

شبیه‌سازی سه بعدی مصالح دانه‌ی به روش اجزاء منفصل با در نظر گرفتن اثر شکست ذرات

اشکان سرابی تبریزی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ

احمدرضا محبوبی اردکانی* (دانشیار)

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

مهندسی عمران تهریف، تابستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲، شماره ۱/۲، ص. ۷۹-۹۰

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های مهندسی مصالح دانه‌ی درشت، مانند شن و سنگ‌ریز، وابستگی رفتار آن‌ها به میزان شکست ذرات است. در پژوهش حاضر، مدل‌سازی سه‌بعدی رفتار مصالح دانه‌ی به روش اجزاء منفصل با نرم‌افزار PFC^{2D} و برنامه‌نویسی به زبان فیش (FISH) در مدل‌سازی پدیده‌ی شکست ذرات و اثر آن در رفتار مقاومتی و تغییرشکلی آن انجام شده است. به منظور در نظر گرفتن شکل غیرکروی ذرات از کرات متصل به یکدیگر استفاده شده است. برای مدل‌سازی شکست دانه‌ها، معیار شکست با در نظر گرفتن دو شرط ناهمسانی نیروهای تماسی و تنش موجود در ذره تعریف شده است. در نهایت، مدل و معیار ارائه شده اعتبارسنجی شد. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری، که بر اساس نتایج تجربی موجود برای سنگ‌ریز سد پورولیا انجام شد، نشان می‌دهد که مدل مذکور جنبه‌های اصلی اثر شکست ذرات در رفتار محیط دانه‌ی را می‌تواند مدل‌سازی کند.

واژگان کلیدی: روش اجزاء منفصل، شکست ذرات، مدل‌سازی سه‌بعدی، مصالح دانه‌ی.

ashkan.sarabil@yahoo.com
a_mahboubi@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

محیط‌های دانه‌ی از ذراتی مجزا و به صورت مستقل از یکدیگر تشکیل شده‌اند و فقط در نقاط تماس در یکدیگر اثر می‌گذارند. رفتار مصالح دانه‌ی پیچیده است و جهت تعیین رفتار مذکور به آزمایش‌های متعددی نیاز است. رفتار خاک‌های دانه‌ی مثل ماسه متأثر از تنش اعمالی در مجموعه است. در تنش‌های بالا، ذرات خاک می‌توانند دچار خردشدگی شوند. شکسته شدن ذرات و تبدیل ذرات درشت به ذرات ریزتر باعث ایجاد تغییراتی در منحنی دانه‌بندی و در نتیجه تغییر در خصوصیات فنی مصالح دانه‌ی می‌شود. پدیده‌ی اخیر در سازه‌های خاکی بلند، همچون سدهای سنگ‌ریزه‌ی و موج‌شکن‌ها، خصوصاً در لایه‌های زیرین که تحت وزن لایه‌های فوقانی تنش‌های بزرگ‌تری را متحمل می‌شوند، بیشتر روی می‌دهد. با توسعه‌ی محاسبات سریع، روش‌های عددی برای مدل‌سازی رفتار مصالح دانه‌ی روز به روز استفاده‌ی بیشتری پیدا می‌کنند، که یکی از آن‌ها، که امروزه در حال توسعه‌ی روزافزون است، روش اجزاء منفصل (DEM) است.^[۱]

شبیه‌سازی رفتار یک مجموعه از ذرات دانه‌ی استفاده کرد.^[۴] وی با مقایسه‌ی نیروی به دست آمده از روش عددی و نتایج روش تجربی فوتوکشسان نشان داد که روش اجزاء منفصل، ابزاری معتبر برای مطالعات پایه‌ی رفتار مجموعه‌های دانه‌ی است. مطالعات نشان داده است که روش اجزاء منفصل می‌تواند رفتار واقعی و فیزیکی مجموعه‌های دانه‌ی را شبیه‌سازی کند.^[۱] روش اجزاء منفصل (DEM)، قوانین تماسی ساده را در نقاط تماس بین دانه‌ی برای به دست آوردن پاسخ‌های پیچیده‌ی مجموعه‌ی مصالح به کار می‌گیرد. روش DEM می‌کوشد تا بدون آن‌که قانون رفتاری خاصی را بر مصالح تحمیل کند، رفتار مکانیکی آن را شبیه‌سازی کند. همچنین می‌تواند اثر عوامل مختلف (مانند: شکل دانه‌ها، دانه‌بندی و مقاومت دانه‌ها و ...) را در رفتار مکانیکی خاک مورد مطالعه در نظر بگیرد.

از مهم‌ترین پدیده‌هایی که تأثیر آن در رفتار مصالح دانه‌ی توسط پژوهش‌گران بسیاری اثبات شده است، پدیده‌ی شکست دانه‌ها است.^[۵-۷] شکست دانه‌ها موجب کاهش حجم فضاهای خالی و در نتیجه رفتار انقباضی مصالح، کاهش مقاومت برشی، و همچنین کاهش قابلیت هدایت هیدرولیکی مصالح می‌شود.^[۷] میزان شکست ذرات تحت تأثیر عوامل مختلفی است. ژو^۸ و همکاران (۲۰۱۷)،^[۸] با بررسی سه‌بعدی رفتار میکرو و ماکرو مصالح سنگ‌ریز که تحت مسیرهای تنش

روش اجزاء منفصل، روشی عددی است که کاندال^۲ آن را برای تحلیل مسائل مکانیک سنگ به وجود آورد،^[۳] و در پژوهشی در سال ۱۹۷۹ از آن برای

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۶/۴، اصلاحیه ۱۳۹۷/۸/۳۰، پذیرش ۱۳۹۷/۱۱/۳

DOI:10.24200/J30.2019.51567.2414

مختلف قرار دارند، به این نتیجه رسیدند که میزان شکست به شدت به تنش همه‌جانبه، تنش انحرافی و مسیر تنش بستگی دارد.

دو روش برای در نظر گرفتن ماهیت منفصل خاک‌ها وجود دارد. روش اول، اصلاح کردن مدل‌های مبتنی بر مکانیک محیط پیوسته با معرفی قوانین اضافی، که تغییرات ریزساختاری خاک، مثل بافت^۵، را منعکس کند،^{۱۹} یا بهبود قوانین ساختاری موجود بر اساس مطالعات میکرومکانیک موجود روی خاک است.^{۱۰} روش دوم، خاک را مستقیماً به‌عنوان مجموعه‌ی از مصالح منفصل در نظر می‌گیرد و پاسخ‌های ماکروسکوپی (درشت مقیاس (مقیاس نمونه)) و میکروسکوپی (ریز مقیاس (مقیاس ذره‌ی)) آن تحت بارگذاری، به‌صورت عددی، تحلیلی و یا تجربی جمع‌آوری می‌شود. این روش به‌طور وسیعی توسط پژوهشگران میکرومکانیک استفاده شده است.^{۱۱-۱۵}

لیم و مکدول (۲۰۰۵)،^{۱۶} نیز مدلی برای رفتار مصالح بالاست استفاده شده در زیر خطوط راه‌آهن با استفاده از روش اجزاء منفصل و با نرم‌افزار PFC^{۳D} تحت فشار ادومتر ارائه کردند.

همچنین برخی پژوهش‌گران،^{۱۷،۱۸} یک روش ترکیبی اجزاء محدود - منفصل برای شبیه‌سازی دانه‌هایی با اشکال نامنظم ارائه کردند. ما^۶ و همکاران^{۱۹،۲۰} نیز از روش اخیر برای شبیه‌سازی شکست ذرات سنگ‌ریز، بدین صورت که سطوح شکستگی بالقوه با المان‌های سطح مشترک چسبیده بدون ضخامت^۷ شبیه‌سازی شدند، استفاده کرده‌اند.

از مهم‌ترین مطالعاتی که برای مدل‌سازی اثر شکست ذرات به روش اجزاء منفصل انجام شده است، می‌توان از شبیه‌سازی رفتار مصالح سنگ‌ریز و اثر شکست ذرات با استفاده از یک مدل شکست احتمالاتی نام برد. دلوارش^۸ و همکاران (۲۰۰۶)، با استفاده از خوشه‌های دوبعدی شکننده، رفتار مصالح سنگ‌ریزه‌ی استفاده شده در سدهای خاکی را به‌خصوص با در نظر گرفتن اثر شکست ذرات در تغییر شکل‌ها شبیه‌سازی کردند و اثر قابل توجه شکست ذرات در تغییر شکل‌های سد هنگام آب‌گیری و همین‌طور تأثیر قابل توجه یک لایه بلوک دست‌چین در بالادست و پایین‌دست سد در بهبود پایداری سد را نتیجه گرفتند.^{۲۱}

مک‌داول^۹ و همکاران (۲۰۰۲)،^{۲۲} شکست دانه‌های ماسه‌ی سه‌بعدی را با استفاده از روش اجزاء منفصل به منظور بررسی اثر اندازه در مقاومت بررسی کردند. آن‌ها یک ذره‌ی سنگ‌دانه را به‌صورت توده‌ی از گوی‌های متصل به هم مدل کردند و برای به دست آوردن توزیع مقاومت و درزه و ترک‌ها با مدول ویول موردنظر، ابتدا تعدادی از گوی‌ها را به‌طور تصادفی حذف کردند و نتیجه گرفتند که در ذرات مرکب که گوی‌ها در یک آرایش شش‌ضلعی قرار دارند، هنگامی که صفر تا ۲۵٪ گوی‌های از توده حذف شوند، تعداد آن‌ها تقریباً هیچ اثری در مقاومت ذره‌ی مرکب ندارد. برخی محققان،^{۲۳} نیز با استفاده از نرم‌افزار PFC^{۳D}، توده‌های قابل شکست را به روش اجزاء منفصل با در نظر گرفتن سرعت بارگذاری در آزمایش سه‌محوری طی مسیر تنش‌های مختلف، شبیه‌سازی کردند.

