



مقایسه پارامترهای مقاومتی ماسه کربناته و کوارتزی با آزمایش‌های سه محوری و برش ساده

کوروش زرگر، محمود حسنلوراد*، علیرضا اردکانی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ع)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۱۲

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۱۲

کلمات کلیدی:

مقاومت برشی

مسیر تنش

ماسه کربناته

آزمایش سه محوری

آزمایش برش ساده

خلاصه: رسوبات کربناته جزء خاک‌های مسئله‌دار در مهندسی ژئوتکنیک هستند. این خاک‌ها هم از لحاظ منشأ تولید و هم از لحاظ رفتار مهندسی، متفاوت از خاک‌های کوارتزی می‌باشند. در این مقاله پارامترهای مقاومتی ماسه کربناته بندرعباس و ماسه کوارتزی فیروزکوه تحت آزمایش‌های سه محوری معمولی و برش ساده استاتیکی بررسی می‌شود. آزمایش‌ها در شرایط یکسان دانه‌بندی، دانسیته نسبی و سطح تنش انجام گرفت. پارامترهایی مانند ویژگی‌های فیزیکی، رفتار برشی، مسیر تنش، مدول الاستیسیته، مدول برشی و زاویه اصطکاک داخلی حداکثر مقایسه می‌شوند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ماسه کربناته در شرایط یکسان، مقاومت برشی بیشتری نسبت به ماسه کوارتزی دارد. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی حداکثر ماسه کربناته به علت قفل و بست ذاتی دانه‌های آن در هر دو آزمایش سه محوری و برش ساده، بیشتر از ماسه کوارتزی است. زاویه اتساع برای هر دو آزمایش با افزایش تنش، روند کاهشی دارد. در ماسه کربناته به دلیل خاصیت خرد شدگی و شکننده بودن دانه‌ها میزان افت اتساع بیشتر از ماسه کوارتزی است. همچنین در نمونه‌های سست نسبت به نمونه‌های متراکم به علت این که قفل و بست دانه‌ها کمتر است و دانه‌ها از گیرداری کمتری برخوردار می‌باشند، میزان افت اتساع بیشتر از حالت متراکم است. به علت تفاوت در مسیر تنش دو آزمایش، پارامترهای مقاومتی حاصل از آزمایش سه محوری به طور متوسط ۱۰ الی ۱۵ درصد بیشتر از آزمایش برش ساده است.

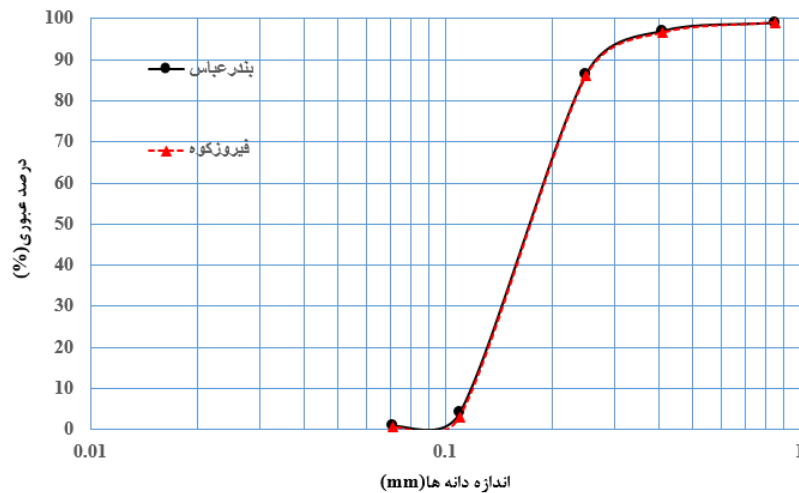
۱- مقدمه

دانه‌ای و نامنظمی و شکنندگی، قابلیت فشردگی بالایی دارند. نوع دانه، منحنی دانه‌بندی، درجه سیمانی شدگی و ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت و قابلیت فشردگی و نفوذپذیری این خاک‌ها در فاصله کمی می‌تواند متغیر باشد که این تغییر پذیری باعث بروز مشکلاتی در پیش‌بینی رفتار سازه ژئوتکنیکی می‌گردد. نمونه‌های بارز این نوع خاک‌ها در سواحل و صخره‌های مرجانی واقع در خلیج فارس یافت می‌شود [۱]. این خاک‌ها رفتار برشی متنوعی داشته و خیلی وقت‌ها متفاوت از ماسه‌های سیلیکاتی عمل می‌کنند. به همین دلیل آشنایی با خصوصیات و رفتار مهندسی این خاک‌ها بسیار مهم است. مک‌کلاند^۱ در سال ۱۹۸۸، بیان کرد که مهم‌ترین ویژگی که رسوبات کربناته را

خاک‌های کربناته به خاک‌هایی گفته می‌شود که دارای مقادیر قابل ملاحظه‌ای از کربنات کلسیم هستند و به لحاظ رفتار مهندسی متفاوت از خاک‌های کوارتزی هستند. رسوبات کربناته یکی از خاک‌های مسئله‌دار در مهندسی ژئوتکنیک است. این نوع خاک‌ها دارای منشأ بیولوژیکی، مکانیکی و شیمیایی هستند و سرتاسر جهان یافت می‌شوند. درجه سختی کانی کلسیت (۳ در مقیاس موس) نسبت به کوارتز (۷ در مقیاس موس) خیلی کمتر است. همچنین درجه سیمانی شدگی خاک‌های کربناته به طور قابل ملاحظه‌ای متغیر است. معمولاً این خاک‌ها به علت سختی کمتر، تخلخل زیاد بین دانه‌ای و داخل

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hassanlou@eng.ikiu.ac.ir

1 McClelland



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه‌های بررسی شده
Fig. 1. Gradation curve of the studied sands

و همکاران^۵ در سال ۲۰۱۹ با بررسی ماسه کربناته بیان کردند که مقاومت برشی این ماسه‌ها بستگی به دانه‌بندی خاک، شکل دانه‌ها و ساختار ذرات کربناته دارد و وجود حفرات بین دانه‌ای تأثیر به‌سزایی در مقاومت برشی دارد [۱۳ و ۱۲]. شاه نظری و همکاران در سال ۲۰۱۶ با انجام یک سری آزمایش برش ساده استاتیکی با دانسیته‌های نسبی و تنش‌های قائم متفاوت اظهار داشتند که نمونه‌های متراکم، پیک تنش برشی واضح تری نسبت به نمونه‌های سست دارند. همچنین نمونه‌های متراکم، مقاومت برشی بیشتری نسبت به نمونه‌های سست دارند [۱۴]. رسولی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با بررسی ماسه کربناته چابهار و ماسه کوارتزی فیروزکوه دریافتند که با افزایش تنش همه جانبه، زاویه اتساع هر دو ماسه کاهش پیدا می‌کند. در ماسه کربناته به دلیل خرد شدگی دانه‌ها، زاویه اتساع افت بیشتری دارد [۱۵]. رسولی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با بررسی چهار نوع ماسه کربناته جنوب ایران بیان کردند که زاویه اصطکاک داخلی حداکثر با افزایش تنش همه جانبه کاهش پیدا می‌کند. همچنین اندازه‌ی دانه‌ها یکی از عوامل مؤثر بر زاویه اصطکاک داخلی است. مدول الاستیسیته نیز با افزایش تنش همه جانبه، افزایش و سپس بسته به ماسه مورد نظر دچار افت شده و یا نرخ افزایش متوقف می‌شود [۱۶].

شانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ به مطالعه مقاومت برشی شن‌های کربناته پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش سربار و دانسیته نسبی،

با خاک‌های کوارتزی متمایز می‌کند، منافذ درون دانه‌ای است که این منافذ اثر تعیین‌کننده‌ای در رفتار این خاک‌ها دارد. همچنین ذرات کربناته شکل نامنظم‌تر و نسبت تخلخل بیشتری نسبت به ماسه‌های کوارتزی دارند [۵-۲]. شارما و اسماعیل در سال ۲۰۰۶ دریافتند که ماسه‌های کربناته با منشأ اسکلتی و جانوری زاویه اصطکاک داخلی بیشتری نسبت به ماسه‌های کوارتزی دارند. همچنین ماسه‌های کربناته نسبت به ماسه‌های کوارتزی تغییر حجم زیادی از خود نشان می‌دهند [۶]. سمپل^۱ در سال ۱۹۸۸، بیان کرد که ویژگی‌های رفتاری رسوبات کربناته بسیار گسترده است. به طوری که خصوصیات این خاک‌ها در فاصله اندک از یکدیگر متفاوت هستند و نمی‌توان همه آن‌ها را در یک گروه دسته‌بندی کرد [۸ و ۷].

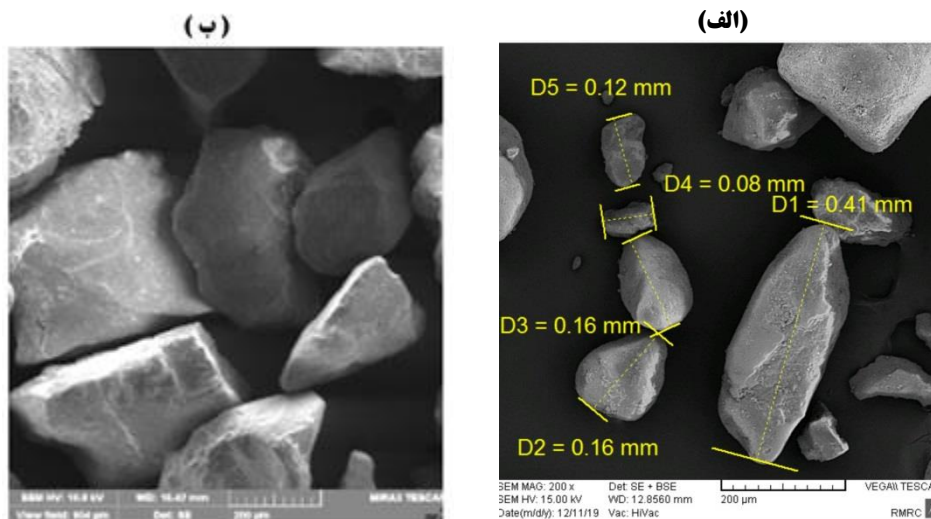
کوپ و همکاران^۲ در سال ۲۰۰۴، ژانگ و لو^۳ در سال ۲۰۲۰ با انجام چندین آزمایش روی ماسه کربناته دریافتند که خرد شدن دانه‌ها عامل اصلی در تعیین مقاومت برشی و زاویه اتساع است [۹ و ۱۰]. برندس^۴ در سال ۲۰۱۲ بیان کرد که رفتار حجمی ماسه‌های کربناته متفاوت از ماسه‌های کوارتزی است. همچنین وی با افزایش تنش نرمال در آزمایش برش ساده دریافت که زاویه اصطکاک داخلی حداکثر ماسه کربناته به دلیل تردی دانه‌ها نسبت به ماسه کوارتزی بیشتر افت می‌کند [۱۱]. حسنلوراد و همکاران در سال ۲۰۱۴، وانگ

1 Semple
2 Coop et al.
3 Zhang & Luo
4 Brandes

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه‌های بررسی شده

Table I. Physical properties of the sands

e _{max}	e _{min}	C _u	C _c	USCS	G _s	CaCO ₃ %	ماسه
۰/۹۷	۰/۶۴	۱/۶۷	۱	SP	۲/۷۴	۷۶/۱	بندرعباس (کربناته)
۰/۸۷	۰/۵۶	۱/۶۷	۱	SP	۲/۶۵	۱/۷	فیروزکوه (کوارتزی)



شکل ۲. تصویر میکروسکوب الکترونیکی ماسه‌ها؛ الف) ماسه بندرعباس، ب) ماسه فیروزکوه

Fig. 2. Microscopic electronic pictures of sands: a) Bandar Abbas sand, b) Firoozkooch sand

سه محوری و برش ساده مقایسه می‌گردد.

۲- مصالح مورد استفاده

در این پژوهش از دو نوع ماسه کربناته و کوارتزی استفاده شده است. ماسه کربناته مورد نظر از نزدیکی خط ساحل، واقع در پارک ولایت بندرعباس از عمق دو متری برداشت شد. برای ماسه کوارتزی از ماسه فیروزکوه استفاده شد. این ماسه به عنوان یک ماسه استاندارد در کشور معروف است. جهت تعیین درصد کربنات کلسیم ماسه‌ها از استاندارد BS-1377 استفاده شد. یکی از عوامل اصلی در به وجود آمدن رفتار متفاوت مهندسی در ماسه کربناته نسبت به خاک‌های دیگر مقدار کربنات کلسیم است. هر چقدر درصد کربنات بالاتر باشد، ماسه رفتار متفاوت تری داشته و مسئله دارتر خواهد بود. دانه‌بندی ماسه فیروزکوه مشابه با دانه‌بندی ماسه بندرعباس تنظیم شد. در

مقاومت برشی این شن‌ها افزایش پیدا می‌کند. همچنین در اثر افزایش سربار، ذرات شن کربناته بیشتر از شن‌های کوارتزی خرد می‌شوند [۱۷]. ملاحظه می‌شود که همچنان اکثر محققین در حال بررسی رفتار خاص ماسه‌های کربناته و تفاوت‌های آن‌ها با ماسه‌های کوارتزی هستند. از طرفی، همان‌طور که می‌دانیم یکی از عوامل موثر در رفتار برشی خاک، نوع آزمایش و اثر مسیر تنش بر روی آن است موضوعی که کمتر مورد توجه محققان مخصوصاً در ماسه‌های کربناته قرار گرفته است. لذا در این تحقیق رفتار دو ماسه کربناته بندرعباس و ماسه کوارتزی فیروزکوه در دانسیته‌های نسبی سست و متراکم با استفاده از آزمایش‌های سه محوری معمولی و برش ساده بررسی می‌شود. تفاوت‌ها و شباهت‌های رفتاری دو ماسه از قبیل مقاومت برشی، زاویه اصطکاک داخلی حداکثر، زاویه اتساع، کرنش نظیر نقطه بیشینه، مدول الاستیسیته و مدول برشی بر اساس نتایج دو آزمایش

جدول ۲. مشخصات و کدهای آزمایش سه محوری
Table 2. Specifications and triaxial test codes

کد آزمایش	σ_c (kPa)	Dr (%)	کد آزمایش	σ_c (kPa)	Dr (%)	ماسه
BDT50	۵۰		BLT50	۵۰		
BDT100	۱۰۰		BLT100	۱۰۰		
BDT200	۲۰۰		BLT200	۲۰۰		
BDT300	۳۰۰		BLT300	۳۰۰		
BDT400	۴۰۰	۷۰	BLT400	۴۰۰	۳۰	بندرعباس
BDT500	۵۰۰		BLT500	۵۰۰		
BDT600	۶۰۰		BLT600	۶۰۰		
FDT50	۵۰		FLT50	۵۰		
FDT100	۱۰۰		FLT100	۱۰۰		
FDT200	۲۰۰		FLT200	۲۰۰		
FDT300	۳۰۰		FLT300	۳۰۰		
FDT400	۴۰۰	۷۰	FLT400	۴۰۰	۳۰	فیروزکوه
FDT500	۵۰۰		FLT500	۵۰۰		
FDT600	۶۰۰		FLT600	۶۰۰		

سازی نمونه‌های همگن، خاک را به سه لایه تقسیم کرده و هر لایه با وزن مشخص در قالب ریخته شده و سپس با وارد کردن ضرباتی به جداره‌ی قالب نمونه‌ها متراکم شدند. آزمایش‌ها به صورت خشک و تحت تنش‌های همه جانبه ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال انجام شدند. نمونه‌های برش ساده نیز به شکل استوانه و با قطر قالب ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۶ میلی‌متر در سه لایه همگن با دانسیته نسبی مورد نظر آماده شدند. نمونه‌ها به صورت خشک و تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال آزمایش شدند. جدول ۲ و ۳ به ترتیب مشخصات و کدهای آزمایش سه محوری و برش ساده را نشان می‌دهند. با توجه به روش ساخت نمونه‌ها، می‌توان گفت رفتار نمونه‌ها مشابه رفتار خاک‌های ریخته و کوبیده شده خواهد بود.

