



مقاله پژوهشی

مدل سازی عددی بررسی رفتار تونل کم عمق در زمین‌های ماسه‌ای تحکیم نیافته با مدل رفتاری هایپوپلاستیک

نادر موسایی^۱، محمدحسین خسروی^{۲*}، محمد فاروق حسینی^۳

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- دانشکده مهندسی معدن و منابع انرژی، دانشگاه نیو ساوت ولز، سیدنی، استرالیا

(دریافت: آبان ۱۴۰۱، پذیرش: اسفند ۱۴۰۲)

چکیده

پیش‌بینی درست رفتار زمین حین حفاری تونل نسبت به آنچه در واقعیت اتفاق خواهد افتاد، یک امر بسیار پر چالش، به‌ویژه در تونل‌های شهری است. از طرفی هر قدر این پیش‌بینی سریع و بدون نیاز به صرف هزینه بیشتر باشد به مراتب بارز تر خواهد بود. در مطالعه حاضر سعی شده است که کارایی مدل رفتاری هایپوپلاستیک برای پیش‌بینی نتایج حاصل از مدل‌سازی فیزیکی در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور، در این تحقیق رفتار محیط اطراف یک تونل در حال حفر در محیط ماسه‌ای با استفاده از مدل رفتاری هایپوپلاستیک شبیه‌سازی شده و خصوصیات مقاومتی خاک مورد مطالعه بر اساس نتایج آزمایش سه محوره صحت سنجی شده است. هم‌زمان با شبیه‌سازی فرایند حفر تونل، مقادیر نشست سطح زمین و تغییرات تنش در خاک بالای تونل، به ازای مقادیر مختلف چگالی خاک و عمق تونل، اندازه‌گیری شده و نتایج با مدل‌سازی فیزیکی و روش تحلیلی مقایسه شد. نتایج این تحقیق مطابقت خوبی با نتایج مدل‌سازی فیزیکی و تئوری نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این تحقیق، مدل رفتاری هایپوپلاستیک قابلیت پیش‌بینی رفتار خاک‌های دانه‌ای سست را دارد. همگرایی تونل منجر به آشفته‌گی میدان تنش اطراف تونل شده و بر اثر پدیده قوس زدگی خاک در اطراف تونل، توزیع تنش از حالت خطی خارج می‌شود. در شرایط یکسان، اگرچه با افزایش عمق تونل زون گسیخته بالای تونل گسترش می‌یابد، نشست سطح زمین کاهش پیدا می‌کند.

کلمات کلیدی

تونل‌های کم عمق، مدل هایپوپلاستیک، مدل‌سازی عددی، زون گسیخته بالای تونل

*عهده‌دار مکاتبات: mh.khosravi@birjand.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2024.19110.1574

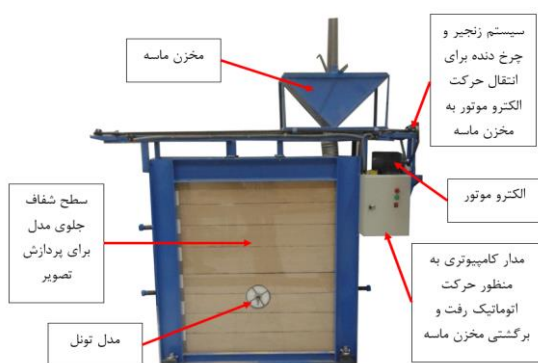
۱- مقدمه

تحقیقات گسترده‌ای در راستای نشان دادن مزایای مدل رفتاری هایپوپلاستیسیته نسبت به تئوری پلاستیسیته در پیش‌بینی رفتار غیرخطی تنش-کرنش صورت گرفته است [۱۲]. پیشرفت‌های زیادی با مطالعات توکوکا که از معیار شکست هوبر-ون-میسز ترسکا نشأت می‌گرفت، حاصل گردید [۱۳، ۱۴]. همانند توکوکا، داویس و مولنگر معیارهای شکست قابل قبولی برای خاک با استفاده از هایپوپلاستیک ارائه کردند. سپس مدل رفتاری هایپوپلاستیک برای مواد دانه‌ای توسط محققان زیادی بکار برده شد [۱۵-۲۰].

هایپوپلاستیسیته همانند هایپوپلاستیسیته^۲ بر پایه توابع تانسوری بوده و از مفاهیم موجود در تئوری پلاستیسیته مانند سطح تسلیم، قانون جریان^۳، تقسیم تغییر شکل‌ها به دو بخش الاستیک و پلاستیک استفاده نمی‌کنند. تفاوت اساسی در رابطه میان نرخ تنش و کرنش است که در هایپوپلاستیسیته رابطه غیرخطی است [۱۲].

مدل هایپوپلاستیک در صورتی که با نتایج آزمایشگاهی کالیبره شود، قابل کاربرد خواهد بود. پرواضح است که مدل کالیبره شده بایستی با شرایط مرزی و تغییر شکل‌ها سازگار باشد. وجود و یگانگی راه‌حل یکی از اهمیت‌های بنیادی این مدل است [۲۱].

در این مقاله سعی شده است که نتایج مدل فیزیکی تونل در زمین ماسه‌ای سست با نتایج شبیه‌سازی عددی با مدل رفتاری هایپوپلاستیک ارائه شده توسط وانگ و وو مقایسه گردد [۲۲، ۲۳]. همچنین بر اساس تغییرات تنش در مدل گستردگی زون رها از تنش موردبررسی قرار گرفته است. در شکل ۱ هندسه مدل فیزیکی نشان داده شده و اجزای آن معرفی شده است.



شکل ۱: چهارچوب مدل فیزیکی و معرفی اجزاء مدل [۲۲].

مدل رفتاری در شبیه‌سازی عددی رفتار تنش-کرنش ماده و یا جسم تحت بار را مشخص می‌کند. رفتار غیرخطی در کرنش‌های کوچک و رفتار پلاستیک در کرنش‌های بزرگ نکات کلیدی هستند که بایستی در مدل‌های رفتاری خاک در نظر گرفته شوند [۱]. در دهه‌های گذشته پیشرفت‌های شگرفی در ارائه مدل‌های رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای صورت گرفته است. ظرفیت این مدل‌ها با اضافه کردن مفاهیمی چون سطح تسلیم دوگانه، سطح حدی و حالت سخت شونده غیر همسانگرد ارتقا یافته است [۲-۵].

