

## اثر اتساع و شکستگی دانه‌ها بر رفتار حجمی ماسه‌های کربناته

محمود حسنلوراد<sup>۱\*</sup>، حسین صالح زاده<sup>۲</sup> و حبیب شاه نظری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار دانشکده فنی دانشگاه بین الملل امام خمینی (ره)

<sup>۲</sup>استادیار دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۳</sup>استادیار دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۹/۰۹/۲۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۶/۱۴، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۶/۲۸)

### چکیده

در این مقاله رفتار حجمی چهار ماسه کربناته با خصوصیات فیزیکی مختلف در آزمایش‌های سه محوری همسان تحکیم یافته-زهکشی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. تنوع اشکال دانه‌های صفحه‌ای، سوزنی، زاویه‌دار و نیمه زاویه‌دار متخلخل و غیره و اثر متقابل اتساع و انقباض ناشی از خردشدگی دانه‌ها باعث پیچیده شدن رفتار حجمی در این خاک‌ها در حین بارگذاری می‌شود. نتایج آزمایش‌ها بر روی ماسه‌های کربناته مختلف نشان می‌دهد که تا کرنش‌های محوری ۲۰٪، حالت بحرانی واقعی وجود ندارد و تغییر شکل تحت حجم ثابت مشاهده شده در واقع تعادل بین اتساع و انقباض ناشی از خردشدگی دانه‌ها بوده و یک حالت ظاهری و گذرا می‌باشد. با توجه به مقادیر نسبی این دو کمیت، محل حالت بحرانی ظاهری متغیر بوده و به شکل منحنی است و تابع نسبت منافذ اولیه، مقدار اتساع، مقدار شکستگی دانه‌ها و اندازه تنش‌های همه جانبه است.

### واژه‌های کلیدی: ماسه‌های کربناته، خردشوندگی، اتساع، حالت بحرانی

Adrian و همکاران (۲۰۰۴) تشریح شده است بیان

کردند که خط حالت بحرانی در ماسه‌ها در اثر مقادیر متفاوت شکستگی دانه‌ها در ترازهای مختلف تنش متشکل از سه پاره خط با شیب‌های متفاوت خواهد بود [۴]، [۵].

تحقیقات فوق‌الذکر در کنار مشکلات پیش روی مهندسان ژئوتکنیک در برخورد با این خاک‌ها و گستردگی آنها در سواحل خلیج فارس اهمیت شناخت دقیق تر رفتار مهندسی آنها را طلب می‌نماید. لذا در این مقاله اثر کاهش حجم ناشی از شکستگی دانه‌ها و اتساع ناشی از آرایش مجدد آنها و اثر متقابل این دو بر روی رفتار حجمی و حالت بحرانی با استفاده از آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده بر روی چهار ماسه کربناته با خصوصیات فیزیکی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### مصالح

برای انجام آزمایش‌ها چهار ماسه کربناته به نام‌های ماسه کیش، هرمز، تنبک، حاصل از سواحل شمالی خلیج فارس و یک ماسه دیگر به نام ماسه Rock حاصل از جنوب انگلستان مورد بررسی قرار گرفت [۶].

### مقدمه

ماسه‌های کربناته به دلیل نرم و شکننده بودن دانه-هایشان در حین برش دچار شکستگی می‌شوند. شکستن دانه‌ها در حین برش موجب کاهش حجم نمونه و بغرنج شدن مفهوم حالت بحرانی می‌گردد.

فرض بر این است که در حالت بحرانی، ماسه به یک دانه‌بندی پایدار خواهد رسید به طوری که تنش‌های تماسی در بین دانه‌ها برای شکستگی بیشتر دانه‌ها کافی نخواهد بود. در این ارتباط Chandler (۱۹۸۵) و Baharom و Stallebrass (۱۹۹۸) بیان کردند که حالت بحرانی که در آزمایش سه محوری مشاهده می‌گردد در واقع تعادل بین کاهش حجم ناشی از شکستگی دانه‌ها و اتساع ناشی از آرایش مجدد دانه‌ها است [۱]، [۲]. در سال ۲۰۰۲ Luzzani و Coop با انجام آزمایش‌های برش حلقه بر روی دو ماسه (یکی ماسه کوارتزی و دیگری ماسه کربناته) بیان کردند که حالت حجم ثابت در ماسه‌های کربناته در آزمایش‌های سه محوری اثر خنثی‌کنندگی کرنش حجمی ناشی از شکستگی دانه‌ها است که دانه-بندی پایدار حاصل نمی‌شود [۳].

