



## ارزیابی اثر میکروپارامترها بر ویژگی‌های ماکرومقیاس خاک‌های دانهای سیمانته شبیه‌سازی شده به روش اجزای منفصل

نازنین محبوبی مطلق، احمدرضا محبوبی اردکانی<sup>\*</sup>، علی نورزاد

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸

### کلمات کلیدی:

شبیه‌سازی به روش اجزای منفصل

مدل تماسی پیوندی اتصال مسطح

مصالح دانه‌ای سیمانته

تحلیل حساسیت

حلیل رگرسیون

**خلاصه:** یکی از مدل‌های تماسی پیوندی که برای شبیه‌سازی پیوندهای سیمانی شکل گرفته بین ذرات در یک نمونه سیمانته در روش اجزای منفصل به کار می‌رود، مدل "اتصال مسطح" است. تعداد میکروپارامترهای مورد نیاز برای تعریف این مدل تماسی در بین ذرات، بسیار بوده و اثر هر یک از این پارامترها روی پاسخ مصالح مشخص نیست. در این مطالعه، پس از انجام آزمایش‌های سه محوری استاتیکی و دینامیکی بزرگ مقیاس بر روی مصالح شنی سیمانته در آزمایشگاه، به شبیه‌سازی آن‌ها با استفاده از مدل تماسی اتصال مسطح پرداخته شد. سپس، یک تحلیل حساسیت به منظور تعیین اثر میکروپارامترها روی پاسخ ماکروسکوپیک نمونه‌های سیمانته و مشخص نمودن موثرترین میکروپارامترها، جهت ساده‌سازی فرآیند کالیبراسیون، انجام شد. برای کمی کردن روابط بین پارامترهای میکرو و ویژگی‌های مکانیکی نمونه، تحلیل رگرسیون نتایج شبیه‌سازی‌ها صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که مقاومت بیشینه و پسماند برشی عمدتاً به چسبندگی و نسبت سختی وابسته هستند. اثر مدول الاستیک و نسبت سختی روی مدول مماسی اولیه و مدول برشی قابل توجه است. نسبت پواسون تحت تاثیر نسبت سختی و چسبندگی می‌باشد. نسبت میرایی بیشتر به مدول الاستیک بستگی دارد. این نتایج می‌تواند به عنوان یک راهنما برای مدل‌سازی رفتار مصالح شکننده در روش اجزای منفصل به کار رود. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های آزمایشگاهی، مشاهده می‌شود که مدل عددی به خوبی توانسته رفتار نرم شونددگی و اتساعی شن سیمانته را ارائه دهد.

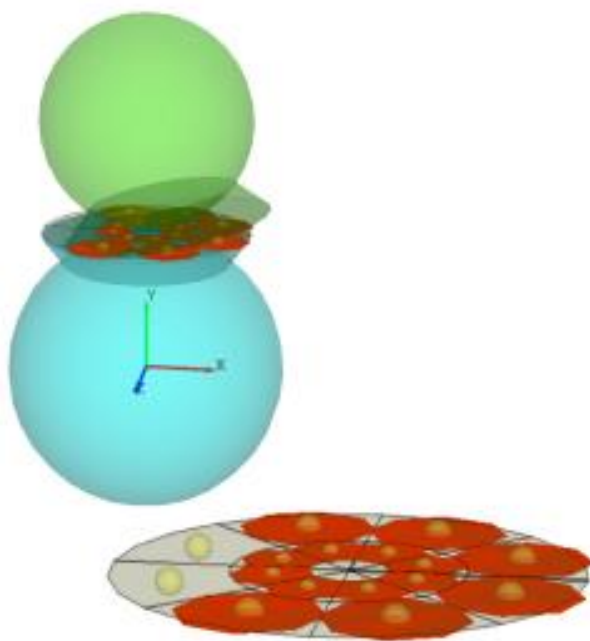
### ۱- مقدمه

روش‌ها در بررسی رفتار مصالح سیمانته، روش اجزای منفصل<sup>۱</sup> می‌باشد. این روش به عنوان یک روش نوگرا، رفتار مصالح دانه‌ای سیمانی را به صورت واقع‌گرایانه و بدون تحمیل مدل‌های رفتاری پیچیده شبیه‌سازی می‌نماید. برای شبیه‌سازی رفتار خاک‌های سیمانته از مدل‌های تماسی پیوندی بین ذرات استفاده می‌شود.

در شبیه‌سازی مصالح شبه‌سنگی شکننده با مدل‌های تماسی پیوندی، چند مشکل ذاتی وجود دارد که عبارتند از (۱) نسبت مقاومت فشاری تک محوری به مقاومت کششی به صورت غیرواقع‌بینانه‌ای در محدوده ۳ الی ۷ قرار دارد، (۲) زاویه اصطکاک داخلی را کم تخمین می‌زند، (۳) پوش گسیختگی را خطی فرض می‌کند، (۴) مقاومت برشی در این مدل‌ها مستقل از فشار وارده است و (۵) قادر به مدل‌سازی ترک‌های اولیه در نمونه نیستند. در صورتی که به طور معمول، مصالح سیمانته دارای زاویه اصطکاک بالا، پوش گسیختگی غیرخطی، نسبت مقاومت فشاری به کششی بین ۱۰ تا ۲۰، مقاومت برشی

خاک سیمانته اصطلاحاً به خاکی گفته می‌شود که در طی فرآیندهای طبیعی و یا مصنوعی، بین دانه‌های آن پیوند سیمانی برقرار شده باشد. نقش سیمان‌تاسیون بر رفتار مکانیکی خاک‌ها بسیار موثر بوده و عوامل مختلفی نظیر درصد و نوع سیمان، نسبت آب به سیمان، تراکم و توزیع اندازه دانه‌ها روی خواص مکانیکی خاک‌های سیمانته اثرگذار می‌باشند. درک اثر سیمان‌تاسیون شکل گرفته در بین دانه‌های خاک در آزمایشگاه به دلیل دشواری در نظارت بر داده‌های میکروسکوپی، حتی با استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند اسکن اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و انتشار صوتی، کار ساده‌ای نیست [۱]. از این رو، می‌توان از روش‌های عددی که امکان بررسی رفتار کوچک‌مقیاس مصالح را دارند، به عنوان راهکاری مناسب برای پیش‌بینی رفتار مصالح سیمانته استفاده کرد. یکی از کارآمدترین





شکل ۱. فصل مشترک بین ذره در مدل اتصال مسطح، شامل ۲ المان پیوندی و ۱۴ المان غیرپیوندی

### 1. The interface between two particles in flat joint model; 2 bonded, and 14 un-bonded elements

روش اجزای منفصل، مقادیر مناسب این مجموعه از میکروپارامترها (ذرات و مدل تماسی) بر اساس فرآیند کالیبراسیون که در آن، پاسخ‌های مدل عددی به صورت مستقیم با مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه می‌شود، به دست می‌آید. تنها روش برای یافتن یک مجموعه مطلوب (از میکروپارامترها) در هنگام استفاده از روش اجزای منفصل، روش سعی و خطاست که روشی زمانبر و قدیمی است. از آنجایی که مدل تماسی اتصال مسطح شامل میکروپارامترهای زیادی است، کالیبراسیون آن ساده نیست. بنابراین، ضروری به نظر می‌رسد که کالیبراسیون میکروپارامترهای مصالح با مدل تماسی اتصال مسطح مطالعه شود.

حساسیت یک مدل به پارامترهای کلیدی آن با یک تحلیل واریانس<sup>۲</sup> در سطح قابل توجه ۵ درصد تحلیل می‌شود. تحلیل واریانس یک روش مفید در تعیین کمی اثر عوامل اصلی کنترل کننده میکرو روی ویژگی‌های ماکرو مورد نظر است. در واقع، این روش مشخص می‌کند که آیا چندین عامل مفروض در مدل روی متغیر وابسته به صورت قابل توجهی اثر دارند یا خیر.

وابسته به فشار نرمال وارده و عمدتاً دارای ترک هستند [۲]. این نقوص با معرفی مدل تماسی پیوندی اتصال مسطح<sup>۱</sup> برطرف شد. مدل تماسی اتصال مسطح، یک پیوند را با شبیه‌سازی رفتار یک فصل مشترک بین دو سطح از دو ذره تعریف می‌کند. این فصل مشترک به المان‌هایی تقسیم می‌شود که می‌توانند پیوندی یا غیرپیوندی اصطکاکی باشند (شکل ۱). این مدل قادر است مقاومت دورانی را حتی پس از شکست پیوند تامین کند.

