

مقاله پژوهشی

## تأثیر ویژگی‌های خاک در پیش‌بینی نشست ناشی از حفر تونل در مدل‌های رفتاری مختلف در خط A متروی قم

عارف جابری<sup>۱</sup>، شکراله زارع<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی معدن؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، arefjaberi@gmail.com  
۲. دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، zare@shahroodut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۴

### چکیده

امروزه برای آنالیز و طراحی تونل‌ها از روش‌های متعددی استفاده می‌شود که معمولاً برای تونل‌های شهری که در اعماق کم و در زمین‌های نرم اجرا می‌شوند، بهترین روش عددی است. انتخاب مدل رفتاری مناسب یکی از اساسی‌ترین مراحل در تحلیل عددی است. در اکثر مدل‌سازی‌های عددی حفر تونل از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده می‌شود، این مدل رفتاری اغلب منجر به پیش‌بینی نشست کمتر سطح زمین نسبت به نتایج ایزاربنندی می‌شود. در این تحقیق به بررسی اثر پارامترهای مختلف خاک در نشست سطح زمین مترو خط A قم در مدل‌های رفتاری سخت‌شونده، موهر کولمب و دراگر پراگر با استفاده از روش تفاضل محدود پرداخته شد. ابتدا مدل‌سازی عددی نشست سطح زمین انجام و نتایج تحلیل با داده‌های ایزاربنندی مقایسه شد. در ادامه تأثیر پارامترهای مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک، چسبندگی، ضریب پواسون و وزن مخصوص در مدل‌های رفتاری مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل رفتاری سخت‌شونده و مدل رفتاری دراگر پراگر به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیرپذیری را از تغییرات پارامترهای خاک مترو خط A قم دارند.

### کلمات کلیدی

نشست سطح زمین، مدل رفتاری دراگر پراگر، خاک سخت‌شونده، مدل‌سازی عددی، مترو خط A قم.

## ۱- مقدمه

به طور کلی حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به حذف توده‌ای از خاک و سنگ محل و بروز تغییرات قابل توجه در وضعیت تنش اطراف آن‌ها می‌شود. بیشتر تونل‌های شهری نیز در عمق کم و زمین نرم حفر می‌شوند؛ بنابراین تغییر شکل (به ویژه نشست) ناشی از حفاری یک پدیده نسبتاً شایع است. برآورد دقیق نشست نقش مهمی در ایمنی، طراحی و ساخت تونل دارد و این مساله هنگام عبور تونل از زیر مناطق مسکونی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. با برآورد نشست، در صورت احتمال وقوع هرگونه خسارت، می‌توان از مسایل فوق جلوگیری یا برخی اقدامات برای کنترل آن‌ها اتخاذ کرد؛ بنابراین، آگاهی از میزان حداکثر نشست سطح و مقایسه با نشست مجاز اهمیت زیادی دارد و همواره از سوی پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است [۱] و [۲]. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی نشست سطح زمین وجود دارد که در میان آن‌ها می‌توان به روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی اشاره کرد.

اولین تلاش‌ها برای پیش‌بینی نشست ناشی از حفر تونل با استفاده از روش‌های تجربی انجام شده است. روش‌های تجربی چارچوب محاسباتی ساده‌ای دارند و یک تخمین کلی و ابتدایی از جابه‌جایی‌های ناشی از حفر تونل ارائه می‌دهند [۳] تا [۹]. روابط حاکم بر جابه‌جایی ناشی از حفر تونل در روش‌های تجربی جایگاهی نداشته است، در نتیجه مطالعات جدیدتر به سمت توسعه روش‌های تحلیلی و راه‌حل‌های فرم بسته گرایش پیدا کرد [۱۰] و [۱۱].

روش‌های تحلیلی بیشتر برای پیش‌بینی بیشترین نشست کوتاه مدت زمین مفید است. مطالعات زیادی در این زمینه نیز انجام شده است [۱۲] تا [۱۸]. مدل‌های تحلیلی دارای فرضیات ساده‌کننده بسیار زیادی است و در اعمال بسیاری از پارامترهای موثر در اندرکنش تونل و زمین درون‌گیر شامل پارامترهای ژئومکانیکی زمین، اثر آب زیرزمینی، شکل مقطع تونل و روش حفاری و نصب سیستم نگهداری دارای ضعف شدیدند.

روش‌های عددی با توسعه سریع ابزار محاسباتی و توانایی این روش در حل مسایل پیچیده به روشی محبوب تبدیل شده‌اند. با استفاده از روش عددی می‌توان بر بسیاری از محدودیت‌های روش تجربی و روش‌های تحلیلی مانند عوارض خاص (پی ساختمان‌ها، پی پل‌ها، تقاطع تونل‌ها و نظایر آن) فایق آمد. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های عددی با قابلیت‌هایی همچون امکان مدل‌سازی رفتارهای مختلف زمین، امکان در نظر گرفتن رفتار آنیزوتروپ و ناهمگن محیط، قابلیت

تحلیل مسایل غیرخطی، قابلیت مدل‌سازی تونل با اشکال مختلف و امکان اعمال روش اجرایی، برای شبیه‌سازی تغییر شکل‌های اطراف تونل و پیش‌بینی نشست ناشی از حفر تونل به شدت گسترش یافته است [۱۹] تا [۲۷].

امروزه تحلیل‌های عددی اهمیت زیادی در پروژه‌های ژئوتکنیکی دارند و به کمک مدل‌سازی‌های عددی می‌توان روند حفاری، نگهداری و اثر جریان آب را در پایداری توده‌های سنگی یا خاکی بررسی کرد. دقت مدل‌سازی عددی به شدت تحت تاثیر پارامترهای ورودی، میزان ساده‌سازی روابط حاکم و سطح گسسته‌سازی روابط است. یکی از اساسی‌ترین مراحل تحلیل‌های عددی برای توصیف رفتار مکانیکی خاک، انتخاب مدل رفتاری مناسب است. انتخاب مدل رفتاری مناسب نقش بسیار کلیدی در صحت و دقت نتایج مدل عددی به ویژه در مسایل غیرخطی با اندرکنش تونل و زمین درون‌گیر خواهد داشت [۲۸].

میرحبیبی و سروش (۲۰۲۰) به کمک روش عددی المان محدود سه بعدی و با در نظر گرفتن مدل رفتاری موهر کولمب به بررسی تاثیر حفاری تونل‌های دوقلو با در نظر گرفتن ساختمان‌های سطحی بر نشست سطح زمین پرداختند [۲۹].

قیاسی و کوشکی (۲۰۲۰) تحلیل پارامتریکی را با استفاده از روش المان محدود برای بررسی نشست سطح زمین انجام دادند و در ادامه از یک شبکه عصبی مصنوعی نیز برای پیش‌بینی نشست سطح زمین استفاده کردند [۳۰].

فنگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی تاثیر مدل‌های تشکیل‌دهنده دو بعدی و سه بعدی با در نظر گرفتن غیرهم محوری و ناهمسانگردی خاک در نشست سطح زمین پرداختند [۳۱].

آنا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۱) تاثیر سختی پوشش تونل، مقاومت دوغاب، مدول الاستیک دوغاب و سرعت سپر را بر نشست سطح زمین با نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار دادند. بررسی حاصل از این تحقیق نشان داد که نشست سطح زمین با کاهش سرعت سپر افزایش می‌یابد. به طور مشابه، افزایش مدول الاستیک دوغاب باعث کاهش نشست زمین می‌شود [۳۲].

در بحث تاثیر مدل‌های رفتاری مختلف در برآورد میزان تغییر شکل‌ها نیز تحقیقات متعددی انجام شده است. حجازی و

<sup>1</sup> Fang

<sup>2</sup> Anato

زاکهم و ال ناگار<sup>۹</sup> در سال ۲۰۱۹ به بررسی تأثیر مدل رفتاری سخت‌شونده، سخت‌شونده با کرنش کوچک، مدل کم کلی اصلاحی و مدل نرم‌شونده<sup>۱۰</sup> در تونلی در شانگهای چین پرداخته است. نتایج تحقیق نشان داد که مدل رفتاری سخت‌شونده با کرنش کوچک نسبت به سایر مدل‌ها نتایج بهتری دارد [۳۸].

نعمت الهی و دیاس<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۱۹ به بررسی تأثیر مدل رفتاری موه‌ر کولمب و مدل رفتاری پوش تسلیم در خط دو مترو شیراز پرداخته و نتایج نشان از بهتر بودن مدل رفتاری پوش تسلیم نسبت به مدل رفتاری موه‌ر کولمب دارد [۳۹].

اسلامی و همکاران در سال ۲۰۲۰ تأثیر مدل‌های رفتاری موه‌ر کولمب و کم کلی اصلاح‌شده را بر میزان نشست سطح زمین در خط دو مترو مشهد مورد بررسی قرار دادند. اسلامی بیان داشت که مدل کم کلی اصلاح‌شده نسبت به مدل موه‌ر کولمب نتایج نشست طولی و عرضی را با دقت بیشتری نشان می‌دهد، همچنین مدل کم کلی را برای رس‌های نرم و زمین‌ها با تحکیم یافتگی پیشنهاد داده‌اند [۴۰].

شیوایی و همکاران (۲۰۲۱) رفتار کوپل بین تونل‌های دوقلو مکانیزه و آب‌های زیرزمینی خط دو مترو شیراز پرداخته؛ در این پژوهش عددی و مطالعه پارامتریک از مدل رفتاری موه‌ر کولمب و کم کلی اصلاحی استفاده شده شد [۴۱].

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که پیش از این مطالعاتی در مورد تأثیر مدل‌های رفتاری مختلف بر نشست سطح زمین انجام گرفته است؛ از طرفی بررسی‌های در مورد تأثیر پارامترهای مختلف در نشست سطح زمین انجام شده است که بیشتر در مدل رفتاری موه‌ر کولمب است و بررسی برای مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف در چندین مدل رفتاری انجام نگرفته است. از این رو، در این مقاله تأثیر پارامترهای مختلف خاک در نشست سطح زمین در مدل‌های رفتاری موه‌ر-کولمب، مدل رفتاری سخت‌شونده و مدل رفتاری دراگر پراگر<sup>۱۲</sup> بررسی می‌شود.

## ۲- ویژگی مدل‌های رفتاری اعمالی

### ۲-۱- مدل رفتاری موه‌ر کولمب

مدل موه‌ر کولمب یک مدل الاستیک-پلاستیک کامل و رایج‌ترین مدل برای نمایش شکست‌های برشی در خاک و

همکاران در سال ۲۰۰۸ پژوهشی با عنوان تأثیر مدل‌های رفتاری بر تحلیل عددی سازه‌های زیرزمینی، به بررسی سه مدل رفتاری موه‌ر کولمب<sup>۱</sup>، خاک سخت‌شونده<sup>۲</sup> و خاک سخت‌شونده با کرنش‌های کوچک<sup>۳</sup> پرداختند و نتیجه گرفتند که استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تر که شامل خطی بودن پیش از شکست و صلبیت بالا در کرنش‌های بسیار کوچک است، به طور قابل‌ملاحظه‌ای برآورد جابه‌جایی‌ها را بهبود می‌بخشد [۳۳].

لامبروگی<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ با مدل عددی سه‌بعدی و به کمک سه مدل رفتاری الاستیک خطی، موه‌ر کولمب و کم کلی اصلاحی<sup>۵</sup> جنبه‌های ساخت حفاری مکانیزه و تأثیر آن‌ها بر جابه‌جایی زمین مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند که نتایج حاصل از مدل رفتاری کم کلی اصلاح نسبت به دو مدل رفتاری دیگر هم‌خوانی بیشتری با نتایج ایزاربنندی داشته است [۳۴].

دو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر مدل‌های رفتاری موه‌ر کولمب و پوش تسلیم<sup>۷</sup> در حفاری مکانیزه تونل پرداختند. نتایج نشان داده است که به طور کلی مدل پوش تسلیم نیروی سازه‌ای و نشست سطح زمین بیش‌تری را به نسبت مدل موه‌ر کولمب ارائه می‌دهد [۳۵].

وکیلی و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی به بررسی تأثیر سه مدل موه‌ر کولمب، سخت‌شونده و مدل سخت‌شونده کرنش کوچک پرداخته است. بررسی حاصل از این تحقیق نشان داد که جابه‌جایی‌های بدست آمده از مدل خاک سخت‌شونده همسانگرد با کرنش‌های کوچک در مقایسه با مدل خاک سخت‌شونده همسانگرد، کوچک‌ترند. همچنین برخلاف مدل‌های پیشرفته، جابه‌جایی قائم بدست آمده از مدل موه‌ر کولمب هم‌خوانی با آنچه در واقعیت اندازه‌گیری شده است ندارد [۳۶].

لیتساس<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ به کمک روش عددی المان محدود به بررسی تأثیر مدل‌های موه‌ر کولمب و کم کلی اصلاح‌شده پرداخته، نتایج نشان از جابه‌جایی بالای تاج تونل در مدل کم کلی نسبت به مدل موه‌ر کولمب داشته در حالی که پیش‌بینی نشست سطح زمین در دو مدل رفتاری قابل مقایسه‌تر بوده است و اختلاف کمتری را نشان می‌دهد [۳۷].

