



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# Determining Hardening Soil Model Parameters of Urmia Lake Sand by Numerical Modeling of Undrained Triaxial Test and Comparison with Laboratory Results

Vahid Mohammadi <sup>a</sup>, Hadi Bahadori <sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> PhD Student, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

<sup>b</sup> Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 02 September 2023

Revised: 22 January 2024

Accepted: 12 February 2024

### Keywords:

Triaxial soil test,  
Numerical modeling,  
Finite element method,  
Midas GTS NX,  
Hardening soil models,  
Urmia lake sand.

## ABSTRACT

Triaxial soil test is one of the most important and widely used experiments to identify the soil behavior and determination of soil shear strength parameters. Thorough study of the soil behavior requires numerous experiments that require time and cost. The alternative solution is the use of numerical modeling. Numerical modeling requires constitutive soil model to provide a qualitative description of soil behavior using behavioral parameters and provide the relationship between stress-strain in different states and under different loads. In this research, numerical modeling undrained triaxial test with finite element method by Midas GTS NX software under different confining pressures have been done. Validation of the numerical modeling has been done with the data available in the technical literature. The hardening soil model shows the most agreement with the stress-strain behavior of the soil compared to the conventional Mohr-Coulomb model. Therefore, better results can be observed in geotechnical engineering modeling by having hardening soil model parameters. Therefore, in this paper, the behavioral parameters of the hardening soil for the standard Urmia lake sand are determined using repeated numerical modeling using the finite element method and compared with the laboratory results. The matching between these results demonstrates the ability of the present modeling method to determining the required behavioral parameters of all types of soils.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31672.2523>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author.

E-mail address: [h.bahadori@urmia.ac.ir](mailto:h.bahadori@urmia.ac.ir)

## How to cite this article:

Bahadori, H., & Mohammadi, V. (2024). Determining hardening soil model parameters of Urmia lake sand by numerical modeling of undrained triaxial test and comparison with laboratory results. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(78), 171-183. doi: 10.22075/jme.2024.31672.2523

## تعیین پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت‌شونده ماسه دریاچه ارومیه با مدل‌سازی عددی آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

وحید محمدی قلعه عزیز<sup>۱</sup>، هادی بهادری<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱	یکی از پرکاربردترین آزمایش‌ها به منظور شناسایی رفتار خاک و تعیین پارامترهای مقاومت برشی، آزمایش سه‌محوری است. برای مطالعه کامل رفتار مصالح خاکی نیاز به انجام آزمایش‌های متعددی است و این کار مستلزم صرف زمان و هزینه بسیار خواهد بود. راه حل جایگزین و مکمل، استفاده از مدل‌سازی عددی صحت‌سنجی شده است. برای مدل‌سازی نیاز به مدل‌های رفتاری مناسب می‌باشد تا توصیفی کیفی از رفتار خاک با استفاده از پارامترهای رفتاری و همچنین ارتباط بین تنش و کرنش در حالات مختلف و تحت بارگذاری‌های متفاوت را ارائه دهد. در این پژوهش به مدل‌سازی و تحلیل عددی آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده خاک با روش اجزای محدود توسط نرم‌افزار Midas GTS NX تحت تنش‌های همه‌جانبه متفاوت پرداخته شده است. صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی با داده‌های موجود در ادبیات فنی صورت گرفته است. مدل رفتاری خاک سخت‌شونده نسبت به مدل موهر-کولمب مرسوم بیشترین تطابق را با رفتار تنش-کرنش خاک از خود نشان می‌دهد. از این رو در مدل‌سازی‌های مهندسی ژئوتکنیک با در دست داشتن پارامترهای رفتاری این مدل می‌توان نتایج بهتری را مشاهده کرد. لذا در این مقاله پارامترهای رفتاری خاک سخت‌شونده برای ماسه استاندارد دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی مکرر به روش اجزای محدود تعیین شده و با نتایج آزمایشگاهی انجام شده مقایسه می‌شود. انطباق مناسب بین این نتایج، توانایی روش مدل‌سازی پژوهش حاضر را در تعیین پارامترهای رفتاری مورد نیاز انواع خاک‌ها، نشان می‌دهد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۲	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳	
<b>واژگان کلیدی:</b> آزمایش سه‌محوری خاک، مدل‌سازی عددی، روش اجزای محدود، نرم‌افزار Midas GTS NX، مدل خاک سخت‌شونده، ماسه دریاچه ارومیه.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31672.2523>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه  
محدودی آزمایش جهت ساخت مدل عددی و کالیبره نمودن آن برای شبیه‌سازی سایر آزمایش‌های مورد نظر است. این مدل‌سازی نه به عنوان جایگزین بلکه به عنوان مکمل آزمایش‌های آزمایشگاهی است [۴-۶]. اهمیت مدل‌سازی محدود به این مورد نبوده و روز به روز مدل‌سازی عددی در مهندسی ژئوتکنیک در بخش‌های تحقیقاتی و

یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های مهندسی ژئوتکنیک جهت شناسایی رفتار و به دست آوردن پارامترهای مقاومت برشی خاک، آزمایش سه‌محوری است لیکن انجام آزمایش‌های متعدد برای شناخت کامل رفتار مصالح خاکی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است [۱-۳]. یک راه حل، انجام تعداد

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.bahadori@urmia.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ایران

۲. استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ایران

استناد به این مقاله:

بهادری، هادی، و محمدی قلعه عزیز، وحید. (۱۴۰۳). تعیین پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت‌شونده ماسه دریاچه ارومیه با مدل‌سازی عددی آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی. مدل‌سازی در مهندسی، ۲۲(۷۸)، ۱۷۱-۱۸۳. doi: 10.22075/jme.2024.31672.2523

کردند و دقت مدل دانکن-چان<sup>۶</sup> را در مقایسه با داده‌های تجربی به دست آمده از آزمایش سه محوری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل دانکن-چان به دقت رفتار خاک را پیش‌بینی می‌کند.

همانطور که بیان شد یکی از عمومی‌ترین روش‌ها در برخورد با مدل‌سازی‌های ژئوتکنیکی، روش اجزای محدود است و از طرفی امکان مدل‌سازی با نرم‌افزارهای مرسوم در دسترس و مدل‌های رفتاری آشنا و قابل ارزیابی در آزمایشگاه با این روش وجود دارد، لذا در این مقاله ابتدا یک سری آزمایشات سه محوری بر روی ماسه دریاچه ارومیه انجام گرفته و سپس با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Midas GTS NX به عنوان یک نرم‌افزار قدرتمند ژئوتکنیکی با استفاده از مدل‌سازی به ارزیابی و ارائه پارامترهای مدل رفتاری پرداخته می‌شود.

در مدل‌سازی عددی نیاز به یک مدل رفتاری مناسب خاک است؛ از دهه هشتاد میلادی تاکنون تلاش‌های بسیاری توسط محققین در جهت ارائه مدل‌های رفتاری در چارچوب نرم‌افزارهای طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی به منظور ارزیابی دقیق این مدل‌ها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته است. با این حال تعداد آن دسته از مدل‌های رفتاری که امروزه در نرم‌افزارهای تجاری مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک موجود است، نسبت به مدل‌های ارائه شده محدود است. مدل‌های رفتاری ساده اگر چه نیاز به پارامترهای زیادی ندارند، ولی نتایج حاصل از تحلیل با این گونه مدل‌ها ممکن است با نتایج واقعی اختلاف زیادی داشته باشد که یکی از رایج‌ترین این مدل‌ها، مدل رفتاری موهر-کولمب است. از سوی دیگر مدل‌های رفتاری پیچیده نیاز به پارامترهای ژئوتکنیکی دقیق‌تری دارند که تعیین آنها از نظر اقتصادی و آزمایشگاهی چندان ساده نیست. بنابراین انتخاب یک مدل رفتاری مناسب که پارامترهای آن قابل ارزیابی باشد، یکی از وظایف محققین ژئوتکنیک است. در این مقاله در مدل‌سازی آزمایش سه‌محوری از مدل‌های رفتاری مرسوم و مناسب خاک سخت شونده الاستوپلاستیک<sup>۷</sup> [۲۱] استفاده شده است که پارامترهای رفتاری این مدل با مقایسه نتایج آزمایش ارزیابی می‌شود.

