



## مطالعه عددی آزمایش نفوذ پیژوکن در خاک ماسه‌ای فیروزکوه با شرایط زهکشی مختلف

محمد جواد ماشین چیان، محمد مهدی احمدی\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۰۵  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۲/۰۸

### کلمات کلیدی:

آزمایش نفوذ پیژوکن  
زهکشی جزئی  
مدل‌سازی عددی  
نرم‌افزار آباکوس  
مدل رفتاری هایپوپلاستیک

**خلاصه:** آزمایش نفوذ پیژوکن یکی از رایج‌ترین آزمایش‌های میدانی است که از آن، به منظور اندازه‌گیری فشار آب منفذی، شناسایی لایه‌بندی خاک و تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی زمین استفاده می‌شود. بسته به نوع خاک که در محدوده رس تا ماسه قرار گرفته، شرایط زهکشی شده، زهکشی نشده و یا زهکشی جزئی می‌تواند در حین فرایند نفوذ رخ دهد. در خاک‌های لای دار و ترکیب رس-ماسه، وجود شرایط زهکشی جزئی در آزمون پیژوکن محتمل است، که اغلب در تفسیرهای آزمایش، از این موضوع صرف‌نظر می‌شود. در ادبیات فنی، بررسی تأثیر شرایط زهکشی بر نتایج آزمایش پیژوکن عمدتاً به صورت آزمایشگاهی یافت می‌شود، و مطالعات عددی که بتوانند مدل‌سازی قابل قبولی از پیچیدگی‌های این آزمون مانند اندرکنش خاک-مخروط، اندرکنش آب-خاک، تغییر شکل‌های بزرگ و اثر رفتار غیرخطی خاک را ارائه دهد، به ندرت انجام شده است. در این مقاله، به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس و با استفاده از مدل رفتاری پیشرفته هایپوپلاستیک تغییر شکل‌های بزرگ و رفتار غیرخطی خاک در حین فرایند نفوذ مدل‌سازی و رفتار خاک ماسه‌ای اشباع فیروزکوه در شرایط زهکشی و درصد تراکم‌های مختلف تحلیل شد. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده، محدوده تأثیر نفوذ مخروط بر خاک اطراف و محدوده شرایط زهکشی جزئی برای خاک ماسه‌ای فیروزکوه بررسی شد. همچنین نشان داده شد که شرایط زهکشی و درصد تراکم خاک تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روند تغییرات اضافه فشار آب منفذی در خاک اطراف مخروط دارد.

### ۱- مقدمه

در شرایط کنونی آزمون نفوذ مخروط<sup>۱</sup> (CPT) با توجه به کارایی بالای آن در ارائه‌ی یک پروفیل پیوسته از لایه‌بندی خاک و تخمین قابل قبول از خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی برای خاک‌های رسی و ماسه‌ای، و همچنین سرعت مناسب آزمون و ویژگی‌های اقتصادی آن، به یک آزمون برجای معمول و متداول در سطح جهان تبدیل شده است. این آزمون بر اساس نفوذ پیوسته‌ی میله استوانه‌ای با نوک مخروطی شکل به داخل زمین استوار است [۱]. میله‌ی نفوذ کننده استاندارد دارای نوک مخروطی با زاویه رأس ۶۰ درجه و قطر ۳۵/۷ میلی‌متر و طول غلاف اصطکاکی ۱۳۴ میلی‌متر است (شکل ۱). در این آزمون، مخروط با سرعت ۲۰ میلی‌متر در ثانیه به داخل زمین نفوذ می‌کند. در حین نفوذ مقادیر مقاومت نوک

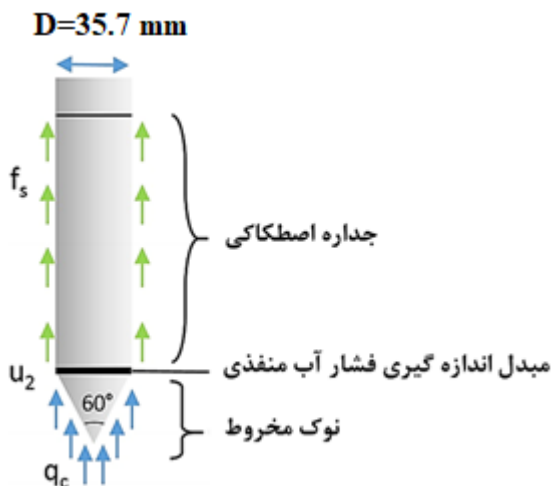
$(q_c)$ ، مقاومت اصطکاکی جدار  $(f_s)$  و فشار آب منفذی  $(u)$  اندازه‌گیری می‌شوند.

نتایج آزمون نفوذ مخروط برای تخمین بسیاری از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در خاک‌های ریزدانه و ماسه‌ها به کار می‌آید. بدین منظور محققان روابط همبستگی متعددی بین خصوصیات خاک و پارامترهای حاصل از این آزمایش ارائه نموده‌اند. بسته به نوع خاک که در محدوده رس تا ماسه قرار می‌گیرد هر یک از شرایط زهکشی نشده، زهکشی جزئی و یا زهکشی کامل ممکن است در حین فرایند نفوذ مخروط رخ دهد، و این در حالی است که در اغلب مطالعات انجام شده بر روی آزمون نفوذ مخروط، خاک فقط به صورت زهکشی نشده و یا کاملاً زهکشی شده در نظر گرفته می‌شود، اما نفوذ مخروط در خاک‌های لای دار و ترکیبات رس-ماسه، در شرایط زهکشی جزئی انجام می‌شود که این مهم اغلب در تفسیر داده‌های حاصل از این آزمایش نادیده گرفته می‌شود. اثر زهکشی در اندازه‌گیری‌های آزمون

1 Cone penetration test

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mmahmadi@sharif.edu





شکل ۱. شکل شماتیک از یک دستگاه پیزوکن

Fig. 1. Schematic diagram of a piezocone device

است [۴ و ۳].

با توجه به بررسی‌های انجام شده، مطالعات عددی که بتواند رفتار پیچیده آزمون نفوذ پیزوکن را شبیه‌سازی کند، به تعداد بسیار اندکی انجام شده است. مطالعات سوسیلا و رایسی‌یو<sup>۲</sup> (۲۰۰۳)، هوانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۴)، کورتسیز<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، در شرایط زهکشی شده انجام شده است. همچنین مطالعات ابوفرسخ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۳)، بیوت و ورمی‌پر<sup>۶</sup> (۲۰۱۳) در شرایط زهکشی نشده انجام شده است. در حالی که اثر نرخ زهکشی در مطالعات سیلوا<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۶) و یی<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۲) و مو<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، بررسی شده است [۱۲-۵]. سیلوا و همکاران (۲۰۰۶)، توزیع تنش پس از نفوذ مخروط را در خاک‌های رسی عادی و پیش تحکیم یافته بررسی نمودند. رفتار خاک در این مطالعه به صورت مدل کم-کلی اصلاح شده<sup>۱۰</sup> در نظر گرفته شد. این روش بر اساس تئوری انبساط حفره<sup>۱۱</sup>

پیزوکن<sup>۱</sup> (CPTu) به طور عمده به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است و تحلیل‌های عددی در این زمینه بسیار اندک است، چرا که مدل‌سازی عددی که در آن رفتار غیرخطی خاک، اندرکنش خاک-مخروط و خاک-آب و تغییر شکل‌های بزرگ خاک در نظر گرفته شود امری دشوار است [۲]. با توجه به مطالب ارائه شده، انجام یک مطالعه عددی جامع با رعایت پیچیدگی‌های گفته شده در بالا و برای شرایط زهکشی مختلف ضروری به نظر می‌رسد.

## ۲- مروری بر ادبیات فنی

اغلب روابط تئوری و تجربی که در اندازه‌گیری‌های CPT و مشخصات خاک، موجود است، با فرض شرایط کاملاً زهکشی شده و یا کاملاً زهکشی نشده ارائه شده است، در حالی که، تحت شرایط خاص، برای نمونه در خاک‌های لای‌دار و یا ترکیبات رس-ماسه، شرایط تحکیمی می‌تواند در حالت زهکشی جزئی قرار گیرد. به عبارت دیگر، فشار آب منفذی به وجود آمده در حین نفوذ به صورت جزئی زهکشی می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد در شرایطی که استهلاک فشار آب منفذی در مقایسه با نرخ نفوذ سریع‌تر باشد، خاک موجود در اطراف مخروط، در هنگام نفوذ تحکیم می‌یابد. بنابراین، در مقایسه با شرایط زهکشی نشده مقاومت نوک بیشتری مشاهده شده

- 2 Susila & Hryciw
- 3 Huang
- 4 Kouretzis
- 5 Abu-Farsakh
- 6 Beuth & Vermeer
- 7 Silva
- 8 Yi
- 9 Mo
- 10 Modified cam clay
- 11 Cavity Expansion Theory

1 Piezocone test

شویجر<sup>۱۱</sup> (۲۰۲۱)) و همچنین روش تفاضل محدود (احمدی و همکاران (۲۰۰۵)) اشاره کرد [۲۲-۱۳]. اغلب این مطالعات، در شرایط کاملاً زهکشی شده و یا زهکشی نشده انجام شده است و اثر تحکیم و زمان مورد نیاز برای استهلاک فشار آب منفذی اضافه در آن‌ها به خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته است.

در این تحقیق، اثر زهکشی جزئی بر روی خاک ماسه‌ای فیروزکوه با بررسی تأثیر پارامترهایی مانند درصد تراکم و نفوذپذیری خاک بر روی مقدار فشار آب منفذی مطالعه شده است. در حالی که، مطالعات پیشین بر روی خاک‌های رسی و یا رس-سیلتی انجام شده‌اند. یکی دیگر از اهداف این مطالعه ایجاد درک بهتری از فرآیند نفوذ و تفسیر دقیق‌تر داده‌های به دست آمده است. به همین منظور از مدل رفتاری هایپوپلاستیک<sup>۱۲</sup> در مدل‌سازی استفاده شده تا تغییر شکل‌های بزرگ خاک، اندرکنش آب-خاک، اندرکنش خاک-مخروط و رفتار غیرخطی خاک در مدل‌سازی‌های عددی به خوبی منظور شود.

