



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of Iran

Numerical Simulation of Behavior of Unsaturated Granular Soil with Polygonal Particles Using Discrete Element Method

Research Article

Mohammad Hossein Jalalian¹, Ehsan Seyedi Hosseininia²

DOI: [10.22067/jfcej.2023.85350.1270](https://doi.org/10.22067/jfcej.2023.85350.1270)

1. Introduction

Unlike saturated soils, which consist of only two phases, and similarly dry soils, unsaturated soils consist of three phases: solid, air, and liquid. To study the interaction between these phases, we need to study the liquid bridge between particles called meniscus. The shape of the meniscus depends on the type of liquid and solid phase and has a concave curvature on its outer surface for soil and water. In unsaturated soils, the soil water retention curve (SWRC) is used to investigate the relationship between suction and water content.

The DEM is one of the numerical modeling methods from a micromechanical point of view. The advantage of particle-based methods is the use of established physical laws and the consideration of the inherent discreteness and heterogeneity of soil particles. In the DEM, each particle is represented as a separate solid body that interacts with neighboring particles through computational cycles that use simple mechanical laws. This method was first introduced for circular particles and was later developed for modeling polygonal particles.

The DEM has been used to simulate the behavior of unsaturated soils in the technical literature because it can study the interaction between the three phases of soil (solid, liquid, and gas) and investigate the role of the meniscus and its impact on two adjacent particles. In these simulations, particles have been modeled in two-dimensional circular shapes, three-dimensional spherical shapes, and two-dimensional elliptical shapes. Although using particles with simplified shapes (circular, spherical, and elliptical) reduces the modeling time and cost, it can lead to misleading results because it cannot simulate the realistic geometry of soil particles. Moreover, the distribution of moisture between particles is usually modeled as uniform or as a function of particle size, neither of which accurately reflects the actual distribution of moisture in soil pores.

Previous studies have used particles with simplified geometry to simulate the behavior of unsaturated granular soils. However, this study focused on using more realistic polygonal particle shapes to simulate the two-dimensional behavior of unsaturated granular soils. To this end, an existing program for polygonal particles was used to perform biaxial test modeling with different suction levels in the pendular regime range. The results were validated against laboratory studies. In the next step of simulations, the role of grading and particle size on shear strength of unsaturated granular soils was investigated.

2. Numerical modeling of unsaturated soil

The capillary forces in unsaturated soils are due to the presence of meniscus. To determine the meniscus forces, it is first necessary to identify which particles form meniscus and under what conditions it remains between particles. Due to the more complex shape of the particles compared to previous studies, it was assumed in this study that meniscus only form between particles in contact and disappear when the particles separate. In this numerical simulation, the suction should be assigned to the sample as an input value. Then, taking into account the geometric properties of colliding particles, the possibility of meniscus formation in each pore is investigated. After identifying the particles in contact, it is necessary to determine the geometric properties of the meniscus to obtain the meniscus force between the particles.

In this simulation, about 2000 particles with five different inscribed polygonal geometries were used. The diameters of the circumscribed circles range from 0.3 mm to 1.2 mm. The modeling was performed under confining pressures of 50, 100, and 200 kPa and suction values of 0, 1, 3, 5, 30, and 100 kPa were applied to the sample. The modeling stages in the program include the following ones. First, particles were produced and randomly placed in the simulation environment without making contact with each other. Then, the particles were compacted until

*Manuscript received November 14, 2023, Revised, December 4, 2023, Accepted, February 4, 2024.

¹ PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Corresponding author. Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: eseyedi@um.ac.ir

the sample porosity reached the desired level without the particles overlapping. In the next step, confining pressure was applied to the sample. Finally, deviatoric stress was applied to the sample. It should be noted that the force due to meniscus was considered in the third and fourth steps.

Figure 1 shows two colliding particles named Particle 1 and Particle 2 and geometrical parameters investigated for meniscus formation. In this figure, two particles are overlapped each other (hatched area) and a water meniscus is formed in one of the pores. The wetted length of meniscus on the adjacent particle is L . L_1 and L_2 are distances between collision points of two particles from vertex of adjacent edge of meniscus. If the value of L is less than the distance between the vertices of particles and the collision point ($L < \min[L_1, L_2]$), it is possible to form a meniscus, otherwise the meniscus will not intersect the edges of the particles and the desired pore assumed to be saturated and therefore meniscus force ignored in this pore.

3. Simulation results

Results showed that in all simulations the samples with a suction had higher shear strength than samples without suction. This is because applying suction to the sample increases the meniscus force, which increases the threshold shear force of the particles and consequently the shear strength.

Figure 2 shows the changes in the ratio of maximum deviatoric stress to mean stress $(q/p)_{max}$. As indicated, increasing suction does not always increase shear strength; it only increases up to a certain suction level that is called optimum suction. Beyond this level, shear strength does not increase and may even decrease. The optimal suction value for this study is obtained 5 kPa.

Moreover, the results showed that an increase in the confining pressure decreases the impact of suction on the increase in shear strength of the sample. The reason for this phenomenon as indicated in Figure 3 is that increasing confining pressure augments contact forces, while meniscus force does not change without a change in suction. As a result, the impact of meniscus force on the shear strength of unsaturated soil decreases relative to the impact of contact forces.

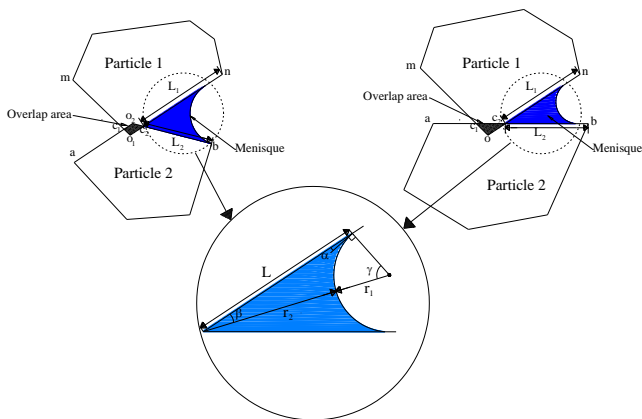


Figure 1. Geometric characteristics of the meniscus formed between two angular particles

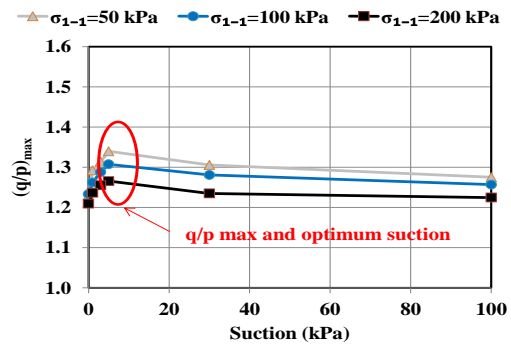


Figure 2. $(q/p)_{max}$ ratio versus suction for different confining pressures

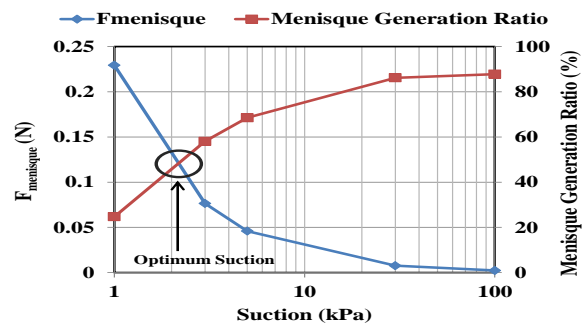


Figure 3. Changes in meniscus force and meniscus generation ratio versus suction

4. Conclusion

The simulation results are qualitatively consistent with laboratory results available in the technical literature. The main results are as follows:

- 1) Samples with suction have higher shear strength than samples without suction at a constant confining pressure. Moreover, by increasing suction to a certain amount (called optimal suction), shear strength increases, and after that, with further increase in suction, the impact of increasing shear strength decreases;
- 2) The impact of unsaturated forces on the shear strength of granular soils decreases with increasing confining pressure. This is because as confining pressure increases, the effect of contact forces on increasing the shear strength of soil mass increases while the amount of unsaturated forces does not change without changing suction. As a result, the ratio of meniscus forces to contact forces decreases;
- 3) The amount of increase in shear strength depends on the amount of meniscus forces and the number of pores with meniscus. The existence of optimal suction is due to the fact that as suction increases, the amount of meniscus forces decreases. However, the number of pores that can form meniscus increases, and these two parameters create the maximum shear strength at a certain suction;
- 4) With decreasing particle size, the impact of unsaturated forces on shear strength increases, and at a constant confining pressure and suction, samples with smaller particles have higher shear strength.



شبیه‌سازی عددی رفتار خاک دانه‌ای غیر اشباع با ذرات چند گوشه با استفاده از روش اجزای مجزا*

مقاله پژوهشی

محمدحسین جلالیان^(۱) سیداحسان سیدی حسینی نیا^(۲)

DOI: 10.22067/jfeci.2023.85350.1270

چکیده مدل‌سازی عددی خاک‌های غیر اشباع، امروزه مورد توجه قرار گرفته است. روش اجزای مجزا توانایی مناسبی در مدل‌سازی منیسک بین ذرات دارد. در این پژوهش رفتار خاک دانه‌ای غیر اشباع با استفاده از مدل‌سازی دو محوری به شیوه اجزای مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. بر خلاف پژوهش‌های گذشته که شکل ذرات به صورت ساده دایروی یا کروی در نظر گرفته می‌شدند، در این مدل‌سازی از ذرات چند گوشه استفاده شده است که تطابق بیشتری با شکل واقعی ذرات دارد و می‌توان امکان تشکیل منیسک در حفرات مختلف را با توجه به هندسه و آرایش ذرات در کنار هم بررسی کرد. در حالی که به دلیل تقارن در ذرات دایروی و کروی، شکل منیسک در بین این ذرات فقط به اندازه ذرات بستگی دارد. با توسعه یک برنامه موجود بر پایه روش اجزای مجزا، ذرات در مکش‌ها و تنش‌های همه‌جانبه مختلف تحت بارگذاری دو محوری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش مکش تا حد مشخصی، مقاومت برشی نمونه افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش مکش، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که با افزایش تنش همه‌جانبه، اثر نیروی منیسک بر مقاومت برشی کاهش می‌یابد. مدل‌سازی ذرات با اندازه‌های مختلف همچنین نشان داد که تأثیر نیروی منیسک بر ذرات کوچک‌تر، بیشتر است و با افزایش اندازه ذرات اثر نیروی منیسک بر مقاومت برشی کمتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی خاک غیر اشباع، روش اجزای مجزا، ذرات چند گوشه، پل مایع، تأثیر شکل ذرات.

