

## Investigation of the Effect of Interface Roughness on the Shear Behavior of a Granular Soil-Structure System Using 3D DEM Simulation

Babak Ebrahimi<sup>1\*</sup>, Aidin Kahbasi<sup>2</sup>, Seyed Ali Mirkhani<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Geotechnical and Transportation Engineering Department, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Graduate M.Sc. Student, Geotechnical and Transportation Engineering Department, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Ph.D. Candidate, Geotechnical and Transportation Engineering Department, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

The shear behavior of soil-structure interfaces plays a crucial role in estimating the bearing capacity of geotechnical structures such as retaining walls, anchors, piles, and reinforced soil systems. One key factor influencing the shear behavior of the soil-structure interface is the relative roughness of the structure's surface in contact with the adjacent soil body. In the present study, the effect of relative roughness on the shear behavior of the soil-structure interface is investigated. For this purpose, a three-dimensional (3D) interface shear box test is simulated under monotonic loading, with varying surface roughness ( $R_n = 0, 0.5, 0.75, 1, 2$ ) of the bottom bounding structure. Numerical analyses are conducted using the discrete element method (DEM). In this approach, spherical particles are used to simulate soil grains, a linear contact model is applied to represent the interaction between them, and rotational resistance is considered to virtually account for the effect of particle shape. A standard sawtooth pattern is employed to represent the rough surface geometry of the bounding structure in contact with the granular soil. To calculate the thickness of the shear zone, the average particle displacement and porosity distribution are used. DEM results show when the relative roughness is zero and the structure's surface is completely smooth, the sample exhibits a perfectly elastic-plastic behavior, and no shear zone forms along the interface. As the relative roughness increases, the shear stress and peak friction angle at the interface rise sharply until reaching a critical surface roughness value, beyond which changes are minimal. With an increase in relative roughness from 0.5 to 2, the peak shear resistance increases by 50 kPa, and the volumetric strain increases by 295%. The shear zone thickness also increases from  $2.1D_{50}$  to  $4.53D_{50}$  (4.1 mm), as relative roughness rises from 0.5 to 2.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 23 October 2024

Revise Date: 25 January 2025

Accept Date: 12 March 2025

### Keywords:

Soil-structure interaction

Surface roughness

Shear strength

Interface shear test

Granular soil

Discrete element method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.482379.3540

\*Corresponding author: Babak Ebrahimi

Email address: b\_ebrahimi@sbu.ac.ir

## مطالعه اثر زبری سطح مشترک بر رفتار برشی سیستم خاک دانه‌ای-سازه با استفاده از

### شبیه‌سازی سه‌بعدی به روش اجزای منفصل

بابک ابراهیمیان<sup>۱\*</sup>، آیدین کهباسی<sup>۲</sup>، سید علی میرخانی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی ژئوتکنیک و حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی ژئوتکنیک و حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی ژئوتکنیک و حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

#### چکیده

رفتار برشی سطح مشترک خاک - سازه نقش مهمی در برآورد ظرفیت باربری سازه‌های ژئوتکنیکی مانند شمع‌ها، دیوارهای حائل، مهاری‌ها و سامانه‌های خاک مسلح ایفا می‌کند و زبری نسبی سطح سازه در تماس با خاک، یکی از عوامل بسیار مؤثر بر این رفتار است. در مطالعه حاضر، به بررسی اثر زبری نسبی بر رفتار برشی سطح مشترک خاک - سازه پرداخته می‌شود. از آنجاکه مطالعات گذشته عموماً بر رفتار ماکروسکوپی این سطح متمرکز بوده‌اند، این پژوهش عمدتاً به بررسی رفتار برشی تماسی خاک‌های دانه‌ای از دیدگاه میکروسکوپی می‌پردازد. برای این منظور، آزمایش برش سطح مشترک تحت بارگذاری مونوتونیک با مقادیر مختلف زبری نسبی سطح تماس ( $R_{\eta}$  برابر با ۰، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۲) به صورت سه‌بعدی با روش اجزای منفصل شبیه‌سازی می‌شود. در این روش، از ذرات کروی برای شبیه‌سازی دانه‌های خاک، مدل تماسی خطی برای ارتباط بین آن‌ها و مقاومت چرخشی برای لحاظ نمودن مجازی اثر شکل ذرات استفاده می‌شود. برای نمایش هندسه سطح زیر سازه در تماس با خاک دانه‌ای، الگوی دندانه‌دار استاندارد به کار گرفته می‌شود. برای مطالعه رفتار برشی تماسی، پارامترهای ماکروسکوپی مانند تنش برشی، زاویه اصطکاک و کرنش حجمی و پارامترهای میکروسکوپی مانند یوکی، چرخش ذرات، زنجیره نیروها و نحوه جهت‌گیری تماس‌ها بررسی می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند زمانی که پارامتر زبری نسبی صفر و سطح سازه کاملاً صاف است، رفتار نمونه کشسان - مومسان کامل است و ناحیه برشی در نمونه تشکیل نمی‌شود. با افزایش زبری نسبی تا مقدار بحرانی، رفتار نمونه کشسان - مومسان همراه با نرم‌شوندگی است و تنش برشی و زاویه اصطکاک بیشینه در سطح مشترک با شیب تندی افزایش می‌یابند و پس از آن تغییرات اندک است. با افزایش زبری نسبی از ۰/۵ به ۲، مقاومت برشی بیشینه از ۱۰۰ کیلوپاسکال به ۱۵۰ کیلوپاسکال و کرنش حجمی از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۰۴ افزایش می‌یابند. ضخامت ناحیه برشی تحت تاثیر زبری نسبی سطح سازه قرار دارد و با افزایش زبری نسبی از ۰/۵ به ۲، از  $2/1D_{50}$  به  $4/53D_{50}$  و به میزان  $4/1$  میلی‌متر افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک - سازه، زبری سطح، مقاومت برشی، آزمایش برش سطح مشترک، خاک دانه‌ای، روش اجزای منفصل.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.482379.3540	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.482379.3540	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۱۲/۲۲	۱۴۰۳/۱۲/۲۲	۱۴۰۳/۱۱/۰۶	۱۴۰۳/۰۸/۰۲
*نویسنده مسئول: بابک ابراهیمیان b_brahimian@sbu.ac.ir					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

در بسیاری از سازه‌های ژئوتکنیکی، خاک‌های دانه‌ای با اجزاء و عناصر سازه‌ای در تماس هستند و ضروری است اندرکنش خاک دانه‌ای - سازه<sup>۱</sup> که موضوعی بسیار مهم و اثرگذار در پایداری و ایمنی سازه‌های مختلف ژئوتکنیکی مانند شالوده‌های سطحی و عمیق، دیوارهای حائل، مهارها، سازه‌های زیرزمینی، سازه‌های دریایی و سازه‌های مسلح شده با ژئوسنتتیک‌ها است، بررسی شود [۱-۴].

جابه‌جایی‌های نسبی در سطح مشترک خاک - سازه<sup>۲</sup> با استمرار بارگذاری برشی رخ می‌دهد و پدیده محلی شدن کرنش برشی<sup>۳</sup> در نوار باریکی<sup>۴</sup> با ضخامت مشخص که به آن ناحیه برشی<sup>۵</sup> گفته می‌شود، اتفاق می‌افتد. رفتار خاک در ناحیه برشی و تعیین ضخامت این ناحیه تاثیر عمده‌ای بر ظرفیت باربری و مقاومت برشی سیستم و هم‌چنین تخمین صحیح نیروهای منتقل شده از جانب خاک به سازه متحرک مجاور و بالعکس دارد [۱ و ۵]. طبق مشاهدات دیانگ و همکاران<sup>۶</sup> [۶] با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویر ذرات<sup>۷</sup>، ضخامت ناحیه برشی مستقیماً به زبری سطح مشترک وابسته است. در ناحیه برشی علاوه بر محلی شدن کرنش برشی، چرخش دانه‌ها، تغییر حجم و تمرکز تنش برشی اتفاق می‌افتد و در نتیجه رفتار خاک در داخل این ناحیه به‌صورت قابل ملاحظه‌ای نسبت به خارج آن متفاوت است. مقاومت برشی سطح مشترک خاک - سازه تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند تنش قائم، زبری سطح، سختی مصالح، اندازه دانه، درجه اشباع، چگالی نسبی و شکست ذرات خاک است [۷-۱۳]. در میان این عوامل، زبری سطح نقش بسیار مهمی را در رفتار برشی تماسی ایفا می‌کند [۱۴-۱۹] و بارزترین عامل اثرگذار بر رفتار انبساطی و انقباضی سطح مشترک خاک - سازه است [۲۰]. هم‌چنین، تاثیر زبری سطح در بهبود عملکرد و افزایش ایمنی سازه‌های ژئوتکنیکی مشهود است [۴]. در بسیاری از مطالعات گذشته، زبری تنها به‌صورت کیفی ارزیابی شده است [۲۱ و ۲۲]. هم‌چنین، زبری از طریق مشاهده ریخت‌شناسی<sup>۸</sup> سطح عموماً به دو گروه صاف<sup>۹</sup> و زبر تقسیم‌بندی شده است [۲۲ و ۲۳]. در اکثر مطالعات گذشته، برای سهولت در تحلیل، سطوح ساده‌سازی شده و به‌جای سطوح نامنظم از سطوح منظم مانند الگوی دندانه‌دار<sup>۱۰</sup> و الگوی نیمه قوسی<sup>۱۱</sup> استفاده شده‌اند [۱۵، ۲۷-۲۴]. در سطوح صاف، مقاومت برشی در سطح مشترک خاک-سازه بسیج نمی‌شود و در نتیجه نیروهای چندانی بین خاک و سازه مبادله نمی‌شوند، اما در سطوح زبر نیروهای منتقل شده بین خاک و سازه به‌علت مقاومت برشی بسیج شده در سطح مشترک خاک - سازه افزایش می‌یابند. با افزایش زبری، مقاومت برشی سطح مشترک خاک-سازه همواره از مقادیر متناظر توده خاک کمتر است [۲۸، ۲۹ و ۳۰]. بررسی کمی اثر زبری بر رفتار برشی سطح مشترک خاک - سازه توسط پژوهش‌گران مختلف بررسی و روابط متفاوتی ارائه شده است [۳۱ و ۳۲]. در این میان، پارامتر زبری نسبی<sup>۱۲</sup> ارائه شده توسط یوسوجی و کیشیدا<sup>۱۳</sup> [۳۱]  $R_n = \frac{R_{max}}{D_{50}}$ ، که در آن  $R_{max}$  ارتفاع بین بلندترین قله<sup>۱۴</sup> و کوتاه‌ترین دره<sup>۱۵</sup> در پروفیل سطح و  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات خاک<sup>۱۶</sup> تعریف می‌شوند) به‌عنوان متداول‌ترین پارامتر استفاده می‌شود که می‌تواند اثر ترکیبی زبری سطح و اندازه ذره را در نظر بگیرد. در همین راستا، پژوهش‌های مختلفی به‌منظور بررسی اثر زبری نسبی بر رفتار برشی سطح مشترک خاک - سازه انجام شده‌اند [۲۵، ۴۰-۴۱].

<sup>1</sup> Granular soil – structure interaction

<sup>2</sup> Soil – structure interface

<sup>3</sup> Shear strain localization phenomenon

<sup>4</sup> Thin layer

<sup>5</sup> Shear Zone

<sup>6</sup> Dejong et al.

<sup>7</sup> Particle image velocimetry

<sup>8</sup> Surface morphology

<sup>9</sup> Smooth

<sup>10</sup> Saw-tooth pattern

<sup>11</sup> Semi-arch pattern

<sup>12</sup> Relative roughness

<sup>13</sup> Uesugi and Kishida

<sup>14</sup> Highest peak

<sup>15</sup> Lowest valley

<sup>16</sup> Mean grain diameter

[۳۳]. نتایج این مطالعات نشان می‌دهند زبری سطح نقش بسیار مهمی در مقاومت برشی سطح مشترک خاک - سازه ایفا می‌کند و با افزایش پارامتر زبری نسبی، ناحیه برشی ضخیم‌تر و مقاومت برشی افزایش می‌یابد [۲ و ۴۱]. زبری سطح دارای مقدار حدی به نام زبری بحرانی<sup>۱۷</sup> است که بیش‌تر از این مقدار، تاثیر زبری بر زاویه اصطکاک سطح مشترک ناچیز می‌شود [۴۱ و ۴۲]. هم‌چنین برای سطوح زبر، نرم‌شدگی و برای سطوح صاف رفتار کشسان - مومسان<sup>۱۸</sup> کامل مشاهده می‌شوند [۲۷، ۳۶ و ۴۱].

