

# تعیین پارامترهای مدل رفتاری Cam - Clay در مدل سازی رفتار خاک ماسه‌یی در آزمایش سه‌محوری

زهرة خلیلی (کارشناس ارشد)

سیدشهاب‌الدین یثربی (دانشیار)

محمد علیایی\* (استادیار)

دانشکده‌ی هندیسی عمان و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۳)  
دوری ۲-۳، شماره ۲، ص. ۹۷-۱۰۶، (یادداشت نثی)

مدل سازی عددی رفتار خاک‌ها روشی برای کاهش هزینه‌های آزمون‌های آزمایشگاهی مطرح است. با توجه به کاربرد زیاد پارامترهای مقاومتی حاصل از آزمایش سه‌محوری، نیاز به مدل سازی عددی این آزمایش و پیش‌بینی پارامترهای مذکور احساس می‌شود. در این نوشتار، به پیش‌بینی رفتار خاک‌های ماسه‌یی مخلوط با خاک ریزدانه تحت آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته - زهکشی نشده پرداخته شده است. خاک مورد مطالعه ترکیبی از ماسه‌ی فیروزکوه با درصدهای مختلف رس است. منحنی تنش - کرنش خاک در این آزمایش‌ها با استفاده از یک مدل اجزاء محدود شبیه‌سازی شده است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، قسمت خطی نمودار تنش - کرنش مدل شده و پارامترهای مورد نیاز از روش معکوس به دست آمده است. براساس نتایج شبیه‌سازی، پارامترهای مقاومتی محاسبه شده و نمودارهای تنش انحرافی - کرنش محوری، فشار آب حفره‌یی - کرنش محوری و مسیر تنش پیش‌بینی شده است. نتایج حاصل از مدل سازی‌های انجام شده با این پارامترها نزدیک به نتایج آزمایشگاهی هستند.

zohreh\_khalili2002@yahoo.com  
yasrobis@modares.ac.ir  
m.Olyaei@modares.ac.ir

واژگان کلیدی: آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته - زهکشی نشده، مدل سازی عددی، خاک ماسه‌یی مخلوط با ریزدانه.

## ۱. مقدمه

دانستن رفتار تنش - کرنش خاک‌ها زیربنای دیگر مطالعات ژئوتکنیکی است. آزمایش سه‌محوری از آزمایش‌های رایج برای برآورد خواص مهم مکانیکی خاک‌ها مانند: پارامترهای مقاومتی، رابطه‌ی تنش - کرنش و خواص ناشی از بارگذاری‌های مختلف است.

با توجه به هزینه‌ی نسبتاً بالای انجام آزمایش سه‌محوری، پیش‌بینی رفتار تنش - کرنش خاک‌ها در این آزمایش همواره مدنظر پژوهشگران بوده است و مدل‌های ریاضی مختلفی در چند دهه‌ی اخیر برای مدل کردن رفتار خاک ابداع شده است. دلایل عمده‌ی بهره‌گیری از آزمایش سه‌محوری عبارت‌اند از:

الف) سادگی نسبی کنترل زهکشی و اندازه‌گیری فشار آب حفره‌یی در بالا و پایین نمونه؛

ب) توانایی اعمال تنش‌های اصلی در جهت‌های شناخته‌شده؛

ج) سهولت اندازه‌گیری کرنش‌های محوری و حجمی.

در آزمایش سه‌محوری ۳ روش استاندارد برای انجام آزمایش وجود دارد:

۱. آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته - زهکشی شده<sup>۱</sup>؛

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۰۶/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۰/۱۱/۱۵، پذیرش ۱۳۹۱/۰۶/۱۴.

با توجه به مسائل مطرح شده و همچنین هزینه‌ی نسبتاً زیاد انجام آزمایش‌های سه‌محوری، در این پژوهش تلاش شده است تا روشی مناسب جهت مدل سازی رفتار خاک ماسه‌یی به همراه مقادیر مختلف ریزدانه ارائه شود، تا بتوان در شرایط مشابه به پیش‌بینی رفتار خاک در آزمایش سه‌محوری پرداخت.

علت انتخاب این ترکیب از خاک، وجود مقداری خاک ریزدانه در بیشتر خاک‌های ماسه‌یی موجود در طبیعت است. لذا مسئله‌ی تأثیر میزان ریزدانه در رفتار ماسه‌های تمیز یکی از موضوعاتی است که در سال‌های اخیر، مهندسان ژئوتکنیک به آن پرداخته‌اند. وجود ذرات ریزدانه در رفتار خاک‌های ماسه‌یی مؤثر است، به طوری که بسته به مقدار ریزدانه و خصوصیات خمیری آن، رفتار ماسه‌های حاوی ریزدانه می‌تواند بسیار متفاوت باشد. اگر مقدار ریزدانه در ماسه‌ها کم باشد (کمتر از ۵٪)، می‌توان از تأثیر آن صرف‌نظر کرد.<sup>[۱]</sup> همچنین حالت خمیری خاک ریزدانه نیز می‌تواند در رفتار و مقاومت خاک‌ها مؤثر باشد.

خاک مورد مطالعه در این تحقیق خاک ماسه‌یی فیروزکوه است، که در ترکیب با مقادیر مختلف خاک ریزدانه‌ی رسی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. خاک موجود

که در آن‌ها،  $K$  و  $K_p$  شیب اولیه و نهایی منحنی تنش - کرنش؛  $f_0$  تنش مرجع؛  $n$  پارامتر شکل منحنی.

با مقایسه‌ی نتایج ناشی از این مدل و نتایج آزمایشگاهی بر روی ماسه‌ی کوارتزی، نزدیکی بسیار خوبی بین مقادیر مدل و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. فقط در مقادیر بالای کرنش، مقدار تنش انحرافی پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر آزمایشگاهی است، که البته در برخی مسائل نیاز به کرنش بالا نداریم.

روابط محاسبه‌ی پارامترهای مدل براساس نتایج آزمایشگاهی و با استفاده از برازش مقادیر به صورت روابط ۳ الی ۸ به دست آمده است:

$$K = 54 \sigma_c - 2787.5 \quad (3)$$

$$K = 834228 \text{Dr}^2 - 867555 \text{Dr} + 347224 \quad (4)$$

$$K_p = -(87.5 \sigma_c - 215) \quad (5)$$

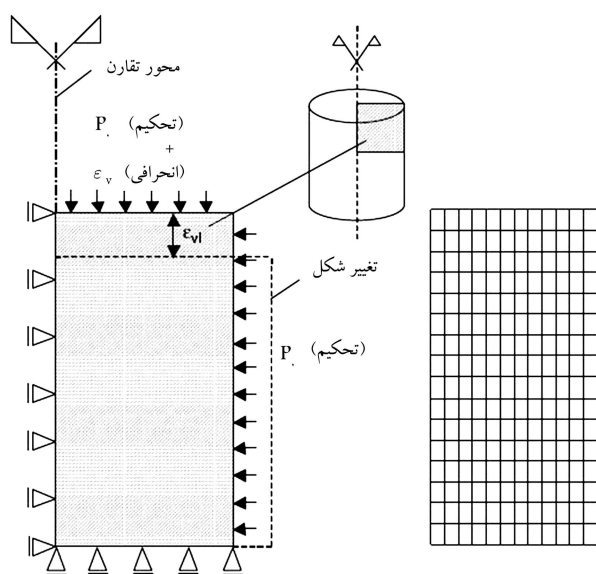
$$K_p = -32697.5 \text{Dr}^2 + 749784 \text{Dr} - 438706 \quad (6)$$

$$f_0 = 3785 \sigma_c - 287.5 \quad (7)$$

$$f_0 = 6447 \text{Dr} + 502 \quad (8)$$

در مدل‌سازی دیگری که در سال ۲۰۰۶ انجام شده است، از نرم‌افزار اجزاء محدود Abaqus برای شبیه‌سازی آزمایش سه‌محوری استفاده شده است.<sup>[۹]</sup> در شبیه‌سازی مذکور شرایط مرزی ایده‌آل در نظر گرفته شده است (برای مثال دو صفحه‌ی بالا و پایین بدون اصطکاک هستند). این فرض موجب ایجاد یک ناحیه‌ی تنش همگن در نمونه می‌شود. بنابراین تنش و کرنش در هر نقطه از خاک به دست می‌آید. نمونه‌ی استوانه‌یی به صورت یک برش متقارن محوری مدل می‌شود. خاک به صورت همسان‌گرد فشرده و سپس با یک جابجایی قائم یکنواخت گسیخته می‌شود. بارگذاری زهکشی‌نشده با اجازه‌ی تحکیم خاک در یک زمان بسیار کوتاه (۰/۰۰۰۰۱ ثانیه) شبیه‌سازی می‌شود.

