشار وارد بر نگهدارنده تونل که توسط مکانیسم شکست در حالت سه بعدی محاسبه شده است، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و از طرفی نتایج حاصل از مکانیسم شکست در حالت دو بعدی مقدار فشار وارد بر نگهدارنده تونل را دست بالا محاسبه می‌کند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش مرز بالا در تحلیل حدی، روش موثری برای تحلیل پایداری تونل‌های سطحی است؛ به‌طوری که اعتبار آن توسط آزمایش مدل سانتریفیوژ تأیید گردیده است.

بررسی تغییر شکل اطراف تونل و نشست ایجاد شده در تونل‌ها توسط پژوهشگران مختلفی انجام شده است (Zarei, et al., 2016; Rezaei, et al., 2018; Jalili and Beik, 2018; Hajiazizi and Hashemi, 2017; Han, et al., 2017; Singh, et al., 2017). مقدار فشار وارد بر نگهدارنده تونل توسط ترزاقی (Terzaghi, 1946) با ترکیب نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی بر حسب عرض و ارتفاع تونل برای سنگ‌های سست و ضعیف ارائه گردیده

است. رابطه ارائه شده توسط ترزاقی برای تونل‌های با عرض کمتر از ۶ متر، مناسب است. سیسیل (Cecil, 1970) رابطه و طبقه‌بندی ترزاقی را جامع ندانست؛ زیرا خواص سنگ در آن در نظر گرفته نشده است. بر مبنای ادعای نداشتن ارتباط مستقیم تغییرات فشار وارد بر نگهدارنده تونل با عرض تونل، بارتن و همکاران (Barton, et al., 1974) رابطه فشار وارد بر نگهدارنده تونل را مستقل از عرض تونل‌های سنگی ارائه دادند. ورمان (Verman, 1993) در بررسی عمل و عکس‌العمل سنگ و نگهدارنده تونل ادعا کرد که فشار وارد بر نگهدارنده تونل، تقریباً مستقل از عرض تونل است. ژوئل و همکاران (Goel, et al., 1996)، در بررسی اثر ابعاد تونل بر فشار وارد بر نگهدارنده دریافتند، در زمین‌هایی که ویژگی فشارندگی ندارند، اثر ابعاد تونل بر فشار وارد بر نگهدارنده قابل چشم پوشی است، اما این اثر در زمین‌هایی قابل توجه است که چنین ویژگی را دارا می‌باشند؛ بنابراین فشار وارد بر نگهدارنده تونل و مقدار تغییر مکان تاج و کناره‌های تونل، از موضوعات مهم در احداث تونل‌های سطحی است. مقایسه رفتار فشارندگی تونل‌هایی در ایران (تونل نوسود و تونل  $T_4$ ) به‌صورت مطالعه موردی توسط محققان مختلفی انجام شده است (Fatemi Aghda, et al., 2016; Ajalloeian, et al., 2017).

سنگ‌های فشارنده (بدون آنکه حجم آن‌ها به‌صورت محسوسی افزایش یابد) بر اثر اعمال تنش به آرامی به سمت تونل پیشروی می‌کنند. به‌طور کلی، فشارندگی بر اثر افزایش تنش برشی، منجر به حرکت اطراف تونل به سمت داخل آن می‌شود.

در این پژوهش رویکرد جدیدی به فشار وارد بر نگهدارنده تونل و تغییر مکان تاج و کناره‌های تونل ارائه شده است. با افزایش ارتفاع روباره تونل، مقدار تنش و تغییر مکان نگهدارنده تونل دایره‌ای در دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی، به‌دست می‌آید؛ در نتیجه می‌توان حداقل ارتفاع لازم برای روباره تونل را به‌دست آورد. حداقل ارتفاع لازم برای روباره تونل، بیانگر کمترین فشار ممکن بر نگهدارنده تونل خواهد بود. در مطالعات قبلی، تحلیل تنش-کرنش تونل‌ها در حالت استاتیکی انجام گرفته است. در تحقیق حاضر، تحلیل تنش-کرنش در حالت شبه استاتیکی و با استفاده از روش‌های تفاضل محدود و اجزای محدود انجام

پارامتری مهم در طراحی تونل است. هوک و براون تنش‌های برجای زیادی را در نقاط مختلف دنیا اندازه گرفتند و متوجه شدند که تقریباً مقدار تنش قائم، معادل با تنش حاصل از ارتفاع روباره است (Hoek and Brown, 1980). تنش‌های افقی محلی، برای روباره کمتر از ۲۰۰۰ متر در محدوده روابط زیر قرار می‌گیرند:

$$\sigma_H < 40 + 0.5 \sigma_V \text{ (MPa)} \quad (1)$$

$$\sigma_h > 2.7 + 0.3 \sigma_V \text{ (MPa)} \quad (2)$$

$$\sigma_V \cong \gamma z \quad (3)$$

$\gamma$  وزن مخصوص سنگ و  $z$  عمق مکان مورد نظر در زیر سطح زمین است. استیفانسون (Stephansson, 1993) تنش‌های افقی و قائم محلی در اعماق کمتر از ۱۰۰۰ متر را با استفاده از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی مطابق با روابط (۴) و (۵) پیشنهاد داد:

$$\sigma_H = 2.8 + 1.48 \sigma_V \text{ (MPa)} \quad (4)$$

$$\sigma_h = 2.2 + 0.89 \sigma_V \text{ (MPa)} \quad (5)$$

همچنین سنگوپتا (Sengupta, 1998) و شوروی (Sheorey, et al., 2001) روابط (۶) و (۷) را برای محاسبه تنش‌های افقی محلی در اعماق کمتر از ۴۰۰ متر پیشنهاد دادند:

$$\sigma_H = 1.5 + 1.2 \sigma_V \text{ (MPa)} \quad (6)$$

$$\sigma_h = 1.0 + 0.5 \sigma_V \text{ (MPa)} \quad (7)$$

بنابراین می‌توان تنش‌های افقی و قائم را در خاک و سنگ به کمک روابط ارائه شده به دست آورد. هر چند که روابط ارائه شده برای تنش‌های افقی در خاک، یکسان و در سنگ متفاوت هستند. در این پژوهش از روابط ارائه شده برای تونل‌های حفاری شده در اعماق کم (روابط ۶ و ۷) استفاده شده است.

شده است. هدف از این پژوهش، بررسی رفتار تونل در حالت شبه استاتیکی است. اهمیت این موضوع در مناطقی است که زلزله خیزند.

## ۲- اثر اندازه ابعاد تونل بر فشار وارد بر نگهدارنده

اندازه‌گیری فشار وارد بر نگهدارنده تونل و تاثیر اندازه ابعاد تونل بر آن، موضوعات مهمی هستند که مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. بعضی از محققان نشان داده‌اند که فشار وارد بر نگهدارنده تونل، مستقل از اندازه ابعاد تونل است (Daemen, 1975; Jethwa, 1981). از طرفی، محققان دیگری بوده‌اند که اعتقاد به وابستگی مستقیم فشار وارد بر نگهدارنده تونل بر اندازه تونل داشته‌اند (Terzaghi, 1946). در تحقیقات مختلف انجام شده، پژوهشگران دریافته‌اند که در تونل‌هایی با سقف مسطح، فشار وارد بر نگهدارنده با تغییر عرض و یا اندازه تونل تغییر می‌کند؛ اما در تونل‌هایی که سقف آنها قوسی است، فشار وارد بر نگهدارنده مستقل از اندازه تونل است (Singh and Goel, 2011). ژوئل و همکاران (Goel, et al., 1995)، روش بارتن و همکاران (Barton, et al., 1974) و همچنین روش سینگ و همکاران (Singh, et al., 1992) را با اندازه گیری فشار وارد بر روباره ۲۵ تونل مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها متوجه شدند که روش بارتن و همکاران در زمین‌هایی با ویژگی فشارندگی قابل اعتماد نیست. ژوئل و همکاران (Goel, et al., 1995) همچنین دریافته‌اند که روش سینگ و همکاران (Singh, et al., 1992) برای تونل‌های با دهانه بیش از ۹ متر در زمین‌های با ویژگی فشارندگی، نیز معتبر نمی‌باشد.

