



شبیه‌سازی رفتار مکانیکی ماسه تیز گوشه سیمانته تحت آزمون فشار همه‌جانبه به روش اجزای مجزا

معین الرضا قندهاری، سید احسان سیدی حسینی‌نیا*، سیاوش هنری

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

کلمات کلیدی:

ماسه سیمانته
ذرات تیز گوشه
آزمون فشار همه‌جانبه
اجزای مجزا
مدل پیوند تماسی

خلاصه: تشکیل پیوند میان دانه‌های خاک به کمک عامل سیمانی باعث می‌شود تا خاک رفتاری متفاوت نسبت به خاک غیرسیمانته داشته باشد. در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی عددی به روش اجزای مجزا، تأثیر مقاومت پیوند بر روی رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای سیمانته در آزمون فشار همه‌جانبه بررسی شده است. برای شبیه‌سازی پیوند، از یک مدل پیوند تماسی استفاده شده که در آن، مقاومت پیوند در برش و کشش یکسان است. شرایط تشکیل پیوند در این مدل پیوند تماسی، وجود تماس فیزیکی بین ذرات و حداقل همپوشانی آن‌ها است. در شبیه‌سازی آزمون فشاری همه‌جانبه، از سه مقاومت پیوند مختلف در تهیه نمونه‌ها استفاده شده و این نمونه‌ها تا سطح تنش ۶۰ مگاپاسکال بارگذاری شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد افزایش مقاومت پیوند باعث می‌شود تمایل نمونه سیمانته به تراکم یا کاهش نسبت تخلخل در مقایسه با نمونه غیرسیمانته، کاهش پیدا کند. همچنین، تنش مرتبط با نقاط تسلیم اولیه و ثانویه با افزایش مقاومت پیوند، افزایش یافته است. با بررسی شکست پیوند در طول آزمون مشاهده می‌شود که در فشار همه‌جانبه‌ای که تسلیم اولیه در نمونه‌های سیمانته رخ می‌دهد، شکست پیوند با نرخ شدیدی اتفاق می‌افتد. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سهم تنشی که پیوندها از کل تنش اعمالی تحمل می‌کنند، با افزایش کرنش حجمی، افزایش پیدا می‌کند. همچنین هرچه مقاومت پیوند نمونه بیشتر باشد، مقدار تنش تحمل شده توسط پیوندها افزایش پیدا می‌کند. در مطالعه حاضر، دقت و صحت نتایج شبیه‌سازی با مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است.

۱- مقدمه

خاک سیمانته به گونه‌ای از خاک گفته می‌شود که ذرات دانه‌ای آن بوسیله یک عامل به یکدیگر متصل شده‌اند. این اتصال میان دانه‌ها در طبیعت می‌تواند به دلایل گوناگون ایجاد شود. به طور مثال، حضور عواملی همچون سیلیکا، سیلیکات آبدار، اکسید آهن آبدار، رس و سیلت در بافت خاک، باعث به وجود آمدن پیوند میان ذرات دانه‌ای این نوع از خاک‌ها می‌شوند [۱]. برای نمونه، می‌توان به ماسه کربناته با رسوب کربنات کلسیم و ماسه سنگ کوارتزی که به دلیل تولید اکسید آهن از طریق جریان آب از درون خاک بوجود می‌آید، اشاره کرد.

بررسی رفتار خاک دانه‌ای سیمانته که در بعضی از جوامع مهندسی به عنوان خاک مشکل‌ساز شناخته می‌شود [۲]، به دلیل تفاوت رفتاری آن‌ها با خاک دانه‌ای تمیز، مورد توجه پژوهش‌های مختلف قرار گرفته است. علت این رفتار منحصر به فرد، در ریزساختار این نوع از خاک است. پیوندهای

سیمانی در رابطه میان تنش و کرنش و پارامترهای مقاومتی خاک، نقش تأثیرگذاری دارند؛ بطوریکه رفتار این خاک علاوه بر تاریخچه تنش و وزن مخصوص (تراکم)، تحت تأثیر مقاومت پیوند نیز است. به این دلیل، بسیار مهم است که تأثیر مقاومت پیوند بر روی رفتار اینگونه از خاک‌ها مطالعه شود.

در پژوهش‌های آزمایشگاهی، مطالعه بر روی ماسه سیمانته را می‌توان به دو صورت انجام داد. صورت اول نمونه‌هایی است که از طبیعت به صورت دست نخورده (مثلاً به روش بلوکی) مانند پژوهش کلاف و همکاران [۱] اخذ می‌شود. شکل دوم مطالعه، روش متداول‌تری است که در آن نمونه‌ها به طور مصنوعی با محتوای سیمانی مختلف به روش‌هایی همچون انتشار گاز^۱ یا مخلوط کردن، در آزمایشگاه ساخته می‌شوند. پژوهش‌های صورت گرفته بر روی ماسه سیمانته را می‌توان به دو دسته آزمایشگاهی و عددی تقسیم بندی کرد. در آزمایشگاه، عمده آزمون‌های انجام شده بر روی این خاک، آزمون



فشاری محصور نشده، آزمون فشار همه‌جانبه و آزمون سه محوری زهکشی شده و نشده بوده است. عمده کاربرد آزمون فشاری محدود نشده، طبقه بندی نمونه‌های سیمانته بوده است [۳-۵]. در پژوهش‌های مختلف دیگر [۱، ۳، ۶-۱۷]، از آزمون سه محوری برای بررسی پارامترهای مکانیکی این خاک در شرایط زهکشی شده و نشده استفاده شده است. در این پژوهش‌ها، مواردی همچون پوش گسیختگی [۱۵، ۱۸، ۱۹]، زاویه اصطکاک داخلی [۱، ۱۱، ۱۵، ۱۹]، اتساع نمونه‌ها [۷، ۱۴، ۱۷]، مدول تماسی [۱، ۶، ۱۹] و بهسازی خاک‌ها [۲۰] بررسی شده‌اند. همچنین رفتار دینامیکی این نوع خاک در آزمون‌های آزمایشگاهی [۲۱، ۲۲] مطالعه شده و پژوهش‌هایی [مانند ۲۳]، به بررسی روانگرایی در این خاک پرداخته‌اند. در زمینه آزمون فشار همه‌جانبه تحقیقات بسیار اندکی [۹، ۱۵، ۲۴، ۲۵] بر روی خاک ماسه‌ای سیمانته انجام شده است. رُتا و همکاران [۲۴] در پژوهش خود به بررسی اثر به وجود آمدن پیوند بر روی رفتار خاک ماسه‌ای سیمانته پرداختند. در این پژوهش، اثر محتوای سیمانی، نسبت تخلخل عمل‌آوری و فشار عمل‌آوری بر روی تنش تسلیم اولیه و سختی نمونه‌ها بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان داده است هرچه محتوای سیمان نمونه‌ها افزایش پیدا کند، مقدار تنش تسلیم اولیه نیز افزایش داشته است. ماری و همکاران [۱۵] به بررسی اثر محتوای سیمان و نسبت تخلخل اولیه بر روی رفتار ماسه سیمانته پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند با افزایش محتوای سیمان، مقدار و نرخ تغییرات نسبت تخلخل کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، تراکم پذیری نمونه‌های سیمانته تحت فشار همه‌جانبه با افزایش محتوای سیمان کاهش پیدا کرده است.

