

# بررسی خواص ژئومکانیکی مصالح درشت دانه با در نظر گرفتن سطح تنش

علی قربانی\* (استادیار)

مهدی ویس کریمی (استادیار)

سید محمد رضا علوی پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۴)  
دوره ۲ - ۳۱، شماره ۲/۲، ص. ۱۰۹-۱۱۹، (پادداشت فنی)

با توجه به تأثیر زیاد سطح تنش در رفتار تنش - کرنش مصالح دانه‌بندی درشت، تعیین پارامترهایی مانند زاویه اصطکاک بحرانی و بیشینه این سنگ‌دانه‌ها اهمیت بالایی در پروژه‌های عمرانی دارد. در این مطالعه، یک مجموعه از آزمون‌های سه محوری بزرگ مقیاس بر روی سنگ‌دانه‌ها با سطوح تنش مختلف انجام و با ترکیب اطلاعات به دست آمده با سایر داده‌های جمع‌آوری شده از آزمون‌های موجود در ادبیات فنی، تأثیر جنس، شکل و منشأ دانه‌ها در پارامترهای ژئومکانیکی این نوع مصالح بررسی و در نهایت روابط و بازه‌هایی برای به دست آوردن زاویه اصطکاک داخلی بیشینه و بحرانی ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصله با افزایش تنش همه‌جانبه در تمامی سنگ‌دانه‌ها، زاویه اصطکاک بحرانی کاهش یافته است. همچنین نشان داده شده است که در تنش‌های همه‌جانبه‌ای بالا، تأثیر جنس و شکل ذرات در مقاومت آنها بسیار ناچیز است.

واژگان کلیدی: تنش مؤثر، سنگ‌دانه، جنس، شکل، زاویه اصطکاک، منشأ، آزمایش سه محوری بزرگ مقیاس، سطح تنش.

## ۱. مقدمه

سنگ‌دانه‌ها دارای نوع، شکل و منشأهای متفاوتی هستند که هر کدام از این موارد به طور جداگانه در رفتار و خصوصیات ژئومکانیکی آنها از جمله سایش و مقاومت تأثیر می‌گذرانند. سنگ‌دانه‌ها از نظر نوع به دو دسته طبیعی و شکسته تقسیم می‌شوند. سنگ‌دانه‌ی شکسته از طریق شکستن قطعات سنگی بزرگ در اندازه‌های لاشه‌سنگ، قلوه‌سنگ و شن درشت و ریز تهیه می‌شود و اغلب تیرگوشه هستند. اما سنگ‌دانه‌های طبیعی از نوع مصالح رسوبی‌اند، که به صورت لایه یا عدسی در نتیجه فرآیند رسوب‌گذاری در آبرفت‌ها، دریاچه‌ها و رودخانه‌ها شکل می‌گیرند و این مصالح به دلیل حمل توسط جریان آب و سائیده شدن به یکدیگر عموماً گردگوشه هستند. معمولاً این طور بیان می‌شود که دانه‌های گردگوشه به علت آنکه سطح آنها صیقلی است، اصطکاک داخلی کمتری دارند و بهتر روی هم می‌لغزند، در صورتی که معمولاً سنگ‌دانه‌ی شکسته به علت تیرگوشه بودن، اصطکاک داخلی بالاتری دارند؛ البته نمی‌توان به طور قاطع این مسئله را بیان کرد، زیرا این مسئله ممکن است متأثر از عوامل دیگری مانند جنس و منشأ سنگ‌دانه‌ها باشند و موارد مطرح شده در باره زاویه اصطکاک داخلی عکس موارد بیان شده عمل کند.

از لحاظ منشأ نیز می‌توان سنگ‌دانه‌ها را به انواع مختلف طبقه‌بندی کرد، که

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۲/۷/۱۶، پذیرش ۱۳۹۲/۸/۱۹.

ghorbani@guilan.ac.ir  
mveiskarami@gmail.com  
ma\_alavipour@yahoo.com

عموماً می‌توان مصالح سنگی نظیر سنگ آهک (با منشأ رسوبی) و همچنین دولومیت و بازالت (با منشأ آذرین) را به دلیل مقاومت بیشتر مطلوب‌تر دانست. سنگ‌های دیگر (از منشأهای متفاوت و یا از منشأ یکسان و جنس متفاوت)، مقاومت کمتری نسبت به دسته‌ی اول دارند.

مسئله‌ی دیگری که می‌تواند در ظرفیت باربری، مقاومت و پارامترهای تغییرشکل‌پذیری مصالح مؤثر باشد، توزیع دانه‌بندی است. درحقیقت نوع و توزیع دانه‌بندی مصالح خود به تنهایی تأثیر بسیار زیادی در ویژگی‌های رفتاری مصالح دارد.<sup>[۱]</sup> اصولاً هدف از به‌کار بردن دانه با ابعاد مختلف آن است که دانه‌بندی به گونه‌ی باشد که دانه‌های ریزتر فضای دانه‌های درشت‌تر را پر کنند و نمونه‌ی تهیه شده متراکم‌تر با وزن مخصوص بیشتری باشد. در بین سنگ‌دانه‌ها، درشت‌دانه‌ها نقش عمده‌ی ایفا می‌کنند، به طوری که از این مواد برای رسیدن به مقاومت‌های بالا برای تأمین از پایداری سازه‌ها استفاده خواهد شد. این قضیه زمانی قوت می‌یابد که سازه‌ها با بارهای سیکنلی یا بارهایی که باعث از بین بردن معیارهای کنترلی در هنگام طراحی می‌شوند، مواجه باشند. برخلاف مواد ریزدانه، که توسط شاخص خمیری یا کانی‌هایشان مشخص می‌شوند، مواد درشت‌دانه به احتمال زیاد به جنس، شکل، توزیع دانه‌بندی، نوع و منشأ دانه‌ها بستگی دارند.<sup>[۲]</sup>

پارامترهایی که در مدل رفتاری وجود دارند، براساس نوع، شکل و اندازه‌ی ذرات

به دست می‌آیند، پارامترهای مقاومت برشی مواد نیز تابعی از سطح تنش هستند. به طوری که مطالعات زیادی بر روی رفتار نوع‌های مختلفی از ماسه تحت تنش‌های متفاوت انجام شده است، که نقش نوع و شکل ذرات به خوبی در آن مشهود است. از سوی دیگر، خواص فیزیکی مانند قدرت سایش و ضریب شکست از آنجایی که به طور مستقیم یا غیرمستقیم در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند، حائز اهمیت است. بنابراین توصیف رفتار مواد درشت‌دانه براساس نوع، شکل و اندازه‌ی دانه‌ها شایسته‌ی توجه بیشتری است. [۶-۲]

در این مطالعه، روشی که برای تعیین پارامترهای فیزیکی سنگ‌دانه‌ها و به دست آوردن روابط بین آن‌ها در نظر گرفته شده است، براساس تعیین تأثیر شکل، جنس، نوع و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های درشت بر این پارامترها و با در نظر گرفتن سطح تنش است. به طوری که در ابتدا با تفکیک سنگ‌دانه‌های درشت به دو نوع شکسته و طبیعی و از منشأهای متفاوت با دانه‌بندی یکسان فولر، سنگ‌دانه‌ها تحت آزمایش سه محوری و معیار سایش قرار داده شده‌اند تا براساس نتایج این آزمایش‌ها، حالت‌های مذکور و پارامترهای مورد نظر به دست آورده شود. در نهایت، نمودارهای تنش - کرنش و کرنش‌های قائم و حجمی از روی این آزمایش‌ها به دست آمده است. منشأ سنگ‌دانه‌های درشت و هم چنین پارامترهایی که به مشخصات ذرات از جمله سایش و زاویه‌ی اصطکاک سنگ‌دانه‌های درشت مرتبط هستند، نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایجی کامل از طریق آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش و منابع مختلف جمع‌آوری و نقش شکل و منشأ و جنس ذرات در خواص رفتاری آن‌ها و پارامترهای مهم تعیین شده است. در پایان نیز روابطی بین این خواص و پارامترهای ژئومکانیکی که با شکل، نوع و منشأ ذرات توصیف می‌شوند، ارائه شده است.

## ۲. مروری بر مباحث و اقدامات انجام شده

براساس آنچه مطرح شده است، آزمایش‌ها و پژوهش‌های متعددی بر روی سنگ‌دانه‌ها صورت گرفته است. به عنوان نمونه پژوهشی در سال ۲۰۰۳ بر روی سنگ‌دانه‌هایی با دو نوع طبیعی و شکسته و با دو شکل گردگوشه و تیزگوشه آزمایش‌هایی انجام و ذرات تیزگوشه از انفجار سنگ و ذرات گردگوشه نیز از مواد رسوبی رودخانه انتخاب شده‌اند. در مطالعات انجام شده، تأثیرات نوع، شکل، منشأ و توزیع دانه‌بندی بر روی خصوصیات این سنگ‌دانه‌ها کاملاً محسوس بوده و آزمایش‌های سه محوری و لس‌آنجلس بر روی نمونه‌های مذکور انجام و به بررسی ارزش ضربه‌یی، ارزش خردشدگی و ارزش سایش مواد و همچنین تأثیر تنش در این مصالح پرداخته شده است. [۷] در این آزمایش‌ها، ارزش سایش و شکستگی و ضربه‌یی تمامی نمونه‌های شکسته بیشتر از طبیعی به دست آمده است که این مسئله را می‌توان ناشی از عواملی چون، شکل و منشأ دانست. همچنین توزیع دانه‌بندی نیز می‌تواند همراه با عوامل دیگر در مقاومت نمونه‌ها تأثیرگذار باشد. در مطالعات دیگری نیز تأثیر این عوامل بر روی تنش و تغییرات کرنش حجمی بررسی و با ترسیم نمودارهای تنش - کرنش و همچنین تغییرات کرنش حجمی تأثیرات عوامل مختلف نشان داده شده است. [۸،۷]

