

مدل سازی رفتار خاک‌های دانه‌ای غیراشباع به روش اجزا منفصل

کیخسرو تورانی^۱، احمد رضا محبوبی اردکانی^{۱*} و سید احسان سیدی حسینی نیا^۲

۱. دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲. دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۱۰ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۰۴/۱۵)

چکیده - در بررسی رفتار مهندسی خاک‌ها اگرچه بخش قابل توجهی از شرایطی که مهندسی ژئوتکنیک با آن روبرو می‌شود شامل خاک‌های غیراشباع است، با این حال تحلیل و طراحی به روش مرسوم با فرض شرایط محدودکننده خاک به صورت کاملاً خشک و یا کاملاً اشباع انجام می‌پذیرد. در خاک‌های غیراشباع، پدیده موئینگی موجب ایجاد نیروهای جاذب بین ذرات می‌گردد. روش اجزا منفصل، روشی مناسب برای بررسی اثرات موئینگی است. در روش اجزا منفصل به صورت بی‌دریبی محاسبات قانون دوم نیوتن برای ذرات و قانون نیرو-جابجایی در نقاط تماس ذرات صورت می‌پذیرد. در این مقاله، رفتار خاک‌های غیراشباع در رژیم پاندولی با استفاده از روش اجزا منفصل شبیه‌سازی شده است. آزمایش سه‌محوری به صورت دوبعدی و با در نظر گرفتن اثرات نیروی موئینگی مدل‌سازی گردیده است. نهایتاً، اثرات موئینگی بر پارامترهای ماکرو خاکدانه‌ای مدل‌سازی شده (تنش، کرنش محوری، کرنش حجمی و درصد نشانه خلاء) و پارامترهای معیار گسیختگی کولمب بررسی شده است. واژگان کلیدی: روش اجزا منفصل، نیروی موئینگی، رژیم پاندولی، پارامترهای مقاومت برشی کولمب، عدد تماسی.

Discrete Element Method for Modeling the Mechanical Behavior of Unsaturated Granular Material

K. Tourani¹, A. R. Mahboubi^{1*} and E. Seyed Hosseinia²

1. Department of Civil and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

2. Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract: Although a significant portion of conditions encountered in geotechnical engineering, for investigating engineering behavior of soil, involves unsaturated soils; the traditional analysis and design approach has been to assume the limiting conditions of soils being either completely dry or completely saturated. In unsaturated soils the capillary force produce attractive forces between particles. Discrete Element Method (DEM) is an appropriate tool to consider the capillary effects. The calculations performed in DEM is based on iterative application of Newton's second law to the particles and force-displacement law at the contacts. In the present study, the behavior of unsaturated soils in pendular regime is simulated utilizing DEM. Triaxial

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a_mahboubi@sbu.ac.ir

compression tests were modeled as two-dimensional, considering capillary force effects. Finally, capillary effects on Macro parameters of a simulated granular soil (stress, axial strain, volumetric strain and void ratio) and Mohr Coulomb failure criteria parameters were studied.

Keywords: Discrete Element Method (DEM), capillary force, pendular regime, Coulomb shear strength parameters, coordination number.

فهرست علائم

δ_n^{\max}	فاصله شکست پیوند (mm)	C	چسبندگی ظاهری (Pa)
ε_v	کرنش حجمی	D	فاصله بین ذره‌ای (m)
ε_r	کرنش محوری	F_1	نیروی کشش سطحی (N)
ϕ	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	F_2	نیروی هیدرواستاتیک (N)
Φ_1	زاویه ترشدگی در ذره بزرگ‌تر (درجه)	F_{cap}	نیروی موئینگی (N)
Φ_2	زاویه ترشدگی در ذره کوچک‌تر (درجه)	P_c	فشار موئینگی (Pa)
θ	زاویه تماس (درجه)	r_1	شعاع ذره بزرگ‌تر (mm)
ρ_1	شعاع انحنای خارجی منیسک (mm)	r_2	شعاع ذره کوچک‌تر (mm)
ρ_2	شعاع انحنای داخلی منیسک (mm)	S_r	درصد اشباع
σ_n	تنش نرمال (Pa)	U_a-U_w	مکش بافتی (Pa)
$\Delta\sigma_d=\sigma_1-\sigma_3$	تنش انحرافی (Pa)	V	حجم منیسک (mm ³)
T_s	کشش سطحی آب (N/m)	V_1	حجم حاصل از دوران کمان P_1, P_2, P_3 حول خط‌المركزین دو ذره (mm ³)
τ	تنش برشی (Pa)	V_2	حجم قطعات کره (mm ³)

۱- مقدمه

برای هر المان، برای پیدا کردن موقعیت‌های جدید المان‌ها استفاده می‌شود. در روش اجزاء منفصل به صورت پی‌درپی محاسبات قانون دوم نیوتن برای ذرات و قانون نیرو-جابجایی در نقاط تماس ذرات صورت می‌پذیرد. قانون دوم نیوتن به منظور بررسی حرکت هریک از ذرات تحت اثر نیروهای حجمی و تماسی وارد بر آنها و قانون نیرو-جابجایی جهت به‌هنگام‌سازی نیروهای تماسی ناشی از حرکت نسبی در هر تماس به کار گرفته می‌شود. در واقع در این روش با اعمال نیروی خارجی (یا تغییر مکان) به مجموعه ذرات، که موجب جابه‌جایی در ذرات مرزی می‌شود، انتشار این جابه‌جایی در محیط شبیه‌سازی می‌گردد تا دوباره محیط به تعادل برسد. در محیط دانه‌ای حتی اگر این نیرو به تعداد کمی از ذرات وارد

روش اجزاء منفصل^۱ (DEM) اولین بار توسط کاندال و استراک (۱۹۷۹)، به صورت الگوریتمی شامل دو مرحله ارائه شده است. نخست، زمانی که المان‌ها (ذرات مجزا از هم) اندکی در یکدیگر نفوذ کرده‌اند نیروهای اندرکنش با استفاده از روابط نیرو-جابه‌جایی محاسبه می‌شود [۱]. همان‌طور که کاندال و هارت (۱۹۹۲) اشاره کردند [۲]، اگرچه به نظر می‌رسد که در یک مفهوم ریاضی نفوذ دو المان مجزا به یکدیگر می‌تواند نامناسب باشد، اما در واقع نشان‌دهنده تغییر شکل نسبی لایه‌های سطحی المان‌ها است (به‌ویژه هنگامی که ذرات سطوح خشن و زبری دارند) و این مسئله نسبت به هم‌پوشانی بین آنها واقعی به نظر می‌رسد. در مرحله دوم، قانون دوم نیوتن برای تعیین شتاب،

شود، از طریق تماس بین ذرات در کل محیط پخش می‌گردد و تمامی ذرات در جهت ایجاد تعادل مجدد حرکت می‌کنند. بنابراین، تغییرات در یک محیط دانه‌ای را می‌توان به سه مرحله اعمال نیرو، انتشار بی‌نظمی و برقراری مجدد تعادل تقسیم نمود. این سه مرحله در حقیقت اساس مدل‌سازی به‌روش 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 هر گام زمانی شبیه‌سازی می‌شود. روند حل مشابه با روش تفاضل محدود برای تحلیل‌های پیوسته است. روش اجزاء منفصل براساس ایده انتخاب گام زمانی کوچک استوار است، به‌طوری‌که در طول یک گام زمانی جابه‌جایی‌ها بسیار کوچک بوده و اغتشاش اعمال شده نمی‌تواند بیشتر از ذره مجاور خود انتشار یابد و می‌توان سرعت و شتاب ذرات را در طول هر گام زمانی ثابت فرض نمود (شبیه‌سازی شبه‌استاتیکی). بنابراین در محاسبه نیروی وارد بر هر ذره در هر لحظه، تنها ذرات در تماس با آن مدنظر قرار می‌گیرند. این ایده، DEM را قادر می‌سازد تا بدون نیاز به مقادیر بسیار زیاد حافظه، مجموعه‌های بسیار بزرگ از ذرات را شبیه‌سازی کند.

ایده اولیه تحلیل خاک‌های ماسه‌ای به‌عنوان مجموعه‌ای از دانه‌ها توسط موگامی (۱۹۶۵) ارائه شد [۳]. به‌دلیل پیچیدگی و تنوع اشکال ممکن برای ذرات، محیط دانه‌ای به‌عنوان یک محیط ایده‌آل برای مطالعه، درنظر گرفته می‌شود. محیط شرح داده شده براساس برخی مفروضات، محیطی متشکل از ذرات کروی شکل همگن و کاملاً صاف (بدون ناهمواری) است. سطح واقعی ذرات خاک همیشه مژرس و کم و بیش دارای زبری است که می‌تواند موجب تغییر در نیروهای مؤثنتگی گردد [۴]. در خاک‌های غیراشباع، وجود پدیده مؤثنتگی بین دو ذره جامد به‌خوبی درک می‌شود، اما اثرات این پدیده خیلی روشن نیست. در اثر اندرکنش فازهای آب، هوا و دانه‌ها، غشای الاستیکی بین ذرات شکل می‌گیرد که، با توجه به میزان مکش

بافتی ایجاد شده، دارای شکل حلقوی است. این غشا موجب ایجاد نیروهای کششی بین ذرات شده که تأثیر آن در محیط‌های دانه‌ای بیشتر قابل مشاهده است. به‌طور کلی دسترسی به اطلاعات محلی مانند نیروهای تماسی و یا پیوندهای مایع در محیط دانه‌ای بسیار مشکل است، با این حال، رفتار این نوع از خاک‌ها و اندرکنش فازهای مختلف خاک به‌طور وسیعی از طریق مدل‌هایی از نوع مدل‌های پدیده‌شناسی^۲ بررسی شده‌اند. این مدل‌ها اگرچه کم و بیش در مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار در بعضی از مسیرهای تنش موفق بوده‌اند ولی به‌طور کامل اثری از آنچه در ساختار ذره‌ای خاک (مقیاس میکروسکوپی) می‌گذرد در این مدل‌ها به‌چشم نمی‌خورد. به‌عبارت دیگر، این مدل‌ها از رفتار خاک در مقیاس ذرات نشأت نمی‌گیرند و اثری از فیزیک و تغییرات فیزیکی که در ماده به‌وجود می‌آید در این مدل‌ها وجود ندارد. برای حل این مشکل می‌توان از DEM، که ذرات گسسته خاک و برهم‌کنش آنها با یکدیگر و آب حفره‌ای را شبیه‌سازی می‌کند، استفاده کرد. مدل‌های عددی بر پایه روش اجزاء منفصل اجازه شبیه‌سازی رفتار محیط‌های ناپیوسته را می‌دهند. درنظر گرفتن خاک به‌صورت مجموعه‌ای از ذرات مجزا از هم و تغییر شکل ناپذیر (سخت)، که می‌تواند در نقاط تماس دارای هم‌پوشانی شوند، روش اجزاء منفصل (DEM) را برای مدل‌سازی مصالح دانه‌ای مانند خاک‌های ماسه‌ای مناسب می‌نماید. خصوصیات در مقیاس دانه‌ای به‌مواردی مانند: جنس، شکل، اندازه و وضعیت سطح دانه‌ها بستگی دارد. علاوه بر این، در رویکرد منفصل به تعاریف دقیق از اندرکنش هر ذره با ذرات مجاور از طریق تماس مکانیکی، اصطکاک و چسبندگی می‌پردازد. تأثیرات خارجی مثل رطوبت، دما و فشار نیز می‌توانند بر تغییرات در اندرکنش‌ها تأثیرگذار باشند [۵].

در این مقاله، هدف مدل‌سازی عددی رفتار مصالح دانه‌ای غیراشباع در رژیم پاندولی^۳ با درنظر گرفتن اثرات پل مایع (منیسک^۴) و با استفاده از روش DEM است. این کار در نرم‌افزار اجزاء منفصل PFC^{2D} و با برنامه‌نویسی به زبان ++C انجام گرفته است. در این مدل، بیان صریحی از نیروی مؤثنتگی

به عنوان تابعی از فاصله بین ذره‌ای، حجم پل مایع، کشش سطحی و درجه اشباع صورت می‌گیرد. در واقع هدف شبیه‌سازی یافتن نحوه رفتار خاک غیراشباع بر مبنای عملکرد تک تک ذرات (DEM) است. مدل پیشنهادی قادر به ارائه خصوصیات اصلی مکانیکی و هیدرولیکی خاک دانه‌ای غیراشباع است. در ادامه نحوه عملکرد مدل در شبیه‌سازی آزمایش دومحوری (سه محوری در حالت دوبعدی) بر روی نمونه‌ها برای بررسی اثر درصد اشباع خاک بر پارامترهای معیار گسیختگی کولمب به کار گرفته شده است. همچنین تأثیر پارامتر ضریب اصطکاک بین ذره‌ای بر نشانه خلاء و عدد تماسی نمونه‌ها بررسی شده است.

۲- محاسبه نیروی موئینگی ناشی از پل مایع (منیسک)

یک خاک غیراشباع شامل فازهای: ذرات جامد، هوا، آب و سطح تداخل آب و هوا است. در این گونه خاک‌ها، به واسطه وجود پل مایع در بین ذرات مجاور هم، نیروی موئینگی بین ذرات به وجود می‌آید. تأثیرات این نیرو بستگی به درجه اشباع محیط دارد. هنگام پایین بودن درصد رطوبت و تا قبل از قطع پل مایع بین دو ذره، به واسطه مکش بافتی یا فشار داخلی موئینگی در پل مایع بین دو ذره، نیروی کششی بین ذرات به وجود می‌آید. تا زمانی که آب تراوش^۵ نکند، امکان شبیه‌سازی اثرات آب در رژیم پاندولی وجود دارد. در واقع رژیم پاندولی حالتی از اشباع شدگی است که محیط متخلخل در کمترین وضعیت اشباع خود است و پل‌های آبی بین ذرات تشکیل می‌شود. لازم به ذکر است هنگامی که فاز آب دیگر پیوسته نیست رژیم پاندولی شروع به شکل‌گیری می‌کند. این بدین معنی است که فاز آب تمامی فضای بین ذرات را پر نکرده و فقط بین ذرات مجاور هم پل مایع شکل می‌گیرد. رژیم پاندولی در درصد اشباع پایین‌تر از ۳۰٪ روی می‌دهد [۶]. بدیهی است که در یک محیط دانه‌ای، و در حالت درجه اشباع بزرگ‌تر از رژیم پاندولی، پل مایع و اندرکنش‌های موئینگی در ذرات مختلف با

پیچیدگی‌های بیشتری همراه است. لذا این مدل برای هر درجه اشباعی قابل قبول نیست.