در شکل ۱، هندسه و بارگذاری مدل مذکور نشان داده شده است. شبیه‌سازی‌ها بر روی ماسه‌ی Pueblo و رس Weald انجام شده و پارامترهای کم-کلی<sup>۴</sup> مورد نیاز در جدول ۱ آمده است. براساس نتایج به دست آمده، همخوانی خوبی بین دو حالت



شکل ۱. مدل‌سازی آزمایش سه‌محوری (هندسه و بارگذاری). [۹]

به صورت ماسه‌ی تمیز و ماسه در ترکیب با خاک رسی (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) است. لازم به ذکر است که خاک ریزدانه‌ی رسی در شرایط خمیری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نمونه‌ها در دو چگالی مختلف ۱/۴۵ و ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب مورد بررسی قرار گرفته‌اند، که در محدوده‌ی خاک‌های با چگالی کم تا متوسط محسوب می‌شوند. مدل‌سازی آزمایش سه‌محوری باید مطابق با روند انجام آزمایش سه‌محوری در آزمایشگاه باشد، لذا نیازمند آشنایی کامل با این آزمایش است.

در شبیه‌سازی مسائل ژئوتکنیکی به روش اجزاء محدود، کالیبراسیون مدل‌های رفتاری مورد استفاده دارای اهمیت بالایی است. مدل‌های رفتاری مختلفی برای بررسی رفتار خاک استخراج شده است، که استفاده‌ی درست از این مدل‌ها مستلزم استخراج و کالیبراسیون دقیق پارامترهای مربوط در مدل است. یکی از روش‌های مناسب برای کالیبره کردن مدل رفتاری مورد نظر، استفاده از روش‌های معکوس برای کاهش اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی است. در این روش، ابتدا یک سری پارامترهای اولیه فرض شده است و به روش عددی، رفتار خاک مدل‌سازی می‌شود. در ادامه، نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است و در صورت وجود اختلاف فراوان، مدل‌سازی با پارامترهای جدید انجام می‌شود. این روند تا نزدیکی نتایج آزمایشگاهی و عددی ادامه خواهد داشت.<sup>[۱]</sup>

در تحلیل اجزاء محدود مسائل ژئوتکنیکی، انتخاب مدل رفتاری مناسب در نتایج عددی تأثیر می‌گذارد. در سال‌های اخیر، مدل‌های رفتاری مختلفی ارائه شده است، که البته برخی از آنها پیچیده و یا شامل پارامترهایی هستند که از آزمایش‌های متداول آزمایشگاهی به دست نمی‌آیند. براساس نتایج پژوهشی در سال ۲۰۰۵، یک مدل رفتاری واحد که بتواند تمام فاکتورهای مطرح را با هم ترکیب کند، وجود ندارد. لذا برای طراحی هر مسئله‌ی خاص، باید از مدل رفتاری مناسب آن استفاده شود.<sup>[۲،۳]</sup> مدل‌سازی عددی آزمایش سه‌محوری موضوعی است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهشی در سال ۱۹۷۵، یک مدل سخت‌شونده‌ی همگن برای خاک غیرچسبیده ارائه شد. این مدل شامل سطح جریان و سطح گسیختگی بود.<sup>[۴]</sup> سپس مدل مذکور در سال ۱۹۷۷ اصلاح و کلاسیک انتهایی به آن افزوده شد. اندازه‌ی کلاسیک توسط کرنش‌های خمیری ناشی از فشرده‌گی همسان‌گرد کنترل می‌شود. از این مدل برای بررسی فشار آب حفره‌یی در آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده استفاده می‌شود.<sup>[۶]</sup>

در مطالعه‌ی در سال ۱۹۷۸، یک مدل سخت‌شونده‌ی دوسطحی شامل سطوح برشی و حجمی برای مدل کردن بارگذاری و باربرداری ماسه‌ها ارائه شده است.<sup>[۷]</sup> در سال ۲۰۰۶ نیز یک مدل ریاضی هیبریدیک برای پیش‌بینی منحنی کامل تنش - کرنش خاک ماسه‌یی در آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده ارائه شده است.<sup>[۸]</sup> در این مدل تمام پارامترهای مؤثر در رفتار خاک وارد شده است. به طوری که پارامترهای اصلی مدل شامل: فشار محصورکننده، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و تراکم نسبی است. همچنین پارامترهای دیگری به صورت تابعی از پارامترهای اصلی معرفی شده‌اند. مدل مذکور شامل یک معادله برای آزمایش سه‌محوری است، که تغییرات تنش قائم انحرافی ( $\sigma_d$ ) را نسبت به کرنش قائم ( $\epsilon_v$ ) نشان می‌دهد (روابط ۱ و ۲):

$$\sigma_d = f(K, K_p, f_0, n) * \epsilon_v \quad (1)$$

$$\sigma_d = \frac{(K - K_p) \epsilon_v}{\left[ 1 + \left[ \frac{(K - K_p) \epsilon_v}{f_0} \right]^n \right]^{\frac{1}{n}}} + K_p \epsilon_v \quad (2)$$

خاک مورد مطالعه در این پژوهش، خاک ماسه‌ی فیروزکوه مخلوط با خاک ریزدانه‌ی رسی است. همچنین نتایج آزمایش‌های سه‌محوری مورد استفاده در این پژوهش از مطالعه‌ی در سال ۱۳۸۵، [۱۰] برگرفته شده است.

## ۱.۲. معرفی خاک ماسه‌ی فیروزکوه

در این بررسی نوعی از ماسه‌ی سیلیسی شکسته‌ی فیروزکوه (ماسه‌ی شماره‌ی ۱۶۱) به‌عنوان ماسه‌ی استاندارد جهت آزمایش‌های انجام‌شده معرفی و خصوصیات فیزیکی آن ارائه شده است. این نوع ماسه دارای رنگ زرد متمایل به طلایی و دارای دانه‌بندی یکنواختی است که در ادامه، به اختصار ماسه‌ی فیروزکوه نامیده شده است (مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ ارائه شده است).

## ۲.۲. معرفی خاک ریزدانه‌ی مورد استفاده

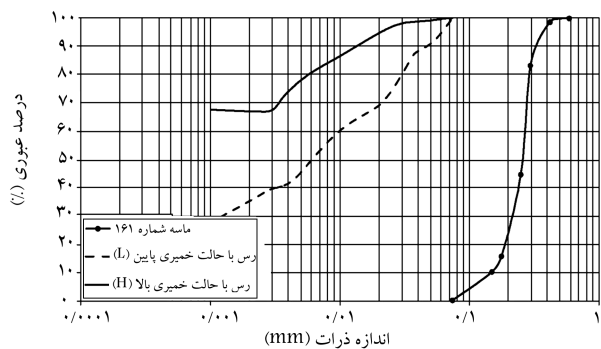
برای مصالح رسی موردنیاز در ترکیب با خاک ماسه‌ی، از دو نوع خاک رسی با حالت خمیری کم و زیاد استفاده شده است. برای مصالح رسی با حالت خمیری کم از نوعی رس در محدوده‌ی سد درونگر خراسان شمالی با رنگ تقریباً روشن و برای مصالح رسی با حالت خمیری بالا از رس دشت قزوین استفاده شده است. مشخصات این دو نوع رس در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. منحنی دانه‌بندی خاک‌های معرفی‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی رس با حالت خمیری پایین.

نوع رس	$G_s$	LL (%)	PL (%)	PI (%)
درونگر مشهد	۲٫۶۴	۲۸	۱۷	۱۱

جدول ۴. مشخصات فیزیکی رس با حالت خمیری بالا.

نوع رس	$G_s$	LL (%)	PL (%)	PI (%)
قزوین	۲٫۶۴	۵۵	۲۵	۳۰



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی ماسه‌ی سیلیسی فیروزکوه.

نوع ماسه	$G_s$	$e_{min}$	$e_{max}$	$D_{50}$ (mm)	$F$ (%)	$C_u$	$C_c$	$K$ (cm/sec)
۱۶۱ فیروزکوه	۲٫۶۴	۰٫۵۸۳	۰٫۹۲۸	۰٫۲۶	۰	۱٫۸	۱٫۱۹	۰٫۱۲۵

جدول ۱. پارامترهای مدل رفتاری کم - کلی برای دو نوع خاک مورد مطالعه در شبیه‌سازی موجود. [۹]

$p'_0$ (kPa)	$e_0 @ p'_0$	$G$ (kPa)	$\kappa$	$M$	$\lambda$	
۲۰۷	۰٫۶۲۸	۳۰۰۰	۰٫۰۳۱	۰٫۸۸۲	۰٫۰۸۸	Weald Clay
۶۹	۰٫۳۴۰	۲۰۰۰	۰٫۰۰۲۴	۱٫۲۴۰	۰٫۰۱۴	Pueblo Sand

مدل‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد. در ادامه‌ی این مدل‌سازی‌ها، به بررسی تأثیر بیش‌تحکیمی خاک پرداخته شده است.

در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در خاک‌های بیش‌تحکیم یافته با نسبت بیش‌تحکیمی زیاد، رفتار نرم‌شونده‌ی خاک مدل شده است. نتایج به‌دست‌آمده شبیه مشخصات اصلی خاک است؛ هرچند که براساس نتایج به‌دست‌آمده، این مدل دارای محدودیت‌هایی است. برای مثال:

-- تنش‌های گسیختگی برای نمونه‌های اتساعی دست بالا است.