Numerical Simulation of Behavior of Unsaturated Granular Soil with Polygonal Particles Using Discrete Element Method

Mohammad Hossein Jalalian

Ehsan Seyedi Hosseininia

Abstract Numerical modeling of unsaturated soils has become increasingly popular in recent years. The Discrete Element Method (DEM) is a powerful tool for modeling granular materials by focusing on particle interactions. In this study, the behavior of unsaturated granular soil was investigated using two-dimensional DEM by considering meniscus formation among particles. Unlike previous studies that simply considered particle shapes as circular or spherical, this study used more realistic polygonal particles shape that forming meniscus can be examined in different pores with respect to the geometry and arrangement of the particles. However, because of symmetry in circular and spherical particles, the shape of the meniscus among these particles depends only to the size of the particles. To this end, using a program based on the DEM was developed and a soil sample were simulated under different suction values and confining pressures. The results showed that the shear strength of the sample augments by increasing suction until a specific value and then, decreased with further suction increases. It was also observed that the effect of meniscus force on increasing shear strength decreased with increasing confining pressures. Modeling particles of different sizes also showed that the effect of meniscus force is greater for smaller particles and decreases with particle size.

Key Words Unsaturated Soil, Discrete Element Method, Polygonal Particles, Liquid Bridge, Effect of Particles Shape.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۸/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۱/۱۵ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گرایش ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) استاد گروه مهندسی عمران، گرایش ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه خشک که سطح آب زیرزمینی پایین است، خاک معمولاً در شرایط کاملاً اشباع یا کاملاً خشک قرار ندارد و ممکن است با تغییر سطح آب یا وقوع بارندگی، رطوبت خاک تغییر کند. در حالت غیر اشباع و بسته به مقدار رطوبت اولیه خاک، تغییر رطوبت باعث افزایش و یا کاهش ظرفیت باربری پی‌ها و یا گسیختگی شیروانی‌ها شود [1]. بنابراین بررسی رفتار خاک‌ها در شرایط غیر اشباع ضروری است. یک خاک دانه‌ای غیر اشباع شامل ذراتی است که یک شبکه متخلخل را تشکیل می‌دهد که حفرات توسط هر دو آب و هوا پر شده است. این خاک دارای رفتار پیچیده غیر خطی بوده که دلیل آن وجود اندرکنش بین ذرات جامد و آب و هوا است.

برخلاف خاک‌های اشباع که فقط از دو فاز جامد و مایع و خاک‌های خشک که فقط از دو فاز جامد و گاز تشکیل شده‌اند، خاک‌های غیر اشباع از سه فاز جامد، مایع و گاز تشکیل شده است. برای مطالعه اندرکنش بین سه فاز موجود در محیط خاک غیر اشباع، باید به مطالعه پل مایع بین ذرات پرداخت که به آن منیسک گفته می‌شود. شکل منیسک به جنس فاز مایع و جامد بستگی دارد و برای مصالح خاکی و آب دارای انحناى مقعر در بخش خارجی آن است [2]. مجموع مساحت منیسک‌ها در توده مصالح دو بعدی نشان دهنده مقدار درصد رطوبت کل نمونه است.

برای بررسی رابطه بین مکش و رطوبت در خاک‌های غیر اشباع، از منحنی نگهداشت استفاده می‌شود. منحنی نگهداشت هر خاک نشان می‌دهد که به ازای هر مکش، مقدار رطوبت در خاک چه مقدار است. با افزایش مکش در خاک، رطوبت خاک و مساحت منیسک‌ها کاهش می‌یابد تا به اندازه‌ای برسد که هر منیسک فقط بین دو ذره در تماس باشد. در این شرایط خاک، مطابق دسته‌بندی جرمن [3]، اگر منیسک بین همه ذرات مجاور وجود داشته باشد، خاک در محدوده رطوبتی رژیم پاندولی بوده و در صورتی که منیسک فقط بین برخی از ذرات مجاور ایجاد شود، خاک در محدوده رطوبتی رژیم پاندولی جزئی است. درجه اشباع خاک در این دو محدوده رطوبتی طبق مطالعات پیشین بین صفر تا ۳۰ درصد گزارش شده است [4,5]. محدوده این دو رژیم رطوبتی با توجه به مشخصات خاک مثلاً دانه‌بندی، جنس ذرات، و تراکم می‌تواند متفاوت باشد.

به منظور مطالعه مقاومت برشی خاک‌های دانه‌ای غیر

اشباع، روابط زیادی بر پایه نظریه مقاومتی کولمب توسعه و ارائه شده است که با استفاده از این روابط می‌توان مقاومت خاک‌های غیر اشباع را پیش‌بینی کرد [6-12]. همچنین به منظور بررسی رفتار خاک‌های دانه‌ای غیر اشباع به صورت آزمایشگاهی پژوهش‌های زیادی انجام شده است. در این پژوهش‌ها مقاومت برشی خاک [13-17]، مقاومت کششی [13,18,19] و مدول الاستیسیته [20] خاک‌های دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. برای درک بهتر شناخت رفتار خاک‌های دانه‌ای غیر اشباع، نیاز به استفاده از روش‌های مطالعاتی مبتنی بر ذرات است، به طوری که بتوان اندرکنش میان سه فاز جامد (ذرات)، مایع (آب) و گاز (هوا) را در نظر گرفت. برای شبیه‌سازی عددی این اندرکنش، می‌توان از روش اجزای مجزا استفاده کرد.

روش اجزای مجزا (Discrete (Distinct) Element Method) یکی از روش‌های مدل‌سازی عددی به دیدگاه میکرومکانیکی است. مزیت روش‌های مبتنی بر اجزای مجزا، استفاده از قوانین مسلم فیزیک و توجه به گسسته و نامتناجس بودن ذاتی محیط‌های ذره‌ای است. در روش اجزای مجزا هر ذره به عنوان یک جسم جامد مجزا با ذرات کناری به صورت یک چرخه دینامیکی اندرکنش دارد که در آن از قوانین ساده مکانیک استفاده می‌شود [21]. به‌کارگیری این روش برای توده خاک که ابتدا توسط کاندال [22] برای ذرات دایره‌ای معرفی شد و سپس برای مدل‌سازی ذرات چند گوشه توسعه داده شد [23]. این روش اخیر در شبیه‌سازی پدیده‌های مختلفی مانند شکست ذرات [24,25]، اثر ناهمسانی ذرات [21-28]، ناپایداری در خاک دانه‌ای اشباع [29] و تولید ماسه [30] استفاده شده است.

در ادبیات فنی، از روش DEM در شبیه‌سازی خاک غیر اشباع استفاده شده است. به دلیل توانایی این روش در مطالعه اندرکنش بین سه فاز تشکیل دهنده محیط خاکی و بررسی نقش منیسک و تأثیر آن بر هر دو ذره کنار هم، از این روش برای شبیه‌سازی خاک‌های غیر اشباع استفاده شده است و رفتار مقاومتی و تغییر شکلی ذرات دانه‌ای [31-39] و رسی [40,41] غیر اشباع مورد مطالعه قرار گرفته است. در مدل‌سازی‌های ذرات دانه‌ای شکل‌های دو بعدی دایروی [31,32,36,38]، سه بعدی کروی [33,34,37] و دو بعدی بیضوی [35] بررسی شده است. استفاده از ذرات با شکل ساده شده (دایروی، کروی و بیضوی)، گرچه باعث می‌شود تا زمان و هزینه مدل‌سازی

ذرات دارای برخورد تشکیل می‌شود و با جدا شدن ذرات از بین می‌رود.

توزیع رطوبت بین ذرات

پس از تشخیص ذرات دارای تماس، لازم است تا مشخصات هندسی منیسک تعیین شود تا بتوان نیروی منیسک بین ذرات را به دست آورد. مجموع حجم کل منیسک‌ها (مساحت در این پژوهش) در میان ذرات خاک، نشان دهنده رطوبت کل نمونه است. در پژوهش‌های گذشته، مساحت هر منیسک به صورت مساوی [31] یا به نسبت اندازه ذرات [34,35]، در میان ذرات کل توده خاک تقسیم شده است. در این پژوهش با توجه به هندسه ذرات که برخلاف پژوهش‌های گذشته، نامنظم و چند گوشه هستند، رطوبت کل بر اساس مشخصات هندسی حفرات بین ذرات به آن‌ها اختصاص داده شده است. در شکل ۱) دو ذره Particle 1 و Particle 2 که به دو صورت رأس به ضلع یا رأس به رأس با یکدیگر برخورد دارند، نشان داده شده است و پارامترهای مورد بررسی جهت تشکیل منیسک در آن‌ها بر روی شکل مشخص شده‌اند. در این شکل دو ذره به اندازه سطح هاشورخورده با یکدیگر هم‌پوشانی دارند و یک منیسک آب در یکی از حفرات (به طور مثال) تشکیل شده است. طول ترشدگی منیسک بر روی ذره مجاور به اندازه L است. r_1 و r_2 به ترتیب شعاع‌های خارجی و داخلی منیسک، β نصف زاویه بین دو ذره، γ زاویه مکمل زوایای β و $90^\circ + \alpha$ در سه ضلعی تشکیل شده است. L_1 و L_2 فاصله بین محل برخورد دو ذره از رأس ضلع مجاور منیسک هستند. زاویه برخورد α نشان دهنده زاویه بین سطح جامد- مایع با خط مماس بر سطح مایع- گاز است.