<sup>1</sup> Mohr-Coulomb

<sup>2</sup> Hardening soil

<sup>3</sup> Hardening soil-small

<sup>4</sup> Lambrughi

<sup>5</sup> modified Cam-Clay

<sup>6</sup> Do

<sup>7</sup> Cysoil

<sup>8</sup> Litsas

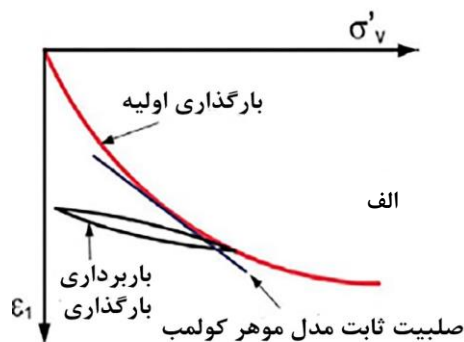
<sup>9</sup> Zakhem and El Naggar

<sup>10</sup> Soft soil

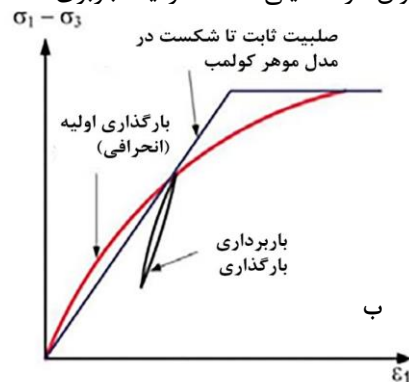
<sup>11</sup> Dias

<sup>12</sup> Drucker- Prager

پایداری شیب استفاده کرد. در مقابل این مدل رفتاری نقص‌های اساسی در تجزیه و تحلیل مسایل تغییر شکل مانند تونل زنی و حفاری دارد. یکی از نقاط ضعف این مدل در مورد مسایل مربوط به حفاری است که در آن صلبیت ثابت است و تمایزی بین بارگذاری و باربرداری مواد به ویژه در خاک قایل نمی‌شود [۴۲]. تفاوت بین پیش‌بینی صلبیت در مدل موه‌ر کلمب و آزمایش‌های واقعی مانند آزمایش سه محوری روی نمونه خاک در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت قابل توجهی بین رفتار واقعی مواد و مدل پیش‌بینی موه‌ر کلمب وجود دارد.



سنگ است. معیار تسلیم موه‌ر کلمب بر اساس تنش‌های اصلی یک شش‌وجهی نامنظم است و محور اصلی آن مکان هندسی سطح تسلیم را نمایش می‌دهد. برای نشان دادن رفتار تنش کرنش در این مدل رفتاری نیاز به پنج پارامتر ورودی است. این پارامترها شامل دو پارامتر الاستیک از قانون هوک شامل مدول یانگ و نسبت پواسون، دو پارامتر از معیار شکست کولمب شامل زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی و یک پارامتر از قانون جریان شامل زاویه اتساع است. در میان مدل‌های رفتاری مختلف، این مدل رفتاری به دلیل سادگی و داده‌های ورودی کمتر کاربرد بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. از این مدل رفتاری می‌توان در مسایلی مانند ظرفیت باربری خاک یا



شکل ۱- نتایج شماتیک از آزمایش الف) تک‌محوری و ب) سه محوری [۴۲]

ضرایبی‌اند که از رابطه ۲ محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin \varphi}} \\ Y = \frac{\sqrt{3}c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin \varphi}} \end{cases} \quad (2)$$

با در نظر گرفتن علامت مثبت برای تنش فشاری و علامت منفی برای تنش کششی رابطه ۳ بر اساس تئوری گسترش حفره به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_\theta \\ \sigma_2 &= \sigma_r \\ \sigma_3 &= \sigma_0 \end{aligned} \quad (3)$$

بنابراین ثابت اول تنش اصلی و ثابت دوم تانسور تنش انحرافی را می‌توان به صورت رابطه ۴ ساده کرد:

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_\theta + \sigma_r \\ I_2 = \frac{(\sigma_\theta - \sigma_r)^2}{6} \end{cases} \quad (4)$$

با جایگزینی رابطه ۴ در رابطه ۱، معیار تسلیم دراگر پراگر به صورت رابطه ۵ است:

## ۲-۲- مدل رفتاری دراگر- پراگر

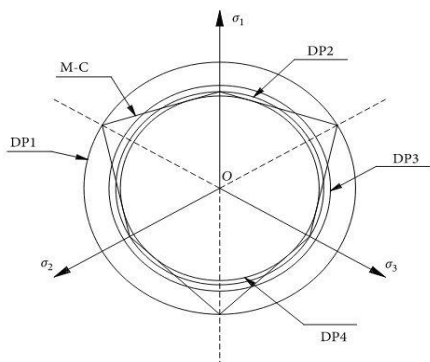
معیار دراگر پراگر مشابه معیار موه‌ر کولمب است. این معیار شکست مخروطی را به عنوان پوش شکست در فضای سه‌بعدی به جای یک هرم شش‌وجهی که مربوط به معیار موه‌ر کولمب است ایجاد می‌کند [۴۳]. معیار موه‌ر کولمب را برای توصیف مکانیزم تسلیم و شکست مواد می‌توان به کار برد. در این معیار وقتی جریان پلاستیک در گوشه‌های سطح تسلیم وجود داشته باشد باعث مشکلاتی می‌شود. معیار دراگر پراگر از پایای سوم تنش انحرافی در سطح تسلیم صرف‌نظر می‌کند و آن را می‌توان به عنوان یک تلاش اولیه برای تخمین معیار موه‌ر کولمب با تابع مسطح در نظر گرفت. این معیار بر اساس پایای اول تنش اصلی و پایای دوم تنش انحرافی است و به دو ثابت مواد که می‌توان به ضرایب موه‌ر کولمب مرتبط شود نیاز دارد (رابطه ۱) [۴۴]:

$$\begin{aligned} f &= \sqrt{J_2} + \alpha I_1 \\ I_2 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \end{aligned} \quad (1)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

$I_1$  ثابت اول تنش اصلی،  $J_2$  ثابت دوم تنش انحرافی،  $\alpha$  و  $Y$

Y و  $\alpha$  وجود دارد که در جدول ۱ مشاهده می‌شود [۴۴].



شکل ۲- حالت‌های مختلف دو معیار شکست در صفحه [۴۴]

$$\left(\sqrt{\frac{1}{6}} - \alpha\right) \sigma_{\theta} - \left(\sqrt{\frac{1}{6}} + \alpha\right) \sigma_r = Y \quad (5)$$

چنانچه:

$$\begin{cases} \lambda = \frac{\sqrt{6} + 6\alpha}{\sqrt{6} - 6\alpha} \\ Y = \frac{6}{\sqrt{6} - 6\alpha} \end{cases} \quad (6)$$

با جایگزینی رابطه ۶ در رابطه ۵،  $\sigma_{\theta}$  به عنوان تابعی از  $\sigma_r$  بیان می‌شود (رابطه ۷):

$$\sigma_{\theta} = \gamma Y + \lambda \sigma_r \quad (7)$$

بر اساس چگونگی ارتباط بین معیار در اگر پراگر و معیار موهر کولمب در صفحه  $\pi$  شکل ۲، روابط متعددی برای محاسبه

جدول ۱- نحوه محاسبه پارامترهای معیار در اگر پراگر [۴۴]

شماره	نوع معیار	$\alpha$	Y
DP1	معیار موهر کولمب از گوشه‌های بیرونی محدود شده، یک معیار تسلیم دایره‌ای است	$(2\sin\varphi)/(\sqrt{3}(3 - \sin\varphi))$	$(6c\cos\varphi)/(\sqrt{3}(3 - \sin\varphi))$
DP2	معیار موهر کولمب از گوشه‌های درونی محدود شده، یک معیار تسلیم دایره‌ای است	$(2\sin\varphi)/(\sqrt{3}(3 + \sin\varphi))$	$(6c\cos\varphi)/(\sqrt{3}(3 + \sin\varphi))$
DP3	معیار موهر کولمب بر اساس مساحت معادل، یک معیار تسلیم دایره‌ای است	$(2\sqrt{3}\sin\varphi)/(\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9 - \sin^2\varphi)})$	$(6\sqrt{3}c\cos\varphi)/(\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9 - \sin^2\varphi)})$
DP4	معیار موهر کولمب با دواير منطبق، برای مسایل کرنش مسطح با قوانین جریان مرتبط	$(\sin\varphi)/(\sqrt{3}(\sqrt{3} + \sin\varphi))$	$(\sqrt{3}c\cos\varphi)/(\sqrt{3} + \sin\varphi)$

در خاک مانند رفتار خاک در گودبرداری‌ها و تونل‌ها است.

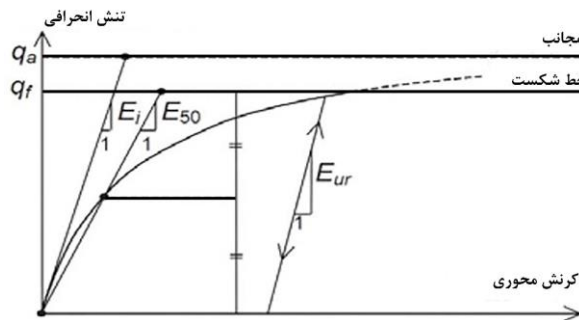
این مدل با هدف بازتولید پدیده‌های ماکروسکوپی موجود در خاک طراحی شده است. سطح تسلیم در مدل‌های با مکانیزم سخت‌شونده در فضای تنش‌های اصلی موقعیت ثابتی ندارد (امکان توسعه سطح تسلیم در اثر تغییر شکل پلاستیک) و امکان بازتولید حالت‌های پس از شکست به صورت واقع‌بینانه‌تری فراهم می‌شود. در این مدل، رفتار خاک پیش از شکست غیرخطی است و با استفاده از سه پارامتر مدول صلیبیت شامل مدول بارگذاری سه‌محوره ( $E_{50}^{ref}$ )، مدول باربرداری و بارگذاری ( $E_{ur}^{ref}$ )، مدول بارگذاری ادیومتری ( $E_{50}^{oed}$ ) توصیف می‌شود. رفتار خاک در مدل سخت‌شونده پس از شکست، بر

### ۲-۳- مدل رفتاری سخت‌شونده

مدل رفتاری سخت‌شونده یکی از مدل‌هایی است که بر مبنای مکانیک خاک حالت بحرانی توسعه داده شده است. این مدل شامل دو حالت استاندارد و کرنش‌های کوچک است. در مدل رفتاری سخت‌شونده، کرنش کلی بر اساس مقدار تنش وابسته به سختی محاسبه می‌شود که مقدار آن در بارگذاری و باربرداری متفاوت بوده و فرض بر این است که شرایط ایزوتروپیک بر توده خاک حاکم است. از این مدل می‌توان برای بررسی رفتار سیلت‌های رسی، خاک‌های شنی و ماسه‌ای و خاک‌های رسی با نسبت پیش‌تحکیمی پایین استفاده کرد. بیشترین کاربرد این مدل در بحث باربرداری و بارگذاری مجدد

ادیومتری ( $E_{50}^{oed}$ ) کنترل می‌شود.

رفتار کلی تنش کرنش، همراه با مدول‌های تغییرشکل مختلف برای مدل سخت‌شونده در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل رفتاری سخت‌شونده به دلیل استفاده از مدول‌های تغییر شکل (صلبیت) وابسته به سطح تنش، رفتار تنش کرنش به ویژه کرنش‌های الاستیک و پلاستیک را با سطح قابل قبول تری نسبت به مدول الاستوپلاستیک پیش‌بینی می‌کند [۴۲].



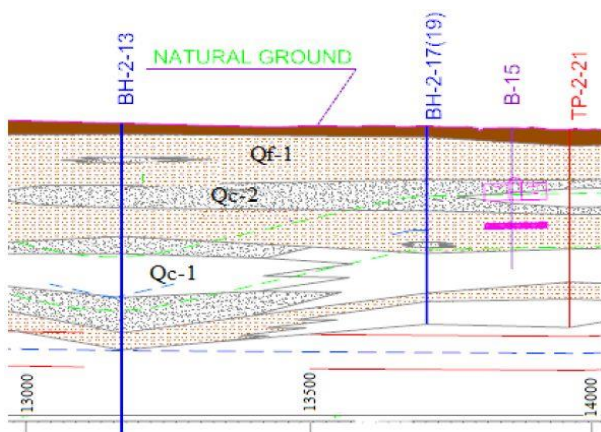
شکل ۳- رابطه تنش کرنش هذلولی استفاده در مدل خاک سخت‌شونده [۴۲]

جدول ۲- طبقه‌بندی واحدهای خاک در مسیر تونل [۴۵]

واحد خاکی	توصیف ژئوتکنیکی
QC-1	شن ماسه‌ای و ماسه شن‌دار همراه با مقداری ریزدانه
QC-2	ماسه رسی - سیلیتی همراه با شن
Qf-1	سیلت رسی با کمی ماسه
Qf-2	رس لایه‌دار با کمی ماسه

۲- عرفی مترو خط A قم

پروژه مترو خط A شهر قم با طولی حدود ۱۴/۷ کیلومتر به صورت زیرزمینی است. بخش زیرزمینی از محله قلعه کامکار در تقاطع کمربندی شروع می‌شود و با عبور از خیابان قلعه کامکار، میدان کشاورز، خیابان امامزاده ابراهیم، میدان معصومیه و میدان سعیدی، خیابان هدف، میدان مطهری، پل علیخانی، خیابان شهید دل آذر به میدان ولیعصر می‌رسد. در ادامه، مسیر مترو در امتداد بلوار خلیج فارس ادامه می‌یابد و در محل میدان بقیه‌اله با یک قوس به سمت میدان انتظار تغییر مسیر می‌دهد و به مسیر مسجد جمکران می‌پیوندد. در مسیر خط A، ۱۶ ایستگاه در تقاطع‌ها و میدان‌های مهم در نظر گرفته شده که با نام‌های A<sub>1</sub> تا A<sub>16</sub> نام‌گذاری شده‌اند.



