



دوره اول، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۱ تا ۱۰



ارزیابی عوامل مؤثر بر شکست مصالح دانهای با استفاده از شبیهسازی به روش اجزای مجزا

على امينزاده'؛ احمد فهيمي فر آ*

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

یدیرش: ۱۳۹۶/۰۱

دریافت: ۱۳۹۵/۰۷

حكىدە

بر اساس نتایج آزمونهای آزمایشگاهی، پارامترهای گوناگونی بر رفتار مصالح دانهای تأثیر دارند. در این مقاله، تأثیر تنش همهجانبه، شکل و حالت شکست دانهها بر گسترش شکست ذرات در مصالح دانهای موردمطالعه قرار گرفته است. برای رسیدن به این منظور، از شبیهسازی عددی چندین آزمون دومحوری به کمک روش اجزای مجزا استفاده میشود. روشهای عددی علاوه بر مزایایی مانند ارزان و سریع بودن، قابلیت تمرکز بر روی یک یا چند پارامتر خاص را نیز دارند. برای هرکدام از پارامترهای موردبررسی، نتایج شبیهسازیهای انجامشده بهصورت منحنیهای درصد شکست ذرات نسبت به تنش همهجانبه ترسیم می گردد. آزمایش ها برای سه شکل مختلف از ذرات (سه، چهار و شش گوشهای) که دارای دو حالت شکست متفاوت (تقسیم به دو قسمت مساوی یا فرسایش گوشههای تیز) هستند اجراشدهاند. نتایج نشان می دهد که افزایش هر دو پارامتر تیزگوشهگی و تنش همهجانبه باعث گسترش شکست ذرات نمونهها می شود. علاوه بر این، حالت شکست نیز تأثیر قابلتوجهی در میزان شکست ذرات دارد. درنهایت، نتایج بهدستآمده از مدلسازیهای عددی با کد اجزای مجزای استفادهشده در این تحقیق با نتایج عددی و تجربی حاصل از کارهای گذشته در یک نمودار مورد مقایسه قرارگرفته است. مقایسه بین نتایج، تطابق قابلقبول بین آنها را نشان میدهد. اختلافاتی نیز در نتایج به چشم میخورد که ممکن است ناشی از دوبعدی بودن شبیهسازی و همچنین تفاوت در نحوه در تعریف شکست در آزمایشهای تجربی با عددی باشد؛ بنابراین درمجموع، استفاده از کد موردنظر برای شبیهسازیهای آتی مناسب به نظر میرسد.

> شکست ذرات، مصالح دانهای، روش اجزای مجزا، شکل ذرات، تنش همهجانبه واژگان کلیدی

*. ايران، تهران، خيابان حافظ۲۴، دانشگاه صنعتی امير کبير، ساختمان عمران شماره ۲، اتلق ۲۱۱۱، کد يستی ۱۵۹۱۶۳۴۳۱ تلفن ثابت: ١١ -٤٤٥٤٣٣-٢٢٣-٦٤٢٠ تلفن همراه: ٩١٥٣٢٥٧٤٥٠ ، نمابر: ١١ -٤٤٥٤٣٠

أدرس پست الكترونيك: fahim@aut.ac.ir www.SID.ir

۱– مقدمه

پارامترهای مختلفی بر رفتار مصالح دانهای مثل خاکها و سنگها اثر می گذارند که ازجمله آنها می توان به سطح تنش همهجانبهی واردشده، تراکم، دانهبندی، شکل ذرات، جنس ذرات و همچنین مقدار و نحوه شکست ذرات اشاره کرد. بهمنظور تحقیق در مورد رفتار مکانیکی محیطهای دانهای می-توان از آزمایشهای تجربی استفاده نمود. ازجمله این آزمایشها می توان از آزمایش تکمحوری، سه محوری و کرنش صفحهای نام برد. با توجه به تحقیقات انجامشده در مورد تأثیر عواملی همچون شکل و شکست دانهها و تنش همهجانبه مشاهده می-شود که توجه به این عوامل در مطالعه رفتار مصالح دانهای اجتنابناپذیر است. خرد شدن ذرات منجر به تغییر در خصوصیات فنی و مکانیکی مصالح دانهای همچون مقاومت برشی، تغییر شکلیذیری و نفوذیذیری میشود[۱–۶]. رفتار مکانیکی نمونهی ذرات مصالح دانهای با تغییر شکل ذرات تشکیلدهنده آن تغییر میکند. محققان مختلفی بر روی تأثیر شکل ذرات بر روی رفتار مکانیکی خاک مطالعه کردهاند. [۷– ۱۱] با توجه به تحقیقات انجامشده بر روی تأثیر عواملی همچون شکل و شکست دانهها و تنش همهجانبه مشاهده می-شود که توجه به این عوامل در مطالعه رفتار خاک اجتناب-ناپذیر است. بیشتر این آزمونها برای تنشهای همهجانبه مختلف تکرار شدهاند.