نیروی موئینگی اولین بار توسط فیشر (۱۹۲۶)، و با این فرض که شکل پل مایع به صورت حلقوی است، محاسبه شد [۷]. دو روش مختلف برای تخمین این نیرو استفاده شده است: در روش اول نیرو در گردنه یا تنگه منیسک تخمین زده می‌شود و در روش دوم که به روش تماسی شناخته می‌شود، نیرو در محل تماس پل مایع با دانه جامد برآورد می‌گردد [۸]. این دو روش دقت معقولی از نظر تئوری، تجربی و عددی دارند [۹]. روش دیگر برای تعیین نیروی موئینگی براساس تعادل و عدم تعادل ترمودینامیک است. در این حالت می‌توان شعاع پل مایع را ثابت فرض کرده و به وسیله حل معادله کلونین، به روش عددی یا تحلیلی، فشار بخار غیراشباع موجود در محیط نمونه و نهایتاً نیروی موئینگی را محاسبه کرد [۱۰]. این کار می‌تواند برپایه ثابت نگه‌داشتن حجم پل مایع و براساس اصل انرژی، مقدار نیروی موئینگی انجام شود [۱۱].

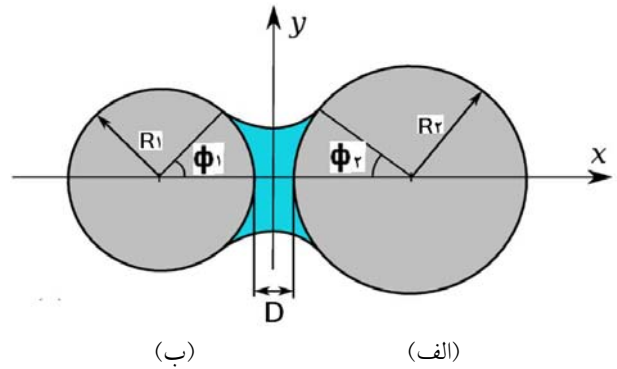
مقدار نیروی موئینه در پدیده موئینگی بین دو ذره که با پل مایع به یکدیگر متصل شده‌اند را می‌توان به وسیله معادله لاپلاس - یانگ به طور دقیق تعیین نمود [۱۲]. شکل هندسی پل مایع و فرضیات مورد استفاده در حل به روش معادله لاپلاس - یانگ در شکل (۱) نشان داده شده است.

R_1 و R_2 شعاع ذرات و D فاصله بین ذره‌ای^۶ (یا همان فاصله شکست پیوند) است. زاویه ϕ_1 و ϕ_2 نشان‌دهنده زاویه‌های ترشدگی^۷ ذرات هستند. دانه‌ها با مایع به واسطه زاویه تماس^۸ θ تر می‌شوند که در واقع نشان‌دهنده محل تماس پل با ذره است. خطی که مرکز دو کره را به هم متصل می‌کند، و در راستای محور x است، محور تقارن شکل است. پل مایع حجمی با تقارن محوری است که شکل آن با پروفیل $y(x)$ مشخص شده است. کمترین ضخامت پل مایع (کمترین مقدار پروفیل روی محور y ها) به عنوان شعاع اتصال^۹، y_0 ، معین شده است. معادله لاپلاس - یانگ نیز، به عنوان حل دیفرانسیل مدل تماسی، به طور

جنش‌های بین دانه‌ای، به‌اندازه کافی کوچک هستند که بتوان از نیروی دینامیکی پل مایع صرف‌نظر کرد. این فرض در مقایسه با سهم ویسکوزیته و کشش سطحی در نیروهای اعمال شده قابل قبول است [۱۴].

برای مدل‌سازی نیروی موئینگی در شبیه‌سازی DEM بایستی نحوه توزیع مایع بین ذرات مشخص باشد. ماگوراما و همکاران (۲۰۰۰) فرض کردند که مایع می‌تواند بین ذرات جابه‌جا شده و به‌طور مساوی در میان همه شکاف‌هایی که کمتر از فاصله گسیختگی منیسک هستند توزیع شود [۱۵]. از سوی دیگر میکامی و همکاران (۱۹۹۸) فرض کردند که مایع به‌طور مساوی بین ذرات توزیع شده و جابه‌جایی مایع بین ذرات در صورتی که ویسکوزیته مایع به حد کافی پایین باشد قابل چشم‌پوشی است [۱۴]. با ترکیب این دو فرض، یانگ و همکارانش (۲۰۰۳) فرض کردند که مایع به‌طور مساوی بین ذرات توزیع شده و انتقال‌پذیر نیست [۱۶]. وقتی که فاصله بین ذرات از فاصله گسیختگی منیسک کمتر باشد پل مایع شکل گرفته و حجم مایع به آن اختصاص داده می‌شود.

با توجه به وجود متغیرهای مختلف مانند شعاع انحنا، زاویه مرطوب‌شدگی و حجم پل مایع برای تعیین نیروی موئینگی به‌صورت تابع صریحی از حجم پل مایع و فاصله بین ذره‌ای که به‌راحتی در شبیه‌سازی‌های DEM قابل اجرا باشد، حل تقریبی پیشنهاد گردیده است [۱۷]. خطای این نوع تقریب زمانی که نسبت حجم مایع به جامد ۰/۱ درصد است در حدود ۴ درصد خواهد بود اما با افزایش نسبت حجم افزایش می‌یابد [۱۷]. با یک رابطه پیچیده‌تر که برای نسبت حجم کمتر از ۱۰ درصد قابل قبول است، خطای محاسبه نیروی تخمینی کمتر از ۳ درصد بوده و دقت محاسبات بهبود چشم‌گیری پیدا می‌کند [۱۷]. تقریب درجاگین^{۱۰} [۱۱] برای محاسبه نیروی موئینگی بین ذرات با اندازه‌های نابرابر و در شرایطی که حجم پل مایع کم و فاصله بین ذره‌ای در محدوده شکست منیسک و یا ذرات در مجاور یکدیگر هستند، روش نسبتاً دقیقی است [۱۷]. محاسبه دقیق انحنا پل مایع تنها از حل معادله لاپلاس-یانگ



شکل ۱- پل مایع بین دو ذره با اندازه متفاوت (نمونه با دانه‌بندی غیریکنواخت): الف) نمای کلی از موئینگی دو تایی، ب) هندسه پل مایع [۱۲]

کامل هندسه پل مایع (V: حجم و D: فاصله بین ذره‌ای) و همچنین نیروی بین ذره‌ای تولید شده (F_{cap}) را، به‌واسطه تعریف پروفیل y(x) و از طریق روابط تحلیلی، محاسبه می‌کند:

$$\frac{\Delta P}{\gamma} \left(1 + y'^2(x) \right)^{3/2} + \frac{1 + y'^2(x)}{y(x)} - y''(x) = 0 \quad (1)$$

$$V = \pi \int_{x_{c1}}^{x_{c2}} y^2(x) dx - V_1 - V_2 \quad (2)$$

$$V_i = \frac{1}{3} \pi R_i^3 (1 - \cos \varphi_i)^2 (\varphi_i + \cos \varphi_i) \quad (3)$$

$$D = x_{c2} - R_2 (1 - \cos \varphi_2) - x_{c1} - R_1 (1 - \cos \varphi_1) \quad (4)$$

نیروی کششی ناشی از موئینگی آب را می‌توان به‌صورت تابعی از حجم پل مایع، اندازه ذرات و جنس سیال و با استفاده از حل معادلات لاپلاس-یانگ به‌صورت زیر بیان کرد [۱۲]:

$$F_{cap} = 2\pi\gamma T_s + \pi\gamma^2 \Delta P \quad (5)$$

در رابطه فوق T_s کشش سطحی در فاز مایع و ΔP اختلاف فشار فاز گاز و مایع (یا همان فشار موئینگی، P_c) هستند. از جمله فرض‌هایی که برای رسیدن به معادله بالا صورت گرفته می‌توان به نادیده گرفتن اثرات گرانشی، با توجه به حجم کم آب مطرح شده، اشاره کرد که معقول و منطقی به‌نظر می‌رسد. به‌عنوان یک راه کلی، اثرات گرانش را می‌توان برای تعداد پیوندهای کم، نادیده گرفت [۱۳]. علاوه بر این، پل مایع در پیکربندی شبه‌استاتیک مورد مطالعه قرار گرفته و از اثرات ویسکوزیته صرف‌نظر شده است. همچنین فرض می‌شود که

امکان پذیر است. با این حال لیان و همکارانش (۱۹۹۳) نشان دادند که اختلاف بین راه حل عددی تقریبی و راه حل دقیق کمتر از ۱۰ درصد است [۱۸]. با توجه به وجود خطا در اندازه گیری های تجربی به دلیل عدم قطعیت حجم پل مایع، کشش سطحی و زبری ذرات، این تقریب به اندازه کافی دقیق است.

بر اثر اندرکنش فازهای آب، هوا و دانه ها غشای الاستیکی شکل گرفته که با دانستن میزان حجم پل، این امکان وجود دارد تا بتوان نیروی کشش بین ذرات ناشی از چسبندگی بین آنها را تعیین کرد. در شکل (۲) هندسه پل مایع برای جایی که دو کره با اندازه متفاوت به یکدیگر با منیسک متصل شده را نشان می دهد. در این شکل θ زاویه تماس و ϕ_1 و ϕ_2 زاویه ترشدگی (مرطوب شدگی) در هر دو ذره، R_1 و R_2 شعاع کره ها، D فاصله بین ذرات و نهایتاً ρ_1 و ρ_2 شعاع انحنا مایع اتصال هستند. شکل (۲)، هندسه مقطعی از منیسک بین دو ذره با شعاع نابرابر با موقعیت مراکز O_1 و O_2 را نشان می دهد. خط های O_1P_1 و O_2P_2 برابر شعاع دو ذره هستند [۱۹]. P_1 و P_2 محل برخورد منیسک با ذرات، A نقطه تلاقی امتداد O_1P_1 و O_2P_2 و C_1 نقطه تلاقی به ترتیب O_2C_1 با پروفیل پل مایع P_1P_2 و محور O_1O_2 است. بنابر شکل (۲)، پارامتر زاویه مرطوب شدگی منیسک را می توان به صورت زیر محاسبه نمود [۱۹]:

$$\phi_2 = 2 \arctan \left[\frac{d + 2r_1 \tan \left(\frac{\phi_1}{2} \right)}{d + 2r_2} \right] \quad (6)$$

زمانی که پروفیل پل مایع به صورت کمافی از دایره شکل می گیرد، شعاع نخست اصلی منحنی ρ_1 برابر با شعاع کمان دایره P_1P_2 و شعاع اصلی دوم ρ_2 نیز برابر با طول خط C_1P_2 خواهد بود، بنابراین می توان نشان داد که:

$$\rho_1 = \frac{r_1(1 - \cos \phi_1) + d + r_2(1 - \cos \phi_2)}{\cos(\phi_1 + \theta) + \cos(\phi_2 + \theta)} \quad (7)$$

$$\rho_2 = r_2 \sin \phi_1 - \rho_1 [1 - \sin(\phi_1 + \theta)] \quad (8)$$

حجم پل مایع را می توان با استفاده از روابط شعاع انحنا ρ_1

و ρ_2 ، زاویه ترشدگی ϕ و زاویه تماسی θ تعیین نمود. به هر حال زاویه ترشدگی را نمی توان به طور صریح تعیین نمود، بنابراین برای تعیین ϕ به عنوان تابعی از حجم منیسک، فاصله جدایی بین دو ذره و زاویه تماسی به رویه ای تکراری نیاز است [۱۲].

حجم پل مایع V ، را می توان 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 ، به صورت زیر تعیین نمود:

$$a = \rho_1 \sin(\phi_2 + \theta) + r_2 \sin \phi_2 \quad (9)$$

$$V_1 = \pi \left\{ \begin{array}{l} (a^2 + \rho_1^2) \rho_1 [\cos(\phi_1 + \theta) + \cos(\phi_2 + \theta)] \\ - \frac{1}{3} \rho_1^3 [\cos^3(\phi_1 + \theta) + \cos^3(\phi_2 + \theta)] \\ - a \rho_1^2 [\sin(\phi_1 + \theta) \cos(\phi_1 + \theta) + \sin(\phi_2 + \theta) \cos(\phi_2 + \theta)] \\ + a \rho_1^2 (\phi_1 + \phi_2 + 2\theta - \pi) \end{array} \right\} \quad (10)$$

$$V_2 = \frac{\pi}{3} \left[(r_2 - r_2 \cos \phi_1 + \cos^3 \phi_1) r_2^3 + (r_2 - r_2 \cos \phi_2 + \cos^3 \phi_2) r_2^3 \right] \quad (11)$$

$$V = V_1 - V_2 \quad (12)$$

بنابراین در صورتی که V مشخص باشد، می توان ϕ_1 را از معادلات قبلی محاسبه نمود [۱۹].

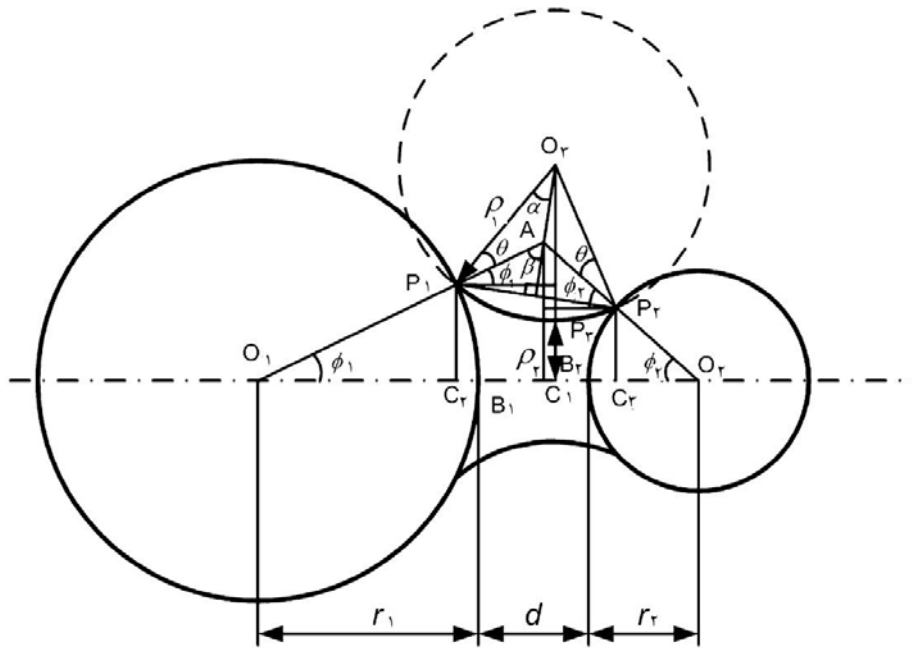
نیروی حاصل از یک پل مایع حلقوی را می توان در سطح تماس سه فاز (روش مرزی) و یا در تنگه (گردن) پل مایع محاسبه نمود. در روش دوم فرض بر این است که نیروی موئینگی شامل سهمی از فشار موئینگی (P_c) و همچنین کشش سطحی (T_s) است. نیروی کشش سطحی محوری در گردنه منیسک را می توان به وسیله رابطه زیر تعیین نمود [۱۸ و ۱۹]:

$$F_1 = 2\pi T_s \rho_2 \quad (13)$$

و نیروی هیدرواستاتیک در گردنه منیسک با رابطه زیر تعیین می شود:

$$F_2 = \pi \rho_2^2 P_c \quad (14)$$

بنابراین، نیروی موئینگی کل را می توان به صورت مجموع دو نیروی کشش سطحی و نیروی هیدرواستاتیک بیان کرد:



