

بررسی عددی تأثیر خصوصیات خاک بر باندهای برشی

علی اصغر میرقاسمی^{۱*} و حلیا رحمانی^۲

(// // //)

چکیده

در پدیده هایی همچون گسیختگی در خاکها، شکست در محدوده باریکی از خاک متمرکز می شود که باند برشی نامیده می شود. این پدیده که در واقع یک رخداد بنیادین در خاکهای دانه ای است، در چند دهه اخیر طی تحقیقات آزمایشگاهی گوناگون که بسیار پر هزینه می باشند و نیز برخی مدلسازی های عددی بررسی شده است. اکثر روشهای عددی به کار گرفته شده قبلی بر مبنای تئوری های محیطهای پیوسته می باشند که در آنها باندهای برشی به عنوان سطوحی در نظر گرفته می شدند، که توده های خاک به صورت اجسامی صلب بر روی آنها می لغزیدند. در این نوع تفسیر بسیاری پدیده های فیزیکی از جمله تغییراتی که در ساختمان خاک در محدوده اطراف این سطح به وجود می آیند، در نظر گرفته نمی شود. در این مقاله از روش اجزاء مجزا برای مدلسازی باندهای برشی استفاده شده است. از آنجاییکه این روش برخی اشکالات موجود روشهای آزمایشگاهی و مدلسازی بر مبنای محیطهای پیوسته را بر طرف می کند، یک روش ایده آل برای به دست آوردن تنشها و کرنشها و بررسی باندهای برشی در یک محیط دانه ای هنگامی که تحت تأثیر نیروهای خارجی قرار می گیرد، می باشد. در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء مجزا و انجام یک سری آزمایش دو محوری تأثیر عوامل گوناگون از جمله اندازه متوسط دانه ها، شکل دانه ها و تنش همه جانبه بر روی باندهای برشی بررسی شده است و با توجه به نتایج حاصله به نظر می رسد برخی از فاکتورهای بررسی شده از جمله قطر متوسط دانه ها و تنش همه جانبه تأثیر قابل ملاحظه ای بر خصوصیات باندهای برشی دارند.

: باند برشی - روش اجزاء مجزا - مدلسازی عددی

مقدمه

برای مدلسازی خاکها توسعه یافت. BALL نخستین برنامه کامپیوتری است که برای مدلسازی دو بعدی محیطهای دانه ای متشکل از دیسکهای دایروی براساس روش المانهای مجزا نوشته شده است [۱]. بعد از آن برنامه های دیگری از کره های سه بعدی به وجود آمد [۲]. همچنین برنامه هایی از ذرات دو بعدی به صورت چند ضلعی و بیضی شکل وجود دارد. در این تحقیق از برنامه ELLIPSE که نسخه اصلاح شده ای از برنامه BALL برای شبیه سازی مدلهای دانه ای متشکل از ذرات بیضی شکل می باشد استفاده می شود [۳]. در تحقیق حاضر تغییراتی در برنامه ایجاد گردیده که توانایی مدل کردن مرزهای شکل پذیر و نمونه های با تعداد بیشتر ذرات را داشته باشیم. از آنجاییکه این برنامه براساس روش اجزاء مجزا می باشد، در ابتدا در مورد اصول این روش به طور خلاصه توضیح داده می شود. برای مدلسازی یک محیط دانه ای در این روش سه مرحله اساسی اعمال نیرو، انتشار بی نظمی و برقراری تعادل وجود دارد. نیرو معمولاً با حرکت مرزها اعمال می شود و در پی آن با حرکت ذرات بی نظمی در محیط ایجاد می شود، سپس با انجام یک سری محاسبات متوالی در فواصل زمانی معین، تعادل محیط

در آزمایشهای مختلف مشاهده شده که همیشه ذرات سعی می کنند از محل خود جدا شده در راستای تنش بیشینه اعمالی قرار گیرند. در واقع این ذرات تحت تأثیر اصطکاک بینایی می چرخند و با قرار گرفتن در راستای تنش بیشینه ستونهایی را تشکیل می دهند و به این ترتیب نمونه به مقاومت پیک می رسد. در مقاومت پیک در یک سری نقاط تنشها از اصطکاک بین ذرات تجاوز کرده و این ذرات به میزان زیاد و به طور ناگهانی نسبت به هم حرکت می کنند. این امر موجب گسیخته شدن ستونهای مذکور می شود که به محل تمرکز تنش متمایل می شود. در این پدیده مشاهده می شود که تغییر شکلها در یک محدوده باریک که در واقع همان باند برشی است، متمرکز می شود، در حالیکه سایر قسمتها آرایش قبلی خود را حفظ می کنند. از آنجاییکه این پدیده در خاکهای دانه ای رخ می دهد یکی از روشهای مناسب برای مدلسازی آن روش اجزاء مجزا به نظر می رسد.

روش اجزاء مجزا

برای اولین بار این روش توسط Cundall و همکاران

در رابطه فوق f نیروی برخورد بین تمام ذرات درون حجم V و I بردارهای تماسی که در راستای مراکز دو ذره در حال تماس می باشد.

باند‌های برشی و مطالعات قبلی در این زمینه

هر باند برشی یک سری خصوصیات دارد که در اثر عوامل گوناگون به وجود می آید. هر کدام از این عوامل را می توان طی یک سری آزمایشات یا مدلسازی ها بررسی کرد که برخی از آنها به شرح زیر می باشند:

- جهت یا شیب باند برشی.
 - ضخامت باند برشی.
 - تغییر مکان ذرات درون باند برشی.
 - چرخش ذرات درون باند برشی.
 - سطح کرنشی که در آن باند برشی تشکیل می شود.
- هر یک از خصوصیات فوق در اثر عوامل گوناگونی تأثیر می پذیرند، یک سری از این عوامل به خود نمونه بستگی دارند و یک سری به نحوه بارگذاری آن وابسته هستند. برخی از این عوامل، به علت سهولت اندازه گیری بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته و در مورد آن بیشتر کار شده است، نمونه هایی از این موارد را می توان به صورت زیر خلاصه کرد :

۱. دانه بندی و شکل ذرات: Wolf & Konig &

(2002) Triantafyllidis تأثیر دانه بندی و شکل ذرات را بر روی باند‌های برشی با استفاده از یک سری آزمایشات جعبه ماسه^۱ و اندازه گیری با اشعه X بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که ضریب یکنواختی تنها در وضوح شبکه باند‌های برشی مؤثر است، در حالیکه اندازه متوسط دانه ها در ضخامت و زاویه باند‌های برشی تأثیر می گذارد [۵]. همچنین (Viggiani, Kuntz, Desrues 2001) با استفاده از آزمایشاتی بر روی نمونه های به دست آمده از ترکیب دو نمونه ماسه مرجع با نسبت‌های مختلف، به نتایج مشابهی در مورد تأثیر اندازه و درجه یکنواختی دانه ها بر باند‌های برشی رسیدند، اما در عین حال اعلام نمودند که اندازه دانه ها تأثیر چندانی بر زاویه تمایل باند‌های برشی ندارد [۶].

۲. تنش همه جانبه: (Hammad 1991), Han (1991) با

انجام یک سری آزمایشهای دو محوری به این نتیجه رسیدند که با افزایش تنش همه جانبه زاویه بین باند برشی و امتداد تنش اصلی کوچکتر کاهش می یابد

دوباره برقرار می شود. تمامی مراحل فوق به صورت سیکلهای پیاپی انجام می گردد که حرکت تک تک ذرات را دنبال می کنند. هر سیکل شامل به کارگیری دو قانون علم مکانیک می باشد:

الف) قانون نیرو تغییر مکان

در ابتدا با استفاده از سرعت‌های ذرات موقعیت مکانی هر ذره و میزان هم پوشانی بین دو ذره به دست می آید، سپس با به کارگیری رابطه ۱ نیروی حاصل از برخورد بین هر دو ذره محاسبه می شود.

$$\Delta F_n = K_n \times \Delta n$$

(۱- الف)

$$\Delta F_s = K_s \times \Delta s$$

(۱- ب)

در روابط فوق K_n و K_s به ترتیب سختی های قائم و برشی هستند که با ضرب کردن در تغییر مکان نسبی قائم و مماسی، نیروهای قائم و برشی را به دست می دهند.

ب) قانون دوم نیوتن

در مرحله بعد با اعمال قانون دوم نیوتن بر برآیند نیروهای وارده به ذره i ام شتاب ذره به صورت زیر به دست می آید.

$$m(\ddot{X}_i) = \sum (F_i)$$

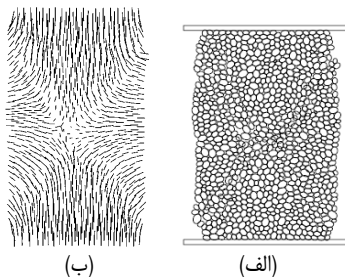
(۲)

با توجه به اینکه گامهای زمانی به قدری کوچک انتخاب می شود که بتوان شتاب و سرعت هر ذره را در طول آن ثابت فرض نمود، با ضرب شتاب در زمان می توان سرعت و به همین ترتیب تغییر مکان ذره مورد نظر را به دست آورد و دوباره با به کارگیری قانون نیرو تغییر مکان نیروهای تک تک ذرات را محاسبه نمود. این سیکل آنقدر تکرار می شود تا نیروهای نا متعادل بین ذرات صفر یا بسیار کوچک شود. به این ترتیب می توان سرعت، تغییر مکان و نیروهای وارد بر هر ذره را در هر لحظه زمانی داشت. با داشتن نیروی برخورد بین ذرات تنشهای موجود در نمونه را می توان محاسبه نمود. می توان نشان داد که در یک محیط دانه ای، تانسور تنش های وارده بر یک جسم با حجم V ، برای مجموعه ای از ذرات که دارای تعادل استاتیکی می باشند بصورت زیر قابل تعریف است [۴].

