



مقایسه رفتار برشی ماسه کربناته و کوارتزی بر اساس مفاهیم انرژی

محمد رضا رسولی^۱، محمود حسنلوراد^۲^۱ دانشگاه تهران، تهران، ایران^۲ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۲ مهر ۱۳۹۲
بازنگری: ۲۵ خرداد ۱۳۹۴
پذیرش: ۲۶ آبان ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۶ بهمن ۱۳۹۴

کلیمات کلیدی:

ماسه کربناته
ماسه کوارتزی
آزمایش سه‌محوری
مفهوم انرژی
اتساع
شکستگی دانه

چکیده: معمولاً ماسه‌های کربناته یکی از خاک‌های مسئله‌دار بوده و به لحاظ مقاومتی، با ماسه‌های کوارتزی تفاوت دارند. در این مقاله، مقاومت برشی یک ماسه کربناته حاصل از سواحل شمالی دریای عمان به صورت مقایسه‌ای با یک ماسه کوارتزی با استفاده از آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته-زهکشی شده بر مبنای مفاهیم انرژی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها تحت شرایط یکسان از نظر دانه‌بندی، چگالی نسبی و تنش‌های همه‌جانبه و اشکال متفاوت دانه‌ها بر روی دو ماسه انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌ها نشان دادند که تفاوت‌های قابل توجهی از لحاظ مقدار مقاومت برشی و مؤلفه‌های آن، تغییرهای حجمی خاک، قابلیت خردشدگی دانه‌ها و اثر آن بر روی مقاومت برشی، انرژی صرف شده برای خردشدگی دانه‌ها و نسبت سهم اتساع و خردشدگی دانه‌ها از زویه اصطکاک داخلی کل وجود دارد. در انتها ملاحظه شد که در هر یک از ماسه‌ها، یک ارتباط خطی بین نسبت انرژی صرف شده به منظور شکستگی دانه‌ها از کل انرژی اعمالی به نمونه و سهم شکستگی دانه‌ها از زویه اصطکاک داخلی کل وجود دارد. در ماسه کربناته با قابلیت شکستگی بیشتر دانه‌ها، در حدود ۱۴ تا ۳۱ درصد و در ماسه کوارتزی در بیشترین حالت ۱۰ درصد انرژی اعمالی صرف شکستگی دانه‌ها می‌شود.

تنش همه‌جانبه در این خاک‌ها موجب خرد شدگی دانه‌ها و کاهش نرخ اتساع می‌گردد.

برای ماسه‌های با دانه‌های ضعیف و تیز گوشه و میله‌ای (مانند رسوب‌های دریایی، آتشفشانی و کربناتی) و همچنین گرانیت‌های هوازده، خردشدگی قابل ملاحظه دانه‌ها و کاهش نرخ اتساع در تنش‌های کوچک نیز قابل مشاهده خواهد بود [۹-۶].

آیری و همکاران^۶ در سال ۱۹۸۸ و بولتن در سال ۱۹۸۶ با انجام یک‌سری آزمایش سه‌محوری بر روی چند نمونه ماسه کربناته، بیان کردند که این ماسه‌ها به خوبی از نظریه تنش-اتساع رو (۱۹۶۲) که برای ماسه‌های کوارتزی بیان شده است، تبعیت می‌کند [۱۰، ۵، ۳].

در ادامه، یوانگ و چن^۷ در سال ۲۰۰۰ و ایندراراتنا و سلیم^۸ در سال ۲۰۰۲ به بررسی رفتار مصالح خردشونده تحت تنش‌های برشی بر اساس مفهوم انرژی پرداختند. آن‌ها نظریه رو را برای ماسه‌هایی با دانه‌های شکننده تعمیم دادند و بیان کردند که مقدار انرژی صرف شده برای شکست دانه‌ها با ضریب خردشدگی دانه‌ها ارتباطی غیرخطی دارد. همچنین شکست دانه‌ها حتی پس از نقطه بیشینه تنش برشی در آزمایش سه‌محوری ادامه خواهد

۱- مقدمه

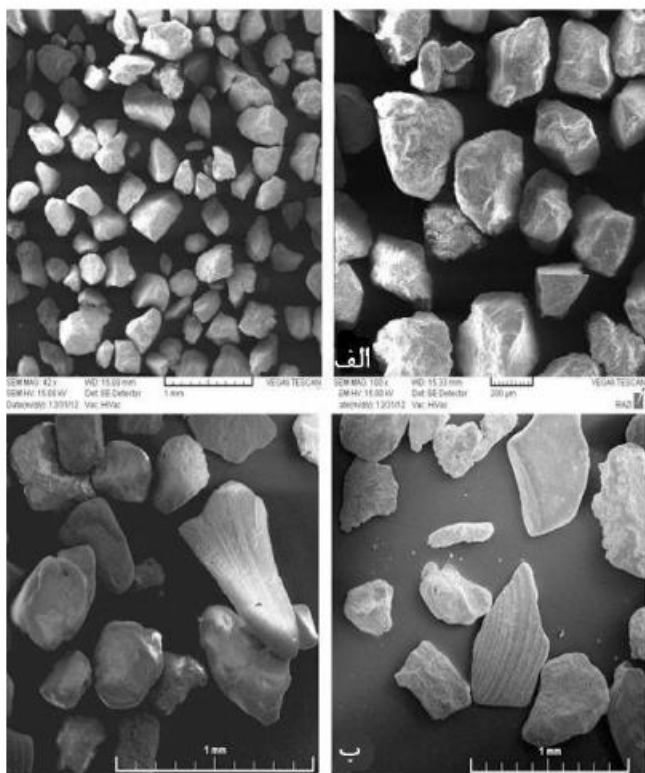
ماسه‌های کربناته (کلسیتی) از جمله خاک‌هایی هستند که به طور وسیع در سواحل اقیانوس‌ها و دریاها یافت می‌شوند و شناخت خصوصیات ژئوتکنیکی و رفتار مهندسی این رسوب‌ها با افزایش روزافزون فعالیت‌های عمرانی در سواحل دریاها و اقیانوس‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از دیرباز تحقیقات گسترده‌ای بر روی ارتباط بین مؤلفه‌های اولیه خاک مانند اصطکاک بین دانه‌ها، میزان تخلخل، قابلیت شکستگی دانه‌ها، شکل دانه‌ها و تنش‌های همه‌جانبه، مقاومت برشی و اتساع در حین اعمال تنش برشی انجام گرفته است. برای نمونه، می‌توان به تحقیقات تیلور^۱ [۱] (۱۹۴۸)، نیولاند و آلی^۲ [۲] (۱۹۵۷)، رو^۳ [۳] (۱۹۶۲)، لی و سید^۴ [۴] (۱۹۶۷) و بولتون^۵ [۵] (۱۹۸۶) اشاره نمود. این تحقیقات نشان می‌دهند که مقاومت برشی ماسه‌های کربناته با بالا رفتن مقدار اتساع افزایش می‌یابد. همچنین افزایش تنش همه‌جانبه سبب کاهش نرخ اتساع می‌شود. در واقع، افزایش

^۱ D. W. Taylor^۲ P. L. Newland & B. H. Allely^۳ P. W. Rowe^۴ K. L. Lee & H. B. Seed^۵ M. D. Bolton^۶ D. W. Airey^۷ T. S. Ueng & T. J. Chen^۸ B. Indraratna & W. Salim



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی آخذ نمونه‌ها

Fig. 1. Geographic position of the prepared samples



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی ماسه‌ها؛ (الف) فیروزکوه و (ب) چابهار

Fig. 2. Microscopic electronic images of sands: (a) Firouzkoh and (b) Chabahar sand

داشت [۹،۱۱].