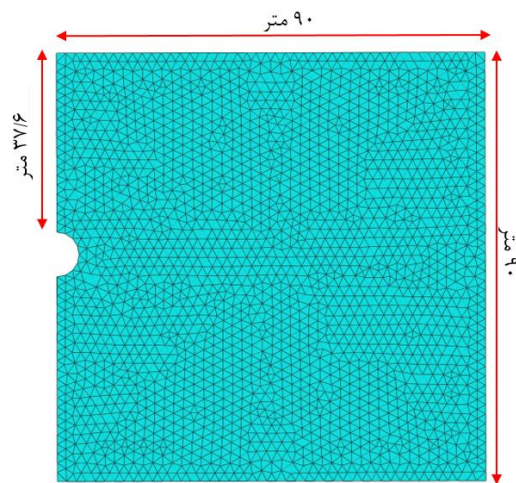
بررسی مدل‌های بر پایه تئوری پلاستیسیته^۱ نشان می‌دهد که پیچیدگی رفتار مواد دانه‌ای با افزودن روابط ریاضی پیچیده و افزایش پارامترهای مربوط به مواد پوشش داده شده است که این مهم کاربرد آن‌ها را سخت‌تر می‌کند. همچنین، به دلیل رخداد اتساع در مواد خاکی، قانون جریان همراه در روابط الاستوپلاستیک اغنا نمی‌گردد؛ بنابراین نیاز برای یک مدل ساده‌تر بیشتر احساس می‌گردد.

در سازه‌های زیرزمینی در اثر فعل‌وانفعالات اتفاق افتاده در حین تونل‌زنی در محیط‌های خاکی، ممکن است بر اساس تغییرات در مسیر تنش، بخشی از محیط متراکم و بخشی منبسط و یا رها از تنش گردد؛ بنابراین پارامترهای فیزیکی مواد تحت تأثیر مسیر تنش تغییر خواهد کرد؛ در نتیجه معیار گسیختگی نیز بایستی در تمامی نقاط متناظر با مسیر تنش بروز رسانی گردد. این نکته کلیدی نیز در مدل رفتاری هایپوپلاستیک گنجانده شده است. این مدل رفتاری تنش را به صورت تابعی همگن مرتبه اول از نرخ کرنش با قانون جریان غیرهمراه در نظر می‌گیرد [۶]. از دیگر ویژگی‌های مدل رفتاری در نظر گرفتن شرایط بحرانی و تأثیر مسیر تنش با اضافه کردن پارامتر تخلخل خاک است [۷].

اولین مدل رفتاری هایپوپلاستی بر پایه مدل ارائه شده توسط وو و باور است [۵، ۶، ۸]. کاستی مدل اولیه این بود که در کرنش‌های بزرگ‌تر مدل انقباض بیشتری را نشان می‌داد. این مشکل با یکسان در نظر گرفتن دو پارامتری که به بخش غیرخطی ضرب می‌شدند توسط باور و ولفراشدورف برطرف گردید [۹، ۱۰]. با این راه‌حل هم مشکل نرخ کرنش حجمی در فشارش و کشش مرتفع گردید و همچنین تعداد پارامترهای مدل به سه عدد کاهش یافت [۱۱].

۲- مدل سازی عددی

در مجموع ۱۵ آزمایش مدل عددی با نرم افزار اباکوس V6.13 صورت گرفته است. مدل عددی بر اساس مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه [۲۲] با اعمال فاکتور مقیاس طول برابر با ۵۰ متر (حالت واقعی) و در ابعاد ۹۰*۹۰ متر به صورت کرنش صفحه ای شبیه سازی شده است (شکل ۲). مرزهای قائم در راستای افقی و مرز افقی پایین در راستای قائم جابجایی برابر با صفر دارد. قطر تونل برابر با ۹،۴ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد بزرگ مدل به دلیل عدم تأثیر پذیری نتایج از مرزها است.



شکل ۲: هندسه مدل عددی.

برای شبیه سازی حفاری تونل، ابتدا بعد از به تعادل رسیدن مدل در دو مرحله الاستیک و پلاستیک، مقطع تونل حذف شده و معادل تنش های برجا به دیواره آن تنش وارد می گردد. سپس به تناسب به نحوی که شوک به مدل وارد نگردد از میزان فشار داخلی کاسته می شود تا به تدریج دیواره تونل شروع به همگرا شدن کند. در نهایت فشار تا حدی کم می شود که میزان پارامتر افت زمین برابر با ۴ درصد شود. این فرایند برای حالت های مختلف با سعی و خطا صورت گرفته است.

۳- مدل رفتاری هایپوپلاستیک

مدل رفتاری هایپوپلاستیک که توسط وو و کولیمباس [۲۶] ارائه شده، به شرح رابطه (۱) است:

$$\sigma^o = L(\sigma, \dot{\varepsilon}) + N(\sigma, \dot{\varepsilon}) \|\dot{\varepsilon}\| \quad (1)$$

که در آن L یک تابع تانسوری خطی از نرخ کرنش $(\dot{\varepsilon})$ ده و N نیز یک تابع غیرخطی از $\dot{\varepsilon}$ است. تانسور نرخ تنش

کوشی $(\dot{\sigma})$ و تابع چرخش (ω) طبق رابطه (۲) برای محاسبه تانسور نرخ تنش ژوئمن (σ^o) استفاده می گردد.

$$\sigma^o = \dot{\sigma} + \sigma \cdot \omega - \omega \cdot \sigma \quad (2)$$

بر اساس همین پیش فرض وانگ و وو یک مدل رفتاری هایپوپلاستیک ساده مطابق رابطه (۳) ارائه کرده اند [۲۳]:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} = & C_1(tr\sigma)\dot{\varepsilon} + C_2(tr\dot{\varepsilon})\sigma \\ & + C_3 \frac{tr(\sigma\dot{\varepsilon})}{tr\sigma} \sigma \\ & + C_4(\sigma + \sigma^*) \|\dot{\varepsilon}\| \end{aligned} \quad (3)$$