در مطالعه حاضر، به بررسی اثر زبری نسبی بر رفتار برشی سطح مشترک خاک - سازه پرداخته می‌شود. برای این منظور، شبیه‌سازی سه‌بعدی آزمایش برش سطح مشترک<sup>۱۹</sup> تحت شرایط بارگذاری مونوتونیک<sup>۲۰</sup> بین خاک دانه‌ای و سازه با استفاده از روش اجزای منفصل و نرم‌افزار PFC3D (Itasca Consultants, Inc.) انجام می‌شود. برای نمایش هندسه سطح زبر و برای سهولت در تحلیل، از الگوی دنداندار استاندارد استفاده می‌شود. شیب دندانها در صفحه پایینی<sup>۲۱</sup> با زاویه ۴۵ و ۱۳۵ درجه به‌صورت متناوب شبیه‌سازی و از مقادیر متفاوت پارامتر زبری نسبی ( $R_{\eta}$  برابر با ۰، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۲) استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی ذرات ماسه از کره‌هایی با مدل تماسی خطی همراه با مقاومت چرخشی<sup>۲۲</sup> استفاده می‌شود. در این مقاله، با تکیه بر ۳ جنبه ماکرو و میکرومکانیکی زبر، به مطالعه اثر زبری بر رفتار برشی سطح مشترک خاک - سازه پرداخته می‌شود: (۱) اثر زبری سطح<sup>۲۳</sup> بر مقاومت برشی و کرنش حجمی خاک در سطح مشترک، (۲) بافت مصالح<sup>۲۴</sup> در داخل و خارج ناحیه برشی و (۳) ضخامت ناحیه برشی و ارتباط آن با پارامتر زبری نسبی. در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی مدل عددی توسعه‌یافته در بخش ۲ ارائه می‌شوند. نتایج ماکرو و میکرومکانیکی و بحث پیرامون آن‌ها در بخش ۳ آورده می‌شوند. نهایتاً، نتیجه‌گیری در بخش ۴ ارائه می‌شود.

## ۲- شبیه‌سازی آزمایش برش سطح مشترک با روش اجزای منفصل

در این مطالعه، برای شبیه‌سازی سه‌بعدی آزمایش برش سطح مشترک خاک - سازه تحت شرایط بارگذاری مونوتونیک و بررسی رفتار میکرومکانیکی ذرات خاک دانه‌ای از روش عددی اجزای منفصل استفاده می‌شود. شبیه‌سازی با نرم‌افزار PFC3D (Itasca Consultants, Inc.) انجام می‌شود که در آن هر ذره بر اساس قانون دوم حرکت نیوتن<sup>۲۵</sup> با ذرات یا دیواره‌های همسایه اندرکنش دارد و از قانون نیرو - جابه‌جایی<sup>۲۶</sup> برای به‌روزرسانی هر تماس استفاده می‌شود. در مقایسه با سایر روش‌های عددی بر مبنای مکانیک محیط پیوسته، روش عددی اجزای منفصل قادر است طبیعت مجزای مصالح دانه‌ای را به خوبی شبیه‌سازی نماید [۴۳-۴۵]. برای در نظرگیری اثر مقاومت چرخشی ناشی از شکل ذره بر رفتار برشی سطح مشترک خاک - سازه، از مدل تماسی خطی همراه با مقاومت چرخشی استفاده می‌شود [۱۴، ۴۶-۵۰]. برای استهلاک انرژی جنبشی اضافی<sup>۲۷</sup>، میرایی محلی<sup>۲۸</sup> به هر ذره اعمال می‌شود. بزرگی نیروی میرایی متناسب با نیروی نامتعادل کننده است و ضریب تناسب آن مقداری ثابت است که به‌عنوان ضریب میرایی تعریف می‌شود [۳۶].

تصویر شماتیک مدل تماسی خطی همراه با مقاومت چرخشی در شکل ۱ نشان داده شده است. در تماس بین دو ذره، دو حرکت لغزش و دوران اتفاق می‌افتد. رابطه نیرو - جابه‌جایی بین ذرات از قانون تماس الاستیک پیروی می‌کند. نیروهای تماسی به‌صورت خطی با جابه‌جایی نسبی بین ذرات در حال تماس بر حسب سختی قائم و سختی برشی تا زمانی که لغزش رخ دهد، افزایش می‌یابند. لغزش زمانی

<sup>17</sup> Critical roughness

<sup>18</sup> Elastic-perfectly plastic

<sup>19</sup> Interface shear test

<sup>20</sup> Monotonic

<sup>21</sup> Counterface plate

<sup>22</sup> Rolling resistance linear contact model

<sup>23</sup> Rough interface

<sup>24</sup> Material fabric

<sup>25</sup> Newton's second law of motion

<sup>26</sup> Force-displacement law

<sup>27</sup> Additional kinetic energy

<sup>28</sup> Local damping

روی می دهد که نیروی تماسی برشی به حد گسیختگی کولمب برسد. سختی قائم بین دو المان در تماس که دارای شعاع های  $r_1$  و  $r_2$  هستند، با استفاده از مدول یانگ با رابطه (۱) محاسبه می شود:

$$k_n = \pi r^2 \frac{E}{L} \quad (1)$$

که در آن  $L$  برابر با  $r_1+r_2$  برای تماس ذره - ذره و برابر با  $r_1$  برای تماس ذره - دیواره است. همچنین،  $r$  برابر با  $\min(r_1, r_2)$  برای تماس ذره - ذره و برابر با  $r_1$  برای تماس ذره - دیواره است. دوران باعث چرخش نسبی بین دو ذره در تماس می شود. لنگر مقاوم در برابر چرخش با  $M_r$  نمایش داده می شود. نمو لنگر مقاوم در برابر چرخش یا  $\Delta M_r$  با استفاده از سختی دورانی ( $K_r$ ) و نمو دوران نسبی ( $\Delta \theta_r$ ) محاسبه می شود:

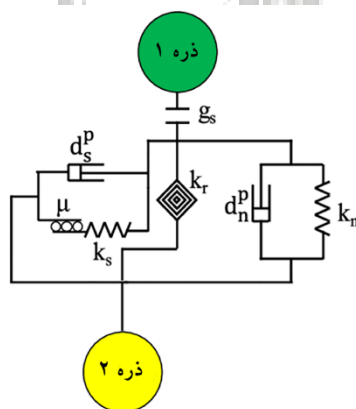
$$\Delta M_r = -k_r \Delta \theta_r \quad (2)$$

$$k_r = k_s \bar{r}^2 \quad (3)$$

که  $k_s$  سختی برشی و  $\bar{r}$  شعاع تماس موثر است و به صورت  $\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$  محاسبه می شود. حد آستانه برای  $M_r$  با  $M^*$  نشان داده می شود و با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$M^* = \mu_r \bar{r} F_n \quad (4)$$

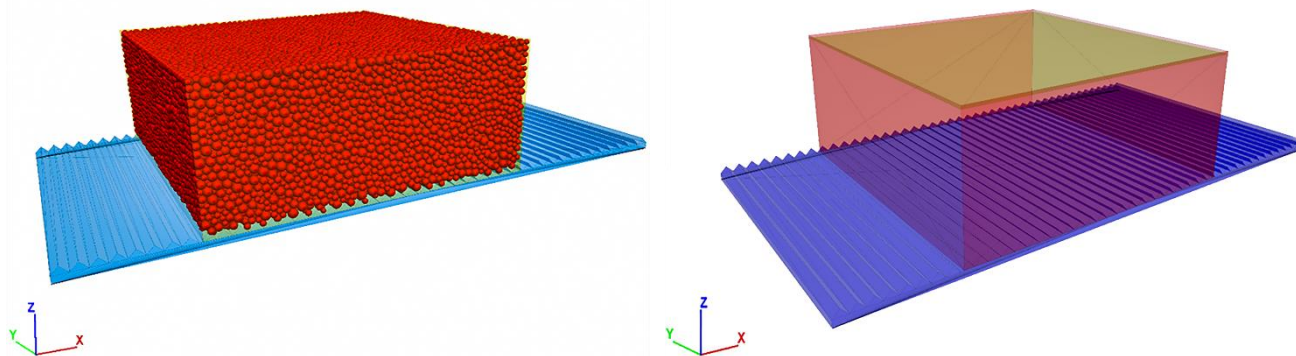
که در آن،  $F_n$  نیروی تماسی قائم و  $\mu_r$  ضریب مقاومت چرخشی است [۵۱].



شکل ۱- تصویر شماتیک مدل تماسی همراه با مقاومت چرخشی [۵۲]

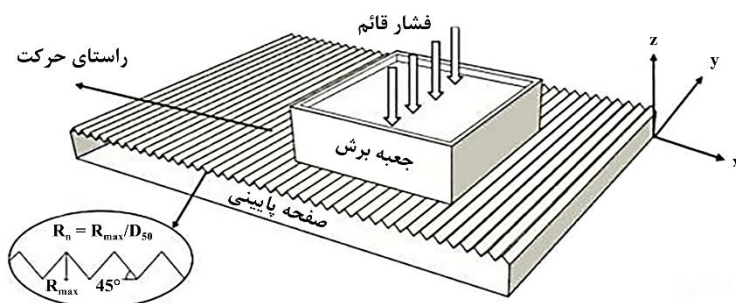
آزمایش برش سطح مشترک خاک - سازه همراه با مجموعه ذرات شبیه سازی شده و هندسه سطح زبر پایینی در شکل ۲ نشان داده شده اند. همان طور که در شکل ۲-الف مشاهده می شود جعبه برش از ۶ دیواره صلب تشکیل شده است که چهار دیواره جانبی ثابت و دیواره بالایی فقط در راستای قائم و دیواره پایینی فقط در راستای افقی جابه جا می شوند. مجموعه ای از ذرات کروی که نمونه خاک دانه ای را تشکیل می دهند و در تماس با دیواره ها هستند، در شکل ۲-ب آمده است. برای ساده سازی در تحلیل و نمایش هندسه سطح زبر از الگوی منظم دندانه دار استاندارد استفاده شده است. شیب دندانه ها در صفحه پایین نمونه با زاویه ۴۵ و ۱۳۵ درجه به صورت متناوب شبیه سازی و از پارامتر زبری نسبی ارائه شده توسط یوسوجی و کیشیدا [۳۱] برای تعریف زبری استفاده می شود. هندسه سطح زبر پایینی در شکل ۲-ج نمایش داده شده است. برای تولید نمونه متراکم ضریب اصطکاک اولیه بین ذرات برابر صفر و تخلخل اولیه ( $n = \text{Porosity}$ ) برابر ۰/۳۲ در نظر گرفته می شوند [۵۳]. ذرات کروی با دانه بندی ماسه فوجیان و مطابق شکل ۳ با کمینه، میانگین و بیشینه قطر ذره

به ترتیب برابر  $1/3$ ،  $1/7$  و  $2$  میلی‌متر با ضریب یکنواختی  $1/25$  و ضریب انحناء  $1$  به صورت تصادفی در جعبه برش تولید می‌شوند [۲۵]. تعداد ذرات کروی تولید شده در نمونه حدود  $44000$  ذره است. پس از تولید نمونه، در مرحله بارگذاری قائم، نمونه تحت بار  $200$  کیلوپاسکال متراکم می‌شود و سپس در مرحله بارگذاری برشی، برای برآورده شدن شرایط بارگذاری مونوتونیک، صفحه پایینی با سرعت ثابت  $0.1$  میلی‌متر بر دقیقه به سمت چپ حرکت می‌کند و هنگامی که جابه‌جایی برشی به  $12$  میلی‌متر معادل کرنش  $15\%$  می‌رسد، روند کلی نمودارها در این محدوده تقریباً ثابت می‌شود و نمونه به حالت نسبتاً پایدار<sup>۲۹</sup> می‌رسد و آزمایش برش سطح مشترک خاک - سازه متوقف می‌شود [۲۵]. لازم به توضیح است، نوسان‌هایی که در نمودارها مشاهده می‌شوند، جزء مشخصه‌های ذاتی روش اجرای منفصل است و در تمامی مطالعات انجام شده پیشین که از این روش بهره گرفته‌اند، گزارش شده است [۲۵، ۳۶ و ۴۲]. برخلاف روش‌های عددی مبتنی بر محیط پیوسته مانند اجزاء محدود، در روش اجرای منفصل، نوسانات به دلیل طبیعت مجزای نمونه و حرکت نوسانی ذرات رخ می‌دهند. برای اعتبارسنجی مدل اجزای منفصل توسعه یافته، از نتایج آزمایشگاهی برش سطح مشترک خاک - سازه توسط چن و همکاران<sup>۳۰</sup> [۲۵] استفاده شده است. در این آزمایش‌ها، از ماسه فوجیان با تراکم نسبی  $90\%$  تحت تنش‌های قائم متفاوت  $100$  و  $200$  کیلوپاسکال استفاده شده و نمونه تحت برش با حرکت صفحه زیر پایینی ( $R_n=1$ ) قرار گرفته است.