-- قانون جریان همراه، اتساع خاک‌های دانه‌ی را دست بالا می‌کند.

-- مدل، رفتار غیرهمسان و اثرات لزوج بر خاک را در نظر نمی‌گیرد.

تلاش‌های زیادی برای در نظر گرفتن پارامترهایی که در مدل کم - کلی موجود نیست، انجام شده است تا رفتار خاک بهتر پیش‌بینی شود. البته این امر موجب پیچیده‌تر شدن مدل می‌شود. اصلاحات بیشتر روی این مدل و پیشرفته‌تر کردن آن، دقت را بالا می‌برد؛ هر چند که افزایش تعداد پارامترها، مانع از واحد شدن جواب می‌شود.

## ۲. مصالح مورد مطالعه

مصالح دانه‌ی غیرجسبیده مانند مصالح آبرفتی ماسه‌ی، بخش عمده‌ی رسوبات طبیعی را تشکیل می‌دهند. به همین دلیل بررسی کمی و تجربی رفتار ماسه‌ها در درک رفتار خاک‌های ماسه‌ی اهمیت فراوانی دارد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران مختلفی رفتار ماسه‌های تمیز اشباع را مورد مطالعه قرار داده‌اند. به علت حجم وسیع مطالعات انجام‌شده در این زمینه و همچنین طبیعت خاک‌های ماسه‌ی تمیز که دارای ساختار یکنواخت هستند، مطالعات انجام‌شده منجر به شناخت نسبتاً کامل رفتار ماسه‌های تمیز شده است و پژوهشگران مختلف تقریباً به یک جمع‌بندی کلی در مورد رفتار این خاک‌ها دست یافته‌اند.

از آنجا که بیشتر خاک‌های ماسه‌ی موجود در طبیعت دارای مقداری ریزدانه هستند، مسئله‌ی تأثیر میزان ریزدانه در رفتار ماسه‌های تمیز یکی از موضوعاتی است که در سال‌های اخیر توسط مهندسان ژئوتکنیک مورد بررسی قرار گرفته است. لذا در این پژوهش به مدل‌سازی رفتار خاک ماسه‌ی همراه با مقادیر مختلف ریزدانه تحت آزمایش سه‌محوری پرداخته شده است.

### ۳. روند انجام مدل سازی

رفتار تنش - کرنش خاک ها به عنوان یکی از مرسوم ترین مصالح در مهندسی عمران همیشه مدنظر دانشمندان بوده است و مدل های ریاضی مختلفی در چند دهه ای اخیر برای مدل کردن رفتار خاک ابداع شده است. در تمامی این مدل ها، این روند به چشم می خورد:

- استفاده از فرضیات ساده شده که اساس را تشکیل می دهد،
- مشخص کردن رفتار خاک در هر مسئله ای مورد بررسی،
- ایجاد عبارات ریاضی که شرایط بالا را مد نظر قرار دهد،
- تشخیص پارامترهای مؤثر در مسئله ای مورد نظر.

مدل در نظر گرفته شده باید براساس اصول مکانیکی بنا شود و توسط مهندسان قابل فهم باشد. با توجه به کاربرد بودن آزمایش سه محوری و استفاده از نتایج آن در مسائل ژئوتکنیکی، مدل سازی و پیش بینی رفتار خاک در این آزمایش امری ضروری به نظر می رسد. لذا در این پژوهش به مدل سازی رفتار خاک ماسه ای مخلوط با مقادیر مختلف خاک ریزدانه پرداخته شده است. نتایج آزمایش سه محوری تحکیم یافته - زهکشی نشده (CU) بر روی این نوع خاک در پژوهشی در سال ۱۳۸۵<sup>[۱۰]</sup> موجود است. براساس این مرجع آزمایش های سه محوری با دو فشار همه جانبه ۱۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال بر روی نمونه های خاک تهیه شده انجام شده است. ابعاد نمونه ای سه محوری در این آزمایش ها ۵×۱۰ سانتی متر و خاک ماسه ای مورد آزمایش به صورت تمیز و یا مخلوط با مقادیر مختلف رس (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) است.

با توجه به نتایج موجود، مدل سازی آزمایش سه محوری با نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS به صورت آنالیز معکوس انجام شده است. بدین ترتیب که در مرحله ای اول پارامترهای مورد نیاز در مدل سازی براساس نتایج آزمایش های موجود تخمین زده شده است. در مراحل بعدی با انجام آنالیزهای مختلف و تغییر پارامترها، در نهایت پارامترهای مناسب هر خاک استخراج شده است.

نتایج خروجی این مدل سازی های شامل نمودارهای تنش - کرنش  $(q - \varepsilon)$ ، فشار آب حفره ای - کرنش  $(u - \varepsilon)$  و مسیر تنش  $(q - p')$  است. نتایج به دست آمده از مدل سازی ها هم خوانی خوبی با نتایج به دست آمده از آزمایش های آزمایشگاهی دارد.

براساس پارامترهای به دست آمده و با توجه به روند تغییر آنها با تغییر درصد رس و حالت خمیری آن، می توان رفتار خاک را در شرایط مشابه در ترکیب با مقادیر مختلف خاک ریزدانه و همچنین تحت فشارهای همه جانبه ای متفاوت در آزمایش سه محوری تحکیم یافته - زهکشی شده پیش بینی کرد.

#### ۱.۳. معرفی نرم افزار Abaqus<sup>[۱۱]</sup>

نرم افزار Abaqus با قابلیت های منحصر به فرد خود، به منزله ای یک نرم افزار بسیار دقیق تحقیقاتی و کاربردی در دانشگاه و صنعت شناخته شده است. از مزایای این نرم افزار قابلیت مدل سازی گام به گام است، که موجب تسریع در ایجاد تغییرات در مدل می شود. از توانایی های دیگر این نرم افزار داشتن مدل های رفتاری مختلف است. تئوری کامل این نرم افزار مبتنی بر تحلیل غیرخطی المان محدود پیشرفته است. از مزایای این نرم افزار این است که کاربر می تواند تمام زیر برنامه های مرتبط با موضوع کار خود را در این نرم افزار تغییر دهد و در حقیقت نرم افزار جدید خود را به وجود آورد.

از مزایای دیگر آن می توان به داشتن روش های حل صریح<sup>۵</sup> و ضمنی<sup>۶</sup>، داشتن مدل های رفتاری پیشرفته برای مواد مختلف، امکان ایجاد سریع مدل های با هندسه ی پیچیده و غیره اشاره کرد.

نرم افزار اجزاء محدود Abaqus مبتنی بر ۳ مرحله است: پیش پردازش، پردازش، و پس پردازش. در این پژوهش از نرم افزار Abaqus ۶/۸ استفاده شده است. مدل های رفتار خمیری موجود در این نرم افزار برای خاک عبارتند از:

- Extended Drucker-Prager Model
- Modified Drucker-Prager/Cap Model
- Mohr-Coulomb Plasticity
- Critical State Plasticity Model

با توجه به اینکه در مدل سازی های انجام شده در این پژوهش از مدل رفتار خمیری حالت بحرانی خاک استفاده شده است، در ادامه به اختصار به معرفی این مدل موجود در نرم افزار می پردازیم.

#### ۱.۱.۳. مدل رفتار خمیری حالت بحرانی

این مدل رفتار غیرکشسان خاک های غیرچسبیده را ارائه می کند، که تطابق مناسبی با رفتار تجربی خاک های غیرچسبیده دارد. رفتار غیرخطی خاک به وسیله ای تابع تسلیمی، که با ۳ نامتغیر تنش توصیف می شود، مدل می شود. ویژگی های این مدل به این شرح است:

۱. این مدل بسط یافته ای مدلی است که توسط روسکو و همکاران در دانشگاه کمبریج ایجاد شده است.
۲. رفتار غیرکشسان مصالح با تابع تسلیمی که به سه نامتغیر تنش بستگی دارد بیان می شود. در این مدل فرض جریان همراه برای بیان نرخ کرنش خمیری و همچنین فرض سخت شونده گی کرنش اعمال شده است. سطح تسلیم ارائه شده در این مدل به شرح رابطه ای ۹ است:

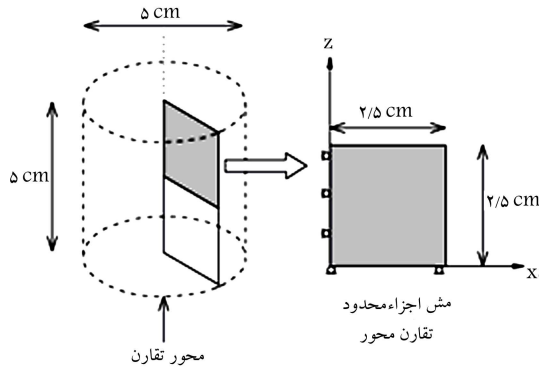
$$f(p, q, r) = \frac{1}{\beta^2} \left( \frac{p}{a} - 1 \right)^2 + \left( \frac{t}{Ma} \right)^2 - 1 = 0 \quad (9)$$

۳. در این مدل قسمت کشسان تغییر شکل ها با مدل رفتاری کشسان خطی بیان می شود.