عامل دیگری که در مطالعات مذکور به آن پرداخته شده  $B_g$  (ضریب شکست) است. ضریبی که به عواملی چون اندازه‌ی ذرات و  $\sigma_c$  (تنش همه جانبه) بستگی دارد و البته می‌توان تأثیرگذاری مواردی چون شکل و نوع را در آن مؤثر دانست، به طوری که فشردگی و کاهش حجم مواردی هستند که به این ضریب و در وسعتی حقیقی‌تر به عوامل بیان شده بستگی دارند. همچنین رابطه‌ی بین  $B_g$  و  $\sigma_c$  بررسی و با آزمایش‌های انجام شده بر این نمونه‌ها نشان داده شده است که با افزایش فشار

و اندازه‌ی ذرات در حالت کلی  $B_g$  نیز بیشتر می‌شود. این مسئله در ذرات بزرگ‌تر محسوس‌تر است، به طوری که میزان بیشتری شکست در این ذرات اتفاق می‌افتد. [۸،۷] در مطالعات دیگری، تفاوت زاویه‌ی اصطکاک نمونه‌های طبیعی و گردگوشه نشان داده شده است، به طوری که در نمونه‌های مورد آزمایش، گردگوشه‌ها زاویه‌ی اصطکاک بیشتری نسبت به تیزگوشه‌ها از خود نشان داده‌اند و این می‌تواند متأثر از شکستگی باشد؛ که البته می‌تواند به شکل و نوع و حتی منشأ نمونه‌ها مرتبط باشد. البته این احتمال وجود دارد که در فشارهای بالاتر و در منشأهای دیگر این رفتار متفاوت شود. [۹،۷]

پیش از این، در تحقیقات وسیع دیگری، رابطه‌ی بین زاویه‌ی اصطکاک مواد، زاویه‌ی اتساع و زاویه‌ی اصطکاک حالت بحرانی ارائه شده بود (رابطه‌ی ۱): [۴]

$$\phi_{\max} = \phi_{c.s.} + \nu / \lambda \quad (1)$$

که در آن،  $\phi_{c.s.}$  زاویه‌ی اصطکاک حالت بحرانی و  $\nu$  زاویه‌ی اتساع هستند. همچنین در مطالعه‌ی مذکور نشان داده شده است که زاویه‌ی اصطکاک و همین‌طور اتساع با سطح تنش رابطه دارند (روابط ۲ الی ۴):

$$I_R = D_r(Q - \ln(\sigma)) - R \quad (2)$$

$$\phi' = \phi_{crit.} + \Delta I_R \quad (\text{کرنش صفحه‌یی}) \quad (3)$$

$$\phi' = \phi_{crit.} + \Delta I_R \quad (\text{کرنش سه‌محوری}) \quad (4)$$

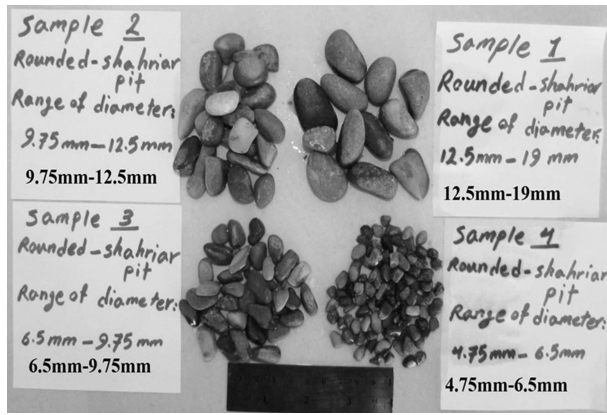
در این روابط نیز  $\phi'$  زاویه‌ی اصطکاک بیشینه و  $I_R$  اندیس اتساعی،  $D_r$  چگالی نسبی خاک،  $\sigma$  تنش مؤثر (kPa)،  $Q$  و  $R$  ثابت هستند که در پژوهشی در سال ۱۹۸۶،  $Q$  برابر ۱۰ و  $R$  برابر ۱ به دست آمده است. [۱۰] از سوی دیگر می‌توان این مسئله را با پژوهش‌هایی که با اعمال تنش‌های مختلف، زاویه‌ی اصطکاک متفاوتی به دست آورده بود، مرتبط دانست. [۷]

در پژوهش دیگری نیز آزمایش‌هایی بر روی ماسه‌ی سیلیسی متراکم، که اندازه‌ی متوسط دانه‌ها ( $D_{50}$ ) برابر ۰٫۲ میلی‌متر بوده، انجام و نمونه‌ها تحت آزمایش سه‌محوری استاندارد با فشارهای مختلف قرار داده شده و یک رابطه بین زاویه‌ی اصطکاک بیشینه و فشار محدودکننده ارائه شده است (رابطه‌ی ۵): [۱۱]

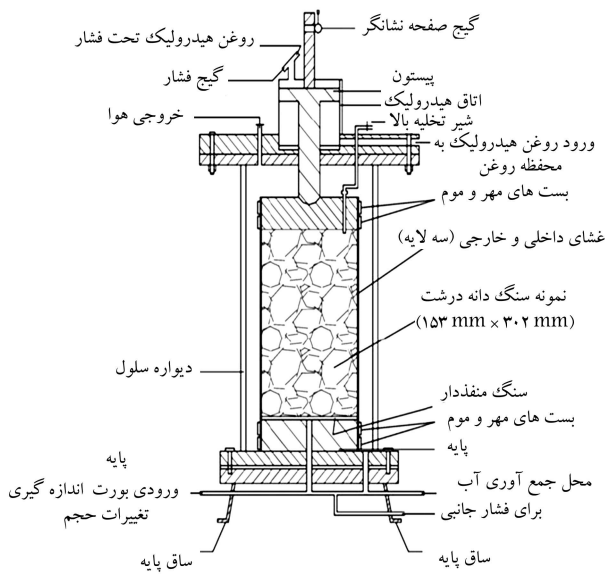
$$\phi' = A(\sigma_c)^M \quad (5)$$

که در آن،  $\phi'$  زاویه‌ی اصطکاک بیشینه است که با تغییرات  $\sigma_c$  (فشار محدودکننده در آزمایش سه محوری) تغییر می‌کند، به طوری که  $A$  ضریبی است که می‌تواند در حالت زاویه‌ی اصطکاک بیشینه برابر ۱ کیلوپاسکال در نظر گرفته شود.  $M$  نیز توانی است که در این تساوی ساده از یک سری آزمایش‌های برشی به دست می‌آید، به طوری که نیازی به محاسبه‌ی چگالی نسبی خاک وجود ندارد. شکل ۱، نتایج آزمایش‌های مذکور را نشان می‌دهد، در واقع این شکل بیان‌گر رابطه‌ی بین بیشینه‌ی زاویه‌ی اصطکاک (در دو حالت بحرانی و بیشینه) و فشار محدودکننده ( $\sigma$ ) است. همچنین آزمایش سه محوری نشان داده است که دو زاویه‌ی بیشینه‌ی اصطکاک  $\phi'$  و بحرانی  $\phi_{c.s.}$  با افزایش سطح تنش کاهش پیدا می‌کنند. آنچه از شکل مشخص است تغییرات  $\phi'$  با افزایش سطح تنش بیشتر از  $\phi_{c.s.}$  است. [۱۲-۱۰]

در تمامی پژوهش‌های صورت گرفته رفتار پارامترهای ژئومکانیکی خاک با در نظر گرفتن سطح تنش بررسی شده و در بسیاری موارد خواص فیزیکی نمونه‌های مورد آزمایش نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدیهی است که رفتار میکروسکوپی خاک ناشی از خواص سطحی و فیزیکی ذرات و فرآیندهای به وجود آمدن آن‌هاست.



شکل ۲. نمونه‌هایی از سنگ‌دانه‌های قبل سنگ‌شکن دانه‌بندی شده‌ی معدن شهریار براساس منحنی فولر.



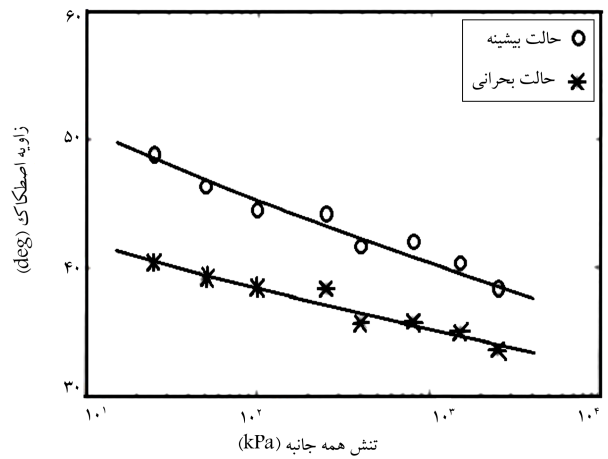
شکل ۳. تصویری شماتیک از دستگاه سه‌محوری برای نمونه‌های آزمون شده در این مطالعه.

(شیمیایی) و همچنین عکس برداری میکروسکوپ الکترونی (ASTM C ۲۹۴) برای توصیف ساختارهای متفاوت معدنی مواد بوده است، که نتایج آن در جدول ۱ قابل مشاهده است.

البته برای تکمیل مطالعه‌ی صورت‌گرفته، نمونه‌های بسیاری از پژوهش‌های متنوع نیز جمع‌آوری شده است، تا بتوان نتایج را در یک مقیاس وسیع تحلیل کرد.

