شبیه سازی عددی پدیده شکست دانههای مصالح سنگریز (تیز گوشه)

احد باقرزاده خلخالی کی اصغر میرقاسمی ۲۰ سهیل محمدی ۳ ادکتری مکانیک خاک و مهندسی پی

^۲استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکدههای فنی، دانشگاه تهران ۳استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکدههای فنی، دانشگاه تهران (تاریخ دریافت ۱۳۸۶/۰۸/۱۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۵/۱۷، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۵/۲۷

چکیدہ:

در اثر شکست دانهها، رفتار مقاومتی و تغییرشکلی مصالح سنگریز دچار تغییرات محسوسی میشود. در عمده مطالعات عددی انجام گرفته در راستای شبیه سازی پدیده شکست دانهها، نحوه شکست و به ویژه هندسه دانههای جدید حاصل از شکست، از ابتدای شبیه سازیها فرض شده اند. در تحقیق حاضر برای نخستین بار دانههای اولیه در داخل نمونه شبیه سازی شده کاملا سالم و ترک نخورده فرض میشوند و در مراحل مختلف تحلیلهای عددی بر اساس نحوه توزیع تنش در داخل هر دانه بر پایه نتایج حاصل از تحلیل تنش – کرنش بر روی آن و در صورت ارضای معیارهای شکست؛ دانه مورد نظر دچار شکست میگردد. در این تحقیق با ترکیب روشهای MEM و FEM امکان شبیه سازی پدیده شکست در ذرات تیزگوشه بدون نیاز به فرضیات اولیه فراهم گردیده است. در مجموع نتایج حاصل نشان میدهد که شکست مسازی پدیده شکست در ذرات تیزگوشه بدون نیاز به فرضیات اولیه فراهم گردیده است. در مجموع نتایج حاصل نشان میدهد که شکست فرات در مصالح سنگریز باعث کاهش مقاومت این مصالح شده و از رفتار اتساعی آنها می کاهد. نکته جالب اینکه شکستن ذرات به نوعی باعث تعدیل رفتار تغییر شکل این مصالح می گردد. ضمنا تاثیر پدیده شکست ذرات بر روی مقاومت برشی مصالح به شکست فرات به نوعی باعث

واژدهای کلیدی: شکست ذرات، مصالح تیز گوشه، روش المان مجزا، روش المان محدود، مصالح دانه ای.

مقدمه

بطور کلی خرد شدن اجزاء تشکیل دهنده (دانههای) یک محیط خاکی در اثر تنشهای وارده را شکست ذرات مینامند. این مهم در بسیاری از تودههای خاکی- سنگریزهای نظیر سدهای سنگریزهای و همینطور در بسیاری از آزمونهای شناسایی (آزمایشهای متداول) انجام گرفته بر روی نمونههای آنها تحت فشارهای معمول مشاهده گردیده است. این پدیده توسط محققین متعددی سه محوری، تحکیم و تک محوری فشاری مورد مطالعه قرار گرفته است و برخی از آنها پارامترهای مناسبی جهت بیان این پدیده با عنوان فاکتور شکست ارائه کردهاند.

مطالعات یاد شده نشان دادهاند که بسیاری از خصوصیات مهندسی مصالح دانهای نظیر رفتار مقاومتی (تنش-کرنش)، تغییرات حجم، میزان و نحوه توزیع فشار میزان شکست ذرات این مصالح در اثر تغییرات تنش در آنها میزان شکست ذرات این مصالح در اثر تغییرات تنش در آنها میباشد[۱و۲]. Marsal که شاید برای اولین بار بطور جامع به شکست ذرات طی آزمون سه محوری پرداخت، با ساخت دستگاه سهمحوری فشاری بزرگ مقیاس، توانست پدیده شکست در ذرات مصالح سنگریز را بطور مطلوبی مورد بررسی

قرار دهد. نتیجه نهایی این مطالعات در جملهای بصورت ذیل ازطرف ایشان جمعبندی شدهاست که عبارتاست از:

"به نظر میرسد خرد شدن ذرات عامل بسیار مهمی است که بر روی مقاومت برشی و قابلیت فشردگی مصالح دانهای تاثیر می گذارد و این پدیده در شرایط مختلف تنشهای اعمالی نظیر مرحله اعمال فشار همه جانبه در آزمون سه محوری و یا مرحله بارگذاری انحرافی در این آزمون، بر روی پارامترهای یاد شده تاثیرگذار است". [۳و۴] سایر محققان نیز به نتیجهای مشابه جمله کلیدی ارائه شده از تحقیقات Marsal دست یافتهاند. البته فاکتورهای شکست مختلفی نیز جهت تعیین کمی مقدار شکست در مصالح خاکی ارائه شده اند که به مهمترین آنها در ادامه اشاره خواهد گردید.

مروری بر تحقیقات گذشته

محققان بسیاری در مورد پدیده شکست ذرات خاکهای درشت دانه – سنگریزهای در اثر تغییر حالت تنش و تاثیر آن بر رفتار مصالح مطالعه نموده اند. نتیجه مطالعات برخی از این محققین نیز با ارائه فاکتور شکست برای تعیین میزان شکست همراه بوده است. در این بخش بطور خلاصه به برخی از این تحقیقات اشاره می گردد.



$$\operatorname{Sin}(\varphi) = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \frac{\frac{-1}{\sigma_3} - 1}{\frac{\sigma_1}{\sigma_3} + 1}$$
(1)

در هر حال با توجه به شکل ۱، میتوان نتیجه گرفت که هر چه شکست مصالح دانهای بیشتر گردد، مقدار (φ) و به عبارتی مقاومت برشی مصالح دانهای کاهش مییابد.