روابط زیادی برای بیان حالت بحرانی ارائه شده است ولی در این تحقیق از رابطه (۴) ارائه شده توسط وانگ و همکارانش استفاده شده است که به بخش غیرخطی رابطه (۱) ضرب می گردد [۲۴]. همان طور که بیان شد نسبت پوکی بحرانی در سطح تنش های مختلف متفاوت بوده و از طریق رابطه (۵) قابل محاسبه است [۲۵]. همچنین برای کاربری رابطه (۳) برای خاک های بسیار سست ضرب در رابطه (۶) می گردد که توسط وو و کولیمباس ارائه شده است [۲۶]؛ بنابراین رابطه (۳) را می توان به صورت رابطه (۷) بازنویسی کرد:

$$I_e = \left(\frac{e}{e_{crt}}\right)^\alpha \quad (4)$$

$$e_{crt} = e_{c0} \exp\left[-\lambda\left(\frac{p}{p_a}\right)^\xi\right] \quad (5)$$

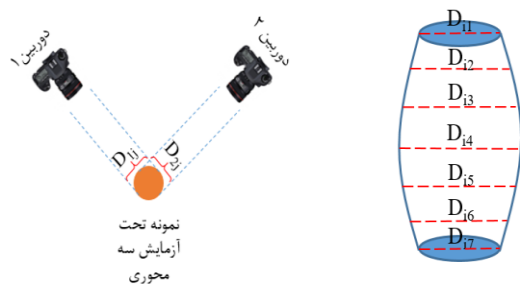
$$I_s = \frac{\exp[\beta(e_{crt} - e)]}{(1+r)^2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} = & I_s \left[C_1(tr\sigma)\dot{\varepsilon} + C_2(tr\dot{\varepsilon})\sigma \right. \\ & + C_3 \frac{tr(\sigma\dot{\varepsilon})}{tr\sigma} \sigma \\ & + C_4(\sigma \\ & \left. + \sigma^*) \|\dot{\varepsilon}\| I_e \right] \end{aligned} \quad (7)$$

اجرای مدل رفتاری هایپوپلاستیک در نرم افزار اباکوس به وسیله کد نویسی تکمیل شده در دانشگاه BOKU انجام شده است. سپس کد دوم که شرایط مدل در آن شبیه سازی شده و کد مدل رفتاری را فعال می کند، تکمیل شده است.

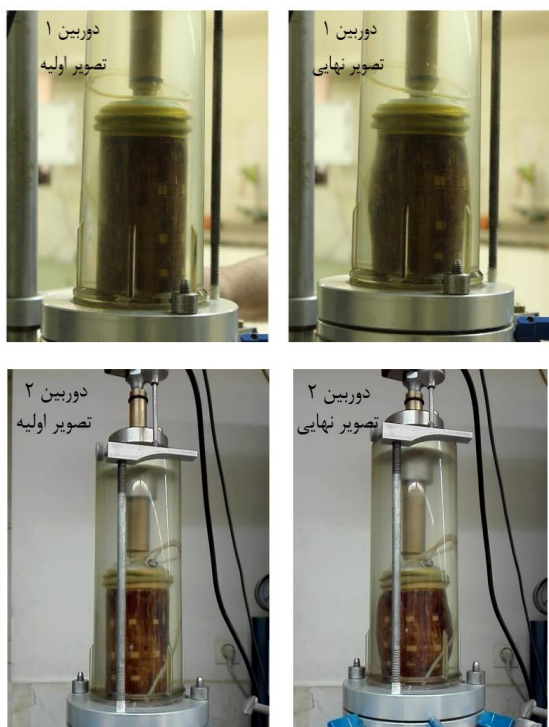
۴- کالیبره کردن مدل رفتاری

به طوری که بیشترین تطابق را با نتایج آزمایش سه محوره داشتند (شکل ۵).



شکل ۳: شماتیک سیستم اندازه‌گیری تغییرات قطر نمونه.

علاوه بر پارامترهای نه‌گانه که در جدول ۱ به آن‌ها اشاره شد، دیگر ورودی مهم برای مدل رفتاری هایپوپلاستیک، نسبت پوکی اولیه خاک است. برای شبیه‌سازی عددی از پارامترهای حاصل از مدل فیزیکی، نشان داده شده در جدول ۲، استفاده شده است. به منظور پیوستگی داده‌ها و عدم محدودیت افزایش مدل‌سازی‌ها در مقایسه با مدل فیزیکی، چگالی مربوط به ارتفاع ریزش ۹۰ سانتی‌متر هم نیز به مدل‌های عددی اضافه شده است.



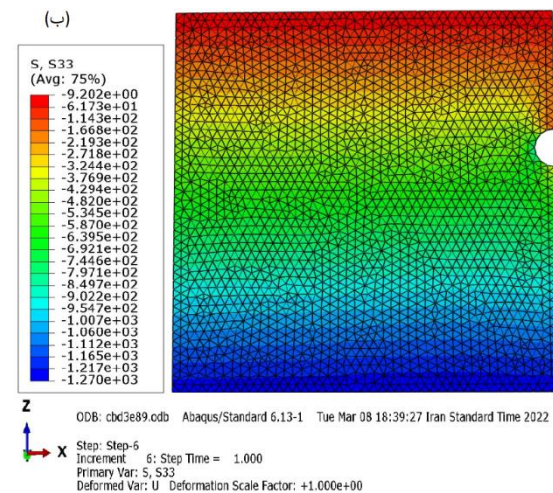
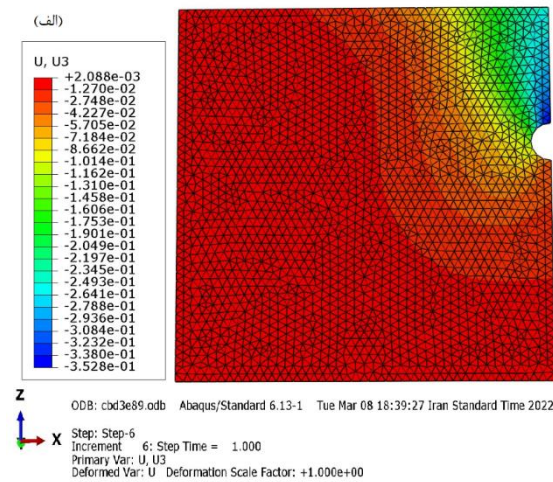
شکل ۴: تصویر نمونه قبل از شروع آزمایش و در انتهای آزمایش در راستای دوربین شماره ۱ و دوربین شماره ۲.