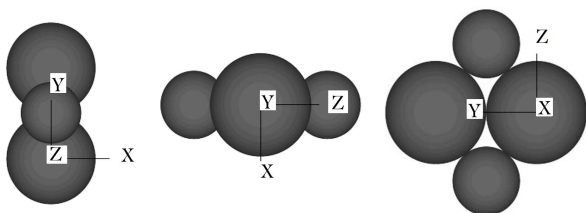
۲. مدل استفاده شده برای مصالح سنگ‌ریز

به منظور شبیه‌سازی شکست ذرات در یک مدل اجزاء منفصل، ذرات تشکیل‌دهنده‌ی مجموعه‌ی ذرات از ذرات مرکب ساخته شده است.^{۲۴} یک ذره‌ی مرکب، که به آن خوشه^{۱۰} گفته می‌شود، از تعدادی دانه‌ی کروی (گوی) متصل به هم تشکیل شده است، که پس از شکسته شدن خوشه، ذرات کروی امکان جدا شدن از گروه ذرات

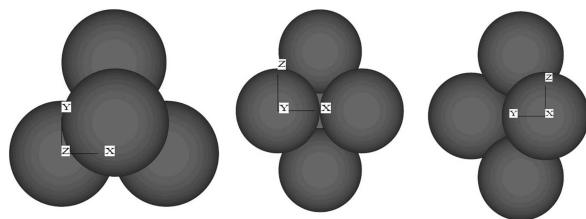
را دارند و بدین ترتیب شبیه‌سازی شکست و جدا شدن ذرات از هم در یک ذره‌ی مرکب امکان‌پذیر می‌شود. در شبیه‌سازی حاضر، برای مدل‌سازی دانه‌های سنگ‌ریز و امکان مدل‌سازی شکست آن‌ها، از ذرات مرکب سه‌بعدی، که از اتصال گوی‌های کروی با اندازه‌های مختلف ساخته شده‌اند، استفاده شده است. همچنین برای در نظر گرفتن شکل گوشه‌دار مصالح سنگ‌ریز بعد از شکسته شدن، از گوی‌های ریزتری که به پیرامون خوشه‌های نوع قبلی متصل شده بودند، استفاده شده است. اتصال گوی‌های ریز اخیر به گوی‌های بزرگ‌تر به‌گونه‌ی است که گوی‌های ریز نمی‌توانند از گوی‌های میزبان خود جدا شوند. تولید بلوک‌های سنگ‌ریز بدین صورت است که ابتدا گوی‌های تشکیل‌دهنده‌ی هر بلوک سنگ‌ریز (خوشه) در کنار هم تولید می‌شوند و موقعیت نسبی گوی‌های تشکیل‌دهنده‌ی هر خوشه‌ی سنگ‌ریز در طول شبیه‌سازی ثابت می‌ماند، مگر این‌که معیار شکست ارضا شود و در این صورت گوی‌های تشکیل‌دهنده‌ی خوشه از همدیگر جدا می‌شوند و شبیه‌سازی شکست ذرات در روش اخیر عملی می‌شود. به منظور شبیه‌سازی شکست و ایجاد قابلیت ذکر شده در نرم‌افزار PFC^{۳D}،^{۲۵} زیر برنامه‌های لازم به زبان برنامه‌نویسی فیش^{۱۱} در نرم‌افزار اصلی کدنویسی و به آن اضافه شدند. به ازاء هر ۱۰۰ سیکل از شبیه‌سازی، زیر برنامه‌های اخیر فراخوانده و اجرا می‌شوند. بدین ترتیب تمامی خوشه‌های سنگ‌ریز در معیار شکست تعریف شده کنترل می‌شوند و گوی‌ها یا زیرخوشه‌های تشکیل‌دهنده‌ی هر خوشه، که در معیار شکست صدق کنند، با توجه به الگوی شکست از هم جدا می‌شوند و در ادامه‌ی شبیه‌سازی به‌طور آزاد و مستقل عمل خواهند کرد. به منظور جلوگیری از بروز نیروهای بزرگ در هنگام شکست ذرات، در هنگام تولید یک خوشه، ذرات هم‌پوشانی نداشتند و همچنین در لحظه‌ی شکست خوشه، در چند مرحله با صفر کردن سرعت ذرات برای کاهش انرژی جنبشی و به تعادل رسیدن گوی‌ها، کدنویسی مناسب انجام شد.

۱.۲. آرایش خوشه‌ها

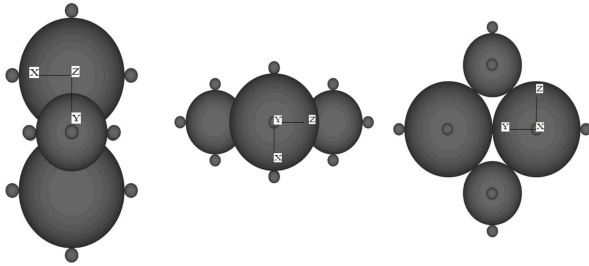
در مطالعه‌ی حاضر، از دو گروه خوشه برای شبیه‌سازی بلوک‌های سنگ‌ریز استفاده شده است. خوشه‌های گروه اول، بدون گوی‌های ریز پیرامونی، و خوشه‌های گروه دوم، با گوی‌های ریز پیرامونی بودند. خوشه‌های سنگ‌ریز گروه اول متشکل از ۴، ۵، ۶ و ۸ گوی در سه جهت X، Y و Z به ترتیب در شکل‌های ۱ الی ۴ مشاهده می‌شوند.



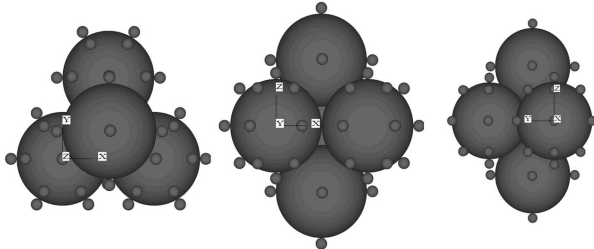
شکل ۱. خوشه‌ی گروه اول - نوع اول، متشکل از ۴ گوی.



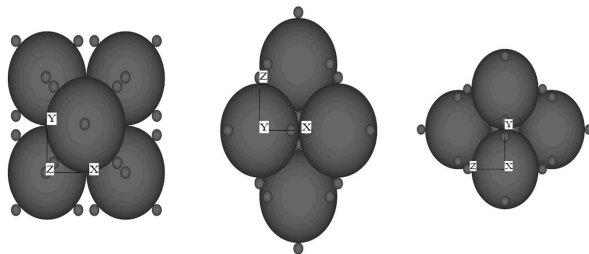
شکل ۲. خوشه‌ی گروه اول - نوع دوم، متشکل از ۵ گوی.



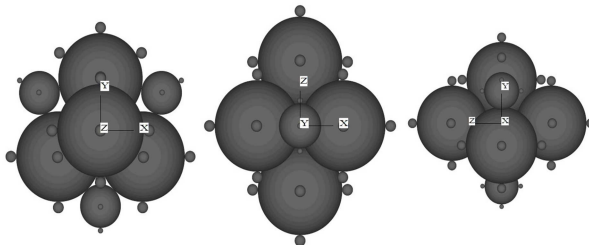
شکل ۵. خوشه‌ی گروه دوم - نوع اول، متشکل از ۱۶ گوی.



شکل ۶. خوشه‌ی گروه دوم - نوع دوم، متشکل از ۵۷ گوی.



شکل ۷. خوشه‌ی گروه دوم - نوع سوم، متشکل از ۴۲ گوی.

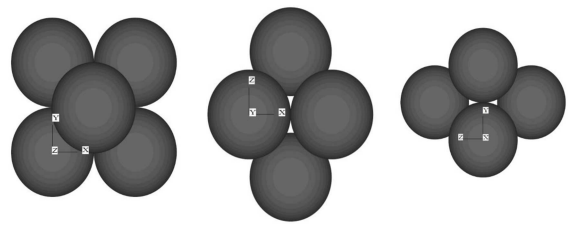


شکل ۸. خوشه‌ی گروه دوم - نوع چهارم، متشکل از ۴۱ گوی.

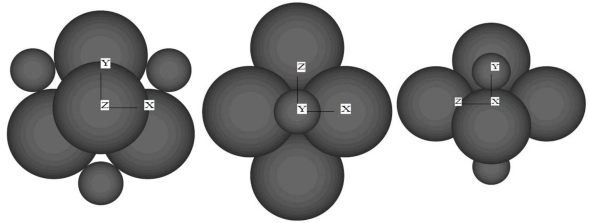
خصوصاً محصورشدگی خوشه (ناهمسانی نیروهای تماس وارد بر یک خوشه) و نیز تنش وارد بر خوشه، به‌طور هم‌زمان محقق شود:

۱. شرط اول: محصورشدگی خوشه، در پژوهش حاضر شرط شکست مربوط به محصورشدگی، با استفاده از عامل ناهمسانی نیروهای تماسی سنجیده می‌شود. اگر عامل ناهمسانی نیروهای تماسی از مقدار 0.25 بیشتر شود (و یا در واقع محصورشدگی از حد معینی کمتر باشد)، یکی از شروط شکست محقق شده است.
۲. شرط دوم: تنش وارد بر خوشه از مقاومت شکست تعریف شده هر خوشه بیشتر باشد.

مشابه معیار شکست اخیر در مطالعات قبلی نیز استفاده شده است.^[۵] در ادامه، پارامترهای اشاره شده معرفی شده‌اند:



شکل ۳. خوشه‌ی گروه اول - نوع سوم، متشکل از ۶ گوی.



شکل ۴. خوشه‌ی گروه اول - نوع چهارم، متشکل از ۸ گوی.

در گروه اول خوشه‌های متشکل از ۴ گوی، ۲ نوع گوی به شعاع‌های 0.75 و 0.5 سانتی‌متر وجود دارد (شکل ۱)، که یک کره‌ی فرضی به قطر ۳ سانتی‌متر آن را محیط کرده است (شبیه‌سازی بلوک سنگ‌ریز به قطر ۳ سانتی‌متر).