حتی پروژه‌های مرسوم مهندسی نقش پررنگ‌تری را ایفا می‌کند. با پیشرفت‌های کامپیوتری مدل‌های رفتاری پیچیده مواد ژئوتکنیکی، نرم‌افزارها و روش‌های عددی قوی‌تر به شدت در حال توسعه است. با این پیشرفت‌ها زمان چرخه بین تحقیق، توسعه، استقرار و اجرای طرح‌های مهندسی از سال‌ها به چند ماه کاهش یافته است [۷]. از آن جایی که چرخه اجرا و نتیجه‌بخشی طرح‌ها کوتاه شده است، از این رو روند تأیید و اعتباربخشی به این مدل‌سازی‌های پیشرفته بسیار مهم است [۸]. دو روش عمده مدل‌سازی آزمایش سه‌محوری که پژوهشگران تاکنون بیشترین استفاده را از آنها نموده‌اند، روش اجزای محدود (FEM) و روش اجزای گسسته (DEM) است [۹].

روش اجزای گسسته برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰-۱۳]. این روش نیاز به مدل‌سازی و پارامترهای پیچیده رفتاری دارد که شاید برای اکثر مهندسیین و محققین این حوزه عمومیت نداشته باشد. همچنین قابلیت مدل‌سازی آزمایش با تنوع مصالح غیردانه‌ای را نیز ندارد.

روش اجزای محدود برای تفسیر رفتار تنش و کرنش خاک و مسائل تحلیلی پیچیده به عنوان یک روش ایده آل که قابل مدل‌سازی با مدل‌های مختلف رفتاری را دارد، معرفی می‌شود [۱۴، ۱۵]. لذا محققین زیادی از این روش برای مدل‌سازی آزمایشات آزمایشگاهی استفاده کردند بطور مثال خلیلی و همکاران [۱۶] از نرم‌افزار ABAQUS برای مدل‌سازی آزمایش سه‌محوری در شرایط زهکشی نشده برای خاک همگن و ارزیابی پارامترهای رفتاری مدل کم-کلی<sup>۱</sup> استفاده کردند. بایومی [۱۷] با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS آزمایش سه‌محوری را در هر دو شرایط زهکشی شده و نشده مدل‌سازی نمود و با استفاده از مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پارامترهای رفتاری مدل کم-کلی را برای دو نوع خاک ماسه (پوبلو<sup>۲</sup>) و رس (ولد<sup>۳</sup>) ارائه کرد. گلمائی و بولون [۱۸، ۱۹] برای ارزیابی و ارائه پارامترهای رفتاری سخت شونده خاک ماسه لینه<sup>۴</sup> از نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS استفاده کردند. هرا و همکاران [۲۰] رابطه تنش-کرنش سه‌محوری رس (کوبان<sup>۵</sup>) را با استفاده از روش اجزای محدود شبیه‌سازی

<sup>۶</sup> Duncan-Chan

<sup>۷</sup> Elasto-plastic Hardening Soil Model (HS-Model)

<sup>۱</sup> Cam-Clay

<sup>۲</sup> Pueblo Sand

<sup>۳</sup> Weald Clay

<sup>۴</sup> Labenne Sand

<sup>۵</sup> Cuban Clay

## ۲- مصالح و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات مصالح

در این پژوهش از ماسه استاندارد دریاچه ارومیه (ضلع شرقی) برای آزمایش‌ها استفاده شده است. مطابق شکل (۱) این ماسه رنگ خاکستری تیره داشته و از نوع گرد گوشه می‌باشد. خصوصیات فیزیکی ماسه مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- ماسه مورد استفاده در پژوهش

(الف) تصویر ماسه دریاچه ارومیه (ب) تصویر میکروسکوپی ماسه

جدول ۱- مشخصات فیزیکی ماسه دریاچه ارومیه

$C_c$	$C_u$	$D_{50}$ (mm)	$e_{min}$	$e_{max}$	$G_s$
۰/۹۸	۲/۴	۰/۲۸	۰/۵۳۳	۰/۸۴۱	۲/۸

### ۲-۲- دستگاه سه محوری و روند آزمایش

دستگاه سه محوری مورد استفاده در این تحقیق بصورت مونوتونیک کنترل کرنش کامپیوتری می‌باشد. شمای کلی این دستگاه در شکل (۲) ارائه شده است. دستگاه از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

(۱) قسمت جک دستگاه که بصورت چرخ دنده‌ای با

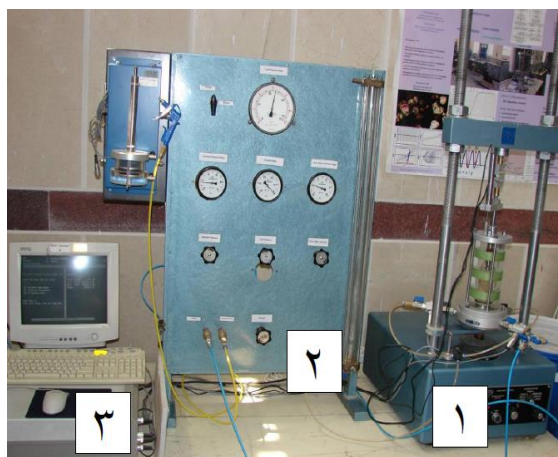
اعمال بارگذاری کنترل کرنش عمل می‌کند.

(۲) سیستم کنترل فشار و خلاء

(۳) بخش کامپیوتر و دستگاه ثبت داده

پس از تهیه نمونه برای مرحله اشباع سازی نمونه،  $CO_2$

(دی اکسید کربن، با فشار تقریبی ۳ کیلو پاسکال) و آب بدون هوا از داخل نمونه عبور داده می‌شود سپس فرآیند اشباع کردن نمونه با افزایش فشار محصور کننده در چند مرحله و اندازه گیری فشار آب منفذی انجام می‌شود. زمانی که ضریب اسکمپتون<sup>۱</sup> (B) از ۰/۹۵ بیشتر شود، نمونه را می‌توان اشباع شده در نظر گرفت. مقدار پارامتر B برای همه نمونه‌ها در این تحقیق بیشتر از ۰/۹۷ بود. درجه اشباع بودن نمونه به شدت بر مقاومت برشی خاک تأثیر می‌گذارد و با کاهش اشباعیت، مقاومت ماسه افزایش می‌یابد. پس از مرحله اشباع شدن نمونه‌ها به صورت همسان تحکیم می‌شوند. در حین تحکیم، اختلاف تنش همه جانبه و پس فشار به گونه‌ای تنظیم می‌شود که برای هر نمونه تنش موثر برابر با ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال ثابت باشد. انتخاب این مقادیر برای تنش موثر به عنوان یک مقدار متوسط در پروژه‌های ژئوتکنیکی بر اساس تحقیقات مختلف موجود در ادبیات فنی می‌باشد [۲۲]. لذا پارامترهای رفتاری برای این سه سطح تنش ارائه خواهد شد.