 σ_1

تاثیر شکست ذرات بر تراکم پذیری مصالح دانهای

محققین مختلف نشان داده اند که که هر چه مقدار شکستگی مصالح افزایش مییابد، کاهش نسبت منفذها بیشتر خواهد بود و در نتیجه مصالح متراکم تر میگردد. به

عقیده مارشال تغییرات نسبت منفذها ناشی از آرایش جدید دانهها پس از شکست و پر شدن حفرات با تکههای شکسته شده کوچکتر میباشد. Yamamuro و Lade از آزمایشهای انجام شده بر روی ماسه تحت فشارهای همه جانبه متفاوت (از ۱/۵ تا ۲۰ مگاپاسکال) چنین نتیجه گرفتند که شکستگی ذرات عمده ترین سهم را در تغییر حجم مصالح تحت فشارهای زیاد دارا میباشد.[۵]

شبیه سازی عددی پدیده شکست ذرات

محققان متعددی برای مطالعه رفتار خاکهای دانه ای، از شبیه سازیهای کامپیوتری مبتنی بر DEM استفاده کرده اند .[۶ و ۲ و ۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱]

روش تحقيق

با توجه به محدودیت روشهای فیزیکی و تحلیلی، مطلوب ترین روش برای شبیه سازی محیطهای دانه ای، شبیه سازی عددی است. مدلهای عددی در مقایسه با مدلهای تحلیلی، قابلیت شبیه سازی ذرات با شکلها و اندازههای متفاوت تحت بارگذاریهای مختلف را دارا هستند. همچنین برخلاف مدلهای فیزیکی، در شبیه سازیهای عددی در هر لحظه از اجرای آزمایش، امکان دستیابی به هر نوع اطلاعات مورد نیاز همچون تنش، کرنش، راستا و مقدار نیروهای قائم و برشی بین ذرات وجود دارد. در راستای توسعه مدلسازی عددی محیطهای دانهای به کمک روش اجراء محدود، نرم افـزار کامپیوتـری POLY به منظـور شبیه سازی دو بعـدی محیطهای متشکل از فرات تیز گوشه (چندضلعی) ارائه گردیده است[۹].

با عنایت به هدف اصلی تحقیق، بهره گیری از روش اجزاء مجزا جهت شبيه سازى مجموعه ذرات تيز گوشه (مصالح سنگریزه ای) به منظور مطالعه یدیده شکست مد نظر قرار گرفت. به این ترتیب نرم افزار POLY مبنای تحقیق حاضر قرار گرفت و تغییرات لازم بر روی آن صورت پذیرفت. نکته مهم این است که در تحقیق حاضر برای نخستین بار پدیده شکست ذرات سنگریزهای بدون فرضیات اولیه در خصوص مسير شكست انجام پذيرقته است. اين مهم به کمک مدلسازی عددی هر کدام از ذرات سنگریزهای در هرگام تحلیل DEM بر اساس روش المانهای محدود (FEM) پایه ریزی شده است. به طوری که در هر گام از تحليلهاى روش المانهاى مجزا (مربوط به شبيه سازى کل مجموعه ذرات) هر کدام از ذرات به طور جداگانه به ازاء بارگذاریهای آن گام از تحلیل، بر اساس نرم افزار دیگری که در تحقیق حاضر بر پایه روش المانهای محدود تهیه گردیده (نرم افزار FEA)، تحت تحلیل تنش- کرنش قرار مي گيرند.

مدلسازی مجموعه ذرات با روش المان مجزا

در روش المانهای مجزا، یک سری محاسبات متوالی در فواصل زمانی معین (سیکلهای محاسباتی) انجام می گیرد که در هر سیکل، هدف محاسبات رساندن ذرات به حالت تعادل میباشد. فواصل زمانی Δt به اندازهای کوچک اختیار می شوند که بتوان سرعت و شتاب ذرات را در طول هر فاصله زمانی تقریبا ثابت فرض نمود؛ به عبارتی اساس DEM بر این ایده استوار است که در صورتی که گامهای زمانی به اندازه کافی کوچک باشند، یک ذره در طول هـر گام زمانی تنها میتواند بر ذرات مجاور خود تاثیر بگذارد. در این صورت برای محاسبه نیروی وارد بر هر دیسک در هر لحظه، تنها دیسکهای دارای برخورد با آن دیسک مد نظر قرار می گیرند. این ایده کلیدی، DEM را قادر میسازد تا بدون نیاز به مقادیر بسیار زیاد حافظه، قادر به شبیه سازی تعداد نسبتاً زیادی از ذرات باشد. در این روش، تغییر شکل ذرات در مقایسه با تغییر شکل کل محیط دانهای مورد آزمایش، بسیار کوچک میباشد و به همین جهت ذرات صلب فرض می شوند. البته ذرات میتوانند در نقاط تماس با یکدیگر، دارای همپوشانی باشند؛ این همپوشانی به عنوان تغییر شکل ذرات در اثر برخورد تعبیر می شود و نیروهای تماسی ذرات با توجه به آن محاسبه می گردند.

مدلسازی شکست ذرات به روش المان محدود

در تحقیق حاضر بر خلاف مطالعات گذشته نحوه شکست ذرات مدلسازی شده (به کمک روش عددی DEM) از پیش فرض نمی شود. بلکه هر کدام از ذرات بدون درز و ترک مع صورت ذره سالم مدلسازی می شوند. تا اینکه در مراحل مختلف تحلیل مجموعه ذرات شبیه سازی شده، هر کدام از ذرات به طور جداگانه به ازاء بارهای وارده و شرایط مرزی حاکم (تکیه گاهها) تحت تحلیل قرار می گیرند. این تحلیل که با هدف تحلیل تنش کرنش هر ذره انجام می پذیرد بر اساس روش المان محدود (FEM) در تحقیق حاضر به انجام می رسد. در نتیجه تحلیل تنش – کرنش، بر اساس توزیع تنش ها در یک ذره، المان ها (موقعیتهای) پلاستیک شده هر ذره به کمک معیار هوک – براون تعیین می گردد و در صورت احتمال شکست ذره، مسیر شکست با فرض مسیر خط مستقیم بر پایه