## ۳- اثر عمق و یا ارتفاع روباره تونل بر فشار وارد بر نگهدارنده

به‌علت وجود روباره در توده‌های سنگ، تنش‌های برجا در آن‌ها ایجاد می‌شود. از طرفی فشار وارد بر نگهدارنده تونل ناشی از همین تنش‌های برجا است؛ بنابراین عمق تونل و یا ارتفاع روباره،

کوچک شده‌اند که نتایج حاصل از تحلیل در دو شبکه آخر، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. در این مدل‌ها از شرایط مرزی در شرایط استاتیکی استفاده شده است، یعنی تغییر مکان مرز پایین مدل در هر دو جهت افقی و قائم برابر با صفر در نظر گرفته شده است، اما تغییر مکان مرزهای کناری مدل فقط در جهت افقی برابر با صفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- المان‌بندی و موقعیت تونل در روش تفاضل محدود



شکل ۳- المان‌بندی و موقعیت تونل در روش اجزای محدود

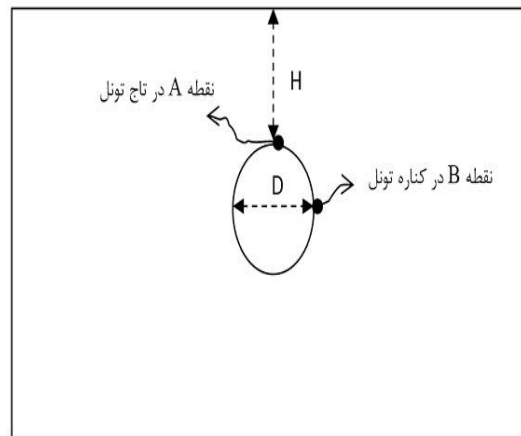
شکل ۴، تغییرات ضخامت روباره را با تغییر مکان افقی در نقطه B (دیواره‌ی تونل) به دو روش تفاضل محدود و اجزای محدود نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت روباره مقدار تغییر مکان کاهش می‌یابد.

همچنین شکل ۵، تغییرات ضخامت روباره را با تغییر مکان قائم در تاج تونل (نقطه‌ی A) به دو روش تفاضل محدود و اجزای محدود نشان می‌دهد. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع روباره، مقدار تغییر مکان کاهش می‌یابد. تطابق بسیار خوب حاصل از نتایج دو روش به خوبی در شکل ۴ و شکل ۵ قابل مشاهده است. در شرایط یکسان جنس، لایه‌بندی و دیگر مشخصات مقاومتی

#### ۴- تحلیل استاتیکی اثر ارتفاع روباره بر تغییر مکان و تنش در تونل

شکل ۱، مقطع دایره‌ای تونل را در یک توده سنگ مقاوم نشان می‌دهد که ارتفاع روباره وارد بر تونل دارای ضخامت  $H$  است.

نحوه مدل‌سازی به این شکل بوده است که ابتدا فضای مسئله و ابعاد مدل و مش بندی‌های لازم ساخته می‌شود و مرزبندی‌های لازم به اطراف مدل اختصاص داده می‌شود و مشخصات مصالح نیز برای مدل تعریف می‌شود. سپس تونل در موقعیت مورد نظر احداث می‌شود و در گام آخر، حفاری انجام خواهد شد و تحلیل برای تونل انجام می‌گردد. مدل رفتاری الاستیک برای توده سنگ در نظر گرفته شده است. قطر تونل ۸ متر، وزن مخصوص سنگ ۲۶/۵ کیلونیوتن بر متر مکعب، ضریب پواسون ۰/۲۵ و مدول الاستیسیته ۵۵/۸ گیگاپاسکال بوده است. تحلیل در شرایط استاتیکی با استفاده از نرم افزارهای تفاضل محدود و اجزای محدود دو بعدی انجام شده است.



شکل ۱- مقطع تونل دایره‌ای در توده سنگ مقاوم

شکل ۲ و شکل ۳، شبکه‌ی المان‌ها و تونل را به ترتیب در روش‌های تفاضل محدود و اجزای محدود نشان می‌دهند، که تونل در عمق  $H$  از سطح زمین قرار دارد. به منظور استهلاک تنش‌های ناشی از حفاری در مرزها، ابعاد شبکه بیش از ۵ برابر قطر تونل در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از صحت نتایج، ابتدا برای مدل‌ها تحلیل حساسیت انجام شد، به طوری که المان‌های شبکه آن قدر

با استفاده از رابطه شئوری و همکاران (Sheorey, et al., 2001)، تنش‌های افقی در تاج تونل به ترتیب زیر خواهند شد:

$$\sigma_H = 1.5 + 1.2 \sigma_v = 1.5 + 1.2 (0.02) = 1.524 \text{ MPa} \quad (8)$$

$$\sigma_h = 1.0 + 0.5 \sigma_v = 1.0 + 0.5 (0.02) = 1.01 \text{ MPa} \quad (9)$$

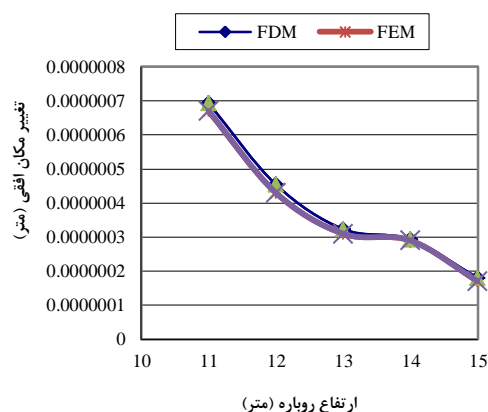
در سیستم  $Q$  بارتن، می‌توان مشاهده کرد که در تونل‌های با ارتفاع روباره بیش از ۵۰ متر، مقدار  $SRF$  برابر با ۲/۵ و با ارتفاع روباره کمتر از ۵۰ متر مقدار  $SRF$  برابر با ۵ خواهد شد. با توجه به اینکه مولفه  $SRF$  در مخرج است، با افزایش ارتفاع روباره مقدار  $Q$  افزایش می‌یابد. هر چند بارتن تاثیر افزایش روباره را به‌طور دقیق بررسی نکرده است، اما می‌توان چنین نتیجه‌ای گرفت که با افزایش ارتفاع روباره تونل و در شرایط یکسان، تغییر شکل‌های تونل کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در ارتفاع روباره بیشتر، کیفیت سنگ بهتر است و مقدار  $Q$  افزایش می‌یابد، در نتیجه ضخامت شاتکریت کاهش و فواصل بلت‌ها بیشتر می‌شود که بدین معنی است که تغییر شکل‌ها کمتر است.