برای شبیه‌سازی توده خاک غیر اشباع و تعیین مقدار نیروی منیسک، لازم است با توجه به مشخصات هندسی ذرات دارای برخورد، امکان تشکیل منیسک در هر یک از حفرات بررسی شود. برای تعیین مشخصات هندسی حفره مانند β ، L_1 و L_2 ابتدا اضلاع مجاور منیسک تعیین می‌شوند و سپس طول و زاویه آن‌ها با یکدیگر محاسبه می‌شود. بدین منظور، در برخورد به شکل رأس به ضلع مطابق شکل ۱)، ابتدا تعیین می‌شود که رأس متداخل (نقطه o) در ذره Particle 1 یا Particle 2 قرار دارد. پس از مشخص شدن رأس متداخل، رأس‌های مجاور آن در ذره Particle 1 (نقاط m و n) شناسایی می‌شوند. در ذره Particle 2 نیز با مشخص بودن محل نقاط تماس (c_1 و c_2)،

کاهش یابد، ولی به دلیل عدم امکان شبیه‌سازی واقعی هندسه ذرات خاک ممکن است باعث نارسایی نتایج شود. همچنین در این پژوهش‌ها، توزیع رطوبت بین ذرات معمولاً به صورت یکنواخت یا تابعی از اندازه ذرات مدل‌سازی شده است که با هندسه پیچیده واقعی حفرات خاک و توزیع واقعی رطوبت در حفرات تطابق زیادی ندارد.

با توجه به استفاده از ذرات با هندسه ساده شده در پژوهش‌های قبلی و لزوم استفاده از شکل واقعی‌تر ذرات در شبیه‌سازی خاک‌های غیر اشباع دانه‌ای، این پژوهش با توسعه برنامه موجود برای ذرات تیز گوشه [23]، به شبیه‌سازی دو بعدی رفتار خاک غیر اشباع پرداخته است. بدین منظور مدل‌سازی آزمایش دو محوری با مکش‌های متفاوت با رطوبت در محدوده رژیم پاندولی و پاندولی جزئی (که به اختصار رژیم پاندولی ذکر شده است) انجام شده و نتایج به دست آمده با پژوهش‌های آزمایشگاهی دیگر صحت‌سنجی شده است. همچنین در بخش بعدی شبیه‌سازی، به نقش دانه‌بندی و قطر ذرات خاک بر مقاومت برشی خاک‌های دانه‌ای غیر اشباع بررسی شده است.

مدل‌سازی عددی خاک غیر اشباع

با توجه به دید میکرومکانیکی در شبیه‌سازی توده خاک غیر اشباع، نحوه مدل‌سازی منیسک و نیروی ناشی از آن بر ذرات پیرامونی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در این بخش، به معرفی آن پرداخته می‌شود.

تخریب و تشکیل منیسک

نیروهای موجود در خاک‌های غیر اشباع ناشی از وجود منیسک است. برای تعیین نیروی منیسک ابتدا باید مشخص شود که منیسک بین کدام ذرات تشکیل می‌شود و برای چه شرایطی میان ذرات، برقرار می‌ماند. جهت تعیین فاصله تشکیل و تخریب منیسک پژوهش‌هایی انجام شده مدل‌هایی جهت تعیین آن ارائه شده است [42,44,45]. با این وجود، در شبیه‌سازی عددی خاک غیر اشباع با روش اجزای مجزا جهت ساده‌سازی معمولاً فرض می‌شود که منیسک، فقط بین ذرات دارای تماس تشکیل می‌شود [5,31,33-35] و با جدا شدن ذرات از یکدیگر منیسک تخریب می‌شود [31,34,35]. به طور مشابه، در این پژوهش، به دلیل شکل پیچیده‌تر ذرات نسبت به پژوهش‌های گذشته، برای ساده‌سازی فرض شده است که منیسک فقط بین

با مشخص بودن مقدار زاویه بین دو ضلع و همچنین مقدار r_1 طبق رابطه (۱) و با ساده سازی رابطه (۲)، مقدار طول ترشدگی (L) طبق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$L = \frac{r_1 \times \sin \varphi}{\sin \beta} = \frac{r_1 \times \sin \varphi (90 - (\alpha + \beta))}{\sin \beta} \quad (3)$$

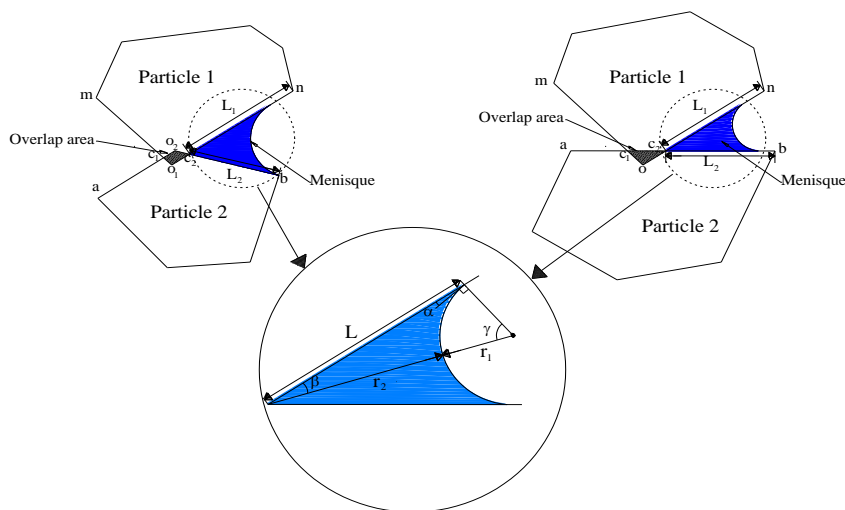
با توجه به جنس ذرات دانه‌ای که ذرات فاقد بار سطحی هستند، ذرات به صورت کاملاً خیس شونده (Perfectly wetting surface) هستند و در این شرایط زاویه برخورد (α) برابر صفر در نظر گرفته می‌شود [46]. چن و همکاران [47] نیز نشان دادند که استفاده از مقدار زاویه برخورد بین صفر تا ۱۰ درجه تفاوت چشم‌گیری در مقدار نیروی منیسک ندارد. در برخی مدل‌سازی‌های پیشین، زاویه برخورد در محدوده صفر تا ۱۰ درجه [31,34,35] فرض شده است. در مدل‌سازی حاضر مقدار زاویه برخورد برابر صفر فرض شده است. اگر مقدار طول ترشدگی مورد نیاز برای تشکیل منیسک (L) از کمینه فاصله بین رئوس اعضا و محل برخورد (L_1 و L_2) کمتر باشد ($L < \min[L_1, L_2]$)، امکان تشکیل کامل منیسک مطابق شرایط رژیم پاندولی وجود دارد و در غیر این صورت سطح انحنا منیسک دو ذره را در داخل حفره بین آن‌ها قطع نخواهد کرد و فرض می‌شود که حفره مورد نظر اشباع است و در نتیجه از نیروی غیر اشباع در این حفره صرف نظر می‌شود.

راستای خط گذرنده از این نقاط مشخص شده و با راستای کلیه اضلاع ذره Particle2 مقایسه شده و در نتیجه ضلع ab مشخص می‌شود. در برخورد رأس به رأس نیز ابتدا رئوس متداخل در هر یک از ذرات (o_1 و o_2) مشخص می‌شوند. سپس رئوس مجاور آن‌ها در هر یک از ذره (m و n در ذره Particle1 و a و b در ذره Particle2) شناسایی می‌شوند. سپس در ادامه الگوریتم مشخص می‌شود که هر یک از نقاط m و n در ذره Particle1 و a و b در ذره Particle2 به کدام یک از نقاط برخورد c_1 و c_2 مرتبط هستند و حفره را تشکیل می‌دهند. پس از مشخص شدن اضلاع مرتبط بین دو ذره، ac_1 و mc_1 در حفره سمت چپ، و bc_2 و nc_2 در حفره سمت راست، مشخصات هندسی حفره مانند β ، L_1 و L_2 محاسبه می‌شود. برای تعیین شعاع انحنا منیسک، مقدار مکش به صورت ورودی به برنامه داده می‌شود و شعاع خارجی منیسک (r_1) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$r_1 = \frac{T_s}{\text{Suction}} \quad (1)$$

که در آن T_s نیروی کشش سطحی آب و Suction مقدار مکش اعمالی بر نمونه است. سپس با فرض دایره‌ای بودن انحنا منیسک [42,45] و با استفاده از رابطه سینوس‌ها مطابق معادله (۲) داریم:

$$\frac{L}{\sin \varphi} = \frac{r_1 + r_2}{\sin(90 + \alpha)} = \frac{r_1}{\sin \beta} \quad (2)$$



شکل ۱ مشخصات هندسی منیسک تشکیل شده بین دو ذره در شرایط برخورد رأس به ضلع و رأس به رأس

محاسبه می‌شوند. تنش متوسط p و تنش تفاضلی q به ترتیب از روابط (۶-الف) و (۶-ب) محاسبه می‌شوند.

$$p = \frac{\sigma_{1-1} + \sigma_{2-2}}{2} \quad (۶-الف)$$

$$q = \sigma_{2-2} - \sigma_{1-1} \quad (۶-ب)$$

در روابط بالا σ_{1-1} و σ_{2-2} تنش در راستای محور افق (۱-۱) و در راستای محور قائم (۲-۲) هستند. همچنین چسبندگی (C) نیز مطابق رابطه کولمب از رابطه ساده شده زیر محاسبه می‌شود.

$$C = \frac{q}{2 \cos(\phi)} + p \tan(\phi) \quad (۷)$$

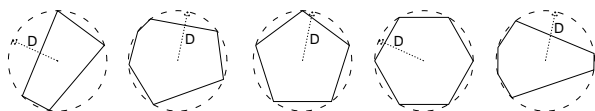
در رابطه بالا ϕ زاویه اصطکاک داخلی توده خاک است. با مشخص بودن q و p در هر مکش به ازای حداقل دو تنش همه جانبه متفاوت، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) در هر مکش به دست می‌آید.

مشخصات شبیه‌سازی عددی

برای مدل‌سازی عددی از یک برنامه کامپیوتری با نام POLY استفاده شده است [23]. این برنامه، گسترش یافته برنامه DISC بوده [48] که برای شبیه‌سازی آزمون فشاری دو محوری ذرات دایروی استفاده می‌شود. برنامه POLY برای شبیه‌سازی ذرات چند گوشه توسعه داده شده است. در این بخش مشخصات شبیه‌سازی‌های انجام شده با برنامه POLY شرح داده می‌شود.

مشخصات ذرات

در این مدل‌سازی از حدود ۲۰۰۰ ذره با پنج نوع هندسه چند گوشه که در شکل ۲ نشان داده شده است، استفاده شده است که این ذرات در دایره محاط می‌شوند. قطر دایره محیطی ذرات (D) از ۰/۳ تا ۱/۲ میلی‌متر است.