شکل ۲- نمای کلی از دستگاه سه محوری مونوتونیک

آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه ارومیه

### ۳-۲- مدل‌های رفتاری

#### ۳-۲-۱- مدل موهر-کولمب (MC)

این مدل یک مدل الاستیک-پلاستیک کامل<sup>۲</sup> که قانون هوک و معیار شکست کولمب را با هم ترکیب می‌کند و یک مدل مرتبه اول برای خاک‌هایی است که نیازمند به پنج پارامتر ورودی پایه شامل مدول یانگ (E)، ضریب پواسون (ν)، زاویه اصطکاک داخلی خاک (φ)، چسبندگی خاک (C)

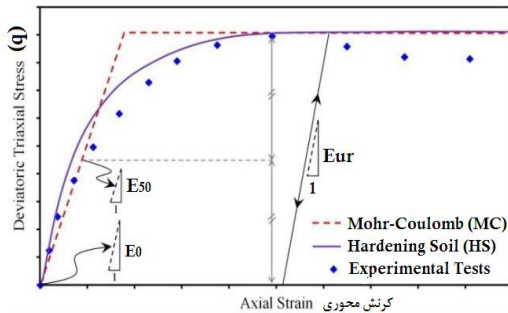
<sup>2</sup> Elastic-Perfectly Plastic

<sup>1</sup> Skempton's parameter

محدوده ۰/۶ تا ۰/۸ پیشنهاد شده است [۲۷]. مقادیر این پارامتر با روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی می‌تواند تخمین زده شود. پژوهشگران متعددی مقدار این پارامتر را برای انواع خاک‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند که می‌تواند مبنای اولیه برای مدل‌سازی باشد. پارامتر  $R_f$  در مدل رفتاری که نشان دهنده سطح کرنش در زمان شکست می‌باشد در مدل‌سازی رفتار غیرخطی تنش-کرنش موثر است که به عنوان پیش فرض مقدار ۰/۹ پیشنهاد می‌شود.  $E_{50}^{ref}$  سختی سکانتی در ۵۰ درصد حداکثر تنش انحرافی، در فشاری برابر با تنش مرجع ( $P_{ref}=100 \text{ kPa}$  پیش فرض) است. به عنوان پیش فرض اولیه  $E_{50}^{ref} \approx (0.5 \sim 1) E_{oed}^{ref}$  و  $E_{ur}^{ref} > 3 E_{50}^{ref}$  را می‌توان در نظر گرفت [۲۸]. تفاوت اصلی بین MC و HS در رویکرد سختی است، مدل سخت شونده با استفاده از سه سختی ورودی در مقایسه با تک سختی (مدول یانگ) مدل موهر-کولمب دقت بیشتری را در توصیف رفتار خاک دارد.

جدول ۲- مقادیر پارامتر  $m$  برای برخی خاک‌های شناخته شده

نوع خاک	$m$
ماسه اتاوا- ماسه سیلیکاتی	۰/۵
ماسه توپورا	۰/۰-۴۱/۵۱
ماسه هوستون	۰/۴۷



شکل ۳- پارامترهای رفتار خاک سخت شونده و مقایسه با رفتار موهر-کولمب در پیش بینی کرنش نمونه خاک

#### ۲-۴- نرم‌افزار مدل‌سازی MIDAS

مجموعه نرم‌افزارهای MIDAS بر پایه روش اجزای محدود توسعه داده شده‌اند که در برگیرنده نرم‌افزارهای مهندسی ژئوتکنیک، سازه و پل است. شاخه مربوط به مهندسی ژئوتکنیک تحت عنوان Midas GTS NX ارائه شده که به

و زاویه اتساع  $(\psi)$  می‌باشد. این مدل در زمینه پیش‌بینی رفتار تغییر شکل خاک دارای محدودیت‌هایی است که ناشی از فرض رفتار خطی و سختی الاستیک تا قبل از مرحله گسیختگی می‌باشد [۲۳]. با این حال این مدل به علت سادگی و پارامترهای با معانی فیزیکی مشخص که تخمین و اعتباربخشی آنها به آسانی صورت می‌گیرد، یکی از پر کاربردترین مدل‌های رفتاری خاک است.

#### ۲-۳-۲- مدل خاک سخت‌شونده (HS)

مدل خاک سخت‌شونده یکی از مدل‌های پیشرفته رفتاری خاک است که قابلیت شبیه‌سازی هر دو نوع خاک نرم و سخت را دارا است. در این مدل، شکست با استفاده از معیار موهر-کولمب تعریف شده با این تفاوت که در مدل خاک سخت‌شونده افزایش سختی وابسته به تغییرات فشار در نظر گرفته می‌شود و رفتار غیرخطی تنش-کرنش خاک را می‌تواند ترسیم کند. این مدل مرتبه دوم مناسب برای شبیه‌سازی رفتار خاک رس، ماسه، سیلت و شن است [۲۴]. این مدل به ۱۱ پارامتر ورودی نیازمند است که عبارتند از: سه پارامتر مربوط به سختی مرجع بارگذاری سه‌محوری  $(E_{50}^{ref})^2$ ، سختی باربرداری سه‌محوری  $(E_{ur}^{ref})^3$  و سختی بارگذاری اُدمتری  $(E_{oed}^{ref})^4$  مطابق شکل (۳)، پارامتر توان ( $m$ ) برای فرمولاسیون سختی وابسته به تنش، نسبت پواسون باربرداری و بارگذاری ( $\nu_{ur}$ )، پارامترهای مقاومت برشی موهر-کولمب ( $C, \phi$ )، زاویه اتساع ( $\psi$ )، ضریب فشار افقی ( $K_0$ )، پارامتر موسوم به نسبت شکست  $(R_f)$  که بیان‌گر سطح کرنش در زمان شکست است و یک تنش مرجع برای سختی  $(P_{ref})^6$  [۲۵]. برای مدل‌سازی اولیه برخی از مفروضات برای مدل خاک سخت‌شونده (HS) را بایستی در نظر گرفت، سپس با همگرایی نتایج آزمایشگاهی و عددی می‌توان مقادیر دقیق پارامترهای رفتاری را بدست آورد. پارامتر توان سختی وابسته به تنش ( $m$ ) است که در محدوده ۰/۴ تا یک برای خاک‌های طبیعی متغیر است [۲۶]. برای خاک‌های ماسه‌ای محدوده ۰/۵ برای این پارامتر پیشنهاد شده است، نمونه‌هایی از مقادیر این پارامتر برای ماسه‌های شناخته شده در جدول ۲ ارائه شده است، همچنین برای خاک‌های رسی با توجه به قوام نمونه خاک محدوده ۰/۹ تا یک و برای خاک‌های سیلتی

<sup>4</sup> Oedometer Loading Stiffness

<sup>5</sup> Failure Ratio

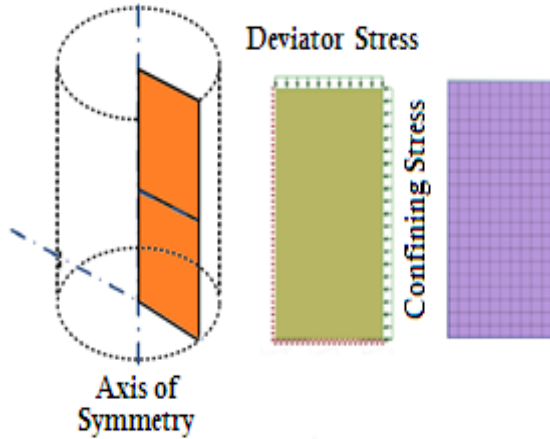
<sup>6</sup> Stress For Stiffnesses

<sup>1</sup> Dilatancy Angle

<sup>2</sup> Triaxial Loading Stiffness

<sup>3</sup> Triaxial Unloading Stiffness

و مسیر تنش با نتایج آزمایشگاهی جهت تایید پارامترهای مدل رفتاری مقایسه می‌شود. در صورتیکه میزان برآزش منحنی‌ها رضایت بخش نباشد، مجموعه پارامترها از طریق برآزش مجدد کالیبره می‌شوند.