شکل ۲- هندسه اندرکنش کره- کره در حضور پل مایع [۱۹]

۳- ایجاد و جای گذاری مدل محاسباتی نیروی بین

ذرات با وجود منیسک در نرم افزار PFC^{2D}

مدل‌های عددی ارائه شده برای محاسبه نیروی بین ذره‌ای در نرم افزار PFC^{2D} براساس هم‌پوشانی ذرات پایه‌ریزی شده‌اند، بنابراین تنها توانایی محاسبه نیروهای فشاری (دافعه مکانیکی) بین ذرات را دارند و امکان محاسبه نیروی کششی حاصل از منیسک بین ذرات در این مدل‌های محاسباتی پیش فرض، وجود ندارد. نرم افزار PFC^{2D} امکان ایجاد مدل تماسی جدید با استفاده از زبان برنامه نویسی C++ توسط کاربر را دارد. برای این منظور بایستی از فایل‌های سرلیست^{۱۱} با پسوند H و فایل‌های با پسوند cpp نرم‌افزار که در آنها کلاس‌های پایه^{۱۲} تعریف شده استفاده نمود. کلاس پایه چارچوبی برای کلاس‌های مشتق شده در مدل تماسی است که برای تعریف روابط جدید محاسباتی به کار برده می‌شوند. فایل‌های سرلیست که قبلاً به آنها اشاره شد شامل بعضی از متغیرها و توابعی کلی هستند که توسط کاربر به هنگام ایجاد مدل تماسی قابل استفاده هستند. برخی از این کلاس‌ها شامل:

$$F_l = F_l + F_r = \pi \rho_r T_s \frac{\rho_1 + \rho_r}{\rho_1} \quad (15)$$

فشار موئینگی با استفاده از معادله زیر قابل محاسبه است [۱۸]:

$$P_c = T_s C = U_a - U_w = T_s (\sqrt{\rho_1} - \sqrt{\rho_r}) \quad (16)$$

مطابق روابط فوق، در فاصله بین ذره‌ای صفر، بیشینه نیروی منیسک در کمترین حجم پل مایع روی می‌دهد.

پیوند مایع تا زمانی که فاصله بین ذره‌ای کمتر از فاصله شکست پیوند δ_n^{\max} باشد، پایدار است. بیشینه فاصله بین ذرات با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\delta_n^{\max} = (1 + 0.5\theta) V^{(1/3)} \quad (17)$$

لیان و همکاران [۱۸] نشان دادند که نیروی پل مایع، که به فاصله جدایی بین دو ذره وابسته است، تا مقدار بحرانی آن پایدار است. فاصله گسیختگی یا بیشینه فاصله جدایی δ_n^{\max} ، که منیسک در آن می‌شکند، وابسته به پارامترهای زاویه تماس θ و حجم پل مایع V بوده به طوری که اگر $\theta \leq \frac{2\pi}{9}$ باشد، با رابطه فوق می‌توان میزان فاصله بحرانی را تعیین نمود [۱۹].

۱. Model Contact: کلاس پایه برای مدل تماسی،

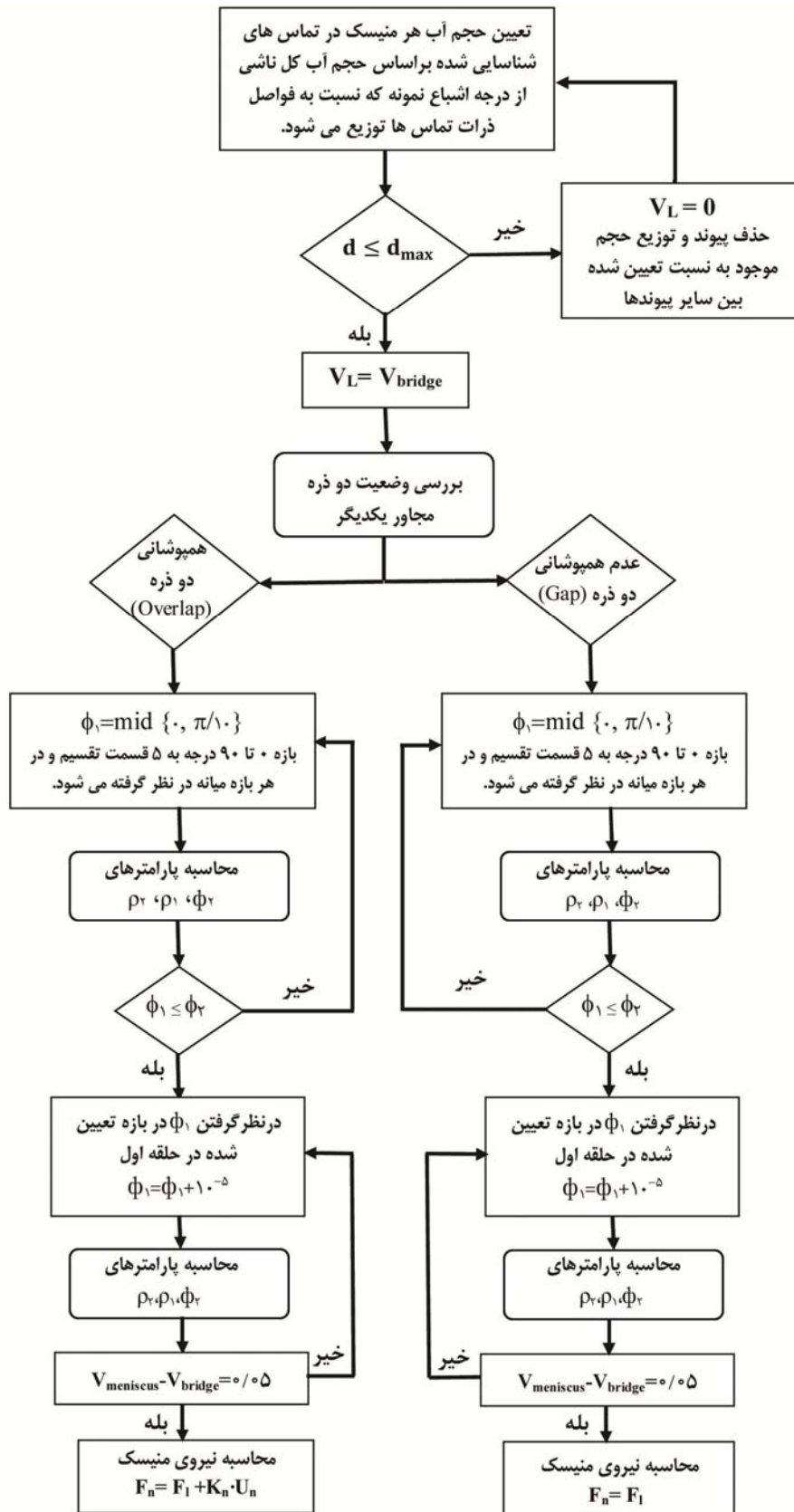
۲. Fd Block: ساختار به کار رفته برای رد و بدل کردن اطلاعات بین مدل تماسی و نرم افزار PFC^{2D} در هنگام سیکل گذاری،

۳. Prop Block: ساختار به کار رفته برای رد و بدل نمودن اطلاعات بین مدل تماسی و نرم افزار PFC^{2D} به هنگام ایجاد مدل و یا قبل از سیکل گذاری.

ساختارهای فوق شامل مجموعه ای از متغیرها هستند که هنگام به کارگیری مدل تماسی داده های مورد نظر را قبل و بعد از سیکل گذاری بین نرم افزار و مدل تماسی کاربر انتقال می دهند. مجموعه متغیرهای موجود در این ساختارها شامل خصوصیات فیزیکی، میزان جابه جایی، سرعت، نیرو و خصوصیات تماسی بین ذرات هستند. مدل مورد نظر با زبان برنامه نویسی ++C نوشته شده و سپس با کامپایل^{۱۳} نمودن آن به فایل با پسوند DLL^{۱۴} امکان بارگذاری در نرم افزار را پیدا می کند. بدین منظور از فرمان CONFIG cplusplus استفاده می شود. این فرمان به کاربر این امکان را می دهد تا از روش محاسباتی مورد نظر خود بهره ببرد. در ادامه فایل DLL مدل با استفاده از فرمان MODEL load بارگذاری می گردد. حال کاربر می تواند با استفاده از فرمان MODEL، مدل تماسی مورد نظر خود را به کار گیرد. این فایل مدل ایجاد شده شامل نام مدل، خصوصیات مورد نظر مدل و ساختار داده های محلی مدل در نرم افزار است. لازم به ذکر است که با توجه به به کارگیری نرم افزار PFC^{2D} version 3.10 در این مقاله و با توجه به محدودیت نرم افزار در نوشتن و کامپایل کردن مدل تماسی و وابستگی به نسخه نرم افزار (زیرا هر نسخه تنها فایل های سرلیست مربوط به خود را می پذیرد) برای نگارش کد ++C از نرم افزار Microsoft VisualC++ (VC++) Version 6.0 (SP4) استفاده شده است.

پاسخ خاک های دانه ای غیراشباع تحت بارگذاری های مختلف، ناشی از هم پوشانی ذرات جامد بر یکدیگر به طور مکانیکی توسط نرم افزار PFC^{2D} با مدل رفتاری خطی

شبه سازی شده و نیروی حاصل از منیسک های شکل گرفته بین ذرات بر اثر سیال حفره ای با استفاده از ضوابط اضافه شده به مدل اولیه بر اساس محاسبه نیروی موئینگی و تأثیرات متقابل این دو بر هم مدل می شود. برای مدل سازی منیسک (پل مایع)، ابتدا بایستی تعیین نمود که کدامیک از ذرات در مجاور هم قرار داشته و امکان شکل گیری منیسک بین آنها وجود دارد. نرم افزار به هر کدام از ذرات تولید شده یک کد شناسه تخصیص می دهد که می توان با استفاده از توابع تعریف شده در خود نرم افزار موقعیت مکانی ذرات در نمونه را در دستگاه x و y مشخص نمود و سپس با به کارگیری روابط ریاضی فاصله بین هر ذره را تعیین نمود. بعد از شناسایی ذرات پیرامونی هر یک از گوی ها بایستی میزان آب حفره ای موجود در نمونه به نسبت مناسب بین ذرات توزیع گردد. در برخی از مدل سازی ها آب حفره ای به صورت همگن در کل نمونه توزیع شده که به نظر می رسد عواملی چون سطح ذرات، زبری، فاصله بین ذرات و شعاع ذرات می توانند در توزیع آب مؤثر باشند. بنابراین در این مدل سازی آب حفره ای با توجه به فاصله بین ذرات در تماس و فاصله خط مرکزین بین ذرات توزیع شده است (به نسبت وزنی فاصله بین مراکز ذرات در تماس). سپس با توجه به تعداد معادلات و مجهولات موجود، به روش سعی و خطا پارامترهای مورد نظر هندسی منیسک در مدل نوشته شده تعیین و در ادامه شرط های مورد نظر مانند حداکثر فاصله بحرانی منیسک بررسی و نیروی کششی هر پل مایع مشخص و این نیرو به وسیله کد UDM^{۱۵} مشروح به نرم افزار داده شده است. در شکل (۳) فلوچارت کلی محاسبه نیروی نرمال بین دو ذره ترسیم شده است. بر طبق این فلوچارت، در حالتی که دو ذره با یکدیگر فاصله دارند، تنها نیروی کششی بین دو ذره بر اثر پل مایع به وجود می آید در حالی که با ایجاد هم پوشانی بین دو ذره، علاوه بر نیروی کششی نیروی دافعه نیز شکل می گیرد که به صورت خطی با میزان هم پوشانی عمل می کند.



شکل ۳- فلوجارت محاسباتی نیروی منیسک در مدل محاسباتی ایجاد شده

جدول ۱- تعداد ذرات در هر نمونه

مجموع تعداد ذرات	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	قطر ذرات (میلی متر)
۱۷۲۵	۷۰۵	۵۶۳	۲۸۱	۱۴۱	۳۵	تعداد هر ذره

۴- مدل‌سازی عددی

نیروی موئینگی زمانی که ذرات اندازه‌ای بین ۴۰ تا ۴۰۰ میکرون (۰/۴ تا ۰/۴ میلی‌متر) دارند، شکل می‌گیرد. در ذرات بزرگتر از $400\ \mu\text{m}$ ، اصطکاک بین ذره‌ای منجر به رفتار چسبندگی برشی می‌شود. در ذرات کوچکتر از $40\ \mu\text{m}$ این نیروی واندروالس است که به‌طور قابل توجهی شروع به افزایش به‌عنوان نیروی چسبندگی می‌کند [۲۰]. بازه اندازه ذرات در این مدل‌سازی بین ۰/۵ تا ۰/۱ میلی‌متر بوده که در محدوده اشاره شده است. تعداد ذرات تولید شده با توجه به نحوه توزیع وزنی مورد نظر در این تحقیق تعیین و در جدول (۱) نشان داده شده است. براساس مطالعات انجام شده در DEM وقتی تعداد ذرات از حدود ۱۰۰۰ ذره تجاوز کند، تعداد ذرات اثری بر رفتار کلی نمونه ندارد، لذا در این مطالعه از حدود ۱۷۰۰ ذره اصلی و حدود ۵۰۰ ذره پیرامونی برای مدل‌سازی استفاده شده است. تعداد بیشتر ذرات موجب افزایش زمان اجرای نرم‌افزار شده و موجب تطویل زمان می‌گردد. 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 می‌شود که نتوان دو نمونه کاملاً یکسان را تولید نمود، به‌عبارت دیگر در هر بار تولید ذرات به‌علت تعیین قطر و مکان تصادفی ذرات، امکان رسیدن به یک نمونه کاملاً مشابه وجود نداشته باشد. برای تهیه نمونه ذرات لازم جهت انجام آزمایش دو محوری، ابتدا چهار دیوار به‌گونه‌ای تعریف می‌شوند تا فضایی با ارتفاع ۲۷/۴ و عرض ۱۳/۷ میلی‌متر را تولید کنند. این ابعاد براساس سعی و خطا و با رعایت نسبت طول به عرض در آزمایش‌های سه‌محوری و اینکه با تعداد قابل قبول سعی بتوان تعداد ذرات مشخص را تولید کرد، انتخاب شده است. ابتدا ذرات با قطر

کمتر از قطر نهایی، در محیط اشاره شده که بزرگتر از اندازه نهایی نمونه است، تولید می‌شوند. در ادامه با افزایش شعاع ذرات تا اندازه مورد نظر و حرکت دیواره‌ها به سمت یکدیگر و با سرعت ثابت، تراکم مورد نیاز حاصل شده و نمونه به ارتفاع ۲۵/۴ و عرض ۱۲/۷ میلی‌متر می‌رسد.