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{C \in V} f_i^c l_j^c$$

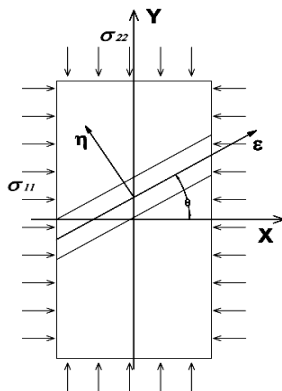
(۳)

جابجایی ذرات عمدتاً در امتداد باندهای برشی خواهد بود و ذرات کمتری در راستای عمود بر باندهای برشی جابجا می شوند. به گونه ای که ذرات خارج از باند برشی به صورت بلوکهای صلب در امتداد باند برشی حرکت می کنند. همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، پدیده فوق را می توان در دیاگرام جابجایی ذرات مشاهده نمود. با استفاده از این دیاگرام می توان تخمینی از شیب و مختصات باندهای برشی به دست آورد (شکل ۱). باندهای برشی در ابتدا به صورت متقاطع یک X را تشکیل می دهند، اما با افزایش کرنش یکی از این خطوط محو می شود و تغییر مکان و جابجایی در دیگری افزایش می یابد [۱۵].



شکل ۱: نمونه (الف) و دیاگرام (ب) تغییر مکان ذرات بعد از مقاومت پیک.

با ترسیم دیاگرام جابجایی ذرات در هر مورد می توان مرکز باندهای برشی را با دقت قابل قبولی تعیین کرد. سپس محورهای مختصات حول این مرکز به نحوی گردانده می شوند تا یکی از محورها عمود بر محور باند برشی اصلی قرار گیرد و دیگری در راستای آن (شکل ۲).



شکل ۲: نمایش سیستم مختصات محلی و عمومی برای بررسی باندهای برشی.

با کشیدن نمودار تغییر مکان و چرخش ذرات در این سیستم مختصات جدید نمودارهایی مطابق شکل‌های (۳-الف و ب) خواهیم داشت. از آنجاییکه محور باندهای برشی خطی در نظر گرفته می شود که تغییر مکان

در حالیکه شدت کرنش برشی در آغاز تشکیل باند برشی افزایش می یابد [۷ و ۸].

۳. **تخلخل محیط:** Arthur et. al. (1980), Vardoulakis (1984), Desrues et. al. (1978) با استفاده از یک سری مدل‌های تئوری عوامل مختلفی را در مواد بررسی کردند که یکی از آنها تخلخل اولیه محیط می باشد. اما به علت تأثیر زیاد سایر پارامترها بر این عامل در این مورد نتایج درستی حاصل نشده است [۹ و ۱۰ و ۱۱].

۴. **پارامترهای دینامیکی و سرعت بارگذاری:** Wu (1993) با مدلسازی عددی باند برشی از طریق اختلاف محدود و اعمال برش خالص بر نمونه های مربعی در محیطهای الاستو پلاستیک، با کنترل سرعت بارگذاری و ویژگی های مصالح و فشار همه جانبه، تأثیر خصوصیات دینامیکی از جمله سرعت موج طولی (P-wave) و سختی دینامیکی را برآورد کرده اند [۱۲ و ۱۳]. به علاوه Wolf & Konig & Triantafyllidis (2002) به این نتیجه رسیدند که برخلاف نظر Poliakov et. al. (1994) شکل سیستم باندهای برشی مستقل از سرعت بارگذاری است [۱۴ و ۱۵].

در بین تحقیقات انجام شده بر روی باندهای برشی Bardet & Proubet (1992) نتایج حاصل از روشهای تئوری برای مطالعه باندهای برشی را با نتایج حاصل از مدلسازی با DEM مقایسه نمودند. در حقیقت این افراد میزان چرخش و تغییر مکان ذرات درون باندهای برشی تشکیل شده در یک نمونه از خاک دانه ای ایدآل را بررسی نمودند [۱۵].

هدف این مقاله بررسی تأثیر فاکتورهای قابل اندازه گیری با برنامه موجود، بر خصوصیات باندهای برشی می باشد.

نحوه تعیین ساختمان باندهای برشی

در برنامه موجود برای دنبال کردن هر ذره مشخصاتی از جمله مختصات مرکز ذره، میزان چرخش ذره و جابجایی آن در هر جهت، همچنین نیروها و لنگرهای وارد بر ذره در هر لحظه از آزمایش نگهداری می شود. بنابراین می توان در هر لحظه جابجاییها، چرخشها و مختصات مرکز ذرات را به دست آورد و بر این اساس در فواصل زمانی معین، دیاگرام چرخش و یا جابجایی ذرات را ترسیم نمود. پس از شکل گیری باندهای برشی که معمولاً بعد از مقاومت پیک است،

جزئیات شبیه سازی آزمایشات

در این تحقیق به منظور بررسی عوامل مؤثر بر روی نحوه شکل گیری و آرایش باندهای برشی یک سری آزمایش دو محوری بر روی نمونه هایی شامل ۱۰۰۰ ذره انجام گرفته است. نحوه و میزان تأثیر هر یک از عوامل انتخابی با استفاده از نتایج آزمایشهای دو محوری بررسی می شود. برای انجام آزمایشها یک سری ثابتهای و همچنین یک سری پارامترهای متغیر برای هر نمونه وجود دارد. ثابتهایی که بدین منظور در ورودی برنامه داده شده اند، در جدول ۱ آورده شده اند. سختی ها و جرم حجمی ذرات با مقادیر واقعی برابر می باشند و سایر متغیرها نیز به گونه ای انتخاب شده اند که نتایج مطابق با واقعیت به دست آید.

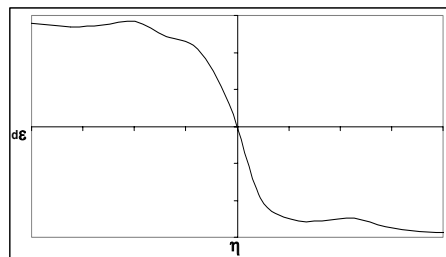
جدول ۱: پارامترهای ورودی برای شبیه سازی عددی.

Properties	values used
Normal Stiffness – K_n (MN/mm)	1.75
Shear Stiffness – K_s (MN/mm)	1.75
Damping Coefficient	0.01
Density of disks - ρ (Kg/m^3)	2000
Friction coefficient	0.5

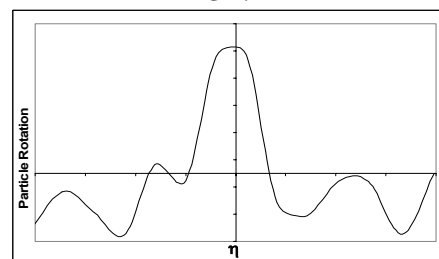
با توجه به مواردی که قبلاً ذکر گردید، عوامل متعددی در باندهای برشی تأثیر گذار هستند، اما با در نظر گرفتن محدودیتهای موجود و نیز عدم وجود نتایج برای مقایسه با واقعیت، خصوصیات کنترل شده به موارد موجود در جدول (۲) محدود شده اند، که برای بررسی اثر مرزها تمامی این آزمایشات یک بار بر روی نمونه هایی با مرزهای صلب و یک بار بر روی نمونه های با مرزهای شکل پذیر انجام گرفته است. در شکل زیر دو نمونه با مرزهای شکل پذیر و صلب در انتهای آزمایش دو محوری نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود برای مدل کردن مرزهای شکل پذیر از دو سری ذرات دایروی در دو طرف نمونه استفاده شده است. این ذرات هر کدام در اثر نیروهای داخلی به صورت افقی حرکت می کنند و از آنجایی که مستقل از یکدیگر حرکت می کنند به صورت مرز شکل پذیر عمل می نمایند.

برای بررسی هر یک از عوامل موجود در این جدول همان طور که نشان داده شده است، سه نمونه با مقادیر متفاوت از خصوصیت مورد نظر انتخاب گردیده اند، به گونه ای که سایر خصوصیات نمونه ها کاملاً یکسان می باشد.

ذرات در آن صفر است. برای یافتن زاویه و مرکز دقیق باند برشی در اینجا از روش سعی خطا استفاده شده است. در واقع مرکز به دست آمده از شکل (۱) و زاویه به دست آمده از رابطه $\pi/4 + \phi/2$ در نقطه پیک نمودار زاویه اصطکاک داخلی به عنوان حدس اولیه قرار می گیرد و با تغییر این دو مقدار و ترسیم نمودارهای ذیل، مقدار دقیق زاویه باند برشی و مرکز آن به دست می آید. لازم به ذکر است که در صورتی که یکی از این دو مقدار درست نباشد، شکل نمودارها با حالت ایده آل شکل (۳) به مقدار زیادی تفاوت خواهد داشت و نیز نمودار تغییر مکان ذرات از مبدأ عبور نخواهد کرد. در شکل (۳-الف) یک شاخه شیب دار وجود دارد که در واقع همان محدوده باند برشی است و دو شاخه افقی، که ذرات خارج از باند برشی هستند و با حفظ آرایش قبلی خود تنها به موازات محور باند برشی حرکت می کنند. با استفاده از این شکل می توان گفت ضخامت باند برشی در واقع فاصله بین دو نقطه تغییر شیب نمودار به حالت افقی است.



شکل ۳-الف: تغییرات جابجایی ذرات در مقطع عرضی باند برشی.

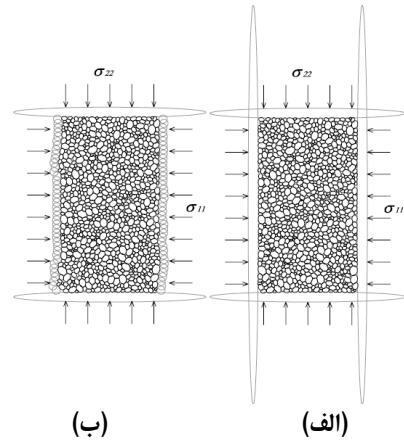


شکل ۳-ب: چرخش ذرات در مقطع عرضی باند برشی.

