مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۴۷-۵۷

Original Article

مدل‌سازی رفتار و بررسی تأثیر شرایط غیراشباع در خاک‌های دانه‌یی در پارامترهای مقاومت برشی به روش اجزاء منفصل

کیخسرو تورانی (کارشناس ارشد)
احمدرضا محبوبی اردکانی* (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

خاک محیطی سه‌فازی، شامل ذرات جامد، منافذ و سیال منفذی است. در شرایط غیراشباع، پدیده‌ی مویینگی موجب نیروی کششی بین ذرات خاک ناشی از موئینگی به‌صورت پیوندهای منیسکی می‌شود. روش اجزاء منفصل (DEM)، توانایی شبیه‌سازی اندرکنش بین ذرات خاک را دارد. در نوشتار حاضر، به مدل‌سازی یک محیط دانه‌یی غیراشباع با استفاده از روش اجزاء منفصل و با درنظرگرفتن نیروی کششی بین ذرات ناشی از مویینگی پرداخته و تأثیر درجه‌ی اشباع در پارامترهای مقاومت برشی بررسی شده است. بدین منظور با برنامه‌نویسی و اصلاح قانون تماس و با درنظرگرفتن کشش مویینگی در کد اجزاء منفصل PFC^{2D}، آزمایش‌های سه‌محوری شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که نیروهای کششی بین ذرات ناشی از منیسک‌های مایع در پارامترهای معیار گسیختگی موهر ـ کولمب تأثیر می‌گذارند، به نحوی که نیروی کششی ایجادشده بین ذرات به‌صورت چسبندگی ظاهر می‌شود، اما در زاویه‌ی اصطکاک داخلی تأثیری ندارد.

واژگان کلیدی: روش اجزاء منفصل، نیروی مویینگی، درجه‌ی اشباع، پل مایع (منیسک)، چسبندگی ظاهری، معیار موهر ـ کولمب.

keykhosro.turani@gmail.com
a_mahboubi@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

با افزایش پیچیدگی طراحی پروژه‌های عمرانی در سطح دنیا، بررسی دقیق‌تر رفتار خاک‌ها از نظر مهندسی به‌عنوان بستر سازه اهمیت بیشتری پیدا کرده است. بنابراین روابط مکانیک خاک کلاسیک که بر پایه‌ی شرایط خاک‌های کاملاً اشباع یا خشک پایه‌ریزی شده‌اند، نیازمند مکملی به نام مکانیک خاک غیراشباع هستند که محیط خاک را با فرض سه فاز آب، هوا و دانه‌های جامد خاک بررسی می‌کند. چنین محیطی، رفتار پیچیده‌یی تحت بارگذاری‌های مختلف دارد که دلیل آن، آثار برهم‌کنش فازها در یکدیگر است. تاکنون رفتار خاک‌های غیراشباع و اندرکنش فازهای مختلف خاک به وسیله‌ی مدل‌های درشت‌مقیاس[۱] و ریزمقیاس[۲] بررسی شده است. مدل‌های درشت‌مقیاس، اگرچه کم و بیش در مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار در بعضی از مسیرهای تنش موفق بوده‌اند، ولی به‌طورکامل اثری از آنچه در ساختار ذره‌یی خاک می‌گذرد، در آن‌ها به چشم نمی‌خورد؛ و به عبارت دیگر، مدل‌های درشت‌مقیاس از رفتار خاک در مقیاس ذرات نشات نمی‌گیرند و اثری از فیزیک و تغییرات فیزیکی که در ماده به‌وجود می‌آید، در آن‌ها وجود ندارد. در واقع در مدل ریزمقیاس می‌توان تک‌تک ذرات را در نظر گرفت و فرایند اندرکنش بین ذرات مجاور را بررسی کرد.

دومین برتری مدل ریزمقیاس نسبت به مدل درشت‌مقیاس این است که می‌توان از آن برای شناسایی ارتباط‌های بین ذرات در یک مجموعه استفاده کرد. مدل ریزمقیاس برای تشریح سینماتیک محلی و یا شناسایی ایجاد و حذف زنجیره‌ی نیرویی بین ذرات مناسب است.

بر این اساس، روش اجزاء منفصل (DEM)[۳]، به‌عنوان روشی مبتنی بر تحلیل آثار برهم‌کنش ذرات در یکدیگر، امکان بررسی پارامترهای میکرو و پیش‌بینی رفتار ماکروسکوپیک مجموعه‌ی ذرات در خاک‌های غیراشباع را دارد. بنابراین می‌توان گفت که روش اجزاء منفصل، ابزاری قدرتمند جهت پیش‌بینی رفتار مصالح دانه‌یی تحت شرایط مختلف است.[۱] همچنین امکان مطالعه‌ی عددی تغییرشکل و مشخصات مقاومت خاک‌های غیراشباع، با استفاده از روش اجزاء منفصل به‌واسطه‌ی درنظر گرفتن نیروی چسبندگی بین ذره‌یی وجود دارد.[۲] به عبارت دیگر، مشخصه‌ی منفصل و ذره‌یی روش مذکور موجب شناخت جامع مصالح در مقیاس دانه‌یی و نتیجتاً رفتار مناسب سینماتیک و مکانیکی در مقیاس مذکور می‌شود. خصوصیات مقیاس دانه‌یی به مواردی مانند: ترکیب، شکل، اندازه و وضعیت سطح دانه‌ها بستگی دارد. به دلیل پیچیدگی و تنوع شکل‌های ممکن برای ذرات، مجموعه‌یی از ذرات کروی برای مطالعه در نظر گرفته شده است. محیط شرح داده‌شده براساس برخی مفروضات مانند: دانه‌های کروی‌شکل و کاملاً صاف (بدون ناهمواری) و متشکل از

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۳/۳۱، اصلاحیه ۱۳۹۵/۹/۲۰، پذیرش ۱۳۹۵/۱۰/۱۸.
DOI:10.24200/J30.2018.1424

یک ماده‌ی منحصر به فرد است. ولی در واقع، سطح حقیقی دانه، همیشه زبری دارد که می‌تواند موجب تغییر در نیروهای موییننگی شود.[۳]

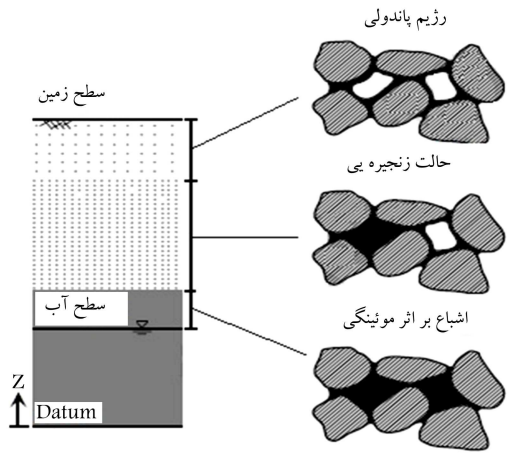
روش اجزاء منفصل، برای اولین بار در سال ۱۹۷۹، برای شبیه‌سازی رفتار محیط‌های ناپیوسته پیشنهاد شد.[۴] روش اجزاء منفصل مبتنی بر اندرکنش مکانیکی ذرات مجزا بر روی یکدیگر است که در آن ذرات منفرد به‌صورت اجسام صلب مدل‌سازی می‌شوند. هر ذره می‌تواند در تماس با ذرات مجاور و یا مرزهای محیط باشد. تماس بین دو ذره براساس قانون تماس تعریف می‌شود که بسته به پدیده‌ی مورد مطالعه‌ی قانون تماس می‌تواند اجزاء لازم برای شبیه‌سازی واقعیت را داشته باشد. ساده‌ترین مدل تماس مدل فنر و میراگر است. فنر و میراگر در هر دو جهت قائم و مماسی در تماس در نظر گرفته می‌شوند. فنر در جهت قائم به‌منظور مدل‌سازی نیروی دافعه (یا کششی) بین دو ذره و فنر در جهت مماسی برای مدل‌سازی نیروی برشی در نظر گرفته می‌شوند. اگر نیروی مماسی به حد اصطکاک کولمب برسد، از آن پس، ذره اجازه‌ی لغزش می‌یابد. نیروهای تولیدشده در تماس، براساس میزان هم‌پوشانی ذرات در تماس با یکدیگر و سختی فنر محاسبه می‌شوند.

در نوشتار حاضر، رفتار مصالح دانه‌یی غیراشباع در رژیم پاندولی با درنظر گرفتن آثار پل مایع (منیسک) و با استفاده از روش اجزاء منفصل (DEM) مدل‌سازی شده است. این کار در نرم‌افزار اجزاء منفصل $PFC^{۲D}$ و با نوشتن یک مدل تماسی جدید، که بتواند نیروهای جاذبه‌ی موئینگی را مدل‌سازی کند و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C++ انجام شده است. نرم‌افزار C++، به‌طور پیش‌فرض توانایی محاسبه‌ی نیروی کششی را ندارد، که مشکل آن با کد تهیه‌شده حل شده است. در مدل مذکور، نیروی موییننگی به‌عنوان تابعی از فاصله‌ی بین ذره‌یی، حجم پل آبی، کشش سطحی و درجه‌ی اشباع محاسبه شده است. در واقع، هدف شبیه‌سازی، یافتن نحوه‌ی رفتار خاک غیراشباع بر مبنای عملکرد تک‌تک ذرات است. مدل پیشنهادی قادر به ارائه‌ی خصوصیات اصلی مکانیکی خاک دانه‌یی غیراشباع است. در ادامه، نحوه‌ی عملکرد مدل در شبیه‌سازی آزمایش دومحوری، بر روی نمونه‌ها برای بررسی اثر درجه‌ی اشباع خاک در پارامترهای معیار گسیختگی موهر ـ کولمب استفاده شده است. از هدف‌های دیگر موردنظر در نوشتار حاضر، می‌توان به صحت‌سنجی روش مذکور و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج مدل‌سازی‌های عددی دیگر و نتایج آزمایش‌های کلاسیک که توسط سایر پژوهشگران صورت گرفته است، اشاره کرد.