انجام چنین آزمایشهایی گاه بسیار پرهزینه و دشوار میباشد؛ بنابراین، از روشهای عددی بهعنوان جایگزین مناسبی برای چنین آزمونهایی استفاده میشود. با کمک شبیهسازیهای عددی میتوان تأثیر عوامل مختلف (مانند شکل، اندازه، دانه-بندی و شکست ذرات، تنش همهجانبه و غیره) را بر روی رفتار محیط دانهای به تفکیک یا بهطور همزمان بررسی نمود و اهمیت هرکدام از عوامل را با سایر عاملها مقایسه کرد. این روش علاوه بر ارزانتر بودن، به تجهیزات ویژه نیز نیاز ندارد. در این پژوهش، از روش اجزای مجزا^۱ استفاده میشود.

Cundall (1971) توسط (1971) دوش اجزای مجزا نخستین بار توسط (1971) ایه منظور شبیه سازی محیطهای دانه ای ارائه شد و این امکان را فراهم نمود که نمونه ای متشکل از مجموعه ای از ذرات موردبررسی قرار گیرد. نخستین برنامه ی رایانه ای که بر اساس

اجزای مجزا معرفی شد، BALL نام دارد که بهمنظور مدلسازی دوبعدی محیطهای دانهای که از ذرات دایروی تشکیلشدهاند، تهیه شد.]۱۳,۱۲[او از این روش برای تغییر شکل مجموعهی سنگهای بلوکی استفاده نمود. پسازآن، برنامههای رایانهای دیگری برای شبیهسازی محیطهای دانهای متشکل از ذرات بیضی شکل[۱۴] و ذرات تیز گوشه چندضلعی [۱۵] معرفی شدند.

برنامهی POLY که برای مدلسازی محیطهای متشکل از ذرات دوبعدی تیزگوشه ارائهشده است [۱۵] و نسخهی تغییریافتهای از برنامهی [13] BALL میباشد، جهت مدلسازی شکسته شدن ذرات چندضلعی تیز گوشه دوبعدی اصلاح گردیده [۱۶] و برای بررسی اثر شکل و شکست ذرات بر رفتار مکانیکی مصالح دانهای استفادهشده است [۱۷]. کد موردنظر M-POLY نام دارد و مبنای کار پژوهش حاضر قرار گرفته است.

تاکنون توسط برنامه M-POLY، تأثیر عواملی همچون فشار همهجانبه و شکست ذرات [۱۸] و همچنین ناهمسانی^۲ [۱۹] بر رفتار مکانیکی محیطهای دانهای موردمطالعه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، علاوه بر بررسی عواملی مانند شکست ذرات و فشار همهجانبه تأثیر همزمان شکل ذرات و همچنین نحوه ی شکست آنها بر رفتار خاک دانهای موردبررسی قرار گرفته است. با مروری در ادبیات گذشته، روشن است که تاکنون به تأثیر این عوامل به طور همزمان چندان پرداخته نشده است. علاوه بر این، نحوه ی شکست ذرات نیز از عواملی است که هنوز در تحقیقات انجام شده اطلاعات بسیار کمی در مورد آن موجود می باشد و پیشتر به پدیده ی شکست ذرات پرداخته شده است اما در مورد نحوه ی شکست آنها نتایج زیادی مشاهده نمی شود.

۲- استفاده از روش اجزای مجزا

برای شبیهسازی برهم کنش بین ذرات، از سیستم جرم و فنر به همراه میراگر استفاده می شود. با توجه به این که در سیستم موجود، ذرات دارای انرژی جنبشی هستند، برای کاهش این انرژی و رسیدن به حالت تعادل استاتیکی، استفاده از میراگر لازم است. در شکل ۱ نمونهای از این نوع شبیه سازی ملاحظه می شود. همان طور که در شکل مشاهده می شود، برای هر ذره

¹⁻ Discrete Element Method (DEM)

²⁻ Anisotropy

مانند A و B (که بهصورت یک چندضلعی محدب میباشد) یک محور مختصات محلی تعریفشده است. از طرفی، مبدأ مختصات محلی هر ذره بر روی مرکز ثقل آن (مرکز سطح ذره) قرار دارد. همچنین، شعاع معادل این چندضلعی که برابر بافاصله دورترین گوشهی چندضلعی نسبت به مرکز ثقل آن میباشد توسط برنامه محاسبه میگردد؛ بنابراین، برنامه بهجای میباشد توسط برنامه محاسبه میگردد؟ بنابراین، برنامه بهجای مرکز ثقل و شعاع آن برابر شعاع معادل ذره میباشد. این دایره معادل، دایره محیطی ذره نامیده میشود. فنری که در راستای معادل، دایره محیطی ذره نامیده میشود. فنری که در راستای ناینده سختی عمودی بوده که با K_n نشان داده میشود و فنری که در راستای عمود بر خط اتصال دو مرکز است، نشاندهنده سختی برشی میباشد که با K_s نمایش داده

علاوه بر سختی در تماس بین دو ذره، باید میرایی نیز برای تماس در نظر گرفته شود. میرایی به دو صورت قابل شبیه سازی می باشد: میرایی تماسی^T و میرایی کلی^T. میرایی تماسی ناشی از میراگرهایی است که در دو راستای عمود و مماس بر محل برخورد ذرات تعبیه شده اند که در شکل ۱، به صورت Cn و C_s و نمایش داده می شوند. میرایی کلی را می توان ناشی از میراگرهایی تصور نمود که تک تک ذرات را به یک دستگاه مرجع ثابت متصل کرده اند که در شکل ۱ به صورت Cm نشان داده شده است.