سپس دیواره‌های صلب پیرامونی حذف و به‌جای این دیواره‌ها یک ردیف از ذرات (ذرات غشایی) با قطر کمتر از کوچکترین ذره نمونه، دور تا دور مجموعه ذرات، تولید می‌شود (شکل (۴)). قطر ذرات غشاء به‌نحوی است که از ۱٪ قطر نمونه نیز کمتر است. عملکرد این ذرات مانند غشای لاستیکی در برگیرنده نمونه خاک، در آزمایش سه محوری است. تعریف شرایط مرزی بدین طریق دارای امتیازاتی از جمله: وقوع گسیختگی نمونه در ضعیف‌ترین صفحه، ایجاد فشار همه‌جانبه به‌صورت کاملاً یکنواخت به‌علت امکان اعمال نیرو به ذرات مرزی و عدم نیاز به تعریف روابط مورد نیاز برای هندسه منیسک بین ذره و دیوار است. ویژگی‌های ذرات اصلی نمونه و ذرات مرزی در جدول (۲) نشان داده شده است.

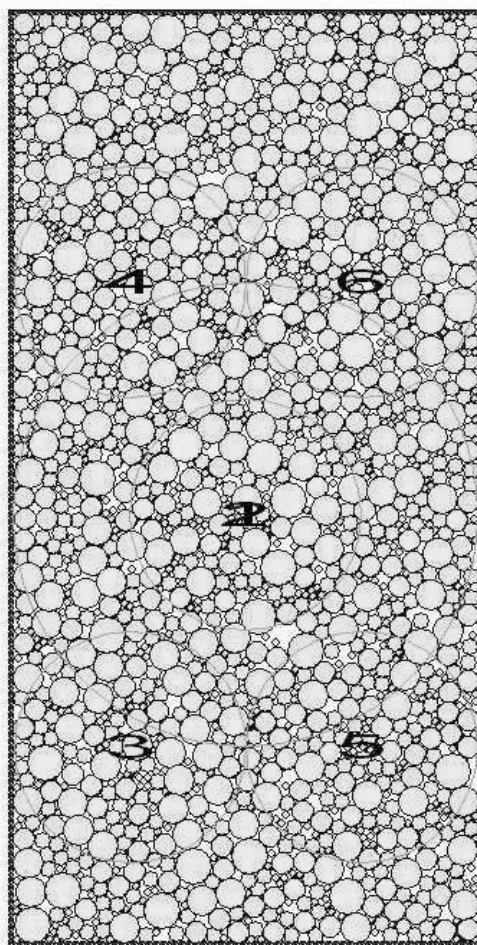
باتوجه به مدل‌سازی‌های انجام گرفته توسط سایر محققین، در این مقاله نیز شبیه‌سازی در محدوده پاندولی صورت می‌گیرد و بنابراین شبیه‌سازی‌ها برای درجات اشباع‌شدگی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و حالت خشک انجام می‌شود. یکی از مسائل مهمی که در بحث پل‌های مایع وجود دارد آن است که این پل‌ها در بین کدام‌یک از ذرات وجود داشته و به چه نسبتی از میزان آب حفره‌ای سهم می‌برند. در برخی از مدل‌سازی‌ها پل‌های مایع به‌طور همگن بین ذرات توزیع شده‌اند. با توجه به اینکه میزان حجم پل مایع به فاصله بین ذرات وابسته است، بنابراین به‌نظر می‌رسد توزیع پل‌های مایع به نسبت فاصله مرکز

در کلیه شبیه‌سازی‌ها گام زمانی برابر با 10^{-6} s در نظر گرفته شده است. بارگذاری در تمام آزمایش‌ها با سرعت ثابت و برابر با $1/27 \text{ cm/s}$ انجام شده‌اند. در واقع در نرم‌افزار PFC^{2D} میزان جابه‌جایی برابر است با حاصل ضرب سرعت در گام زمانی انتخاب شده که این مقدار باید به گونه‌ای باشد که الگوی عددی روش دچار اختلال نگردد و رفتار نمونه از حالت استاتیکی خارج نشود. این مقدار با استفاده از روش سعی و خطا به نحوی که نمونه دچار فروپاشی نشود به دست آمده است.

۵- نتایج مدل‌سازی

یکی از اهداف اصلی در این تحقیق بررسی پارامترهای مؤثر بر نیروی موئینگی به عنوان شرایط مشاهده شده در خاک‌های غیراشباع است. هرچند که نیروی موئینگی در هر تماس مقدار متفاوتی دارد ولی به طور کلی ساختار یکسانی در تمامی منیسک‌ها حاکم است. در واقع با افزایش فاصله بین دو ذره در تماس، مقدار نیروی چسبندگی پل مایع کاهش یافته تا اینکه پیوند گسیخته می‌شود. شکل (۵) نحوه تغییرات نیرو نسبت به فاصله بین ذرات را نشان می‌دهد. حجم پل مایع محاسبه شده در این نمودار برابر با متوسط حجم منیسک‌های شکل گرفته در تماس بین ذرات در درصد رطوبت‌های اشاره شده در آغاز بارگذاری هستند. در شکل (۵) مشاهده می‌شود که با کاهش میزان حجم پل مایع، مقدار نیروی چسبندگی حاصل از موئینگی کاهش یافته و پل مایع در فاصله بین ذره‌ای کوچکتری دچار گسیختگی شده است.

شکل (۶) رابطه بین زاویه مرطوب‌شدگی و فاصله بین ذره‌ای را نشان می‌دهد. از این دو نمودار می‌توان دریافت که با افزایش فاصله بین ذره‌ای زاویه مرطوب‌شدگی کاهش یافته و در واقع منیسک بین دو ذره در حال کشیدگی تا حد گسیختگی است. همچنین با افزایش حجم پل مایع میزان زاویه مرطوب‌شدگی نیز افزایش یافته که امری منطقی است.



شکل ۴- مجموعه ذرات تولید شده قبل از بارگذاری [۲۱]

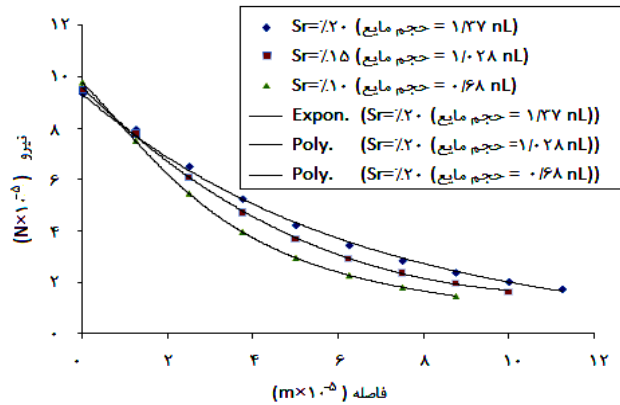
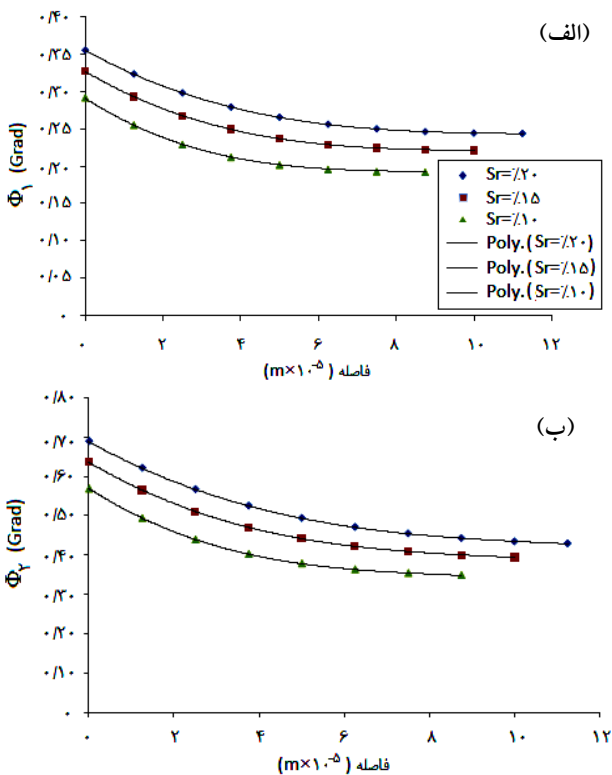
به مرکز دو ذره مجاور به مجموع فواصل مراکز تمام ذرات در تماس روش مناسبی باشد.

اعمال فشار جانبی بر نمونه خاک از طریق ذرات مرزی صورت می‌گیرد. این کار با محاسبه نیروی متناظر با فشار جانبی که بر هر ذره مرزی وارد می‌شود صورت می‌گیرد. با استفاده از چنین روشی اطمینان حاصل می‌شود که فشار جانبی به صورت کاملاً یکنواخت بر نمونه خاک اعمال شده است. در بالا و پایین نمونه خاک نیز دو دیواره صلب تعریف شده که با نزدیک شدن این دیواره‌ها به یکدیگر نمونه تحت بارگذاری قرار می‌گیرد.

لازم به ذکر است که در مدل‌سازی‌های صورت گرفته در این تحقیق مقدار کشش سطحی آب (T_s)، برابر با 0.0735 N/m در دمای 15°C در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح [۲۱]

ویژگی مصالح	نمونه شماره ۱	نمونه شماره ۲	ذرات مرزی
قطر حداقل (mm)	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵
قطر حداکثر (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



شکل ۵- نمودار تغییرات نیروی موئینگی نسبت به فاصله بین ذره‌ای

شکل (۷) رابطه بین شعاع‌های منیسک و فاصله بین ذره‌ای را نشان می‌دهد. شعاع‌های داخلی و خارجی منیسک در شکل (۲) معرفی شده‌اند. در شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود که شعاع خارجی منیسک (ρ_1) با افزایش فاصله، زیاد شده تا حدی که پل می‌شکند. در واقع این پارامتر نشان می‌دهد که گردنه منیسک با افزایش فاصله کوچک شده و این مسئله امری طبیعی است. با کاهش رطوبت اندازه شعاع نیز کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش حجم پل مایع است. در مقابل شکل (۷-الف) نشان‌دهنده آن است که شعاع داخلی منیسک (ρ_2)، که معرف اندازه گلوگاه پل است، با افزایش فاصله شعاع کاهش می‌یابد و پل دچار کشیدگی و نهایتاً گسیخته می‌شود. با افزایش میزان رطوبت حجم پل مایع نیز افزایش می‌یابد.

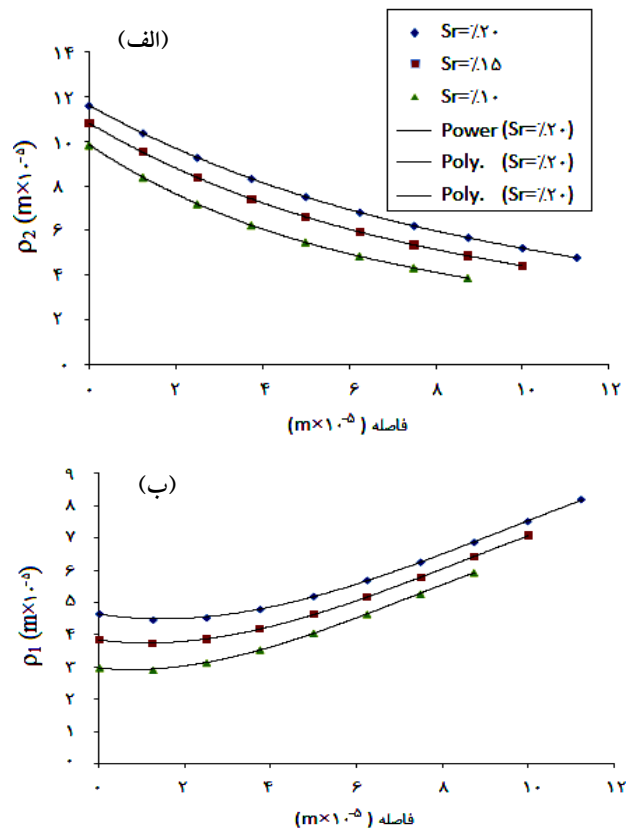
شکل ۶- تغییرات زاویه ترشدگی ذرات نسبت به فاصله بین ذره‌ای

هدف از تعیین نیروهای موئینگی، دستیابی به نتایج حاصل از این پدیده بر پارامترهای مهندسی ژئوتکنیک در مقیاس ماکرو است. بنابراین به بیان نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایش دو محوری در درصد رطوبت‌های ۲۰، ۱۵ و ۱۰ درصد پرداخته می‌شود. علاوه بر این نمونه‌های خشک نیز به منظور مقایسه

نتیجه خلل و فرج نمونه افزایش یافته و نهایتاً منجر به افزایش پوکی نمونه می‌گردد.

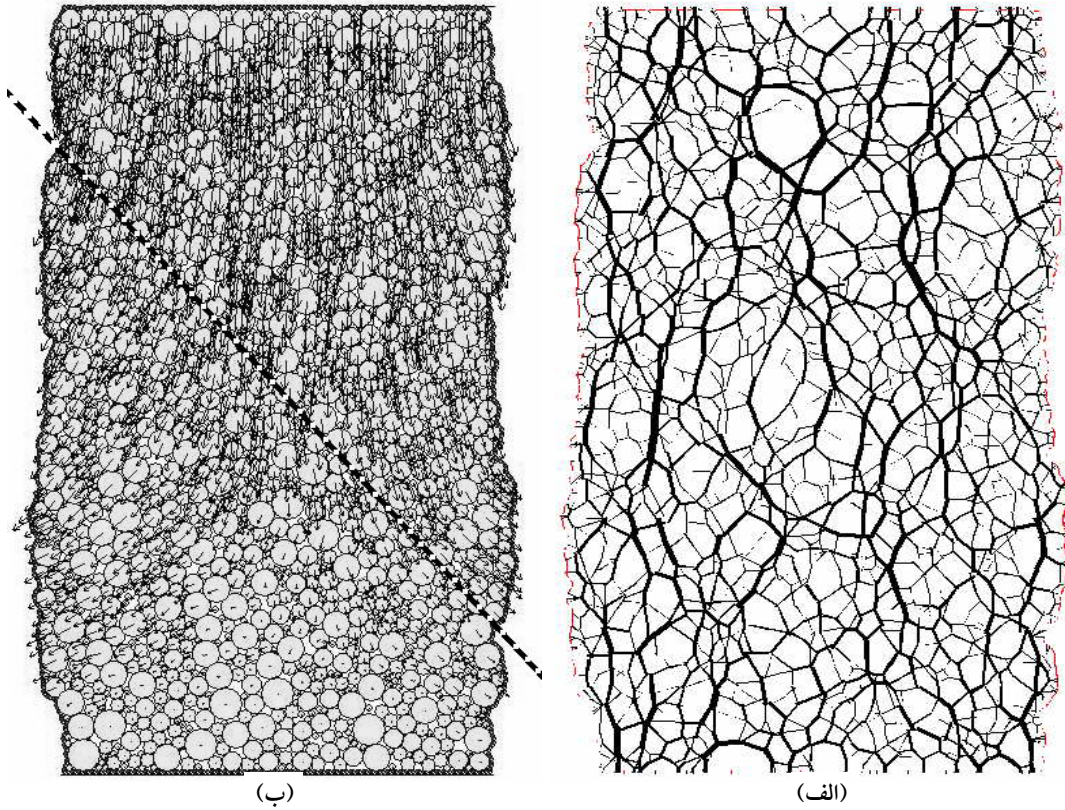
در شکل (۸) روند تغییرات نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ تحت اثر تنش همه جانبه ۵ kPa و درصد رطوبت ۱۵٪ را نشان می‌دهد. در شکل (۸-ب)، بردارهای سرعت ذرات نشان داده شده است. با توجه به این بردارها، صفحات گسیختگی نمونه به راحتی قابل تشخیص است (صفحه گسیختگی با خط چین نشان داده شده است). شکل (۸-الف)، نحوه توزیع نیروهای بین ذره‌ای را نمایش می‌دهد. در واقع همان‌طور که در شکل پیدا است نیروها به طور شبکه‌ای نامنظم در کل نمونه ایجاد شده است که در حین بارگذاری دچار تغییر می‌گردد.