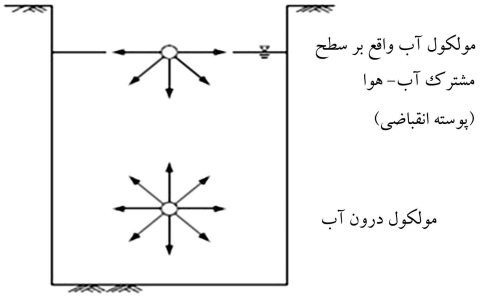
۲. پدیده‌ی موییننگی

۱.۲. دسته‌بندی خاک‌های مرطوب براساس میزان اشباع‌شدگی

خاک مجموعه‌یی از ذرات جامد، همچنین حفره‌ها و آب بین آنهاست. بررسی آثار میزان رطوبت خاک در مسائل ژئوتکنیک، اهمیت زیادی دارد. در واقع خاک‌ها را به‌طور کلی از نظر میزان رطوبت می‌توان به ۵ دسته‌ی کلی تقسیم کرد: نخست خاک در حالت خشک بوده و تمامی حفره‌ها توسط هوا اشغال شده است. همان‌طورکه آب به سیستم اضافه می‌شود، ابتدا لایه‌های جاذب شروع به شکل‌گیری در سطح ذرات می‌کند و سپس پل مایع بین ذرات در تماس و یا نزدیک به یکدیگر ایجاد می‌شود. این وضعیت در محدوده‌یی به‌عنوان رژیم پاندولی[۴] شکل می‌گیرد (شکل ۱). تا زمانی که آب تراوش نکند، امکان شبیه‌سازی آثار آب در رژیم پاندولی وجود دارد. در واقع، رژیم پاندولی حالتی از اشباع‌شدگی است، که محیط متخلخل در کمترین وضعیت اشباع خود است که امکان تشکیل پل‌های مایع بین ذرات وجود دارد. توجه داشته



شکل ۱. سه حالت مختلف اشباع‌شدگی در یک خاک.[۶]



شکل ۲. کشش سطحی در فصل مشترک آب و هوا و نیروهای کنشی بر مولکول آب.[۷]

باشید زمانی که فاز آب، دیگر پیوسته نیست، رژیم پاندولی شروع می‌شود که به این معناست که فاز آب بین تمامی ذرات پیوسته نیست و فقط بین جفت ذرات شکل می‌گیرد. لازم به ذکر است که رژیم پاندولی در درجه‌ی اشباع پایین‌تر از ۳۰٪ روی می‌دهد.

با افزایش میزان آب در خاک و پُرشدگی برخی از منافذ آب، حالت زنجیره‌یی[۵] شکل می‌گیرد و تا درجه‌ی اشباع‌شدگی بالایی ادامه می‌یابد (شکل ۱). در نهایت، هنگامی که منافذ با آب موییننه پر می‌شود، نمونه به حالت اشباع کامل می‌رسد. حضور آب موییننه در منافذ خاک موجب ایجاد نیروی جاذبه در بین ذرات در تماس می‌شود. این نیروهای جاذب به چسبندگی ظاهری کمک می‌کند و به‌عنوان مقاومت کششی تمام سیستم قابل تفسیر است.[۵]

۲.۲. پدیده‌ی کشش سطحی

فصل مشترک هوا ـ آب یا به بیان دیگر پوسته‌ی انقباضی، خاصیتی دارد که به آن کشش سطحی می‌گویند. پدیده‌ی کشش سطحی ناشی از نیروهای بین مولکولی در پوسته‌ی انقباضی است. این نیروها با نیروهایی که به یک مولکول آب در زیر سطح آب وارد می‌شود، متفاوت است. یک مولکول آب در زیر سطح متحمل نیروهای مساوی در تمام جهات می‌شود و لذا هیچ نیروی نامتعادلی وجود نخواهد داشت (شکل ۲). در حالی که مولکول‌های آب بر روی پوسته‌ی انقباضی نیروی نامتعادلی را به سمت داخل مایع متحمل می‌شوند (شکل ۲). برای آنکه پوسته‌ی انقباضی در حال تعادل باشد، یک نیروی کششی در طول پوسته به‌وجود می‌آید. خاصیت پوسته‌ی انقباضی که موجب بروز نیروی کششی ذکرشده در پوسته می‌شود

راکشش سطحی (T_s) می‌نامند. مقدار نیروی کششی سطحی بر حسب واحد طول بیان می‌شود و بر سطح تماس مماس است.[۶-۷] موییننگی را نیز می‌توان با کشش سطحی در حد فاصل بین دو مایع غیرقابل اختلاط و یا بین یک مایع و گاز توضیح داد.

کشش سطحی باعث می‌شود تا پوسته‌ی انقباضی همچون غشاء کشسان رفتار کند. در صورتی که غشاء کشسان دو بُعدی در ۲ وجه خود تحت اثر کشش قرار گیرد، برای آنکه در وضعیت تعادل باشد، باید سطح آن یک شکل مقعر به خود بگیرد و جهت تقعر آن نیز به سمت فشار بیشتر باشد. در نتیجه مولکول‌های سطح، به جرم مایع جذب می‌شوند و سطح مایع در معرض نیروی عمودی قرار می‌گیرد که انحناء آن ناشی از جاذبه‌ی کشش سطحی خواهد بود.[۶]

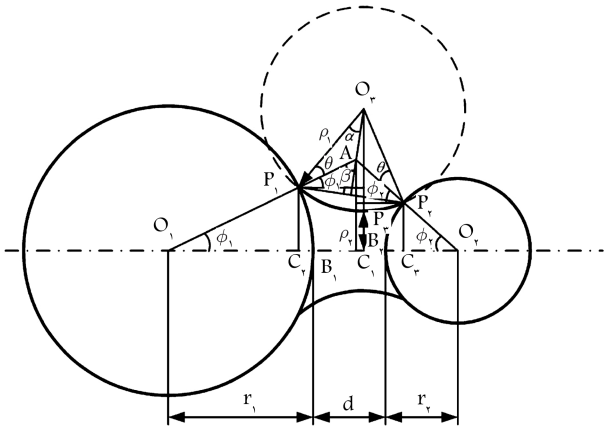
۳.۲. محاسبه‌ی نیروی موییننه براساس پارامترهای هندسه‌ی پل مایع (منیسک)

همان‌طور که گفته شد، در اثر اندرکنش فازهای آب، هوا و دانه‌های خاک، غشاء کشسانی شکل می‌گیرد که با دانستن میزان حجم پل، این امکان وجود دارد تا بتوان نیروی کشش بین ذرات ناشی از چسبندگی بین آن‌ها را تعیین کرد. محاسبه‌ی دقیق حجم منحنی پل مایع فقط با حل معادله‌ی لاپلاس ـ یانگ ممکن است. از جمله فرض‌هایی که برای رسیدن به پاسخ معادله‌ی مذکور صورت گرفته است، می‌توان به نادیده گرفتن آثار گرانشی با توجه به حجم کم آب مطرح‌شده اشاره کرد که معقول و منطقی به نظر می‌رسد. به‌عنوان یک راه کلی، آثار گرانش را می‌توان برای مقادیر تعداد پیوند کم نادیده گرفت.[۸] علاوه بر پل مایع که در پیکربندی شبه استاتیک مطالعه شده است، فرض شده است که آثار گرانروی نادیده گرفته‌شده و گرانروی مایع و جنبش‌های بین دانه‌یی، به اندازه‌ی کافی کوچک هستند و از نیروی دینامیکی پل مایع صرف‌نظر شده است.[۹]

با این‌حال نشان داده شده است که اختلاف بین راه حل‌عددی تقریبی و راه حل دقیق، کمتر از ۱۰٪ است.[۱۰،۱۱] با توجه به خطا در اندازه‌گیری‌های تجربی به دلیل عدم قطعیت حجم پل مایع، کشش سطحی و زبری ذرات، تقریب ذکرشده به اندازه‌ی کافی دقیق است. شکل ۳ که بر پایه‌ی حل عددی است، هندسه‌ی پل مایع برای دو کره با اندازه‌ی متفاوت که به یکدیگر با منیسک متصل شده‌اند، را نشان می‌دهد.[۱۲] در شکل مذکور، θ زاویه‌ی تماس،[۶] و ϕ_1 و ϕ_2 زاویه‌ی ترشدگی[۷] در هر دو ذره، r_1 و r_2 شعاع کره‌ها، d فاصله‌ی بین ذرات، و نهایتاً ρ_1 و ρ_2 شعاع انحناء مایع اتصال هستند. شکل ۳، هندسه‌ی مقطعی از منیسک بین دو ذره با شعاع نابرابر با موقعیت مراکز O_1 و O_2 را نشان می‌دهد. خط O_1P_1 و O_2P_2 برابر شعاع دو ذره هستند. زاویه‌ی تماس صفر نیست و O_3 مرکز کمان دایروی پل مایع است. P_1 و P_2 محل برخورد منیسک با ذرات، A نقطه‌ی تلاقی امتداد O_1P_1 و O_2P_2 و C_1 نقطه‌ی تلاقی به ترتیب O_2C_1 با پروفیل پل‌مایع P_1P_2 و محور O_1O_2 است. بنابر شکل ۳ و ساده‌سازی روابط هندسی می‌توان پارامتر زاویه‌ی ترشدگی منیسک ذره‌ی کوچک‌تر را به‌صورت رابطه‌ی ۱ محاسبه کرد:

$$\phi_2 = 2\arctan\left[\frac{d+2r_1}{d+2r_2}\tan\left(\frac{\phi_1}{2}\right)\right] \qquad (1)$$

زمانی که پروفیل پل مایع به‌صورت کمانی از دایره شکل می‌گیرد، شعاع نخست اصلی منحنی (ρ_1) برابر با شعاع کمان دایره $P_1P_3P_2$ و شعاع اصلی دوم (ρ_2) نیز برابر با طول خط C_1P_3 خواهد بود، بنابراین می‌توان گفت که ρ_1 و ρ_2 از روابط ۲ و



شکل ۳. هندسه‌ی اندرکنش کره ـ کره با پل مایع.[۱۲]