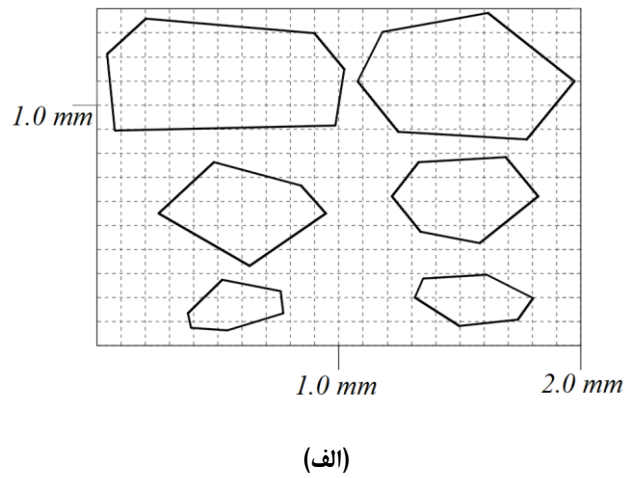
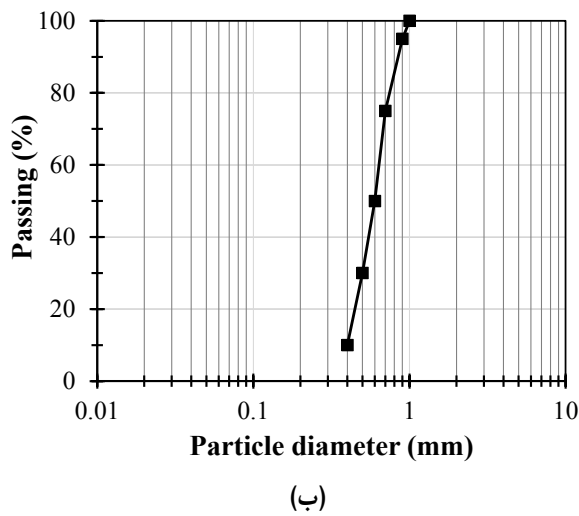
از یک طرف، به دلیل محدودیت‌های موجود در مطالعات آزمایشگاهی و از طرف دیگر، بهبود توان محاسباتی رایانه‌ها در انجام تحلیل‌های مهندسی، بسیاری از پژوهشگران در سال‌های اخیر از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی رفتار ماسه سیمانی استفاده کرده‌اند. با کمک این روش‌ها، برخی از محدودیت‌های آزمایشگاهی نظیر مشکلات ساخت نمونه، زمان بر بودن عمل‌آوری و قابلیت اعمال تنش‌های بسیار بزرگ به نمونه، تا حدودی رفع شده است. در بین روش‌های عددی موجود، روش اجزای مجزا به دلیل توانایی شبیه‌سازی جدا از هم دانه‌های خاک، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این روش توده‌ی خاک به صورت ذرات جدا از هم شبیه‌سازی شده و فرض می‌گردد که نیروها از طریق تماس ذرات منتقل شود. این روش در ابتدا توسط کاندال [۲۶] برای بررسی رفتار سنگ‌های دارای درز و ترک توسعه یافت و سپس توسط کاندال و استرک [۲۷] برای شبیه‌سازی محیط‌های خاکی توسعه یافت. در پژوهش حاضر، از روش اجزای مجزا برای شبیه‌سازی

نمونه‌ی ماسه‌ای سیمانته تحت آزمون فشار همه‌جانبه استفاده شده است. در پژوهش‌های عددی متنوعی، از روش اجزای مجزا برای بررسی رفتار ماسه سیمانته استفاده شده است. در ادبیات فنی، بیشتر شبیه‌سازی‌ها ذرات دانه‌ای خاک به صورت دایروی یا کروی شبیه‌سازی شده است در صورتیکه در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی واقعی‌تر رفتار خاک، ذرات دانه‌ای خاک به صورت چند گوشه در نظر گرفته شده‌اند. پژوهش‌های محققان قبلی را می‌توان به شبیه‌سازی دو بُعدی [۲، ۲۸-۳۲] و سه بُعدی [۳۱، ۳۳-۳۷] تقسیم بندی کرد. در پژوهش‌های دو بُعدی، آزمون‌های فشار همه‌جانبه [۲]، آزمون تحکیم یک بُعدی [۳۰] و آزمون دو محوری [۱۶، ۲۹، ۳۲] و در پژوهش‌های سه بُعدی، آزمون سه محوری [۳۱، ۳۳-۳۷] شبیه‌سازی شده است. در اکثر شبیه‌سازی‌های انجام شده، مقاومت پیوند میان ذرات به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است و پژوهش‌های اندکی مانند پژوهش مرجع [۱۶]، به بررسی اثر محتوای سیمانی بر روی رفتار مکانیکی پرداخته‌اند. عمده تفاوت‌های این پژوهش‌ها در نحوه‌ی شبیه‌سازی پیوند میان ذرات بوده است. برای شبیه‌سازی پیوند در این پژوهش‌ها از مدل‌های تماسی مانند مدل تماسی موازی [۳۳، ۳۴، ۳۶]، مدل تماسی سری [۳۳، ۳۴] و استفاده از میله کشسان دارای سختی [۳۷] استفاده شده است. در اکثر این پژوهش‌ها ذرات ماسه به صورت کروی [۳۵] و یا دایروی [۲] شبیه‌سازی شده‌اند.

در پژوهش حاضر، با کمک از روش عددی اجزای مجزا به مطالعه رفتار مکانیکی ماسه سیمانته با ذرات چندگوشه تحت آزمون فشار همه‌جانبه با مقاومت پیوندهای مختلف پرداخته می‌شود. برای شبیه‌سازی پیوند میان ذرات از مدل تماسی پیوند استفاده شده و فرض شده است که این پیوندها در برشی و کشش مقاومت یکسانی دارند. در این مطالعه‌ی عددی مواردی همچون رفتار مکانیکی نمونه‌ی سیمانته و غیرسیمانته، شکست پیوند در نمونه سیمانته، مدول تسلیم اولیه و ثانویه و مقاومت ماتریس سیمانی بررسی می‌شود.

۲- مصالح

در طبیعت، ذرات ماسه غالباً چند ضلعی هستند. در پژوهش حاضر، جهت لحاظ رفتار بهتر و نزدیک‌تر به واقعیت خاک ماسه‌ای، هندسه ذرات به صورت چند گوشه شبیه‌سازی شده‌اند. شکل ۱ مشخصات فیزیکی ذرات شامل هندسه و دانه بندی نمایش داده شده است. مطابق شکل ۱-الف هندسه ذرات در نظر گرفته شده، بصورت شش تا هشت ضلعی بوده و قطر اصلی بیضی محاط شده این ذرات در بازه ۰/۴ الی یک میلی‌متر انتخاب



شکل ۱. مشخصات هندسی مصالح مورد استفاده و دانه‌بندی نمونه‌ها

Fig. 1. The geometry of particles and particle size distribution curve

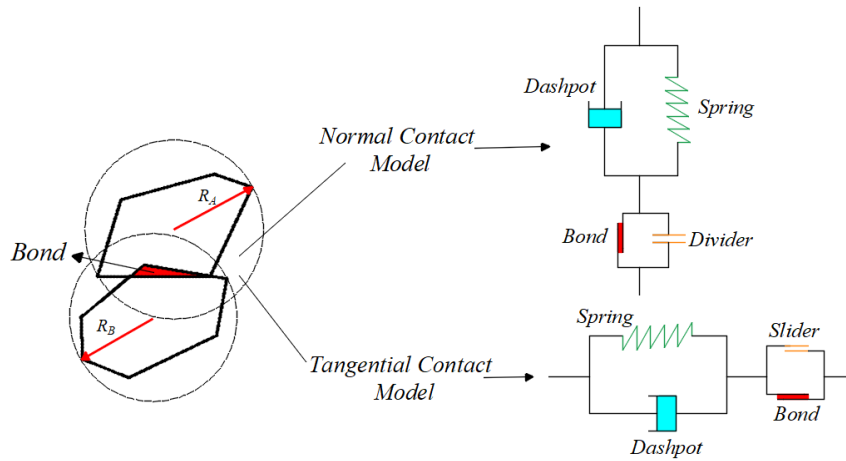
[۴۰]، مطالعه تأثیر ناهمسانی بر رفتار مکانیکی محیط دانه‌ای [۴۱-۴۴] و ناپایداری مصالح دانه‌ای اشباع [۴۵] توسعه یافته است.