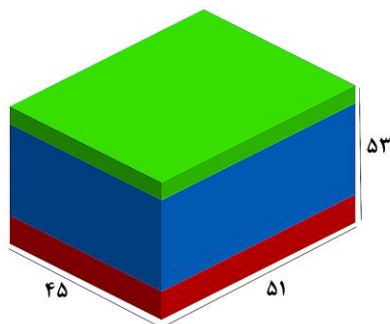
شکل ۴- بخشی از مقطع زمین‌شناسی مورد بررسی کیلومتر ۱۳ تا ۱۴

۴- مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی بخشی از کیلومتر ۱۳ تا ۱۴ خط A مترو قم با

در مطالعات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی انجام گرفته در دو مرحله از مطالعات این پروژه، لایه‌های خاکی مسیر مترو به چهار گونه زمین‌شناسی (دو واحد خاکی ریزدانه و دو واحد خاکی درشت‌دانه) تفکیک شده‌اند. دو واحد خاکی درشت‌دانه QC-1 و QC-2 گسترش نسبتاً زیادی دارد و به صورت لایه‌هایی به نسبت ضخیم و گاه به شکل لنزهای نسبتاً گسترده و ضخیم در میان واحدهای خاکی ریزدانه Qf-1 و Qf-2 قابل مشاهده‌اند (جدول ۲). در شکل ۴ نیمرخ طولی مسیر و مقطع زمین‌شناسی کیلومتر ۱۳ تا ۱۴ مشاهده می‌شود [۴۵].

قم با نرم‌افزار FLAC3D نشان داده شده است با توجه به متقارن بودن نصف مدل برای تحلیل ایجاد شده است.



شکل ۵- هندسه مدل سازی شده مترو قم

#### ۴-۲- تعیین مدل رفتاری و ویژگی‌های مواد

گام بعدی، در انجام مدل‌سازی عددی اعمال مدل رفتاری متناسب با رفتار محیط است. در نرم‌افزار FLAC3D V5 امکان مدل‌سازی ۱۵ نوع مدل رفتاری مصالح سنگی و خاکی وجود دارد [۴۶]. هر یک از مدل‌های رفتاری با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و یکسری از آزمایش‌های شاخص برای شناسایی پارامترهای لازم در مدل رفتاری انتخاب می‌شود. در این پژوهش از مدل رفتاری سخت‌شونده، مدل موهر کولمب و مدل دراگر پراگر برای تحلیل پارامتریک استفاده شده است. در جدول ۳ پارامترهای ژئوتکنیکی مدل ارائه شده است. جدول ۴ و ۵ نیز پارامترهای ورودی مدل‌های رفتاری دراگر پراگر و سخت‌شونده برای این مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۳- پارامترهای ژئوتکنیکی لایه موردنظر مسیر تونل [۴۵]

پارامترها ژئوتکنیکی	لایه فوقانی	لایه وسطی	لایه زیرین
مدول الاستیسیته (KPa)	۳۵۰۰۰	۷۵۰۰۰	۵۰۰۰۰
چسبندگی (KPa)	۳۱	۳۰	۳۰
زاویه اصطکاک (درجه)	۲۸	۳۳	۳۳
نسبت پواسون	۰٫۳۵	۰٫۳	۰٫۳۲
وزن مخصوص خشک ( $\text{KN/m}^3$ )	۱۷	۱۸	۱۹

جدول ۴- پارامترهای مدل دراگر پراگر لایه موردنظر مسیر تونل [۴۵]

مشخصات لایه مدل‌سازی	لایه فوقانی	لایه وسطی	لایه زیرین
مدول بالک (KPa)	۰٫۰۳۸۸	۰٫۰۶۲۵	۰٫۰۴۶۲
پارامتر ماده ( $k_\phi$ ) (KPa)	۳۷٫۴۶	۳۵٫۴۹	۳۵٫۴۹
پارامتر ماده ( $q_\phi$ ) (KPa)	۰٫۶۴۲	۰٫۷۶۸۳	۰٫۷۶۸۳
مدول برشی (KPa)	۰٫۱۲۹	۰٫۲۸۸	۰٫۱۸۹
مقاومت کششی (KPa)	۵۸٫۲۹	۴۶٫۱۹	۴۶٫۱۹
وزن مخصوص خشک ( $\text{KN/m}^3$ )	۱۷	۱۸	۱۹

استفاده از نرم‌افزار FLAC3D که یک برنامه تفاضل محدود از مجموعه نرم‌افزارهای شرکت ITASCA است و برای محیط‌های پیوسته به کار می‌رود انجام شده است.

#### ۴-۱- هندسه و ابعاد مدل

برای تعیین ابعاد بلوک باید در نظر داشت که در مقطع عرضی و عمود بر محور تونل، عرض بلوک باید به گونه‌ای انتخاب شود که موقعیت تنش‌ها در اطراف مرز بلوک مستقل از آشفتگی میدان تنش در اطراف حفاری و مقدار آن‌ها با تنش‌های اولیه قبل از حفاری برابر باشد. برای ایجاد چنین مدلی حداقل ابعاد مدل بر اساس قوانین زیر انتخاب شده است [۳۹]:

- $(H+4D)$ ، برای ارتفاع مدل
- $(H+3D)$ ، برای طول مدل
- $(3H)$ ، برای نصف عرض مدل
- $H$  عمق تونل و  $D$  قطر تونل است

برای رسیدن به دقت مناسب در نتایج، در اطراف محدوده حفاری به دلیل آشفتگی در میدان‌های برجای تنش و همچنین جابه‌جایی‌های بزرگتر، ابعاد مش‌ها و فاصله گره‌ها کوچک‌تر شد و با فاصله گرفتن از محل حفاری ابعاد المان‌ها بزرگتر در نظر گرفته شد. در این تحقیق برای دقت در نتایج، در تمام امتداد محور طولی تونل، ابعاد مش به گونه‌ای انتخاب شده است که کمتر از آن، ابعاد مش تأثیر بسیار کمی در نتایج دارد و تنها منجر به زمان‌بر شدن اجرای مدل می‌شود. در شکل ۵ هندسه مدل ایجاد شده تونل مترو

جدول ۵- پارامترهای مدل سخت‌شونده لایه مورد نظر مسیر تونل [۴۵]

مشخصات مدل رفتاری	کرنش برشی (درصد)	چسبندگی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)
لایه اول	۰	۰/۰۱۸	۲۰
	۰/۱	۰/۰۱۵	۲۵
لایه دوم	۰	۰/۰۳	۲۵
	۰/۰۱	۰/۰۲۵	۳۰
لایه سوم	۰	۰/۰۲۲	۲۵
	۰/۱	۰/۰۱۸	۳۰

## ۴-۳- اعمال شرایط مرزی و اولیه

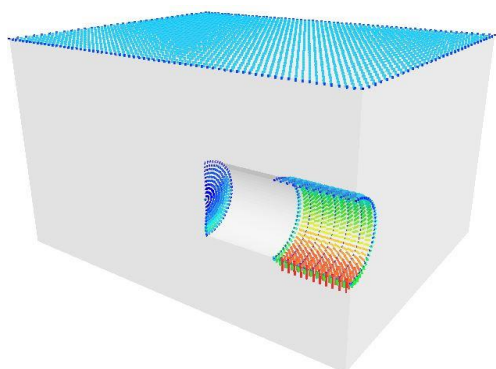
به طور خطی با افزایش عمق، افزایش می‌یابد تا تاثیر دانسیته دوغاب نیز در نظر گرفته شود. در شکل ۶ بار ناشی از ترافیک، فشار جبهه‌کار و فشار تزریق دوغاب اعمالی به مدل نشان داده شده است.

جدول ۶- مشخصات سپر ماشین [۴۵]

الاستیک	مدل رفتاری
۲۱۰	مدول الاستیسیته (Gpa)
۴۸,۸	وزن (KN/m/m)
۰/۲	نسبت پواسون
۱۰۰۰۰	صلبیت محوری (MN/m)
۵۰	صلبیت خمشی (MNm <sup>2</sup> /m)
۰/۱	ضخامت (m)
۹	طول سپر (m)

جدول ۷- مشخصات پوشش بتنی [۴۵]

الاستیک خطی	مدل رفتاری
۳۱	مدول الاستیسیته (GPa)
۲۴۰۰	دانسیته (kg/m <sup>3</sup> )
۰/۳۲	ضخامت (m)
۰/۲	نسبت پواسون



شکل ۶- بار ترافیک، فشار جبهه‌کار و فشار تزریق اعمالی در مدل سازی

برای اعمال شرایط مرزی، ابتدا و انتهای مدل در امتداد محور X و Y با استفاده از دستور Fix ثابت شده، همچنین قسمت پایین مدل در امتداد Z نیز ثابت شد. در قسمت بالای مدل بار ناشی از ترافیک به صورت گسترده به مدل اعمال شده است [۳۹]، [۴۱]، [۴۷] و [۴۸]. این بار برابر ۲۰ کیلو پاسکال است [۴۵]. تنش‌های برجای قائم در مدل به صورت ثقلی و نسبت تنش افقی به قائم برابر با ضریب فشار خاک در حالت سکون  $k_0 = 1 - \sin\phi$  در نظر گرفته شده است، بنابراین تنش افقی به صورت  $\sigma_h = (1 - \sin\phi)\sigma_v$  استفاده شده است.

## ۴-۴- فرآیند حفاری تونل و تزریق دوغاب

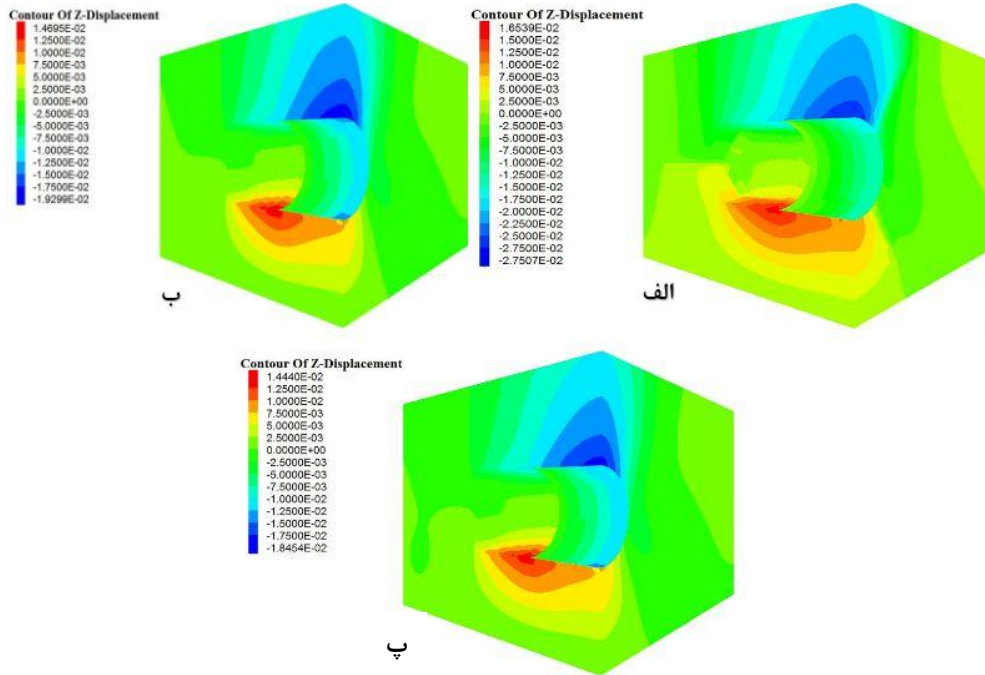
برای تطبیق هر چه بیشتر شرایط حفاری با واقعیت، مدل‌سازی عملیات حفاری به صورت مرحله به مرحله و در گام‌های ۱/۵ متری (معادل طول سگمنت) و با اعمال شرایط سپر تا متر ۹ متری (طول سپر) حفاری می‌شود، سپس با عبور متر ۹ متری از هر گام و حرکت دستگاه حفاری به سمت جلو در هر گام حفاری، هم‌زمان با مدل‌سازی سپر در قسمت حفاری شده یک گام حفاری از قسمت ابتدایی سپر حذف شده و المان پوسته‌ای پوشش بتنی و تزریق پشت سگمنت هم‌زمان در قسمت حذف شده سپر انجام می‌شود و تا انتهای متر ۹ متری حفاری این روند ادامه می‌یابد. مشخصات و اطلاعات مربوط به سپر ماشین حفار و مشخصات پوشش سگمنتی در جدول‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود.