برای خوشه‌های متشکل از ۵ گوی (شکل ۲)، تمام گوی‌های تشکیل‌دهنده‌ی خوشه یکسان هستند (به شعاع تقریبی $1/16$ سانتی‌متر). خوشه‌ی اخیر، در داخل یک کره‌ی فرضی به قطر ۵ سانتی‌متر محاط شده است (شبیه‌سازی بلوک سنگ‌ریز به قطر ۵ سانتی‌متر).

همین‌طور برای خوشه‌های متشکل از ۶ گوی، یک نوع گوی با شعاع برابر (تقریباً 0.828 سانتی‌متر) وجود دارد. خوشه‌ی ذکر شده، در داخل یک کره‌ی فرضی به قطر ۴ سانتی‌متر محاط شده است (شبیه‌سازی بلوک سنگ‌ریز به قطر ۴ سانتی‌متر (شکل ۳)).

در نهایت برای خوشه‌های متشکل از ۸ گوی، دو نوع گوی وجود دارد. برای این‌که خوشه، در داخل یک کره‌ی فرضی به قطر ۶ سانتی‌متر محاط شود (شبیه‌سازی بلوک سنگ‌ریز به قطر ۶ سانتی‌متر)، شعاع گوی‌های بزرگ‌تر و کوچک‌تر به ترتیب تقریباً با $1/39$ و 0.09 سانتی‌متر برابر هستند (شکل ۴).

در ادامه، خوشه‌های گروه دوم متشکل از ۴، ۵، ۶ و ۸ گوی، در ۳ جهت x ، y و z به ترتیب در شکل‌های ۵ الی ۸ مشاهده می‌شوند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، خوشه‌های گروه دوم مشابه خوشه‌های گروه اول هستند، با این تفاوت که حاوی تعدادی گوی‌های ریز پیرامونی که شعاع آن‌ها برابر $1/8$ گوی‌های متصل به آن در هر خوشه (برای خوشه‌های شامل ۲ نوع گوی، شعاع گوی متناظرش مدنظر است (شکل ۸))، هستند. بلوک‌های گروه اول پس از شکستن به گوی‌های تشکیل‌دهنده‌ی خود تجزیه خواهند شد؛ در حالی که بلوک‌های گروه دوم پس از شکست به زیرخوشه‌های تشکیل‌دهنده‌ی خود، که شامل چند گوی است، تجزیه می‌شوند. زیرخوشه‌های مذکور پس از شکست خوشه‌ی اولیه، دیگر قابلیت شکستن ندارند. مزیت این نوع خوشه در این است که ذرات به جامانده از شکست، برخلاف گروه اول که ذرات حاصل از شکست کاملاً گرد و کروی هستند، گوشه‌دار هستند.

۲.۲. معیار شکست

در نوشتار حاضر، برای شکست یک ذره‌ی مرکب (خوشه) لازم است تا دوشروط در

۳.۲. ناهمسانی نیروهای تماسی برای یک خوشه

برای هر خوشه (بلوک سنگ‌ریز) و برای هر زاویه θ ، نسبت جمع جبری تمام نیروهای تماسی که در جهت θ قرار گرفته‌اند، به کل نیروهای تماسی وارده به آن خوشه، به‌عنوان ناهمسانی جهت‌گیری نیروی تماس^{۱۲} تعریف می‌شود. به منظور وارد کردن اثر ناهمسانی نیروهای تماسی در معیار شکست (شرط اول)، مجموع نیروهای تماسی برای هر خوشه در بازه‌های $\Delta\varphi$ ، $\Delta\theta$ و $\Delta\psi$ (φ ، θ و ψ زوایای هر نقطه‌ی تماس در یک خوشه با سه محور مختصات هستند) محاسبه می‌شوند. در مطالعه‌ی حاضر، برای سادگی معیار شکست و حجم محاسبات، نیروها برای بازه‌های $\Delta\varphi = \Delta\theta = \Delta\psi = 20^\circ$ بدین معنی که فضا در سه جهت x ، y و z به بازه‌های 20° تقسیم و به هر کدام یک شماره‌ی شناسایی تخصیص داده شد. بدین منظور، تمامی فضای اطراف هر خوشه، با نوشتن سه حلقه‌ی متداخل، جستجو و تمام تماس‌های یک‌گویی تشکیل‌دهنده‌ی یک خوشه بررسی شدند و نیروی وارده بر اساس بازه‌ی زاویه‌ی که داخلش قرار داشت، ثبت شد. اطلاعات مذکور در یک آرایه‌ی سه‌بعدی که هر بعد آن ۱۸ عضو داشت و در نرم‌افزار اصلی کدنویسی و اضافه شده بود، ذخیره شد. این روند برای تمام تماس‌های سایر گوی‌های یک خوشه و در ادامه برای تمام خوشه‌های دیگر تکرار شده است.

سپس بزرگ‌ترین درایه‌ی ماتریس مذکور جستجو شد، که با $\max(f\theta)$ نشان داده شده است. جمع جبری نیروهای وارد بر یک خوشه نیز محاسبه شده است، که با $\Sigma f\theta$ نشان داده شده است. در نهایت، عامل ناهمسانی نیروهای تماسی (U_f)، مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه شد:

$$U_f = \frac{(f\theta)_{\max}}{\Sigma f\theta} \quad (1)$$

که در آن، مقدار U_f از صفر تا ۰٫۵ (برای آزمایش بار نقطه‌ی) متغیر است.

۴.۲. تنش ایجاد شده در یک خوشه

برای معرفی شرط دوم شکست (مربوط به مقاومت شکست)، ابتدا لازم است تا تنش ایجاد شده در خوشه در اثر نیروهای تماسی تعیین شود. بیشینه‌ی تنش کششی ایجاد شده در بلوک‌های سنگی تحت آزمایش کششی غیرمستقیم مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:^[۲۶]

$$\sigma = \frac{F}{a^2} \quad (2)$$

که در آن، F نیروی وارده بر سنگ توسط صفحات آزمایش و فاصله‌ی میان صفحات آزمایش در ابتدای آزمایش است. بنابراین در مدل حاضر، با فرض این‌که سازوکار شکست بلوک‌های سنگ‌ریز در یک مجموعه بلوک، مانند سازوکار شکست در آزمایش برزلی است، تنش کششی بیشینه‌ی ایجاد شده در یک خوشه با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه شده است:

$$\sigma_t = \frac{(f\theta)_{\max}}{d^2} \quad (3)$$

که در آن $(f\theta)_{\max}$ ، با توجه به توضیحات ارائه شده در بند ۳.۲ محاسبه شده است.

۵.۲. مقاومت شکست

قابلیت شکست دانه‌های سنگ‌ریز به جنس سنگ و کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن و نیز به مشخصات فیزیکی مصالح، از قبیل: اندازه، شکل و تخلخل داخلی دانه‌ها

بستگی دارد. مک‌داول و همکاران (۱۹۹۶)^[۲۷] مفهوم احتمال را در مطالعه‌ی رفتار شکست دانه‌ها در نظر گرفتند و احتمال بقای (شکسته نشدن) یک دانه (P_{sc}) تحت تنش σ_c اعمال شده در آزمایش شکست را به‌صورت رابطه‌ی ۴ تعریف کردند:

$$P_{sc} = \frac{\text{تعداد ذرات شکسته شده وقتی: } \sigma \geq \sigma_c}{\text{تعداد کل ذرات آزمایش}} \quad (4)$$

که در آن، σ بیشینه‌ی تنش ایجاد شده در بلوک سنگی در آزمایش کشش غیرمستقیم است.

ایشان همچنین بیان کردند که توزیع ویبول^{۱۳} (۱۹۵۱) می‌تواند تغییرات مقاومت مصالح دانه‌ی را مدل کند و مطالعات ایشان مؤید این مطلب است که مقاومت شکست مصالح دانه‌ی از قانون ویبول تبعیت می‌کند.^[۲۸] همچنین مک‌داول و همکاران (۱۹۹۶)^[۲۷] به منظور دست‌یابی به یک الگوی منظم برای توزیع مقاومت مصالح دانه‌ی، احتمال بقای یک دانه تحت تنش کششی به‌صورت تابعی از نسبت σ/σ_c (تنش نرمالایز شده) را به‌صورت رابطه‌ی ۵ تعریف کردند:

$$P_s = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_c}\right)^m\right] \quad (5)$$

که در آن، P_s احتمال بقای یک دانه تحت تنش کششی و σ_c تنش مشخصه^{۱۴} است که تحت آن، ۳۷٪ ($\exp(-1)$) یک مجموعه از دانه‌ها بدون شکست باقی می‌مانند. m مدول ویبول است، که نحوه‌ی تغییرات احتمال بقا را با تغییرات تنش وارده تعیین می‌کند و با افزایش تغییرات مقاومت، کاهش می‌یابد.

مارسال^{۱۵} (۱۹۷۳) مطالعه‌ی در مورد مقاومت شکست بلوک‌های سنگی به‌صورت مقاومت شکست میانگین F_b (میانگین مقاومت شکست به دست آمده از سه آزمایش انجام شده بر روی نوع ثابتی از مصالح) ارائه کرد و سپس رابطه‌ی ۶ را برای به دست آوردن F_b از روی قطر بلوک سنگی پیشنهاد کرد:^[۶]

$$F_b = \eta\left(\frac{d}{d_0}\right)^\lambda \quad (6)$$

که در آن، F_b برحسب کیلوگرم و η و λ مشخصات مصالح و d_0 اندازه‌ی مشخصه^{۱۶} هستند. مارسال ابتدا فرض کرد که پارامتر λ مربوط به مصالح سنگ‌ریز برابر با ۱٫۵ است. مطالعات تکمیلی وی نشان داد که این فرض دور از واقعیت نیست و برای مصالح سنگ‌ریز مختلف آزمایش شده، پارامتر λ بین ۱٫۸ - ۱٫۲ به دست آمد. مطالعات بعدی نشان داد که رابطه‌ی مستقیمی بین مدول ویبول و پارامتر λ وجود دارد:^[۲۱]

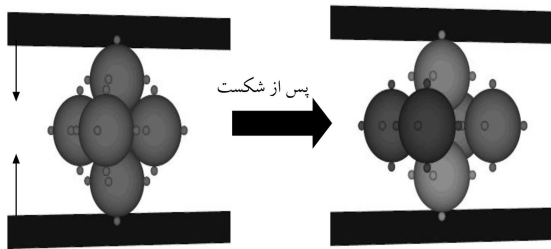
$$\lambda = 2 - \left(\frac{3}{m}\right) \quad (7)$$

بنابراین با جایگذاری ۱٫۵ به جای پارامتر λ در رابطه‌ی اخیر، مقدار ۶ برای مدول ویبول مصالح سنگ‌ریز به دست می‌آید.