#### ۴. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

نتایج به‌دست‌آمده موارد مهمی را برای ارزیابی خواص ژئومکانیکی سنگ‌دانه‌ها آشکار می‌کند. همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است، نتایج به دست آمده از انواع نمونه‌های آزمایش شده در این مطالعه و پژوهش‌های پیشین جمع‌آوری شده است. این نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌ها به‌صورت کاملاً متفاوت از یکدیگر براساس شکل، جنس و منشأ انتخاب شده‌اند تا به کمک آزمایش‌های محوری بتوان رفتار آن‌ها را به‌طور دقیق‌تر بررسی کرد.



شکل ۱. نتایج آزمایش ماسه‌ی سیلیسی در سطح‌های متفاوت تنش و رفتار زوایای پیشینه‌ی اصطکاکی و بحرانی با سطح تنش. [۱۱]

به‌طور خاص، قابل درک است که شکل ذرات در رفتار خاک اثر خواهد گذاشت، اما یک مطالعه‌ی کامل برای تصدیق این موضوع وجود ندارد و نقش درست و کامل پارامترهای فیزیکی و هندسی سنگ‌دانه‌ها و پاسخ آن‌ها در خاک هم‌چنان در ابهام است. البته هدف در این نوشتار، مطالعه‌ی دقیق و تعیین اثر پارامترهای فیزیکی و هندسی سنگ‌دانه‌ها ر نوع پاسخ خاک است.

#### ۳. روش کار و تهیه‌ی مصالح

در این پژوهش، نمونه‌های متفاوتی به‌صورت طبیعی و گردگوشه و در دو نوع شکسته و طبیعی، از دو معدن شهریار و قم انتخاب شده است. در پژوهش صورت‌گرفته این مسئله حائز اهمیت بوده است که سنگ‌دانه‌ها از لحاظ منشأ و جنس و شکل با هم تفاوت داشته باشند، به همین علت سنگ‌دانه‌ها قبل از سنگ‌شکن و بعد از سنگ‌شکن و از دو منطقه‌ی جغرافیای متفاوت و البته با دانه‌بندی یکسان انتخاب شده‌اند. در ادامه، نمونه‌ها از مقیاس ریزدانه تا درشت‌دانه از ۴/۷۵ میلی‌متر تا ۱۹ میلی‌متر و طبق دانه‌بندی فولر تهیه شده‌اند (شکل ۲).

در ادامه، آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده (CD) بر روی نمونه‌ی استوانه‌یی و با قطر ۱۵۳ mm و با حجم  $۵۵۵۰ \text{ cm}^3$  به نوعی روی نمونه‌ها صورت گرفته است تا بتوان رفتار تنش - کرنش و تغییرات حجمی - کرنش را در محدوده‌های متفاوت تنش همه‌جانبه، تا حدی که ظرفیت نمونه‌ها اجازه دهند، اندازه‌گیری و بررسی کرد (شکل ۳). آزمون سه‌محوری بزرگ‌مقیاس در تنش همه‌جانبه‌ی متفاوت برای به‌دست‌آوردن محدوده‌ی وسیعی از سطوح تنش انجام شده است، که این محدوده بین  $۵^\circ$  تا  $۸۰^\circ$  کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. این آزمون‌ها با کاهش فشار سلول تحت یک فشار قائم ثابت صورت گرفته است تا بتوان سطح گسیختگی را در فضای تنش اصلی در جهت دیگر به‌دست آورد. البته با استخراج نتایج مندرج در مراجع دیگر، محدوده‌ی نتیجه‌گیری تا حدود  $۱۴۰^\circ$  کیلوپاسکال افزایش داده شده است تا نتایجی دقیق‌تر حاصل شود. در این مطالعه برای تعیین پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت سنگ‌دانه‌ها طی بارگذاری، آزمون‌هایی برای تعیین خواص ژئوتکنیکی سنگ‌دانه‌ها صورت گرفته است. این آزمون‌ها شامل توزیع اندازه‌ی ذرات (دانه‌بندی براساس ASTM-D۴۲۲)، لس آنجلس (ASTM-C۱۳۱) و آزمون‌های معدنی

جدول ۱. خواص و مشخصات نمونه‌های آزمون‌شده در آزمایش بزرگ مقیاس سه‌محوری.

نشانه‌ی نمونه	محل تهیه‌ی نمونه‌ها	منبع سنگ دانه‌ها	منشأ و جنس سنگ دانه‌ها	شکل سنگ دانه‌ها	$D_{50}$ (mm)	$D_{max}$ (mm)	$\gamma_{max}$ ( $kN/m^3$ )	L.A (%)	مراجع
SA <sup>o</sup> ۱-SS-۱۹	معدن شهریار	بعد سنگ شکن	رسوبی (ماسه سنگ)	شکسته/تیزگوشه	۱۰٫۷۵	۱۹	۱۵٫۶	۲۱-۱۴ (۱۷٫۵)	تحقیق حاضر
SR <sup>o</sup> ۲-SS-۱۹	معدن شهریار	قبل سنگ شکن	آذرین	طبیعی/گردگوشه	۱۰٫۷۵	۱۹	۱۶٫۸	۲۱-۱۸ (۱۹)	تحقیق حاضر
SA <sup>o</sup> ۳-I-۱۹	معدن قم	سنگ شکن	آذرین	شکسته/تیزگوشه	۱۰٫۷۵	۱۹	۱۶٫۶	۲۲-۲۱ (۲۱٫۵)	تحقیق حاضر
SR <sup>o</sup> ۴-I-۱۹	معدن قم	قبل سنگ شکن		طبیعی/گردگوشه	۱۰٫۷۵	۱۹	۱۵٫۷	۲۶-۲۵ (۲۵٫۵)	تحقیق حاضر
SR <sup>o</sup> ۵-SS-۵ <sup>o</sup>	منطقه شاه‌نهار	رسوبی	رسوبی (ماسه سنگ)	طبیعی/گردگوشه	-	۵ <sup>o</sup>	-	-	[۸]
SA <sup>o</sup> ۶-LS-۲۵	سد گل	انفجاری	رسوبی (سنگ آهک)	شکسته/تیزگوشه	-	۲۵	-	-	[۸]
SR <sup>o</sup> ۷-SS-۲۵	سد رانجیت		رسوبی		۲۲	۳٫۸	۲۲	۲۳٫۸	[۹٫۷]
SR <sup>o</sup> ۷-SS-۵ <sup>o</sup>	ساگار	رسوبی	رسوبی (ماسه سنگ)	طبیعی/گردگوشه	۷٫۶	۵ <sup>o</sup>	۲۲		[۹٫۷]
SR <sup>o</sup> ۷-SS-۸ <sup>o</sup>					۱۲	۸ <sup>o</sup>	۲۲٫۹		[۹٫۷]
SA <sup>o</sup> ۸-Q-۲۵			آذرین (کوارتز)		۵	۲۵	۲۱٫۶		[۹٫۷]
SA <sup>o</sup> ۸-Q-۵ <sup>o</sup>	سد پرولیا	انفجاری	دگرگونی	شکسته/تیزگوشه	۹٫۶	۵ <sup>o</sup>	۲۱٫۶	۴۸٫۸	[۹٫۷]
SA <sup>o</sup> ۸-Q-۸ <sup>o</sup>			(میکا شپست)		۱۵٫۸	۸ <sup>o</sup>	۲۱٫۷		[۹٫۷]
SA <sup>o</sup> ۹-LS-۵ <sup>o</sup>	منطقه‌ی رودبار	انفجاری	رسوبی (ماسه آهک)	شکسته/تیزگوشه	-	۵ <sup>o</sup>	۲۱	۳۰	[۱۵]
SA <sup>o</sup> ۱۰-LS-۵ <sup>o</sup>	منطقه‌ی ونبار	انفجاری	رسوبی (ماسه سنگ)	شکسته/تیزگوشه	-	۵ <sup>o</sup>	۲۰٫۸	۳۲	[۱۵]
SA <sup>o</sup> ۱۱-AB-۵ <sup>o</sup>	منطقه‌ی سیلان	انفجاری	آذرین (آندزیت بازالت)	شکسته/تیزگوشه	-	۵ <sup>o</sup>	۲۱٫۱	۲۸	[۱۵]
SR <sup>o</sup> ۱۲-AB-۵ <sup>o</sup>	منطقه‌ی قلعه چایی	رسوبی	آذرین (آندزیت بازالت)	طبیعی/گردگوشه	-	۵ <sup>o</sup>	۲۱٫۴	۲۶	[۱۵]
SR <sup>o</sup> ۱۳-A-۵ <sup>o</sup>	منطقه‌ی آیدوقموش	رسوبی	آذرین (آندزیت)	طبیعی/گردگوشه	-	۵ <sup>o</sup>	۲۲٫۳	۱۹	[۱۵]