یک راه دیگر برای تعیین محدوده باند برشی استفاده از نمودار چرخش ذرات است. چرخش ذرات درون محدوده باند برشی بسیار بیشتر از ذرات خارجی و همچنین در خلاف جهت آنها است [۱۵]. در واقع ذرات درون این ناحیه نسبت به یکدیگر در حال حرکت هستند بنابراین باعث چرخش یکدیگر می شوند. در حالیکه ذرات خارجی همه با هم در یک جهت حرکت می کنند و در نتیجه چرخش کمتری دارند.

یک بار بر روی نمونه های با مرزهای شکل پذیر انجام گردیده است در این قسمت نتایج به دست آمده در هر سری از آزمایشات به صورت جداگانه بررسی می گردد. ضمناً برای بیان نتایج آزمایش دو محوری شبیه سازی ها از دو روش زیر بهره گرفته شده است:

- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده مصالح که با $\sin \varphi$ تعیین می گردد، در برابر کرنش محوری ϵ_α .
 - تغییرات کرنش حجمی ϵ_θ بر حسب کرنش محوری ϵ_α
- برای بررسی باندهای برشی نیز همان طور که قبلاً توضیح داده شد، دو نمودار تغییر مکان و چرخش ذرات در راستای محور باند برشی ارائه می گردد. همچنین مقدار عددی زاویه باندهای برشی برای مقایسه بین هر دسته از آزمایشات ارائه شده است.



شکل ۴: نمونه های با مرزهای صلب (الف) و مرزهای شکل پذیر (ب) در انتهای آزمایش دوماحوری.

نتایج آزمایشها

همان طور که در جدول (۲) نشان داده شده است ۶ سری آزمایش یک بار بر روی نمونه های با مرزهای صلب و

جدول ۲: آزمایشهای انجام شده بر روی نمونه ها.

قطر متوسط ذرات			دانه بندی			فاکتور مورد آزمایش		
3	2	1	3	2	1	شماره نمونه	دانه بندی	قطر متوسط ذرات (mm)
خوب	خوب	خوب	باز	خوب	یکنواخت			خروج از مرکزیت ذرات
50	40	30	40	40	40			تخلخل
0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15			نرخ بارگذاری ($1/S^2$)
0.202	0.212	0.221	0.218	0.212	0.212			تنش همه جانبه (MPa)
2.E-05	2.E-05	2.E-05	2.E-05	2.E-05	2.E-05			
1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06			
تخلخل			خروج از مرکزیت ذرات			فاکتور مورد آزمایش		
3	2	1	3	2	1	شماره نمونه	دانه بندی	قطر متوسط ذرات (mm)
خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب			خروج از مرکزیت ذرات
40	40	40	40	40	40			تخلخل
0.15	0.15	0.15	0.25	0.15	0.05			نرخ بارگذاری ($1/S^2$)
0.202	0.212	0.245	0.211	0.212	0.225			تنش همه جانبه (MPa)
2.E-05	2.E-05	2.E-05	2.E-05	2.E-05	2.E-05			
1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06			
تنش همه جانبه			نرخ بارگذاری			فاکتور مورد آزمایش		
3	2	1	3	2	1	شماره نمونه	دانه بندی	قطر متوسط ذرات (mm)
خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب			خروج از مرکزیت ذرات
40	40	40	40	40	40			تخلخل
0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15			نرخ بارگذاری ($1/S^2$)
0.209	0.212	0.214	0.212	0.212	0.212			تنش همه جانبه (MPa)
2.E-05	2.E-05	2.E-05	4.E-05	2.E-05	1.E-05			
1.2E+06	1.0E+06	8.5E+05	1.E+06	1.E+06	1.E+06			

نمونه های با مرز شکل پذیر

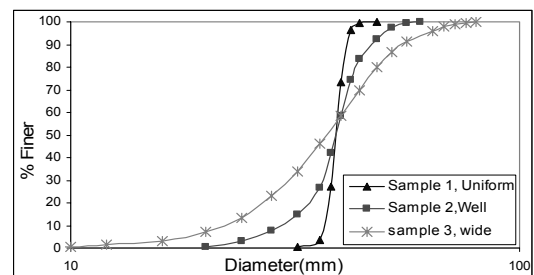
شکل‌های (۶-الف) و (ب) تغییرات $\sin \phi$ و کرنش حجمی نمونه را بر اساس کرنش محوری آن در یک نمونه با مرزهای شکل پذیر نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود زاویه اصطکاک داخلی بیشترین مقادیر را در یک خاک خوب دانه بندی شده دارد و کمترین مقادیر مربوط به نمونه ای با دانه بندی یکنواخت می‌باشد. تغییر حجم نیز در نمونه ای با دانه بندی یکنواخت از همه کمتر و در نمونه ای با دانه بندی باز از همه بیشتر است.

شکل‌های (۶-پ) و (ت) تغییر مکان و چرخش ذرات را در مقطع عمود بر محور اصلی باند برشی در نمونه های با مرزهای شکل پذیر نشان می‌دهد. همان طور که در این شکلها مشاهده می‌شود، با افزایش یکنواختی دانه بندی نمونه، مرزهای باند برشی واضحتر خواهند شد. در سال ۲۰۰۲، Wolf & Konig & Triantafylidis با بررسی آزمایشگاهی به نتیجه مشابهی دست یافتند [۵].

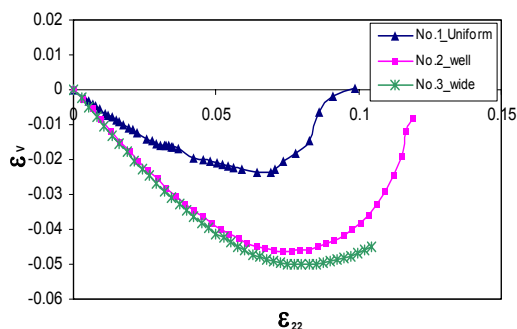
در بعضی موارد نمودارها آورده نشده و تنها نتایج آنها ذکر گردیده است. اطلاعات بیشتر در این موارد در پایان نامه کارشناسی ارشد با عنوان بررسی عددی عوامل مختلف بر باندهای برشی در خاکهای دانه ای موجود می‌باشد [۱۶].

دانه بندی

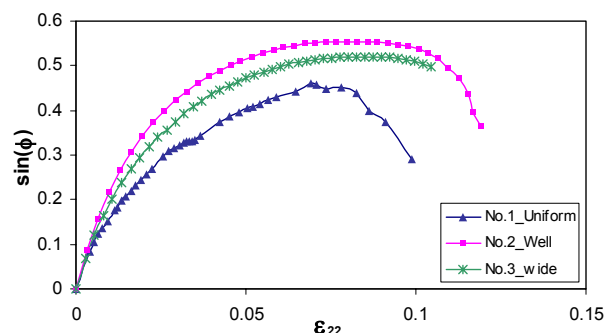
به منظور بررسی اثر دانه بندی سه نوع دانه بندی مطابق آنچه در شکل زیر نشان داده شده در آزمایش با مرزهای صلب و شکل پذیر، انتخاب گردیده است (شکل ۵).



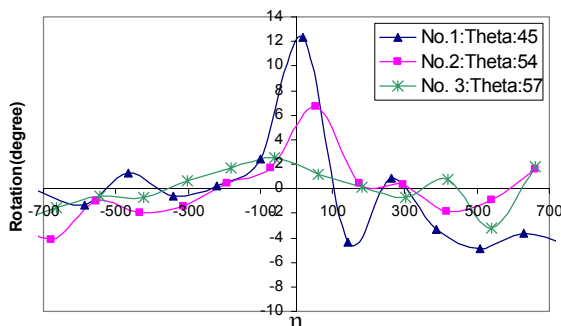
شکل ۵: دانه بندی انتخاب شده برای بررسی اثر دانه بندی بر باندهای برشی.



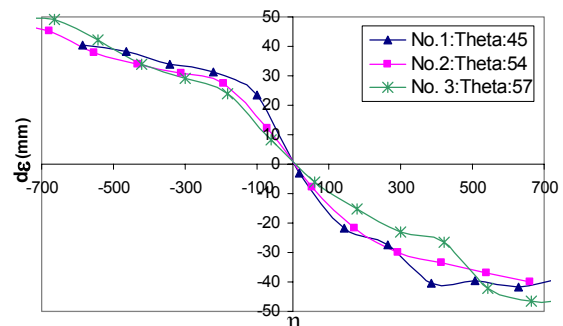
(ب) تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری



(الف). تغییرات $\sin \phi$ نسبت به کرنش محوری

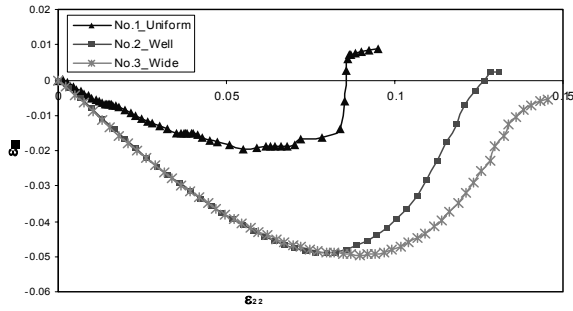


(ت). مقدار چرخش ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۰٪

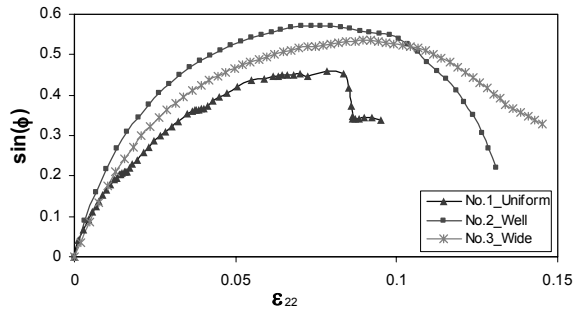


(پ) جابجایی ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۰٪

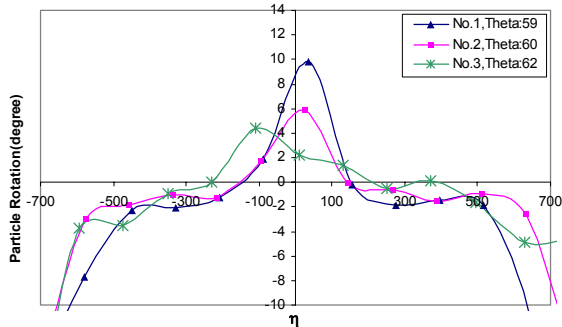
شکل ۶: نتایج آزمایشها در نمونه هایی با مرزهای شکل پذیر و دانه بندی های متفاوت.