۴. این امکان وجود دارد که قانون سخت شونده گی به صورت خطی یا توانی بیان شود. قانون سخت شونده گی این مدل رفتاری در حالت کلی به صورت  $a(f^\alpha)$  تعریف می شود. در این مدل سازی فرض شده است که قانون سخت شونده گی فقط به کرنش حجمی خمیری وابسته است. تابع  $a$  به صورت کلی رابطه ای ۱۰ تعریف می شود:

$$a = a_0 \exp \left[ \left( 1 + e_0 \right) \frac{1 - J^{pl}}{\lambda - \kappa J^{pl}} \right] \quad (10)$$

که در آن،  $P$  تنش فشاری معادل  $P = -1/3 \text{ Trace } \sigma$ ،  $\sigma$  ماتریس تنش؛  $t$  متغیر تنش انحرافی  $\left[ t = \frac{1}{\sqrt{3}} q \left[ 1 + \frac{1}{K} - \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \left( \frac{r}{q} \right)^2 \right] \right]$ ؛  $S$  تنش انحرافی؛  $q$  تنش معادل میسر  $q = \sqrt{\frac{2}{3}} S : S$ ؛  $r$  نامتغیر سوم تنش  $(r^3 = \frac{2}{3} S : S, S, S)$ ؛  $M$  ثابت شیب خط حالت بحرانی؛  $J$  پارامتر کرنش؛  $\lambda$  شیب خط خمیری در فضای  $e - \ln p$ ؛  $\kappa$  شیب خط کشسان در



شکل ۵. نمونه‌ی المان محدود متقارن. [۱۲]

تقارن نیز است، دارای جابجایی  $0^\circ$  در جهت افقی است ( $u_x = 0$ ). در قسمت فوقانی نمونه، جابجایی قائم به اندازه‌ی  $0.5$  سانتی‌متر با سرعت کم اعمال شده است. مشابه آزمایش واقعی تحکیم‌شده - زهکشی‌نشده (CU) آنالیز اجزاء محدود نیز در ۲ مرحله انجام می‌شود. فاز اول آنالیز تحکیمی و فاز دوم آنالیز برش است. در فاز اول، زهکشی در امتداد بالای نمونه آزاد است و تنش دورگیر در قسمت بالا و سمت راست مدل اعمال می‌شود. در این فاز گزینه‌ی ژئواستاتیک<sup>۷</sup> فعال می‌شود تا از برقراری تعادل در نمونه خاک، اطمینان حاصل شود. گزینه‌ی ژئواستاتیک این اطمینان را به ما می‌دهد که شرایط اولیه‌ی تنش در نمونه‌ی خاک درون سطح اولیه‌ی تسلیم مدل کم - کلی قرار می‌گیرد. در فاز دوم که مرحله‌ی برش است، قسمت فوقانی نمونه‌ی خاک مجبور به جابجایی با سرعت مشابه واقعیت می‌شود ( $0.5 \text{ mm/min}$ ).

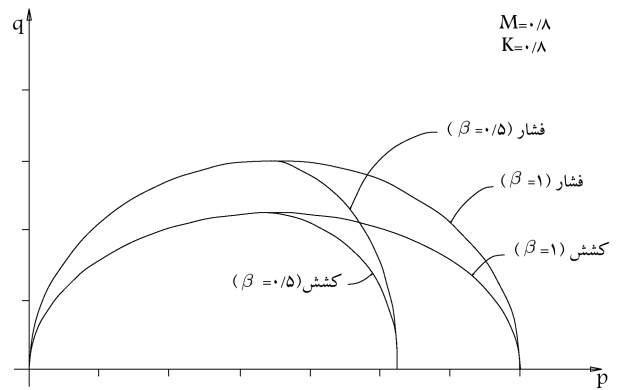
این سرعت بارگذاری شرایط مشابه آزمایش واقعی CU ایجاد می‌کند. در گام برش قسمت فوقانی نمونه به صورت زهکشی‌نشده عمل می‌کند و فشار آب در نمونه افزایش می‌یابد.

در نرم‌افزار Abaqus این امکان وجود دارد که بار را طی نمونه‌های<sup>۸</sup> از پیش تعیین‌شده با مقادیر مساوی یا به صورت اتوماتیک با مقدار اولیه‌ی مشخص اعمال کنیم. در حالت دوم (اتوماتیک) نرم‌افزار نموها را با مقدار اولیه‌ی مساوی شروع می‌کند و در صورتی که امکان افزایش نموها وجود داشته باشد، آن را افزایش می‌دهد. این کار ممکن است منجر به تغییر ناگهانی فشار آب طی نمونه‌های بزرگ شود و نتایج آزمایش دارای خطا باشد. برای جلوگیری از ایجاد این خطا، گزینه‌ی در نرم‌افزار وجود دارد که پیشینه‌ی تغییر فشار آب منفذی را محدود می‌کند. در این مدل‌سازی پیشینه‌ی تغییر فشار آب منفذی به  $0.7$  کیلوپاسکال محدود می‌شود. این فرآیند در بارگذاری‌هایی با زمان طولانی بسیار مناسب است.

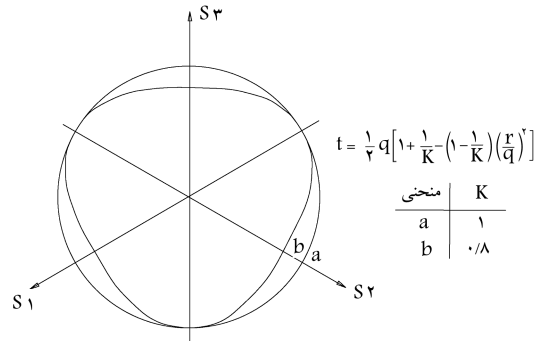
در شروع آزمایش، نرخ تغییر فشار منفذی بسیار بالاست، بنابراین از نمو زمانی کوچک استفاده می‌کنیم. در ادامه، زمانی که نرخ تغییر فشار آب منفذی کاهش می‌یابد، در صورت استفاده از حالت اتوماتیک، می‌توانیم از نمونه‌های زمانی بزرگ‌تر استفاده کنیم. پارامترهای استفاده‌شده در این مدل‌سازی از نتایج تجربی به دست آمده‌اند (جدول ۵).

در شکل‌های ۶ الی ۹، نتایج رفتار تنش - کرنش که از مدل‌سازی به دست آمده است، با نتایج آزمایش تجربی مقایسه شده است.

همچنین نتایج فشار آب منفذی در مقابل کرنش محوری در دو حالت مدل‌سازی و آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. تطابق دقیقی بین مدل‌سازی انجام‌شده



شکل ۳. سطح تسلیم کم - کلی در صفحه‌ی  $(p - q)$ .



شکل ۴. سطوح کم - کلی در صفحه‌ی تنش انحرافی.

فضای  $e-Lnp$ ;  $\beta$  ثابتی است که در سمت خشک خط حالت بحرانی برابر با ۱ است. این ثابت می‌تواند در قسمت تر خط حالت بحرانی متفاوت از مقدار ۱ باشد ( $\beta > 1$ ) سطح تسلیم با شکل بیضی بسته‌تر ایجاد می‌کند؛  $a$ ، اندازه‌ی سطح تسلیم اولیه و برابر با نصف تنش بیش‌تحکیمی اولیه است؛  $K$  نسبت تنش جریان در کشش سه‌محوری به تنش جریان در فشار سه‌محوری است و شکل سطح تسلیم را در صفحه‌ی  $\pi$  Plane تعیین می‌کند. برای اینکه سطح تسلیم به صورت محدب باقی بماند، پارامتر  $K$  در بازه‌ی  $1 < K < 0.778$  قرار می‌گیرد. در شکل‌های ۳ و ۴ مفهوم و نحوه‌ی محاسبه‌ی پارامترهای مختلف این مدل رفتاری ارائه شده است.