## ۵- تحلیل شبه استاتیکی اثر ارتفاع روباره بر

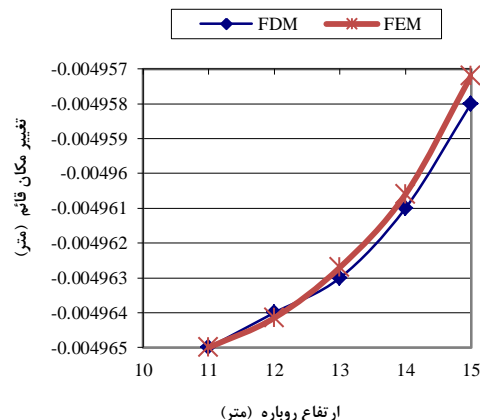
### تغییر مکان و تنش در تونل

تحلیل شبه استاتیکی به کمک نرم افزار تفاضل محدود انجام شده است. معمولاً در تحلیل شبه استاتیکی از مولفه قائم شتاب صرف‌نظر می‌شود؛ زیرا مولفه قائم شتاب در جهت اطمینان تحلیل است و حذف آن موجب طراحی دست بالا می‌شود. علت این موضوع آن است که جهت مولفه قائم شتاب در اولین موج ارسال شده به تونل در جهت مخالف با شتاب جاذبه است و در موج بعدی ارسال شده، تاثیر موج اول خنثی می‌شود. این استدلال در آیین نامه ۲۸۰۰ ایران نیز وجود دارد. به این معنی که توصیه می‌شود، در تحلیل شبه استاتیکی (مانند تحلیل برای بالکن‌ها) از مولفه قائم شتاب صرف‌نظر شود. در تحلیل شبه استاتیکی، ضریب لرزه‌ای ۰/۲ در نظر گرفته شده است؛ چرا که ضریب لرزه‌ای متوسط در کشور ایران در همین حدود است. در شکل ۸، مشاهده می‌شود که تغییر مکان کناره تونل در (نقطه  $B$ ) در تحلیل شبه استاتیکی با ضریب لرزه‌ای ۰/۲، با افزایش ارتفاع روباره، افزایش می‌یابد. در حالی که در شکل ۹، مقدار تغییر

سنگ، با افزایش روباره و یا افزایش عمق تونل، وزن مخصوص ( $\gamma$ ) توده سنگ بیشتر می‌شود. این افزایش به دلیل افزایش تراکم ناشی از افزایش روباره است؛ در نتیجه تغییر مکان کمتر می‌شود. به عبارت دیگر، هر چه وزن مخصوص سنگ بیشتر می‌شود، تغییر مکان کمتر می‌شود.



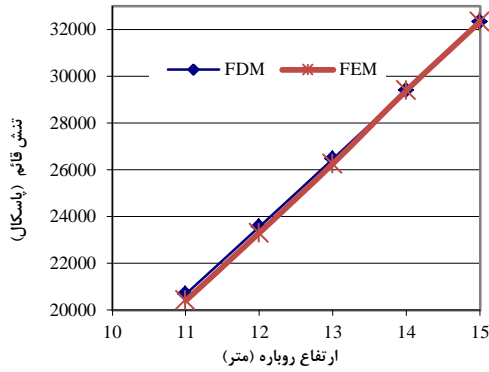
شکل ۴- تغییرات ارتفاع روباره و تغییر مکان افقی در دیواره تونل (نقطه  $B$ ) به دو روش تفاضل محدود و اجزای محدود



شکل ۵- تغییرات ارتفاع روباره و تغییر مکان قائم در تاج تونل (نقطه  $A$ ) به دو روش تفاضل محدود و اجزای محدود

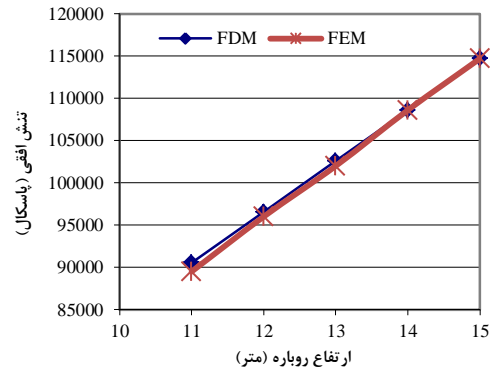
شکل ۶ و شکل ۷، تغییرات ارتفاع روباره را با مقدار تنش به ترتیب در نقاط  $B$  (دیواره‌ی تونل) و  $A$  (تاج تونل) به دو روش اجزای محدود و تفاضل محدود نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع روباره، مقدار تنش افقی و قائم افزایش می‌یابد و این تغییرات به‌صورت خطی است.

که در تحلیل استاتیکی، چنین تفاوت رفتاری مشاهده نگردد.

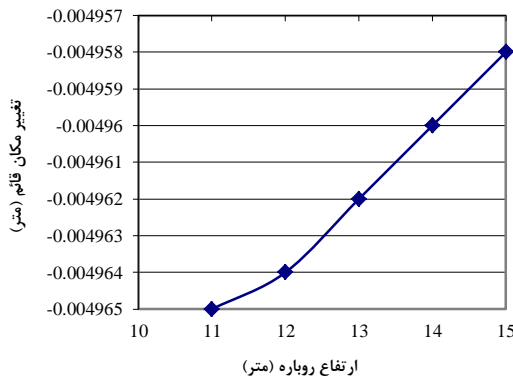


شکل ۷- تغییرات ارتفاع روباره و تنش قائم در تاج تونل (A) به دو روش اجزای محدود و تفاضل محدود

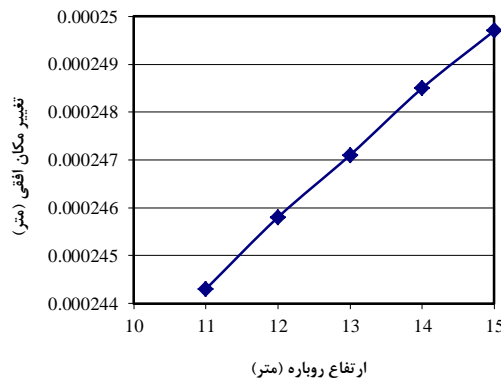
مکان قائم با افزایش ارتفاع روباره کاهش پیدا می‌کند. این تفاوت رفتار مربوط به تحلیل شبه استاتیک است؛ به طوری



شکل ۶- تغییرات ارتفاع روباره و تنش افقی در دیواره تونل (B) به دو روش تفاضل محدود و اجزای محدود



شکل ۹- تغییرات ارتفاع روباره با تغییر مکان قائم در تاج تونل (نقطه A) - تحلیل شبه استاتیک



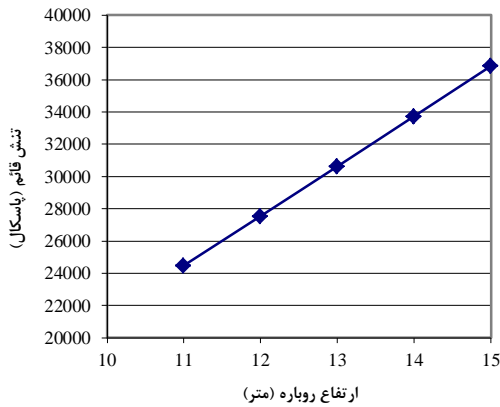
شکل ۸- تغییرات ارتفاع روباره با تغییر مکان افقی در دیواره تونل (نقطه B) - تحلیل شبه استاتیک

## ۶- مقایسه تحلیل استاتیک و شبه استاتیک برای تغییر مکان و تنش در تونل

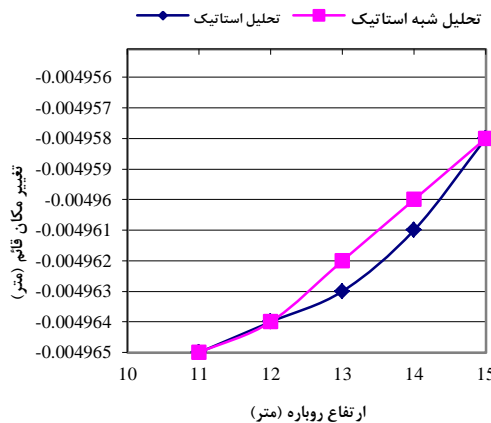
در این بخش تحلیل استاتیکی و شبه استاتیکی تغییر مکان و تنش تونل در کناره و تاج تونل مقایسه می‌شود. شکل ۱۲، مقایسه تغییر مکان دیواره تونل (نقطه B) را در دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که تغییر مکان افقی در کناره تونل در حالت شبه استاتیک در حدود ۵ برابر تحلیل استاتیک است. به علت فاصله زیاد مقادیر تغییر مکان در حالت‌های استاتیکی

شکل ۱۰ و شکل ۱۱، به ترتیب تغییرات ارتفاع روباره با مقدار تنش افقی در کناره تونل و تنش قائم در تاج تونل را نشان می‌دهند. در شکل ۱۰ با افزایش ارتفاع روباره، مقدار تنش افقی در کناره تونل افزایش می‌یابد؛ همچنین در شکل ۱۱ با افزایش ارتفاع روباره، مقدار تنش قائم در تاج تونل افزایش پیدا می‌کند و این تغییرات به صورت خطی است. مقایسه تحلیل استاتیکی و شبه استاتیک که در بخش بعدی انجام خواهد شد، تغییرات رفتار این دو تحلیل را به خوبی نشان خواهد داد.