شکل ۲ شکل ذرات استفاده شده در مدل‌سازی با قطر دایره محیطی D

مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی شامل چگالی ذرات (ρ)، سختی تماسی عمودی (k_n)، سختی تماسی برشی

در صورتی که دانه‌بندی نمونه‌ها شامل ذرات بسیار کوچک تا بسیار بزرگ باشد، ممکن است ذرات کوچک در حفرات بزرگ بین دو ذره قرار گیرند. با توجه به کم بودن مقدار رطوبت در شرایط رژیم پاندولی و کوچک بودن مساحت منیسک‌ها، امکان قرارگیری ذرات در داخل منیسک‌ها کم است. همچنین با توجه به فرض پژوهش که نیروی منیسک فقط برای ذرات دارای برخورد محاسبه می‌شود، از تأثیر قرارگیری احتمالی ذرات ریز در منیسک‌ها و اثر آن‌ها بر نیروی منیسک‌ها صرف نظر می‌شود.

نیروی منیسک

مطابق توضیحات بخش قبل در صورتی که امکان تشکیل منیسک در هر یک از حفرات بین دو ذره وجود داشته باشد، نیروی منیسک مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$F_m = (\pi \times r_2^2 \times \text{Suction} + 2\pi \times r_2 \times T_s) / 2 \quad (۴)$$

در این رابطه F_m نیروی ناشی از منیسک است. با توجه به شکل ذرات و حفرات که فاقد تقارن و نظم مشخصی هستند، ممکن است نیروی منیسک فقط در یکی از حفرات در نظر گرفته شود. در این صورت لنگر اعمالی از طرف منیسک بر هر ذره مقدار متفاوتی خواهد بود. در نتیجه، در شرایط سکون و وجود سطح هم‌پوشانی بسیار ناچیز و بدون وارد شدن نیروی خارجی (مشابه با شرایطی که دو ذره به یکدیگر چسبیده‌اند و بارگذاری به مجموعه اعمال نمی‌شود)، لنگرهای متفاوت وارد بر هر ذره باعث عدم تعادل در مجموعه می‌شود. به این دلیل فقط مقدار نیروی منیسک در راستای عمود بر سطح برخورد تجزیه شده و با مقدار نیروی تماسی عمودی بین ذرات جمع می‌شود و باعث افزایش نیروی آستانه لغزش بین دو ذره می‌شود. در این مدل‌سازی نیروی آستانه لغزش در ذرات دانه‌ای از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

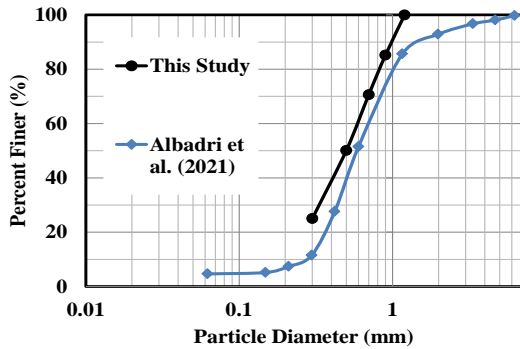
$$F_{S \max} = (F_{Ncon} + F_m) \times \mu \quad (۵)$$

که در آن، F_{Ncon} نیروی عمودی تماسی بین دو ذره و μ ضریب اصطکاک بین دو ذره است.

چسبندگی و مقاومت برشی غیر اشباع

برای بررسی نتایج به دست آمده چسبندگی و تنش‌های انحرافی

شده در پژوهش آزمایشگاهی و این پژوهش در محدوده دانه‌بندی خاک‌های ماسه‌ای قرار دارد و همچنین مشاهده می‌شود دانه‌بندی استفاده شده در پژوهش حاضر، درصد عبوری بین ۲۰ تا ۹۰ درصد پژوهش آزمایشگاهی را پوشش می‌دهد.

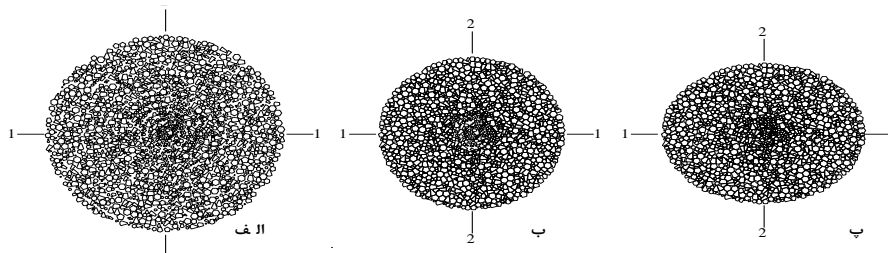


شکل ۳ منحنی دانه‌بندی ذرات استفاده شده در مدل‌سازی و صحت‌سنجی [17]

شرح بارگذاری دو محوری

مراحل مدل‌سازی در برنامه مورد استفاده مطابق شکل ۴ شامل مراحل زیر است:

ابتدا مختصات رئوس ذرات نسبت به مرکز مختصات در یک فایل ورودی به برنامه داده می‌شوند و ذرات نام‌گذاری می‌شوند. سپس این فایل در برنامه فراخوانی می‌شود و ذرات به ترتیب نام‌گذاری با اولویت قرارگیری در مرکز مجموعه تولید می‌شوند به نحوی که با یکدیگر در تماس نباشند (شکل ۴-الف). سپس ذرات به نحوی متراکم می‌شوند تا تخلخل نمونه نداشته باشند (شکل ۴-ب). در مرحله بعد، تنش همه‌جانبه در جهت‌های ۱-۱ و ۲-۲ به نمونه اعمال می‌شود (شکل ۴-ب). در نهایت، در نهایت تنش انحرافی در جهت محور ۲-۲ اعمال می‌شود (شکل ۴-پ). لازم به توضیح هست که نیروی ناشی از منیسک محاسبه شده در بخش‌های گذشته، در مراحل سوم و چهارم بارگذاری در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴ مراحل بارگذاری دو محوری: (الف) تولید اولیه ذرات به صورت توده نامتراکم، (ب) متراکم‌سازی و اعمال تنش همه‌جانبه، (پ) بارگذاری انحرافی

(k_s) ، ضریب اصطکاک (μ) و مقدار نیروی کشش سطحی آب (T_s) مطابق

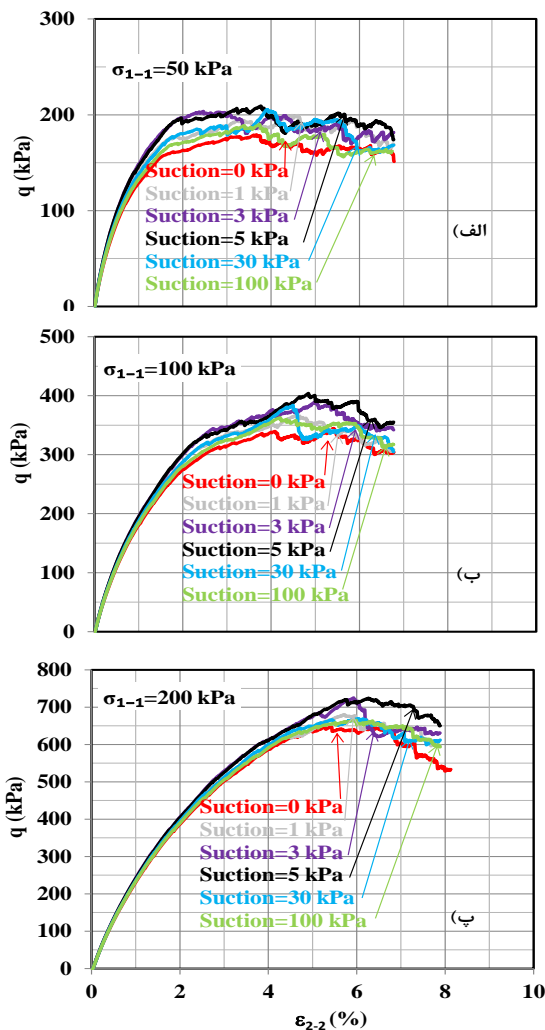
جدول ۱) است. مقادیر سختی تماسی ذرات به نحوی انتخاب شده است تا مقدار هم‌پوشانی ذرات در محدوده قابل قبول باشد. به نحوی که سختی ذرات از حدی کمتر نباشد تا در مرحله متراکم‌سازی، هم‌پوشانی ذرات در یکدیگر بیش از حد نشود. همچنین سختی از حدی بیشتر نشود تا در مرحله متراکم‌سازی، پس از طی تعداد سیکل‌های لازم، تخلخل نمونه به مقدار ثابتی برسد. همچنین مقدار ضریب اصطکاک ذرات در محدوده سایر مطالعات دو بعدی انجام شده بر روی خاک دانه‌ای تیز گوشه با روش اجزای مجزا است [29,30,49]. مقدار نیروی کشش سطحی آب در دمای ۲۵ درجه برابر با $72/4$ میلی نیوتن بر متر است [46]. مقدار چگالی ذرات در محدوده مقادیر موجود در آزمایشگاه برای ذرات خاک است. مدل‌سازی در تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است. همچنین مکش‌های صفر، یک، سه، پنج، ۳۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال شده است.

جدول ۱ مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی

متغیر	مقدار	واحد
چگالی ذرات (ρ)	2500	kg/m^3
سختی تماسی عمودی (k_n)	5×10^7	N/m
سختی تماسی برشی (k_s)	5×10^7	N/m
ضریب اصطکاک (μ)	0.5	-
نیروی کشش سطحی آب (T_s)	72.4	mN/m

در این پژوهش، به جهت صحت‌سنجی کیفی نتایج شبیه‌سازی عددی از نتایج آزمایشگاهی پژوهش‌های البدی و همکاران [17] استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی خاک در این کار آزمایشگاهی به همراه منحنی خاک شبیه‌سازی شده در پژوهش حاضر در شکل ۳ نشان داده شده است. خاک استفاده

می‌شود که مطابق انتظار با افزایش تنش همه‌جانبه، مقاومت برشی نمونه (q_{max}) افزایش می‌یابد و شیب منحنی تنش- کرنش بیشتر می‌شود. همچنین در همه مدل‌سازی‌ها، نمونه‌های دارای مکش نسبت به نمونه‌های بدون مکش، مقاومت برشی بیشتری دارند. علت این پدیده آن است که با ایجاد مکش در نمونه، نیروی منیسک باعث افزایش نیروی آستانه حرکت ذرات می‌شود و در نتیجه مقاومت برشی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در همه تنش‌های همه‌جانبه، بیشینه مقاومت برشی در مکش پنج کیلوپاسکال اتفاق می‌افتد و به ازای سایر مکش‌ها، تأثیر مکش بر افزایش مقاومت برشی کاهش می‌یابد. این پدیده با نتایج پژوهش‌های قبلی برای خاک‌های غیر چسبنده [16,20,50] نیز به صورت کیفی تطابق دارد. مکشی که در آن بیشینه مقاومت برشی اتفاق می‌افتد را می‌توان مکش بهینه نامید که مقدار آن در مدل‌سازی حاضر برابر پنج کیلوپاسکال است.