کالیبره کردن مدل رفتاری بر اساس نتایج آزمون‌های سه محوره زهکشی شده (حالت خشک) صورت گرفته است. به همین منظور، چگالی‌های ۱۴۷۵، ۱۵۳۵ و ۱۵۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب به منظور انجام آزمایش سه محوره در نظر گرفته شده است. علت اینکه محدوده چگالی‌های در نظر گرفته شده در مرحله کالیبراسیون، این است که بتوان رفتار بحرانی ماسه را نیز در مدل رفتاری گنجانید. در این حالت مدل رفتاری طیف کلی حالت سست و حالت تحکیم یافته را در بر خواهد داشت. همچنین فشار همه‌جانبه هم برابر ۴۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد که به دلیل محدودیت دقت سنسورهای دستگاه سه محوره بود.

در انجام این آزمایش‌های سه محوره از پردازش تصویر به‌عنوان ابزار غیر تماسی جهت اندازه‌گیری تغییرات حجم نمونه در حین بارگذاری کمک گرفته شد. به این صورت که مطابق شکل ۳ با استفاده از دو دوربین با محورهای عمود برهم از نمونه در حال بارگذاری فیلم‌برداری می‌شد. پس از انجام آزمایش فیلم ثبت شده به وسیله نرم‌افزار در فواصل زمانی منظم تبدیل به عکس شد (شکل ۴). سپس تغییر قطر نمونه در بازه‌های زمانی مختلف در ترازهای مختلف برای هر یک از دوربین‌ها محاسبه شد. هم‌زمان با انجام آزمایش تغییر طول نمونه نیز توسط کرنش‌سنج اندازه‌گیری می‌شد. در نهایت تغییرات حجم نمونه از حاصل ضرب میانگین قطر نمونه در طول نمونه محاسبه شد. با دانستن حجم نمونه در زمان‌های مشخص و همچنین داشتن میزان تنش محوری نمودار تنش تفاضلی و کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری قابل ترسیم است (شکل ۵). حال بایستی ۹ پارامتر مدل رفتاری که در روابط بالا اشاره شده است براساس نتایج آزمایش سه محوره کالیبره شوند.

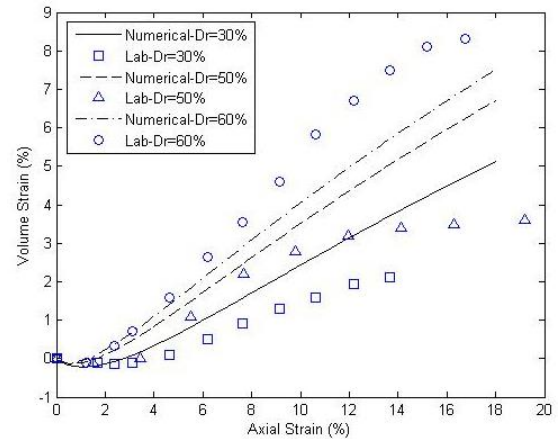
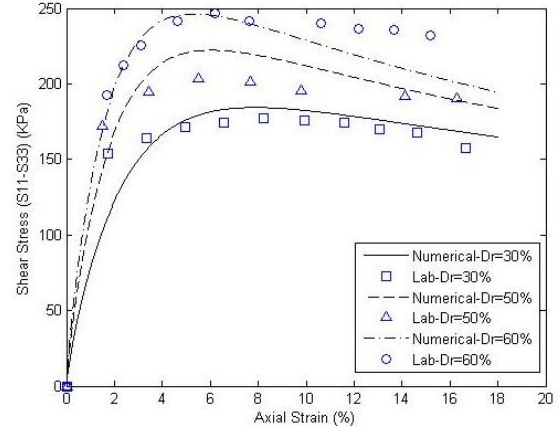
هر یک از پارامترهای C1 تا C4 بر اساس ضریب پواسون، زاویه اتساع، ضریب اصطکاک داخلی و همچنین مدول الاستیک ماسه تعیین می‌شوند. براساس آزمایش‌های فشاری انجام شده، زاویه اصطکاک داخلی برابر با ۳۶ درجه، چسبندگی برابر با صفر، مدول الاستیسیته برابر با ۵۰ کیلو پاسکال و ضریب پواسون برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شده است. پارامترهای مدل رفتاری هایپوپلاستیک عنوان شده در جدول ۱ به صورت سعی و خطا در محدوده مقادیر مجاز تعیین شده،

جابجایی قابل مشاهده است به منظور مقایسه و صحت سنجی نتایج مدل عددی و مدل فیزیکی، مقادیر حداکثر نشست سطح زمین برای نسبت روباره به عمق برابر با سه در شکل ۶ نمایش داده شده است. میزان حداکثر نشست در مدل فیزیکی به وسیله روش پردازش تصویر (PIV) اندازه گیری شده است [۲۷]. ایده اصلی تحلیل PIV بر مقایسه عکس های متوالی از مدل فیزیکی استوار است. از این روش برای به دست آوردن جابجایی ها در مدل های فیزیکی مختلف استفاده شده است [۲۲، ۲۸-۳۳].



شکل ۶: نمودار خروجی مدل عددی آباکوس: الف) کنتور جابجایی قائم؛ ب) کنتور تنش قائم.

مطابق شکل ۷ برای دو حالت «الف» و «ب» با تقریب قابل قبولی نتایج هر سه مدل با یکدیگر منطبق هستند و برای حالتی که چگالی خاک برابر ۱۴۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب است، مقادیر حداکثر نشست در مدل عددی بیشتر از مدل فیزیکی است؛ بخصوص زمانی که نسبت روباره به قطر تونل برابر با ۴ است. به احتمال زیاد این اختلاف ناشی از



شکل ۵: کالیبراسیون مدل رفتاری هایپوپلاستیک با نتایج آزمایش سه محوری (Dr: چگالی نسبی ماسه).