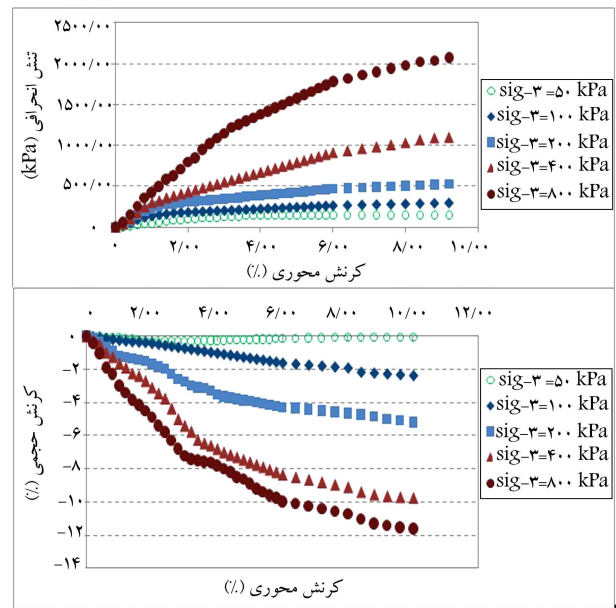
در شکل ۴ نیز می‌توان نتایج به‌دست‌آمده در یکی از آزمایش‌ها را به عنوان نمونه مشاهده کرد، این نمودارها تغییرات تنش - کرنش و حجم نمونه‌ها را در شرایط آزمایش نشان می‌دهد که در آزمایشگاه به‌دست آمده است. در شکل ۵ نیز حالت اصلاح و نرمال‌شده‌ی این نتایج قابل مشاهده است، که در این شکل دو مسئله‌ی مهم حائز اهمیت است: ۱. آخرین حالت نمونه‌ها در زمان نرمال‌سازی تنش همه‌جانبه شبیه یکدیگر است، که اصطلاحاً به آن حالت بحرانی می‌گویند؛ ۲. در فشارهای زیاد (جایی که نمونه‌ها و ذرات شکسته می‌شوند)، مقاومت بیشینه وجود ندارد و بعد از آن مصالح به حالت روانی میل می‌کنند. [۱۳ و ۱۴]

نمودارهای به‌دست‌آمده در آزمایش سه‌محوری بیانگر رفتار نمونه‌ها بوده است، به طوری که پارامترهای رفتاری و مقاومتی این نمونه‌ها از این نمودارها استخراج شده‌اند (جدول ۲). با توجه به این نتایج می‌توان تأثیرپذیری این پارامترها را از جنس، شکل و دانه‌بندی مواد بررسی کرد.

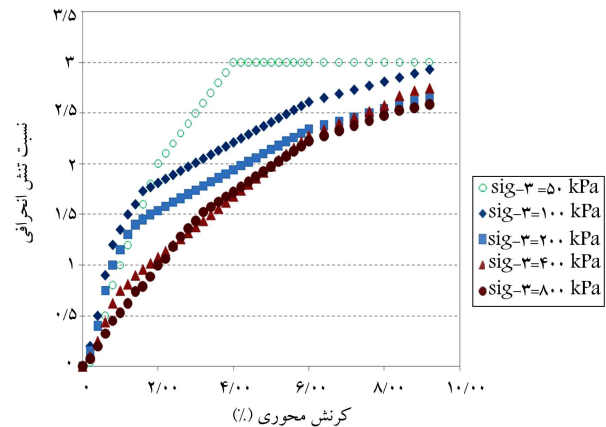
در شکل ۴ نیز می‌توان نتایج به‌دست‌آمده در یکی از آزمایش‌ها را به عنوان نمونه مشاهده کرد، این نمودارها تغییرات تنش - کرنش و حجم نمونه‌ها را در شرایط آزمایش نشان می‌دهد که در آزمایشگاه به‌دست آمده است. در شکل ۵ نیز حالت اصلاح و نرمال‌شده‌ی این نتایج قابل مشاهده است، که در این شکل دو مسئله‌ی مهم حائز اهمیت است: ۱. آخرین حالت نمونه‌ها در زمان نرمال‌سازی تنش همه‌جانبه شبیه یکدیگر است، که اصطلاحاً به آن حالت بحرانی می‌گویند؛ ۲. در فشارهای زیاد

جدول ۲. پارامترهای استخراج شده از نتایج آزمون سه محوری.

نشانه‌ی نمونه	$\sigma'_3$ (kPa)	$\phi'_{Critical}$ (Deg.)	$\sigma'_{Peak}$ (Deg.)	$\epsilon_V$ (%)	$(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3})$ (Failure)
SA° ۱-SS-۱۹	۵۰	۳۸	۴۲	۰٫۳	۴٫۲
	۱۰۰	۳۶	۳۸	۰٫۷	۳٫۸
	۲۰۰	۳۹	۳۵	۲٫۲	۴٫۴
	۴۰۰	۳۸	۳۴	۳٫۶	۴٫۲
	۸۰۰	۳۶٫۱	۲۷٫۱	۴٫۸۲	۳٫۹
SR° ۲-SS-۱۹	۵۰	۴۹	۴۹	۰	۷
	۱۰۰	۴۶	۴۶	۰٫۳	۶٫۲
	۲۰۰	۴۴	۴۲	۳٫۱	۵٫۵
	۴۰۰	۴۵	۴۱	۶	۵٫۸
	۸۰۰	۴۳	۳۷٫۶	۹٫۴۲	۵٫۲۹
SA° ۳-I-۱۹	۵۰	۴۴	۴۴	۰	۵٫۵
	۱۰۰	۴۲	۴۱	۰٫۷	۵
	۲۰۰	۳۷	۳۵	۰٫۸	۴
	۴۰۰	۳۶	۳۴	۱٫۳۸	۳٫۹
	۸۰۰	۳۵٫۸	۲۲٫۲	۶٫۳۵	۳٫۸۱
SR° ۴-I-۱۹	۵۰	۳۷	۳۴	۰٫۱	۴
	۱۰۰	۳۷	۳۰	۲٫۴	۴
	۲۰۰	۳۵	۲۷	۵٫۲	۳٫۷
	۴۰۰	۳۶	۲۶	۹٫۸	۳٫۸
	۸۰۰	۴۰٫۹	۲۴٫۷	۱۱٫۶	۴٫۷۸
SR° ۵-SS-۵۰	۲۰۰	۳۸	۳۸	۰٫۳	۴٫۳
	۴۰۰	۳۷	۳۷	۰٫۵	۴
	۶۰۰	۳۵٫۴	۳۴٫۳	۱	۳٫۷۵
	۸۰۰	۳۵	۳۳٫۷	۱٫۴	۳٫۶۸
	۱۲۰۰	۳۵٫۴	۲۴٫۴	۴٫۱	۶٫۵
SA° ۶-LS-۲۵	۳۰۰	۴۴٫۴	۴۱٫۱	-۰٫۵	۶٫۵
	۶۰۰	۴۳٫۵	۳۹٫۵	-۰٫۲	۵٫۷۵
	۹۰۰	۴۳	۳۹٫۲	۰٫۲	۵٫۳۸
	۱۲۰۰	۴۱٫۸	۳۸٫۷	۰٫۷	۵٫۰۸
	۳۵۰	۴۳	۴۲	۱٫۴	۵٫۱
SR° ۷-SS-۲۵	۷۰۰	۴۱٫۲	۳۹٫۹	۱٫۶۶	۴٫۵۳
	۱۱۰۰	۳۹٫۱	۳۹٫۲	۲٫۱	۴٫۱۸
	۱۴۰۰	۳۸٫۱	۳۸٫۷	۲٫۵	۴٫۱۷
	۳۵۰	۴۶	۴۱	۱٫۵	۶٫۱
	۷۰۰	۴۴٫۱	۴۰٫۵	۱٫۸۷	۵٫۵۷
۱۱۰۰	۴۴	۳۸٫۸	۲٫۲	۵٫۵۴	
۱۴۰۰	۴۳٫۹	۳۸٫۱	۲٫۷۲	۵٫۵۳	
SR° ۷-SS-۸۰	۳۵۰	۴۹	۴۹	۱٫۷	۷٫۳
	۷۰۰	۴۸٫۲	۴۷	۲٫۰۷	۶٫۸۵
	۱۱۰۰	۴۸	۴۵٫۶	۲٫۳۷	۶٫۷۷
	۱۴۰۰	۴۷٫۸	۴۵٫۲	۲٫۹۲	۶٫۷۱
	۳۰۰	۴۱٫۸	۳۶٫۹	۰٫۹	۵
۶۰۰	۴۰٫۳	۳۵٫۹	۰٫۳۲	۴٫۶۷	
۹۰۰	۳۹	۳۴٫۲	۰٫۵۵	۴٫۵۶	
۱۲۰۰	۳۸٫۹	۳۴	۰٫۸۹	۴٫۵	



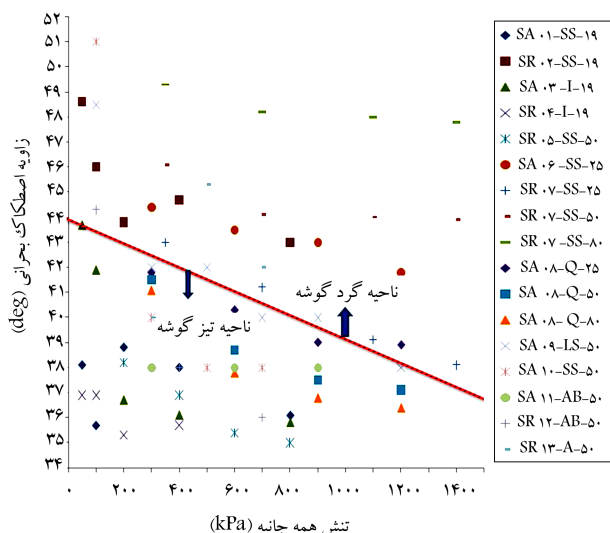
شکل ۴. تغییرات رفتارهای تنش - کرنش - حجم نمونه‌های قبل سنگ شکن معدن قم (SR° ۴-I-۱۹) در تنش همه جانبه‌ی متفاوت.



شکل ۵. منحنی اصلاح شده‌ی تنش - کرنش نمونه‌های قبل سنگ شکن معدن قم (SR° ۴-I-۱۹) در تنش همه جانبه‌ی متفاوت.