### ۳- معرفی مدل رفتاری هایپوپلاستیک

انتخاب یک مدل رفتاری برای مدل‌سازی رفتار واقعی اسکلت خاک همواره به عنوان یک چالش در مهندسی ژئوتکنیک مطرح است. طبیعت رفتار خاک به صورت غیرخطی است. رفتار مواد الاستیک خطی تنها در محدوده کرنش‌های کوچک معتبر است. در حین نفوذ مخروط، خاک زیر مخروط فشرده و به سمت اطراف مخروط منتقل می‌شود. به علت ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ خاک در حین نفوذ، ایجاد فشار آب منفذی دارای اهمیت است. مدل رفتاری هایپوپلاستیک مدل مناسبی برای بیان رفتار غیرخطی برای مصالح دانه‌ای مانند ماسه‌ها می‌باشد که بر اساس تئوری غیرالاستیک و به صورت نموی و غیرخطی در مصالح خاکی قابل تعریف است. در این مدل رفتاری نیازی به تعریف سطح تسلیم و همچنین تفکیک نرخ کرنش به بخش‌های الاستیک و پلاستیک وجود ندارد. در مدل هایپوپلاستیک رفتار انبساطی، رفتار انقباضی خاک، و تأثیر سختی خاک بر پارامترهای تنش و دانسیته خاک در نظر گرفته شده است.

مدل رفتاری هایپوپلاستیک در ابتدا توسط کولیمباس<sup>۱۳</sup> در سال ۱۹۷۸ پیشنهاد گردید. در مدل اولیه، تعیین پارامترهای ورودی

استوانه‌ای در ترکیب با روش المان محدود بود که در آن، تغییر شکل‌های خاک و جریان آب تنها در جهت شعاعی در نظر گرفته می‌شد [۱۰]. یی و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از روش المان محدود لاگرانژی به روز شده و کرنش‌های لگاریتمی مطالعه پارامتری انجام داده‌اند. در این مطالعه که از مدل رفتاری دراگر-پراگر استفاده شده است، مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک‌های عادی تحکیم یافته بیش از حد تخمین زده می‌شود [۱۱]. مو و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از تئوری انبساط حفره و با تعریف پارامتری به عنوان شاخص زهکشی به تفسیر آزمایش نفوذ پی‌زوکن در شرایط زهکشی جزئی در خاک‌های رسی و ماسه‌ای پرداختند [۱۲].

در سال‌های اخیر، محققین با استفاده از آزمون‌های مدل سانتریفیوژ (هوپ و رندولف<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)) و آزمون‌های محفظه کالیبراسیون<sup>۲</sup> (کیم<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، آمودا<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۰))، ارتباط بین عوامل موثر بر زهکشی و مقاومت مخروط را بررسی نموده‌اند. هوپ و رندولف (۲۰۰۴)، به این نتیجه رسیدند که با کاهش نرخ نفوذ، به دلیل کاهش اثر ویسکوزیته، مقاومت نوک در ابتدا به آرامی کاهش یافته و پس از آن افزایش قابل توجهی دارد. این محققین دلیل این موضوع را افزایش مقاومت موضعی خاک در اطراف مخروط، هنگام استهلاک فشار آب منفذی اضافه و کاهش بیان کرده‌اند [۳]. کیم و همکاران (۲۰۰۸)، افزایش مشابهی در مقاومت نوک در خاک‌های ماسه‌ای رسی از آزمایش‌های میدانی و آزمایش‌های محفظه کالیبراسیون 1g مشاهده نمودند [۴].

تحلیل‌های عددی فرایند نفوذ مخروط با استفاده از روش‌های مختلفی تاکنون انجام شده است. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به روش مسیر کرنش<sup>۵</sup> (ته و هالزبی<sup>۵</sup> (۱۹۹۱))، روش انبساط حفره (سالگادو<sup>۶</sup> و همکاران (۱۹۹۷))، روش تحلیل المان محدود (یو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۰)، لیاناپاتیرانا<sup>۸</sup> (۲۰۰۹)، یو و واکر<sup>۹</sup> (۲۰۱۰)، گاوین و طلوعیان<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۱)، خدایاری و احمدی (۲۰۲۰)، هازر و

- 1 Hope & Randolph
- 2 Calibration Chamber
- 3 Kim
- 4 Amuda
- 5 Teh & Houlsby
- 6 Salgado
- 7 Yu
- 8 Liyanapathirana
- 9 Yu & Walker
- 10 Gavin & Tolooian

11 Hauser & Schweiger

12 Hypoplastic constitutive model

13 Kolymbas

جدول ۱. معرفی هر یک از پارامترهای مدل رفتاری هایپوپلاستیک و نحوه به دست آوردن آن‌ها

Table 1. Introduction of each of the parameters of the hypoplastic constitutive model and how to obtain them

پارامتر مدل رفتاری	توصیف	نحوه به دست آوردن هر یک از پارامترها
$\alpha$	پارامتر توانی	آزمایش سه محوری زهکشی شده
$\beta$	پارامتر توانی	آزمایش سه محوری زهکشی شده
$e_{d0}$	نسبت تخلخل حداقل در فشار صفر	آزمایش برش تناوبی با دامنه‌های کوچک و فشار ثابت/ روابط تجربی
$e_{c0}$	نسبت تخلخل بحرانی در فشار صفر	آزمایش سه محوری/ روابط تجربی
$e_{i0}$	نسبت تخلخل حداکثر در فشار صفر	روابط تجربی
$\varphi_c$ (°)	زاویه اصطکاک حالت بحرانی	آزمایش سه محوری / ریزش ماسه و اندازه‌گیری زاویه سکون
$h_s$ (Pa)	وابسته به سختی دانه‌های خاک	آزمایش ادمتری/ روابط تجربی
$n$	پارامتر توانی	آزمایش ادمتری/ روابط تجربی

مدل و همچنین مفاهیم فیزیکی معادلات رفتاری به کار رفته دشوار بود. در سال ۱۹۹۱ راه حلی توسط کولیمباس پیشنهاد گردید که اثرات فشار و دانسیته خاک را در مدل لحاظ کرد. در سال ۱۹۹۶، بایر و گودهوس<sup>۱</sup> فشارهای وابسته به نسبت‌های تخلخل و نسبت تنش را به روابط هایپوپلاستیک اضافه نمودند. این راهکار موجب تسهیل در تعیین پارامترهای مدل و نهایتاً اعتبار بیشتر مدل با نتایج آزمایشگاهی شد. یکی از ضعف‌های مدل که توسط بایر و گودهوس بیان شد، عدم پیش‌بینی مناسب شکل مکان حالت بحرانی در صفحه اکتهدرال<sup>۲</sup> بود. به همین منظور، تصحیح دیگری از مدل، توسط فون ولفرسدروف<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۶ انجام شد.

مدل رفتاری هایپوپلاستیک به کار گرفته شده در این پژوهش بر مبنای مدل ارائه شده توسط فون ولفرسدروف (۱۹۹۶) است که در آن، به طور کلی ۸ پارامتر برای تعریف مدل رفتاری هایپوپلاستیک وجود دارد. معرفی و نحوه به دست آوردن هر یک از پارامترها در جدول ۱ به صورت خلاصه آمده است [۲۶-۲۳].

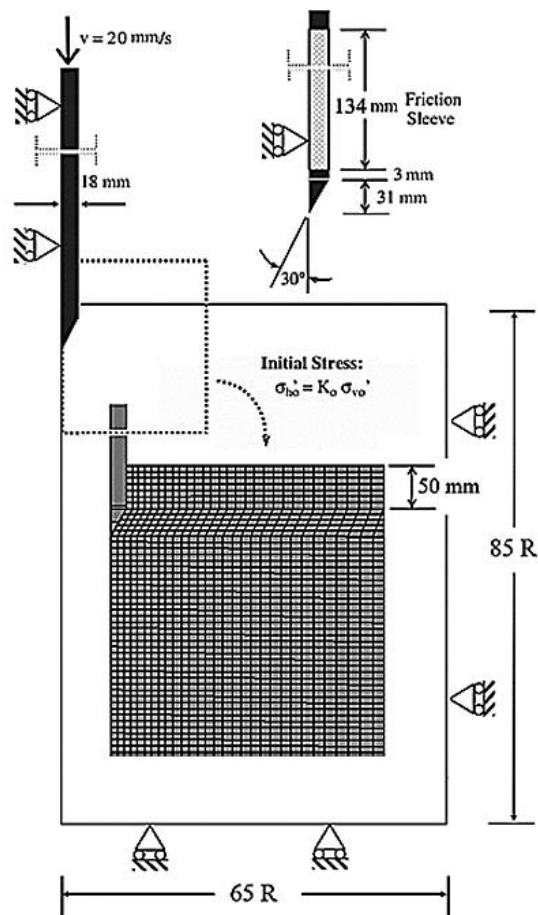
۴- مدل سازی عددی

در این مطالعه فرآیند نفوذ مخروط در خاک‌های ماسه‌ای در حالت تقارن محوری و به کمک نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. شرایط مرزی و مدل اولیه المان محدود در شکل ۲ نشان داده شده

۳ [۲۱].

به منظور جلوگیری از اعوجاج بیش از حد المان‌های خاک در اطراف پیژوکن در ابتدای فرآیند نفوذ، ناحیه مخروطی شکل پیژوکن به صورت مدفون در محیط خاکی در نظر گرفته شده است. در این روش، از ابتدای شروع ترسیم محیط خاکی، یک حفره (برابر با ابعاد مخروط) در بالای مدل و در کنار محور تقارن ساخته و مخروط در

۱ Bauer & Gudehus  
 2 Octahedral Plane  
 3 Von Wolffersdroff



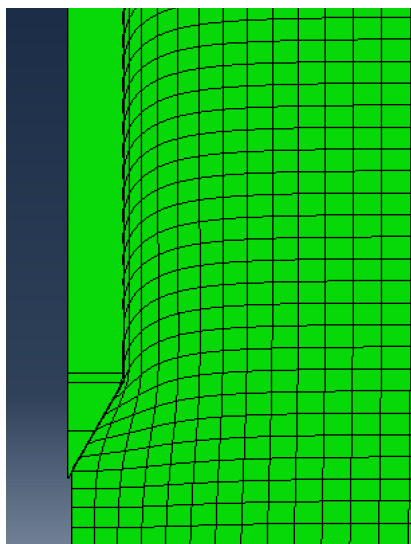
شکل ۲. شرایط مرزی و مش بندی اولیه مدل المان محدود

Fig. 2. Boundary conditions and initial meshing of the finite element model

نداشته باشد و همچنین هزینه محاسباتی نیز به حداقل برسد [۲۱] و [۱۱]. همچنین، امکان استهلاک فشار آب منفذی اضافی در بالای مدل در نظر گرفته شده است، در حالی که پایین و اطراف مدل به صورت نفوذناپذیر در نظر گرفته شده‌اند [۲۷]. شکل شماتیکی از این مدل تقارن محوری در شکل ۲ آمده است. در تحلیل‌های عددی، در مرز پایینی محیط خاکی، از تغییر مکان در جهت قائم جلوگیری و در سایر مرزها تنش برابر با تنش برجای راستای مربوطه اعمال شده است. محیط خاکی نیز به صورت کاملاً اشباع مدل شده است. پس از اعمال تنش‌های استاتیکی (مربوط به عمق مورد نظر از یک خاک واقعی) به محیط خاکی، میله‌ی فرورونده از بالای سطح خاک با سرعت ثابت ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه به درون مش خاک نفوذ می‌کند. در این رابطه، سرعت مذکور به یک گره‌ی مرجع از پیش تعریف شده

آن قرار داده می‌شود. بنابراین، در این روش قبل از شروع فرآیند حل عددی، همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مخروط مقداری در خاک مدفون است و با شروع فرآیند حل عددی، مشکل نفوذ اولیه و جا باز کردن مخروط در خاک پدید نمی‌آید. همچنین، فاصله‌ای به میزان ۱ میلی‌متر از محور تقارن در نظر گرفته شده تا امکان جابه‌جایی المان‌های محیط خاکی در اطراف پی‌زکن حین نفوذ، وجود داشته باشد. این روش توسط احمدی و همکاران (۲۰۰۵) پیش از این استفاده شده است [۲۱].