نبوده و مقادیر واقعی آن در شکل ۴ ترسیم شده است. شکل ۴، تغییر مکان افقی در کنار تونل را برای حالت استاتیکی نشان می‌دهد.



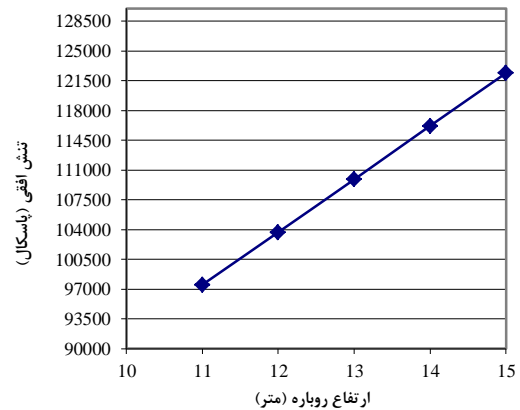
شکل ۱۱- تغییرات ارتفاع روباره با تنش قائم در تاج تونل (نقطه A) - تحلیل شبه استاتیک



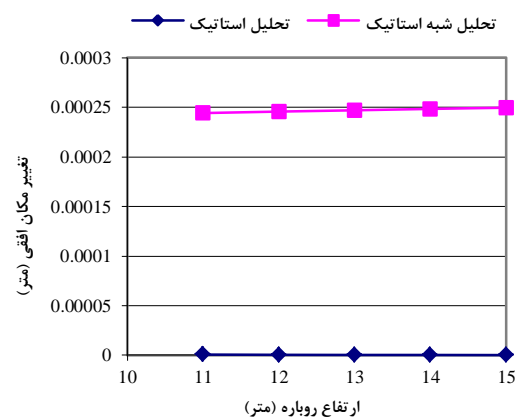
شکل ۱۳- مقایسه‌ی تحلیل استاتیک و شبه استاتیکی برای تغییر مکان قائم در تاج تونل (نقطه A)

استاتیکی می‌شد، مقادیر تغییر مکان‌های قائم در تاج تونل در دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی تقریباً به یکدیگر نزدیک بوده و گاهی در تحلیل شبه استاتیک کمتر نیز هست. شکل ۱۴ و شکل ۱۵، مقایسه مقادیر تنش در دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی در کنار و تاج تونل را نشان می‌دهند.

و شبه استاتیکی، به نظر می‌رسد که مقادیر تغییر مکان‌ها در حالت استاتیکی (شکل ۱۲) صفر هستند، در حالی که صفر



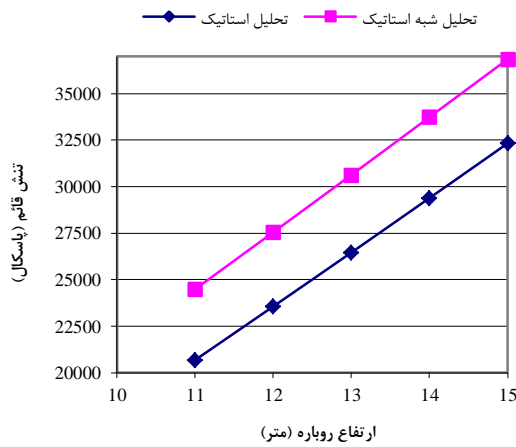
شکل ۱۰- تغییرات ارتفاع روباره با تنش افقی در دیواره تونل (نقطه B) - تحلیل شبه استاتیک



شکل ۱۲- مقایسه تحلیل استاتیک و شبه استاتیک برای تغییر مکان افقی در کنار تونل (نقطه B)

مقدار تغییر مکان قائم در تاج تونل در روباره‌های ۱۱ و ۱۲ متری در تحلیل‌های استاتیکی و شبه استاتیکی تقریباً با هم برابرند، اما در روباره‌های ۱۳ و ۱۴ متری این مقادیر دارای کمی اختلاف هستند و مقادیر تحلیل شبه استاتیکی کمتر است. بر خلاف تغییر مکان‌های افقی در کنار تونل که تحلیل شبه استاتیکی در حدود ۵ برابر تحلیل

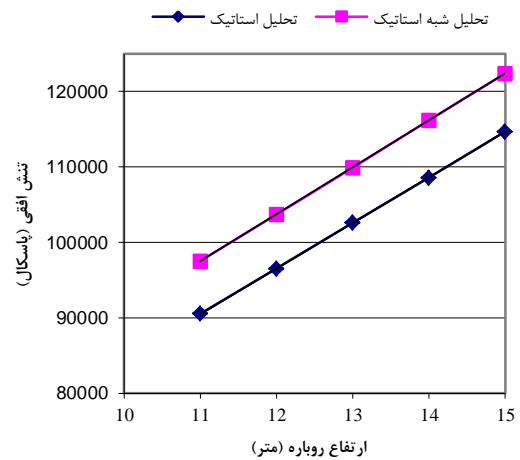




شکل ۱۵-مقایسه تحلیل استاتیک و شبه استاتیک برای تنش در تاج تونل (نقطه A)

جدید ۹ و ۱۰ متری و ارتفاع روباره بیش از ۴۰ و ۶۰ متر نیز، الگوهای قبلی به خوبی تکرار شده‌اند. مجدداً، پاسخ‌های ارتجاعی-خطی مشابه بخش‌های پیشین، به دلیل نوع مدل رفتاری بکار گرفته شده (مدل ارتجاعی-خطی) برای تونل حفر شده در توده سنگ مقاوم (سخت) به دست آمده است؛ همچنین خاطر نشان می‌شود، به علت مقاومت بسیار بالای توده سنگی (سختی و مدول ارتجاعی زیاد بالای آن)، انتخاب مقادیر سختی بیشتر برای انجام تحلیل‌های پارامتری با حفظ الگوهای پاسخ خطی فعلی، منجر به تغییر شکل‌های افقی و قائم بسیار ناچیز شده، به طوری که ارائه و مقایسه نتایج را دشوار می‌کند. از طرفی، کاهش سختی مصالح سنگی نیز به طور عکس، باعث افزایش مقادیر تغییر شکل‌های نقاط A و B خواهد شد که با هدف اساسی مقاله حاضر در تناقض خواهد بود که مطالعه رفتار تونل‌های حفر شده در توده‌های سنگی مقاوم (سخت) است، بنابراین در تحلیل‌های پارامتری انتخاب شده برای تعمیم نتایج تحقیق، دو عامل ارتفاع روباره و قطر تونل متغیر در نظر گرفته شده‌اند.