پاسخ در مقیاس ماکرو نمونه‌ها که از تحلیل رفتار مکانیکی ذرات در مقیاس میکرو به دست می‌آید، به مجموعه‌ای از میکروپارامترهای مورد نیاز جهت تعریف نمونه در محیط اجزای منفصل، بستگی دارد. میکروپارامترهای اساسی مصالح با مدل تماسی پیوندی اتصال مسطح شامل پارامترهای ذرات (چگالی ذرات، نسبت حداکثر به حداقل شعاع ذرات، مدول الاستیک، نسبت سختی نرمال به برشی و ضریب اصطکاک) و مدل پیوندی (تعداد المان‌ها، مدول الاستیک، نسبت سختی نرمال به برشی، ضریب اصطکاک، ضریب شعاع پیوند، مقاومت کششی، چسبندگی و زاویه اصطکاک یا ضریب اصطکاک داخلی) می‌باشد. در همه شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده به

2 Analysis of Variance (ANOVA)

1 Flat joint contact model

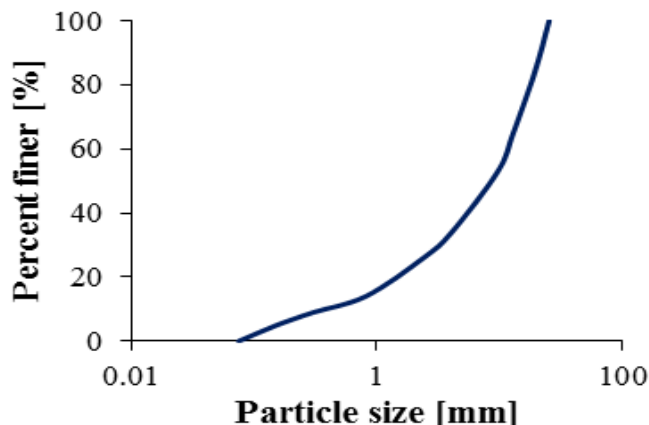
فیلگوئیرا<sup>۱۶</sup> و همکاران [۱۳]، یک برنامه تحلیل حساسیت به منظور دستیابی به اثر پارامترهای میکرو بر پاسخ ماکروسکوپییک نمونه سنگ شبیه‌سازی شده به روش اجزای منفصل انجام شد. ژو<sup>۱۷</sup> و همکاران [۱۴]، یک رویکرد سیستماتیک برای ساده‌سازی فرآیند کالیبراسیون پیشنهاد دادند. شی<sup>۱۸</sup> و همکاران [۱۵] به صورت خلاصه گزارش کردند که مدول یانگ نمونه‌های سیمانته با مدول ذرات و پیوندهای سیمانی در مدل کنترل می‌شود و نسبت پواسون آن نیز به نسبت سختی نرمال به برشی ذرات وابسته است.

در این پژوهش، ابتدا آزمایش‌های سه محوری استاتیکی و دینامیکی بزرگ‌مقیاس روی نمونه‌شن سیمانته (۲ درصد سیمان) تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال در شرایط زهکشی شده انجام شد. سپس به شبیه‌سازی سه بعدی نمونه‌های تحت آزمایش حاوی ذرات گردگوشه با دانه‌بندی مشابه با آزمایش‌های تجربی در نسبت تخلخل ۰/۴۲ به صورت خشک با مدل تماسی پیوندی اتصال مسلح در قالب استوانه‌ای شکل با مرزهای جانبی انعطاف‌پذیر پرداخته شد تا شرایط شبیه‌سازی به آزمایشگاهی تا حد امکان نزدیک گردد که در مدل‌سازی‌های گذشته کمتر به افزایش سازگاری بین شرایط مدل و واقعیت اهمیت داده شده است. پس از کالیبره نمودن مدل شبیه‌سازی شده به روش اجزای منفصل با نتایج تجربی به دست آمده، اثر میکروپارامترهای مدل (مدول الاستیک ذرات و پیوند، نسبت سختی نرمال به برشی تماسی و پیوند، ضریب اصطکاک بین ذرات، چسبندگی پیوند، مقاومت کششی پیوند و زاویه اصطکاک پیوندی) بر متغیرهای ماکروسکوپییک استاتیکی و دینامیکی نمونه، مانند مقاومت برشی بیشینه و پسماند، مدول مماسی اولیه، نسبت پواسون، مدول برشی و نسبت میرایی با بهره‌گیری از روش تحلیل حساسیت مورد مطالعه قرار گرفت. عوامل میکرومقیاس موثر بر پاسخ ماکروسکوپییک مصالح سیمانته معین و ارتباط بین آن‌ها به صورت روابط کمی با استفاده از تحلیل رگرسیون بیان شد که این روابط در تحقیقات قبلی مطرح نشده است. در مطالعات گذشته، به ارزیابی ارتباط بین مقاومت برشی و فشاری تک محوری نمونه‌های سیمانته با تعداد محدودی از میکروپارامترها پرداخته شده و تاکنون متغیرهای دینامیکی مورد بحث قرار نگرفته است که برای اولین بار در این پژوهش مطالعه شده است. استخراج این پارامترهای میکرومقیاس موثر و روابط کمی حاصل شده به تسهیل فرآیند کالیبراسیون نمونه‌های سیمانته در روش اجزای منفصل کمک خواهد کرد که این نیز به نوبه خود یک گام موثر در کالیبراسیون محسوب می‌شود.

هدف از پژوهش یانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۳] تعیین ارتباط کمی بین پارامترهای میکرو و ویژگی‌های مکانیکی نمونه سیمانی بود. یون<sup>۲</sup> [۴] روش طراحی پلاکت برمن<sup>۳</sup> را در تحلیل حساسیت پارامترهای میکرو بر پاسخ ماکرو مدل تماسی پیوندی اعمال کرد و دو تا از موثرترین میکروپارامترها را برای هر یک از ویژگی‌های ماکروسکوپییک معرفی کرد. بر اساس چندین شبیه‌سازی آزمایش فشاری تک محوری بر روی نمونه سیمانته به روش اجزای منفصل، توادروس<sup>۴</sup> و همکاران [۵] از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی ویژگی‌های میکرو مورد نیاز استفاده کردند. با استفاده از روش تاگوچی<sup>۵</sup>، هانلی<sup>۶</sup> و همکاران [۶] میکروپارامترهای مدل تماسی پیوند موازی را کالیبره کردند و دریافتند که مقاومت نرمال پیوند، سختی پیوند و اصطکاک ذرات موثرترین پارامترها در کرنش گسیختگی هستند. چونگ<sup>۷</sup> و همکاران [۷] یک مطالعه پارامتری برای شناسایی اثر نسبت سختی مدل تماسی پیوندی، مساحت پیوند و مقاومت پیوند بر پاسخ تنش-کرنش مصالح سیمانته انجام دادند. نتایج نشان داد که سختی مصالح با افزایش دو عامل اول افزایش می‌یابد اما تحت تاثیر مقاومت پیوند نیست. سان<sup>۸</sup> و همکاران [۸] ترکیب روش‌های طراحی کامل فاکتوریل<sup>۹</sup> و شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش‌بینی میکروپارامترهای مدل پیوندی توسعه دادند. دینگ<sup>۱۰</sup> و همکاران [۹] اثر نسبت حداکثر به حداقل شعاع ذرات و توزیع اندازه ذرات بر ویژگی‌های مکانیکی ماکروسکوپییک مدل سیمانته را تخمین زدند. هدف از مقاله چن<sup>۱۱</sup> [۱۰]، تحلیل آثار میکروپارامترها بر پارامترهای ماکرو مصالح پیوندی با مدل تماسی اتصال مسطح در شرایط دو بعدی و توسعه روش سعی و خطا در کالیبراسیون میکروپارامترها بود. زو<sup>۱۲</sup> و لین<sup>۱۳</sup> [۱۱] میکروپارامترهای موثر بر مقاومت فشاری تک محوری، مدول یانگ و نسبت پواسون زغال سنگ را تعیین کردند. ونگ<sup>۱۴</sup> و کائو<sup>۱۵</sup> [۱۲] از الگوریتم شبیه‌سازی بهبود یافته برای یافتن مقادیر تقریبی میکروپارامترها استفاده کردند. در مطالعه

- 1 Yang
- 2 Yoon
- 3 Plachett-Burman design
- 4 Tawadrous
- 5 Taguchi
- 6 Hanley
- 7 Cheung
- 8 Sun
- 9 full factorial design
- 10 Ding
- 11 Chen
- 12 Zou
- 13 Lin
- 14 Wang
- 15 Cao

- 16 Filgueira
- 17 Zhou
- 18 Shi



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی

Fig. 2. Particle size distribution curve

جدول ۱. ویژگی‌های خاک مصرفی

Table 1. Soil properties

وزن مخصوص درصد طوبت	وزن مخصوص خاک در محل	وزن مخصوص خشک	وزن مخصوص خشک حداقل	وزن مخصوص خشک حداکثر	ضریب انحنا	ضریب یکنواختی	اندازه متوسط ذرات	چگالی ویژه	نوع خاک
$\omega$ [%]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{d \min}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{d \max}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_c$	$C_u$	$D_{50}$ [mm]	$G_s$	
۵	۱۹/۱۱	۱۸/۲	۱۷/۵	۱۸/۵	۲/۷۵	۳۴/۲۸	۹	۲/۸	شن خوب دانه‌بندی شده (GW)

## ۲- مواد و روش‌ها

کم آن است. ترکیبات سیمان مصرفی به کمک آزمایش‌های شیمیایی انجام شده در آزمایشگاه تعیین گردیده و در جدول ۲ آورده شده است.

در این بخش به معرفی مصالح مصرفی، آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی پرداخته خواهد شد.

### ۲-۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، آزمایش‌های سه محوری استاتیکی و دینامیکی در شرایط تحکیم یافته زهکشی شده در محیط آزمایشگاه بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر حاوی ذرات شنی گردگوشه (با توزیع دانه‌ها به صورت نمودار دانه‌بندی شکل ۲) در نسبت تخلخل یکسان ۰/۴۲ و فشار همه جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. آزمایش‌های آزمایشگاهی طبق جدول ۳ صورت گرفته است.

