



## شبیه سازی رفتار دینامیکی مصالح دانه ای به روش اجزای منفصل

نازنین محبوبی مطلق، احمدرضا محبوبی اردکانی\*، علی نورزاد

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۰  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۳  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

### کلمات کلیدی:

خاک های دانه ای  
آزمایش های سیکلی  
ویژگی های دینامیکی  
شکل ذرات  
شبیه سازی به روش اجزای منفصل

**خلاصه:** خاک های دانه ای، پاسخ های ماکروسکوپیکی پیچیده ای تحت بارگذاری های لرزه ای دارند. با توجه به کاربردهای فراوان نتایج حاصل از آزمایش سه محوری دینامیکی، نیاز به مدل سازی عددی این آزمایش برای سهولت در پیش بینی رفتار خاک ها و کاهش هزینه های انجام آزمون های آزمایشگاهی احساس می شود. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی توانایی روش اجزای منفصل در مطالعه رفتار دینامیکی ماسه به کمک شبیه سازی تعدادی آزمایش سه محوری دینامیکی زهکشی شده تنش کنترل در شرایط سه بعدی می باشد. همچنین تاثیر پارامترهایی نظیر تعداد سیکل های بارگذاری، تراکم نسبی خاک، نسبت تنش تناوبی اعمال شده، شکل ذرات و نحوه بارگذاری بر ویژگی های دینامیکی خاک دانه ای (مدول برشی و نسبت میرایی) نیز در این مطالعه مد نظر قرار گرفته است. نتایج نشان می شود که شبیه سازی عددی به روش اجزای منفصل می تواند تغییرات ویژگی های دینامیکی خاک نسبت به متغیرهای در نظر گرفته شده را با دقت قابل قبولی ارائه کند. مقایسه نتایج تجربی موجود در متون فنی و مدل سازی های عددی انجام شده در این پژوهش نشان می دهد که در نسبت تنش تناوبی و تخلخل یکسان، نرخ کاهش مدول برشی و افزایش نسبت میرایی با کرنش برشی برای نمونه ها با ذرات غیر کرووی بیشتر از ذرات کرووی است. نسبت تنش تناوبی اعمالی تاثیر قابل توجهی بر مدول برشی، نسبت میرایی و متوسط تعداد تماس ها در نمونه ها ندارد. متوسط تعداد تماس ها در نمونه با ذرات کرووی و غیر کرووی (در نسبت تخلخل ۰/۳) در انتهای آزمایش به ترتیب ۷/۷ و ۶/۴ به دست آمده است. در شرایط یکسان، نمونه با ذرات غیر کرووی دچار تغییر شکل بیشتری شده است.

### ۱-مقدمه

ضروری به نظر می رسد. جهت دستیابی به طراحی بهینه و ایمن، اولین گام، شناخت رفتار واقعی مصالح در حین اعمال بارهای زلزله است. استفاده از هر مدل یا روش تحلیلی برای توصیف یک نهشته خاکی و تعیین عکس العمل لرزه ای آن نیازمند محاسبه خصوصیات تنش - کرنش و میزان انرژی جذب شده خاک می باشد.

در رابطه با رفتار خاک ها تحت بارهای دینامیکی، به دلیل پیچیدگی مسائل، گستردگی و وسعت موضوعات، علیرغم مطالعات، تحقیقات و کارهای مختلفی که تا به حال صورت گرفته و دستاوردهای ارزشمند و راه گشایی که در بر داشته است، هنوز زمینه های بسط مطالعات، تبیین روش ها و گسترش تحقیقات به منظور آشنایی بیشتر

در مسیر توسعه مهندسی ژئوتکنیک، مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی خاک ها یکی از مهم ترین فعالیت های محققین می باشد؛ چرا که اولین و مهم ترین عامل پایداری سازه ها در زمینه ژئوتکنیکی، عامل مقاومت و تغییر شکل پذیری است. از سوی دیگر، نیروی زلزله مهم ترین نیروی وارد بر بدنه سازه های خاکی می باشد. با توجه به اینکه هر ساله در نقاط مختلف جهان و از جمله در کشور ما، هزینه های هنگفتی برای اجرای پروژه های خاکی صرف می گردد، دقت و توجه هر چه بیشتر در امر طراحی و اجرای این پروژه ها

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: a\_mahboubi@sbu.ac.ir

پایین، رفتار دینامیکی خاک را بررسی کرد. در سال ۱۹۷۶، ایواساکی، تسوکا و تکاگی<sup>۴</sup> [۷] با انجام آزمایش های ستون تشدید و برش سیکلی پیچشی روی ماسه توپورا، مدول برشی و ارتباط آن با کرنش را مطالعه کردند. کوکوشو<sup>۵</sup> [۸] با انجام آزمایش سه محوری سیکلی در شرایط زهکشی نشده بر روی نمونه هایی از ماسه توپورا (نمونه به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر) گزارش کرد که تعداد سیکل های بارگذاری تاثیر کمی بر مدول برشی و نسبت میرایی نمونه ها دارد. با افزایش کرنش برشی، مدول برشی کاهش و نسبت میرایی افزایش می یابد. نسبت تخلخل نمونه ها نیز تاثیر کمتری بر مدول برشی و نسبت میرایی آن ها دارد. کوکوشو و اساشی<sup>۶</sup> [۹] جهت محاسبه خواص دینامیکی مصالح درشت دانه، مطالعات جامعی با استفاده از دستگاه سه محوری سیکلی قطر بزرگ انجام دادند. نمونه هایی به قطر ۳۰۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی متر از مصالح شنی شکسته و گردگوشه تهیه کردند. مشاهده گردید که مدول برشی اولیه نمونه حاوی شن شکسته، حدود ۴۰ درصد بیشتر از شن گردگوشه است. مدول برشی اولیه مصالح درشت دانه تا حدود زیادی تابع شکل ذرات است؛ به این صورت که سنگ خرد شده گوشه دار بزرگترین مدول برشی اولیه و شن گردگوشه، کوچکترین مدول برشی اولیه را دارد. جعفری و جعفرزاده<sup>۷</sup> [۱۰] اثر تنش همه جانبه بر خصوصیات دینامیکی ماسه بابلسر را بررسی کردند. نتایج آزمایش ها نشان داد که با افزایش تنش همه جانبه، مدول برشی افزایش و نسبت میرایی کاهش یافته است. همچنین نشان داده شد که با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری، مدول برشی کاهش پیدا می کند. میدانی<sup>۸</sup> و همکاران [۱۱] به منظور ارزیابی رفتار سیکلی مخلوط شن- رس، ۵۱ آزمایش سه محوری تک سویه<sup>۹</sup> و دو سویه<sup>۱۰</sup> روی نمونه ها با درصد های اختلاط متفاوت از شن و رس تحت فشارهای همه جانبه مختلف انجام دادند. از دو نوع شن گردگوشه و تیزگوشه در نمونه ها با درصد شن یکسان استفاده شد تا اثر شکل ذرات نیز روی رفتار سیکلی مخلوط ها تعیین گردد. جعفریان<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۲] به مطالعه مدول برشی ماسه کربناتی بوشهر با استفاده از آزمایش های ستون تشدید و سه محوری سیکلی

رفتار واقعی خاک ها کاملا احساس می شود و قطعا با پیشرفت در این زمینه، شناخت و اطلاعات دقیق تری به دست خواهد آمد.

آزمایش سه محوری تناوبی از پرکاربردترین آزمون های آزمایشگاهی برای ارزیابی مقاومت دینامیکی خاک ها می باشد. تعیین مدول برشی و نسبت میرایی و تغییرات این پارامترها با کرنش برشی یکی از مهم ترین اقدامات برای مطالعه پاسخ لایه های خاک به بارهای دینامیکی است. ارزیابی صحیح این پارامترها هم برای درک اساسی از رفتار خاک و هم برای استفاده در تحلیل مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه ای از اهمیت بالایی برخوردار است. پارامترهای موثر بر مدول برشی حداکثر، مدول برشی و نسبت میرایی عبارتند از تنش محدود کننده، تعداد سیکل یا تاریخچه کرنش، دست خوردگی، درصد ریزدانه، درصد شن، دانسیته نسبی، فرکانس بارگذاری، شرایط زهکشی، شکل بارگذاری، ناهمسانی، نوع خاک، شکل دانه ها، مقدار شاخص خمیری و حتی دستگاه انجام آزمایش.

از آنجایی که انجام آزمایش های دینامیکی بر روی مصالح مختلف اغلب نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی می باشد، شبیه سازی های عددی می تواند به عنوان راهکاری مناسب برای پیش بینی رفتار مصالح به حساب آید. آزمایش های تجربی می توانند با روش اجزای منفصل به صورت عددی مدل سازی شوند. این روش نخستین بار توسط کاندال و استرک<sup>۱</sup> [۱] برای ارزیابی سازوکار مصالح دانه ای در مقیاس ذره پیشنهاد شد. روش اجزای مجزا یا به اختصار DEM<sup>۲</sup> به عنوان یک روش جدید می تواند رفتار مصالح دانه ای را به روش واقع گرایانه و بدون تحمیل مدل های رفتاری پیچیده پیش بینی نماید [۴-۲]. توسعه چنین روش های مدل سازی پیشرفته و کارآمدی که توانایی تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی مصالح دانه ای را داشته باشند، یکی دیگر از مواردی است که بایستی بیشتر به آن پرداخته شود.

خاک های دانه ای در موقعیت های متفاوتی بارهای سیکلی را تجربه می کند؛ مانند ترافیک، باد، امواج و تراکم. تلاش های قابل توجهی جهت تعیین خواص دینامیکی خاک ها به صورت تجربی توسط محققین مختلف صورت گرفته است. اولین مطالعات مربوط به پاسخ دینامیکی خاک ها به حدود ۸۰ سال پیش باز می گردد که آیدا<sup>۳</sup> [۶] و [۵] با انجام آزمایش ستون تشدید تحت فشار محصور کننده بسیار

4 Iwasaki, Tatsuoka & Takagi

5 Kokusho

6 Kokusho & Esashi

7 Jafari & Jafarzadeh

8 Meidani

9 Monotonic

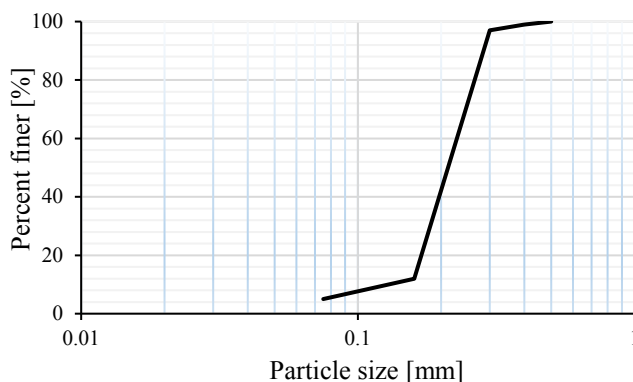
10 Cyclic

11 Jafarian

1 Cundall & Strack

2 Distinct Element Method

3 Iida



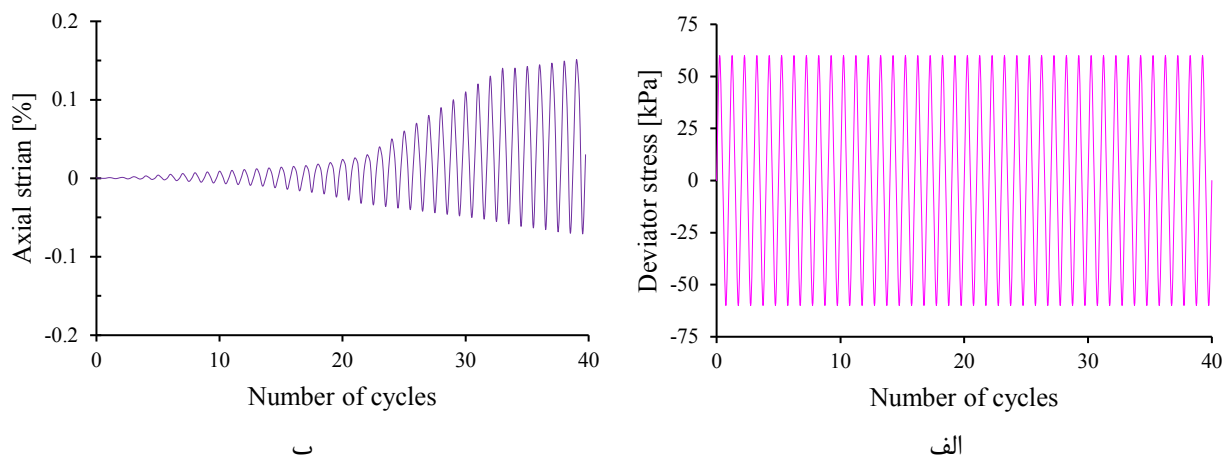
شکل ۱. منحنی توزیع اندازه ذرات [۲۴]  
 Fig. 1. Particle size distribution curve