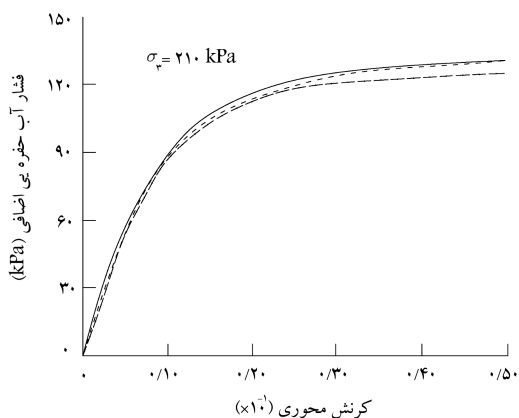
### ۲.۳. ارزیابی عملکرد صحیح با نرم‌افزار

به منظور صحت‌سنجی و اطمینان از درستی نتایج مدل‌سازی‌ها، مدل ارائه‌شده در کتاب مکانیک خاک کاربردی با استفاده از Abaqus،<sup>[۱۲]</sup> براساس روند ارائه‌شده تحلیل شده است. برای مدل‌سازی از یک مدل تقارن محوری دو بعدی استفاده شده است. براساس مطالب موجود در این مرجع، مش‌بندی تأثیری در نتایج ندارد و می‌توان کل نمونه را با یک المان نیز مدل‌سازی کرد. المان مورد استفاده در این مدل‌سازی، المان ۴ وجهی تقارن محور با ۸ گره و دارای خصوصیت مدل‌سازی فشار آب منفذی است. همچنین برای افزایش دقت در محاسبه‌ی کرنش، از تقریب درجه‌ی دوم جابجایی‌ها استفاده شده است.

با توجه به تقارن موجود و برای کاهش حجم محاسبات، یک چهارم نمونه مدل شده است. شرایط مرزی مطابق شکل ۵ است. بدین ترتیب که در قسمت پایین نمونه، جابجایی قائم ثابت شده است ( $u_x = 0$ ). قسمت چپ این مش‌بندی، که خط

جدول ۵. پارامترهای مدل کم-کلی در مدل مرجع.

عمومی		خمیری	
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۱۹۲۳	$\lambda$	۰/۱۷۴
$k$ (m/sec)	۰/۰۲۵	M, نسبت تنش S	۱
$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	۹/۸۱	اندازه سطح تسلیم اولیه	۱۰۵
$e$	۰/۸۸۹	اندازه سطح تسلیم مرطوب	۱
کشسانی			
$\kappa$	۰/۰۲۶	نرخ تنش جریان	۱
$v$	۰/۲۸		



شکل ۹. منحنی فشار آب حفره‌یی - کرنش حاصل از مدل‌سازی در مرجع.

در این پژوهش و مدل‌سازی مرجع با نتایج تجربی دیده می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی صحت مدل‌سازی آزمایش CU با نرم‌افزار است.

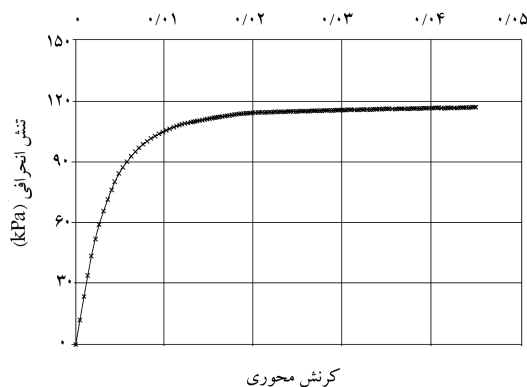
### ۳.۳. شرح مدل

مدل‌سازی آزمایش سه‌محوری در پژوهش موجود، مشابه مراحل انجام آزمایش در آزمایشگاه به این شرح است:

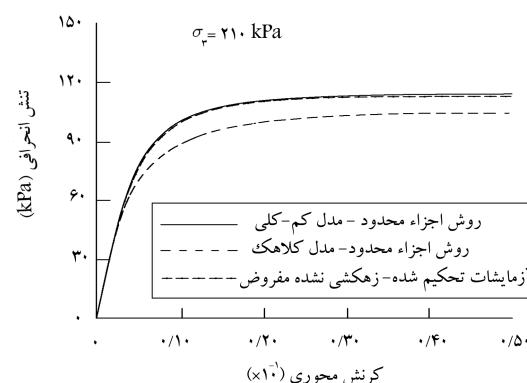
— هندسه و شرایط فیزیکی در آزمایش سه‌محوری متقارن است. از این رو مدل از نوع تقارن محوری در نظر گرفته شده است. بنابراین فقط یک چهارم از هندسه‌ی مسئله مدل‌سازی شده است. نمونه‌ی خاک به صورت استوانه‌یی است که در مدل‌سازی دوبعدی به صورت مستطیل مدل می‌شود. در مرحله‌ی اول مدل‌سازی، مطابق آنچه در آزمایش سه‌محوری رخ می‌دهد، فشار همه‌جانبه به صورت شعاعی و عمودی اعمال می‌شود. این فشار به نوعی معادل فشار همه‌جانبه‌ی وارد بر خاک در محل است. در مرحله‌ی بعدی فشار عمودی اعمال می‌شود، تا جایی که نمونه گسیخته شود. مدل‌سازی موجود از نوع کنترل کرنش است، که با افزایش گام‌های کرنش، در نهایت نمونه گسیخته می‌شود. سرعت اعمال کرنش مطابق آزمایش‌های انجام شده ۰/۵ mm/min است.

— انتخاب ابعاد مدل. با توجه به اینکه نتایج آزمایش‌های سه‌محوری موجود، از آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌یی به ارتفاع ۱۰° میلی‌متر و قطر ۵° میلی‌متر به دست آمده است، مدل‌سازی نیز با همین ابعاد انجام شده است. شکل ۱۰، نمایش‌گر هندسه‌ی اولیه‌ی مدل مش‌بندی‌شده و شرایط مرزی است.

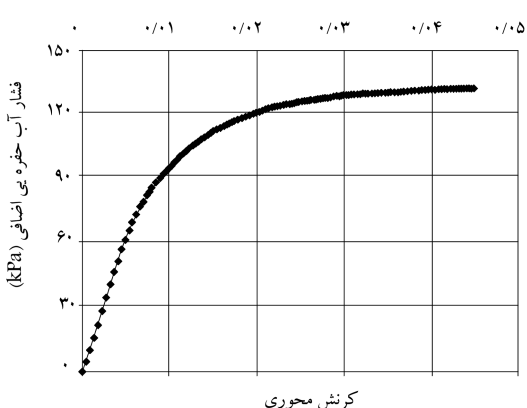
— مدل رفتاری استفاده‌شده در این مدل‌سازی، مدل خمیری حالت بحرانی است. پس از تهیه‌ی هندسه‌ی مدل، درگام دوم پارامترهای مدل رفتاری حالت بحرانی با توجه به مقادیر موجود در مراجع مختلف و همچنین با توجه به رفتار خاک مورد مطالعه تخمین زده می‌شود. سپس نمونه مش‌بندی و قیود موردنیاز اعمال می‌شود. در ضلع زیرین نمونه، جابجایی قائم ثابت می‌شود ( $u_y = 0$ ) و ضلع چپ نمونه که خط تقارن نیز است، دارای جابجایی در جهت افقی است ( $u_x = 0$ ). در قسمت فوقانی نمونه، جابجایی قائم به اندازه‌ی ۱ سانتی‌متر با سرعت ۰/۵ mm/min اعمال می‌شود. مشابه آزمایش واقعی تحکیم‌شده - زهکشی‌نشده (CU) آنالیز اجزاء محدود نیز در ۲ مرحله انجام می‌شود: فاز اول آنالیز تحکیمی و فاز دوم آنالیز برش است. در فاز اول، زهکشی در امتداد بالای نمونه آزاد است و تنش دورگیر در قسمت بالا و سمت راست مدل اعمال می‌شود.



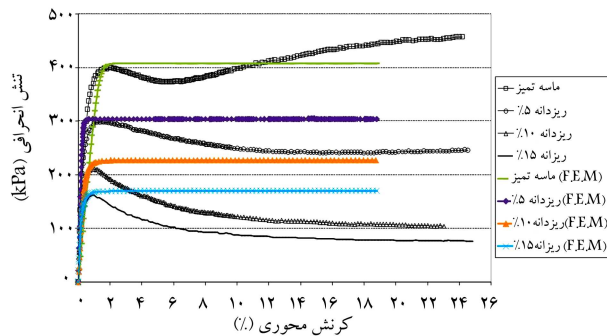
شکل ۶. منحنی تنش - کرنش حاصل از مدل‌سازی در مدل کنترل صحت‌سنجی.



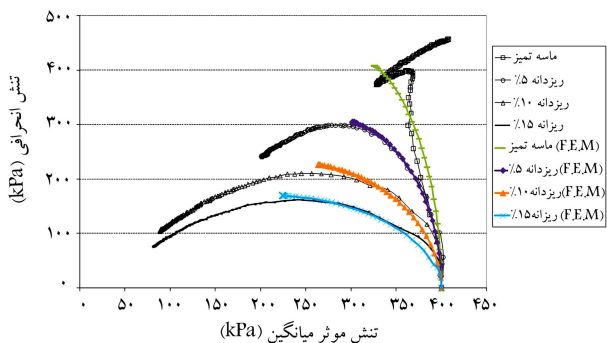
شکل ۷. منحنی تنش - کرنش حاصل از مدل‌سازی در مرجع.