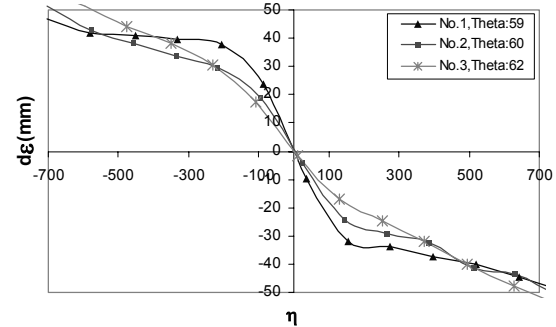
(ب). تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری



(الف). تغییرات $\sin \varphi$ نسبت به کرنش محوری



(ت) مقدار چرخش ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۰٪



(پ) جابجایی ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۰٪

شکل ۷: نتایج آزمایشها در نمونه هایی با مرزهای صلب و دانه بندی های متفاوت.

افزایش یکنواختی دانه بندی نمونه، مرزهای باند برشی واضحتر خواهند شد و نیز با کاهش یکنواختی دانه بندی ضخامت باند برشی در نمونه های مورد آزمایش افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهند که افزایش یکنواختی در دانه بندی نمونه ها، با افت شیب باندهای برشی همراه است. اما در اینجا مقادیر تغییر زاویه باند برشی قابل ملاحظه نمی باشد و به علت اثر مرزها میزان چرخش ذرات کمتر از حالت قبل می باشد. نتایج فوق در جدول زیر به طور خلاصه آمده است.

جدول ۳: خلاصه نتایج مدلسازی نمونه های با دانه بندی

متفاوت

دانه بندی	نوع مرز	$\Sigma \nu \phi_{Peak}$	$M\alpha \xi \varepsilon_m$	چرخش حداکثر ($^{\circ}$)	ضخامت باند برشی (mm)
یکنواخت	شکل پذیر	0.46	0.024	12.4	300
	صلب	0.47	0.019	9.9	360
خوب	شکل پذیر	0.52	0.046	6.7	400
	صلب	0.54	0.049	5.8	380
باز	شکل پذیر	0.56	0.05	2.5	550
	صلب	0.58	0.05	4.4	470

قطر متوسط ذرات

در این مورد نیز سه منحنی دانه بندی موازی با سه قطر متوسط مختلف در نظر گرفته شده است. با توجه به

با مقایسه نتایج حاضر می توان گفت با کاهش یکنواختی دانه بندی ضخامت باند برشی در نمونه های مورد آزمایش افزایش می یابد. البته لازم به ذکر است که این افزایش داخل محدوده 6-13d50 است که در اکثر تحقیقات قبلی (Viggiani, Kuntz, Desrues (2000), (Wolf & Konig & Triantafyllidis (2002) به دست آمده است [۵ و ۶]. همچنین بر خلاف نتایج Wolf & Konig & Triantafyllidis (2002) نتایج حاضر نشان می دهند که افزایش یکنواختی در دانه بندی نمونه ها، با افت قابل ملاحظه شیب باندهای برشی همراه است [۵].

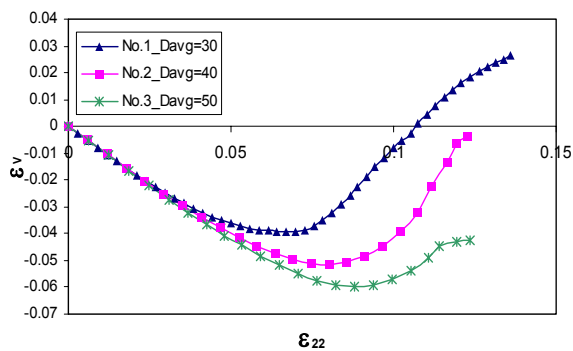
نمونه های با مرزهای صلب

در این قسمت آزمایش دو محوری بر روی نمونه های با مشخصات قبلی و تنها با مرزهای صلب انجام گردیده است. همان گونه که در شکل های ۷ (الف) تا (ت) مشاهده می گردد، روند تغییرات با تغییر دانه بندی در اینجا کاملاً مشابه نمونه ها با مرزهای شکل پذیر است. اما در مقایسه با مرزهای شکل پذیر $\sin \varphi$ در این نمونه ها بیشتر است و همچنین نمونه ها در کرنشهای بزرگتری گسیخته می شوند. در مورد شکل های مربوط به باند برشی نیز می توان گفت، مطابق با نتایج مرزهای شکل پذیر با

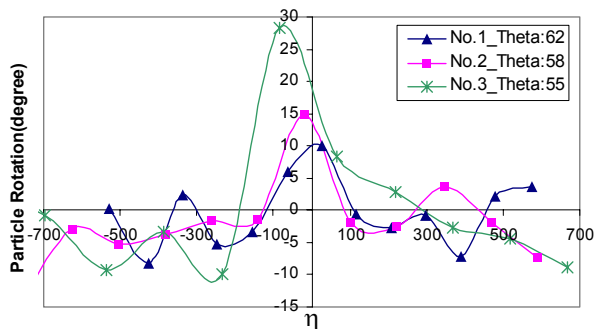
ذرات به وجود آمده است (جدول ۲). در مورد تغییرات حجم نیز مشاهده می شود که هر چه قطر متوسط ذرات کاهش یابد، تغییرات حجم نمونه هم کاهش می یابد (شکل ۹-ب).

شکل‌های (۹-پ) و (ت) تغییر مکان و چرخش ذرات را در مقطع عمود بر محور اصلی باند برشی نشان می دهد. نمودارهای مذکور مطابق اکثر تحقیقات قبلی (Wolf & Konig & Triantafyllidis (2002), Bardet & (1990) Proubet) نشان دهنده افزایش ضخامت باند برشی با بزرگ شدن قطر متوسط ذرات می باشد [۱۵و۵]. با توجه به نتایج حاضر و نتایج قبلی می توان نتیجه گرفت که بهترین تقریب برای پهنای باندهای برشی $6-13d_{50}$ می باشد که در سال ۲۰۰۲ توسط Wolf & Konig & Triantafyllidis اعلام شده است [۵].

نتایج نشان می دهند که با افزایش قطر ذرات زاویه باند برشی به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. نتایج مشابهی توسط Desrues (1991) و Vardoulakis (1978) گزارش شده، این افراد با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تأثیر این فاکتور بر روی باندهای برشی را بررسی نموده اند [۱۷و۱۰].

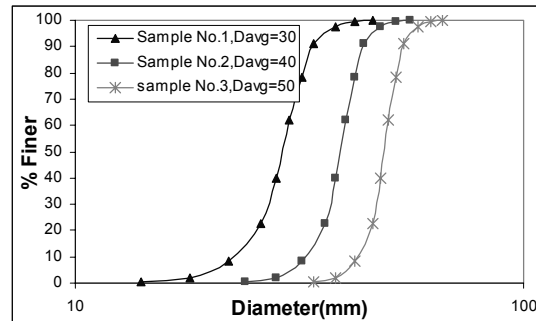


(ب) تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری



(ت) مقدار چرخش ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۲٪

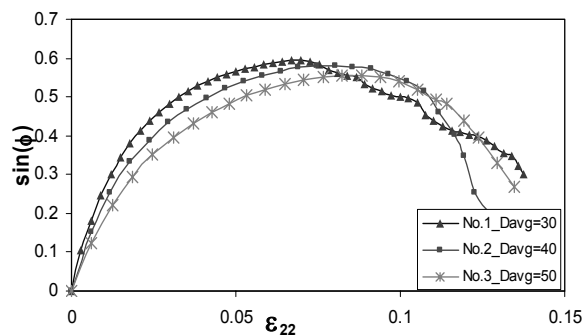
اینکه نمونه ها دارای قطر متوسط متفاوت می باشند و تعداد ذرات در همه مجموعه ها برابر است، ابعاد نمونه ها متفاوت می باشد. اما در تمامی موارد نسبت ابعاد نمونه ها ثابت و برابر یک به دو می باشد.



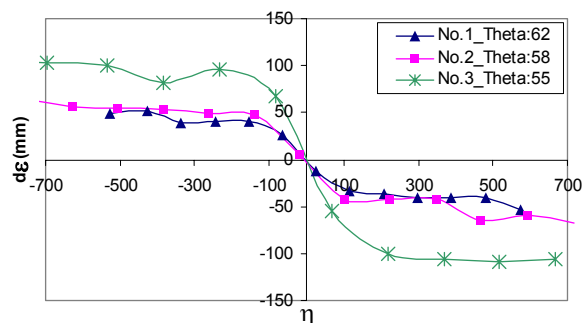
شکل ۸: دانه بندی انتخاب شده برای بررسی اثر اندازه متوسط دانه ها بر باندهای برشی.