شکل ۴- هندسه مدل‌سازی، شرایط مرزی، تنش همه‌جانبه و مش‌بندی نمونه

#### ۲-۶- ارزیابی عملکرد صحیح نرم افزار

به منظور صحت‌سنجی عملکرد نرم افزار، نمونه خاک در آزمایش سه‌محوری بر اساس نتایج پژوهش گلمائی و بولون [۱۸، ۱۹] مدل‌سازی شده است. پارامترهای مدل‌سازی نتایج مراجع ذکر شده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای رفتاری خاک ماسه برای صحت‌سنجی

نرم افزار [۱۸، ۱۹]

پارامتر رفتاری	زهکشی نشده (CU) kPa ۲۰۰ P'=	زهکشی شده (CD) kPa ۱۰۰ P'=
E [kPa]	-	۶۰۰۰۰
$E_{50}^{ref}$ [kPa]	۲۳۰۰۰	۴۲۰۰۰
$E_{oed}^{ref}$ [kPa]	۲۳۰۰۰	۴۲۰۰۰
$E_{ur}^{ref}$ [kPa]	۶۹۰۰۰	۱۲۶۰۰۰
m	۰/۵	۰/۵
C [kPa]	۰/۱	۰/۱
$\phi^\circ$	۳۵	۳۷/۵
$\psi^\circ$	۹	۹/۵
$R_f$	۰/۹۳	۰/۹۵
$P_{ref}$ [kPa]	۱۰۰	۱۰۰
$\nu$	۰/۲	۰/۲

منظور طراحی و تحلیل انواع پروژه‌ها از جمله گود، سد، خاکریز، تونل و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. تنظیمات در نرم‌افزار برای انواع وضعیت‌های میدانی با استفاده از تحلیل خطی و غیرخطی (استاتیکی خطی و غیرخطی، دینامیکی خطی و غیرخطی، آنالیز تحکیم و تراوش، پایداری شیب) و انواع تحلیل‌های دوگانه (تنش-تراوش، شیب-تراوش، تنش-شیب، تحلیل دینامیکی-شیب) فراهم است. از مزایای این نرم‌افزار وجود تنوع زیادی از مدل‌های رفتاری و امکان ایجاد سریع مدل‌ها با هندسه پیچیده است. همچنین امکان مش‌بندی مثلثی، چهارضلعی و ترکیبی وجود دارد [۲۹]. نسخه نرم‌افزار Midas GTS NX مورد استفاده در این پژوهش V1.1 مربوط به سال ۲۰۱۹ است.

#### ۲-۵- نحوه مدل‌سازی آزمایش سه‌محوری

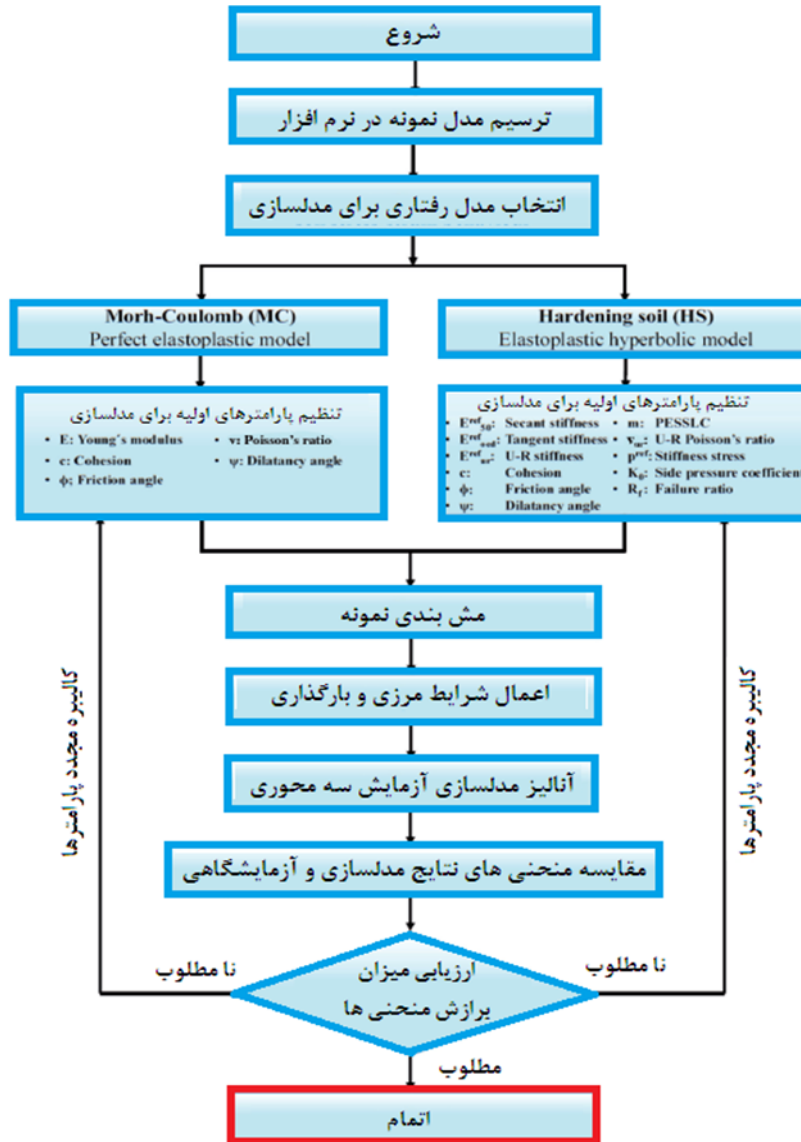
هندسه مدل‌سازی آزمایش سه‌محوری در شرایط تقارن محوری<sup>۱</sup> مطابق شکل (۴) فرض شده و ابعاد نمونه ۵۰ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر است. مش‌بندی از نوع چهارضلعی هشت‌گرمی است. برای مدل‌سازی شرایط مرزی، گره‌ها در امتداد محور تقارن مجاز به حرکت در جهت قائم بوده ولی در امتداد مرز پایین در برابر حرکات قائم و افقی محدود می‌شود. یک فشار همه‌جانبه اولیه<sup>۲</sup> ( $\sigma_3$ ) با مقادیر مد نظر به نمونه وارد شده و سپس تنش قائم انحرافی<sup>۳</sup> ( $\sigma_d$ ) تا رسیدن به گسیختگی به نمونه طی مراحل اعمال می‌شود. در این مدل‌سازی این تنش به صورت اعمال کرنش (جابجایی) مدل می‌شود. با در نظر گرفتن کرنش ۱۰ درصد، برای نمونه جابجایی قائم یک سانتی‌متری طی مراحل (معمولاً ۵۰ مرحله) اعمال می‌شود. مقدار این کرنش وابسته به مشخصات رفتاری و تنش همه‌جانبه خاک است؛ این کرنش باید تا حدی بر نمونه وارد شود که گسیختگی (جابجایی تحت تنش ثابت) در نتایج مشاهده شود.