ملاحظه می‌شود که رفتار و مقاومت برشی ماسه‌هایی با دانه‌های شکننده (مانند ماسه‌های کربناته و غیره) یکی از موضوعات مورد توجه محققان ژئوتکنیک بوده است. کوپ و لوزانو^۱ [۱۲] در سال ۲۰۰۲، کوپ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۴، آدرین و همکاران^۲ [۱۴] در سال ۲۰۰۴ و حسنلواد و همکاران^۳ [۱۵] در سال ۱۳۹۱، مفهوم حالت بحرانی و اثر خردشدگی دانه‌ها بر آن را در خاک‌هایی با دانه‌های خردشونده مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در واقع حالت بحرانی در این ماسه‌ها، ظاهری و تعادل بین اتساع و انقباض ناشی از خردشدگی دانه‌ها بوده و گذرا است. زیرا حالت بحرانی واقعی در هنگامی حاصل خواهد شد که اتساع به طور کامل از بین رفته و همچنین دانه‌بندی ثابت و پایداری حاصل شده باشد [۱۶-۱۸].

حسنلواد و همکاران در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳، از مفاهیم انرژی به منظور تشریح مؤلفه‌های مقاومت برشی برای ماسه‌های کربناته با قابلیت شکنندگی دانه‌ها استفاده نمودند. اما این محققان دو ماسه کربناته (با دانه‌های خردشونده) و کوارتزی را به طور مستقیم مورد مقایسه قرار ندادند [۱۸،۱۹]. بنابراین در این تحقیق، یک نمونه ماسه کربناته و یک نمونه ماسه کوارتزی تحت تنش‌های همه‌جانبه متفاوت با استفاده از آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته-زهکشی شده مورد آزمایش قرار گرفت. با استفاده از نتایج آزمایش سه‌محوری، تفاوت‌ها و شباهت‌های رفتاری بین این دو نوع ماسه به لحاظ مقاومت برشی، اصطکاک بین دانه‌ها، مقدار اتساع و میزان خردشدگی ذرات و اثر آن بر روی مقاومت برشی تحت تنش‌های برشی اعمالی با استفاده از مفاهیم انرژی و روابط تنش-اتساع ارائه شده توسط محققان گذشته بیان می‌شود.

۲- مصالح مورد استفاده

در این تحقیق از دو نوع ماسه (یکی کربناته و دیگری کوارتزی) استفاده شده است. خاک کربناته از ۷۰ کیلومتری غرب بندر چابهار واقع در شمال دریای عمان به نام بندر تنگ بدست آمد. به منظور مقایسه رفتار برشی ماسه کربناته انتخابی با ماسه‌های کوارتزی، از ماسه فیروزکوه استفاده شد. ماسه فیروزکوه از شهر فیروزکوه در جنوب رشته کوه البرز بدست آمد که به عنوان یک ماسه استاندارد در ایران شناخته می‌شود. شکل ۱ موقعیت مکانی دو ماسه را نشان می‌دهد. برای تعیین شکل دانه‌های خاک، عکس میکروسکوپ الکترونیکی از خاک‌ها تهیه شد (شکل ۲-الف و ب). دانه‌بندی ماسه فیروزکوه به گونه‌ای انتخاب شد که کمترین اختلاف را از لحاظ دانه‌بندی با ماسه کربناته چابهار داشته باشد. برای این منظور، برخی از اندازه‌ها پس از الک کردن از آن حذف شدند تا منحنی دانه‌بندی ماسه فیروزکوه مشابه با ماسه چابهار شود (شکل ۳). به طور کلی، درصد کربنات کلسیم به عنوان یک شاخص در رفتار برشی مهندسی برای ماسه‌های کربناته شناخته می‌شود [۲۰]. در این

¹ M. R. Coop & L. Luzzani

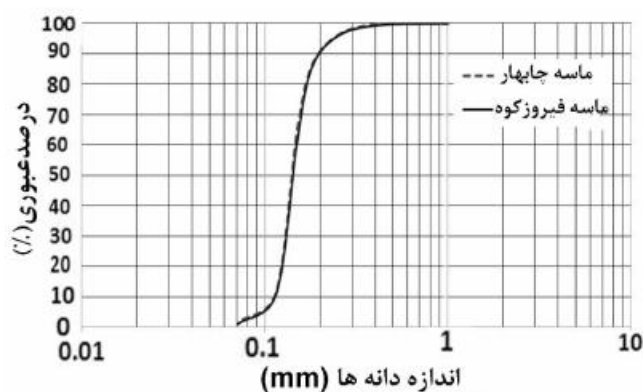
² R. Adrian et al.

³ M. Hasanlou et al.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی ماسه‌های تحقیق شده

Table 1. Physical properties of the sands studied

e_{max}	e_{min}	Cc	Cu	USCS	CaCO ₃ (%)	Gs	ماسه
۰/۹۸۲	۰/۶۹۷	۱/۱۳	۱/۵۴	SP	۴۶/۷	۲/۷۲	چاپهار
۰/۸۶۵	۰/۵۸۰	۱/۱۳	۱/۵۴	SP	۱/۰۳	۲/۶۲	فیروزکوه



شکل ۳: منحنی دانه‌بندی دو ماسه

Fig. 3. Particle size distribution of sands

تحقیق، درصد کربنات معادل ماسه‌ها بر اساس استاندارد BS-1377 تعیین شد (جدول ۱). در این جدول، سایر مشخصات فیزیکی دو ماسه مانند توده ویژه، نسبت منافذ کمینه و بیشینه، ضرایب انحاء و یکنواختی و همچنین نتیجه طبقه‌بندی خاک مربوطه ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است، خاک چاپهار در طبقه‌بندی یونیفاید زیرمجموعه ماسه‌هایی با دانه‌بندی یکنواخت طبقه‌بندی می‌شود.

۳- آماده سازی نمونه‌ها و برنامه انجام آزمایش‌ها

تعداد ۲۸ عدد آزمایش سه‌محوری مونوتونیک در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام گرفت. نمونه‌ها با دو چگالی نسبی ۲۰ و ۸۰ درصد (قبل از تحکیم) به روش ریزش خشک ساخته شدند.

جدول ۲: مشخصات و تعداد آزمایش‌های انجام شده

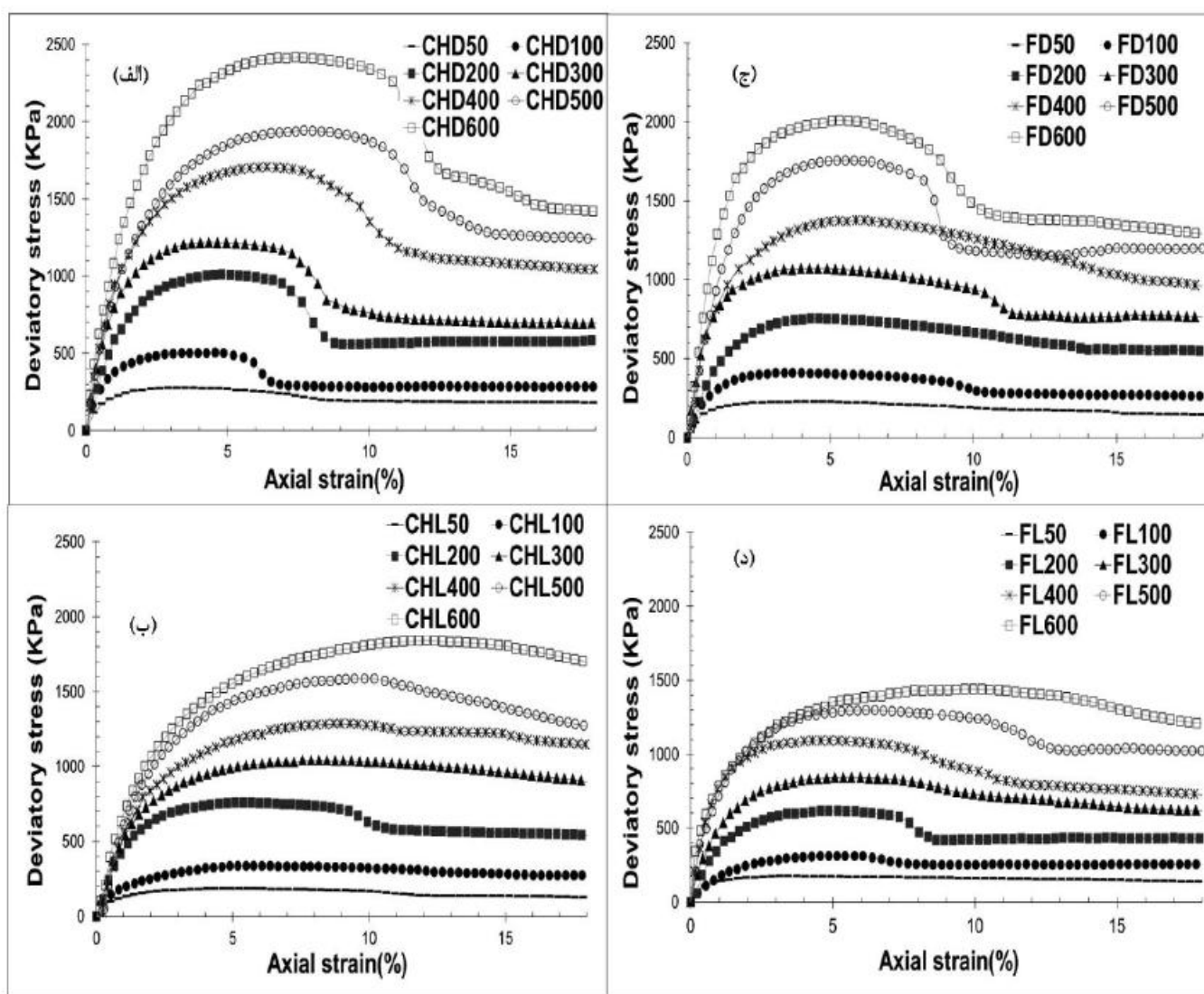
Table 2. Characteristics and the number of the performed tests