تزریق دوغاب در پشت انتهای سپر با روش بسیار ساده‌ای با اعمال توزیع فشار مرزی در زمان تزریق شبیه‌سازی شده است [۳۹]. برای سادگی کار، توزیع فشار تزریق در انتهای سپر به طور خطی با افزایش عمق، افزایش می‌یابد تا تاثیر دانسیته دوغاب نیز در نظر گرفته شود. در این مدل، میانگین فشار تزریق دوغاب در فشار ۱۰۰ کیلو پاسکال برابر با ۱۵۰ کیلو پاسکال در کف و بالای مدل تعیین شده است. برای سادگی کار، توزیع فشار تزریق در انتهای سپر



شده نشان داده می‌شود در جدول ۸ نتایج مدل‌سازی عددی با مدل‌های رفتاری مختلف و نتایج حاصل از ابزاربندی مشاهده می‌شود. با توجه به جدول، جابه‌جایی ثبت شده به وسیله پین نشست‌سنجی CS.LP.22 برابر ۱۵/۱ میلی‌متر است و این مقدار نشست در مدل‌سازی با معیار سخت‌شونده برابر ۱۸/۱ میلی‌متر و برای مدل‌های رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر به ترتیب ۱۰/۸ و ۱۰/۱ میلی‌متر به دست آمده است.

برای اعتبارسنجی و بررسی صحت روند مدل‌سازی عددی سه‌بعدی تفاضل محدود از گزارش‌ها مربوط به ابزاربندی نشست سطح زمین که با استفاده از پین‌های نشست سطحی انجام گرفته است، استفاده شد. این پین‌ها در مقطع مورد بررسی نصب شده و حداقل سه قرائت در زمان مختلف برای آن‌ها انجام گرفته است تا نشست نهایی ثبت شود. در شکل ۷ جابه‌جایی‌های قائم مربوط به مدل‌سازی عددی برای سه مدل رفتاری در نظر گرفته



شکل ۷- جابه‌جایی قائم مربوط به مدل‌سازی در مدل‌های رفتاری؛ الف) سخت‌شونده، ب) موهر کولمب و پ) دراگر پراگر

جدول ۸- مقایسه نتایج حاصل از ابزاربندی و مدل‌سازی عددی

شماره پین	فشار جبهه کار (کیلو پاسکال)	بیشترین نشست سطح در ابزار بندی	بیشترین نشست سطح در مدل‌سازی
CS.LP.22	۱۰۰	۱۵/۱	سخت شونده
			موهر کولمب
			دراگر پراگر
			۱۰/۸
			۱۰/۱

### ۵- مطالعه پارامتریک

موهر کولمب، دراگر پراگر و سخت‌شونده استفاده شده است. در این تحقیق برای هر مدل رفتاری ۲۰ مدل‌سازی انجام و در مجموع ۶۰ مدل مختلف ساخته شده است. در جدول ۹ مقادیر استفاده شده برای هر مدل ساخته نشان داده شده است.

پارامترهای استفاده شده در تحلیل شامل مدول الاستیسیته (E)، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (φ)، نسبت پواسون (ν) و وزن مخصوص خاک (γ) است که در مدل‌های رفتاری

جدول ۹- مدل‌های ساخته شده و مقادیر هر پارامتر

No	strata	E(MPa)	C(KPa)	φ(°)	ν	γ( $\frac{KN}{m^3}$ )	K <sub>0</sub>
۱	A	۱۰	۳۱	۲۸	۰/۳۵	۱۷	۰/۵۳
	B	۵۰	۳۰	۳۳	۰/۳	۱۸	۰/۴۵
	C	۲۵	۳۰	۳۳	۰/۳۲	۱۹	۰/۴۵

No	strata	E(MPa)	C(KPa)	$\varphi(^{\circ})$	$\vartheta$	$\gamma(\frac{KN}{m^3})$	$K_0$
۲	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۳	A	۶۰	۳۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۱۰۰	۳۰	۳۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۴	A	۱۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۱۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۱۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۵	A	۳۵	۶	۲۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۵	۳۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۵	۳۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۶	A	۳۵	۱۶	۲۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۱۵	۳۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۱۵	۳۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۷	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۸	A	۳۵	۴۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۴۰	۳۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۴۰	۳۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۹	A	۳۵	۳۱	۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۱۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۱۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۱۰	A	۳۵	۳۱	۱۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۲۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۲۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۱۱	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۱۲	A	۳۵	۳۱	۳۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۴۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۴۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۱۳	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۲۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۲	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۲۲	۱۹	۰٫۴۵
۱۴	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۳	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۲۵	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۲۷	۱۹	۰٫۴۵

No	strata	E(MPa)	C(KPa)	$\varphi(^{\circ})$	$\theta$	$\gamma\left(\frac{KN}{m^3}\right)$	$K_0$
۱۵	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۱۶	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۴	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳۵	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۳۷	۱۹	۰٫۴۵
۱۷	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۶	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳	۱۷	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۳۲	۱۸	۰٫۴۵
۱۸	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۷	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳	۱۸	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۳۲	۱۹	۰٫۴۵
۱۹	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۸	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳	۱۹	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۳۲	۲۰	۰٫۴۵
۲۰	A	۳۵	۳۱	۲۸	۰٫۳۵	۱۹	۰٫۵۳
	B	۷۵	۳۰	۳۳	۰٫۳	۲۰	۰٫۴۵
	C	۵۰	۳۰	۳۳	۰٫۳۲	۲۱	۰٫۴۵

## ۶- نتایج تحلیل

### ۶-۱- تأثیر الاستیسیته

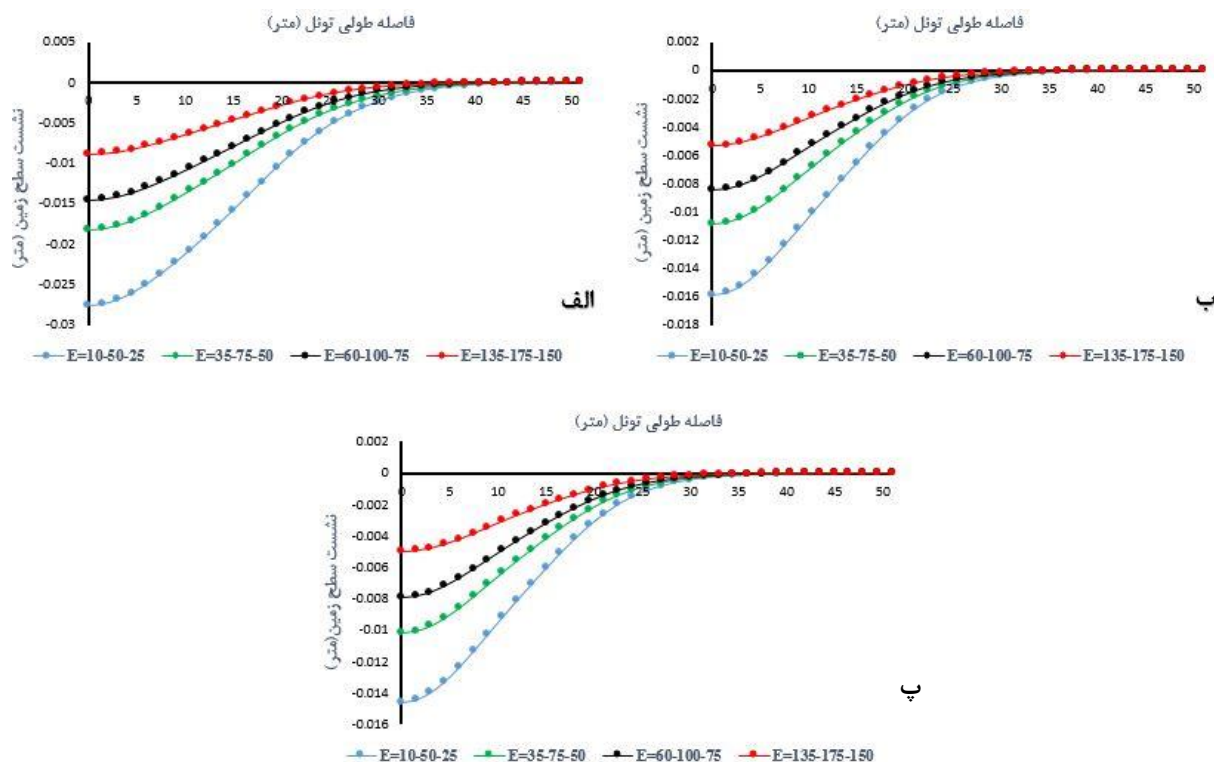
سطح زمین بیشتر از دو مدل رفتاری دیگر است. در سه مدل رفتاری با افزایش مدول الاستیسیته میزان نشست سطح زمین کاهش می‌یابد و این کاهش نشست با افزایش مدول الاستیسیته کمتر می‌شود. در مدل رفتاری سخت‌شونده تغییرات مدول الاستیسیته تأثیر بیشتری در کاهش نشست سطح زمین دارد و با افزایش مدول الاستیسیته تا حداکثر مقدار انتخابی میزان نشست سطح زمین ۱۸٫۷ میلی‌متر کاهش می‌یابد. تأثیر تغییرات مدول الاستیسیته در کاهش نشست سطح زمین در مدل‌های رفتاری موه‌ر کولمب و دراگر پراگر مشابه هم است و افزایش مدول الاستیسیته تا حداکثر مقدار انتخابی باعث کاهش نشست در حدود ۱۰٫۵ و ۹٫۶ میلی‌متر برای مدل موه‌ر کولمب و دراگر پراگر می‌شود.

مطابق بررسی‌ها، شروع نشست سطح زمین در مدل رفتاری سخت‌شونده در کمترین مدول انتخابی، حدود ۳ برابر قطر تونل در جلوی جبهه‌کار است و با افزایش مدول شروع نشست به حدود ۲٫۵ برابر قطر تونل در جلوی جبهه‌کار کاهش می‌یابد. در مدل رفتاری موه‌ر کولمب شروع نشست حدود ۲٫۲ برابر قطر تونل در جلوی جبهه‌کار است و با افزایش مدول شروع نشست سطح زمین ۱٫۵ متر به جبهه‌کار نزدیک‌تر می‌شود. در مدل دراگر پراگر شروع نشست از حدود ۲٫۷ برابر قطر تونل در جلوی جبهه‌کار تا ۲٫۴ برابر قطر تونل با افزایش مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد.

محدوده تغییرات مدول الاستیسیته خط A مترو قم همان‌طور که در جدول ۹ نشان داده شده است برای لایه فوقانی، میانی و تحتانی به ترتیب بین ۱۰ تا ۱۳۵، ۵۰ تا ۱۷۵ و ۲۵ تا ۱۵۰ مگاپاسکال است. با توجه به تأثیرگذاری بالای مدول الاستیسیته بر نشست سطح زمین این پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است. در نرم‌افزار FLAC3D که در این تحقیق استفاده شده است، مدول الاستیسیته به صورت مستقیم در خواص خاک وارد نمی‌شود بلکه مدول بالک و مدول برشی جز داده‌های ورودی‌اند؛ بنابراین تغییرات مدول الاستیسیته با استفاده از رابطه ۸ در مدل اعمال می‌شود:

$$\begin{cases} G = \frac{E}{2(1+\theta)} \\ K = \frac{E}{3(1-2\theta)} \end{cases} \quad (8)$$

تأثیر مدول الاستیسیته مختلف در نیمرخ طولی نشست در مدل‌های رفتاری سخت‌شونده، موه‌ر کولمب و دراگر پراگر در شکل ۸ مشاهده می‌شود. در مدل رفتاری سخت‌شونده میزان نشست



شکل ۸- تاثیر مدول الاستیسیته در نشست طولی سطح زمین در مدل‌های رفتاری؛ الف) سخت‌شونده، ب) موهر کولمب و پ) دراگر پراگر

پارامتر چسبندگی در این تحقیق بین ۵ تا ۴۱ کیلوپاسکال متغیر است. مطابق بررسی‌ها و بر اساس شکل ۱۰ بیشترین نشست رخ داده در مدل رفتاری سخت‌شونده در کمترین میزان چسبندگی ایجاد شده و با افزایش چسبندگی نشست سطح زمین کاهش پیدا کرده و این کاهش حدود ۵/۲ میلی‌متر است. در مدل رفتاری موهر کولمب با افزایش چسبندگی کاهش در میزان نشست به مراتب محسوس‌تر از مدل رفتاری دراگر پراگر است و در مدل رفتاری دراگر پراگر افزایش چسبندگی تاثیر کمتری در کاهش نشست سطح زمین داشته است، کاهش در میزان نشست در حداکثر چسبندگی انتخابی نسبت به کمترین چسبندگی در نظر گرفته‌شده در مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر به ترتیب ۵ و ۲/۷ میلی‌متر است.