۴- نتایج آزمایش‌ها

نتایج آزمایش‌های سه محوری و برش ساده در هفت بخش مجزا شامل: رفتار تنش - کرنش آزمایش سه محوری، رفتار تنش برشی - کرنش برشی آزمایش برش ساده، مسیر تنش، زاویه اصطکاک داخلی حداکثر حاصل از آزمایش سه محوری و برش ساده، زاویه اتساع

همین راستا برخی از اندازه‌های ماسه فیروزکوه پس از الک کردن حذف شد تا شباهت لازم را با ماسه بندرعباس داشته باشد (شکل ۱). جدول ۱ خواص فیزیکی دو ماسه بندرعباس و فیروزکوه را شامل نسبت تخلخل حداقل و حداکثر، ضریب یکنواختی، ضریب انحناء، طبقه بندی خاک، توده ویژه و میزان درصد کربنات کلسیم را نشان می‌دهد. شکل ۲ قسمت (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونیکی برای ماسه بندرعباس و قسمت (ب) برای ماسه فیروزکوه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود ماسه کربناته بندرعباس دارای تنوعی از دانه‌های حجمی فرسایش یافته و سطوح نسبتاً صاف تا زبر است. ولی در مقابل ماسه کوارتزی یک ماسه شکسته دارای دانه‌های حجمی تیز گوشه می‌باشد.

۳- آماده سازی نمونه‌ها و برنامه انجام آزمایش

تعداد ۲۸ آزمایش سه محوری طبق استاندارد ASTM D7181 و ۲۴ آزمایش برش ساده استاتیکی طبق استاندارد ASTM D6528 انجام شد. نمونه‌ها با دو دانسیته نسبی سست (۳۰ درصد) و دانسیته نسبی متراکم (۷۰ درصد) با روش ریزش خشک ساخته شدند. نمونه‌های سه محوری با توجه به استاندارد به شکل استوانه و با قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۸۱/۵ میلی‌متر انتخاب شدند. جهت آماده

جدول ۳. مشخصات و کدهای آزمایش برش ساده
Table 3. Specifications and simple shear test codes

کد آزمایش	σ_v (kPa)	Dr (%)	کد آزمایش	σ_v (kPa)	Dr (%)	ماسه
BDS50	۵۰		BLS50	۵۰		بندرعباس
BDS100	۱۰۰		BLS100	۱۰۰	۳۰	
BDS200	۲۰۰		BLS200	۲۰۰		
BDS300	۳۰۰		BLS300	۳۰۰		
BDS400	۴۰۰	۷۰	BLS400	۴۰۰		
BDS500	۵۰۰		BLS500	۵۰۰		
FDS50	۵۰		FLS50	۵۰		فیروزکوه
FDS100	۱۰۰		FLS100	۱۰۰		
FDS200	۲۰۰		FLS200	۲۰۰		
FDS300	۳۰۰		FLS300	۳۰۰		
FDS400	۴۰۰	۷۰	FLS400	۴۰۰	۳۰	
FDS500	۵۰۰		FLS500	۵۰۰		

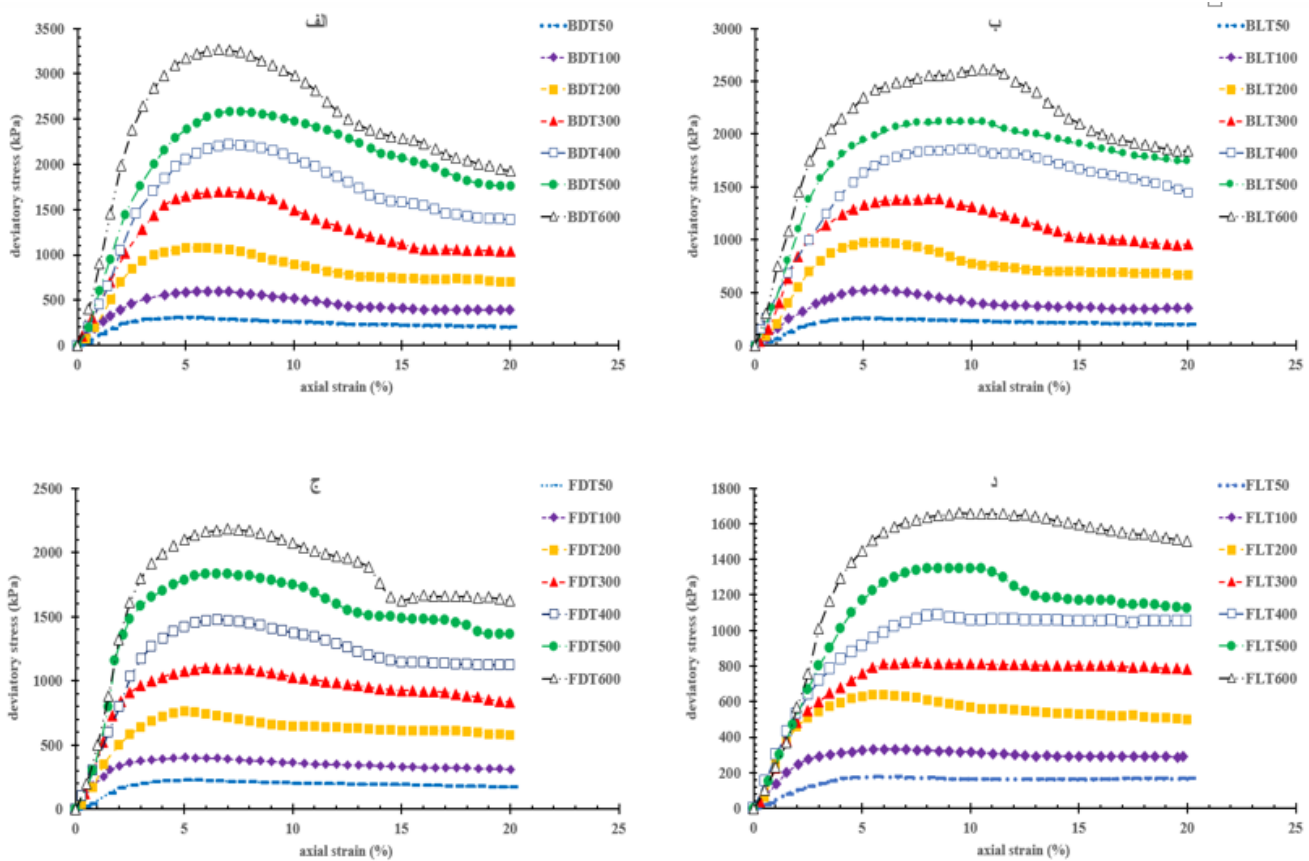
آزمایش سه محوری و برش ساده، مدول الاستیسیته و مدول برشی، کرنش نظیر نقطه بیشینه آزمایش سه محوری ارائه خواهد شد.