۳ به‌دست می‌آیند:

$$\rho_1 = \frac{r_1(1-\cos\phi_1) + d + r_2(1-\cos\phi_2)}{\cos(\phi_1+\theta)+\cos(\phi_2+\theta)} \qquad (2)$$

$$\rho_2 = r_1\sin\phi_1 - \rho_1[1-\sin(\phi_1+\theta)] \qquad (3)$$

حجم پل مایع را می‌توان با استفاده از روابط شعاع انحنا ρ_1 و ρ_2، زاویه‌ی ترشدگی (ϕ)، و زاویه‌ی تماس (θ) تعیین کرد. به هر حال زاویه‌ی ترشدگی ذره‌ی بزرگ‌تر را نمی‌توان به‌طور صریح تعیین کرد، بنابراین برای تعیین ϕ به‌عنوان تابعی از حجم منیسک، فاصله‌ی جدایی بین دو ذره و زاویه‌ی تماسی به روش سعی و خطا عمل می‌شود.[۱۳] حجم پل مایع (V)، را می‌توان با ارزیابی حجم V_1 حاصل از دوران کمان $P_1P_2P_2$ حول محور O_1O_2 و سپس کاهش حجم قطعات کره V_2، به‌صورت رابطه‌ی ۴ تعیین کرد؛ بنابراین، در صورتی که V مشخص باشد، می‌توان ϕ_1 را از معادلات اخیر محاسبه کرد:[۱۲]

$$a = \rho_1\sin(\phi_2+\theta) + r_2\sin\phi_2 \qquad (4)$$

$$V_1 = \pi\left\{\begin{array}{c}(a^2+\rho_1^2)\rho_1[\cos(\phi_1+\theta)+\cos(\phi_2+\theta)] \\ -\frac{1}{3}\rho_1^3[\cos^3(\phi_1+\theta)+\cos^3(\phi_2+\theta)] \\ -a\rho_1^2\begin{bmatrix}\sin(\phi_1+\theta)\cos(\phi_1+\theta)\\ +\sin(\phi_2+\theta)\cos(\phi_2+\theta)\end{bmatrix} \\ +a\rho_1^2(\phi_1+\phi_2+2\theta-\pi)\end{array}\right\} \qquad (5)$$

$$V_2 = \frac{\pi}{3}\begin{bmatrix}(2-3\cos\phi_1+\cos^3\phi_1)r_1^3 \\ +(2-3\cos\phi_2+\cos^3\phi_2)r_2^3\end{bmatrix} \qquad (6)$$

$$V = V_1 - V_2 \qquad (7)$$

با تعیین پارامترهای هندسه‌ی پل مایع، امکان محاسبه‌ی نیروی موییننه فراهم می‌شود. محاسبه‌ی نیروی موییننه اولین بار در سال ۱۹۲۶ و با درنظرگرفتن این فرض که شکل پل مایع به‌صورت حلقوی است، انجام،[۱۴] و دو روش مختلف برای تخمین آن پیشنهاد شد. در روش اول، نیرو در گردنه‌ی[۸] منیسک تخمین زده می‌شود؛[۱۵] و در روش دوم که به روش تماسی شناخته می‌شود، نیرو در محل تماس پل مایع با دانه‌ی جامد برآورد می‌شود.[۱۶] نشان داده شده است که هر دو روش دقت قابل قبولی از نظر تئوری، تجربی، و عددی دارند.[۱۰]

در روش اول، فرض بر این است که نیروی موییننگی شامل سهمی از فشار موییننگی (P_c) و همچنین کشش سطحی (T_s) است. نیروی کشش سطحی محوری

در گردنه‌ی منیسک را می‌توان به‌وسیله‌ی رابطه‌ی ۸ تعیین کرد:[۱۰-۱۲]

$$F_1 = 2\pi T_s \rho_2 \quad (8)$$

و نیروی هیدرواستاتیک در گردنه‌ی منیسک از رابطه‌ی ۹ تعیین می‌شود:

$$F_1 = \pi \rho_2^2 P_c \quad (9)$$

فشار مویینگی که نشان‌دهنده‌ی اثر مکش در نمونه است، با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$P_c = T_s C = U_a - U_w = T_s(1/\rho_1 - 1/\rho_2) \quad (10)$$

بنابراین، نیروی مویینگی کل را می‌توان به‌صورت مجموع دو نیروی کشش سطحی و نیروی هیدرواستاتیک بیان کرد (رابطه‌ی ۱۱) (شکل ۳):

$$F_l = F_1 + F_2 = \pi \rho_2 T_s \frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1} \quad (11)$$

در پژوهشی در سال ۱۹۹۳،[۱۰] نشان داده شد که نیروی پل مایع که به فاصله‌ی جدایی بین دو ذره وابسته است، تا مقدار بحرانی آن پایدار است. فاصله‌ی گسیختگی یا بیشینه‌ی فاصله‌ی جدایی $\delta_n^{\max}$ که منیسک در آن می‌شکند، وابسته به پارامترهای زاویه‌ی تماس θ و حجم پل مایع V است، به‌طوری که اگر $\theta \leq 2\pi/9$ باشد، با رابطه‌ی اخیر می‌توان میزان آن را تعیین کرد.[۱۱] به هر حال، زاویه‌ی ترشدگی مستقیماً قابل تعیین نیست، بنابراین به‌عنوان تابعی از حجم پل مایع، فاصله‌ی بین ذرات و زاویه‌ی تماسی به روش سعی و خطا تعیین می‌شود.[۱۱] پیوند مایع تا زمانی که فاصله‌ی بین ذره‌یی کمتر از فاصله‌ی شکست پیوند ($\delta_n^{\max}$) است، پایدار است. بیشینه‌ی فاصله‌ی بین ذرات با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$\delta_n^{\max} = (1 + 0.5\theta)V^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

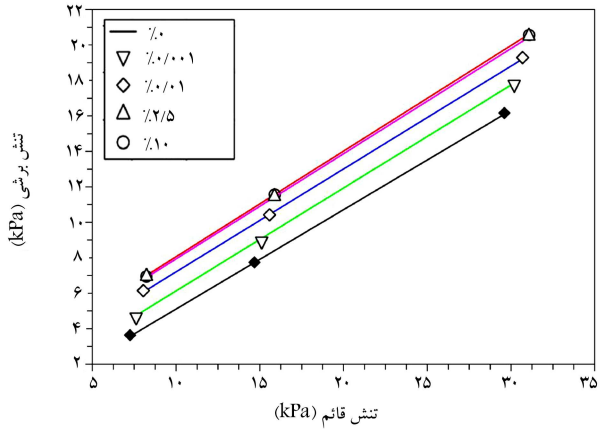
وقتی که فاصله‌ی بین ذرات از فاصله‌ی گسیختگی منیسک کمتر باشد، پل مایع شکل می‌گیرد و حجم مایع به آن اختصاص داده می‌شود. در فاصله‌ی جدایی صفر، بیشینه‌ی نیروی منیسک در کمترین حجم پل مایع روی می‌دهد. از رابطه‌ی ۱۱، برای تعیین نیروی مویینگی به‌عنوان پرکاربردترین روش محاسبه‌ی نیروی مویینه که بیشتر پژوهشگران از آن استفاده کرده‌اند، می‌توان نام برد.

۴.۲. بررسی اثر فشار مویینگی در معیار موهر ـ کولمب توسط سایر پژوهشگران

مقاومت برشی خاک، جایگاه مهمی در مهندسی ژئوتکنیک دارد. مهم‌ترین نظریه در رابطه با پیش‌بینی گسیختگی خاک، معیار موهر ـ کولمب است که رابطه‌ی تنش برشی و تنش قائم روی صفحه‌ی گسیختگی را بیان می‌کند. رابطه‌ی مذکور که کاربردی‌ترین معیار در مطالعات ژئوتکنیکی است، به‌صورت رابطه‌ی خطی با معادله‌ی $\tau = c + \sigma_n \tan\phi$ بیان می‌شود.

مدل‌سازی خاک‌های دانه‌یی غیراشباع برای بررسی پارامترهای معیار موهر ـ کولمب در شرایط پاندولی صورت می‌گیرد. مطالعه در شرایط ذکرشده به این دلیل است که پل‌های مایع بین هر دو ذره شکل بگیرد و هم‌پوشانی با سایر پل‌ها نداشته باشد، زیرا در غیر این صورت باید آثار جریان هیدرولیکی بین پل‌ها نیز بررسی شود.

برخی پژوهشگران (۲۰۰۹) نیز با درنظرگرفتن نیروی کششی بین ذره‌یی ناشی از فشار مویینه، شبیه‌سازی‌های آزمایش سه‌محوری که با استفاده از ۱۰۰۰۰ ذرات کروی



شکل ۴. پوش گسیختگی موهر ـ کولمب تحت شرایط خشک و غیراشباع.[۱۳]

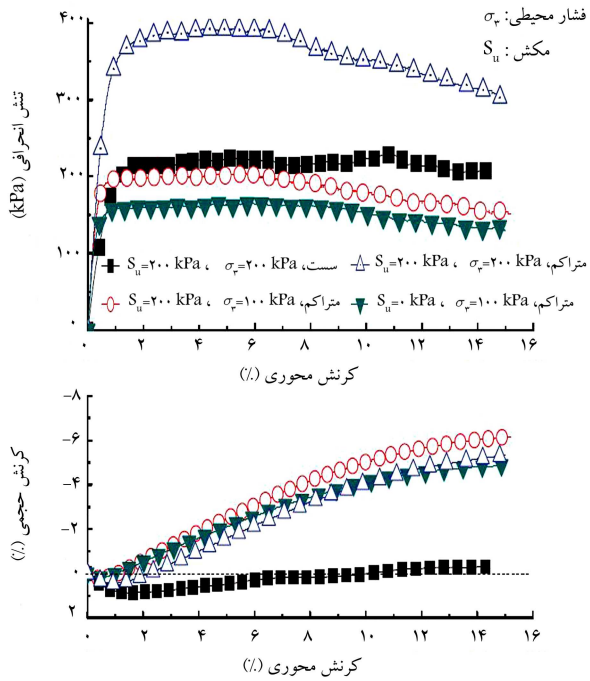
(سه بُعدی) با دامنه‌ی اندازه‌ی ۰٫۰۳۵ تا ۰٫۰۷ میلی‌متر تحت تنش همه‌جانبه‌ی ۵، ۱۰ و ۲۰ کیلوپاسکال و با نرم‌افزار YADE انجام شده است، به خوبی افزایش مقاومت برشی را به دلیل آثار مویینگی و تأثیر آن‌ها در معیار شکست موهر ـ کولمب نشان می‌دهند.[۱۳] شبیه‌سازی‌های مذکور در فشارهای مویینگی مختلف ناشی از درجه‌ی اشباع متغیر بین صفر تا ۱۰ درصد است.