اصول روش المان محدود

با توجه به شکل هندسی قلمروهایی که در تحقیق حاضر میبایست با روش المان محدود شبیه سازی شوند (ذره تیز گوشه- سنگریز)، المان مثلثی خطی (سه گرهی) برای مجزاسازی انتخاب گردید تا امکان شبیه سازی

کلیه گوشههای تیز مصالح سنگریز نیز فراهم گردد. یکی از موثرترین پارامترهای لازم در روش المانهای محدود، شرایط بارگذاری و مرزی مساله است. در هر پدیدهای که به روش المان محدود مجزاسازی شده و تحت تحلیل قرار می گیرد، حتما شرایط مرزی می بایست ارضا گردد. در مسایل تعادلی شرایط مرزی از انواع درجات آزادی مقید شده میباشند. به نوعی تکیه گاههای هر ذره در محلهای تماس آن با ذرات مجاور خواهد بود. شکل ۲ نحوه تعریف شرایط مرزی و بارگذاری را برای یک ذره با تعداد تماس سه نشان میدهد. البته برای ذراتی که بیش از سه تماس داشته باشند، تماسهای مازاد نسبت به شکل۲، به عنوان بارگذاری لحاظ میشوند. لذا در شبیه سازی ذرات به روش المان محدود همواره دو تکیه گاه به عنوان شرایط مرزی وجود داشته و باقیمانده تماسهای ذره به عنوان محل بارگذاری خارجی لحاظ میگردند. مقدار بارهای وارده در محل بارگذاریها نیز از نیروی تماسی بین ذرات (روش المان مجزا) تعیین می شوند. انتخاب موقعیت های تماس به عنوان تکیه گاه، تاثیری بر روی تحلیل تنش-کرنش یک ذره نخواهد داشت. دلیل این مهم این است که در تحلیلهای روش اجزاء محدود (DEM) گامهای زمانی تحلیل (Δt) بسیار کوچک انتخاب می گردند و از طرفی مجموعه ذرات مدلسازی شده از تراکم بالایی برخوردارند. لذا در مراحل مختلف تحلیل DEM، برآیند نیروهای تماسی وارد بر یک ذره از نظر استاتیکی در حال تعادل هستند.

پس از شبکه بندی محیط پیوسته (قلمرو مساله) و تعیین شرایط مرزی و بارگذاری، گامهای بعدی مجموعه عملیاتی هستند که جهت تعیین معادلات حاکم بر پدیده مورد بررسی در فرمهای ماتریسی انجام می گیرند. در تحقیق حاضر تحلیل تنش-کرنش یک محیط چند ضلعی خطی (ذره تیز گوشه) در شرایط الاستیک مد نظر میباشد. با توجه به جنس مصالح تشکیل دهنده محیط که همانا سنگ سالم و ترک نخورده است، لذا فرض رفتار الاستیک خطی با توجه به محدوده تنشهای مورد مطالعه، فرض قابل قبولی خواهد بود. از طرفی دیگر طی سالیان گذشته معادلات ماتریس روش المان محدود برای محیطهای الاستیک (کشسان) خطی به طور کامل ارائه گردیده اند[17].

اصول کنترل شرایط پلاستیک در المان

به منظور کنترل شکست ذرات مدلسازی شده، معیارهای مختلفی در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفتند. مبنای کلیه معیارهای شکست برای یک ذره در تحقیق حاضر، المانهای پلاستیک شده در شبکه بندی آن ذره است که تحلیل تنش-کرنش بر روی آن انجام پذیرفته



شکل ۲: تعریف شرایط مرکزی و بارگذاری ذرات



شکل ۳: شاخصهای خمیری لحظه گسیختگی مدلهای شبیهسازی شده بر حسب مقاومت تکمحوری سنگها



شکل ۴: مقادیر Rat در ذرات مجموعه شبیهسازی شده

است. لذا بخش دوم موثر در تحلیل شکست که نقش کلیدی دارد، انتخاب و به کار گیری مدل رفتاری مناسب برای سنگ سالم است تا امکان کنترل پلاستیک شدن هر المان را فراهم نماید. مدلهای رفتاری مختلفی از جمله موهر-کولمب، هوک- براون، گریفیث، مورل، فرانکلین، هوبس و موارد مشابه آنها بر اساس لحظه گسیختگی سنگ ارائه گردیده اند. سعی گردیده است معیار انتخابی تا حد امکان ساده بوده و بتواند رفتار یک سنگ سالم را با خطای کمتری پیش بینی نماید. ضمناً لازم است مدل رفتاری انتخابی از نظر پارامترهای مدل برای مهندسین سنگ شناخته شده بوده و تجربیات مناسبی در خصوص استفاده از مدل در دسترس باشد. بدین ترتیب بنا به دلایل فوق، از مجموعه معیارهای تجربی ارائه شده برای سنگ سالم، معیار هوک- براون با فرض لحظه گسیختگی به عنوان لحظه ایجاد شرایط پلاستیک در سنگ انتخاب گردید. در سال ۱۹۸۰، هوک و براون رابطهای مطابق ذیل را بر اساس تنشهای اصلی حداکثر و حداقل به منظور تعیین گسیختگی یا شکست در سنگ سالم ارائه داد.

$$\begin{split} \sigma_{1f} &= \sigma_3 + \sigma_c \left(\frac{m\sigma_3}{\sigma_c} + 1\right)^{0.5} , \quad \sigma_3 > -\frac{\sigma_c}{m} \\ \sigma_{1f} &= \sigma_3 , \quad \sigma_3 \leq -\frac{\sigma_c}{m} \end{split}$$

ضریب m در این معیار مقدار ثابتی بر اساس خصوصیات سنگ است و s نیز مقاومت فشاری تک محوری سنگ است. این مقدار برای انواع سنگ بر اساس محققین مختلف ارائه شده است[17].