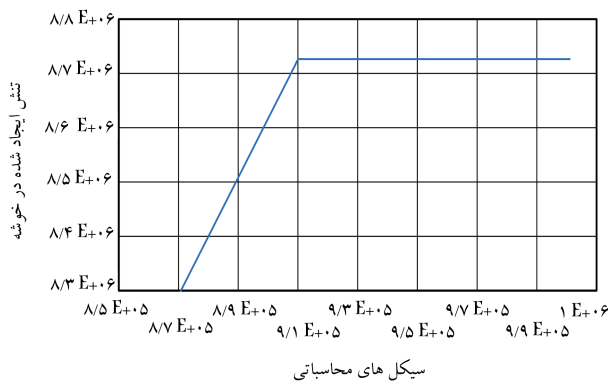
به این ترتیب با به دست آوردن m برای مصالح سنگ‌ریز ذکر شده، می‌توان توزیع مقاومت بر پایه‌ی احتمال را به دست آورد. در مطالعه‌ی حاضر، جهت انجام آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها از مشخصات سنگ‌ریز ارائه شده توسط وارا‌داجان^{۱۷} و همکارانش (۲۰۰۳)^[۲۹] استفاده شده است. ایشان در نتایج آزمایش‌های خود اشاره‌ی به توزیع بر پایه‌ی احتمال مقاومت سنگ‌ریز نکرده‌اند و از مفهوم ارزش شکست^{۱۸} (تغییرات درصد رد شده از الک) جهت بررسی شکست دانه‌ها استفاده کرده‌اند. بنابراین سعی شده است با توجه به مطالعات انجام گرفته بر روی بلوک‌های سنگی توسط مارسال و با توجه به جنس مصالح سنگی آزمایش شده توسط

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی آزمایش شده توسط مارسال و سد پرولیا. [۲۹]

نمونه	جنس کانی	d_{avg} (m)	F_b (N)	η (N)	λ
مصالح سنگی مختلف	کوارتز	۰٫۰۴	۱۰۹۰۰	۲۲۱۸۸۵۰	۱٫۶
آزمایش شده توسط	دیوریت	۰٫۰۴۲	۷۰۳۰	۳۵۱۶۶۰	۱٫۲
مارسال	بازالت	۰٫۰۴۳	۱۱۴۰۰	۸۸۳۳۴۰	۱٫۴
	گرانیت	۰٫۰۴	۶۰۳۰	۱۳۱۵۴۶۰	۱٫۶
مصالح سنگ ریز سد پرولیا	شامل کانی های کوارتز بیوتیت و فلدسپات	۰٫۰۴	۱۱۲۰۰	۱۴۰۰۰۰۰	۱٫۵



شکل ۹. آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی بلوک سنگ ریز گروه دوم با ۶ زیرخوشه.



شکل ۱۰. تنش ایجاد شده در خوشه (برحسب Pa) در برابر سیکل های محاسباتی.

در برابر سیکل های محاسباتی در شکل ۱۰ مشاهده می شود. تنش های اعلام شده، با استفاده از رابطه ۶ برای خوشه با ضخامت واحد است. سختی های نرمال و مماسی دیسک ها برابر با $۱۰^8 \text{ N/m} \times ۱/۵$ و ضریب اصطکاک داخلی $۰٫۷$ انتخاب شده است.

به دلیل پراکندگی اعمال شده بر مقاومت بلوک ها، تنش های بیشینه متفاوتی از آزمایش های مذکور به دست آمده است. در شکل ۱۱، منحنی احتمال بقا برای توزیع ویبول و همچنین نتایج آزمایش های تک محوری مشاهده می شود، که در آن توافق میان نتایج عددی و توزیع ویبول به وضوح مشخص است.

پس از انجام آزمایش ها، مقدار $۸٫۳۸۹$ مگاپاسکال برای σ_c به دست آمد، که همان گونه که گفته شد می توان به عنوان مقاومت شکست مصالح در نظر گرفته شود. بنابراین مقاومت شکست مصالح با قطر $۴٫۴$ سانتی متر، $۸٫۳۸۹$ مگاپاسکال به دست آمد. این مقدار با توجه به شبیه سازی انجام شده به دست آمده است؛ در حالت واقعی نیز با توجه به روابط ۲ و ۶ و با در دست داشتن قطر بلوک، می توان مقاومت واقعی را به دست آورد. این مقدار برای بلوک با قطر $۰٫۴۴$ متر، $۶٫۶۷$ مگاپاسکال به دست می آید، که توافق مناسب میان نتایج واقعی و شبیه سازی را نشان می دهد.

واراداجان و همکاران، مقاومت شکست مقتضی برای مسئله ی حاضر استخراج شود. در جدول ۱، مشخصات مصالح مختلف آزمایش شده توسط مارسال و پارامترهای اتخاذ شده برای مصالح سنگ ریز سد پرولیا ارائه شده است.

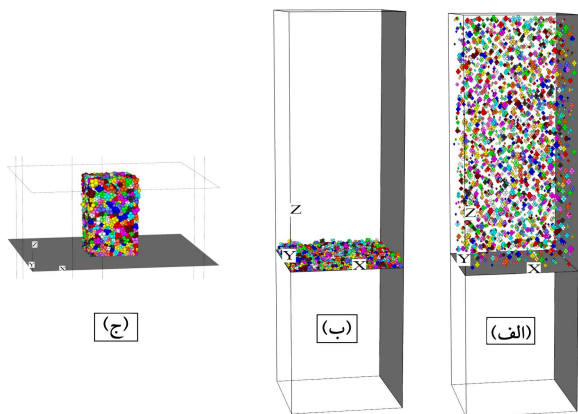
بدین ترتیب با در دست داشتن مشخصات مصالح η و λ می توان F_b و با توجه به رابطه ی ۶، مقاومت مربوط به بلوک با هر اندازه ی قطر را به دست آورد. به منظور انطباق با توزیع آماری ویبول با مدول (m) مساوی ۶، ضرایب احتمالی تغییرات مقاومت بر مقاومت مشخصه (σ_c) اعمال شده است. با بسط دادن رابطه ی ۵، بازه ی تغییرات نسبت $\frac{\sigma}{\sigma_c}$ از $۰٫۴۶۵$ (برای احتمال بقای ۹۹%) تا $۱٫۲۹$ (برای احتمال بقای ۱%) به دست می آید. با در نظر گرفتن مقاومت شکست (σ_{max}) برابر با σ_c ، تنش مشخصه ی توزیع مورد نظر (σ_c) برابر با (σ_{max}) خواهد بود و بازه ی تغییرات بیشینه ی تنش قابل تحمل مصالح (σ_{max}) در بازه ی $(۱/۲۹\sigma_c - ۰/۴۶۵\sigma_c)$ به دست می آید. نرم افزار PFC^{۳D} قابلیت تولید چنین توزیعی را مستقیماً ندارد، لذا یک زیربرنامه ی مناسب به نرم افزار اضافه شد.

۳. آزمایش های عددی شکست بر روی بلوک های سنگ ریز

در مجموع دو نوع آزمایش عددی کشش غیرمستقیم و آزمایش سه محوری بر روی نمونه های ساخته شده از انواع بلوک های سنگ ریز و در شرایط مختلف شبیه سازی شده است. ابتدا جهت استخراج توزیع احتمال بقا و اعتبارسنجی مدل شکست اتخاذ شده، بر روی انواع بلوک های سنگ ریز تولید شده، آزمایش عددی کشش غیرمستقیم شبیه سازی شده است. در ادامه، آزمایش های سه محوری مختلف انجام و اعتبارسنجی شده است.

۳.۱.۳. آزمایش های کشش غیرمستقیم

برای استخراج توزیع احتمال بقای خوشه های مدل شده، خوشه های گروه دوم با ۶ زیرخوشه و به تعداد ۳۰ بلوک سنگ ریز با قطر یکسان ($۴٫۴$ سانتی متر) میان دو دیوار صلب، تحت شرایط کرنش کنترل شده، آزمایش شده و شکست را تجربه کرده اند (شکل ۹). خوشه های تولید شده ی گروه دوم، قبلاً در شکل های ۵ الی ۸ نشان داده شده اند. در آزمایش های مذکور، دیوارها با سرعت یکنواخت به یکدیگر نزدیک می شوند و همان گونه که در بخش ۲ اشاره شد، هر $۱۰^۰$ سیکل یک بار بلوک سنگ ریز در معیار شکست چک می شود. در صورت صدق در معیار شکست، زیرخوشه های تشکیل دهنده ی خوشه از آن جدا خواهند شد. یک نمونه نمودار تنش وارده به خوشه



الف) تولید خوشه‌ها؛ ب) ته نشینی خوشه‌ها؛ ج) حرکت دیوارها و متراکم سازی.

شکل ۱۳. مراحل آماده‌سازی نمونه.