۱-۵- بررسی تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری
 شکل (۹) روند تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و با درجه اشباع ۲۰٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیدا است، با افزایش تنش همه جانبه میزان تنش انحرافی افزایش می‌یابد. شیب افزایش نمودارها با یکدیگر تقریباً برابر است. اختلافی که در نمونه تحت تنش همه جانبه ۵ kPa مشاهده می‌شود را می‌توان اینگونه بیان کرد که با توجه به اینکه در مرحله آماده‌سازی نمونه تحت اثر تنش همه جانبه بیشتری مترکم شده است، در نتیجه در این مرحله به علت کوچک بودن میزان تنش انحرافی در آغاز بارگذاری نمونه آزاد شده و رفتار متفاوتی با سایر مدل سازی‌ها از خود نشان می‌دهد. با طی روند مدل‌سازی، نمودار تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری، در نمونه‌ای با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ و با درجه اشباع ۲۰٪ به صورت شکل (۱۰) است. از مقایسه این دو نمودار با هم می‌توان مشاهده نمود که در تنش همه جانبه یکسان، میزان تنش انحرافی در نمونه دوم بزرگتر است. این مسئله ناشی از افزایش ضریب اصطکاک بین ذره‌ای در این نمونه نسبت به نمونه اول است. در واقع در این حالت

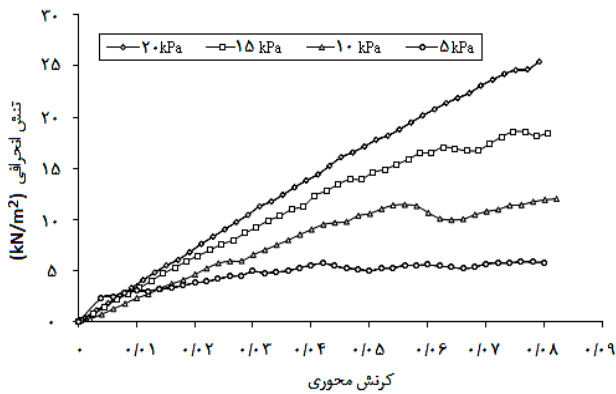


شکل ۷- تغییرات شعاع منیسک نسبت به فاصله بین ذره‌ای،
 الف) شعاع داخلی منیسک، ب) شعاع خارجی منیسک

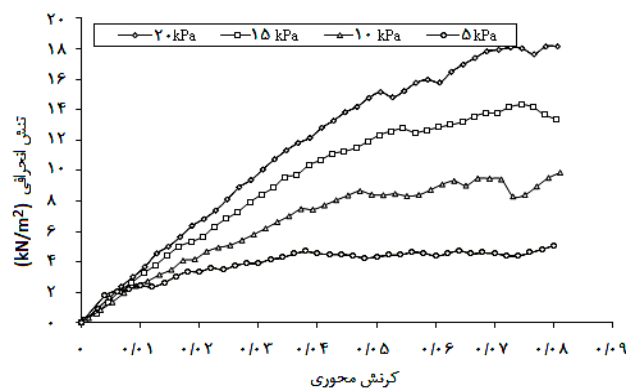
نتایج با شرایط پیشین، شبیه‌سازی شده است. این آزمایش‌ها در تنش‌های همه جانبه ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلو پاسکال صورت گرفته است. این مقادیر با توجه به مدل‌سازی‌های گذشته توسط سایر محققین انتخاب شده‌اند [۱۲]. کوچک بودن میزان تنش همه جانبه به دلیل ماهیت نیروی موئینگی است زیرا این نیرو بسیار کوچک بوده و در شرایط کلی در بازه 1×10^{-4} تا 1×10^{-5} است. بنابراین در صورت استفاده از تنش‌های بزرگتر امکان مشاهده اثرات موئینگی مشکل‌تر خواهد شد. نمونه‌های یک و دو دارای شرایط کاملاً یکسان هستند. تنها تفاوت این دو نمونه در ضریب اصطکاک بین ذره‌ای بوده که در نمونه شماره یک برابر با ۰/۵ و در نمونه شماره دو برابر با ۰/۹ است. این پارامتر موجب تغییر رفتار نمونه‌ها می‌شود زیرا افزایش اصطکاک بین ذره‌ای مشابه زبری بین ذرات عمل کرده و با افزایش این پارامتر، امکان حرکت ذرات ریزتر در داخل نمونه کم شده و در



شکل ۸- نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و درجه اشباع برابر با ۱۵٪، الف) تنش همه جانبه ۵ kPa در کرنش ۰/۸، ب) نیروهای بین ذره‌ای، مجموعه ذرات و بردارهای جابه‌جایی ذرات



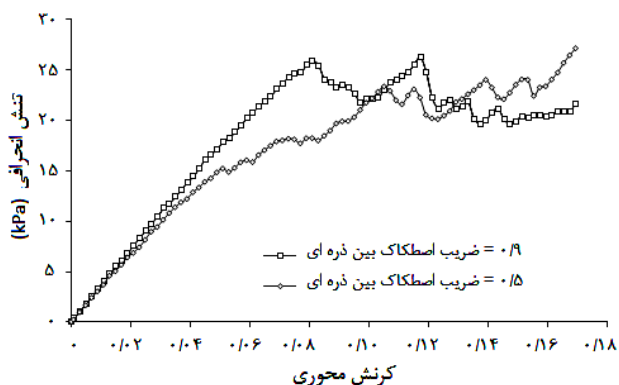
شکل ۱۰- نمودار تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ و $Sr=20\%$ و برای تنش‌های جانبی ۵ تا ۲۰ کیلو پاسکال



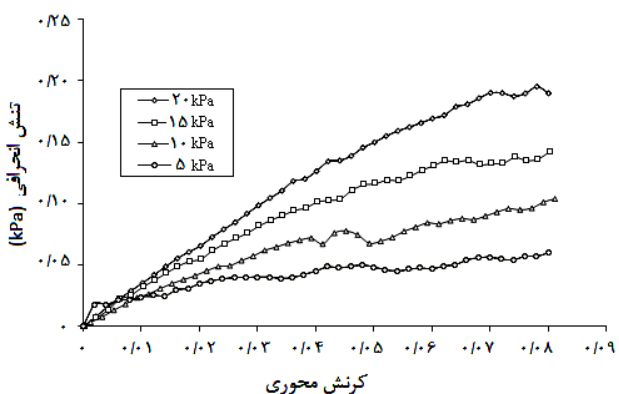
شکل ۹- نمودار تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و $Sr=20\%$ و برای تنش‌های جانبی ۵ تا ۲۰ کیلو پاسکال

در شکل (۱۱)، تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در دو نمونه با ضرایب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و ۰/۹ در تنش همه جانبه ۲۰ کیلو پاسکال در کرنش بالا (کرنش

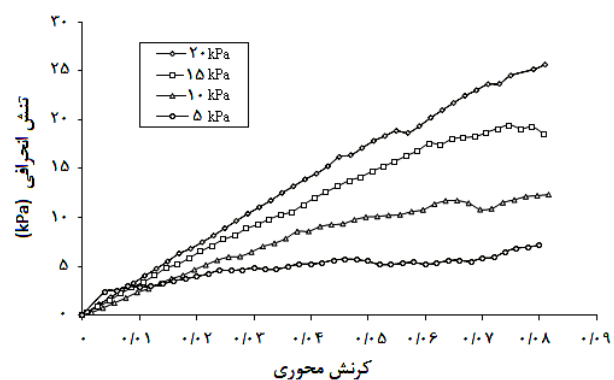
ذرات دارای اصطکاک لغزشی بیشتری با یکدیگر بوده و در نتیجه نیاز به مقدار نیروی بیشتری برای مترکم کردن نمونه و رسیدن به گسیختگی است.



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در دو نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و ۰/۹ تحت تنش همه جانبه ۲۰ kPa و در $Sr = 2\%$



شکل ۱۲- نمودار تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و $Sr = 15\%$ و برای تنش‌های جانبی ۵ تا ۲۰ کیلو پاسکال



شکل ۱۳- روند تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ و $Sr = 15\%$ در تنش‌های همه جانبه متفاوت

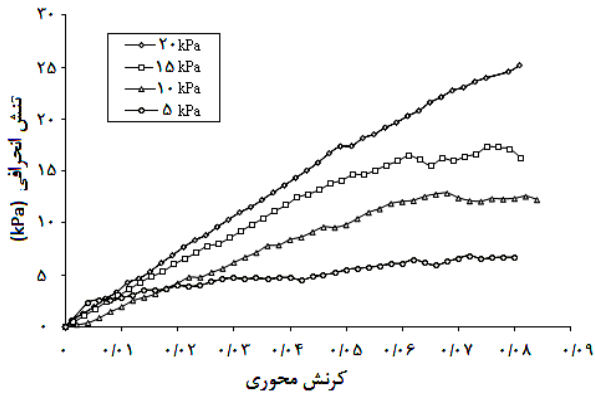
۰/۱۷) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که از نمودار قابل مشاهده است، افزایش ضریب اصطکاک موجب افزایش حداکثر تنش انحرافی در نمونه شده است. همچنین افزایش و کاهش‌های صورت گرفته در نمودارها ناشی از تغییر در وضعیت قرارگیری ذرات و در واقع ایجاد ترک موئین و کاهش باربری و تغییر مکان ذرات و باربری مجدد نمونه‌ها است.

شکل (۱۲)، نمودار تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه‌ای با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و با درصد اشباع ۱۵٪ است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، مدل‌سازی‌ها با نرخ نسبتاً ثابتی افزایش یافته و به مقاومت نهایی خود می‌رسند. با افزایش تنش همه جانبه در نمونه‌ها میزان تنش انحرافی نیز افزایش یافته است.

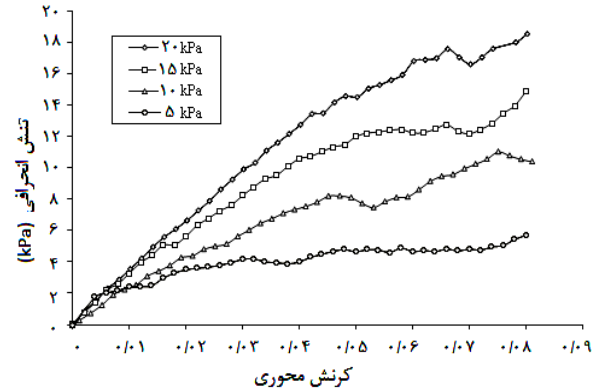
شکل (۱۳)، روند تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه شماره دو با رطوبت ۱۵٪ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب اصطکاک بین ذره‌ای، تنش انحرافی در یک کرنش محوری خاص افزایش می‌یابد. به‌طور مثال در نمونه با تنش همه جانبه ۲۰ kPa و کرنش محوری ۰/۰۵ میزان تنش انحرافی، در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹، برابر با ۱۷/۸۳ kPa است در حالی که در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵، و در همین شرایط، این تنش برابر با ۱۵/۰۱ kPa است.

شکل (۱۴)، تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و درصد اشباع ۱۰٪ را نمایش می‌دهد. در این شکل آشکار است که با افزایش تنش همه جانبه، میزان تنش انحرافی افزایش می‌یابد.

تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ و درصد اشباع ۱۰٪ در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با افزایش ضریب اصطکاک بین ذره‌ای، تنش انحرافی در یک کرنش خاص افزایش می‌یابد. در شکل (۱۶) روند تغییرات تنش انحرافی در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و در حالت خشک نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، بازه تغییرات



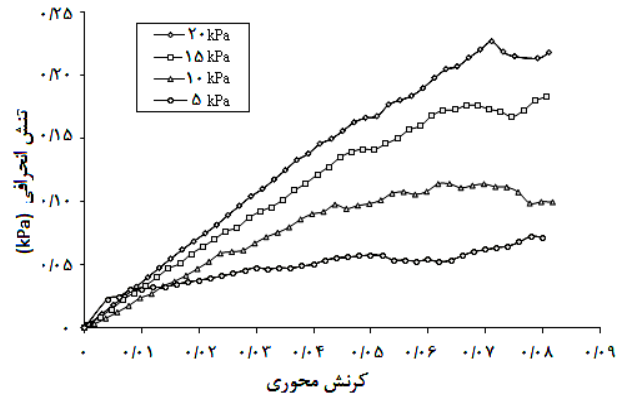
شکل ۱۷- نمودار تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ در حالت خشک و برای تنش‌های همه جانبه متفاوت



شکل ۱۴- نمودار تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و $Sr=10\%$ در تنش‌های همه جانبه متفاوت

تنش انحرافی نسبت به سایر مدل‌سازی‌ها با درصد رطوبت‌های مختلف کوچکتر است.

شکل (۱۷)، نمودار تنش انحرافی به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ در حالت خشک است. در یک کرنش محوری ثابت، اندازه تنش انحرافی در نمونه با ضریب ۰/۹ بزرگتر از نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ است. در واقع در این حالت پارامتر اصطکاک بین ذره‌ای موجب اختلاف بین دو مدل‌سازی در شرایط کاملاً یکسان می‌گردد.

