

# ارزیابی اثر میرایی محلی در مدل سازی سه بُعدی رفتار استاتیکی و دینامیکی مصالح دانه‌یی با استفاده از روش اجزاء منفصل

نازین محبوبی مطلق (دانشجوی دکتری)

احمدرضا محبوبی اردکانی\* (دانشیار)

علی نورزاد (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (۲ - ۳۷، شماره ۱/۴، ص. ۲۳-۳۱)، پژوهشی

برای برقراری تعادل در بیشتر شبیه‌سازی‌های انجام شده به روش اجزاء منفصل از یک میرایی محلی غیرلزجی استفاده شده است. در پژوهش حاضر، برای ارزیابی اثر میرایی محلی غیرلزجی در رفتار ماسه‌های گردگوشه و تیزگوشه تحت آزمایش سه‌محوری از مقادیر مختلف ضریب میرایی ( $\alpha$ ) در شبیه‌سازی‌های سه‌بُعدی استفاده شده است. سپس، آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی و دینامیکی در شرایط تحکیم‌یافته‌ی زهکشی شده در آزمایشگاه روی نمونه‌های ماسه‌یی حاوی ذرات گردگوشه و تیزگوشه در تراکم نسبی  $80\%$  جهت کالیبره کردن مدل‌سازی‌ها انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که اثر میرایی محلی غیرلزجی در رفتار شبه‌استاتیکی مصالح قابل توجه نبوده و در شرایط یکسان، انرژی ذخیره‌شده در نمونه‌ها با ضرایب میرایی مختلف تقریباً برابر بوده است. در آزمایش‌های دینامیکی شبیه‌سازی شده، با افزایش ضرایب میرایی، نسبت میرایی نمونه‌ها، افزایش و مدول برشی آن‌ها، کاهش یافته است. همچنین، بیشینه‌ی سرعت دورانی و سرعت انتقالی ذرات در نمونه‌ها با افزایش ضریب میرایی کاهش پیدا کرده است.

**واژگان کلیدی:** شبیه‌سازی به روش اجزاء منفصل، مصالح دانه‌یی، آزمایش‌های سه‌محوری، ضریب میرایی محلی غیرلزجی.

n\_mahbubimotlagh@sbu.ac.ir  
a\_mahboubi@sbu.ac.ir  
n\_noorzad@sbu.ac.ir

## ۱. مقدمه

است که به‌عنوان یک روش نوگرا، رفتار مصالح دانه‌یی را به صورت واقع‌گرایانه و بدون تحمیل مدل‌های رفتاری پیچیده شبیه‌سازی می‌کند.

امروزه، با افزایش توان محاسباتی رایانه‌ها، استفاده از روش اجزاء منفصل در مدل‌سازی‌ها رو به فزونی است. تاکنون تلاش‌های زیادی توسط پژوهشگران به منظور ایجاد سازگاری بیشتر بین شرایط واقعی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده است. یکی از پدیده‌های فیزیکی که باید در شبیه‌سازی‌های DEM به آن توجه کرد، میرایی یا اتلاف انرژی است. لحاظ کردن اثر میرایی در مدل‌ها منجر به تدقیق نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های عددی (با توجه به مشاهده‌های آزمایشگاهی) می‌شود. با اعمال صحیح میرایی در مدل‌ها می‌توان به نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های DEM اطمینان بیشتری پیدا کرد.

هنگامی زوال انرژی در یک سیستم رخ می‌دهد که لغزش اصطکاکی در آن فعال باشد. لغزش اصطکاکی ممکن است برای رساندن سیستم به وضعیت پایدار در یک تعداد چرخه‌ی محاسباتی منطقی کافی نباشد؛ به عبارتی، برقراری تعادل استاتیکی در سیستم بدون میرایی دشوار است. در این صورت، می‌توان از انواع میرایی‌ها برای زایل کردن انرژی جنبشی سیستم استفاده کرد.<sup>[۱]</sup> رایج‌ترین رویکردهای میرایی

در مسیر توسعه‌ی مهندسی ژئوتکنیک، مطالعه‌ی رفتار استاتیکی و دینامیکی خاک‌ها یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های پژوهشگران است. با توجه به اینکه هر ساله در نقاط مختلف جهان و از جمله در کشور ایران، هزینه‌های هنگفتی برای اجرای پروژه‌های خاکی صرف می‌شود، دقت و توجه هر چه بیشتر در امور طراحی و اجرای پروژه‌های مذکور ضروری به‌نظر می‌رسد. جهت دستیابی به طراحی بهینه و ایمن، اولین گام، شناخت رفتار واقعی مصالح در حین اعمال بارهاست.

از آنجایی که انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی مصالح مختلف اغلب نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی است، مدل‌های عددی می‌توانند به‌عنوان راهکاری مناسب برای شبیه‌سازی رفتار مصالح به حساب آیند. مصالح دانه‌یی (از قبیل شن و یا ماسه) از یک‌سری ذرات مجزا از یکدیگر تشکیل شده‌اند، که در شرایط مختلف بارگذاری‌های خارجی، پاسخ‌های متفاوت و پیچیده‌یی را از خود بروز می‌دهند. یکی از کارآمدترین روش‌ها در بررسی رفتار مصالح دانه‌یی، روش اجزاء منفصل (DEM)<sup>۱</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۸/۷، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱/۱۲، پذیرش ۱۴۰۰/۴/۵.

DOI:10.24200/J30.2021.56704.2848

در مدل‌های DEM، میرایی لزوج<sup>۲</sup> (میرایی جرمی) و میرایی غیرلزوج<sup>۳</sup> (محلی<sup>۴</sup>) هستند. میرایی محلی غیرلزوجی با اعمال یک نیروی میرایی با بزرگی متناسب با بزرگی نیروهای ناپایدار وارده به هر یک از ذرات اعمال می‌شود (رابطه ی ۱).

$$F_i^d = -\alpha |F_i| \text{sign}(v_i) \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

که در آن،  $F_i^d$  نیروی میرایی محلی غیرلزوجی،  $F_i$  مؤلفه‌ی برآیند نیروها (نیروی ناپایدار کل)،  $v_i$  سرعت هر ذره و  $\alpha$  ضریب میرایی است.  $\text{sign}(v_i)$  با توجه به علامت  $v_i$  می‌تواند (-۱)، (+۱) و (۰) باشد. این نوع میرایی برای حفظ پایداری مجموعه‌ی ذرات متراکم، کارایی دارد و برای مسائلی مانند سقوط آزاد ذرات مناسب نیست. از مزایای میرایی غیرلزوجی می‌توان گفت که فقط شتاب حرکت را میرا می‌کند، مستقل از بسامد است و ضریب میرایی بدون بُعد است. در میرایی غیرلزوجی، رفتار شبیه‌سازی شده‌ی مجموعه‌ی ذرات تحت تأثیر ضریب میرایی است. به عبارتی، ضریب میرایی یک پارامتر اساسی برای بیان انرژی جذب شده و نیروی میرایی در مدل‌های عددی به روش اجزاء متفصل به شمار می‌آید. ضریب میرایی  $\alpha$  مثبت است و مقادیری کمتر از ۱ اختیار می‌کند. این لازم به ذکر است تعادل را نمی‌توان برای مدل‌ها با ضریب میرایی بسیار کوچک حفظ کرد.

میرایی لزوجی با افزودن میراگرهای نرمال و برشی برای زایل کردن انرژی، در هر یک از تماس‌ها تعریف می‌شود،<sup>[۱]</sup> و متناسب با بزرگی سرعت ذرات است. ضریب میرایی نرمال و برشی لزوجی از جمله میکروپارامترهای تماسی هستند که می‌توانند مقادیری بین ۰ و ۱ اختیار کنند. به عبارتی، میرایی لزوجی وقتی منجر به اتلاف انرژی می‌شود که تماسی بین ذرات شکل بگیرد. در سقوط آزاد یک ذره، زمان رسیدن ذره به زمین در میرایی غیرلزوجی بیشتر است، ولی ارتفاع بازگشت ذره پس از برخورد با زمین با لحاظ میرایی لزوجی کمتر است.<sup>[۳]</sup> نحوه‌ی محاسبه‌ی دو نوع میرایی لزوجی و غیرلزوجی در چرخه‌ی محاسباتی DEM متفاوت است. میرایی لزوجی در محاسبه‌ی نیروهای تماسی به‌کار می‌رود، ولی میرایی غیرلزوجی در معادله‌ی حرکت وارد می‌شود.

ان جی<sup>۵</sup> (۲۰۰۶)،<sup>[۴]</sup> با شبیه‌سازی رفتار مصالح دانه‌بندی تحت آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده دریافت که ضریب میرایی لزوجی می‌تواند در پاسخ‌های مصالح غیرمتراکم در شرایط استاتیکی اثر گذارد. ان جی (۲۰۰۶)،<sup>[۴]</sup> بیان کرد که با افزایش میرایی، تغییر حجم و مقاومت برشی بیشینه‌ی مصالح افزایش می‌یابد؛ در حالی که بیشینه‌ی سرعت ذرات کاهش پیدا می‌کند و میرایی اثری در مقاومت برشی نهایی مصالح ندارد. همچنین، ان جی و همکاران (۲۰۱۵)،<sup>[۵]</sup> گزارش کردند که اثر میرایی لزوجی در رفتار نمونه‌های متراکم قابل صرف‌نظر است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی مصالح دانه‌بندی توسط ونگ و یان<sup>۶</sup> (۲۰۱۲)،<sup>[۶]</sup> نشان می‌دهد که در میرایی محلی غیرلزوج، نیروی میرایی محلی متناسب با نیروی ناپایدار کل (متناسب با شتاب ذرات) است و افزایش ضریب میرایی از ۱/۰ به ۰/۷ منجر به افزایش انرژی زایل شده در نمونه‌ها می‌شود. بدون اطلاعات تجربی، تعیین مقدار  $\alpha$  برای پیش‌بینی رفتار میرا شده دشوار است.<sup>[۶]</sup> کوزیکی<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۲)،<sup>[۷]</sup> بیان کردند که با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی نمونه‌ی ماسه‌بندی در آزمایش سه‌محوری استاتیکی، حدود ۶٪ از انرژی کل نمونه در حین آزمایش توسط میرایی غیرلزوجی زایل می‌شود. کوزیکی و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۸]</sup> در ادامه‌ی پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضریب میرایی، نسبت تخلخل نمونه‌ها، اندازه‌ی نمونه، محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات و انرژی میرا شده در آن‌ها افزایش می‌یابد.