### ۲-۱- مصالح مصرفی

در این مطالعه از خاک شنی خوب دانه‌بندی شده گردگوشه به همراه ماسه استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی آن‌ها در شکل ۲ آورده شده است. سایر ویژگی‌های خاک مورد آزمایش در جدول ۱ خلاصه شده است. در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک، سیمان مناسب‌ترین مصالح برای تثبیت بستر به دلیل ویژگی‌های مکانیکی مطلوب، دسترسی آسان و هزینه

جدول ۲. ترکیبات سیمان

Table 2. Chemical composition of Portland cement

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	SrO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	ترکیبات
۱۱/۷۸	۶۹/۶۲	۳/۲۳	۸/۴۴	۱/۴۵	۰/۳۶	۲/۳۶	۰/۳	۰/۲۲	۱/۹۲	۰/۰۵	۰/۱۷	درصد وزنی موجود

جدول ۳. آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده

Table 3. Experimental tests schedule

توضیحات	فشار همه جانبه (کیلو پاسکال)	نمونه			درصد سیمان	مصالح پایه	آزمایش
		زمان عمل آوری	تخلخل	نسبت آب به سیمان			
زهکشی شده، کرنش کنترل							سه محوری استاتیکی
زهکشی شده، تنش کنترل، یک مرحله بارگذاری- باربرداری به شکل سینوسی شامل ۴۰ تناوب در نسبت تنش تناوبی ۰/۵	۳۰۰	۲۸ روز	۰/۴۲	۰/۶	۲٪	شن گردگوشه	سه محوری دینامیکی

۲-۳- نتایج آزمایش‌های تجربی

دانه‌بندی مشخص شده در شکل ۲ در قالب استوانه‌ای شکل به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر به صورت خشک در نسبت تخلخل ۰/۴۲ تهیه شدند. مدل تماس پیوندی بین ذرات به صورت مدل تماسی اتصال مسطح در نظر گرفته شد.

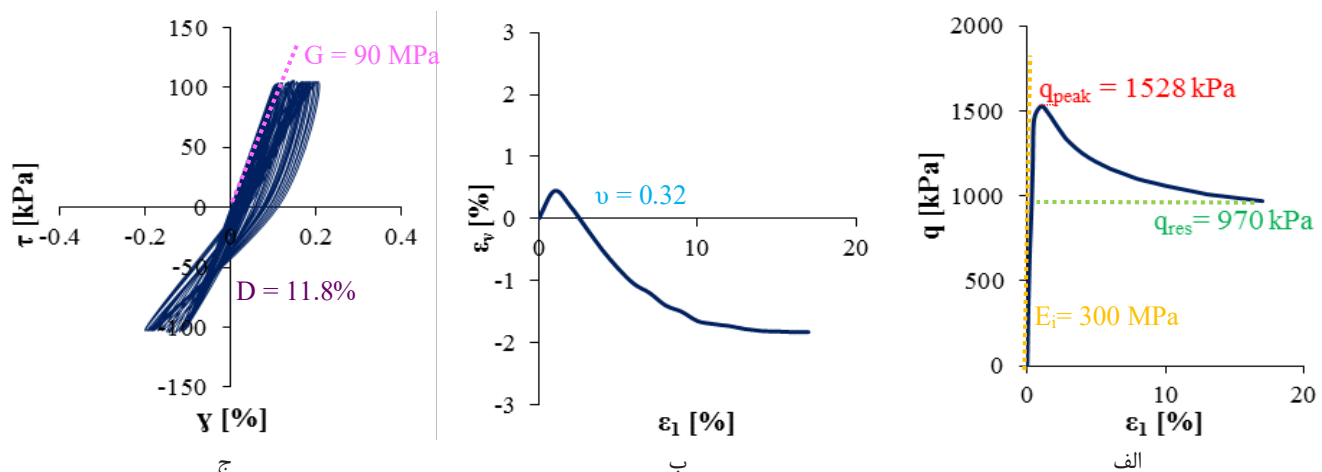
مصالح شرکت کننده در مدل به صورت مجموعه‌ای از ذرات هستند که در آن، مدل تماسی اتصال مسطح در تمام تماس‌های ذره- ذره با فاصله‌ای کمتر یا برابر با فاصله اولیه معرفی شده در انتهای مرحله تولید مصالح، ایجاد می‌شود. همانطور که اشاره شد، در مدل تماسی اتصال مسطح، یک پیوند به صورت یک فصل مشترک بین دو سطح از دو ذره تعریف می‌شود که به المان‌هایی در جهت محیطی و شعاعی تقسیم می‌شود. رفتار المان‌های پیوندی به صورت الاستیک خطی است. هرگاه تنش وارده از مقاومت پیوند تجاوز کند، المان‌های پیوندی آن شروع به شکست می‌کنند و به المان غیرپیوندی تبدیل می‌شوند. در واقع، این مدل می‌تواند شکست جزئی (شکست تعدادی از المان‌های پیوندی در یک تماس ذره - ذره و تبدیل شدن به المان غیرپیوندی) را لحاظ کند [۱۷-۱۹]. به همین دلیل، این المان‌ها می‌توانند پیوندی یا غیرپیوندی اصطکاکی باشند. پارامترهای مورد نیاز در شرایط غیرپیوندی، سختی نرمال و برشی تماسی و ضریب

نتایج حاصل از آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی در شکل ۳ نمایش داده شده است. پارامترهای ماکروسکوپیک شن سیمانته مورد آزمایش نیز در این شکل مشخص گردیده است.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نمونه سیمانته در فشار همه جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال، پس از رسیدن به مقاومت برشی بیشینه (نقطه گسیختگی)، کرنش نرم شوندگی را تجربه کرده و به مقاومت پسماند نمونه بدون سیمان نزدیک می‌شود. از نمودار کرنش حجمی- کرنش محوری دریافت می‌شود که در کرنش محوری پایین، نمونه رفتار انقباضی داشته و سپس با افزایش کرنش محوری، نمونه وارد مرحله اتساعی می‌گردد. مدول برشی و نسبت میرایی برای حلقه دهم از نمودار تنش برشی- کرنش برشی حاصل از آزمایش سه محوری دینامیکی انجام شده روی نمونه محاسبه شده است.

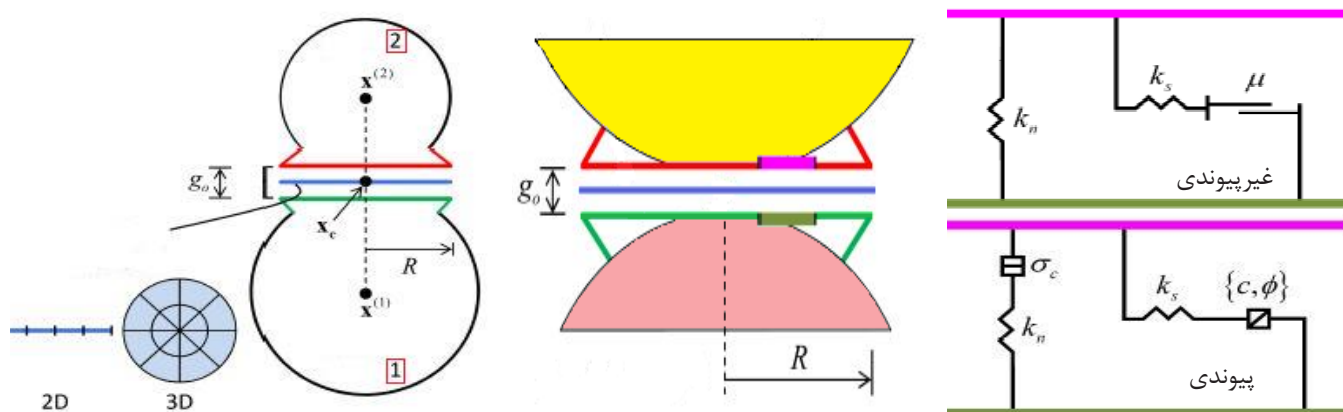
۲-۴- شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی نمونه‌های سیمانته از نرم‌افزار PFC۳D (نسخه ۶) استفاده شده است [۱۶]. نمونه به صورت مجموعه‌ای از ذرات کروی با



شکل ۳. نمودارهای الف) تنش انحرافی- کرنش محوری، ب) کرنش حجمی- کرنش محوری و ج) تنش برشی- کرنش برشی نمونه شن سیمانته

Fig. 3. a) Deviator stress- axial strain, b) volumetric strain- axial strain, and c) shear stress- shear strain curves of the cemented gravelly specimens