جهت ارزیابی پارامترهای مدل رفتاری یک روند بسته مطابق شکل (۵) مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این روند پس از ترسیم مدل و ارائه پارامترهای اولیه در نرم‌افزار Midas خروجی‌های مدل‌سازی شامل منحنی تنش-کرنش

<sup>3</sup> Deviatoric Stress

<sup>1</sup> Axisymmetric

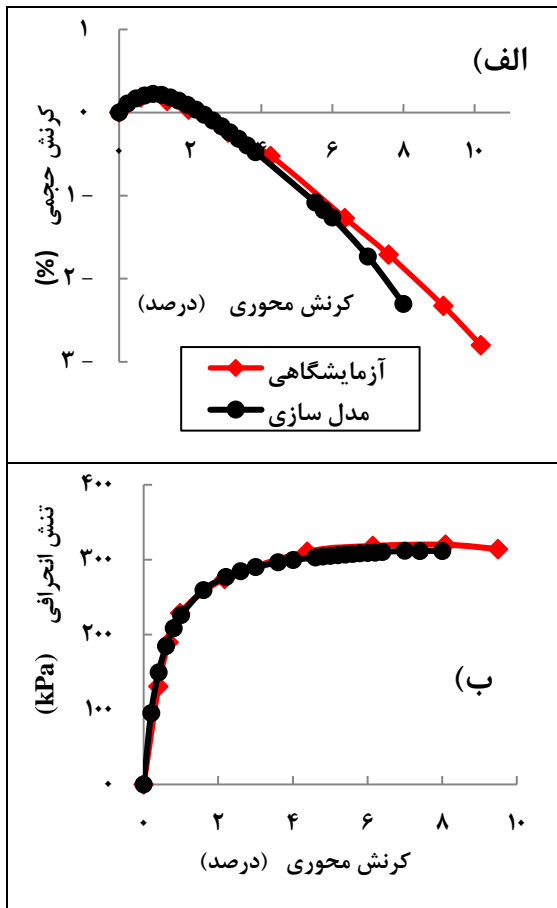
<sup>2</sup> Confining Pressures



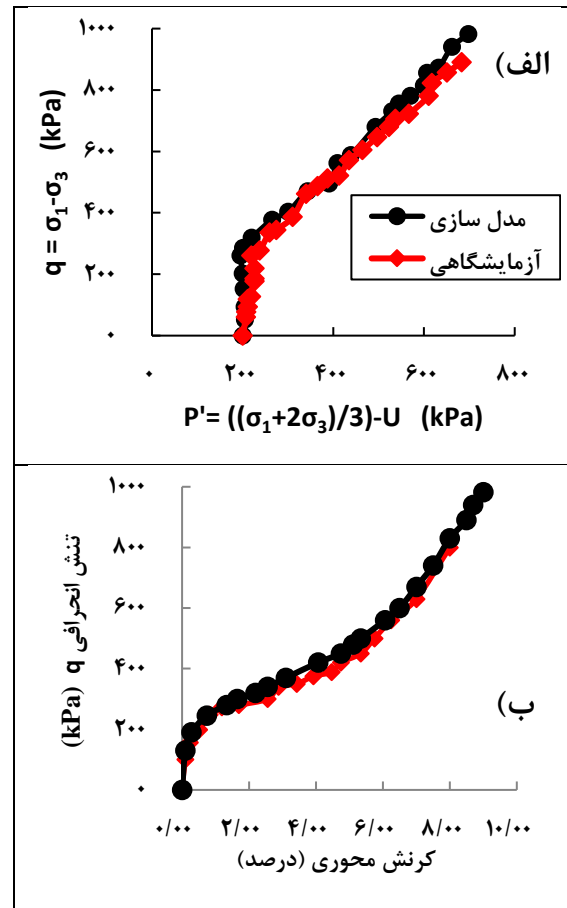
شکل ۵- نمودار روند مدل سازی عددی آزمایش سه محوری

دارند که نشان دهنده صحت مدل سازی آزمایش سه محوری در نرم افزار است. برای مقایسه دو مدل رفتاری موهر-کولمب و خاک سخت شونده منحنی تنش انحرافی- کرنش محوری در شکل (۸) ترسیم شده است. مدل رفتاری موهر-کولمب در محدوده رفتار الاستیک با مدل سخت شونده و نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته ولی با توجه به رفتار خطی و سختی الاستیک تا قبل از مرحله گسیختگی، نمودار رابطه تنش-کرنش را به خوبی مدل نکرده و گسیختگی را در کرنش های کمتر از واقعیت ارائه می دهد ولی تنش گسیختگی بیشینه بر اساس این مدل با نتایج آزمایشگاهی و سایر مدل مطابقت دارد. اما مدل رفتاری سخت شونده در ارائه رفتار تنش-کرنش نمونه خاک با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد.

با توجه به این که مدل سازی اول در شرایط زهکشی نشده است، نمونه دچار تغییر حجم نشده و با اعمال کرنش محوری ابتدا نمونه به صورت انقباضی و ایجاد فشار آب حفره ای مثبت و سپس اتساعی و ایجاد فشار آب حفره ای منفی عمل نموده است. نمودار مسیر تنش و نمودار تنش انحرافی و کرنش محوری در شکل (۶) تحت تنش همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال قابل مشاهده است. با توجه به اینکه مدل سازی دوم در شرایط زهکشی شده صورت گرفته، نمونه دچار تغییر حجم می شود. نمودار کرنش محوری- کرنش حجمی و منحنی تنش انحرافی-کرنش محوری تحت تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال برای این حالت شکل (۷) ترسیم شده است همان طوری که مشاهده می شود، نتایج مدل سازی عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی



شکل ۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی در شرایط زهکشی شده (الف) نمودار کرنش حجمی- کرنش محوری، (ب) نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری

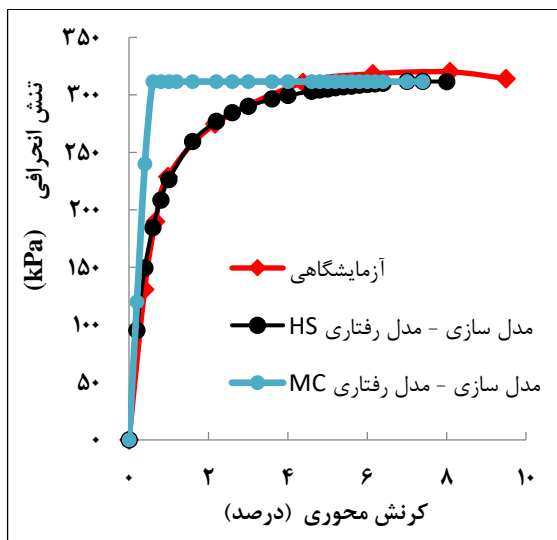


شکل ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی در شرایط زهکشی نشده (الف) نمودار مسیر تنش، (ب) نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری

### ۳- نتایج

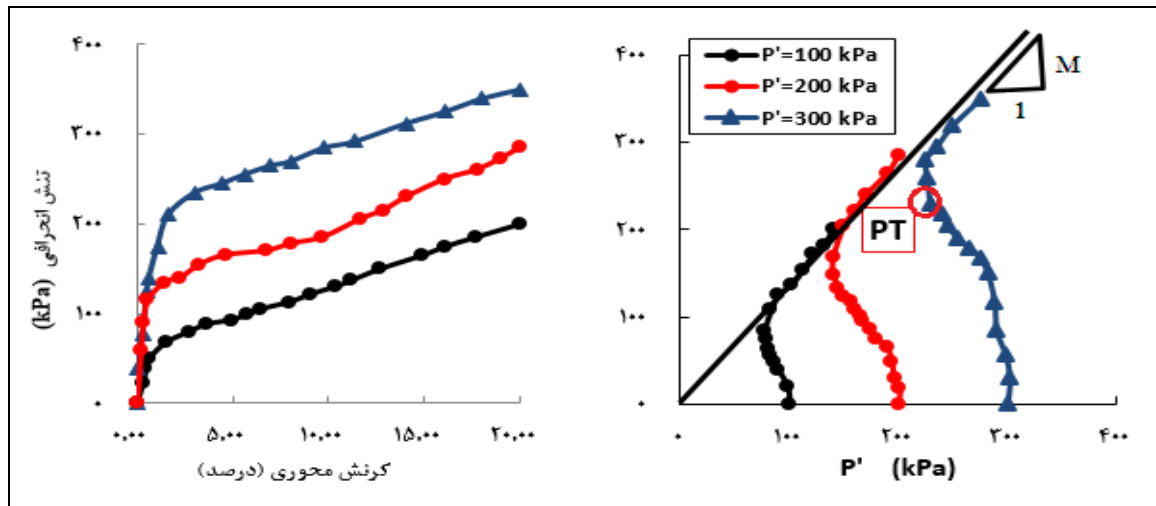
#### ۳-۱- نتایج آزمایشات سه محوری

نمونه‌های ماسه تحت سه تنش همه جانبه کم تا متوسط ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایشات سه محوری صورت گرفته بر روی نمونه ماسه بصورت نمودارهای مسیر تنش و تنش انحرافی-کرنش محوری در شکل (۹) ارائه شده است. در نمونه‌ها در نمودار مسیر تنش یک حالت تغییر فاز از نرم شونده به سخت شونده مشاهده می‌شود و نمونه رفتار انبساطی تا رسیدن به حالت پایدار نهایی را طی می‌کند. این نوع رفتار در خاک با تراکم متوسط تا متراکم رخ می‌دهد و با افزایش مداوم مقاومت برشی بدون ظاهر شدن پیک اولیه مشخص می‌شود. این افزایش در مقاومت برشی با کاهش فشار آب منفذی پس از رسیدن به حداکثر مقدار همراه است.



شکل ۸- مقایسه تنش انحرافی-کرنش محوری مدل‌سازی با مدل‌های رفتاری مختلف و نتایج آزمایشگاهی زهکشی شده





شکل ۹- نتایج آزمایشگاهی آزمایش سه محوری ماسه دریاچه ارومیه

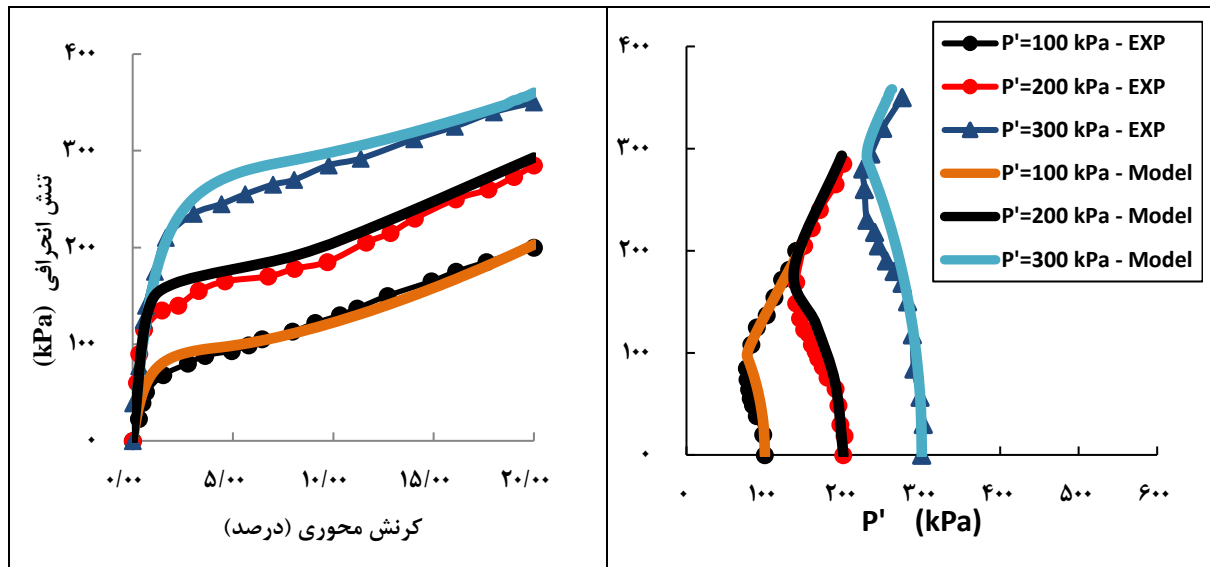
۳-۲- نتایج مدل سازی عددی

در این بخش با استفاده از مدل سازی عددی یک نمونه خاک ماسه دریاچه ارومیه با نرم افزار Midas ، پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت شونده با مدل سازی های مکرر ارزیابی شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در جدول (۴) پارامترهای رفتاری به دست آمده از مدل سازی عددی که تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشتند، برای ماسه مورد مطالعه ارائه شده است و نمودارهای مسیر تنش و نمودار تنش انحرافی - کرنش محوری در شکل (۱۰) تحت تنش همه جانبه ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلو پاسکال بر اساس پارامترهای مربوطه و نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده است.

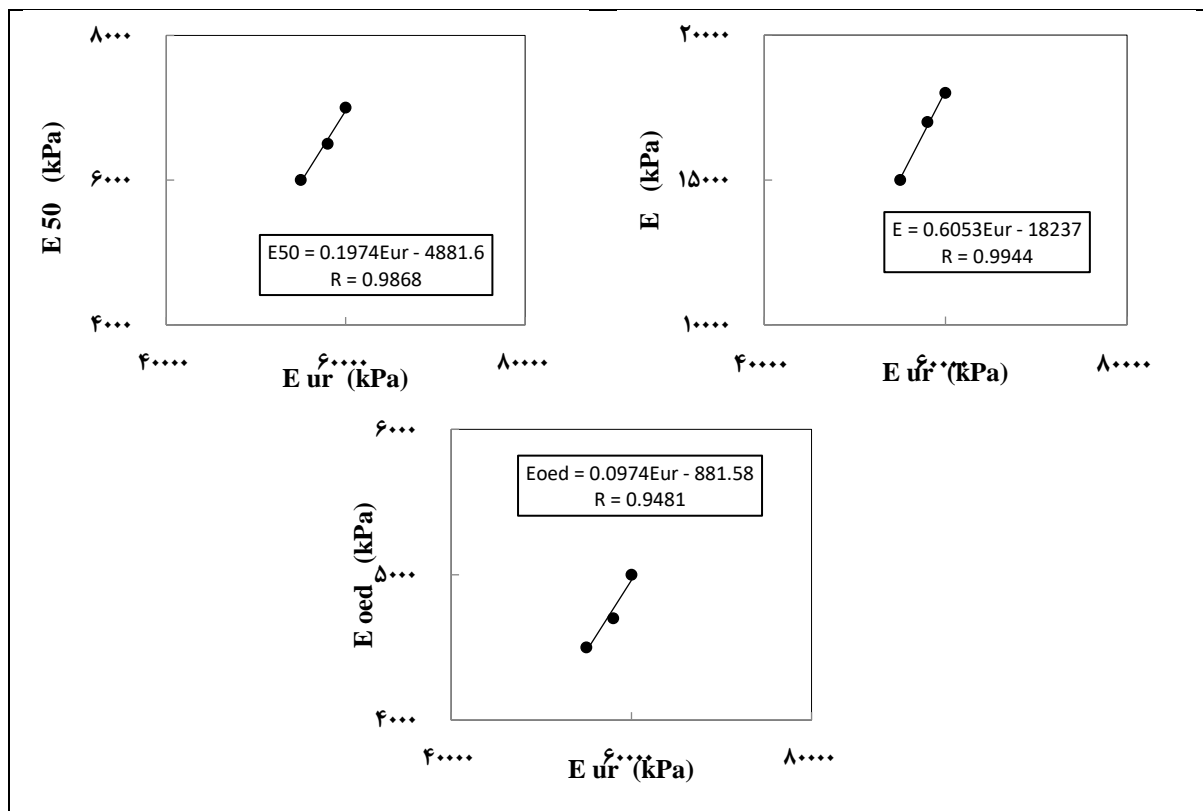
همان طوری که مشاهده می شود، نتایج مدل سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند که نشان دهنده صحت مدل سازی آزمایش سه محوری در نرم افزار است. این پارامترها که قابلیت ارائه رفتار تنش-کرنش خاک با دقت بالا را دارند، می توانند در مدل سازی های پروژه های مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گیرند. ارزیابی رفتار با این روش برای انواع خاک ها و مدل های مختلف رفتاری قابل استفاده است. تعیین ارتباط بین مقادیر سختی در مدل رفتاری خاک سخت شونده می تواند در ارزیابی پارامترها کمک کننده باشد. برای این منظور یک ارتباط ریاضی بین مقادیر سختی در نمونه ها مطابق اشکال (۱۱) برقرار است.