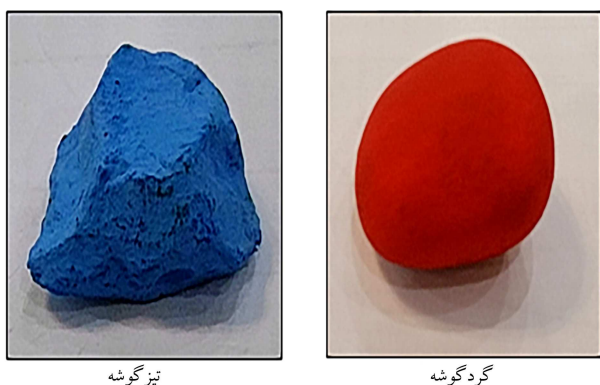
با مرور منابع موجود مشخص شد که تاکنون پژوهشی در زمینه‌ی مطالعه‌ی اثر

میرایی غیرلزوجی در رفتار استاتیکی و دینامیکی خاک‌های دانه‌بندی شبیه‌سازی شده در DEM انجام نشده است. با توجه به اهمیت بحث میرایی در تدقیق نتایج مدل‌سازی‌ها، بررسی ارتباط بین میرایی غیرلزوجی با پارامترهای درشت مقیاس، مانند: مقاومت برشی بیشینه، تغییرات کرنش حجمی، انرژی ذخیره شده، نسبت میرایی و مدول برشی نمونه و پارامترهای ریزمقیاس، مانند: نیروهای بین ذره‌یی، سرعت انتقالی و سرعت دورانی ذرات ضروری به نظر می‌رسد.

همچنین DEM امکان بررسی پارامترهای میکرو و توضیح اثر آن‌ها در پیش‌بینی رفتار درشت مقیاس مجموعه‌ی ذرات خاک را دارد.<sup>[۹]</sup> از جمله‌ی پارامترهای میکرووی ذکر شده، می‌توان به ضریب میرایی غیرلزوجی اشاره کرد. در پژوهش حاضر، برای ارزیابی اثر میرایی غیرلزوجی در رفتار ایستا و پویا ماسه‌ی تیزگوشه و گردگوشه از مقادیر مختلف ضریب میرایی (۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹) به عنوان یک پارامتر ورودی ریزمقیاس در شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی استفاده شده است (لازم به ذکر است برای مقادیر  $\alpha$  کمتر از ۰/۵، تعادل در نمونه‌ها حاصل نشده است). آزمایش‌های سه‌محوری ایستا و پویا روی نمونه‌های ماسه‌بندی حاوی ذرات گردگوشه و تیزگوشه در تراکم نسبی ۸۰٪ تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال و نسبت تنش تناوبی ۰/۵ انجام شد. پس از کالیبره کردن مدل تهیه شده با نتایج آزمایشگاهی، به مطالعه‌ی اثر نسبت تخلخل اولیه، فشار همه‌جانبه و شکل ذرات در رفتار نمونه‌های شبیه‌سازی شده نیز پرداخته شده است. در نهایت، نتایج به‌دست آمده از نگاه درشت مقیاس و ریز مقیاس بحث و بررسی شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

در مطالعه‌ی حاضر از خاک ماسه‌بندی استفاده شده است که از نظر شکل ظاهری به دو گروه ماسه‌ی گردگوشه و تیزگوشه قابل تفکیک بوده است (شکل ۱) دو گروه ماسه‌ی اخیر با دانه‌بندی مشابه آزمایش شدند و منحنی دانه‌بندی آن‌ها در شکل ۲ مشاهده می‌شود. سایر ویژگی‌های مصالح آزمایش شده در جدول ۱ ارائه شده است.



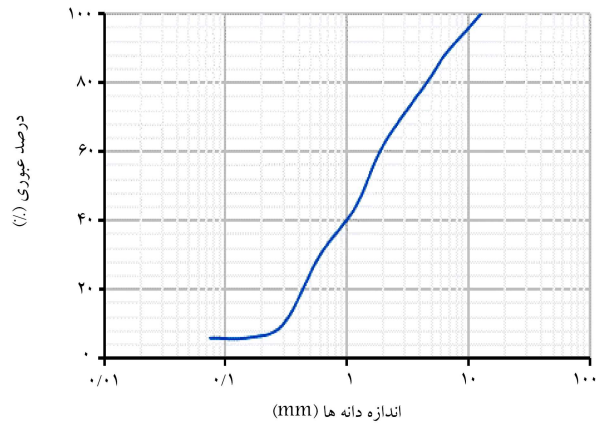
شکل ۱. ماسه‌ی گردگوشه و تیزگوشه.

جدول ۱. ویژگی‌های مصالح.

نوع خاک	چگالی ویژه	ضریب چسبندگی	انحنا
ماسه بد دانه‌بندی شده	۲/۶۷	۷/۱	۰/۷۳

جدول ۲. آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده.

آزمایش	نمونه	فشار همه‌جانبه (کیلو پاسکال)	نسبت تخلخل	توضیحات
سه‌محوری استاتیکی	ماسه	۱۰۰	۰/۴۲	زهکشی شده
	گردگوشه			کرنش کنترل
سه‌محوری دینامیکی	ماسه	۱۰۰	۰/۴۲	زهکشی شده
	گردگوشه			تنش کنترل، یک مرحله بارگذاری - باربرداری به شکل سینوسی شامل ۴۰ تناوب



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ای استفاده شده.

## ۱.۱.۲. آزمایش‌های آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های سه‌محوری ایستا و پویا در آزمایشگاه روی نمونه‌های ماسه‌ای حاوی ذرات گردگوشه و تیزگوشه انجام شده است، که در زیربخش‌های ۱.۱.۲ و ۲.۱.۲ توضیح داده شده است.

### ۱.۱.۲.۱. آزمایش سه‌محوری استاتیکی

در پژوهش حاضر، دو آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی شده‌ی استاتیکی بر روی ماسه‌های استفاده شده (ماسه‌ی تیزگوشه و گردگوشه) با توزیع اندازه‌ی ذرات به صورت نمودار دانه‌بندی ارائه شده در شکل ۲، در قالب استوانه‌یی به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر در نسبت تخلخل ۰/۴۲ و فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلو پاسکال انجام شده است.

نحوه‌ی تهیه‌ی نمونه‌ها به این صورت بود که ابتدا مقداری از ماسه‌ی موردنظر (با توجه به حجم قالب و تراکم ۸۰٪) به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در گرم‌خانه قرار گرفت. پس از سیری شدن زمان مذکور، مصالح از گرم‌خانه خارج شدند و به مدت ۱ ساعت در آزمایشگاه قرار گرفتند تا با محیط هم‌دما شوند. مصالح خشک به ۷ قسمت مساوی تقسیم شدند. هر قسمت به عنوان یک لایه در داخل قالب ریخته و با کوبه‌ی مخصوص متراکم شد. پس از کوبش آخرین لایه، کلاهک بارگذاری روی نمونه نصب شد. پس از آن، فرایند اشباع‌سازی نمونه تا جایی که مقدار B اسکمپتون<sup>۸</sup> به بیش از ۹۵٪ برسد، ادامه پیدا کرد. سپس شیرهای زهکشی باز و نمونه در فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلو پاسکال تحکیم شد. فرایند تحکیم منجر به زایل شدن بیش از ۹۵٪ فشار آب حفره‌یی شد. بار محوری با سرعت ثابت (۱/ میلی‌متر بر دقیقه) به نمونه‌ها اعمال شد و اعمال بار تا کرنش محوری ۲۰٪ ادامه پیدا کرد.

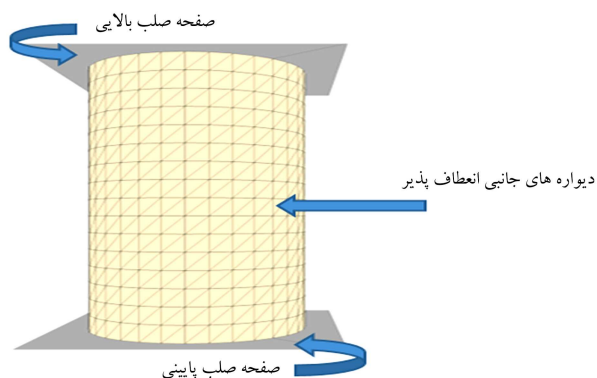
### ۲.۱.۲. آزمایش سه‌محوری دینامیکی

مراحل تهیه‌ی نمونه و اعمال تحکیم همسان (۱۰۰ کیلو پاسکال) مشابه آنچه در قسمت ۱.۱.۲ بیان شد، بوده است. فقط در قسمت بارگذاری محوری تفاوت وجود داشت که در آزمایش سه‌محوری دینامیکی، تنش تناوبی ۵۰ کیلو پاسکال پس از زایل شدن ۹۵٪ فشار آب حفره‌یی در شرایط زهکشی شده به نمونه‌ها (گردگوشه و تیزگوشه) وارد شد. هر آزمایش سه‌محوری دینامیکی پس از اعمال ۴۰ تناوب بارگذاری - باربرداری به اتمام رسید. آزمایش‌های آزمایشگاهی طبق جدول ۲ انجام شده‌اند.

## ۲.۲. شبیه‌سازی‌های عددی

پس از انجام آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی و دینامیکی در آزمایشگاه، به شبیه‌سازی آن‌ها با نرم‌افزار PFC<sup>3D</sup> (نسخه‌ی ۶)<sup>۱۰</sup> که براساس روش اجزاء منفصل است، پرداخته شد. با توجه به اینکه رفتار درشت مقیاس ماسه به شکل ذرات حساس است، شکل دانه‌ها در مدل‌سازی باید تا حد امکان نزدیک به شکل واقعی ذرات در نظر گرفته شود، تا دقت نتایج شبیه‌سازی‌های عددی ارتقاء یابد. روش‌های مختلفی برای ارائه‌ی شکل‌های واقعی ذرات در فضای سه‌بعدی فراهم شده است، که رایج‌ترین آن‌ها روش خوشه‌یی<sup>۹</sup> است. در پژوهش حاضر، با استفاده از مجموعه‌ی کره‌هایی که با یکدیگر هم‌پوشانی دارند و به یکدیگر به صورت صلب متصل شده و یک جسم یکپارچه را تشکیل داده‌اند، ذرات تیزگوشه مدل‌سازی شده‌اند.