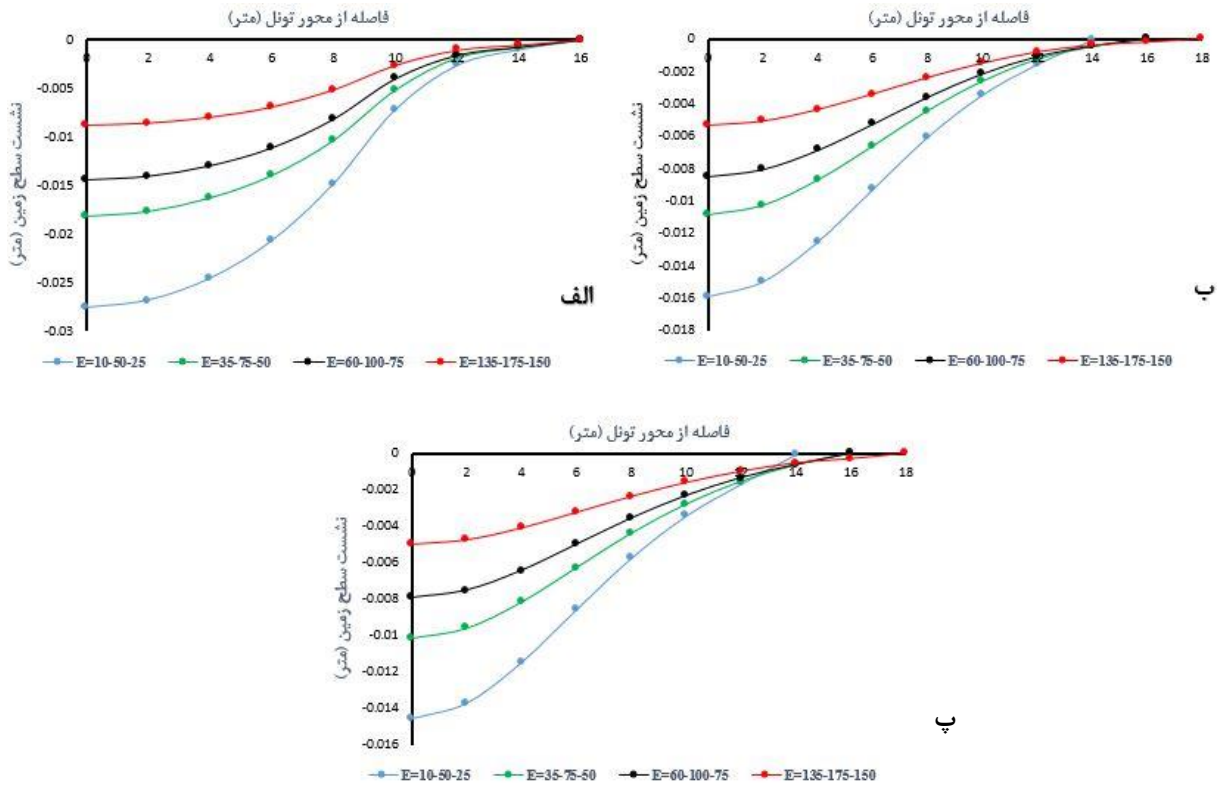
تاثیر چسبندگی در شروع نشست سطح زمین در جلو جبهه‌کار بررسی و در مدل رفتاری سخت‌شونده و در کمترین چسبندگی در حدود ۳/۳ برابر قطر تونل در جلو جبهه‌کار بوده است و با افزایش چسبندگی به حدود ۲/۵ برابر قطر تونل در جلو جبهه‌کار کاهش می‌یابد. در مدل رفتاری موهر کولمب با افزایش چسبندگی شروع نشست از ۲/۵ برابر به ۲ برابر قطر تونل در جلوی جبهه‌کار کاهش می‌یابد. در مدل دراگر پراگر نیز شروع نشست از ۲/۴ تا ۲/۸ برابر قطر تونل در جلوی جبهه‌کار متغیر است.

مقدار درصد نشست سطح زمین در مقطع جبهه‌کار برای مدل‌های رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر در مدول الاستیسیته مختلف بین ۲۷ تا ۲۸ درصد کل نشست رخ داده در سطح زمین است. در مدل رفتاری سخت‌شونده برای کمترین مدول الاستیسیته حدود ۴۴ درصد کل نشست سطح زمین در مقطع جبهه‌کار رخ می‌دهد و این میزان نشست در حالتی که مقدار مدول الاستیسیته بیشترین مقدار خود را در این تحقیق داشته ۴۰ درصد کل نشست رخ داده است.

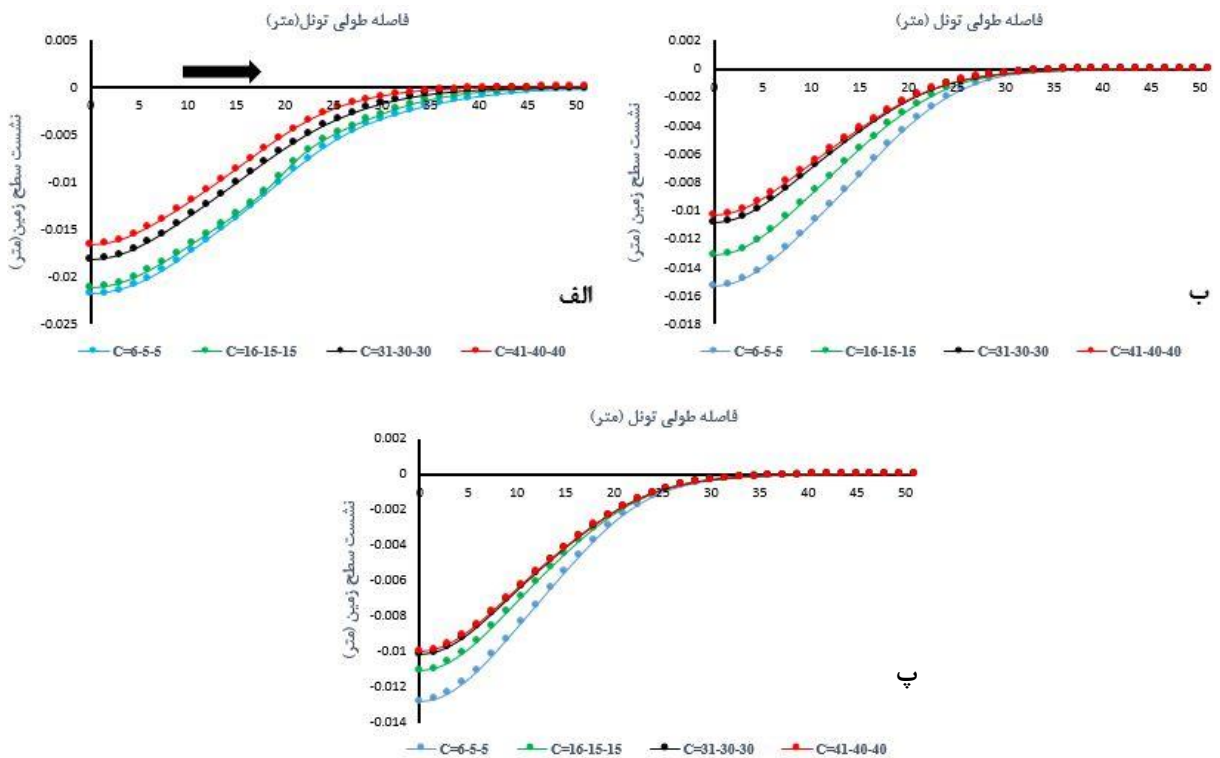
شکل ۹ نیمرخ عرضی نشست را نشان می‌دهد. در مدل‌های رفتاری دراگر پراگر و موهر کولمب با کاهش مدول، تغییرات نشست ناشی از حفر تونل در فاصله کمتری از محور تونل حادث می‌شود و با افزایش مدول الاستیسیته گودی عرض نشست بیشتر می‌شود. در مدل رفتاری سخت‌شونده برای مقادیر مختلف مدول‌های الاستیسیته نشست در فاصله تقریباً مشخصی به صفر می‌رسد.

#### ۲-۶- تاثیر چسبندگی

با توجه به تاثیر زیاد چسبندگی در ویژگی‌های خاک در این بخش اثرات این پارامتر بر نشست سطح زمین بررسی می‌شود. در مدل رفتاری سخت‌شونده تغییرات چسبندگی به عنوان تابعی از کرنش برشی کنترل می‌شود که در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۹- تأثیر مدول الاستیسیته در نشست عرضی سطح زمین در مدل‌های رفتاری؛ الف) سخت‌شونده، ب) موهر کولمب و پ) دراگر پراگر

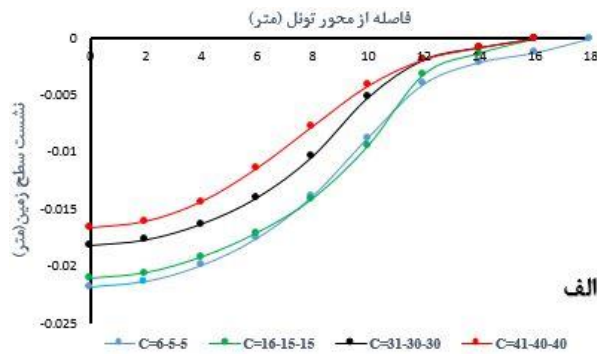


شکل ۱۰- تأثیر چسبندگی در نشست طولی سطح زمین در مدل‌های رفتاری؛ الف) سخت‌شونده، ب) موهر کولمب و پ) دراگر پراگر

نشست رخ داده در سطح زمین است و در بیشترین چسبندگی ۳۸ درصد کل نشست رخ داده است. در کمترین چسبندگی

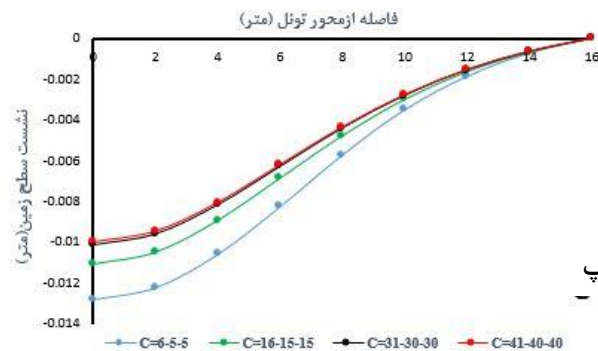
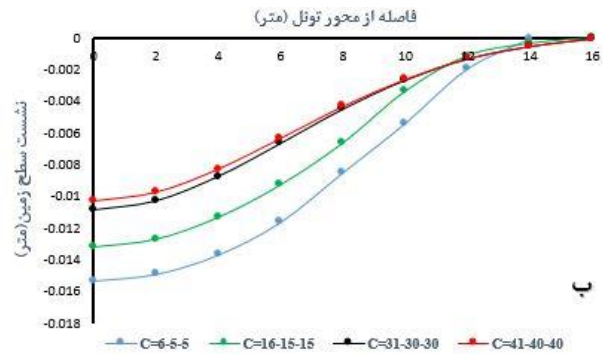
درصد نشست سطح زمین در مقطع جبهه کار در مدل رفتاری سخت‌شونده در کمترین چسبندگی ۵۰ درصد کل

۱۱ نشان داده شده است؛ مطابق شکل هر چه مقدار چسبندگی کمتر باشد نشست سطح زمین در فاصله دورتری از محور تونل صفر می شود و چسبندگی بیشتر سبب کاهش عرض گودی نشست سطح زمین می شود. تغییرات نیمرخ عرضی نشست در مدل های موهر کولمب و دراگر پراگر با افزایش چسبندگی نسبت به مدل رفتاری سخت شونده کمتر است و عرض گودی نشست در چسبندگی های مختلف دچار تغییرات محسوسی نمی شود.



درصد نشست سطح زمین در جلوی جبهه کار برای مدل رفتاری موهر کولمب ۳۴ درصد کل نشست رخ داده در سطح زمین بوده است و در بیشترین چسبندگی انتخابی به ۲۷ درصد کل نشست رخ داده در سطح زمین کاهش می یابد. دراگر پراگر درصد نشست سطح زمین در جلو جبهه کار را بین ۲۸ تا ۲۹ درصد کل نشست رخ داده نشان می دهد.

نیمرخ عرضی نشست در مدل رفتاری سخت شونده در شکل



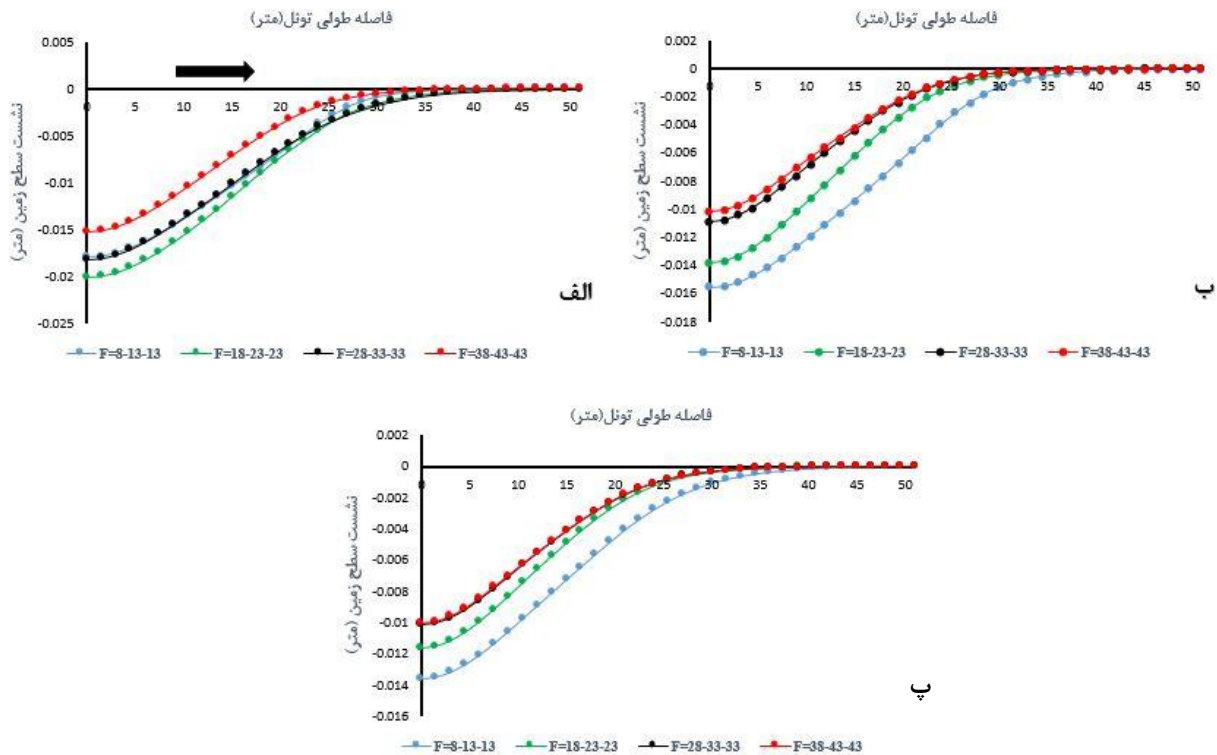
شکل ۱۱- تاثیر چسبندگی در نشست عرضی سطح زمین در مدل های رفتاری؛ الف) سخت شونده، ب) موهر کولمب و پ) دراگر پراگر

است. کاهش در میزان نشست در حداکثر زاویه اصطکاک داخلی انتخابی نسبت به کمترین زاویه اصطکاک داخلی در نظر گرفته شده در مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر به ترتیب ۵/۳ و ۳/۵ میلی متر است.