برای کاهش اثرات شرایط مرزی، عرض محیط خاکی در مدل ۶۵ برابر شعاع مخروط (۱/۱۶ متر) و ارتفاع آن ۸۵ برابر شعاع مخروط (۱/۵۲ متر) در نظر گرفته شده است. این ابعاد طی تحلیل‌های مقدماتی به نحوی انتخاب شده‌اند که اثرات شرایط مرزی در نتایج مدل تأثیری



شکل ۳. مش تغییر شکل یافته پس از نفوذ مخروط

Fig. 3. Deformed mesh after penetration of the cone

جدول ۲. پارامترهای مدل رفتاری هایپوپلاستیک ماسه فیروزکوه [۲۹]

Table 2. Parameters of Firoozkooch sand hypoplastic constitutive model

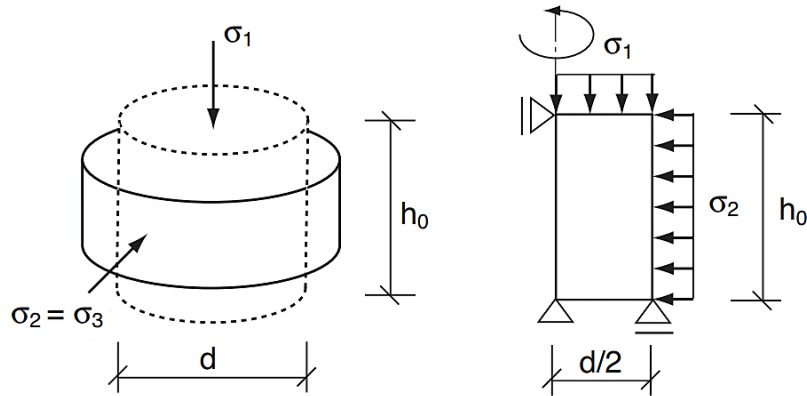
نوع ماسه	$\alpha$	$\beta$	$e_{d0}$	$e_{c0}$	$e_{i0}$	$\varphi_c$ (°)	$h_s$ (MPa)	$n$
ماسه فیروزکوه	۰/۵	۱/۰۰	۰/۵۸	۰/۹۱	۱/۱۰	۳۲/۷	۳۵۰	۰/۲۴

است. بنابراین رفتار تماسی بدون اصطکاک تعریف شده است [۲۸]. همان‌طور که هوانگ و همکاران (۲۰۰۴) اشاره داشته‌اند، تفکیک مقاومت دیواره از نیروهای واکنش کل اعمالی بر روی نفوذسنج در صورت وجود اثر اصطکاک دشوار است. همچنین، وجود اصطکاک در سطح تماس خاک-مخروط باعث می‌شود تا تحلیل همبسته پایداری کمتری داشته باشد. به همین دلیل، در تحلیل‌های انجام شده سطح تماس خاک-مخروط به صورت بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است [۶].

در این پژوهش، رفتار دانه‌های خاک با استفاده از مدل رفتاری هایپوپلاستیک مدل‌سازی شده و در آن از ماسه فیروزکوه ۱۶۱ که پارامترهای هایپوپلاستیک آن، مطابق آزمون‌های آزمایشگاهی محمدی حاجی و اردکانی (۲۰۲۰)، به دست آمده، استفاده شده است. مقدار هر یک از پارامترهای استفاده شده برای این مدل رفتاری در جدول ۲ آمده است.

در بالای میله و روی محور تقارن اعمال می‌شود. حرکت این گره، کنترل‌کننده رفتار حرکتی کل میله است و بدین ترتیب تمام شرایط مرزی مربوط به حرکت میله، به گرهی مرجع اعمال می‌شود. بنابراین برای اعمال شرایط مرزی، علاوه بر اعمال سرعت در راستای پایین، تغییر مکان در راستای افقی و همچنین دوران گره مرجع بسته می‌شود. در شکل ۳، تغییر مش‌بندی محیط خاکی پس از نفوذ مخروط نشان داده شده است.

برای مدل رفتاری تماسی-اصطکاکی بین میله‌ی فرورونده و خاک اطراف، در سطح مشترک آن‌ها به هنگام فرآیند نفوذ، از الگوریتم سینماتیکی استفاده شده که به موجب آن، اجازه‌ی نفوذ المان‌های مخروط در المان‌های خاک اطراف داده نمی‌شود. الگوریتم تماسی به کار گرفته شده در تحلیل‌های عددی شامل دو قانون تماسی عمودی و مماسی می‌شود. به منظور کاهش مسئله اعوجاج مش‌ها در سطوح تماس، سطح مخروط به صورت بدون اصطکاک فرض شده



شکل ۴. شرایط مرزی اعمال شده در آزمایش سه محوری CD

Fig. 4. Boundary conditions applied in the triaxial CD test

جدول ۳. پارامترهای مدل رفتاری هایپوپلاستیک برای ماسه کارلسروهه (هرله و گودهوس (۱۹۹۹)) [۳۰]

Table 3. Hypoplastic constitutive Parameters for Karlsruhe Sand (Herle and Gudehus (1999)) [30]

نوع ماسه	$a$	$\beta$	$e_{d0}$	$e_{c0}$	$e_{i0}$	$\varphi_c$ (°)	$h_s$ (MPa)	$n$
Karlsruhe sand	0.13	1.00	0.53	0.84	1.00	30	5800	0.28

هرله<sup>۲</sup> و گودهوس (۱۹۹۹) است، مقایسه شد. همان طور که مشاهده می شود، تطابق مناسبی بین نتایج مدل سازی و آزمایشگاهی وجود دارد که نشان از درستی و دقت مدل رفتاری هایپوپلاستیک دارد. لازم به ذکر است که با افزایش تنش همه جانبه مقدار خطای مدل افزایش یافته به طوری که حداکثر مقدار خطای نتایج مدل سازی در تنش همه جانبه ۱۰۰۰ کیلوپاسکال، در شکل ۵ در حدود ۷٪ و در شکل ۶ در حدود ۵٪ بوده، که به میزان قابل قبولی است.

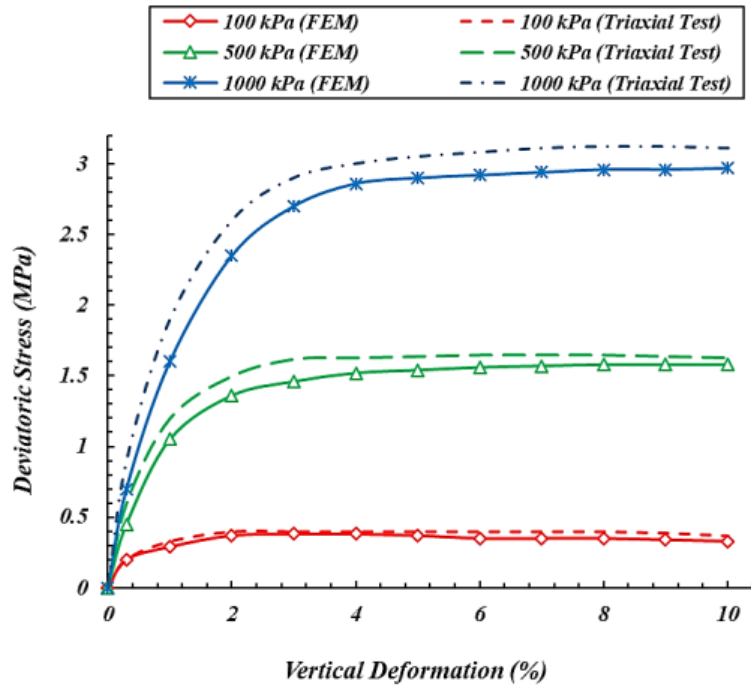
یکی از منابع اصلی اندازه گیری های آزمون CPT، آزمایش های انجام شده با استفاده از محفظه کالیبراسیون است. از سوی دیگر روش های عددی مختلفی تاکنون به منظور مدل سازی فرایند نفوذ مخروط مورد استفاده قرار گرفته است. این روش ها عبارتند از: روش

## ۵- صحت سنجی مدل رفتاری و آزمون نفوذ

به منظور بررسی عملکرد مدل رفتاری استفاده شده در این تحقیق، آزمایش سه محوری زهکشی شده (CD) در محیط نرم افزار شبیه سازی و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. شرایط مرزی و مدل المان محدود آزمایش سه محوری در شکل ۴ نشان داده شده است. نمونه سه محوری شبیه سازی شده قطر و ارتفاع ۱۰ سانتی متر دارد. مطابق آزمایش سه محوری، در مدل سازی نیز ابتدا نمونه خاک تحت تنش همسان مشخصی (۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ کیلوپاسکال) قرار می گیرد و سپس در جهت قائم (محوری) به صورت کرنش کنترل، جابه جایی مشخص به مدل اعمال می گردد. خاک مورد استفاده در این مدل سازی از نوع ماسه کارلسروهه<sup>۱</sup> بوده که مشخصات آن در جدول ۳ نشان داده شده است. در شکل ۵ و ۶ نتایج به دست آمده از این مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی آن، که مطابق مطالعات