برای شبیه‌سازی ذرات تیزگوشه به روش خوشه به این صورت عمل شد که ابتدا با توجه به منحنی دانه‌بندی ارائه شده (شکل ۲)، حجم قالب نمونه‌ی سه‌محوری و تراکم موردنیاز مصالح مصرفی در یک نمونه مشخص شدند. سپس دانه‌های درشت خاک نمونه (مانده روی الک شماره‌ی ۴) از نظر شکل ظاهری به صورت کیفی به دو گروه عمده‌ی گردگوشه و تیزگوشه تفکیک شدند. در شکل ۳، تصویری از سنگ‌دانه‌های نامنظم (غیرکروی) ماسه‌ی استفاده شده مشاهده می‌شود. هر یک از گروه‌های اخیر قابل تفکیک به چندین زیرگروه (مانند: کمی تیزگوشه، تیزگوشه‌ی متوسط و بسیار تیزگوشه) هستند. تعداد ذرات نمونه در هر زیرگروه نیز تعیین شد. با توجه به تعداد موجود در هر زیرگروه، ۱ یا ۲ ذره به عنوان نماینده‌ی آن زیرگروه انتخاب شد. هر چه تعداد ذرات موجود در هر زیرگروه بیشتر باشد، تعداد نمایندگان آن‌ها نیز بیشتر است. سپس، سنگ‌دانه‌های غالب در نمونه (نمایندگان هر یک از زیرگروه‌ها) انتخاب (نمایش داده شده در شکل ۳ با نام‌های الف تا ح) و به کمک روش خوشه در DEM شبیه‌سازی شدند. برای ۵ نمای دیگر نیز مانند روش استفاده شده در شکل ۳ عمل شد و در نهایت، تصویر کامل یک ذره در فضای سه‌بعدی تعیین شد. از آنجایی که ابتدا مصالح در آزمایشگاه دانه‌بندی می‌شوند، قطر متوسط هر یک از سنگ‌دانه‌ها (قطر متوسط برای سنگ‌دانه‌هایی که بین دو الک متوالی قرار گرفته‌اند، عبارت از میانگین حسابی اندازه‌ی قطر چشمه‌های دو الک بالا و پایین مصالح) مشخص است.



شکل ۵. دیواره های جانبی انعطاف پذیر و صفحات صلب پایینی و بالایی.

به منظور شبیه سازی دقیق آزمایش ها و 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 می دهد که تغییر شکل های ناشی از توسعه ی نواحی برشی را با دقت مناسبی نمایش دهد. مرزهای استفاده شده در پژوهش حاضر به صورت دیواره های تغییر شکل پذیر که یک محیط استوانه ایی شکل را فراهم کرده اند، در نظر گرفته شده است (برای شبیه سازی غشا در آزمایش سه محوری از المان های سازه یی پوسته یی با قطعه های افقی و عمودی با سختی ثابت استفاده شده است. هر چه تعداد بخش هایی که دیواره ی مذکور را تعریف می کند، بیشتر باشد، دقت نتایج بیشتر می شود) و همچنین صفحات بالایی و پایینی نمونه به صورت صفحات صلب بدون اصطکاک لحاظ شدند (شکل ۵) که این مدل سازی بسیار نزدیک به شرایط آزمایش سه محوری در آزمایشگاه بوده است.

#### ۲.۲.۲. تحکیم نمونه

آزمایش سه محوری شامل دو مرحله ی تحکیم و برش است. تحکیم هسان با اعمال فشار همه جانبه ی  $10^6$  کیلو پاسکال به صفحه ی بالایی و دیواره های غشایی نمونه در قالب نموی انجام شده است. فشار همه جانبه در حین آزمایش با استفاده از برنامه ی پایش تنش  $10^6$ ، دائماً کنترل شد.

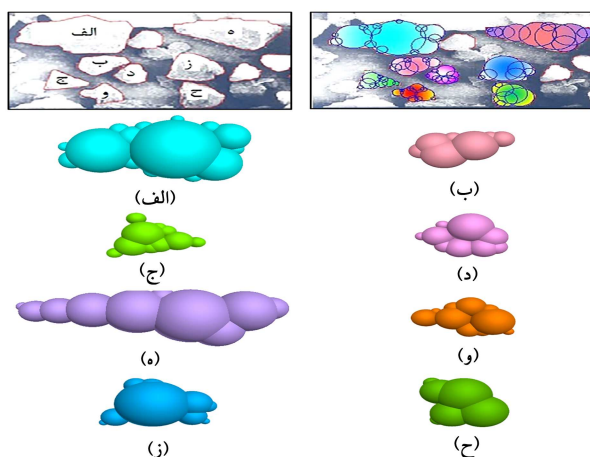
#### ۳.۲.۲. اعمال بار

الف) آزمایش استاتیکی: برای اعمال بار محوری در آزمایش سه محوری استاتیکی کرنش کنترل، ضمن ثابت نگه داشتن تنش شعاعی، صفحه ی بالایی با سرعت ثابت  $10^{-6} \times 3$  متر بر ثانیه در شرایط زهکشی شده به سمت پایین حرکت کرده است (در آزمایشگاه، بار محوری با سرعت ثابت  $1/10^6$  میلی متر بر دقیقه به نمونه ها اعمال شد).

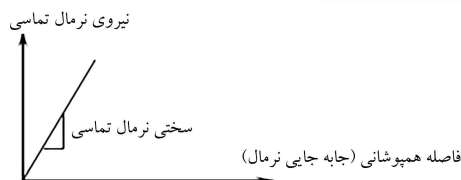
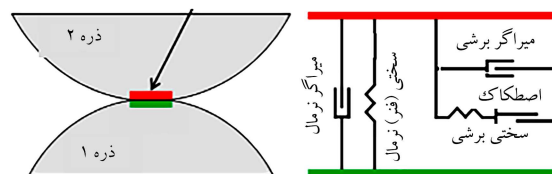
ب) آزمایش دینامیکی: از آنجایی که آزمایش دینامیکی به صورت تنش کنترل شبیه سازی شده است، در مرحله ی برش تناوبی، صفحه ی بالایی برای اعمال بار محوری در رفت و برگشت های متناوب به شکل سینوسی به سمت پایین و بالا حرکت کرد. این کار نیز با استفاده از برنامه ی پایش تنش، ضمن ثابت نگه داشتن تنش شعاعی به عنوان تنش محصورکننده (با کنترل حرکت دیواره های جانبی)، نمونه را تحت تنش محوری متناوب تک مرحله یی در راستای قائم قرار داد و  $40^\circ$  تناوب تنش رفت و برگشتی  $50$  کیلو پاسکالی به نمونه اعمال شد.

#### ۴.۲.۲. کالیبراسیون

در نرم افزار  $PFGE^{10}$  برای شبیه سازی نمونه به خواص ریز مقیاس آن احتیاج است. نرم افزار اخیراً پارامترهای میکرو، خواص هندسی ذرات، ویژگی های تماسی، و شرایط مرزی را به عنوان داده های ورودی دریافت می کند و با انجام چرخه های



شکل ۳. شبیه سازی ذرات تیز گوشه (تصویر از نمای صفحه  $Z+$ ).



شکل ۴. مدل تماسی خطی.

#### ۱.۲.۲. تهیه ی نمونه

نمونه ها به صورت مجموعه یی از ذرات (گرد گوشه یا تیز گوشه) با دانه بندی مشخص شده در شکل ۲ در قالب استوانه ایی شکل به قطر  $100$  و ارتفاع  $200$  میلی متر به صورت تصادفی و خشک در نسبت تخلخل  $42/0$  تهیه شدند؛ به طوری که نمونه ی گرد گوشه حاوی  $43000$  ذره ی کروی و نمونه ی تیز گوشه حاوی  $20160$  ذره ی غیر کروی بود. مدل تماس بین ذرات به صورت خطی در نظر گرفته شد که از مؤلفه های فنر و میراگر به صورت موازی با یکدیگر تشکیل شده بود و در آن، فنرها رفتار اصطکاک کی کشسان خطی و میراگرها رفتار لزجی (میرایی لزجی) را مدل می کردند (شکل ۴). در مدل اخیراً، لنگر تماسی منتقل نمی شد و فقط انتقال نیرو صورت می گرفت. مؤلفه های نیروهای نرمال و برشی در یک سطح تماس کوچک به طور مجزا محاسبه شدند. نیروی نرمال تماسی بین دو ذره در یک لحظه ی معین، به صورت حاصل ضرب سختی نرمال تماسی در فاصله ی هم پوشانی محاسبه شد (ارتباط خطی بین نیرو و هم پوشانی). نمو نیروی برشی در تماس به صورت خطی (با سختی برشی تماس) به جابه جایی نسبی برشی، مرتبط می شود. نیروی برشی در هر گام محاسباتی از حاصل جمع نیروی برشی به دست آمده در گام قبلی و نمو نیروی برشی در گام فعلی به دست آمده است. بزرگی نیروی برشی محاسبه شده به یک مقدار حاصل از ضرب ضریب اصطکاک در نیروی نرمال محدود می شد.

جدول ۳. پارامترهای کالیبره شده‌ی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها.

مقدار	پارامتر
۱	نسبت سختی نرمال به برشی در تماس
۱	سختی مرز انعطاف‌پذیر (مگانیوتن بر متر)
۲۶۵°	چگالی ذرات (کیلوگرم بر متر مکعب)
۹	مدول تماسی (موثر یا کشسان) ذرات (مگانیوتن بر متر)
°/۷	ضریب اصطکاک بین ذرات
در حین تحکیم در حین برش °/۵	ضریب اصطکاک بین ذرات و دیواره‌ها
°/۷	ضریب میرایی محلی غیرلزوج

جدول ۴. برنامه شبیه‌سازی‌های انجام شده.