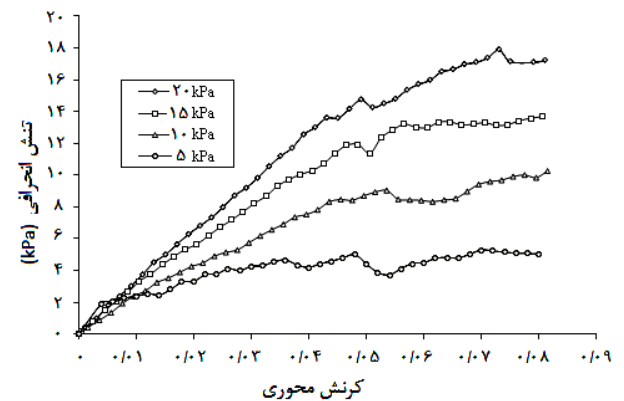


شکل ۱۵- نمودار تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ و $Sr=10\%$ در تنش‌های همه جانبه متفاوت

۲-۵- بررسی تغییرات نشانه خلاء به کرنش محوری

نشانه خلاء جز پارامترهای مکانیک خاک است که در بررسی معیار موهر کولمب در چکیده به آن اشاره شد. شکل (۱۸)، نمودار تغییرات نشانه خلاء به کرنش محوری است که با افزایش میزان تنش همه جانبه، مقدار نشانه خلاء کاهش می‌یابد. همچنین در طی مدل‌سازی در هر نمونه با افزایش کرنش محوری مقدار نشانه خلاء تا جاییکه نمونه گسیخته می‌شود، کاهش می‌یابد. سپس با شکل‌گیری ترک‌های موئین در نمونه میزان نشانه خلاء اندکی افزایش یافته که نشان‌دهنده پدیده گسیختگی در نمونه است.

شکل (۱۹) نمودار تغییرات نشانه خلاء به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ در درجه اشباع ۲۰

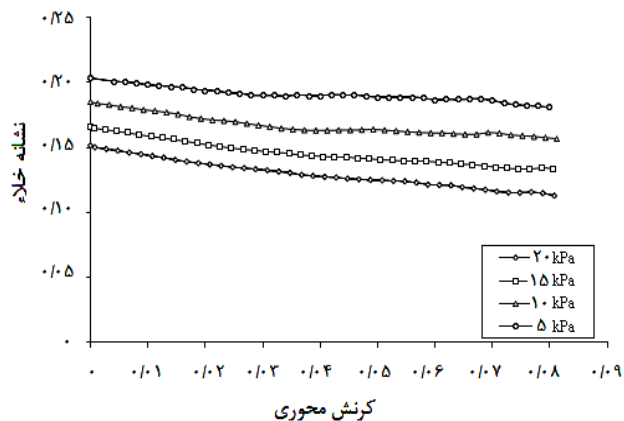


شکل ۱۶- نمودار تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و در حالت خشک و برای تنش‌های همه جانبه متفاوت

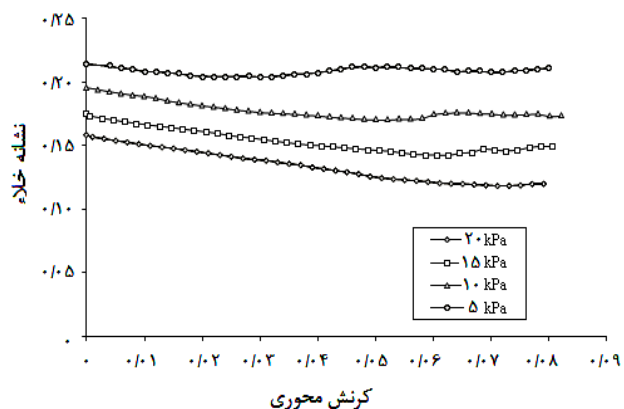
درصد است. روند تغییرات در این شکل نیز مشابه شکل (۱۸) است، با این تفاوت که میزان نشانه خلاء در این نمونه افزایش یافته است. این مسئله نیز به ضریب اصطکاک بین ذره‌ای باز می‌گردد زیرا ذرات سخت‌تر امکان جابه‌جایی یافته و این موجب افزایش حفرات در نمونه می‌گردد.

در شکل (۲۰) روند تغییرات نشانه خلاء در دو نمونه با یکدیگر در شرایط یکسان بارگذاری و با درجه اشباع برابر مقایسه شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، نشانه خلاء اولیه دو نمونه با یکدیگر متفاوت بوده که امکان دارد بر رفتار نمونه‌ها تأثیر بگذارد. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که در هر دو نمونه نشانه خلاء در حین بارگذاری افزایش یافته و در واقع پله‌ای در منحنی ایجاد شده است. این تغییر وضعیت ناشی از گسیختگی در نمونه‌ها و ایجاد ترک‌های موئین بوده است. با نگاهی به شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد که نمونه با اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ بعد از حدود ۸ درصد کرنش حالت اتساعی یافته و افزایش حجم در آن مشاهده می‌گردد (شکل (۲۰))، لذا از این کرنش به بعد دچار افت تنش انحرافی می‌گردد در حالی که نمونه با اصطکاک بین ذره‌ای مساوی با ۰/۵ همچنان رفتار انقباضی دارا است و مشابه یک نمونه با تراکم کم تنش انحرافی در حال افزایش است.

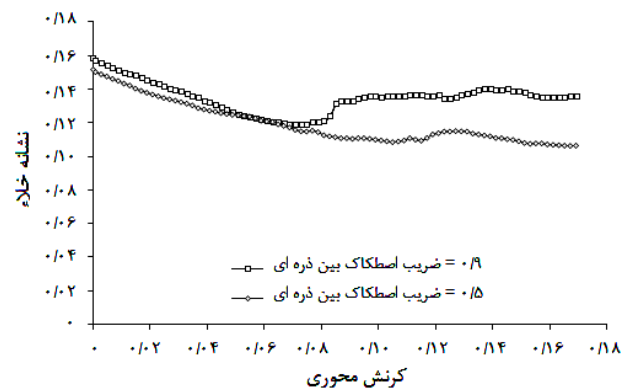
نمودار تغییرات نشانه خلاء به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و با رطوبت ۰/۱۵، در شکل (۲۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، نشانه خلاء در نمونه‌ها کاهش یافته تا به میزان نشانه خلاء در هنگام گسیختگی می‌رسد، سپس در ادامه بارگذاری و گسیخته شدن نمونه میزان نشانه خلاء اندکی افزایش پیدا می‌کند. شکل (۲۲) تغییرات نشانه خلاء نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ با رطوبت ۰/۱۵ را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، رفتار نمونه مشابه ماسه شل است، یعنی با افزایش بارگذاری نشانه خلاء نمونه کاهش یافته تا به نشانه خلاء بحرانی می‌رسد. باید توجه داشت که عدد نمایش داده شده در نمودارهای نشانه خلاء برای با



شکل ۱۸- نمودار تغییرات نشانه خلاء نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و $Sr=20\%$



شکل ۱۹- نمودار تغییرات نشانه خلاء نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ و $Sr=20\%$



شکل ۲۰- تغییرات نشانه خلاء در نمونه‌ها با تنش همه جانبه 20 kPa و $Sr = 20\%$

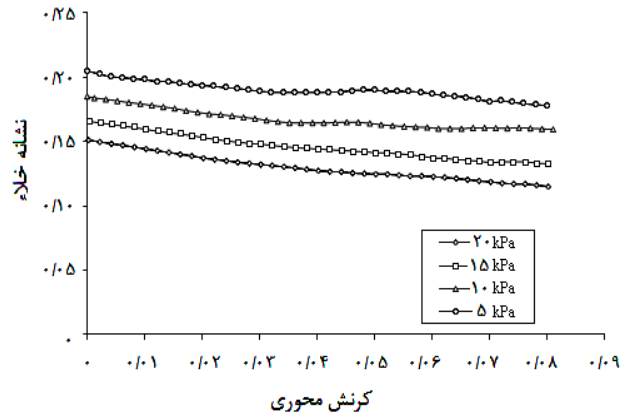
متوسط نشانه خلاء در نمونه است که از دایره اندازه‌گیری که در مرکز نمونه قرار گرفته، و بیش از ۴۰ درصد سطح نمونه را پوشش داده، قرائت شده است. در مرحله آماده‌سازی نمونه و پیش از شروع بارگذاری مقدار نشانه خلاء محاسبه شده توسط دایره اندازه‌گیری با میزان نشانه خلاء کل نمونه که توسط روابط موجود محاسبه شده، مقایسه شده است. میزان اختلاف این دو مقدار کمتر از ۰/۴ درصد بوده است.

شکل (۲۳) نشان‌دهنده تغییرات نشانه خلاء به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ تحت تأثیر درصد اشباع ۱۰٪ است. در این حالت با افزایش تنش همه جانبه میزان نشانه خلاء کاهش می‌یابد.

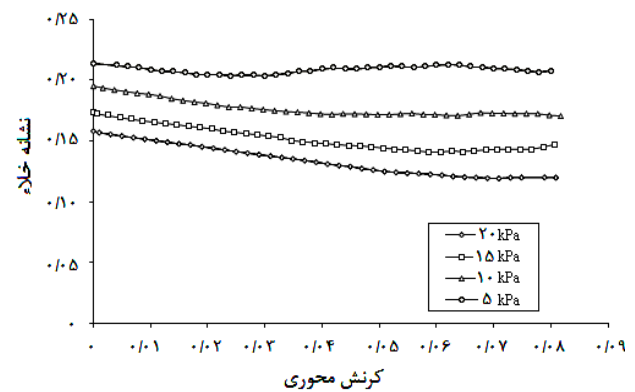
تغییرات نشانه خلاء نسبت به کرنش محوری در آزمایش دومحوری بر روی نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ و با درصد رطوبت ۱۰٪ در شکل (۲۴)، قابل مشاهده است. همان‌طور که از شکل پیدا است، روند تغییرات نشانه خلاء به صورت کاهشی تا رسیدن به نشانه خلاء در هنگام گسیختگی است و سپس در ادامه بعد از گسیختگی نمونه دچار افزایش می‌شود. تغییرات نسبت نشانه خلاء در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ نیز در حالت خشک در شکل (۲۵) نشان داده شده است.

شکل (۲۶) نمودار نشانه خلاء نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ در حالت خشک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نشانه خلاء در نمونه با ضریب اصطکاک ۰/۹ نسبتاً بیشتر بوده و در واقع نمونه شل رفتار می‌کند. این پدیده ناشی از اصطکاک بین ذرات است زیرا ذرات ریزتر امکان حرکت در بین ذرات پیرامونی بزرگتر از خود را نیافته تا بتوانند خلل و فرج ایجاد شده در نمونه را پر کنند.

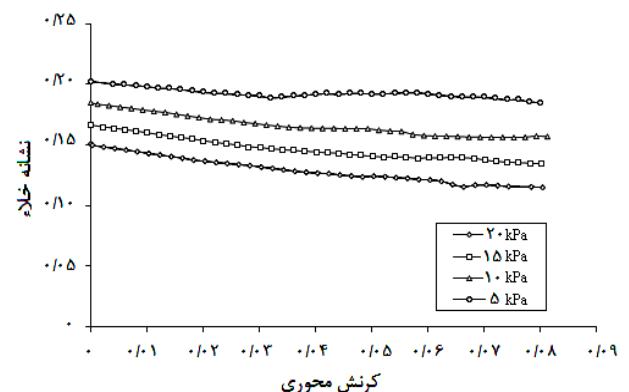
۳-۵- بررسی تغییرات عدد تماسی نسبت به کرنش محوری
ذرات در مجاورت یکدیگر قرار گرفته و با یکدیگر در تماس هستند. عدد تماسی متوسط تعداد پیوند (برخورد) بین ذرات در تماس است که هرچه نمونه متراکم تر باشد، این عدد افزایش



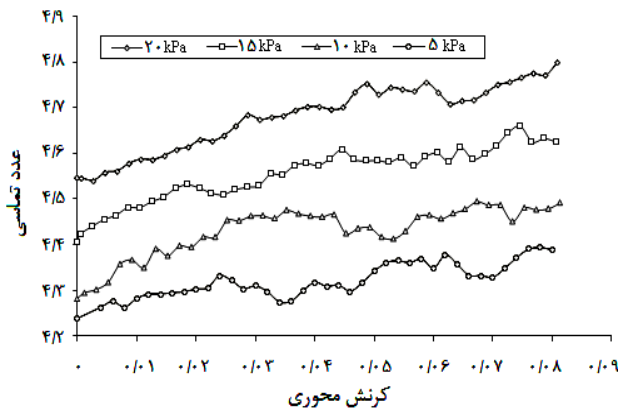
شکل ۲۱- نمودار تغییرات کرنش محوری به نشانه خلاء در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و $Sr=15\%$



شکل ۲۲- تغییرات نشانه خلاء نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ و $Sr=15\%$



شکل ۲۳- نمودار نشانه خلاء به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و $Sr=10\%$

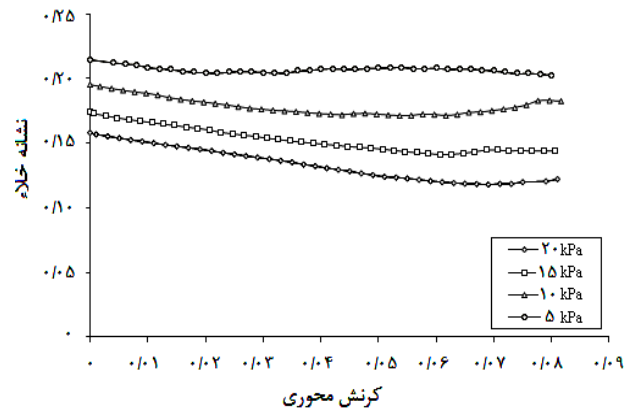


شکل ۲۷- نمودار تغییرات عدد تماسی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و $Sr=20\%$

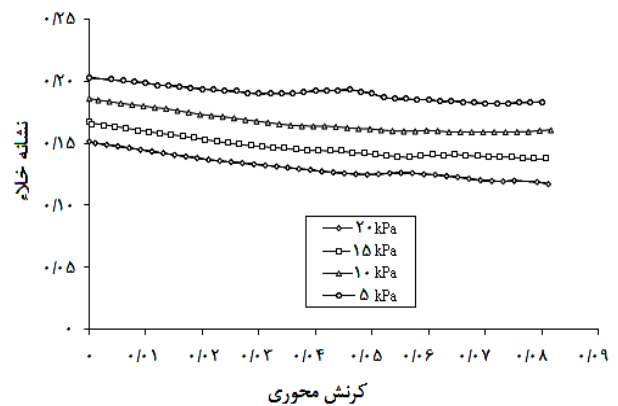
می‌یابد. شکل (۲۷) نمودار تغییرات عدد تماسی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ است. همان‌طور که در شکل (۲۷) قابل مشاهده است، با افزایش تنش همه جانبه، میزان عدد تماسی بین ذرات نیز زیاد می‌شود. این پارامتر نشان می‌دهد که با افزایش نیرو هر ذره توسط ذرات بیشتری احاطه و نمونه متراکم شده است. این افزایش تماس بین ذرات ناشی از افزایش مقدار نیروی وارده به نمونه است.