شکل ۱: شبیهسازی برهمکنش و برخورد ذرات بهوسیله جرم- فنر -میراگر درروش DEM

هنگامی که دو ذره باهم برخورد کنند، نیروهای عمودی وبرشی میان آنان ایجاد میشود. برای نمایش نیروی عمودی از ${}^{F_{
m s}}$ و برای نمایش نیروی برشی از ${}^{F_{
m s}}$ استفاده میشود. ذرات فاقد چسبندگی در نظر گرفته میشوند. بنابراین، هیچ نیروی $F_{n} \leq 0$ کششی در محل برخورد دو ذره ایجاد نمی گردد. اگر شود، تماس میان ذرات از بین میرود و از یکدیگر جدا می-شوند. از قانون اصطکاک کولمب برای محاسبه نیروی اصطکاک بین دو ذره دارای برخورد استفاده می شود. برای محیطهای دانهای فاقد چسبندگی، قانون کولمب بهصورت نوشته می شود (ϕ زاویه اصطکاک در محل $F_s^{\max} = F_n \cdot \tan \phi$ تماس دو ذره است). ذراتی که باهم برخورد دارند، میتوانند با یک ضریب اصطکاک ثابت در محل تماس با یکدیگر بلغزند. اگر نیروی برشی یا مماسی $({}^{(F_s)}_s)$ در محل برخورد دو ذره از حداکثر مقدار نيروى اصطكاك بيشتر شود، لغزش اتفاق مىافتد. مقدار نیروی برشی وارد بر ذرات با حفظ علامت اولیه خود به حداکثر مقدار خود برابر همواره $F_s \leq F_s^{max}$ می باشد)، که مقدار $F_s = F_s^{max}$ نیز از رابطه ۱ به دست مي آيد: $F_{\rm s}^{\rm max} = \mu . F_{\rm n}$ (1)

^π ب در آن ¢ μ = tan ضریب اصطکاک بیندانهای است. اگر بین دو ذره لغزش رخ دهد، میرایی تماسی در جهت مماس بر محل برخورد ذرات (C₅)، اعمال نمی شود.

۳- روش آزمایش

کد مورداستفاده در این مقاله (POLY)، پدیده شکست ذرات تیزگوشه را جهت مطالعه اثر آن بر رفتار نمونهای از مصالح همچون سنگریزهها شبیه سازی می کند. در این کد، شبیه سازی پدیده شکست ذرات به گونه ای انجام گیرد که تا حد امکان از حجم محاسبات و تعداد المان های موردنیاز کاسته شود. بدین منظور ذرات در فضای دوبعدی در نظر گرفته شده اند.

درروش مذکور، فرض شده است که هر ذره تنها بتواند در امتداد تعدادی خط مستقیم، با راستا و موقعیت مشخص شکسته شود. این خطوط به شکلی در نظر گرفتهشدهاند که یکذره سالم تبدیل به چند ریز ذره شود؛ بنابراین، شکل قطعات حاصل از شکست ذره اولیه از ابتدا مشخص فرض میشود. مطابق شکل ۲-الف فرض میشود که ذره P فقط در

³⁻ Contact Damping

⁴⁻ Global Damping

راستای خطوط d1، d2 و d3 قابلیت شکسته شدن داشته باشد. بدینجهت، در این روش بهجای هر ذره یکپارچه مانند P، یکذره مرکب که از به هم پیوستن ذرات پیوندی کوچکتر P1، P2 تا P1 تشکیل شده است، جایگزین می گردد. ذرهی P را ذره مبنا و ریز ذرات پیوندی P1، P2 و P1 را ریزذرات هم مبنا می نامیم.

ریزذرات پیوندی هممبنا، جسم صلب در نظر گرفته می شوند. آنها قابلیت شکستن یا تغییر شکل ندارند؛ اما زمانی که به طرف همدیگر فشار داده شوند، امکان همپوشانی دارند. ذرات مبنا نیز قابلیت تغییر شکل ندارند، اما از آنجاکه از چندین ریزذره پیوندی تشکیل شدهاند، قابلیت شکستن دارند. هر دو ذره مبنا و ریزذره پیوندی به طور اختیاری چند ضلعی محدب در نظر گرفته شدهاند.

جهت اطمینان از صلبیت و یکپارچگی ریزذرات پیوندی هم مبنا برای تشکیل ذره مبنا، فرض می شود هر دو ریزذره پیوندی که وجه مشترک دارند، به وسیله یک اتصال گیردار در وسط وجه مشترک خود به یکدیگر متصل شوند. نقاط m1 و m2 در شکل ۲-ب نشان دهنده محل پیوند مذکور می باشند. این اتصالات گیردار نقش قید را برای دو ذره پیوندی هم مبنا بازی می کنند. در طی شبیه سازی، هرگاه تنش ایجاد شده در اتصال بین دو ذره از ظرفیت باربری آن بیشتر شود، اتصال شکسته می شود و با جدا شدن دو ذره پیوندی از یکدیگر، شکست رخ می دهد.