مدل‌سازی صورت‌گرفته نشان می‌دهد که مقاومت برشی خاک غیراشباع بیشتر شده است و بستگی به درجه‌ی اشباع دارد. با افزایش میزان رطوبت نمونه، تنش تفاضلی افزایش می‌یابد و با یک روند مشخص‌تر نسبت به حالت خشک، نشان‌دهنده‌ی ساختار یکپارچه‌تری خواهد بود. در شکل ۴، می‌توان مشاهده کرد که زاویه‌ی اصطکاک داخلی در هر سطح از اشباع‌شدگی، مستقل از درجه‌ی اشباع است. در مقابل، روشن است که تغییرات چسبندگی به‌طور قابل توجهی از حالت خشک به غیراشباع متفاوت است. چسبندگی به‌صورت غیرخطی تا بیشینه‌ی میزان درجه‌ی اشباع‌شدگی بالاتر که مربوط به حد بالایی حالت پاندولار است، افزایش می‌یابد.[۱۳]

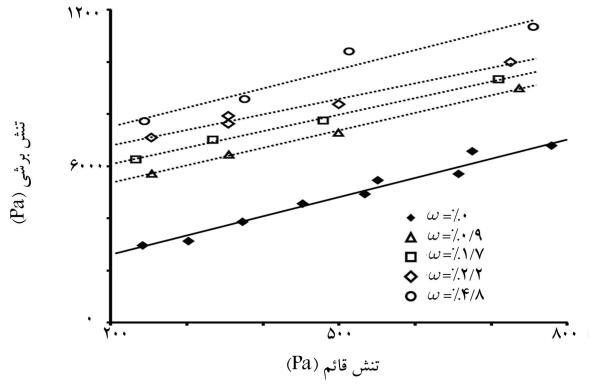
علاوه بر شبیه‌سازی آزمایش سه محوری در سال ۲۰۰۹،[۱۳] که در آن آثار مویینگی با استفاده از رابطه‌ی حاصل از معادله‌ی لاپلاس ـ یانگ بررسی شده است، پژوهشگران دیگری نیز در سال ۲۰۱۳،[۱۷] برای مدل‌سازی آزمایش سه محوری از رابطه‌ی ۱۱ برای محاسبه‌ی نیروی مویینه استفاده کرده‌اند، با این تفاوت که برای محاسبه‌ی پارامترهای هندسی از ۲ بار ساده‌سازی بهره گرفته‌اند. ابتدا برای محاسبه‌ی شعاع‌های منیسک از روابط ساده‌شده‌ی $\rho_1 = r(sec\phi - 1)$ و $\rho_2 = r(1 + \tan\phi - sec\phi)$ استفاده شده و سپس با توجه به نابرابربودن شعاع ذرات مدل‌شده، میزان شعاع ذره به‌صورت $r = 2r_1r_2/(r_1 + r_2)$ ساده‌سازی شده است. هدف از مدل‌سازی مذکور به روش DEM، بررسی رفتار نمونه با ذرات نابرابر با بازه‌ی ۱۰/۵-۶/۶ (μm) تحت اثر مویینگی بوده است. نمونه‌ها با ۱۰۰۰۰ ذره و دو نسبت تخلخل اولیه‌ی ۰٫۵ و ۰٫۸۲ مدل شده‌اند.

شکل ۵، ارتباط بین تنش و کرنش حاصل از ۴ آزمایش را نشان می‌دهد که از مشاهده‌ی آن می‌توان دریافت که نمونه‌ی متراکم دچار رفتار نرم‌شدگی کرنشی و رفتار حجمی اتساعی است و مقدار بیشینه‌ی تنش انحرافی نیز با افزایش تنش همه‌جانبه و مکش افزایش یافته است. در تنش‌های همه‌جانبه‌ی بالا و مکش پایین، رفتار اتساعی چندان اهمیتی ندارد.

در نمونه‌ی شُل، ابتدا تنش انحرافی با کرنش محوری به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد و سپس تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین کرنش حجمی عمدتاً به‌صورت انقباضی



شکل ۵. نمودار تنش و کرنش حجمی در برابر کرنش در شبیه‌سازی به روش DEM.[۱۷]

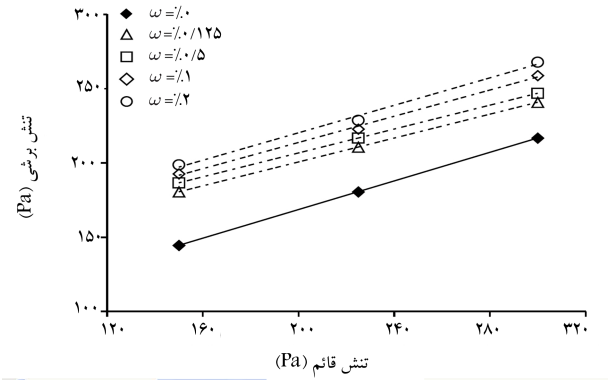


شکل ۶. پوش گسیختگی برای نمونه‌ی ماسه به ازاء مقادیر مختلف رطوبت حاصل از انجام آزمایش برش مستقیم.[۱۸]

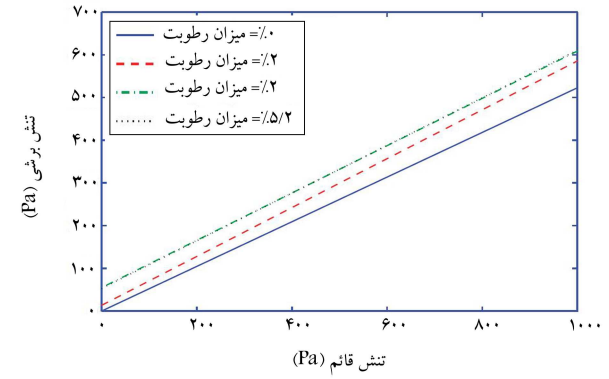
است و در کرنش‌های بزرگ (۱۰٪ <) اندکی انبساطی عمل می‌کند. نمونه‌های متراکم در شرایط یکسان تنش همه‌جانبه و مکش، رفتار انبساطی‌تر و با تنش انحرافی بزرگ‌تری را در برابر نمونه‌های سُل از خود نشان می‌دهند.

همچنین اثر مویینگی در آزمایش‌های برش مستقیم بررسی شده است. مطابق نتایج حاصل از آزمایش مشابه برش مستقیم انجام‌شده در پژوهشی در سال ۲۰۰۷،[۱۸] به نظر می‌آید که زاویه‌ی φ وابستگی محسوسی با رطوبت ندارد؛ در حالی که چسبندگی به‌طور غیرخطی با افزایش رطوبت، افزایش می‌یابد و برای میزان رطوبت، چسبندگی اشباع‌شده (c) را از خود نشان می‌دهد. شکل ۶، مکان هندسی تسلیم $\tau - \sigma$ برای ماسه با دانه‌های گوشه‌دار با دامنه‌ی قطرهای ۰٫۱ تا ۰٫۴ میلی‌متر در مقادیر مختلف درجه رطوبت را نشان می‌دهد.

در حقیقت، سطح پایین‌تر چسبندگی منجر به تحرک بیشتر ذرات و افزایش تخلخل می‌شود که این امر به‌دلیل توزیع کم اندازه‌های ذره در بسیاری از موارد است.[۱۸] مقدار ω به سختی تعیین می‌شود و این احتمالاً به ۲ عامل وابسته



شکل ۷. نمودار معیار موهر ـ کولمب حاصل از شبیه‌سازی.[۱۹]

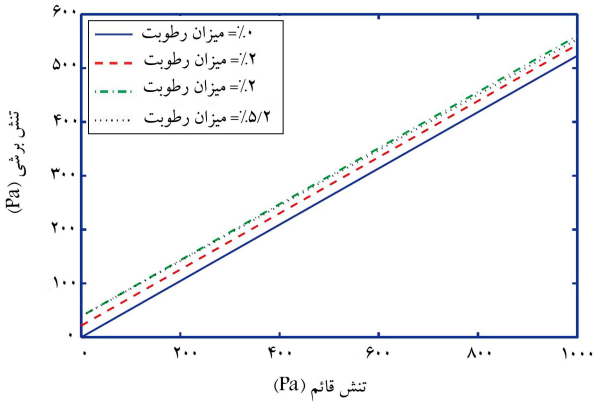


شکل ۸. پوش گسیختگی برای درجه‌ی اشباع‌های مختلف.[۱۱]

است: ۱. حالت سطح ذرات، ۲. امکان انباشتگی فاز مایع.[۱۹] مطابق آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی نمونه‌های ماسه‌یی و شیشه‌یی، دانه‌های ماسه‌یی، سطح زبری دارند و آب بیشتری برای تشکیل منیسک نسبت به دانه‌های شیشه‌یی که خیلی صیقلی هستند، نیاز دارند. از سوی دیگر، امکان انباشتگی جزیی موجب می‌شود تا به مقدار زیادی آب برای ایجاد پل‌های مایع نیاز باشد. برخی پژوهشگران (۲۰۰۶) نیز صحت نتایج آزمایشگاهی خود را با مقادیر حاصل از مدل‌سازی عددی مقایسه کرده‌اند. بر این اساس نمونه‌های عددی از ۷۳۰۷ ذره‌ی کروی با ۳ قطر مختلف (۱، ۱٫۵ و ۲ میلی‌متر) که به‌صورت تصادفی به نسبت مناسب ترکیبی (۵۰٪، ۳۰٪، و ۲۰٪) ساخته شده‌اند.[۱۹] حجم آب نسبت داده‌شده به پیوند مویینه بین دو ذره (V_b)، متناسب با قطرهای ذرات و فاصله‌ی مرکز به مرکز آن‌ها پنداشته شده است، به‌طوری که حجم کل همه‌ی پیوندهای مویینه در نمونه، برابر با آب اضافه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام‌شده در شکل ۷ نشان داده شده است.