شکل (۲۸) نمودار تغییرات عدد تماسی به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ است. از مقایسه این دو نمودار با یکدیگر می‌توان دریافت که در تنش‌های جانبی برابر، عدد تماسی در نمونه با ضریب اصطکاک ۰/۹ کوچکتر از نمونه با ضریب اصطکاک ۰/۵ است. این شرایط نیز ناشی از اصطکاک بین ذرات است، زیرا هر ذره با استفاده از نیروی بیشتری امکان جدا شدن از یک ذره و برقراری تماس با ذرات دیگر را دارد.

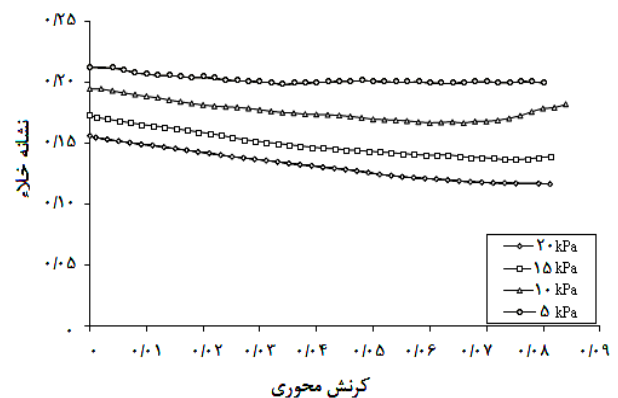
تغییرات عدد تماسی در نمونه با ضرایب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ و ۰/۹ تحت تنش همه جانبه ۲۰ کیلو پاسکال و درجه اشباع ۲۰٪ در شکل (۲۹)، با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو منحنی بعد از یک روند افزایش و سپس ثبات نسبی، مقدار عدد تماسی دچار کاهش شده که مقدار این کاهش در نمونه با ضریب اصطکاک ۰/۹ بیشتر از نمونه دیگری است. این



شکل ۲۴- نمودار نشانه خلاء نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ و $Sr=10\%$



شکل ۲۵- نمودار تغییرات نشانه خلاء در برابر کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ در حالت خشک



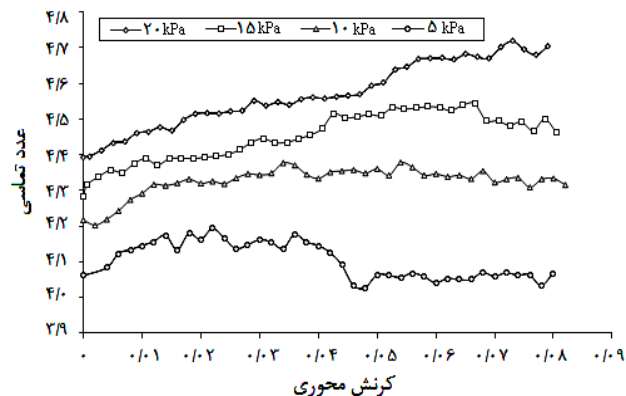
شکل ۲۶- نمودار تغییرات نشانه خلاء در برابر کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ و در حالت خشک

کاهش بیشتر ناشی از اصطکاک بوده است، چرا که بعد از گسیخته شدن نمونه ابتدا فاصله بین ذرات در محدوده اندازه گیری شده بر اثر شکل گیری ترک های موئین افزایش یافته و سپس، با توجه به دشواری بیشتری که ذرات برای حرکت نسبت به نمونه دیگر داشته اند، این فاصله در روند طولانی تری در حال کاهش بوده است. در مقابل در نمونه با ضریب اصطکاک ۰/۵، روند صعودی عدد تماسی بعد از یک کاهش ناشی از گسیختگی نمونه ادامه یافته است. این نشان می دهد که نمونه دوباره دارای ظرفیت باربری شده است (از کرنش ۰/۰۶۲ تا ۰/۱) که مجدداً در ادامه بارگذاری و شکل گیری ترک های موئین جدید مقدار عدد تماسی کاهش یافته و این روند تا انتهای بارگذاری تکرار شده است.

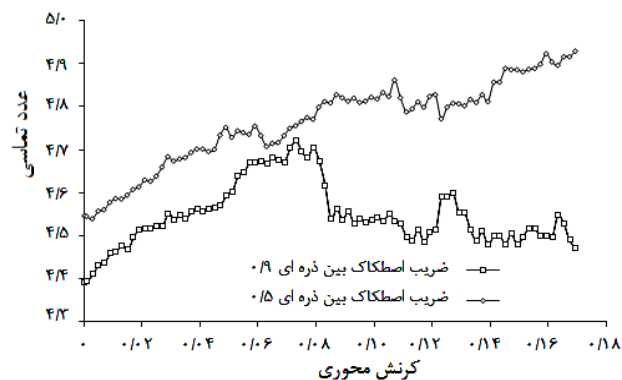
در شکل (۳۰) تغییرات عدد تماسی متوسط در طول مدل سازی بر روی نمونه شماره یک با درجه اشباع ۰/۱۵، برحسب کرنش محوری نشان داده شده است. این نمودار بازه تغییرات عدد تماسی بین ۴/۲ تا ۴/۸ را نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود، عدد تماسی به تدریج افزایش یافته و سپس به مقدار تقریباً ثابتی می رسد. این حالت نسبتاً به طور همزمان با ثبات نسبی تنش انحرافی و نشانه خلاء در مجموعه ذرات در حال تراکم روی می دهد.

شکل (۳۱) تغییرات عدد تماسی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره ای ۰/۹ با همین درصد رطوبت را نشان می دهد. در این نمودار، عدد تماسی در بازه ۴ تا ۴/۸ تغییر می کند. در واقع این نمودار نشان می دهد که با افزایش ضریب اصطکاک بین ذرات، میزان عدد تماسی کاهش می یابد.

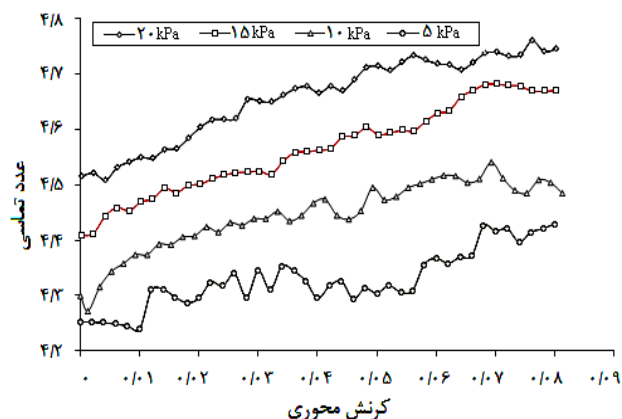
شکل (۳۲) روند تغییرات عدد تماسی نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره ای ۰/۵ و با درصد اشباع ۰/۱۰ و تحت بارگذاری را نشان می دهد. همان طور که در نمودار مشخص است، با افزایش کرنش محوری، میزان عدد تماسی نیز افزایش می یابد تا جاییکه نمونه به حالتی نزدیک شده که مقدار آن تقریباً ثابت می شود.



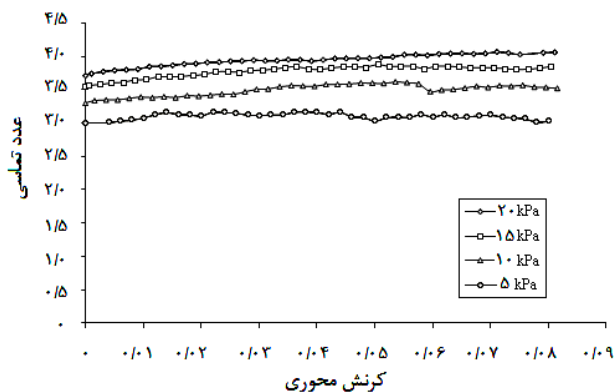
شکل ۲۸- نمودار تغییرات عدد تماسی به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره ای ۰/۹ و $Sr=20\%$



شکل ۲۹- تغییرات عدد تماسی در کرنش بالاتر شرایط یکسان



شکل ۳۰- نمودار تغییرات عدد تماسی به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره ای ۰/۵ و $Sr=15\%$

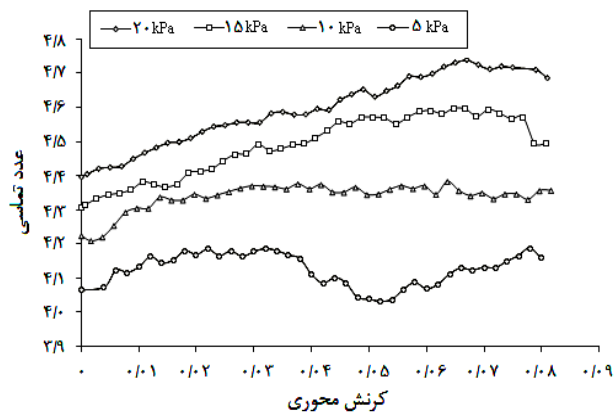


شکل ۳۴- نمودار تغییرات عدد تماسی در برابر کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۵٪ در حالت خشک

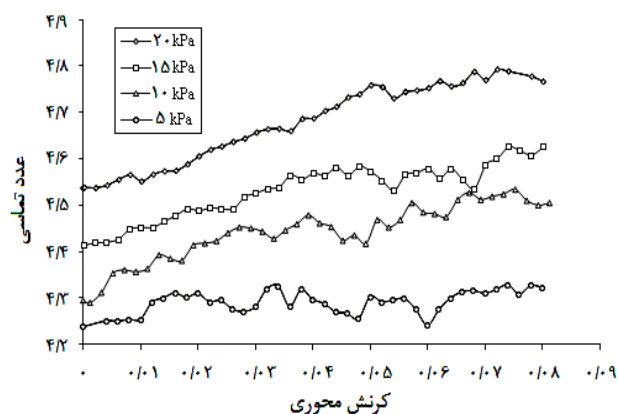
در شکل (۳۳) می‌توان مشاهده کرد که با افزایش میزان تنش همه جانبه، مقدار عدد تماسی نیز زیاد می‌شود. این مسئله به دلیل متراکم شدن نمونه و در واقع کاهش خلل و فرج در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۹٪ و با رطوبت ۱۰٪ بوده است.

تغییرات عدد تماسی در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۵٪ در حالت خشک در شکل (۳۴) نشان داده شده است. در این شکل تغییرات عدد تماسی چندان زیاد نبوده و در واقع در کل بارگذاری وضعیت ثابتی دارد. سرعت افزایش عدد تماسی بر اثر تراکم در این حالت کمتر از سایر حالت‌های شبیه‌سازی شده بوده و روند ثابتی را تقریباً طی می‌کند. با توجه به تنش همه جانبه روی نمونه‌ها، با افزایش تنش همه جانبه شیب تغییرات عدد تماسی در طول بارگذاری نمونه افزایش می‌یابد، رفتار نمونه تحت تنش همه جانبه بیشتر، حالت انقباضی بیشتری داشته و تعداد تماس‌ها افزایش می‌یابد.

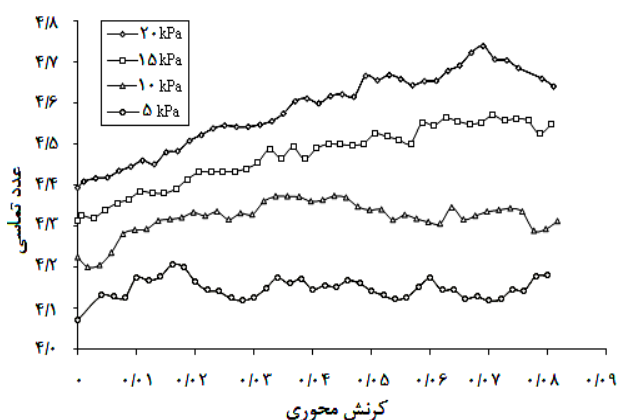
شکل (۳۵) نمایانگر میانگین عدد تماسی برحسب کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۹٪ تحت شرایط خشک است. در این شکل مشخص است که با افزایش ضریب اصطکاک بین ذره‌ای، عدد تماسی ذرات کاهش می‌یابد. از مقایسه دو شکل (۳۴ و ۳۵) می‌توان دریافت که دلیل این امر وجود امکان لغزش و جابه‌جایی بیشتر ذرات با ضریب اصطکاک کوچکتر است.



شکل ۳۱- نمودار تغییرات عدد تماسی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۹٪ و $Sr=15\%$



شکل ۳۲- نمودار تغییرات عدد تماسی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۵٪ و $Sr=10\%$



شکل ۳۳- نمودار تغییرات عدد تماسی در برابر کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۹٪ و $Sr=10\%$

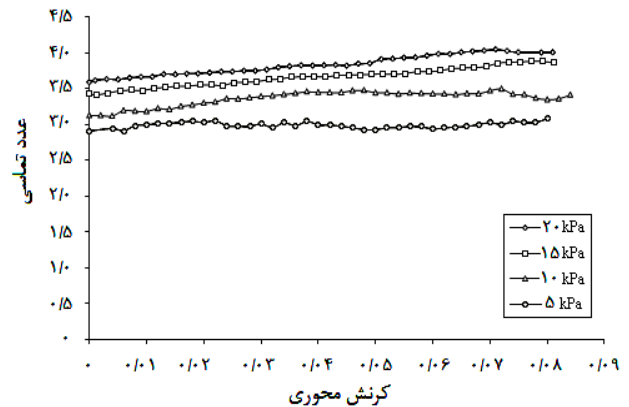
۴-۵- بررسی تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری

شکل (۳۶) نمودار کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای $0/5$ و درصد اشباع 20% است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نمونه رفتار نسبتاً شل (نامتراکم) از خود نشان می‌دهد.

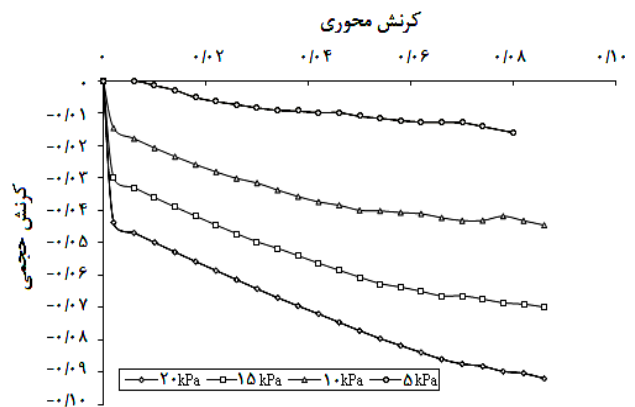
شکل (۳۷) نمودار تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای $0/9$ و درصد اشباع 20% است. همان‌طور که از هر دو نمودار قابل مشاهده است، نمونه‌ها مشابه شرایط ماسه شل رفتار می‌کنند. همچنین در شکل (۳۸)، تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری در دو نمونه با ضرایب اصطکاک بین ذره‌ای $0/5$ و $0/9$ و تحت تنش همه جانبه 20 کیلو پاسکال و درصد اشباع 20% با یکدیگر قابل مقایسه است.