جدول ۱: پارامترهای مدل رفتاری هایپوپلاستیک

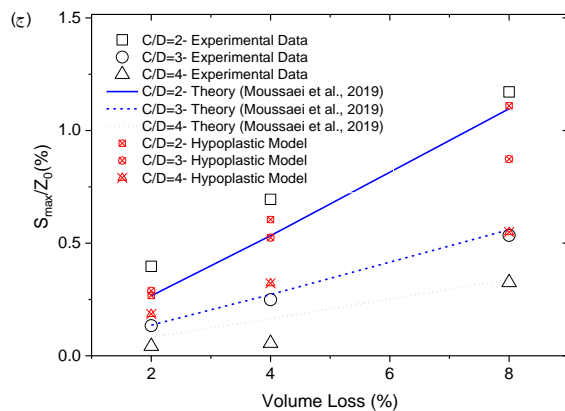
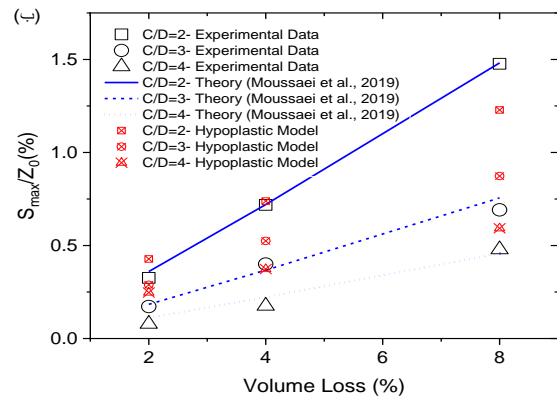
C_1	C_2	C_3	C_4	e_{c0}
-۸۰	-۲۱۹,۲۳۰.۸	-۶۴۳,۲۶۰.۸	-۱۴۷,۸۵۶.۵	۰,۹۱
λ	ξ	α	β	
۰,۳۴	۰,۹۵	۰,۸۵	۶	

جدول ۲: ارتباط بین چگالی اولیه خاک و نسبت پوکی با ارتفاع ریزش خاک در مدل فیزیکی

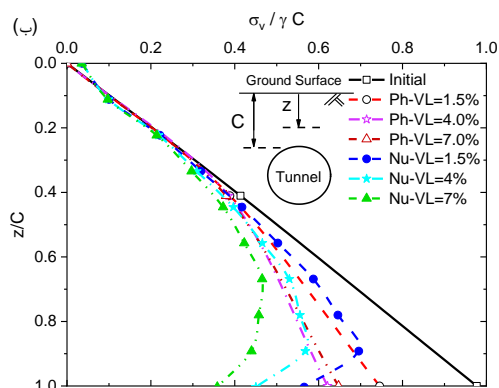
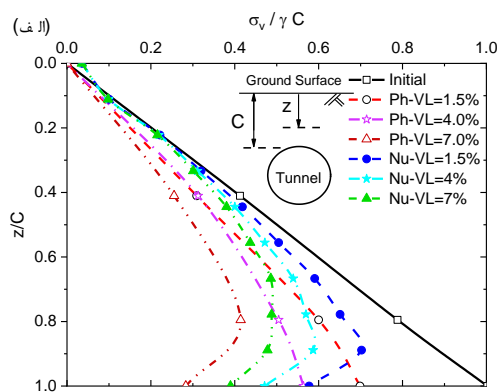
چگالی اولیه (kg/m^3)	۱۴۸۲	۱۴۶۵	۱۴۴۱	۱۴۱۷	۱۴۰۰
ارتفاع ریزش خاک (cm)	۱۱۰	۹۰	۶۰	۳۰	۱۰
نسبت پوکی (e)	۰,۷۸	۰,۸۰	۰,۸۳	۰,۸۶	۰,۸۹

۵- نتایج مدل سازی عددی

در شکل ۶ کنتورهای جابجایی و تنش های قائم نمایش داده شده است. به دلیل وجود تقارن، نصف مدل شبیه سازی شده است. کنتورهای نمایش داده شده برای حالتی که روباره سه برابر قطر تونل است و همچنین نسبت پوکی مدل در کنتورهای نمایش داده برابر با ۰,۸۹ است.