D_r (%)	σ_3 (kPa)	علامت آزمایش	D_r (%)	σ_3 (kPa)	علامت آزمایش	ماسه
۲۰	۵۰	CHL50	۸۰	۵۰	CHD50	چاپهار
	۱۰۰	CHL100		۱۰۰	CHD100	
	۲۰۰	CHL200		۲۰۰	CHD200	
	۳۰۰	CHL300		۳۰۰	CHD300	
	۴۰۰	CHL400		۴۰۰	CHD400	
	۵۰۰	CHL500		۵۰۰	CHD500	
۲۰	۶۰۰	CHL600	۸۰	۶۰۰	CHD600	فیروزکوه
	۵۰	FL50		۵۰	FD50	
	۱۰۰	FL100		۱۰۰	FD100	
	۲۰۰	FL200		۲۰۰	FD200	
	۳۰۰	FL300		۳۰۰	FD300	
	۴۰۰	FL400		۴۰۰	FD400	
۲۰	۵۰۰	FL500	۸۰	۵۰۰	FD500	فیروزکوه
	۶۰۰	FL600		۶۰۰	FD600	

۴- رابطه بین تنش انحرافی و کرنش محوری

نمودارهای تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری در شکل ۴ ارائه شده‌اند. این نمودارها نشان می‌دهند که افزایش تنش همه‌جانبه و افزایش چگالی سبب بالا رفتن مقاومت برشی بیشینه در هر دو ماسه خواهد شد. مقاومت برشی بیشینه در شرایط یکسان از لحاظ تنش همه‌جانبه، چگالی نسبی و دانه‌بندی در شرایط زهکشی شده برای ماسه کربناته چابهار بیش از ماسه کوارتزی فیروزکوه است. علت این موضوع بیشتر ناشی از شکل دانه‌های ماسه‌های چابهار است. شکل صفحه‌ای و سوزنی ماسه‌های کربناته سبب می‌شود تا اثر قفل و بست در این خاک بیشتر از ماسه فیروزکوه با دانه‌های حجمی و مکعبی شکل باشد.

نمونه‌ها به شکل استوانه و به قطر ۳/۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۷/۶ سانتی‌متر انتخاب شدند. برای ایجاد نمونه‌هایی همگن، خاک به سه لایه تقسیم شده و هر لایه نیز به صورت جداگانه با نسبت وزنی مشخص به داخل قالب ریخته شده و با وارد آوردن ضربه‌های ملایم به قالب نمونه توسط چکش پلاستیکی ساخته شدند. نمونه‌ها به صورت اشباع آزمایش شدند. برای تسریع عمل اشباع نمونه، اقدام به عبور گاز دی‌اکسید کربن قبل از عبور آب مقطر از نمونه از آن شده و با اعمال فشاری در حدود ۲۰۰ کیلو پاسکال اشباع شدند. آزمایش‌ها تحت تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلو پاسکال انجام گرفت. در جدول ۲ تعداد، مشخصات و کد آزمایش‌های سه‌محوری ارائه شده است.



شکل ۴: تغییرهای تنش انحرافی در برابر کرنش محوری؛ (الف) ماسه چابهار متراکم، (ب) ماسه چابهار سست، (ج) ماسه فیروزکوه متراکم و (د) ماسه فیروزکوه سست

Fig. 4. Variation of deviator stress versus axial strain; (a) Chabahar dense sand, (b) Chabahar loose sand, (c) Firouzkoeh dense sand, (d) Firouzkoeh loose sand

۵- رابطه بین تنش و اتساع

رو در سال ۱۹۶۲ برای یک ماسه سیلیکاته تحت آزمایش سه محوری با فرض آن که تمامی ذرات در یک جهت می لغزند، رابطه ۱ را ارائه کرد:

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \left(1 + \frac{d \varepsilon_v}{d \varepsilon_1}\right) \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi_\mu}{2}\right) \quad (1)$$

که در آن، σ'_1 تنش اصلی بیشینه، σ'_3 تنش اصلی کمینه، $d\varepsilon_v$ تغییرهای نموی کرنش حجمی (اتساع مثبت)، $d\varepsilon_1$ تغییرهای نموی کرنش محوری (فشاری مثبت) و φ_μ زاویه اصطکاک داخلی بین ذرات است.

رابطه ۱ بر اساس اصل کمینه کار انجام شده بر روی خاک توسط تنش σ'_1 نسبت به کار انجام شده توسط تنش σ'_3 حاصل شده است. معمولاً ماسه‌ها تحت آزمایش سه محوری در جهتی که نرخ انرژی داخلی جذب شده کمینه باشد، می لغزند [۱۱].

رو با استفاده از نتایج تجربی دریافت که مقدار φ_μ در رابطه ۱ باید با مقدار φ_r جایگزین شود که بین زاویه اصطکاک در چگالی نسبی بیشینه و زاویه اصطکاک در حجم ثابت (φ_{cr}) متغیر است. اختلاف بین φ_r و φ_{cr} به خاطر انرژی صرف شده در فرآیند آرایش مجدد دانه‌ها است. به عبارتی دیگر، زاویه اصطکاک داخلی دانه‌های خاک بدون در نظر گرفتن اثر اتساع و انرژی صرف شده برای شکست دانه‌ها است.

کولیانت و دانگس^۱ در سال ۱۹۸۸ نشان دادند که نظریه رو برای ماسه‌های کربناته با دانه‌های شکننده تحت تنش‌های همه‌جانبه کم (تنش‌هایی که خردشوندگی اتفاق نمی افتد) با رفتار خاک انطباق خوبی دارد [۲۲]. در حالی که این رابطه در تنش‌های همه‌جانبه بالا نیازمند اصلاح‌هایی به شکل رابطه ۲ است:

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \left(1 + \frac{d \varepsilon_v}{d \varepsilon_1}\right) \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi_f}{2}\right) + \left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_0 \quad (2)$$

که در آن، $(\sigma'_1/\sigma'_3)_0$ عرض از مبدا محور (σ'_1/σ'_3) در هنگامی که جمله $(1 + d\varepsilon_v/d\varepsilon_1) = 0$ باشد، است.