در سال ۲۰۰۲ Russell و Khalili چندین مجموعه آزمایش آزمایشگاهی را انجام دادند که توسط

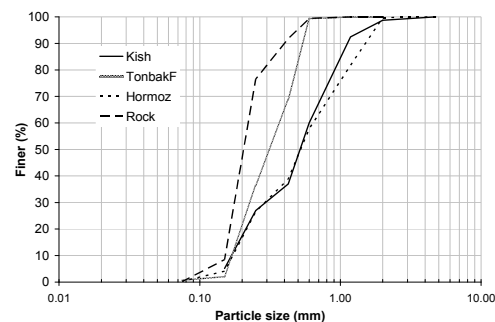
از تحکیم) ۸۰٪ تحت تنش‌های همه جانبه از ۵۰ kPa تا ۶۰۰ kPa انجام گردید. بر روی خاک تنبک ۱۰ آزمایش با دانسیته نسبی اولیه ۲۰٪ و ۸۰٪ هر کدام به تعداد ۵ آزمایش صورت گرفت. برای نشان دادن آزمایش‌ها از حروف اختصاری K, H, T و R به ترتیب برای ماسه‌های کیش، هرمز، تنبک و Rock استفاده شده است. حالت متراکم با D و حالت سست با L و عددی که مقدار تنش‌های همه جانبه را نشان می‌دهد استفاده شده است.

### تغییرات حجمی در حین بارگذاری

کرنش محوری در لحظه انتقال فاز (PT) در برابر تنش‌های همه جانبه برای چهار خاک بررسی شده در دو حالت سست و متراکم در شکل ۲ نشان داده شده است. در واقع در هر چهار ماسه بررسی شده در هر دو حالت سست و متراکم در محدوده تنش‌های همه جانبه تا ۶۰۰ kPa، ابتدا یک بخش انقباض و سپس یک بخش اتساع (حتی در حالت سست) با مقادیر متفاوت در خاک‌ها، دانسیته‌های نسبی و اندازه تنش‌های همه جانبه مختلف ملاحظه گردید. به نحوی که در انتهای آزمایش (کرنش محوری ۲۰٪) یکی از دو حالت اتساع پیوسته و یا انقباض پیوسته رخ می‌دهد.

از شکل ۲ مشاهده می‌گردد که اولاً با افزایش تنش‌های همه جانبه کرنش لحظه انتقال فاز نیز زیاد می‌گردد. به عبارتی دیگر افزایش تنش‌های همه جانبه باعث کاهش بخش اتساع و افزایش بخش انقباض به دلیل اثر تشدید کننده کاهش حجم ناشی از خردشدگی دانه‌ها می‌گردد. ثانیاً نقطه انتقال فاز در نمونه‌های سست نسبت به نمونه‌های متراکم در کرنش‌های بیشتر اتفاق می‌افتد. بدین معنی که بخش انقباض در نمونه‌های سست به دلیل نسبت منافذ اولیه و خرد شدگی بیشتر دانه‌ها بیشتر است. ثالثاً تغییرات کرنش لحظه انتقال فاز و اثر دانسیته در خاک‌های مختلف به دلیل ویژگی‌های مختلف خاک‌ها مانند نوع، شکل و اندازه دانه‌ها متفاوت می‌باشد. ماسه Rock در حالت سست تحت تنش‌های همه جانبه بیشتر از ۳۰۰ kPa رفتار اتساعی از خود نشان نداده است در حالی که در نمونه متراکم این حالت فقط تحت تنش ۶۰۰ kPa دیده می‌شود. به عبارتی دیگر خاک Rock بیشترین قابلیت فشرده‌گی را دارد. یادآوری می‌گردد که ماسه مذکور بیشترین نسبت منافذ اولیه (جدول ۱) را در

منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ نشان داده شده است. از شکل ۱ ملاحظه می‌گردد که ماسه Rock نسبت به سه ماسه دیگر ریزتر می‌باشد. ماسه کیش دارای دانه‌های کروی و نیمه زاویه‌دار گاهی متخلخل، ماسه تنبک دارای دانه‌های نیمه زاویه‌دار تا زاویه‌دار به همراه دانه‌های صفحه‌ای، ماسه هرمز دارای دانه‌های صفحه‌ای و زاویه‌دار با تخلخل روی سطح و احتمالاً داخل دانه‌ها و ماسه Rock اغلب دارای دانه‌های میله‌ای و صفحه‌ای و زاویه‌دار با تخلخل زیاد داخل دانه و روی دانه می‌باشند. سایر مشخصات ماسه‌های فوق شامل چگالی مواد جامد، نسبت منافذ حداقل و حداکثر و درصد کرنبات کلسیم معادل (CaCO<sub>3</sub>) در جدول ۱ خلاصه شده است. این جدول نشان می‌دهد که با توجه به دانه بندی‌ها و اشکال متفاوت دانه‌های ماسه‌های مذکور، مشخصات فیزیکی آنها نیز دارای تفاوت‌های کم تا زیاد می‌باشد.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی ماسه‌های مورد بررسی

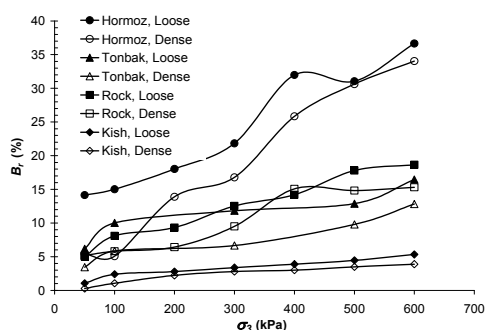
جدول ۱: مشخصات فیزیکی ماسه‌های بررسی شده

ماسه	Gs	$e_{max}$	$e_{min}$	CaCO <sub>3</sub> (%)
کیش	۲/۶۸	۰/۷۱۷	۰/۵۰۹	۹۳
تنبک	۲/۶۹	۰/۹۷۵	۰/۶۷	۹۵
هرمز	۲/۷	۰/۹۷۵	۰/۶۴۳	۷۵
Rock	۲/۷۲	۱/۴۷۳	۰/۸۳۸	۹۰

### آزمایش‌های انجام شده

بر روی چهار ماسه ذکر شده، در کل به تعداد ۵۲ آزمایش سه محوری همسان تحکیم یافته-زهکشی شده انجام گردید. بر روی هر کدام از خاک‌های هرمز، کیش و Rock هفت آزمایش با دانسیته نسبی اولیه (قبل از تحکیم) ۲۰٪ و هفت آزمایش با دانسیته نسبی اولیه (قبل

$$[Y] = \left( Br = \frac{S_{ABC}}{S_{ABD}} \times 100 \right)$$



شکل ۱: شکستگی نسبی در آزمایش‌های سه محوری ماسه-های کیش، تنبک، هرمز و Rock در برابر فشار همه‌جانبه