۱-۴- رفتار تنش - کرنش آزمایش سه محوری

شکل ۳ نمودار تنش انحرافی در برابر کرنش محوری برای دو ماسه بندرعباس و فیروزکوه را در حالت‌های سست و متراکم نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها مشخص است در شرایط یکسان از نظر دانسیته نسبی و تنش همه جانبه، مقاومت برشی ماسه کربناته بندرعباس بیشتر از ماسه کوارتزی فیروزکوه است. با افزایش دانسیته نسبی و تنش همه جانبه، مقدار تنش انحرافی ماکزیمم در دو حالت سست و متراکم افزایش پیدا می‌کند. همچنین نمونه‌های متراکم نسبت به نمونه‌های سست بیشینه تنش واضح‌تری دارند. نمودار مربوط به ماسه بندرعباس رفتار نرم شوندگی از خود نشان می‌دهد که این روند حتی در حالت سست نیز دیده می‌شود. لذا به نظر می‌رسد دانه‌های ماسه کربناته یک قفل و بست ذاتی دارند که با اعمال تغییر شکل این قفل و بست کاهش پیدا می‌کند. در مقابل ماسه کوارتزی رفتار نرم شوندگی کمتری از خود نشان داده است. این رفتار در تحقیقات رسولی و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز گزارش شده است.

۲-۴- تنش برشی - کرنش برشی آزمایش برش ساده

شکل ۴ نمودار تنش برشی در برابر کرنش برشی برای دو ماسه کربناته بندرعباس و کوارتزی فیروزکوه را در حالت‌های سست و متراکم نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش دانسیته نسبی و تنش قائم، مقدار تنش برشی افزایش می‌یابد. همچنین بیشینه تنش در حالت‌های متراکم بیشتر از حالت‌های سست می‌باشد. مقدار مقاومت برشی در شرایط یکسان از نظر دانسیته نسبی و تنش قائم، برای ماسه بندرعباس بیشتر از ماسه فیروزکوه است. برای مثال در تنش قائم ۴۰۰ کیلوپاسکال در حالت متراکم، مقاومت برشی حداکثر ماسه بندرعباس ۳۷۰ کیلوپاسکال است. در مقابل ماسه فیروزکوه در شرایط مشابه مقاومت برشی حداکثر ۳۱۰ کیلوپاسکال دارد. در حالت‌های متراکم برای هر دو ماسه، تا کرنش برشی حدودا ۱۲ الی ۱۴ درصد، مقاومت برشی صعودی است. بعد از کرنش ۱۴ درصد، مقاومت برشی افت پیدا کرده تا به حالت پسماند خود برسد. با بررسی نتایج مشخص می‌شود که این مقدار افت در ماسه کربناته بندرعباس بیشتر از ماسه کوارتزی فیروزکوه است. مهم ترین دلیل این موضوع خاصیت ترد و شکننده بودن دانه های کربناته و کاهش قفل و بست دانه ها با افزایش تغییر شکل است. در اثر اعمال نیروی برشی، ذرات



شکل ۳. تغییرات تنش انحرافی در برابر کرنش محوری؛ الف) ماسه بندرعباس متراکم، ب) ماسه بندرعباس سست، ج) ماسه فیروزکوه متراکم، د) ماسه فیروزکوه سست

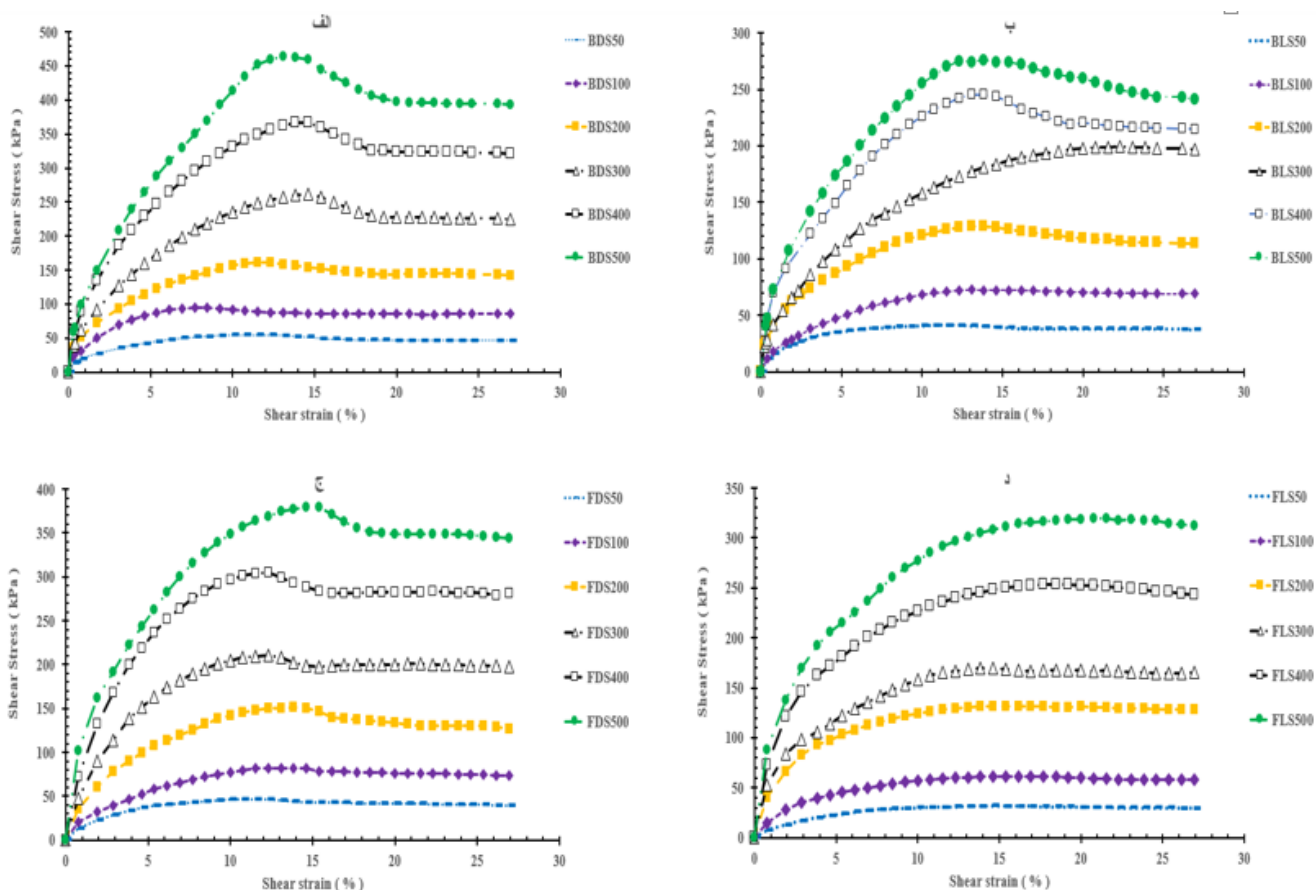
Fig. 3. Deviatoric stress versus axial strain: a) dense Bandar Abbas sand, b) loose Bandar Abbas sand, C) dense Firoozkooch sand, d) loose Firoozkooch sand

وایسته به فشار جانبی خاک به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند و از همان مرحله اول در نمونه و در حین اعمال تنش قائم، برش ایجاد می‌شود، سپس مقدار q در مسیر تنش به اندازه تنش برشی ماکزیمم به صورت قائم افزایش پیدا می‌کند. با مقایسه دو مسیر تنش حاصل از دو آزمایش مشخص می‌شود که آزمایش سه محوری در شرایط یکسان از دانسیته نسبی و تنش، مسیر تنش بزرگتری نسبت به آزمایش برش ساده دارد. ایجاد برش در حین اعمال تنش قائم و برش خالص در حین بارگذاری در آزمایش برش ساده، باعث ایجاد اختلافی در حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد در نتایج کلی دو آزمایش شده است که به تبع آن، مقاومت حاصل از آزمایش سه محوری، بیشتر به دست آمده است. همچنین در شرایط یکسان از نظر دانسیته نسبی و تنش در هر دو آزمایش، ماسه بندرعباس به علت دارا بودن دانه‌های صفحه‌ای و میله‌ای و ایجاد قفل و بست بیشتر، مسیر تنش بزرگتری نسبت به

ابتدا در هم فرو می‌روند و سپس خرد شده، قفل و بست دانه‌ها باز شده و نمونه افت مقاومت پیدا می‌کند. برای مثال در تنش ۵۰۰ کیلوپاسکال مقدار افت مقاومت بعد از نقطه بیشینه تا اتمام آزمایش (کرنش برشی ۲۷ درصد) برای ماسه بندرعباس ۸۰ کیلوپاسکال و ماسه فیروزکوه ۳۰ کیلو پاسکال است.