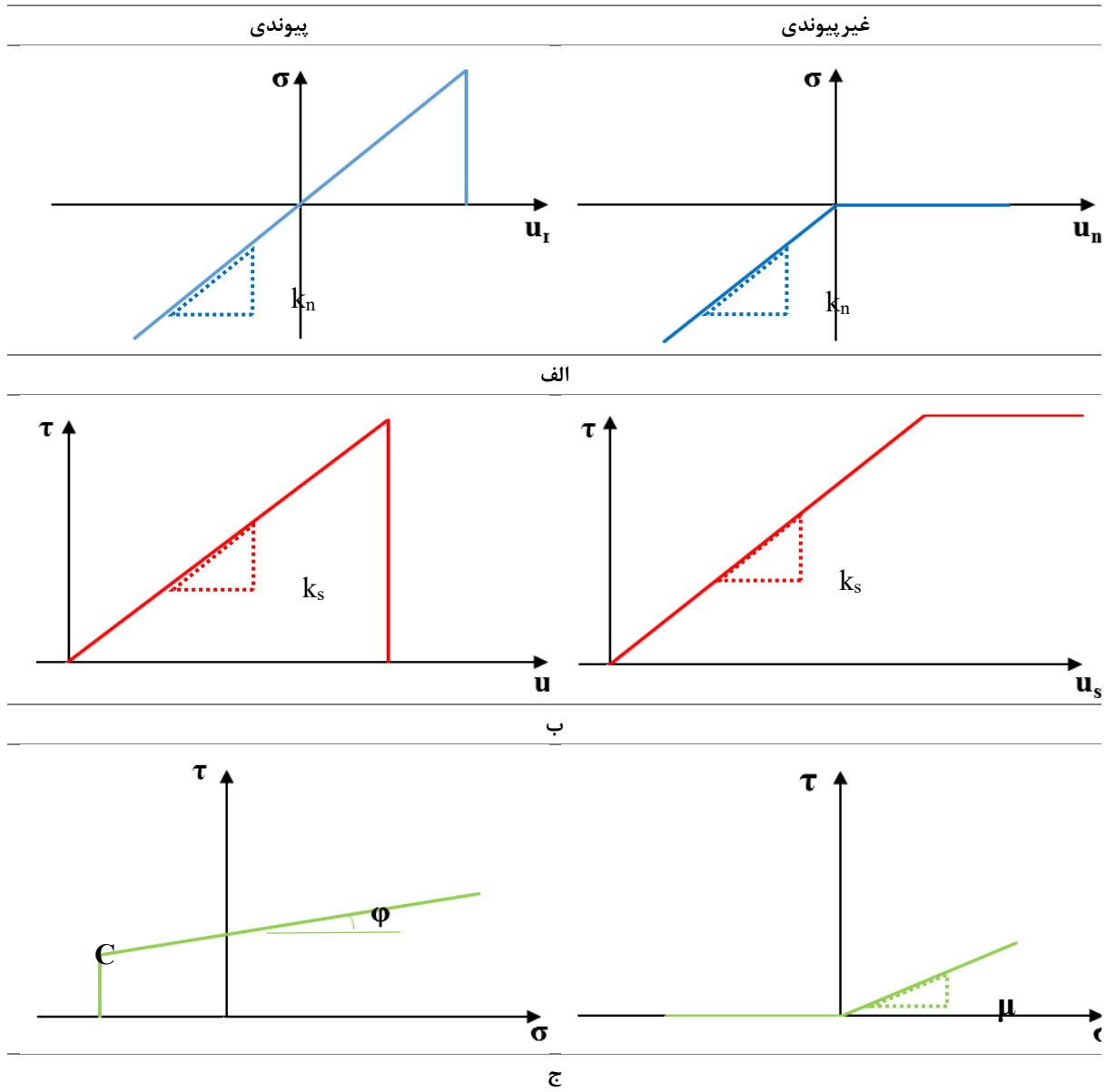
شکل ۴. مدل تماسی اتصال مسطح

Fig. 4. Flat joint contact model

شکل‌های ناشی از توسعه نواحی برشی را با دقت مناسبی نمایش دهد. مرزهای استفاده شده در این پژوهش به صورت دیواره‌های تغییر شکل‌پذیر که یک محیط استوانه‌ای شکل را فراهم کرده‌اند، در نظر گرفته شده است و همچنین صفحات بالایی و پایینی نمونه به صورت صفحات صلب بدون اصطکاک لحاظ شدند که این مدل‌سازی بسیار نزدیک به شرایط آزمایش سه محوری در آزمایشگاه است.

اصطکاک بین ذرات است و در شرایط پیوندی، سختی نرمال و برشی پیوند، مقاومت کششی، چسبندگی و زاویه اصطکاک می‌باشد (شکل‌های ۴ و ۵). به تماس‌هایی که در حین آزمایش در نمونه ایجاد می‌شود، مدل تماس خطی اختصاص می‌یابد.

به منظور شبیه‌سازی دقیق آزمایش‌ها و تطابق بیشتر با شرایط محیط آزمایشگاهی از مرزهای انعطاف‌پذیر به جای مرز جانبی صلب استفاده شده است. استفاده از مرزهای غشایی انعطاف‌پذیر به مدل اجازه می‌دهد که تغییر



شکل ۵. رفتار المان‌ها در شرایط پایندی و غیرپایندی؛ الف) تنش نرمال- جابجایی نرمال، ب) تنش برشی- جابجایی برشی و ج) تنش برشی- تنش نرمال

Fig. 5. The behavior of bonded and non-bonded elements; a) normal stress- normal displacement, b) shear stress- shear displacement, and c) shear stress- normal stress



جدول ۴. برنامه شبیه‌سازی‌های انجام شده

Table 4. Simulations schedule 1.

توضیحات	نسبت تخلخل اولیه	فشار همه جانبه (کیلوپاسکال)	نمونه	آزمایش
زهکشی شده، کرنش کنترل				سه محوری استاتیکی
زهکشی شده، تنش کنترل، یک مرحله بارگذاری- باربرداری به شکل سینوسی شامل ۴۰ تناوب، نسبت تنش تناوبی برابر با ۰/۵	۰/۴۲	۳۰۰	شن گردگوشه سیمانته	سه محوری دینامیکی

آن احتیاج است. این نرم‌افزار، پارامترهای میکرو، خواص هندسی ذرات، ویژگی‌های تماس و شرایط مرزی را به عنوان داده‌های ورودی دریافت می‌کند و با انجام سیکل‌های محاسباتی، خواص ماکروسکوپیکی مانند مقاومت برشی بیشینه و مدول برشی نمونه را به عنوان خروجی ارائه می‌دهد. هیچ روش ساده‌ای برای تعیین پارامترهای میکرو مقیاس بین ذره‌ای وجود ندارد. این پارامترهای میکروسکوپیکی می‌توانند اثر قابل توجهی بر رفتار ماکروسکوپیکی نمونه داشته باشند.

میکروپارامترهایی که یک نمونه سیمانی را در روش اجزای منفصل تعریف می‌کند، پارامترهای ذرات و پیوندهای سیمانی بین آن‌هاست. میکروپارامترهای ذرات شامل چگالی ذرات، نسبت حداکثر به حداقل شعاع ذرات، مدول الاستیک، نسبت سختی نرمال به برشی و ضریب اصطکاک و مدل پیوندی شامل تعداد المان‌ها، مدول الاستیک، نسبت سختی نرمال به برشی، ضریب اصطکاک، ضریب شعاع پیوند، مقاومت کششی، چسبندگی و زاویه اصطکاک یا ضریب اصطکاک داخلی می‌باشد. پارامترهای فیزیکی (مانند نسبت تخلخل) و هندسی (مانند شکل نمونه) نیز از جمله پارامترهای موثر بر نتایج مدل‌سازی‌ها هستند. در ادامه به نحوه کالیبراسیون هر یک از این پارامترها پرداخته می‌شود.

سرعت بارگذاری یکی از پارامترهای مرزی است که از تحلیل حذف می‌شود؛ زیرا در این پژوهش، برای شبیه‌سازی شرایط شبه‌استاتیکی، سرعت اعمال بار به نمونه بسیار پایین در نظر گرفته شده است. پارامترهای محیطی دیگری مانند سختی نرمال دیواره‌ها و پوکی نمونه در تحلیل‌ها در نظر گرفته نشده است. زیرا تمرکز ما بر رابطه بین میکروپارامترهای ذرات و پیوندها با پاسخ‌های ماکروسکوپیکی مشاهده شده است.

آزمایش سه محوری شامل دو مرحله تحکیم و برش است. تحکیم همسان با اعمال فشار همه جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال به صفحه بالایی و دیواره‌های غشایی نمونه در قالب نمودی انجام پذیرفت. فشار همه جانبه در حین آزمایش دائماً کنترل شد (این کار با بهره‌گیری از الگوریتم سروکنترل<sup>۱</sup> انجام شد).

۲-۵- اعمال بار

الف) آزمایش استاتیکی

برای اعمال بار محوری در آزمایش سه محوری استاتیکی در شرایط زهکشی شده، ضمن ثابت نگه داشتن تنش شعاعی، صفحه بالایی با سرعت ثابت  $10^{-6}$  متر بر ثانیه به سمت پایین حرکت کرد.

ب) آزمایش دینامیکی

از آنجایی که آزمایش به صورت تنش کنترل شبیه‌سازی شد، در مرحله برش تناوبی، صفحه بالایی برای اعمال بار محوری در تناوب‌های مختلف به شکل سینوسی به سمت پایین و بالا حرکت کرد. این کار نیز با استفاده از الگوریتم سروکنترل، ضمن ثابت نگه داشتن تنش شعاعی به عنوان تنش محصور کننده (با کنترل حرکت دیواره‌های جانبی)، نمونه را تحت تنش محوری متناوب تک مرحله‌ای در راستای قائم قرار داد. ۴۰ تناوب رفت و برگشتی با تنش ۱۵۰ کیلوپاسکال به نمونه وارد شد.

برنامه شبیه‌سازی‌های انجام شده در جدول ۴ خلاصه شده است.

۲-۶- کالیبراسیون

در نرم‌افزار PFC۳D برای شبیه‌سازی نمونه به خواص میکروسکوپیکی

1 Servo control



جدول ۵. حد بالا، متوسط و پایین میکروپارامترهای مدل اتصال مسطح

Table 5. Upper, mean, and lower limits of flat joint model micro-parameters

میکروپارامتر	نماد	واحد	حد پایین -۱	حد متوسط ۰	حد بالا +۱
مدول الاستیک	$E_c$	GPa	۲۵	۴۵	۶۵
نسبت سختی	$K = k_n/k_s$		۱	۲	۳
ضریب اصطکاک	$\mu$		۰/۳	۰/۶	۰/۹
مقاومت کششی	$\sigma_c$	MPa	۴	۸	۱۲
چسبندگی	C	MPa	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
زاویه اصطکاک	$\varphi$	°	۲۰	۲۵	۳۰

با توجه به مطالب بیان شده، فرآیند کالیبراسیون شامل سعی و خطای پارامترهای میکرومکانیکال زیر می‌شود: مدول الاستیک ذرات و پیوندها، نسبت سختی نرمال به برشی ذرات و پیوندها، ضریب اصطکاک تماس‌های بدون پیوند، مقاومت کششی اتصال مسطح، چسبندگی اتصال مسطح و زاویه اصطکاک اتصال مسطح. مدول و نسبت سختی تماسی ذرات با مدول و نسبت سختی پیوندها برابر در نظر گرفته شد تا تعداد پارامترهای آزاد (عامل مستقل) کاهش یابد و مسئله ساده شود.