جدول ۴- پارامترهای رفتاری تعیین شده برای خاک ماسه دریاچه ارومیه بر اساس مدل خاک سخت شونده

تنش همه جانبه P' (kPa)			پارامتر رفتاری
۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	
۱۸۰۰۰	۱۷۰۰۰	۱۵۰۰۰	مدول یانگ (kPa) E
۷۰۰۰	۶۵۰۰	۶۰۰۰	سختی سکانتی $E_{50}^{ref}$ (kPa)
۵۰۰۰	۴۷۰۰	۴۵۰۰	سختی بارگذاری آدومتی $E_{oed}^{ref}$ (kPa)
۶۰۰۰۰	۵۸۰۰۰	۵۵۰۰۰	سختی باربرداری سه محوری $E_{ur}^{ref}$ (kPa)
۰/۵	۰/۵	۰/۵	توان تراز وابسته به سختی m
۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	پارامتر نسبت شکست $R_f$
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	تنش مرجع برای سختی $P_{ref}$ (kPa)
۳۴/۹۷	۳۵/۱۵	۳۵	زاویه اصطکاک و چسبندگی $\phi^\circ$
۴/۹۷	۵/۱۵	۵	زاویه اتساع $\psi^\circ$
۰/۴۲۶۸	۰/۴۲۴	۰/۴۲۶	ضریب رانش خاک در حالت سکون $K_0$
۰/۳	۰/۳	۰/۳	ضریب پواسون $\nu$
۱/۴۱۷	۱/۴۲۵	۱/۴۲	شیب خط حالت پایدار M



شکل ۱۰- مقایسه نمودارهای تنش- کرنش و مسیر تنش بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی



شکل ۱۱- ارتباط بین مقادیر سختی برای نمونه خاک مورد بررسی

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱) تعیین پارامترهای رفتاری دقیق برای نمونه‌های خاک جهت استفاده در مدل‌سازی‌های ژئوتکنیکی یک امر ضروری است که ارزیابی این پارامترها در بیشتر مواقع مستلزم صرف زمان و هزینه بسیار است. راه حل جایگزین و مکمل، استفاده از مدل‌سازی‌های عددی با بیشترین تطابق با نتایج آزمایشگاهی است.

در پژوهش حاضر پارامترهای رفتاری خاک سخت‌شونده برای ماسه استاندارد دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌سازی- های عددی مکرر به روش اجزای محدود با نرم‌افزار Midas GTS NX تعیین شده و با نتایج آزمایشگاهی انجام شده مقایسه گردید که نتایج اصلی این مقاله را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

فاز از نرم شونده به سخت شونده مشاهده گردید و نمونه رفتار انبساطی تا رسیدن به حالت پایدار نهایی را طی می‌کند. این نوع رفتار در خاک با تراکم متوسط تا متراکم رخ می‌دهد.

۵) با توجه به اینکه استفاده از پارامترهای رفتاری یک خاک استاندارد مانند ماسه دریاچه ارومیه در مطالعات و پروژه‌های ژئوتکنیکی از اهمیت زیادی برخوردار است، مدل‌سازی در شرایط زهکشی نشده بر روی نمونه این خاک انجام گردید و پارامترهای رفتاری مدل خاک سخت‌شونده تعیین گردید که نتایج نمودارهای تنش- کرنش محوری و مسیر تنش ترسیم شده با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد. لذا در مدل‌سازی‌های مهندسی ژئوتکنیک این مدل رفتاری با پارامترهای ارائه شده به عنوان یک مرجع می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۶) مدل‌سازی به روش اجزای محدود بر خلاف روش اجزای گسسته که نیاز به مدل‌سازی و پارامترهای پیچیده رفتاری دارد، می‌تواند رفتار خاک را با مدل‌های رفتاری شاخته شده مهندسی ارائه دهد و همچنین روش اجزای گسسته برای مصالح دانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد که در روش اجزا محدود این محدودیت وجود ندارد.

۷) نرم‌افزار Midas GTS NX با تنوع زیادی از مدل‌های رفتاری و امکان ایجاد سریع مدل‌ها با هندسه پیچیده و متنوع می‌تواند در مدل‌سازی‌های مهندسی مورد استفاده قرار گیرد.

۸) در مدلسازی عددی در صورتیکه میزان برآزش منحنی‌ها حاصل از خروجی نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی رضایت بخش نباشد، مجموعه پارامترها از طریق برآزش مجدد کالیبره شده و مدلسازی تکرار می‌شود. طبیعتاً این روند نیازمند مهارت کافی در مدلسازی و ارزیابی خروجی نرم‌افزار دارد.

۹) در این پژوهش بر استفاده از مدل رفتاری سخت‌شونده به عنوان یک مدل غیر خطی مناسب در پروژه‌های ژئوتکنیک تاکید گردید، علت این امر توسعه این مدل بر اساس مدل موه‌ر-کولمب (رایج‌ترین مدل در جامعه ژئوتکنیک) و دقت مناسب آن می‌باشد. لیکن سایر مدل‌های رفتاری نیز به شرط توجیه فنی، پارامترهای قابل محاسبه و استفاده در نرم‌افزارهای مهندسی می‌توانند در مطالعات آتی مورد استفاده و مقایسه قرار گیرند.

۲) جهت کنترل و صحت‌سنجی، مدل‌سازی آزمایش سه محوری در نرم‌افزار انجام شد و قابلیت مدل‌سازی سریع و دقیق در این نرم‌افزار مشاهده گردید. در مدل‌سازی نمونه‌های زهکشی شده نمودارهای تنش-کرنش محوری و کرنش محوری-کرنش حجمی قابل ترسیم است و نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. که مطابقت خوبی مشاهده گردید و نتایج در رفتار مدل خاک سخت‌شونده بیشترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مدل‌سازی نمونه‌های زهکشی نشده نمودارهای تنش انحرافی-کرنش محوری و مسیر تنش ترسیم گردید و نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد که مطابقت خوبی مشاهده گردید.