است. مشاهده می شود که نسبت میرایی تحت تاثیر تعداد سیکل ها، فشار همه جانبه اولیه، دانه بندی و مسیر تنش است؛ در حالی که مدول برشی نیز به فشار همه جانبه اولیه، نسبت تخلخل، دانه بندی و ناهمسانی اولیه بستگی دارد. وینود و همکاران [۱۷] نشان دادند که روش اجزای منفصل (نرم افزار تروبال<sup>۵</sup>) قابلیت شبیه سازی رفتار دینامیکی مصالح دانه ای مشابه با شرایط آزمایشگاهی را دارد. آن ها از ۱۰۰۰ ذره کروی شکل با قطر بین ۰/۲ تا ۲ میلی متر و مدل تماس خطی نیرو-جابجایی برای شبیه سازی آزمایش سه محوری سیکلی زهکشی نشده کرنش کنترل با فرکانس ۱/۴۲ هرترز استفاده کردند. مان و ساتیام<sup>۶</sup> [۱۸] برای درک رفتار خاک های دانه ای (ماسه) تحت بارهای سیکلی، آزمایش سه محوری دینامیکی را به صورت سه بعدی روی ذرات کروی شکل با DEM (نرم افزار PFC<sup>3D</sup>) مدل سازی کردند. نتایج تحلیل ها نشان می دهد که در فشار همه جانبه و بار محوری سیکلی معین، نمونه با ذرات یکنواخت، مقاومت بیشتری در مقابل گسیختگی، نسبت به نمونه با توزیع غیریکنواخت ذرات دارد. نتایج پژوهش مان و ساتیام [۱۹] مشخص می کند که مدول برشی به نسبت تخلخل خیلی وابسته نیست و حداکثر مدول برشی با افزایش ضریب یکنواختی ذرات کاهش می یابد. نگوین<sup>۷</sup> و همکاران [۲۰] آزمایش سه محوری سیکلی تنش کنترل در دامنه ها و فرکانس های مختلف روی نمونه های مکعبی را مدل سازی کردند. فیوسینگ و سوزوکی<sup>۸</sup> [۲۱] رفتار مصالح دانه ای را تحت مسیرهای تنش سیکلی متفاوت بررسی کردند. این نتایج تایید می کند که رفتار سیکلی خاک

پرداختند. آن ها دریافتند که افزایش فشار محدود کننده میانگین و همچنین دانسیته نسبی، افزایش مدول برشی خاک را به دنبال دارد. توجه به هزینه بر و زمان بر بودن آزمایش های دینامیک خاک، توسعه مدلی که بتواند رفتار خاک های دانه ای تحت بارهای سیکلی را به طور موفقیت آمیزی تصویر کند، یک چالش بزرگ است. به عنوان مثال مدل توسعه یافته توسط نوس<sup>۱</sup> و همکاران [۱۳] بر اساس روش اجزای محدود توانست با دقت مناسبی رفتار ماسه تحت بارهای سیکلی را پیش بینی کند. در سال های اخیر، مدل سازی به کمک روش اجزای منفصل به منظور ارزیابی رفتار سیکلی خاک های دانه ای مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال، سیتارام<sup>۲</sup> [۱۴] برای درک اثر بارگذاری سیکلی روی پاسخ خاک دانه ای، آزمایش های دو محوری سیکلی با دامنه کرنش ثابت روی مجموعه ای از ذرات در قالب مکعبی شکل (به صورت متراکم و غیر متراکم) در دو حالت زهکشی شده و نشده را شبیه سازی کرد. اوسولیوان<sup>۳</sup> و همکاران [۱۵] تعدادی آزمایش سه محوری سیکلی در حالت کرنش کنترل با دامنه های کرنش متفاوت بر روی مصالح دانه ای ایده آل (ذرات کروی فولادی) برای مطالعه پاسخ های میکرو و ماکروسکوپی مصالح را مدل سازی نمودند. در مطالعه سیتارام و وینود<sup>۴</sup> [۱۶]، اثر پارامترهای مختلف مانند تعداد سیکل های بارگذاری، فشار همه جانبه، نسبت تخلخل، دانه بندی، ناهمسانی اولیه و مسیر تنش بر ویژگی های دینامیکی مصالح دانه ای کروی شکل (مانند مدول برشی و نسبت میرایی) در محفظه مکعبی با استفاده از روش اجزای منفصل بررسی شده

5 TRUBAL  
 6 Manne & Satyam  
 7 Nguyen  
 8 Pushing& Suzuki

1 Navas  
 2 Sitharam  
 3 O'Sullivan  
 4 Sitharam & Vinod



شکل ۲. نمودار تنش انحرافی (الف) و کرنش محوری (ب) در مقابل تعداد سیکلها [۲۴]  
**Fig. 2. Deviatoric stress (a) and axial strain (b) versus of number of cycles curves**

جدول ۱. ویژگیهای فیزیکی خاک [۲۴]  
**Table 1. Physical properties of soil**

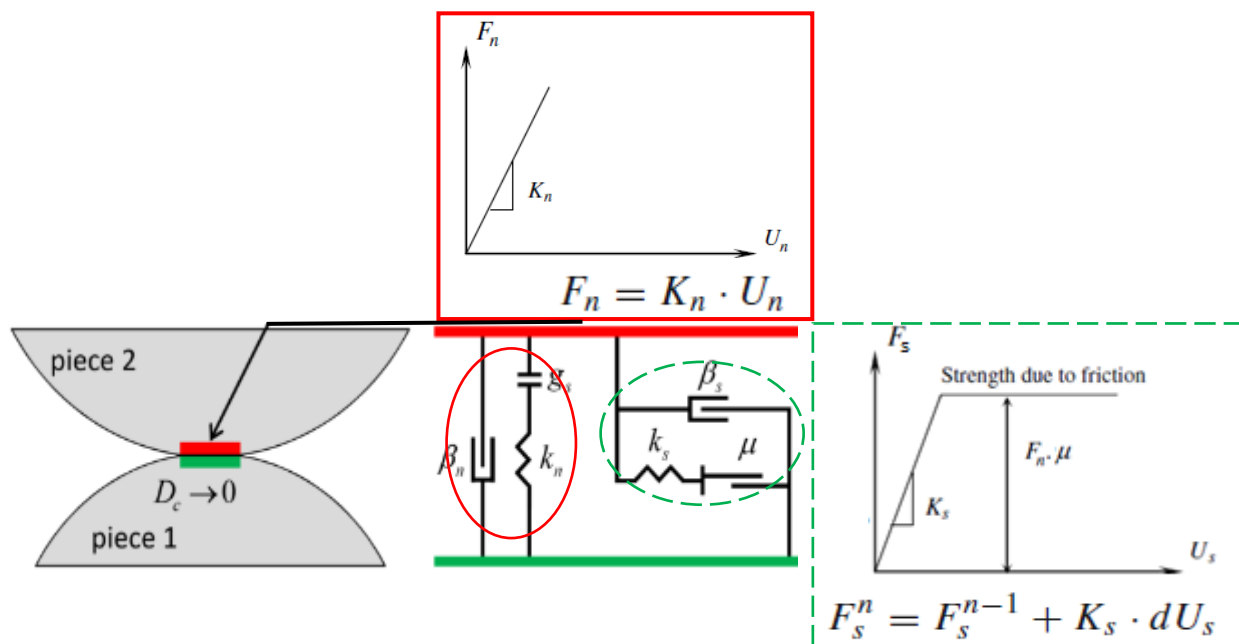
اندازه متوسط ذرات	ضریب یکنواختی	ضریب انحنای	زاویه اصطکاک داخلی	چگالی ویژه	وزن مخصوص خشک حداکثر	وزن مخصوص خشک حداقل	نوع خاک
$D_{50}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	$\phi$ (°)	$G_s$	$\gamma_{Max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{Min}$ (kN/m <sup>3</sup> )	
۰/۲۱	۱/۴۷	۱/۰۹	۴۰	۲/۷	۱۶/۸۴	۱۳/۸۵	SP

مختلف که در بالا بیان شد، از نمونه‌های مکعبی و شرایط مدل‌سازی دو بعدی استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های بسیار محدودی در حالت سه بعدی انجام گرفته است. فقط اوسولیوان و همکاران [۱۵] نمونه استوانه‌ای شکل با مرزهای تناوبی در نظر گرفتند. در همه مطالعات، برای ساده‌سازی از ذرات کروی شکل استفاده شد که این ساده‌سازی‌ها، تصویر دقیقی از رفتار سیکیلی خاک فراهم نمی‌کند. به منظور رفع نقایص مطرح شده و پیشرفت در شبیه‌سازی آزمایش‌های آزمایشگاهی با روش اجزای منفصل، در این پژوهش، نمونه استوانه‌ای حاوی ذرات کروی و بیضوی شکل با مرزهای جانبی انعطاف‌پذیر در شرایط سه بعدی تحت آزمایش سه محوری سیکیلی زهکشی شده تنش کنترل مدل‌سازی و با نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده توسط سایر محققین مقایسه و کالیبره شد. سپس پارامترهایی مانند مدول برشی و نسبت میرایی برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده، محاسبه

دانه‌ای می‌تواند به طور موفقیت آمیزی توسط DEM مدل‌سازی شود. تعدادی آزمایش سه محوری سیکیلی در شرایط زهکشی شده روی نمونه‌هایی با تراکم‌های نسبی اولیه متفاوت به کمک روش DEM شبیه‌سازی شد تا ویژگی‌های میکروسکوپیکی خاک‌های دانه‌ای تحت بار سیکیلی ارزیابی گردد [۲۲]. ان جی او<sup>۱</sup> و ایندرا راتنا<sup>۲</sup> [۲۴] با ترکیب آزمایش‌های سه محوری سیکیلی بزرگ مقیاس روی نمونه‌هایی از بالاست<sup>۳</sup> به قطر ۳۰۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر با تغییر فرکانس در محدوده ۱۰ تا ۴۰ هرتز و مدل‌های محاسباتی (ترکیب روش اجزای محدود و اجزای مجزا)، رفتار مصالح با در نظرگیری شکست ذرات تحت بارهای دینامیکی را مطالعه کردند.

در بیشتر شبیه‌سازی‌های DEM انجام شده توسط محققین

1 Ngo  
 2 Indraratna  
 3 Ballast



شکل ۳. مدل تماسی خطی  
Fig. 3. Linear contact model

ماسه در تراکم نسبی ۶۱ درصد، تحت نسبت تنش تناوبی  $0.2$  و  $0.4$  در فرکانس بارگذاری ۱ هرتز و فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال توسط کومار و همکاران [۲۴] انجام شده است. توزیع اندازه ذرات در نمونه‌ها و سایر ویژگی‌های فیزیکی مربوط به خاک مورد آزمایش به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده است.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها به صورت نمودار تنش انحرافی و کرنش محوری در مقابل تعداد سیکل‌ها در نسبت تنش تناوبی  $0.4$  در شکل ۲ نشان داده شده است.