در پژوهشی در سال ۲۰۰۸،[۱۱] به شبیه‌سازی عددی آزمایش برش مستقیم به‌منظور بررسی مقاومت برشی در مصالح دانه‌یی ریز و مرطوب اقدام شده است. نمونه از ذرات هم‌اندازه به قطر ۱ میلی‌متر ساخته شده و در طول شبیه‌سازی، سرعت عمودی بسیار کوچکی برای جلوگیری از ایجاد نیروهای بزرگ تماسی بین دیواره‌ها و ذرات مجاور به منظور اطمینان از توزیع یکنواخت تنش قائم ویژه (۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۲۵۰ پاسکال) در درون نمونه استفاده شده است. در مدل‌سازی مذکور نیز برای محاسبه‌ی نیروی مویینگی از رابطه‌ی ۱۱ استفاده شده است.[۱۱]

خط گسیختگی حاصل از شبیه‌سازی‌های ذکرشده در فاز خشک‌شدگی در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مطابق آن، چنانکه درجه‌ی اشباع افزایش یابد، بیشینه‌ی تنش برشی شکست به‌طورکلی افزایش می‌یابد. با این حال، خط گسیختگی و



شکل ۹. پوش گسیختگی به ازاء رطوبت‌های متفاوت.[۱۱]

نمودارهای تنش ـ کرنش برشی برای میزان رطوبت‌های ۲٪ و ۵/۲٪ تقریباً یکسان هستند.

در نمونه با درجه‌ی اشباع نسبتاً پایین (مقدار کمی آب)، تنش کششی به یک مقدار ثابت می‌رسد و با افزایش مقدار آب، منفذی افزایش نمی‌یابد. در طول مرحله‌ی ترشدگی نیز، همان روند که در شکل ۹ نشان داده است، مشاهده می‌شود.[۱۱] زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌های تحت برش قرارگرفته در طی مرحله‌ی خشک‌شدگی، عموماً بزرگ‌تر از نمونه‌های تحت برش در مرحله‌ی ترشدگی هستند. به‌طور کلی، چسبندگی ظاهری[۴] برای نمونه‌ی مورد آزمایش در طی مرحله‌ی خشک‌شدگی بزرگ‌تر از نتایج حاصل از مرحله‌ی ترشدگی به جز برای حالت با درجه‌ی اشباع پایین است. افزایش مقدار آب، نمونه را به ازدیاد چسبندگی ظاهری تا حدی که در آن تنش کششی ثابت شود، متمایل می‌سازد.

۳. مدل‌سازی عددی

در روش عددی اجزاء منفصل، محیط با اعمال نیروی خارجی، دچار بی‌نظمی می‌شود و در اثر آن اجزاء محیط به نحوی حرکت می‌کنند که دوباره به حالت تعادل برسند. در محیط دانه‌یی، حتی اگر این نیرو به تعداد کمی از ذرات وارد شود، با تماس‌های متوالی درکل محیط پخش می‌شود و تمامی ذرات در جهت ایجاد تعادل حرکت می‌کنند. بنابراین، تغییراتی از این قبیل در یک محیط دانه‌یی، به سه مرحله تقسیم می‌شوند:

- اعمال نیرو
- انتشار بی‌نظمی
- برقراری تعادل

سه مرحله‌ی ذکرشده، در حقیقت اساس مدل‌سازی به روش اجزاء منفصل هستند. در روش اجزاء منفصل، اندرکنش ذرات به‌صورت روندی دینامیکی تا برقراری توازن نیروهای داخلی ادامه می‌یابد. رفتار دینامیکی با استفاده از گام‌های زمانی با فرض سرعت‌ها و شتاب‌های ثابت در هرگام زمانی شبیه‌سازی می‌شود. چرخه‌ی محاسبات در نرم‌افزار PFC^{2D}، الگوریتم گام زمانی است که نیازمند بکارگیری تکراری قانون حرکت برای هر ذره، قانون نیرو ـ تغییرشکل و به هنگام‌سازی دائمی موقعیت‌های دیوارهاست. تماس‌ها به‌طور خودکار بین ذرات در طول چرخه تشکیل می‌شوند و از بین می‌روند. در شروع هرگام زمانی، با دانستن موقعیت ذرات و دیوارها، تماس‌ها به‌هنگام می‌شود. سپس به منظور تعیین نیروهای تماسی براساس حرکت نسبی بین دو ذره‌ی مستقل در تماس با هم و مدل تماس، قانون نیرو ـ تغییرشکل به‌کار برده می‌شود. در مرحله‌ی بعد، جهت تعیین سرعت و موقعیت ذرات، قانون حرکت استفاده می‌شود.

برای مدل‌سازی نیروی مویینگی به روش عددی DEM، باید نحوه‌ی توزیع مایع بین ذرات مشخص باشد. یکی از مسائل مهمی که در مدل‌سازی‌های اشاره‌شده توسط سایر پژوهشگران مبهم است، این مسئله است که پل‌های مذکور در بین کدامیک از ذرات وجود دارند و به چه نسبتی از میزان آب حفره‌یی سهم می‌برند. فرضیات و روش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است. یک فرض آن است که مایع می‌تواند بین ذرات جابه‌جا شود و به‌طور مساوی در میان همه‌ی شکاف‌هایی که کمتر از فاصله‌ی گسیختگی منیسک هستند، توزیع شود.[۲۰] فرض دیگر آن است که مایع به‌طور مساوی بین ذرات توزیع شود و جابه‌جایی مایع بین ذرات در صورتی که ویسکوزیته‌ی مایع به حد کافی پایین باشد، قابل چشم پوشی است.[۹] با ترکیب دو فرض مذکور، برخی پژوهشگران،[۲۱] فرض کردند که مایع به‌طور مساوی بین ذرات توزیع می‌شود و انتقال‌پذیر نیست. با توجه به اینکه میزان حجم پل مایع به فاصله‌ی بین ذرات وابسته است، بنابراین به نظر می‌رسد توزیع پل‌های مایع به نسبت فاصله‌ی مرکز به مرکز دو ذره‌ی مجاور به مجموع فواصل مراکز تمام ذرات در تماس، روش مناسبی است که در پژوهش حاضر استفاده و پس از توزیع آب بین منیسک‌ها، پایداری پل‌های مایع با توجه به سهم هر یک از آب حفره‌یی بررسی شده است، بدین منظور از رابطه‌ی ۱۲ استفاده شده است.

نرم‌افزار PFC^{2D} نسبت به نرم‌افزارهای مشابه نظیر YADE که توسط سایر پژوهشگران استفاده شده است، پرکاربردتر و کاربرمحور است که براساس روش اجزاء منفصل محاسبه می‌کند، ولی فقط اثر نیروی دافعه بین ذرات خاک‌های دانه‌یی تحت بارگذاری‌های مختلف را با مدل رفتاری خطی به‌صورت هم‌پوشانی ذرات جامد بر یکدیگر به طور مکانیکی شبیه‌سازی می‌کند. اما برای مدل‌سازی نیروی جاذبه‌ی حاصل از منیسک‌های شکل‌گرفته بین ذرات در اثر سیال حفره‌یی باید از ضمائم اضافه‌شده به مدل اولیه براساس محاسبه‌ی نیروی مویینگی و آثار متقابل این دو بر هم استفاده کرد. در مدل رفتاری اضافه‌شده به روش سعی و خطا، پارامترهای موردنیاز برای تعیین نیروی هر پل مایع، مشخص و نیروی مذکور توسط کد UDM نوشته‌شده به زبان C++ به نرم‌افزار داده می‌شود. یک شبیه‌سازی واقع‌گرایانه از محیط دانه‌یی غیراشباع، هنگامی امکان‌پذیر خواهد بود که رفتار هر دو فاز جامد و مایع خاک با معادلات مناسبی تعریف و با حل هم‌زمان معادلات فاز جامد و سیال، برهم‌کنش‌های بین دو فاز مذکور در مدل‌سازی در نظر گرفته شود.[۲۲]

نیروی مویینگی زمانی که ذرات اندازه‌یی بین ۴۰ تا ۴۰۰ میکرون (۰/۰۴ تا ۰/۴ میلی‌متر) دارند، شکل می‌گیرد. در ذرات بزرگ‌تر از ۴۰۰ میکرون، اصطکاک بین‌ذره‌یی منجر به رفتار چسبندگی برشی می‌شود. در ذرات کوچک‌تر از ۴۰ میکرون، این نیروی واندروالس است که به‌طور قابل توجهی شروع به افزایش به‌عنوان نیروی چسبندگی می‌کند.[۲۳] این مدل‌سازی در بازه‌ی اندازه‌ی ذرات بین ۰/۵ تا ۰/۱ میلی‌متر انجام شده است که در بازه‌ی ذکرشده است. تعداد ذرات تولیدشده با توجه به نحوه‌ی توزیع وزنی موردنظر در پژوهش حاضر، تعیین و در جدول ۱ ارائه شده است.

برای تولید ذرات، روش واحدی وجود ندارد و این کار به‌صورت تصادفی انجام می‌گیرد، بنابراین در هر بار تولید ذرات، موقعیت ذره دچار تغییر می‌شود. این امر موجب عدم تولید دو نمونه‌ی کاملا یکسان به روش مذکور می‌شود، دو نمونه‌ی کاملاً یکسان را تولید کرد. به عبارت دیگر، در هر بار تولید ذرات به علت تعیین قطر و مکان تصادفی[۹] ذرات، امکان رسیدن به یک نمونه‌ی کاملاً مشابه وجود ندارد.

جدول ۱. تعداد ذرات در هر نمونه.