ابعاد مدل‌ها ۱۶۰ × ۱۶۰ متر هستند. به جهت حساسیت مقادیر تنش و کرنش، اطراف تونل سطحی به ابعاد ۴۰ × ۴۰ متر در اطراف تونل در نظر گرفته شده است تا المان‌های ریزتری در آن انتخاب شوند. در روش اجزای محدود ۱۷۴۶ المان مثلثی ۱۵ گره‌ای و ۱۴۱۸۵ گره در نظر گرفته شده و



شکل ۱۴-مقایسه تحلیل استاتیک و شبه استاتیک برای تنش در دیواره‌ی تونل (نقطه B)

مشاهده می‌گردد که مقادیر تنش در کنار و تاج تونل در حالت شبه استاتیک بیشتر از حالت استاتیک است. مقادیر تنش در تاج تونل در حالت شبه استاتیک، در حدود ۱/۲ برابر نسبت به حالت استاتیک است و در کنار تونل در حدود ۱/۱ برابر نسبت به حالت استاتیک است. هر چند که ضریب لرزه‌ای برابر با ۰/۲، مقادیر تنش را در حدود ۱/۲ و ۱/۱ برابر در تاج و کنار تونل نسبت به حالت استاتیک افزایش می‌دهد؛ اما چنین تغییراتی در تغییر مکان تاج و کنار تونل مشاهده نمی‌گردد. به طوری که تغییر مکان کنار تونل در حالت شبه استاتیک در حدود ۵ برابر می‌شود و در تاج تونل نه تنها این تغییر مکان افزایش نمی‌یابد، بلکه در برخی از روباره‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند.

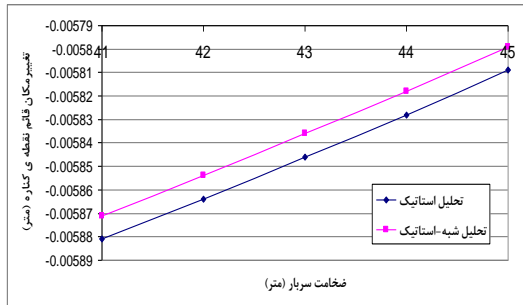
## ۶-۱- تعمیم نتایج به کمک توسعه تحلیل‌های عددی

در این مقاله، به منظور تعمیم نتایج عددی حاصل شده، قطرها و ارتفاع روباره‌های دیگری نیز تحلیل شده‌اند. بدین منظور دو قطر ۹ و ۱۰ متری و ارتفاع روباره به ترتیب، از ۶۱ تا ۶۵ متری و از ۴۱ تا ۴۵ متری در نظر گرفته شده است. نتایج این تحلیل‌ها در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ نمایش داده شده است. در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ دو نمودارهای ستون سمت راست، نتایج حاصل از تاج تونل (نقطه A) و نمودارهای ستون سمت چپ نتایج حاصل از کنار تونل (نقطه B) می‌باشند. مطابق این دو شکل برای قطرهای

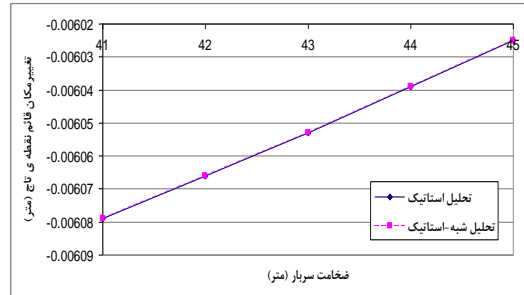


در جهت محور افقی گیردار می‌شوند، اما در جهت محور قائم امکان جابجایی دارند. مرز پایین مدل نیز، در دو جهت  $x$  و  $y$  گیردار می‌شود.

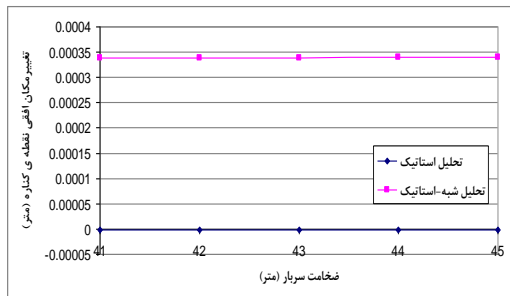
در روش تفاضل محدود ۲۵۶۰۰ المان چهار ضلعی ۴ گرهی و ۱۰۲۴۰۰ گره در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی در دو طرف سمت راست و چپ مدل‌ها بدین ترتیب است که



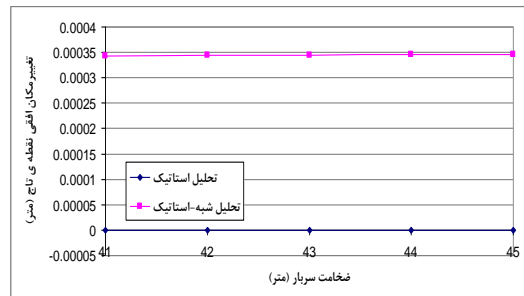
ب) تغییر مکان قائم کناره تونل



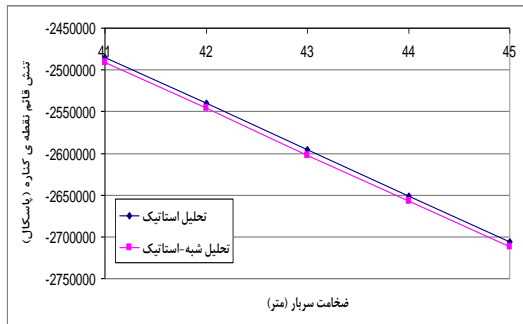
الف) تغییر مکان قائم تاج تونل



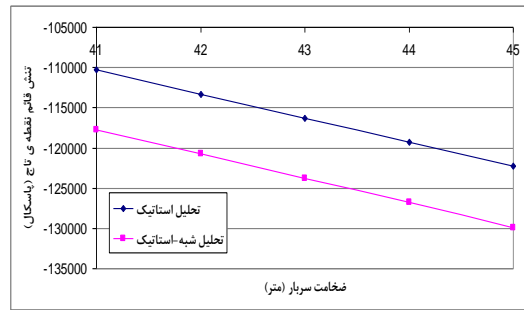
ت) تغییر مکان افقی کناره تونل



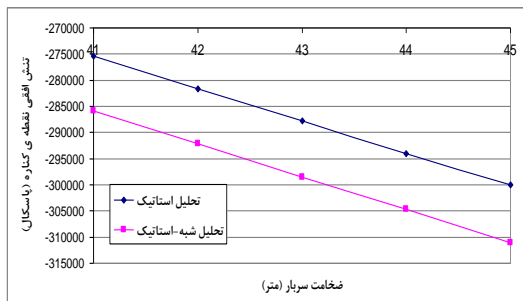
پ) تغییر مکان افقی تاج تونل



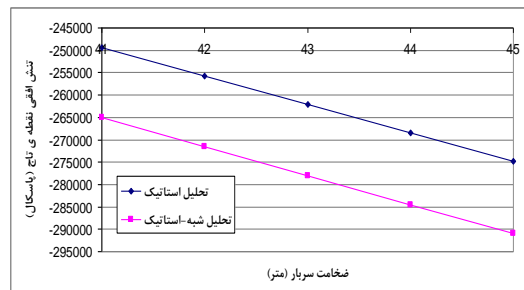
ج) تنش قائم کناره تونل



ث) تنش قائم تاج تونل



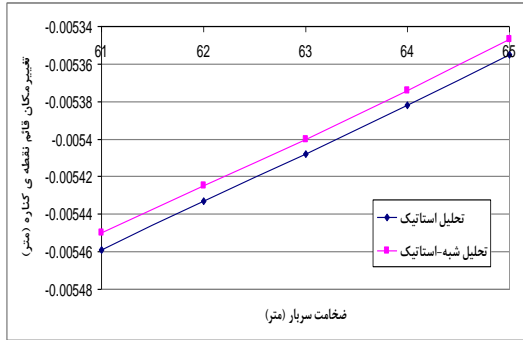
ح) تنش افقی کناره تونل



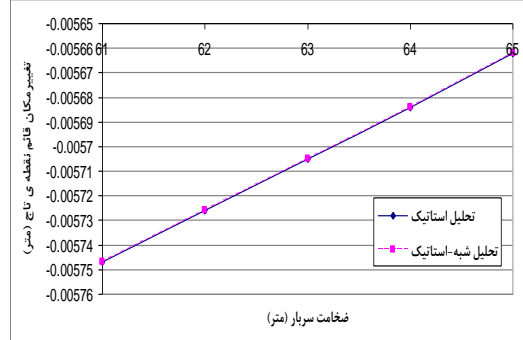
چ) تنش افقی تاج تونل

شکل ۱۶- نتایج حاصل از تحلیل تفاضل محدود برای تونلی به قطر ۱۰ متر و ارتفاع روباره ۴۱ تا ۴۵ متری