(ب)

(الف)

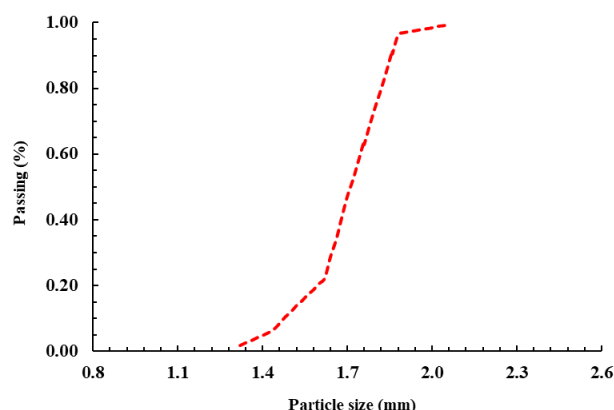


(ج)

شکل ۲- آزمایش برش سطح مشترک خاک - سازه: (الف) جعبه برش تشکیل شده از ۶ دیواره صلب شامل چهار دیواره جانبی، دیواره بالایی با حرکت در راستای  $Z$  و دیواره پایینی با حرکت در خلاف جهت محور  $X$ ، (ب) مجموعه ای از ذرات کروی به‌عنوان نمونه خاک دانه‌ای در تماس با دیواره‌ها، و (ج) هندسه سطح زیر پایینی

<sup>29</sup> Steady State

<sup>30</sup> Chen et al.

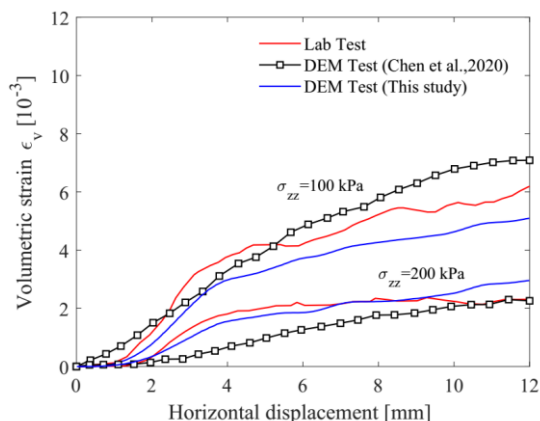


شکل ۳- نمودار دانه‌بندی ماسه فوجیان

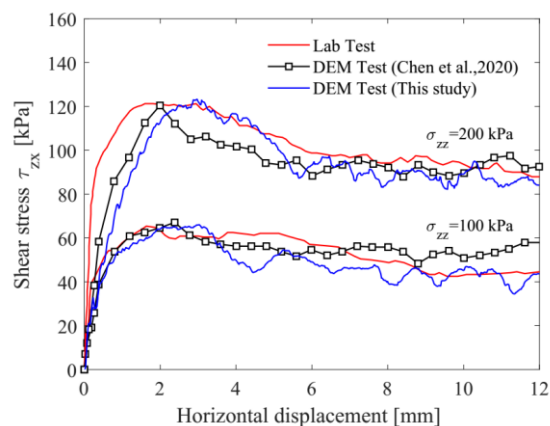
پارامترهای ورودی شبیه‌سازی‌ها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. در شبیه‌سازی روش اجزای منفصل، سختی قائم تماس‌ها تعیین‌کننده همپوشانی ذرات در تماس است و میانگین همپوشانی تماس‌ها باید کمتر از ۰/۳٪ میانگین شعاع ذرات در تماس باشد تا نتایج شبیه‌سازی همگرا باقی بمانند [۵۴]. نیروی میرایی در تماس بین دو ذره اعمال می‌شود و در جهتی مخالف با سرعت انتقال قائم و برشی نسبی دو ذره عمل می‌کند تا انرژی جنبشی مستهلک شود. نیروی میرایی می‌تواند نوسانات دینامیکی ذرات را کاهش دهد و نمونه را در وضعیت شبه‌استاتیک نگه دارد. در روش عددی اجزای منفصل، معمولاً زمانی که میرایی کافی وجود نداشته باشد، ذرات دارای نیروهای نامتعادل کننده بزرگ‌تر و مقاومت برشی کوچک‌تر هستند [۵۵]. در این مطالعه، ضریب میرایی برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است که نسبت همگرایی میانگین، که به‌عنوان نسبت نیروی نامتعادل کننده به نیروی کل ذره تعریف می‌شود را در طول آزمایش کم‌تر از ۰/۰۰۱ و در حالت شبه‌استاتیک حفظ می‌کند. شکل ۴ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های این پژوهش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های به روش اجزای منفصل توسط چن و همکاران [۲۵] و نتایج آزمایشگاهی ایشان را نشان می‌دهد. منحنی‌های تنش برشی و کرنش حجمی بر حسب جابه‌جایی برشی حاصل از شبیه‌سازی‌های این مطالعه با  $R_{II}$  برابر ۱ و در بارگذاری‌های قائم ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های چن و همکاران [۲۵] دارند.

جدول ۱- پارامترهای ورودی استفاده شده در شبیه‌سازی‌های اجزای منفصل

مقدار	پارامتر
۱/۷(mm)	قطر میانگین ذرات
۱/۲۵	ضریب یکنواختی
۲۶۵۰ (kg/m <sup>3</sup> )	چگالی
۲	نسبت سختی قائم به سختی برشی ذره - ذره
۲	نسبت سختی قائم به سختی برشی ذره - دیواره
۰/۲۴	ضریب اصطکاک ذره - ذره
۰/۵	ضریب اصطکاک ذره - دیواره
۰/۰۱	ضریب اصطکاک ذره - صفحه پایینی
۰/۰۵	ضریب مقاومت چرخشی
۰/۷	ضریب میرایی



(ب)



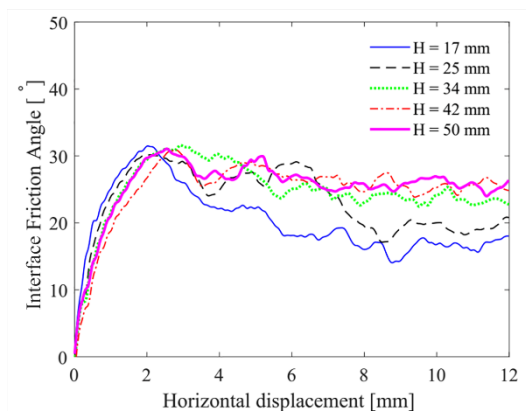
(الف)

شکل ۴- نتایج اعتبارسنجی مدل اجزای منفصل توسعه یافته در این پژوهش: نمودارهای (الف) تنش برشی، و (ب) کرنش حجمی بر حسب جابه‌جایی برشی تحت بارگذاری‌های قائم ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال

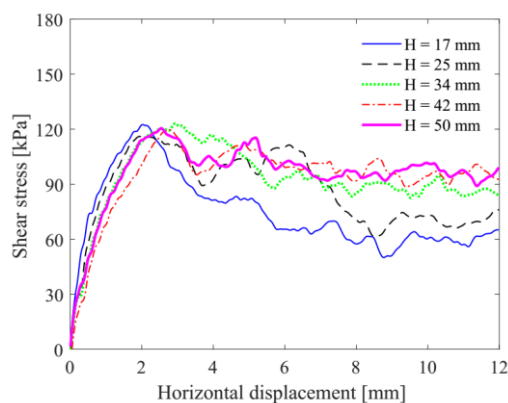
ابعاد جعبه برش می‌تواند بر مقاومت برشی و زاویه اصطکاک بیشینه<sup>۳۱</sup> در سطح تماس مشترک خاک - سازه اثر بگذارد [۵۶]. هرچه طول و عرض جعبه برش بزرگ‌تر باشد، اثر مرزهای صلب جعبه بر رفتار برشی و پارامترهای مقاومتی خاک در سطح تماس کمتر و دقت نتایج حاصل بالاتر است. در استاندارد BS، حداقل طول و عرض جعبه برش برابر ۶۰ میلی‌متر تعیین شده است. ASTM نیز اشاره کرده است که حداقل ابعاد باید ۵۰ میلی‌متر یا ۱۰ برابر حداکثر قطر ذرات، هر کدام که بزرگ‌تر باشد، لحاظ شود. در این رابطه، پژوهش‌گران مختلف از ابعاد متفاوت برای جعبه برش استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال، جینگ و همکاران [۳۶] و ونگ و بین [۴۵] ابعاد جعبه برش را به‌ترتیب برابر ۱۰۰ و ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته‌اند. در این پژوهش، طول و عرض جعبه برش برابر ۸۰ میلی‌متر مطابق پژوهش چن و همکاران [۲۵] انتخاب شده است. بر همین اساس، اعتبارسنجی مدل اجزای منفصل توسعه یافته با نتایج موجود در ادبیات فنی انجام می‌شود. علاوه بر این، در قالب مطالعات حساسیت‌سنجی، ۵ ارتفاع مختلف (۱۷، ۲۵، ۳۴، ۴۲ و ۵۰ میلی‌متر) برای نمونه خاک واقع در جعبه برش بررسی می‌شوند تا ارتفاع بهینه تعیین شود. شکل‌های ۵-الف و ب به‌ترتیب نمودار تغییرات تنش برشی و زاویه اصطکاک در سطح مشترک را بر حسب جابه‌جایی برشی سطح زبر پایینی برای ارتفاع‌های مختلف نمونه خاک نشان می‌دهند. زاویه اصطکاک در سطح مشترک خاک - سازه با استفاده از رابطه  $\phi = \text{Arctan}\left(\frac{\tau}{\sigma}\right)$  تعیین می‌شود. در این رابطه،  $\tau$  و  $\sigma$  به‌ترتیب تنش‌های برشی و قائم در سطح مشترک هستند که با جابجایی صفحه زبر پایینی، تغییر می‌کنند. در جدول ۲ نیز مقدار زاویه اصطکاک بیشینه در سطح مشترک برای ارتفاع‌های مختلف نمونه خاک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات قابل توجهی در مقدار مقاومت برشی و زاویه اصطکاک بیشینه در سطح مشترک در ارتفاع‌های مختلف نمونه خاک مشاهده نمی‌شود و ارتفاع نمونه تاثیر کمی بر رفتار خاک در سطح مشترک دارد. نمودار میانگین جابه‌جایی ذرات در جابه‌جایی برشی ۹ میلی‌متر صفحه پایینی برای ارتفاع‌های مختلف نمونه در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود ناحیه برشی در جعبه‌هایی با ارتفاع کم‌تر از ۳۴ میلی‌متر (۲۰ برابر میانگین قطر ذرات) به‌طور کامل تشکیل نمی‌شود و توسعه نمی‌یابد. زمانی که ارتفاع نمونه کم‌تر باشد، به‌دلیل وجود صفحات مرزی، بخش عمده‌ای از ذرات تحت تاثیر فرآیند برش قرار می‌گیرند و با سرعتی نزدیک به سرعت صفحات مرزی حرکت می‌کنند. در نتیجه ناحیه برشی، صفحه بالایی را قطع کرده و به‌صورت کامل تشکیل نمی‌شود و توسعه نمی‌یابد. با این حال، الگوی حرکتی ذرات در تمامی ارتفاع‌ها مشابه است [۵۷]. بر این اساس، برای انجام شبیه‌سازی موثر و مقرون به صرفه<sup>۳۲</sup> از منظر زمانی، ارتفاع جعبه برش برابر با ۳۴ میلی‌متر انتخاب می‌شود.