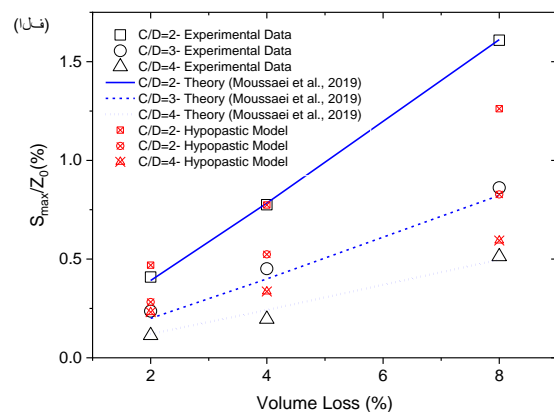


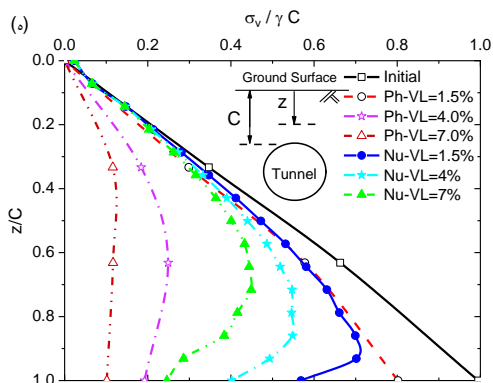
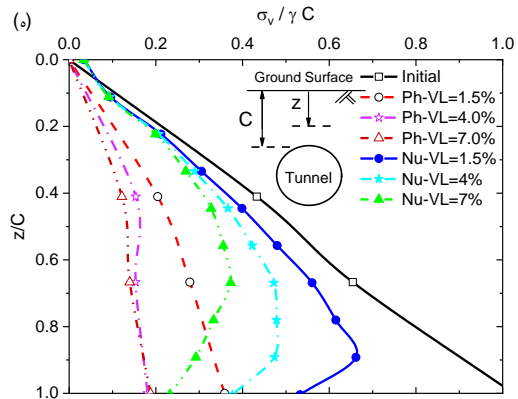
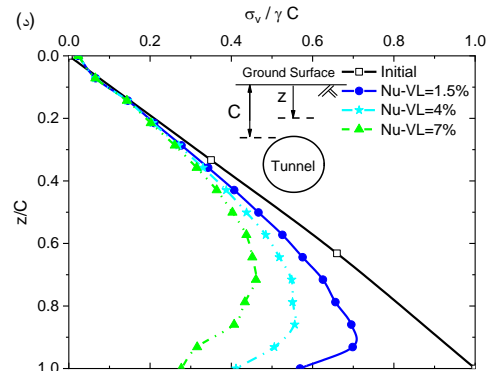
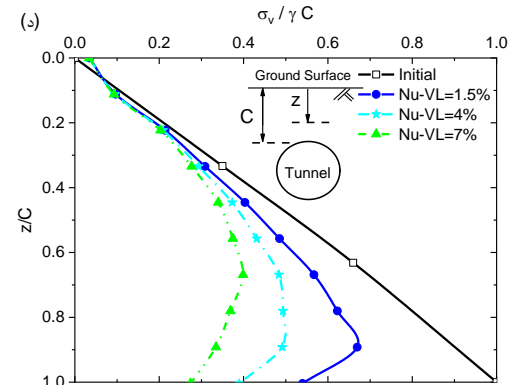
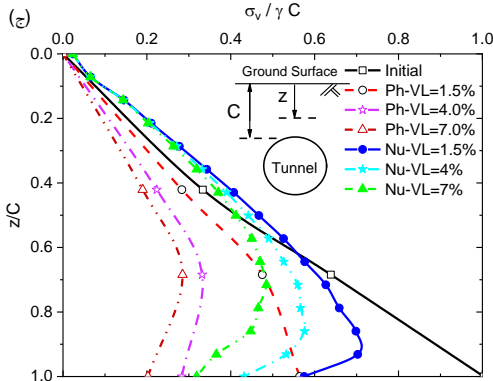
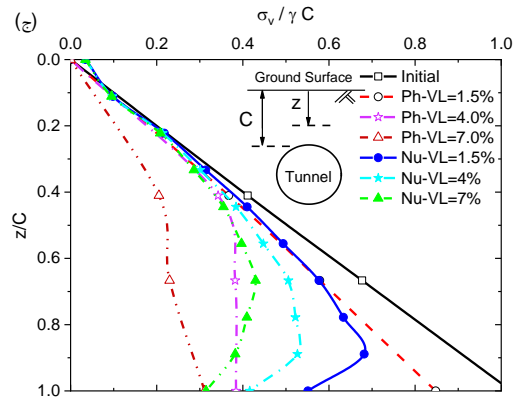
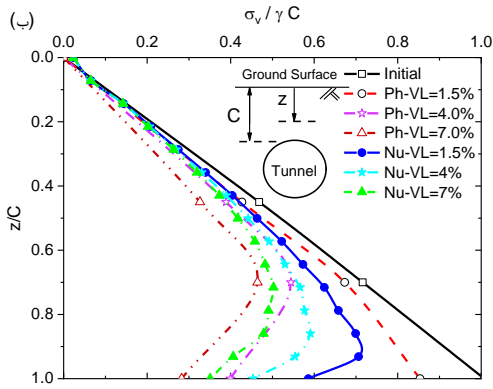
شکل ۷: مقایسه حداکثر نشست در مدل عددی، مدل فیزیکی و مدل تئوری برای ماسه با چگالی الف) ۱۴۰۰، ب) ۱۴۱۷، ج) ۱۴۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب. (C: روبراه، D: قطر تونل، Z_0 : عمق مرکز تونل، S: میزان نشست).



فاکتور اصلاح مربوط به روش آماده‌سازی مدل که در مدل‌سازی فیزیکی استفاده شده است [۲۲]؛ زیرا که این فاکتور براساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل با نسبت قطر به روبراه برابر با ۲ تعیین شده و برای اعماق بیشتر بایستی از ضریب افزایشی متناسب با آن استفاده کرد. لذا با اصلاح ضریب روش آماده‌سازی این اختلاف اندک نیز قابل برطرف کردن است. در نتیجه مدل رفتاری هایپو پلاستیک براساس قابلیت‌هایی که دارد نتایج نزدیک به واقعیت را ارائه می‌دهد. به‌منظور پیوستگی بیشتر داده‌ها، دو حالت از مدل عددی با چگالی برابر با ۱۴۶۵ و ۱۴۴۱ کیلوگرم بر مترمکعب نیز شبیه‌سازی شد. در شکل ۸ تا شکل ۱۰ نمودار تغییرات تنش قائم در عمق به‌منظور تعیین گستردگی زون گسیختگی نمایش داده شده است. ارتفاع زون گسیختگی متناظر با ارتفاعی است که تقعر منحنی تنش قائم تغییر می‌کند [۳۴]. با مقایسه تغییرات تنش نسبت به عمق مشاهده می‌شود که تغییرات تراکم خاک، در محدوده چگالی مورد مطالعه، تأثیر چندانی بر ارتفاع زون سست شده ندارد، در حالی که ارتفاع زون سست شده با افزایش عمق افزایش پیدا می‌کند. این مشاهدات با نتایج مطالعات عددی چن و همکارانش [۳۴] که بر روی توده سنگ ضعیف شبیه‌سازی شده است، مطابقت خوبی دارد.

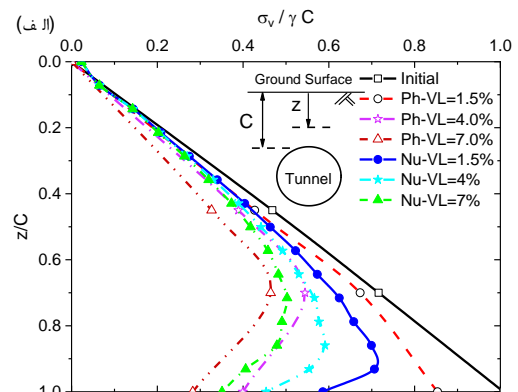
براساس مقایسه تغییرات تنش در مدل‌ها، مشاهده می‌شود که برای مدل‌های فیزیکی که به‌صورت پاشش ماسه آماده‌سازی شده است [۳۵]، نتایج مطابقت خوبی با مدل‌های عددی دارد. در حالی که برای مدل‌های فیزیکی که به‌صورت کوبش آماده‌سازی شده‌اند، کاهش تنش‌ها با سرعت بالایی صورت گرفته است. این تفاوت ناشی از تأثیر روش آماده‌سازی بر عملکرد سنسورهای فشار و پدیده اثر قوس زدگی^۴ در اطراف سنسورها است.

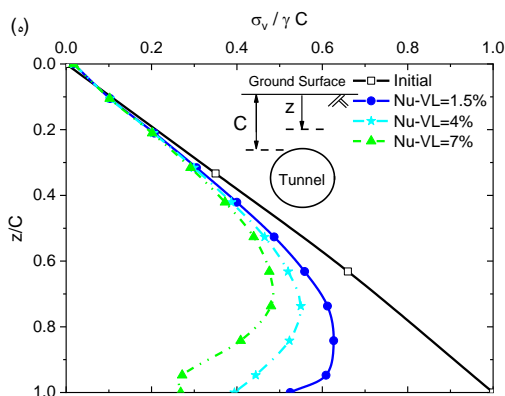




شکل ۸: نمودار تغییرات تنش قائم نسبت به عمق (نسبت عمق به روباره برابر با ۲)؛ چگالی ماسه برابر با الف (۱۴۰۰، ب) (۱۴۱۷، ج) (۱۴۴۱، د) (۱۴۶۵، ه) ۱۴۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب. (VL): پارامتر افت زمین).