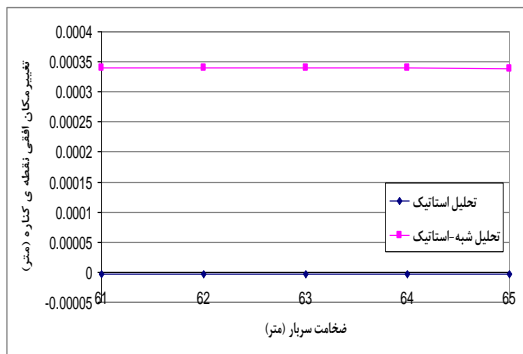
تأثیر بارگذاری استاتیکی و شبه استاتیکی روباره بر جابجایی دیواره ی تونل، محمد حاجی عزیزی و ...، ص ۱۲۱-۱۳۵



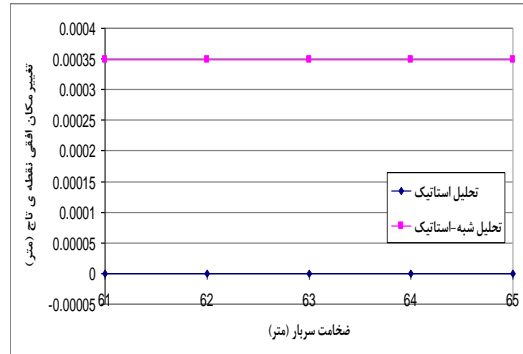
ب) تغییر مکان قائم کناره تونل



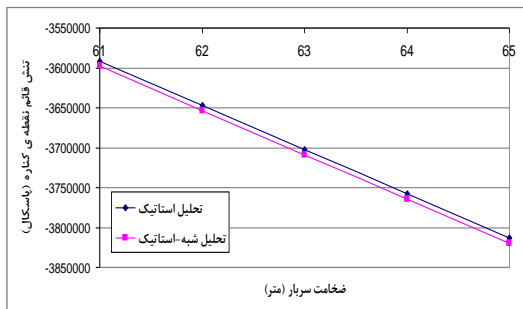
الف) تغییر مکان قائم تاج تونل



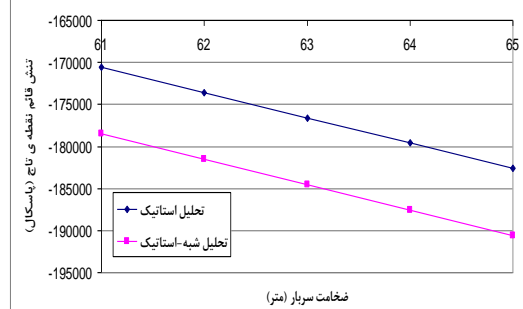
ت) تغییر مکان افقی کناره تونل



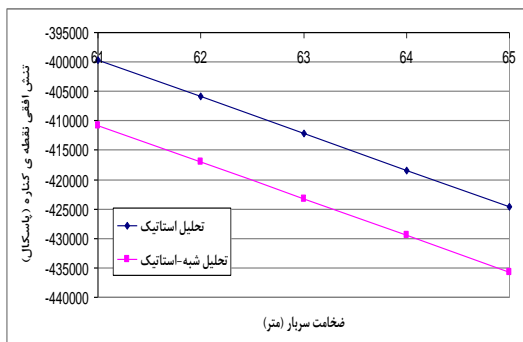
پ) تغییر مکان افقی تاج تونل



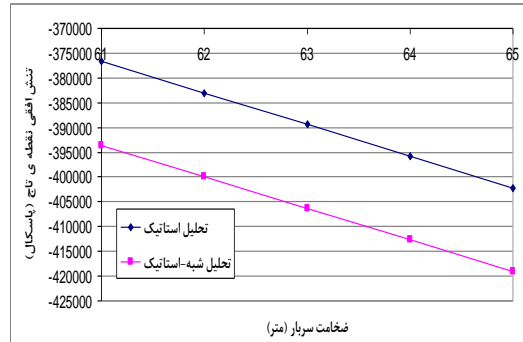
ج) تنش قائم کناره تونل



ث) تنش قائم تاج تونل



ح) تنش افقی کناره تونل

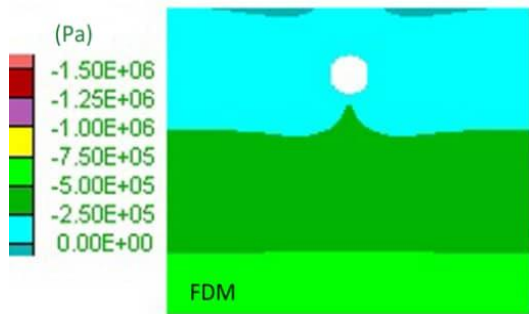


چ) تنش افقی تاج تونل

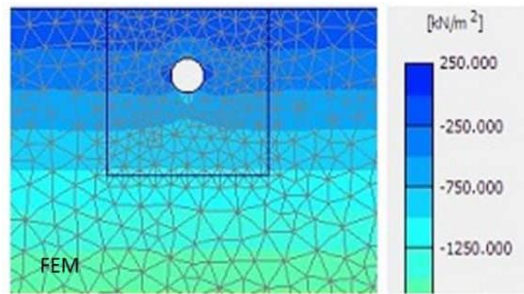
شکل ۱۷- نتایج حاصل از تحلیل تفاضل محدود برای تونلی به قطر ۹ متر و ارتفاع روباره ۶۱ تا ۶۵ متری

نزدیک تونل، از هماهنگی و تطابق بسیار خوبی برخوردار هستند. در تفسیر نتایج این دو شکل و نیز شکل ۲۰، بایستی دقت شود که مقادیر کمی تنش حاصل از روش اجزای محدود بر حسب یکای کیلوپاسکال و مقادیر کمی تنش مستخرج از روش تفاضل محدود بر حسب پاسکال و همراه با ضرایب مربوطه نمایش داده شده‌اند. نتایج شکل ۱۸ تا شکل ۲۰ مربوط به تحلیل‌های استاتیکی و نتایج شکل ۲۱، مربوط به تحلیلی شبه-استاتیکی است. مطابق شکل ۲۱، الگوی اساسی گسترش کانتورهای تغییرشکل افقی در تحلیل‌های شبه استاتیکی در هر دو روش عددی، کاملاً مشابه و با مقادیر کمی یکسان به‌دست آمده است. در شکل ۲۱، مقادیر کمی ارائه شده بر حسب متر هستند.