۳-۴- مسیر تنش

شکل ۵ نمودار مسیر تنش آزمایش‌های سه محوری و برش ساده را بر حسب مستقل‌های تنش p و q ، برای ماسه بندرعباس و فیروزکوه در حالت‌های سست و متراکم نشان می‌دهد. در آزمایش سه محوری، مرحله اول تنش همه جانبه مورد نظر اعمال می‌شود و سپس در مرحله دوم تنش انحرافی تا کرنش ۲۰ درصد به نمونه اعمال می‌گردد. در آزمایش برش ساده، در مرحله اول شیب نمودار با ضربی



شکل ۴. تغییرات تنش برشی در برابر کرنش برشی؛ الف) ماسه بندرعباس متراکم، ب) ماسه بندرعباس سست، ج) ماسه فیروزکوه متراکم، د) ماسه فیروزکوه سست

Fig. 4. Shear stress versus shear strain: a) dense Bandar Abbas sand, b) loose Bandar Abbas sand, C) dense Firoozkooch sand, d) loose Firoozkooch sand

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_v + (k_0 \cdot \sigma_v)}{2} - \sqrt{\left[\frac{\sigma_v - (k_0 \cdot \sigma_v)}{2} \right]^2 - \tau^2} \quad (4)$$

که σ_v و τ به ترتیب تنش قائم و تنش برشی در آزمایش برش ساده است و k_0 ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون می باشد که از رابطه جکی تعیین می شود.

۴-۴- زاویه اصطکاک داخلی

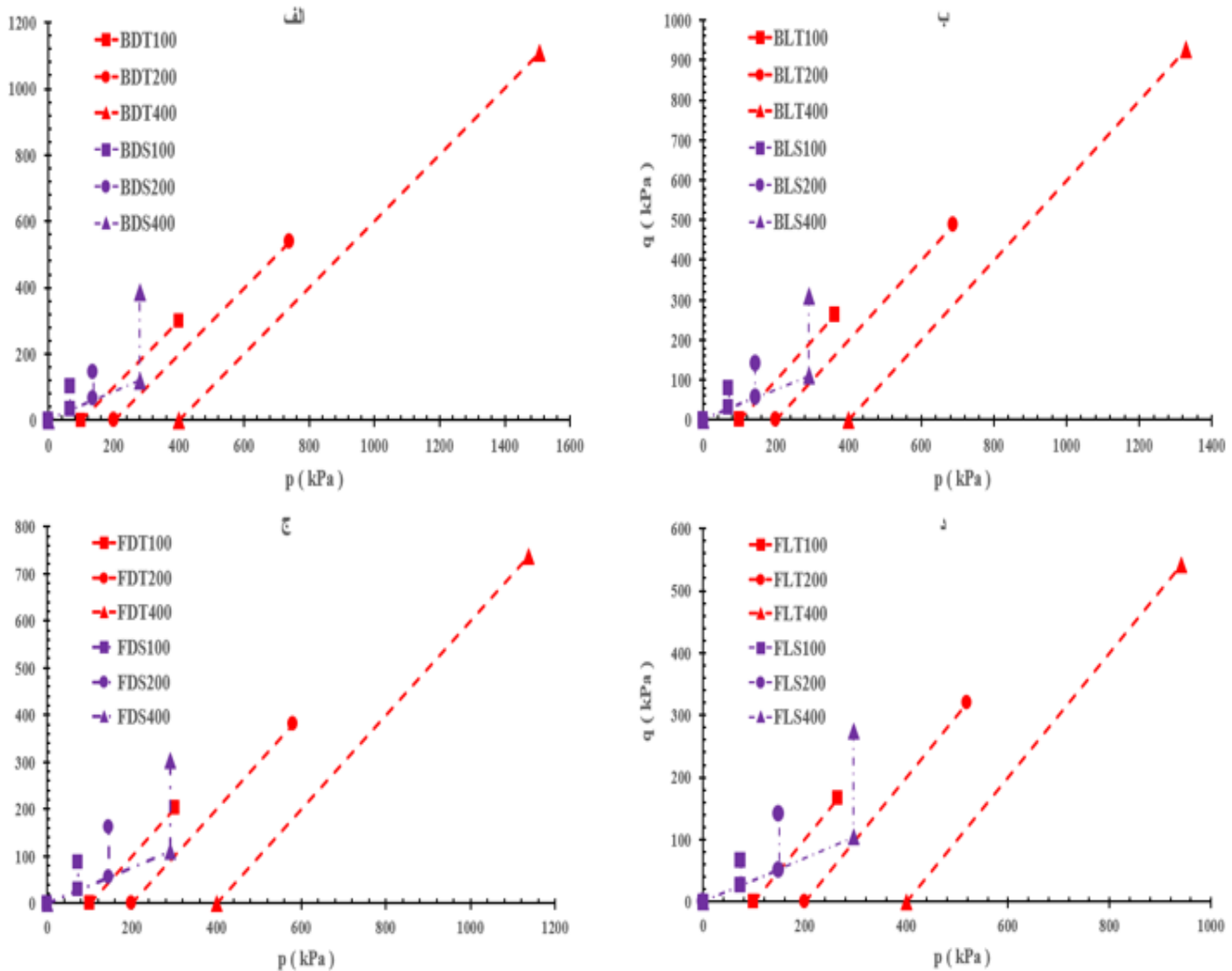
تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در نقطه بیشینه در برابر تنش در شکل ۶ نشان داده شده است. زاویه اصطکاک داخلی آزمایش سه محوری بر اساس رابطه (۵) و زاویه اصطکاک داخلی آزمایش برش ساده با رسم پوش موهر- کولمب محاسبه شده است.

ماسه فیروزکوه دارد. در روابط (۱) و (۲)، تعریف مستقل های تنش p و q ارائه شده است. این روابط برای ترسیم مسیر تنش حاصل آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده، به صورت سراسر مورد استفاده قرار می گیرد، لیکن برای ترسیم مسیر تنش حاصل از آزمایش برش ساده، مقادیر تنش حداقل و حداکثر از روابط (۳) و (۴) استفاده می شود.

$$p = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 \quad (1)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_v + (k_0 \cdot \sigma_v)}{2} + \sqrt{\left[\frac{\sigma_v - (k_0 \cdot \sigma_v)}{2} \right]^2 - \tau^2} \quad (3)$$



شکل ۵. مسیر تنش آزمایش‌های سه محوری و برش ساده؛ الف) ماسه بندرعباس متراکم، ب) ماسه بندرعباس سست، ج) ماسه فیروزکوه متراکم، د) ماسه فیروزکوه سست