در برنامه BDL2D، از یک مدل پیوند تماسی برای شبیه‌سازی پیوند میان ذرات استفاده شده است. شکل ۲، اجزای این مدل پیوند تماسی را نشان می‌دهد. این مدل تماسی قبلاً توسط جیانگ و همکاران [۲] برای شبیه‌سازی ذرات دایروی شکل بکار گرفته شده که در این پژوهش، با اعمال تغییراتی در آن برای شبیه‌سازی ذرات چند گوشه، استفاده شده است. این مدل پیوند تماسی شامل دو بخش مدل پیوند تماسی نرمال و مدل پیوند تماسی مماسی است که در آن برای شبیه‌سازی تماس بین ذرات از فنر و میراگر و برای پیوند از یک المان صلب خمیری استفاده شده است. فنر، رفتار کشسان قبل از گسیختگی را بیان می‌کند و میراگر، نقش زایل‌کننده انرژی را دارد. در مدل پیوند تماسی نرمال، یک جدا کننده و در مدل پیوند تماسی مماسی، یک لغزنده با پیوند به صورت موازی متصل شده است. علت حضور این دو المان موازی برای نشان دادن این حقیقت است که بعد از شکست پیوند، هیچ نیرویی از طریق پیوند منتقل نگردد. در این مدل، ضرایب میرایی به صورت توابعی از جرم و ممان اینرسی تعریف می‌شوند. در شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر، برای ساده سازی و افزایش سرعت محاسبات، مقاومت پیوند در برش و کشش یکسان فرض شده و همچنین سختی‌های برشی و نرمال یکسان در نظر گرفته شده اند. در این مدل پیوند تماسی، در شرایطی که دو

دانه بندی نمونه در شکل ۱-ب نشان داده شده است. مشخصات دانه بندی این خاک عبارتند از $D_{10}=0.40$ ، $D_{30}=0.50$ ، $D_{60}=0.65$ ، $C_u=1.63$ و $C_c=0.96$ است. در اینجا D_a قطری است که a درصد ذرات از آن کوچکتر است. C_u ضریب یکنواختی و C_c ضریب انحناء است. علت انتخاب این دانه بندی، نمایش کارایی این روش از طریق مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش آزمایشگاهی مری و همکاران [۱۵] است. در این پژوهش آزمایشگاهی، مشخصات دانه‌بندی نمونه‌ها به صورت $C_u=2.2$ و $C_c=0.98$ بوده است. طبق تعاریف متداول مکانیک خاک، نمونه‌های خاک در دو پژوهش موردنظر، از نوع ماسه‌ی بد دانه‌بندی در نظر گرفته می‌شود.

۳- شبیه‌سازی

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی محیط دانه‌ای سیمانته از برنامه‌ی BDL2D استفاده شده است. این برنامه توسط هنری و سیدی حسینی‌نیا [۳۲] بر مبنای روش اجزای مجزا تهیه شده که قابلیت شبیه‌سازی محیط‌های دانه‌ای سیمانته و غیرسیمانته در فضای دو بُعدی را دارد. کاربرد اصلی این برنامه شبیه‌سازی رفتار محیط دانه‌ای سیمانته در مواجهه با جریان سیال و فرآیند فرسایش مجموعه دانه‌ها در پدیده‌هایی مانند ماسه‌دهی است. نسخه اولیه این برنامه POLY نام داشته که توسط میرقاسمی و همکاران [۳۸] ارائه شده و برای کاربردهای گوناگون مانند شبیه‌سازی شکست ذرات [۳۹]،



شکل ۲. تعریف مدل تماسی پیوند مورد استفاده در این شبیه‌سازی

Fig. 2. Schemes of bond contact model employed in the simulation of the cemented sand

ذره دارای پیوند تحت نیروی کششی قرار می‌گیرند، نیروی نرمال بین دو ذره بصورت خطی افزایش پیدا می‌کند تا به حداکثر مقاومت خود که همان مقاومت پیوند است، برسد. در صورتیکه مقدار نیروی میان دو ذره بیشتر از مقاوم پیوند شود، پیوند گسیخته و نیروی قائم به مقدار صفر کاهش پیدا می‌کند. در مدل پیوند تماسی مماسی، نیروی بین دو ذره دارای پیوند که تحت نیروی برشی قرار گرفته است به صورت خطی افزایش می‌یابد. در صورتیکه مقدار نیروی مماسی بیشتر از مقاومت پیوند شود، پیوند گسیخته و مقدار نیروی مماسی بین دو ذره برابر با نیروی اصطکاکی که از طریق معیار کولمب بدست می‌آید، کاهش پیدا می‌کند. برای این مدل پیوند تماسی می‌توان نوشت:

ذره دارای پیوند تحت نیروی کششی قرار می‌گیرند، نیروی نرمال بین دو ذره بصورت خطی افزایش پیدا می‌کند تا به حداکثر مقاومت خود که همان مقاومت پیوند است، برسد. در صورتیکه مقدار نیروی میان دو ذره بیشتر از مقاوم پیوند شود، پیوند گسیخته و نیروی قائم به مقدار صفر کاهش پیدا می‌کند. در مدل پیوند تماسی مماسی، نیروی بین دو ذره دارای پیوند که تحت نیروی برشی قرار گرفته است به صورت خطی افزایش می‌یابد. در صورتیکه مقدار نیروی مماسی بیشتر از مقاومت پیوند شود، پیوند گسیخته و مقدار نیروی مماسی بین دو ذره برابر با نیروی اصطکاکی که از طریق معیار کولمب بدست می‌آید، کاهش پیدا می‌کند. برای این مدل پیوند تماسی می‌توان نوشت:

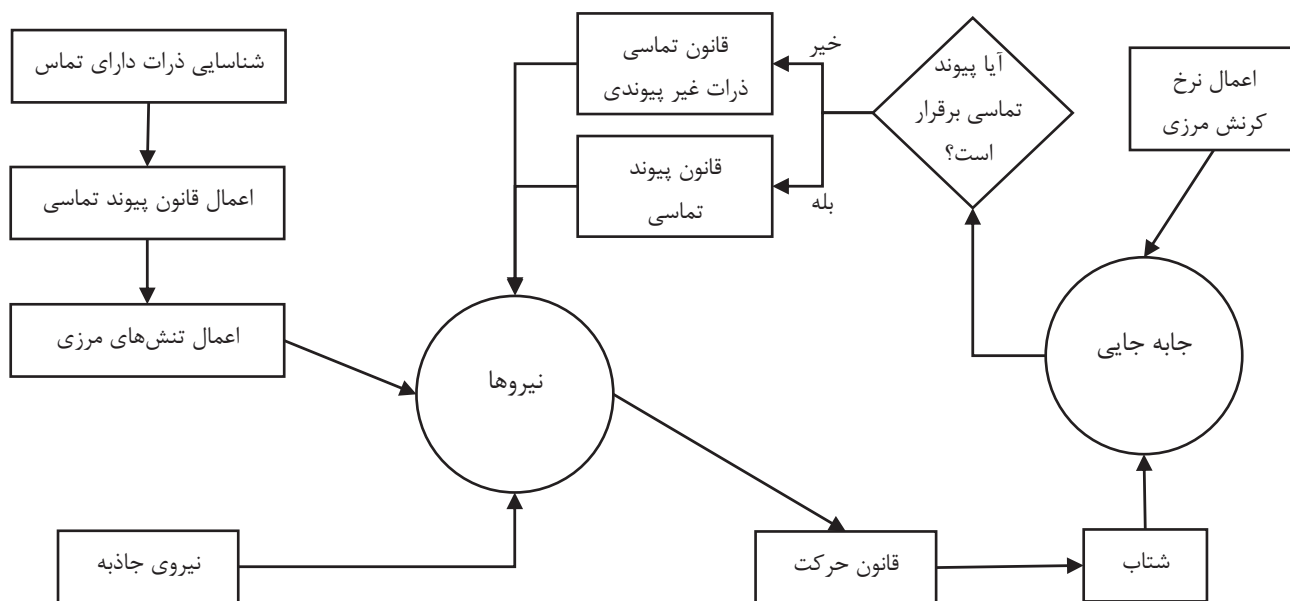
$$\text{Normal Bond Strength: } \begin{cases} R_{nb}; & R_{nb} \geq (F_{n0} - F_n) \\ 0; & R_{nb} < (F_{n0} - F_n) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{Shear Bond Strength: } \begin{cases} F_{sb}^{peak} = R_{sb} + F_n \mu; & F_s < F_{sb}^{peak} \\ F_{sb}^{resid} = F_n \mu; & F_s \geq F_{sb}^{peak} \end{cases} \quad (2)$$

شکل ۳ روند محاسباتی هر سیکل را در روش اجزای مجزا برای شبیه‌سازی ذرات دارای پیوند را نشان می‌دهد. در این برنامه، ابتدا ذرات دارای تماس با یکدیگر شناسایی و با اعمال قانون پیوند تماسی، به عنوان ذرات دارای پیوند شناخته می‌شوند. در مرحله بعد، نیروی تماسی بین دانه‌ها با توجه شرایط مرزی و نیروی جاذبه محاسبه می‌شود. به کمک قانون حرکت، شتاب ذرات بدست می‌آید. با محاسبه شتاب ذرات و با توجه به کرنش‌های مرزی، مقادیر جابه‌جایی ذرات بدست می‌آید. پس از جابه‌جایی ذرات، برنامه بررسی می‌کند که آیا پیوندها شکسته شده‌اند یا خیر. در صورتیکه پیوند میان ذرات شکسته شده باشد، قانون تماسی ذرات غیر پیوندی اعمال می‌شود. این روند در هر سیکل محاسبات تکرار می‌شود تا سیکل‌های محاسباتی به پایان برسد.