مجموع تعداد ذرات	قطر ذرات (میلی‌متر)				
	۰٫۵	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۱
۱۷۲۵	۳۵	۱۴۱	۲۸۱	۵۶۳	۷۰۵ تعداد

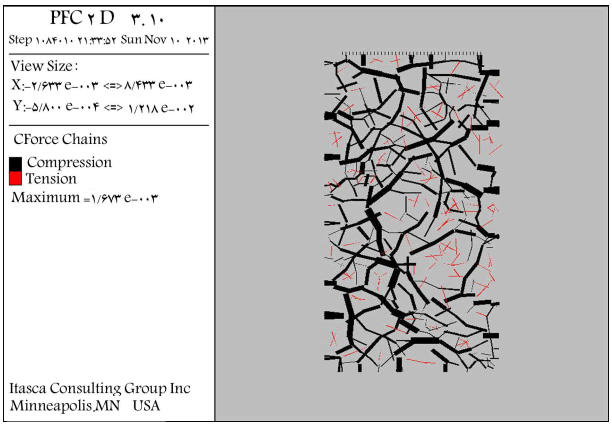
جدول ۲. مشخصات مصالح.

ویژگی مصالح	نمونه‌ی ۱	نمونه‌ی ۲	ذرات مرزی
قطر کمینه (mm)	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۰۵
قطر بیشینه (mm)	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۰۵
چگالی (kg/m^3)	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰
سختی عمودی (N/m)	10^6	10^6	2×10^6
سختی مماسی (N/m)	10^6	10^6	2×10^6
ضریب اصطکاک	۰٫۵	۰٫۹	-
مقاومت نرمال پیوند تماسی (N)	-	-	4×10^6
مقاومت برشی پیوند تماسی (N)	-	-	4×10^6

برای ایجاد شرایط اولیه جهت مدل‌سازی، فرضیات مختلفی توسط سایر پژوهشگران صورت گرفته است که قبلاً نیز اشاره شد. این فرضیات می‌توانند در نتایج تأثیرگذار باشند، بنابراین باید مواردی نظیر کفایت تعداد ذرات، شکل هندسی، شرایط مرزی، و ابعاد نمونه‌ها بررسی و مقایسه شود. در نوشتار حاضر، برای تهیه‌ی نمونه‌ی ذرات لازم جهت انجام آزمایش دو محوری، ابتدا ۴ دیوار به گونه‌یی تعریف می‌شوند تا فضایی با ارتفاع ۲۷٫۴ و عرض ۱۳٫۷ میلی‌متر را تولید کنند. ابتدا ذرات با قطر کوچک‌تر در محیط اشاره‌شده (که بزرگ‌تر از اندازه‌ی نهایی نمونه هستند) تولید می‌شوند. در ادامه، با افزایش شعاع ذرات تا اندازه‌ی موردنظر و حرکت دیواره‌ها با سرعت ثابت، تراکم موردنیاز حاصل می‌شود و نمونه به ارتفاع ۲۵٫۴ و عرض ۱۲٫۷ میلی‌متر می‌رسد.

سپس دیواره‌های صلب پیرامونی حذف و نمونه‌ی خاک شبیه‌سازی‌شده توسط یک ردیف از ذرات با قطرکمتر از کوچک‌ترین ذره‌ی نمونه از ۴ طرف احاطه می‌شود. همچنین قطر ذرات غشاء به نحوی است که از ۱٪ قطر نمونه نیز کمتر است. عملکرد این ذرات مانند غشاء لاستیکی در برگیرنده‌ی نمونه‌ی خاک، در آزمایش سه‌محوری است. تعریف شرایط مرزی بدین طریق، امتیازهایی از جمله: وقوع گسیختگی نمونه در ضعیف‌ترین صفحه، ایجاد فشار همه‌جانبه به‌صورت کاملاً یکنواخت به علت امکان اعمال نیرو به ذرات مرزی و عدم نیاز به تعریف روابط موردنیاز برای هندسه‌ی منیسک بین ذره و دیوار دارد. ویژگی‌های ذرات اصلی نمونه و ذرات مرزی در جدول ۲ ارائه شده است. باتوجه به مدل‌سازی‌های انجام‌گرفته توسط سایر پژوهشگران، در نوشتار حاضر نیز شبیه‌سازی در محدوده‌ی پاندولی صورت گرفته است، بنابراین شبیه‌سازی‌ها برای درجه‌های اشباع‌شدگی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و حالت خشک انجام شده است.

اعمال فشار جانبی بر نمونه‌ی خاک از طریق ذرات مرزی صورت می‌گیرد. این کار با محاسبه‌ی نیروی متناظر با فشار جانبی که بر هر ذره‌ی مرزی وارد می‌شود، انجام می‌گیرد. با استفاده از چنین روشی این اطمینان حاصل می‌شود که فشار جانبی به‌صورت کاملاً یکنواخت بر نمونه‌ی خاک اعمال شده است. در بالا و پایین نمونه‌ی خاک نیز دو دیواره‌ی صلب تعریف شده است، که با نزدیک شدن آن‌ها به یکدیگر



شکل ۱۰. تغییرات حجمی غشاء نمونه‌ی تحت بارگذاری.

نمونه تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی صورت‌گرفته در نوشتار حاضر، مقدار کشش سطحی آب (T_s)، برابر با (N/m) ۰٫۰۷۳۵ در دمای $15C^\circ$ در نظرگرفته شده است. همچنین در کلیه‌ی شبیه‌سازی‌ها، گام زمانی برابر با 1×10^{-6} ثانیه در نظر گرفته شده است. بارگذاری در تمام آزمایش‌ها با سرعت ثابت و برابر (cm/s) ۱٫۲۷ انجام شده‌اند.

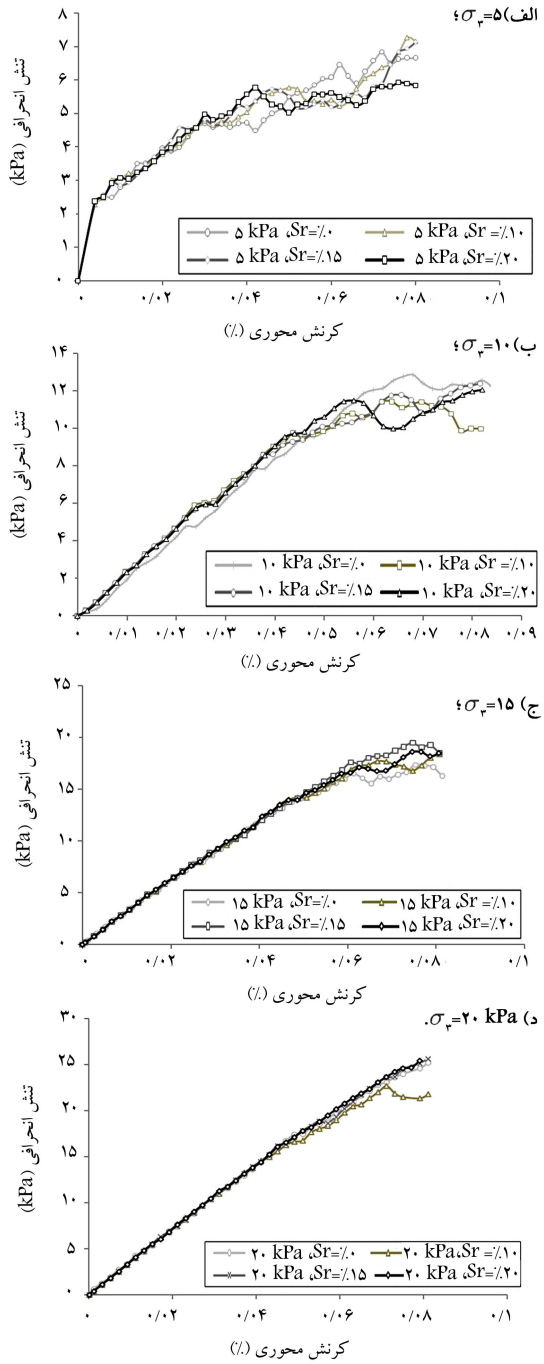
شکل ۱۰، خروجی توزیع نیروی کششی و فشاری یکی از نمونه‌های مدل‌سازی‌شده در هنگام گسیختگی را نشان می‌دهد. در واقع در شکل مذکور، نمونه در حالت گسیختگی دچار افزایش قطر در قسمت میانی شده و شکلی شبیه خمره پیدا کرده است و نمونه‌انقباضی عمل می‌کند. این رفتار با نمودارهای کرنش حجمی به کرنش محوری مطابقت دارد. لازم به ذکر است که خطوط موجود در شکل ۱۰، نشان‌دهنده‌ی نیروها و اندازه‌ی آن‌ها نیز نشان بزرگی‌شان در نمونه هستند و از نمایش ذرات اصلی نمونه صرف‌نظر شده است.