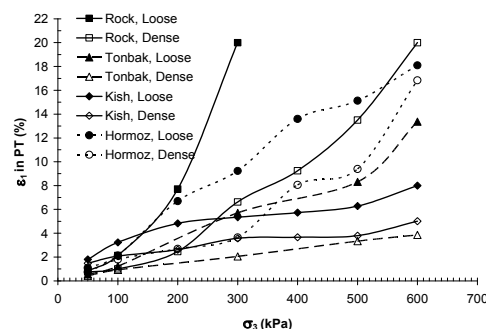
### بررسی حالت بحرانی

تغییرات کرنش حجمی در برابر کرنش محوری در چهار ماسه بررسی شده نشان دادند با وجود ادامه تمام آزمایش‌ها تا کرنش‌های محوری ۲۰٪، کرنش حجمی همچنان متغیر می‌باشد. نرخ تغییرات کرنش حجمی در انتهای آزمایش (کرنش محوری ۲۰٪) در ماسه‌ها و دانسیته‌های نسبی اولیه مختلف متفاوت است. لذا مسئله رسیدن به حالت بحرانی یا تغییر شکل تحت حجم ثابت در نمونه‌ها دچار ابهام می‌گردد. به عبارتی دیگر، اندرکنش متقابل اتساع و خرد شدگی دانه‌های ماسه و کاهش حجم ناشی از آن، مسئله رسیدن حالت بحرانی را تا کرنش‌های اعمال شده بغرنج می‌نماید و به نظر می‌رسد با دستگاه سه محوری و محدودیت‌های آن نتوان آن را برای خاک‌های مزبور تجربه کرد.

به خاطر خرد شدگی دانه‌ها و تغییر منحنی دانه‌بندی در حین تحکیم همسان و برش، مشخصات فیزیکی ماسه مانند نسبت منافذ حداقل و حداکثر و یا دانسیته نسبی حداکثر و حداقل نیز در حین آزمایش از لحظه تحکیم همسان تا انتهای بارگذاری محوری و برشی نمونه‌ها متغیر خواهد بود.

مقادیر نسبت منافذ در انتهای آزمایش (کرنش محوری ۲۰٪) و نقطه انتقال فاز برای ماسه‌های بررسی شده در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد در انتهای آزمایش یک نسبت منافذ ثابت برای دو حالت سست و متراکم حاصل نشده است. برای مثال اختلاف نسبت منافذ نمونه متراکم و سست ماسه هرمز در

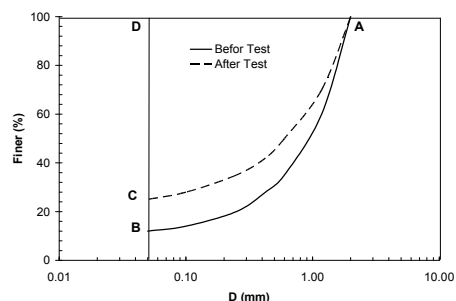
قابلیت فشردگی را دارد. یادآوری می‌گردد که ماسه مذکور بیشترین نسبت منافذ اولیه (جدول ۱) را در بین خاک‌های مورد بررسی داشته و دارای دانه‌های شکننده‌ای است. لذا رفتار مشاهده شده نیز متناسب با نسبت منافذ اولیه بالا و کاهش حجم حاصل از خردشدگی دانه‌ها در این ماسه می‌باشد.



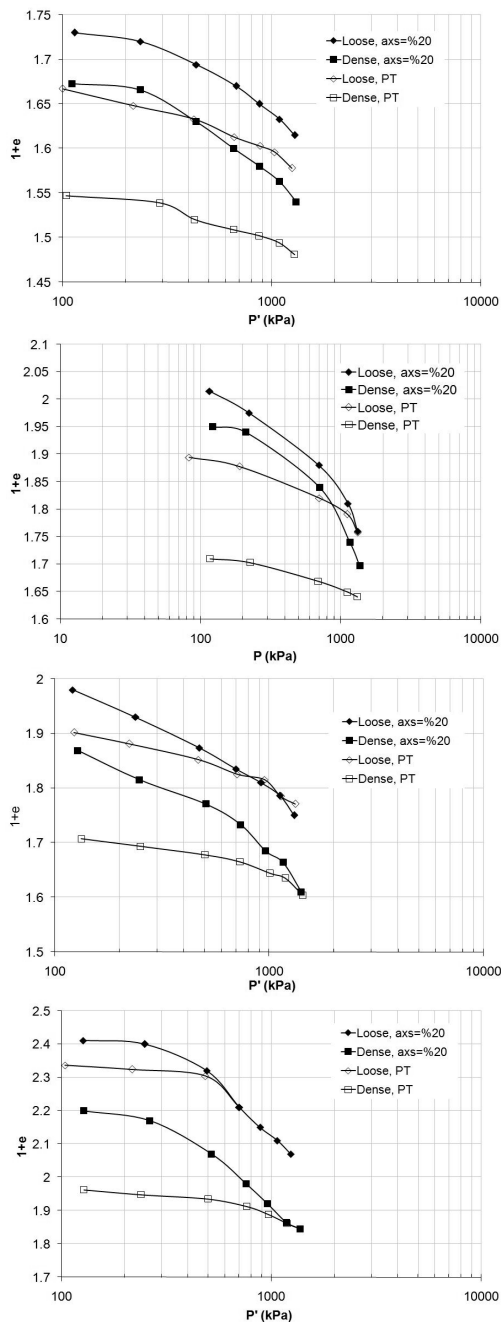
شکل ۲: کرنش تغییر فاز از رفتار انقباضی به رفتار اتساعی در برابر تنش‌های همه‌جانبه