همچنین یونگ و چن در سال ۲۰۰۰ با استفاده از اصل کار کمینه برای ماسه‌هایی با دانه‌های شکننده، رابطه رو را به صورت رابطه ۳ اصلاح کردند:

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \left(1 + \frac{d \varepsilon_v}{d \varepsilon_1}\right) \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi_f}{2}\right) + \frac{dE_B}{\sigma'_3 d \varepsilon_1} (1 + \sin \varphi_f) \quad (3)$$

که در آن، dE_B نمو انرژی صرف شده برای خرد شدن دانه‌ها بوده و φ_f زاویه اصطکاک داخلی بدون در نظر گرفتن اثر اتساع و شکست دانه‌ها است.

با توجه به نظریه اصلاح شده رو برای ماسه‌هایی با دانه‌های خردشونده بر اساس مفهوم انرژی (رابطه ۳)، می‌توان نشان داد که مقاومت برشی ماسه‌ها از سه مؤلفه اصطکاک ذاتی، اثر اتساع و شکستگی دانه‌ها تشکیل شده است [۱۱].

۶- تغییرهای زاویه اصطکاک داخلی در نقطه بیشینه

تغییرهای زاویه اصطکاک داخلی در نقطه بیشینه تنش انحرافی (φ_p) در برابر تنش‌های همه‌جانبه، در شکل ۵ نشان داده شده است. این زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده است.

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi_p}{2}\right) \quad (4)$$

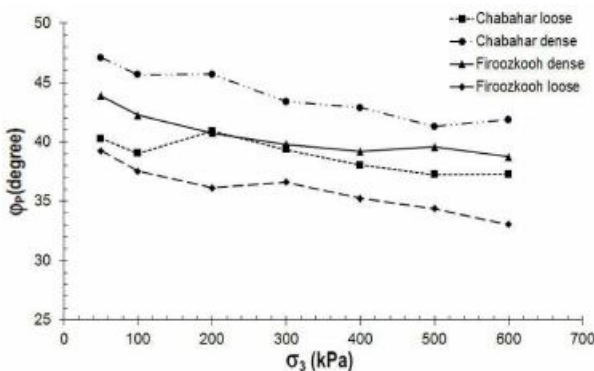
در رابطه ۴، φ_p بیانگر زاویه اصطکاک داخلی در نقطه بیشینه تنش انحرافی با احتساب اثر اتساع و شکست دانه‌ها است. با توجه به شکل ۵ با افزایش تنش همه‌جانبه (تنش تحکیم اولیه)، مقدار زاویه اصطکاک داخلی بیشینه (φ_p) در هر دو ماسه چابهار و فیروزکوه کاهش می‌یابد. در حالت کلی، مقدار زاویه اصطکاک داخلی ماسه چابهار تحت تنش‌های همه‌جانبه و چگالی نسبی یکسان به طور قابل ملاحظه‌ای بیش از ماسه فیروزکوه است.

به طور کلی با افزایش تنش همه‌جانبه، امکان فرار دانه‌های ماسه زیر بار برشی اعمالی کاهش یافته و این موضوع سبب خردشدگی و گردگوشگی در دانه‌های ماسه شده و موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی ماسه‌ها می‌شود. ماسه کربناته به دلیل جنس ضعیف‌تر دانه‌ها و امکان خردشدگی بیشتر، با افزایش تنش همه‌جانبه دچار کاهش بیشتری در زاویه اصطکاک داخلی می‌شود.

در شکل ۶، کرنش نظیر نقطه بیشینه تنش انحرافی در برابر تنش همه‌جانبه رسم شده است. با وجود آن که مقاومت برشی ماسه چابهار بیشتر است، اما با افزایش تنش همه‌جانبه کرنش نظیر نقطه بیشینه تنش تحت تنش‌های همه‌جانبه و چگالی نسبی یکسان در آن بیشتر است. این موضوع، در حالت سست محسوس‌تر است. به عبارتی دیگر، بسیج مقاومت برشی بیشینه در ماسه کربناته نیاز به تغییر شکل بیشتری دارد.

۷- زاویه اتساع ماسه‌ها

به طور کلی، زاویه اتساع به صورت $\psi = \varphi_p - \varphi_\mu$ است که در آن،



شکل ۵: زاویه اصطکاک داخلی کل در برابر تنش‌های همه‌جانبه

Fig. 5. Internal peak friction angle versus confining pressure

¹ Colliat & Dongus

دانه‌ها افزایش خواهد داد.

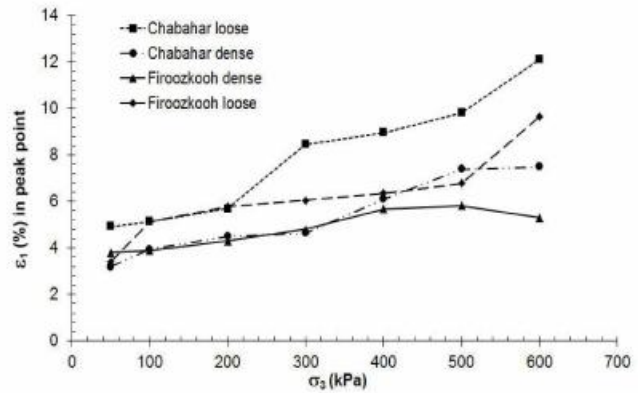
آیری و همکاران در سال ۱۹۸۸ با اصلاح رابطه بولتن برای ماسه‌های کربناته، رابطه ۵ را بین زاویه اصطکاک داخلی بیشینه (در نقطه بیشینه) و حجم ثابت ارائه کردند [۵،۱۰]:

$$\phi_{max} - \phi_{ev} = 16.67 \left(\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \right)_{max} \quad (5)$$

که در آن، $(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{max}$ نرخ اتساع در نقطه بیشینه مقاومت، ϕ_{ev} زاویه اصطکاک در حالت بحرانی و $\phi_{max} - \phi_{ev} = \psi$ ، بیشینه زاویه اتساع است.

با توجه به رابطه ۵، نمودار تغییرات ψ بر حسب $(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{max}$ در شکل ۸ ارائه شده است و روابط اقتباس شده از آن‌ها نیز بیان شده‌اند. حسنلوراد و همکاران در سال ۲۰۱۳ نیز با انجام آزمایش‌های سه‌محوری بر روی ماسه‌های کربناته خلیج فارس (هرمز، کیش و تنبک) و ماسه راک (حاصل از جنوب انگلستان)، روابط مشابهی را ارائه کردند (جدول ۳) [۱۹].

ضریب پشت عبارت $(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{max}$ در رابطه بدست‌آمده برای ماسه کربناته چابهار (۱۶/۸۸) با تقریب خوبی نزدیک به سایر ماسه‌های کربناته تحقیق شده توسط سایر محققان است. ضریب بدست‌آمده برای ماسه کوارتزی فیروزکوه (۱۸/۱۹) تفاوت زیادی را با ماسه‌های کربناته دارد و



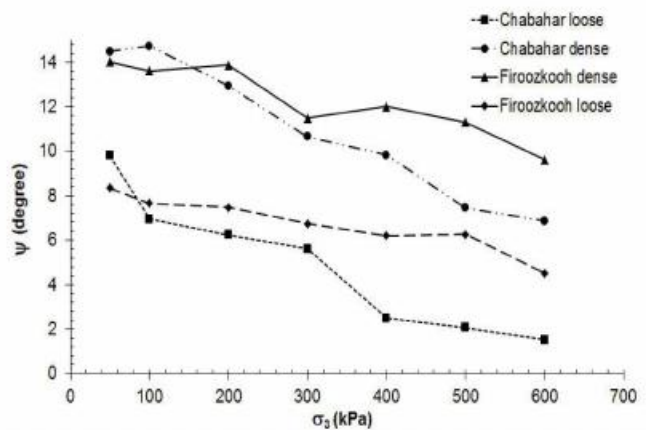
شکل ۶: کرنش متناظر با بسیج مقاومت بیشینه

Fig. 6. Axial strain at peak point versus confining stress

زاویه ϕ_p بیانگر زاویه اصطکاک داخلی بیشینه (حاصل از رابطه ۴) و ϕ_{μ} نشان‌دهنده زاویه اصطکاک بدون در نظر گرفتن اثر اتساع (حاصل از رابطه ۱) تعریف می‌شود.