۱.۳. بررسی تأثیر درجه‌ی اشباع در رفتار نمونه‌ها

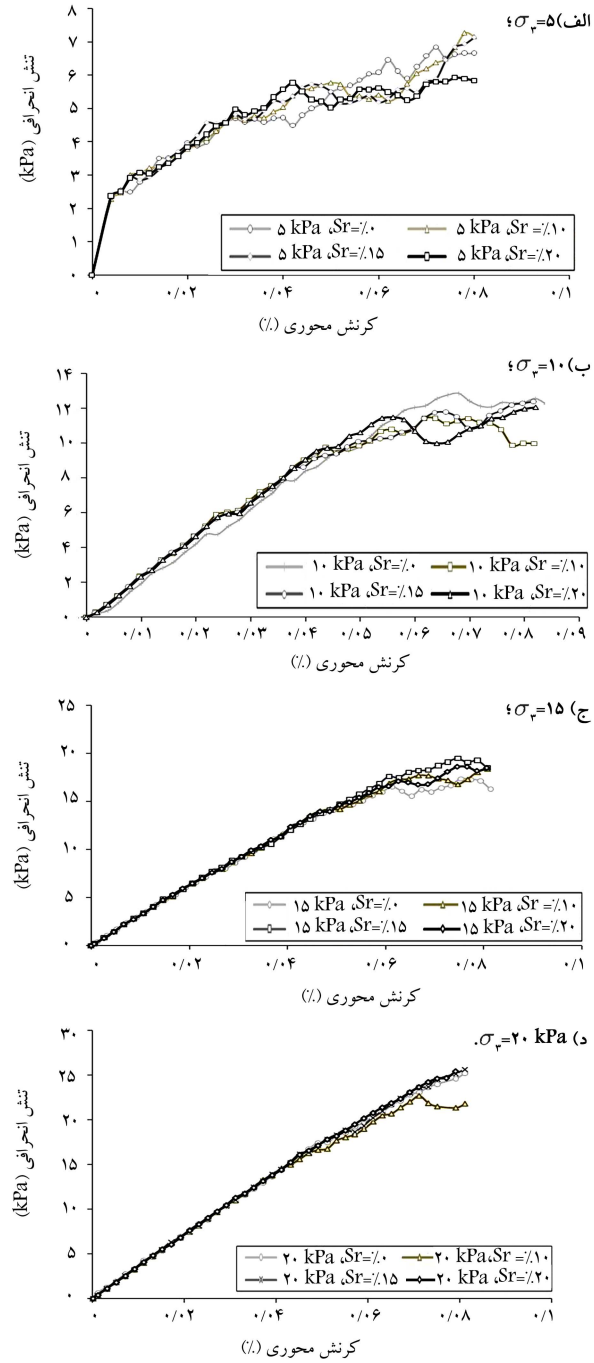
شکل ۱۱، روند تغییرات تنش تفاضلی در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۹ در درجه اشباع‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، تغییرات تنش تفاضلی در درجه اشباع‌های مختلف چندان زیاد نیست، بنابراین بزرگای تنش تفاضلی چندان تغییر نمی‌کند؛ اما با توجه به اینکه سایر پارامترهای مدل‌سازی یکسان است، لذا دامنه‌ی تغییرات موجود می‌تواند ناشی از میزان رطوبت در نمونه‌ها باشد. چرا که در اثر منیسک‌های ایجادشده در نمونه‌ها در درجه اشباع‌های مختلف، بین ذرات نیروی کششی ایجاد شده است. با این حال با توجه به اینکه اندازه‌ی این نیروها نسبت به نیروی ناشی از هم‌پوشانی ذرات کوچک‌تر است، بنابراین می‌توان گفت که در تنش همه‌جانبه‌ی پایین‌تر موجب دامنه‌ی تغییرات بیشتری می‌شوند. اما با افزایش تنش همه‌جانبه، میزان تغییرات ناشی از پل مایع کاهش می‌یابد. بنابراین پل‌های مایع باعث تغییر زیاد در ظرفیت باربری نمونه نمی‌شوند و این مسئله منطقی به نظر می‌رسد.

شکل ۱۲، نمودار تنش تفاضلی نسبت به کرنش محوری در درجه اشباع‌های مختلف در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۵ است. نرخ تغییرات تنش تفاضلی در نمونه‌های با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۵ کمتر از نمونه با ضریب اصطکاک ۰٫۹ است.

در واقع همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، میزان رطوبت در



شکل ۱۱. تنش تفاضلی نسبت به کرنش محوری در درجه اشباع‌های مختلف در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۹.



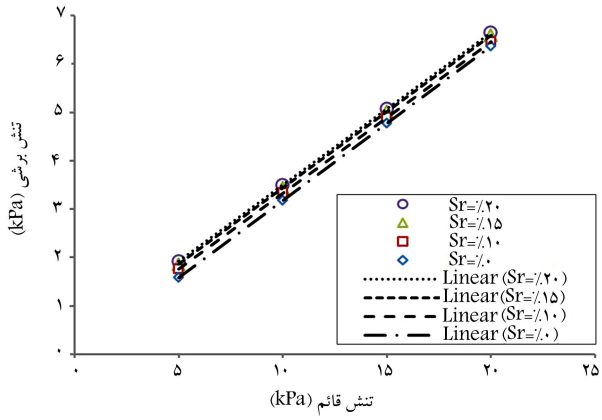
شکل ۱۲. تنش تفاضلی نسبت به کرنش محوری در درجه اشباع‌های مختلف در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۵.

محدوده‌ی تنش تفاضلی تأثیر چندانی ندارد و درجه‌ی اشباع فقط موجب تغییرات دامنه‌ی تنش تفاضلی شده است که ناشی از نیروی مویینگی بین ذرات است. با این حال، شیب نمودارها در همه‌ی آزمایش‌ها با درجه‌ی اشباع برابر یکسان بوده است.

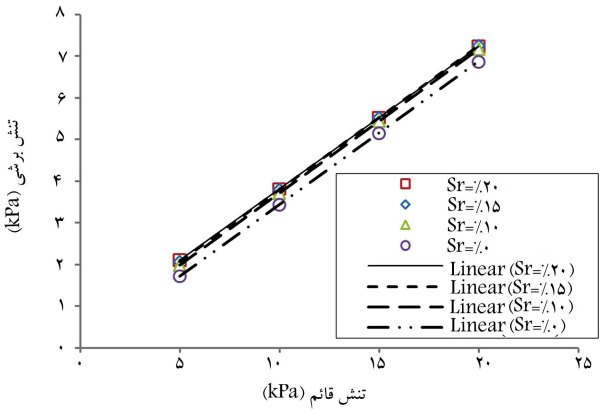
همان‌طورکه نتایج موجود نشان می‌دهند، ضریب اصطکاک بین ذره‌یی موجب تغییر در تنش تفاضلی در نمونه‌ها می‌شود. این مسئله به نحوی است که افزایش ضریب اصطکاک بین ذره‌یی مانند زبری ذرات عمل می‌کند و باعث می‌شود تا ذرات به سختی امکان حرکت بین یکدیگر را پیدا کنند و در نتیجه به نیروی بیشتری برای متراکم کردن نمونه نیاز باشد.

۲.۳. تأثیر درجه‌ی اشباع در زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی ظاهری

هدف اصلی از مطالعه‌ی تنش و کرنش محوری در پژوهش حاضر، بررسی پارامترهای c و φ در معیار گسیختگی موهر ـ کولمب بوده است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش درجه‌ی اشباع در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۵، میزان چسبندگی ظاهری (c) افزایش می‌یابد. این امر در حالی است که در حالت اشباع کامل براساس مکانیک خاک کلاسیک، باید نمونه با دانه‌بندی مذکور، هیچ مقدار



شکل ۱۳. نمودار پوش گسیختگی موهر ـ کولمب در نمونه‌ها با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۵ در درجه‌های اشباع مختلف.



شکل ۱۴. نمودار پوش گسیختگی موهر ـ کولمب در نمونه‌ها با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۹ در درجه‌های اشباع مختلف.

چسبندگی از خود نشان ندهد. شاید بتوان گفت که شرایط اتفاق افتاده در نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده مشابه رفتار ماسه‌ی بادی غیراشباع است، زیرا در این حالت با اینکه ماسه هیچ چسبندگی ندارد، با این حال در چنین شرایطی رفتاری مشابه خاک‌های چسبنده از خود نشان می‌دهد. در مقابل، افزایش رطوبت نمونه، تأثیری در زاویه‌ی اصطکاک داخلی (φ) ندارد و پوش گسیختگی در نمونه‌ها با یکدیگر موازی است.

شکل ۱۴، پوش گسیختگی نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۹ را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. در نمونه با ضریب اصطکاک ۰٫۹، زاویه‌ی اصطکاک داخلی φ نسبت به نمونه‌ی یک بزرگ‌تر شده است. این امر ناشی از افزایش ضریب اصطکاک بین ذره‌یی در نمونه‌ی مذکور است، زیرا در این شرایط برای جابه‌جایی ذرات در اثر تراکم نیاز به اعمال تنش انحرافی بیشتری نسبت به نمونه‌ی شماره یک بوده است. در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۹ نیز مشابه نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰٫۵، با افزایش درجه‌ی اشباع، چسبندگی ظاهری افزایش یافته است؛ در حالی که زاویه‌ی اصطکاک داخلی (φ) تغییر نکرده و پوش گسیختگی در آزمایش‌ها با یکدیگر موازی بوده است. جدول ۳، پارامترهای معیار موهر ـ کولمب در نمونه‌ها تحت شرایط مختلف اشباع‌شدگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مذکور مشاهده می‌شود، اختلاف بین زاویه‌ی اصطکاک داخلی در دو نمونه کمتر از ۲ درجه است.

۳.۳. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی و عددی سایر پژوهشگران

از آنجایی که اعتبار مدل‌سازی‌های عددی باید به نحو مطلوبی بررسی شود، لذا بهترین راه برای رسیدن به هدف مذکور، مقایسه‌ی نتایج حاصل با پژوهش‌های سایر پژوهشگران است. بدین منظور نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته در پژوهش حاضر با نتایج سایر پژوهشگران مقایسه شده است. مدل ارائه‌شده در نوشتار حاضر، براساس محاسبه‌ی نیروی ناشی از مویینگی نسبت به فاصله‌ی بین ذره‌یی است. درواقع براساس مدل ارائه‌شده، نیروی مویینگی در اثر افزایش فاصله بین ذرات کاهش می‌یابد، تا نهایتاً با رسیدن به فاصله‌ی نهایی، پیوند شکسته و نیرو صفر می‌شود. بازه‌ی تغییرات نیرو از ۱×۱۰^{-۴} تا ۱×۱۰^{-۵} نیوتن است و با افزایش حجم پل مایع، مقدار نیرو افزایش می‌یابد. نتایج حاصل با مبانی ارائه‌شده‌ی برخی پژوهشگران، مطابقت دارد.[۱۲] اختلافی که بین نتایج حاصل از مدل‌سازی صورت‌گرفته با نتایج پژوهش اخیر وجود دارد، ناشی از تفاوت شعاع ذرات و حجم پل مایع است. با این حال با توجه به اینکه محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات در بازه‌ی اشاره‌شده در پژوهشی در سال ۱۹۹۶،[۲۳] بوده است، بنابراین محدوده‌ی نیرو در بازه‌ی مشخص‌شده است. با استفاده از مدل ارائه‌شده، آزمایش دو محوری بر روی خاک غیراشباع شبیه‌سازی شده و براساس تنش‌های اصلی $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$، دوایر موهر ترسیم و سپس پوش گسیختگی موهر ـ کولمب عبور داده شده است. از مقایسه‌ی نتایج حاصل (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) با نتایج شبیه‌سازی آزمایش سه محوری توسط برخی پژوهشگران،[۱۳] می‌توان دریافت که روند تغییرات چسبندگی به نحو مطلوبی در طی سیکل بارگذاری نمونه‌ها روی داده است. با این حال تفاوت موجود بین مقادیر می‌تواند ناشی از اختلاف مقدار اشباع‌شدگی، تفاوت اندازه‌ی ذرات، ساده‌سازی‌های صورت‌گرفته، و تعداد ذرات مدل شده باشد. آزمایشی مشابه برش مستقیم نیز در پژوهشی در سال ۲۰۰۷،[۱۸] به طور تجربی انجام و سپس شبیه‌سازی شده است. نتایج تجربی حاصل (شکل ۶) با مدل‌سازی صورت‌گرفته در نوشتار حاضر مطابقت خوبی دارد، زیرا اندازه‌ی ذرات مشابه یکدیگر بوده است. با این حال درجه‌ی اشباع‌شدگی ذرات متفاوت است و تفاوت موجود بین نتایج می‌تواند ناشی از این مسئله باشد. تفاوت موجود بین نتایج در نوشتار حاضر و نتایج شبیه‌سازی نیز می‌تواند ناشی از تفاوت در اندازه‌ی ذرات و تعداد آن‌ها بوده باشد (شکل ۷).