توضیحات	نسبت تخلخل	فشار همه‌جانبه (کیلوپاسکال)	نمونه	آزمایش
			ماسه	
زهکشی شده			تیزگوشه	سه‌محوری
کرنش کنترل			ماسه	استاتیکی
			گردگوشه	
		۳۰۰ و ۱۰۰	ماسه	
زهکشی شده	°/۴۲		تیزگوشه	سه‌محوری
تشش کنترل،	°/۶۶			دینامیکی
یک مرحله	°/۷۸ و		ماسه	
بارگذاری - باربرداری به			تیزگوشه	
شکل سینوسی شامل				
۴۰ تناوب، نسبت تنش				
تناوبی برابر با °/۵				

با مقایسه‌ی نسبت پواسون و مدول یانگ نمونه‌ها حاصل از روش‌های عددی و تجربی به‌دست آمده است (با استفاده از روش سعی و خطا در مقدار میکروپارامترها). با کالیبره کردن دو میکروپارامتر ذکر شده، مقادیر ضرایب نرمال و برشی تماسی مطابق روابط مطرح شده مشخص می‌شود. سختی مرزهای انعطاف‌پذیر برای محاسبه‌ی نیروهای تماسی در هنگام تماس ذرات با دیواره‌ها استفاده می‌شود. ضریب اصطکاک بین ذرات و همچنین بین ذرات و دیواره‌ها جهت نزدیک‌تر کردن شرایط شبیه‌سازی به واقعیت استفاده می‌شود که مقادیر آن‌ها با مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی می‌تواند بین ° تا ۱ اختیار شود که در پژوهش حاضر مناسب‌ترین مقادیر در جدول ۳ ارائه شده است. مشاهده شد که نمونه‌ها با ضریب  $\alpha$  برابر با °/۷ با آزمایش‌های تجربی کالیبره شدند. برای مطالعه‌ی اثر میرایی محلی غیرلزوج در رفتار استاتیکی و دینامیکی ماسه از مقادیر مختلف ضرایب میرایی (°/۵، °/۶، °/۷، °/۸، و °/۹) در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد که در بخش بعدی به آن پرداخته شده است. لازم به ذکر است تعادل را نمی‌توان برای مدل‌ها با میرایی بسیار کوچک حفظ کرد.

در ادامه، نمونه‌های کالیبره شده به کمک آزمایش‌های تجربی، تحت فشار همه‌جانبه‌ی ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال در نسبت‌های تخلخل °/۴۲، °/۶۶ و °/۷۸ و بار محوری تناوبی ۱۵ کیلوپاسکال (آزمایش دینامیکی) شبیه‌سازی شدند، تا اثر نسبت تخلخل اولیه و فشار همه‌جانبه در کنار ضریب میرایی در رفتار نمونه‌ها مطالعه شود. خلاصه‌ی برنامه‌ی شبیه‌سازی‌های انجام شده در جدول ۴ ارائه شده است.

محاسباتی، خواص درشت مقیاس (مانند مقاومت برشی) و ریز مقیاس (مانند نیروهای تماسی بین ذرات) نمونه را به‌عنوان خروجی ارائه می‌دهد.

در فرایند کالیبراسیون، پارامترهای ریز مقیاس ذرات و تماس‌ها در تحلیل‌های اجزاء منفصل به کمک مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی تعیین می‌شوند. هیچ روش ساده‌ی برای تعیین پارامترهای میکرومقیاس بین ذره‌ی وجود ندارد.<sup>[۱۱]</sup> پارامترهای میکروسکوپی مذکور می‌توانند اثر قابل توجهی در رفتار درشت مقیاس نمونه داشته باشند. در مطالعه‌ی حاضر، میکروپارامترهای موردنیاز برای شبیه‌سازی ماسه به روش اجزاء منفصل براساس نتایج آزمایش‌های سه‌محوری انجام شده بر روی ماسه‌های گردگوشه و تیزگوشه در فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال کالیبره شدند. چندین شبیه‌سازی با فرایند سعی و خطا برای کالیبراسیون پارامترهای نمونه‌های ماسه‌ی انجام پذیرفت.

نمودارهای تنش برشی - کرنش محوری و کرنش حجمی - کرنش محوری حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی (سه‌محوری استاتیکی و دینامیکی) و شبیه‌سازی‌های عددی نمونه‌های حاوی ماسه‌های گردگوشه و تیزگوشه تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۶ مشاهده می‌شود. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی تهیه شده و مقایسه‌ی بهتر، نتایج آزمایش‌های تجربی و مدل‌های عددی در قالب یک نمودار برای هر گروه از نمونه‌ها و آزمایش‌ها ارائه شده است.

مشاهده می‌شود که رفتار نمونه‌های شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی با دقت قابل قبولی سازگاری دارد. اختلاف بیشینه بین تنش انحرافی حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی در آزمایش سه‌محوری استاتیکی برای نمونه‌ها با ذرات گردگوشه و تیزگوشه به ترتیب ۴ و ۱۳ درصد به دست آمده است. تفاوت بین تنش برشی بیشینه در نمونه‌های گرد و تیزگوشه در آزمایش سه‌محوری دینامیکی به ترتیب ۲ و ۴ مگاپاسکال بوده است.

با استفاده از مرزهای جانبی انعطاف‌پذیر، امکان بررسی تغییر حجم نمونه‌ها نیز در طول آزمایش‌ها فراهم شده است. از نمودارهای کرنش حجمی - کرنش محوری در شکل ۶ مشخص است که نمونه‌های عددی (ماسه‌های گردگوشه و تیزگوشه) مانند نمونه‌های آزمایشگاهی، در هر دو آزمایش ایستا و پویا در کرنش‌های اولیه دچار انقباض کمی شده و پس از آن رفتار اتساعی را تا انتهای آزمایش تجربه کرده‌اند. تفاوت قابل توجهی در نمودارهای کرنش حجمی نمونه‌ها حاصل از آزمایش‌ها (تجربی) و شبیه‌سازی‌ها مشاهده نمی‌شود. پارامترهای کالیبره شده‌ی استفاده شده در شبیه‌سازی‌های اخیر در جدول ۳ ارائه شده است.

از چگالی ذرات ( $\rho$ ) برای محاسبه‌ی جرم ذرات ( $m$ ) با توجه به حجم آن‌ها استفاده می‌شود (رابطه‌ی ۲).

$$m = \rho \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right) \quad (2)$$

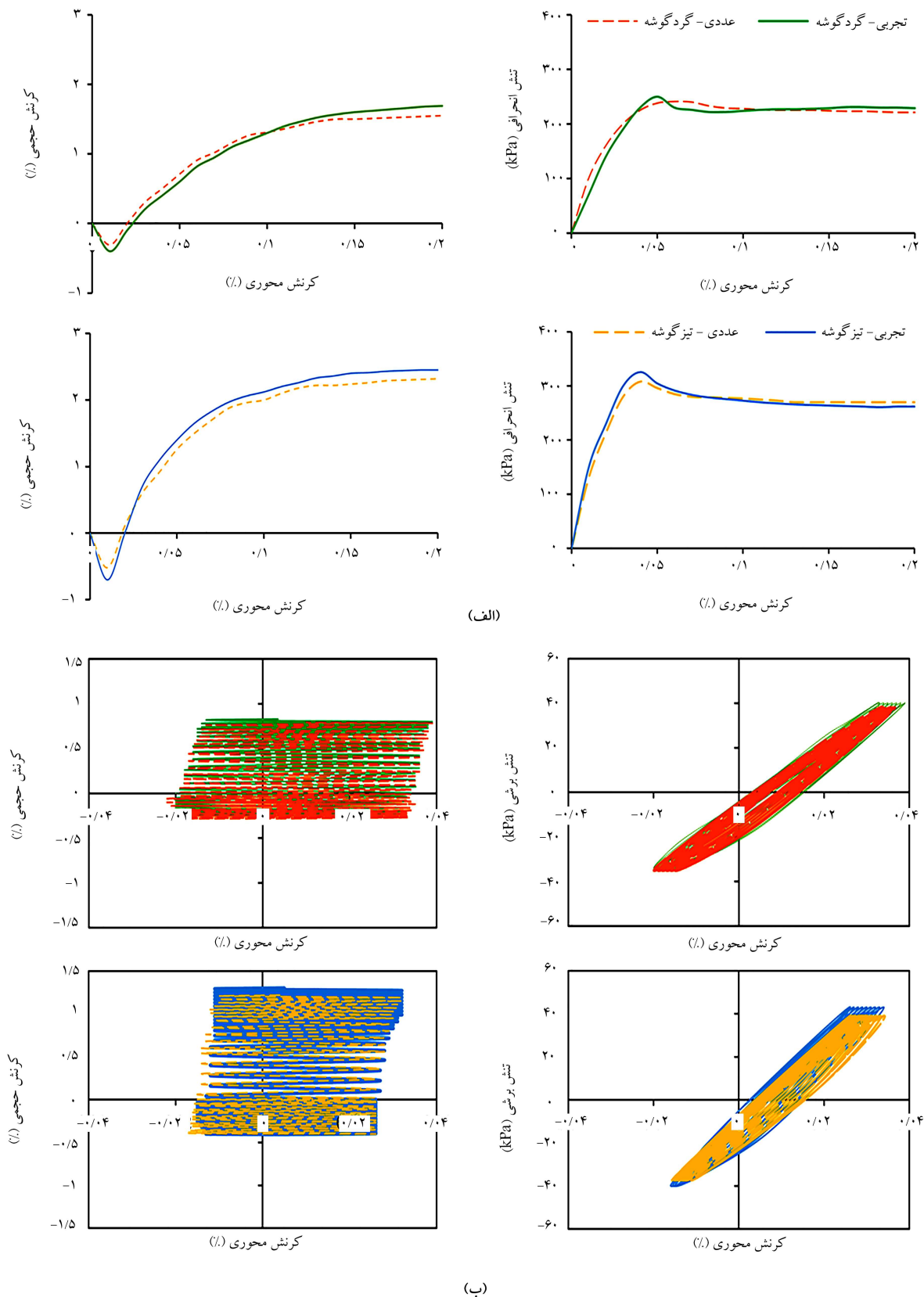
که در آن،  $R$  شعاع ذره است.