<sup>31</sup> Peak friction angle

<sup>32</sup> Affordable computational efficiency



(ب)

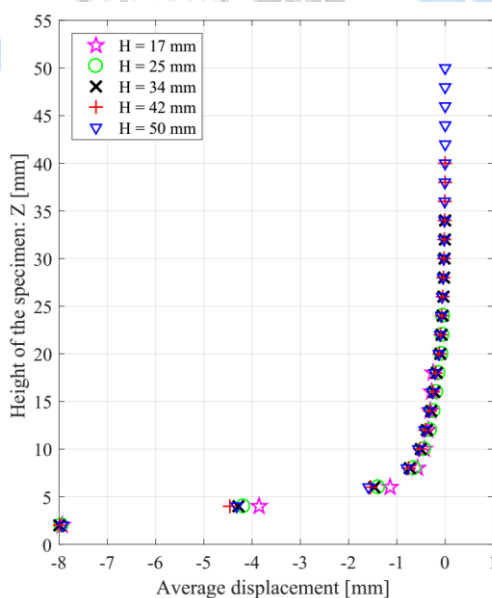


(الف)

شکل ۵- تغییرات: (الف) تنش برشی، و (ب) زاویه اصطکاک در سطح مشترک بر حسب جابه‌جایی برشی سطح زیر پایینی برای ارتفاع‌های مختلف نمونه

جدول ۲- زاویه اصطکاک بیشینه در سطح مشترک برای ارتفاع‌های مختلف مدل

ارتفاع مدل (mm)	زاویه اصطکاک بیشینه در سطح مشترک (درجه)
۱۷	۳۲
۲۵	۳۰
۳۴	۳۲
۴۲	۳۱
۵۰	۳۱



شکل ۶- میانگین جابه‌جایی ذرات در میزان جابه‌جایی برشی ۹ میلی‌متر صفحه پایینی برای ارتفاع‌های مختلف نمونه

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- رفتار ماکرو مکانیکی سطح مشترک خاک - سازه

در شکل ۷، نمودارهای تغییرات تنش برشی در راستای  $x$  ( $\tau_{zx}$ ) و زاویه اصطکاک بیشینه در سطح مشترک بر حسب پارامتر زبری نسبی تحت بارگذاری قائم ۲۰۰ کیلو پاسکال، روندی دوخطی<sup>۳۳</sup> را نشان می‌دهند. با افزایش مقدار پارامتر زبری نسبی، تنش برشی و زاویه اصطکاک بیشینه در سطح مشترک تا رسیدن به زبری بحرانی سطح<sup>۳۴</sup> با شیب تندی افزایش می‌یابند و پس از آن تغییرات جزئی است. این روند با مشاهدات آزمایشگاهی [۳۳ و ۳۷] و شبیه‌سازی‌های روش اجزای منفصل [۳۶، ۳۸ و ۴۲] مطابقت دارد. در این مطالعه، زبری بحرانی سطح برابر  $R_n(\text{crit}) = 0.5-0.75$  است که این مقدار مشابه نتایج مطالعه سو و همکاران<sup>۳۵</sup> [۳۷] و گرابوسکی و همکاران<sup>۳۶</sup> [۴۲] است. در شکل ۸، تغییرات تنش برشی، کرنش حجمی و زاویه اصطکاک سطح مشترک بر حسب جابه‌جایی برشی برای مقادیر زبری نسبی مختلف نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش زبری نسبی باعث افزایش مقاومت برشی بیشینه و کرنش حجمی می‌شود که علت آن چفت‌وبست<sup>۳۷</sup> بیش‌تر بین ذرات و سطح زبر با افزایش مقدار  $R_n$  است. در زبری نسبی صفر (صاف بودن صفحه پایینی)، رفتار کشسان - مومسان کامل مشاهده می‌شود و ذرات خاک در حین برش تمایل به لغزش در طول سطح را دارند که منجر به کرنش حجمی ناچیزی می‌شود. علت نوسانی بودن منحنی‌های مربوط به  $R_n=0.5$  هم‌اندازه نبودن قطر ذرات و دهانه دندان‌های سطح صفحه پایینی است که منجر به نوسان دوره‌ای<sup>۳۸</sup> ذرات بین قله و دره دندان می‌شود [۳۶]. برای  $R_n \geq 0.75$  بعد از مقاومت برشی بیشینه، رفتار نرم‌شدگی برای تنش برشی دیده می‌شود و در نهایت به حالت بحرانی می‌رسد. با افزایش پارامتر زبری نسبی از ۰/۵ به ۲، مقاومت برشی بیشینه از حدود ۱۰۰ کیلو پاسکال به ۱۵۰ کیلو پاسکال افزایش می‌یابد. همچنین، پدیده محلی شدن کرنش به دلیل چرخش و غلتش ذرات خاک در تماس با سطح زبر صفحه پایینی با شدت بیش‌تری در نوار برشی به وقوع می‌پیوندد و کرنش حجمی در نوار برشی ایجاد شده در جوار سازه (صفحه صلب پایینی) از حدود ۰/۰۱ به ۰/۰۴ افزایش می‌یابد.

رفتار نرم‌شونده در منحنی تنش-کرنش یک نمونه متراکم تحت برش، ناشی از بازآرایی ذرات، حرکات غالباً چرخشی و غلتشی آن‌ها در مجاورت سازه، کاهش تماس‌های موثر بین ذرات، و انبساط حجمی در نواحی برشی است. این رفتار معمولاً به دنبال یک نقطه اوج مقاومت رخ می‌دهد. در نزدیکی نقطه اوج، ذرات خاک در حالت قفل‌شده هستند و اصطکاک و مقاومت برشی بالایی ایجاد می‌کنند. با افزایش تغییر شکل برشی و بازآرایی ذرات، مقاومت کاهش می‌یابد. در خاک‌های متراکم تحت بارگذاری برشی، به دلیل حرکت‌های عمدتاً چرخشی و غلتشی ذرات، خاک تمایل به انبساط حجمی دارد. این انبساط باعث کاهش تماس‌های موثر بین ذرات و در نتیجه افت مقاومت برشی نمونه می‌شود. با ادامه بارگذاری، تنش‌ها و کرنش‌های برشی در نواحی بسیار محدود متمرکز و نوارهای برشی در نمونه ایجاد می‌شوند. این فرآیند منجر به کاهش مقاومت خاک می‌شود.

<sup>33</sup> Bilinear trend

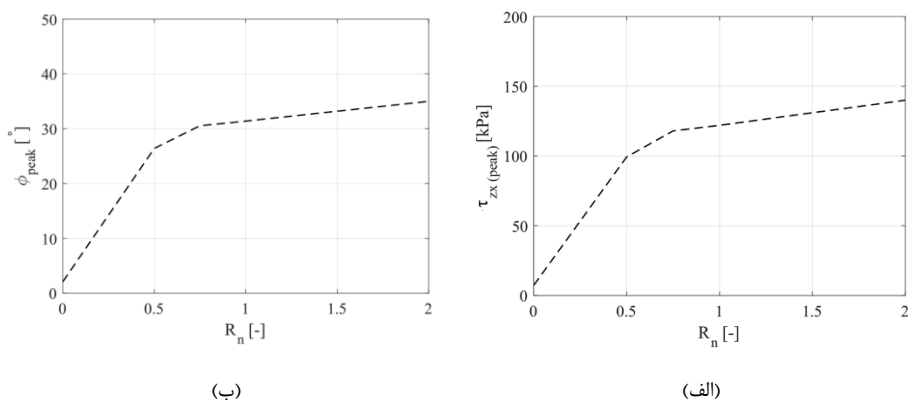
<sup>34</sup> Critical surface roughness

<sup>35</sup> Su et al.

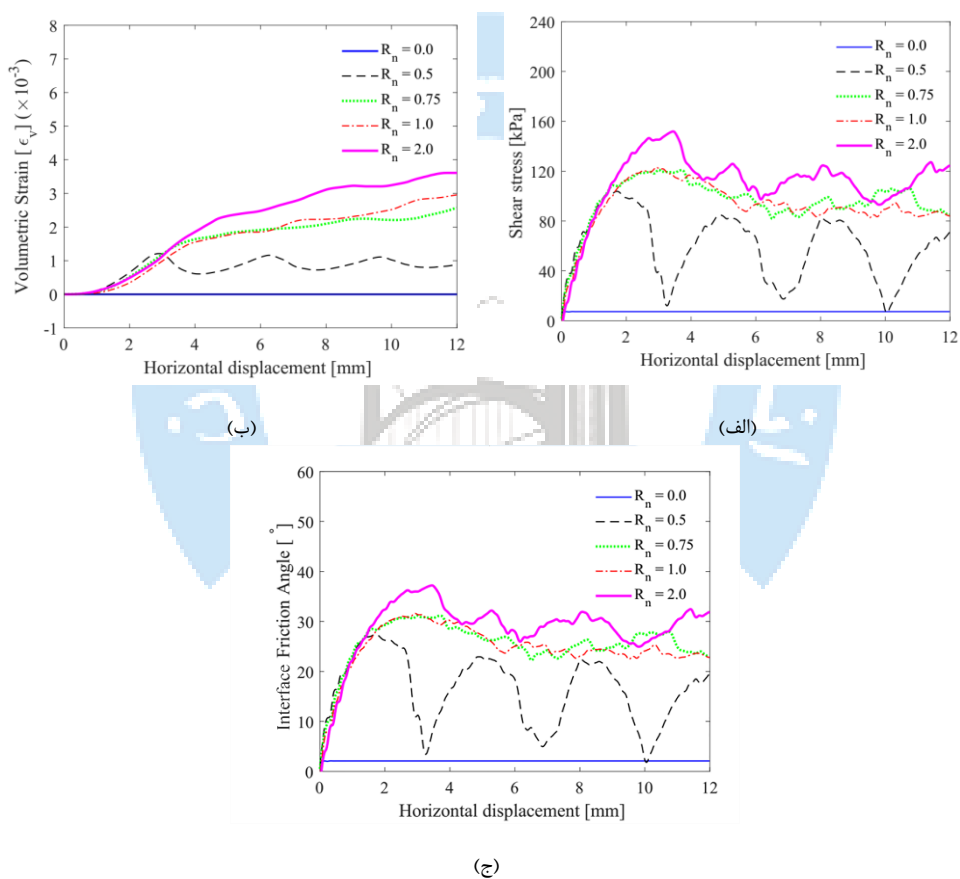
<sup>36</sup> Grabowski et al.

<sup>37</sup> Interlocking

<sup>38</sup> Periodic oscillation



شکل ۷- تغییرات: (الف) تنش برشی در راستای x، و (ب) زاویه اصطکاک بیشینه در سطح مشترک بر حسب مقادیر مختلف پارامتر زبری نسبی تحت تنش قائم ۲۰۰ کیلو پاسکال.