در این پژوهش شبیه‌سازی آزمون فشار همه‌جانبه در چهار مرحله انجام شده است. مرحله اول، ساخت یک نمونه دایروی است که در آن، نزدیک به ۲۰۰۰ ذره قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که چیدمان ذرات در این پژوهش کاملاً تصادفی بوده است. از این رو، به صورت همسان عمل می‌کند و ناهمسانی ذاتی به وجود نمی‌آید. نمونه‌ی ساخته شده، تراکم نیافته بوده و نیاز به تراکم اولیه دارد که به عنوان مرحله دوم شناخته می‌شود. در این مرحله، نمونه‌ی ساخته شده تحت فشار همه‌جانبه ۱۲/۵ کیلوپاسکال قرار گرفته

در این روابط، R_{nb} مقاومت کششی پیوند، R_{sb} مقاومت برشی پیوند، F_{n0} نیروی عمودی اولیه تماسی، F_n نیروی عمودی تماسی فعلی، F_s نیروی برشی تماسی، F_{sb}^{peak} بیشینه مقاومت برشی تماسی دارای پیوند،



شکل ۳. روند محاسبات در هر سیکل محاسباتی در کد نوشته شده با روش اجزای مجزا

Fig. 3. Algorithm of each computational cycle in the code by using Discrete Element Method (DEM)

۴- نتایج

قبل از بررسی نتایج، لازم است ابتدا تعاریف مورد استفاده جهت تفسیر نتایج و مقایسه با کارهای آزمایشگاهی معرفی شوند. تعریف نقاط تسلیم اولیه و تسلیم ثانویه بصورت تصویری در شکل ۵ معرفی شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، منحنی رسم شده میان نسبت تخلخل و فشار همه‌جانبه در فضای نیمه لگاریتمی برای یک نمونه‌ی دانه‌ای را می‌توان بر اساس شیب نمودارها به سه قسمت تقسیم کرد. در بخش اول نمودار، تغییرات چندانی در نسبت تخلخل با افزایش فشار همه‌جانبه رخ نمی‌دهد. در قسمت دوم نمودار، این تغییرات با نرخ کمی شروع شده و در قسمت سوم نرخ تغییرات شدت می‌گیرد. شکل ۵-الف تعریف نقطه تسلیم اولیه را نشان می‌دهد که مطابق تعریف رُتا و همکاران [۲۴] به عنوان نقطه‌ی جدایش منحنی از خط مماس بر قسمت اول آن تعریف می‌شود. شکل ۵-ب نحوه مشخص کردن نقطه تسلیم ثانویه^۱ را نشان می‌دهد. برای مشخص کردن این نقطه، از تعریف جیانگ و همکاران [۲] استفاده شده است. آن‌ها برای

تا متراکم شود. برای افزایش سرعت تحلیل، ضریب اصطکاک بین دانه‌ای بطور موقت برابر با صفر قرار داده شده است تا نمونه سریع‌تر به تراکم برسد. معیار رسیدن به تراکم در این مرحله، ثابت شدن تغییرات حجمی (نسبت تخلخل) در مقابل تعداد سیکل‌های محاسباتی است. پس از تراکم اولیه، در مرحله سوم نوبت به اختصاص پیوند میان ذرات می‌رسد. دلیل انتخاب این تنش، اختصاص پیوند میان ذرات دانه‌ای و تشکیل پیوند بوده است. ضریب اصطکاک بین دانه‌ای در مرحله اختصاص پیوند به ۰/۶ تغییر پیدا می‌کند و در نهایت حدود ۴۰۰۰ پیوند میان ذرات دانه‌ای در مرحله سوم تشکیل می‌شود. مرحله چهارم، اعمال فشار همه‌جانبه به نمونه‌ها است که در آن نمونه‌های سیمانته و غیرسیمانته تا سطح تنش ۶۰ مگاپاسکال بارگذاری می‌شوند. در جدول ۱، مشخصه‌های آزمون و در جدول ۲، مشخصه‌های آزمون فشار همه‌جانبه آورده شده است. شکل ۴ مراحل شبیه‌سازی آزمون فشار همه‌جانبه را برای یک نمونه نشان داده است.

1 Gross yield stress

جدول ۱. مشخصات مورد نیاز برای شبیه‌سازی در محیط اجزای مجزا

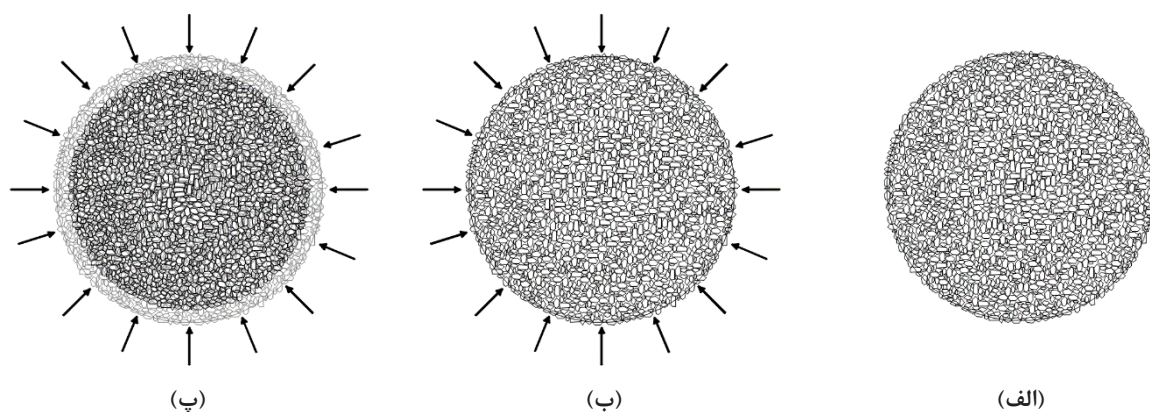
Table 1. Parameters used to simulate isotropic compression tests in DEM

مقدار	کمیت
۳۰۰۰ کیلوگرم بر متر مربع	دانسیته ذرات
۲۰۰۰۰۰ نیوتن بر میلی‌متر	سختی نرمال و برشی
صفر (مرحله اول و دوم) و ۰/۶ (بقیه مراحل)	ضریب اصطکاک میان دانه‌ها
۰/۹۵	ضریب میرایی کلی
صفر	ضریب میرایی ویسکوز

جدول ۲. خلاصه‌ای از مراحل شبیه‌سازی آزمون فشار همه‌جانبه

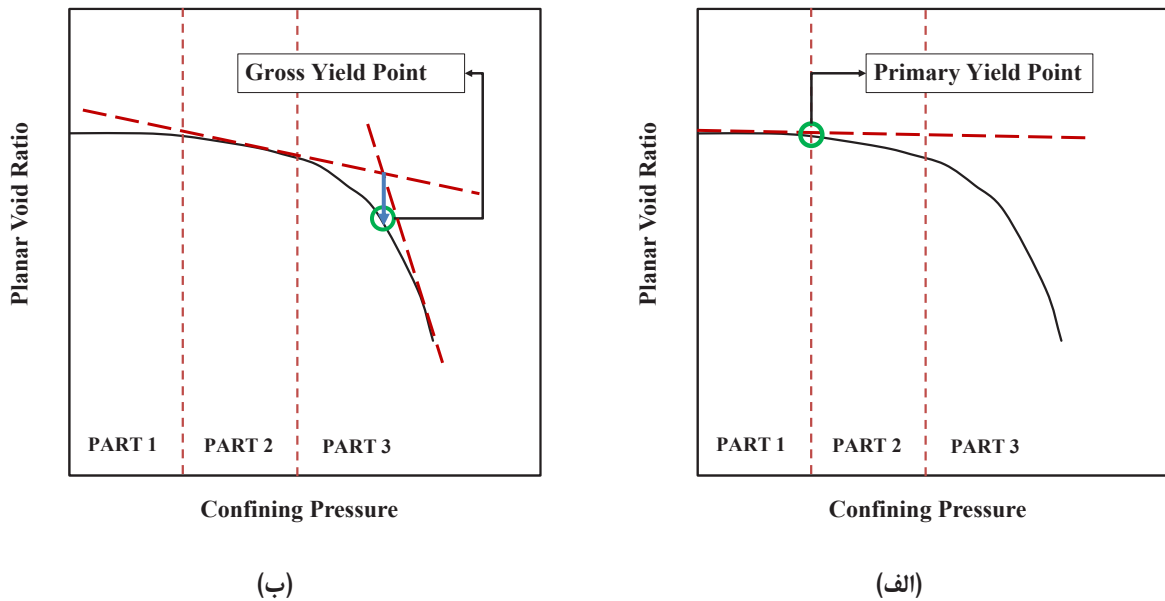
Table 2. Simulation steps of isotropic compression test