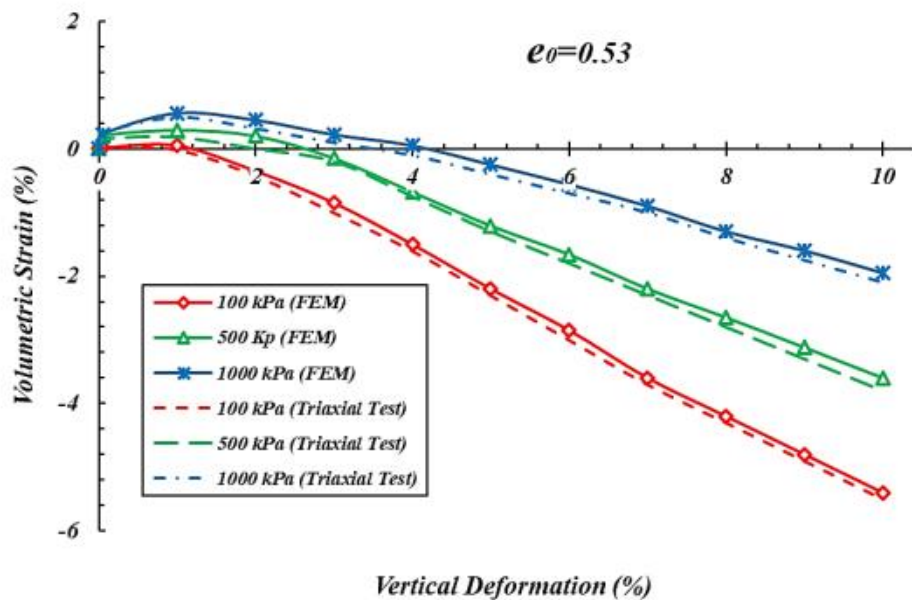
2 Herle

1 Karlsruhe



شکل ۵. مقایسه نتایج عددی به دست آمده در این پژوهش با داده‌های آزمایش سه محوری (تنش تفاضلی در برابر کرنش محوری)

Fig. 5. Comparison of numerical results obtained in this study with triaxial test data (deviatoric stress versus axial strain)



شکل ۶. مقایسه نتایج عددی به دست آمده در این پژوهش با داده‌های آزمایش سه محوری (کرنش حجمی در برابر کرنش محوری)

Fig. 6. Comparison of numerical results obtained in this study with triaxial test data (volumetric strain versus axial strain)



جدول ۴. پارامترهای هایپوپلاستیک ماسه‌های استفاده شده در آزمایش محفظه کالیبراسیون (کودمانی و اوسینوف (۲۰۰۱)) [۳۲]

Table 4. Hypoplastic parameters of sands used in calibration chamber experiments (Cudmani and Osinov (2001)) [32]

نوع ماسه	$\alpha$	$\beta$	$e_{d0}$	$e_{c0}$	$e_{i0}$	$\varphi_c$ (°)	$h_s$ (MPa)	$n$
Toyoura	0.13	1.00	0.53	0.84	1.00	30	5800	0.28
Ticino	0.11	1.00	0.59	0.94	1.11	31	250	0.68
Hocksund	0.09	1.00	0.53	0.87	1.01	31	150	0.70

اغلب مقادیر مقاومت نوک مخروط را با دقت مثبت یا منفی ۳۰٪ پیش‌بینی کند، آن روش یا تئوری توسط نتایج آزمایشگاهی مورد تأیید است. از مهم‌ترین دلایل آن، عدم قطعیت در تعیین تراکم نسبی نمونه در آزمایشگاه و خطای ناشی از عدم یکنواختی نمونه ساخته شده است [۳۳]. در این رابطه، شکل ۷، مقادیر مقاومت نوک مخروط پیش‌بینی شده توسط حل عددی و مقادیر مشابه اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های محفظه کالیبراسیون را با دقت ۳۰٪ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اغلب داده‌های به دست آمده در این محدوده قرار گرفته‌اند.

#### ۶- تأثیر شرایط زهکشی و درصد تراکم خاک در آزمون‌های نفوذ پی‌زوک

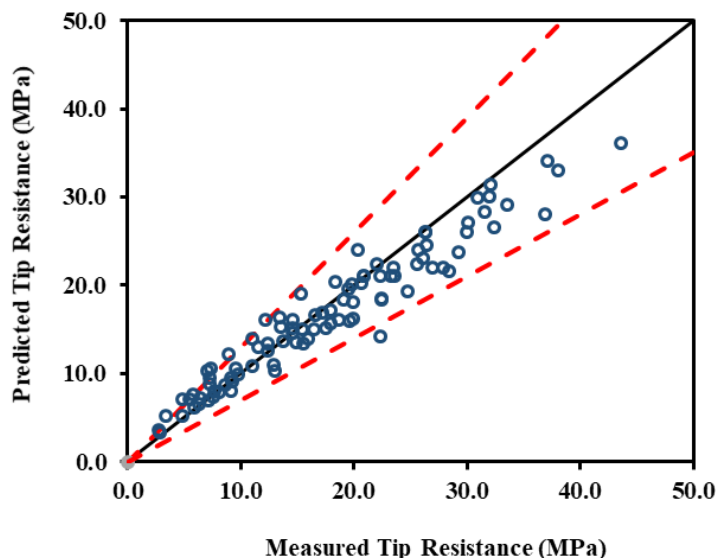
در بخش قبل مدل‌سازی عددی و مدل رفتاری استفاده شده در این تحقیق مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت، و نشان داده شد که مدل‌سازی عددی در این تحقیق می‌تواند برای دستیابی به اهداف این مطالعه به خوبی مورد استفاده قرار گیرد. در این بخش، اثر زهکشی جزئی در فرآیند نفوذ مخروط مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور آزمایش‌های نفوذ مخروط و استهلاک فشار آب منفذی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده است. در این بررسی از خاک ماسه فیروزکوه با مدل رفتاری هایپوپلاستیک مطابق با مشخصات جدول ۲ استفاده شده و با نفوذپذیری و درصد تراکم‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل‌های انجام شده ۴ درصد تراکم ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۷۵٪ و نفوذپذیری‌های  $10^{-3}$ ،  $10^{-5}$ ،  $10^{-7}$  و  $10^{-8}$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. مقادیر درصد

اجزای محدود<sup>۱</sup>، روش تفاضل متناهی<sup>۲</sup> و روش اجزای گسسته<sup>۳</sup>. اما علی‌رغم وجود مطالعات قبلی قابل توجه مبتنی بر روش‌های حل عددی جهت شبیه‌سازی فرآیند نفوذ مخروط، صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی‌های عددی با آزمایش‌هایی نظیر محفظه کالیبراسیون به ندرت صورت گرفته است. در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی آزمون نفوذ مخروط به روش اجزای محدود انجام شده، و نتایج مدل‌سازی‌ها با اندازه‌گیری‌های منتشر شده از آزمایش‌های محفظه کالیبراسیون مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفته و دقت نتایج ارزیابی شده است.

به منظور اعتبارسنجی نتایج پیش‌بینی شده‌ی مقاومت نوک مخروط از حل عددی، تعداد زیادی از اندازه‌گیری‌های آزمایش‌های محفظه کالیبراسیون برای ماسه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۳۱]. لازم به ذکر است که در این صحت‌سنجی از مدل رفتاری هایپوپلاستیک استفاده شده است. پارامترهای این مدل رفتاری نیز، از مقاله کودمانی و اوسینوف<sup>۴</sup> (۲۰۰۱) که مطالعات آزمایشگاهی جامعی را بر روی انواع خاک‌های ماسه‌ای انجام داده و این پارامترها را کالیبره نموده‌اند، برداشت شده است (جدول ۴).

به طور کلی میزان عدم قطعیت در تعیین تراکم نسبی در آزمایشگاه در حدود ۵ درصد است. اما با توجه به اینکه علاوه بر خطای مذکور، خطای ناشی از عدم یکنواختی نمونه‌ی ساخته شده نیز وجود دارد، بنابر پیشنهاد سالگادو<sup>۵</sup> (۱۹۹۳)، اگر یک تئوری بتواند

- 1 Finite element method (FEM)
- 2 Finite difference method (FDM)
- 3 Discrete element method (DEM)
- 4 Cudmani & Osinov
- 5 Salgado



شکل ۷. مقادیر مقاومت نوک مخروط پیش‌بینی شده از حل عددی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی آزمایشگاهی

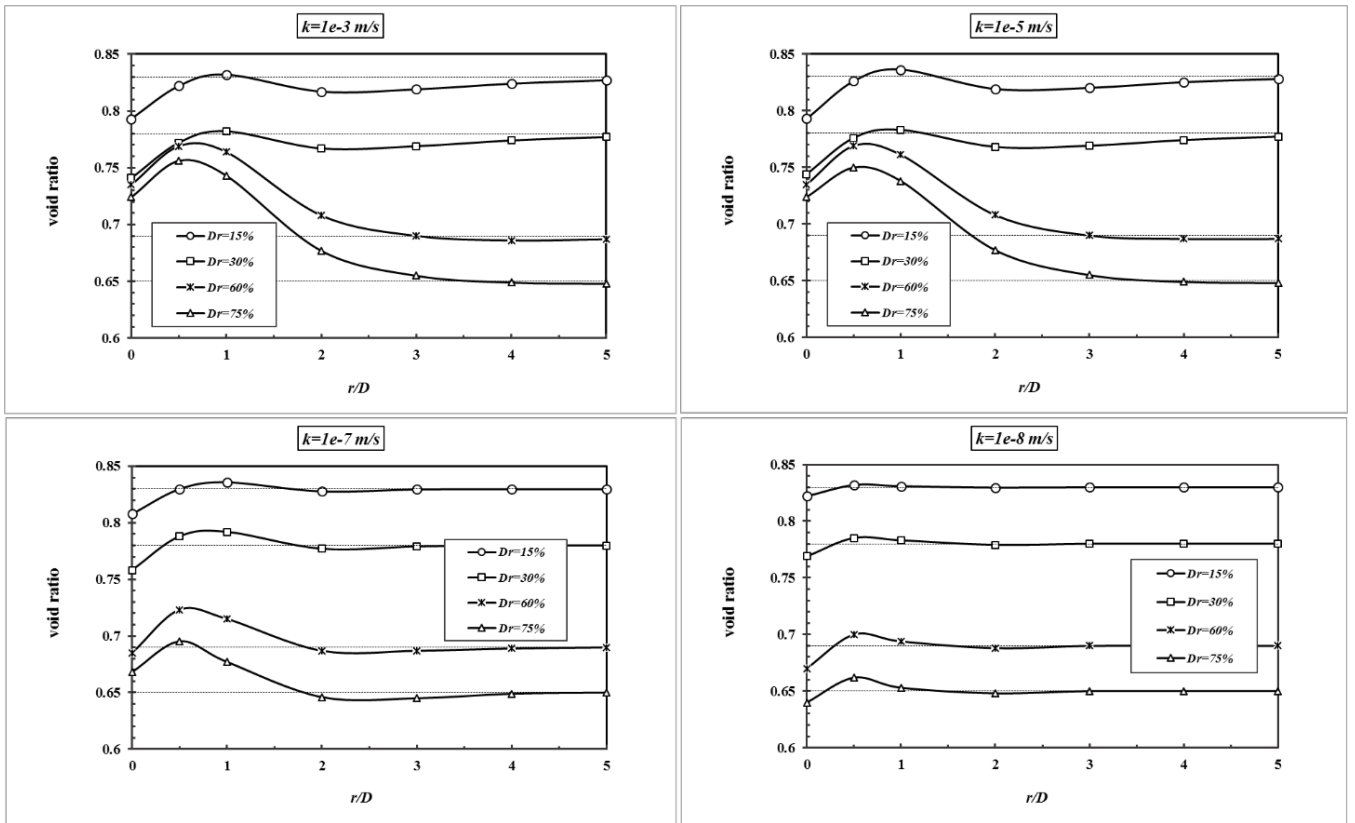
Fig. 7. Predicted values of cone tip resistance from numerical solution versus measured laboratory values