نمونه های با مرز شکل پذیر

همانطور که در شکل (۹-الف) مشاهده می شود، افزایش اندازه ذرات باعث کاهش $\sin \phi$ در نمونه های با مرزهای شکل پذیر می شود، که این روند دقیقاً مشابه تغییرات مقاومت در نمونه ها است. این نتیجه که در تناقض با برخی نتایج تجربی می باشد ممکن است به علت تغییرات تخلخل در این سه نمونه باشد که با تغییر اندازه

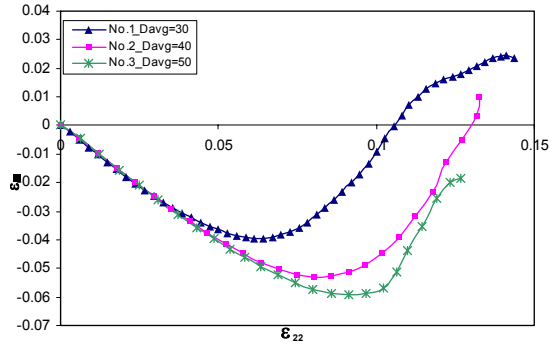


(الف) تغییرات $\sin \phi$ نسبت به کرنش محوری

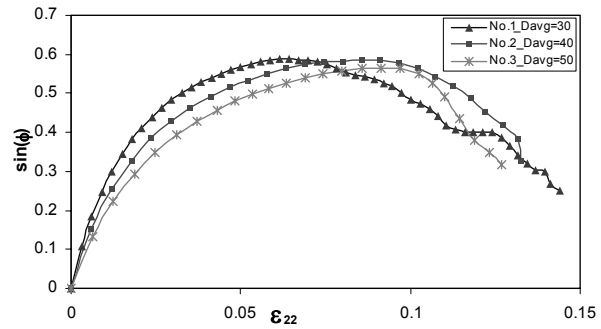


(پ) تغییر مکان ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۲٪

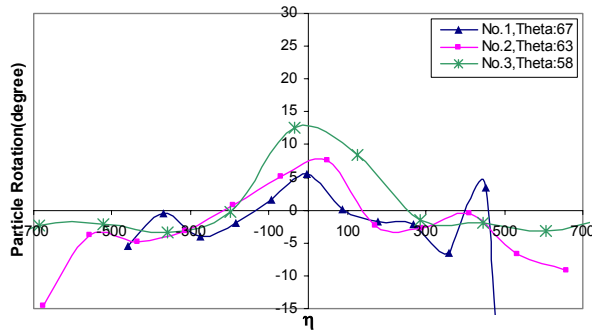
شکل ۹: نتایج آزمایشها در نمونه هایی با مرزهای شکل پذیر و قطر متوسط ذرات متفاوت.



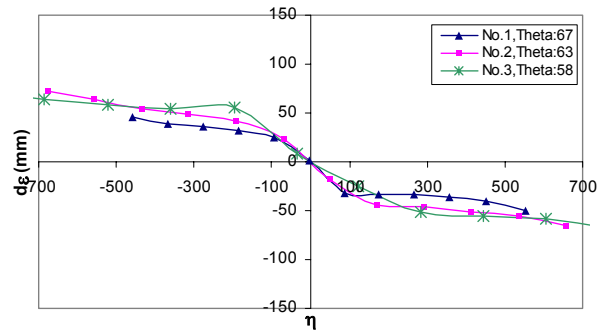
(ب) تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری



(الف) تغییرات $\sin \phi$ نسبت به کرنش محوری



(ت) مقدار چرخش ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۲٪



(پ) تغییر مکان ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۲٪

شکل ۱۰: نتایج آزمایشها در نمونه هایی با مرزهای صلب و قطر متوسط ذرات متفاوت.

جدول ۴: خلاصه نتایج مدلسازی نمونه های با قطر متوسط ذرات متفاوت.

ضخامت باند برشی (μm)	چرخش حداکثر ($^{\circ}$)	$M\alpha_{\xi} \varepsilon_{\text{m}}$	$\Sigma \text{IV } \phi_{\text{Hessak}}$	نوع مرز	قطر متوسط ذرات (μm)
,	,	,	,	,	,
,	,	,	,	,	,
,	,	,	,	,	,
,	,	,	,	,	,
,	,	,	,	,	,

نمونه های با مرز صلب

در شکل (۱۰-الف) مشاهده می شود که با افزایش قطر ذرات $\sin \phi$ نمونه کاهش می یابد، اما این کاهش بسیار کمتر از نمونه های با مرزهای شکل پذیر است. حالیکه در مورد تغییر حجم تغییرات کاملاً مشابه نمونه های با مرزهای شکل پذیر می باشد و تنها حالت اتساع نمونه در کرنشهای بزرگتر اتفاق افتاده است.

شکلهای (۱۰-پ) و (ت) نشان دهنده میزان تغییر مکان و چرخش ذرات می باشند، این نتایج نیز مشابه مرزهای شکل پذیر نشان دهنده افزایش ضخامت محدوده باند برشی با افزایش قطر ذرات می باشند. همچنین با افزایش قطر مقادیر تغییر مکان و چرخش ذرات نیز به صورت تابعی از اندازه قطر متوسط افزایش می یابد. با استفاده از نتایج حاضر می توان نتیجه گرفت که اندازه متوسط قطر ذرات تأثیر زیادی بر شیب باند برشی دارد و با کاهش آن شیب باند برشی به مقدار زیادی افزایش می یابد.

برخی نتایج فوق را می توان به صورت زیر خلاصه نمود.

خروج از مرکزیت ذرات

خصوصیات مربوط به شکل ذرات طی تحقیقات گوناگونی بررسی شده است [۱۸]. در این مقاله به علت محدودیتهای برنامه تغییر این فاکتور تنها با تغییر خروج از مرکزیت هر ذره بیضی شکل امکان می پذیرد. بر اساس نتایج Rothenburg & Bathurst (1991) تغییر شکل ذرات از دیسکهای دایروی به بیضی شکل باعث افزایش مقاومت نمونه و تطابق بیشتر آن با واقعیت می شود [۳]. اما برای خروج از مرکزیت یک مقدار بهینه وجود دارد و با افزایش این مقدار دوباره مقاومت نمونه کاهش می یابد.

نمونه های با مرز شکل پذیر

در شکل (۱۱-الف) مشاهده می شود که با افزایش بیش از حد خروج از مرکزیت ذرات زاویه اصطکاک داخلی دوباره کاهش می یابد. این امر در مورد تغییر حجم نمونه ها نیز وجود دارد، به این معنا که با افزایش خروج از مرکزیت تا حد معین کاهش حجم نمونه ها افزایش می یابد، اما با تجاوز از این حد، کاهش حجم نمونه ها دوباره کم می شود. در شکل های (۱۱-پ) و (ت) مشاهده می شود که با تغییر خروج از مرکزیت ذرات تغییرات مهمی در ضخامت باندهای برشی مشاهده نمی شود. اما میزان چرخش و تغییر مکان ذرات با افزایش این فاکتور کاهش می یابد. همچنین بر خلاف نظر Desrues (1991) و Vardoulakis (1978) که کاهش شیب باند برشی با افزایش تیز گوشگی ذرات را گزارش نموده اند، در اینجا با تغییر این عامل تغییرات زیادی در زاویه باند برشی مشاهده نمی شود [۱۰ و ۱۷].

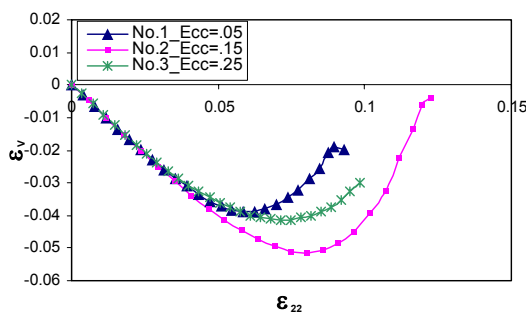
نمونه های با مرز صلب

روند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و تغییر حجم نسبی در نمونه های با مرزهای صلب و شکل پذیر مشابه می باشد با این تفاوت که ماکزیمم مقدار در تمامی نمودارها در مرزهای صلب افزایش می یابد (شکل های ۱۲-الف) و (ب)). در مورد باندهای برشی مشاهده

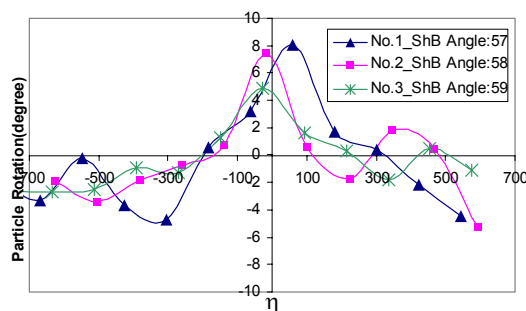
می شود که هیچ گونه روند مشخصی برای تغییر ضخامت باند برشی و یا میزان چرخش ذرات در نمونه های با مرزهای صلب حاصل نشده است و حتی بر خلاف نمونه های با مرزهای شکل پذیر میزان چرخش در نمونه های با خروج از مرکزیت بالا افزایش یافته است و با توجه به این تغییرات ناچیز می توان نتیجه گرفت که عامل خروج از مرکزیت تأثیر چندانی در میزان چرخش ذرات ندارد. اما در مورد شیب باند برشی در اینجا نیز مشابه با نمونه های قبلی با تغییر خروج از مرکزیت ذرات تغییر عمده ای در زوایای باند های برشی به وجود نمی آید. در این مورد نیز مشابه تمامی آزمایشات دیگر باندهای برشی در نمونه های با مرزهای صلب با زوایای بزرگتری نسبت به مرزهای شکل پذیر تشکیل شده اند. برای مقایسه بهتر خلاصه ای از نتایج در جدول زیر آمده است.

جدول ۵: خلاصه نتایج مدلسازی نمونه های با خروج از مرکزیت متفاوت ذرات.