کالیبراسیون با استفاده از روش طراحی متعامد تجربی<sup>۱</sup> انجام شد [۲۱] و [۲۰].

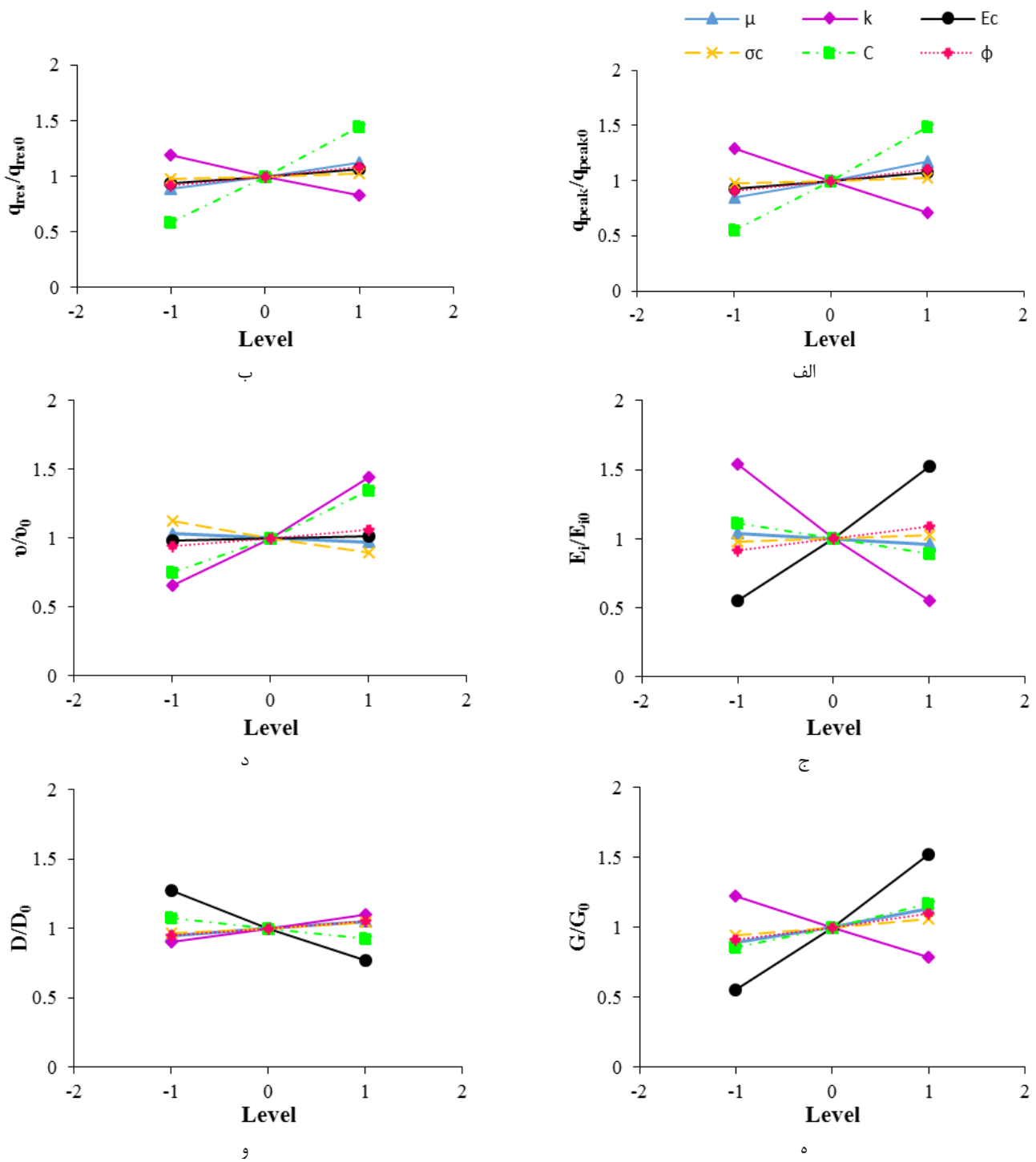
در این روش، اولین گام، تعیین محدوده مقادیر برای هر عامل است. بر اساس نتایج تحقیقات گذشته و پارامترهای مکانیکی مصالح، محدوده مقادیر هر عامل تعیین می‌شود. پس از تعیین محدوده هر عامل، یک طرح آزمایشی غربالگری انجام می‌شود. در این طرح، سه سطح برای هر عامل در نظر گرفته می‌شود (حداکثر، متوسط و حداقل مقدار). در جدول ۵ مجموعه‌ای از میکروپارامترهایی که یک مدل تماس پیوندی را تعریف می‌کنند با کمترین (حد پایین)، متوسط و بیشترین (حد بالا) مقدار آورده شده است.

نتایج شبیه‌سازی‌های نمونه‌های شنی سیمانه (مقاومت برشی بیشینه، مقاومت برشی پسماند، مدول مماسی اولیه، نسبت پواسون، مدول برشی و نسبت میرایی) در سه سطح ارائه شده برای کلیه پارامترهای مدل در جدول ۵ در شکل ۶ آورده شده است.

بر اساس متون فنی، چگالی ذرات اثری بر رفتار مدل ندارد و می‌تواند یک مقدار ثابت (۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) در نظر گرفته شود [۱۳]. برای مقایسه دقیق‌تر نتایج تجربی و عددی، اندازه نمونه در هر دو روش یکسان در نظر گرفته شد. نسبت حداکثر به حداقل شعاع ذرات در مدل نیز تاثیر کمی بر پاسخ‌های شبیه‌سازی‌ها دارد و از معادلات حذف می‌شود. نسبت قطر نمونه به قطر متوسط ذرات روی خواص ماکرومکانیک سنگ‌ها اثر می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های الاستیک، وقتی این نسبت کم است، تغییرات وسیعی دارند ولی وقتی این نسبت بیش از ۵۰ می‌شود، آن‌ها به یک مقدار ثابت همگرا می‌شوند. بنابراین، حداقل مقدار برای این نسبت ۴۵ انتخاب می‌شود تا اطمینان حاصل شود که ویژگی‌های ماکرو به یک مقدار پایدار همگرا می‌شوند [۱۳].

تعداد المان‌های فصل مشترک پیوند در جهت محیطی و شعاعی در مدل تماسی اتصال مسطح اثر بسیار محدودی بر پارامترهای ماکروسکوپیک دارد [۱۳]. بنابراین، از لیست متغیرهای مورد بررسی حذف می‌شود.

در این مقاله، فرض شده است که هیچ ترکی در نمونه سیمانه متراکم وجود ندارد و همه تماس‌ها در مدل تماسی اتصال مسطح از نوع پیوندی هستند. ضریب  $\lambda$  برای نمونه با ۲ درصد سیمان و نسبت آب به سیمان ۰/۶، برابر با ۰/۳ لحاظ شد. با توجه به متوسط قطر ذرات (۹/۵ میلی‌متر) و ضریب شعاع پیوند (۰/۳)، حداکثر فاصله اولیه برای تشکیل پیوند بین ذرات ۱/۴۲ میلی‌متر به دست آمد.

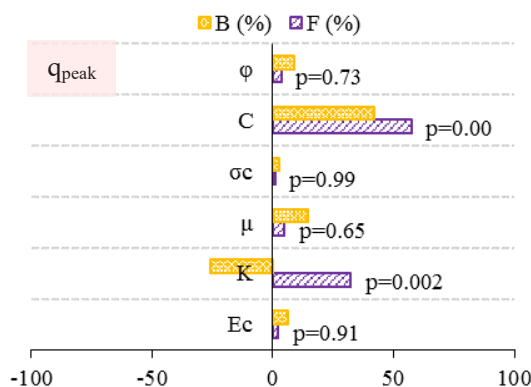


شکل ۶. تغییرات الف) مقاومت برشی بیشینه، ب) مقاومت برشی پسماند، ج) مدول مماسی اولیه، د) نسبت پواسون، ه) مدول برشی و و) نسبت میرایی با سطوح میکروپارامترهای مدل

Fig. 6. The variation of a) peak shear strength, b) residual shear strength, c) initial tangential modulus, d) Poisson's ratio, e) shear modulus and f) damping ratio versus micro-parameters levels