### شکستگی دانه‌ها در حین بارگذاری

برای تخمین مقدار شکستگی دانه‌های ماسه در حین انجام آزمایش‌های سه محوری، منحنی‌های دانه بندی نمونه‌ها قبل و بعد از بارگذاری تعیین گردید. با توجه به تعریف شکستگی نسبی  $Br$  در شکل ۳ [۷]، نتایج آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با کاهش دانسیته نسبی اولیه و کاهش تعداد نقاط تماس دانه‌ها و افزایش تنش‌های همه‌جانبه، شکستگی دانه‌ها نیز بیشتر می‌شود. با نسبت طول به قطر دانه‌های میله‌ای (برای مثال ماسه Rock) و نسبت سطح به ضخامت دانه‌های صفحه‌ای (برای مثال ماسه هرمز) خردشدگی دانه‌ها نیز بیشتر می‌شود. هر چند نسبت منافذ اولیه نیز تاثیر به سزایی دارد و افزایش آن منجر به افزایش شکستگی دانه‌ها خواهد شد. یادآوری می‌گردد که کانی اصلی ماسه‌های بررسی شده کلسیت با سختی یکسان است.



شکل ۳: تعریف شکستگی نسبی بر اساس منحنی دانه‌بندی



شکل ۵: تغییرات حجم ویژه در برابر فشار همه جانبه در انتهای آزمایش و نقطه انتقال فاز

انتهای آزمایش تحت تنش همه جانبه  $10 \text{ kPa}$  برابر با  $0.12/0.811-0.931$  و در ابتدای آزمایش برابر با  $0.193/0.7-0.893$  می‌باشد. لذا با وجود تغییرات متفاوت نرخ نسبت منافذ، همچنان در انتهای آزمایش نسبت منافذ نمونه متراکم و سست متفاوت است.

همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که رابطه بین حجم ویژه ( $v=1+e$ ) و  $\log P'$  در بخش انتهایی آزمایش و نه الزاما حالت بحرانی به صورت منحنی می‌باشد. Adrian و همکاران (۲۰۰۴) بیان کردند که خط حالت بحرانی در خاک‌های با دانه‌های خردشونده از سه قسمت تشکیل می‌شود. بخش اول که مربوط به چرخش و لغزش و آرایش مجدد دانه‌ها است دارای شیب کمی می‌باشد. بخش دوم که در ادامه بخش اول می‌باشد به خاطر خردشدگی دانه‌ها (و کاهش حجم ناشی از آن) دچار شیب تند تری می‌گردد و بخش سوم برای حالتی است که دانه‌بندی پایدار (اتمام خردشدگی) حاصل می‌شود و نسبت به بخش دوم دارای شیب کمتری است (شکل ۶) [۵]. شکل ۵ نیز نشان می‌دهند که می‌توان منحنی را با دو خط معادل سازی نمود و به نوعی معادل دو خط اول مشروح توسط Adrian و همکاران نظر گرفت، منحنی بودن ارتباط  $v-\log P'$  موید این واقعیت است که شکستگی دانه‌ها در تمام تراز تنش‌های همه جانبه وجود دارد که با افزایش تنش‌های همه جانبه شدت خرد شدگی دانه‌ها نیز زیادتر گشته و با تشدید نرخ کاهش حجم، مسیر منحنی ایجاد شده است.