برابر با سختی خوشه‌ها، ولی سختی دیوارهای عمودی به نسبت ۰٫۱ سختی خوشه‌ها، برای شبیه‌سازی شرایط محصورشدگی نرم^{۱۹} در نظر گرفته شده است.^[۲۳] دمپینگ برابر ۰٫۷ (پیش فرض نرم‌افزار) و گام زمانی $2E -$ بوده است. برای آماده‌سازی نمونه‌ی آزمایش، از یک فرایند ریزشی استفاده شده است، تا از برهم خوردگی شرایط اولیه‌ی نمونه جلوگیری شود. به طور کلی، آزمایش‌های سه‌محوری شامل سه مرحله هستند:

۱. مرحله‌ی اول ساخت نمونه با تخلخل موردنظر (که خود شامل فرایند ریزشی خوشه‌ها و حرکت دیوارها به سمت هم است)؛

۲. مرحله‌ی دوم اعمال تنش همه‌جانبه تا تنش موردنظر؛

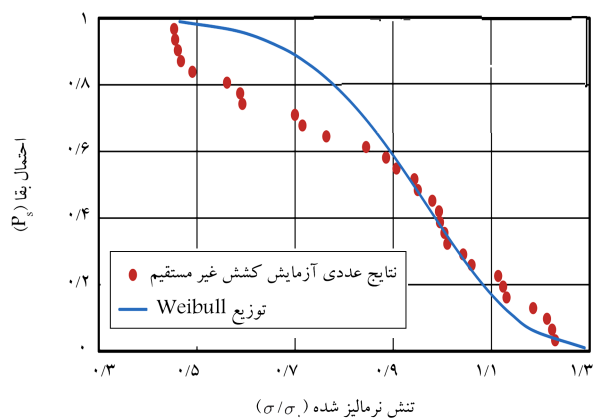
۳. مرحله‌ی سوم اعمال تنش انحرافی با ثابت بودن تنش همه‌جانبه.

لازم به ذکر است که در مرحله‌ی اول (ساخت نمونه) امکان شکست به خوشه‌ها داده نمی‌شود، ولی در مراحل دوم و سوم این امکان وجود دارد و خوشه‌ها طی فرایند تعیین شده در معیار شکست بررسی می‌شوند.

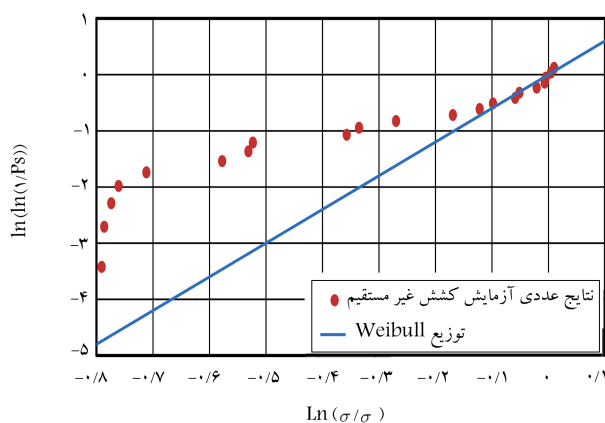
در مرحله‌ی اعمال تنش انحرافی برای برش، دیوارهای افقی بالایی و پایینی نمونه با سرعت از پیش تعیین شده‌ی به یکدیگر نزدیک می‌شوند. این سرعت در مراحل اولیه کم است و سپس در مراحل بعدی افزایش پیدا می‌کند تا به سرعت نهایی (۴۰۰ متر بر ثانیه) برسد. تعداد این مراحل ۸۰ در نظر گرفته شده است؛ که در مرحله‌ی اول، سرعت دیوارها ۱/۸۰ سرعت انتهایی است و در پایان مرحله به سرعت نهایی تعیین شده‌ی موردنظر می‌رسد. در جدول ۲، مشخصات شبیه‌سازی‌های ارائه شده است.

۲.۴. مراحل آماده‌سازی نمونه

ابتدا ۶ دیوار در فواصل مشخصی ایجاد شد، به طوری که مطابق شکل ۱۳ یک مکعب مستطیل به ابعاد $1/1 \times 1/1 \times 2/6$ متر ایجاد شده است. در فضای مذکور، ۲۱۰۰ عدد گوی با شعاع متغیر ۳ تا ۶ سانتی‌متر به صورت تصادفی تولید و در گام بعدی، ۲۰۰ عدد خوشه‌ی ۸ تایی (شامل ۸ گوی)، ۵۰۰ عدد خوشه‌ی ۵ تایی، ۶۰۰ عدد خوشه‌ی ۶ تایی و ۸۰۰ عدد خوشه‌ی ۴ تایی جایگزین گوی‌های اولیه‌ی تولید شدند (شکل ۱۳ - الف). سپس با اعمال گرانش به سمت کف نمونه (شتاب منفی) و با اعمال چند سیکل، ذرات ته‌نشین شدند. بدین ترتیب نمونه برای متراکم‌سازی تا تخلخل موردنظر آماده شد (شکل ۱۳ - ب). در نهایت، دیوارها با



شکل ۱۱. منحنی توزیع احتمال بقا در برابر تنش نرمالیز شده σ/σ_0 .



شکل ۱۲. مدول m ، برای توزیع ویبول و آزمایش‌های انجام شده.

معادله‌ی ۵ را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۸ بازنویسی کرد و برای تعیین مدول ویبول استفاده کرد.

$$\ln(\ln(\frac{1}{P_s})) = m \times \ln(\frac{\sigma}{\sigma_0}) \quad (8)$$

در شکل ۱۲، هر دو نتیجه مربوط به توزیع ویبول و نتایج عددی، مقدار تقریبی یکسانی از m به دست می‌دهند، که در آن، شیب منحنی، با توجه به رابطه‌ی ۷ و محورهای مختصات، نشان‌گر مدول m است.

۴. آزمایش‌های سه‌محوری

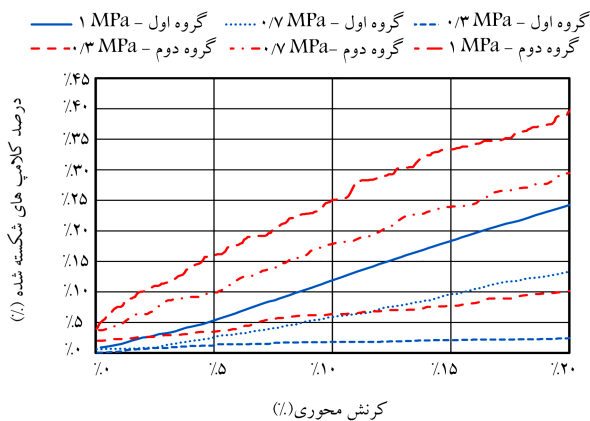
در مطالعه‌ی حاضر، جهت اعتبارسنجی مدل، آزمایش‌های سه‌محوری انجام شده توسط واردادجان و همکارانش (۱۹۵۱)^[۲۸] بر روی مصالح سنگ ریز سد پرولیا در نظر گرفته شده است.

۱.۴. نحوه‌ی انجام آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌ی بلوک‌های سنگ ریز

جهت شبیه‌سازی آزمایش سه‌محوری، مجموعه‌ی بلوک‌های سنگ ریز داخل ۶ دیواره به عنوان المان‌های مرزی جهت اعمال شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. دیوارهای افقی به عنوان صفحات صلب واردکننده‌ی نیروی عمودی و دیوارهای عمودی جهت اعمال تنش همه‌جانبه استفاده شده‌اند. سختی‌های نرمال و مماسی دیوارهای افقی

جدول ۲. مشخصات نمونه در شبیه سازی های عددی سه محوری.

تعداد گوی های مدل شده	تعداد کل خوشه های مدل شده	سختی قائم و برشی (N/m)	چگالی	ضریب اصطکاک دیوار با ذرات	ضریب اصطکاک بین ذرات	نشانه ی خلا	قطر خوشه (cm)	نوع گروه	ترکیب خوشه ها
۱۰۹۰۰	۲۱۰۰	1×10^8	۲۶۸۰	۰٫۷	۰٫۲۵	۰٫۶۶	۳، ۵، ۴، ۶	اول، دوم، سوم، چهارم	گروه اول
۳۱۳۱۶	۱۱۰۰	1×10^8	۲۶۸۰	۰٫۷	۰٫۲۵	۰٫۷	۳٫۳۷، ۵٫۵۸، ۴٫۴، ۶٫۷	اول، دوم، سوم، چهارم	گروه دوم



شکل ۱۴. درصد خوشه های شکسته شده در مقابل کرنش محوری (خوشه ی گروه های اول و دوم، تنش های جانبی ۰٫۳ تا ۱ مگاپاسکال).

جدول ۳. درصد شکست خوشه ها در کرنش ۲۰٪.

میزان افزایش شکست (%)	میزان شکست خوشه ها (%)		
	گروه دوم	گروه اول	تنش همه جانبه (کیلو پاسکال)
۱۱۹٫۴	۱۰٫۱۸	۴٫۶۴	۳۰۰
۱۰۹٫۹	۳۰	۱۴٫۲۹	۷۰۰
۵۷٫۱	۴۰٫۱۸	۲۵٫۵۷	۱۰۰۰

نتایج نشان می دهد که گوشه داری بیشتر بلوک های سنگ ریز شبیه سازی شده موجب افزایش شیب شکست خوشه ها و درصد نهایی آن در کرنش ۲۰٪ شده است؛ به طوری که روند مذکور برای خوشه ی گروه دوم با تنش همه جانبه ی ۰٫۳ مگاپاسکال، نسبتاً مشابه خوشه ی گروه اول اما با تنش همه جانبه ی ۰٫۷ مگاپاسکال بوده است. اختلاف مذکور برای تنش های بالاتر (۰٫۷ و ۱ مگاپاسکال) بیشتر بوده و شکست خوشه های گروه دوم (تیرگوشه) با شیب بیشتری انجام شده است. در جدول ۳، درصد شکست خوشه ها در کرنش ۲۰٪ ارائه شده است.