در مدل رفتاری سخت شونده شروع نشست سطح زمین در حدود ۲/۲ تا ۲/۸ برابر قطر تونل در جلوی جبهه کار برای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک داخلی است. در مدل رفتاری موهر کولمب در حالتی که زاویه اصطکاک داخلی کمترین میزان انتخابی باشد، شروع نشست در حدود ۲/۸ برابر قطر تونل در جلوی جبهه کار است و در سایر زوایای اصطکاک داخلی شروع نشست سطح زمین به حدود ۲ برابر قطر تونل در جلوی جبهه کار کاهش می یابد. در مدل دراگر پراگر شروع نشست از حدود ۲/۳ تا ۲/۸ برابر قطر تونل در جلوی جبهه کار متغیر است.

### ۳-۶- زاویه اصطکاک داخلی

محدوده بررسی زاویه اصطکاک در این تحقیق بین ۸ تا ۴۳ درجه است. در مدل رفتاری سخت شونده تغییرات زاویه اصطکاک نیز به عنوان تابعی از کرنش برشی کنترل می شود که در جدول ۵ آورده شده است. مطابق شکل ۱۲- الف بیشترین نشست سطح زمین در حالتی که لایه ها فوقانی، میانی و تحتانی به ترتیب دارای زاویه اصطکاک ۱۸، ۲۳ و ۲۳ باشد رخ می دهد. مدل رفتاری سخت شونده برخلاف دو مدل رفتاری دیگر در کمترین زاویه اصطکاک داخلی، بیشترین نشست سطح زمین را منجر نمی شود. مدل رفتاری سخت شونده در بیشترین زاویه اصطکاک داخلی نشست در حدود ۱۵ میلی متر را سبب می شود. بیشترین نشست سطح در مدل های رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر در کمترین زاویه اصطکاک رخ داده و با افزایش زاویه اصطکاک داخلی نشست سطح زمین کاهش یافته



شکل ۱۲- تأثیر زاویه اصطکاک در نشست طولی سطح زمین در مدل‌های رفتاری؛ الف) سخت‌شونده، ب) موهر کولمب و پ) دراگر پراگر

است، برای لایه فوقانی، میانی و تحتانی به ترتیب بین ۰/۲۵ تا ۰/۴، ۰/۲ تا ۰/۳۵ و ۰/۲۷ تا ۰/۳۷ است. تأثیر نسبت پواسون‌های مختلف در نیمرخ طولی نشست در مدل‌های رفتاری موهر کولمب، دراگر پراگر و سخت‌شونده در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. بر اساس بررسی‌ها در مدل رفتاری سخت‌شونده با افزایش ضریب پواسون مقدار نشست سطح زمین کاهش یافته، این میزان کاهش نشست با افزایش نسبت پواسون حدود ۵ میلی‌متر است. افزایش نسبت پواسون در مدل رفتاری موهر کولمب منجر به کاهش نشست سطح زمین در حدود ۲ میلی‌متر می‌شود. مدل رفتاری دراگر پراگر تأثیرپذیری کمتری از نسبت پواسون دارد و افزایش این نسبت کاهش حدود ۱/۲ میلی‌متری نشست سطح زمین را منجر می‌شود.

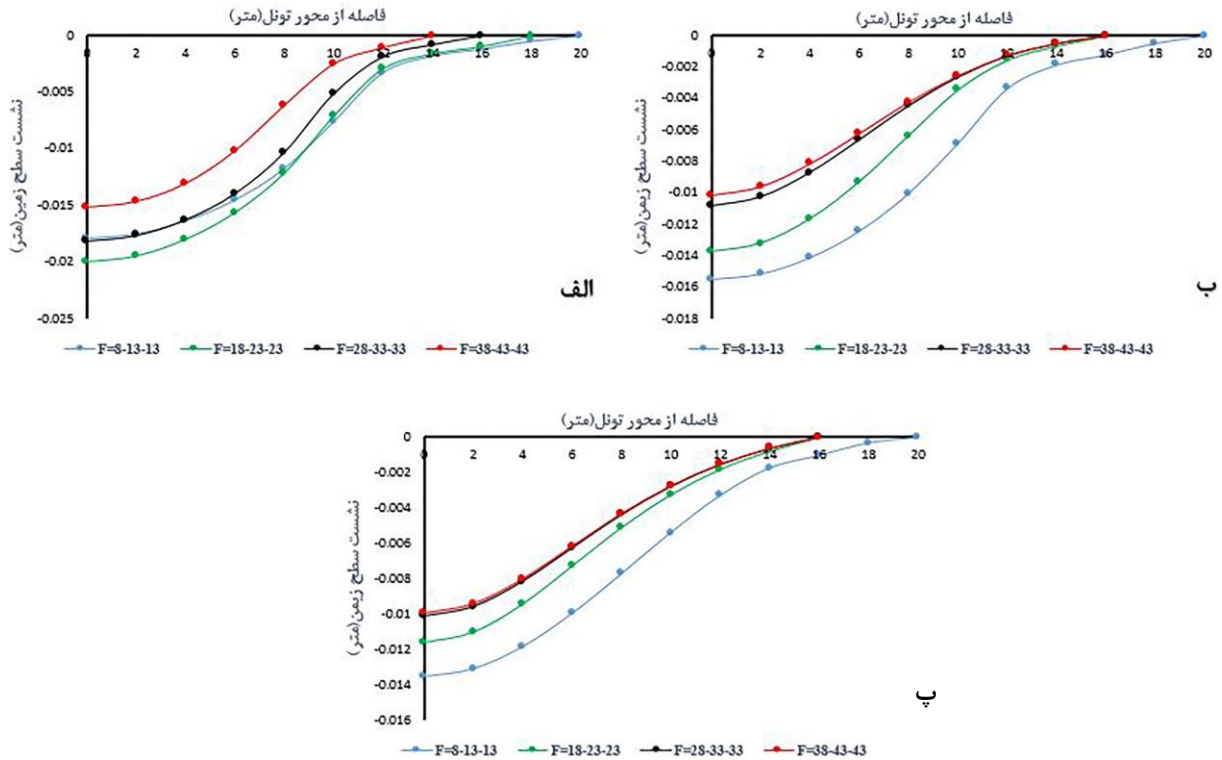
تأثیر پواسون در شروع نشست سطح زمین در جلو جبهه‌کار بررسی و در مدل رفتاری سخت‌شونده و در کمترین پواسون شروع نشست در حدود ۳/۳ برابر قطر تونل در جلو جبهه‌کار است و با افزایش نسبت پواسون به حدود ۲/۴ برابر قطر تونل در جلو جبهه‌کار کاهش می‌یابد. در مدل رفتاری موهر کولمب شروع نشست از ۲/۲ برابر قطر تا ۲/۸ برابر قطر تونل در جلو پراگر نیز از حدود ۲/۷ تا ۲/۵ برابر قطر تونل در جلو جبهه‌کار نشست سطح زمین شروع شده و نسبت پواسون‌های مختلف تأثیر کمتری در شروع نشست نسبت به دو مدل دیگر دارد.

در مدل رفتاری سخت‌شونده درصد نشست سطح زمین در مقطع جبهه‌کار برای کمترین زاویه اصطکاک داخلی حدود ۴۶ درصد کل نشست سطح زمین است. این درصد نشست در حالتی که مقدار زاویه اصطکاک داخلی بیشترین مقدار خود را دارد حدود ۳۳ درصد کل نشست رخ داده است. مدل رفتاری موهر کولمب درصد نشست سطح زمین در جلوی جبهه‌کار را برای کمترین و بیشترین زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب در حدود ۴۹ و ۲۸ درصد کل نشست سطح زمین نشان می‌دهد. مدل دراگر پراگر این درصد نشست را برای کمترین و بیشترین زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب در حدود ۴۱ و ۲۸ درصد کل نشست سطح زمین نشان می‌دهد.

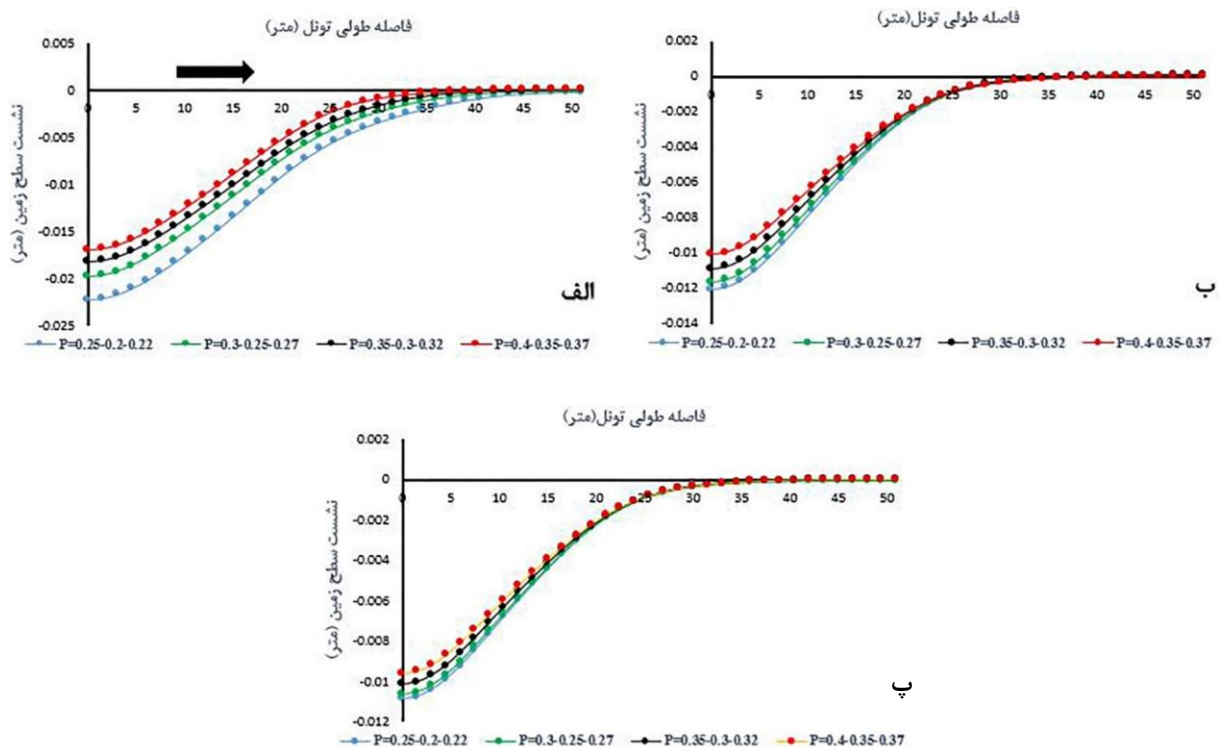
شکل ۱۳- الف) نیمرخ عرضی نشست در مدل رفتاری سخت‌شونده را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش زاویه اصطکاک داخلی نشست سطح زمین در فاصله کمتری از محور تونل به صفر می‌رسد و هر چه مقدار زاویه اصطکاک کمتر باشد، عرض گودی نشست سطح زمین بیشتر می‌شود. مطابق شکل ۱۳- ب و ۱۳- ج در مدل‌های رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر نیز افزایش زاویه اصطکاک سبب کاهش عرض گودی نشست سطح زمین می‌شود.

#### ۴-۶- نسبت پواسون

محدوده تغییرات نسبت پواسون که در جدول ۹ آورده شده



شکل ۱۳- تاثیر زاویه اصطکاک در نشست عرضی سطح زمین در مدل‌های رفتاری؛ الف) سخت‌شونده، ب) موهر کولمب و پ) دراگر پراگر



شکل ۱۴- تاثیر نسبت پواسون در نشست طولی سطح زمین در مدل‌های رفتاری؛ الف) سخت‌شونده، ب) موهر کولمب و پ) دراگر پراگر

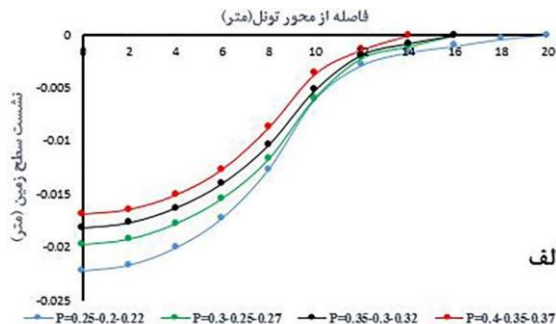
موهر کولمب و دراگر پراگر درصد مشابهی را نشان می‌دهد و این مقدار ۲۷ تا ۲۸ درصد کل نشست رخ داده در سطح زمین است.