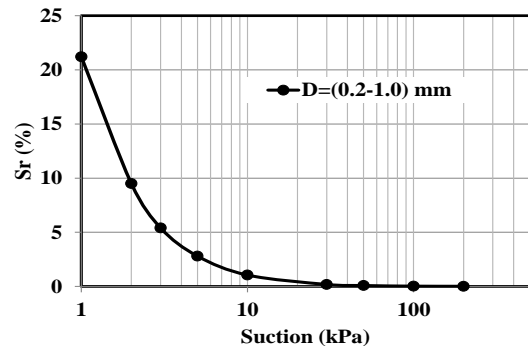


شکل ۶ منحنی تنش تفاضلی در برابر تغییر مکان محوری برای تنش‌های همه‌جانبه: (الف) ۵۰، (ب) ۱۰۰، (پ) ۲۰۰ کیلوپاسکال

منحنی نگهداشت

منحنی نگهداشت یکی از مهم‌ترین مشخصات مصالح در خاک‌های غیر اشباع است. در این منحنی رابطه بین مکش با رطوبت یا درجه اشباع تعیین می‌شود. در مدل‌سازی حاضر می‌توان منحنی نگهداشت را به صورت کیفی در محدوده رژیم پاندولی برای هر نمونه‌ای استخراج کرد. برای تهیه منحنی نگهداشت، مکش به نمونه اعمال می‌شود و مطابق توضیحات بخش‌های گذشته امکان تشکیل منیسک در حفرات مختلف بررسی می‌شود. در حفراتی که منیسک در آن تشکیل می‌شود، مساحت منیسک مشخص می‌شود و با مشخص شدن مساحت کلیه منیسک‌ها و مشخص بودن فضای خالی کل، درجه اشباع نمونه تعیین می‌شود. این فرایند برای مکش‌های مختلف تکرار می‌شود و با رسم منحنی درجه اشباع به ازای مکش‌های مختلف، منحنی نگهداشت رسم می‌شود. منحنی نگهداشت نمونه استفاده شده در مدل‌سازی حاضر مطابق

شکل ۵) است. در منحنی نگهداشت مشاهده می‌شود که با افزایش مکش، درجه اشباع کاهش می‌یابد. همچنین درجه اشباع در محدوده زیر ۳۰ درصد قرار دارد که مطابق با مطالعات گذشته در محدوده رطوبتی رژیم پاندولی دارد [4,5].



شکل ۵ منحنی نگهداشت به دست آمده از مدل‌سازی با ذرات غیر یکنواخت در محدوده رژیم پاندولی

نتایج شبیه‌سازی

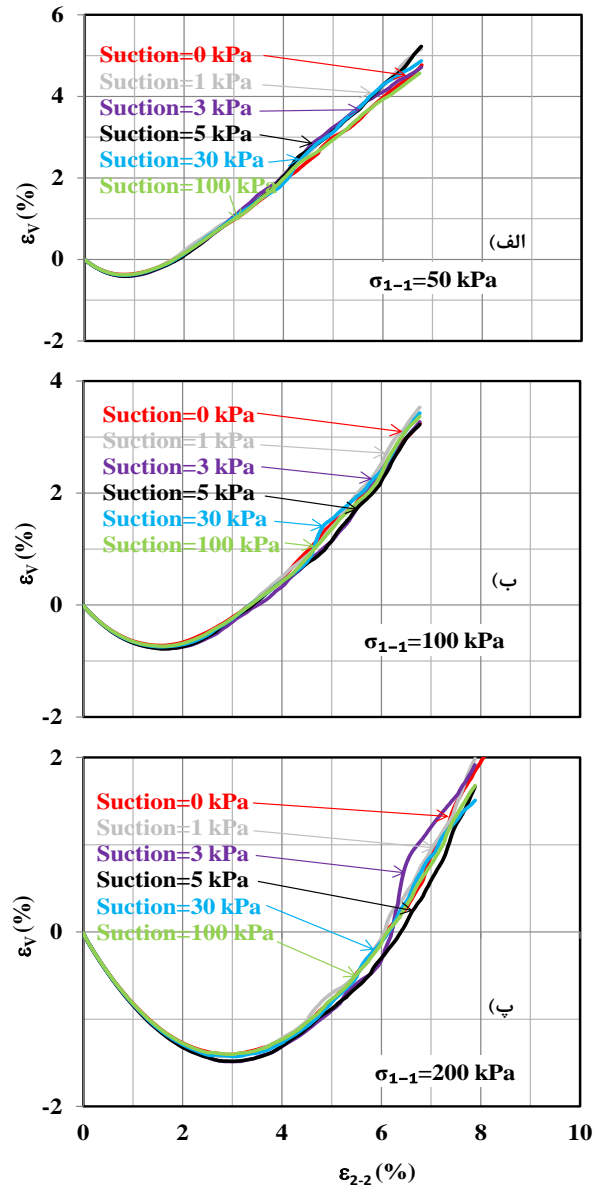
در این بخش، نتایج مدل‌سازی در سه سطح تنش همه‌جانبه و شش مکش و مقایسه نتایج آن با کار آزمایشگاهی [17] جهت صحت‌سنجی تشریح شده است.

تغییرات تنش و کرنش

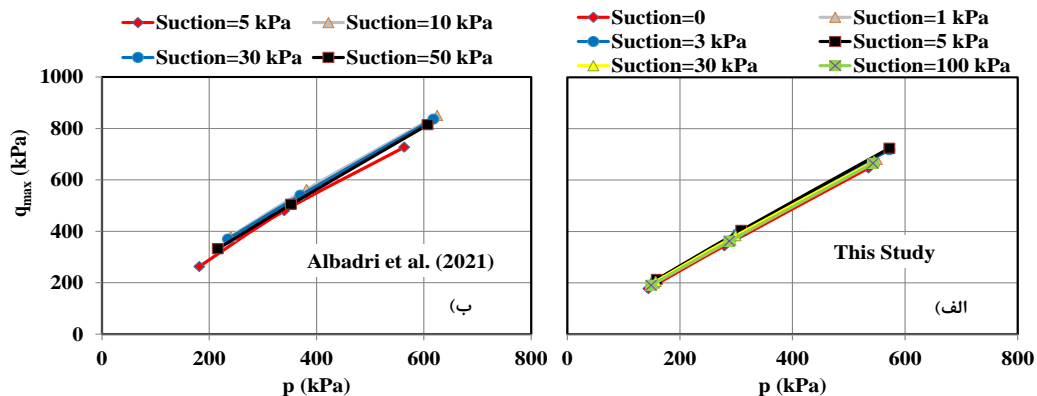
تغییرات تنش تفاضلی (q) با کرنش محوری به ازای تنش‌ها و مکش‌های متفاوت بررسی شده است. در شکل ۶ مشاهده

صحت سنجی

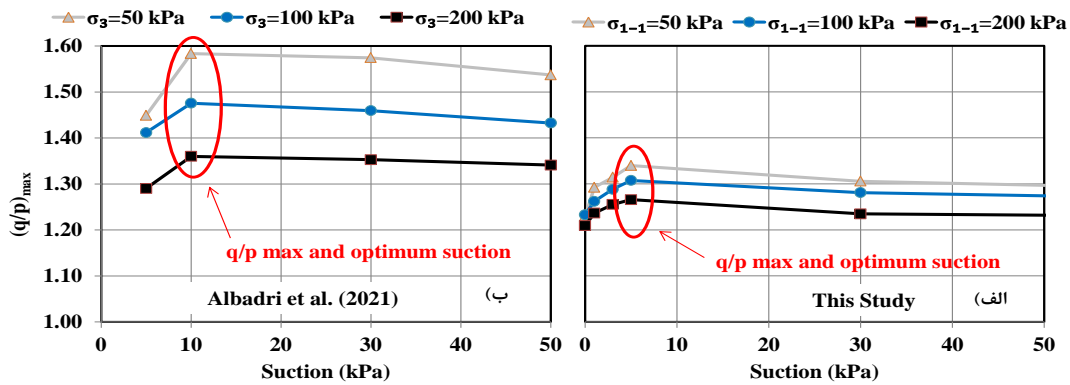
در پژوهش البدری و همکاران [17]، آزمایش سه محوری غیر اشباع با مکش‌های پنج، ۱۰، ۳۰ و ۵۰ کیلوپاسکال تحت تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال و بر روی خاک ماسه‌ای انجام شده است. نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر به همراه کار آزمایشگاهی [17] در فضای تنش تفاضلی بیشینه- تنش متوسط ($q_{max}-p$) در شکل ۸ نشان داده شده است. با وجود ساده‌سازی‌های ذاتی روش مدل‌سازی دو بعدی اجزای مجزا، نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی تطابق مناسبی با یکدیگر دارند. مطابق انتظار با افزایش تنش متوسط، تنش انحرافی بیشینه افزایش می‌یابد. اثر مکش بر روی مقاومت برشی بیشینه در این نمودارها به خوبی مشخص نیست. ولی با تغییر پارامترهای نمودار، می‌توان به تأثیر مهم آن پی برد. مقدار مکش بر روی مقاومت برشی توده خاک غیر اشباع تأثیر به‌سزایی دارد. در شکل ۹ تغییرات نسبت تنش انحرافی به تنش متوسط بیشینه (q/p)_{max} در برابر مقدار مکش برای مطالعه حاضر (شکل ۹-الف) و پژوهش البدری و همکاران [17] (شکل ۹-ب) رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مشابه نتایج آزمایشگاهی البدری و همکاران [17]، در مدل‌سازی حاضر ابتدا با افزایش مکش تا مقدار خاصی، نسبت (q/p)_{max} افزایش می‌یابد. سپس با افزایش بیشتر مکش، نسبت (q/p)_{max} کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش مکش در خاک دانه‌ای همواره موجب افزایش مقاومت برشی نشده، بلکه از حدی به بعد، تأثیری در افزایش مقاومت ندارد. مطابق مقدار مکش بهینه در پژوهش حاضر برابر پنج و در پژوهش البدری و همکاران [17] برابر ۱۰ کیلوپاسکال است.