### ۲-۲- شبیه‌سازی‌ها به روش اجزای منفصل

روش DEM امکان بررسی پارامترهای میکرو و توضیح اثر آن‌ها در پیش‌بینی رفتار ماکروسکوپی یک مجموعه ذرات خاک را فراهم می‌کند [۲۵]. از معمول‌ترین نرم‌افزارهایی که بر اساس این روش توسعه پیدا کرده‌اند، می‌توان به نرم‌افزار  $PFC^{3D}$  اشاره کرد. در این پژوهش نیز برای شبیه‌سازی آزمایش سه محوری سیکلی از نرم‌افزار  $PFC^{3D}$  (نسخه ۶) استفاده شده است [۲۶]. نمونه‌ها به صورت مجموعه‌ای از ذرات با دانه‌بندی مشخص شده در شکل ۱ در قالب

گردید و به بررسی تاثیر عواملی مانند تعداد سیکل‌های بارگذاری، تراکم نسبی نمونه خاک، نسبت تنش تناوبی اعمال شده، شکل ذرات و نحوه بارگذاری بر این ویژگی‌های دینامیکی پرداخته شد.

### ۲- مواد و روش‌ها

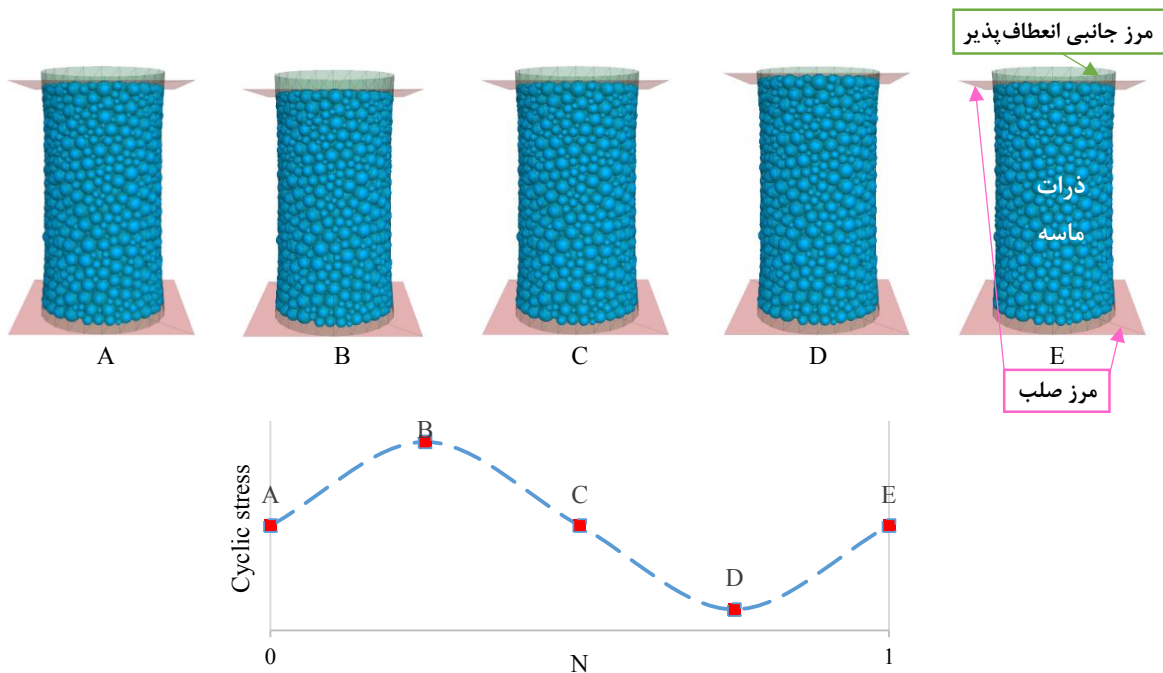
سال‌های متمادی است که آزمایش سه محوری به منظور اندازه‌گیری پارامترهای مقاومت برشی و همچنین بررسی و تعیین خصوصیات تنش - تغییرشکل خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این بخش، ابتدا به معرفی مصالح و نحوه انجام آزمایش‌های سه محوری سیکلی توسط کومار<sup>۱</sup> و همکاران [۲۴] (در زیربخش ۲-۱) پرداخته شده و در زیربخش ۲-۲، نحوه شبیه‌سازی آزمایش‌ها به روش اجزای منفصل و کالیبراسیون آن آورده شده است.

### ۲-۱- آزمایش‌های تجربی

آزمایش‌های سه محوری سیکلی تنش کنترل بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل (به قطر ۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۴۰ میلی‌متر) حاوی

2 Cyclic Stress Ratio (CSR)

1 Kumar



شکل ۴. نمونه ماسه‌های شبیه‌سازی شده در یک سیکل بارگذاری کامل  
 Fig. 4. The simulated sand specimen in a single load cycle

تطابق بیشتر با شرایط محیط آزمایشگاهی از مرزهای انعطاف پذیر به جای مرز جانبی صلب استفاده شده است. استفاده از مرزهای غشایی انعطاف پذیر به مدل اجازه می‌دهد که تغییر شکل‌های ناشی از توسعه نواحی برشی را با دقت مناسبی نشان دهند. مرزهای استفاده شده در این پژوهش به صورت دیواره‌های تغییر شکل پذیر که یک محیط استوانه‌ای شکل را فراهم کرده‌اند، در نظر گرفته شد. صفحات بالایی و پایینی نمونه به صورت صفحات صلب بدون اصطکاک لحاظ شد. آزمایش سه محوری سیکلی شامل دو مرحله تحکیم و برش سیکلی است. تحکیم همسان با اعمال فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال به صفحه بالایی و دیواره‌های غشایی نمونه در قالب نمودی انجام پذیرفت. فشار همه جانبه در حین آزمایش دائما کنترل شد (این کار با بهره‌گیری از الگوریتم سروکنترل<sup>۱</sup> انجام شد). از آنجایی که آزمایش به صورت تنش کنترل شبیه‌سازی شد، در مرحله برش سیکلی، صفحه بالایی برای اعمال بار محوری در سیکل‌های مختلف به شکل سینوسی به سمت پایین و بالا حرکت کرد، این کار نیز با استفاده از الگوریتم سروکنترل، ضمن ثابت نگه داشتن تنش شعاعی به عنوان تنش محصور کننده (با کنترل حرکت دیواره‌های جانبی)،

استوانه‌ای شکل به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر به صورت تصادفی و خشک در نسبت‌های تخلخل ۰/۳ و ۰/۶ تولید شدند. مدل تماس بین ذرات به صورت خطی در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که مدل تماس خطی از مولفه‌های فنر و میراگر به صورت موازی به یکدیگر تشکیل شده است که فنرها رفتار اصطکاکی الاستیک خطی و میراگرها رفتار ویسکوزیته را مدل می‌کنند (شکل ۳). در این مدل، لنگر تماسی منتقل نمی‌شود و فقط انتقال نیرو صورت می‌گیرد. مولفه‌های نیروی نرمال و مماسی در یک سطح تماس کوچک به طور مجزا محاسبه می‌شوند. نیروی نرمال تماسی ( $F_n$ ) بین دو ذره در لحظه معین، به صورت حاصل ضرب سختی نرمال تماسی ( $K_n$ ) در فاصله همپوشانی ( $U_n$ ) محاسبه می‌شود (ارتباط خطی بین نیرو و همپوشانی). نمو نیروی مماسی تماسی ( $dF_s^n$ ) به صورت خطی (با سختی برشی تماس ( $K_s$ )) به جابجایی نسبی ( $U_s$ ) مرتبط شده و در هر گام محاسباتی به مقدار نیروی مماسی به دست آمده در گام قبلی ( $F_s^{n-1}$ ) اضافه می‌شود. بزرگی نیروی مماسی محاسبه شده به یک مقدار حاصل از ضرب ضریب اصطکاک  $\mu$  در نیروی نرمال محدود می‌شود.

در تحقیقات اخیر، جهت نیل به شبیه‌سازی دقیق آزمایش‌ها و

1 Servo control



جدول ۲. برنامه شبیه‌سازیهای انجام شده  
Table 2. DEM simulations of triaxial test program

نسبت تنش تناوبی (CSR)	نسبت تخلخل (e)	شکل ذرات	نوع بارگذاری
۰/۴ - ۰/۲	۰/۶ - ۰/۳	کروی بیضوی	سیکلی یکنواخت
-	۰/۳	کروی بیضوی	سیکلی غیریکنواخت

جانبی انعطاف پذیر در یک سیکل بارگذاری کامل در شکل ۴ مشخص شده است.

برای مدل سازی مناسب رفتار توده ذرات، بهتر است تا حد امکان شکل ذرات مدل شده به واقعیت نزدیک باشد. روش های مختلفی برای ارائه اشکال واقعی ذرات در فضای سه بعدی فراهم شده است که رایج ترین آن ها روش خوشه ای<sup>۱</sup> است. در این پژوهش، با استفاده از مجموعه کره هایی که با یکدیگر همپوشانی دارند و به یکدیگر به صورت صلب متصل شده اند و یک جسم یکپارچه را تشکیل داده اند، ذرات بیضوی مدل سازی شده است. شکل ۵ نمونه ای از ذره کروی و بیضوی شکل را نشان می دهد.

برنامه شبیه سازی های انجام شده در جدول ۲ خلاصه شده است. در این میان، هر چه خصوصیات مصالح انتخاب شده در شبیه سازی ها به شرایط واقعی نزدیک تر باشد، نتایج عددی با نتایج آزمایش های تجربی همخوانی بیشتری خواهد داشت. در نرم افزار PFC<sup>3D</sup> [۲۶] برای تولید نمونه به خواص میکروسکوپی آن احتیاج است که از جمله این خواص می توان به سختی نرمال، سختی برشی و اصطکاک بین ذرات اشاره کرد. این نرم افزار، پارامترهای میکرو، خواص هندسی ذرات، ویژگی های تماس و شرایط مرزی را به عنوان داده های ورودی دریافت می کند و با انجام سیکل های محاسباتی، خواص ماکروسکوپی مانند مقاومت برشی نمونه را به عنوان خروجی ارائه می دهد. مشخصات و پارامترهای استفاده شده در این شبیه سازی ها در جدول ۳ آورده شده است.

#### ۲-۲-۱- کالیبراسیون مدل

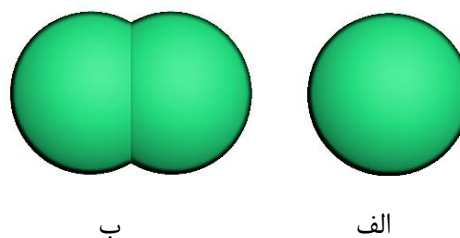
در فرآیند کالیبراسیون، پارامترهای میکرومکانیکی ذرات در تحلیل های عددی به روش اجزای مجزا به کمک مقایسه نتایج

جدول ۳. پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی

Table 3. Input parameters for DEM simulations

مقدار	پارامتر
۱۰	سختی نرمال تماس (MN/m)
۱۰	سختی برشی تماس (MN/m)
۱	سختی مرز انعطاف پذیر (MN/m)
۹	مدول یانگ ذرات (MPa)
۰/۳	نسبت پواسون
۲۶۰۰	چگالی ذرات (kg/m <sup>3</sup> )
۹	سختی ذرات (MN/m)
۰/۳	ضریب اصطکاک بین ذرات
۰	ضریب اصطکاک بین ذرات و دیواره ها
۰/۷	میرایی محلی <sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> Local



شکل ۵. ذره کروی (الف) و ذره پیوندی (بیضوی) (ب)

Fig. 5. Single spherical particle (a) and clumped particle (b) (ellipsoid)