شکل ۱۵ نیمرخ عرضی نشست در مدل رفتاری

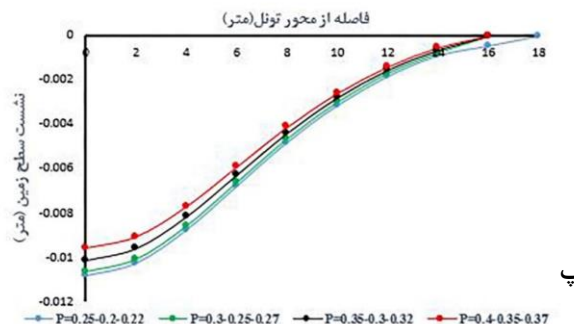
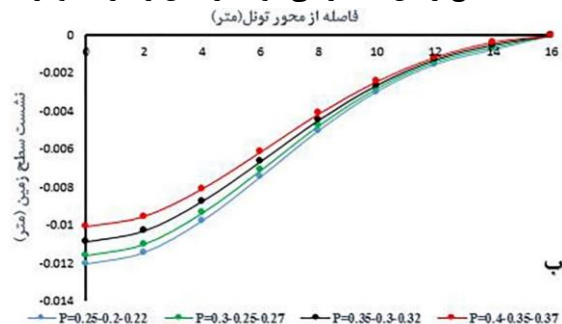
در مدل رفتاری سخت‌شونده درصد نشست سطح زمین در مقطع جبهه کار برای کمترین و بیشترین نسبت پواسون انتخابی بین ۴۸ و ۳۹ درصد کل نشست رخ داده در سطح زمین است. درصد نشست سطح زمین در مقطع جبهه کار در مدل‌های رفتاری



کولمب افزایش نسبت پواسون تأثیری در عرض گودی نشست ندارد؛ مدل رفتاری دراگر پراگر کاهش عرض گودی نشست را با افزایش نسبت پواسون نشان می‌دهد.



سخت‌شونده را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش نسبت پواسون نشست سطح زمین در فاصله نزدیک‌تری از محور تونل به صفر می‌رسد و هر چه مقدار نسبت پواسون کمتر باشد عرض گودی نشست سطح زمین بیشتر می‌شود. در مدل رفتاری موهر



شکل ۱۵- تأثیر نسبت پواسون در نشست عرضی سطح زمین در مدل‌های رفتاری؛ (الف) سخت‌شونده، (ب) موهر کولمب و (پ) دراگر پراگر

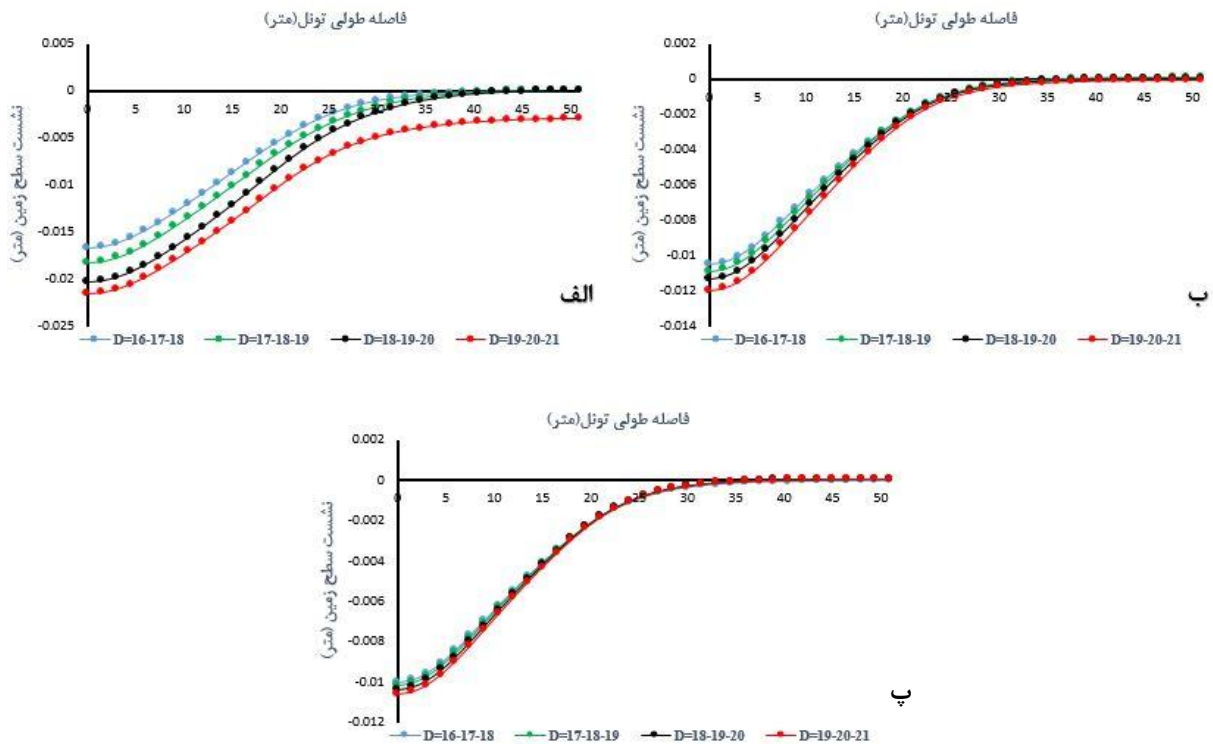
تأثیر وزن مخصوص در شروع نشست سطح زمین در جلو جبهه کار بررسی شده است و در مدل رفتاری سخت‌شونده برای مقادیر انتخابی بین ۲٫۸۷ تا ۳٫۵ برابر قطر تونل در جلو جبهه کار بوده که متغیر است. در مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر با افزایش وزن مخصوص شروع نشست از ۳٫۵ برابر به ۲ برابر قطر تونل در جلوی جبهه کار متغیر است. در هر سه مدل رفتاری و در بیشترین وزن مخصوص در نظر گرفته شده شروع نشست سطح زمین در فاصله بیشتر از فاصله در نظر گرفته شده در ابعاد مدل‌سازی اتفاق می‌افتد.

در مدل رفتاری سخت‌شونده، نشست سطح زمین در مقطع جبهه کار در کمترین وزن مخصوص حدود ۳۹ درصد کل نشست و در حالتی که وزن مخصوص بیشترین مقدار است؛ به حدود ۵۳ درصد کل نشست می‌رسد. مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر درصد نشست سطح زمین در مقطع جبهه کار بین ۲۷ تا ۲۸ درصد کل نشست رخ داده در سطح زمین ثابت می‌کند. نیمرخ عرضی نشست برای وزن مخصوص مختلف در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مطابق شکل در هر سه مدل رفتاری افزایش وزن مخصوص تأثیری در گودی عرض نشست ندارد.

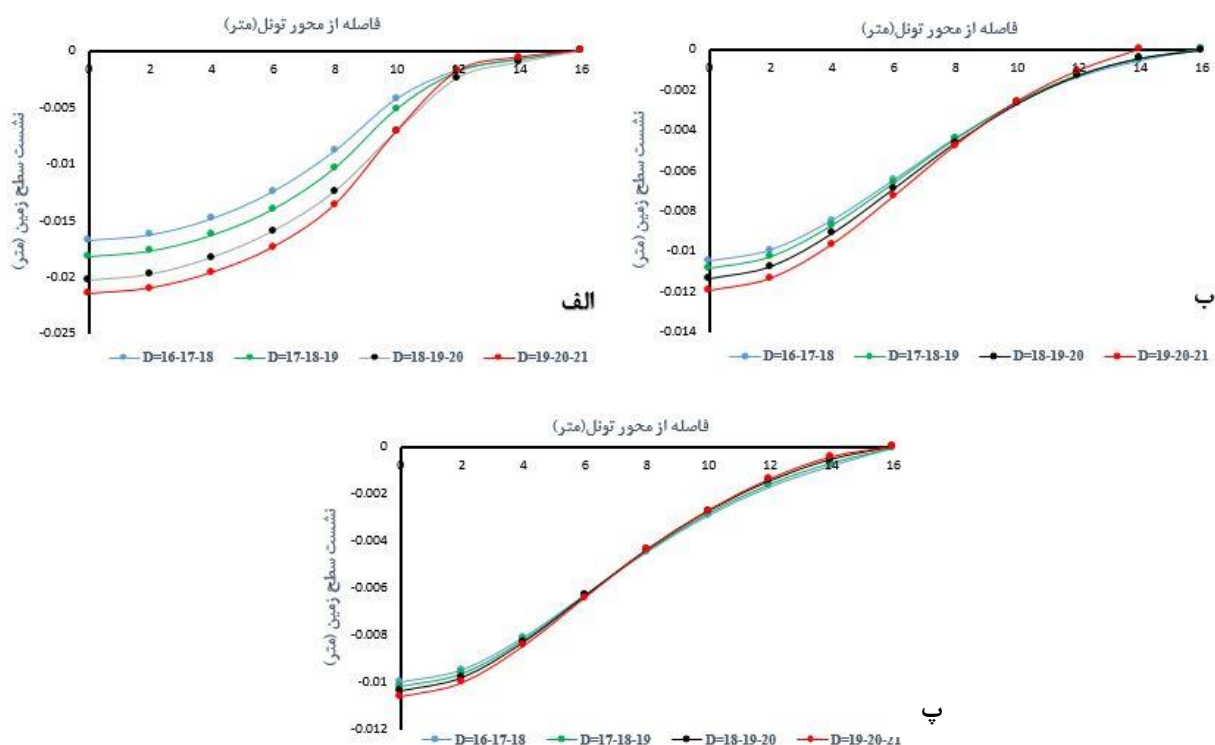
#### ۵-۶- وزن مخصوص خاک

برای بررسی اثر وزن مخصوص خاک بر میزان نشست سطح زمین تمام پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی، ثابت فرض شده و مقادیر پارامتر وزن مخصوص مطابق جدول ۹ در نظر گرفته شده است.

مطابق بررسی‌ها و بر اساس شکل ۱۶ بیشترین نشست رخ داده در مدل رفتاری سخت‌شونده در بیشترین وزن مخصوص است و با کاهش وزن مخصوص خاک نشست سطح زمین کاهش می‌یابد؛ این کاهش نشست سطح زمین یا کاهش وزن مخصوص خاک در مدل رفتاری سخت‌شونده حدود ۴٫۷ میلی‌متر است. در مدل رفتاری موهر کولمب کاهش وزن مخصوص منجر به کاهش نشست می‌شود که این کاهش نشست سطح زمین به مراتب محسوس‌تر از مدل رفتاری دراگر پراگر است و در مدل رفتاری دراگر پراگر افزایش وزن مخصوص تأثیر بسیار ناچیزی در افزایش نشست سطح زمین دارد؛ کاهش در میزان نشست در کمترین وزن مخصوص انتخابی نسبت به بیشترین وزن مخصوص در نظر گرفته شده در مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر به ترتیب ۱٫۵ و ۰٫۶ میلی‌متر است.



شکل ۱۶- تاثیر وزن مخصوص در نشست طولی سطح زمین در مدل‌های رفتاری؛ الف) سخت‌شونده، ب) موهر کولمب و پ) دراگر پراگر



شکل ۱۷- تاثیر وزن مخصوص در نشست عرضی سطح زمین در مدل‌های رفتاری؛ الف) سخت‌شونده، ب) موهر کولمب و پ) دراگر پراگر

## ۷- نتیجه‌گیری

خط A قم مطالعه و بررسی شده است. در راستای نیل به هدف از مدل رفتاری موهر کولمب، مدل سخت‌شونده و مدل دراگر پراگر و پارامترهای مختلف خاک از جمله مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک، چسبندگی، ضریب پواسون و وزن مخصوص

در این تحقیق به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف خاک در نشست سطح زمین در مدل‌های رفتاری مختلف پرداخته شده است. در این راستا، مدل‌سازی سه‌بعدی تفاضل محدود مترو

زمین در مقطع جبهه‌کار را در مقادیر پایین زاویه اصطکاک بیشتر از مدل دراگر پراگر نشان می‌دهد و در زاویه اصطکاک داخلی بالاتر این میزان مشابه مدل دراگر پراگر است؛ در حالی که این میزان در مدل رفتاری سخت‌شونده بیشتر است. کاهش عرض گودی نشست با افزایش زاویه اصطکاک داخلی برای هر سه مدل رفتاری مشاهده می‌شود.