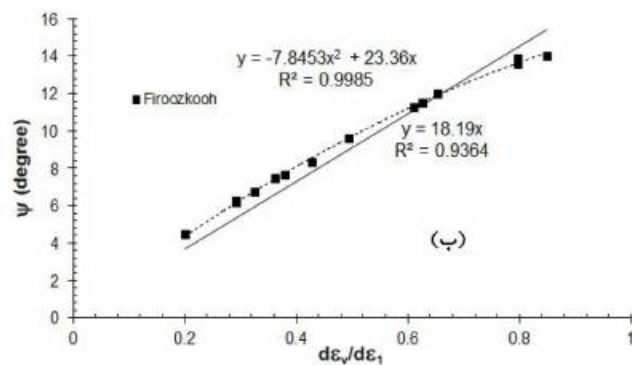
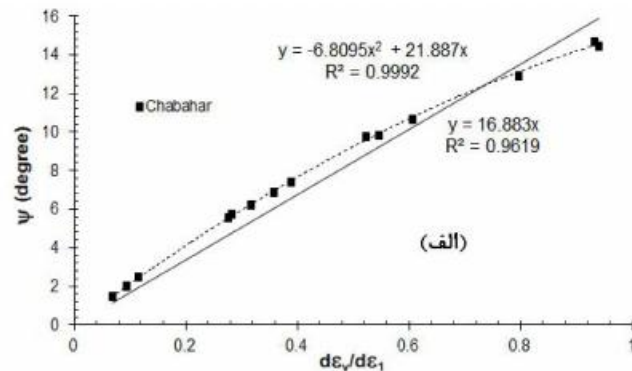
تغییرهای زاویه اتساع با تنش‌های همه‌جانبه برای هر دو ماسه در حالت سست و متراکم، در شکل ۷ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که رفتار عمومی هر دو ماسه در هر دو حالت سست و متراکم در محدوده تنش‌های همه‌جانبه بررسی شده، همواره اتساعی بوده و دلیل این موضوع، یکنواخت بودن دانه‌ندی هر دو ماسه است.

با توجه به شکل ۷ مقدار زاویه اتساع در ماسه چابهار در تنش‌های همه‌جانبه کم، بیشتر از ماسه فیروزکوه است. با افزایش تنش همه‌جانبه در هر دو ماسه، مقدار زاویه اتساع کاهش می‌یابد. اما نرخ کاهش آن در ماسه چابهار شدیدتر خواهد بود. در واقع، افزایش تنش‌های همه‌جانبه در ماسه کربناته به دلیل اثر خردشدگی دانه‌ها، مقدار اتساع را بیشتر کاهش می‌دهد. افزایش چگالی نسبی نیز مقدار زاویه اتساع را به دلیل قفل و بست بیشتر



شکل ۷: زاویه اتساع در برابر تنش‌های همه‌جانبه

Fig. 7. Dilation angle versus confining pressure



شکل ۸: زاویه اتساع در برابر نسبت نرخ کرنش حجمی به کرنش محوری در نقطه بیشینه

Fig. 8. Dilation angle versus volumetric to axial strain ratio at peak point

جدول ۳: روابط خطی و غیرخطی بین زاویه اتساع و نسبت نرخ کرنش حجمی به کرنش محوری بیشینه

Table 3. Relations between the dilation angle and volumetric to axial strain ratio at peak point

مؤلفان	معادله خطی	معادله غیرخطی	ماسه
آیری و همکاران (۱۹۸۸)	$\psi=16.67(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}$	-	ماسه کربناته
حسنلوواد و همکاران (۲۰۱۲)	$\psi=16.77(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}$	$\psi=21.4(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}-8.2(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}^2$	ماسه کربناته (راک، کیش، هرمز و تنبک)
تحقیق حاضر	$\psi=16.88(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}$	$\psi=21.89(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}-6.81(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}^2$	ماسه کربناته (چابهار)
تحقیق حاضر	$\psi=18.19(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}$	$\psi=23.36(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}-7.85(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{\max}^2$	ماسه کوارتزی (فیروزکوه)

نمودار افزایش یابد. همچنین از شکل ۱۰ نتیجه می شود که دامنه تغییرهای مؤلفه اتساعی $(1+d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)$ برای ماسه کربناته چابهار (۱/۹۶ تا ۱/۰۶) بیش از ماسه کوارتزی فیروزکوه (۱/۰۲ تا ۱/۸۶) است.

چن و یوانگ در سال ۲۰۰۰ برای ماسه‌هایی با دانه‌های خردشونده تحت بارهای برشی، دریافتند که جهت لغزش دانه‌ها تحت تأثیر مقدار انرژی صرف شده برای شکست دانه‌ها خواهد بود. در حالی که جهت لغزش دانه‌ها برای ماسه کوارتزی به سمتی است که نسبت تنش‌های اصلی مؤثر به صورت کمینه باشد [۱۱].

برای محاسبه مقدار انرژی صرف شده برای شکستن دانه‌ها، مؤلفه I_B به صورت رابطه ۷ تعریف می شود [۱۱]:

به نظر می رسد که این ضریب، وابسته به میزان خردشدگی دانه‌ها است. هر اندازه که میزان خردشدگی ذرات بیشتر باشد، این ضریب کوچکتر و به عدد ۱۶ نزدیکتر می شود. با این حال به نظر می رسد که با توجه به شکل ۸، ارائه معادلات به صورت درجه دوم همخوانی بهتری با نتایج بدست آمده از آزمایشگاه دارد (جدول ۳).

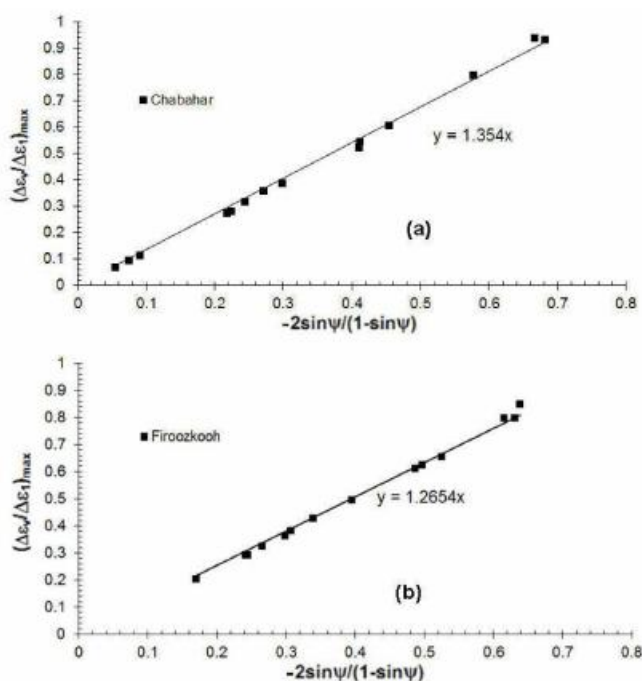
دانو و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۴ با انجام آزمایش سه محوری بر روی چند نمونه ماسه کوارتزی، نشان دادند که زاویه اتساع بیشینه با شیب نمودار $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ در کرنش‌های معادل نقطه بیشینه تنش، دارای رابطه‌ای مانند رابطه ۶ است [۲۲]:

$$\left(\frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\varepsilon_1}\right)_{\max} = \left(\frac{-2\sin\psi}{1-\sin\psi}\right) \quad (6)$$

با توجه به رابطه ۶، تغییرهای $\Delta\varepsilon_v/\Delta\varepsilon_1$ در برابر $-2\sin\psi/(1-\sin\psi)$ برای ماسه‌های مورد تحقیق در این مقاله، در شکل ۹ ارائه شده‌اند. با توجه به شکل ۹ و جدول ۴ برای هر دو ماسه چابهار و فیروزکوه، می توان روابطی مشابه با رابطه ۶ ارائه داد. تنها تفاوت موجود بین روابط این تحقیق و سایر محققان، مربوط به ضریب در پشت عبارت $-2\sin\psi/(1-\sin\psi)$ است که دلیل این امر، تفاوت در میزان خردشدگی ذرات ماسه خواهد بود. با توجه به جدول ۴، ضریب مذکور برای ماسه کوارتزی فیروزکوه (۱/۲۶۵) کوچکتر از ماسه کربناته چابهار (۱/۳۵۴) است.