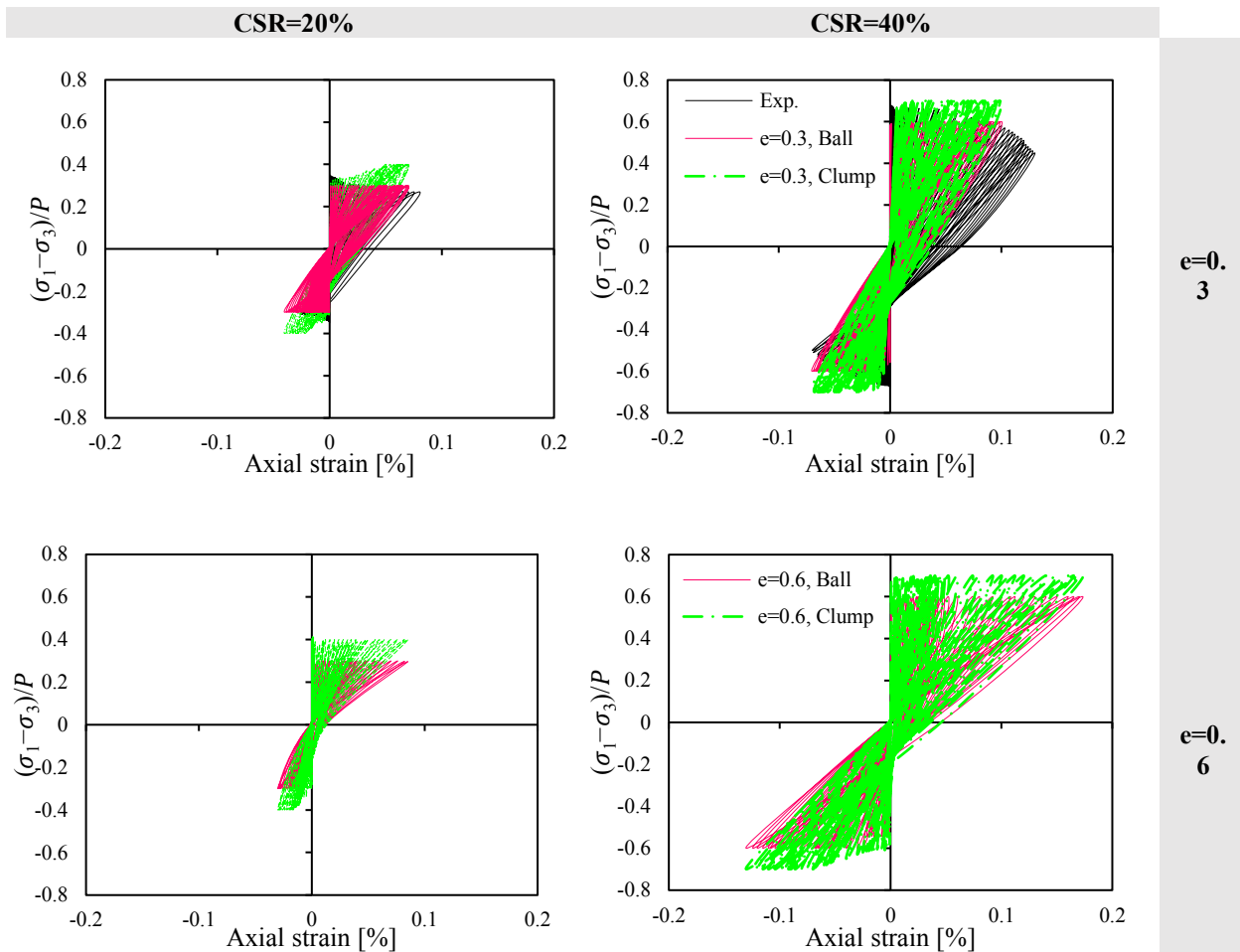
نمونه را تحت تنش محوری متناوب در راستای قائم قرار داد.

لازم به ذکر است که از دو نسبت تنش تناوبی (CSR) ۰/۴ و ۰/۲

برای اعمال بارهای سیکلی محوری استفاده شد.

تصویری از نمونه ماسه ای شبیه سازی شده تحت آزمایش سه

محوری سیکلی در PFC<sup>3D</sup> [۲۶] در قالب استوانه ای شکل با مرزهای



شکل ۶. حلقه های هیستریزس مربوط به نمونه های حاوی دانه های کروی و بیضی شکل در نسبت های تخلخل (۰/۳ و ۰/۶) و تنشهای تناوبی (۲۰٪ و ۴۰٪) تحت تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال

**Fig. 6. Hysteresis loops of the specimens with spherical and elliptical particles at void ratios (0.3 and 0.6), CSRs of 20 and %40 at confining pressure of 100 kPa**

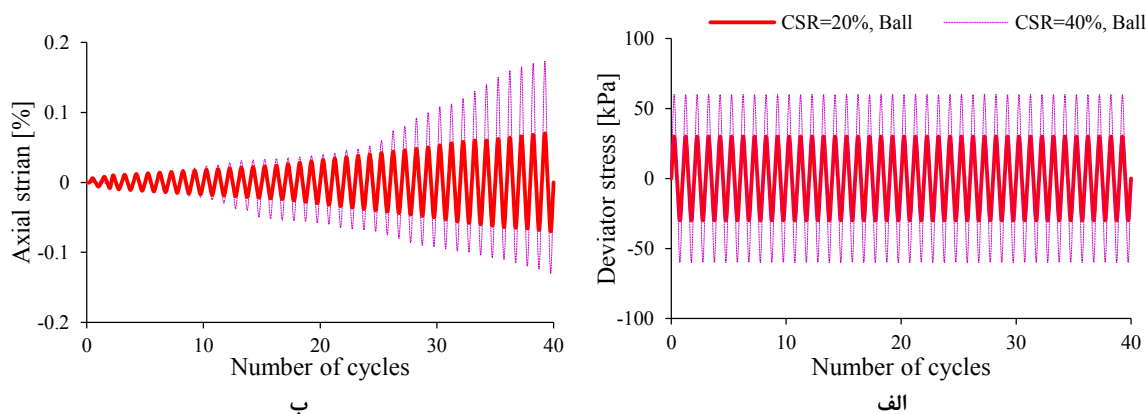
نزدیک شدن به مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون به دست آمده از آزمایش های انجام شده بر روی ماسه تغییر کرد (با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها) تا مناسب ترین مقدار برای این پارامترهای میکرو اختیار شود [۲۸]. لازم به ذکر است که پارامترهای ارائه شده در جدول ۳، پارامترهایی هستند که پس از فرآیند کالیبراسیون به دست آمده اند [۲۹ و ۲۸ و ۱۶-۱۴ و ۴].

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا نتایج مربوط به بارگذاری سیکنالی یکنواخت آورده شده (زیربخش ۳-۱) و در ادامه به نتایج حاصل از بارگذاری سیکنالی غیریکنواخت پرداخته شده است (زیربخش ۳-۲).

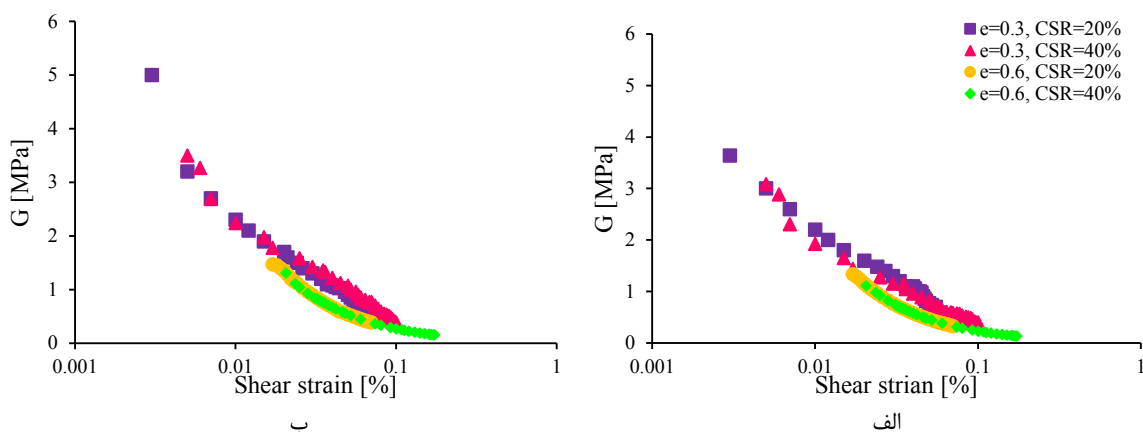
آزمایش های آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی و مدل های عددی تعیین می شود. هیچ روش ساده ای برای تعیین پارامترهای میکرو مقیاس بین ذره ای وجود ندارد [۲۷]. این پارامترهای میکروسکوپی می توانند اثر قابل توجهی بر رفتار ماکروسکوپیک نمونه داشته باشند. در این مطالعه، پارامترهای میکرو ماسه مانند نسبت سختی نرمال به برشی تماس و ضریب اصطکاک بین ذرات بر اساس نتایج آزمایش های انجام شده توسط کومار و همکاران [۲۴] (که در قسمت ۲-۱ آورده شده است) در فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال کالیبره شد. چندین شبیه سازی با فرآیند سعی و خطا برای کالیبراسیون نمونه های ماسه ای انجام پذیرفت. به عنوان مثال، در هر شبیه سازی، سختی نرمال تماس و نسبت سختی نرمال به برشی تماسی برای





شکل ۷. تغییرات تنش انحرافی (الف) و کرنش محوری (ب) با سیکلهای بارگذاری در نمونه ها با دانه های کروی

Fig. 7. Variation of deviatoric stress (a) and axial strain (b) with number of loading cycles for specimens with spherical particles



شکل ۸. تغییرات مدول برشی (الف) ذرات کروی (ب) غیر کروی با کرنش برشی

Fig. 8. Variation of shear modulus with shear strain for spherical (a) and non-spherical (b) particles specimens

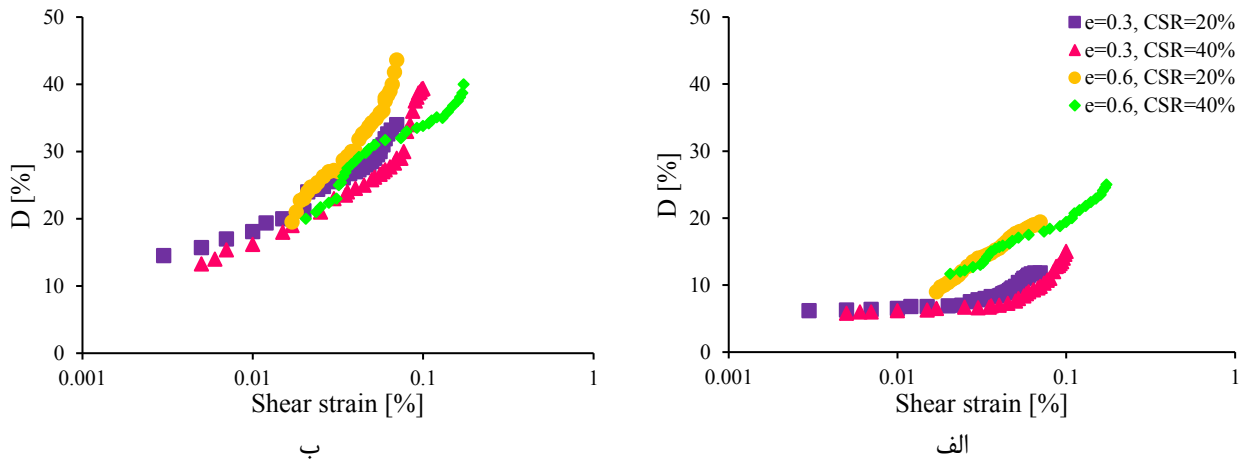
و مقایسه بهتر، نتایج آزمایش های انجام شده توسط کومار و همکاران [۲۴] و مدل های عددی در کنار هم و در قالب یک نمودار برای هر نسبت تخلخل و تنش تناوبی آورده شده است. از شکل ۶ مشاهده می شود که نتایج عددی ارائه شده با دقت قابل قبولی با نتایج تجربی مطابقت دارند. حلقه های هیستریزیس به دست آمده به صورت کیفی مشابه با حلقه های حاصل از مدل توسعه یافته فیوسینگ و سوزوکی [۲۱] است. این حلقه ها با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری تدریجا به سمت راست و محور افقی متمایل می شوند (کاهش شیب حلقه ها).

تغییرات تنش انحرافی و کرنش محوری با سیکل های بارگذاری در نمونه ها با دانه های کروی در فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال

### ۳-۱- بارگذاری سیکلی یکنواخت

مدول برشی و نسبت میرایی خاک ها با استفاده از نتایج آزمایش سه محوری سیکلی تعیین می شود. در پایان هر سیکل از آزمایش، منحنی های هیستریزیس تنش انحرافی - کرنش محوری ترسیم گشته و آنگاه می توان مدول برشی و نسبت میرایی را در هر سیکل بارگذاری - باربرداری تعیین نمود.