شکل ۷ منحنی تغییر حجم در برابر تغییر مکان محوری برای تنش‌های همه‌جانبه: (الف) ۵۰، (ب) ۱۰۰، (پ) ۲۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۸ منحنی $q_{max}-p$ در مکش‌های مختلف: (الف) پژوهش حاضر، (ب) پژوهش البدری و همکاران [17]



شکل ۹ منحنی $(q/p)_{max}$ در برابر مکش برای تنش‌های همه‌جانبه مختلف: (الف) پژوهش حاضر، (ب) پژوهش البدری و همکاران [17]

تأثیر تغییر مکش در تنش‌های همه‌جانبه مختلف

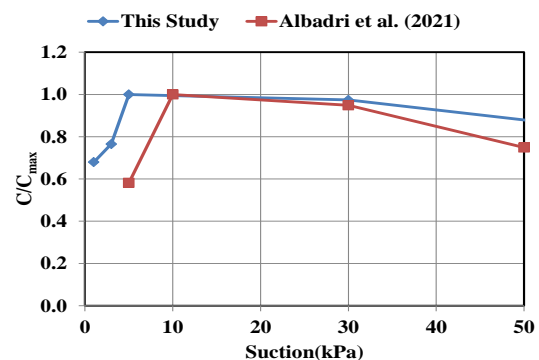
تأثیر مکش بر مقاومت برشی توده خاک غیر اشباع در تنش‌های همه‌جانبه مختلف، متفاوت است. مطابق توضیحات بخش‌های گذشته، در مدل‌سازی حاضر و در همه تنش‌های همه‌جانبه بیشینه مقاومت برشی در مکش پنج کیلوپاسکال اتفاق می‌افتد. برای آنکه بتوان اثر مکش در توده خاک غیر اشباع را در تنش‌های همه‌جانبه مختلف مقایسه کرد، پارامتری با نام نسبت تنش بیشینه نرمالیزه شده (Normalized Peak Stress Ratio) $(NPSR)$ تعریف می‌شود. مقدار این نسبت در هر مکش مطابق رابطه (۸) و با تقسیم نسبت تنش انحرافی به متوسط بیشینه $(q/p)_{max}$ بر نسبت تنش انحرافی به متوسط در شرایط بدون مکش $(q/p)_0$ ، منهای واحد به دست آمده است.

$$NPSR = \frac{\left(\frac{q}{p}\right)_{max}}{\left(\frac{q}{p}\right)_0} \quad (8)$$

مقدار پارامتر $NPSR$ در مکش‌های یکسان و به ازای تنش‌های همه‌جانبه مختلف، متفاوت به دست می‌آید. در شکل ۱۱ مقدار این نسبت در تنش‌های همه‌جانبه مختلف در برابر مکش نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تنش همه‌جانبه، اثر افزایش مکش بر مقاومت برشی نمونه کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده آن است که با افزایش تنش همه‌جانبه، اثر نیروهای تماسی افزایش یافته، در حالی که بدون تغییر مکش، نیروی منیسک تغییر نمی‌کند. در نتیجه اثر نیروی منیسک به نیروهای تماسی بر مقاومت برشی کاهش می‌یابد.

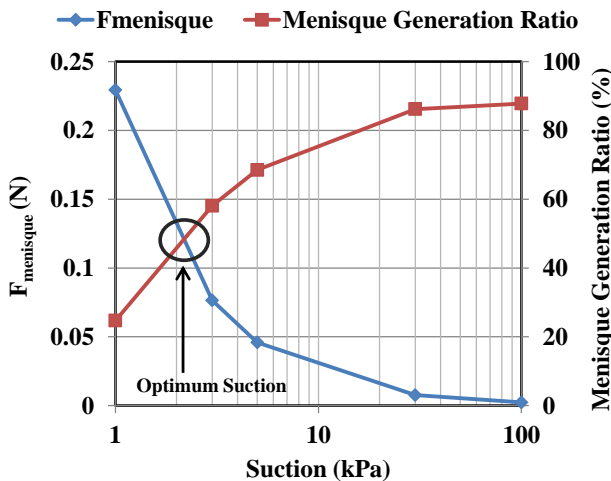
تغییرات چسبندگی

چسبندگی در توده خاک‌های غیر اشباع با تغییر مکش، تغییر می‌کند. مطابق توضیحات بخش‌های گذشته مقدار چسبندگی در مکش‌های مختلف محاسبه شده است و بیشترین چسبندگی در مکش‌های مختلف، چسبندگی بیشینه (C_{max}) نامیده شده است. به منظور بررسی تغییرات چسبندگی در مکش‌های مختلف، نسبت چسبندگی در هر مکش (C) به مقدار چسبندگی بیشینه (C_{max}) محاسبه شده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نسبت چسبندگی (C/C_{max}) مشابه با پژوهش البدری و همکاران [17]، دارای نقطه بیشینه به ازای مکش بهینه است و ابتدا با افزایش مکش تا حد مشخصی، چسبندگی افزایش می‌یابد و در نقطه مکش بهینه، بیشترین چسبندگی را دارد. سپس با افزایش مکش، مقدار چسبندگی اندکی کاهش می‌یابد. مقدار مکش بهینه در پژوهش حاضر برابر پنج کیلوپاسکال و در پژوهش البدری و همکاران [17] برابر ۱۰ کیلوپاسکال است. همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو پژوهش مقدار چسبندگی بیشینه، حدود دو برابر مقدار آن در کمترین مقدار است.



شکل ۱۰ منحنی نسبت چسبندگی در برابر مکش در در این پژوهش و پژوهش البدری و همکاران [17]

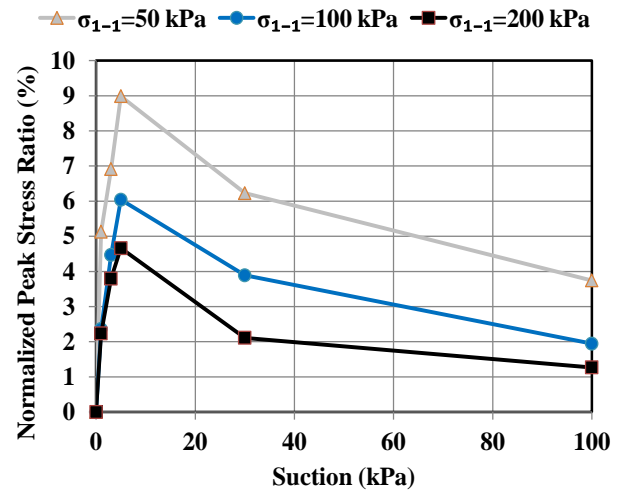
افزایش می‌یابد. این امر موجب می‌شود تا بیشینه مقاومت برشی در مکشی بهینه اتفاق بیفتد که به ازای آن مقدار نیرو و تعداد منیسک‌ها بیشترین تأثیر را بر مقاومت برشی خاک غیراشباع داشته باشند.



شکل ۱۲ روند تغییرات نیروی منیسک و نسبت ایجاد منیسک قابل تشکیل در برابر مکش برای حفراتی با فرض $\beta=15^\circ$

تأثیر اندازه ذرات

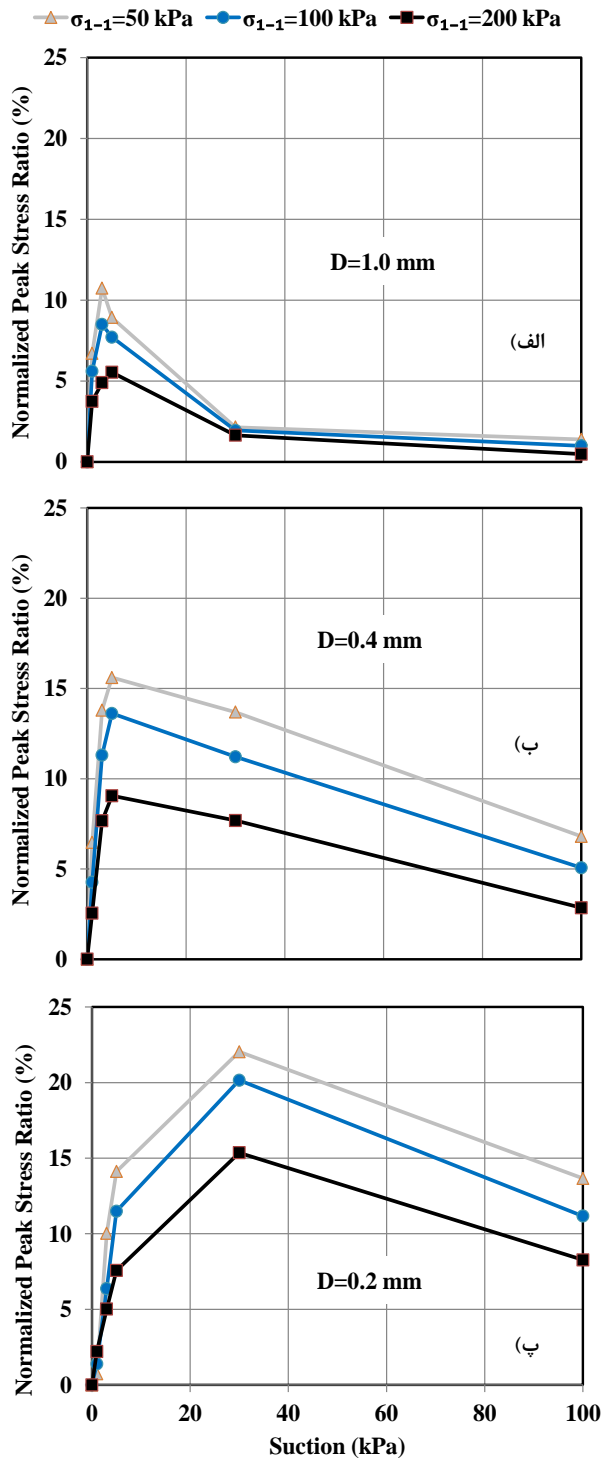
به طور کلی، اندازه ذرات توده خاک بر مقاومت برشی خاک غیر اشباع بودن نیز می‌تواند تأثیرگذار باشد. با حفظ دانه‌بندی یکنواخت و شکل هندسی ثابت، تأثیر اندازه ذرات در این مطالعه بررسی شده است. قطر ذرات در سه مدل‌سازی مختلف برابر $0/2$ ، $0/4$ و $1/0$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مشابه بخش‌های گذشته تنش همه‌جانبه در مدل‌سازی‌ها برابر با 50 ، 100 و 200 کیلوپاسکال و مکش برابر صفر، یک، سه، پنج و 30 و 100 کیلوپاسکال انتخاب شده است. سایر مشخصات ذرات مطابق جدول (۱) و در همه مدل‌سازی‌ها یکسان است. منحنی نگهداشت ذرات برای سه دانه‌بندی به دست آمده و در شکل (۱۳) نشان داده است. در این منحنی‌ها، مشاهده می‌شود که با کوچک‌تر شدن ذرات، منحنی نگهداشت بالاتر قرار می‌گیرد. زیرا با کوچک‌تر شدن ذرات، حفرات میان ذرات نیز کوچک‌تر شده و به دلیل کشش سطحی میان ذرات آب و ذرات جامد، حفظ رطوبت در میان حفرات بیشتر خواهد بود. نمود این پدیده در نمودارها به خوبی مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر به