مرحله	عنوان	توضیحات
۱	ساخت نمونه	نمونه‌های شامل ۲۰۰۰ ذره تیز گوشه
۲	تراکم اولیه	تراکم تحت فشار همه‌جانبه ۱۲/۵ کیلوپاسکال و ضریب اصطکاک بین دانه‌های صفر
۳	تخصیص پیوند	مقاومت پیوندهای ۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ نیوتن
۴	فشار همه‌جانبه	شامل ۲۰ فشار همه‌جانبه مختلف، از فشار ۱۲/۵ کیلوپاسکال تا ۶۰ مگاپاسکال



شکل ۴. مراحل شبیه‌سازی آزمون فشار همه‌جانبه، الف) نمونه متراکم شده، ب) تشکیل پیوند تحت فشار همه‌جانبه ۱۲/۵ کیلوپاسکال و پ) اعمال فشار همه‌جانبه.

Fig. 4. Typical view of a soil sample in different four steps after a) initial compaction, b) bond formation, c) consolidation under confining pressure



شکل ۵. تعریف تصویری نقاط تسلیم؛ الف) تسلیم اولیه [۲۴] و ب) تسلیم ثانویه [۲]
Fig. 5. Definition of yield points, a) initial yield [24] and b) gross yield [2]

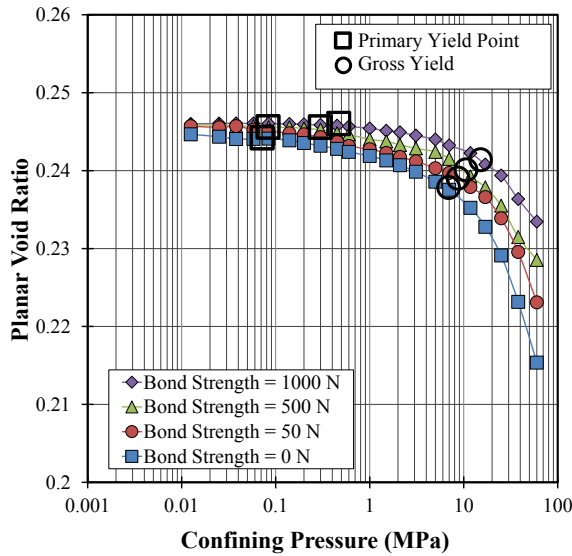
است. در این شکل، مشاهده می‌شود که مطابق انتظار تشکیل پیوند میان ذرات ماسه‌ای باعث کاهش تمایل نمونه‌ی سیمانته به کاهش حجم می‌شود و هرچه مقاومت پیوند بیشتر باشد، نمونه در مقابل کاهش حجم در فشارهای همه‌جانبه‌ی بالا مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. خاطر نشان می‌شود در شبیه‌سازی عددی، افزایش محتوای سیمان به صورت افزایش مقاومت پیوند لحاظ شده است. با مقایسه این دو دسته نتایج، می‌توان گفت روندی مشابه آنچه در پژوهش آزمایشگاهی مری و همکاران [۱۵] مشاهده شده است، در شبیه‌سازی حاضر نیز دیده می‌شود. همچنین در شکل ۵، نقاط تسلیم اولیه و ثانویه با توجه به تعریف‌های انجام شده در ابتدای این قسمت، برای نتایج پژوهش آزمایشگاهی مذکور و این پژوهش عددی به کمک مربع‌های توخالی (تسلیم اولیه) و دایره‌های توخالی (تسلیم ثانویه) مشخص شده است.

یکی دیگر از مزایای شبیه‌سازی عددی به روش اجزای مجزا، توانایی بررسی رفتار مکانیکی در مقیاس ذره‌ای نمونه‌ها مانند شکست پیوند حین آزمون است. شکل ۷ منحنی تغییرات نسبت تخلخل صفحه‌ای و تغییرات شکست پیوند در برابر فشار همه‌جانبه را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان

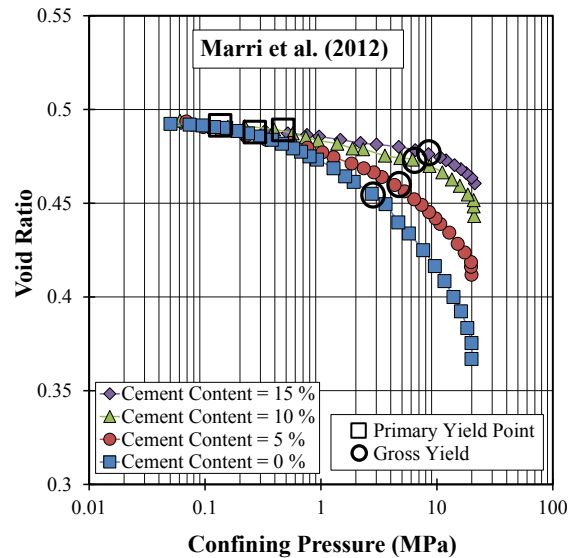
مشخص کردن این نقطه، دو خط مماس بر قسمت میانی و انتهایی نمودارها را رسم کردند و محل تقاطع این دو خط را به عنوان نقطه‌ی تسلیم ثانویه در نظر گرفتند.

۴-۱- تغییرات نسبت تخلخل در برابر فشار همه‌جانبه

شکل ۶ نمودار تغییرات نسبت تخلخل در مقابل فشار همه‌جانبه را برای نتایج این پژوهش و نتایج پژوهش آزمایشگاهی مری و همکاران [۱۵] آورده شده است. یکی از اهداف این پژوهش آزمایشگاهی، بررسی رفتار مکانیکی ماسه سیمانته تحت فشار همه‌جانبه بوده است. در این پژوهش، نمونه‌های مختلف با محتوای وزنی سیمانی متفاوت (شامل صفر، پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد) تحت تنش‌های همه‌جانبه تا ۲۰ مگاپاسکال بارگذاری شده‌اند. شکل ۶-الف نتایج این پژوهش را نشان می‌دهد که در آن، با افزایش درصد محتوای وزنی سیمان که منجر به افزایش پیوند میان ذرات دانه‌ای می‌گردد، تمایل نمونه به کاهش نسبت تخلخل کمتر شده است. بطور مشابه و برای آزمون‌های شبیه‌سازی شده در پژوهش حاضر، نتیجه تغییرات نسبت تخلخل در برابر فشار همه‌جانبه در فضای نیمه لگاریتمی در شکل ۶-ب نشان داده شده



(ب)



(الف)

شکل ۶. تغییرات نسبت تخلخل در مقابل فشار همه‌جانبه، (الف) پژوهش آزمایشگاهی [۱۵] و (ب) پژوهش عددی حاضر

Fig. 6. Variation of void ratio along with confining pressure, a) experimental study [15] and b) current study.

شده است که در آن با افزایش محتوای سیمان، مقدار این نسبت افزایش پیدا کرده است. در ادامه شکل ۸-الف، روندی مشابه برای تنش تسلیم ثانویه در این پژوهش آزمایشگاهی قابل مشاهده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش محتوای سیمان باعث افزایش مقدار این دو تنش تسلیم شده است. مقادیر نسبت تنش تسلیم اولیه و ثانویه برای این پژوهش عددی به ترتیب در شکل ۸-ب آورده شده است. در شبیه‌سازی عددی حاضر مشاهده می‌شود که مقادیر این دو نسبت تنش تسلیم با افزایش مقاومت پیوند، افزایش پیدا کرده است. با مقایسه‌ی نتایج پژوهش حاضر و پژوهش [۱۵] مشاهده می‌شود که روند تغییر در تنش تسلیم اولیه و ثانویه با تغییر محتوای سیمان مشابه روند تغییر این دو مقدار با تغییر در مقاومت پیوند است.