شکل ۹: نمودار تغییرات تنش قائم نسبت به عمق (نسبت عمق به روباره برابر با ۳)؛ چگالی ماسه برابر با الف (۱۴۰۰، ب) (۱۴۱۷، ج) (۱۴۴۱، د) (۱۴۶۵، ه) ۱۴۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب. (VL): پارامتر افت زمین).





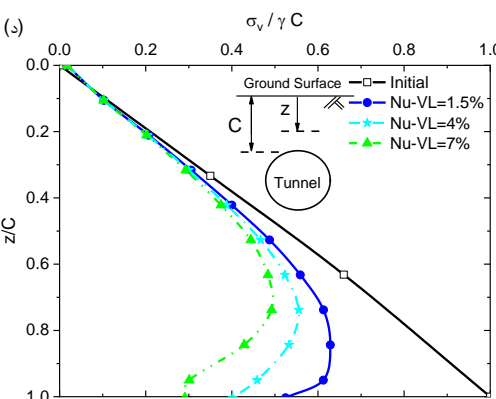
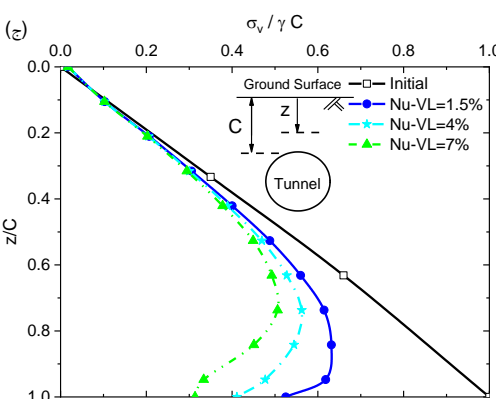
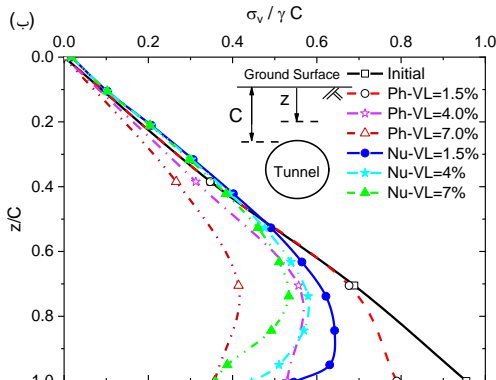
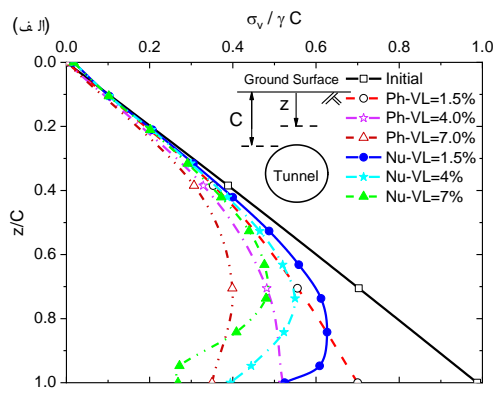
شکل ۱۰: نمودار تغییرات تنش قائم نسبت به عمق (نسبت عمق به روباره برابر با ۴)؛ چگالی ماسه برابر با الف) ۱۴۰۰، ب) ۱۴۱۷، ج) ۱۴۴۱، د) ۱۴۶۵، ه) ۱۴۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب. (VL: پارامتر افت زمین).

همچنین، برای حالتی که روباره دو برابر قطر تونل باشد، تأثیر پدیده قوس زدگی در مدل فیزیکی در مقایسه با مدل عددی بسیار کم و جزئی بوده است. دلیل این موضوع این نکته می‌تواند باشد که در عمق کم و سطح تنش‌های پائین، در مدل فیزیکی تأثیر پارامترهای مقاومتی قابل‌لمس نبوده ولی در مدل عددی به دلیل مقیاس واقعی و سطح تنش قابل‌توجه، پارامترهای مقاومتی خاک بیشتر نقش ایفا می‌کند.

۶- جمع‌بندی

رفتار محیط اطراف یک تونل در حال حفر در محیط ماسه‌ای با استفاده از مدل رفتاری هایپوپلاستیک مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور تعداد ۱۵ مدل عددی ساخته‌شده و مقادیر تغییرات تنش قائم از سطح زمین تا تاج تونل و همچنین مقادیر نشست سطح زمین اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن، تأثیر تراکم خاک و عمق تونل بر توزیع تنش و نشست سطح زمین نیز مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت نتایج مدل‌سازی عددی با مدل‌سازی فیزیکی و تئوری مقایسه شد. نتایج این تحقیق به‌اختصار در اینجا آورده شده است:

الف) نتایج مدل رفتاری هایپوپلاستیک مطابقت خوبی با نتایج مدل‌سازی فیزیکی و همچنین تئوری نشان داده، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل رفتاری هایپوپلاستیک قابلیت پیش‌بینی رفتار خاک‌های دانه‌ای سست را دارد.



- [5] Wu, W., Bauer, E., and Kolymbas, D., Hypoplastic constitutive model with critical state for granular materials. *Mechanics of materials*, 1996. 23(1): p. 45-69.
- [6] Wu, W., and Bauer, E., A simple hypoplastic constitutive model for sand. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1994. 18(12): p. 833-862.
- [7] Katoh, Y., Miyake, M., and Wada, M. Ground deformation around shield tunnel. in *Proceedings of the International Conference on Centrifuge Modelling (Centrifuge'98)*. 1998.
- [8] Wu, W., Hypoplasticity as a mathematical model for the mechanical behavior of granular materials. *Publication Series of the Institute of Soil Mechanics and Rock Mechanics, Karlsruhe University*, 1992.
- [9] Bauer, E., Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials. *Soils and foundations*, 1996. 36(1): p. 13-26.
- [10] Von Wolffersdorff, P.A., A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive- frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures*, 1996. 1(3): p. 251-271.
- [11] Wu, W., Lin, J., and Wang, X., A basic hypoplastic constitutive model for sand. *Acta Geotechnica*, 2017. 12(6): p. 1373-1382.
- [12] Wu, W., and Niemunis, A., Failure criterion, flow rule and dissipation function derived from hypoplasticity. *Mechanics of Cohesive- frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures*, 1996. 1(2): p. 145-163.
- [13] Tokuoka, T., Yield conditions and flow rules derived from hypo-elasticity. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1971. 42(4): p. 239-252.
- [14] Tokuoka, T., Rate type plastic material with kinematic work-hardening. *Acta Mechanica*, 1977. 27(1): p. 145-154.
- [15] Davis, R., and Mullenger, G., Derived failure criteria for granular media. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1979. 3(3): p. 279-283.
- [16] Matsuoka, H., and Nakai, T., Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses. in *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 1974. Japan Society of Civil Engineers.