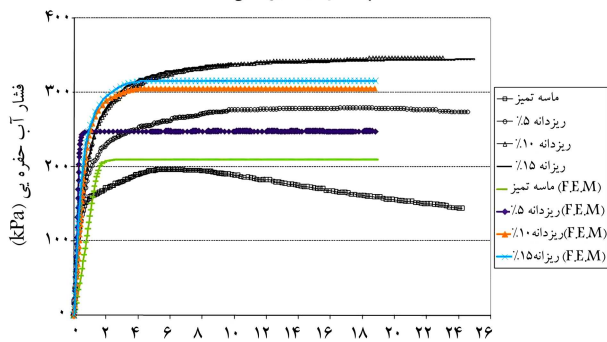
شکل ۸. منحنی فشار آب حفره‌یی - کرنش حاصل از مدل‌سازی در مدل کنترل صحت‌سنجی.



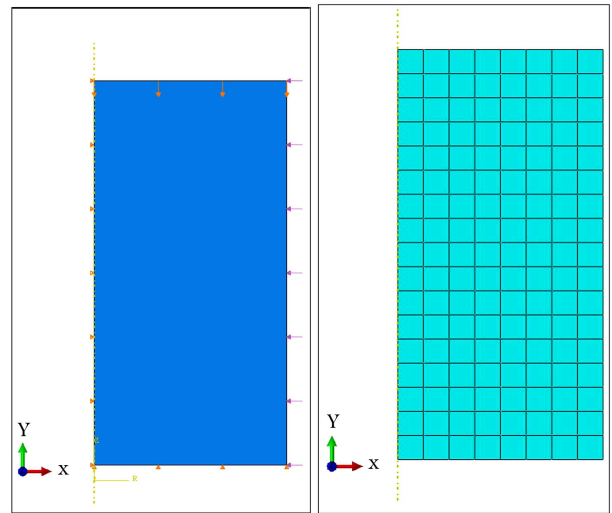
الف) نمودار تغييرات تنش انحرافي در مقابل کرنش محوري؛



ب) نمودار مسير تنش؛



ج) نمودار تغييرات فشار آب حفره يی در مقابل کرنش محوري.



شکل ۱۰. نمایی از مدل کاربردی، شرایط مرزی و مش بندی مدل.

در فاز دوم (مرحله ی برش)، قسمت فوقانی نمونه ی خاک مجبور به جابجایی با سرعت مشابه واقعیت می شود (۰/۵ mm/min). این سرعت بارگذاری شرایط مشابه آزمایش واقعی CU ایجاد می کند. درگام برش، قسمت فوقانی نمونه به صورت زهکشی نشده عمل می کند و فشار آب در نمونه افزایش می یابد.

در نهایت آنالیز کلی انجام و با اعمال جابجایی، نمونه ی مدل سازی شده گسیخته می شود. با کنترل نتایج به دست آمده از مدل سازی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، پارامترهای مدل به تدریج تغییر داده می شوند و پس از انجام تحلیل های فراوان و اعمال تغییرات جزئی در هر مرحله، در نهایت پارامترهای مناسب مدل رفتاری کم - کلی برای خاک ماسه یی با مقادیر مختلف خاک رسی به دست می آیند. در ادامه، نتایج حاصل از مدل سازی و مقایسه ی آن با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است. نمونه یی از نمودارهای به دست آمده از مدل سازی و مقایسه ی آن با نتایج آزمایشگاهی برای خاک با چگالی ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب و حالت خمیری بالا در شکل ۱۱ نشان داده شده است. هر ترکیب به اختصار به صورت A-B-C نام گذاری شده است، که در آن عدد A نشانگر وزن مخصوص خشک نمونه، عدد B نشانگر فشار تحکیم مؤثری است که آزمایش در آن انجام شده است، و حرف C نیز نشانگر نوع رس به کار رفته در ترکیب است. برای رس با حالت خمیری بالا (PI=۳۰) از حرف اختصاری H و برای رس با حالت خمیری پایین (PI=۱۱) از حرف L استفاده شده است. به عنوان مثال ترکیب H-۴۰-۱/۵ نشانگر نمونه هایی است که در تراکم ۱/۵ gr/cm<sup>۳</sup> ساخته و در فشار مؤثر تحکیمی ۴۰۰ کیلو پاسکال تحکیم شده اند.

با تغییر هر پارامتر، خروجی های منتج از تحلیل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده اند و به روند تأثیر هر پارامتر در رفتار خاک رسیده ایم. با دانستن این روند و تغییر مداوم پارامترها، در نهایت پارامترهای مناسب برای هر گروه از خاک های مورد مطالعه استخراج شده است. در این مدل سازی های معیار تطابق با نتایج آزمایشگاهی، مقدار تنش ها در نقطه اوج نمودار تنش - کرنش است و رفتار خاک پس از نقطه اوج به دست نیامده است.

پارامترهای به دست آمده از تحلیل کامل بر روی نتایج آزمایشگاهی با فشار همه جانبه ۴۰۰ kPa به دست آمده و سپس به منظور کنترل صحت نتایج، رفتار خاک در آزمایش سه محوری با فشار همه جانبه ۱۰۰ kPa در هر گروه خاک با پارامترهای مرتبط با آن گروه با نرم افزار تحلیل شده است. نمونه یی از این کنترل در

شکل ۱۱. نتایج مربوط به ترکیب های H-۴۰-۱/۵ برای درصد های مختلف رس.

شکل ۱۲ نمایش داده شده است. نتایج این تحلیل ها نشان دهنده ی انتخاب درست پارامترهای مدل کم - کلی است.

#### ۴. نتایج مدل سازی

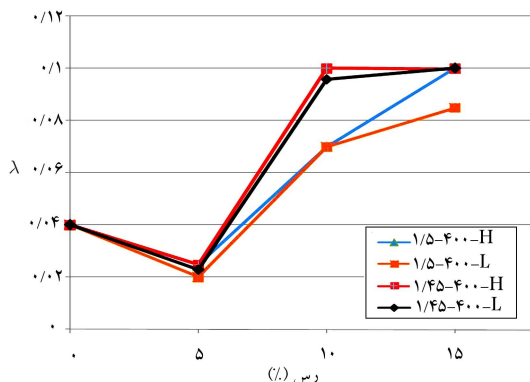
پس از تطابق نتایج مدل سازی های با نتایج آزمایشگاهی پارامترهای مناسب در مدل کم - کلی استخراج و روند تغییرات پارامترها ارزیابی شده است. در شکل ۱۳، روند تغییرات پارامتر M (یکی از پارامترهای مؤثر و مقاومتی خاک در مدل رفتاری کم - کلی) با تغییر میزان رس موجود در خاک نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش درصد رس موجود، پارامتر M کاهش یافته است. از طرف دیگر نتایج حاکی از آن است که تراکم خاک، تأثیری در پارامتر M ندارد و میزان این پارامتر برای هر دو حالت چگالی (۱/۵ و ۱/۴۵ gr/cm<sup>۳</sup>) یکسان است. همچنین با کاهش حالت خمیری خاک رس موجود، پارامتر M به طور متوسط حدود (۵٪)

افزایش یافته است. برآزش نمودار از نقاط M به دست آمده نشان می‌دهد که روند تغییرات پارامتر M با افزایش درصد رس، نزولی است.

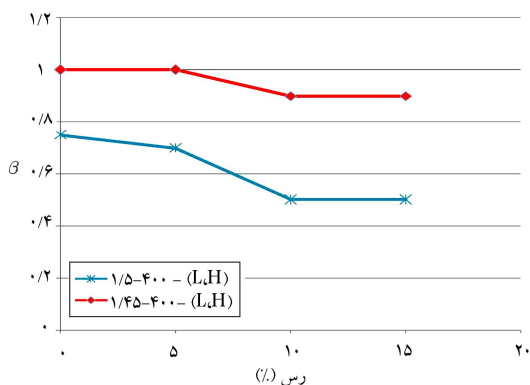
بدین ترتیب با تغییر درصد رس خاک ماسه‌یی و یا با تغییر تراکم خاک، می‌توان پارامتر M مناسب مدل رفتاری کم-کلی را پیش‌بینی کرد. پارامتر دیگری که در مدل رفتاری کم-کلی مهم و مؤثر است، پارامتر  $\lambda$  است.

با انجام تحلیل‌های مورد نیاز، مقدار مناسب برای هر گروه استخراج شده است. شکل ۱۴، روند تغییر پارامتر  $\lambda$  را با تغییر میزان رس موجود در خاک نشان می‌دهد. بر این اساس پارامتر  $\lambda$  در تغییر از حالت ماسه‌ی تمیز به ماسه‌ی رس‌دار کاهش می‌یابد. حال آنکه با افزایش درصد رس خاک ماسه‌یی رس‌دار، این پارامتر افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که پارامتر  $\lambda$  با کاهش چگالی افزایش می‌یابد، به طوری که با تغییر چگالی از  $1/5$  به  $1/45 \text{ gr/cm}^3$ ، مقدار  $\lambda$  افزایش یافته است. نتیجه‌ی دیگری که می‌توان از تحلیل‌ها استخراج کرد، آن است که پارامتر  $\lambda$  در حالت خمیری بالا اندکی بیشتر از حالت خمیری پایین خاک رسی است. البته این تفاوت ناچیز است. این موضوع با روند کلی تغییرات  $\lambda$  با درصد رس توده‌ی خاک مطابقت دارد. چرا که با افزایش درصد رس، خاصیت حالت خمیری کلی توده‌ی خاک افزایش می‌یابد.