۳) مدل رفتاری موه‌ر-کولمب به عنوان یک مدل ساده و رایج در مهندسی ژئوتکنیک در محدوده رفتار الاستیک با مدل سخت‌شونده و نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته ولی با توجه به رفتار خطی و سختی الاستیک تا قبل از مرحله گسیختگی، نمودار رابطه تنش-کرنش را به خوبی مدل نکرده و بحث سخت‌شوندگی در این مدل مطرح نیست و بعد از رسیدن به مقدار تنش تسلیم، مقدار تنش با افزایش کرنش‌های پلاستیک ثابت مانده که این موضوع با رفتار واقعی اکثر مصالح خاکی مغایر است. این مدل گسیختگی را در کرنش‌های کمتر از واقعیت ارائه می‌دهد ولی تنش گسیختگی بیشینه بر اساس این مدل با نتایج آزمایشگاهی و سایر مدل مطابقت دارد. با توجه به ضعف این مدل استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته که به نوعی وابستگی سختی به سطح تنش و همچنین رفتار غیر خطی را بیان کند، در پروژه‌های با اهمیت امری ضروری است. مدل رفتاری سخت‌شونده با بکارگیری تعداد بیشتری از مدول تغییر شکل، تخمین مناسب‌تری را در ارائه رفتار تنش-کرنش خاک ارائه می‌دهد و همچنین تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی را دارد، لذا در مدل‌سازی‌های مهندسی ژئوتکنیک این مدل رفتاری می‌تواند به عنوان جایگزین مدل موه‌ر-کولمب مورد استفاده قرار گیرد.

۴) برای ارزیابی پارامترهای رفتاری، آزمایش‌های سه محوری بر روی نمونه‌های ماسه دریاچه ارومیه تحت سه تنش همه جانبه کم تا متوسط ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام گردید و نتایج آزمایش‌ها صورت گرفته بصورت نمودارهای مسیر تنش و تنش انحرافی-کرنش محوری ارائه گردید. در نمودار مسیر تنش یک حالت تغییر

## مراجع

- [1] D. Wulfsohn و B.A. Adams و D.G. Fredlund. "Triaxial testing of unsaturated agricultural soils." *Journal of Agricultural Engineering Research* 69. no. 4 (1998): 317–330.
- [2] D.S. Liyanapathirana, J. Carter, and D. Airey. "Numerical modeling of nonhomogeneous behavior of structured soils during triaxial tests." *International Journal of Geomechanics* 5. no. 1 (2005): 10–23.
- [3] S.J. Lee, Y.M. Hashash, and E.G. Nezami. "Simulation of triaxial compression tests with polyhedral discrete elements." *Computers and Geotechnics* 43. (2012): 92–100.
- [4] D. Penumadu, R. Zhao, and D. Frost. "Virtual geotechnical laboratory experiments using a simulator." *International Journal for Numerical and Analytical Methods In Geomechanics* 24. no. 5 (2000): 439–451.
- [5] L. Shao, S.C. Chi, L.J. Zhou, and Y.Z. Wang. "Discrete element simulation of crushable rockfill materials." *Water Science and Engineering* 6. no. 2 (2013): 215–229.
- [6] P. Kulatilake, B. Malama, and J. Wang. "Physical and particle flow modeling of jointed rock block behavior under uniaxial loading." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38. no. 5 (2001): 641–657.
- [7] Z. Szilvágyi, and R.P. Ray. "Verification of the Ramberg-Osgood material model in Midas GTS NX with the modeling of torsional simple shear tests." *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 62. no. 3 (2018): 629–635.
- [8] R. Brinkgreve, and E. Engin. "Validation of geotechnical finite element analysis." *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France*. vol.2. p.677-682. 2013.
- [9] O.K. Mahabadi, A. Lisjak, G. Grasselli, T. Lukas, and A. Munjiza. "Numerical modelling of a triaxial test of homogeneous rocks using the combined finite-discrete element method." *ISRM EUROCK*. 2018.
- [10] G. McDowell, and O. Harireche. "Discrete element modelling of soil particle fracture." *Géotechnique* 52. no. 2. (2002): 131–135.
- [11] N. Belheine, J.P. Plassiard, F.V. Donzé, F. Darve, and A. Seridi. "Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling." *Computers and Geotechnics* 52. no. 2 (2009): 131–135.
- [12] D.C. AStrack. "A discrete numerical model for granular assemblies." *Geotechnique* 29. (1979): 47–65.
- [13] G. Yang, T. Yu, and L. Hanlong. "Numerical simulation of undrained triaxial test using 3D discrete element modeling." *Instrumentation, Testing, and Modeling of Soil and Rock Behavior*. (2011): 99–106.
- [14] N. Ungureanu, V. Vlăduț, and S.Ș. Biriș. "FEM modelling of soil behaviour under compressive loads." *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, Bristol, UK*. vol. 163. no. 1. 2017.
- [15] G. Shafabakhsh, and A. Mehrabi. "Numerical Analysis of Flexible Pavements Using Micromechanical Approach." *Journal of Modeling in Engineering* 13. no. 40 (2015): 59–67. (in Persian)
- [16] Z. Khalil, S. Yasreb, and M. Oliaei. "Determination of cam-clay constitutive parameters in numerical modeling of sandy soil behaviour under triaxial testing." *Sharif Journal of Civil Engineering* 30. no. 2. (2014): 97–106.
- [17] A. Bayoumi. "New laboratory test procedure for the enhanced calibration of constitutive models." *Georgia Institute of Technology, USA*. 2006.
- [18] S.H. Golmaei, and M. Boulon. "Comparison between experimental and finite element modeling data for triaxial undrained cyclic tests in compression on hostum sand." *International Journal of Civil & Structural Engineering* 3. no. 2. (2012): 429–442.
- [19] S.H. Golmaei. "Application of finite element modeling of isotropic drained monotonic and cyclic triaxial tests, using explicit accumulation model for noncohesive soils under cyclic loading." *International Journal of Civil & Structural Engineering* 3. no. 3. (2013): 629–643.
- [20] M. Herrera Suárez, O. González Cueto, C. Iglesias Coronel, A. De La Rosa Andino, and R. Madruga Hernández. "Estudio de la exactitud del modelo hiperbólico de Duncan y Chan en la predicción de la relación esfuerzo deformación de tres suelos arcillosos cubanos." *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 19. no. 4. (2010): 24–29.
- [21] T. Schanz, P. Vermeer, and P.G. Bonnier. "The hardening soil model: formulation and verification." *Beyond 2000 in Computational Geotechnics* 1. (2017): 281–296.
- [22] A. Cherif Taiba, Y. Mahmoudi, M. Belkhatir, A. Kadri, and T. Schanz. "Experimental characterization of the undrained instability and steady state of silty sand soils under monotonic loading conditions." *International Journal of Geotechnical Engineering* 12. no. 5. (2018): 513–529.

- [23] L. Callisto, A. Amorosi, and S. Rampello. "The influence of pre-failure soil modelling on the behaviour of open excavations." *Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. The Netherlands Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 1999.
- [24] P. Teo, and K. Wong. "Application of the Hardening Soil model in deep excavation analysis." *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering* 5. no. 3. (2012): 152–165.
- [25] V.P. Singh, and G. Sivakumar Babu. "2D numerical simulations of soil nail walls." *Geotechnical and Geological Engineering* 28. (2010): 299–309.
- [26] R. Obrzud, and A. Truty. "The Hardening Soil Model-a practical guidebook. Z Soil. PC 100701 report." *Zaca Service Ltd. Switzerland*. 2018.
- [27] N. Janbu. "Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests." *European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMFE). Wiesbaden*. vol. 1. p.19-25. 1963.
- [28] V.A. Hernández-Hernández, D.R. Joya-Cárdenas, L.N. Equihua-Anguiano, J.C. Leal-Vaca, J.A. Peña, L. Pérez-Moreno, and A. Saldaña-Robles. "Experimental and numerical analysis of triaxial compression test for a clay soil." *Chilean Journal of Agricultural Research* 81. no. 3. (2021): 357–367.
- [29] G. Midas. "GTS NX user manual." *MIDAS Information Technology Corporation Ltd. Seongnam, Korea*. 2019.