۸- مقاومت برشی و اثر خردشدگی دانه‌ها

در شکل ۱۰ تغییرهای نسبت تنش‌های اصلی مؤثر (σ'_1/σ'_3) در برابر مؤلفه اتساع $(1+d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)$ برای آزمایش‌های انجام شده از تنش همه‌جانبه ۵۰ تا ۶۰۰ کیلو پاسکال نشان داده شده است. در این شکل، مشاهده می شود که نسبت σ'_1/σ'_3 برای ماسه کربناته چابهار بیش از ماسه کوارتزی فیروزکوه است. با توجه به شکل ۱۰، رابطه رو همخوانی بیشتری با معادله بدست آمده برای ماسه فیروزکوه دارد. زیرا رابطه رو برای ماسه‌های با دانه‌های صلب بیان شده است. عرض از مبدأ نمودار برابر با صفر است. در واقع، شکندگی دانه‌های ماسه چابهار سبب شده است تا مقدار عرض از مبدأ



شکل ۹: ارتباط نسبت کرنش حجمی به کرنش محوری در نقطه بیشینه در برابر عبارت اتساع

Fig. 9. Volumetric to axial strain ratio versus dilation parameter at peak pint

¹ C. Danu

جدول ۴: روابط بین نسبت نرخ کرنش حجمی به کرنش محوری بیشینه و زاویه اتساع

Table 4. Relations between the volumetric to axial strain ratio and dilation angle

مؤلف	رابطه خطی	ماسه
دائر و همکاران (۲۰۰۴)	$(\Delta\varepsilon_v/\Delta\varepsilon_1)_{\max} = [-2\sin\psi/(1-\sin\psi)]$	رابطه نظری
حسنلوراد و همکاران (۲۰۱۳)	$(\Delta\varepsilon_v/\Delta\varepsilon_1)_{\max} = 1.45[-2\sin\psi/(1-\sin\psi)]$	کیش، هرمز، تنبک، راک
تحقیق حاضر	$(\Delta\varepsilon_v/\Delta\varepsilon_1)_{\max} = 1.35[-2\sin\psi/(1-\sin\psi)]$	چابهار
تحقیق حاضر	$(\Delta\varepsilon_v/\Delta\varepsilon_1)_{\max} = 1.26[-2\sin\psi/(1-\sin\psi)]$	فیروزکوه

مقدار I_B برای دو ماسه مورد تحقیق، در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به این جدول، مقدار I_B برای هر دو ماسه کمتر از ۱ است. اما مقدار این مؤلفه برای ماسه کربناته چابهار با دانه‌های شکننده بزرگتر است. با توجه به رابطه ۳ و شکل ۱۰ می‌توان مقدار انرژی صرف‌شده برای شکستن دانه‌ها در نقطه اوج (ΔE_B) و مقدار انرژی کل وارده به نمونه (ΔE_T) را به صورت رابطه ۹ محاسبه نمود:

$$\Delta E_B = \frac{b \sigma'_3 \Delta \varepsilon_1}{1 + \sin \varphi_f} \quad (9)$$

مؤلفه b برابر با عرض از مبدأ در شکل ۱۰ است و برای ماسه چابهار برابر با ۱/۲۹۹ و برای ماسه فیروزکوه برابر با ۰/۳۹۹ است. همچنین مقدار φ_f زاویه اصطکاک داخلی بدون در نظر گرفتن مقدار اتساع و اثر شکستن دانه‌ها است.

با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۸ می‌توان زاویه اصطکاک داخلی را بدون در نظر گرفتن اثر اتساع و شکستگی دانه‌ها (φ_f) بدست آورد. این مقدار، برای ماسه چابهار برابر با ۲۵/۸۶ درجه و برای ماسه فیروزکوه برابر با ۲۶/۳۴ درجه است. اختلاف مقادیر مذکور با زاویه اصطکاک داخلی بدست‌آمده از رابطه ۱ (φ_μ) ، سهم شکستگی دانه‌ها $(\beta = \varphi_\mu - \varphi_f)$ از زاویه اصطکاک داخلی کل (φ_p) را در نقطه بیشینه نشان می‌دهد.

شکل ۱۱ تغییرهای سهم شکستگی دانه‌ها از زاویه اصطکاک داخلی کل (β) را در برابر تنش‌های همه‌جانبه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، روشن است که سهم شکستگی دانه‌ها از زاویه اصطکاک داخلی کل برای نمونه‌های کربناته بیش از نمونه‌های کوارتزی است. همچنین مقدار β در حالت سست بیش از حالت متراکم است که این موضوع، نشان‌دهنده شکستگی بیشتر دانه‌ها در حالت سست است. علاوه بر این با افزایش تنش همه‌جانبه در ماسه کربناته چابهار، سهم شکستگی دانه‌ها از مقدار زاویه اصطکاک داخلی کل افزایش می‌یابد؛ در حالی که در ماسه فیروزکوه با افزایش تنش همه‌جانبه به دلیل سختی بیشتر دانه‌ها، سهم شکستگی از زاویه اصطکاک داخلی کل روند تقریباً ثابتی دارد. در واقع، شکستگی دانه‌ها در محدوده تنش‌های همه‌جانبه مطالعه‌شده در ماسه فیروزکوه چندان محسوس و متغیر نیست.

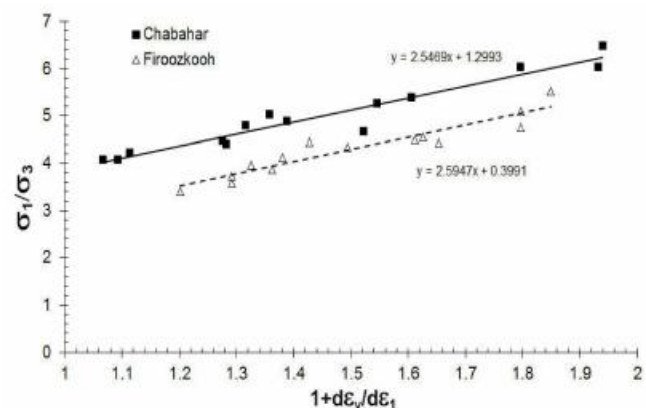
$$I_B = \frac{dE_{bi}}{F_{3i} dy_i} \quad (7)$$

که در آن، dE_{bi} انرژی صرف‌شده برای شکستن دانه در نقطه i و dy_i جابه‌جایی در راستای تنش σ'_1 در نقطه i و F_{3i} نیرو در جهت σ'_3 و در نقطه i است.

مقدار مؤلفه I_B را می‌توان از رابطه ۸ تخمین زد:

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3 \left(1 + \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}\right)} = \frac{\tan(\beta_c + \varphi_\mu)}{\tan \beta_c} + \frac{I_B}{\tan \beta_c (1 - \tan \beta_c \cdot \tan \varphi_\mu)} \quad (8)$$

در رابطه ۸، β_c زاویه بین جهت لغزش دانه و تنش اصلی بیشینه است. برای ماسه‌هایی با دانه‌های شکننده ثابت نیست و با افزایش شکستگی دانه‌ها، افزایش می‌یابد. I_B مؤلفه‌ای است که میزان شکست دانه‌ها را نشان می‌دهد. در صورتی که $I_B < 1$ باشد، فرض مقدار $\beta_c = 45^\circ - \varphi_\mu/2$ قابل قبول خواهد بود و φ_μ نیز از رابطه ۱ بدست خواهد آمد [۱۱].