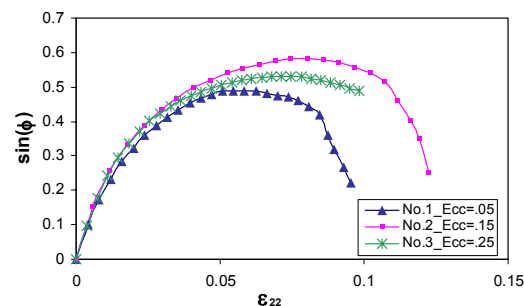
خروج از مرکزیت	نوع مرز	$\Sigma_{IV} \phi_{Tmax}$	$M\alpha \xi \varepsilon_m$	چرخش حداکثر (°)	ضخامت باند برشی (mm)
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰



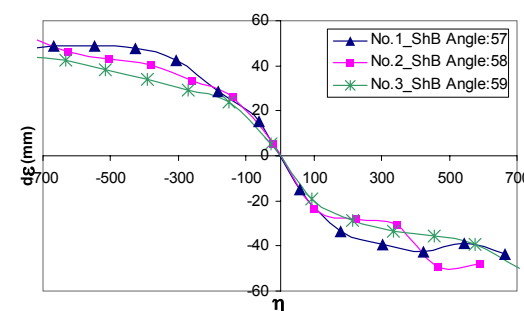
(ب) تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری



(ت) مقدار چرخش ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۹/۵٪

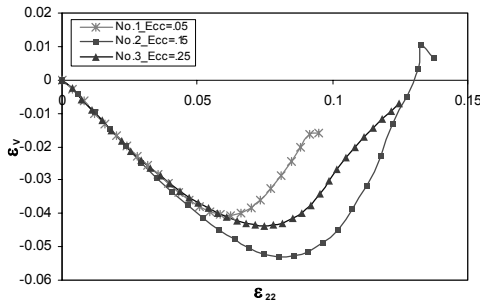


(الف) تغییرات sin φ نسبت به کرنش محوری

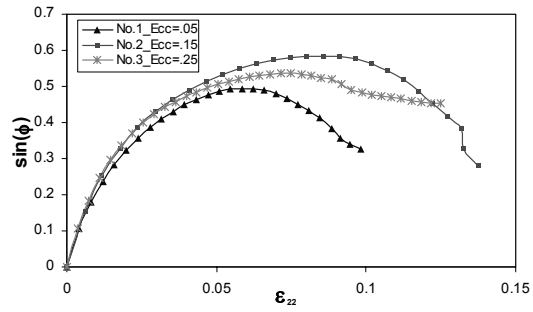


(پ) تغییر مکان ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۹/۵٪

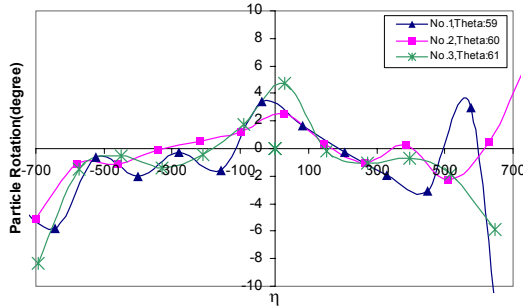
شکل ۱۱: نتایج آزمایشها در نمونه هایی با مرزهای شکل پذیر و خروج از مرکزیت متفاوت ذرات.



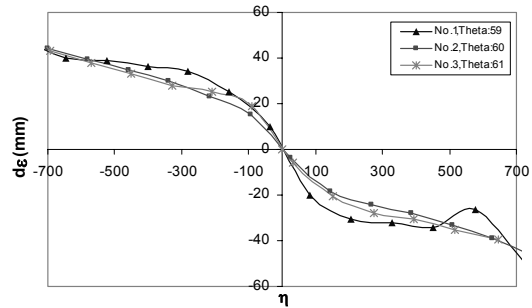
(ب) تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری



(الف) تغییرات $\sin \varphi$ نسبت به کرنش محوری



(ت) مقدار چرخش ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۹/۵٪



(پ) تغییر مکان ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۹/۵٪

شکل ۱۲: نتایج آزمایشها در نمونه هایی با مرزهای صلب و خروج از مرکزیت متفاوت ذرات.

فاکتور تغییر مکان ذرات در امتداد باند برشی زیاد می شود (شکل ۱۲-پ)).

نمونه های با مرز صلب

در اینجا نیز مشابه نمونه های با مرزهای شکل پذیر با افزایش تخلخل زاویه اصطکاک داخلی کاهش می یابد. در مورد تغییرات حجم نیز به همین ترتیب با افزایش تخلخل، نمونه کاهش حجم بیشتری خواهد داشت. در کل نتایج به دست آمده نشان می دهند که تخلخل کمتر از سایر عوامل تحت تأثیر شرایط مرزی می باشد و از آنجایی که نمودارها مشابه می باشند از آوردن آن صرف نظر شده است. در اینجا نیز برای مقایسه بهتر خلاصه ای از نتایج در جدول زیر آمده است.

جدول ۶: خلاصه نتایج مدل سازی نمونه های با تخلخل متفاوت.

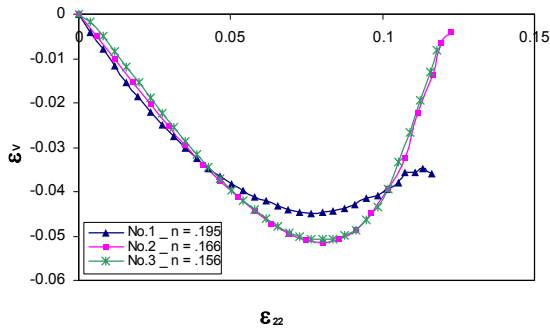
تخلخل	نوع مرز	$\sum_{i=1}^n \phi_{i\text{Ecc}}$	$M\alpha \xi \varepsilon_{\text{eff}}$	چرخش حداکثر برشی ($^{\circ}$)	ضخامت باند برشی (μm)
'	'	'	'	'	'
'	'	'	'	'	'
'	'	'	'	'	'
'	'	'	'	'	'
'	'	'	'	'	'

تخلخل

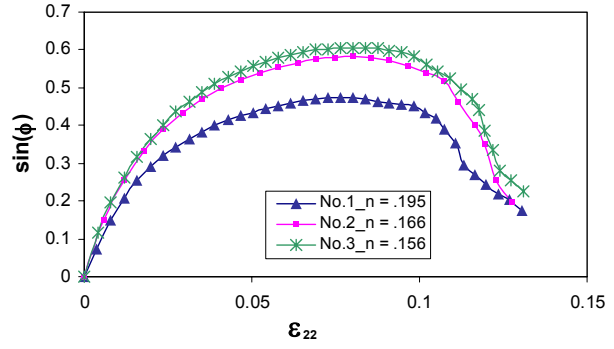
با تغییر تخلخل انتظار می رود همان طور که مقاومت نمونه ها تغییر می کند، سطح کرنشی که باندهای برشی در آن تشکیل می شود و آرایش این باندها تغییر کند. در برخی تحقیقات قبلی نیز این عامل بررسی شده است، اما با تغییر تراکم سایر خصوصیات نیز تغییر می کنند، برای مثال تنشهای موجود در نمونه به این فاکتور بسیار حساس است و با افزایش تراکم تنش های نمونه نیز افزایش می یابد. به همین علت برای ثابت نگه داشتن سایر خصوصیات نمونه ها تخلخل در بازه بسیار کوچکی تغییر داده شده است.

نمونه های با مرز شکل پذیر

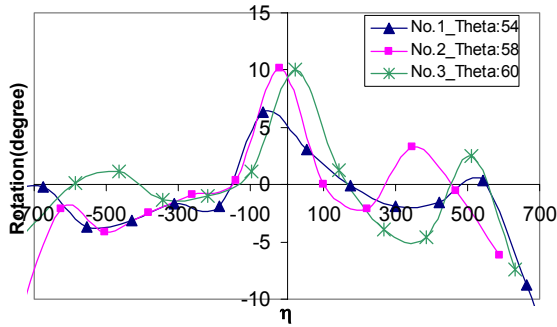
این امر کاملاً واضح است که با افزایش تخلخل نمونه ها مقاومت و $\sin \varphi$ کاهش می یابد. شکل (۱۳-الف) این تغییرات را برای $\sin \varphi$ نشان می دهد. در مورد تغییر حجم نیز می توان گفت در صورت افزایش تخلخل به علت افزایش حجم حفرات در یک مقدار بار ثابت کاهش حجم بیشتر خواهد بود (شکل ۱۳-ب)). در شکل های (۱۳-پ) و (ت) عدم تأثیر تخلخل بر محدوده باندهای برشی واضح است. همچنین با افزایش تخلخل چرخش ذرات کاهش می یابد. این در حالی است که با افزایش این



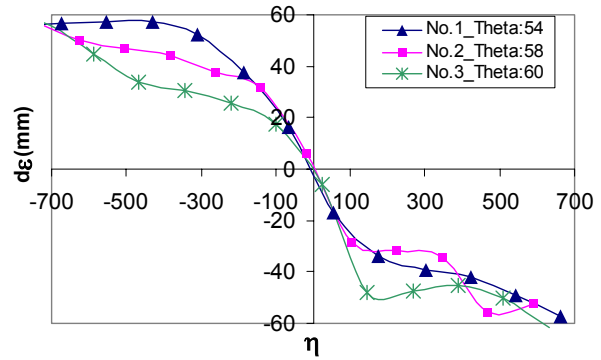
(ب) تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری



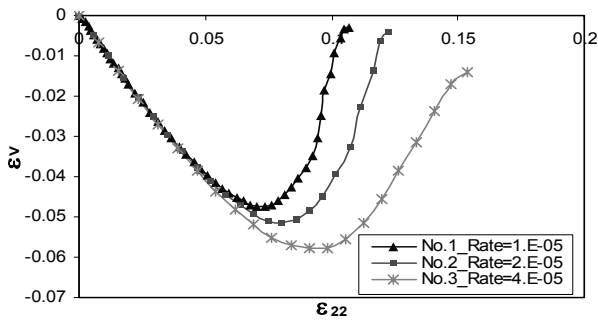
(الف) تغییرات $\sin \phi$ نسبت به کرنش محوری



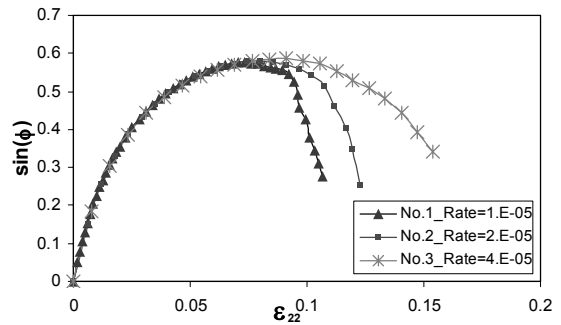
(ت) مقدار چرخش ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۱٪



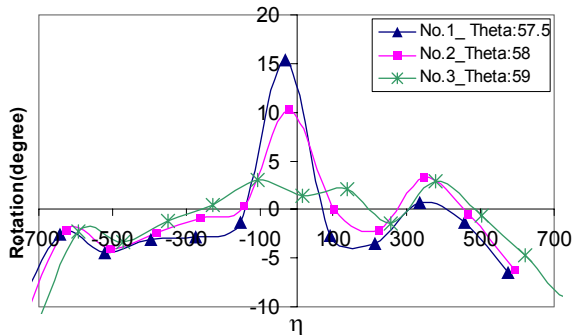
(پ) تغییر مکان ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۱٪



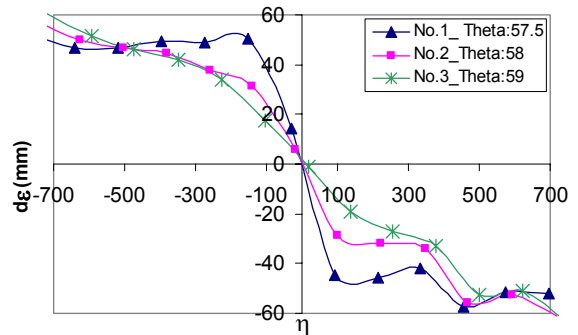
(ب) تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری



(الف) تغییرات $\sin \phi$ نسبت به کرنش محوری



(ت) مقدار چرخش ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۱٪



(پ) تغییر مکان ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۱٪

نرخ بارگذاری

باند‌ها در نمونه‌های با مرزهای صلب بر خلاف نمونه‌های با مرزهای شکل‌پذیر با افزایش سرعت افزایش می‌یابد و نیز مشابه نتایج آزمایش با مرزهای شکل‌پذیر افزایش سرعت باعث کاهش تغییر مکان و چرخش ذرات می‌شود. جدول زیر خلاصه‌ای از نتایج فوق را نشان می‌دهد.

جدول ۷: خلاصه نتایج مدلسازی نمونه‌های با نرخ بارگذاری متفاوت.

نرخ بارگذاری	نوع مرز	$\Sigma_{IV} \phi_{\Pi\epsilon\alpha\kappa}$	$M\alpha\xi \epsilon_{\text{III}}$	چرخش حداکثر (°)	ضخامت باند برشی (mm)
1E-5					
2E-5					
4E-5					

$\sin \varphi$

((-))

$\sin \varphi$

Poliakov et. al. (1994)

((-))

Wolf & Konig & Triantafyllidis

((-))

[]

تنش همه جانبه

این عامل نیز همچون دو عامل قبلی تأثیر زیادی در خواص مقاومتی نمونه‌ها دارد. اما همچون تخلخل با تغییر آن سایر موارد به خصوص تخلخل تغییر خواهد کرد، به همین علت مقادیر آن در بازه کوچکی تغییر داده شده است.

نمونه‌های با مرز شکل‌پذیر

با افزایش تنش هیدرواستاتیک، مقاومت نمونه به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. شکل (۱۵-الف) تغییرات $\sin \varphi$ را در طی آزمایش دو محوری برای سه نمونه با تنش‌های همه جانبه متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تنش همه جانبه زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد، در واقعیت وقوع این پدیده را به علت ساییده شدن گوشه‌های تیز ذرات و نیز کاهش اتساع نمونه می‌دانند. اما در این مدل، از آنجاییکه ساییده شدن گوشه‌ها مدل نشده است، وقوع این پدیده تنها به خاطر کاهش اتساع و ناهمسانی می‌باشد. در مورد تغییرات حجم نیز مشاهده می‌شود که با افزایش تنش همه جانبه نمونه در طی آزمایش کاهش حجم بیشتری خواهد داشت.

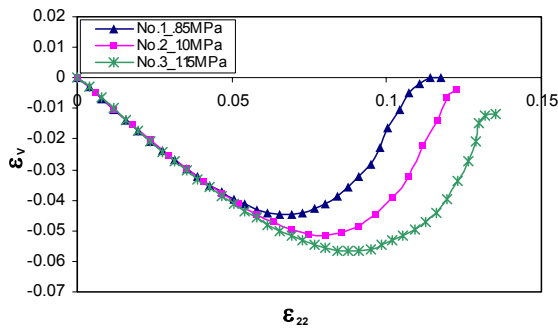
$6d_{50}$

$13d_{50}$

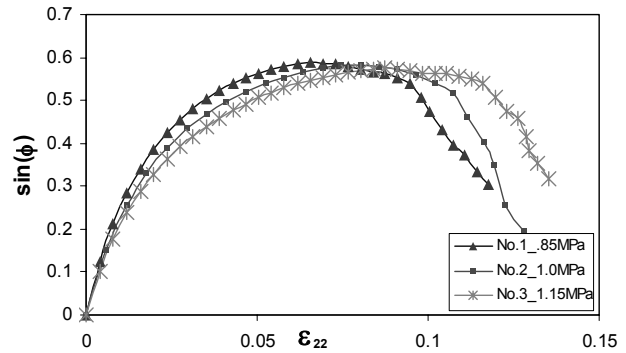
((-))

نمونه‌های با مرز صلب

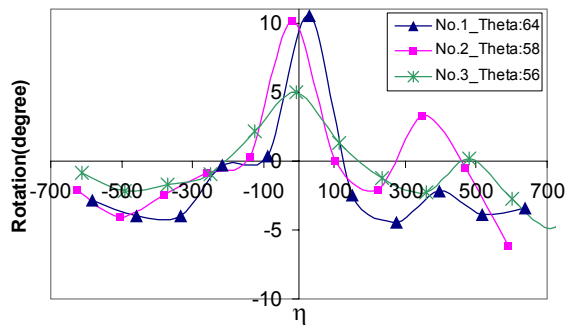
مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در اینجا تفاوت چندانی با حالت مرزهای شکل‌پذیر ندارند، تنها در تمامی موارد نمونه‌ها در کرنش‌های بزرگتری گسیخته شده‌اند. در مورد باند‌های برشی نیز مشابه نمونه‌های با مرزهای شکل‌پذیر عرض باند‌های برشی با افزایش سرعت بارگذاری کم می‌شود و مقادیر تفاوت چندانی ندارد. به همین علت از آوردن اشکال صرف نظر شده است. اما زاویه



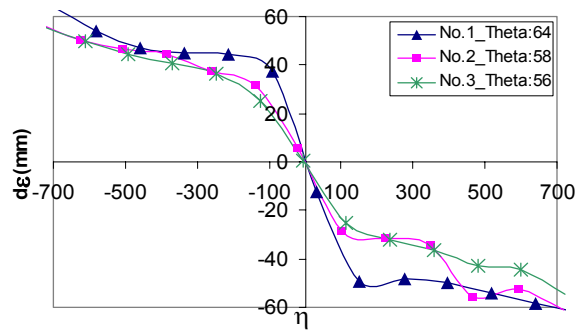
(ب) تغییرات کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری



(الف) تغییرات $\sin \phi$ نسبت به کرنش محوری



(ت) مقدار چرخش ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۱٪



(پ) تغییر مکان ذرات در مقطع عرضی باند برشی در کرنش ۱۱٪

شکل ۱۵: نتایج آزمایشها در نمونه هایی با مرزهای شکل پذیر و تنش همه جانبه متفاوت.

جدول ۸: خلاصه نتایج مدلسازی نمونه های با تنش همه جانبه متفاوت.

تنش همه جانبه (MPa)	نوع مرز	Sin ϕ_{Peak}	Max ϵ_v	چرخش حداکثر ($^\circ$)	ضخامت باند برشی (mm)
85	شکل پذیر	0.64	0.015	10	0.15
10	شکل پذیر	0.58	0.01	5	0.1
115	شکل پذیر	0.56	0.015	10	0.15

همان طور که بیان شد هر باند برشی دارای ویژگی های خاصی می باشد که هر کدام از آنها در اثر یک سری عوامل خارجی مشخص بیش از سایر عوامل تغییر خواهند کرد. در قسمت قبل هر یک از این عوامل به تفصیل بررسی گردید، تأثیر هر یک از عوامل مذکور بر روی خصوصیات باندهای برشی را به صورت زیر می توان خلاصه کرد:

- چرخش ذرات: مقدار چرخش ذرات یک فاکتور بسیار حساس می باشد و تقریباً با تمامی عواملی که بررسی شد تغییر می کند. حتی تأثیر تبدیل مرزهای شکل

در مورد باندهای برشی نیز مشاهده می شود که کاهش فشار همه جانبه باعث بیشتر شدن چرخش و تغییر مکان ذرات در راستای محور اصلی باند برشی می شود (شکل های ۱۵-پ) و (ت)). همچنین به نظر می رسد که با افزایش این فاکتور خط گسیختگی محدوده وسیع تری را در داخل نمونه تحت تأثیر قرار دهد و ضخامت باند برشی افزایش یابد. در مورد زاویه باند برشی نیز می توان گفت که در تنشهای همه جانبه بالاتر این مقدار بسیار کمتر خواهد بود. نتایج مشابهی در این زمینه در سال ۱۹۹۱ توسط Han و Hammad ارائه شده است [۷و۸].