شکل ۸- تغییرات: (الف) تنش برشی، (ب) کرنش حجمی، و (ج) زاویه اصطکاک سطح مشترک بر حسب جابه‌جایی برشی برای مقادیر مختلف پارامتر زبری نسبی تحت تنش قائم ۲۰۰ کیلو پاسکال

## ۳-۲- بافت مصالح

از دیدگاه میکروسکوپیک، رفتار ماکرو خاک‌های دانه‌ای با تغییر بافت مصالح در اثر حرکت، چرخش و شکست ذرات خاک مرتبط است [۵۸ و ۵۹]. برای توصیف بافت مصالح غالباً از توزیع جهت‌گیری تماس‌ها<sup>۳۹</sup> استفاده می‌شود. برای مشاهده توزیع جهت‌گیری تماس‌ها از توزیع چگالی احتمال<sup>۴۰</sup>  $P(\vec{n})$  بردار واحد قائم تماس<sup>۴۱</sup>  $\vec{n}$  استفاده می‌شود:

$$P(\vec{n}) = \frac{N_c(d\Omega)}{N_c} \quad (۵)$$

که در آن،  $N_c$  تعداد کل تماس و  $N_c(d\Omega)$  تعداد تماس بردارهای قائم تماسی در محدوده زاویه  $d\Omega$  است.

هم‌چنین، برای توصیف عددی جهت‌گیری تماس‌های قائم در محیط دانه‌ای، تانسور مرتبه دوم<sup>۴۲</sup>  $F_{ij}$  توسط ستاک<sup>۴۳</sup> [۶۰] معرفی شده است:

$$F_{ij} = \frac{1}{N_c} \sum_{\alpha} n_i^{\alpha} n_j^{\alpha}, (i, j = x, y, z) \quad (۶)$$

که در آن،  $N_c$  تعداد کل تماس،  $n_i^{\alpha}$  بردار قائم تماس در تماس  $\alpha$ ام است. مقادیر ویژه تانسور  $F_{ij}$  حاصل، به ترتیب  $F_1$ ،  $F_2$  و  $F_3$  هستند. تفاوت بین این مقادیر نشان‌دهنده میزان ناهمسانی بافت<sup>۴۴</sup> است. برای مشخص کردن ناهمسانی بافت مصالح، بافت انحرافی<sup>۴۵</sup>  $F_{ij}$  با استفاده از رابطه بارتو<sup>۴۶</sup> و همکاران [۶۱] به دست می‌آید:

$$\delta_D = \frac{1}{\sqrt{2}} [(F_1 - F_2)^2 + (F_2 - F_3)^2 + (F_1 - F_3)^2]^{0.5} \quad (۷)$$

شکل ۹، نمودار تغییرات بافت انحرافی را بر حسب جابه‌جایی برشی برای مقادیر مختلف زبری نسبی در داخل و خارج ناحیه برشی نشان می‌دهد. برای  $R_n \geq 0.75$ ، این مقدار با افزایش جابه‌جایی برشی افزایش می‌یابد و به بیش‌ترین مقدار می‌رسد. در حین نرم‌شدگی، این مقدار کاهش می‌یابد و با رسیدن خاک به حالت پایدار<sup>۴۷</sup>، مقدار نسبتاً ثابتی را نشان می‌دهد. این نتایج در آزمایش برش مستقیم انجام شده توسط کوی و اسالیوان<sup>۴۸</sup> [۵۳] نیز مشاهده شده است. روند نمودار تغییرات بافت انحرافی بر حسب جابه‌جایی برشی در مقیاس میکرو مانند روند نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی برشی در مقیاس ماکرو است که دلالت بر رابطه بافت و مقاومت برشی دارد [۳۶]. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات این پارامتر در خارج ناحیه برشی نسبت به داخل آن متفاوت است و در خارج ناحیه برشی این تغییرات کم‌تر است. تفاوت مقدار اولیه بافت انحرافی در داخل ناحیه برشی، می‌تواند به دلیل ناهمگنی<sup>۴۹</sup> به وجود آمده در مرحله بارگذاری

<sup>39</sup> Contact orientation

<sup>40</sup> Probability density distribution

<sup>41</sup> Contact normal

<sup>42</sup> Second-order tensor

<sup>43</sup> Satake

<sup>44</sup> Fabric anisotropy

<sup>45</sup> Deviator fabric

<sup>46</sup> Barreto et al

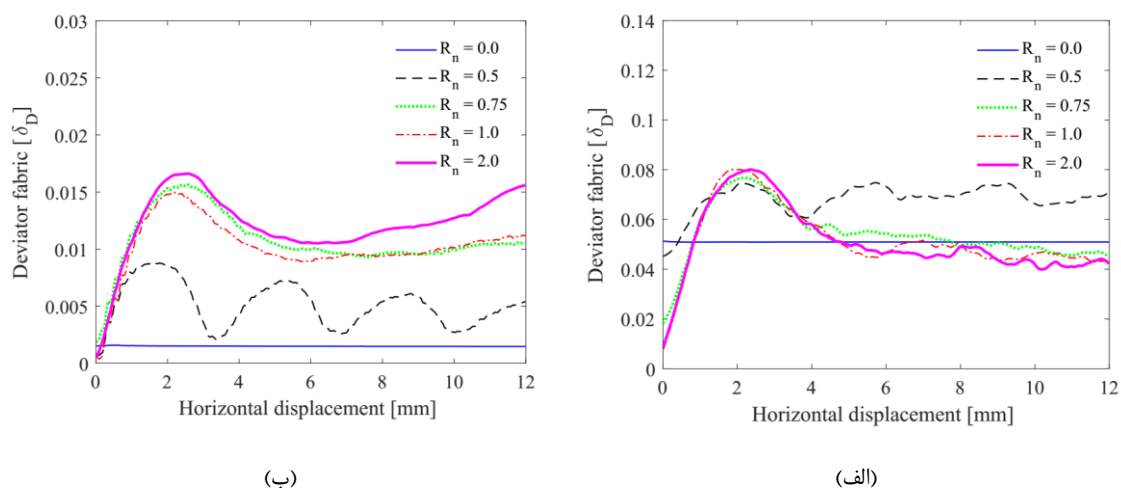
<sup>47</sup> Steady state

<sup>48</sup> Cui and O'Sullivan

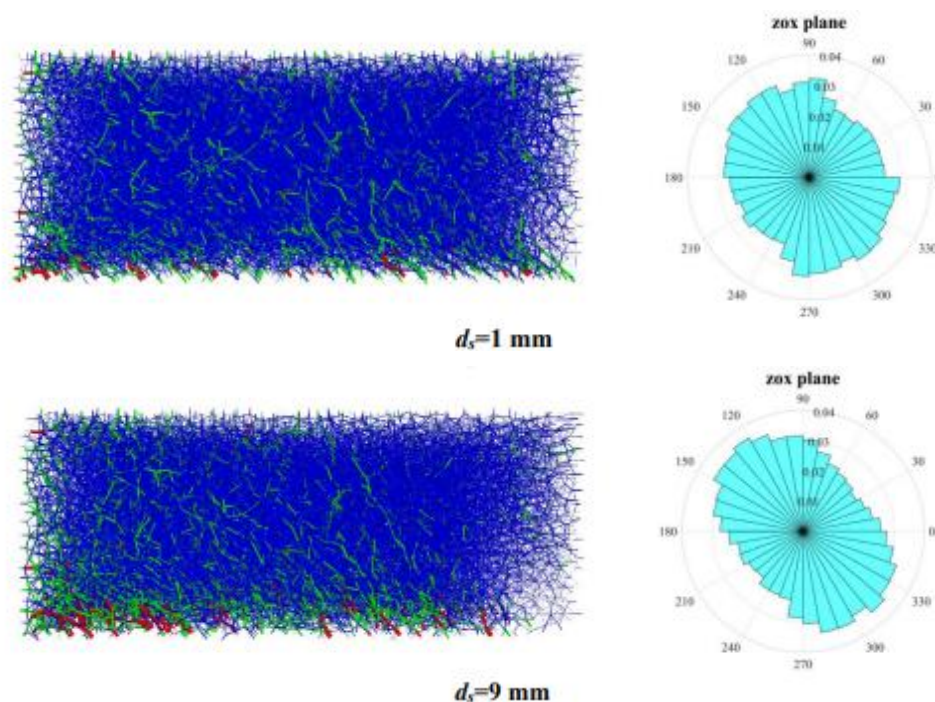
<sup>49</sup> Heterogeneity

قائم باشد. هم چنین وجود ناهمسانی بیش تر در ناحیه برشی به دلیل دنداندار بودن صفحه پایینی، می تواند تفاوت مقدار بافت انحرافی را در داخل و خارج ناحیه برشی در ابتدای مرحله برش توجیه نماید.

شکل ۱۰ توزیع زنجیره نیرو و توزیع چگالی احتمال  $P(\vec{n})$  بردار واحد قائم تماس  $\vec{n}$  را برای  $R_n=0.75$  تحت جابه جایی های ۱ و ۹ میلی متر نشان می دهد. توزیع چگالی احتمال پیش از رسیدن به مقاومت برشی بیشینه (جابه جایی ۱ میلی متر) به دایره شباهت دارد که نشان دهنده توزیع همسان زنجیره نیرو در شروع جابه جایی برشی است. در جابه جایی های برشی بیشتر، توزیع چگالی احتمال و زنجیره نیرو دارای جهت گیری مشخصی (شمال غربی - جنوب شرقی) هستند که این جهت گیری مرتبط با الگوی حرکت ذرات است. نازک شدن زنجیره نیرو نیز به دلیل اتساع در نمونه است [۶۲].

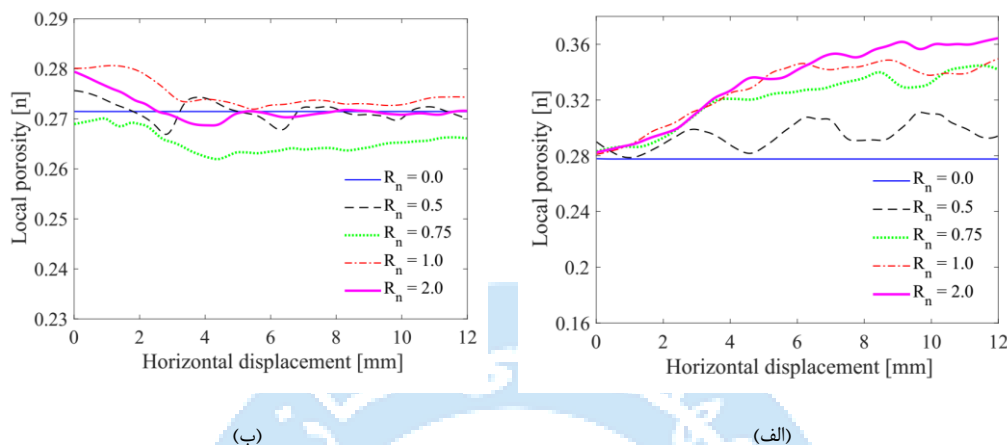


شکل ۹- تغییرات پارامتر بافت انحرافی برای مقادیر مختلف پارامتر زبری نسبی در: (الف) داخل ناحیه برشی، و (ب) خارج ناحیه برشی

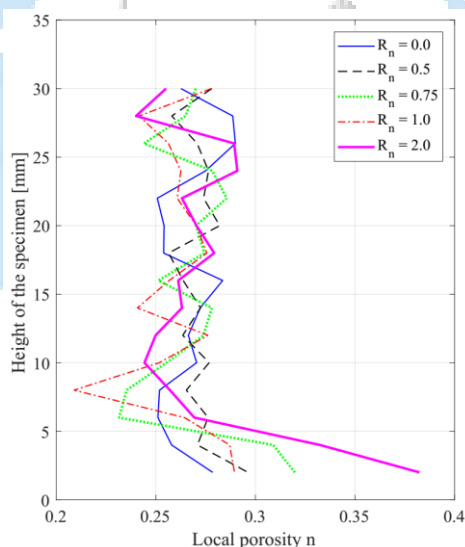


شکل ۱۰- توزیع زنجیره های نیرو و توزیع چگالی احتمال بردار واحد قائم تماس برای  $R_n=0.75$  در جابه جایی های ۱ و ۹ میلی متر

شکل ۱۱ تغییرات پوکی را برحسب جابه‌جایی برشی در داخل و خارج ناحیه برشی برای مقادیر مختلف زبری نسبی نشان می‌دهد. پوکی در داخل ناحیه برشی بیش‌تر از خارج آن است که این تفاوت نشان‌دهنده رفتار اتساعی در داخل ناحیه برشی است و رفتار تدریجاً از خاک متراکم به سست تغییر می‌یابد [۶۳]. در داخل ناحیه برشی تغییرات پوکی با افزایش زبری نسبی بیش‌تر می‌شود و در خارج ناحیه برشی، حجم نمونه پس از یک کاهش اولیه ناشی از اعمال بارگذاری قائم نسبتاً ثابت باقی می‌ماند. هم‌چنین، متفاوت بودن پوکی در ارتفاع‌های مختلف نمونه که در جابه‌جایی ۹ میلی‌متر در شکل ۱۲ نشان داده شده است، به دلیل ناهمگنی اولیه است [۳۶].