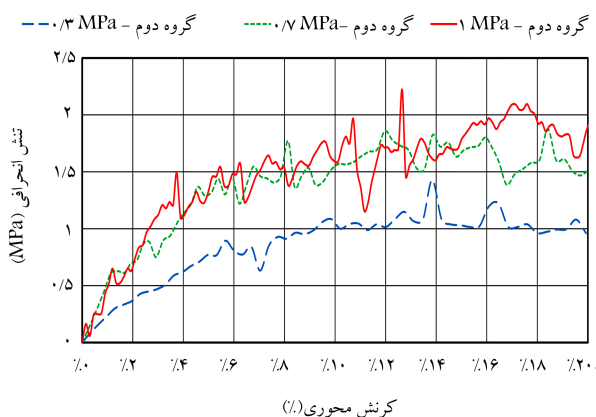
سرعت مناسبی به سمت یکدیگر نزدیک شدند تا نسبت تداخل کمیته ی مورد نظر (که در جدول ۲ ارائه شده است) حاصل شود (شکل ۱۳ - ج) برای خوشه های گروه دوم هم دقیقاً همین روال برای ساخت نمونه از ذرات با گوشه داری بیشتر تکرار شد. ابعاد نهایی نمونه $0.48 \times 0.28 \times 0.28$ متر بود، که نسبت کوچک ترین بعد نمونه به اندازه ی بزرگ ترین سنگ دانه برای نمونه های گروه اول و دوم به ترتیب برابر ۴٫۷۶ و ۴٫۱۷ بوده است.

۳.۴. اعمال تنش همه جانبه و تنش انحرافی

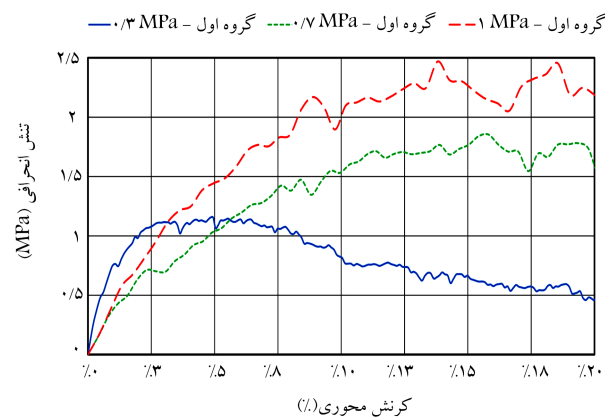
آزمایش های سه محوری در فشارهای همه جانبه ی مختلف انجام می شوند. برای ثابت نگه داشتن تنش های همه جانبه در طول انجام آزمایش، از یک سازوکار کنترل تنش جانبی، که با کدنویسی به نرم افزار اضافه شده استفاده شده است. بدین ترتیب که ابتدا دیوارها برای رسیدن به تنش مورد نظر به هم نزدیک می شدند، سپس با در نظر گرفتن یک رواداری کوچک (مثلاً $0.05 \pm$ پاسکال)، تنش موجود با تنش همه جانبه ی هدف مقایسه و بر اساس آن، سرعت دیوارهای جانبی تنظیم شده است. در نرم افزار PFC^{2D} برای بارگذاری نمونه (اعمال تنش)، از حرکت و سرعت دادن به دیوارها استفاده شده است. در مرحله ی اعمال تنش انحرافی، دیوارهای بالا و پایین نمونه با سرعت از پیش تعیین شده یی به سمت یکدیگر نزدیک می شدند. این سرعت در مراحل اولیه کم بود و سپس در مراحل بعدی افزایش پیدا کرد تا به سرعت نهایی (۰٫۴ متر بر ثانیه) رسید. تعداد مراحل مذکور، ۸۰ در نظر گرفته شده است؛ که در مرحله ی اول، سرعت دیوارها ۱٫۸۰ سرعت انتهایی بوده و در پایان مرحله به سرعت نهایی تعیین شده رسیده است. همان گونه که گفته شد، از شروع مرحله ی اعمال تنش همه جانبه تا پایان آزمایش سه محوری، امکان شکست برای خوشه ها فراهم شده است، هر چند در مرحله ی اعمال تنش همه جانبه، درصد اندکی از خوشه ها دچار شکست شدند.

۴.۴. نتایج آزمایش های سه محوری

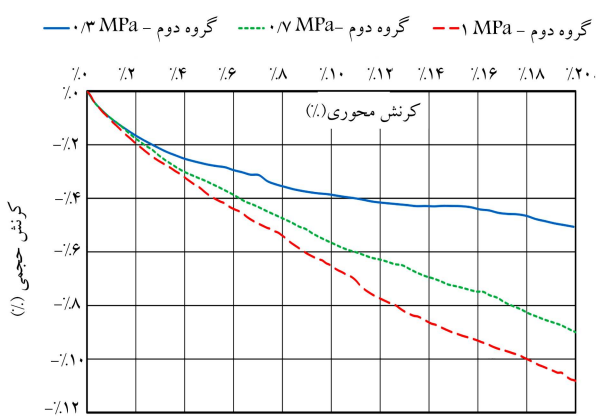
نتایج آزمایش های سه محوری برای دو گروه خوشه ها و برای فشارهای همه جانبه ی ۰٫۳، ۰٫۷ و ۱ مگاپاسکال ارائه و در آخر نتایج آن ها با هم مقایسه شده اند. در شکل ۱۴، درصد شکست خوشه ها طی مرحله ی اعمال برش آزمایش سه محوری برای تمام آزمایش ها مشاهده می شوند.



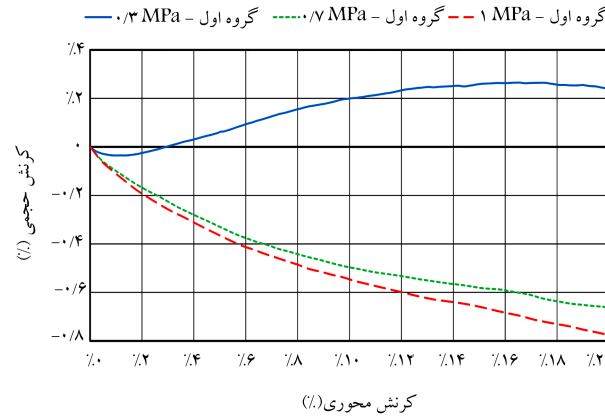
شکل ۱۷. تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری (خوشه‌ی گروه دوم در تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳، ۰٫۷ و ۱ مگاپاسکال).



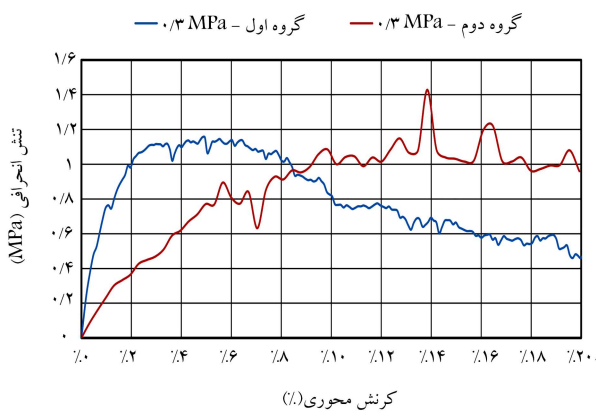
شکل ۱۶. تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری (خوشه‌ی گروه اول - تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳، ۰٫۷ و ۱ مگاپاسکال).



شکل ۱۸. کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری (خوشه‌ی گروه دوم در تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳، ۰٫۷ و ۱ مگاپاسکال).



شکل ۱۶. رفتار حجمی نمونه‌ی خوشه‌ی گروه اول (در تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳، ۰٫۷ و ۱ مگاپاسکال).



شکل ۱۹. تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری (خوشه‌ی گروه اول و دوم - تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳ مگاپاسکال).

به‌طور مجزا ارائه شده‌اند، تا تأثیر گردگوشه یا تیزگوشه بودن بلوک‌های سنگ‌ریز دقیق‌تر مشخص شود. در تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳ مگاپاسکال، نمونه‌ی گردگوشه (گروه اول)، دارای پیک است؛ در حالی که نمونه‌ی تیزگوشه (گروه دوم)، با جهت تقعر ثابتی با مقداری از تنش تقریباً ثابت شده است (شکل ۱۹). همچنین نمونه‌ی گردگوشه (گروه اول)، رفتاری انقباضی و بعد اتساعی دارد؛

۱.۴.۴. مقایسه‌ی نمودارهای تنش و کرنش برای هر گروه خوشه

در شکل‌های ۱۵ الی ۱۸، به‌ترتیب نمودار تنش انحرافی در برابر کرنش و رفتار حجمی نمونه‌ها در حین آزمایش سه‌محوری در هر سه تنش همه‌جانبه برای هر دو گروه خوشه‌ها مشاهده می‌شود.

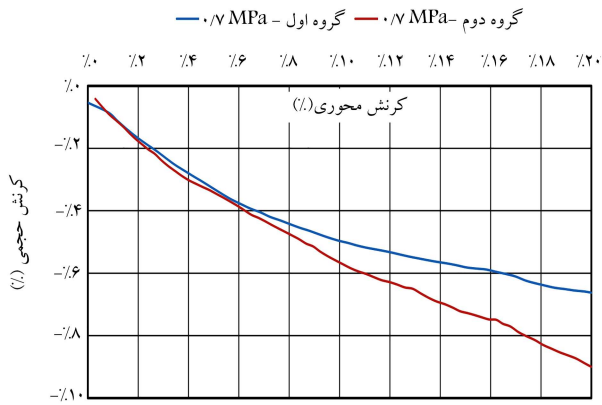
همان‌طورکه پیشتر اشاره شد، برای خوشه‌های گروه اول، در تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳ مگاپاسکال، رفتار نمونه متفاوت و دارای پیک است، سختی اولیه‌ی بیشتری دارد، اما مقدار تنش انحرافی در کرنش ۲۰٪ کمتری را دارد.

همچنین تفاوت مذکور برای رفتار کرنش حجمی و محوری نیز وجود دارد. مطابق شکل ۱۶، فقط نمونه تحت تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳، رفتاری اتساعی از خود نشان داده است؛ در حالی که رفتار نمونه‌های با تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۷ و ۱ مگاپاسکال کاملاً انقباضی و با کاهش حجم همراه هستند.