بر ثانیه، محدوده‌ی تغییر نسبت تخلخل به ۱ تا ۲ برابر قطر مخروط می‌رسد. همچنین با بررسی بیشتر، مشاهده می‌شود که در درصد تراکم‌های پایین ( $D_r = 15\%$  و  $D_r = 30\%$ )، مقدار نسبت تخلخل در نزدیکی مخروط کمتر از نسبت تخلخل اولیه خاک بوده و با فاصله از مخروط، تغییرات نسبت تخلخل روند صعودی داشته تا به نسبت تخلخل اولیه خود برسد، در حالی که در درصد تراکم‌های بالاتر ( $60\%$   $D_r = 75\%$  و  $D_r = 75\%$ ) مقدار نسبت تخلخل در نزدیکی مخروط بیشتر از نسبت تخلخل اولیه خاک است و با فاصله از مخروط، نسبت تخلخل خاک در ابتدا کمی افزایش یافته و پس از آن روند کاهش به خود گرفته است. در واقع یکی از دلایل بیشتر بودن نسبت تخلخل خاک در نزدیکی نوک مخروط در درصد تراکم‌های بالا، رفتار انبساطی خاک در برش است. لازم به ذکر است که با کاهش نفوذپذیری رفتار انبساطی خاک کاهش یافته، به نحوی که در نفوذپذیری  $10^{-8}$  متر بر ثانیه دیگر این رفتار مشاهده نمی‌شود.

در جدول ۵ مقادیر حداقل و حداکثر نسبت تخلخل برای نفوذپذیری‌ها و درصد تراکم‌های مختلف به صورت کمی مقایسه شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که درصد افزایش نسبت تخلخل حداکثر برای درصد تراکم‌های بالا، با کاهش نفوذپذیری کم می‌شود، به طوری که برای مثال، برای تراکم  $75\%$

تراکم و نفوذپذیری به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا محدوده‌های مختلف تراکم خاک و محدوده‌های مختلف زهکشی از جمله زهکشی نشده کامل، زهکشی شده کامل و شرایط زهکشی جزئی را جهت مطالعه دربرگیرند. لازم به ذکر است یکی از ویژگی‌های مدل رفتاری مورد استفاده، یکسان بودن پارامترهای آن در درصد تراکم‌های مختلف است و تنها نسبت تخلخل اولیه و نفوذپذیری اولیه در مدل‌سازی به عنوان متغیر تعریف شده است.

شکل ۸ تغییرات نسبت تخلخل با فاصله از نوک مخروط را برای درصد تراکم‌های مختلف نشان می‌دهد. هر یک از خطوط خطچین نشان داده شده در شکل، نسبت تخلخل اولیه خاک متناظر با درصد تراکم خود را نشان می‌دهد. این مقدار برای درصد تراکم‌های  $15\%$ ،  $30\%$ ،  $60\%$  و  $75\%$  به ترتیب برابر با  $0.83$ ،  $0.78$ ،  $0.69$  و  $0.65$  است. مطابق این شکل، مشاهده می‌شود که نسبت تخلخل خاک در ناحیه‌های نزدیک مخروط متأثر از نفوذ آن است، و در ناحیه‌هایی که خاک از مخروط فاصله دارد بر اثر نفوذ مخروط تغییراتی در نسبت تخلخل خاک ایجاد نمی‌شود. با بررسی مدل‌سازی‌های انجام شده، مشاهده می‌شود که مقدار محدوده تأثیر به نفوذپذیری خاک وابسته است. به طوری که برای مثال، برای خاک با نفوذپذیری  $10^{-3}$  متر بر ثانیه این محدوده ۴ تا ۵ برابر قطر مخروط است، اما در نفوذپذیری  $10^{-8}$  متر



شکل ۸. تغییرات نسبت تخلخل با فاصله از نوک مخروط با درصد تراکم و نفوذپذیری‌های متفاوت

Fig. 8. Variation of void ratio with distance from the tip of the cone with different densities and permeabilities

مخروط از به مقدار  $0/69$  در فاصله‌ی ۳ برابر شعاع مخروط رسیده و پس از آن در همان مقدار  $0/69$  تقریباً ثابت مانده است. در ادامه روند تغییرات اضافه فشار آب منفذی در نوک مخروط با گذشت زمان برای درصد تراکم‌های مختلف با انجام آزمایش‌های استهلاک مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۰). مطابق آن، پس از اینکه مخروط تا عمق مورد نظر نفوذ کرد، فرآیند نفوذ متوقف و مطابق آزمایش روند استهلاک اضافه فشار آب منفذی با گذشت زمان مورد بررسی می‌گیرد. لازم به ذکر است؛ با توجه به اینکه نوسانات شدید در ثانیه‌های ابتدایی آزمایش استهلاک مشاهده و پس آن روند تغییر هر یک از نمودارها ملایم شده است، لذا برای بررسی دقیق‌تر تغییرات فشار آب منفذی، تنها چند ثانیه ابتدایی آزمایش استهلاک مورد مقایسه قرار گرفته است. بدیهی است که با کاهش نفوذپذیری خاک، مدت زمان لازم برای استهلاک اضافه فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. با بررسی نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که روند

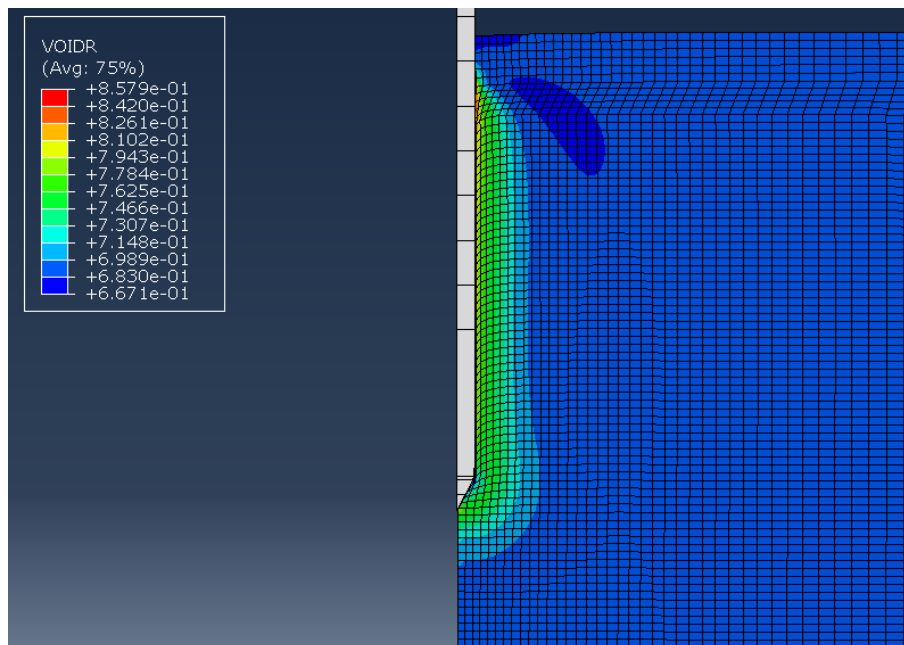
مقدار افزایش نسبت تخلخل از  $16/31\%$  در نفوذپذیری  $10^{-3}$  متر بر ثانیه به  $11/85\%$  در نفوذپذیری  $10^{-8}$  متر بر ثانیه رسیده است. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین میزان کاهش در درصد تراکم‌های پایین و نفوذپذیری‌های بالا ایجاد شده است. به طوری که برای مثال، برای تراکم  $15\%$ ، مقدار کاهش نسبت تخلخل از  $4/46\%$  در نفوذپذیری  $10^{-3}$  متر بر ثانیه به  $0/96\%$  در نفوذپذیری  $10^{-8}$  متر بر ثانیه رسیده است.