حلقه های هیستریزیس (تنش انحرافی - کرنش محوری) مربوط به نمونه های حاوی دانه های کروی و بیضوی شکل در دو نسبت تخلخل (۰/۳ و ۰/۶) و نسبت های تنش تناوبی متفاوت (۰/۲ و ۰/۴) و تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال در ۴۰ سیکل اول بارگذاری در شکل ۶ ارائه شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی تهیه شده



شکل ۹. تغییرات نسبت میرایی (الف) ذرات کروی (ب) غیر کروی با کرنش برشی

Fig. 9. Variation of damping ratio with shear strain for spherical (a) and non-spherical (b) particles specimens

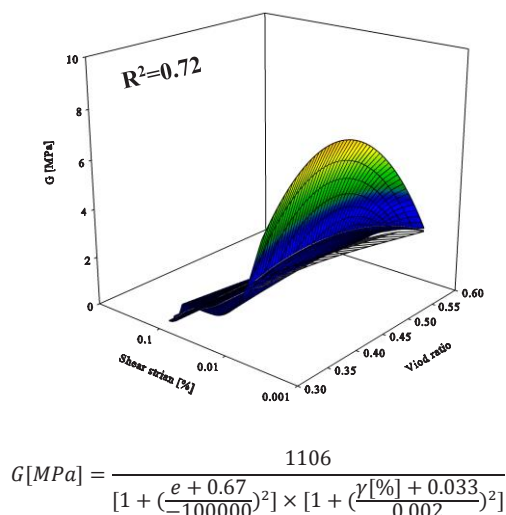
کاهش مدول برشی با کرنش می تواند ناشی از کاهش متوسط تعداد تماس های بین ذرات باشد. نسبت تنش تناوبی اثر قابل توجهی بر مدول برشی نمونه ها ندارد. نرخ کاهش مدول برشی با کرنش برشی برای نمونه های متراکم تر (با ذرات کروی و بیضوی شکل) بیشتر (حدود ۳ برابر) است. در نسبت تنش تناوبی و تخلخل یکسان، سرعت کاهش مدول برشی برای نمونه ها با ذرات غیر کروی، بیشتر به دست آمده ولی کرنش برشی که در آن مدول برشی شروع به افت می کند، تقریباً یکسان است.

مطابق شکل ۹، نسبت میرایی در کلیه نمونه ها، با کرنش برشی افزایش می یابد (پهنای حلقه ها با افزایش دامنه کرنش افزایش می یابد) و در محدوده ۶ تا ۲۴ درصد برای نمونه های دارای ذرات کروی و ۱۳ تا ۴۳ درصد برای ذرات غیر کروی قرار می گیرد. افزایش نسبت میرایی با کرنش برشی برای نمونه ها با ذرات غیر کروی بیشتر از ذرات کروی در نسبت های تخلخل و تنش تناوبی یکسان است. نرخ افزایش نسبت میرایی با کرنش برای نمونه های متراکم کمتر از نمونه های نیمه متراکم است. جیانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۲۲] بیان کردند که نسبت تخلخل تاثیر قابل توجهی روی نسبت میرایی دارد. سیتارام و وینود [۱۶] گزارش کردند که تغییرات نسبت میرایی با کرنش در نمونه ها با تراکم های مختلف در یک باند باریک قرار دارد که این موضوع بیانگر تاثیر غیر قابل توجه نسبت تخلخل اولیه نمونه بر نسبت میرایی آن است. نسبت تنش تناوبی اثر قابل ملاحظه ای بر

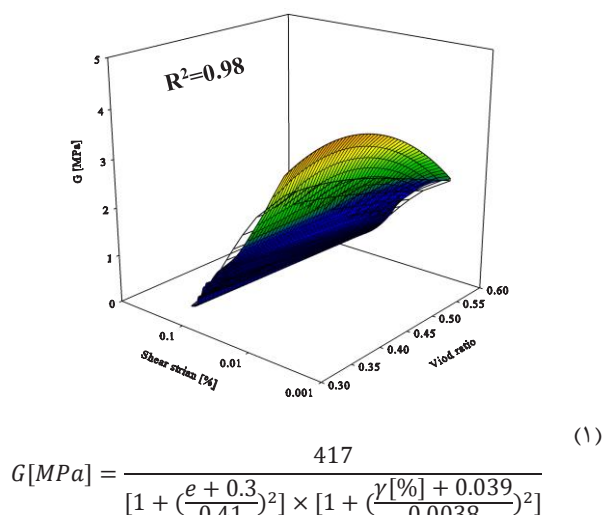
در نسبت تخلخل ۰/۶ و نسبت های تنش تناوبی ۰/۲ و ۰/۴ در شکل ۷ ارائه شده است. از آنجایی که آزمایش به صورت تنش کنترل شبیه سازی شده است، حداکثر مقاومت نمونه ها در کشش و فشار با یکدیگر تقریباً برابر بوده و مقدار یکسانی دارد (شکل ۷-الف). کرنش محوری به آهستگی با افزایش تعداد سیکل ها افزایش می یابد (شکل ۷-ب). زیرا با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری، نمونه به تدریج تضعیف شده و تغییر شکل های بیشتری در اثر بار وارده در نمونه ایجاد می شود. لازم به ذکر است که افزایش کرنش محوری در حین آزمایش در سیکل های بالاتر نمایان تر است (سیکل شماره ۱۰ به بعد).

تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی با کرنش برشی در فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال در نسبت های تخلخل (۰/۳ و ۰/۶) و تنش تناوبی مختلف (۰/۲ و ۰/۴) برای نمونه ها با ذرات کروی و غیر کروی در شکل های ۸ و ۹ مشخص شده است.

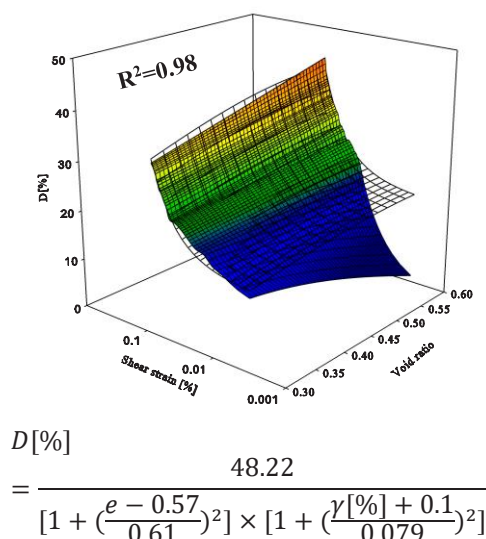
همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می شود، مدول برشی با افزایش کرنش برشی کاهش می یابد. این کاهش حدود ۷۵ الی ۹۰ درصد برای نمونه های حاوی ذرات کروی و غیر کروی با نسبت تخلخل و تنش های تناوبی متفاوت به دست آمده است. کاهش مدول برشی با کرنش که اساساً به واسطه رفتار غیر خطی خاک صورت می گیرد، در همه شبیه سازی های این پژوهش مشاهده می شود. مدول برشی تحت تاثیر نسبت تخلخل است. در یک کرنش برشی معین، مدول برشی نمونه متراکم تر بیشتر است. مطابق نظر سیتارام و وینود [۱۶]،



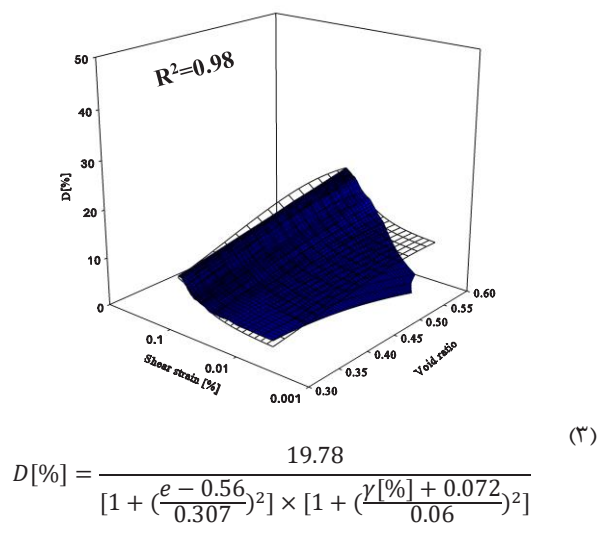
ب



الف



د



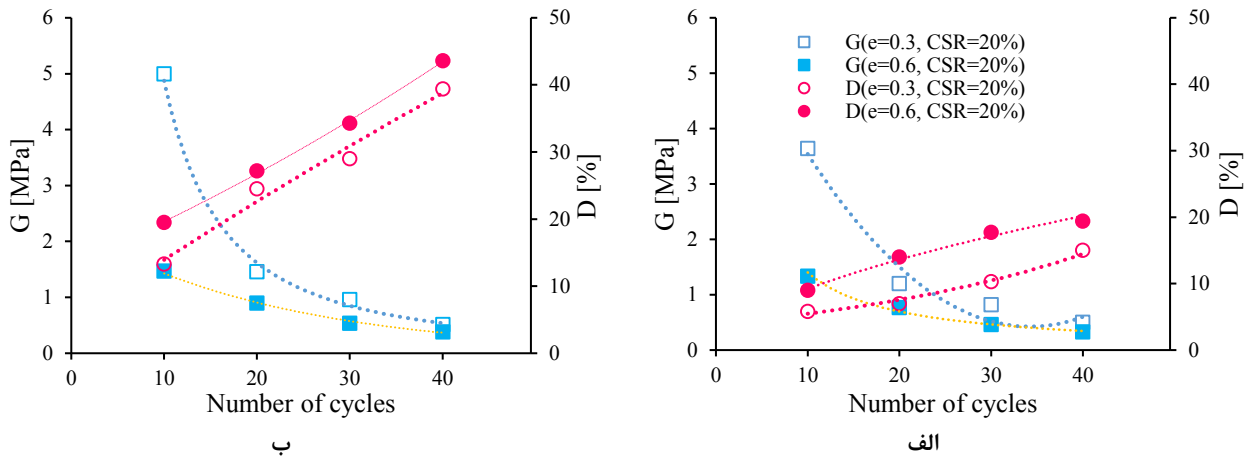
ج

شکل ۱۰. ارتباط مدول برشی و نسبت میرایی با کرنش برشی، نسبت تنش تناوبی و نسبت تخلخل برای نمونه‌ها با دانه‌های کروی ("الف" و "ج") و غیرکروی ("ب" و "د")

Fig. 10. Relationship between shear modulus and damping ratio, CSR and void ratio with shear strain for spherical (a and c) and non-spherical (b and d) particles specimens

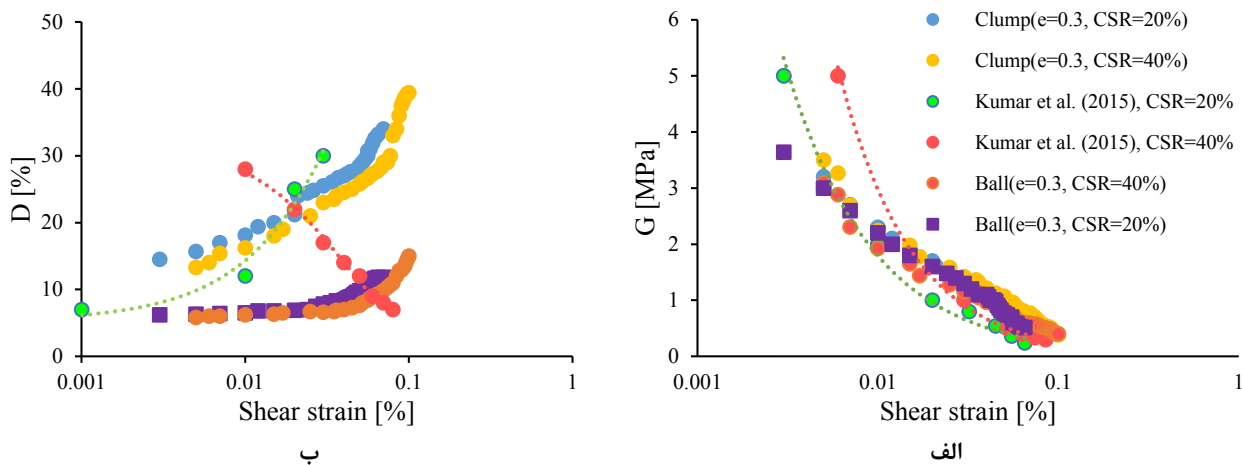
استفاده شده است، نمی‌توان ارتباط این موارد با پارامترهای مدول برشی و نسبت میرایی را کمی نمود ولی اثر سایر عوامل مانند کرنش برشی، درصد تخلخل، نسبت تنش تناوبی و شکل دانه‌ها قابل تعیین است. از شکل‌های ۸ و ۹ دریافت می‌شود که نسبت تنش تناوبی اثر قابل توجهی بر مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌ها ندارد و می‌توان آن را نادیده گرفت. در شکل ۱۰ ارتباط بین مدول برشی (G) و