شکل ۱۰: نسبت تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه در برابر مؤلفه اتساع

Fig. 10. Maximum and minimum principal stress ratio versus dilation parameter

جدول ۵: مؤلفه I_B برای ماسه‌های مطالعه‌شده و چند مورد دیگر حاصل از نتایج محققان دیگر

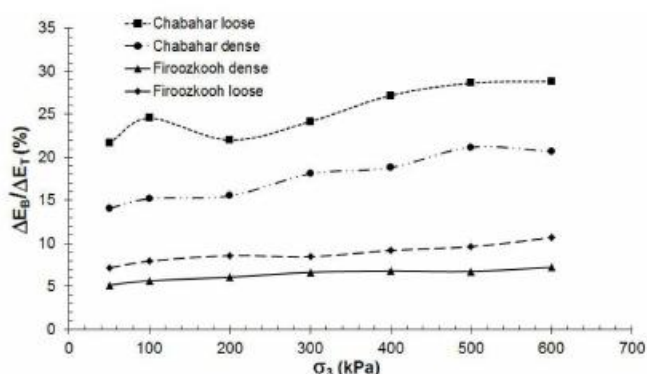
Table 5. I_B parameter for the studied sands and some other samples obtained from previous researches

نویسنده	I_B	σ_3 (kPa)	D_r (%)	ماسه
لی و سید (۱۹۶۷)	۰/۷۵	۱۲۷۰۰	-	ماسه اتاوا و ماسه سکرانتو
میورا و اوهارا (۱۹۷۹)	۰/۰۳-۰/۳۶	۱۰-۲۹۴	-	سنگ گرانیت متلاشی شده
یونگ و چن (۲۰۰۰)	۰/۰۲-۰/۲۲	۴۸-۷۶۵	۵۰-۷۵	ماسه فولانگ
یونگ و چن (۲۰۰۰)	۰/۰۳-۰/۶۳	۴۸-۷۶۵	۷۵، ۵۰، ۳۱	ماسه رودخانه تام سوی
حسنلوراد و همکاران (۲۰۱۲)	۰/۱۹-۰/۲۸	۵۰-۶۰۰	۸۰، ۲۰	ماسه جزیره کیش
حسنلوراد و همکاران (۲۰۱۲)	۰/۲۷-۰/۳۷	۵۰-۶۰۰	۲۰	ماسه تنبک (درشت)
حسنلوراد و همکاران (۲۰۱۲)	۰/۲۷-۰/۴۴	۵۰-۶۰۰	۸۰، ۲۰	ماسه تنبک (ریز)
حسنلوراد و همکاران (۲۰۱۲)	۰/۱۱-۰/۲۲	۵۰-۶۰۰	۸۰، ۲۰	ماسه هرمز
حسنلوراد و همکاران (۲۰۱۲)	۰/۱-۰/۲۲	۵۰-۶۰۰	۸۰، ۲۰	ماسه راک
تحقیق حاضر	۰/۲۹-۰/۳۵	۵۰-۶۰۰	۸۰، ۲۰	ماسه چاپهار
تحقیق حاضر	۰/۰۹-۰/۱۴	۵۰-۶۰۰	۸۰، ۲۰	ماسه فیروزکوه

که این تغییرها برای ماسه کوارتزی فیروزکوه تقریباً ثابت است. نسبت سهم شکستگی دانه‌ها از زاویه اصطکاک داخلی به مقدار زاویه اصطکاک داخلی کل (β/φ_p) در برابر نمو انرژی صرف شده برای شکستگی دانه‌ها به نمو انرژی کل ($\Delta E_B/\Delta E_T$) در نقطه تنش بیشینه، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نسبت β/φ_p با نسبت $\Delta E_B/\Delta E_T$ رابطه‌ای خطی دارد. به طور کلی، سهم شکست دانه‌ها (β) از φ_p برای ماسه چاپهار بیشتر از ماسه فیروزکوه است. برای هر دو ماسه با افزایش $\Delta E_B/\Delta E_T$ ، نسبت β/φ_p افزایش یافته است. اما نرخ افزایش آن

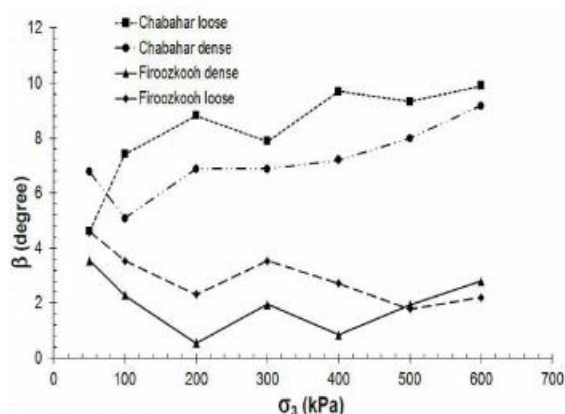
در شکل ۱۲ تغییرهای نسبت انرژی صرف شده برای شکستن دانه‌ها به کل انرژی صرف شده در داخل نمونه با افزایش تنش همه‌جانبه برای نقطه بیشینه نشان داده شده و ملاحظه می‌شود که این نسبت در نمونه‌های سست بیش از نمونه‌های متراکم است.

در واقع، در حالت سست به دلیل کمبودن سطح تماس دانه‌ها و افزایش تنش تماسی، شکستگی بیشتری اتفاق خواهد افتاد. با بررسی این نمودارها، مشخص می‌شود که افزایش تنش همه‌جانبه سبب بالا رفتن سهم انرژی شکستگی دانه‌ها از انرژی کل در ماسه کریناته چاپهار شده است؛ در حالی



شکل ۱۲: نسبت انرژی صرف شده برای شکستگی دانه‌ها به انرژی کل در برابر تنش‌های همه‌جانبه

Fig. 12. Consumed energy for particle breakage to total applied energy versus confining pressure



شکل ۱۱: سهم شکستگی دانه‌ها از زاویه اصطکاک داخلی کل

Fig. 11. Particle breakage angle versus confining pressure

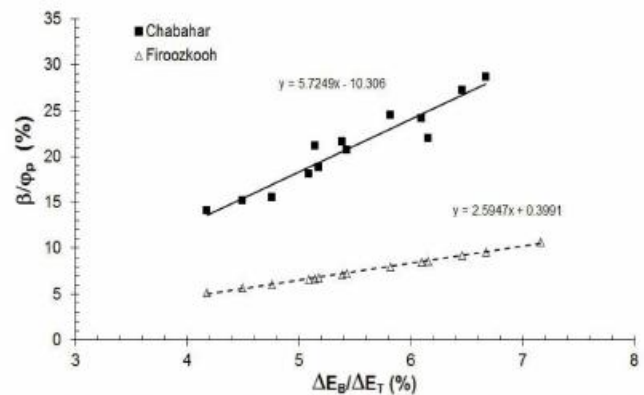
ث) در انتها ملاحظه شد که ارتباطی خطی بین نسبت انرژی صرف شده برای شکستگی دانه‌ها به کل انرژی اعمالی و نسبت سهم شکستگی دانه‌ها از زاویه اصطکاک داخلی کل در هر دو ماسه‌ها وجود دارد.