نمونه های با مرز صلب

در اینجا نیز مشابه آزمایشات قبلی با افزایش تنش همه جانبه $\sin \phi$ کاهش می یابد. همچنین افزایش این فاکتور باعث افزایش کاهش حجم نمونه می شود. تأثیر تنش همه جانبه بر روی باندهای برشی در نمونه های با مرزهای صلب کاملاً مشابه آزمایش نمونه های با مرزهای شکل پذیر می باشد، تنها تفاوت در این است که در مرزهای صلب تغییرات بسیار محدودتر می باشند.

• سطح کرنش تشکیل باندهای برشی: از آنجاییکه باندهای برشی بلافاصله بعد از نقطه پیک نمودارهای تنش کرنش تشکیل می شود بنابراین سطح کرنش تشکیل این باند ها را می توان با استفاده از سطح گسیختگی نمونه تعیین کرد. مهم ترین عاملی که در این مورد تأثیر گذار است شرایط مرزی می باشد که در همه موارد با صلب کردن مرزها نمونه در کرنش بزرگتری گسیخته می شود. در بین سایر عوامل نیز میزان خروج از مرکزیت ذرات بیشترین تأثیر را در زمان گسیختگی نمونه دارد، به این معنا که یک خروج از مرکزیت بهینه (حدود ۰/۱۵) برای ذرات وجود دارد و با دور شدن از این مقدار نمونه ها بسیار زودتر گسیخته می شوند. همچنین در نمونه های با اندازه متوسط ذرات بزرگتر گسیختگی دیرتر اتفاق می افتد. سایر عوامل نیز در این مورد تأثیر گذار هستند اما به نظر می رسد تأثیر سه عامل فوق از همه بیشتر است.

علاوه بر موارد فوق لازم به ذکر است که روند تغییرات زوایای باندهای برشی در اغلب موارد با رابطه ارائه شده توسط کولمب ($\pi/4 + \phi/2$) یکسان می باشد، اما در مرزهای شکل پذیر مقادیر به دست آمده ۱-۵ درجه از این مقادیر کوچکتر و در مرزهای صلب ۱-۵ درجه بزرگتر می باشند. همچنین از آنجایی که نتایج آزمایش بر روی مرزهای صلب بسیار نزدیک به هم است و تعیین روند تغییرات مشکل تر می باشد، به نظر می رسد نمونه های با مرزهای شکل پذیر نسبت به تغییرات عوامل خارجی حساس تر باشند و نتایج بهتری را ارائه می دهند.

در نهایت لازم به ذکر است، از آنجاییکه اکثر پارامترهای بررسی شده با نتایج واقعی تطابق خوبی داشته اند و همچنین کنترل و تفسیر نتایج مشکلات آزمایشهای آزمایشگاهی و مدلهای فیزیکی را ندارد، و به علاوه هر فاکتور دلخواه را می توان بدون تغییر سایر فاکتورها با دقت خوبی بررسی کرد، می توان گفت این مدل می تواند جایگزین خوبی برای آزمایشهای واقعی باشد. البته از آنجاییکه در هیچ از یک مقالات موجود مقادیر عددی ارائه نشده است، در مورد مقادیر عددی موجود نمی توان چنین نتیجه گیری نمود و این امر تنها در مورد روند تغییرات صادق می باشد.

پذیر به صلب در این پارامتر کاملاً مشهود است و با این تبدیل در ذرات کناری به طور ناگهانی میزان چرخش تغییر می کند. تأثیر دیگری که مرزهای صلب بر روی این فاکتور دارند کاهش عمومی میزان چرخش ذرات است، بدین معنا که بدون تغییر روند آن در اکثر موارد تنها مقادیر چرخش ذرات بسیار کمتر می شود.

• تغییر مکان ذرات: عواملی که بیشترین تأثیر را بر روی این فاکتور دارند، نرخ بارگذاری و تنش همه جانبه می باشند. همچنین با افزایش قطر مقادیر تغییر مکان ذرات به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابد اما اگر این مقادیر بر قطر ذرات تقسیم شود تغییر قابل ملاحظه ای در مقادیر تغییر مکان ملاحظه نمی شود. مرزهای صلب در مورد تغییر مکان نیز اثری مشابه چرخش ذرات دارند و مقادیر آنها را کاهش می دهند. سایر عوامل به نظر نمی رسد تأثیر عمده ای بر این پارامتر داشته باشند.

• ضخامت باندهای برشی: در تحقیقات مختلف مقادیر متفاوتی به منظور تخمین ضخامت باندهای برشی ارائه شده است، در این میان با توجه به نتایج ارائه شده بازه 6-13d₅₀ بهترین تقریب برای تعیین این خصوصیت به نظر می رسد و با تغییر سایر عوامل ضخامت باند برشی درون این محدوده تغییر می کند. همچنین لازم به ذکر است که با افزایش سرعت بارگذاری و تنش همه جانبه ضخامت باندهای برشی افزایش می یابد.

• زاویه باند برشی: عواملی که بیشترین تأثیر را در شیب باندهای برشی دارند به ترتیب میزان تأثیر عبارتند از: تنش همه جانبه (افزایش این عامل باعث کاهش شیب می شود)، تخلخل (افزایش آن با کاهش زاویه باند برشی همراه است)، دانه بندی (افزایش یکنواختی باعث کاهش زاویه باند برشی می شود) و اندازه ذرات (در نمونه های با اندازه متوسط ذرات بزرگتر زاویه خط گسیختگی کوچکتر خواهد بود) در بین این فاکتورها عامل اندازه ذرات کمترین تأثیر را دارد. همچنین لازم است عامل شرط مرزی نیز به طور جداگانه و به عنوان یکی از عواملی که بیشترین تأثیر را در این مورد دارد معرفی گردد. با صلب کردن مرزها زاویه باندهای برشی در تمامی موارد به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

-
- 1 - Cundall, P. A. (1978). "BALL- a program to model granular media using distinct element method." *Technical Note. Advanced Technology Group*. Dames And Moore. London
 - 2 - Stark, O. D. L. and Cundall, P. A. (1978). "A discrete numerical mode For granular assemblies." *Geotechnique*, Vol. 29, PP.47-65.
 - 3 - Rothenburg, L. and Bathurst, R. J. (1991). "Numerical simulations of idealized granular assemblies with plane elliptical particles." *J. Computer and Geotechnics*, Vol. 11, PP.315–329.
 - 4 - Rothenburg, L., Bathurst, R. J. and Dusseault, M. B. (1989). "Micromechanical ideas in constitutive modeling of granular materials." *Powders and Grains, Biarez & Gourves(eds)*, Balkema, Rotterdam. ISBN 906191 984 3.
 - 5 - Wolf, H., Konig, D. and Triantafyllidis T. (2002). "Experimental investigation of shear band patterns in granular material." *Journal of Structural Geology*, Vol. 25, No.2003, PP. 1229-1240.
 - 6 - Viggiani, G., Küntz, M. and Desrues, J. (2001). "An experimental investigation of the relationships between grain size distribution and shear banding in sand." *Lecture Notes in Physics Springer*, Vol. 568 / 2001.
 - 7 - Hammad, W. (1991). *Modelisation Nonlineaire et Etude Experimentale de Bande de Cisaillement Dans Les Sables*, These Docteur, Universite de Grenoble.
 - 8 - Han, C. (1991). *Localization of Deformation in Sand*, PhD Thesis, University of Minesota.
 - 9 - Arthur, J. R. F., Dunstan, T., Al-Ani, Q. A. J. L. and Asadi, A. (1980). "Plastic deformation and failure in granular media." *Géotechnique*, Vol. 27, No.1, PP.53-74.
 - 10 - Vardoulakis, I., Goldscheider, M. and Gudehus, Q. G. (1978). "Formation of shear bands in sand bodies as a bifurcation problem." *Int. J. Num. Anal. Meth. Geom*, Vol. 2, PP.99 –128.
 - 11 - Desrues, J. (1984). *La localisation de la deformation dans les materiaux granulaires*. These de doctorates sciences, USMG —INPG.
 - 12 - Muhlhaus, H. B. and Aifantis, E. C. (1990). "The influence of microstructure-induced gradients on the localization of deformation in viscoplastic materials." *Acta Mechanicac Springer*, Vol. 89, No. 1-4, PP.217–231.
 - 13 - Tejchman, J. and Wu, W. (1993). "Numerical study on patterning of shear bands in a Cosserat continuum." *Acta Mechanicac Springer*, Vol. 99, No. 1-4, PP.61 – 74.
 - 14 - Paliakov et. al. (1994). *Self-organized criticality of plastic shear bands in rocks*, *Geophysical Research Letters (ISSN 0094-8276)*, Vol. 21, No. 19, PP.2143-2146.
 - 15 - Bardet, J. P. and Proubet, J. (1992). "Shear-Band Analysis in Idealized Granular Material." *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 118, PP.396-416.
 - 16 - Rahmani, H. (2006). *Discrete Element simulation of shear bands in granular materials*, Msc Thesis, School of Civil Engineering, University College of Engineering, University of Tehran.
 - 17 - Desrues, J. (1990). Shear band initiation in granular materials: Experimentation and theory. *In: Geomaterials Constitutive Equations and Modelling*, Elsevier, Amsterdam, PP.283-310.
 - 18 - Mirghasemi, A. A., Rothenburg, L. and Matyas, E. L. (2002) "Influence of particle shape on engineering properties of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles." *Géotechnique*, Vol. 52, No.3, PP.209-217.