مدول مؤثر ذرات ( $E$ ) برای محاسبه‌ی سختی تماس نرمال ( $k_n$ ) به‌کار می‌رود (رابطه‌ی ۳).  $\bar{R}$  متوسط شعاع دو ذره در تماس ( $R_a$  و  $R_b$  است (رابطه‌ی ۴).

$$k_n = 4 \bar{R} E \quad (3)$$

$$\bar{R} = \frac{2R_a \times R_b}{R_a + R_b} \quad (4)$$

با داشتن نسبت سختی نرمال به برشی و سختی نرمال تماس، سختی برشی تماس به‌دست می‌آید که برای محاسبه‌ی نیروی برشی تماسی موردنیاز است. مقدار نسبت سختی نرمال به برشی در تماس و مدول مؤثر ذرات (میکروپارامترها) به ترتیب



شکل ۶. الف) نمودارهای تنش انحرافی - کرنش محوری و کرنش حجمی - کرنش محوری (استاتیکی)، ب) نمودارهای تنش برشی - کرنش محوری و کرنش حجمی - کرنش محوری (دینامیکی) حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی نمونه‌های گرد گوشه و تیز گوشه.

## ۳. نتایج و بحث

### ۳.۱. نتایج شبیه‌سازی آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی

#### ۳.۱.۱. اثر نسبت تخلخل در رفتار استاتیکی ماسه

در شکل ۷، نمودارهای تنش انحرافی - کرنش محوری و کرنش حجمی - کرنش محوری مربوط به نمونه‌ها با ذرات گردگوشه در تراکم نسبی ۸۰، ۴۴، و ۲۶ درصد (نسبت‌های تخلخل ۰/۴۲، ۰/۶۶ و ۰/۷۸) فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال و ضرایب میرایی مختلف مشاهده می‌شود.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش تراکم در نمونه‌ها منجر به تغییر رفتار آن‌ها شده و نمونه‌های متراکم، کرنش نرم‌شوندگی داشته‌اند و در ابتدای آزمایش، رفتار انقباضی را تجربه کردند و سپس دچار اتساع شدند؛ این در حالی است که نمونه‌ها با نسبت‌های تخلخل ۰/۶۶ و ۰/۷۸، کرنش سخت‌شوندگی داشتند و در سراسر آزمایش منقبض شدند. با کاهش نسبت تخلخل در نمونه‌های گردگوشه از ۰/۷۸ به ۰/۶۶ و ۰/۴۲ به ترتیب مقاومت بیشینه، ۱۲ و ۳۴ درصد افزایش پیدا کرده است.

#### ۳.۱.۲. اثر فشار همه‌جانبه در رفتار استاتیکی ماسه

در شکل ۸، رفتار نمونه‌های حاوی ذرات گردگوشه در نسبت‌های تخلخل ۰/۴۲، ۰/۶۶ و ۰/۷۸، فشار همه‌جانبه‌ی ۳۰۰ کیلوپاسکال و ضرایب میرایی مختلف مشاهده می‌شود که مطابق آن، با کاهش نسبت تخلخل در نمونه‌های مذکور از ۰/۷۸ به ۰/۶۶ و ۰/۴۲، به ترتیب مقاومت بیشینه ۱۰/۶ و ۳۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

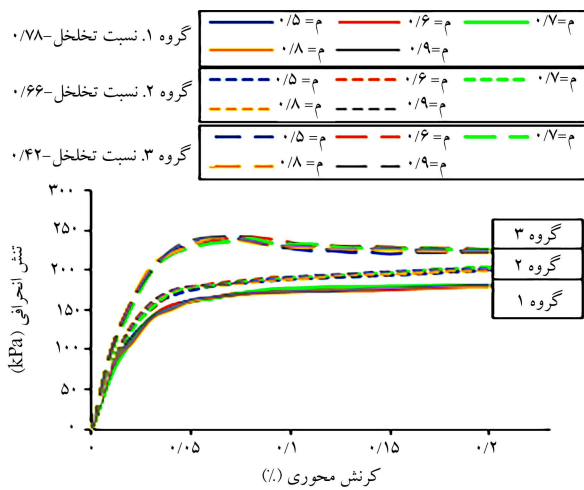
با مقایسه‌ی شکل‌های ۷ و ۸ مشخص است که افزایش فشار همه‌جانبه از ۱۰۰ به ۳۰۰ کیلوپاسکال، ۲۹، ۳۱، و ۲۷ درصد افزایش مقاومت در نمونه‌های گردگوشه با نسبت‌های تخلخل ۰/۴۲، ۰/۶۶ و ۰/۷۸ را به همراه داشته است. افزایش از ۱۰۰ به ۳۰۰ کیلوپاسکال در فشار همه‌جانبه منجر به کاهش ۳۷ درصدی در بیشینه‌ی اتساع نمونه با نسبت تخلخل ۰/۴۲ و افزایش ۷۹ و ۹۶ درصد در بیشینه‌ی انقباض نمونه‌ها با نسبت‌های تخلخل ۰/۶۶ و ۰/۷۸ شده است.

#### ۳.۱.۳. اثر شکل ذرات در رفتار استاتیکی ماسه

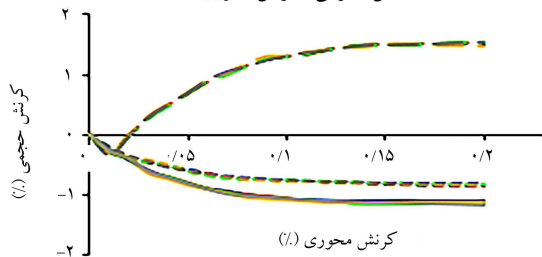
با توجه به شکل ۹، بیشینه‌ی مقاومت و اتساع در نمونه‌های تیزگوشه، حدود ۳۳ و ۴۸ درصد بیش از نمونه‌های گردگوشه در یک نسبت تخلخل، ضریب میرایی و فشار همه‌جانبه‌ی معین بوده است. زیرا مقاومت در خاک‌های دانه‌ی از اصطکاک بین ذرات نشأت گرفته و قفل و بست بهتری بین ذرات با شکل‌های غیرکروی ایجاد شده است که منجر به افزایش اصطکاک بین ذره‌ی شده و از لغزش ذرات بر روی یکدیگر کاسته است. تغییر حجم در نمونه‌ی تیزگوشه به دلیل تغییر در ساختار نمونه با حرکت ذرات غیرکروی در اثر اعمال بار و بازآرایی ذرات بیشتر بوده است.

#### ۳.۱.۴. اثر میرایی در رفتار استاتیکی ماسه

در شکل‌های ۷ الی ۹، اثر میرایی محلی غیرلزج در منحنی‌های تنش انحرافی - کرنش محوری و کرنش حجمی - کرنش محوری نمونه‌های ماسه‌ی (گردگوشه و تیزگوشه) در نسبت‌های تخلخل ۰/۴۲، ۰/۶۶ و ۰/۷۸ و فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، نمودارهای مربوط به ضرایب میرایی مختلف تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند (یک نمونه‌ی مشخص در نسبت تخلخل و فشار همه‌جانبه‌ی معین) و اثر میرایی مذکور در شبیه‌سازی‌های شبه‌استاتیکی قابل توجه نیست. زیرا سرعت بارگذاری به اندازه‌ی کافی آهسته انتخاب شده است ( $10^{-6} \times 3$  متر بر ثانیه) تا اطمینان حاصل شود که آزمایش

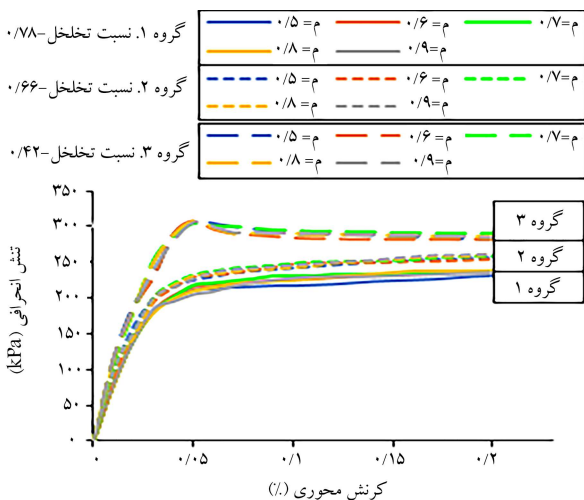


الف) تنش انحرافی - کرنش محوری؛

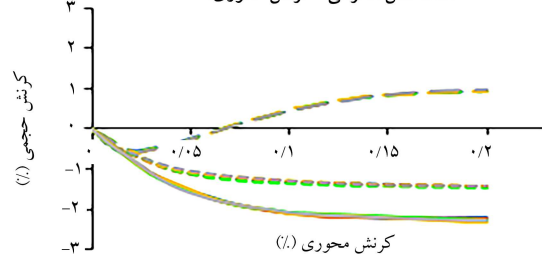


ب) کرنش حجمی - کرنش محوری نمونه گرد گوشه با نسبت تخلخل ۰/۴۲، ۰/۶۶ و ۰/۷۸ در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ kPa.

شکل ۷. نمودار اثر ضریب میرایی در رفتار.

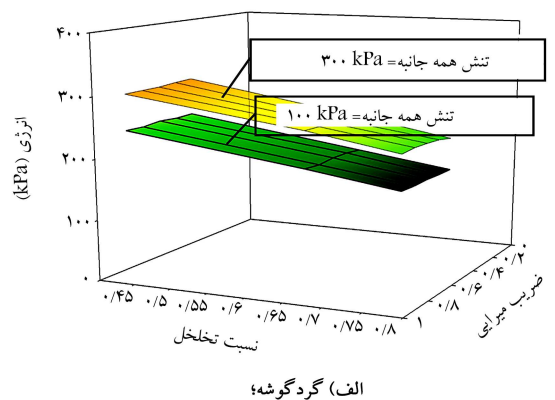


الف) تنش انحرافی - کرنش محوری؛

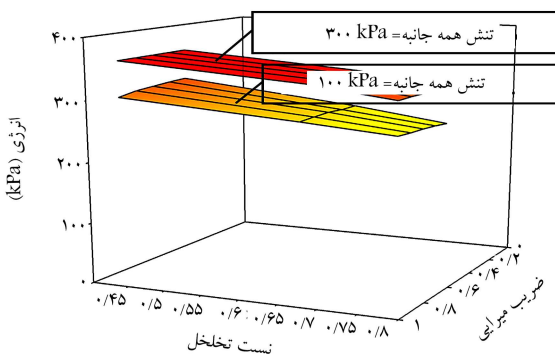


ب) کرنش حجمی - کرنش محوری نمونه گرد گوشه با نسبت تخلخل ۰/۴۲، ۰/۶۶ و ۰/۷۸ در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ kPa.