نسبت‌های میرایی نمونه‌ها ندارند. همانطور که قبلاً اشاره شد، مدول برشی و نسبت میرایی به کرنش برشی، درصد تخلخل (دانسیته نسبی)، فشار همه‌جانبه، شکل دانه‌ها، فرکانس بارگذاری، شرایط زهکشی و ... وابسته هستند. از آنجایی که در این پژوهش، از یک فرکانس بارگذاری (۱ هرتز) و فشار همه‌جانبه (۱۰۰ کیلوپاسکال) معین و شرایط زهکشی شده در شبیه‌سازی‌ها



شکل ۱۱. تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی با تعداد سیکل ها برای نمونه ها با ذرات کروی (الف) و غیر کروی (ب)

Fig. 11. Variation of shear modulus and damping ratio with number of cycles for spherical (a) and non-spherical (b) particles specimens



شکل ۱۲. مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی به روش DEM با نتایج آزمایش های تجربی انجام شده [۲۴]

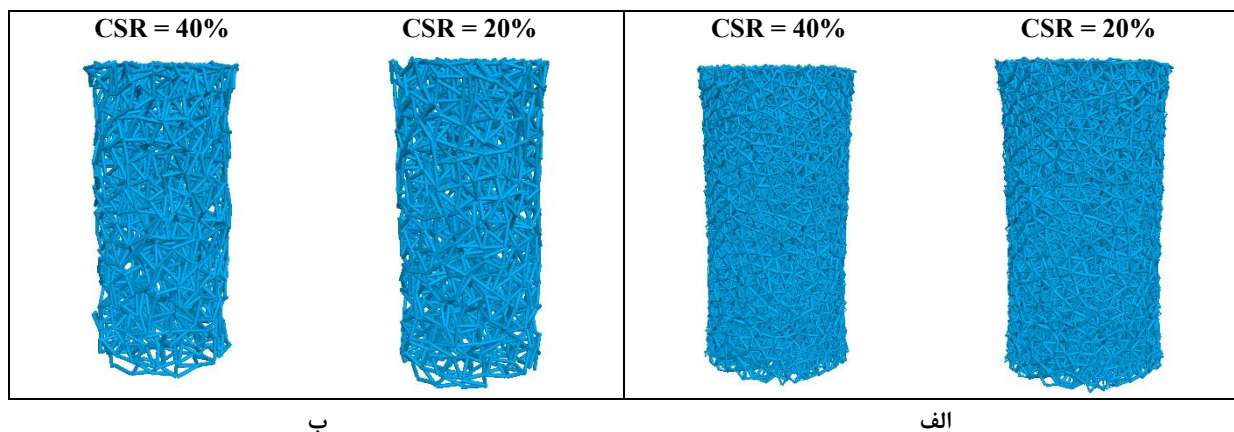
Fig. 12. Comparison the results of DEM simulations and laboratory tests

که بیانگر مدول الاستیک است، با افزایش تعداد سیکل ها کاهش یافته و به تدریج به سمت محور افقی متمایل می شوند. مساحت حلقه های هیستریزس با افزایش تعداد سیکل ها و کرنش برشی افزایش می یابد؛ در نتیجه، نسبت میرایی نمونه ها نیز با سیکل های بارگذاری روند افزایشی دارد.

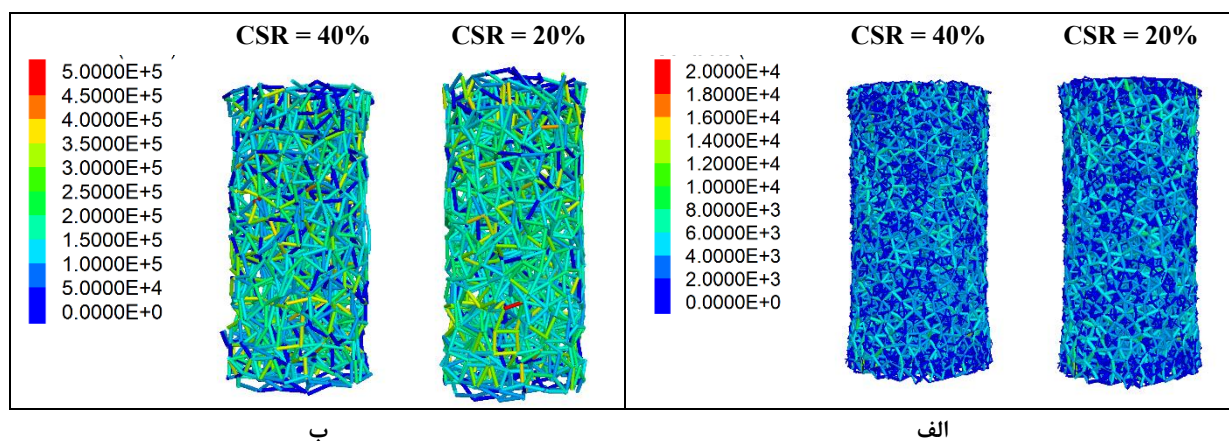
مدول برشی نمونه ها با ذرات بیضوی شکل بیش از ذرات کروی شکل است؛ زیرا قفل و بست بهتری بین ذرات غیر کروی ایجاد می شود. همچنین، نسبت میرایی نمونه های حاوی ذرات غیر کروی نیز بیش از ذرات کروی است. در واقع، در اثر بارگذاری قسمت های

نسبت میرایی (D) با کرنش برشی ( $\gamma$ ) و نسبت تخلخل (e) برای نمونه های حاوی ذرات کروی و بیضوی نشان داده شده و روابط فی ما بین (روابط (۱) تا (۴)) استخراج گشته است.

شکل ۱۱، تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی در مقابل تعداد سیکل های بارگذاری در فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه های حاوی ذرات کروی (الف) و غیر کروی (ب) در نسبت تخلخل ۰/۳ و ۰/۶ و نسبت تنش تناوبی ۲۰٪ را نشان می دهد. مدول برشی با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری کاهش می یابد. همان طور که در شکل ۶ ملاحظه شد، شیب حلقه های هیستریزس



شکل ۱۳. تماس بین ذرات در نمونه با ذرات کروی (الف) و غیرکروی (ب)  
 Fig. 13. Particle contacts in spherical (a) and non-spherical (b) particles specimens



شکل ۱۴. بزرگی نیروهای تماسی بین ذرات در نمونه با ذرات کروی (الف) و غیرکروی (ب) (نیرو بر حسب نیوتن)  
 Fig. 14. The magnitude of contact forces in spherical (a) and non-spherical (b) particles specimens [N]

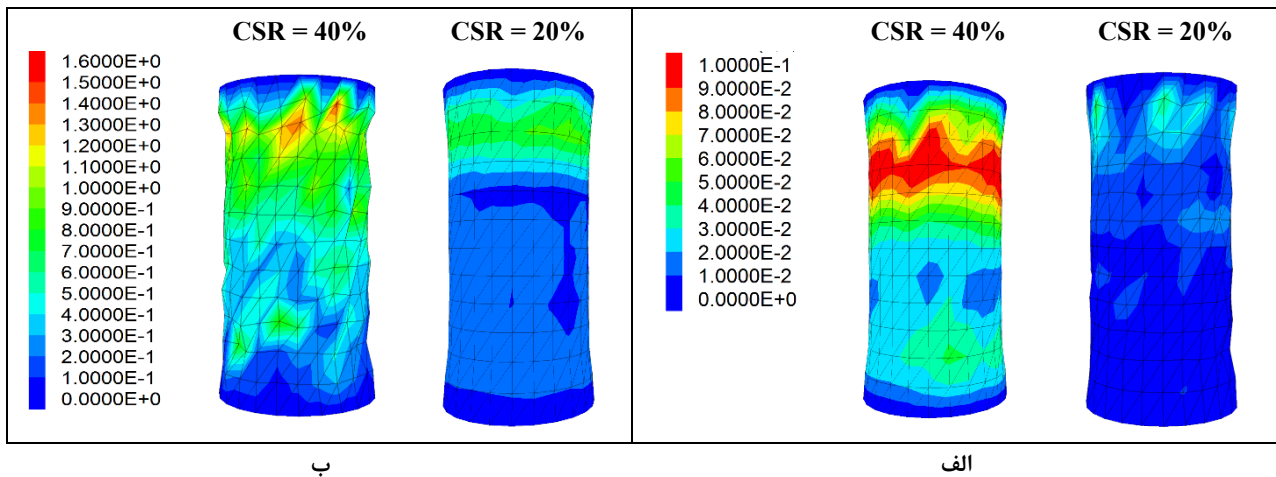
مقاومت کرده و چگالی پایین تری دارند. همچنین بیان کردند که نسبت مدول برشی به مدول برشی حداکثر نمونه‌ها با شن تیزگوشه در کرنش برشی بالاتری شروع به کاهش می‌کنند. در نمونه‌های با شن ۷۳/۵ درصد، نمونه گردگوشه در فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، نسبت میرایی بیشتری دارد. این ممکن است به علت اثر قفل و بست بین ذرات تیزگوشه باشد که به راحتی نمی‌توانند روی هم نمی‌لغزند. بنابراین، انرژی کمتری از طریق اصطکاک بین ذرات اتلاف می‌شود [۱۱].

کلیه مقادیر به دست آمده از مدل‌های عددی برای مدول برشی

تیز سنگ‌دانه‌ها می‌شکنند. شکست دانه‌ها در هر محیطی میزان زیادی از انرژی را مستهلک می‌کند. بنابراین، در ذرات تیزگوشه با شکست قسمت‌های تیز، رفتار غیرخطی نمونه بیشتر شده و باعث افزایش نسبت میرایی می‌شود.

میدانی و همکاران [۱۱] نشان دادند که در نمونه‌های حاوی بیش از ۵۴ درصد شن در فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، آن‌هایی که دارای شن تیزگوشه هستند، مدول برشی کمتری نسبت به نمونه‌ها با ذرات گرد دارند. زیرا نمونه‌های گردگوشه تحت اثر تراکم یکسان، بهتر متراکم می‌شوند؛ در حالی که ذرات تیزگوشه در مقابل تراکم





شکل ۱۵. تغییرشکلهای ایجاد شده در نمونه با ذرات کروی (الف) و غیر کروی (ب) (جابجایی دیواره غشایی بر حسب سانتی متر)  
 Fig. 15. Deformations occurred in spherical (a) and non-spherical (b) particles specimens [cm]

ذرات به تعداد کل ذرات در مجموعه تعریف می شود. با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری، تعداد تماس ها و بزرگی نیروهای تماسی افزایش می یابد. این پدیده می تواند به علت تراکم نمونه و بازآرایی و شکست ذرات باشد. در شکل های ۱۳ و ۱۴ تماس های شکل گرفته بین ذرات و بزرگی نیروهای تماسی بین ذره ای در انتهای آزمایش برش سیکلی (۴۰ سیکل بارگذاری و باربرداری) در نمونه های حاوی ذرات کروی و غیر کروی در نسبت تخلخل ۰/۳ و نسبت های تنش تناوبی ۲۰ و ۴۰ درصد آورده شده است. تعداد تماس های بین ذرات در مرحله انتهای برش سیکلی، در نمونه با ذرات کروی بیشتر از ذرات غیر کروی می باشد. متوسط تعداد تماس ها در نمونه ها با ذرات کروی و غیر کروی (در نسبت تخلخل ۰/۳) در انتهای آزمایش به ترتیب ۷/۷ و ۶/۴ به دست آمده است. نسبت تنش تناوبی اعمالی تاثیر قابل توجهی بر متوسط تعداد تماس ها در نمونه ها (کروی و غیر کروی) ندارد. حداکثر بزرگی نیروهای تماسی در انتهای آزمایش در نمونه متشکل از ذرات کروی بسیار کمتر (۰/۴ برابر) از ذرات غیر کروی است.