مرکب معادل آن؛ (ب) نقاط پیوند دو ریزدره پیوندی [۱۶]

مدلسازی اتصال گیردار بین دو ذره دارای پیوند، از طریق دو فنر خطی و یک فنر پیچشی انجام میشود. یکی از فنرهای خطی که عمود بر وجه مشترک دو ذره است فنر قائم و فنر خطی دیگر که موازی با وجه مشترک دو ذره میباشد فنر برشی نام دارند. نیروها و لنگر در محل اتصال بین دو ذره پیوندی، از طریق فنرهای خطی و پیچشی منتقل میشوند. محاسبه مقدار آنها با توجه به جابجایی نسبی دو ذره پیوندی، در هر سیکل شبیهسازی مقدور میباشد.

در شکل ۳ دو ریزذره P_1 و P_2 که ذره مبنای P را تشکیل می دهند، نشان داده شده است. براثر اعمال بار، هر یک از ریز ذرهها جابجا می شوند. براثر جابجایی نسبی این دو ریز ذره، باید بررسی کرد که آیا شکست در این ذره رخداده است یا خیر. بدین منظور، نقاط m_1 و m که دیگر بر هم منطبق نیستند، بررسی می شوند. به منظور محاسبه نیرو و لنگر اعمال شده بر هر ذره، جابجایی نسبی دو ذره پیوندی P_1 و P_2 به سه جابجایی نسبی عمودی (Δ_n)، جابجایی برشی (Δ_s) و دورانی (Δ_0) تفکیک می شود. این سه مؤلفه نسبت به صفحه ی مشتر ک دو ریزذره سنجیده می شوند. از این رو، نیروهای عمودی، برشی و لنگر ایجاد شده در اتصال به کمک روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{split} F_{nBond} &= K_{nBond} \cdot \Delta_n \end{split} \tag{(7)} \\ F_{sBond} &= K_{sBond} \cdot \Delta_s \end{aligned} \tag{(7)} \\ M_{Bond} &= K_{\theta Bond} \cdot \Delta_\theta \end{aligned} \tag{(7)}$$

 K_{s-} و K_{n-Bond} ، در روابط بالا K_{0-Bond} سختی فنر پیچشی، K_{0-Bond} و Bond bond we with Bond we with K_{0-} and K_{0-} and





شکل ۳: جایگزینی جابجایی نسبی دو ریز ذره، با سه مؤلفه عمودی، برشی و پیچشی [1۵]





۳. آزمون دومحوری: در آخرین مرحله از هر آزمایش، نمونه در معرض کرنش برشی دومحوری با نرخ ثابت قرار میگیرد. در آزمون دومحوری، کرنش محوری با نرخ ثابتی در راستای عمودی اعمال میشود و همزمان، تنش داخلی مجموعه یذرات در راستای افقی مساوی با فشار محصورکننده ای که در مرحله قبل به نمونه واردشده بود، نگهداشته میشود. این مرحله در تمام آزمون های انجامشده تا کرنش محوری ۲۰٪ نمونه ادامه یافته است.

شکل ۵-الف نمونهای از ذرات مربعی تولیدشده را نشان می-دهد. این ذرات سپس بهصورت همسان متراکم شده است و بهصورت شکل ۵-ب درآمده است. در شکل ۵-پ این نمونه از ذرات تا رسیدن به کرنش محوری ۲۰٪ تحت برش دومحوری قرارگرفته است.

۴–۱– پارامترهای استفادهشده در شبیهسازیها

پارامترهای استفادهشده در آزمایش بر روی نمونهها شامل ذرات سالم و ذرات شامل چند ریزذره مطابق جدول ۱ انتخاب شدند. همان گونه که ملاحظه می شود، برای بررسی شکست، مقاومت فشاری و کششی ماسه و چسبندگی و ضریب اصطکاک سکون نیز باید تعیین شود.

۴-۲- تنشهای همهجانبه، شکل ذرات، شکست و نوع آن در آزمایش بر روی نمونههای با ذرات مثلثی، مربعی و شش ضلعی از تنشهای همهجانبهی نیم، یک، دو و چهار مگاپاسکال برای تراکم همهجانبهی نمونهها استفاده شده است. برای هر تنش همهجانبه روند تکرار چرخهها تا جایی ادامه یافته که نسبت تخلخل نمونهها به مقدار ثابتی برسد. پسازآن نمونه تحت اثر تنش همهجانبهی بزرگتری قرار گرفته است. با رخ دادن یکی از دو حالت زیر، قید بین دو ذره پیوندی گسسته میشود:

الف- هرگاه تنش برشی در محل اتصال دو ذره پیوندی، از مقدار تنش برشی نهایی (ظرفیت باربری قید) فراتر رود.

ب- هرگاه حداکثر تنشهای فشاری یا کششی اتصال (که بهوسیله گشتاور و نیروی عمودی به وجود آمدهاند) از تنشهای فشاری و کششی نهایی بیشتر شوند.

۴- شبیهسازیهای عددی در تحقیق حاضر

روند شبیهسازی شامل سه مرحلهی مختلف است:

 ۲. تولید اولیهی نمونهی ذرات: ابتدا ذرات موردنظر تولید می شوند. تخلخل مجموعه تولید شده زیاد است، بنابراین نیاز به تراکم دارد.