شکل ۸. نمودار اثر ضریب میرایی در رفتار.

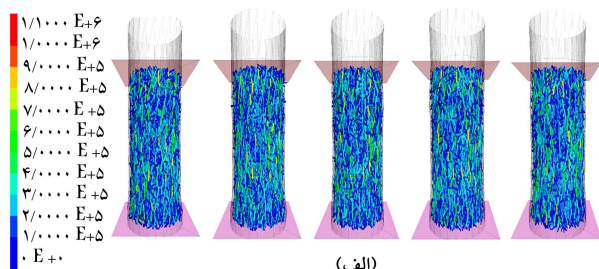


الف) گرد گوشه؛

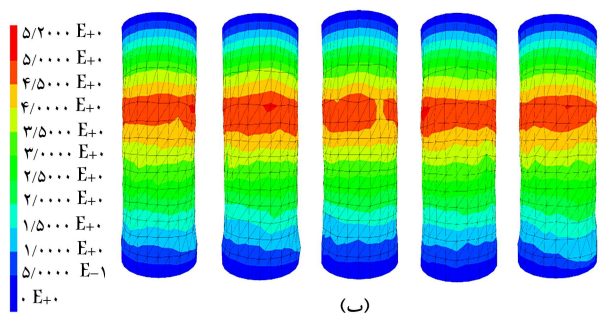


ب) تیز گوشه در دو فشار همه جانبه ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال.

شکل ۱۰. سطح انرژی ذخیره شده - نسبت تخلخل و ضرایب میرایی نمونه‌ها.



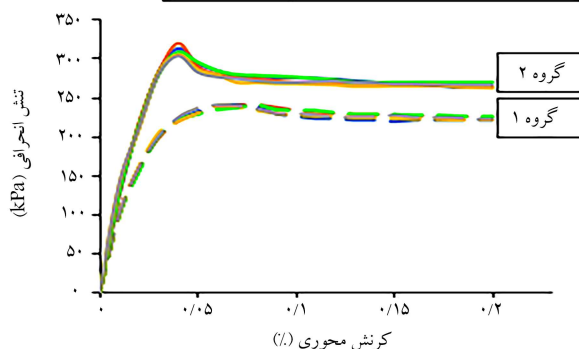
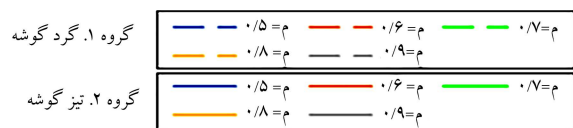
الف)



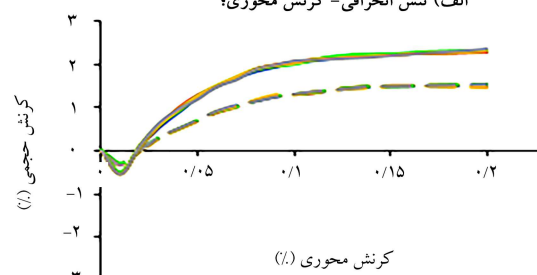
ب)

شکل ۱۱. الف) نیروهای بین ذره‌یی و ب) بیشینه‌ی تغییر شکل ایجاد شده در نمونه‌ی گرد گوشه در ضرایب میرایی مختلف در انتهای آزمایش سه‌محوری استاتیکی.

شده در نمونه‌های گرد گوشه در نسبت تخلخل ۰/۴۲ و فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلو پاسکال در انتهای آزمایش سه‌محوری ایستا (کرنش محوری ۲۰٪) در ضرایب میرایی مختلف در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. ضریب میرایی اثر قابل توجهی در متوسط تعداد تماس‌ها، بزرگی نیروهای تماسی و همچنین بیشینه‌ی تغییر شکل در



الف) تنش انحرافی - کرنش محوری؛



ب) کنش حجمی - کرنش محوری نمونه گرد گوشه تیز گوشه با نسبت تخلخل ۰/۴۲ در فشار همه جانبه ۱۰۰ kPa.

شکل ۹. نمودار اثر ضریب میرایی در رفتار.

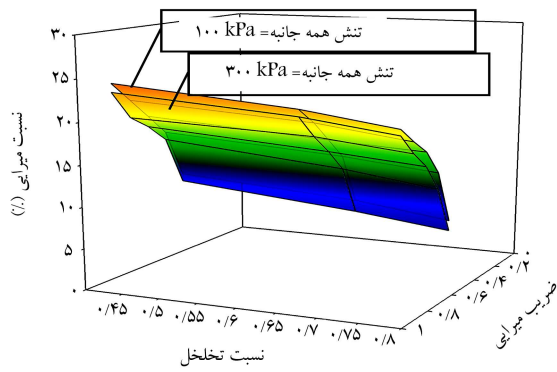
در شرایط استاتیکی انجام شده است. اثر میرایی به عنوان یک پارامتر ورودی تا زمانی که نیروهای نامتعادل در سیستم کوچک باشد، قابل اغماض است.<sup>[۱۲]</sup>

انرژی ذخیره شده در نمونه‌ها به کمک محاسبه‌ی سطح زیر نمودار تنش - کرنش آن‌ها به دست آمده است. در شکل ۱۰، انرژی ذخیره شده در نمونه‌های گرد گوشه و تیز گوشه در سه نسبت تخلخل ۰/۴۲، ۰/۶۶ و ۰/۷۸ و ضرایب میرایی مختلف در فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال مشاهده می‌شود. براساس نتایج به دست آمده، در یک نمونه‌ی مشخص (گرد گوشه یا تیز گوشه)، دو سطح انرژی که مربوط به دو فشار همه‌جانبه‌ی مختلف بود، تقریباً با هم موازی بوده و فقط حدود ۶۰ کیلو پاسکال با یکدیگر تفاوت داشته‌اند (سطح انرژی مربوط به فشار همه‌جانبه‌ی ۳۰۰ کیلو پاسکالی، ۶۰ کیلو پاسکال بالاتر بوده است). نمونه‌های تیز گوشه، سطح انرژی ذخیره شده‌ی بالاتری داشتند؛ این در حالی است که ونگ<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۱۲]</sup> معتقدند که انرژی زایل شده در نمونه‌ها با ذرات غیرکروی بیشتر است. با افزایش نسبت تخلخل در نمونه‌های گرد گوشه و تیز گوشه، سطح انرژی به ترتیب به طور متوسط ۲۳ و ۱۲ درصد کاهش پیدا کرده است. نرخ کاهش سطح انرژی با نسبت تخلخل در نمونه‌های گرد گوشه بیش از تیز گوشه بوده است. در شرایط یکسان، انرژی ذخیره شده در نمونه‌ها با ضرایب میرایی مختلف تقریباً برابر بوده و ضرایب میرایی اثری در انرژی ذخیره شده در نمونه‌های مدل‌سازی شده نداشته‌اند. ونگ و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۱۲]</sup> به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضریب میرایی، انرژی جنبشی زایل شده بیشتر می‌شود (انرژی ذخیره شده در نمونه کاهش یافته است).

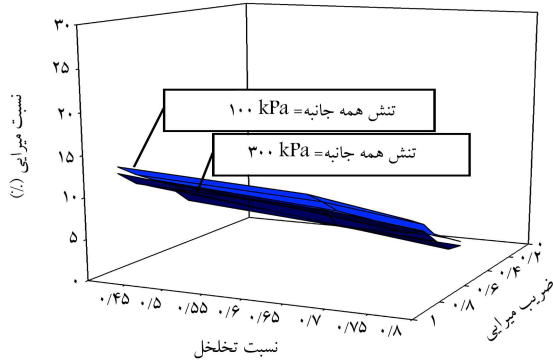
### ۵.۱.۳. نتایج میکروسکوپی

به کمک روش اجزاء منفصل می‌توان در مورد آنچه در مقیاس میکروسکوپی بین ذرات اتفاق می‌افتد، نیز مطالعه کرد. نیروهای بین ذره‌یی و تغییر شکل‌های ایجاد





الف) گردگوشه؛



ب) تیز گوشه در دو فشار همه جانبه ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال.

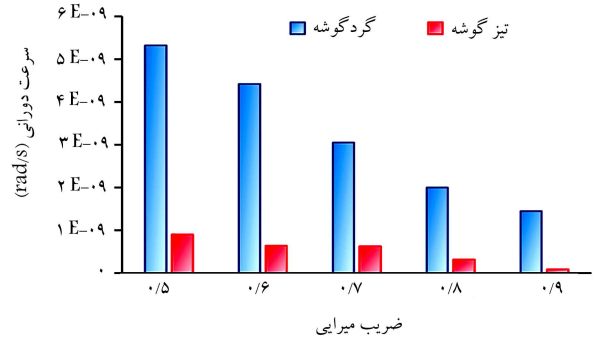
شکل ۱۳. نسبت میرایی - نسبت تخلخل و ضرایب میرایی نمونه‌ها.

۱۰۰ کیلو پاسکال حدود ۱/۵ درصد بیشتر بوده است. نمودارهای نسبت میرایی برای نمونه‌های تیز گوشه با تغییر تنش همه جانبه از ۱۰۰ به ۳۰۰ کیلو پاسکال، تغییر محسوسی نداشته‌اند.

