

# تأثیرات شکل و اندازه شن‌دانه‌ها بر ویژگی‌های مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای

امیر حمیدی<sup>۱</sup>، نیما سلیمی<sup>۱</sup> و وحید یزدانجو<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت معلم تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۹/۲۹

## چکیده

امروزه محدودیت منابع قرضه با دانه‌بندی مناسب در فعالیت‌های رایج مهندسی، باعث رواج هر چه بیشتر استفاده از دانه‌های شنی با اندازه‌های درشت و تا مرز قلوه سنگ در خاکریزها شده است. به کارگیری چنین ذرات درشت‌دانه‌ای در شیب‌ها و خاکریزها مستلزم در نظر گرفتن تأثیرات آنها در مخلوط با خاک‌های ریزتر است. برای مثال تعیین متغیرهای مقاومتی و تغییر شکل چنین مخلوط‌هایی برای تعیین پایداری شبروانی‌ها، شیب پوسه سدهای خاکی و زمین‌لغزه‌ها ضروری است. از سوی دیگر در بسیاری از موارد، خاک ساختگاهی که با آن سر و کار داریم به صورت ترکیبی از شن‌دانه‌ها در خمیره‌ای از ذرات ماسه‌ای است. محدودیت ابعاد دستگاه‌های آزمایشگاهی متعارف مانع از انجام آزمایش بر روی نمونه‌های با ابعاد درشت می‌شود. بنابراین در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس تأثیر شکل و اندازه شن‌دانه بر رفتار مکانیکی مخلوط‌های ماسه‌ای مشخص شود. در این پژوهش انجام تعدادی آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس با جعبه برش ۳۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متری بر مخلوط خاک ماسه‌ای و شن‌دانه‌های گردگوشه یا تیزگوشه با بیشترین قطر دانه‌های ۱۲/۵ و ۲۵/۴ میلی‌متر ترتیب داده شد. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های خشک در تراکم‌های نسبی ۳۵، ۶۰ و ۸۵٪ و سربارهای ۱/۵، ۳ و ۴/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و در درصد‌های شن‌دانه صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که شن‌های تیزگوشه نسبت به شن‌های گردگوشه به میزان بیشتری مقاومت برشی نهایی، مقاومت پسماند، زاویه اصطکاک و اتساع و شاخص تردی مخلوط‌های شن و ماسه را افزایش می‌دهند. به همین ترتیب، شن‌های با بیشترین قطر دانه ۲۵/۴ میلی‌متر نیز نسبت به شن‌های با بیشترین قطر دانه ۱۲/۵ میلی‌متر به میزان بیشتری بر روی متغیرهای اشاره شده در بالا تأثیر می‌گذارند. همچنین تأثیر شکل و اندازه شن بر رفتار خاک‌های مخلوط در درصد‌های شن‌دانه بیشتر، سربار زیادتر و تراکم نسبی بالاتر، آشکارتر است.

**کلیدواژه‌ها:** مقاومت برشی، چگالی نسبی، فشار سربار، درصد وزنی شن‌دانه، شکل شن‌دانه، اندازه شن‌دانه

\*نویسنده مسئول: امیر حمیدی

E-mail: hamidi@tmu.ac.ir

## ۱- مقدمه

همه نمونه‌های ایشان تحت سربار ثابت ۹۰ کیلوپاسکال انجام گرفت. این مقدار از حد خردشدگی دانه‌ها که حدود ۱۵۰ کیلوپاسکال است کمتر است.

Hamidi et al. (2009a, b) مخلوط‌های شن گردگوشه و ماسه بدانه‌بندی شده را تحت سربارهای ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ کیلوپاسکال که فراتر از حد خردشدگی دانه‌های آنهاست تحت آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس قرار داده و با بررسی رفتار برشی و تغییرحجم آنها، روابط پیشنهادی (Simoni and Hously, 2006) را به سربارهای فراتر از حد خردشدگی دانه‌ها گسترش دادند.