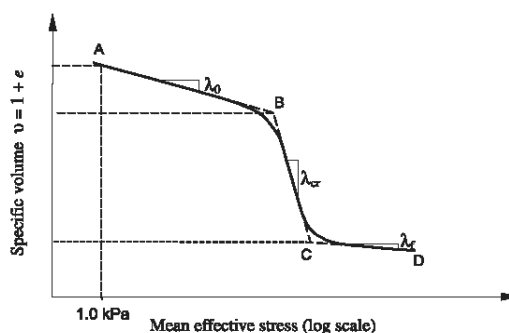
از طرفی مشاهده می‌گردد که منحنی‌های  $(1+e)$  و  $\log P'$  مربوط به نمونه‌های سست و متراکم به صورت جدا از هم قرار گرفته‌اند. به عبارتی دیگر با وجود اتساع بیشتر نمونه‌های متراکم نسبت به نمونه‌های سست، اثر توامان اتساع و انقباض ناشی از خرد شدگی دانه‌ها نتوانسته است اختلاف نسبت منافذ اولیه بین نمونه سست و متراکم را بین ببرد. احتمالاً با افزایش بیشتر تنش‌های همه جانبه که در آن خردشدگی دانه‌ها به اتمام رسیده و دانه‌بندی ثابت حاصل شده است، دو منحنی تغییر شیب متفاوتی داده و به همدیگر نزدیکتر خواهند شد.

### نتیجه گیری

آزمایش‌های سه محوری همسان تحکیم یافته-زهکشی شده بر روی چهار ماسه کربناته با ویژگی‌های متفاوت دانه‌ها نشان داد که خردشدگی دانه‌ها در حین برش منجر به کاهش حجم نمونه شده و برای خنثی کردن اتساع عمل خواهد نمود. بسته به مقدار خردشدگی، ممکن است کاهش حجم ناشی از آن از اتساع ناشی از آرایش دانه‌ها در حین برش، بیشتر یا کمتر باشد. لذا در این ماسه‌ها، حصول حالت بحرانی در آزمایش‌های سه محوری مبهم می‌گردد. حالت بحرانی مشاهده شده در این ماسه‌ها در واقع ظاهری و تعادل بین اتساع و انقباض ناشی از خردشدگی دانه‌ها بوده و گذرا است. چرا که حالت بحرانی واقعی زمانی حاصل خواهد شد که اتساع کاملاً از بین رفته و دانه‌بندی ثابت و پایدار حاصل شده باشد.

با توجه به محدودیت افزایش حجم ناشی از اتساع، با اعمال کرنش‌های محوری بیشتر (از حدوداً ۲۰٪) و وجود خردشدگی تا حصول دانه‌بندی پایدار، انتظار می‌رود اتساع زودتر از خردشدگی به اتمام برسد. بنابراین در شرایط بارگذاری با کرنش‌های برشی زیاد، رفتار حجمی خاک به صورت انقباضی و کاهش حجم خواهد بود.

با کاهش مقاومت دانه‌ها در برابر شکستگی (افزایش اندازه، نسبت سطح به ضخامت، طول به قطر یا ضخامت و تخلخل داخل یا سطح و کاهش سختی دانه‌ها)، کاهش دانسیته نسبی اولیه، افزایش تنش‌های همه جانبه و کرنش‌های برشی، مقدار خردشدگی دانه‌ها و کاهش حجم ناشی از آن زیاد می‌گردد.



شکل ۶: خطوط حالت بحرانی برای ماسه‌های با قابلیت خردشدگی دانه‌ها [۵].