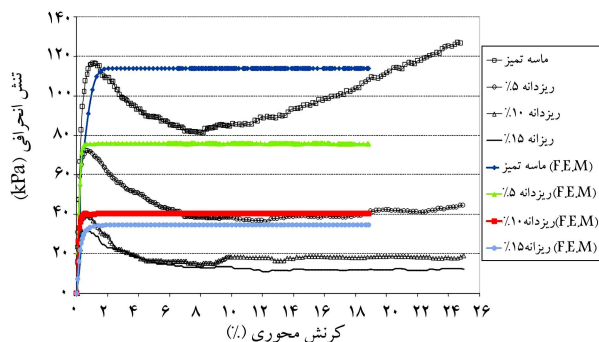
پس با افزایش حالت خمیری، پارامتر  $\lambda$  افزایش یافته است و این همان چیزی است که در مقایسه‌ی حالت خمیری کم و زیاد خاک رسی نتیجه شده است. پارامتر دیگری که در این مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است، پارامتر  $\beta$  است. نمودار تغییرات این پارامتر با درصد‌های مختلف ریزدانه و برای حالات مختلف خاک در شکل ۱۵ ارائه شده است. براساس نتایج موجود، پارامتر  $\beta$  با افزایش درصد رس موجود در خاک روند نزولی دارد. انجام تحلیل‌های بیشتر و توجه به نتایج نشان



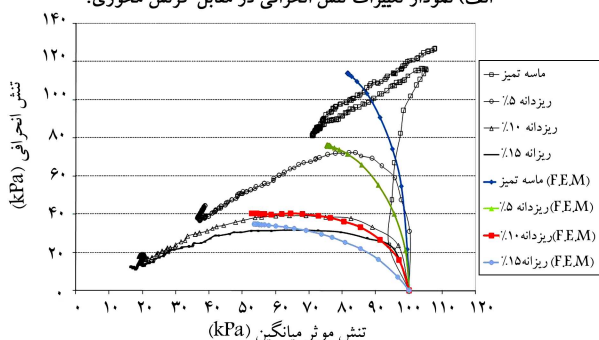
شکل ۱۴. روند تغییرات پارامتر  $\lambda$  با تغییر خواص خاک.



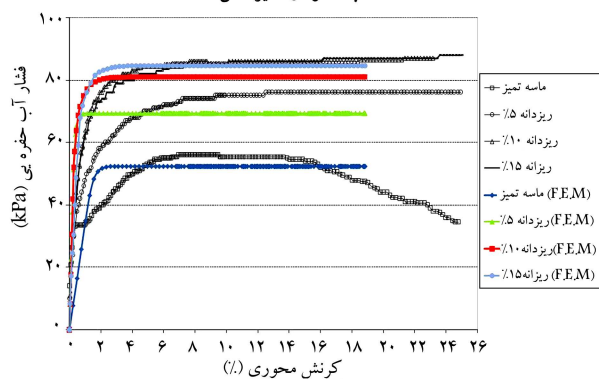
شکل ۱۵. روند تغییرات پارامتر  $\beta$  با تغییر خواص خاک.



الف) نمودار تغییرات تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری؟

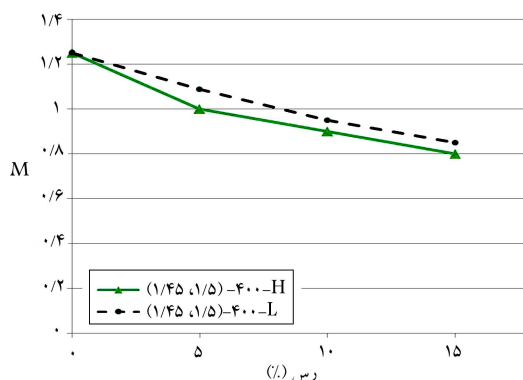


ب) نمودار مسیر تنش؟



ج) نمودار تغییرات فشار آب حفره بی در مقابل کرنش محوری.

شکل ۱۲. کنترل نتایج مربوط به ترکیبات H-100-1/5 برای درصد‌های مختلف رس.



شکل ۱۳. روند تغییرات پارامتر M با درصد رس.



تحلیل سازه‌ی ژئوتکنیکی وارد شده‌اند و یکی از اصلی‌ترین انتخاب‌های مهندسان طراح برای مدل رفتاری خاک هستند.

ب) مکانیک خاک حالت بحرانی می‌تواند به‌عنوان یک چهارچوب واحد برای تفسیر رفتار همه نوع خاک به‌کار رود. بر این اساس می‌توان یک مدل رفتاری مبتنی بر مکانیک خاک حالت بحرانی را (با افزودن پارامترهای لازم در هر مورد) به شکل قابل قبولی برای انواع مختلف خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه استفاده کرد.

ج) مدل‌های رفتاری مبتنی بر مکانیک خاک حالت بحرانی دارای پارامترهای ورودی نسبتاً کمی هستند. همچنین برخی از این پارامترها را می‌توان از آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین کرد. چنین ویژگی یک امتیاز بزرگ به‌شمار می‌آید.

نتایج پژوهش انجام‌شده را می‌توان به‌این صورت طبقه‌بندی کرد:

- براساس نتایج، نرم‌افزار Abaqus قابلیت مدل‌سازی رفتار نرم‌شونده در خاک‌های عادی تحکیم‌یافته را ندارد. لذا اگرچه رفتار خاک‌های مورد مطالعه براساس تفاوت در وزن مخصوص، درصد رس و میزان حالت خمیری رس متفاوت است این تفاوت رفتارها پس از Peak به‌دست نیامده است و فقط با بسته‌کردن بیضی سطح تسلیم در ناحیه‌ی تر خط حالت بحرانی، مقدار تنش‌ها در Peak مدل‌سازی شده است. البته توجه به این نکته ضروری است که در اغلب پروژه‌های مهندسی، هدف دانستن میزان تنش در Peak و طراحی متناسب با آن است. مدل رفتاری کم - کلی اصلاح‌شده، یک مدل رفتاری مناسب و ساده است که بسیاری از خواص رفتاری خاک را در بر می‌گیرد. هرچند این مدل در نرم‌افزار Abaqus قادر به مدل‌سازی رفتار نرم‌شونده در خاک مورد مطالعه است، ولیکن با توجه به کالیبراسیون انجام‌شده و کنترل صحت پارامترهای به‌دست‌آمده یک مدل مناسب به‌شمار می‌آید. برای مدل‌سازی بخش نرم‌شونده‌ی رفتار خاک، باید مدل‌های رفتاری دیگر که قادر به مدل‌سازی این رفتار هستند، مورد بررسی و استفاده قرار گیرند.

- افزایش میزان رس موجود در خاک باعث کاهش مقاومت‌های حالت پایدار و بیشینه در هر دو حالت سست و نیمه‌تراکم می‌شود. این روند کاهش مقاومت در مدل‌سازی عددی با بررسی اثر پارامترهای  $M$ ،  $\lambda$ ،  $\kappa$  و  $\beta$  ارائه شده است.

- با افزایش میزان رس و ضعیف‌تر شدن توده‌ی خاک، پارامتر  $M$  مدل رفتاری کم - کلی کاهش پیدا کرده است.

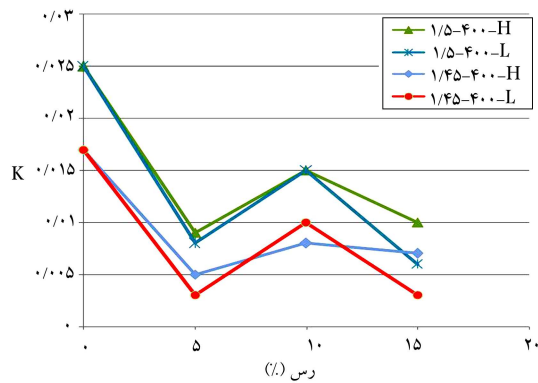
- تراکم خاک تأثیری در میزان پارامتر  $M$  ندارد و میزان این پارامتر برای دو حالت سست و نیمه‌تراکم یکسان است.

- با کاهش حالت خمیری خاک رس موجود در توده‌ی خاک، پارامتر  $M$  افزایش یافته است.

- در تغییر از حالت ماسه‌ی تمیز به ماسه‌ی رس‌دار پارامتر  $\lambda$  کاهش می‌یابد. حال آنکه با افزایش درصد رس خاک ماسه‌ی رس‌دار و ضعیف‌تر شدن خاک، این پارامتر افزایش پیدا کرده است.

- پارامتر  $\lambda$  با کاهش چگالی افزایش می‌یابد، به طوری که با تغییر  $\gamma$  از  $1/5$  به  $1/45 \text{ gr/cm}^3$  مقدار  $\lambda$  افزایش یافته است.