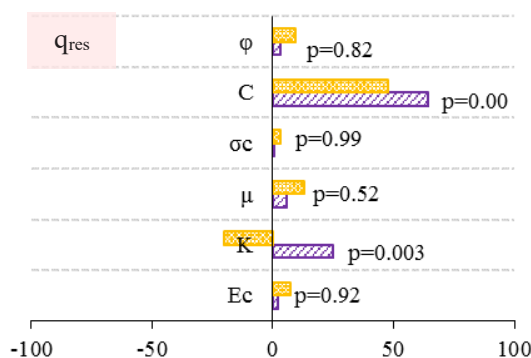
پسماند، مدول مماسی اولیه، نسبت پواسون، مدول برشی و نسبت میرایی به  $C$ ،  $\sigma_c$ ،  $\mu$ ،  $K$ ،  $E_c$  و  $\varphi$ ، تحلیل واریانس در سطح قابل توجه ۵ درصد بر روی پاسخ مدل‌ها انجام شد. در واقع، اثر هر یک از این میکروپارامترها بر پاسخ مدل بر اساس مقادیر  $F$  و  $p$  حاصل از تحلیل واریانس چند متغیره مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار  $p$  (یا  $F$ ) مشخص می‌کند که اثر میکروپارامتر بر پاسخ ماکرو قابل توجه است یا خیر. مقدار  $F$  بیشتر (یا  $p$  کمتر) نشان از اثر بارزتر میکروپارامتر در متغیر است. اگر مقدار  $p$  کمتر یا برابر با ۰/۰۵ باشد، نتیجه می‌شود که متغیر به این عامل حساس است؛ در غیر این صورت، متغیر و عامل، مستقل از یکدیگر تغییر می‌کنند. مقادیر  $F$  و  $p$  عوامل در شکل ۷ برای متغیرهای مفروض آورده شده است.  $B$  تاثیر متغیر مستقل بر وابسته (سهام نسبی هر عامل در پیش‌بینی متغیر وابسته) را نشان می‌دهد که در این شکل نیز مشخص گردیده است. پس از تحلیل حساسیت، تحلیل رگرسیون برای کمی کردن روابط بین متغیرهای وابسته و متغیرهای مستقل موثر به کار رفت که روابط حاصل شده (روابط ۱ تا ۶) در شکل ۷ آورده شده است. مطالعه پارامتریک عمدتاً برای بهینه‌سازی فرآیند کالیبراسیون انجام می‌شود.

مقاومت برشی بیشینه و پسماند به چسبندگی و نسبت سختی وابسته هستند و اثر سایر عوامل کمتر است. با افزایش چسبندگی (از ۲۵ تا ۶۵ گیگاپاسکال) و نسبت سختی (از ۱ تا ۳)، مقاومت حداکثر  $+۰.۱۷۶\%$  و  $-۰.۴۵\%$  و مقاومت پسماند  $+۰.۱۴۸\%$  و  $-۰.۳۱\%$  تغییر می‌کنند. اثر مدول الاستیک و نسبت سختی روی مدول مماسی اولیه قابل توجه است؛ در حالی که سایر پارامترها اثر بارزی ندارند. با تغییر سطوح  $E_c$  و  $K$  از  $-۱$  تا  $+۱$  به ترتیب ۱۷۴ درصد افزایش و ۱۷۷ درصد کاهش در مدول مماسی ایجاد می‌شود. مدول برشی نیز مانند مدول مماسی تحت تاثیر دو عامل  $E_c$  و  $K$  است. با افزایش  $E_c$  از سطح  $-۱$  به  $+۱$  مدول برشی ۱۸۵ درصد افزایش می‌یابد؛ در حالی که با افزایش  $K$ ، مدول برشی ۳۵ درصد کاهش پیدا می‌کند. اثر نسبت سختی و چسبندگی روی نسبت پواسون قابل مشاهده می‌باشد؛ به طوری که افزایش در نسبت سختی و چسبندگی منجر به افزایش ۱۱۹ و ۸۰ درصدی نسبت پواسون می‌شود و سایر عوامل درجه تاثیر بسیار کمتری دارند. نسبت میرایی بیشتر تحت اثر مدول الاستیک بوده و با آن رابطه عکس دارد. برای مشخص کردن حساسیت مقاومت برشی بیشینه، مقاومت برشی



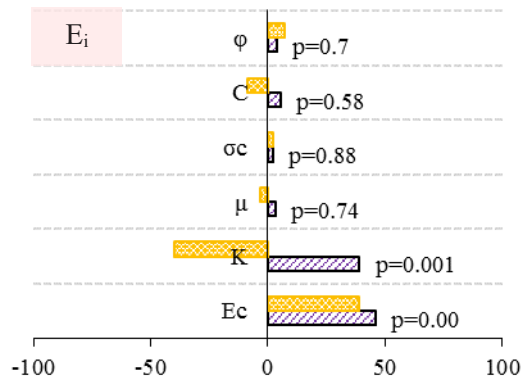
$$q_{peak} [\text{kPa}] = 0.011E_c [\text{MPa}] + 1275\mu - 444K + 10.75\sigma_c [\text{MPa}] + 36.375C [\text{MPa}] + 30\varphi [\text{deg.}] - 3110.077 \quad (۱)$$

الف



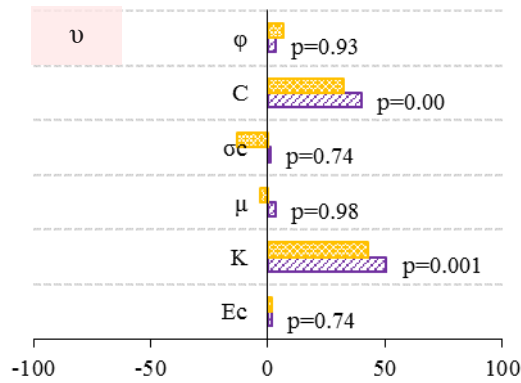
$$q_{res} [\text{kPa}] = 0.006E_c [\text{MPa}] + 555\mu - 177.5K + 6.5\sigma_c [\text{MPa}] + 20.825C [\text{MPa}] + 16\varphi [\text{deg.}] - 1726.231 \quad (۲)$$

ب



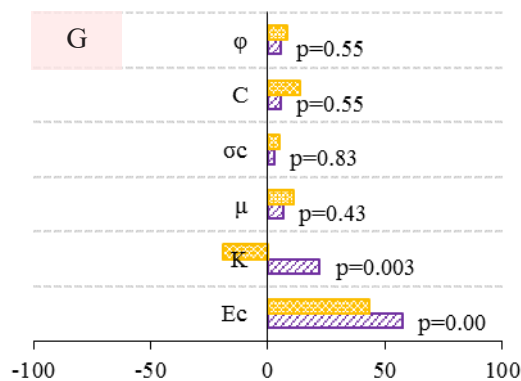
$$E_i [\text{MPa}] = 0.044E_c [\text{MPa}] - 177.5\mu - 444K + 5.5\sigma_c [\text{MPa}] - 5C [\text{MPa}] + 15\phi [\text{deg.}] + 217.865 \quad (۳)$$

ع



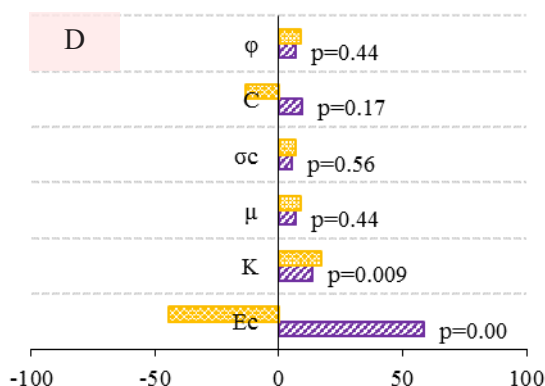
$$\nu = 5 \times 10^{-7} E_c [\text{MPa}] - 5 \times 10^{-2} \mu + 0.125K - 9 \times 10^{-3} \sigma_c [\text{MPa}] + 5 \times 10^{-3} C [\text{MPa}] + 4 \times 10^{-3} \phi [\text{deg.}] - 0.42 \quad (۴)$$

و



$$G [\text{GPa}] = 4 \times 10^{-3} E_c [\text{MPa}] + 55\mu - 19.5K + 1.25\sigma_c [\text{MPa}] + 0.7C [\text{MPa}] + 1.7\phi [\text{deg.}] - 198.154 \quad (۵)$$

گ



$$D[\%] = 3\mu + 1.15K + 0.113\sigma_c [\text{MPa}] - 4.5 \times 10^{-2} C [\text{MPa}] + 0.12\phi [\text{deg.}] + 20.454 \quad (6)$$

9

شکل ۷. تحلیل حساسیت و رگرسیون متغیرهای وابسته (الف) مقاومت برشی پیشینه، (ب) مقاومت برشی پسماند و (ج) مدول مماسی، (د) نسبت پواسون، (ه) مدول برشی و (و) نسبت میرایی) و مستقل

Fig. 7. Sensitivity analysis and regression analysis of dependent variables (a) peak shear strength, b) residual shear strength, c) initial tangential modulus, d) Poisson's ratio, e) shear modulus and f) damping ratio and independent variables

که در این پژوهش، آزمایش کششی انجام نشده است، تغییر این عامل مستقل از متغیرهای بحث شده می‌باشد. انتظار می‌رفت که زاویه اصطکاک پیوند و همچنین ضریب اصطکاک تماسی از جمله عوامل موثر در متغیرهای ماکروسکوپیک نمونه باشند ولی نتایج به دست آمده از تحلیل واریانس نشان می‌دهد که متغیرها نسبت به این دو عامل نام برده، حساس نیستند.