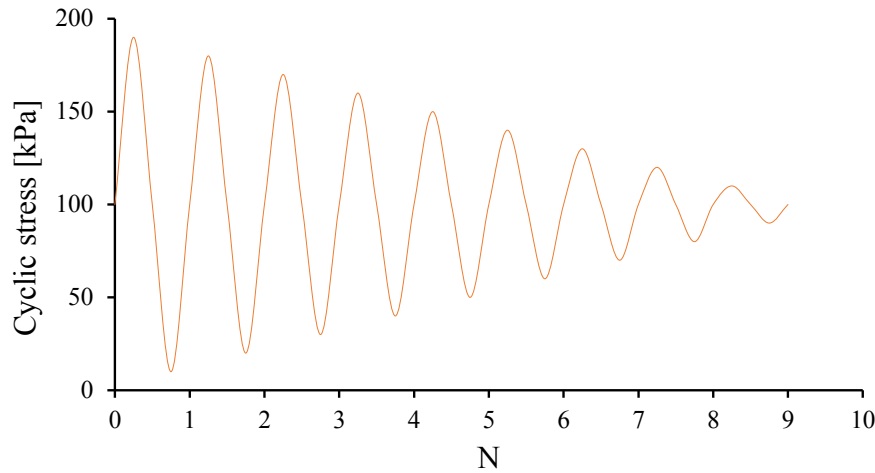
همانطور که قبلا اشاره شد، به کمک مرزهای غشایی انعطاف پذیر می توان خواص تغییر شکل ناشی از توسعه نواحی برشی را با دقت مناسبی تصویرسازی کرد. با مقایسه شکل های ۱۵-الف و ب مشاهده می شود که نمونه مدل شده پس از اعمال بار سیکلی دچار تغییر شکل شده و محل حداکثر تغییر شکل ایجاد شده در کلیه نمونه ها تقریبا با هم منطبق هستند. حداکثر تغییر شکل به وجود آمده در

و نسبت میرایی نمونه ها با ذرات کروی و بیضوی شکل در نسبت تخلخل ۰/۳ و تنش تناوبی ۲۰ و ۴۰ درصد با نتایج تجربی ارائه شده توسط کومار و همکاران [۲۴] در شکل ۱۲ رسم شده است. کومار و همکاران (۲۰۱۵) با انجام آزمایش های سه محوری سیکلی بر روی نمونه های ماسه ای به این نتیجه دست یافتند که در کرنش های برشی ۰ تا ۰/۱٪، مدول برشی تقریبا بین ۹۴ تا ۹۷ درصد با افزایش کرنش کاهش می یابد. نتیجه شبیه سازی های عددی نشان می دهد که این کاهش برای نمونه های حاوی ذرات کروی و غیر کروی در نسبت تخلخل ۰/۳ (با توجه به محدوده کرنش برشی نشان داده شده در شکل ۱۲)، به ترتیب حدود ۸۶ و ۸۸ درصد می باشد. کومار و همکاران [۲۴] نشان دادند که نسبت میرایی با کرنش برشی در نسبت تنش تناوبی ۰/۴۰، روند کاهشی دارد؛ در صورتی که با افزایش کرنش برشی و سیکل های بارگذاری، نمونه به تدریج تضعیف شده (سختی و مقاومت آن کاهش می یابد) و میرایی آن افزایش می یابد. روند افزایشی نسبت میرایی با کرنش برشی برای کلیه نمونه های شبیه سازی شده به دست آمده است.

پارامتر میکروسکوپی که اغلب برای بیان ساختار توده ذرات به کار می رود، متوسط تعداد تماس هاست<sup>۱</sup>. این پارامتر یک پارامتر اسکالر است که اطلاعاتی از ساختار مصالح فراهم می کند. متوسط تعداد تماس ها به صورت نسبت دو برابر تعداد کل تماس های بین

1 Coordinate number





شکل ۱۶. نمونه‌های از نمودار تنش سیکلی - سیکلها (غیر یکنواخت)  
 Fig. 16. Cyclic stress versus number of loading cycles (irregular)

می‌تواند به صورت رابطه (۵) بیان شود.

$$\sigma_{Cyclic} = \frac{m}{A} \left[ e^{\frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \omega_n t} \left( (\sin(\omega_d t)) \times \sigma_3 \right) + \sigma_3 \right] \quad (5)$$

که در آن  $\sigma_{Cyclic}$  دامنه تنش تناوبی،  $m$  جرم نمونه،  $A$  مساحت نمونه،  $\delta$  کاهش لگاریتمی دامنه،  $\omega_n$  فرکانس دایروی طبیعی نامیرا،  $t$  زمان،  $\omega_d$  فرکانس دایروی طبیعی میرا و  $\sigma_3$  تنش همه جانبه است. این نوع بارگذاری به نمونه‌های حاوی ذرات کروی و بیضوی شکل در نسبت تخلخل ۰/۳ وارد گردیده است. پاسخ نمونه‌ها به بار سیکلی غیریکنواخت اعمال شده (نمایش داده شده در شکل ۱۶) در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

از شکل ۱۷ دریافت می‌شود که مساحت حلقه‌های هیستریزس به دست آمده با افزایش تعداد سیکل‌ها کاهش می‌یابند ولی شیب حلقه‌ها تقریباً یکسان است. بر خلاف حلقه‌های هیستریزس ناشی از بارهای سیکلی یکنواخت که به تدریج به سمت افزایش کرنش محوری (سمت راست) متمایل می‌شوند، حلقه‌های ناشی از بار سیکلی غیریکنواخت در هر سیکل در داخل حلقه سیکل قبلی جای می‌گیرد که با نتایج پژوهش پکر<sup>۱</sup> [۳۰] همخوانی دارد.

پن و یانگ<sup>۲</sup> [۳۱] یک ارزیابی تجربی از رفتار زهکشی نشده ماسه اشباع سست تحت بارگذاری سیکلی غیریکنواخت انجام دادند.

نمونه‌های حاوی ذرات کروی و غیر کروی، تحت تنش تناوبی ۴۰ درصد تقریباً دو برابر نمونه‌ها تحت نسبت تنش سیکلی ۲۰ درصد است. در شرایط یکسان، نمونه با ذرات غیر کروی دچار تغییر شکل بیشتری نسبت به کروی شده است.

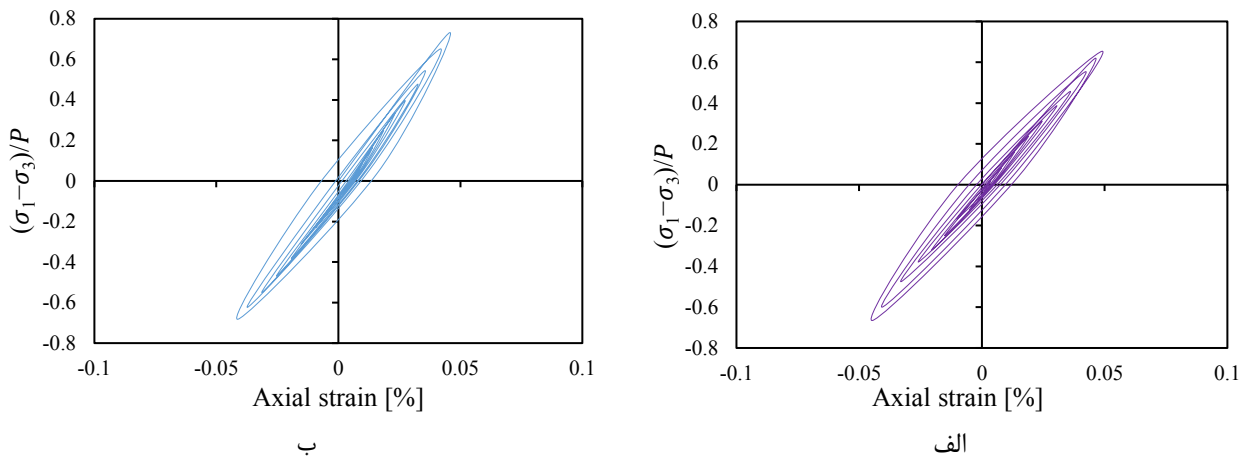
### ۳-۲- بارگذاری سیکلی غیر یکنواخت

بارهای دینامیکی که بر پی‌ها و سازه‌های خاکی اثر می‌نمایند، ممکن است در اثر عوامل مختلفی از قبیل زلزله، انفجار، ماشین‌آلات پیستونی، شمع کوب‌ها، ترافیک وسایل و امواج دریا ایجاد گردند. رفتار خاک‌ها تحت بار سیکلی غیریکنواخت نسبت به بار سیکلی یکنواخت که معمولاً در طراحی‌های مهندسی رایج است، پیچیده‌تر می‌باشد. برای مطالعه رفتار خاک‌ها تحت بارهای سیکلی غیر یکنواخت از تنش سیکلی معادل یکنواخت استفاده می‌کنند؛ این در حالی است که مطالعه رفتار ماسه تحت بار سیکلی غیر یکنواخت به صورت تجربی با دقت هنوز انجام نشده است.

یکی از نوآوری‌هایی که در این پژوهش انجام شده است این می‌باشد که مدل کالیبره شده تحت بارهای سیکلی یکنواخت برای مطالعه رفتار ماسه تحت اثر بار سیکلی غیریکنواخت نیز توسعه یافته است. به عنوان مثال، نمودار تنش سیکلی - تعداد سیکل‌ها برای بارگذاری غیریکنواخت در شکل ۱۶ نمایش داده است.

رابطه دامنه بار - زمان برای بارگذاری سیکلی غیریکنواخت

1 Pecker  
 2 Pan & Yang



شکل ۱۷. حلقه های هیستریزیس مربوط به نمونه های حاوی دانه های کروی (الف) و بیضوی (ب) شکل تحت بار سیکلی غیریکنواخت  
**Fig. 17. Hysteresis loops of the specimens with spherical (a) and elliptical (b) particles under irregular cyclic load**

دو پارامتر دینامیکی مهم در ارزیابی رفتار لرزه ای مصالح هستند که به کمک حلقه های هیستریزیس (حاصل از مدل عددی و یا محیط آزمایشگاه) به دست می آیند. با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری، حلقه های هیستریزیس به دست آمده از شبیه سازی های عددی تدریجاً به سمت راست و محور افقی متمایل می شوند (کاهش شیب حلقه ها) که با نتایج تجربی همخوانی دارد. از آنجایی که آزمایش به صورت تنش کنترل شبیه سازی شده است، حداکثر مقاومت نمونه ها در کشش و فشار با یکدیگر تقریباً برابر است. با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری، کرنش محوری به آهستگی افزایش می یابد؛ زیرا نمونه به تدریج تضعیف شده و تغییر شکل های بیشتری در اثر بارهای رفت و برگشتی در نمونه رخ می دهد.

تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی با کرنش برشی در شبیه سازی های عددی برای نمونه های حاوی ذرات کروی و بیضوی مشابه آزمایش های تجربی است. همانطور که در پژوهش های محققین گذشته مشخص شده بود، با افزایش کرنش برشی و سیکل های بارگذاری، مدول برشی کاهش ولی نسبت میرایی نمونه ها افزایش می یابد.

مدول برشی تحت تاثیر نسبت تخلخل اولیه است. مدول برشی نمونه ها با افزایش تراکم نسبی آن ها افزایش می یابد؛ در صورتی که تراکم اولیه نمونه ها اثر قابل ملاحظه ای بر نسبت میرایی نمونه ها ندارد. در یک کرنش برشی معین، مدول برشی نمونه متراکم تر بیشتر است. نرخ افزایش نسبت میرایی با کرنش برای نمونه های متراکم

نمونه تحت بار سیکلی غیریکنواخت در ۱۰۶ سیکل گسیخته شد؛ در حالی که تحت سیکل های یکنواخت در سیکل شانزدهم به گسیختگی رسید. در نمونه های تحکیم همسان، با افزایش CSR تعداد سیکل های مورد نیاز برای گسیختگی کاهش می یابد. هنگامی که نمونه تحت بار غیریکنواخت قرار می گیرد، مقاومت سیکلی بیشتری نسبت به بار یکنواخت کسب می کند.