در شکل ۹ نیز، تغییرات نسبت تخلخل خاک با نفوذ مخروط برای نمونه‌ای با درصد تراکم  $60\%$  و نفوذپذیری  $10^{-5}$  متر بر ثانیه و محدوده تأثیرگذاری مخروط بر خاک اطراف نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که با نفوذ مخروط، نسبت تخلخل خاک در ناحیه‌ای در حدود ۳ برابر شعاع مخروط، تحت تأثیر قرار گرفته است. مطابق کانتورهای به دست آمده که نتایج شکل ۸ را نیز تأیید می‌کند، مقدار نسبت تخلخل از مقدار  $0/74$  در نزدیکی نوک

جدول ۵. مقایسه مقادیر حداقل و حداکثر نسبت تخلخل به دست آمده در اطراف مخروط برای درصد تراکم و نفوذپذیری‌های مختلف

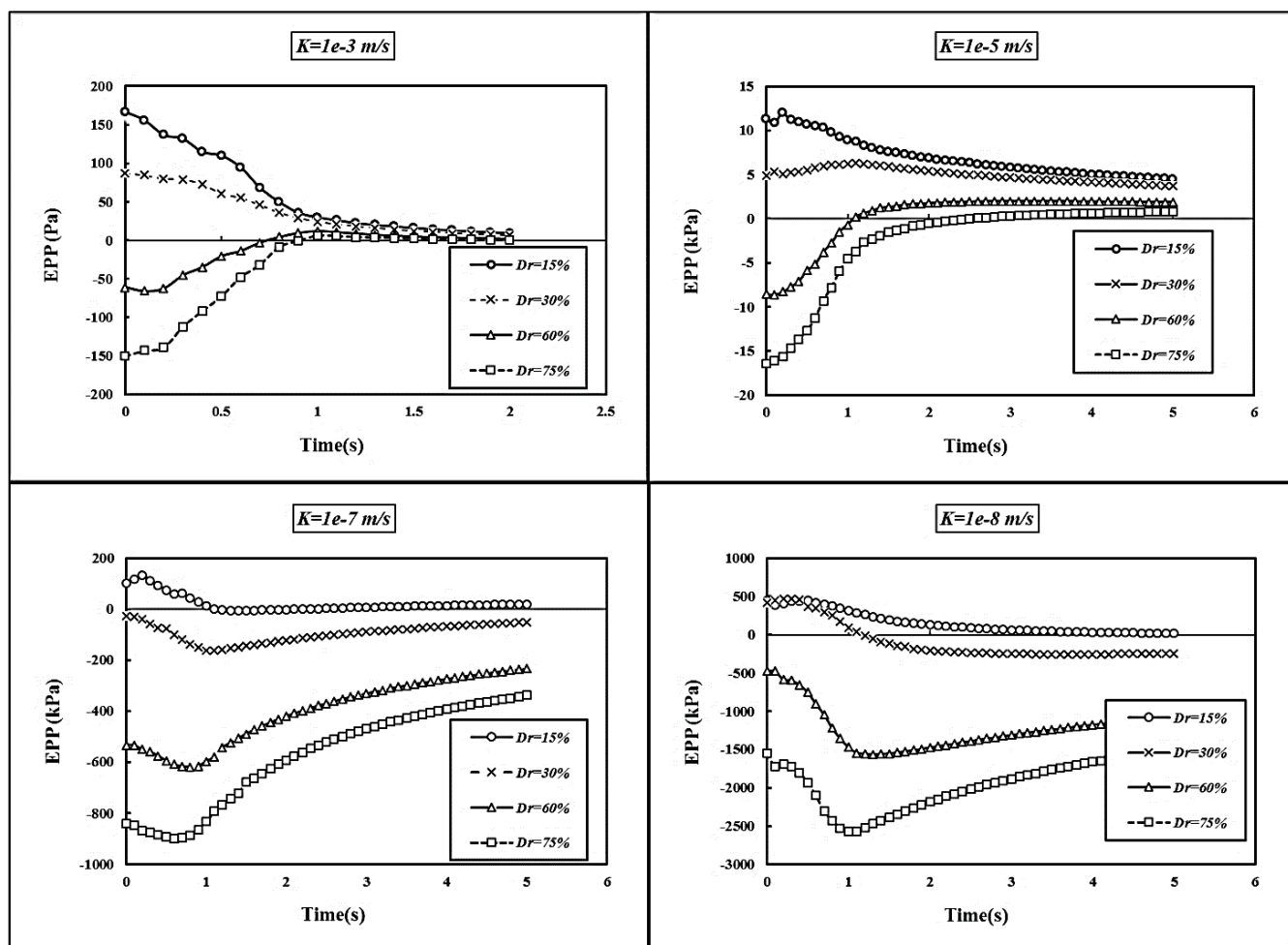
Table 5. Comparison of minimum and maximum void ratios obtained around the cone for different densities and permeabilities

نفوذپذیری ( $m/s$ )	درصد تراکم (%)	نسبت تخلخل اولیه ( $e_0$ )	حداکثر نسبت تخلخل	درصد افزایش (%)	حداقل نسبت تخلخل	درصد کاهش (%)
$10^{-3}$	15	0.83	0.832	0.24	0.793	4.46
	30	0.78	0.782	0.26	0.741	5.00
	60	0.69	0.769	11.45	0.687	0.43
	75	0.65	0.756	16.31	0.648	0.31
$10^{-5}$	15	0.83	0.836	0.72	0.793	4.46
	30	0.78	0.783	0.38	0.744	4.62
	60	0.69	0.769	11.45	0.687	0.43
	75	0.65	0.750	15.38	0.648	0.31
$10^{-7}$	15	0.83	0.836	0.72	0.808	2.65
	30	0.78	0.792	1.54	0.758	2.82
	60	0.69	0.723	4.78	0.685	0.72
	75	0.65	0.695	6.92	0.645	0.77
$10^{-8}$	15	0.83	0.832	0.24	0.822	0.96
	30	0.78	0.785	0.64	0.769	1.41
	60	0.69	0.7	1.45	0.670	2.90
	75	0.65	0.662	1.85	0.640	1.54



شکل ۹. تغییرات نسبت تخلخل با فاصله از نوک مخروط در درصد تراکم ۶۰٪

Fig. 9. Changes in void ratio with distance from the tip of the cone at a density of 60%



شکل ۱۰. تغییرات اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده با زمان برای درصد تراکم‌های متفاوت در آزمایش استهلاک

Fig. 10. Changes in excess pore water pressure created over time for different densities in the dissipation test

۷۵٪ افزایش یافته است. به طوری که برای مثال، به ترتیب برای خاک با نفوذپذیری‌های  $10^{-3}$ ،  $10^{-5}$ ،  $10^{-7}$  و  $10^{-8}$  متر بر ثانیه ۹۱٪، ۴۵٪ و ۶۴٪ افزایش یافته است. همچنین، در برخی از نمودارها، به خصوص در خاک با درصد تراکم‌های بالاتر یک تغییر شدید در چند ثانیه‌ی ابتدایی مشاهده می‌شود که اصطلاحاً به آن‌ها منحنی‌های غیراستاندارد آزمایش استهلاک گفته می‌شود. در منحنی‌های استاندارد، روند استهلاک اضافه فشار آب منفذی به صورت تدریجی است. در واقع، دلیل اصلی نوسان فشار آب منفذی قبل از استهلاک، به دلیل باز توزیع فشار آب منفذی بلافاصله پس از توقف نفوذ است [۳۴]. معمولاً فشار آب منفذی در نوک بیشتر از شانه مخروط بوده

تغییرات اضافه فشار آب منفذی در درصد تراکم‌ها و نفوذپذیری‌های مختلف، متفاوت است. به طوری که در درصد تراکم‌های بالا (۶۰ و ۷۵٪)، اضافه فشار آب منفذی منفی در نفوذپذیری‌های بالا ( $10^{-3}$  متر بر ثانیه)، با گذشت زمان به مقدار مثبتی رسیده و پس از آن مستهلک شده، اما در نفوذپذیری‌های پایین ( $10^{-8}$  متر بر ثانیه) اضافه فشار آب منفذی که در ابتدا منفی بوده، بدون تغییر علامت مستهلک شده است. دلیل این موضوع مکانیزم متفاوتی است که نفوذ مخروط در خاک با درصد تراکم‌های مختلف ایجاد کرده است. همچنین با توجه به شکل ۱۰ می‌توان بیان نمود که مقدار حداکثر فشار آب منفذی اضافی ایجاد شده با افزایش درصد تراکم خاک از ۶۰٪ به

آب از فشار هیدرواستاتیک کمتر گردد. بدیهی است که برای خاک با نفوذپذیری‌های پایین‌تر مدت زمان بیشتری لازم است تا نمونه به تعادل هیدرواستاتیکی برسد.

همان‌طور که مشاهده شد در این مطالعه به بررسی تغییرات نسبت تخلخل خاک در اطراف مخروط و تغییرات اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده در آزمایش استهلاک در خاک با نفوذپذیری‌ها و درصد تخلخل‌های مختلف پرداخته شد. هر چند در نظر گرفتن مقدار  $10^{-8}$  متر بر ثانیه برای نفوذپذیری خاک ماسه‌ای دور از واقعیت به نظر می‌رسد، اما برای مطالعه شرایط مختلف زهکشی خاک در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین این مقدار نفوذپذیری می‌تواند به عنوان نماینده خاک با شرایط زهکشی نشده مورد بررسی قرار گیرد.

در این مطالعه، با بررسی شرایط زهکشی مختلف، تغییر رفتار تدریجی مشخصاتی مانند اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده و نسبت تخلخل در اطراف مخروط، با عبور از حالت زهکشی نشده به حالت زهکشی شده کامل، مشاهده شد. بنابراین، تشخیص محدوده‌ای برای نفوذپذیری خاک به عنوان محدوده نفوذپذیری خاک با زهکشی جزئی دارای اهمیت بوده و باعث شناخت هر چه بیشتر ویژگی‌های خاک می‌شود. به همین منظور برای خاک ماسه‌ای فیروزکوه تحلیل برای نفوذپذیری‌های مختلف انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۲ آمده است. مطابق شکل ۱۲، محور افقی نشان دهنده نرخ نفوذ بی‌بعد شده بوده و نسبت نرخ نفوذ مخروط ( $v$ ) به ضریب نفوذپذیری خاک ( $k$ ) را نشان می‌دهد. همچنین محور قائم حداکثر فشار آب منفذی ایجاد شده را نشان می‌دهد. در واقع نه تنها نفوذپذیری خاک در تعیین محدوده زهکشی خاک تأثیرگذار بوده بلکه نرخ نفوذ مخروط نیز در تعیین شرایط زهکشی خاک تأثیرگذار بوده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، خاک در محدوده نرخ نفوذ بدون بعد  $10^3 \times 2$  تا  $10^6 \times 2$  رفتار زهکشی جزئی از خود نشان می‌دهد و روند افزایشی دارد و در محدوده‌ی نرخ نفوذ بدون بعد کمتر از  $10^3 \times 2$  رفتار خاک به صورت زهکشی شده است. همچنین، در محدوده نرخ‌های بیشتر از  $10^6 \times 2$  رفتار خاک به صورت زهکشی نشده در نظر گرفته می‌شود و با کاهش مقدار نفوذپذیری خاک یا افزایش مقدار نرخ نفوذ بدون بعد در این ناحیه، مقدار فشار آب منفذی تقریباً ثابت باقی مانده است. لازم به ذکر است که در بررسی‌های انجام شده، مقدار نرخ نفوذ مقادری