بررسی‌های دیگری نیز بر رفتار برشی مخلوط شن و ماسه انجام شده است که از این جمله می‌توان به پژوهش‌های (Thevanayagam (2000)، (Evans and Zhou (1995)، (Kuenza et al. (2004)، (Vallejo and Luis (2001)، (Kokusho et al. (2004) اشاره نمود. این پژوهشگران با استفاده از آزمایشات استاتیکی و دینامیکی به بررسی ویژگی‌های مقاومتی و مکانیکی خاک‌های مخلوط شن و ماسه‌ای پرداختند. با وجود این، تأثیر شکل و اندازه شن‌دانه‌ها بر رفتار برشی و تغییرحجم این مخلوط‌ها موضوعی است که در بررسی‌های پیشین مورد توجه کمتری قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، مجموعه منظمی از آزمایش‌های برش بزرگ مقیاس بر مخلوط شن و ماسه حاوی شن‌دانه‌های تیز و گردگوشه در دو اندازه ۱۲/۵ و ۲۵/۴ میلی‌متر انجام شده است. هدف اصلی بررسی و تعیین اثرات شکل و اندازه درشت‌دانه شنی بر ویژگی‌های مقاومت برشی و تغییرحجم مخلوط شن و ماسه تحت بارگذاری استاتیکی است.

## ۲- برنامه آزمایش‌ها

### ۲-۱. ویژگی‌های مصالح

در تاریخچه مکانیک خاک، شکل دانه‌ها به وسیله نمودارهای استاندارد که در آنها ذرات به صورت منفرد رسم می‌شوند بررسی می‌شود. نمونه‌ای از این نمودارها در شکل ۱ ارائه شده است (Krumbein, 1941; Krumbein and Sloss, 1963; Powers, 1953).

دست‌خوردگی و نیاز به نمونه‌های بزرگ مقیاس همواره موجب بروز مشکلات و محدودیت‌هایی در انجام مطالعات آزمایشگاهی بر مصالح درشت‌دانه بوده است. در بسیاری از بررسی‌ها، بیشترین اندازه درشت‌دانه‌ها به یک ششم کوچک‌ترین بعد نمونه آزمایشگاهی محدود شده است. این موضوع موجب کمبود بررسی‌های آزمایشگاهی بر این نوع مصالح است.

(Fragaszy et al. (1990;1992 رفتار برشی مصالح مخلوط شن و ماسه‌ای را بررسی نموده و مدلی برای ارزیابی مقاومت مخلوط بر اساس مقاومت برشی بخش ریزتر که ماتریس یا خمیره نامیدند ارائه دادند. بر اساس نظر ایشان، در مقادیر کمتر از یک حد آستانه بخصوص، دانه‌های درشت در ماتریس ریزتر بدون تماس در شرایط شناور قرار خواهند داشت. بدین ترتیب مقاومت برشی و تغییرشکل مخلوط توسط ماتریس ریزتر کنترل خواهد شد. اما با افزایش درصد درشت‌دانه در خاک و ایجاد تماس مابین دانه‌ها، مقاومت مخلوط توسط هر دو بخش ریز و درشت‌دانه کنترل می‌شود. همچنین ایشان چگالی زمینه دور را به عنوان چگالی ماتریس ریزتر در فاصله زیاد از دانه‌های درشت تعریف نموده و نتیجه‌گیری کردند که مقاومت برشی خاک مخلوط در شرایط شناوری درشت‌دانه‌ها، با آزمایش بر بخش ریزتر، مشروط بر آن که نمونه‌ها در چگالی برابر با چگالی زمینه دور تهیه شدند قابل محاسبه است.

(Yagiz (2001 تأثیر درصد و شکل شن‌دانه بر مقاومت برشی مخلوط شن و ماسه‌ای را با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر نمونه‌های ۶۰ در ۶۰ میلی‌متری بررسی نمودند. برای بررسی تأثیر شکل درشت‌دانه‌ها، شن‌دانه‌های تیز و گردگوشه را در نمونه مورد استفاده قرار دادند.