با این حال تمامی نتایج تجربی و مدل‌سازی، نشان‌دهنده این مسئله هستند که در اثر تغییر درجه‌ی اشباع در خاک‌های دانه‌یی غیراشباع، چسبندگی ظاهری خاک دچار تغییر می‌شود و درواقع خاک دانه‌یی از خود چسبندگی نشان می‌دهد که ناشی از پدیده‌ی مویینگی خواهد بود. همچنین این روند تا درجه‌ی اشباع خاصی با توجه به منحنی دانه‌بندی خاک ادامه می‌یابد و سپس به ثبات می‌رسد. در مقابل، زاویه‌ی اصطکاک داخلی تحت تأثیر رطوبت قرار نگرفته و فقط به ساختار خاک وابسته بوده است. این روند در شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته در نوشتار حاضر نیز مشاهده شده است که نشان‌دهنده‌ی توانایی خوب مدل در شبیه‌سازی مسئله‌ی مویینگی است.

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با مشخص‌شدن حجم پل مایع می‌توان با حل عددی، زاویه‌ی ترشدگی را تعیین و سپس نیروی مویینگی را محاسبه کرد. همچنین تأثیر میزان رطوبت در پل مایع و نیروی مویینگی بررسی شده است. در شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته، اثر فشار همه‌جانبه بررسی شده است. با افزایش میزان فشار همه‌جانبه،

جدول ۳. پارامترهای معیار موهر ـ کولمب در نمونه تحت شرایط مختلف اشباع‌شدگی.

پارامتر مقاومت برشی	نمونه‌ی ۱ (ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰/۵)			
	$Sr = ۲۰٪$	$Sr = ۱۵٪$	$Sr = ۱۰٪$	$Sr = ۰٪$
$c(Pa)$	۳۴۷/۹	۲۹۳/۸	۲۰۷/۲	-
$\varphi(degree)$	۱۷/۴۸	۱۷/۴۸	۱۷/۳۸	۱۷/۶۹
	نمونه‌ی ۲ (ضریب اصطکاک بین ذره‌یی ۰/۹)			
$c(Pa)$	۳۹۸/۱	۳۵۴/۴	۲۷۱	-
$\varphi(degree)$	۱۸/۸۳	۱۸/۹۸	۱۸/۹۸	۱۸/۹۳

مقدار تنش انحرافی در هر دو نمونه افزایش یافته است. مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش تنش همه‌جانبه، میزان درصد تخلخل نمونه‌ها کاهش می‌یابد. براساس مدل‌سازی‌های انجام‌گرفته، ضریب اصطکاک به‌صورت زبری ذرات اثر می‌کند و در نتیجه در نمونه با ضریب اصطکاک بزرگ‌تر برای حرکت ذرات ریزتر در بین ذرات پیرامونی به مقدار نیروی بیشتری نیاز است. مدل میکرومکانیک استفاده‌شده برای تحلیل خاک‌دانه‌یی در شرایط غیراشباع نشان می‌دهد که نیروهای جاذب ایجادشده در اثر مویینگی و هیسترسیس هیدرولیک می‌تواند نقش مهمی در پارامترهای معیار گسیختگی موهر ـ کولمب بازی کند. نیروهای جاذب مذکور، موجب ایجاد تنش کششی می‌شوند که به‌صورت چسبندگی در خاک ظاهر می‌شوند و سختی خاک را افزایش می‌دهند. این چسبندگی با افزایش درجه‌ی اشباع افزایش می‌یابد. اثر مویینگی در مقاومت خاک غیراشباع به‌صورت اصطکاکی نیست، بلکه ماهیت چسبندگی دارد. نمونه‌های متراکم‌تر، بیشینه‌ی زاویه‌ی اصطکاک بیشتری را نسبت به نمونه‌های سُل در همان درجه‌ی اشباع و تحت همان مکش از خود نشان می‌دهند. از مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های خشک و غیراشباع مشخص شد که زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌های خشک و غیراشباع تقریباً با یکدیگر برابر است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها، مطابقت خوبی با دانسته‌های مکانیک خاک‌های غیراشباع دارد. این امر نشان‌دهنده‌ی توانایی مدل ارائه‌شده در شبیه‌سازی محیط دانه‌یی غیراشباع است.

پانوشت‌ها

1. macroscopic
2. microscopic
3. discrete element method
4. pendular regime
5. funicular state
6. contact angle
7. wetting angle
8. gorge
9. random

منابع (References)

1. Simpson, B. and Tatsuoka, F. "Geotechnics: The next 60 years", *Geotechnique*, **58**(5), pp. 357-368 (2008).
2. Kato, S., Yamamoto, S. and Nonami, S. "Study of the influence of adhesion force on deformation and strength of unsaturated soil by DEM analysis", *In: Rahardjo, H., et al. Editors, Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils*, Singapore (2000).
3. Bocquet, L., Charlaix, E. and Restagno, F. "Physics of humid granular media", *Compterendu de Physique de l'Academia des Sciences*, **3**(2), pp. 207-215 (2002).
4. Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. "The distinct numerical model for granular assemblies", *Gotechnique*, **29**(1), pp. 47-65 (1979).
5. Kim, T.H. and Sture, S. "Effect of moisture on attraction force in beach sand", *Marine Georesources and Geotechnology*, **22**(1-2), pp. 33-47 (2004).
6. Lu, N. and Likos, W.J., *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & SonsWiley, New Jersey (2004).
7. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, NewYork (1993).
8. Pitotis, O. "Assemblees de grain lubrifies: Elaboration dun system modele experimentale et etude de la loi de contact", Theses de Doctorat, Ecole National des Ponts et Chaussees (1999).
9. Mikami, T., Kamiya, H. and Horio, M. "Numerical simulation of cohesive powder behavior in a fluidized bed", *Chemical Engineering Science*, **53**(10), pp. 1927-1940 (1998).
10. Lian, G., Thornton, C. and Adams, M.J. "A Theoretical study of the liquid bridge forces between two rigid spherical bodies", *Journal of Colloid an Interface Science*, **161**(1), pp. 138-147 (1993).
11. El Shamy, U. and Groger, T. "Micromechanical aspects of the shear strength of wet granular soils", *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, **32**(14), pp. 1763-1790 (2008).
12. Chen, Y., Zhao, Y., Gao, H. and et al. "Liquid bridge force between two unequal-sized spheres or a sphere and a plane", *Particuology*, **9**(4), pp. 374-380 (2011).
13. Scholtès, L., Chareyre, B., Nicot, F. and et al. "Discrete modelling of capillary mechanisms in multi-phase granular media", *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, **52**(3), pp. 297-318 (2009).

14. Fisher, R.A. "On the capillary forces in an ideal soil; correction of formulae given by W. B. Haines", *J. Agric. Sci.*, **16**(03), pp. 492-505 (1926).

15. Hotta, K., Takeda, K. and Iinoya, K. "The capillary binding force of a liquid bridge", *Powder Technology*, **10**(4-5), pp. 231-242 (1974).

16. Adams, M.J. and Perchard, V. "The cohesive forces between particles with interstitial liquid", *Institute of Chemical Engineering Symposium*, **91**, pp. 147-160 (1985).

17. Jiang, M. and Shen, Z. "Strength and fabric evolution of unsaturated granular materials by 3D DEM analyses", *AIP Conference Proceedings*, **1542**(1), pp. 273-276 (2013).

18. Richefeu, V., El-Youssoufi, M. and Radjai, F. "Shear strength of unsaturated soils: Experiments, DEM simulations, and micromechanical analysis", *Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanics of Unsaturated Soils*, Weimar, Germany (2007).

19. Richefeu, V., El-Youssoufi, M. and Radjai, F. "Shear strength properties of wet granular materials", *Physical Review*, **E 73**(5: part 1), pp.1-12 (2006).

20. Muguruma, Y., Tanaka, T., Kawatake, S. and et al. "Numericalsimulation of particulate flow with liquid bridge between particle, simulation of a centrifugal tumbling granulator", *Powder Technology*, **109**(1-3), pp. 49-57 (2000).

21. Yang, R.Y., Zou, R.P. and Yu, A.B. "Numerical study of the packing of wet coarse uniform spheres", *A.I.Ch.E. Journal*, **49**(7), pp. 1656-1666 (2003).

22. Tourani, K., Mahboubi, R. and Seyedi Hosseininia, E. "Discrete element method for modeling the mechanical behavior of unsaturated granular material", *Computational Methods In Engineering Isfahan University of Technology*, **35**(1), pp 157-181 (sep., 2016).

23. Kraan, M. "Techniques for the measurement of the flow properties of cohesive powders", PhD Dissertation, Delf University, Delft, Netherland (1996).