۴-۳- بررسی اجزای مختلف خاک سیمانته در تحمل تنش

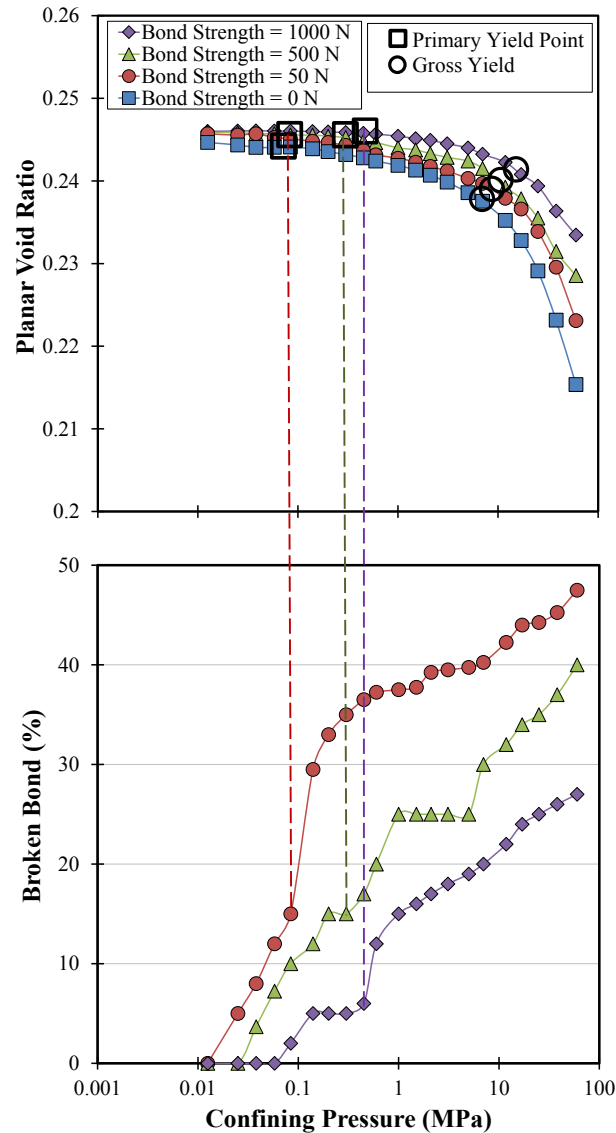
باری که به یک توده خاک سیمانته وارد می‌شود، توسط دو بخش مختلف شامل سنگدانه‌ها و پیوندهای میان آنها تحمل می‌گردد. به منظور بررسی تنش تحمل شده توسط پیوند، کانسولی و همکاران [۴۶] رابطه زیر را ارائه کردند:

$$p' = p'_{particles} + p'_{bond} \quad (3)$$

دریافت که هر چه مقاومت پیوند بیشتر باشد، درصد کمتری از پیوندها با افزایش فشار همه‌جانبه شکسته می‌شود. به طور مثال، برای نمونه ای با مقاومت پیوند ۵۰ نیوتن، ۵۰ درصد پیوندها در انتهای آزمون شکسته شده و برای نمونه با مقاومت پیوند ۱۰۰۰ نیوتن، کمتر از ۳۰ درصد پیوندها گسیخته شده است. همانطور که در این شکل می‌توان مشاهده کرد، در نقطه‌ای که تسلیم اولیه در نمونه اتفاق افتاده، نرخ شکست پیوندها شدت گرفته است. علت این روند را می‌توان در آن دانست که پیوندها در این مرحله به صورت پیش‌رونده شکسته شده‌اند. به عبارت دیگر، بین دو ناحیه سیمانته درون نمونه که به وسیله‌ی پیوندها به یکدیگر متصل هستند، شکست تعدادی از پیوند باعث شکستن بقیه پیوندها شده است.

۴-۲- تنش‌های تسلیم اولیه و ثانویه

تغییرات نسبت تنش تسلیم اولیه و ثانویه با مقدار محتوای سیمان و قدرت پیوند به ترتیب برای پژوهش آزمایشگاهی مری و همکاران [۱۵] و پژوهش عددی حاضر در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل، مقادیر تنش تسلیم اولیه و ثانویه نمونه‌ی سیمانته نسبت به تنش تسلیم اولیه و ثانویه در نمونه‌ی غیرسیمانته بی بعد شده است. در شکل ۸-الف مقادیر نسبت تنش تسلیم اولیه برای پژوهش آزمایشگاهی [۱۵] نشان داده

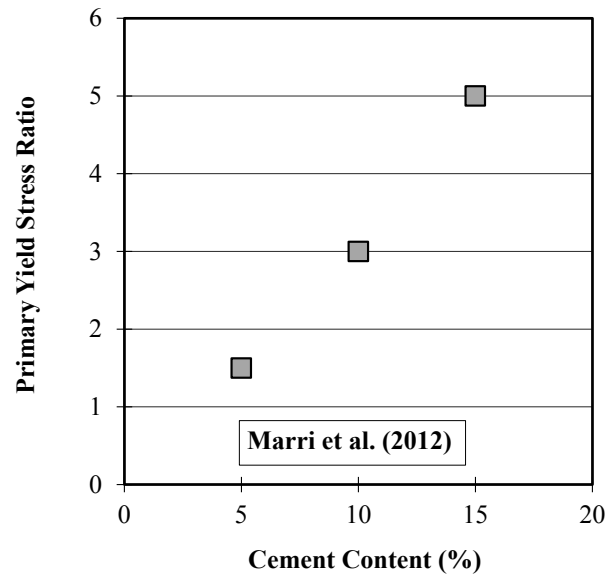
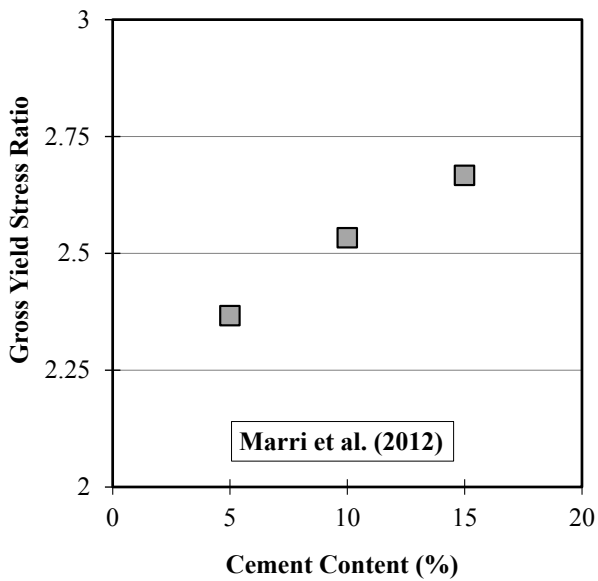


شکل ۷. تغییرات نسبت تخلخل نمونه و درصد شکست پیوند در نمونه‌های سیمانته با فشار همه‌جانبه در پژوهش حاضر

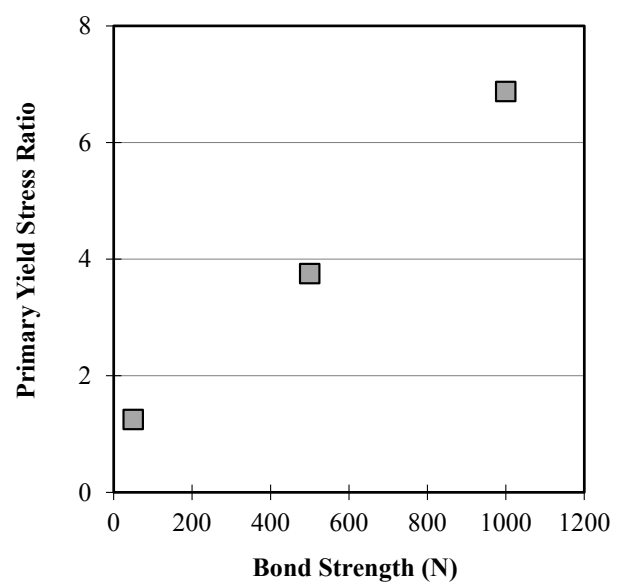
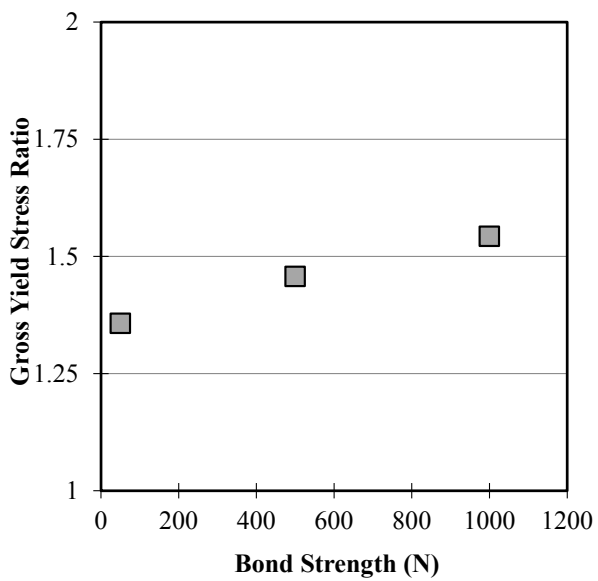
Fig. 7. Changes in void ratio and broken bond ratio of cemented samples along with confining pressure in current study