(Simoni & Hously (2006 آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس بر مخلوط‌های بدانه‌بندی شده حاوی شن‌دانه با اندازه‌های مختلف انجام دادند. ایشان با استفاده از مفاهیم ارائه شده (Bolton (1986;1987 روشی برای برآورد زاویه اصطکاک مخلوط شن و ماسه بر اساس زاویه اصطکاک بخش ریزتر پیشنهاد نمودند.

#### ۴- اثر شکل شن دانه بر رفتار برشی مخلوط شن و ماسه

تعدادی از آزمایش‌های برش مستقیم در پژوهش حاضر برای بررسی تأثیرات شکل شن دانه بر رفتار برشی مخلوط شن و ماسه‌ای انجام شده‌اند. شکل ۷ نشانگر تغییرات تنش برشی با تغییر شکل برشی در درصد‌های مختلف شن دانه گرد یا تیز گوشه با بیشینه اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر است. این نتایج مربوط به انجام آزمایش تحت سربارهای مختلف در چگالی نسبی ۶۰ درصد هستند.

بر اساس این شکل، مقاومت برشی مخلوط‌های دارای شن دانه تیز گوشه به طور عموم در مقایسه با مخلوط دارای شن دانه گرد گوشه بیشتر است. این موضوع با بررسی منحنی‌های اتساع- تغییر شکل برشی در شکل ۸ قابل توجه است. در واقع، وقوع اتساع بیشتر در مخلوط دارای شن تیز گوشه در مقایسه با مخلوط دارای شن گرد گوشه به معنای انجام کار بیشتر برای وقوع تغییر شکل تحت سربار قائم یکسان است که سبب نیاز به تنش‌های برشی بیشتر یا همان مقاومت برشی بالاتر می‌شود.

این بحث در مورد مقاومت برشی اوج صادق است اما بر اساس تئوری حالت بحرانی خاک، مقاومت نهایی یا مقاومت پسماند که در تغییر شکل‌های زیاد اتفاق می‌افتد مستقل از چیدمان و شرایط اولیه دانه‌ها در نمونه است (Poulos, 1981). مقایسه شکل‌های مربوط به سربارهای مختلف تأیید می‌کند که اثرات شکل و اندازه شن دانه بر رفتار برشی مخلوط با افزایش سربار به کار رفته در آزمایش‌ها زیاد می‌شود.

شکل‌های ۹ و ۱۰ منحنی‌های تنش برشی- تغییر شکل برشی و اتساع- تغییر شکل برشی را برای بررسی تأثیر شکل شن دانه بر رفتار برشی مخلوط در چگالی‌های نسبی مختلف نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل‌ها نشان داده شده است، تأثیر شکل شن دانه بر رفتار برشی مخلوط در چگالی‌های نسبی بالا آشکارتر است. بر اساس تئوری ارائه شده توسط Taylor (1948) این موضوع بیانگر درهم فرورفتگی و درگیری بیشتر دانه‌هاست که منجر به وقوع اتساع بیشتر هنگام بارگذاری برشی و نقش کلیدی‌تر شن دانه‌ها و بویژه شکل آنها در رفتار برشی خاک مخلوط خواهد شد.

با استفاده از منحنی‌های تنش برشی- تغییر شکل برشی، شاخص تردی مخلوط ( $I_B$ ) که توسط Bishop (1956) پیشنهاد شده است محاسبه و برای ارزیابی نرخ کاهش مقاومت برشی پس از نقطه اوج در مخلوط‌های دارای شن دانه با شکل‌های مختلف بر اساس رابطه زیر تعیین شده است:

$$I_B = \frac{q_p - q_r}{q_p} \quad (1)$$

در این رابطه،  $q_p$  و  $q_r$  مقاومت برشی اوج و پسماند هستند. شکل ۱۱ نشان‌دهنده تغییرات شاخص تردی با درصد شن دانه به شکل‌های مختلف در مخلوط‌های با چگالی نسبی ۶۰ درصد تحت سربارهای متفاوت است. بر اساس این شکل، شاخص تردی با ازدیاد سربار قائم کاهش می‌یابد. اما مقدار این متغیر در مخلوط‌های دارای شن دانه تیز گوشه بویژه در درصد‌های بالاتر از ۲۰ بیشتر است. این موضوع حاکی از نرخ بیشتر کاهش مقاومت و رفتار نرم شونده در مخلوط‌های دارای درصد شن دانه بیشتر است. شکل ۱۲، تغییرات نسبت مقاومت برشی خاک مخلوط به مقاومت خاک ماسه‌ای فاقد شن دانه را با درصد شن برای مخلوط‌های دارای شن گرد یا تیز گوشه نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، این نسبت با ازدیاد درصد شن افزایش می‌یابد و در مخلوط‌های دارای شن تیز گوشه بیشتر است. همچنین این شکل نیز تأیید کننده تأثیر بیشتر شن دانه‌ها بر ویژگی‌های مقاومتی مخلوط در درصد‌های بالاتر است.

شکل ۱۳ نیز بیانگر تأثیرات شکل شن دانه بر زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع بیشینه مخلوط شن و ماسه‌ای است. بر اساس این شکل، هر دو متغیر یادشده در مخلوط‌های دارای شن دانه تیز گوشه بیشتر خواهند بود. زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع بیشینه، با ازدیاد درصد شن دانه افزایش نشان می‌دهند. زاویه اتساع ( $\psi$ ) با استفاده از مقادیر تغییر شکل قائم (۱۷) و تغییر شکل افقی (۱۸) با استفاده از رابطه زیر تعیین شده است:

$$\tan \psi = \frac{dv}{du} \quad (2)$$

نسبت کرویت برای یک دانه به معنای نسبت قطر دانه یادشده به قطر کره با حجم معادل آن است. همچنین گردی دانه‌ها نیز به صورت نسبت شعاع متوسط انحناى گوشه‌ها و لبه‌های ذره به شعاع بزرگترین کره‌ای که در ذره محاط می‌شود تعریف شده است (Wadell, 1932).

Mitchell and Soga (2005) از تیز گوشگی و کرویت برای توصیف شکل دانه‌ها بر اساس شکل ۲ استفاده نمودند. مطابق این تعریف، دانه‌های شنی به کار رفته در پژوهش حاضر به دو شکل نیمه گرد تا کاملاً گرد گوشه رودخانه‌ای و یا نیمه تیز تا کاملاً تیز گوشه هستند که در درصد‌های وزنی مختلف با خاک ماسه‌ای پایه مخلوط می‌شوند. شکل ۳ نمایی از خاک ماسه پایه و دو نوع شن دانه به کار رفته در این پژوهش را نشان می‌دهد.

در خصوص شن گرد گوشه، دو دانه‌بندی مختلف با بیشینه اندازه شن دانه ۱۲/۵ و ۲۵/۴ میلی‌متر در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. اما شن تیز گوشه فقط در اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر در تهیه نمونه به کار رفت. درصد وزنی شن دانه‌ها در این پژوهش ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد انتخاب شد.

شکل ۴ دانه‌بندی ماسه، شن و مخلوط‌های شن و ماسه به کار رفته در این پژوهش را نشان می‌دهد. چگالی ویژه دانه‌های ماسه‌ای و شنی بر اساس استاندارد ASTM-D854 به ترتیب ۲/۷۴ و ۲/۶۴ برآورد شده است. نسبت تخلخل بیشینه و کمینه ماسه، شن و مخلوط ماسه و شن نیز بر اساس استانداردهای ASTM- D4254، ASTM- D4253 برآورد شد.