## ۵. بررسی رابطه‌ی تنش همه جانبه با زوایای اصطکاک

خصوصیات رفتار مکانیکی سنگ‌دانه‌ها با رفتار کلی خاک‌ها مقایسه می‌شوند، به طوری که تنش همه جانبه در فشار بالا می‌تواند اثرات مخرب در مدول‌های تغییر شکل نمونه‌های سنگ‌دانه‌ها داشته باشد و باعث نرم شدن و به اصطلاح روان شدن آنها شود. همچنین پدیده‌ی شکست ذرات که در طول فشار و برش اتفاق می‌افتد، به عنوان اصلی‌ترین عامل برای این اثرات مخرب شناخته شده و در حالت کلی به عنوان عاملی برای کنترل رفتار ذرات است.<sup>[۱۶]</sup> براساس نتایج به دست آمده باید پارامترهای مکانیکی سنگ‌دانه‌ها و حالت‌های بحرانی و بیشینه‌ی آنها شناسایی شوند. در واقع با بررسی ارتباط پارامترهای مختلف با اثر جنس و شکل و منشأ آنها و همچنین با در نظر گرفتن سطح تنش می‌توان ارتباطی بین آنها در وسعتی از نمونه‌های آزمون شده یافت، به طوری که بتوان خصوصیات سنگ‌دانه‌های مشابه را با این خصوصیات از روی این روابط حدس زد.



شکل ۶. تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بحرانی با تغییرات تنش همه‌جانبه.

مطابق شکل ۶، به علت پراکندگی ذرات تیزگوشه و گردگوشه در ناحیه‌ی مشخص و تفکیک‌پذیر از یکدیگر، این نمودار به این دو ناحیه تقسیم شده است و با بررسی آن می‌توان به این موارد پی برد:

۱. ناحیه‌ی ذرات گردگوشه در منطقه‌ی بالاتر از تیزگوشه قرار گرفته است و این بدان معنی است که عموماً سنگ‌دانه‌های گردگوشه، زاویه‌ی اصطکاک بحرانی بیشتری در مقایسه با سنگ‌دانه‌های تیزگوشه دارند. این نتیجه دقیقاً مشابه نتایج پیشینان از جمله Varadarajan و همکاران است، که در نتایج خود این مسئله را اثبات کرده است.<sup>[۷]</sup> البته، می‌توان در توجیه این علت، اثر شکست ذرات در قبل از رسیدن به حالت بحرانی را بیان کرد، زیرا ذراتی که به شکل تیزگوشه و به نوعی از نوع شکسته هستند به نوعی به علت وجود سنگ‌شکن و یا انفجار در آن‌ها شکست وجود دارد.

۲. با افزایش مقدار تنش همه‌جانبه در تمامی سنگ‌دانه‌ها (طبیعی و گردگوشه)، زاویه‌ی اصطکاک حالت بحرانی تمامی سنگ‌دانه‌ها به صورتی نزولی حرکت می‌کند و کاهش می‌یابد، که این بیانگر آن است که ذرات که هر جنس و شکلی، مقاومتی از خود در فشارهای بالاتر نشان نمی‌دهند.

برای بررسی دقیق‌تر سنگ‌دانه‌های تیزگوشه از گردگوشه با هدف تعیین رابطه‌ی تقریبی بین زاویه‌ی اصطکاک در حالت بحرانی با تنش همه‌جانبه تفکیک شده‌اند (شکل ۷).

آنچه از روابطی که با در نظر گرفتن اثر سطح تنش، جنس و شکل ذرات بر زاویه‌ی اصطکاک بحرانی در شکل ۷ به دست آمده است، بیانگر آن است که با افزایش تنش همه‌جانبه، زاویه‌ی اصطکاک بحرانی تمایل دارد در فشارهای بالا به حالت بدون تغییر (تمایل به خط تقریباً با شیب صفر) گرایش یابد، که این خود گواه دیگری بر وجود حالت روانی و بدون مقاومت نمونه‌ها در فشارهای بالاست، که این مسئله متمایز از خصوصیات مکانیکی خاک است.

#### ۲.۵. بررسی رابطه‌ی تنش همه‌جانبه با زاویه‌ی اصطکاک پیشینه

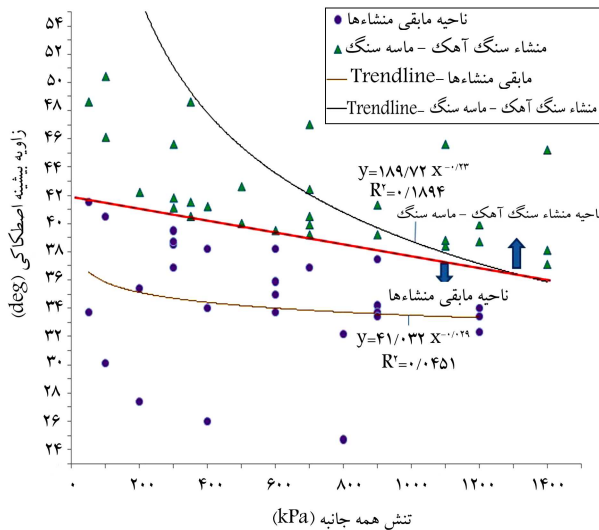
در شکل ۸، به بررسی رفتار سنگ‌دانه‌ها با توجه به زاویه‌ی اصطکاک پیشینه و تنش همه‌جانبه پرداخته شده است. در این شکل برای بررسی دقیق رفتار سنگ‌دانه‌ها اقدام به ناحیه‌بندی نمونه‌های آزمون‌شده گردیده است. در این نمودار تفکیک نتایج

جدول ۲. پارامترهای استخراج شده از نتایج آزمون سه محوری (ادامه).

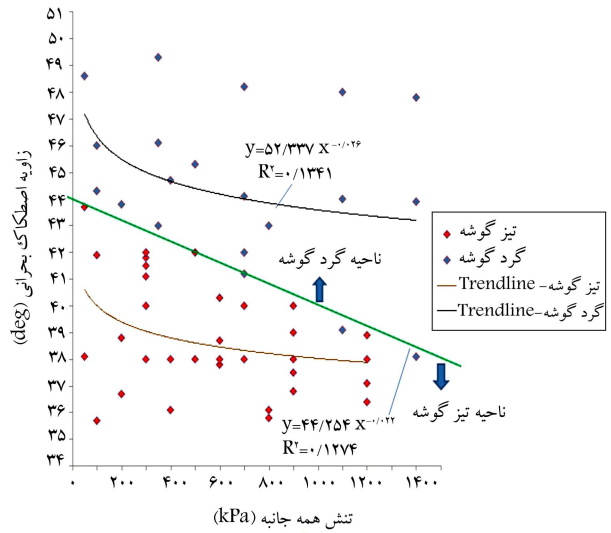
نشانه‌ی نمونه	$\sigma'_p$ (kPa)	$\phi'_{Critical}$ (Deg.)	$\sigma'_{Peak}$ (Deg.)	$\varepsilon_v$ (%)	$(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3})$ (Failure)
SA° ۸-Q-۵°	۳۰۰	۴۱٫۵	۳۸٫۵	۰٫۲	۵٫۱۷
	۶۰۰	۳۸٫۷	۳۵	۰٫۱۳	۴٫۳
	۹۰۰	۳۷٫۵	۳۳٫۷	۰٫۴۲	۴٫۱
	۱۲۰۰	۳۷٫۱	۳۳٫۴	۰٫۶۹	۴٫۰۴
SA° ۸-Q-۸°	۳۰۰	۴۱٫۱	۳۹٫۵	۰٫۵	۵٫۱۷
	۶۰۰	۳۷٫۸	۳۳٫۷	۰٫۱	۴٫۱۷
	۹۰۰	۳۶٫۸	۳۳٫۴	۰٫۱۷	۳٫۹۴
	۱۲۰۰	۳۶٫۴	۳۲٫۳	۰٫۴۹	۳٫۹۱
SA° ۹-LS-۵°	۱۰۰	۴۹	۵۰	۱	۶٫۷
	۳۰۰	۴۲	۴۵٫۶	۰٫۹	۵
	۵۰۰	۴۲	۴۳	-۱	۴٫۲
	۷۰۰	۴۰	۴۲٫۴	-۱٫۳	۴٫۱۴
SA ۱۰-SS-۵°	۹۰۰	۴۰	۴۱٫۳	-۲	۳٫۸۸
	۱۲۰۰	۳۸	۳۹٫۹	-۲	۳٫۵۸
	۱۰۰	۵۱	۵۳	۰٫۱	۸
	۳۰۰	۴۰	۴۱٫۸	۱٫۲	۴
SA ۱۱-AB-۵°	۵۰۰	۳۸	۴۰	۱٫۲	۳٫۶
	۷۰۰	۳۸	۳۹٫۲	۱	۳٫۴۳
	۳۰۰	۳۸	۳۸٫۷	۱٫۵	۳٫۳۳
	۶۰۰	۳۸	۳۸٫۲	-۱٫۴	۳٫۲۵
SR ۱۲-AB-۵°	۹۰۰	۳۸	۳۷٫۵	-۱٫۵	۳٫۱۱
	۱۰۰	۴۴	۴۶	۰٫۲	۵
	۴۰۰	۳۸	۳۸	۰٫۶	۳٫۳
	۷۰۰	۳۶	۳۶٫۹	۱	۳
SR ۱۳-A-۵°	۳۰۰	۴۰	۴۱٫۵	-۰٫۱	۳٫۹۳
	۵۰۰	۴۵	۴۷	۰٫۳	۵٫۵
	۷۰۰	۴۲	۴۳	۰	۴٫۲۸

#### ۱.۵. بررسی رابطه‌ی تنش همه‌جانبه با زاویه‌ی اصطکاک بحرانی

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با استخراج نتایج به دست آمده از جدول ۲، در نموداری اقدام به بررسی رابطه‌ی زاویه‌ی اصطکاک بحرانی با تنش همه‌جانبه شده است. در این نمودار وسعت و پراکندگی داده‌ها بسیار زیاد است، و این خود می‌تواند گواهی بر آشفتگی ذرات باشد که به پارامترهای فیزیکی مرتبط می‌شود. به عبارت دیگر، رفتار ذرات می‌تواند در تنش‌های همه‌جانبه‌ی یکسان با یکدیگر مشابه نباشد و در یک بازه تعیین شود.