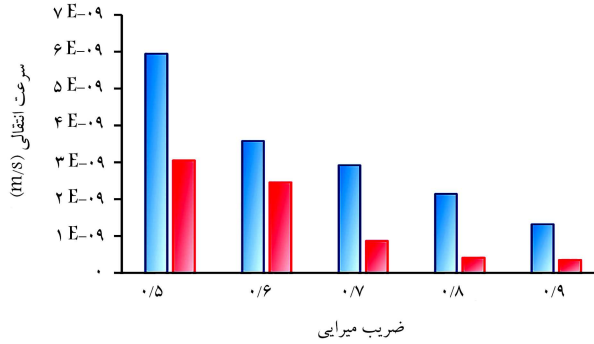
افزایش نسبت تخلخل منجر به کاهش نسبت میرایی شده است؛ به طوری که با کاهش نسبت تخلخل از ۰/۷۸ به ۰/۶۶ و ۰/۴۲، نسبت میرایی نمونه‌های گردگوشه در فشارهای همه جانبه ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال به ترتیب ۲ و ۳ درصد افزایش یافته است. پژوهشگرانی مانند سیتارام<sup>۱۲</sup> و ونود<sup>۱۳</sup>، شفیعی<sup>۱۴</sup> و همکاران و جیانگ<sup>۱۵</sup> و همکاران،<sup>[۱۳-۱۵]</sup> بیان کردند که نسبت تخلخل اثر قابل توجهی در نسبت میرایی ندارد. در هر گروه از نمونه‌ها، نرخ کاهش نسبت میرایی با افزایش تخلخل در هر دو فشار همه جانبه‌ی مورد نظر تقریباً یکسان به دست آمده و نرخ مذکور در نمونه‌های تیز گوشه کمی بیشتر از نمونه‌های گردگوشه بوده است. در نمونه‌های با ذرات غیرکروی، قفل و بست بین ذرات بیشتر و چرخش ذرات دشوار است و همین امر، موجب کاهش نسبت میرایی می‌شود.<sup>[۱۶-۱۸]</sup> در پژوهش حاضر، شکست ذرات لحاظ نشده است. در صورتی که در اثر اعمال بار، قسمت‌های تیز سنگ‌دانه‌ها شکسته شوند، به تبع آن، نسبت میرایی بیشتری حاصل خواهد شد.

### ۲.۲.۳. مدول برشی

با توجه به شکل ۱۴، با افزایش ضریب میرایی از ۰/۵ به ۰/۹، مدول برشی نمونه‌های گردگوشه و تیز گوشه در نسبت‌های تخلخل ۰/۷۸، ۰/۶۶، و ۰/۴۲ به ترتیب ۱۰، ۷ و ۶/۲ درصد کاهش یافته است. افزایش فشار همه جانبه از ۱۰۰ به ۳۰۰ کیلو پاسکال موجب افزایش ۲۸، ۳۱ و ۲۶ درصدی مدول برشی متوسط در نمونه‌های گردگوشه (در ۳ نسبت تخلخل مذکور) و ۳۷، ۳۹ و ۳۴ درصد در نمونه‌های تیز گوشه شده است. در فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال، کاهش نسبت



الف)



ب)

شکل ۱۲. الف) بیشینه‌ی سرعت دورانی و ب) سرعت انتقالی ذرات در نمونه‌های گردگوشه و تیز گوشه در نسبت تخلخل ۰/۴۲ و فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال.

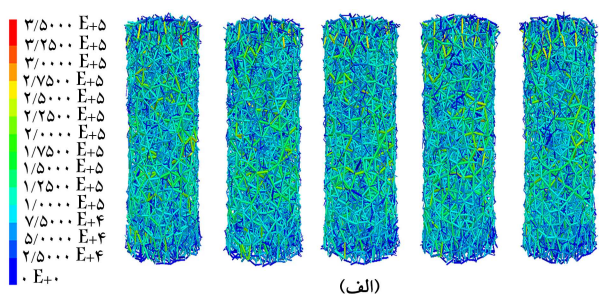
نمونه‌ها در انتهای آزمایش سه محوری ایستا نداشته‌اند. همچنین در شکل ۱۲، تغییرات بیشینه‌ی سرعت دورانی و انتقالی ذرات تیز گوشه و گردگوشه با ضرایب میرایی در نسبت تخلخل ۰/۴۲ تحت فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال مشاهده می‌شود. بیشینه‌ی سرعت دورانی و انتقالی ذرات تیز گوشه کمتر از ذرات گردگوشه بوده است. با افزایش ضریب میرایی از ۰/۵ به ۰/۹، بیشینه‌ی سرعت دورانی و سرعت انتقالی ذرات تیز گوشه ۹ و ۸۹ درصد و برای ذرات گردگوشه ۷۳ و ۷۸ درصد کاهش پیدا کرده است. نرخ کاهش بیشینه‌ی سرعت دورانی و سرعت انتقالی ذرات با افزایش ضریب میرایی برای نمونه‌ی گردگوشه به ترتیب ۴/۷۸ و ۱/۷ برابر نمونه‌ی تیز گوشه به دست آمده است.

### ۲.۳. نتایج شبیه‌سازی آزمایش‌های سه محوری پویا

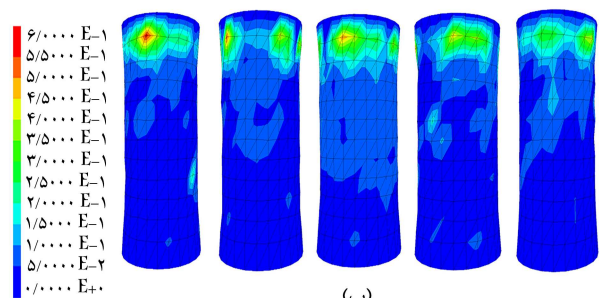
به ازاى نسبت تنش تناوبی ۰/۵، مدول برشی (G) و نسبت میرایی (D) براساس روابط موجود برای تناوب دهم حلقه‌های بارگذاری - باربرداری محاسبه شده است. اثر پارامترهای نسبت تخلخل اولیه، فشار همه جانبه، شکل ذرات و ضریب میرایی (α) در مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌ها ارزیابی شده است.

### ۱.۲.۳. نسبت میرایی

اثر ضریب میرایی در نسبت میرایی نمونه‌ها در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. هر چه ضریب میرایی در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی‌ها بیشتر بوده است، انرژی بیشتری زایل شده است و در نتیجه، نسبت میرایی افزایش یافته است. نرخ افزایش نسبت میرایی در هر گروه از نمونه‌ها با ضریب α در فشارهای همه جانبه‌ی مختلف، یکسان بوده است. این نرخ در نمونه‌ی گردگوشه ۲/۲ برابر نمونه‌ی تیز گوشه به دست آمده است. نمودارهای نسبت‌های میرایی در نمونه‌های گردگوشه در فشارهای همه جانبه‌ی ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال با یکدیگر موازی و نسبت میرایی در فشار همه جانبه‌ی

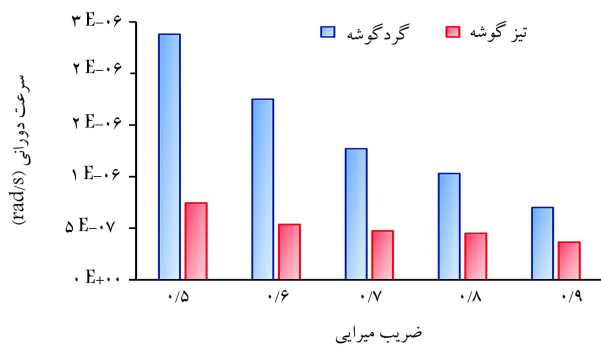


(الف)



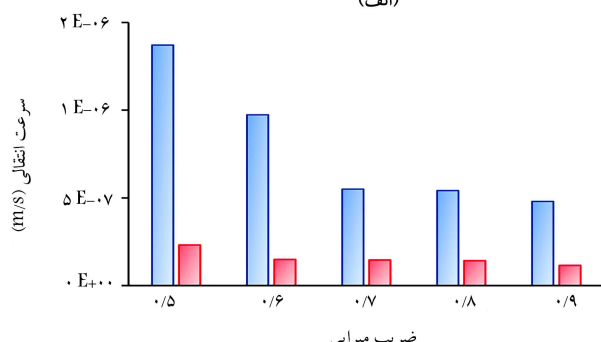
(ب)

شکل ۱۵. الف) نیروهای بین ذره‌یی و ب) بیشینه‌ی تغییرشکل ایجاد شده در نمونه‌ی گردگوشه در ضرایب میرایی مختلف در انتهای تناوب دهم آزمایش سه‌محوری دینامیکی.



ضریب میرایی

(الف)

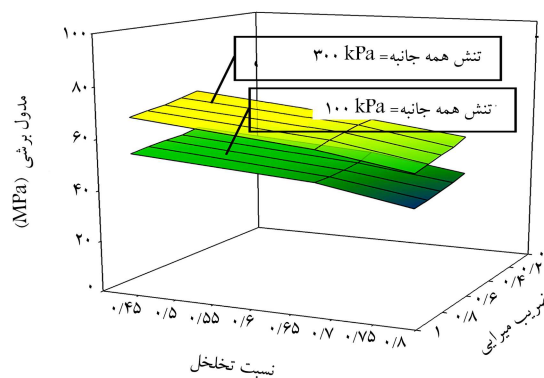


ضریب میرایی

(ب)

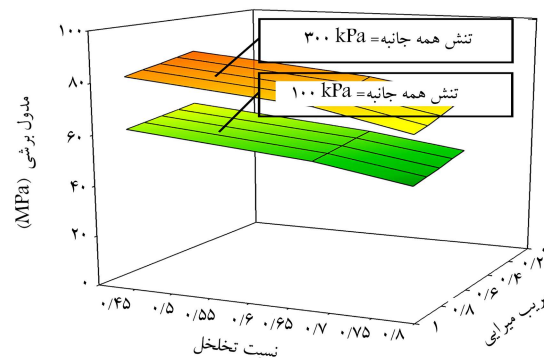
شکل ۱۶. الف) بیشینه‌ی سرعت دورانی و ب) سرعت انتقالی ذرات در نمونه‌های گردگوشه و تیزگوشه در نسبت تخلخل ۰/۴۲ و فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال و تنش تناوبی ۵۰ کیلوپاسکال.