بررسی شکست ذره

مهمترین گام در تحلیل شکست، بررسی شکست ذره و تعیین مشخصات هندسی ذرات جدید بر اساس خط شکست نهایی است. در این بخش میبایست به این پرسش پاسخ داد که آیا ذره مورد مطالعه دچار شکست می شود یا خیر؟ بدیهی است اگر پاسخ این سوال مثبت باشد شکست در راستای خط شکست نهایی رخ داده و ذرات جدید حاصل می شوند. در صور تیکه پاسخ سوال منفی بود، هیچ شکستی رخ نمیدهد و از خط شکست نهایی تنها به عنوان خط شکست محتمل یاد می شود. در راستای پاسخ به سوال مذکور، نیاز به معیار فنی مناسبی است. در حقيقت اساس كنترلهاى مذكور مقايسه شاخص خميرى خط شکست نهایی یا کل ذره با مقداری از پیش تعریف شده است. شاخص خمیری خط شکست (Ind) به صورت نسبت تعداد المانهای پلاستیک مستقر بر روی خط به تعداد کل المانهایی است که مسیر شکست از آنها میگذرد. در مقابل، شاخص خمیری کل ذرہ (Rat) نسبت تعداد المانهای پلاستیک به کل تعداد المانهای آن ذره تعریف می شود.

پارامتر موثر در کنترلهای مذکور معیارهایی است که برای مقادیر Ind و Rat تعریف می شود که مرز شکست یا عدم شکست ذره را معرفی مینماید. برای دستیابی به این معیارها لازم بود مدلهای آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گیرند. لذا مجموعهای از دادههای آزمایشگاهی مربوط به مصالح سنگی که در پروژههای سدسازی کشورمان انجام پذیرفته بودند، جمع آوری گردید. دادههای آزمایشگاهی شامل ۵۱ مورد نتایج آزمایش تک محوری و ۳۰ مورد نتایج آزمون سه محوری به همراه ۶ مورد آزمایش برزیلی مدنظر قرار گرفتند که سنگهای با مشخصات مختلف نظیر دیوریت، بازالت، کوارتز و سنگ آهک را در بر می گیرد. در گام بعدی با صرفنظر کردن از تاثیر شرایط سه بعدی در این آزمونها و همچنین خطای ناشی از همگن و ایزوترپ فرض نمودن کل نمونه سنگ، آزمونهای یاد شده توسط روش اجزاء محدود معرفی شده مدلسازی گردیدند. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگی برای هر نمونه آزمایشگاهی به طور جداگانه در برنامه تعریف گردید. همچنین



شکل ۵^۰: ردیابی پدیده شکست در ذرات تیزگوشه ۳۷۷ و ۴۸ * عکسالعملهای تکیهگاهی با دو فلش متوالی نمایش داده شدهاند.

هر نمونه آزمایشگاهی بر اساس ابعاد واقعی آزمایش، عیناً مدلسازی گردید. لازم به توضیح است که پارامتر مدل هوک-براون (m) بر اساس جداول پیشنهاد شده محققین مختلف برای انواع سنگ انتخاب گردیده اند [۱۳]. مدل های هندسی شبیه سازی شده تحت بارهای گسیختگی ثبت شده در آزمونها قرار گرفتند و تحلیلهای لازم بر روی مدل انجام پذیرفت. مسیرهای شکست در آزمونها با عکسهای در دسترس برای لحاظ فرضیات ساده کننده در مدلهای شبیه سازی شده، تطابق خوبی مشاهده گردید. در مجموع بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازیها، مقادیر In و Ra (شاخصهای خمیری) به بررسی تاثیر مقاومت تک محوری سنگ بر روی مقادیر شاخصهای خمیری در لحظه گسیختگی؛ نمودار شکل ۳ به عنوان نمونهای از بررسیهای انجام گرفته، ارائه گردیده است.

در مجموع میتوان گفت مقدار متوسط Rat در لحظه گسیختگی برای شبیه سازیهای انجام گرفته، ۲۴/۰ و مقدار متوسط Ind برای کنترل لحظه گسیختگی، ۲/۳۰ است. همان طوری که بیان شد، در کنار آزمونهای تک محوری، آزمونهای سه محوری نیز شبیه سازی شده اند. در این شبیه سازیها تیز رابطه بین شاخصهای خمیری روش عددی در لحظه گسیختگی نسبت مستقیم با تنش انحرافی و به نوعی تنش همه انحرافی مصالح سنگریز وابسته به تنش همه جانبه میباشند، روند تغییرات فوق قابل تائید است. چرا که با افزایش تنش همه جانبه، تشکیل مسیر شکست به دلیل وضعیت محدود شده به راحتی میسر نمی گردد، لذا نیاز به المانهای پلاستیک بیشتر

جهت بسیج نهایی زونهای خمیری در راستای ایجاد مسیر شکست است. بدین ترتیب تغییرات به دست آمده از مدلسازی عددی منطقی میباشند. مقدار متوسط Ra و Ind به ترتیب برای شرایط آزمون سه محوری معادل ۸/۰ و ۲۸/۰ میباشد. آمده از مدلسازی آزمونهای تک محوری (۳۴/۰ و ۲۷/۰) موید تاثیر تنش محدود کننده است که بدان اشاره شد. برای بررسی بیشتر یافتههای فوق و کنترل تاثیر تنش همه جانبه بر روی شاخصهای خمیری لحظه گسیختگی، تعداد شش مورد از آزمونهای برزیلی جمع آوری شده (با وجود تقریب زیاد) مدلسازی گردیدند.