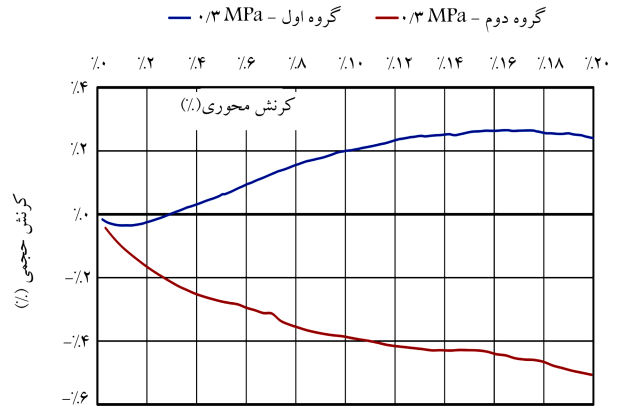
مطابق شکل ۱۷، برای خوشه‌های گروه دوم، رفتار متفاوت است. نمونه از تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳ مگاپاسکال به ۰٫۷ مگاپاسکال در کرنش ثابت، تنش انحرافی بیشتری تجربه کرده است؛ در حالی رفتار نمونه‌های با تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۷ و ۱ مگاپاسکال به آن میزان اختلاف ندارند. همچنین مطابق شکل ۱۸، هر چه تنش همه‌جانبه بیشتر شده است، رفتار انقباضی نمونه‌ها نیز بیشتر شده است.

۲.۴.۴. مقایسه‌ی نمودارهای تنش و کرنش برای هر تنش همه‌جانبه

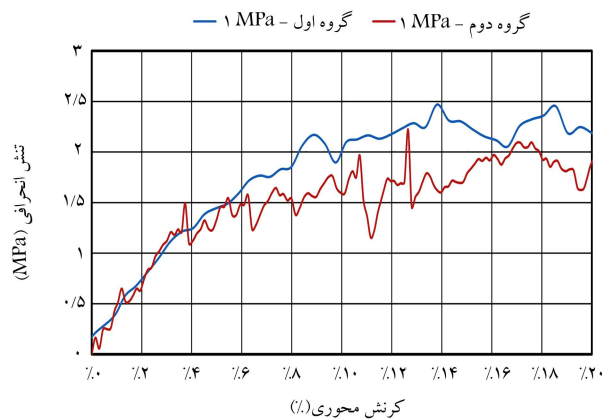
در بخش کنونی، رفتار نمونه‌ها در تنش‌های همه‌جانبه‌ی مختلف برای ۲ گروه خوشه



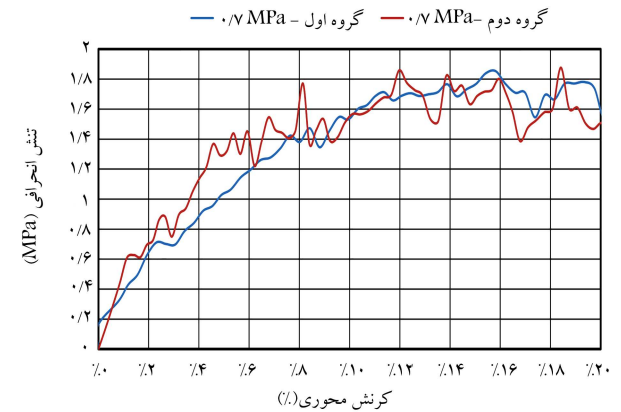
شکل ۲۲. کرنش محوری در مقابل کرنش حجمی (خوشه‌ی گروه‌های اول و دوم، تنش همه‌جانبه‌ی برابر با ۰٫۷ مگاپاسکال).



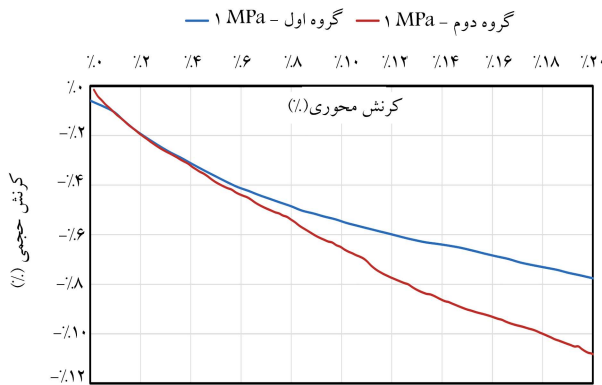
شکل ۲۰. کرنش محوری در مقابل کرنش حجمی (خوشه‌ی گروه‌های اول و دوم - تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳ مگاپاسکال).



شکل ۲۳. تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری (خوشه‌ی گروه‌های اول و دوم - تنش همه‌جانبه‌ی ۱ مگاپاسکال).



شکل ۲۱. تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری (خوشه‌ی گروه‌های اول و دوم - تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۷ مگاپاسکال).



شکل ۲۴. کرنش محوری در مقابل کرنش حجمی (خوشه‌ی گروه‌های اول و دوم - تنش همه‌جانبه‌ی ۱ مگاپاسکال).

در حالی‌که نمونه‌ی تیزگوشه (گروه دوم)، کاملاً انقباضی است (شکل ۲۰)، که تابعی از شکست بیشتر ذرات سنگ‌ریز گروه دوم است. شکسته شدن سنگ‌ریز و تولید ذرات کوچک‌تر، موجب بروز رفتار انقباضی بیشتر می‌شود.

در تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۷ مگاپاسکال، نمونه‌ی تیزگوشه (گروه دوم) در مقایسه با گروه اول، در کرنش‌های کمتر از ۷٪، تنش انحرافی بزرگتری را به ازاء کرنش ثابت داریم و در ادامه، تقریباً منطبق می‌شوند و در کل رفتاری مشابه به هم دارند (شکل ۲۱).

همچنین هر دو نمونه‌ی گردگوشه (گروه اول) و تیزگوشه (گروه دوم) رفتاری انقباضی دارند، که این برای نمونه‌ی تیزگوشه (گروه دوم) بیشتر است (شکل ۲۲). در تنش همه‌جانبه‌ی ۱ مگاپاسکال، ابتدا نمودار دو نمونه تقریباً بر هم منطبق بودند و در ادامه، نمونه‌ی گردگوشه (گروه اول) مقادیر بیشتری تنش به ازاء کرنش ثابت داده است (شکل ۲۳).

همچنین همانند آزمایش با تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۷ مگاپاسکال، هر دو نمونه‌ی گردگوشه (گروه اول) و تیزگوشه (گروه دوم) رفتاری انقباضی دارند، که این برای نمونه‌ی تیزگوشه بیشتر است (شکل ۲۴).

شکل ۲۵ مشاهده می‌شود، که مطابق آن‌ها با افزایش تنش جانبی، شکست در نمونه افزایش یافته و تغییرات در منحنی دانه‌بندی بیشتر شده است. همچنین با افزایش گوشه‌داری ذرات (خوشه‌ی گروه دوم)، شکست افزایش یافته و دانه‌بندی نمونه ریزتر شده است.

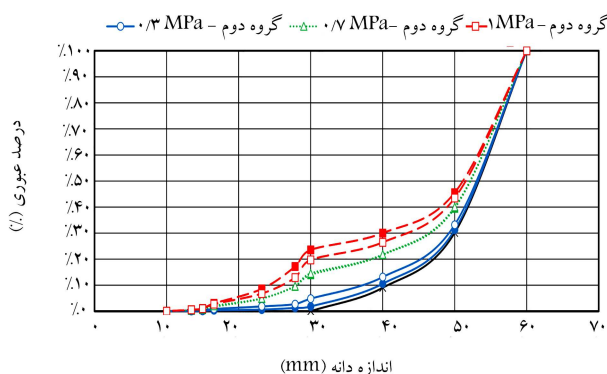
۵.۴. تغییر دانه‌بندی در اثر شکست ذرات

منحنی‌های دانه‌بندی برای نمونه‌ها در انتهای تراکم ایزوتروپ و انتهای آزمایش در

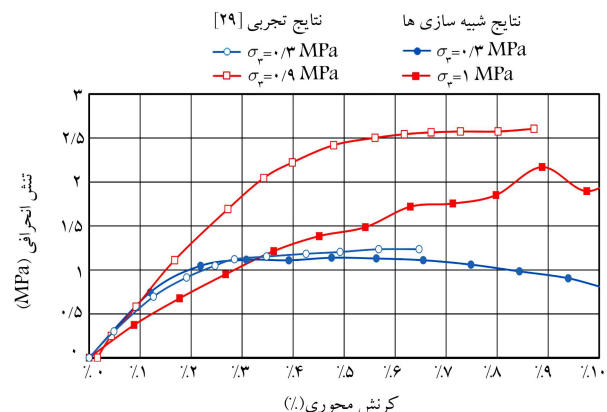
جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های عددی و تجربی.

نتایج عددی		نتایج تجربی [۲۹]	
تنش همه‌جانبه		خوشه‌های گروه اول خوشه‌های گروه دوم	
(مگاپاسکال)		در گسیختگی	
در گسیختگی	در گسیختگی	در گسیختگی	در گسیختگی
۰٫۳	۴۳	۴۱	۴۰
۰٫۷	۳۸	۳۵	۳۳
۱	۳۶	۳۴	۲۸

گروه اول - ۱ MPa - گروه اول - ۰٫۷ MPa - گروه اول - ۰٫۳ MPa - قبل از آزمایش



شکل ۲۴. منحنی‌های دانه‌بندی مصالح قبل و بعد از آزمایش.



شکل ۲۶. مقایسه‌ی نتایج کرنش محوری در مقابل تنش انحرافی برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایش‌های تجربی [۲۹].

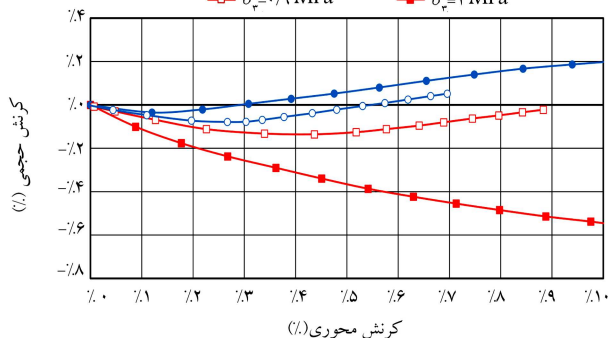
۶.۴. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌های تجربی

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در بخش ۴.۴، به همراه داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی سه محوری بزرگ مقیاس بر روی مصالح سد پرولیا (نمونه‌ی B)، [۲۹] در شکل‌های ۲۶ و ۲۷ مشاهده و در جدول نیز ۴ ارائه شده‌اند.