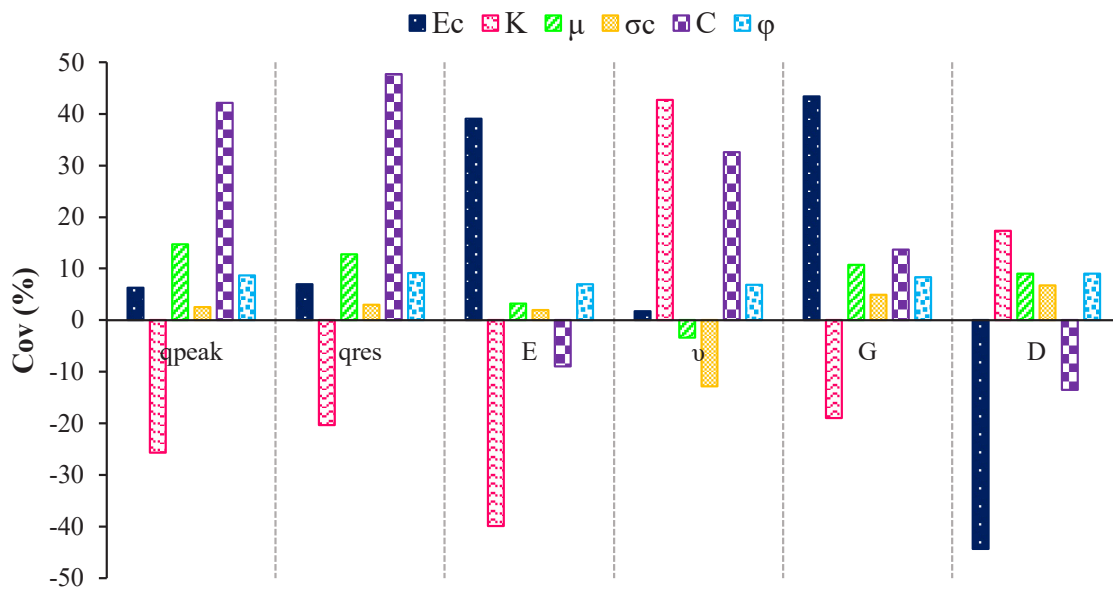
کوواریانس<sup>۱</sup> یا ضریب تغییرات، شاخصی است که میزان هم‌مانگی یا تغییرات بین متغیر و عامل را نشان می‌دهد. اگر جهت تغییرات بین متغیر و عامل یکسان باشد، مقدار کوواریانس مثبت و در صورتی که این دو در جهت عکس یکدیگر تغییر کنند، مقدار کوواریانس منفی خواهد بود. در شکل ۸ تغییرپذیری ویژگی‌های ماکروسکوپیک نمونه برای پارامترهای میکرو در قالب ضریب تغییرات بیان می‌شود.

ضریب تغییرات، میزان پراکندگی به ازای یک واحد از میانگین را بیان می‌کند. هر چه ضریب تغییرات میکروپارامتری بیشتر باشد، میزان پراکندگی داده‌های آن از مقدار میانگین بیشتر بوده و سهم بیشتری در تغییر ماکروپارامتر دارد. به عبارتی، تغییر در پاسخ ماکرو بیشتر از تغییر آن میکرو پارامتر نشات گرفته و اثر غالب‌تری نسبت به سایر میکروپارامترها دارد. با توجه به مطالب بیان شده در قسمت‌های قبلی، مجموعه‌ای از مناسب‌ترین میکروپارامترها به دست آمده است (جدول ۶).

از رگرسیون خطی برای تعیین مناسب‌ترین روابط بین میکروپارامترها و ویژگی‌های ماکرو متفاوت استفاده می‌گردد. روابط به دست آمده می‌تواند برای تخمین پارامترهای میکرو مورد نیاز برای تحلیل ژئومکانیکال مصالح پیوندی به کار رود.

همانطور که انتظار می‌رفت، عامل چسبندگی پیوندی و نسبت سختی در سطح معناداری برای متغیرهای مقاومت برشی پیشینه و پسماند قرار دارند و مقادیر p برای سایر عوامل بیش از ۵ درصد است. مقدار p عوامل نسبت سختی و مدول الاستیک برای متغیرهای مدول مماسی و مدول برشی کمتر از سطح تعریف شده (۰/۰۵) می‌باشد. به عبارتی، مدول مماسی و مدول برشی نمونه‌ها با مدول الاستیک و نسبت سختی نرمال به برشی مدل در ناحیه الاستیک که هنوز گسیختگی رخ نداده، تعیین می‌شوند. مشاهده می‌شود که مقاومت کششی، چسبندگی، زاویه اصطکاک پیوند و ضریب اصطکاک تماس اثری بر مدول مماسی و مدول برشی نمونه ندارند. نسبت پواسون عمدتاً تحت اثر نسبت سختی و چسبندگی است (مقدار F به ترتیب برابر با ۵۰ و ۴۰ درصد). مقدار F برای عامل مدول الاستیک در متغیر نسبت میرایی ۵۸ درصد می‌باشد که در سطح معناداری قرار دارد.

با مرور در سایر پژوهش‌ها [۱۹] دریافت شد که عامل مقاومت کششی پیوند عمدتاً در مقاومت کششی ماکروسکوپیک نمونه موثر است و از آنجایی



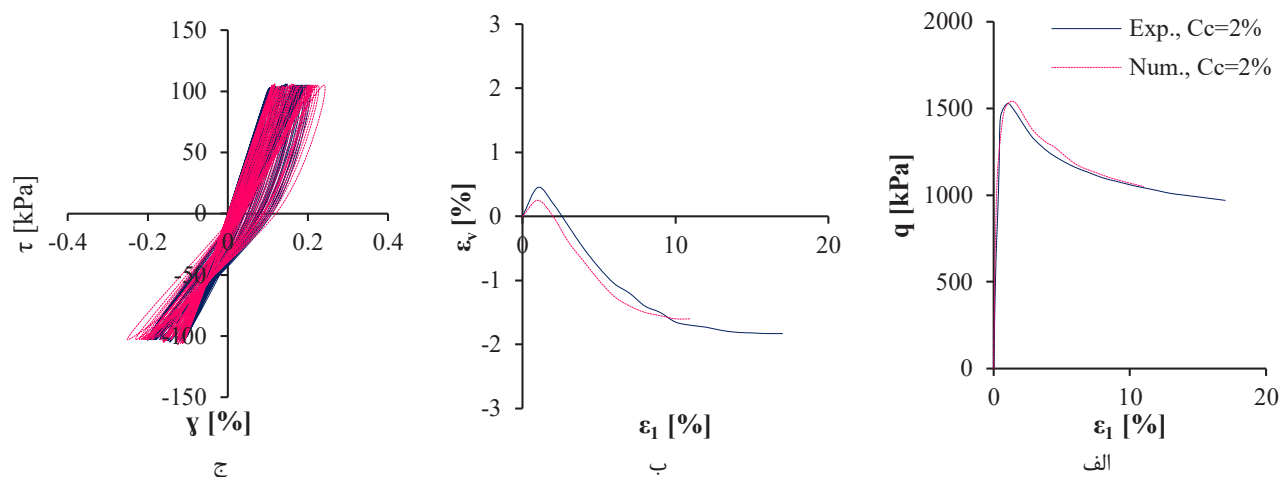
شکل ۸. ضریب تغییرات عوامل

Fig. 8. Covariance of parameters

جدول ۶. پارامترهای کالیبره شده مدل

Table 6. Calibrated model parameters

نام پارامتر	واحد	مقدار
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	۲۶۵۰
$N_r$	-	۱
$N_a$	-	۳
$\lambda$	-	۰/۳
$g_0$	mm	۰
$g$	mm	۱/۷۸
$\Phi_B$	-	۱
$E_c$	GPa	۴۵
$k$	-	۲
$\mu$	-	۰/۶
$\sigma_c$	MPa	۸
$C$	MPa	۱۰۰
$\varphi$	°	۲۵



شکل ۹. نمودارهای الف) تنش انحرافی- کرنش محوری، ب) کرنش حجمی- کرنش محوری و ج) تنش برشی- کرنش برشی نمونه شن سیمانته حاصل از مدل سازی های عددی و آزمایش های تجربی

Fig. 9. a) Deviator stress- axial strain, b) volumetric strain- axial strain, and c) shear stress- shear strain curves of the experimentally and numerically cemented gravelly specimens

کمک مدل اتصال سطح را کنترل می کنند، عبارتند از: مدول الاستیک پیوند (یا ذرات)، مقاومت کششی پیوند، چسبندگی پیوند، زاویه اصطکاک پیوند، ضریب اصطکاک تماسی، نسبت سختی نرمال به سختی برشی. از آنجایی که تعداد میکروپارامترهای مورد نیاز برای تعریف مدل تماسی اتصال سطح زیاد بوده و به سادگی در آزمایشگاه قابل اندازه گیری نیستند و نمی توان مستقیماً رابطه ای بین آن ها و پارامترهای فیزیکی قابل اندازه گیری مصالح را به دست آورد، از روش تحلیل واریانس استفاده شده که در آن، اثر پارامترهای مدل به صورت منفرد روی ویژگی های ماکرو ارزیابی می شود. با تحلیل حساسیت و تحلیل رگرسیون نتایج شبیه سازی ها، ارتباط بین ویژگی های ماکرو نمونه و میکروپارامترهای مدل استخراج می گردد.

در این پژوهش، پس از انجام آزمایش های سه محوری استاتیکی و دینامیکی در آزمایشگاه بر روی شن سیمانته، به شبیه سازی آن ها با نرم افزار PFC۳D (نسخه ۶) پرداخته شد. سپس موثرین میکروپارامترها در مقاومت برشی بیشینه، مقاومت برشی پسماند، مدول مماسی اولیه، نسبت پواسون، مدول برشی و نسبت میرایی نمونه های شبیه سازی شده، با روش تحلیل حساسیت مشخص گردید. دریافت شد که مقاومت برشی بیشینه و پسماند عمدتاً به چسبندگی و نسبت سختی وابسته هستند. اثر مدول الاستیک و نسبت سختی روی مدول مماسی اولیه و مدول برشی قابل توجه است. نسبت پواسون تحت اثر نسبت سختی و چسبندگی می باشد. نسبت میرایی بیشتر به مدول الاستیک بستگی دارد. پس از تحلیل حساسیت، تحلیل رگرسیون

### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۹ نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی (با داده های جدول ۶) در مقایسه با آزمایش های آزمایشگاهی (شکل ۳) نمایش داده شده است. مشاهده می شود که مدل عددی به خوبی توانسته رفتار شکننده شن سیمانته را ارائه دهد (شیب نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری حاصل از دو روش بر هم منطبق هستند) و در فاز کرنش نرم شوندگی نیز با دقت عمل کرده و به صورت قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. استفاده از غشای انعطاف پذیر در مدل اجازه تغییر شکل های جانبی نمونه را صادر کرده و نمودار کرنش حجمی- کرنش محوری به دست آمده از دو روش سازگاری تقریباً مناسبی با هم نشان می دهند. نمودار تنش برشی- کرنش برشی شن سیمانته حاصل از مدل عددی و آزمایش تجربی با دقت قابل قبولی بر هم منطبق هستند و حداکثر مقاومت برشی دینامیکی و کرنش برشی نمونه ها به یکدیگر بسیار نزدیک است.