وضعیت میکروسکوپی مجموعه ذرات مدلسازی شده که مجموعهای از مصالح سنگریز هستند نشان میدهد، به دلیل دانه بندی رعایت شده (بدون ریزدانه)، معمولاً در اکثر ذرات وضعیت محدود شده وجود ندارد. لذا در شبیه سازیهای اصلی مجموعه ذرات تحقیق با توجه به مطالعات فوق، مقادیر شاخصهای خمیری لحظه گسیختگی حدود ۴۰درصد فرض شده اند.

شبیه سازیها و بحث بر روی نتایج

به منظور بررسی تاثیر پدیده شکست بر روی رفتار مصالح تیزگوشه(سنگریز)، چندین آزمایش دو محوری با تنشهای همه جانبه مختلف بر روی مجموعهای شامل ۵۰۰ ذره (دانه) اولیه شبیه سازی گردیده اند. در هر تنش همه جانبه، دو آزمایش در شرایط بدون امکان شکست (WNB) و در شرایط با امکان شکست(WB) به کمک مجموعه نرم افزارهای تحقیق مدلسازی شده اند.

مشخصات شبيه سازىها

به منظور بررسی اثر شکست ذرات بر خصوصیات مصالح تیزگوشه، دوگروه آزمایش دو محوری شامل گروه WNB که در آن تمام ذرات از ابتدا تا انتهای شبیه سازی بدون شکست میمانند و گروه WB که در آن ذرات در ابتدای شبیه سازی کاملا سالم و ترک نخورده بوده و در هر مرحله از شبیه سازیها بر حسب شرایط اعمالی میتوانند دچار شکست شوند، مدنظر قرار گرفته اند. در هر دو گروه آزمایش، مقدار ضریب اصطکاک بین دانهای برابر ۲/۵ و سطح دانهها فاقد چسبندگی در نظر گرفته شده اند.

برای این که بتوان نتایج هر دو گروه آزمایش را با هم مقایسه کنیم لازم است شرایط آزمایش در هر دو یکسان باشد و در نتیجه برای انجام آزمایشهای گروه WB، از نمونه كاملا مشابه گروه اول استفاده شده است؛ بدین ترتیب که پس از این که مجموعه ذرات در گروه آزمایش WNB متراکم شده و به تعادل رسیدند، نمونههای حاصل مبناى شبيه سازى مراحل اعمال فشار هيدرواستاتيك و تنش انحرافی در هر دو گروه آزمایشها قرار گرفته اند. این شبیه سازیها تحت فشارهای همه جانبه ۱٬۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۴ مگاپاسکال انجام گرفته اند. همچنین لازم به ذکر است که در هر گروه آزمایش، از اثر شتاب زمین بر وزن دانهها صرفنظر شده است. پارامترهای بکار گرفته شده در آزمایشها به شرح جدول ۱ میباشد. همان طور که ملاحظه می گردد در هر دو گروه، تمام پارامترها به غیر از گام زمانی یکسان انتخاب شده است. دلیل کوچکتر بودن گام زمانی در گروه WB، کوچکتر بودن اندازه ذرات (به دلیل شکست ذرات اولیه) در این شبیه سازیها نسبت به آزمایشهای مشابه در گروه WNB میباشد. لازم به ذکر است که پارامترهای مقاومتی در آزمایشهای گروه WB معادل مقاومت سنگ كوارتزيت انتخاب شده است.

قبل از ارائه نتایج حاصل از شبیه سازیها؛ به منظور بررسی صحت عملکرد الگوریتمهای به کار رفته در خصوص مدلسازی پدیده شکست ذرات تیزگوشه؛ نمونههای مختلفی از

شکست در تحقیق	ں نحوہ	كنترز	بررسی و
---------------	--------	-------	---------

حدما ٦ بابامت هام به کار گرفته شده در آدمارش ها					
جمون ۱۰ پاراستر مای به مار ترجعه شماه مار ارسیس م		WB	WNB		
Normal and	Tangential Stiffness (N/m)	2×107	2×107		
Unit Weight of Particles (Kg/m ³)		2500	2500		
Transitional	Damping Coefficient (1/sec)	100	75		
Rotational D	amping Coefficient (1/sec)	600	450		
Time Step (sec)		3×10 ⁻⁵	3×10 ⁻⁴		
Strain Rate (%)		0.005	0.005		
Modulus of Elasticity (E) (MN/m ²)		7×10 ⁴	-		
Poisson's Ratio (v)		0.17	-		
Rock Strength Parameters	Compressive Strength (MN/m ²)	300	-		
	m (Hoek & Brown's Criteria)	25.0	-		
	S (Hoek & Brown's Criteria)	1	-		
	a (Hoek & Brown's Criteria)	0.5	-		