که این موضوع سبب ایجاد گرادیان فشار منفذی در موقعیت  $u_2$  و ایجاد جریان زهکشی از نوک به سمت شانه مخروط می‌گردد. عواملی نظیر نفوذپذیری خاک و مقدار گرادیان فشار منفذی در نرخ زهکشی تأثیرگذار هستند. علاوه بر آن نیز، سختی خاک اطراف مخروط، بر گرادیان و نرخ استهلاک تأثیرگذار است. از دلایل دیگر شکل‌گیری منحنی‌های غیراستاندارد فشار آب منفذی تأثیر نیروی برشی در فشار منفذی است. نیروی برشی باعث ایجاد رفتار انبساطی در خاک شده که به موجب آن فشار آب منفذی در اطراف شانه مخروط در مقایسه با خاک اطراف کاهش می‌یابد. هنگامی که فرایند نفوذ متوقف می‌شود، فشار منفذی اضافی بیشتر در نواحی اطراف باعث باز توزیع فشار منفذی به سمت  $u_2$  می‌گردد. به منظور درک دقیق‌تر فشار آب منفذی درک مولفه‌های تأثیرگذار در فشار آب منفذی ضروری است. اگر چه که تفکیک مقدار هر یک از مولفه‌ها در اندازه‌گیری‌های انجام شده ممکن نیست. به بیان دقیق‌تر، مقدار  $u_2$  ترکیبی از فشار منفذی هیدرواستاتیک ( $u_0$ )، فشار منفذی ناشی از تنش نرمال اکتاهدرال<sup>۱</sup> یا تنش کل متوسط ( $u_{oct}$ ) و فشار منفذی ناشی از تغییرات نیروی برشی ( $u_{shear}$ ) است که در رابطه (۱) بیان شده است.

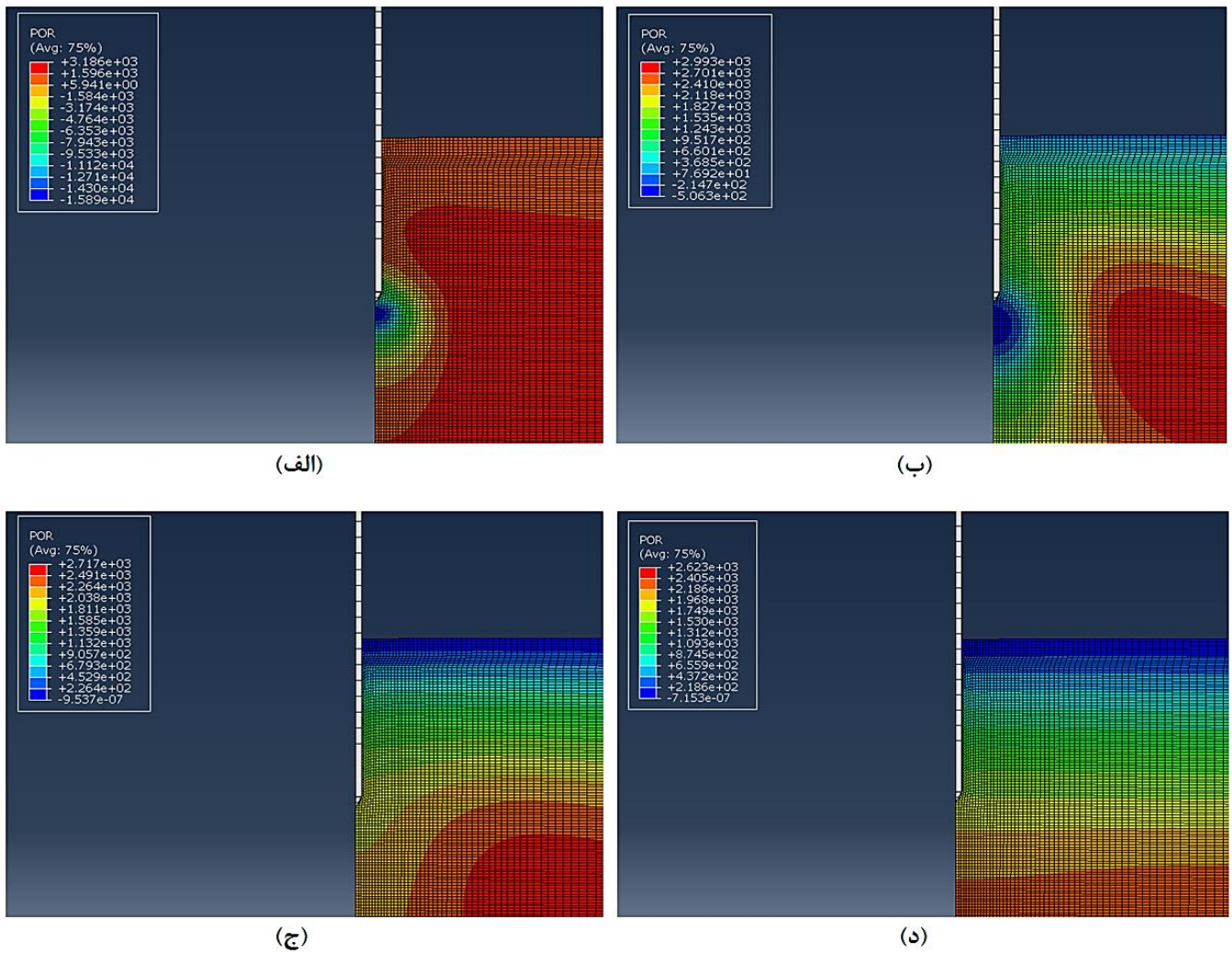
$$u_2 = u_0 + u_{2,oct} + u_{2,shear} \quad (1)$$

تغییرات فشار آب منفذی در آزمایش استهلاک نیز در رابطه (۲) آمده است [۳۵].

$$\Delta u_2 = \Delta u_{2,oct} + \Delta u_{2,shear} \quad (2)$$

نمونه‌ای از روند استهلاک فشار آب منفذی برای خاک با نفوذپذیری  $10^{-5}$  متر بر ثانیه و درصد تراکم ۶۰٪ با گذشت زمان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، مطابق با روند به دست آمده از شکل ۱۰، اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده در اثر نفوذ مخروط در ابتدا به دلیل متراکم بودن نمونه، مقداری منفی بوده و با گذشت فشار آب منفذی به تدریج افزایش یافته و پس از گذشت مدت زمان حدود ۱۰ ثانیه، نمونه به تعادل هیدرواستاتیکی نزدیک شده است. دلیل اصلی ایجاد فشار آب منفذی منفی تمایل به افزایش حجم خاک در تراکم‌های بالا بوده که باعث شده تا فشار

1 Octahedral normal stress



شکل ۱۱. روند تغییرات اضافه فشار آب منفذی با گذشت زمان در آزمایش استهلاک (الف- در زمان صفر؛ ب- در ثانیه اول؛ ج- در ثانیه سوم؛ د- در ثانیه دهم)

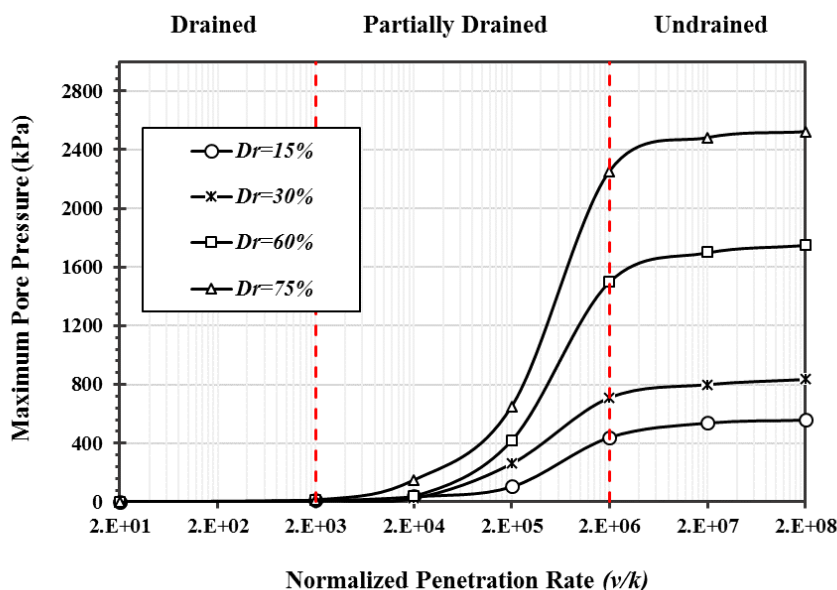
Fig. 11. The trend of excess pore water changes over time in the dissipation test (a- at zero time; b- at the first second; c- at the third second; d- at the tenth second)

منفذی به ترتیب ۴۹٪، ۱۰۹٪ و ۴۴٪ افزایش می‌یابد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس و با استفاده از مدل رفتاری هایپوپلاستیک مدل‌سازی آزمایش نفوذ پی‌زوکن انجام شده است. در ابتدا درستی مدل رفتاری با استفاده از آزمایش‌های سه محوری مورد بررسی قرار گرفت. پس از اطمینان از درستی مدل رفتاری به کار گرفته شده، نتایج آزمایش نفوذ مخروط با استفاده از نتایج آزمایش محفظه کالیبراسیون مورد مقایسه قرار گرفت. در

ثابت و برابر مقدار استاندارد ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و همچنین مقدار نرخ‌های نفوذ بدون بعد  $10^{-2}$  و  $10^{-6}$  به ترتیب معادل نفوذپذیری‌های  $10^{-5}$  و  $10^{-8}$  متر بر ثانیه برای خاک می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد تشخیص ناحیه زهکشی جزئی در برآورد فشار آب و تخمین ویژگی‌های خاک دارای اهمیت است. موضوع دیگری که با توجه به نتایج به دست آمده قابل بحث است، افزایش مقدار فشار آب منفذی با افزایش درصد تراکم خاک در شرایط زهکشی نشده است. به طوری که با افزایش درصد تراکم خاک از ۱۵٪ به ۳۰٪، از ۳۰٪ به ۶۰٪ و از ۶۰٪ به ۷۵٪ مقدار حداکثر فشار آب



شکل ۱۲. بررسی تغییرات حداکثر فشار آب منفذی با نرخ نفوذ بدون بعد برای درصد تراکم‌های مختلف ماسه فیروزکوه

Fig. 12. Changes in maximum pore water pressure with normalized penetration rate for different densities of Firoozkooch sand

منفی در اطراف مخروط به دلیل رفتار انبساطی خاک با درصد تراکم بالا مشاهده شد.