شکل ۱۱- تغییرات پوکی برای مقادیر مختلف پارامتر زبری نسبی در: (الف) داخل، و (ب) خارج ناحیه برشی



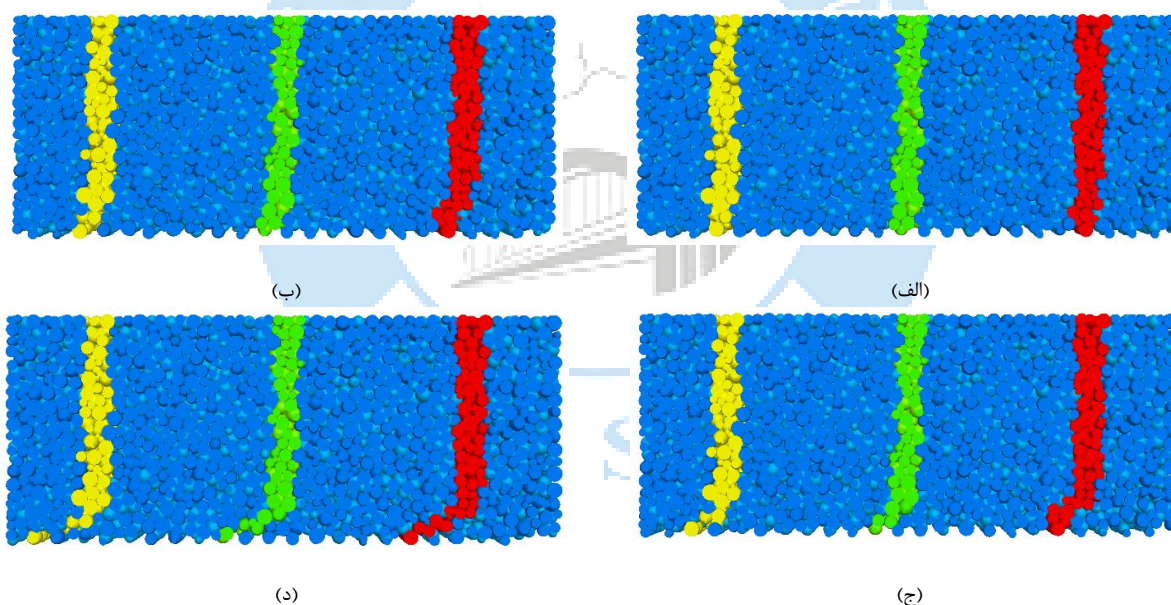
شکل ۱۲- توزیع پوکی در راستای ارتفاع نمونه برای مقادیر مختلف زبری نسبی در جابه‌جایی برشی ۹ میلی‌متر

### ۳-۳- تشکیل ناحیه برشی و تعیین ضخامت آن

ناحیه برشی معمولاً با ترسیم و دنبال کردن حرکت هر ذره در جابه‌جایی‌های مختلف بررسی می‌شود. شکل ۱۳ سه ستون از ذرات در موقعیت‌های مختلف را در جابه‌جایی‌های متفاوت برای  $R_n=1$  نشان می‌دهد. با افزایش جابه‌جایی برشی از ۱ به ۹ میلی‌متر، حرکت ذرات نزدیک به صفحه پایینی بیش‌تر می‌شود. در شبیه‌سازی انجام شده برای  $R_n=1$ ، محلی شدن کرنش در جابه‌جایی برشی ۱ میلی‌متر با ظاهر شدن دو گسیختگی<sup>۵۰</sup> ( $S_1$ ) در دو انتهای جعبه شروع می‌شود (شکل ۱۴-الف). با ادامه جابه‌جایی برشی و با رسیدن به

<sup>50</sup> Rupture

مقاومت برشی بیشینه در جابه‌جایی ۳ میلی‌متر، گسیختگی دیگری ( $S_2$ ) نیز بعد از تشکیل  $S_1$  به صورت افقی در طول نمونه تشکیل می‌شود (شکل ۱۴-ب) که علت تحمیل شدن راستای این گسیختگی و موازی بودن آن با خط افق صفر<sup>۵۱</sup>، محدودیت جنبشی<sup>۵۲</sup> حرکت مرزها است. ناحیه برشی با گسترش گسیختگی‌های  $S_1$  و  $S_2$ ، تشکیل شده و ناحیه برآمده ماندنی<sup>۵۳</sup> همان‌طور که در شکل ۱۴-ج مشاهده می‌شود، به وجود می‌آید. بعد از مقاومت برشی بیشینه، متمرکز شدن ناحیه برشی اتفاق می‌افتد. سمت راست ناحیه تشکیل شده، که شیب آن زاویه بیش‌تری نسبت به محور افقی می‌سازد، ناحیه مقاوم<sup>۵۴</sup> و سمت چپ آن که شیب کم‌تری نسبت به محور افقی می‌سازد، ناحیه محرک<sup>۵۵</sup> نامیده می‌شوند. علت تفاوت شیب در این دو ناحیه، اتساع و مقاومت بسیج شده بزرگ‌تر در ناحیه مقاوم است [۴۶ و ۴۷]. در شکل ۱۵، میانگین جابه‌جایی و دوران ذرات در جابه‌جایی برشی ۹ میلی‌متر برای مقادیر مختلف زبری نسبی نشان داده شده‌اند. جابه‌جایی ذرات نشان می‌دهد که با کاهش مقدار زبری نسبی، ضخامت ناحیه برشی کاهش می‌یابد و برای  $R_n=0$ ، ناحیه برشی تشکیل نمی‌شود. با توجه به شکل ۱۲، ضخامت ناحیه برشی حاصل از توزیع پوکی برای  $R_n=0$  و  $R_n=0.5$  ناچیز است. جدول ۳ ضخامت ناحیه برشی محاسبه شده حاصل از توزیع جابه‌جایی، توزیع چرخش ذرات و توزیع پوکی و شکل ۱۶ ناحیه برشی تشکیل شده در جابه‌جایی ۹ میلی‌متر را برای مقادیر مختلف پارامتر زبری نسبی نشان می‌دهند. با افزایش زبری نسبی از ۰/۵ به ۲، ضخامت ناحیه برشی از  $D_{50}/2$  به  $4/53 D_{50}$  معادل ۴/۱ میلی‌متر افزایش می‌یابد. شکل ۱۷ تغییرات ضخامت ناحیه برشی را برحسب زبری نسبی در این مطالعه و مطالعه مارتینز و فراست [۶۵] نشان می‌دهد. رابطه بین ضخامت ناحیه برشی و پارامتر زبری نسبی دارای روند دوخطی است و در ابتدا با افزایش مقدار پارامتر زبری نسبی، ضخامت ناحیه برشی با شیب تندی افزایش یافته و پس از آن تغییرات جزئی است. این روند مشابه نتایج مارتینز و فراست [۶۵] در آزمایش برش پیچشی<sup>۵۶</sup> و برش محوری<sup>۵۷</sup> است.



شکل ۱۳- ستون‌هایی از ذرات در موقعیت‌های مختلف صفحه پایینی با  $R_n=1$  در جابه‌جایی‌های برشی: (الف) ۱، (ب) ۳، (ج) ۵، و (د) ۹ میلی‌متر