هدف اصلی از مطالعه تنش، کرنش محوری، کرنش حجمی و نشانه خلاء در این تحقیق، بررسی پارامترهای C و ϕ در معیار گسیختگی کولمب بوده است. شکل (۳۹) نشان‌دهنده این مسئله است که، با افزایش درصد رطوبت نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای $0/5$ ، میزان چسبندگی ظاهری C افزایش می‌یابد. این امر درحالی است که براساس مکانیک خاک کلاسیک در حالت کاملاً اشباع، بایستی نمونه با دانه‌بندی فوق هیچ مقدار چسبندگی از خود نشان ندهد. شاید بتوان گفت که شرایط اتفاق افتاده در نمونه‌های شبیه‌سازی شده مشابه رفتار ماسه بادی غیراشباع است، زیرا در این حالت با اینکه ماسه هیچ چسبندگی ندارد رفتاری مشابه خاک‌های چسبنده از خود نشان می‌دهد. در مقابل، افزایش رطوبت نمونه تأثیری بر زاویه اصطکاک داخلی ϕ ندارد و پوش گسیختگی در نمونه‌ها با یکدیگر موازی هستند.

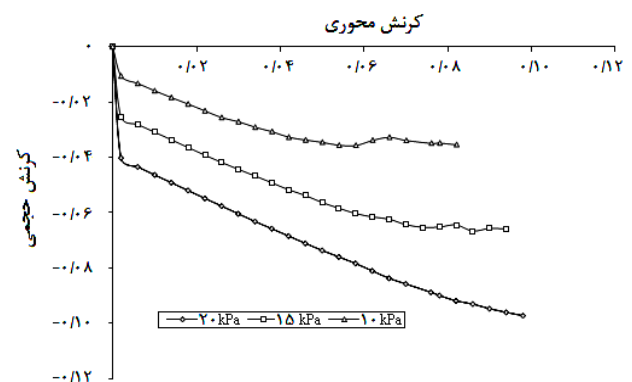
شکل (۴۰)، پوش گسیختگی نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای $0/9$ را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. در نمونه با ضریب اصطکاک $0/9$ زاویه اصطکاک داخلی ϕ نسبت به نمونه اول بزرگتر شده است. این امر ناشی از افزایش ضریب اصطکاک بین ذره‌ای در این نمونه است زیرا در این شرایط



شکل ۳۵- نمودار تغییرات عدد تماسی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک $0/9$ و در حالت خشک



شکل ۳۶- نمودار کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای $0/5$ و $Sr=20\%$



شکل ۳۷- نمودار تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای $0/9$ و $Sr=20\%$

برای جابه‌جایی ذرات در نمونه بر اثر تراکم، نیاز به اعمال تنش انحرافی بیشتر نسبت به نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ بوده است. در نمونه با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ نیز، مشابه نمونه با ضریب اصطکاک ۰/۵، با افزایش درجه اشباع نمونه میزان چسبندگی ظاهری C افزایش یافته درحالی که زاویه اصطکاک داخلی ϕ تغییر نکرده و پوش گسیختگی در آزمایش‌ها با یکدیگر موازی هستند.

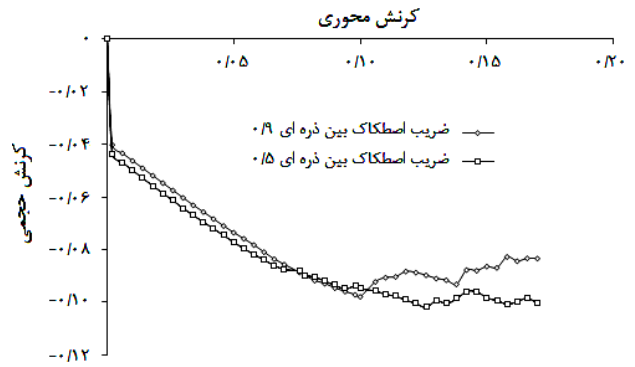
جدول (۳) تغییرات پارامترهای معیار کولمب در نمونه‌ها تحت شرایط مختلف اشباع‌شدگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول قابل مشاهده است اختلاف بین زاویه اصطکاک داخلی در دو نمونه کمتر از ۲ درجه است.

۶- نتیجه‌گیری

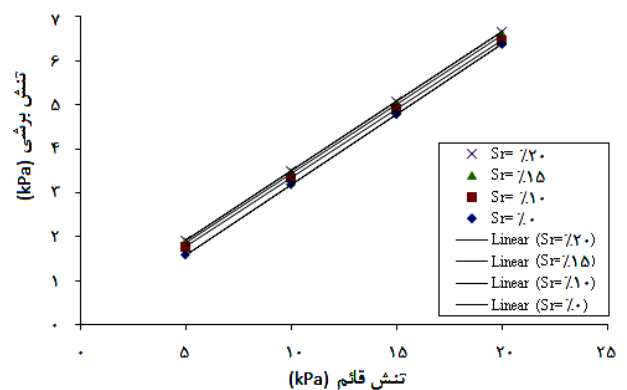
در این تحقیق حجم پل مایع بین ذراتی که امکان ایجاد پل بین آنها وجود داشته با روش مورد نظر توزیع و سپس به روش سعی و خطا زاویه ترشدگی، شعاع داخلی و خارجی منیسک و نهایتاً نیروی موئینگی محاسبه شده است. تأثیر میزان رطوبت بر پل مایع و نیروی موئینگی و همچنین زاویه تماس، شعاع ذرات، شعاع منیسک، فاصله بین ذره‌ای و حجم پل مایع در مقیاس میکروسکوپی مورد مطالعه قرار گرفته است.

در ادامه با شبیه‌سازی آزمایش سه‌محوری به صورت دوبعدی اثر فشار همه جانبه در مقیاس ماکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش میزان فشار همه جانبه، مقدار تنش انحرافی در هر دو نمونه افزایش یافته، همچنین میزان درصد نشانه خلاء نمونه‌ها کاهش می‌یابد. روند تغییرات نشانه خلاء به نحوی است که با افزایش بارگذاری کاهش یافته تا اینکه نمونه دچار گسیختگی می‌گردد، سپس در ادامه بر اثر ترک‌های مویین ایجاد شده در نمونه و امکان جابه‌جایی ذرات، میزان نشانه خلاء اندکی افزایش پیدا می‌کند.

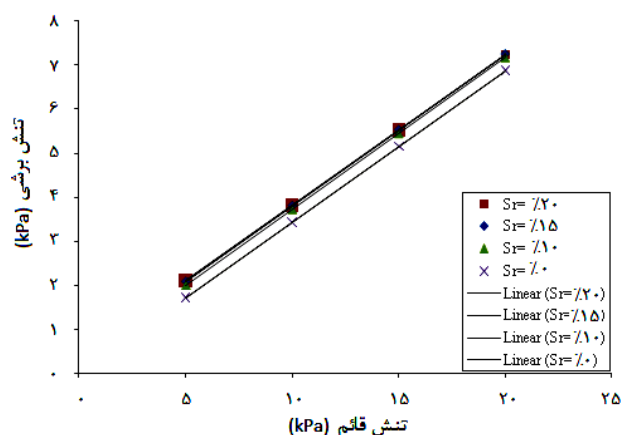
بر اساس مدل‌سازی‌های انجام گرفته، با افزایش تنش همه جانبه، مقدار عدد تماسی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بزرگی



شکل ۳۸- تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری در دو نمونه در شرایط بارگذاری یکسان



شکل ۳۹- نمودار پوش گسیختگی کولمب در نمونه‌ها با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ در درصد‌های اشباع مختلف



شکل ۴۰- نمودار پوش گسیختگی کولمب در نمونه‌ها با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ در درصد‌های اشباع مختلف

جدول ۳- پارامترهای مقاومت برشی کولمب در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته

نمونه شماره (۲)				نمونه شماره (۱)				پارامترهای مقاومت برشی
(ضریب اصطکاک بین ذره‌ای برابر ۰/۹)				(ضریب اصطکاک بین ذره‌ای برابر ۰/۵)				
$S_f = \%0$	$S_f = \%10$	$S_f = \%15$	$S_f = \%20$	$S_f = \%0$	$S_f = \%10$	$S_f = \%15$	$S_f = \%20$	
-	۲۷۱	۳۵۴/۴	۳۹۸/۱	-	۲۰۷/۲	۲۹۳/۸	۳۴۷/۹	C (Pa)
۱۸/۹۳	۱۸/۹۸	۱۸/۹۸	۱۸/۸۳	۱۷/۶۹	۱۷/۳۸	۱۷/۴۸	۱۷/۴۸	ϕ (degree)

در خاک ظاهر می‌شوند و سختی خاک را افزایش می‌دهند. این چسبندگی با افزایش درجه اشباع افزایش می‌یابد. بنابراین اثر موئینگی بر مقاومت خاک غیراشباع به صورت اصطکاکی نیست بلکه ماهیت چسبندگی دارد. نمونه‌های متراکم‌تر حداکثر زاویه اصطکاک بیشتر را نسبت به نمونه‌های شل در همان درجه اشباع و تحت همان مکش از خود نشان می‌دهند. همچنین از مقایسه رفتار نمونه‌های خشک و غیراشباع مشخص گردید که زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های خشک و غیراشباع تقریباً با یکدیگر برابر است.

عدد تماسی در نمونه‌های با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۵ بیشتر از نمونه‌های با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای ۰/۹ هستند. این مسئله نشان می‌دهد که این ضریب به صورت زبری ذرات اثر کرده و در نتیجه برای حرکت ذرات ریزتر در بین ذرات پیرامونی به مقدار نیروی بیشتری نیاز است.

مدل میکرومکانیک استفاده شده برای تحلیل خاکدانه‌ای در شرایط غیراشباع نشان می‌دهد که نیروهای جاذب ایجاد شده بر اثر موئینگی و هیسترسیس هیدرولیک نقش مهمی در پارامترهای معیار گسیختگی کولمب بازی می‌کنند. این نیروهای جاذب موجب ایجاد تنش کششی شده که به صورت چسبندگی

واژه‌نامه

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. Discrete Element Method | 9. Gorge radius |
| 2. phenomenological | 10. Derjaguin |
| 3. pendular regime | 11. Header file |
| 4. Meniscus | 12. base class |
| 5. percolate | 13. compile |
| 6. intergranular distance | 14. Dynamic Link Library (DLL) |
| 7. embracing angle, filling angle, wetting angle | 15. User Defined Model (UDM) |
| 8. contact angle | |

مراجع

- Cundall, P. A. and Strack, O. D. L., "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", *Géotechnique*, Vol. 29 (1), pp. 47-65, 1979.
- Cundall, P. A. and Hart, R. D., "Numerical Modelling of Discontinua", *Engineering Computations*, Vol. 9 (2), pp. 101-113, 1992.
- Mogami, T., "A Statistical Approach to the Mechanics of Granular Materials", *Soils and Foundations*, Vol. 5 (2), pp. 26-36, 1965.
- Bocquet, L., Charlaix, E., and Restagno, F., "Physics of Humid Granular Media", *Comptes rendu physique*, Vol. 3 (2), pp. 207-215, 2002.
- Richefeu, V., El-Yousoufi, M., and Radjai, F., "Shear Strength of Unsaturated Soils: Experiments, DEM Simulations, and Micromechanical Analysis", *2nd International Conference on Mechanics of Unsaturated Soils*, Weimar, Germany, 2007.
- El Shamy, U., and Groger, T., "Micromechanical Aspects of the Shear Strength of Wet Granular Soils", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 32, pp. 1763-1790, 2008.
- Hotta, K., Takeda, K., and Iinoya, K., "The Capillary Binding Force of a Liquid Bridge", *Powder*

- Technology*, Vol. 10, pp. 231-242, 1974.
8. Adams, M. J., and Perchard, V., "The Cohesive Forces between Particles with Interstitial Liquid", *Institute of Chemical Engineering Symposium*, Vol. 91, pp. 147-160, 1985.
 9. Zhu, H. P., Zhou, Y. Y., Yang, R. Y., and Yu, A. B., "Discrete Particle Simulation of Particulate Systems: Theoretical Developments", *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, pp. 3378-3396, 2007.
 10. Butt, H. J., "Capillary Forces: Influence of Roughness and Heterogeneity", *Langmuir*, Vol. 24, pp. 4715-4721, 2008.
 11. Israelachvili, J. N., "*Intermolecular and Surface Forces*", Academic Press, London, 1992.
 12. Scholtès, L., Chareyre, B., Nicot, F., and Darve, F., "Discrete Modeling of Capillary Mechanisms in Multi-Phase Granular Media", *CMES*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-22, 2009.
 13. Pitois, O., "*Assemblée de Grains Lubrifiés: Elaboration D'un Système Modèle Expérimental et Etude de la loi de Contact*", Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1999.
 14. Mikami, T., Kamiya, H., and Horio, M., "Numerical Simulation of Cohesive Powder Behavior in a Fluidized Bed", *Chemical Engineering Science*, Vol. 53(10), pp. 1927-1940, 1998.
 15. Muguruma, Y., Tanaka, T., Kawatake, S., and Tsuji, Y., "Numerical simulation of Particulate Flow with Liquid Bridge between Particles (Simulation of a Centrifugal Tumbling Granulator)", *Powder Technology*, Vol. 109, pp. 49-57, 2000.
 16. Yang, R. Y., Zou, R. P., and Yu, A. B., "Numerical Study of the Packing of Wet Coarse Uniform Spheres", *American Institute of Chemical Engineers*, Vol. 49, pp. 1656-1666, 2003.
 17. Willett, C. D., Adams, M. J., Johnson, S. A., and Seville, J. P. K., "Capillary Bridges between two Spherical Bodies", *Langmuir*, Vol. 16, pp. 9396-9405, 2000.
 18. Lian, G., Thorton, C., and Adams, M. J., "A Theoretical Study of the Liquid Bridge Forces between two Rigid Spherical Bodies", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 161, pp. 138-147, 1993.
 19. Chen, Y., Zhao, Y., Gao, H., and Zheng, J. "Liquid Bridge Force between two Unequal-Sized Spheres or a Sphere and a Plane", *Particuology*, Vol. 9, pp. 374-380, 2011.
 20. Kraan, M., "Techniques for the Measurement of the Flow Properties of Cohesive Powders", Ph.D Dissertation Delft University, Delft, 1996.
۲۱. تورانی، ک.، "مدل‌سازی رفتار خاک‌های دانه‌ای نیمه اشباع به روش اجزا منفصل"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، دی ماه ۱۳۹۲.