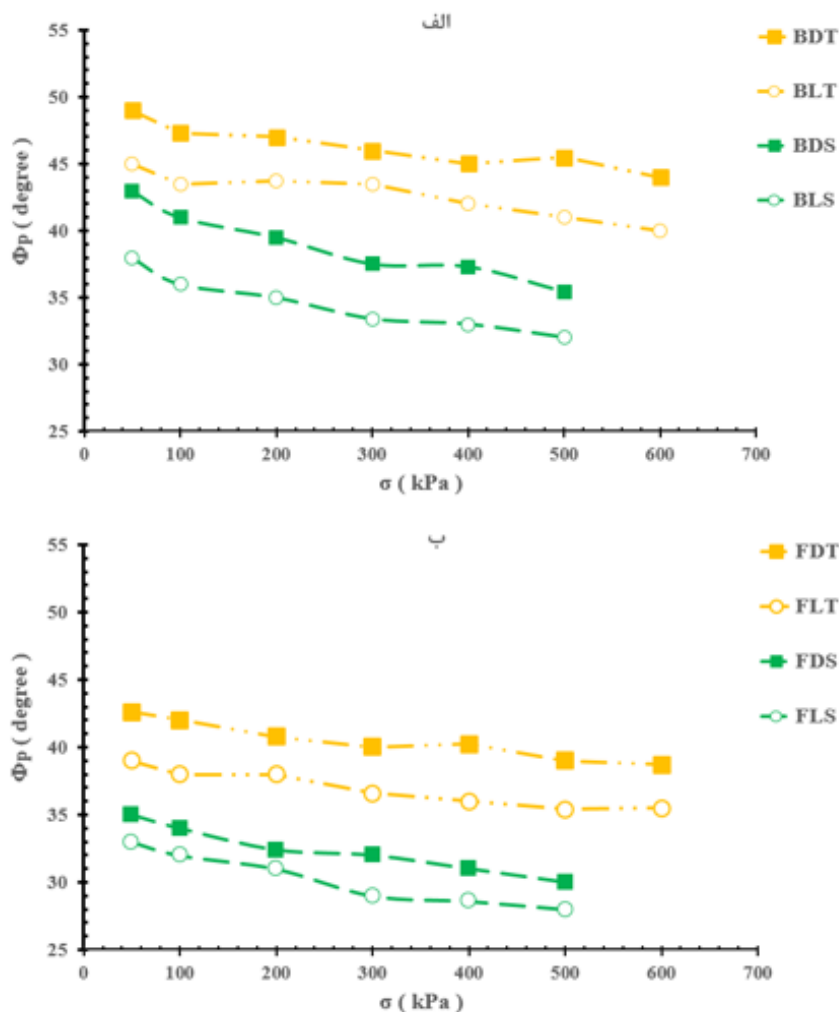
Fig. 5. Stress path of triaxial and simple shear tests: a) dense Bandar Abbas sand, b) loose Bandar Abbas sand, C) dense Firoozkooch sand, d) loose Firoozkooch sand

کاهش زاویه اصطکاک داخلی حداکثر هر دو ماسه شده است. مطابق تحقیقات حسنلوراد و همکاران در سال ۲۰۱۴ و رسولی و حسنلوراد در سال ۲۰۱۷ در آزمایش سه محوری، با افزایش تنش همه جانبه، کاهش زاویه اصطکاک داخلی حداکثر در دو ماسه مشاهده می‌شود [۱۶ و ۱۲]. همچنین کاهش زاویه اصطکاک داخلی در ماسه کربناته بندرعباس به دلیل تردی و شکنندگی دانه‌های آن و تخلخل زیاد بین دانه‌های بیشتر از ماسه کوارتزی فیروزکوه است. زاویه اصطکاک داخلی حداکثر حاصل از آزمایش سه محوری به طور متوسط ۱۵ درصد بیشتر از آزمایش برش ساده است. این موضوع به دلیل وجود پیش برش در حین اعمال تنش قائم در آزمایش برش ساده قابل توجیه است.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_p}{2} \right) \quad (5)$$

ϕ_p بیانگر زاویه اصطکاک داخلی حداکثر (در نقطه بیشینه تنش انحرافی) است.

با توجه به نتایج، زاویه اصطکاک داخلی حداکثر ماسه کربناته در دانسیته نسبی و تنش یکسان به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از ماسه کوارتزی است. موضوعی که توسط اکثر محققین پیشین گزارش شده است. این امر نشان از قفل و بست ذاتی دانه‌های کربناته دارد. همچنین افزایش دانسیته باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی حداکثر شده است افزایش تنش قائم در آزمایش برش ساده باعث

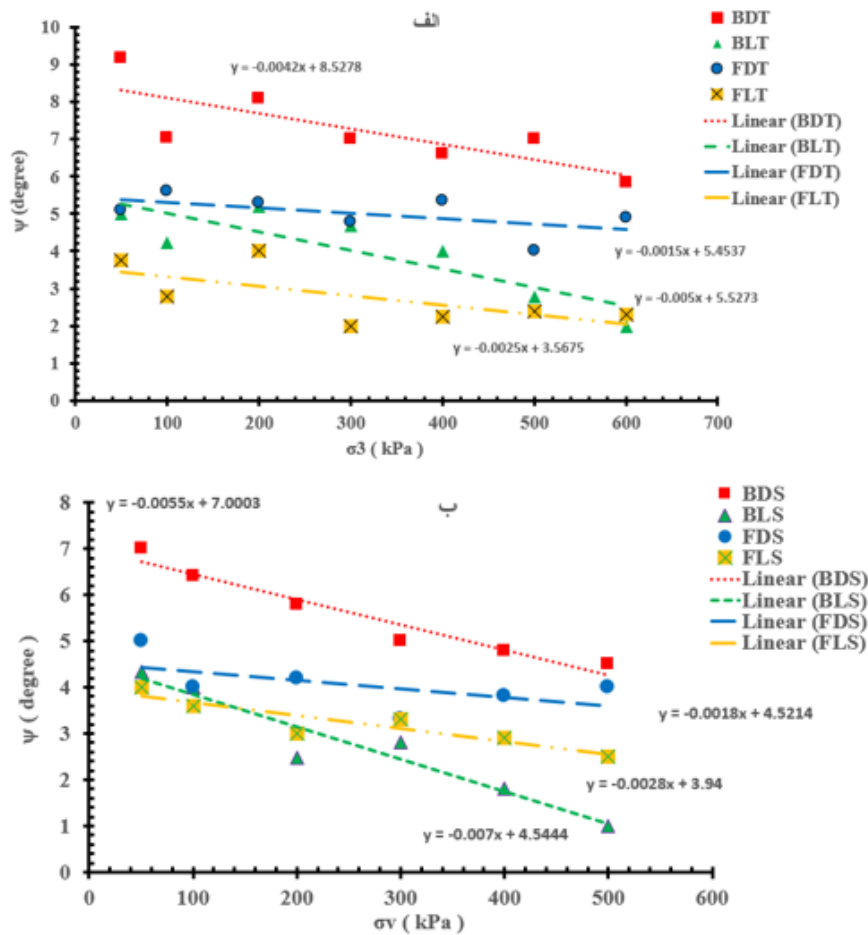


شکل ۶. زاویه اصطکاک داخلی حداکثر حاصل از آزمایش سه محوری و برش ساده در برابر تنش؛ الف) ماسه بندرعباس، ب) ماسه فیروزکوه
Fig. 6. Maximum internal friction angle from triaxial and simple shear tests versus stress: a) Bandar Abbas sand, b) Firoozkooh sand

مکانیزم تغییر شکل در ماسه‌های کربناته چرخش و لغزش دانه‌ها روی یکدیگر و خرد شدن آن‌ها بوده و در مقابل در ماسه کوارتزی، عمدتاً لغزش و چرخش دانه‌ها روی یکدیگر است. لذا با افزایش تنش، خرد شدن دانه‌ها در ماسه کربناته باعث افت بیشتر اتساع خاک می‌شود. همچنین نمونه‌های سست در هر دو آزمایش نسبت به نمونه‌های متراکم اتساع کمتری داشته و با افزایش تنش افت بیشتری نیز پیدا کرده‌اند. علت اصلی آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در نمونه‌های سست قفل و بست اولیه کمتر و گیرداری دانه‌ها نیز کمتر از حالت متراکم است. نکته دیگر این است که اثر تراکم در ماسه کربناته نسبت به ماسه کوارتزی بیشتر است. با مقایسه دو شکل الف و ب ملاحظه