ب) نتایج مدل سازی عددی ایجاد پدیده قوس زدگی در خاک دربرگیرنده تونل و در نتیجه توزیع غیر خطی تنش قائم در بالای تونل را تأیید می کند.

ج) در عمق و تراکم ثابت، با افزایش همگرایی تونل نشست سطح زمین تقریباً به صورت خطی افزایش پیدا می کند.

د) نتایج مدل عددی نشان می دهد که در محدوده چگالی مورد مطالعه، افزایش تراکم خاک کاهش جزئی در ارتفاع زون گسیخته بالای تونل ایجاد می کند.

ه) در تراکم و همگرایی ثابت، با افزایش عمق تونل نشست سطح زمین کاهش پیدا کرده ولی ارتفاع زون گسیخته بالای تونل افزایش می یابد. در نتیجه فشار وارد بر سیستم نگهداری افزایش خواهد یافت.

قدردانی

از جناب آقای پرفسور وی وو (Wei Wu)، استاد دانشگاه منابع طبیعی و علوم زیستی وین به خاطر مشاوره ارزشمندشان در خصوص مدل رفتاری هایپوپلاستیک تشکر و قدردانی می شود.

این تحقیق با حمایت مالی موسسه حرا (قرب نوح ع)- قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء (ص) انجام شده است که بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی از این موسسه ابراز می گردد.

مراجع

- [1] Wang, X., An updated hypoplastic model, its implementation, and its application in tunnelling. 2009, PhD thesis, University of Natural Resources and applied life sciences, Vienna.
- [2] Lade, P.V., Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. *International journal of solids and structures*, 1977. 13(11): p. 1019-1035.
- [3] Dafalias, Y., and Hermann, L., Soil mechanics-transient and cyclic loads, Chapter 10: Bounding surface formulation of soil plasticity, GN Pande y OC Zienkiewicz. 1982, John Wiley, New York, USA.
- [4] Mroz, Z., and Pietruszczak, S., A constitutive model for sand with anisotropic hardening rule. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1983. 7(3): p. 305-320.

- [27] Sveen, J.K., An introduction to MatPIV v. 1.6. 1. Preprint series. Mechanics and Applied Mathematics <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-23418>, 2004.
- [28] Marshall, A., Farrell, R., Klar, A., and Mair, R., Tunnels in sands: the effect of size, depth and volume loss on greenfield displacements. *Géotechnique*, 2012. 62(5): p. 385.
- [29] Pipatpongsa, T., Khosravi, M.H., Wattanachai, P., and Likitlersuang, S. Stress Distributions in Storage Silo under Uniform Vertical Pressure, in the 22nd KCCNN symposium on Civil Engineering. 2009: Chiang Mai, Thailand.
- [30] Kirsch, A., Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand. *Acta Geotechnica*, 2010. 5(1): p. 43-62.
- [31] Moussaei, N., Sharifzadeh, M., Sahriar, K. and Khosravi, M.H., A new classification of failure mechanisms at tunnels in stratified rock masses through physical and numerical modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019. 91: p. 103017.
- [32] Moussaei, N., Sharifzadeh, M., Sahriar, K. and Khosravi, M.H., Evaluation of discontinuity and opening geometry effects on roof beam deflection. *ISRM International Symposium-EUROCK 2016*. 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [33] Moussaei, N., Sharifzadeh, M., Sahriar, K. and Khosravi, M.H., On Stability of Shallow Tunnel by Model Test and Numerical Simulation. *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*. 2018. Springer.
- [34] Chen, C.N., Huang, W., Tseng, C., Stress redistribution and ground arch development during tunneling, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 26, Issue 1, 2011, Pages 228-235.
- [35] Moussaei, N., Khosravi, M.H., and Hossaini, M.F., Physical modeling of soil arching around shallow tunnels in sandy grounds, *International Journal of Mining & Geo-Engineering*, Volume 56-4, 2022, Pages 413-422.
- [17] Lade, P.V., and Duncan, J.M., Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1975. 101(10): p. 1037-1053.
- [18] Coon, M., and Evans, R., Incremental constitutive laws and their associated failure criteria with application to plain concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 1972. 8(9): p. 1169-1183.
- [19] Romano, M., A continuum theory for granular media with a critical state. *Arch. Mech*, 1974. 26(20): p. 1011-1028.
- [20] Davis, R., and Mullenger, G., A rate- type constitutive model for soil with a critical state. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1978. 2(3): p. 255-282.
- [21] Hadamard, J., *Lectures on Cauchy's problem in linear partial differential equations*. Yale Univ. Press, New Haven. Oxford Univ. Press, London, 1923. 1(923): p. 1.
- [22] Moussaei, N., Khosravi, M.H., and Hossaini, M.F., Physical modeling of tunnel induced displacement in sandy grounds. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019. 90: p. 19-27.
- [23] Wang, X., and Wu, W., An updated hypoplastic constitutive model, its implementation and application, in *Bifurcations, instabilities and degradations in geomaterials*. 2011, Springer. p. 133-143.
- [24] Wang, S., Wu, W., Yin, Z.Y., Peng, C., and He, X., Modelling the time- dependent behaviour of granular material with hypoplasticity. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2018. 42(12): p. 1331-1345.
- [25] Li, X.S., and Wang, Y., Linear representation of steady-state line for sand. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 1998. 124(12): p. 1215-1217.
- [26] Wu, W., and Kolymbas, D., Hypoplasticity then and now, in *Constitutive modelling of granular materials*. 2000, Springer. p. 57-105.

³ Flow rule⁴ Arching effect¹ Plasticity theory² Hypo elastic