شکل ۹. رابطه‌ی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بیشینه با تغییرات تنش همه‌جانبه براساس تفکیک جنس و منشأ.

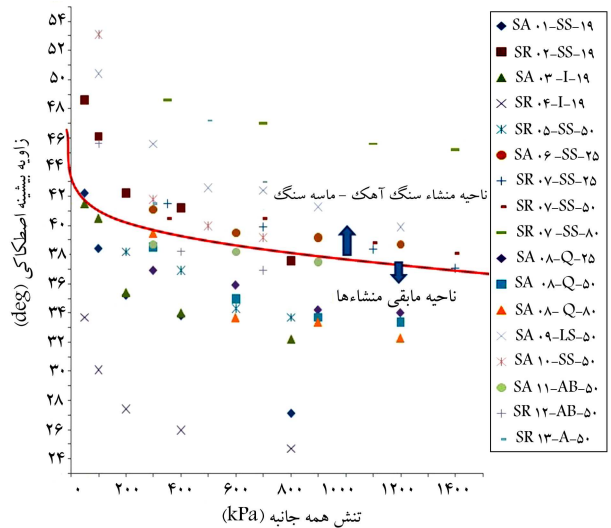


شکل ۷. رابطه‌ی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بحرانی با تغییرات تنش همه‌جانبه در دو حالت گرد گوشه و تیز گوشه.

۳. در تنش همه‌جانبه با فشار بالا، تأثیر جنس در زاویه‌ی اصطکاک بیشینه، اثر چندانی نداشته است، به طوری که به علت روانی و نبود مقاومت در سنگ‌دانه‌ها، زاویه‌ی اصطکاک بیشینه در تمامی نمونه‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

۴. همچنین در شکل ۸، پراکندگی ذرات در هر ناحیه بسیار زیاد است، به طوری که می‌توان اثر لسان‌انجاس را نیز در تعیین پارامتر زاویه‌ی اصطکاک بیشینه مؤثر دانست. اگرچه در این پژوهش این مسئله نیز بررسی شده است.

۵. تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بیشینه با افزایش تنش همه‌جانبه و در فشارهای بالا، شدت بیشتری به نسبت زاویه‌ی اصطکاک بحرانی دارد و با شیب بیشتری رو به کاهش است، این بدان معنی است که با افزایش فشار جانبی، کاهش زاویه‌ی اصطکاک بیشینه سریع‌تر است و مقدار بیشتری دارد و این مسئله می‌تواند تأییدی بر پژوهش صورت‌گرفته‌ی کلارک (Clark) باشد.<sup>[۱۱]</sup>



شکل ۸. تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بیشینه با تغییرات تنش همه‌جانبه.

## ۶. بررسی رابطه‌ی معیار سایش با زوایای اصطکاک

در این بخش هدف بررسی معیار سایش (لس‌انجاس) است، که با جنس و شکل سنگ‌دانه‌ها در ارتباط است.

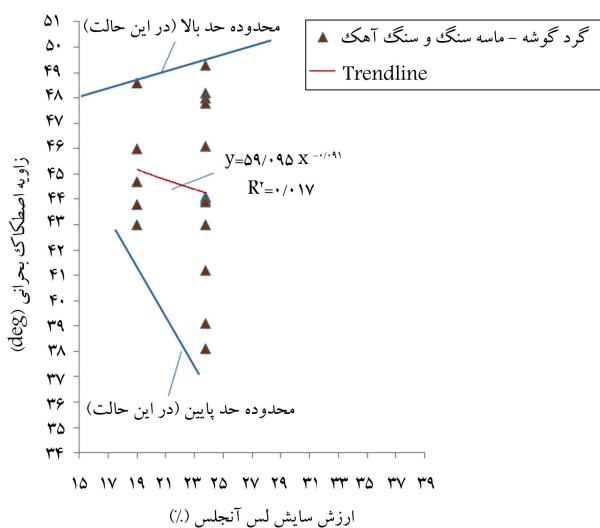
### ۱.۶. بررسی رابطه‌ی معیار سایش با زاویه‌ی اصطکاک بحرانی

با بررسی شکل ۱۰ که بیان‌گر نوع رفتار سنگ‌دانه‌ها با در نظر گرفتن معیار سایش و ارتباط آن با زاویه‌ی اصطکاک بحرانی است، پراکندگی نمونه‌ها بسیار زیاد است و باید برای به دست آوردن رابطه‌ی دقیق‌تر، این نمودار را براساس منشأ و شکل سنگ‌دانه‌ها تفکیک کرد. تفکیک نمودار براساس هر دو پارامتر منشأ و شکل می‌تواند نتیجه‌ی بسیار دقیق‌تر را در نظر گرفتن معیار سایش حاصل کند. مطابق شکل ۱۰، می‌توانیم سنگ‌دانه‌هایی با جنس ماسه‌سنگ و سنگ آهک را در یک محدوده‌ی رفتاری براساس معیار سایش در نظر بگیریم که دو رفتار متفاوت در آنها با در نظر گرفتن تیز گوشه و گرد گوشه‌بودن مشاهده می‌شود. در ادامه، نمودار شکل ۱۰ براساس منشأ و شکل سنگ‌دانه‌ها به ۳ نمودار تقسیم شده و نتایج مهمی به دست آمده است:

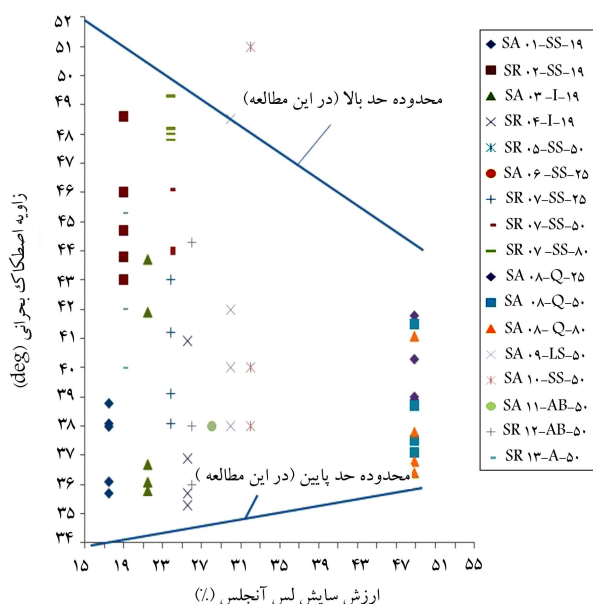
براساس منشأ سنگ‌دانه‌ها می‌تواند نتیجه‌ی دقیق‌تر باشد. با در نظر گرفتن ناحیه‌های تفکیک شده در این شکل، می‌توان به یک رابطه بین زاویه‌ی اصطکاک بیشینه با تغییرات تنش همه‌جانبه رسید، که به تفکیک برای این دو منطقه و در شکل ۹ بیان شده است، روابطی که خود، اثر سطح تنش، جنس و منشأ را توأم در تعیین زاویه‌ی اصطکاک بیشینه نشان می‌دهند. مطابق شکل‌های ۸ و ۹، تفکیک نمودار فوق براساس منشأ، بیانگر این نتایج مهم است:

۱. زاویه‌ی اصطکاک بیشینه در نمونه‌هایی با منشأ رسوبی، که عمدتاً از جنس سنگ آهک و ماسه‌سنگ هستند، مقدار بیشتری نسبت به سایر منشأهاست؛ به طوری که در تنش همه‌جانبه‌ی متفاوت، محدوده‌ی رفتاری آن‌ها در قسمت بالاتری از سایر منشأها قرار گرفته است.

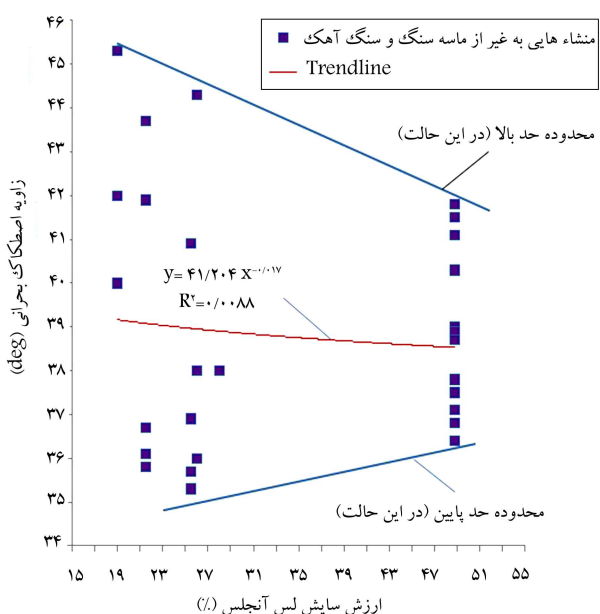
۲. با افزایش تنش همه‌جانبه، زاویه‌ی اصطکاک بیشینه در حال کاهش است، که نشان می‌دهد با افزایش فشار جانبی، این زاویه همانند زاویه‌ی اصطکاک بحرانی کاهش می‌یابد.