#### ۴- نتیجه گیری

به طور کلی، هدف از انجام آزمایش های آزمایشگاهی در مکانیک خاک، شناخت رفتار واقعی مصالح و تعیین عکس العمل توده خاک در مقابل نیروهای اعمال شده است. تاکنون مطالعات بسیاری به وسیله پژوهشگران متفاوت برای بررسی رفتار دینامیکی ماسه تحت شرایط گوناگون به روش تجربی صورت گرفته است.

مدل سازی های عددی آزمایش های آزمایشگاهی برای درک فرآیندهای اساسی که در حین بارگذاری لرزه ای در خاک رخ می دهند، ضروری است. مقایسه بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی، اعتبار مدل عددی را تایید می کند. باید گفت که روش اجزای منفصل با ایجاد درکی مناسب از سازوکار میکروسکوپیکی داخل خاک، روشی قابل اعتماد در بررسی محیط های مجزا می باشد.

این مقاله، توانایی روش اجزای مجزا در مطالعه اثر پارامترهای مختلف بر روی ویژگی های دینامیکی مصالح دانه ای در محدوده ای معین از کرنش برشی را نشان می دهد. مدول برشی و نسبت میرایی

کمتر از نمونه‌های نیمه متراکم است. نسبت تنش تناوبی اثر قابل توجهی بر مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌ها ندارد.

برای مدل‌سازی مناسب رفتار توده ذرات، بهتر است تا حد امکان شکل ذرات مدل شده به واقعیت نزدیک باشد. از آنجایی که خاک به ندرت از ذرات کروی شکل تشکیل شده‌اند، برای ارائه اشکال واقعی ذرات در فضای سه بعدی از روش خوشه‌ای استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها روی مجموعه ذرات بیضوی با نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی تطابق بیشتری دارد. مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌ها با ذرات بیضوی شکل بیش از ذرات کروی است؛ زیرا قفل و بست بهتری بین ذرات ایجاد می‌شود. در نسبت تنش تناوبی و تخلخل یکسان، سرعت کاهش مدول برشی و افزایش نسبت میرایی برای نمونه‌ها با ذرات غیرکروی بیشتر به دست آمده است.

با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، تعداد تماس‌ها و بزرگی نیروهای تماسی افزایش می‌یابد؛ این پدیده می‌تواند به علت تراکم نمونه و بازآرایی و شکست ذرات باشد. متوسط تعداد تماس‌ها در نمونه با ذرات کروی و غیرکروی در انتهای ۴۰ سیکل بارگذاری به ترتیب ۷/۷ و ۶/۴ به دست آمده و نمونه با ذرات غیر کروی دچار تغییر شکل بیشتری نسبت به کروی شده است. حداکثر تغییر شکل به وجود آمده در نمونه‌ها تحت تنش تناوبی ۴۰ درصد، حدود دو برابر نمونه‌ها تحت نسبت تنش سیکلی ۲۰ درصد است. نسبت تنش تناوبی اعمالی تاثیر قابل توجهی بر متوسط تعداد تماس‌ها در نمونه‌ها ندارد.

در نهایت، می‌توان گفت که نرم افزار PFC<sup>3D</sup> می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مجازی، آزمایش‌های سه محوری سیکلی را به نحوه مطلوبی مدل‌سازی نماید و این امکان را فراهم سازد که بتوان بدون مصرف مصالح و صرف هزینه، اثر پارامترهای مختلف را بر نتایج آزمایش‌ها بررسی نمود. به کمک این روش می‌توان رفتار مصالح دانه‌ای تحت بار سیکلی غیریکنواخت را نیز مطالعه کرد.

#### علائم انگلیسی

$A$	مساحت نمونه، $m^2$
$C_c$	ضریب انحنای
$C_u$	ضریب یکنواختی
$D$	نسبت میرایی
$D_{50}$	اندازه متوسط ذرات، mm
$dF_s^n$	نمو نیروی مماسی تماسی، N
$e$	نسبت تخلخل
$F_n$	نیروی نرمال تماسی، N
$F_s^{n-1}$	نیروی مماسی به دست آمده در گام قبلی، N
$G$	مدول برشی، $N/m^2$
$G_s$	چگالی ویژه
$K_n$	سختی نرمال تماسی، N/m
$K_s$	سختی برشی تماسی، N/m
$m$	جرم نمونه، kg
$U_n$	فاصله همپوشانی، m
$U_s$	جابجایی نسبی، m
$t$	زمان، s

#### علائم یونانی

$\gamma$	کرنش برشی
$\gamma_{Max}$	وزن مخصوص خشک حداکثر، $kN/m^3$
$\gamma_{Min}$	وزن مخصوص خشک حداقل، $kN/m^3$
$\delta$	کاهش لگاریتمی دامنه
$\mu$	ضریب اصطکاک
$\sigma_3$	تنش همه جانبه، $N/m^2$
$\sigma_{Cyclic}$	دامنه تنش تناوبی، $N/m^2$
$\phi$	زاویه اصطکاک داخلی، °
$\omega_d$	فرکانس دایروی طبیعی میرا
$\omega_n$	فرکانس دایروی طبیعی نامیرا

- Seismology, Geneva, Switzerland, September 3-8, 2006, 1345.
- [11] Meidani, M., Shafiei, A., Habibagahi, G., Jafari, M. K., Mohri, Y., Ghahramani, A., and Chang, C. S., 2008. "Granule shape effect on the shear modulus and damping ratio of mixed gravel and clay". *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 32(B5), pp. 501–518.
- [12] Jafarian, Y., Haddad, A., and Javdanian, H., 2015. "Estimating the shearing modulus of Boushehr calcareous sand using resonant column and cyclic triaxial experiments". *Modares Civil Engineering journal*, 15(4), pp. 9–19.
- [13] Navas, P., Manzanal, D., Stickle, M. M., Pastor, M., and Molinos, M., 2020. "Meshfree modeling of cyclic behavior of sands within large strain Generalized Plasticity Framework". *Computers and Geotechnics*, 122(2020), 103538.
- [14] Sitharam, T. G., 2003. "Discrete element modelling of cyclic behaviour of granular materials". *Geotechnical & Geological Engineering*, 21(4), pp. 297–329.
- [15] O'Sullivan, C., Cui, L., and O'Neill, S. C., 2008. "Discrete element analysis of the response of granular materials during cyclic loading". *Soils and Foundations*, 48(4), pp. 511–530.
- [16] Sitharam, T. G., and Vinod, J. S., 2010. "Evaluation of shear modulus and damping ratio of granular materials using discrete element approach". *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(5), pp. 591–601.
- [17] In proceedings, Vinod, J. S., Indraratna, B., and Sitharam, T. G., 2013. "DEM modelling of granular materials during cyclic loading". In *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Chicago, Illinois, May 03, 2013.
- [18] In Proceedings, Manne, A., and satyam, N., 2013. "Numerical modeling of granular soils under cyclic triaxial testing". In *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, Roorkee, India, December 22-24, 2013.
- [19] In Proceedings, Manne, A., and satyam, N., 2014. "Effect of particle size on the shear modulus of granular
- [1] Cundall, P. A. and Strack, O. D., 1979. "A discrete numerical model for granular assemblies". *Geotechnique*, 29(1), pp. 47–65.
- [2] Wang, L., Park, J. Y., and Fu, Y., 2007. "Representation of real particles for DEM simulation using X-ray tomography". *Construction and Building Materials*, 21(2), pp. 338–346.
- [3] Shamsi, M. M., and Mirghasemi, A. A., 2012. "Numerical simulation of 3D semi-real-shaped granular particle assembly". *Powder Technology*, 221, pp. 431–446.
- [4] Tian, J., Liu, E., Jiang, L., Jiang, X., Sun, Y., and Xu, R., 2018. "Influence of particle shape on the microstructure evolution and the mechanical properties of granular materials". *Comptes Rendus Mécanique*, 346(6), pp. 460–476.
- [5] Iida, K., 1938. "The velocity of elastic waves in sand", *Bulletin, Earthquake research institute, Tokyo Imperial University*, 16, pp. 131–144.
- [6] Iida, K., 1940. "On the elastic properties of soil, particularly in relation to its water content", *Bulletin, Earthquake research institute, Tokyo Imperial University*, 18, pp. 657–690.
- [7] Iwasaki, T., Tatsuoka, F., and Takagi, Y., 1976. "Dynamic shear deformation properties of sand for wide strain range". *Report of civil engineering institute, 1085, Ministry of construction (in Japanese)*.
- [8] Kokusho, T., 1980. "Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range". *Soils and Foundations*, 20(2), pp. 45–60.
- [9] In Proceedings, Kokusho, T., and Esashi, Y., 1981. "Cyclic triaxial test on sands and coarse materials". In *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, June 15, 1981, Vol. 1, pp. 673–679.
- [10] In Proceedings, Jafari, S., and Jafarzadeh, F., 2006. "Effect of confining pressure on dynamic properties of Babolsar sand using cyclic triaxial tests". In *Proceeding of First European Conference on Earthquake Engineering and*

- for liquefaction assessment". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20(1), pp. 21–46.
- [26] Itasca Consulting group Inc., 2018. *Particle Flow Code in Three Dimensions (PFC<sup>3D</sup>)*. Version 6.00. Minneapolis, USA.
- [27] Asadi, M., Mahboubi, A., and Thoeni, K., 2018. "Discrete modeling of sand–tire mixture considering grain-scale deformability". *Granular Matter*, 20(2), pp. 18–31.
- [28] Belheine, N., Plassiard, J. P., Donzé, F. V., Darve, F., & Seridi, A., 2009. "Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling". *Computers and Geotechnics*, 36(1-2), pp. 320–331.
- [29] Kodicherla, S. P. K., Gong, G., Yang, Z. X., Krabbenhoft, K., Fan, L., Moy, C. K., and Wilkinson, S., 2019. "The influence of particle elongations on direct shear behaviour of granular materials using DEM". *Granular Matter*, 21(4), 86–98.
- [30] Pecker, A., 2007. "Soil behaviour under cyclic loading". *Advanced Earthquake Engineering Analysis*, Springer, Vienna, pp. 1–13.
- [31] Pan, K., and Yang, Z., 2018. "Undrained behavior of sand under cyclic paths that match storm-wave loading conditions". *Marine Geo-resources & Geotechnology*, 36(1), pp. 72–82.
- soil". In *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, Kakinaba, India, December 18-20, 2014.
- [20] Nguyen, N. S., François, S., and Degrande, G., 2014. "Discrete modeling of strain accumulation in granular soils under low amplitude cyclic loading". *Computers and Geotechnics*, 62, pp. 232–243.
- [21] Phusing, D., and Suzuki, K., 2015. "Cyclic behaviors of granular materials under generalized stress condition using DEM". *Journal of Engineering Mechanics*, 141(10), pp. 4015–034.
- [22] Jiang, M., Zhang, A., and Li, T., 2019. "Distinct element analysis of the microstructure evolution in granular soils under cyclic loading". *Granular Matter*, 21(2), pp. 39–50.
- [23] In *Proceedings*, Ngo, N. T., and Indraratna, B., 2020. "Numerical modelling of track behavior capturing particle breakage under dynamic loading". *Geo-Congress, 2020, GSP*, 316.
- [24] In *Proceedings*, Kumar, S. S., Krishna, A. M., and Dey, A., 2015. "Cyclic response of sand using stress controlled cyclic triaxial tests". In *Proceeding of 50<sup>th</sup> India Geotechnical Conference*, Pune, Maharashtra, India, December 17-19, 2015.
- [25] Manne, A., and Satyam, N., 2015. "A review on the discrete element modeling of dynamic laboratory tests

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Mahbubi Motlagh, A. R. Mahboubi Ardakani\*, A. Noorzad, *Discrete Element Method Simulation of Dynamic Behavior of Granular Materials*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4325-4344.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18320.6833](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18320.6833)