۴-۵- زاویه اتساع

روش‌های مختلفی برای بیان و اندازه‌گیری زاویه اتساع توسط محققین مطرح شده است. به دلیل خشک بودن نمونه‌ها و عدم امکان اندازه‌گیری تغییرات حجم در این پژوهش، اتساع به صورت اختلاف زاویه اصطکاک داخلی حداکثر با زاویه اصطکاک داخلی ماندگار تعریف شده است. شکل ۷ زاویه اتساع حاصل از دو آزمایش سه محوری و برش ساده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در حالت متراکم مقدار اتساع ماسه کربناته بندرعباس نسبت به ماسه کوارتزی فیروزکوه به دلیل قفل و بست ذاتی آن، بیشتر بوده و افت آن نیز با افزایش تنش بیشتر است. می‌توان گفت



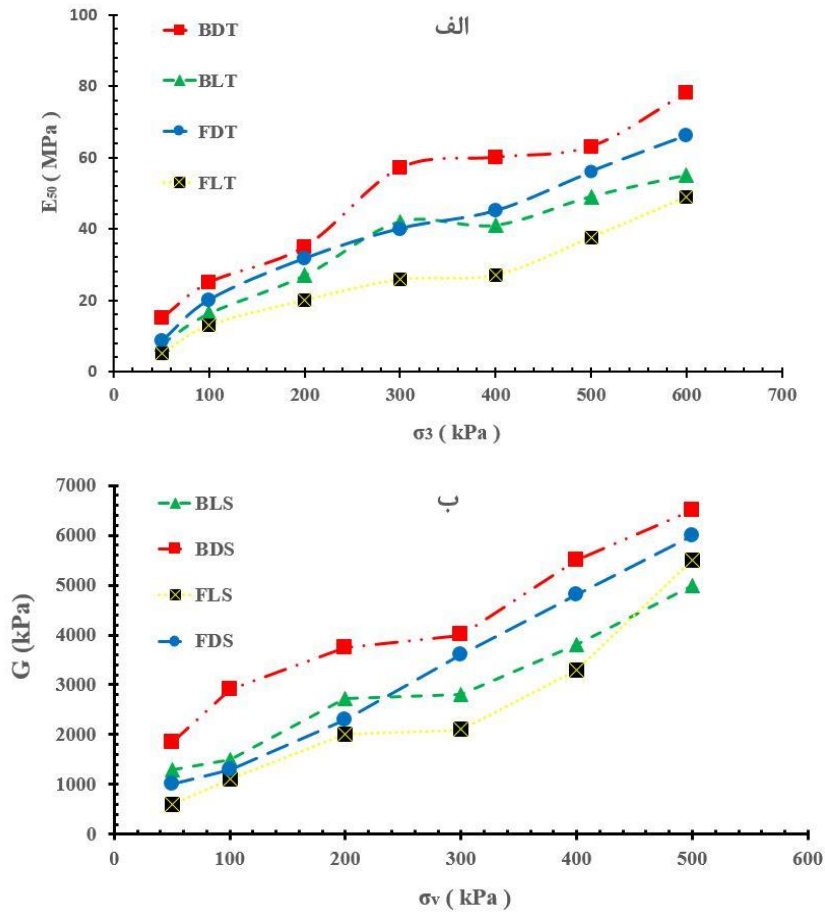
شکل ۷. زاویه اتساع ماسه بندرعباس و ماسه فیروزکوه در برابر تنش؛ الف) حاصل از آزمایش سه محوری ب) حاصل از آزمایش برش ساده
Fig. 7. Dilation angle of Bandar Abbas sand and Firoozkooch sand versus stress: a) from triaxial test, b) from simple shear test

افزایش تنش همه جانبه، سختی ماسه‌ها افزایش پیدا می‌کند. در شرایط دانسیته نسبی و تنش همه جانبه یکسان ماسه کرناته سختی بیشتری نسبت به ماسه کوارتزی از خود نشان می‌دهد. با توجه به خرد شدگی دانه‌های کرناته، سختی ماسه کرناته بندرعباس تا تنش همه جانبه ۳۰۰ الی ۴۰۰ کیلوپاسکال پیوسته افزایش پیدا می‌کند اما با بیشتر شدن تنش همه جانبه، شیب نمودار کاهش یافته و سپس شیب ملایم‌تری پیدا کرده است. در مقابل، سختی ماسه کوارتزی فیروزکوه (در حالت متراکم) تقریباً به طور مرتب افزایش پیدا کرده است. با توجه به شکل ۸-ب ملاحظه می‌گردد تغییرات مدول برشی نیز تا حدودی شبیه مدول الاستیسیته است با این تفاوت که محل تغییر شیب نمودار کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر به دلیل قابلیت خرد شدگی دانه‌ها در ماسه کرناته و وجود پیش برش در آزمایش برش ساده، تنش نظیر کاهش شیب نمودار کمتر شده است. نکته قابل

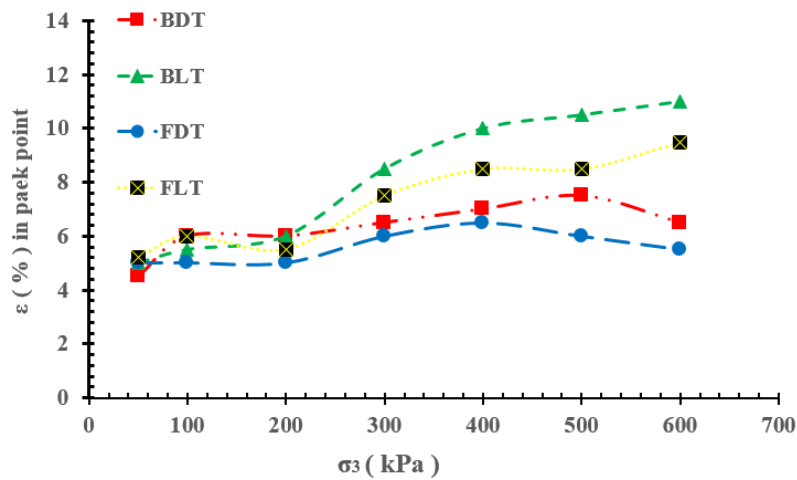
می‌گردد که در آزمایش سه محوری، نمونه سست ماسه کرناته اتساع بیشتری داشته و در آزمایش برش ساده نمونه سست ماسه کوارتزی اتساع بیشتری داشته است لذا می‌توان گفت که مسیر تنش می‌تواند اثر تراکم را نیز تغییر دهد. به طور کلی نتیجه گیری می‌شود در شرایط یکسان از نظر دانه بندی، مقدار زاویه اتساع تابع نوع خاک، تراکم نمونه، مسیر تنش و اندازه تنش محصور کننده می‌باشد.

۴-۶- مدول الاستیسیته و مدول برشی

شکل ۸ مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش سه محوری و مدول برشی حاصل از آزمایش برش ساده را در برابر تنش نشان می‌دهد. برای محاسبه مدول الاستیسیته و مدول برشی از روش سکانت ۵۰٪ استفاده شده است. با توجه به شکل ۸-الف مشخص است که با



شکل ۸. مدول الاستیسته و مدول برشی ماسه بندرعباس و فیروزکوه در برابر تنش: الف) حاصل از آزمایش سه محوری، ب) حاصل از آزمایش برش ساده
 Fig. 8. Elastic modulus and shear modulus of Bandar Abbas sand and Firoozkooch sand versus stress: a) from triaxial test, b) from simple shear test



شکل ۹. کرنش محوری نظیر نقطه بیشینه تنش انحرافی بسیج شده در برابر تنش همه جانبه برای ماسه کربناته و کوارتزی
 Fig. 9. Axial strain corresponding to the maximum mobilized deviatoric stress versus confining stress carbonate and quartz sand

توجه دیگر این است که نمونه سست ماسه کوارتزی نیز همانند ماسه کربناته با افزایش تنش، دچار نوسان سختی می گردد و روند پیوسته افزایشی ندارد.