### ۴- نتیجه گیری

برای شبیه سازی رفتار خاک های دانه ای سیمانته در روش اجزای منفصل از مدل تماسی پیوندی "اتصال سطح" بین ذرات استفاده شده است که یک پیوند را به صورت یک فصل مشترک بین دو سطح از ذره تعریف می کند. این فصل مشترک به المان هایی تقسیم می شود که می توانند پیوندی یا غیرپیوندی اصطکاکی باشند. پارامترهایی که نمونه سیمانی مدل شده به



$q_{res}$	مقاومت برشی پسماند، $N/m^2$
$u_n$	جابجایی نرمال، mm
$u_s$	جابجایی مماسی (برشی)، mm

#### علائم یونانی

$\gamma$	کرنش برشی، %
$\gamma$	وزن مخصوص خاک محل، $N/m^3$
$\gamma_d$	وزن مخصوص خشک، $N/m^3$
$\gamma_d^{min}$	وزن مخصوص خشک، $N/m^3$
$\gamma_d^{max}$	وزن مخصوص خشک، $N/m^3$
$\varepsilon$	کرنش محوری، %
$\varepsilon_v$	کرنش حجمی، %
$\lambda$	ضریب شعاع پیوندی
$\mu$	ضریب اصطکاک بین ذرات
$\nu$	نسبت پواسون
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\sigma$	تنش نرمال، $N/m^2$
$\sigma_c$	مقاومت کششی پیوند اتصال مسطح، $N/m^2$
$\tau$	تنش برشی، $N/m^2$
$\varphi$	زاویه اصطکاک بین ذرات در پیوند اتصال مسطح، °
$\varphi_B$	نسبت تعداد تماس‌های پیوندی به تعداد کل تماس‌ها
$\omega$	درصد رطوبت، %

#### منابع

- [1] E. Hoek, C. D. Martin, Fracture initiation and propagation in intact rock – A review, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(4) (2014) 287–300.
- [2] D. O. Potyondy, A flat-jointed bonded-particle material for hard rock. *Proc., 46th U.S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium*, Chicago, American Rock Mechanics Association, Alexandria, VA, (June 2012).
- [3] B. Yang, Y. Jiao, S. Lei, A study on the effects of microparameters on macroproperties for specimens created by bonded particles, *Engineering Computations*, 23(6) (2006) 607-631.
- [4] J. Yoon, Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation, *International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(6) (2007) 871–889.

برای کمی کردن روابط بین متغیرهای وابسته و متغیرهای مستقل موثر به کار رفت. بهره‌گیری از روابط مستخرج در پیش‌بینی میکروپارامترهای مدل می‌تواند مفید واقع شود.

برای کالیبراسیون میکروپارامترها توصیه می‌شود، ابتدا مدول الاستیک بر اساس نسبت میرایی تعیین شود. سپس نسبت سختی با هماهنگی با مدول مماسی و مدول برشی مصالح مشخص گردد. در مرحله بعدی، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک پیوندی نیز با مقایسه مقادیر مقاومت برشی بیشینه و پسماند و نسبت پواسون حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی حاصل شود. سایر پارامترها مانند مقاومت کششی پیوندی با آزمایش‌های مقاومت کششی قابل تعیین است که خارج از حوزه پژوهش این مقاله می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های عددی و تجربی نشان می‌دهد که سازگاری مناسبی بین نتایج وجود دارد. هر چه دقت در انتخاب مقادیر برای میکروپارامترها بیشتر باشد، خروجی‌های روش DEM نیز به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر خواهد بود.

#### ۵- فهرست علائم

##### علائم انگلیسی

$C$	چسبندگی پیوند اتصال مسطح، $N/m^2$
$C_c$	ضریب انحنا
$C_u$	ضریب یکنواختی
$D$	نسبت میرایی، %
$D_{50}$	اندازه متوسط ذرات، mm
$E_c$	مدول الاستیک ذرات (پیوند)، $N/m^2$
$E_i$	مدول مماسی اولیه، $N/m^2$
$G$	مدول برشی، $N/m^2$
$G_s$	چگالی ویژه
$g$	حداکثر فاصله‌ای که امکان تشکیل پیوند سیمانی بین ذرات وجود دارد، mm
$g_0$	فاصله اولیه بین ذرات، mm
$k_n$	سختی نرمال تماسی، N/m
$k_s$	سختی برشی تماسی، N/m
$K=k_n/k_s$	نسبت سختی نرمال به برشی تماس
$N_a$	تعداد المان‌های فصل مشترک در تماس پیوندی اتصال مسطح در جهت محیطی
$N_r$	تعداد المان‌های فصل مشترک در تماس پیوندی اتصال مسطح در جهت شعاعی
$q_{peak}$	مقاومت برشی بیشینه، $N/m^2$

- approach to the calibration of micro-parameters for the flat-jointed bonded particle model, *Geomechanics and Engineering*, 16(5) (2018) 471-482.
- [14] U. Castro-Filgueira, L.R. Alejano, J. Arzúa, D.M. Ivars, Sensitivity analysis of the micro-parameters used in a PFC analysis towards the mechanical properties of rocks, *ISRM European Rock Mechanics Symposium-EUROCK 2017*, Ostrava, Czech Republic, (June 2017), 191:488–495.
- [15] C. Shi, W. Yang, J. Yang, X. Chen, Calibration of micro-scaled mechanical parameters of granite based on a bonded-particle model with 2D particle flow code, *Granular Matter*, 21 (2019) 38-50.
- [16] Itasca Consulting group Inc. Particle Flow Code in Three Dimensions (PFC3D) (2018) Version 6.00. Minneapolis, USA.
- [17] S. Wu, X. Xu, A study of three intrinsic problems of the classic discrete element method using flat-joint model, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(5) (2016) 1813-1830.
- [18] J. A. Vallejos, J. M. Salinas, A. Delonca, D. Mas Ivars, Calibration and verification of two bonded-particle models for simulation of intact rock behavior, *International Journal of Geomechanics*, 17(4) (2017) 1-11.
- [19] M. Bahaaddini, A. M. Sheikhpourkhani, H. Mansouri, Flat-joint model to reproduce the mechanical behaviour of intact rocks, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2019) 1-22.
- [20] H. Wu, B. Dai, G. Zhao, Y. Chen, Y. Tian, A novel method of calibrating micro-scale parameters of PFC model and experimental validation, *Applied Sciences*, 10(9) (2020) 1-20.
- [21] S. Yu, M. Jia, J. Zhou, C. Zhao, L. Li, Micro-Mechanism of spherical gypsum particle breakage under ball–plane contact condition, *Applied Sciences*, 9(22) (2019) 1-16.
- [5] A. S. Tawadrous, D. DeGagnã, M. Pierce, D. M. Ivars, Prediction of uniaxial compression PFC3D model micro-properties using artificial neural networks, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Géoméchanics*, 33(18) (2009) 1953–1962.
- [6] K. J. Hanley, C. O’Sullivan, J. Oliveira, K. Cronin, E.P. Byrne, Application of Taguchi methods to DEM calibration of bonded agglomerates, *Powder Technology*, 210(3) (2011) 230–240.
- [7] L. Cheung, C. O’Sullivan, M. Coop, Discrete element method simulations of analogue reservoir sandstones, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 63 (2013) 93–103.
- [8] M. Sun, H. Tang, X. Hu, Y. Ge, S. Lu, Microparameter prediction for a triaxial compression PFC3D model of rock using full factorial designs and artificial neural networks, *Geotechnical and Geological Engineering*, 31 (2013) 1249–1259.
- [9] X. Ding, L. Zhang, H. Zhu, Q. Zhang, Effect of model scale and particle size distribution on PFC3D simulation results, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47 (2013) 2139–2156.
- [10] P. Y. Chen, Effects of microparameters on macroparameters of flat-jointed bonded-particle materials and suggestions on trial-and-error method, *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(2) (2017) 663-677.
- [11] Q. Zou, B. Lin, Modeling the relationship between macro- and meso-parameters of coal using a combined optimization method, *Environmental Earth Sciences*, 76 (2017) 479–498.
- [12] M. Wang, P. Cao, Calibrating the micromechanical parameters of the PFC2D(3D) models using the improved simulated annealing algorithm, *Mathematical Problems in Engineering*, (2017) 1–11.
- [13] C. Zhou, C. Xu, M. Karakus, J. Shen, A systematic

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*N. Mahbubi Motlagh, A. R. Mahboubi Ardakani, A. Noorzad, Evaluation of the effect of micro-parameters on the macroscopic properties of cemented granular soils, Amirkabir J. Civil Eng., 54(11) (2023) 4253-4270.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2022.20556.7462](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20556.7462)