در شکل ۵ منحنی‌های  $1+e$  و  $\log P'$  در محل نقطه انتقال فاز (تبدیل روند کاهش حجم به افزایش حجم و وقوع موضعی حجم ثابت) نیز ترسیم شده است. همانند منحنی‌های  $1+e$  و  $\log P'$  در انتهای آزمایش، این منحنی‌ها نیز برای نمونه‌های سست و متراکم جدا از هم می‌باشند. با افزایش تنش‌های همه جانبه، دو منحنی مربوط به انتهای آزمایش و انتقال فاز به یکدیگر نزدیک شده‌اند و غیر از ماسه کیش و ماسه تنبک در حالت متراکم، در بقیه ماسه‌ها در هر دو حالت سست و متراکم بر هم منطبق گشته‌اند. این مسئله نشان می‌دهد که در ماسه‌های کربناته با دانه‌های خرد شونده یک شبه حالت بحرانی یا حالت بحرانی ظاهری وجود دارد که در آن تغییر شکل تحت حجم ثابت ایجاد می‌شود. همان‌طور که Chandler و همکاران (۱۹۸۵)، Baharom و Stalleberass (۱۹۹۸) و Coop و همکاران (۲۰۰۴) بیان کردند این حالت در واقع یک حالت گذرا بوده و حالت بحرانی واقعی نمی‌باشد [۱]، [۲] و [۸]. چرا که حالت بحرانی واقعی زمانی حاصل می‌گردد که اتساع به اتمام رسیده و دانه‌بندی پایدار حاصل شده باشد. این که در این خاک‌ها چه موقع و در چه کرنشی این حالت ایجاد می‌گردد نیاز به بررسی بیشتر و اعمال کرنش‌های خیلی زیادتری (>۲۰٪) دارد. انتظار می‌رود اتساع سریع‌تر از خردشدگی به اتمام برسد ولی خردشدگی تا کرنش‌های زیاد ادامه یابد.

لازم به ذکر است که بحث‌های دیگر در ارتباط با مشخصات خاک‌های مطالعه شده، مقاومت و رفتار برشی و اثر مشخصات دانه‌ها بر روی آنها در مقالات ارائه شده توسط مولفین قابل مطالعه است [۹] و [۱۰].

## مراجع

- 1- Chandler, H. W. (1985). "A plasticity theory without Drucker's postulate, suitable for granular materials." J. Mech. Phys. Solids Vol. 33, PP. 215-226.
- 2- Baharom, B. and Stallebrass, S. E. (1998), "A constitutive model combining the microscopic and macroscopic behavior of sands in shear and volumetric deformation." Proc. 4th Eur. Conf. on Numerical Methods in Geotech. Engng. Udine, 1998, Springer-Verlag Wien, New York. 1998, PP. 263-273.
- 3- Luzzani, L. and Coop, M. R. (2002). "On the relationship between particle breakage and critical state of sands." Soils and Found. J. Vol. 42, No. 2, PP. 77-82.
- 4- Russell, A.R., and Khalili, N. (2002). "Drained cavity expansion in sands exhibiting particles crushing." Int. J. for Num. and Ana. Methods in Geomechanics, Vol. 26, PP. 323-340
- 5- Adrian, R., Russel and Khalili, N. (2004), "A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing." Canadian Geotechnical J., Vol. 41, PP. 1179-1192.
- 6- Salehzadeh, M, (2000). "The behavior of non-cemented and artificially cemented carbonate sand under monotonic and reversed cyclic shearing." Ph.D. Thesis, University of Manchester, UK.
- 7- Hardin, B. O. (1985). "Crushing of soil particles." J. Geotech. Eng., Proc. ASCE, Vol. 111, No. 10, PP. 1177-1192.
- 8- Coop, M.R., Sorensen, K. K., Bodas, T. & Georgoutsos G, (2004). "Particle breakage during shearing of a carbonate sand." Geotechnique, Vol. 54, No. 3, PP. 157-163.
- 9- Hassanlourad M., Salehzadeh H., Shahnazari H., (2010) "Mechanical properties of ungrouted and grouted carbonate sands", Int. J. of Geomechanical Eng., Vol. 4, PP. 507- 516.
- 10- Hassanlourad, M., Salehzadeh, H. and Shahnazari H. (2008), "Dilation and Particle Breakage Effects on the Shear Strength of Calcareous Sands Based on Energy Aspects" *Int. J. of Civil Eng.*, 6(2). PP. 108-119.