ذرات تیزگوشه تحت فشارهای همه جانبه متفاوت، تحلیل و نحوه شکست ذرات در آنها ردیابی گردید. مجموعهای از ۵۰۰ ذره تیز گوشه مطابق شکل ۴ تحت آزمون دومحوری قرار گرفته است. در این شکل یکی از مراحل کنترل شکست ذرات نمایش داده شده است. درسمت چپ شکل، نحوه توزیع پارامتر Rat (مربوط به تحلیلهای شکست) نشان داده شده اند. هر کدام از دوایر توپر در این شکلها معرف مقدار Rat (نسبت المانهای پلاستیک شده به کل المانها) در ذرات تیزگوشه میباشند. از انجایی که قطر این دوایر نسبت مستقیم با بزرگی مقدار Rat در هر ذره دارد، لذا ذراتی خواهند شکست که دوایر توپر بزرگتری به آنها اختصاص یافته است. دو اندازه نشان داده شده در این شکل، معیارRatF را ارضاء میکنند. این مهم در شکل سمت راست (شکل ۴) به وضوح مشاهده می شود. در این شکلها با همپوشانی مقادیرRat در هر ذره با شکل ذرات، نشان میدهد که ذرات با Rat مشخص شده به دلیل ارضاء معیار شکست که همانا ۴. RatF=۰ میباشد، دچار شکست شده اند. مطابق با این شکل در این مرحله از آزمون دو محوری بر روی نمونه یاد شده شش ذره شکسته اند. از بررسیهای انجام گرفته میتوان نتیجه گرفت که الگوریتم به کار رفته در تحلیل شکست به درستی ذرات تیزگوشهای را که تحت بارهای وارد بر آنها معیار شکست را ارضاء مینمایند، شناسایی و شکست در این ذرات را تعیین مینماید. در ادامه، جهت بررسی صحت تعیین مسیر شکست در ذرات، شش ذره شکسته شده در این مرحله که در موقعیتهای مختلفی داخل مجموعه ذرات قرار دارند، انتخاب گردیده اند. دو ذره از این ذرات که پیش از شکست با شمارههای ۳۷۷ و ۴۸ در مجموعه ذرات مشخص بودند، در شکل۵ نشان داده شده (F_{N}) اند. در این شکل مسیرهای انتقال نیروهای تماسی قائم (F_{N}) و برشی (F_s) بین ذرات تشکیل دهنده مجموعه تحت آزمایش نیز نشان داده شده اند. با توجه به اینکه نیروهای وارد بر هر ذره در تحلیل شکست (المان محدود) بر اساس نیروهای تماسی آن ذره با ذرات مجاور آن انتخاب می گردد؛ لذا بر اساس بررسی مسیرهای انتقال نیروهای تماسی می توان به نحوه اعمال نیروها بر روی یک ذره دست یافت.









مشاهدات ماکروسکوپیک – بحث بر روی نتایج تاثیر پدیده شکست ذرات بر مقاومت برشی و تراکم پذیری مصالح تیزگوشه

نتایج حاصل نشان میدهد که در نمونههایی که شکستن ذرات در آنها ممکن میباشد، تنش قائم و در نتیجه آن تنش اختلافي قابل تحمل توسط نمونه كاهش يافته است (شکل ۶). این کاهش باعث می شود مقاومت برشی نمونه های با قابلیت شکست نسبت به نمونههای بدون امکان شکست ذرات کاهش یابد. نکته جالب در خصوص نتایج حاصل از مقایسه دو گروه WNB و WB این است که در سطوح کرنش بالا (نزدیک۲۰درصد)، مقادیر تنشهای اختلافی و در نتیجه آن مقاومت برشی در اکثر تنشهای همه جانبه به یکدیگر نزدیک می شوند و این مهم به سطح تنش ارتباط معنی دار ندارد. اگر رفتار نمونهها را در دو سطح تنش همه جانبه دسته بندى نماییم(تا ۲ مگایاسکال و بیش از آن)، نمونههایی که تحت تنش همه جانبه کم قرار دارند، تغییرات پارامترهای مقاومتی دو گروه از شبیه سازیها بر روی آنها تقریبا رفتار مشابهی را نشان میدهد. در حالیکه نمونههای تحت تنشهای همه جانبه زیادتر، نحوه تغییرات پارامتر مقاومتی آنها در دو گروه از شبیه سازی متفاوت می باشد. به طوریکه در نمونه های تحت تنش های همه جانبه ۸ و ۱۴ مگاپاسکال، پارامترهای مقاومتی دو گروه WB و WNB در سطوح کرنش کمتر تفاوت بیشتری با هم دارند و با افزایش كرنش محوري، اختلاف آنها كاهش مي يابد.

بررسی رفتار تراکم پذیری مصالح تیزگوشه بین دو





A) نمودار درصد شکست در مقابل کرنش محوری B) نمودار درصد شکست در مقابل کرنش محوری گروه WNB وWNB نیز نشان میدهد که پدیده شکست ذرات باعث کاهش تمایل نمونههای دانهای به اتساع میشود. ضمناً در تنشهای همه جانبه زیاد به دلیل شکست ذرات مناع در تنشهای کم، از انقباض نمونه کاسته میشود. در مجموع به نظر میرسد پدیده شکست ضمن محدود کردن اتساع نمونهها در انتهای آزمایش، از انقباض زیاد نمونه در سطوح کرنش کم نیز جلوگیری میکند. این مهم میتواند به دلیل جایگیری ذرات کوچک حاصل از شکستها در میان ذرات درشت تر باشد که در نمونههای گروه WNB، امکان این جایگیری وجود ندارد(شکل ۷).

همان طوریکه در شکل ۸ مشاهده میشود، تغییرات درصد شکست ذرات در طی آزمون دومحوری درمقابل کرنش محوری می تواند به صورت خطی فرض شود. در تنشهای همه جانبه کمتر، شیب افزایش خطی درصد شکست می تواند برای همه سطوح کرنش یکسان در نظر گرفته شود. در حالیکه برای نمونههای تحت تنشهای همه جانبه بیشتر شیب تغییرات درصد شکست در کرنشهای محوری میانی (۷ تا ۱۲ درصد) بیشتر از سایر سطوح کرنش است. بررسی نمودارهای درصد شکست در مقابل کرنش حجمی نمونهها موید این موضوع است شکست ذرات به هنگام انقباض در نمونه کمتر از شکست که شکست ذرات به هنگام انقباض در نمونه کمتر از شکست در طی اتساع نمونه است. این تفاوت با افزایش تنش همه جانبه افزایش می یابد. دلیل این امر می تواند وجود تنشهای فشاری