<sup>51</sup> Zero extension line

<sup>52</sup> Kinematic constraint

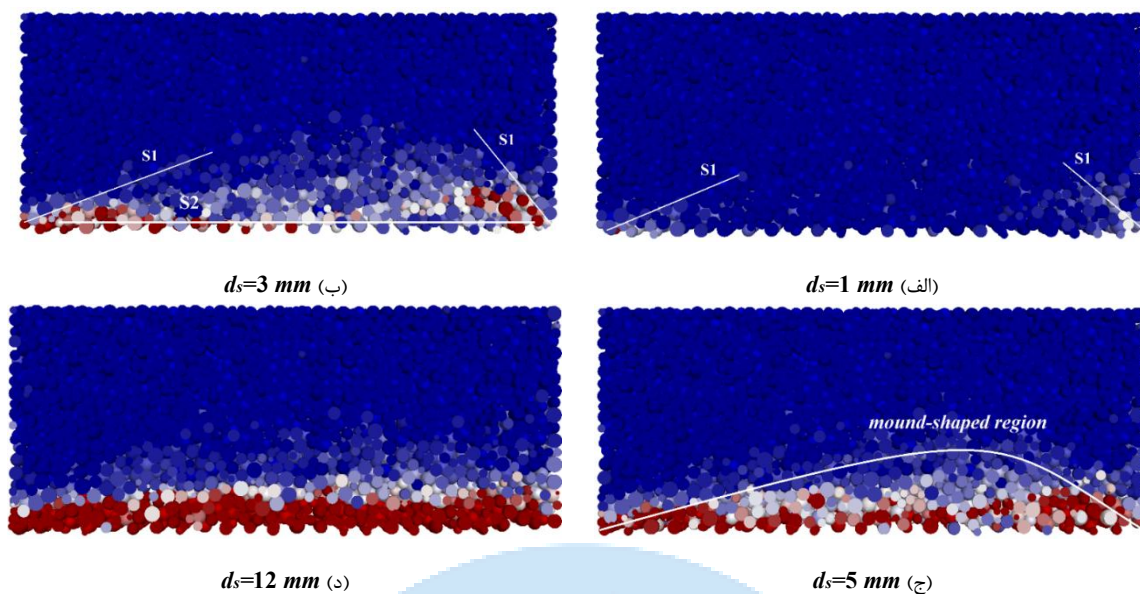
<sup>53</sup> Mound-shaped

<sup>54</sup> Passive zone

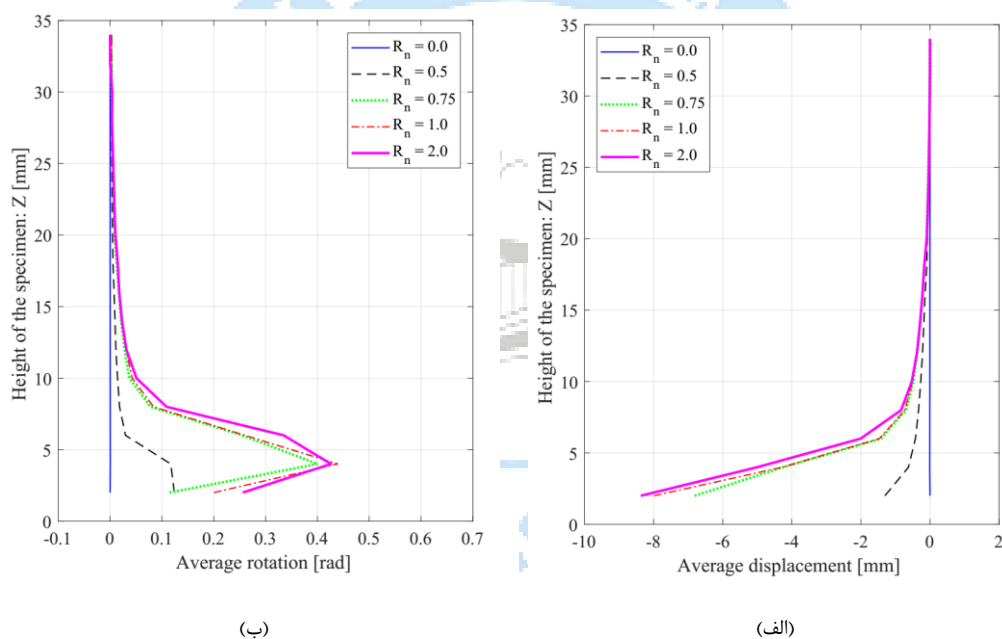
<sup>55</sup> Active zone

<sup>56</sup> Torsional shear

<sup>57</sup> Axial shear



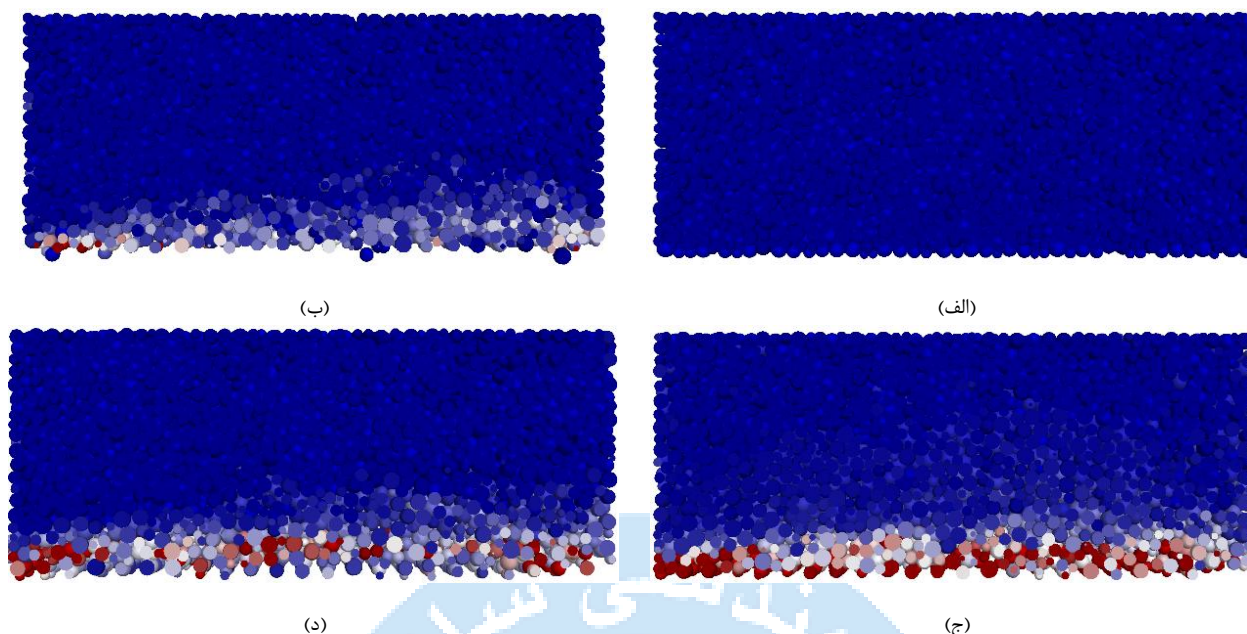
شکل ۱۴- توزیع چرخش ذرات و مراحل تشکیل ناحیه برشی در  $R_n=1$  در جابه‌جایی‌های: (الف) ۱، (ب) ۳، (ج) ۵، و (د) ۱۲ میلی‌متر



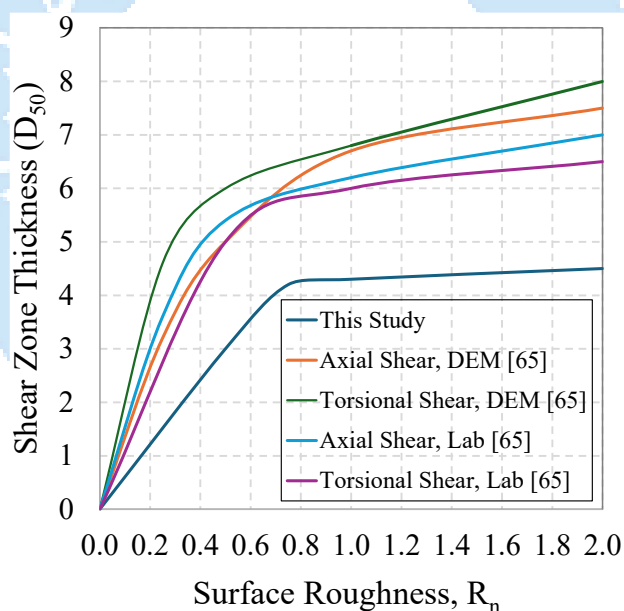
شکل ۱۵- تغییرات میانگین: (الف) جابه‌جایی، و (ب) دوران ذرات در جابه‌جایی برشی ۹ میلی‌متر برای مقادیر مختلف زبری نسبی

جدول ۳- ضخامت محاسبه شده ناحیه برشی برای مقادیر مختلف پارامتر زبری نسبی

پارامتر زبری نسبی	ضخامت ناحیه برشی حاصل از توزیع جابه‌جایی و چرخش ذرات		ضخامت ناحیه برشی حاصل
	ضخامت ناحیه برشی (mm)	ضخامت ناحیه برشی بر حسب $D_{50}$	از توزیع پوکی (mm)
۰	-	-	-
۰/۵	۳/۶	۲/۱	-
۰/۷۵	۷/۱	۴/۱۸	۶
۱/۰	۷/۲	۴/۲۴	۸
۲/۰	۷/۷	۴/۵۳	۱۰



شکل ۱۶- ناحیه برشی تشکیل شده در جابه‌جایی ۹ میلی‌متر برای مقادیر مختلف پارامتر زبری نسبی: (الف) ۰، (ب) ۰/۷۵، (ج) ۱، و (د) ۲



شکل ۱۷- رابطه ضخامت ناحیه برشی و پارامتر زبری نسبی در مطالعه حاضر و مطالعات مارتینز و فراست [۶۵]

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به شبیه‌سازی سه‌بعدی آزمایش برش سطح مشترک خاک - سازه تحت شرایط بارگذاری برشی مونوتونیک بین خاک دانه‌ای و سازه و بررسی اثر پارامتر زبری نسبی سازه بر رفتار برشی سطح مشترک با استفاده از روش اجزای منفصل پرداخته شده است. در همین راستا، با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای پارامتر زبری نسبی ( $R_n$  برابر با ۰، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۲) پاسخ سطح مشترک خاک - سازه از دیدگاه ماکرومکانیکی و میکرومکانیکی تحلیل شده است. برای نمایش هندسه سطح زیر صفحه پایینی به‌عنوان سطح سازه

از الگوی دندانه دار استاندارد با زوایای متناوب ۴۵ و ۱۳۵ درجه استفاده شده است. برای شبیه سازی تقریبی شکل ذرات ماسه نیز کره هایی با مدل تماسی خطی همراه با مقاومت چرخشی به کار گرفته شده اند. به طور خلاصه نتایج زیر به دست آمده اند:

- نمودارهای تغییرات تنش برشی و زاویه اصطکاک در سطح مشترک بر حسب پارامتر زبری نسبی روندی دوخطی را نشان می دهند که با افزایش مقدار پارامتر زبری نسبی، تنش برشی و زاویه اصطکاک بیشینه تا رسیدن به زبری بحرانی سطح  $(R_{n(crit)})$  0.5-0.75 با شیب تندی افزایش می یابند و پس از آن تغییراتشان جزئی است. این مسئله نشان دهنده اثر قابل توجه  $R_n$  بر رفتار مکانیکی سطح مشترک خاک - سازه است. افزایش  $R_n$  که همراه با چفت و بست بیش تر ذرات و سطح زبر است، باعث افزایش مقاومت برشی بیشینه و کرنش حجمی در سطح مشترک می شود. هنگامی که  $R_n=0$  است، ذرات خاک تمایل به لغزش در طول سطح تحت برش را دارند و رفتار کشسان-مومسان کامل در پاسخ تنش-کرنش خاک در مجاورت سطح سازه مشاهده می شود. با افزایش پارامتر زبری نسبی، پاسخ تنش-کرنش خاک در مجاورت سطح سازه به کشسان-مومسان همراه با نرم شوندگی تغییر می یابد. با تغییر زبری نسبی از ۰/۵ به ۲، مقاومت برشی بیشینه از ۱۰۰ کیلوپاسکال به ۱۵۰ کیلوپاسکال و کرنش حجمی از ۰/۰۱ به ۰/۰۴ افزایش می یابند.
- بافت انحرافی که بر مبنای تنسور بافت مصالح تعریف می شود، درجه ناهمسانی نمونه را پس از اعمال برش نشان می دهد و نمودار تغییرات آن بر حسب جابه جایی برشی در مقیاس میکرو مشابه نمودار تنش برشی بر حسب جابه جایی برشی در مقیاس ماکرو است که نشان دهنده ارتباط بافت و مقاومت برشی است. با افزایش زبری نسبی، میزان جهت گیری تماس ها به محور قائم نزدیک می شود و پوکی افزایش می یابد و رفتار نمونه اتساعی تر می شود.
- ضخامت ناحیه برشی که عامل بسیار مهمی در تخمین صحیح مقاومت برشی و نیروهای انتقالی از خاک به سازه و بالعکس است، به زبری سطح مشترک وابسته است. برای محاسبه ضخامت ناحیه برشی از روش های توزیع جابه جایی، توزیع چرخش ذرات و توزیع پوکی استفاده شده است. با افزایش زبری نسبی از ۰/۵ به ۲ با استفاده از توزیع جابه جایی و توزیع چرخش ذرات، ضخامت ناحیه برشی از  $D_{50} 2/1$  به  $D_{50} 4/53$  و به اندازه ۴/۱ میلی متر افزایش می یابد. نمودار تغییرات ضخامت ناحیه برشی بر حسب پارامتر زبری نسبی نیز دارای روندی دوخطی است که در ابتدا با افزایش زبری نسبی، ضخامت ناحیه برشی با شیب تندی افزایش می یابد و پس از آن تغییرات جزئی است.

## مراجع

- [1] Ebrahimian, B., Noorzad, A., & Alsaleh, M. I. (2012). Modeling shear localization along granular soil-structure interfaces using elasto-plastic Cosserat continuum. *International Journal of Solids and Structures*, 49(2), 257-278. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.09.005>
- [2] Ebrahimian, B., Noorzad, A., & Alsaleh, M. I. (2017). Modeling interface shear behavior of granular materials using micro-polar continuum approach. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 30(1), 95-126. <https://doi.org/10.1007/s00161-017-0588-4>
- [3] Wang, P., Yin, Z., Zhou, W., & Chen, W. (2021). Micro-mechanical analysis of soil-structure interface behavior under constant normal stiffness condition with DEM. *Acta Geotechnica*, 17(7), 2711-2733. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01374-8>
- [4] Wang, R., Ong, D. E. L., Peerun, M. I., & Jeng, D. (2022). Influence of surface roughness and particle Characteristics on Soil-Structure Interactions: A State-of-the-Art Review. *Geosciences*, 12(4), 145. <https://doi.org/10.3390/geosciences12040145>
- [5] Tejchman, J. (1997). Modelling of shear localisation and autogeneous dynamic effects in granular bodies. *Publication Series of the Institute for Soil Mechanics and Rock Mechanics*, 140, 1-335. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571698599493386880>
- [6] Dejong, J. T., White, D. J., & Randolph, M. F. (2006). Microscale observation and modeling of Soil-Structure interface behavior using particle image velocimetry. *Soils and Foundations*, 46(1), 15-28. <https://doi.org/10.3208/sandf.46.15>