- پارامتر  $\lambda$  در حالت خمیری بالا اندکی بیشتر از حالت خمیری پایین رس می‌باشد. البته این تفاوت ناچیز است. این موضوع با روند کلی تغییرات  $\lambda$  با درصد رس توده‌ی خاک مطابقت دارد. چرا که با افزایش درصد رس، خاصیت حالت خمیری کلی توده‌ی خاک افزایش می‌یابد. پس با افزایش حالت خمیری، پارامتر



شکل ۱۶. روند تغییرات پارامتر  $\kappa$  با تغییر خواص خاک.

می‌دهد که اگرچه پارامتر  $\beta$  با افزایش درصد رس کاهش می‌یابد، ولی در نهایت با تغییر درصد رس از  $10\%$  به  $15\%$ ، تغییری در آن مشاهده نمی‌شود. این موضوع حکایت از آن دارد که با افزایش میزان رس، اثر آن در تغییر پارامتر  $\beta$  کمتر می‌شود. تا جایی که به تدریج پارامتر  $\beta$  ثابت می‌شود و دیگر متأثر از درصد رس نخواهد بود. نتیجه‌ی حاصل دیگر آن است که با کاهش چگالی خاک، پارامتر  $\beta$  افزایش می‌یابد. براساس نتایج موجود با تغییر میزان چگالی از  $1/5$  به  $1/45 \text{ gr/cm}^3$ ، پارامتر  $\beta$  افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد میزان حالت خمیری خاک رسی در پارامتر  $\beta$  مؤثر نیست، به طوری که مقادیر پارامتر  $\beta$  برای هر دو حالت با حالت خمیری بالا و پایین یکسان است.

در نهایت به بررسی تغییرات پارامتر  $\kappa$  با تغییر مشخصات خاک موجود پرداخته‌ایم. شکل ۱۶، روند تغییرات پارامتر  $\kappa$  را نشان می‌دهد. در این بررسی روند کلی و منظمی دیده نمی‌شود. با وجود این نتایج نشان می‌دهد که مقدار پارامتر  $\kappa$  در حالت تراکم‌تر بیشتر است. به طوری که با تغییر چگالی از مقدار  $1/5$  به  $1/45 \text{ gr/cm}^3$  پارامتر  $\kappa$  کاهش یافته است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر حالت خمیری خاک رسی در پارامتر  $\kappa$  ناچیز است. با بررسی این پارامترها و استخراج روند تغییر آنها با تغییر تراکم توده‌ی خاک و یا تغییر میزان رس و حالت خمیری آن می‌توان به پیش‌بینی میزان این پارامترها در شرایط دیگر پرداخت. در نهایت، با داشتن پارامترهای متناسب و با کمک نرم‌افزار اجزاء محدود می‌توان به پیش‌بینی رفتار خاک تحت آزمایش سه‌محوری پرداخت.

## ۵. نتیجه‌گیری

مدل‌سازی یک پروژه‌ی ژئوتکنیکی و یا یک آزمایش مانند آزمایش سه‌محوری علاوه بر بررسی روند تغییرات، جهت کالیبره‌کردن پارامترهای یک مدل رفتاری نیز مورد استفاده واقع می‌شود. در این پژوهش برای آنالیز نتایج آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته - زهکشی‌نشده از نرم‌افزار کاربردی Abaqus استفاده شده است. مدل حالت بحرانی در نرم‌افزار Abaqus در اولویت قرار گرفته است. همچنین یافتن پارامترهای مناسب مدل و کالیبراسیون آنها به صورت آنالیز معکوس انجام گرفته است.

مهم‌ترین علل انتخاب چهارچوب مکانیک خاک حالت بحرانی برای مدل‌سازی رفتاری خاک مورد مطالعه، به این شرح هستند:

الف) مدل‌های مبتنی بر اصول مکانیک خاک حالت بحرانی، که معروف‌ترین آنها گروه مدل‌های کم - کلی هستند، امروزه در بیشتر نرم‌افزارهای کامپیوتری متداول

در واقع می‌توان پارامترهای هر نوع خاک ماسه‌یی مخلوط با رس را پیش‌بینی کرد، با اعمال فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف به مدل‌سازی آزمایش سه‌محوری آن خاک پرداخت

- در بررسی نتایج آزمایش‌های سه‌محوری مشاهده می‌شود که با تغییر میزان حالت خمیری رس موجود در توده‌ی خاک، میزان مقاومت خاک تغییر می‌کند. به طوری که با افزایش حالت خمیری بخش رسی خاک، مقاومت توده‌ی خاک تا حدودی کاهش می‌یابد. این موضوع با تغییرات پارامترهای مورد مطالعه هم‌خوانی دارد، به طوری که با افزایش حالت خمیری مقادیر پارامتر  $\lambda$  نسبت به حالت خمیری کمتر تا حدودی افزایش می‌یابد. همچنین در این حالت مقادیر پارامتر  $M$  قدری کاهش می‌یابد.
- براساس پژوهش‌های پیشین و با توجه به مدل‌سازی‌های موجود، با افزایش تراکم مقاومت بیشینه‌ی ترکیبات ماسه با رس بالاتر می‌رود، ولی اثر تراکم با افزایش درصد رس کمتر می‌شود. بر این اساس با تغییر تراکم تغییر چندانی در پارامترهای مدل ایجاد نمی‌شود.

$\lambda$  افزایش یافته است و این همان نتیجه‌ی است که در مقایسه‌ی حالت خمیری کم و زیاد رس حاصل شد.

- براساس نتایج موجود، پارامتر  $\beta$  با افزایش درصد رس موجود در خاک روند نزولی دارد. با افزایش میزان رس، اثر آن در تغییر پارامتر  $\beta$  کمتر می‌شود. تا جایی که به تدریج پارامتر  $\beta$  ثابت می‌شود و دیگر متأثر از درصد رس نخواهد بود.
- با کاهش چگالی خاک، پارامتر  $\beta$  تا حدودی افزایش می‌یابد. براساس نتایج موجود با تغییر میزان  $\gamma$  از  $1/5$  به  $1/45 \text{ gr/cm}^3$  پارامتر  $\beta$  افزایش می‌یابد.
- میزان حالت خمیری خاک رسی در پارامتر  $\beta$  مؤثر نیست. به طوری که مقادیر پارامتر  $\beta$  برای هردو حالت با حالت خمیری بالا و پایین یکسان است.
- در مورد تغییرات پارامتر  $n$  الگوی مشخصی به دست نیامده و مقادیر متفاوتی بر حسب میزان رس موجود در خاک برآزش شده است. با وجود این نتایج نشان می‌دهد که مقدار  $n$  در حالت متراکم‌تر بیشتر است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر حالت خمیری خاک رسی در پارامتر  $n$  ناچیز است.
- افزایش فشار همه‌جانبه تأثیری در پارامترهای انواع ترکیبات ماسه و رس ندارد.

## پانویس‌ها

1. consolidated-drained (CD)
2. consolidated-undrained (CU)
3. unconsolidated-undrained (UU)
4. Cam-Clay
5. explicit
6. implicit
7. Geostatic
8. increment

## منابع (References)

1. Rafiee, R. "Evaluation the effect of nonplastic fines on the dissimilar behavior of saturated sands with undrained monotonic triaxial tests" Master's thesis, Tehran University, Engineering Faculty (In Persain) (2009).
2. Calvello, M. and Finno, R.J. "Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis", *Computers and Geotechnics*, **31**(4), pp. 410-424 (2004)
3. Andrade, J.E. and Ellison, K.C. "Evaluation of a predictive constitutive model for sands", *ASCE*, **134**(12), pp. 1825-1828 (2008)
4. Desai, C.S. "Constitutive modeling for geologic materials significance and directions", *International Journal of Geomechanics*, *ASCE*, pp. 81-84 (2005).
5. Lade, P.V. and Duncan, J.M. "Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **101**(10), pp. 1037-1053 (1975).
6. Lade, P.V. "Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces", *International Journal of Solids and Structures*, **13**(11), pp. 1019-1035 (1977).
7. Vermeer, P.A. "A double hardening model for sand", *Geotechnique*, **28**(4), pp. 413-433 (1978).
8. Alkarni, A. "Modeling of stress-strain curves of drained triaxial test on sand", *American Journal of Applied Sciences*, **3**, p. 6 (2006).
9. Bayoumi, A. "New laboratory test procedure for the enhanced calibration of constitutive mode", A Thesis Presented to the Academic Faculty, In Partial Fulfillment of the Requirements of the Degree Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology (May 2006).
10. Naeemifar, O. "the effect of fine content with different plasticity values on the liquefaction potential of sands" Master's thesis, Tarbiat Modares University, Engineering Faculty (In Persain) (2007).
11. ABAQUS Users Manual, version 6.8.1 Abaqus, Inc. Pawtucket R.I. © Dassault System (2008).
12. Helwaney, S., *Applied Soil Mechanics With Abaqus Application*, John Wiley & Sons (2007).