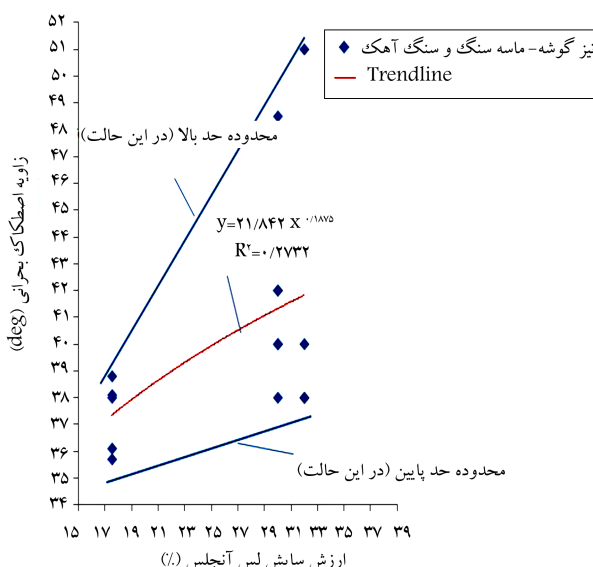
شکل ۱۲. رابطه‌ی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بحرانی با ارزش سایش لس آنجلس در تقسیم‌بندی سنگ‌دانه‌ها براساس سنگ آهک - ماسه‌سنگ - گردگوشه.



شکل ۱۰. تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بحرانی با ارزش سایش لس آنجلس.



شکل ۱۳. رابطه‌ی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بحرانی با ارزش سایش لس آنجلس در سنگ‌دانه‌ها با منشأ غیر از سنگ آهک و ماسه‌سنگ - تیزگوشه - گردگوشه.



شکل ۱۱. رابطه‌ی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بحرانی با ارزش سایش لس آنجلس در تقسیم‌بندی سنگ‌دانه‌ها براساس سنگ آهک - ماسه‌سنگ - تیزگوشه.

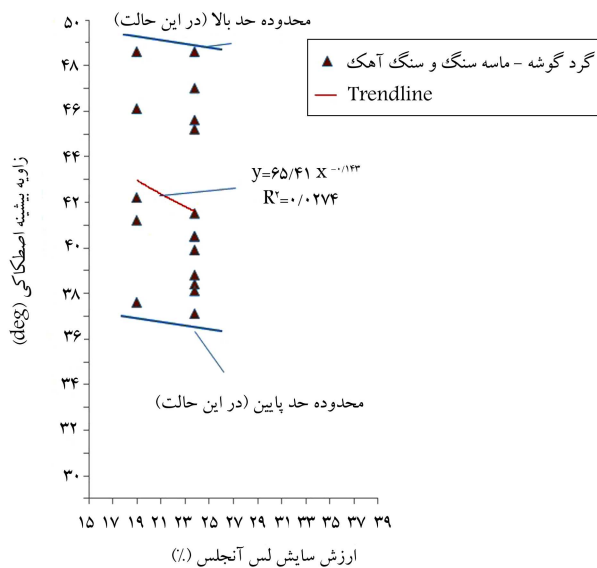
را می‌توان فقط با در نظر گرفتن منشأ آنها بررسی کرد. بر همین اساس در شکل ۱۳ که تقسیم‌بندی صورت‌گرفته براساس سنگ‌دانه‌ها با منشأهایی غیر از ماسه‌سنگ و سنگ آهک و با در نظر گرفتن گردگوشگی و تیزگوشگی است، با افزایش معیار سایش، زاویه‌ی اصطکاک بحرانی کاهش یافته و در نهایت رابطه‌ی تقریبی نیز در این حالت به دست آمده است. در رابطه‌های بیان‌شده در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳، پارامتر  $L.S$  پارامتر لس آنجلس است که به صورت درصد بیان شده است.

۱. در سنگ‌دانه‌ها با منشأ سنگ آهکی و ماسه‌سنگی و با در نظر گرفتن تیزگوشگی، با افزایش معیار سایش، زاویه‌ی اصطکاک بحرانی رو به افزایش است (شکل ۱۱)، در صورتی‌که در سنگ‌دانه‌ها با در نظر گرفتن گردگوشگی، دقیقاً رفتار سنگ‌دانه‌ها بر عکس است و با افزایش معیار سایش، زاویه‌ی اصطکاک بحرانی کاهش می‌یابد (شکل ۱۲). در واقع اثر منشأ و شکل باید توأم در نظر گرفته شود و برای تعیین رابطه‌ی دقیق‌تر، باید سنگ‌دانه‌ها با منشأ سنگ آهک و ماسه‌سنگ با گردگوشگی و تیزگوشگی از هم تفکیک شوند.

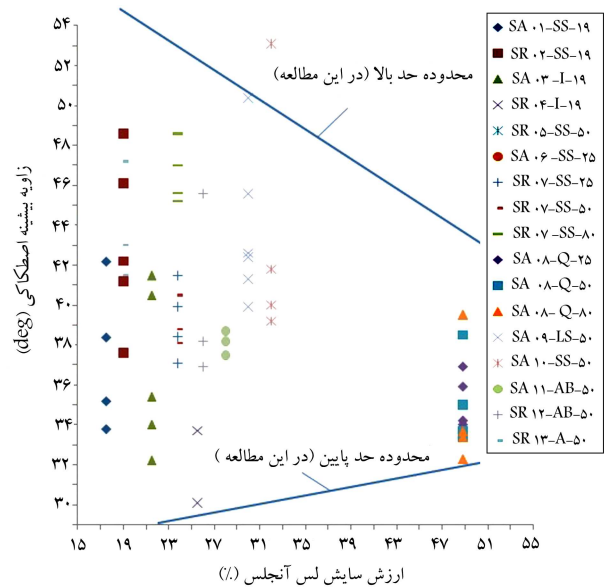
## ۲.۶. بررسی رابطه‌ی معیار سایش با زاویه‌ی اصطکاک بیشینه همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، اقدام به بررسی رابطه‌ی زاویه‌ی

۲. در سنگ‌دانه‌ها با منشأهایی به جزء ماسه‌سنگ و سنگ آهکی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بحرانی با افزایش معیار سایش تفاوت مشهودی در دو نوع گردگوشه و تیزگوشه ندارد، به عبارت دیگر، رفتار این‌گونه سنگ‌دانه‌ها

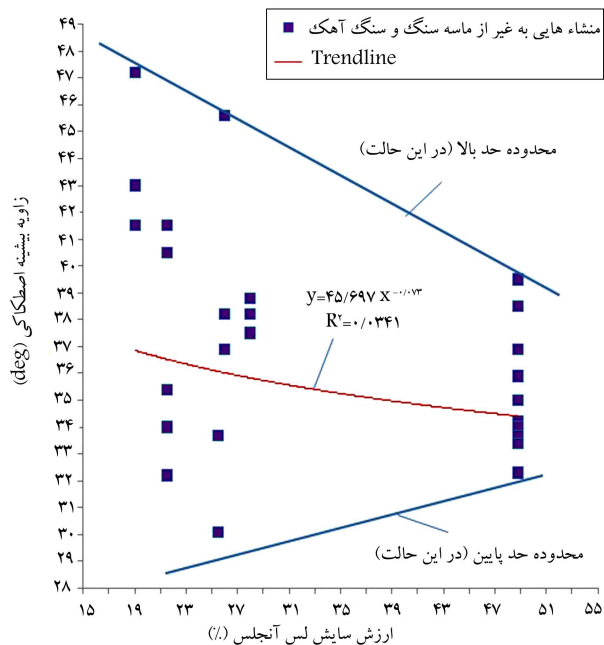




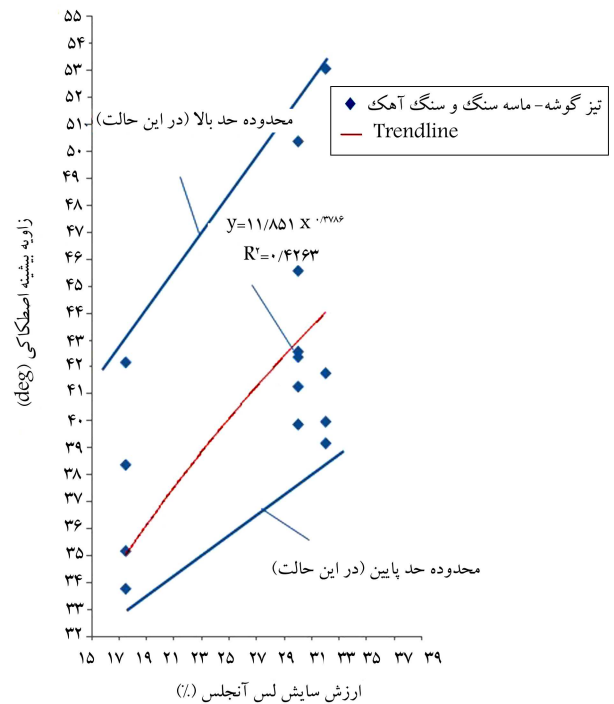
شکل ۱۴. رابطه‌ی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بیشینه با ارزش سایش لس آنجلس در تقسیم‌بندی سنگ‌دانه‌ها براساس سنگ آهک - ماسه سنگ - گرد گوشه.



شکل ۱۴. تغییرات زاویه اصطکاکی بیشینه با ارزش سایش لس آنجلس.



شکل ۱۵. رابطه‌ی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بیشینه با ارزش سایش لس آنجلس در تقسیم‌بندی سنگ‌دانه‌ها براساس سنگ آهک - ماسه سنگ - تیرگوشه - گرد گوشه.