تاثیر مقدار فشار همه جانبه بر مقاومت برشی و تراکم پذیری مصالح تیزگوشه

در این بخش تاثیر سطح تنش بر روی رفتار تنش-کرنش مصالح سنگریز مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۶ تاثیر سطح تنش را بر روی تنش اختلافی در آزمون دو محوری نشان میدهد. همان طوریکه انتظار میرفت با افزایش سطح تنش، تنش قائم و انحرافی قابل تحمل توسط نمونه سنگریز افزایش یافته است. این مهم برای هر دو گروه از شبیه سازیها (WNB و WS) صادق می باشد. همچنین مشاهده می شود که افزایش سطح تنش (تنش همه جانبه) تاثیر پدیده شکست را در کاهش تنش قائم و اختلافی افزایش می دهد. دلیل این امر می تواند ایجاد شکست ذرات بیشتر در سطوح تنش

زیاد باشد. مطابق با این شکل افزایش تنش همه جانبه باعث کاهش مقاومت برشی مصالح $(\phi)Sin(a)$ می شود. این تاثیر در خصوص سطوح تنش بزرگتر، شدیدتر میباشد. به عبارتی با افزایش تنش همه جانبه در آزمون دو محوری، زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده کاهش مییابد. کاهش ناهمسانیها در داخل نمونه با افزایش تنش همه جانبه، دلیل اصلی کاهش مدخل نمونه با افزایش تنش همه جانبه، دلیل اصلی کاهش مولاح تنش مختلف نشان میدهد که هر چه تنش همه جانبه وارد بر نمونه بزرگتر باشد، نمونه پیش از گسیختگی متحمل کرنش محوری بیشتری خواهد بود. این نتایج پیشتر در تحقیقات آزمایشگاهی و شبیه سازیهای عددی نیز ملاحظه گردیده اند [۱۴ و ۱۵]. جدول ۲ مقدار زاویه اصطکاک داخلی حداکثر بسیج شده در شبیه سازیها را نشان میدهد. در این جدول تاثیر تنش همه جانبه بر روی مقدار زاویه اصطکاک

مقایسه نتایج شبیهسازیها با آزمونهای آزمایشگاهی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازیها با تعدادی از آزمونهای سه محوری بزرگ مقیاس انجام گرفته بر روی مصالح پوسته بدنه یک سد سنگریزهای با رویه بتنی مقایسه می گردد. برای انجام این مقایسه چهار مورد آزمایش سه محوری مصالح پوسته سد یاد شده مد نظر قرار گرفته است. این میلیمتر) در شرایط استاتیکی انجام پذیرفته است. با توجه به آزمایش منحنی دانه بندی مصالح سنگریز طراحی شده برای بدنه سد به دلیل محدودیت ابعاد آزمایش، دانه بندی مصالح برای آزمایش می بیست اصلاح می شدند. برای این منظور از روش منده است[۶۲ و ۱۲]. لذا منحنی دانه بندی تولیدی در معدن شده است[۶۲ و ۱۲]. لذا منحنی دانه بندی تولیدی در معدن سنگ به طوری اصلاح گردیده تا حداکثر سایز آن ۵ سانتیمتر بوده و مقدار ریز دانه از حد مجاز پوش خارج نشود. بدین تر تیب

ِ شبیهسازیها	در	نمونه	داخلى	زاویه اصطکاک	۲: ۱	جدول
--------------	----	-------	-------	--------------	------	------

Confining Pressure	WNB	WB
(MPa)	(Deg.)	(Deg.)
0.5	39.1	34.8
1.0	37.6	34.9
2.0	36.5	35.0
4.0	35.5	33.4
8.0	34.7	32.0
14.0	34.0	31.3



منحنی دانه بندی مصالح سنگریز برای مدلسازی آزمایشگاهی انتخاب شده است.

ازمایشهای سه محوری مذکور بر روی نمونههای اشباع شده (مقدار B معادل ۲۹۵۵) تحت چهار تنش همه جانبه ۲، ۶، ۱۰ و ۱۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع انجام پذیرفته اند. مطابق با نتایج حاصل با افزایش تنش موثر، مقاومت برشی نمونهها افزایش یافته است و همچنین از رفتار اتساعی نمونهها کاسته میشود. به طوریکه در نمونه تحت آزمایش با تنش همه جانبه ۱۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع (معادل ۱/۵ مگاپاسکال) اتساعی در نمونه رخ نمی دهد. این تغییرات با شبیه سازیهای این تحقیق که پیشتر نمایش داده شدند تطابق خوبی دارد. لیکن می ایست توجه شود که تفاوت کمی در رفتار تغییرشکلی مصالح بین نمونههای آزمایشگاهی و شبیه سازی شده ناشی از شرایط سه بعدی، سایز دانهها و به ویژه وجود مصالح ریز دانه در نمونههای واقعی است که در شبیه سازیها وجود نداشته اند.

به هر حال، هدف اصلی از ارائه این بخش مقایسه کیفی نتایج شبیه سازیها با نمونههای واقعی است؛ چرا که علاوه بر شرایط سه بعدی حاکم بر آزمونهای آزمایشگاهی، دانههای خاکهای بکار رفته در آزمایشگاه میتوانند دارای درز و ترک باشند که در تحلیلهای عددی سلامت اولیه سنگدانهها مبنا بوده است. علاوه بر این تاثیر ضریب مقیاس و خطاهای انسانی در آزمایش را نیز میبایست بدان اضافه نمود.