- [7] Ebrahimiyan, B., & Bauer, E. (2011). Numerical simulation of the effect of interface friction of a bounding structure on shear deformation in a granular soil. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(12), 1486–1506. <https://doi.org/10.1002/nag.1059>
- [8] Bauer, E., & Ebrahimiyan, B. (2021). Investigations of granular specimen size effect in interface shear box test using a micro-polar continuum description. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45(17), 2467–2489. <https://doi.org/10.1002/nag.3273>
- [9] Dove, J., Bents, D., Wang, J., & Gao, B. (2006). Particle-scale surface interactions of non-dilative interface systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(3), 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2006.01.002>
- [10] Punetha, P., Mohanty, P., & Samanta, M. (2017). Microstructural investigation on mechanical behavior of soil-geosynthetic interface in direct shear test. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(3), 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2017.02.001>
- [11] Samanta, M., Punetha, P., & Sharma, M. (2018). Effect of roughness on interface shear behavior of sand with steel and concrete surface. *Geomechanics and Engineering*, 14(4), 387–398. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.14.4.387>
- [12] Alidadi, S., Alipour, R., & Shakeri, M. (2022). Fractures in non-homogeneous rockfill materials from a micromechanics perspective. *Journal of Hydraulic Structures*, 8(2), 27-39. <https://doi.org/10.22055/jhs.2022.41574.1225>
- [13] Alidadi, S., Alipour, R., & Shakeri, M. (2022). Influence of rockfill particle breakage on long-term settlement of embankment dams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 176(4), 315–325. <https://doi.org/10.1680/jgeen.21.00005>
- [14] Ebrahimiyan, B., & Alsaleh, M. I. (2023). Modeling isochoric and non-isochoric deformations in a polar elasto-plastic material. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 51(7), 4007-4031. <http://dx.doi.org/10.1080/15397734.2021.1949344>
- [15] Ebrahimiyan, B., Noorzad, A., & Alsaleh, M. I. (2019). A numerical study on interface shearing of granular Cosserat materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25(13), 2337–2369. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1627249>
- [16] Ebrahimiyan, B., Alsaleh, M. I., & Kahbasi, A. (2021). Comparative FE-studies of interface behavior of granular Cosserat materials under constant pressure and constant volume conditions. *Archives of Mechanics*, 73(5-6), 421-470. <http://doi.org/10.24423/aom.3726>
- [17] Potyondy, J. G. (1961). Skin friction between various soils and construction materials. *Géotechnique*, 11(4), 339–353. <https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.4.339>
- [18] Martinez, A., Frost, J. D., & Hebler, G. L. (2015). Experimental study of shear zones formed at Sand/Steel interfaces in axial and torsional axisymmetric tests. *Geotechnical Testing Journal*, 38(4), 20140266. <https://doi.org/10.1520/gtj20140266>
- [19] Hebler, G. L., Martinez, A., & Frost, J. D. (2015). Shear zone evolution of granular soils in contact with conventional and textured CPT friction sleeves. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), 1267–1282. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0767-6>
- [20] Porcino, D., Fioravante, V., Ghionna, V., & Pedroni, S. (2003). Interface Behavior of Sands from Constant Normal Stiffness Direct Shear Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 26(3), 289–301. <https://doi.org/10.1520/gtj11308j>
- [21] Sharma, M., Samanta, M., & Sarkar, S. (2017). Laboratory study on pullout capacity of helical soil nail in cohesionless soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(10), 1482–1495. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0243>
- [22] Zhao, C., Zhang, R., Zhao, C., Wang, W., & Wang, Y. (2021). A three-dimensional evaluation of interface shear behavior between granular material and rough surface. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(2), 713–727. <https://doi.org/10.1520/jte20180749>
- [23] Brumund, W., & Leonards, G. (1973). Experimental study of static and dynamic friction between sand and typical construction materials. *Journal of Testing and Evaluation*, 1(2), 162–165. <https://doi.org/10.1520/jte10893j>
- [24] Feng, S., Liu, X., Chen, H., & Zhao, T. (2017). Micro-mechanical analysis of geomembrane-sand interactions using DEM. *Computers and Geotechnics*, 94, 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.08.019>
- [25] Chen, W., Zhou, W., & Santos, J. a. D. (2020). Analysis of consistent soil–structure interface response in multi-directional shear tests by discrete element modeling. *Transportation Geotechnics*, 24, 100379. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100379>
- [26] Guo, J., Wang, X., Lei, S., Wang, R., Kou, H., & Wei, D. (2020). Effects of groove feature on shear behavior of Steel-Sand interface. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2020/9593187>

- [27] Zhou, W., & Yin, Z. (2022). Practice of Discrete Element Method in Soil-Structure Interface Modelling. Springer Nature, 260 Pages. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-0047-1>
- [28] Kishida, H., & Uesugi, M. (1987). Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus. *Géotechnique*, 37(1), 45–52. <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.1.45>
- [29] Farhadi, B., & Lashkari, A. (2015). Study on the influence of roughness on the strength and volume change behaviors of sand-steel interfaces. *Experimental Research in Civil Engineering*, 2(3), 35–45.
- [30] Ebrahimian, B., Noorzad, A., & Alsaleh, M. I. (2012). FE simulation of shear localization along granular soil–structure interfaces using micro-polar elasto-plasticity. *Mechanics Research Communications*, 39(1), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2011.10.001>
- [31] Uesugi, M., & Kishida, H. (1986). Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel. *Soils and Foundations*, 26(4), 139–149. [https://doi.org/10.3208/sandf1972.26.4\\_139](https://doi.org/10.3208/sandf1972.26.4_139)
- [32] Frost, J., DeJong, J., & Recalde, M. (2002). Shear failure behavior of granular–continuum interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(17), 2029–2048. [https://doi.org/10.1016/s0013-7944\(02\)00075-9](https://doi.org/10.1016/s0013-7944(02)00075-9)
- [33] Hu, L., & Pu, J. (2004). Testing and modeling of soil-structure interface. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 851–860. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2004\)130:8\(851](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:8(851)
- [34] Zhu, H., Zhou, W., & Yin, Z. (2017). Deformation mechanism of strain localization in 2D numerical interface tests. *Acta Geotechnica*, 13(3), 557–573. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0561-1>
- [35] Martinez, A., & Frost, J. D. (2017). The influence of surface roughness form on the strength of sand–structure interfaces. *Géotechnique Letters*, 7(1), 104–111. <https://doi.org/10.1680/jgele.16.00169>
- [36] Jing, X., Zhou, W., Zhu, H., Yin, Z., & Li, Y. (2017). Analysis of soil-structural interface behavior using three-dimensional DEM simulations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 42(2), 339–357. <https://doi.org/10.1002/nag.2745>
- [37] Su, L., Zhou, W., Chen, W., & Jie, X. (2018). Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface. *Measurement*, 122, 339–346. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.003>
- [38] Zhang, N., & Evans, T. M. (2018). Three-dimensional discrete element method simulations of interface shear. *Soils and Foundations*, 58(4), 941–956. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.05.010>
- [39] Wang, H., Zhou, W., Yin, Z., & Jie, X. (2019). Effect of grain size distribution of sandy soil on shearing behaviors at Soil–Structure Interface. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002880](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002880)
- [40] Han, F., Ganju, E., Prezzi, M., & Salgado, R. (2019). Closure to “Effects of interface roughness, particle geometry, and gradation on the sand–steel interface friction angle” by Fei Han, Eshan Ganju, Rodrigo Salgado, and Monica Prezzi, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(11). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002172](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002172)
- [41] Jing, X., Zhou, W., & Li, Y. (2017). Interface direct shearing behavior between soil and saw-tooth surfaces by DEM simulation. *Procedia Engineering*, 175, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.011>
- [42] Grabowski, A., Nitka, M., & Tejchman, J. (2020). 3D DEM simulations of monotonic interface behaviour between cohesionless sand and rigid wall of different roughness. *Acta Geotechnica*, 16(4), 1001–1026. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01085-6>
- [43] He, X., Xu, H., Li, W., & Sheng, D. (2020). An improved VOF-DEM model for soil-water interaction with particle size scaling. *Computers and Geotechnics*, 128, 103818. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103818>
- [44] Huang, X., O’Sullivan, C., Hanley, K. J., & Kwok, C. Y. (2014). Discrete-element method analysis of the state parameter. *Géotechnique*, 64(12), 954–965. <https://doi.org/10.1680/geot.14.p.013>
- [45] Wang, P., & Yin, Z. (2022). Effect of particle breakage on the behavior of soil-structure interface under constant normal stiffness condition with DEM. *Computers and Geotechnics*, 147, 104766. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104766>
- [46] Wang, J., Gutierrez, M. S., & Dove, J. E. (2007). Numerical studies of shear banding in interface shear tests using a new strain calculation method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31(12), 1349–1366. <https://doi.org/10.1002/nag.589>
- [47] Huang, W., Huang, L., Sheng, D., & Sloan, S. W. (2014). DEM modelling of shear localization in a plane Couette shear test of granular materials. *Acta Geotechnica*, 10(3), 389–397. <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0348-6>
- [48] Zhu, H., Nguyen, H., Nicot, F., & Darve, F. (2016). On a common critical state in localized and diffuse failure modes. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 95, 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2016.05.026>
- [49] Liu, Y., Liu, H., & Mao, H. (2018). The influence of rolling resistance on the stress-dilatancy and fabric anisotropy of granular materials. *Granular Matter*, 20(1). <https://doi.org/10.1007/s10035-017-0780-z>

- [50] Zhao, S., Evans, T. M., & Zhou, X. (2018). Shear-induced anisotropy of granular materials with rolling resistance and particle shape effects. *International Journal of Solids and Structures*, 150, 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.06.024>
- [51] Ai, J., Chen, J., Rotter, J. M., & Ooi, J. Y. (2010). Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. *Powder Technology*, 206(3), 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.030>
- [52] Dong, Y., Fatahi, B., Khabbaz, H., & Zhang, H. (2018). Influence of particle contact models on soil response of poorly graded sand during cavity expansion in discrete element simulation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(6), 1154–1170. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.009>
- [53] Cui, L., & O'Sullivan, C. (2006). Exploring the macro- and micro-scale response of an idealised granular material in the direct shear apparatus. *Géotechnique*, 56(7), 455–468. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.7.455>
- [54] Lommen, S., Schott, D., & Lodewijks, G. (2013). DEM speedup: Stiffness effects on behavior of bulk material. *Particuology*, 12, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.03.006>
- [55] Ng, T. (2006). Input parameters of discrete element methods. *Journal of Engineering Mechanics*, 132(7), 723–729. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2006\)132:7\(723](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2006)132:7(723)
- [56] Cerato, A., & Lutenecker, A. (2006). Specimen size and scale effects of direct shear box tests of sands. *Geotechnical Testing Journal*, 29(6), 507–516. <https://doi.org/10.1520/gtj100312>
- [57] Wang, J., Dove, J. E., Gutierrez, M. S., & Corton, J. (2005). Shear deformation in the interphase region. *Powders and grains*, 747-750. <https://doi.org/10.1201/noe0415383486>
- [58] Oda, M. (1972). The mechanism of fabric changes during compressional deformation of sand. *Soils and Foundations*, 12(2), 1–18. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.12.1>
- [59] Yin, Z., & Chang, C. S. (2011). Stress–dilatancy behavior for sand under loading and unloading conditions. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(8), 855–870. <https://doi.org/10.1002/nag.1125>
- [60] Satake, M. (1982). Fabric tensor in granular materials. In *IUTAM-Conference on Deformation and Failure of Granular Materials*, 63-68. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571980075689604736>
- [61] Barreto, D., O'Sullivan, C., Zdravkovic, L., Nakagawa, M., & Luding, S. (2009). Quantifying the evolution of soil fabric under different stress paths. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.3179881>
- [62] Lü, X., Ma, Y., Qian, J., & Huang, M. (2019). Discrete-element simulation of scaling effect of strain localization in dense granular materials. *International Journal of Geomechanics*, 19(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001443](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001443)
- [63] Alshibli, K. A., & Hasan, A. (2008). Spatial variation of void ratio and shear band thickness in sand using X-ray computed tomography. *Géotechnique*, 58(4), 249–257. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.4.249>
- [64] Wang, J. (2006). Micromechanics of Granular Media: A Fundamental study of Interphase systems, *Ph.D. Dissertation*, Virginia tech. <http://hdl.handle.net/10919/27216>
- [65] Martinez, A., & Frost, J. (2016). Particle-scale effects on global axial and torsional interface shear behavior. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 41(3), 400–421. <https://doi.org/10.1002/nag.2564>