- افزایش نسبت پواسون در کاهش نشست سطح زمین در مدل سخت‌شونده بیشترین تاثیر و در مدل دراگر پراگر کمترین تاثیر را دارد. در این حالت نیز مدل رفتاری سخت‌شونده شروع نشست سطح زمین را در فاصله دورتری نسبت به دو مدل دیگر تخمین می‌زند. مدل رفتاری سخت‌شونده میزان نشست سطح زمین مقطع جبهه‌کار را ۱/۷ برابر بیشتر از دو مدل رفتاری دیگر نشان می‌دهد. عرض گودی نشست در مدل سخت‌شونده تاثیرپذیری بیشتری از نسبت پواسون نسبت به دو مدل رفتاری دیگر دارد.
- تغییرات وزن مخصوص در مدل رفتاری سخت‌شونده تاثیر بیشتری در نشست سطح زمین نسبت به دو مدل رفتاری دیگر دارد و روند تغییرات وزن مخصوص در مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر شباهت بیشتری نسبت به هم دارند. تغییرات وزن مخصوص در هر سه مدل رفتاری در شروع نشست سطح زمین نسبت به پارامترهای دیگر موثرتر است. مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر نشست سطح زمین در مقطع جبهه‌کار را به یک اندازه تخمین می‌زند؛ در مدل رفتاری سخت‌شونده این میزان ۱/۸ برابر بیشتر از دو مدل دیگر تخمین زده شده است. عرض گودی نشست متاثر از وزن مخصوص خاک نیست.

با جمع‌بندی نتایج فوق می‌توان اظهار داشت که مدل رفتاری سخت‌شونده نسبت به مدل‌های موهر کولمب و دراگر پراگر تاثیرپذیری بیشتری از تغییرات پارامترهای خاک داشته؛ همچنین مدل رفتاری دراگر پراگر کمترین تاثیرپذیری را از پارامترهای مختلف خاک داشته است. پیش‌بینی نتایج در دو مدل رفتاری دراگر پراگر و موهر کولمب بسیار مشابه هم و نشان‌دهنده شباهت این دو مدل رفتاری در برآورد نشست‌ها است.

#### منابع

1. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and Xu, S. eds. *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*. Taylor & Francis, 2008.

استفاده شده است. برای بررسی تاثیر این پارامترها بیش از ۶۰ مدل با مقادیر مختلف خاک ساخته شده و تاثیر هر یک مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای مدل‌های رفتاری انتخاب‌شده از نتایج مطالعات برجا و آزمایشگاهی انتخاب و در مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D اعمال شده است. صحت نتایج مدل‌سازی عددی با استفاده از نتایج ابراربندی نیز ارزیابی شده است. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق عبارتند از:

- تغییرات مدول الاستیسیته در مدل رفتاری سخت‌شونده تاثیر بیشتری در نشست سطح زمین نسبت به دو مدل رفتاری دیگر دارد و روند تغییرات مدول الاستیسیته در مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر مشابه هم است. در مدل رفتاری سخت‌شونده شروع نشست سطح زمین در فاصله دورتری نسبت به دو مدل دیگر آغاز می‌شود. مدل رفتاری موهر کولمب و دراگر پراگر نشست سطح زمین در مقطع جبهه‌کار را به یک اندازه تخمین زده؛ در مدل رفتاری سخت‌شونده این میزان ۱/۵ برابر بیشتر از دو مدل دیگر تخمین زده شده است. کاهش مدول الاستیسیته باعث کاهش عرض گودی نشست سطح زمین در مدل موهر کولمب و دراگر پراگر می‌شود و در مدل رفتاری سخت‌شونده عرض گودی نشست تغییر نمی‌کند.
- تغییرات چسبندگی در نشست سطح زمین در مدل رفتاری دراگر پراگر نسبت به دو مدل رفتاری دیگر تاثیر کمتری دارد؛ مدل رفتاری سخت‌شونده شروع نشست سطح زمین را در فاصله دورتری نسبت به دو مدل دیگر تخمین می‌زند. مدل رفتاری موهر کولمب در مقادیر پایین چسبندگی نشست سطح زمین در مقطع جبهه‌کار را بیشتر از مدل دراگر پراگر و در مقادیر بالا چسبندگی مشابه دراگر پراگر تخمین زده می‌زند؛ در حالی که این میزان در مدل رفتاری سخت‌شونده ۱/۷ برابر بیشتر از دو مدل دیگر تخمین می‌زند. چسبندگی کمتر عرض گودی نشست سطح زمین را در مدل سخت‌شونده نشان می‌دهد در حالی که در دو مدل رفتاری دیگر این عرض گودی متاثر از تغییرات چسبندگی نبوده و ثابت است.
- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در نشست سطح زمین در مدل رفتاری دراگر پراگر نسبت به دو مدل رفتاری دیگر تاثیر کمتری دارد؛ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در مدل رفتاری سخت‌شونده منجر به پاسخی پیچیده‌تری نسبت به دو مدل رفتاری می‌شود. نشست سطح زمین در مدل رفتاری سخت‌شونده در فاصله دورتری از جبهه‌کار تونل شروع می‌شود. مدل رفتاری موهر کولمب نشست سطح

- Geotechnics*, 28(6-7), pp.445-468, 2001.
15. Bobet, A. Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground. *Journal of engineering mechanics*, 127(12), pp.1258-1266, 2001.
  16. Chi, S.Y., Chern, J.C. and Lin, C.C. Optimized back-analysis for tunneling-induced ground movement using equivalent ground loss model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(3), pp.159-165, 2001.
  17. Chou, W.I. and Bobet, A. Predictions of ground deformations in shallow tunnels in clay. *Tunnelling and underground space technology*, 17(1), pp.3-19, 2002.
  18. Park, K.H. Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays. *Tunnelling and underground space technology*, 20(3), pp.249-261, 2005.
  19. Ocak, I. Environmental effects of tunnel excavation in soft and shallow ground with EPBM: the case of Istanbul. *Environmental Earth Sciences*, 59(2), pp.347-352, 2009.
  20. Chakeri, H., Hasanpour, R., Hindistan, M.A. and Ünver, B. Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70(3), pp.439-448, 2011.
  21. Ercelebi, S.G., Copur, H. and Ocak, I. Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM. *Environmental Earth Sciences*, 62(2), pp.357-365, 2011.
  22. Chakeri, H., Ozcelik, Y. and Ünver, B. Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 36, pp.14-23, 2013.
  23. Chakeri, H. and Ünver, B. A new equation for estimating the maximum surface settlement above tunnels excavated in soft ground. *Environmental earth sciences*, 71(7), pp.3195-3210, 2014.
  24. Sainoki, A., Tabata, S., Mitri, H.S., Fukuda, D. and Kodama, J.I. Time-dependent tunnel deformations in homogeneous and heterogeneous weak rock formations. *Computers and Geotechnics*, 92, pp.186-200, 2017.
  25. Dalong J, Dajun Y, Xinggao L, Haotian Z. Analysis of the settlement of an existing tunnel induced by shield tunneling underneath Tunnell. *Underground Space Technol.*, 2018.
  26. Ng, C.W.W., Fong, K.Y. and Liu, H.L. The effects of existing horseshoe-shaped tunnel sizes on circular crossing tunnel interactions: Three-dimensional numerical analyses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, pp.68-79, 2018.
  27. Schreter, M., Neuner, M., Unteregger, D. and Moeinossadat, S.R. and Ahangari, K. Estimating maximum surface settlement due to EPBM tunneling by Numerical-Intelligent approach—A case study: Tehran subway line 7. *Transportation Geotechnics*, 18, pp.92-102., 2019.
  3. Peck, R.B. Deep excavations and tunneling in soft ground. *Proc. 7th ICSMFE*, 1969, pp.225-290, 1969.
  4. Vermeer, P.A. Pile settlements due to tunneling. In *Proc. 10th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg., Florence, 1991* (Vol. 2, pp. 869-872). Balkema.
  5. Arioğlu E. Surface movements due to tunnelling activities in urban areas and minimization of building damages [in Turkish]. Short Course, Istanbul Technical University, Mining engineering department; 1992.
  6. Hamza, M., Ata, A. and Roussin, A. Ground movements due to the construction of cut-and-cover structures and slurry shield tunnel of the Cairo Metro. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 14(3), pp.281-289, 1999.
  7. Macklin, S.R. The prediction of volume loss due to tunnelling in overconsolidated clay based on heading geometry and stability number. *Ground engineering*, 32(4), pp.30-33, 1999.
  8. Klar, A. and Elkayam, I. Direct and relaxation methods for soil-structure interaction due to tunneling. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 11(1), pp.9-17, 2010.
  9. Yahya, S.M. and Abdullah, R.A. A Review on Methods of Predicting Tunneling Induced Ground Settlements. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, pp.5813-5826, 2014.
  10. Zhang, Z., Zhang, M., Jiang, Y., Bai, Q. and Zhao, Q. Analytical prediction for ground movements and liner internal forces induced by shallow tunnels considering non-uniform convergence pattern and ground-liner interaction mechanism. *Soils and Foundations*, 57(2), pp.211-226, 2017.
  11. Wang, H.N., Chen, X.P., Jiang, M.J., Song, F. and Wu, L. The analytical predictions on displacement and stress around shallow tunnels subjected to surcharge loadings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, pp.403-427, 2018.
  12. Loganathan, N. and Poulos, H.G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays. *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124(9), pp.846-856, 1998.
  13. Verruijt, A. and Booker, J.R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. *Geotechnique*, 48(5), pp.709-713, 1998.
  14. Gonzalez, C. and Sagaseta, C. Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extension of Madrid Metro. *Computers and*

- World Tunnel Congress 2018.
38. Zakhem, A.M. and El Naggar, H. *Effect of the constitutive material model employed on predictions of the behaviour of earth pressure balance (EPB) shield-driven tunnels*. Transportation Geotechnics, 21, p.100264, 2019.
  39. Nematollahi, M. and Dias, D. *Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction—Case of the Shiraz subway line*. Tunnelling and Underground Space Technology, 86, pp.75-88, 2019.
  40. Eslami, B., Golshani, A. and Arefizadeh, S. *Evaluation of Constitutive Models in Prediction of Surface Settlements in Cohesive Soils—A Case Study: Mashhad Metro Line 2*. ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories, 5(3), pp.182-198, 2020.
  41. Shivaiei, S., Hataf, N., & Pirastehfar, K. 3D numerical investigation of the coupled interaction behavior between mechanized twin tunnels and groundwater—A case study: Shiraz metro line 2. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103458, 2020.
  42. ÇELİK, S. *Comparison of mohr-coulomb and hardening soil models' numerical estimation of ground surface settlement caused by tunneling*. Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology, pp.96-102, 2017.
  43. Konietzky H, Ismael M. *Failure criteria for rocks—an introduction*. In: Griebisch A (ed) Introduction into geomechanics. Geotech Inst TU Bergakademie, Freiberg, 2017.
  44. Yang, X., Yuan, H., Wu, J. and Li, S. *Elastoplastic analysis of circular tunnel based on Drucker–Prager criterion*. Advances in Civil Engineering, 2018.
  45. Sahel Consulting Engineers. *Geological and geotechnical studies of Qom city metro, Line A*, 2011.
  46. Itasca Consulting Group. *FLAC fast Lagrangian analysis of continua, version 5.0*. User's manual, 2012.
  47. Dehghan AN, Bagheri E, Khodaei M, Kalehsar RI. Evaluating the effect of EPBM operational parameters on surface settlement in soft ground. *Journal of Geophysics and Engineering*, 18(1): pp. 47-61, 2021.
  48. Salimi AR, Esmaeili M, Salehi B. Analysis of a TBM Tunneling Effect on Surface Subsidence: A Case Study from Tehran, Iran. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 7(6):332-6, 2013.
  - Hofstetter, G. On the importance of advanced constitutive models in finite element simulations of deep tunnel advance. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 80, pp.103-113, 2018.
  28. Gulvanessian, H., Calgaro, J.A. and Holický, M. *Designer's guide to EN 1990: eurocode: basis of structural design*. Thomas Telford, 2002.
  29. Mirhabibi, A., & Soroush, A. Three-dimensional simulation of interaction between surface buildings and twin tunnelling regarding the surface settlement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 5143-5166, 2020.
  30. Ghiasi, V., & Koushki, M. Numerical and artificial neural network analyses of ground surface settlement of tunnel in saturated soil. *SN Applied Sciences*, 2(5), 1-14, 2020.
  31. Fang, Y., Cui, J., Wanatowski, D., Nikitas, N., Yuan, R., & He, Y. (Subsurface settlements of shield tunneling predicted by 2D and 3D constitutive models considering non-coaxiality and soil anisotropy: a case study. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021.
  32. Anato, N. J., Chen, J., Tang, A., & Assogba, O. C. Numerical Investigation of Ground Settlements Induced by the Construction of Nanjing WeiSanLu Tunnel and Parametric Analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-17, 2021.
  33. Hejazi, Y., Dias, D. and Kastner, R. Impact of constitutive models on the numerical analysis of underground constructions. *Acta Geotechnica*, 3(4), pp.251-258, 2008.
  34. Lambrughi, A., Rodríguez, L.M. and Castellanza, R. *Development and validation of a 3D numerical model for TBM–EPB mechanised excavations*. Computers and Geotechnics, 40, pp.97-113, 2012.
  35. Do, N.A., Dias, D., Oreste, P.P. and Djeran-Maigre, I. *3D modelling for mechanized tunnelling in soft ground—Influence of the constitutive model*. American journal of applied sciences, 10(8), pp.863-875, 2013.
  36. Vakili, K., Lavasan, A.A., Schanz, T. and Datcheva, M. June. *The influence of the soil constitutive model on the numerical assessment of mechanized tunneling*. In Numerical Methods in Geotechnical Engineering contains the proceedings of the 8th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Delft, The Netherlands (Vol. 18, p. 20), 2014,
  37. Litsas, D., Sitarenios, P. and Kavvadas, M. April. *Advanced numerical analyses of EPB tunnelling using critical state plasticity*. In ITA-AITES