پایوست: جدول علائم و اختصارها

علائم و اختصارهای بکاررفته در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

مراجع

- [1] D. W., Taylor; Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York, 1948.
- [2] P. L., Newland; B. H., Allely; Volume Changes in Drained Triaxial Tests on Granular Materials, *Geotechnique*, Vol. 7, No. 1, pp. 17-34, 1957.
- [3] P. W., Rowe; The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, The Royal Society, Vol. 269, No. 1339, 1962.
- [4] K. L., Lee; H. B., Seed; Drained Strength Characteristics of Sand, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 93, No. SM6, pp. 117-141, 1967.
- [5] M. D., Bolton; The Strength and Dilatancy of Sands, *Geotechnique*, Vol. 36, No. 1, pp. 65-78, 1986.
- [6] N., Miura; S., O-hara; Particle-crushing of a Decomposed Granite Soil under Shear Stress, *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 3, pp. 1-14, 1979.
- [7] I., Noorany; Classification of Marine Sediments, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 115, No. 1, pp. 23-37, 1989.
- [8] T. S., Ueng; Y. M., Tzou; C. J., Lee; The Effect of End Resistant on Volume Change and Particle Breakage of Sands in Triaxial Tests, *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP-977*, pp. 679-691, 1988.
- [9] B., Indraratna; W., Salim; Modeling of Particle Breakage of Coarse Aggregate Incorporating Strength and Dilatancy, *Journal of Geotechnical Engineering, ICE*, Vol. 155, No. 4, pp. 243-252, 2002.
- [10] D. W., Airey; M. F., Randolph; A. M., Hyden; The Strength and Stiffness of Two Calcareous Sands, *1st International Conference on Calcareous Sediments, Perth, Australia*, Vol. 1, 1988.
- [11] T. S., Ueng; T. J., Chen; Energy Aspects of Particle Breakage in Drained Shear of Sands, *Geotechnique*, Vol. 50, No. 1, pp. 65-72, 2000.
- [12] L., Luzzani; M. R., Coop; On the Relationship between Particle Breakage and Critical State of Sands, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 2, pp. 77-82, 2002.



شکل ۱۳: نسبت انرژی صرف شده برای شکستگی دانه‌ها به انرژی کل در برابر نسبت سهم شکستگی دانه‌ها از زاویه اصطکاک داخلی کل
Fig. 13. Particle breakage angle to peak internal friction angle versus consumed energy for particle breakage to total applied energy

برای ماسه چابهار بیشتر از ماسه فیروزکوه است. این شکل، نشان می‌دهد که پراکنندگی داده‌های مربوط به ماسه کربناته بیشتر از ماسه کوارتزی است. امکان دارد که این موضوع به علت تأثیر کم قابلیت خردشدگی دانه‌ها در ماسه کوارتزی و رفتار ساده‌تر آن باشد.

۹- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده بر روی دو نمونه ماسه کربناته و کوارتزی و بر اساس مفاهیم انرژی، نتایج زیر بدست آمد:

الف) مقاومت برشی ماسه کربناته بیشتر از ماسه کوارتزی است. اما به منظور بسیج کامل آن در ماسه کربناته، نیاز به اعمال تغییر شکل‌های بیشتری وجود خواهد داشت.

ب) ماسه‌های انتخابی به دلیل یکنواختی دانه‌ها حتی در حالت سست تا تنش‌های همه‌جانبه ۶۰۰ کیلو پاسکال، رفتار اتساعی داشتند و همچنین افزایش تنش‌های همه‌جانبه منجر به کاهش اتساع شد. نرخ کاهش اتساع در ماسه کربناته به دلیل شکننده بودن دانه‌های آن، شدیدتر از ماسه کوارتزی بود.

پ) سهم اتساع در ماسه کوارتزی و نیز سهم شکستگی دانه‌ها، در ماسه کربناته بیشتر است. افزایش تنش‌های همه‌جانبه منجر به کاهش سهم اتساع و همچنین افزایش سهم شکستگی دانه‌ها می‌شود.

ت) بخشی از انرژی اعمالی به نمونه در حین بارگذاری، صرف شکستگی دانه‌ها خواهد شد و نرخ این انرژی با افزایش تنش‌های همه‌جانبه افزایش خواهد یافت. در ماسه کربناته با قابلیت شکستگی بیشتر دانه‌ها در حدود ۱۴ تا ۳۱ درصد و در ماسه کوارتزی در بیشترین حالت، ۱۰ درصد انرژی اعمالی صرف شکستگی دانه‌ها می‌شود.

163, 2004.

- [14] A. R., Russell; N., Khalili; A Bounding Surface Plasticity Model for Sands Exhibiting Particle Crushing, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 6, pp. 1179-1192, 2004.
- [15] M., Hassanlourad, Triaxial Shear Behavior of Non-Cemented and Chemically Grouted Carbonate Sands, Ph.D. Thesis, Iran University of Science and Technology, 2008.
- [16] H. W., Chandler; A Plasticity Theory without Drucker's Postulate, Suitable for Granular Materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 33, No. 3, pp. 215-226, 1985.
- [17] B., Baharom; S. E., Stallebrass; A Constitutive Model Combining the Microscopic and Macroscopic Behavior of Sands in Shear and Volumetric Deformation, *4th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering Udine, Springer-Verlag Wien*, New York, pp. 263-273, 1998.
- [18] M., Hassanlourad, H., Salehzadeh, H., Shahnazari, Dilation and Particle Breakage on the Volumetric Behavior of Carbonate Sands, *Civil Engineering and Survey Journal*, Vol. 45, No. 4, pp. 411-416, 2011.
- [19] M., Hassanlourad, H., Salehzadeh, H., Shahnazari, Drained Shear Strength of Carbonate Sands Based on Energy Approach, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-9, 2014.
- [20] K., Demars; R., Chaney, Geotechnical Properties, Behavior and Performance of Calcareous Soils, Symposium Summary, *ASTM Special Technical Publication*, No. 777, pp. 395-404, 1982.
- [21] D., Colliat, Triaxial Testing of Granular Soil under Elevated Cell Pressure, *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP-977*, Philadelphia, pp. 290-310, 1988.
- [22] C., Dano; P. Y., Hicher; S., Tailliez; Engineering Properties of Grouted Sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 3, pp. 328-338, 2004.
- [23] M., Hassanlourad, H., Salehzadeh, H., Shahnazari, Drained Shear Strength of Carbonate Sands Based on Energy Approach, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-9, 2014.

جدول ۶: علائم و اختصارهای داخل مقاله

Table 6. Abbreviations and symbols of the paper

عنوان	علامت
چگالی دانه‌های جامد	Gs
ضریب یکنواختی دانه‌بندی	Cu
ضریب انحنای دانه‌بندی	Cc
نسبت تخلخل کمینه	e_{min}
نسبت تخلخل بیشینه	e_{max}
تنش همه‌جانبه تحکیم اولیه	σ_3
تنش اصلی کمینه	σ'_3
تنش اصلی بیشینه	σ'_1
کرنش حجمی	ϵ_v
کرنش محوری	ϵ_1
تغییرهای جزئی کرنش حجمی	$d\epsilon_v$
تغییرهای جزئی کرنش محوری	$d\epsilon_1$
تغییرهای جزئی انرژی صرف‌شده برای خرد شدن دانه‌ها	dE_B
مقدار انرژی صرف‌شده برای شکستن دانه‌ها در نقطه پیک تنش انحرافی	ΔE_B
مقدار انرژی کل داده‌شده به نمونه	ΔE_T
انرژی صرف‌شده برای شکستن دانه در نقطه i	dE_{bi}
جابه‌جایی در راستای تنش σ'_1 در نقطه i	dy_i
نیرو در جهت σ'_3 و در نقطه i	F_{3i}
زاویه بین جهت لغزش دانه و تنش اصلی بیشینه	β_c
نسبت انرژی صرف‌شده برای شکست دانه‌های ماسه	I_B
زاویه اصطکاک داخلی کل در نقطه پیک تنش انحرافی با احتساب اثر اتساع و شکست دانه‌ها	φ_p
زاویه اصطکاک داخلی بین ذرات	φ_μ
زاویه اصطکاک داخلی بدون در نظر گرفتن اثر اتساع و شکست دانه‌ها	φ_f
زاویه اصطکاک داخلی در حجم ثابت	φ_{cv}
زاویه اتساع ماسه‌ها	ψ
تغییرهای سهم شکستگی دانه‌ها از زاویه اصطکاک داخلی کل	β

- [13] M. R., Coop; K. K., Sorensen; T., Bodas; G., Georgoutsos; Particle Breakage During Shearing of a Carbonate Sand, *Geotechnique*, Vol. 54, No. 3, pp. 157-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. R., Rasouli, M., Hassanlourad, "Comparative Study of Carbonate and Quartz Sand Based on Energy Concepts".

Amirkabir J. Civil Eng., 49(1) (2017) 89-99.

DOI: 10.22060/ceej.2016.592