شکل ۱۱ نسبت تنش بیشینه نرمالیزه شده در برابر مکش برای تنش‌های همه‌جانبه مختلف

مکش بهینه

در بخش‌های قبل توضیح داده شد که مقدار چسبندگی و مقاومت برشی در مکش مشخصی، بیشترین مقدار را دارد که مکش بهینه نامیده می‌شود. به منظور بررسی علت کاهش مقاومت برشی در مکش‌های کمتر و بیشتر از مکش بهینه، پارامتری با نام نسبت ایجاد منیسک (Menisque Generation Ratio) تعریف شده است. تعداد کل حفرات بین هر دو ذره در توده خاک با V_t و تعداد حفراتی که منیسک در آن‌ها تشکیل می‌شود با V_m معرفی می‌شوند. مقدار نسبت ایجاد منیسک از تقسیم پارامتر V_m بر V_t به دست می‌آید. روند مقدار نیروی منیسک و نسبت ایجاد منیسک در برابر مکش برای اضلاع دو ذره دارای برخورد با مشخصات هندسی برخورد $\beta=15^\circ$ (به عنوان نمونه) در شکل (۱۲) نشان داده شده است. محور عمودی سمت چپ، مقدار نیروی منیسک را نشان می‌دهد که از رابطه (۴) محاسبه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مکش و در نتیجه کاهش شعاع انحنا مطابق رابطه (۱)، نیروی ناشی از منیسک کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش مکش، رطوبت نمونه کاهش می‌یابد و مطابق توضیحات بخش‌های گذشته، حفرات بیشتری از حالت اشباع خارج می‌شوند و امکان تشکیل منیسک در حفرات بیشتری وجود دارد. در نتیجه نیروی منیسک بر تعداد ذرات بیشتری وارد می‌شود. بنابراین افزایش مکش، از یک طرف، باعث کاهش مقدار نیروی منیسک شده و از طرف دیگر، تعداد حفراتی که منیسک می‌تواند در آن تشکیل شود

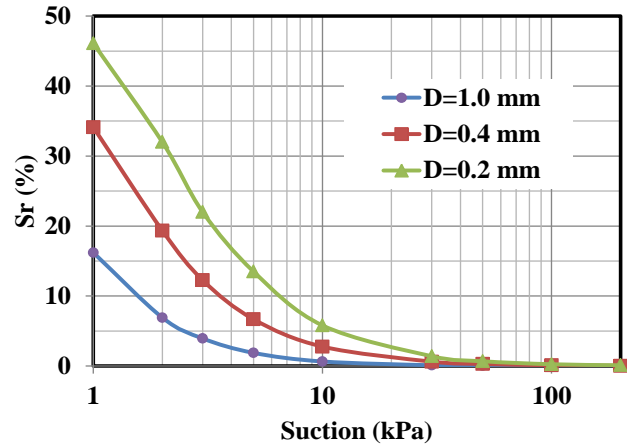


شکل ۱۳ نسبت تنش بیشینه نرمالیزه شده در مکش‌های و تنش‌های همه‌جانبه مختلف، برای ذرات با قطرهای یکنواخت (الف) ۱/۰، (ب) ۰/۴ و (پ) ۰/۲ میلی‌متر

نتیجه‌گیری

با توجه به فرضیات ساده‌کننده پژوهش‌های پیشین برای شکل ذرات، در این پژوهش رفتار ذرات دانه‌ای غیر اشباع با شکل

ازای یک مکش یکسان، رطوبت نمونه در ذرات ریزدانه‌تر، بیشتر است که این روند در سایر مراجع [1,46] نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۱۴ منحنی نگهداشت به دست آمده از مدل‌سازی ذرات با قطرهای یکنواخت ۰/۲ و ۰/۴ و ۱/۰ میلی‌متر

برای بررسی تأثیر قطر ذرات بر مقاومت برشی نمونه‌های غیر اشباع، از نسبت تنش بیشینه نرمالیزه شده (NPSR) در مکش‌ها و تنش‌های همه‌جانبه مختلف استفاده شده است و تغییرات آن در برابر مکش در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک تنش همه‌جانبه مشخص، نسبت NPSR برای ذرات ریزتر مقدار بیشتری دارد. به عبارت دیگر هر چه ذرات ریزدانه‌تر باشند، اثر نیروی منیسک بر مقاومت برشی بیشتر است و با افزایش اندازه ذرات، تأثیر نیروی منیسک بر مقاومت برشی کم می‌شود. اندازه ذرات بر مقدار مکش بهینه نیز تأثیر دارد. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که با کوچک‌تر شدن ذرات، بیشینه مقاومت برشی در مکش بیشتری اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، در ذرات ریزدانه‌تر، مقدار مکش بهینه بیشتر است. علت این پدیده آن است که با کاهش اندازه ذرات، اندازه حفرات موجود در خاک نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه حفرات خاک به ازای مکش بیشتری از حالت اشباع خارج و منیسک در آن‌ها تشکیل می‌شود. یعنی با کاهش اندازه ذرات، نسبت ایجاد منیسک (مطابق توضیحات بخش‌های گذشته) کاهش می‌یابد و در نتیجه دو منحنی نیروی منیسک و نسبت ایجاد منیسک در مکش بیشتری با هم برخورد خواهند داشت و مقدار مکش بهینه بیشتر خواهد بود.

منیسک در آن‌ها وجود دارد، افزایش می‌یابد و این دو پارامتر در مکش مشخصی بیشترین مقاومت برشی را ایجاد می‌کنند.

۴. با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات، تأثیر نیروهای غیر اشباع بر مقاومت برشی بیشتر می‌شود و در یک تنش همه‌جانبه و مکش ثابت، افزایش مقاومت برشی در نمونه با ذرات کوچک‌تر بیشتر است. همچنین با کوچک‌تر شدن ذرات، بیشینه مقاومت برشی در مکش بیشتری اتفاق می‌افتد.

با اینکه نتایج این پژوهش با نتایج کارهای آزمایشگاهی تطابق دارد، باید گفت که شبیه‌سازی توده خاک در فضای دو بعدی انجام شده است. از طرفی، شکل ذرات به صورت چند گوشه در نظر گرفته شده است. برای بالابردن کیفیت شبیه‌سازی‌ها و توسعه آن، می‌توان از همین ایده مدل‌سازی منیسک در شبیه‌سازی توده خاک با شکل ذرات چند گوشه سه بعدی استفاده نمود. همچنین، در این پژوهش، وجود منیسک با نیروهای معادل آن لحاظ شده بود. می‌توان با در نظر گرفتن حضور ذرات آب، علاوه بر نیروهای کشش سطحی، حرکت آب میان ذرات را هم شبیه‌سازی کرد. رطوبت نمونه‌ها در این مدل‌سازی در محدوده رژیم پاندولی است و می‌توان در پژوهش‌های بعدی، محدوده گسترده‌تری از رطوبت‌ها را در نظر گرفت. همچنین برای ساده‌سازی فرض شده است تا پس از برخورد ذرات با هم منیسک تشکیل می‌شود و با جدا شدن ذرات از یکدیگر، منیسک بین ذرات از بین می‌رود. در پژوهش‌های آینده می‌توان تشکیل و تخریب منیسک را در ذرات بدون تماس نیز بررسی و با نتایج حاضر مقایسه کرد.

سپاسگزاری

چند گوشه غیرمنتظم و منظم به صورت دو بعدی با استفاده از روش اجزای مجزا شبیه‌سازی شد. برای مدل‌سازی، برنامه اجزای مجزا POLY برای شرایط غیر اشباع توسعه داده شد. برای مدل‌سازی شرایط غیر اشباع، مکش به نمونه اختصاص داده شد و امکان تشکیل منیسک در حفرات بررسی گردید و در صورت تشکیل آن، نیروی منیسک به ذرات اعمال شد. مدل‌سازی با سه تنش همه‌جانبه و پنج مکش انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها با نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی تطابق رفتاری داشت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد:

۱. نمونه‌های دارای مکش، مقاومت برشی بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون مکش دارند. همچنین با افزایش مکش تا مقداری مشخص (که مکش بهینه نامیده شده است)، مقاومت برشی افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش بیشتر مکش، اثر افزایش مقاومت کمتر می‌شود. همچنین چسبندگی بیشینه در مکش بهینه اتفاق می‌افتد و با افزایش یا کاهش مکش از مقدار بهینه، چسبندگی کاهش می‌یابد.
۲. تأثیر نیروهای غیر اشباع بر مقاومت برشی خاک‌های دانه‌ای با افزایش تنش همه‌جانبه، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، اثر نیروهای ناشی از منیسک در افزایش مقاومت برشی خاک غیر اشباع در تنش‌های همه‌جانبه کم، بیشتر است. زیرا با افزایش تنش همه‌جانبه تأثیر نیروهای تماسی بر مقاومت برشی توده خاک بیشتر می‌شود در حالی که بدون تغییر مکش، مقدار نیروهای غیر اشباع تغییر نمی‌کند و در نتیجه نسبت نیروهای منیسک به نیروهای تماسی کاهش می‌یابد.
۳. مقدار افزایش مقاومت برشی به مقدار نیروهای منیسک و تعداد حفرات دارای منیسک بستگی دارد. وجود مکش بهینه به این دلیل است که با افزایش مکش، مقدار نیروهای منیسک کاهش می‌یابد ولی تعداد حفراتی که امکان تشکیل