- تغییر رفتار تدریجی مشخصاتی مانند اضافه فشار آب منفذی و نسبت تخلخل با عبور از حالت زهکشی نشده به حالت زهکشی شده در اطراف مخروط مشاهده شد. به همین منظور با بررسی بیشتر و انجام مدل‌سازی برای نرخ‌های مختلف محدوده زهکشی جزئی برای خاک ماسه‌ای فیروزکوه تعیین شد.

- تعیین محدوده شرایط مختلف زهکشی برای خاک ماسه‌ای فیروزکوه به طوری که خاک در محدوده نرخ‌های نفوذ بدون بعد  $(v/k)$  کمتر از  $10^2 \times 2$  رفتار زهکشی شده داشته و در محدوده نرخ‌های بیشتر از  $10^6 \times 2$  رفتار خاک به صورت زهکشی نشده در نظر گرفته می‌شود.

- افزایش مقدار فشار آب منفذی ایجاد شده با افزایش درصد تراکم خاک، به طوری که برای مثال با افزایش درصد تراکم خاک از ۶۰٪ به ۷۵٪، مقدار حداکثر فشار آب منفذی حدود ۴۴٪ افزایش می‌یابد.

ادامه، آزمایش‌های نفوذ پی‌زکن با ساخت مدل‌هایی با درصد تراکم و نفوذپذیری‌های متفاوت انجام شد. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تغییرات اضافه فشار آب منفذی و خاک اطراف، در شرایط زهکشی و درصد تراکم‌های مختلف بود. با بررسی‌های انجام شده، می‌توان به طور خلاصه به نتایج ذیل اشاره داشت:

- تغییرات نسبت تخلخل خاک اطراف مخروط در جهت شعاعی بررسی شد و مشاهده شده با کاهش نفوذپذیری خاک محدوده شعاعی تغییرات نسبت تخلخل کاهش می‌یابد. برای مثال مشاهده شد برای خاک با نفوذپذیری  $10^{-3}$  متر بر ثانیه این محدوده ۴ تا ۵ برابر قطر مخروط است، اما در نفوذپذیری  $10^{-8}$  متر بر ثانیه، محدوده‌ی تغییر نسبت تخلخل به ۱ تا ۲ برابر قطر مخروط می‌رسد.
- بیشتر بودن مقدار نسبت تخلخل خاک اطراف مخروط نسبت به تخلخل اولیه خود در خاک‌های با درصد تراکم بالا. این مقدار برای خاک‌های با نفوذپذیری بالا تا حدود ۱۶٪ می‌باشد.
- با بررسی تغییرات فشار آب منفذی ایجاد شده در نفوذپذیری‌های مختلف در آزمایش استهلاک، منحنی‌های غیراستاندارد استهلاک فشار آب منفذی و اضافه فشار آب منفذی



## ۸- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$e_{c0}$	نسبت تخلخل بحرانی در فشار صفر
$e_{d0}$	نسبت تخلخل حداقل در فشار صفر
$e_{i0}$	نسبت تخلخل حداکثر در فشار صفر
$f_s$	مقاومت اصطکاکی جداره مخروط، kPa
$h_s$	سختی دانه‌ای، GPa
$k$	نفوذپذیری خاک، m/s
$n$	پارامتر توانی مدل رفتاری هایپوپلاستیک
$q_c$	مقاومت نوک مخروط، kPa
$q_t$	مقاومت نوک تصحیح شده مخروط، kPa
$u_0$	فشار آب منفذی هیدرواستاتیک، kPa
$u_2$	فشار آب منفذی، kPa
$u_{oct}$	فشار آب منفذی اکتاهدرال، kPa
$u_{shear}$	فشار آب منفذی برشی، kPa
$v$	نرخ نفوذ استاندارد مخروط، mm/s

### علائم یونانی

$\alpha$	پارامتر توانی مدل رفتاری هایپوپلاستیک
$\beta$	پارامتر توانی مدل رفتاری هایپوپلاستیک
$\varphi_c$	زاویه اصطکاک حالت بحرانی

## منابع

- 152.
- [4] K. Kim, M. Prezzi, R. Salgado, W. Lee, Effect of penetration rate on cone penetration resistance in saturated clayey soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(8) (2008) 1142-1153.
- [5] E. Susila, R.D. Hryciw, Large displacement FEM modelling of the cone penetration test (CPT) in normally consolidated sand, *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, 27(7) (2003) 585-602.
- [6] W. Huang, D. Sheng, S. Sloan, H. Yu, Finite element analysis of cone penetration in cohesionless soil, *Computers and Geotechnics*, 31(7) (2004) 517-528.
- [7] G.P. Kouretzis, D. Sheng, D. Wang, Numerical simulation of cone penetration testing using a new critical state constitutive model for sand, *Computers and Geotechnics*, 56 (2014) 50-60.
- [8] M. Abu-Farsakh, M. Tumay, G. Voyiadjis, Numerical parametric study of piezocone penetration test in clays, *International Journal of Geomechanics*, 3(2) (2003) 170-181.
- [9] L. Beuth, P. Vermeer, Large deformation analysis of cone penetration testing in undrained clay, *Installation effects in geotechnical engineering*, (2013).
- [10] M.F. Silva, D.J. White, M.D. Bolton, An analytical study of the effect of penetration rate on piezocone tests in clay, *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, 30(6) (2006) 501-527.
- [11] J. Yi, S. Goh, F. Lee, M. Randolph, A numerical study of cone penetration in fine-grained soils allowing for consolidation effects, *Géotechnique*, 62(8) (2012) 707-719.
- [12] Mo, P. Q., Gao, X. W., Yang, W., & Yu, H. S., A cavity expansion-based solution for interpretation of CPTu data in soils under partially drained conditions, *International Journal for Numerical and Analytical*
- [1] Golestani Dariani AA, Ahmadi MM. Generation and Dissipation of Excess Pore Water Pressure During CPTu in Clayey Soils: A Numerical Approach. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2021 Jun;39(5):3639-53.
- [2] Ceccato, Francesca, Lars Beuth, and Paolo Simonini, Analysis of piezocone penetration under different Drainage conditions with the two-phase material point method, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 142.12 (2016): 04016066.
- [3] M. Randolph, S. Hope, Effect of cone velocity on cone resistance and excess pore pressures, in: *Effect of cone velocity on cone resistance and excess pore pressures*, Yodogawa Kogisha Co. Ltd, 2004, pp. 147-

- Applied mechanics, 61(3) (1991) 143-151.
- [24] E. Bauer, Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials, *Soils and Foundations*, 36(1) (1996) 13-26.
- [25] P.A. Von Wolffersdorff, 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*, 1(3) (1996) 251-271.
- [26] D. Mašin, Modelling of soil behaviour with hypoplasticity, *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, Ó Springer Nature Switzerland AG, <https://doi.org/10.1007/978-93-9045-100-7>.
- [27] Sheng D, Kelly R, Pineda J, Bates L. Numerical study of rate effects in cone penetration test. In 3rd international symposium on cone penetration testing, (2014) 419-428.
- [28] T. Hamann, G. Qiu, J. Grabe, Application of a Coupled Eulerian–Lagrangian approach on pile installation problems under partially drained conditions, *Computers and Geotechnics*, 63 (2015) 279-290.
- [29] B. Mohammadi-Haji, A. Ardakani, Calibration of a hypoplastic constitutive model with elastic strain range for Firoozkuh sand, *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 38 (2020) 5279-5293.
- [30] I. Herle, G. Gudehus, Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies, *Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures*, 4(5) (1999) 461-486.
- [31] T. Lunne, J.J. Powell, P.K. Robertson, *Cone penetration testing in geotechnical practice*, CRC Press, 2002.
- [32] R. Cudmani, V. Osinov, The cavity expansion problem for the interpretation of cone penetration and pressuremeter tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 38(3) Methods in Geomechanics, 44(7) (2020) 1053-1076.
- [13] C. Teh, G. Houlsby, An analytical study of the cone penetration test in clay, *Géotechnique*, 41(1) (1991) 17-34.
- [14] R. Salgado, J. Mitchell, M. Jamiolkowski, Cavity expansion and penetration resistance in sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(4) (1997) 344-354.
- [15] A.G. Amuda, A. Hasan, F. Sahdi, S.N.L. Taib, Variable penetration rate testing for shear strength of peat—a review, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14(6) (2020) 673-685.
- [16] H. Yu, L. Herrmann, R. Boulanger, Analysis of steady cone penetration in clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(7) (2000) 594-605.
- [17] D. Liyanapathirana, Arbitrary Lagrangian Eulerian based finite element analysis of cone penetration in soft clay, *Computers and Geotechnics*, 36(5) (2009) 851-860.
- [18] J. Walker, H.-S. Yu, Analysis of the cone penetration test in layered clay, *Géotechnique*, 60(12) (2010) 939-948.
- [19] A. Tolooiyan, K. Gavin, Modelling the cone penetration test in sand using cavity expansion and arbitrary Lagrangian Eulerian finite element methods, *Computers and Geotechnics*, 38(4) (2011) 482-490.
- [20] M.M. Ahmadi, P. Byrne, R. Campanella, Cone tip resistance in sand: modeling, verification, and applications, *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4) (2005) 977-993.
- [21] M. Khodayari, M.M. Ahmadi, Excess Pore Water Pressure along the Friction Sleeve of a Piezocone Penetrating in Clay: Numerical Study, *International Journal of Geomechanics*, 20(7) (2020) 04020100.
- [22] Hauser L, Schweiger HF. Numerical study on undrained cone penetration in structured soil using G-PFEM. *Computers and Geotechnics*. 2021 May 1;133:104061.
- [23] D. Kolymbas, An outline of hypoplasticity, *Archive of*

Geoenvironmental Engineering, 140(6) (2014) 0401-4022.

[35] Bihs A, Long M, Nordal S, Paniagua P, Consolidation parameters in silts from varied rate CPTU tests, AIMS Geosciences, 7(4) (2021) 637-68.

(2001) 622-638.

[33] R. Salgado, Analysis of penetration resistance in sands, University of California, Berkeley, 1993.

[34] H. Mahmoodzadeh, M.F. Randolph, Penetrometer testing: effect of partial consolidation on subsequent dissipation response, Journal of Geotechnical and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. J. Mashinchian, M. M. Ahmadi, A numerical study of piezocone test in Firoozkooh sandy soil under different drained conditions, Amirkabir J. Civil Eng., 54(10) (2023) 3637-3656.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21082.7611