در ادامه، در شکل ۱۸ تا شکل ۲۱ برخی نتایج گرافیکی از کانتورهای تنش و تغییرشکل حاصل از کاربرد دو روش اجزای محدود و تفاضل محدود ارائه شده است. این نتایج مربوط به تحلیل‌های استاتیکی و شبه-استاتیکی برای تونلی به قطر ۸ متر و ارتفاع روباره ۱۲ متر هستند. در شکل ۱۸، مقایسه کانتورهای تنش افقی استاتیکی حاصل از دو روش تفاضل محدود (*FDM*) و اجزا محدود (*FEM*) و در شکل ۱۹، مقایسه کانتورهای تنش برشی استاتیکی حاصل از این دو روش، برای تونلی به قطر ۸ متر و ارتفاع روباره ۱۲ متر ارائه شده است. مطابق این دو شکل، هم الگوی گرافیکی نتایج و هم مقادیر کمی حاصل شده به ویژه در حوزه

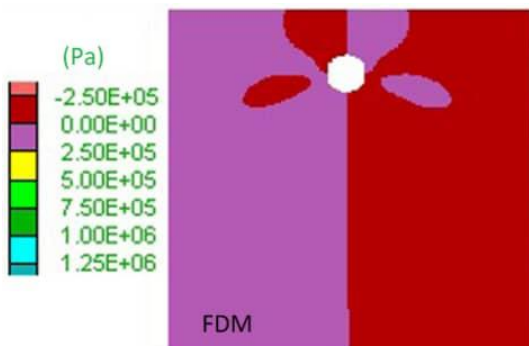


ب) کانتورهای تنش افقی استاتیکی حاصل از روش اجزای محدود (*FEM*)

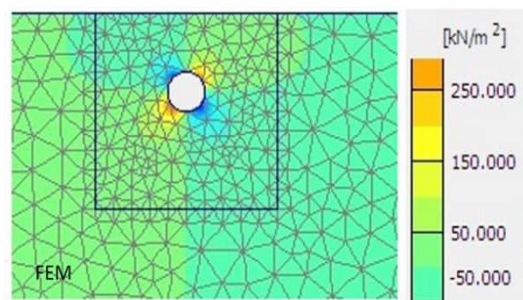


الف) کانتورهای تنش افقی استاتیکی حاصل از روش تفاضل محدود (*FDM*)

شکل ۱۸- مقایسه‌ی کانتورهای تنش افقی استاتیکی حاصل از دو روش مختلف برای تونلی به قطر ۸ متر و ارتفاع روباره ۱۲ متر

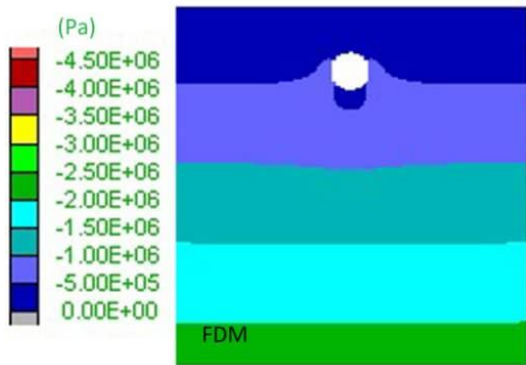


ب) کانتورهای تنش برشی استاتیکی حاصل از روش اجزا محدود (*FEM*)

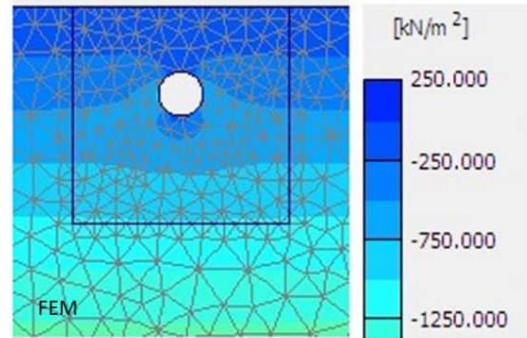


الف) کانتورهای تنش برشی استاتیکی حاصل از روش تفاضل محدود (*FDM*)

شکل ۱۹- مقایسه‌ی کانتورهای تنش برشی استاتیکی حاصل از دو روش مختلف برای تونلی به قطر ۸ متر و ارتفاع روباره ۱۲ متر

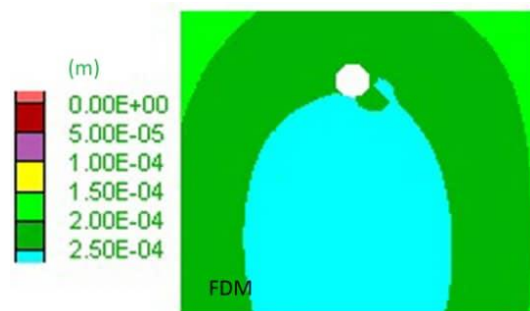


ب) کانتورهای تنش قائم استاتیکی حاصل از روش اجزا محدود (FEM)

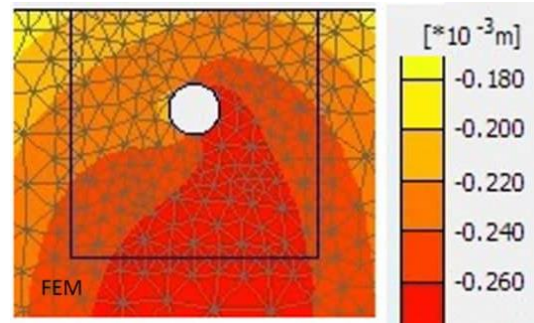


الف) کانتورهای تنش قائم استاتیکی حاصل از روش تفاضل محدود (FDM)

شکل ۲۰- مقایسه‌ی کانتورهای تنش قائم استاتیکی حاصل از دو روش مختلف برای تونلی به قطر ۸ متر و ارتفاع روباره ۱۲ متر



کانتورهای تغییر مکان افقی شبه- استاتیکی حاصل از روش اجزا محدود (FEM)



کانتورهای تغییر مکان افقی شبه- استاتیکی حاصل از روش تفاضل محدود (FDM)

شکل ۲۱- مقایسه‌ی کانتورهای تغییر مکان افقی شبه- استاتیکی حاصل از دو روش مختلف برای تونلی به قطر ۸ متر و ارتفاع روباره ۱۲ متر

گردید که با افزایش ارتفاع روباره، مقدار تغییر مکان قائم در تاج تونل کاهش می‌یابد، اما مقدار تغییر مکان افقی در دیواره‌ی تونل افزایش پیدا می‌کند. تغییر مکان افقی در کناره‌های تونل در حالت شبه استاتیکی در حدود ۵ برابر تحلیل استاتیکی به دست آمده است که قابل تامل است؛ اما مقادیر تغییر مکان در تاج تونل اینگونه نیست و نتایج هر دو تحلیل استاتیکی و شبه استاتیکی به یکدیگر نزدیک هستند. نظر به زلزله‌خیز بودن کشور ایران و همچنین اختلاف چشمگیر تغییر مکان‌های ایجاد شده در کناره تونل در دو حالت (استاتیک و شبه استاتیک) که دست‌آورد این پژوهش است، توجه به این مسئله بسیار مهم است. نکته مهم و قابل

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر ارتفاع روباره تونل بر رفتار تنش-کرنش تونل در سنگ‌های مقاوم در حالت استاتیکی و شبه استاتیکی با استفاده از روش‌های تفاضل محدود و اجزای محدود مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. تحلیل شبه استاتیکی با استفاده از روش تفاضل محدود، موضوع جدیدی است که در این پژوهش بررسی شده و نتایج قابل توجهی را به همراه داشته است. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی نشان دادند که با افزایش ارتفاع روباره، مقدار تغییر مکان افقی در دیواره تونل و مقدار تغییر مکان قائم در تاج تونل کاهش یافته است؛ همچنین در تحلیل شبه استاتیکی مشاهده

علت این نتایج را می‌توان اینگونه توجیه کرد که شتاب افقی اعمال شده به تونل، تغییر مکان افقی کناره‌های تونل را تحت تاثیر خود قرار داده است و این شتاب افقی در تغییر مکان قائم تونل تاثیر قابل توجهی نداشته است. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در این مقاله، لزوم نگهدارنده مناسب برای تونل به ویژه دیواره تونل را هنگام وقوع زلزله ضروری می‌داند.

توجهی که از یافته‌های این تحقیق است، آن است که تنها با مقایسه تغییر مکان‌های تاج تونل در دو روش تحلیل نمی‌توان به اهمیت ضرورت انجام تحلیل‌های شبه استاتیکی برای تونل‌ها پی برد (چرا که نتایج هر دو تحلیل بهم نزدیک‌اند). از این رو یکی از مهمترین دست‌آوردهای این پژوهش روشن شدن اهمیت تحلیل‌های شبه استاتیکی (به‌ویژه برای محاسبه تغییر مکان‌های کناره‌ی تونل) است.