مراجع

- [1] D.G. Fredlund, H. Rahardjo, Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, 1993.
- [2] S. D. N. Lourenço, D. Gallipoli, C. E. Augarde, D.G. Toll, P.C. Fisher, " Congreve, A. Formation and evolution of water menisci in unsaturated granular media," *Géotechnique*, vol. 62, pp. 193-199, 2012. doi:10.1680/geot.11.P.034
- [3] R. M. German, Particle packing characteristics. 1989.
- [4] R. Wan, S. Khosravani, M. Pouragha, " Micromechanical Analysis of Force Transport in Wet Granular Soils," *Vadose Zone Journal*, 13, 2014. doi:10.2136/vzj2013.06.0113

- [5] U. El Shamy, T. Gröger, “ 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. doi:10.1002/nag.695.
- [6] A.W. Bishop, G. Blight, “ Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils,” *Geotechnique*, vol. 13, pp. 177-197, 1963.
- [7] D.G. Fredlund, N. R. Morgenstern, R. A. Widger, “ The shear strength of unsaturated soils,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol.15, pp. 313-321, 1978. doi:10.1139/t78-029.
- [8] A. Öberg, G. Sällfors, “ Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve,” *Geotechnical Testing Journal*, vol. 20, pp. 40-48, 1997.
- [9] S. Vanapalli, D. Fredlund, D. Pufahl, A. Clifton, “ Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, pp. 379-392, 1996.
- [10] S. Rohm, O. Vilar, “ Shear strength of an unsaturated sandy soil,” In Proceedings of the Proceedings of the first international conference on unsaturated soils /unsat'95/Paris/France/6-8 September, vol. 1, 1995.
- [11] N. Khalili, M. Khabbaz, “ A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils,” *Geotechnique*, vol. 48, pp. 681-687, 1998.
- [12] G. Eskandari, A. R. Estabragh, A. Soroush, “ Introducing a new technique for evaluating the behavior and volume change of unsaturated soils,” *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 25, pp. 31-55, 2014. (In Persian)
- [13] R. Baltodano-Goulding, Tensile strength, shear strength and effective stress for unsaturated sand. University of Missouri--Columbia, 2006.
- [14] R. Schnellmann, H. Rahardjo, H. R. Schneider, “ Unsaturated shear strength of a silty sand,” *Engineering Geology*, vol. 162, pp. 88-96, 2013. doi: 10.1016/j.enggeo.2013.05.011.
- [15] S. L. Houston, N. Perez-Garcia, W.N. Houston, “ Shear strength and shear-induced volume change behavior of unsaturated soils from a triaxial test program,” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 134, pp. 1619-1632, 2008.
- [16] I. J. Alhani, M. J. b. M. Noor, M. A. M. Al-Bared, I. S. H. Harahap, W. M. Albadri, “ Mechanical response of saturated and unsaturated gravels of different sizes in drained triaxial testing,” *Acta Geotechnica*, vol. 15, pp. 3075-3093, 2020.
- [17] W. M. Albadri, M. J. M. Noor, I. J. Alhani, “ The relationship between the shear strength and water retention curve of unsaturated sand at different hydraulic phases,” *Acta Geotechnica*, vol. 16, pp. 2821-2835, 2021.
- [18] N. Lu, B. Wu, C. Tan, “ A tensile strength apparatus for cohesionless soils,” *Advanced experimental unsaturated soil mechanics*, pp. 105-110, 2005.
- [19] N. Lu, B. Wu, C.P. Tan, “ Tensile Strength Characteristics of Unsaturated Sands,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, pp. 144-154, 2007. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(144).
- [20] W.T. Oh, S. K. Vanapalli, A. J. Puppala, “ Semi-empirical model for the prediction of modulus of elasticity for unsaturated soils,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 46, pp. 903-914, 2009. doi:10.1139/T09-030.

- [21] E. Seyedi Hosseininia, " Investigating the micromechanical evolutions within inherently anisotropic granular materials using discrete element method," *Granular Matter*, vol. 14, pp. 483-503, 2012.
- [22] P. A. Cundall, O. D. L. Strack, " A discrete numerical model for granular assemblies," *Géotechnique*, vol. 29, pp. 47-65, 1979. doi:10.1680/geot.1979.29.1.47.
- [23] A. Mirghasemi, L. Rothenburg, E. Matyas, " Numerical simulations of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles and effects of confining pressure on shear strength," *Soils and Foundations*, vol. 37, pp. 43-52, 1997.
- [24] E. Seyedi Hosseininia, A. Mirghasemi, " Numerical simulation of breakage of two-dimensional polygon-shaped particles using discrete element method," *Powder Technology*, vol. 166, pp. 100-112, 2006.
- [25] E. Seyedi Hosseininia, A. Mirghasemi, " Effect of particle breakage on the behavior of simulated angular particle assemblies," *China Particuology*, vol. 5, pp. 328-336, 2007.
- [26] E. Seyedi Hosseininia, " Discrete element modeling of inherently anisotropic granular assemblies with polygonal particles," *Particuology*, vol. 10, pp. 542-552, 2012.
- [27] E. Seyedi Hosseininia, " Stress–force–fabric relationship for planar granular materials," *Géotechnique*, vol. 63, pp. 830-841, 2013.
- [28] E. Seyedi Hosseininia, " A micromechanical study on the stress rotation in granular materials due to fabric evolution," *Powder Technology*, vol. 283, pp. 462-474, 2015.
- [29] M. Khabazian, E. Seyedi Hosseininia, " Instability of saturated granular materials in biaxial loading with polygonal particles using discrete element Method (DEM)," *Powder Technology*, vol. 363, pp. 428-441, 2020.
- [30] S. Honari, E. Seyedi Hosseininia, " Particulate modeling of sand production using coupled DEM-LBM," *Energies*, vol. 14, pp. 906, 2021.
- [31] M. J. Jiang, S. Leroueil, J. M. Konrad, " Insight into shear strength functions of unsaturated granulates by DEM analyses," *Computers and Geotechnics*, vol. 31, pp. 473-489, 2004.
doi:10.1016/j.compgeo.2004.07.001
- [32] K. Tourani, R. Mahboubi, E. Seyedi Hosseininia, " Discrete Element Method for Modeling the Mechanical Behavior of Unsaturated Granular Material," *Journal of Computational Methods In Engineering*, vol. 35, pp. 157-181, 2016. doi:10.18869/acadpub.jcme.35.1.157.
- [33] L. Scholtès, B. Chareyre, F. Nicot, F. Darve, " Micromechanics of granular materials with capillary effects," *International Journal of Engineering Science*, vol. 47, pp. 64-75, 2009. doi:10.1016/j.ijengsci.2008.07.002,
- [34] Z. Shen, M. Jiang, C. Thornton, " Shear strength of unsaturated granular soils: three-dimensional discrete element analyses," *Granular Matter*, vol. 18, pp. 37, 2016. doi:10.1007/s10035-016-0645-x.
- [35] R. Asadi, A. Mirghasemi, " Numerical investigation of particle shape on mechanical behaviour of unsaturated granular soils using elliptical particles," *Advanced Powder Technology*, vol. 29, pp. 3087-3099, 2018.
- [36] J. A. Gili, E. E. Alonso, " Microstructural deformation mechanisms of unsaturated granular soils," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 26, pp. 433-468, 2002. doi:10.1002/nag.206.
- [37] V. Richefeu, M. S. El Youssofi, R. Peyroux, F. Radjai, " A model of capillary cohesion for numerical simulations

- of 3D polydisperse granular media,” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 32, pp. 1365-1383, 2008.
- [38] M. J. Jiang, T. Li, H. J. Hu, C. Thornton, “DEM analyses of one-dimensional compression and collapse behaviour of unsaturated structural loess,” *Computers and Geotechnics*, vol. 60, pp. 47-60, 2014. doi:10.1016/j.compgeo.2014.04.002.
- [39] B. Kim, S. Park, S. Kato, “DEM simulation of collapse behaviours of unsaturated granular materials under general stress states,” *Computers and Geotechnics*, vol. 42, pp. 52-61, 2012.
- [40] M. Khabazian, A. A. Mirghasemi, H. Bayesteh, “Compressibility of montmorillonite/kaolinite mixtures in consolidation testing using discrete element method,” *Computers and Geotechnics*, vol. 104, pp. 271-280, 2018.
- [41] M. Khabazian, A. A. Mirghasemi, H. Bayesteh, “Discrete-element simulation of drying effect on the volume and equivalent effective stress of kaolinite,” *Géotechnique*, vol. 72, pp. 95-107, 2022.
- [42] G. Lian, C. Thornton, M. J. Adams, “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.
- [43] G. C. Cho, J. C. Santamarina, “Unsaturated particulate materials—particle-level studies,” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 127, pp. 84-96, 2001.
- [44] F. Soulie, M. S. El Yousoufi, F. Cherblanc, C. Saix, “Capillary cohesion and mechanical strength of polydisperse granular materials,” *The European Physical Journal E: Soft Matter and Biological Physics*, vol. 21, pp. 349-357, 2006.
- [45] R. Fisher, “On the capillary forces in an ideal soil; correction of formulae given by WB Haines,” *The Journal of Agricultural Science*, vol. 16, pp. 492-505, 1926.
- [46] L. Ning, W. J. Likos, “Unsaturated soil mechanics,” John Wiley & Sons Inc, New Jersey, 2004.
- [47] Y. Chen, Y. Zhao, H. Gao, J. Zheng, “Liquid bridge force between two unequal-sized spheres or a sphere and a plane,” *Particuology*, vol. 9, pp. 374-380, 2011.
- [48] R. J. Bathurst, “A study of stress and anisotropy in idealized granular assemblies,” 1987.
- [49] R. R. Olivera Bonilla, “Numerical simulations of undrained granular media,” 2004.
- [50] S. Vanapalli, W. Oh, “A model for predicting the modulus of elasticity of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve,” *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 4, pp. 425-433, 2010.