۲. تراکم همهجانبه: برنامه در مرحلهی تراکم همهجانبهی مجموعهی ذرات، نرخ کرنش واردشده بر ذرات را به شکلی کنترل میکند تا مقدار تنشهای داخلی میانگین نمونهی ذرات، به تنش همهجانبهای که توسط کاربر تعریف میشود برسد. با در نظر گرفتن این شرط در برنامه، اگر تنشهای داخلی مجموعه از تنشهای همهجانبه تعریفشده کمتر باشد، ذرات مرزی به مرکز دایره محصورکننده ی ذرات نزدیک شده و در غیر این صورت از مرکز دایره دور میشوند. مرحلهی تراکم همهجانبه تا جایی ادامه می بابد که:

الف- میان تنش داخلی نمونه ذرات و تنش همهجانبهی وارد-شده تعادل برقرار گردد. به عبارتی، تنش همهجانبه باید به مقداری برسد که کاربر تعریف کرده است.

ب- حجم نمونه به مقدار ثابتی برسد که با ثابت شدن نمودار نسبت تخلخل به تعداد چرخههای تکرار روند آزمایش مشخص میشود.

در شکل ۴ تغییرات نسبت تخلخل نمونهی ذرات مربعی نسبت به افزایش چرخههای محاسباتی اجراشده بهوسیلهی برنامه، تحت تنش همهجانبهی نیم مگاپاسکال مشاهده می شود. تغییرات نسبت تخلخل در ابتدا سرعت زیادی داشته اما با ادامهی روند تراکم همهجانبه نسبت تخلخل به مقدار ثابتی می رسد. نشریه علمی- پژوهشی مکانیک سنگ

در این تحقیق، هر نمونه شامل ذرات مثلثی، مربعی یا ششگوشه میباشد. هرکدام از این ذرات میتوانند بهصورت دو ریزذرهای یا چند ریزذرهای موجود باشند (جدول ۲). ازاین پس برای هرکدام از ذرات و حالت شکست آن، از علامت اختصاری نشان داده شده در جدول ۳ استفاده می شود.



ی نیم مگاپاسکال

نمونه ذرات	جدول ۱: پارامترهای استفادهشده در
------------	----------------------------------

اندازه	واحد	عامل استفادەشدە
2.0×10 ⁸	نيوتن بر متر	سختی عمودی و مماسی (k _n ,k _s)
2.5×10 ³	کیلوگرم بر مترمکعب	وزن واحد ذرات (م)
1.0×10 ⁴	بر ثانيه	ضریب میرایی انتقالی
2.0×10 ⁴	بر ثانيه	(ALPHA) ضریب میرایی حاخشہ
		پر علی (ALPHA)
1.3e ⁻⁵	ثانيه	گام زمانی (Frac)
1.0×10 ⁻²	بر ثانیه	نرخ کرنش (EBEVEL)
0.0	کیلو پاسکال	چسبندگی بین ذرات (c)
	، ماسه	عاملهای مرتبط با مقاومت
200	مگا نیوتن بر مترمربع	مقاومت فشاری (Sc)
20	مگا نیوتن بر مترمربع	مقاومت کششی (St)
4.0×10 ⁶	مگا نیوتن بر مترمربع	ضريب الاستيسته (E)

ل ۲: نحوه شکست هرکدام از ذرات	جدول ۲: نحوه ن
-------------------------------	----------------

	شكل ذرات		حالتهای
Н	S	Т	شکست
$\langle \square \rangle$			١
$\langle \rangle$		\mathbb{A}	٢

رات با دو	مختلف ذ	شكل	ای سه	ی برا	اختصار	ىتھاى	۳: علاه	جدول
			کست	ت شـ	حال			

	مت ≲ ث مام∵ الم						
ششضلعی	مربع	مثلث	حالتهای سکست				
H1	S1	Tl	١				
H2	<i>S2</i>	<i>T</i> 2	٢				

۴–۳– شرایط نمونه ذرات

شبیه سازی آزمون دومحوری بر روی ذراتی با شکل های مختلف توسط رایانهی شخصی انجام شده است. برای این که امکان بررسی و مقایسه عامل های مختلف را به طور مجزا داشته باشیم، نمونه ها شرایطی مطابق زیر دارند:

الف- شعاع معادل همه ذرات، یک میلیمتر میباشد. ب- هر مجموعه شامل فقط یکشکل از ذرات (مثلثی، مربعی و ششگوشه) میباشد.

پ- هر نمونه از ذرات، بهوسیله دایرهای به شعاع ۴۰ میلیمتر احاطهشده است.

در فایل ورودی برنامه برای تمام نمونهها، طول و عرض محدودهی مستطیلی شکلی که حافظهی برنامه فقط به ذرات داخل آنها اختصاص مییابد ۱۴۵ میلیمتر انتخاب شده است. شعاع دایرهی محصور کنندهی ذرات ۴۰ میلیمتر در نظر گرفته می شود. حداکثر تعداد ذراتی که میتوانند تولید شوند برای می شود. حداکثر تعداد ذراتی که میتوانند تولید شوند برای نزات مثلثی ۴۶۰، مربعی ۲۱۰ و شش ضلعی ۵۷۱ ذره مبنا تعریف می شود. برای ذرات شامل دو ریز ذره، تعداد کل ریز ذرات مثلثی ۸۴۰، مربعی ۳۶۴ و شش ضلعی ۵۷۱ ذره به دست می-آید. این مقدار برای ذرات چند ریز ذره ای به ترتیب ۱۶۱۲، ۸۴۷ و ۱۰۱۹ ریز ذره می شود.