چرخه‌ی محاسباتی منطقی، کافی نیست، تقریباً در تمامی شبیه‌سازی‌ها به روش اجزاء منفصل، برای برقراری تعادل در سیستم از میرایی محلی غیرلزج با اعمال یک نیروی میرایی با بزرگی متناسب با نیروهای ناپایدار به هر یک از ذرات



نسبت تخلخل

الف) گردگوشه؛



ب) تیز گوشه در دو فشار همه جانبه ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال.

شکل ۱۴. مدول برشی - نسبت تخلخل و ضرایب میرایی نمونه‌ها.

تخلخل از ۰/۷۸ به ۰/۶۶ و ۰/۴۲ منجر به افزایش ۱۱ و ۲۶ درصدی در مدول برشی نمونه‌ها شده و در فشار همه‌جانبه‌ی ۳۰۰ کیلوپاسکال، مقادیر مذکور به ۱۰ و ۲۲ درصد تغییر یافته‌اند. در یک فشار همه‌جانبه، ضریب میرایی و تراکم یکسان، مدول برشی در نمونه‌های تیزگوشه بیشتر بوده است. در سایر مطالعات نیز مشابه همین نتایج حاصل شده است. [۱۳، ۱۶-۱۸]

### ۳.۲.۳. نتایج میکروسکوپی

نیروهای بین‌ذره‌یی و تغییرشکل‌های ایجادشده در نمونه‌های گردگوشه در نسبت تخلخل ۰/۴۲، فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال و تنش تناوبی ۵۰ کیلوپاسکال در انتهای تناوب دهم آزمایش سه‌محوری دینامیکی در ضرایب میرایی مختلف در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. ضریب میرایی اثر قابل توجهی در تعداد تماس‌های بین ذرات نداشته است؛ ولی با افزایش ضریب میرایی، بزرگی نیروهای تماسی و بیشینه‌ی تغییرشکل در نمونه‌ها کاهش یافته است. در شکل ۱۶ نیز مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی سرعت دورانی و سرعت انتقالی ذرات تیزگوشه کمتر از ذرات گردگوشه بوده است. با افزایش ضریب میرایی از ۰/۵ به ۰/۹، بیشینه‌ی سرعت دورانی و سرعت انتقالی ذرات تیزگوشه، ۵۱ و ۵۰/۴ درصد و برای ذرات گردگوشه، ۷۰/۵ و ۶۵ درصد کاهش پیدا کرده است. نرخ کاهش بیشینه‌ی سرعت دورانی و سرعت انتقالی ذرات با افزایش ضریب میرایی در نمونه‌ی گردگوشه به ترتیب ۴/۴۲ و ۷/۶ برابر نمونه‌ی تیزگوشه به دست آمده است.

### ۴. نتیجه‌گیری

از آنجایی که لغزش اصطکاکی برای پایداری یک سیستم ذرات در یک تعداد

است. سطوح انرژی ذخیره شده در یک نمونه مشخص (گردگوشه و تیزگوشه)، در دو فشار همه‌جانبه‌ی مختلف، تقریباً با هم موازی هستند. با افزایش نسبت تخلخل در نمونه‌های گردگوشه و تیزگوشه، سطح انرژی کاهش پیدا می‌کند. نمونه‌های تیزگوشه سطح انرژی ذخیره‌شده‌ی بالاتری دارند. ضریب میرایی اثر قابل توجهی در تعداد و بزرگی نیروهای تماسی و همچنین بیشینه‌ی تغییرشکل در نمونه‌ها در انتهای آزمایش سه‌محوری استاتیکی (کرنش محوری  $2^\circ$ ) ندارد، ولی افزایش ضریب میرایی منجر به کاهش بیشینه‌ی سرعت دورانی و انتقالی ذرات می‌شود. هر چه ضریب میرایی در نظر گرفته‌شده در شبیه‌سازی آزمایش‌های دینامیکی بیشتر باشد، انرژی بیشتری زایل می‌شود و در نتیجه، نسبت میرایی نمونه افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب میرایی، مدول برشی نمونه‌های گردگوشه و تیزگوشه کاهش می‌یابد. مدول برشی در نمونه‌های تیزگوشه، بیشتر به‌دست آمده است. ضریب میرایی اثر قابل توجهی در تعداد تماس‌های بین ذرات در نمونه‌ها تحت آزمایش سه‌محوری دینامیکی ندارد، ولی با افزایش این ضریب، بزرگی نیروهای تماسی، بیشینه‌ی سرعت دورانی و انتقالی ذرات و بیشینه‌ی تغییرشکل رخ داده در نمونه کاهش می‌یابد.

می‌شود. پیش‌بینی رفتار درشت مقیاس مجموعه‌ی ذرات خاک شبیه‌سازی شده تحت تأثیر انتخاب ضریب میرایی ( $\alpha$ ) است.  $\alpha$  مثبت است و مقادیری کمتر از ۱ اختیار می‌کند.

در پژوهش حاضر، پس از کالیبره کردن مدل عددی تهیه شده با نتایج آزمایش‌های سه‌محوری ایستا و پویا انجام شده روی نمونه‌های ماسه‌ی حاوی ذرات گردگوشه و تیزگوشه تحت فشار همه‌جانبه‌ی  $10^\circ$  کیلوپاسکال و نسبت تنش تناوبی  $0/5$ ، برای ارزیابی اثر میرایی محلی غیرلزوج در رفتار ایستا و پویا ماسه‌ها از مقادیر مختلف ضرایب میرایی ( $0/5$ ،  $0/6$ ،  $0/7$ ،  $0/8$  و  $0/9$ ) در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. سپس به مطالعه‌ی اثر نسبت تخلخل اولیه، فشار همه‌جانبه و شکل ذرات نیز در رفتار نمونه‌ها پرداخته شده است.

نتایج نمونه‌های شبیه‌سازی شده تحت آزمایش سه‌محوری استاتیکی (نمودارهای تنش انحرافی - کرنش محوری و کرنش حجمی - کرنش محوری) نشان می‌دهد که اثر میرایی محلی غیرلزوج در رفتار شبه‌استاتیکی مصالح قابل صرف‌نظر است. در شرایط یکسان، انرژی ذخیره‌شده در نمونه‌ها با ضرایب میرایی مختلف تقریباً برابر

## پانویس‌ها

1. discrete element method
2. Viscous
3. Non-viscous
4. local
5. Ng
6. Wang & Yan
7. Kozicki
8. Skempton
9. Clump
10. Servo control
11. Wang
12. Sitharam
13. Vinod
14. Shafiee
15. Jiang

## منابع (References)

4. Ng, T.T. "Input parameters of discrete element methods", *Journal of Engineering Mechanics*, **132**(7), pp. 723-729 (2006).
5. Ng, T.T., Zhou, W., Ma, G. and Chang, X.L. "Damping and particle mass in DEM simulations under gravity", *Journal of Engineering Mechanics*, **141**(6), pp. 1-9 (2015).
6. Wang, J. and Yan, H. "DEM analysis of energy dissipation in crushable soils", *Soils and Foundations*, **52**(4), pp. 644-657 (2012).
7. Kozicki, J., Tejchman, J. and Mroz, Z. "Effect of grain roughness on strength, volume changes, elastic and dissipated energies during quasi-static homogeneous triaxial compression using DEM during quasi-static homogeneous triaxial compression using DEM", *Granular Matter*, **14**(4), pp. 457-468 (2012).
8. Kozicki, J., Tejchman, J. and Mühlhaus, H.B. "Discrete simulations of a triaxial compression test for sand by DEM", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **38**(18), pp. 1923-1952 (2014).
9. Manne, A. and Satyam, N. "A review on the discrete element modeling of dynamic laboratory tests for liquefaction assessment", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **20**(1), pp. 21-46 (2015).
10. Itasca Consulting Group Inc., "Particle flow code in three dimensions (PFC3D)", Version 6.00. Minneapolis, USA (2018).
11. Asadi, M., Mahboubi, A. and Thoani, K. "Discrete modeling of sand-tire mixture considering grain-scale deformability", *Granular Matter*, **20**(2), pp. 18-32 (2018).
12. Wang, C., Deng, A., Taheri, A. and et al. "Modelling particle kinetic behaviour considering asperity contact:
1. Zhang, Z., Wang, Y., Xu, W. and Sun, S. "DEM verification of the damping effect in a freely falling particle motion for quasi-and non-quasi-static conditions", *Arabian Journal of Geosciences*, **12**(22), pp. 691-704 (2019).
2. Yousefi, A. "Size-dependent damping model for DEM: improved equilibrium compared with mass-damping at no extra computational cost", *Granular Matter*, **20**(2), pp. 21-34 (2018).
3. Chen, F., Drumm, E.C. and Guiochon, G. "Prediction/verification of particle motion in one dimension with the discrete-element method", *International Journal of Geomechanics*, **7**(5), pp. 344-352 (2007).

- formulation and DEM simulations”, *Granular Matter*, **21**(2), pp. 1-16 (2019).
13. Sitharam, T.G. and Vinod, J.S. “Evaluation of shear modulus and damping ratio of granular materials using discrete element approach”, *Geotechnical and Geological Engineering*, **28**(5), pp. 591-601 (2010).
  14. Shafiee, A., Dabiri, R. and Askari, F. “Dynamic properties of Firoozkooh sand-silt mixtures”, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **19**(4), pp. 273-284 (2018).
  15. Jiang, M., Zhang, A. and Li, T. “Distinct element analysis of the microstructure evolution in granular soils under cyclic loading”, *Granular Matter*, **21**, pp. 39-50 (2019).
  16. Meidani, M., Shafiei, A., Habibagahi, G. and et al. “Granule shape effect on the shear modulus and damping ratio of mixed gravel and clay”, *Iranian Journal of Science and Technology Transaction B- Engineering*, **32**(B5), pp. 501-518 (2008).
  17. Tong, L. and Wang, Y.H. “DEM simulations of shear modulus and damping ratio of sand with emphasis on the effects of particle number, particle shape, and aging”, *Acta Geotechnica*, **10**, pp. 117-130 (2015).
  18. Javdanian, H. and Jafarian, Y. “Dynamic shear stiffness and damping ratio of marine calcareous and siliceous sands”, *Geo-Marine Letters*, **38**, pp. 315-322 (2018).