نسبت تخلخل در طی آزمون، سهم تنش که توسط پیوندها تحمل می‌شود برابر با فاصله‌ی میان منحنی سیمانته و غیرسیمانته است. به عبارت دیگر، سهم پیوندها در تحمل تنش مساوی با اختلاف تنش‌های p'_1 و p'_2 است. تغییرات تنش تحمل شده توسط پیوند در مقابل کرنش حجمی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به منظور مقایسه بهتر تغییرات p'_{bond} از نسبت بدون بعد $\frac{p'_{bond}}{p'_y}$ استفاده شده است که منظور از p'_y تنش تسلیم ثانویه نمونه تحت آزمون فشار همه‌جانبه است. در شکل ۱۰-الف نتایج پژوهش آزمایشگاهی کانسولی و همکاران [۴۶] نشان داده شده است. آن‌ها

در این رابطه، p' مجموع تنش همه‌جانبه‌ای است که به نمونه اعمال می‌شود. $p'_{particles}$ تنش است که توسط دانه‌های جامد و p'_{bond} تنش است که توسط پیوندها تحمل می‌شود. بدیهی است در حالت کلی و وجود آب، این تنش‌ها از جنس تنش موثر (در مقابل تنش کل) هستند. مفهوم تصویری این رابطه‌ی ریاضی در شکل ۹ نشان داده شده است که در آن، نمودار تغییرات نسبت تخلخل در برابر فشار همه‌جانبه برای دو نمونه خاک سیمانته و غیرسیمانته رسم شده است که این دو نمونه در شروع آزمون نسبت تخلخل یکسانی دارند. طبق رابطه‌ی ۳ می‌توان دریافت که برای هر



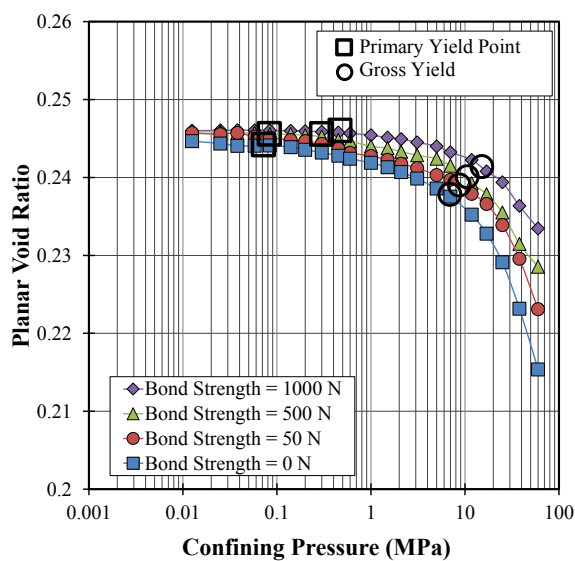
(الف)



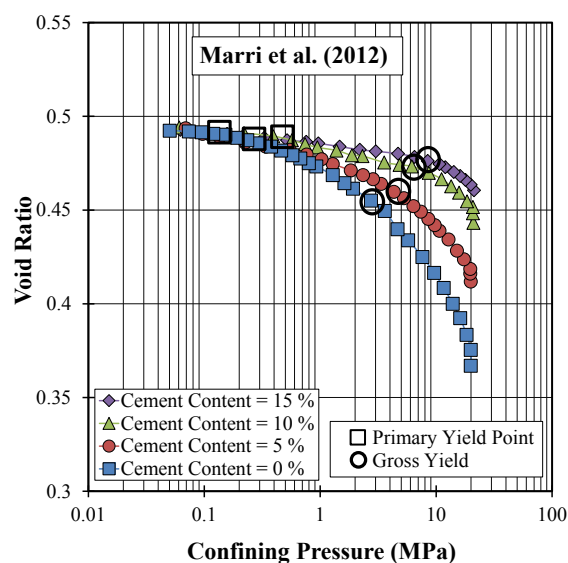
(ب)

شکل ۸. تغییرات نسبت تنش تسلیم اولیه و ثانویه، الف در پژوهش آزمایشگاهی [۱۵]، ب) این پژوهش عددی

Fig. 8. Variation of initial and gross yield stress, a) experimental study [15] and b) this numerical study



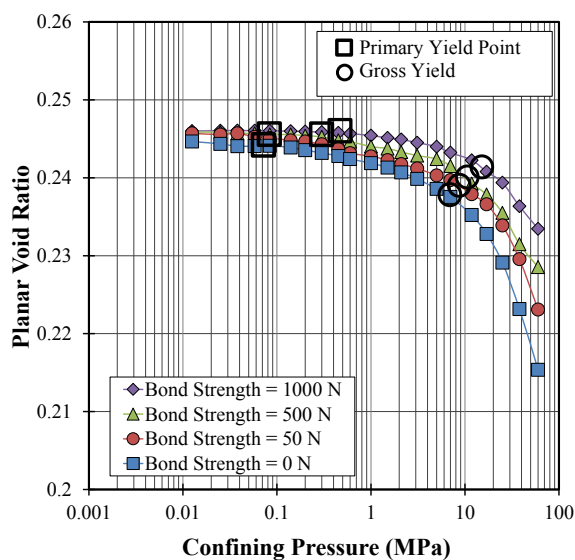
(ب)



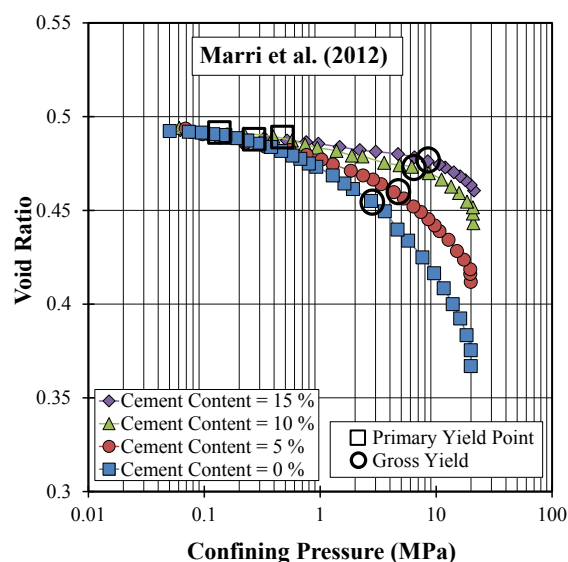
(الف)

شکل ۹. تغییرات نسبت تخلخل در مقابل فشار همه‌جانبه، الف) پژوهش آزمایشگاهی [۱۵] و ب) پژوهش عددی حاضر

Fig. 9. Variation of void ratio along with confining pressure, a) experimental study [15] and b) current study.



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. تغییرات نسبت سهم تنش پیوندها به تنش تسلیم ثانویه، الف) پژوهش آزمایشگاهی [۴۶] و ب) پژوهش عددی حاضر

Fig. 10. Changes in the ratio of bond stress to secondary yield stress: a) Laboratory experimental research [46] and b) Current numerical research

ذرات بزرگتر باشد، پیوندها سهم بیشتری از تنش را تحمل می‌کنند.