در مجموع برای ارزیابی و مقایسه کیفی نتایج آزمایشگاهی و تحلیلهای عددی بر اساس روش مارشال فاکتور شکست مصالح سنگریز در آزمایشهای انجام گرفته تعیین گردیدند. شکل ۱۱ منحنیهای دانه بندی نمونههای سنگریز

را پس از اتمام آزمایشهای سه محوری نشان میدهد. بر اساس این منحنیها فاکتور شکست مصالح بین ۱ تا ۷ به ازاء تنشهای همه جانبه مختلف میباشد. مطابق با شکل ۱۲، حداکثر نسبت تنشهای اصلی در نمونهها ۶، ۵، ۴/۸۶ و ۴/۱ به ترتیب از تنش همه جانبه کم تا زیاد بوده است. اگر آزمایشگاهی محققین قبلی نشان داده شوند، در شکل حاصل (شکل ۱۲) تطابق نتایج با تقریب مناسبی مشاهده می گردد. همان طوری که مشاهده میشود، با افزایش شکست ذرات در نمونهها، نسبت تنشهای اصلی (σ_1/σ_3) در نمونه نیز کاهش مییابد. این مهم در شبیه سازیها و آزمونهای نیز کاهش مییابد. این مهم در شبیه سازیها و آزمونهای

خلاصه

در مجموع ارزیابی نتایج شبیه سازی عددی پدیده شکست نشان داد که ترکیب دو روش DEM و FEM برای مدلسازی پدیده شکست در ذرات تیزگوشه (سنگریز) مناسب می باشد. ضمنا مدلسازی پدیده شکست ذرات در روش عددی DEM، رفتار مصالح را به واقعیت نزدیک تر مینماید. ارزیابی نتایج نشانگر آن است که با شکسته شدن ذرات تحت بار، مقاومت برشی کاهش و در عوض قابلیت تراکم نمونه افزایش می یابد. همچنین اثر فشار همه جانبه بر مقدار شکست قابل توجه مىباشد. با افزايش فشار همه جانبه، مقدار شكست افزایش و به تبع آن مقاومت برشی مجموعه نیز روند کاهشی پیدا می کند. مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازیها با نتایج ثبت شده از آزمونهای واقعی سه محوری موید این مهم هستند که مکانیسم و روشهای به کار رفته برای شبیه سازی پدیده شکست در این تحقیق کیفیت فنی مطلوبی را دارا میباشند. همچنین از دیدگاه میکروسکوپیک این مهم قابل درک است که پدیده شکست باعث می شود تا نمونه نسبت به حالتی که ذرات نمی توانند بشکنند، رفتاری همگن تر از خود نشان دهد.



مراجع

1- Lade, P.V. and Yamamuro, J.A. (1996). "Undrained Sand Behavior in Axisymmetric Tests". J. of Geotechnical Engineering , Vol.122, No.2 , PP.120-129.

2- Lade, P. V., Yamamuro, J. A. and Bopp, P.A. (1996). "Significance of Particle Crushing in Granular Materials". J. Geotechnical Engineering, Vol.122, No.4, PP. 309-316.

3- Marsal, R.J. (1967). "Large Scale Testing of Rock fill Materials". J. of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol.93, No. SM2.

4- Marsal, R.J. (1973). "Mechanical Properties of Rock fill". Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, Hirshfeld, R.C. and Poulos, S.J. (eds.), John Wiley& Sons Inc., New York, PP. 109-200.

5- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V. (1996). "Drained Sand Behavior in Axisymmetric Tests at High Pressures". J. of Geotechnical Eng., Vol.122, No.2, PP.109-119.

6- Rothenburg, L. and Bathurst, R.J. (1989). "Analytical Study of Induced Anisotropy in Idealized Granular Materials". Geotechnique, Vol.39, No.4, PP.601-614.

7- Rothenburg, L. and Bathurst, R.J. (1991). "Numerical Simulation of Idealized Granular Assemblies with Plane Elliptical Particles". Comput. Geotech., Vol.11, PP.315-329.

8- Cundall ,P. A. (1978). "Ball- A Computer Program to Model Granular Media Using Distinct Element Method". Technical Note TN-LN-13, Advanced Technology Group, Dams and Moore, London.

9- Mirghasemi, A.A., Rothenburg, L. and Matyas, E.L. (1997). "Numerical Simulation of Assemblies of Two-Dimensional Polygon-Shaped Particles and Effects of Confining Pressure on Shear Strength". Soils and Foundation, Japanese Geotechnical Society, Vol.37, No.3, PP.43-52.

10- Bagherzadeh kh., A., Mirghasemi, A.A. and Mohammadi, S. (2011). "Numerical Simulation of Particle Breakage of Angular Particles Using Combined DEM and FEM". Powder Technology, 205, PP.15-29.

11- Bagherzadeh-khalkhali, A., Mirghasemi, A.A. and Mohammadi, S. (2008). "Micromechanics of Breakage in Sharp-Edge Particles Using Combined DEM and FEM ". Particoulogy, 6, PP.347-361.

12- Reddy, J. N. (1996). "An Introduction to the Finite Element Method". Second Edition, Mc Graw Hill, Inc., ISBN 0-07-051355-4.

13- Goodman, R. E. (1989). "Introduction to Rock Mechanics". Second Edition, John Wiley & Sons, New York, ISBN 0-471-81200-5.

14- Varadarajan, A., Sharma, K.G., Venkatachalam, K. and Gupta, A.K. (2003). "Testing and Modelling Two Rockfill Materials". J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng. ASCE, Vol.129, No.3, PP.206-218.

15- Mirghasemi, A.A., Mossavi nik, R. and Mohebbi, A.R. (2001). "Influence of Particle Breakage on Mechanical Behavior of Assemblies of Two-Dimensional Polygon-Shaped Particles". J. of Faculty of Engineering, University of Tehran, Vol.34, No.4, Mar.2001, PP.49-61.

16- Bagherzadeh-khalkhali, A. and Mirghasemi, A.A. (2009). "Numerical and Experimental Direct Shear Tests for Coarse-Grained Soils". Particoulogy, 7, PP.83-91.

17- Flora, A., Silvestri, F. and Vinale, F. (1997). "Considerations on the Shear Strength of Rock fills Releant to Dam Design". Proc. 19th Int. Congress on Large Dams, 1, pp.843-865.