۵- نتايج

آزمون آزمایشگاهی سه محوری با توجه به مساوی بودن تنشها در دو جهت از سه بعد، در عمل به آزمونی دومحوری تبدیل می شود. برای شبیه سازی آزمون دومحوری با روش اجزای مجزا، ابتدا نمونه اوليه بهوسيله برنامهى AutoBall توليد می شود. برنامهی AutoBall برای تعریف موقعیت مکانی هر ذره کنترل مینماید که دایره محیطی هر ذره با دایرههای محيطي ذرات پيرامون آن تداخل نداشته باشد؛ بنابراين نمونهي تولیدشده تخلخل زیادی دارد. با توجه به غیرمتراکمبودن نمونهی اولیهی تولیدشده بهوسیلهی برنامهی AutoBall، ابتدا بايد تخلخل نمونهها را با واردكردن تراكم اوليه (بدون اين كه تنشى به ذرات اعمال شود) كاهش داد. بدين منظور، با اعمال کرنش محوری بر مرز مجموعه، ذرات مرزی با یک نرخ کرنش ثابت (EBEVEL=0.01) به سمت مرکز نمونه ذرات به حرکت درمیآیند که درنتیجهی آن، مجموعه متراکم می شود. روند تراکم تا جایی ادامه می یابد که تنش ناچیزی درمجموعه ذرات به وجود آید. در غیر این صورت با افزایش عملیات تراکم، ذرات

در یکدیگر فرو میروند و درنتیجه در داخل مجموعه نیروهای بسیار بزرگی ایجاد می شود. مقدار تراکم اولیه توسط آزمونوخطا به دست مىآيد. به اين صورت كه ابتدا تعدادى چرخه معین به برنامه داده می شود. با کنترل روند اجرای برنامه مشاهده می شود که از یک چرخهی معین به بعد (یعنی همان مقداری که باید بهعنوان چرخهی پایان برنامه در نظر گرفته شود) نیروهای بزرگی در داخل مجموعه پدید میآیند. درنتیجه چرخه تعریفشده توسط کاربر اصلاح می گردد. پس از تراکم نمونه اولیه، آزمون دومحوری با اعمال کرنش محوری با آهنگ مشخصی در راستای دو (که در شکل ۵ نشان داده شد) اجرا می شود و همزمان، تنش داخلی مجموعه ی ذرات در راستای یک مساوی با فشار جانبی از قبل تعیین شده در مرحله تراکم همهجانبه، نگهداشته می شود. این مرحله تا کرنش محوری (کرنش در راستای ۲-۲) ۲۰٪ ادامه دارد. با ترسیم نمودارهای درصد شکست ذرات هرکدام از نمونهها نسبت به فشار جانبی در راستای ۱-۱، روند تغییرات شکست ذرات نسبت به فشارهای جانبی مختلف برای نمونههایی شامل ذرات مثلثی، مربعی و شش گوشه برای دو حالت شکست موردمطالعه قرار مي گيرد.

۵-۱- تأثیر شکل و نحوه شکست ذرات و تنش جانبی بر درصد شکست ذرات

در این بخش، تأثیر همزمان عاملهای شکل و نحوه شکست ذرات و مقدار تنش جانبی بر مقدار شکست ذرات موردمطالعه قرار می گیرد. در هرکدام از قسمتهای زیر، تأثیر دو عامل از سه عامل شکل، نحوه شکست ذرات و تنش جانبی موردبررسی قرار گرفته است. همان گونه که در شکلهای ۶ و ۷ دیده می-شود، منحنیهای شکست ذرات مختلف از صفر شروع نشدهاند که علت آن، شکست مقداری از ذرات در مرحله تراکم همه-جانبه است.

۵-۱-۱- تأثیر شکل ذرات و تنش جانبی

تغییرات درصد شکست مجموعه ذرات شامل دو و چند ریزذره نسبت به تنشهای ثابت جانبی مختلف در شکل ۶ نشان دادهشده است. در هر یک از شکلها سه منحنی جداگانه برای مقایسهی تأثیر شکل ذرات نمونه (مثلثی، مربعی و ششضلعی) بر رفتار نمونه ترسیم شده است. شکل ۶-الف مقدار شکست مجموعه ذرات دو ریزذرهای را با در نظر گرفتن فقط مرحله آزمون دومحوری نمایش می دهد. کم ترین درصد شکست

مربوط به نمونه ذرات شش ضلعی می باشد. از طرفی، ذرات مثلثی بیش ترین درصد شکست رادارند. برای ذرات شامل چند ریز ذره (شکل ۶-ب) نیز، درصد شکست بیشینه در هر تنش جانبی برای نمونه ذرات مثلثی و درصد شکست کمینه برای ذرات شش ضلعی اتفاق می افتد با این تفاوت که، اختلاف میان نمودارهای ذرات بیش تر و متمایز تر است. به طور کلی می توان گفت که هر چه ذرات نمونه تیز گوشه تر باشند، درصد شکست نهایی ذرات بیش تر است. آزمون های تجربی نیز این نتایج را تائید می کند [۲۰].