در شکل ۲۶، مقایسه‌ی نتایج تنش و کرنش محوری آزمایش‌های شبیه‌سازی شده (برای خوشه‌ی گروه اول) و نتایج گزارش شده برای آزمایش‌های تجربی، [۲۹] با تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۰٫۳ و ۰٫۹ مگاپاسکال و نیز در شکل ۲۷، نتایج کرنش حجمی در برابر کرنش محوری برای همان آزمایش‌ها مشاهده می‌شود.

به منظور صرفه‌جویی در زمان و تعداد شبیه‌سازی‌ها از سه فشار همه‌جانبه‌ی ۰٫۳، ۰٫۷ و ۱ مگاپاسکال برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. آزمایش‌های

نتایج شبیه‌سازی ها
نتایج تجربی [۲۹]



شکل ۲۷. مقایسه‌ی نتایج کرنش محوری در برابر کرنش حجمی برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایش‌های تجربی [۲۹].

تجربی موردنظر در ۴ تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳، ۰٫۶، ۰٫۹ و ۱٫۲ مگاپاسکال بوده است، که آزمایش‌های شبیه‌سازی شده در بازه‌ی میانی آزمایش‌های تجربی قرار می‌گیرند. به علت محدودیت‌های شبیه‌سازی، تخلخل اولیه‌ی نمونه‌ها متفاوت است؛ لذا کرنش حجمی نتایج شبیه‌سازی شده و آزمایش‌های تجربی قابل مقایسه نیستند. لازم به ذکر است که امکان رسیدن به تخلخل پایین در آماده‌سازی سه‌بعدی نمونه میسر نشده است.

بررسی و مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که نتایج در تنش همه‌جانبه‌ی ۰٫۳ مگاپاسکال کاملاً رضایت‌بخش است، ولی با افزایش تنش همه‌جانبه و با افزایش شکست ذرات در نمونه‌ی عددی و به علت تولید ذرات کاملاً کروی، که حاصل از شکست ذرات مرکب هستند، نمونه‌ی عددی افزایش مقاومت کمتری را نشان می‌دهد و از نظر حجمی نیز رفتار تراکمی تری دارد.

مقایسه‌ی مقادیر موجود در جدول ۴، دقت و تطابق بالای شبیه‌سازی عددی و معیار ارائه شده با آزمایش‌های تجربی ارائه شده است. کاهش φ برای خوشه‌های گروه دوم به نسبت گروه اول، ناشی از شکست بیشتر است، که در نمونه رخ داده است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار مصالح سنگ‌ریز و پدیده‌ی شکست ذرات به کمک روش اجزاء منفصل و ارائه‌ی مدلی کارآمد، شبیه‌سازی و اعتبارسنجی شده است. همان‌طور که از خروجی‌های آزمایش‌های عددی انجام گرفته مشخص است، افزایش فشار همه‌جانبه و افزایش تیزگوشگی بلوک‌های سنگ‌ریز باعث افزایش شکست دانه‌ها طی اعمال برش به نمونه شده است. شکست ذرات باعث می‌شود که نمونه‌ها عمدتاً رفتار انبساطی از خود نشان ندهند و کاملاً انقباضی عمل کنند. به علاوه رفتار تنش - کرنش آن از حالت متراکم (با پیک) به روند یک نمونه‌ی سست تغییر کند، که تمامی موارد اخیر تأثیر زیاد پدیده‌ی شکست را در رفتارهای نمونه اثبات می‌کند. مطالعه‌ی حاضر توانایی روش اجزاء منفصل (DEM) برای در نظر گرفتن رفتار پیچیده‌ی مصالح سنگ‌ریز را نشان می‌دهد.

نتایج به دست آمده برای شبیه‌سازی یک سنگ‌ریز واقعی نشان می‌دهد که زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح با دقت خوبی شبیه‌سازی شده است. شاخص‌های

۲. معیار گسیختگی ارائه شده، پارامترهای مقاومتی و همچنین محصورشدگی (ناهمسانی نیروهای تماسی) را در نظر می‌گیرد.
۳. مفهوم احتمال برای مقاومت بلوک‌ها در معیار گسیختگی لحاظ شده است.

- مهم و نقاط قوتی که مدل ارائه شده برای شبیه‌سازی رفتار مصالح سنگ‌ریز دارد، بدین شرح است:
۱. مدل سه‌بعدی، نتایج را بیش از پیش دقیق‌تر و مدل را کارآمدتر می‌کند.

پانویس‌ها

1. discrete element method
2. Cundall
3. particle crushing phenomenon
4. Xu
5. fabric
6. Ma
7. non-thickness cohesive interface elements
8. Deluzarche
9. McDowell
10. clump
11. FISH
12. contact force orientation anisotropy
13. weibull
14. characteristic stress
15. Marsal
16. characteristic size
17. Varadarajan
18. crushing value
19. soft confinement

منابع (References)

1. O'Sullivan, C. "Particle-based discrete element modeling: geomechanics perspective", *Int. J. of Geomechanics*, **11**(6), pp. 449-464 (2011).
2. Cundall, P.A. "A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems", *Proceedings of the Symposium of the International Society for Rock Mechanics*, **2**, pp. 129-136 (1971).
3. Cundall, P.A. "A computer model for rock mass behavior using interactive graphics for input and output of geometrical data", U.S. Army Corps of Engineers (Missouri River Division), Technical Report No. MRD 2074 (1974).
4. Cundall, P.A. and Starck, O.D.L. "A discrete numerical model for granular assemblies", *Géotechnique*, **29**(1), pp. 47-65 (1979).
5. Alaei, E. and Mahboubi, A. "A discrete model for simulating shear strength and deformation behaviour of rockfill material considering the particle breakage phenomenon", *Granular Matter*, **14**(6), pp. 707-717 (2012).
6. Marsal, R.J. "Mechanical properties of rockfill", in *Embankment Dam Engineering: Casagrande Volume*, pp. 109-200, Wiley, New York (1973).
7. Lade, P.V., Yamamuro, J.A. and Bopp, P.A. "Significance of particle crushing in granular materials", *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**(4), pp. 309-316 (1996).
8. Xu, M., Hong, J. and Song, E. "DEM study on the effect of particle breakage on the macro- and micro-behavior of rockfill sheared along different stress paths", *Computers and Geotechnics*, **89**, pp. 113-127 (2017).
9. Wan R.G. and Guo P.J. "Stress dilatancy and fabric dependencies on sand behaviour", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **6**(1), pp. 635-645 (2004).
10. Shen, Z.J. "A granular medium model for liquefaction analysis of sands", *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **21**(5), pp. 742-748 (1999).
11. Chang, C.S. and Liao C.L. "Constitutive relation for a particulate medium with effect of particle rotation", *International Journal of Solids and Structures*, **26**(4), pp. 437-453 (1990).
12. Chang, C.S. and Ma, L. "A micromechanically-based micropolar theory for deformation of granular solids", *International Journal of Solids and Structures*, **28**(1), pp. 67-86 (1991).
13. Oda, M., Konishi, J. and Nemat-Nasser, S. "Experimental micromechanical evaluation of strength of granular materials: effects of particle rolling", *Mechanics of Materials*, **1**(4), pp. 269-283 (1982).
14. Chang, C.S. and Liao, C.L. "Constitutive relation for a particulate medium with the effect of particle rotation", *International Journal of Solids and Structures*, **26**(4), pp. 437-453 (1990).
15. Chang, C.S. and Ma, L. "A micromechanical-based micropolar theory for deformation of granular solids", *International Journal of Solids and Structures*, **28**(1), pp. 67-86 (1991).
16. Lim, W.L. and McDowell, G.R. "Discrete element modelling of railway ballast", *Granular Matter*, **7**, pp. 19-29 (2005).
17. Munjiza, A., Owen, D. and Bicanic, N. "A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids", *Engineering Computations*, **12**(2), pp. 145-174 (1995).
18. Munjiza, A., *The Combined Finite-Discrete Element Method*, 1st ed., Wiley, New York (2004).
19. Ma, G., Zhou, W. and Chang, X.L. "Modeling the particle breakage of rockfill materials with the cohesive crack

- model", *Computers and Geotechnics*, **61**, pp. 132-143 (2014).
20. Ma, G., Zhou, W., Chang, X.L. and et al. "A hybrid approach for modeling of breakable granular materials using combined finite-discrete element method", *Granular Matter*, **18**(1), pp. 1-17 (2016).
 21. Deluzarche, A. and Cambou, B. "Discrete numerical modeling of rockfill dams", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **30**, pp. 1075-1096 (2006).
 22. McDowell, G.R. and Harireche, O. "Discrete element modelling of soil particle fracture", *Géotechnique*, **52**(2), pp. 131-135 (2002).
 23. Cheng Y.P., Nakata Y. and Bolton, M.D. "Discrete element simulation of crushable soil", *Géotechnique*, **53**(7), pp. 633-641 (2003).
 24. Mahboubi, A., Cambou, B. and Fry, J.J., *Numerical Modeling of the Mechanical Behavior of Non-Spherical Crushable Particles, Powders & Grains 97*, ed. R.P. Behringer & J.T. Jenkins, Balkema (1997).
 25. *Itasca Consulting Group Inc.* "PFC3D (Particle flow code in three dimensions), version 3.0, minneapolis, minnesota (2002).
 26. Jaeger, J.C. "Failure of rocks under tensile conditions", *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **4**(2), pp. 219-227 (1967).
 27. McDowell, G.R., Bolton, M.R. and Robertson, D. "The fractal crushing of granular materials", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **44**, pp. 2079-2102 (1996).
 28. Weibull, W. "A statistical distribution function of wide applicability", *Journal of Applied Mechanics*, **18**, pp. 293-297 (1951).
 29. Varadarajan, A., Sharma, K.G., Venkatachalam, K. and et al. "Testing and modeling two rockfill materials", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**, pp. 206-218 (2003).