## ۸- مراجع

- Ajalloeian, R., Moghaddam, B., & Azimian, A. (2017). Prediction of rock mass squeezing of T4 tunnel in Iran. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(2), 747-763.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support (NGI Publication No. 106, p.48)*. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute.
- Cecil, O. S. (1970). *Correlation of rock bolt-Shotcrete support and rock quality parameters in Scandinavian tunnels. (p. 414)*. Ph.D. Thesis. Urbana: University of Illinois.
- Chambon, P., & Corté, J. F. (1994). Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(7), 1148-1165.
- Daemen, J. J. K. (1975). *Tunnel Support Loading Caused by Rock Failure*. Ph.D. Thesis. Minneapolis, MN: University of Minnesota.
- Fatemi Aghda, S. M. Ganjalipour, K., & Esmaeil Zade, M. (2016). Comparison of squeezing prediction methods: A case study on Nowaoud tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(5), 1487-1512.
- Goel, R. K., Jethwa, J. L., & Dhar, B. B. (1996). "Effect of tunnel size on support pressure. *Technical Note. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences-Geomechanics Abstract*, 33(7), 749-755.
- Goel, R. K., Jethwa, J. L., & Paithankar, A. G. (1995). Indian experiences with *Q* and RMR systems. *Tunneling and Underground Space Technology*, 10(1), 97-109.
- Hajiazizi, M., & Hashemi, M. (2017). Predicting three-dimensional displacement around the tunnel and its impact on the value of *Q*-system. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 51(2), 133-138.
- Han, L., Ye, G. L., Chen, J. J., Xia, X. H., & Wang, J. H. (2017) Pressures on the lining of a large shield tunnel with a small overburden: A case study. *Tunneling and Underground Space Technology*, 64, 1-9.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground excavations in rock. (p.527)* Institution of Mining and

*Metallurgy. London: Maney Publishing.*

- Jalali, M., & Beik, P. (2018). *Analysis of lining load of mechanized tunnels - A case study of Zayanderood dam to Kashan water conveyance tunnel. Tunneling & Underground Space Engineering, 6(2), pp. 19-36.*
- Jethwa, J. L. (1981). *Evaluation of rock pressure under squeezing rock condition for tunnels in Himalayas. (p. 272) Ph.D. Thesis. Uttarakhand, India: IIT Roorkee.*
- McCutchin, W. R. (1982). *Some elements of a theory of in situ stresses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences-Geomechanics Abstracts, 19(4), 201-203.*
- Rezaei, A., Kateb, H., Ahmadi Adli, M. (2018). *Evaluation of Mechanized Tunnels Lining Loads by Application of Physical Modelling. Tunneling & Underground Space Engineering, 6(2), pp. 49-66.*
- Sengupta, S. (1998). *Influence of geological structures on in situ stresses. Ph.D. Thesis, P. 275. Department of Civil Engineering, IIT, Uttarakhand, India.*
- Singh, B., Jethwa, J. L., & Dude A. K. (1992). *Correlation between observed support pressure and rock mass quality. Tunneling and Underground Space Technology, No. 7, 59-75.*
- Singh, B. & Goel, R. K. (2011). *Engineering Rock Mass Classification. Elsevier, UAS.*
- Singh, M., Viladkar, M. N., & Samadhiya, N. K. (2017) *Seismic analysis of Delhi Metro underground tunnels. Indian Geotechnical Journal, 47(1), 67-83.*
- Sheorey, P. R., Mohan, G. M., & Sinha, A. (2001). *Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress. Technical Note. In. J. of Rock Mech. and Mining Sciences, No. 38, 1211-1216.*
- Soubra, A. H., Dias, D., & Emeriault, F. (2008). *Three-dimensional face stability analysis of circular tunnels by a kinematical approach. Proceedings of GeoCongress, Characterization, Monitoring and Modelling of Geosystems, New Orleans, 9-12.*
- Stephansson, O. (1993). *Rock stress in the Fennoscandian Shield. In Comprehensive rock engineering (V. 3, Chap. 17, pp.445-459). New York: Pergamon.*
- Terzaghi, K. (1946). *Introduction to tunnel geology. In R.V. Proctor & T. L. White (Eds.), Rock tunneling with steel supports (p. 271). Youngstown, OH: Commercial Shearing & Stamping Co.*
- Verman, M. K. (1993). *Rock mass-tunnel support interaction analysis. (p. 258). Ph.D. Thesis. Uttarakhand, India: IIT Roorkee.*
- Zarei, H., Shahriar, K., Moarefyand, P., & Ahmadi, M. (2015). *Prediction of tunnels support system loads using analytical and numerical methods. Tunneling & Underground Space Engineering, 4(2), pp. 11-27.*



## Static and Pseudo-Static Analysis of the Effect of Tunnel Overburden Height on Stress-Strain Behavior Using Numerical Methods

M. Hajiazizi<sup>1</sup>; M. Mosallanezhad<sup>2</sup>; M. Nasiri<sup>3</sup>; Y. Shams Maleki<sup>4</sup>

1- Associate Professor; Faculty of Engineering, Razi University, mhazizi@yahoo.com

2- Assistant Professor; Faculty of Engineering, Shiraz University, mmosalla@shirazu.ac.ir

3- Ph.D. Candidate in Geotechnical Engineering, Razi University, m.nasiri.edu@gmail.com

4- Ph.D. Graduated in Geotechnical Engineering, Razi University, yshamsmaleki@yahoo.com

Received: 8 Feb 2020; Accepted: 27 Jul 2020  
DOI: 10.22044/tuse.2020.9331.1388

---

### Keywords

Tunnel  
Stress-Strain  
Numerical Methods  
Pseudo-Dynamic Analysis  
Overburden Height

---

### Extended Abstract

#### Summary

The tunnel overburden height has considerable effect on the stability or instability of surface tunnels. In this research, effects of tunnel overburden in strong rocks in both static and pseudo-dynamic states are investigated. As shown in this paper, the results of pseudo-dynamic analysis compared to static state analysis seem to be outstanding. Due to superficiality of the tunnel, the water table line is considered lower than the tunnel bottom. The obtained results of static analysis performed by finite element method (FEM) beside finite difference method (FDM) indicate that the results obtained from these two methods are close together. Furthermore, this study shows that the stress in crest of tunnel in the pseudo-dynamic analysis is about 1.2 times of that in the static analysis, and in the sidewalls, the stress is about 1.1 times of that in the static condition. However, the changes in displacements are not obvious for both sidewalls and crest of the tunnel. The sidewalls deformations in the pseudo-dynamic analysis are about 5 times of those in the static condition, but vertical displacement in the crest do not increase, and in some states, it faces reduction.

### Introduction

In major cities, today vehicles are faced with the problem of traffic and lack of proper space. Subways are effective solutions that can greatly alleviate these problems. Moreover, the sections of the subways that are close to the stations are located on the surface. These conditions are considered in surface tunnels. Overhead size in surface tunnels has a significant impact on its stability, especially if high-rise buildings are located near the tunnel path. Soil settlement is a common problem as a consequence of the construction of a surface tunnel, but what is important is that the settlement should be in allowable range.

### Methodology and Approaches

Modeling in this research is carried out in such a way that the problem space and dimensions of the model and the necessary layouts are constructed first, the boundaries around the model are assigned, and the material specifications are defined for the model. Then, the tunnel is constructed at the desired location and the final step will be drilling and analysis for the tunnel. Elastic behavior model is considered for rock mass.

### Results and Conclusions

The results of static analysis showed that with increasing overhead, the amount of horizontal displacement in the tunnel wall and the amount of vertical displacement in the tunnel crown decreased. It was also observed in the quasi-dynamic analysis that with increasing overhead, the amount of vertical displacement in the tunnel crown decreased but the amount of horizontal displacement in the tunnel wall increased.

---