برای همه نمونهها (مثلثی، مربعی و ششضلعی)، افزایش تنش جانبی منجر به افزایش درصد شکست می گردد که با نتایج آزمایشهای تجربی گزارششده تطابق دارد [7].





در شکل ۷ تغییرات درصد شکست مجموعه ذرات مثلثی، مربعی و شش گوشه نسبت به تنش های جانبی مختلف برای آزمون دومحوری نشان دادهشده است. هر کدام از شکل ها شامل سه منحنی جداگانه برای نمایش و مقایسهی نمونه ذرات دو یا چند ریز ذرهای می باشد. همان گونه که دیده می شود برای هر

سه شکل ذرات (الف- مثلث، ب- مربع و پ- شش گوشه) و در هر تنش جانبی، افزایش تعداد ریزذرهها منجر به افزایش مقدار شکست ذرات میشود.

همچنین مشابه بخش ۵–۱–۱، در همه نمونهها و در هر مرحله از آزمایش، افزایش تنش جانبی منجر به افزایش درصد شکست ذرات میشود.



شکل ۷: منحنیهای تغییر درصد شکست مجموعه ذرات شامل دو و چند ریزذره نسبت به تنشهای جانبی ۰/۵، یک، دو و چهار مگاپاسکال برای ذرات (الف) مثلثی، (ب) مربعی و (پ) ششضلعی در آزمون دومحوری



شکل ۸- تغییرات نسبت تنشهای اصلی به فاکتور شکست (برحسب درصد) برای نتایج شبیهسازیهای دومحوری و آزمایشهای تجربی

۷- نتیجهگیری

نتایج حاصل از شبیهسازیهای عددی بهمنظور بررسی عوامل تنش همهجانبه، شکل ذرات و حالت شکست ذرات بر مقدار شکست مصالح دانهای موردمطالعه قرار گرفت. نمونهها شامل ذراتی به شکل مثلث، مربع یا شش ضلعی انتخاب شدند. هر کدام از این ذرات می تواند با دو حالت مختلف بشکند. هر دسته از آزمایشها با چهار تنش محصور کننده متفاوت (۰/۵، یک، دو و چهار مگایاسکال) انجامشده است. آزمونها شامل مراحل تراکم همهجانبه و همچنین، آزمون دومحوری می باشند. بنابراین، ۴۸ آزمایش مختلف بر روی نمونههایی که توسط دایرهای به شعاع ۴۰ میلیمتر محاط شدهاند، صورت گرفته است. علاوه بر این، ذرات تشكيل دهندهي همه نمونهها داراي شعاع معادل يكساني برابر یک میلیمتر هستند. خلاصهای از نتایج بهدستآمده از شبیهسازیهای عددی به شرح زیر میباشد: الف- برای تمام نمونهها، افزایش تنش جانبی منجر به افزایش درصد شکست ذرات می شود. ب- مجموعههای شامل ذرات تیز گوشهتر، شکست بیشتری از خود نشان میدهند. پ- با افزایش ریزذرات ذره مبنا (حالتی که به فرایش ذرات شبیه است)، درصد بیشتری از ذرات نمونه می شکند.

rockfill dams (pp. 531-551), 10th Congress on Large Dams.

[3] Marachi, N.D., & Chan, C.K., & H.B. Bolton. (1972). Evaluation of properties of rockfill materials, J. Soil Mech. Found. Div. 98(1), 95-114.

[4] Bopp, P.A.(1994). Effect of initial relative density

با مرور ادبیات گذشته می توان تأثیر پارامترهای شکل [۲۱] و شکست ذرات [۲۲] در تنشهای جانبی مختلف را در شبیه سازی های انجام شده توسط محققین پیدا کرد، اما تأثیر هم زمان این پارامترها به ندرت یافت می شود. علاوه بر این، تلاش شده است تا با شبیه سازی نحوه شکست ذرات، روند مناسبی برای مدل سازی حالت های مختلف شکست برای تحقیقات آینده ارائه شود.

۶- مقایسه نتایج با سایر مطالعات تجربی و عددی

بهمنظور مقایسهی نتایج شبیهسازیها با آزمایشهای تجربی، مقادیر تجربی نسبت تنشهای اصلی بیشینه $(\sigma_2 \, / \, \sigma_1)_{
m max}$ در مقابل درجه شکست (B_{ρ}) که توسط محققان مختلفی انجامشده است، در شکل ۸ مشاهده می شود. علاوه بر این، نتایج حاصل از شبیهسازیهای عددی صورت گرفته درگذشته که بر روی مجموعهای از ذرات با شکل های نامنظم که بهطور تصادفی انتخاب شده اند انجام گرفته [۲۳] و نتایج شبیه سازی تحقیق حاضر که بر روی ذراتی با شکلهای مثلثی، مربعی و ششضلعی اجراشده، در این شکل نمایش دادهشدهاند. همان-گونه که مشاهده می شود، نتایج تجربی در اطراف مرز پایینی بەدستآمدە از نتایج آزمایشگاهی بەدستآمدە است؛ بنابراین، روش استفادهشده در این تحقیق روشی مناسب برای شبیهسازی رفتار مصالح دانهای است. شایان ذکر است که محققان در آزمایشهای تجربی خود از عامل شکست مارشال استفاده کردهاند، درحالی که تحقیق حاضر شبیهسازی عددی بوده و برای تعریف مقدار شکست از نسبت ذرات شکسته شده به تعداد کل ذرات استفادهشده است. علاوه براین، مدلسازیها در دو بعد انجامشدهاند. درصورتی که مدلسازی سهبعدی انجام شود، شاید نتایج انطباق بیشتری باهم پیدا کنند.