۴-۷- کرنش محوری نظیر نقطه بیشینه

شکل ۹ نمودار کرنش محوری نظیر نقطه تنش بیشینه را در برابر تنش همه جانبه نشان می دهد. با توجه به این شکل، تغییرات کرنش نظیر نقطه بیشینه نمونه های متراکم در هر دو ماسه کمتر از نمونه های سست است. این موضوع نشان از تمایل نمونه های سست به رفتار سخت شونده دارد. حداکثر مقاومت بسیج شده در شرایط تنش همه جانبه یکسان در دو حالت متراکم و سست، در ماسه کربناته در کرنش بالاتری رخ می دهد. به عبارتی ماسه کربناته در شرایط یکسان از دانسیته نسبی و تنش همه جانبه مقاومت بیشتری از خود نشان می دهد، اما جهت رسیدن به حداکثر مقاومت بسیج شده به کرنش و تغییر شکل بالاتری نیاز دارد.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق با انجام آزمایش های سه محوری و برش ساده استاتیکی با مسیرهای تنش مختلف بر روی دو ماسه کربناته و

کوارتزی با دانه بندی یکسان، در حالت های سست و متراکم و با دانسیته های نسبی برابر، نتایج زیر به دست آمده است:

- مقاومت برشی ماسه کربناته بیشتر از ماسه کوارتزی به دست آمد. همچنین ماسه کربناته در دو حالت سست و متراکم رفتار نرم شونده از خود نشان می دهد، در مقابل ماسه کوارتزی مخصوصاً در حالت سست تمایل به رفتار سخت شونده دارد.

- در آزمایش برش ساده به دلیل وجود یک پیش برش در حین اعمال تنش قائم باعث شده تا در نتایج کلی دو آزمایش اختلافی حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد مشاهده شود که به تبع آن آزمایش سه محوری مقاومت بیشتری برای خاک نشان می دهد.

- زاویه اصطکاک داخلی حداکثر ماسه کربناته به طور قابل ملاحظه در دو حالت سست و متراکم بیشتر از ماسه کوارتزی است. همچنین وجود پیش برش ناشی از آزمایش برش ساده نسبت به تحکیم همسان آزمایش سه محوری اثر بیشتری روی خرد شدگی دانه ها و در نتیجه کاهش زاویه اصطکاک داخلی گذاشته است.

- میزان افت اتساع در برابر سطح تنش در ماسه کربناته به دلیل قابلیت خرد شدگی دانه های آن بیشتر از ماسه کوارتزی است. همچنین میزان افت اتساع در نمونه های سست به دلیل این که قفل

جدول ۴. علائم

Table 4. Symptoms

عنوان	علامت
نسبت تخلخل بیشینه	e_{max}
نسبت تخلخل کمینه	e_{min}
ضریب یکنواختی دانه بندی	C_u
ضریب انحنای دانه بندی	C_c
چگالی دانه های جامد	G_s
دانسیته نسبی	D_r
تنش همه جانبه تحکیم اولیه	σ_c
تنش قائم	σ_v
تنش اصلی بیشینه	σ_1
تنش اصلی کمینه	σ_3
تنش برشی	τ
ضریب فشار جانبی در حالت سکون	k_0
زاویه اصطکاک داخلی حداکثر	ϕ_p
زاویه اتساع	ψ
مدول ارتجاعی	E_{50}
مدول برشی	G
کرنش محوری	ϵ

- (1988) 807-836.
- [8] H. Shahnazari, R. Rezvani, Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study, *Engineering geology*, 159 (2013) 98-105.
- [9] M. Coop, K. Sorensen, T. Bodas Freitas, G. Georgoutsos, Particle breakage during shearing of a carbonate sand, *Géotechnique*, 54(3) (2004) 157-163.
- [10] J. Zhang, M. Luo, Dilatancy and Critical State of Calcareous Sand Incorporating Particle Breakage, *International Journal of Geomechanics*, 20(4) (2020) 04020030.
- [11] H. Brandes, Simple shear behavior of calcareous and quartz sands, *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(1) (2011) 113-126.
- [12] M. Hassanlourad, H. Salehzadeh, H. Shahnazari, Drained shear strength of carbonate sands based on energy approach, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 8(1) (2014) 1-9.
- [13] X. Wang, Y. Weng, H. Wei, Q. Meng, M. Hu, Particle obstruction and crushing of dredged calcareous soil in the Nansha Islands, South China Sea, *Engineering Geology*, 261 (2019) 105274.
- [14] H. Shahnazari, Y. Jafarian, M.A. Tutunchian, R. Rezvani, Undrained cyclic and monotonic behavior of Hormuz calcareous sand using hollow cylinder simple shear tests, *International Journal of Civil Engineering*, 14(4) (2016) 209-219.
- [15] M. Rasouli, M. Hassanlourad, A study on geotechnical properties of four carbonates sands from southern of Iran, *Modares Civil Engineering Journal*, 15(4) (2016) 31-40.
- [16] M. Rasouli, M. Hassanlourad, Comparative Study of Carbonate and Quartz Sand Based on Energy Concepts, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(1) (2017) 89-89.
- [17] G. Shang, L. Sun, S. Li, X. Liu, W. Chen, Experimental study of the shear strength of carbonate gravel, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (2020) 1-14.
- و بست اولیه کمتری نسبت به نمونه‌های متراکم دارند، بیشتر است. (ث روند تغییرات مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش سه محوری و مدول برشی حاصل از آزمایش برش ساده مشابه یکدیگر است. افت مدول برشی در ماسه کربناته در برابر سطح تنش به دلیل اثر بیشتر پیش برش در آزمایش برش ساده روی خرد شدگی دانه‌ها زودتر از مدول الاستیسیته رخ می دهد.
- فهرست علائم**
- علائم و اختصارهای به کار رفته در جدول ۴ ارائه شده است.
- مراجع**
- [1] Y. Jafarian, H. Javdanian, A. Haddad, Strain-dependent dynamic properties of Bushehr siliceous-carbonate sand: experimental and comparative study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107 (2018) 339-349.
- [2] B. McClelland, Calcareous sediments: an engineering enigma, in: *International conference on calcareous sediments*, 1988, pp. 777-784.
- [3] B.T. Morioka, Evaluation of the static and cyclic strength properties of calcareous sand using cone penetrometer tests, (2000).
- [4] H. Salehzadeh, The behaviour of non-Cemented and artificially cemented carbonate sand under monotonic and reversed cyclic shearing, University of Manchester, 2000.
- [5] X.-Z. Wang, F.-Y. Tan, Y.-Y. Jiao, R. Wang, A new apparatus for testing the bearing capacity of calcareous sand in laboratory, *Marine Georesources & Geotechnology*, 32(4) (2014) 379-386.
- [6] S.S. Sharma, M.A. Ismail, Monotonic and cyclic behavior of two calcareous soils of different origins, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(12) (2006) 1581-1591.
- [7] R. Semple, Mechanical properties of calcareous soils: state of the art report, *Engineering for calcareous sediments*, 2

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

K. Zargar, M. Hassanlourad, A. Ardakani Comparison of carbonate and quartz sand shear strength parameters with triaxial and simple shear tests, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4345-4358.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18313.6834