شکل ۱۵. رابطه‌ی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بیشینه با ارزش سایش لس آنجلس در تقسیم‌بندی سنگ‌دانه‌ها براساس سنگ آهک - ماسه سنگ - تیزگوشه.

(شکل‌های ۱۵ الی ۱۷).

## ۷. ارائه‌ی روابط ریاضی براساس نتایج

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، در جدول ۳ جمع‌بندی شده‌است تا بتوان پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌دانه‌ها را بدون آزمایش تعیین کرد. در جدول ۴، نیز بازه‌های عددی براساس رابطه‌های به‌دست‌آمده ارائه شده‌است تا بتوان براساس هر کدام از پارامترها، محدوده‌ی پارامتر دیگر را نیز حدس زد.

جدول ۳. روابط ارائه شده برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌دانه‌ها با توجه به جنس، شکل، منشأ آن‌ها با توجه به در نظر گرفتن سطح تنش.

$\phi'_{Peak}$ (Deg.)		$\phi'_{Critical}$ (Deg.)		سنگ‌دانه‌ها براساس منشأ	سنگ‌دانه‌ها براساس شکل
ارزش سایش (% لیس آنجلس)	$\sigma'_p$ (kPa)	ارزش سایش (% لیس آنجلس)	$\sigma'_p$ (kPa)		
۶۵/۴۱L.S <sup>-۰٫۱۴۳</sup>	۱۸۹/۷۲ $\sigma'_p$ <sup>-۰٫۲۳</sup>	۵۹/۰۹۵L.S <sup>-۰٫۰۹۱</sup>	۵۲/۳۳۷ $\sigma'_p$ <sup>-۰٫۰۲۶</sup>	سنگ آهک و ماسه سنگ	طبیعی/گردگوشه
۴۵/۶۹۷L.S <sup>-۰٫۰۷۳</sup>	۴۱/۰۳۲ $\sigma'_p$ <sup>-۰٫۰۲۹</sup>	۴۱/۲۰۴L.S <sup>-۰٫۰۱۷</sup>		به غیر از سنگ آهک و ماسه سنگ	
۱۱/۸۵۱L.S <sup>-۰٫۲۷۸۶</sup>	۱۸۹/۷۲ $\sigma'_p$ <sup>-۰٫۲۳</sup>	۲۱/۸۴۲L.S <sup>-۰٫۱۸۷۵</sup>	۴۴/۲۵۴ $\sigma'_p$ <sup>-۰٫۰۲۶</sup>	به غیر از سنگ آهک و ماسه سنگ	شکسته/تیزگوشه
				سنگ آهک و ماسه سنگ	

جدول ۴. تعیین زوایای اصطکاکی بحرانی و اصطکاکی بیشینه براساس جنس، شکل، منشأ و ارزش سایش لیس آنجلس به صورت عددی و بازویی.

$\phi'_{Peak}$ (Deg.)	ارزش سایش (% لیس آنجلس)	$\sigma'_p$ (kPa)	$\phi'_{Critical}$ (Deg.)	ارزش سایش (% لیس آنجلس)	$\sigma'_p$ (kPa)	سنگ‌دانه‌ها براساس منشأ	سنگ‌دانه‌ها براساس شکل
۵۱-۳۶	۶۵-۸	۱۴۰۰-۳۰۰	۴۹-۴۳	۳۳-۸	۲۰۰۰-۱۰	سنگ آهک و ماسه سنگ	طبیعی/گردگوشه
۳۸٫۵-۳۳٫۵	۶۵-۱۰	۱۱۰۰-۱۰	-	-	-	به غیر از سنگ آهک و ماسه سنگ	
			۴۰-۳۸٫۵	۵۰-۶	۱۵۰۰-۵۰	به غیر از سنگ آهک و ماسه سنگ	شکسته/تیزگوشه
۵۱-۳۶	۴۷-۱۹	۱۴۰۰-۳۰۰	۴۱-۳۶	۳۱-۱۵	۲۰۰۰-۱۰	سنگ آهک و ماسه سنگ	

## ۸. نتیجه‌گیری

- زاویه‌ی اصطکاکی بیشینه‌ی سنگ‌دانه‌هایی با جنس سنگ آهک و ماسه‌سنگ بیشتر از زاویه‌ی اصطکاکی بیشینه‌ی سایر سنگ‌دانه‌هاست.
- با افزایش تنش همه‌جانبه، زاویه‌ی اصطکاکی بیشینه کاهش می‌یابد.
- در تنش‌های همه‌جانبه‌ی بالا، اثر جنس و منشأ سنگ‌دانه‌ها در زاویه‌ی اصطکاکی بیشینه بسیار ناچیز است.
- با افزایش تنش همه‌جانبه، زاویه‌ی اصطکاکی بیشینه سریع‌تر کاهش می‌یابد و این امر تأییدی بر پژوهش صورت‌گرفته‌ی کلارک (Clark) است.
- در سنگ‌دانه‌های تیزگوشه از جنس سنگ آهک و ماسه‌سنگ، با افزایش درصد سایش لیس آنجلس، زاویه‌ی اصطکاکی بحرانی افزایش می‌یابد، و بالعکس در سنگ‌دانه‌های گردگوشه، با افزایش درصد سایش لیس آنجلس، زاویه‌ی اصطکاکی بحرانی کاهش می‌یابد.

رفتار مصالح سنگ‌دانه‌ی علاوه بر سطح تنش به پارامترهای متعددی مانند: توزیع دانه‌بندی، منشأ سنگ‌دانه‌ها، شکل دانه‌ها و جنس آنها بستگی دارد. در این مطالعه با انجام آزمون‌های سه محوری بزرگ مقیاس و جمع‌آوری داده‌های گذشته رفتار این نوع مصالح بررسی و نتایج مهمی به این شرح حاصل شده است:

- سنگ‌دانه‌های گردگوشه‌ی مورد مطالعه، عموماً دارای زاویه‌ی اصطکاکی بحرانی بیشتری در مقایسه با سنگ‌دانه‌های تیزگوشه هستند که دلیل این امر را می‌توان در جنس و منشأ سنگ‌دانه‌ها جستجو کرد.
- با افزایش تنش همه‌جانبه در تمامی سنگ‌دانه‌ها با هر جنس و شکلی، زاویه‌ی اصطکاکی بحرانی کاهش می‌یابد.

## منابع (References)

1. Veiskarami, M. "The effect of particle size distribution of soil aggregates on the geotechnical properties of embankments", Dissertation presented in Guilan University (2005).
2. Desai, C.S. and Toth, J. "Disturbed state constitutive modeling based on stress-strain and nondestructive behavior", *International Journal of Solids and Structures*, **33**(11), pp. 1619-1650 (1996).
3. Desai, C.S., *Mechanics of Materials and Interfaces—the Disturbed State Concept*, CRC Press (2001).
4. Santamarina, J.C. and Cho, G.C. "Determination of critical state parameters in sandy soils – simple procedure", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, **24**(2), pp. 185-192 (2001).
5. Santamarina, J.C. and Cho, G.C. "Soil behaviour: The role of particle shape", *Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference*, R.J. Jardine et al. (ed.), Thomas Telford, **1**, pp. 604-617 (29-31 March 2004).
6. Barrett, P.J. "The shape of rock particles, a critical review", *Sedimentology*, **27**(3), pp. 291-303 (1980).
7. Varadarajan, A., Sharma, K.G., Venkatachalam, K. and Gupta, A.K. "Testing and modeling two rockfill materials", *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, **129**(3), pp. 208-212 (2003).
8. Varadarajan, A., Sharma, K.G., Abbas, S.M. and Dhawan, D.K. "Constitutive model for rockfill materi-

- als and determination of material constants”, *International Journal of Geomechanics (ASCE)*, **6**(4), pp. 226-237 (2006).
9. Gupta, A.K. “Effect of particle size and confining pressure on breakage and strength parameters of rockfill materials”, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **14**, Bundle H, pp. 1-12 (2009).
  10. Bolton, M.D. “The strength and dilatancy of sands”, *Geotechnique*, **36**(1), pp. 68-72 (1986).
  11. Clark, J.I. “The Settlement and bearing capacity of very large foundation on strong soils”, *R.M. Hardy Keynote Address, Can. Geotech. J.*, **35**(1), pp. 131-145 (1998).
  12. Jahanandish, M., Veiskarami, M. and Ghahramani, A. “Effect of foundation size and roughness on the bearing capacity factor,  $N_\gamma$ , by stress level based ZEL method”, *Arabian Journal for Science and Engineering (AJSE)*, Accepted Article (Feb. 2011).
  13. Veiskarami, M.; Ghorbani, A. and Alavipour, A. “Development of a constitutive model for rockfills and similar granular materials based on the disturbed state concept”, *Frontiers of Structural and Civil Engineering Journal*, **6**(4), pp. 365-378 (Springer 2012).
  14. Veiskarami, M., Ghorbani, A. and Alavipour, M. “Application of the disturbed state concept in evaluation of a developed elasto-plastic constitutive model for rockfills”, Presented in the V-th International Geomechanics Conference, Varna, Bulgaria, pp. 65-74 (18-21 June 2012).
  15. Aghaei Araei, A., Soroush A. and Rayhani, M. “Large-scale triaxial testing and numerical modeling of rounded and angular rockfill materials”, *Sharif University of Technology*, **17**(3), pp. 169-183 (2010).
  16. Soroush, A. and Jannatiaghdam, R. “Behavior of rockfill materials in triaxial compression testing”, *International Journal of Civil Engineering*, **10**(2), pp. 153-161 (June 2012).