۸- مراجع

[1] Marsal, R.J. (1967). Large scale testing of rockfill materials. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (pp. 27-43) Proceedings of the American Society of Civil Engineers.

[2] Fumagali, E., & Moscini, B. Rossi, P.P. (1970). Laboratory tests on materials and static models for [15] Mirghasemi, A.A., & Rothenburg, L., & Matyas, E.L. (1997). Numerical Simulations of Assemblies of Two-Dimensional Polygon-Shaped Particles and Effects of Confining Pressure on Shear Strength, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society. 37(3), 43– 52. DOI: 10.3208/sandf.37.3_43

[16] Hosseininia, E.S., & Mirghasemi, A.A. (2006).
Numerical simulation of breakage of two-dimensional polygon-shaped particles using discrete element method, Powder Technology(pp. 100-112).
Doi:10.1016/j.powtec.2006.05.006

[17] Aminzadeh, A., & Hosseininia, E.S.(2013). A study on the effect of particle shape and fragmentation on the mechanical behavior of granular materials using discrete element method (pp. 915–918). AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, sydney, australia. doi:10.1063/1.4812081.

[18] Hosseininia, E.S., & Mirghasemi, A.A. (2007).
Effect of particle breakage on the behavior of simulated angular particle assemblies. Journal of China Particuology. 5, 328–336.
Doi:10.1016/j.cpart.2007.06.005

[19] Seyedi Hosseininia, E. (2012). Discrete element modeling of inherently anisotropic granular assemblies with polygonal particles, Particuology. 130(4), 32-43. Doi:10.1016/j.partic.2011.11.015.

[20] Lobo-Guerrero, S., & Vallejo, L.E., & Vesga, L.F.
(2006). Visualization of Crushing Evolution in Granular Materials under Compression Using DEM. International Journal of Geomechanics. 6(3), 195-200. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2006)6:3(195)

[21] Abedi, S. A, & Mirghasemi, A. (2011). Particle shape consideration in numerical simulation of assemblies of irregularly shaped particles. Particuology. 9(4), 387–397. DOI:10.1016/j.partic.2010.11.005.

[22] Al Hattamleh, O. F., & AlShalabi, H., & Al Qablan, T. Al-Rousan, (2010). Effect of grain crushing and bedding plane inclination on Aqaba sand behavior. Journal of Bull. Eng. Geol. Environ. 69, 41–49. DOI 10.1007/s10064-009-0238-6

[23] Seyedi Hosseininia, E., & Mirghasemi, a. a. (2006). Numerical simulation of breakage of two-dimensional polygon-shaped particles using discrete element method. Powder Technology. 166, 100–112. DOI:10.1016/j.powtec.2006.05.006 on instability and behavior of granular materials at high pressures, Univ. of California.

[5] Yamamuro, J.A., & Bopp, P.A., & Lade, P. V. (1996). One-dimensional compression of sands at high pressures. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. 122(2), 109–119. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:2(109)

[6] Varadarajan, A., & Sharma, K.G., & Venkatachalam, K., & Gupta, A.K. (2003). Testing and modeling two rockfill materials. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 129(3), 206-218. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:3(206)

[7] Lade, P. V., & Yamamuro, J.A., & Bopp, P.A.(
1996). Significance of Particle Crushing in Granular Materials. Journal of Geotech. Engr., ASCE. 122(4),
309–316. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(309)

[8] Lee, K.L., & Farhoomand, I. (1967). Compressibility and crushing of granular soil. Journal of Can. Geotech. 4(1), 68–86. DOI: 10.1139/t67-012

[9] Hagerty, M.M., & Hite, D.R., & Ulrich, C.R., & Hagerty, D.J. (1993). One-dimensional high pressure compression of granular media. Journal of Geotech. Eng. ASCE. 119(1), 1–18. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:1(1)

[10] Santamarina, J.C., & Cho G.C. (2004). Soil behaviour : The role of particle shape. 18(1), 1–14.

[11] Cho, G.C., & Dodds, J. J., & Santamarina, C. (2006). Particle Shape Effects on Packing Density , Stiffness , and Strength: Natural and Crushed Sands, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. 132(5), 591–602. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591)

[12] Cundall P.A.(1971). A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems (pp. 129-136). Symp. ISRM, Nancy, France. Proc.

[13] Cundall, P.A. (1978). Ball—A computer programto model granular media using distinct element method, Advanced Technology Group, Dams and Moore, London. Technical.

[14] Ting, J., & Khawaja, M., & Meachum, L., & Rowell, J. (1993). An ellipse-based discrete element model for granular materials. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 17(9), 603–623. DOI: 10.1002/nag.1610170902