منابع

- [1] G.W. Clough, N. Sitar, R.C. Bachus, N.S. Rad, Cemented Sands under Static Loading Journal of the Geotechnical Engineering Division, 107(6) (1981) 799-817.
- [2] M. Jiang, H.S. Yu, S. Leroueil, A simple and efficient approach to capturing bonding effect in naturally microstructured sands by discrete element method, Numerical Method in Engineering, 69(6) (2007) 1158-1193.
- [3] M. Shakeri, S. Haeri, M. Shahrabi, A. Khosravi, A. Sajadi, An Experimental Study on Mechanical Behavior of a Calcite Cemented Gravelly Sand, Geotechnical Testing Journal 41 (2018) 494-507.
- [4] S.M. Haeri, A. Hamidi, S.M. Hosseini, E. Asghari, Effect of cement type on the mechanical behavior of a gravelly sand, Geotechnical and Geological Engineering, 24 (2006) 335-360.
- [5] F. Schnaid, P.D.M. Prietto, N.C. Consoli, Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(10) (2001) 857-868.
- [6] Z. Fu, S. Chen, H. Han, Large-scale triaxial experiments on the static and dynamic behavior of an artificially cemented gravel material, European Journal of Environmental and Civil Engineering, (2020).
- [7] M. Rezaeian, P.M.V. Ferreira, A. Ekinici, Mechanical behaviour of a compacted well-graded granular material with and without cement, Soils and Foundation, 59 (2019) 687-698.
- [8] X.C. Jie Yang, Xing-Wen Guo, Jin-Lei Zhao Effect of Cement Content on the Deformation Properties of Cemented Sand and Gravel Material, Appl. Sci., 9, (2019) 23-69.
- [9] D.D. Porcino, V. Marcano, Bonding degradation and stress-dilatancy response of weakly cemented sands Geomechanics and Geoengineering, (2017).
- [10] X.L. Dongliang Li, Xianshan Liu, Experimental Study on Artificial Cemented Sand Prepared with Ordinary

مشاهده کردند که با افزایش کرنش حجمی، مقدار تنشی که توسط ماتریس سیمانی تحمل می‌شود، افزایش پیدا کرده است. همچنین مقدار این تنش با افزایش محتوای سیمان، افزایش پیدا می‌کند. در شبیه‌سازی عددی حاضر، تغییرات تنش تحمل شده توسط پیوندها در شکل ۱۰-ب آورده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار کرنش حجمی، مقدار تنش تحمل شده توسط پیوندها افزایش یافته و هرچه مقدار مقاومت پیوند بیشتر باشد، مقدار این تنش نیز بزرگتر خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از شبیه‌سازی عددی به روش اجزای مجزا برای بررسی رفتار ماسه سیمانته و غیرسیمانته تحت فشار همه‌جانبه استفاده شده است. بر خلاف بیشتر پژوهش‌های عددی، در این پژوهش ذرات دانه‌ای به صورت چند گوشه در نظر گرفته شده‌اند تا مکانیک رفتاری خاک به واقعیت نزدیک‌تر باشد. با توجه به نقش مهمتر مقاومت پیوند نسبت به محتوای سیمانی در رفتار مکانیکی خاک سیمانته (نظیر پژوهش [۲])، از این‌رو، در پژوهش حاضر اثر مقاومت پیوند میان ذرات ماسه بر روی مکانیک رفتاری بررسی شده است. در شبیه‌سازی‌های حاضر از نمونه‌هایی با سه مقاومت پیوند ۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ نیوتن استفاده شده و آن‌ها تا سطح تنش همه‌جانبه ۶۰ مگاپاسکال بارگذاری شدند. نتایج حاصل از این پژوهش عددی به کمک پژوهش‌های آزمایشگاهی موجود، اعتبار سنجی شد. نتایج این پژوهش عبارتند از:

- افزودن پیوند میان ذرات، باعث شده نمونه تمایل کمتری به کاهش حجم داشته باشد و با افزایش مقاومت پیوند، نمونه در مقابل کاهش حجم، مقاومت بیشتری می‌کند. به کمک تعاریف ارائه شده در ادبیات فنی مرتبط [۲، ۲۴]، نقاط تسلیم اولیه و ثانویه برای نمونه‌های سیمانته استخراج شد و نشان داده شد که با افزایش مقاومت پیوند، مقادیر تنش مربوط به این دو نقطه، افزایش پیدا کرده است.
- با مطالعه تغییرات شکست پیوند حین آزمون، مشاهده شد که با افزایش مقاومت پیوند، درصد کمتری از پیوندها گسیخته می‌شوند. با مطالعه روند شکست پیوند در نمونه‌های سیمانته، تسلیم اولیه در نمونه‌ها باعث شده است که نرخ شکست پیوند افزایش یابد.
- با بررسی سهم تنش اعمال شده میان پیوندها و اسکلت خاک در این پژوهش عددی، مشاهده شد که با افزایش کرنش حجمی، سهم تنش تحمل شده توسط پیوندها افزایش پیدا می‌کند. هرچه مقاومت پیوند میان

- Gravelly Sand Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV (2012)
- [22]J.-M. Dupas, A. Pecker, Static and Dynamic Properties of Sand-Cement, *Journal of Geotechnical Division*, 105 (1979).
- [23]H. Rasouli, B. Fatahi, S. Nimbalkar, Liquefaction and post-liquefaction assessment of lightly cemented sands, *57(2)* (2020) 173-188.
- [24]N.C.C. G. V. Rotta, P. D. M. Prietto, M. R. Coop, J. Graham, Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress, *Géotechnique*, 53(5) (2003) 493-501.
- [25]N.C. Consoli, G.V. Rotta, P.D.M. Prietto, Yielding–compressibility–strength relationship for an artificially cemented soil cured under stress, *Geotechnique* 56 (2006) 69-72.
- [26]P.A. Cundal, A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, *Proceedings of the Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Society for Rock Mechanics (ISRM)*, (1971).
- [27]P.A. Cundall, O.D.L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29(1) (1979) 47-65.
- [28] M.J. Jiang, H.B. Yan, H.H. Zhu, S. Utili, Modeling shear behavior and strain localization in cemented sands by two-dimensional distinct element method analyses, *Computers and Geotechnics*, 38 (2011) 14-29.
- [29]M. Jiang, W. Zhang, Y. Sun, S. Utili, An investigation on loose cemented granular materials via DEM analyses, *Granular Matter*, 15(1) (2013) 65-84.
- [30]J.P. de Bono, G.R. McDowell, Discrete element modelling of one-dimensional compression of cemented sand, *Granular Matter*, 16(1) (2014) 79-90.
- [31]J.P. de Bono, G.R. McDowell, DEM of triaxial tests on crushable sand, *Granular Matter*, 16(4) (2014) 551-562.
- [32]S. Honari, E.S. Hosseininia, Particulate Modeling of Sand Production Using Coupled DEM-LBM, *energies*, 14 (2021).
- [33]Z. Shen, M. Jiang, C. Thornton, DEM simulation Portland Cement with Different Contents, *Materials (Basel)*, 8, (2015) 3960-3974.
- [11]Y. Amini, A. Hamidi, E. Asghari, Shear strength–dilation characteristics of cemented sand–gravel mixtures, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 8, (2014) 406-413.
- [12]Y. Amini, A. Hamidi, Triaxial shear behavior of a cement-treated sand–gravel mixture, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, (2014) 455-465.
- [13]Y. Amini, A. Hamidi, E. Asghari, Shear Strength Characteristics of an Artificially Cemented Sand-Gravel Mixture, in, 2013, 88-95.
- [14]A. Hamidi, S. Soleimani, Shear Strength-dilation relation in cemented gravelly sand, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 6 (2012).
- [15]A. Marri, D. Wanatowski, H.S. Yu, Drained behaviour of cemented sand in high pressure triaxial compression tests, *Geomechanics and Geoengineering*, 7 (2012) 1-166.
- [16]Y.H. Wang, S.C. Leung, Characterization of Cemented Sand by Experimental and Numerical Investigations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134 (2008).
- [17]E. Asghari, D.G. Toll, S.M. Haeri, Triaxial behaviour of a cemented gravelly sand, *Tehran alluvium, Geotechnical & Geological Engineering*, 21 (2003) 1-28.
- [18]E. Asghari, D.G. Toll, S.M. Haeri, Effect of Cementation on the Shear Strength of Tehran Gravelly Sand Using Triaxial Tests, *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 15 (2004).
- [19]S.M. Haeri, A. Seiphoori, A. Rahmati, The Behavior of a Limy Cemented Gravelly Sand Under Static Loading-Case Study of Tehran Alluvium, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* (2008)
- [20]M. Shahidi, F. Asemi, F. Farrokhi, Improving the Mechanical Behavior of Soil Contaminated with Gas–Oil Using Organoclay and Nanoclay, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48 (2022)
- [21]S.A.S. S. Mohsen Haeri ; Mohammad Reza Shakeri, Evaluation of Dynamic Properties of a Calcite Cemented