شکل ۵ نشان‌دهنده تغییرات نسبت تخلخل بیشینه و کمینه مخلوط را با درصد شن دانه گرد یا تیز گوشه نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، شکل و اندازه شن دانه‌ها تأثیر ناچیزی بر نسبت تخلخل بیشینه و کمینه مخلوط دارد ولی می‌توان به طور کلی نتیجه‌گیری کرد که اضافه نمودن درصدی شن دانه به خاک ماسه‌ای موجب کاهش قابل توجه نسبت تخلخل بیشینه و کمینه خاک می‌شود. همچنین بر اساس این شکل، کاهش نسبت تخلخل بیشینه و کمینه تا درصد شن دانه ۶۰ قابل رویت است. این مقدار آستانه شناوری شن دانه‌ها در ماتریس ریزتر ماسه‌ای را نشان می‌دهد.

#### ۲-۲. متغیرهای به کار رفته در آزمایش‌ها

جدول ۱ لیست متغیرهای به کار گرفته شده در برنامه بررسی‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. این متغیرها شامل درصد شن دانه، چگالی نسبی، فشار سربار، شکل و اندازه شن دانه هستند. درصد‌های شن دانه صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ به همراه سه چگالی نسبی ۳۵، ۶۰ و ۸۵ درصد و سه فشار سربار ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ کیلوپاسکال در آزمایش‌ها استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها بر نمونه‌های کاملاً خشک در شرایط تحکیم یافته زهکشی شده انجام شدند.

#### ۳- ساخت نمونه برای آزمایش‌ها

با استفاده از مقادیر چگالی ویژه، نسبت تخلخل بیشینه و نسبت تخلخل کمینه، محاسبه وزن مخصوص خشک در هر چگالی نسبی و درصد شن امکان‌پذیر خواهد بود. با توجه به ابعاد جعبه برش مستقیم ۳۰۰ در ۳۰۰ در ۱۷۰ میلی‌متری، وزن لازم برای حصول به چگالی نسبی مورد نظر محاسبه می‌شود. نمونه‌ها در سه لایه ساخته شدند و هر لایه تا یک سوم ارتفاع جعبه برش متراکم شد. کوبش لایه‌ها به آرامی و با استفاده از یک چکش فلزی انجام گرفت.

پس از ساخت نمونه، فشار سربار مورد نظر بر آن اعمال می‌شود. آزمایش‌های برش مستقیم کنترل کرنش با سرعت ۰/۶۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شدند. تغییر شکل برشی، تغییر شکل قائم یا اتساع به همراه تنش برشی وارده در طول آزمایش ثبت شدند. شکل ۶ نمایی از دستگاه‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس و میز و بیره به کار گرفته شده در تعیین نسبت تخلخل بیشینه و نسبت تخلخل کمینه نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

## ۵- اثر اندازه شن بر رفتار برشی مخلوط شن و ماسه

روند نتایج ایشان را تأیید می‌کند. تفاوت نتایج به دیگر عوامل از جمله اختلاف در دانه‌بندی مصالح مربوط است.

## ۶- مقایسه و نتیجه‌گیری

خاک‌های دانه‌ای دارای شن دانه، به‌فراوانی در طبیعت و رسوبات و نهشته‌های آبرفتی در سواحل دیده می‌شوند. توصیف رفتار این مصالح برای کاربرد در پروژه‌های عمرانی و مقاصد عملی اهمیت فراوانی دارد. از طرف دیگر، تعیین ویژگی‌های رفتاری و مقاومتی این مصالح، به‌دلیل مشکلات موجود در مطالعات آزمایشگاهی از جمله نیاز به نمونه بزرگ مقیاس دشوار است.

در این پژوهش، تعدادی آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس برای ارزیابی اثرات شن دانه‌ها بر رفتار مکانیکی خاک‌های ماسه‌ای انجام گرفت. آزمایش‌ها بر مخلوط‌های دارای شن دانه گرد یا تیز گوشه با بیشینه اندازه دانه ۱۲/۵ و ۲۵/۴ میلی‌متر انجام شد. همچنین چگالی نسبی و فشار سربار به کار گرفته شده، از دیگر متغیرهای آزمایش‌ها بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها، شکل و اندازه شن دانه‌ها، رفتار برشی مخلوط شن و ماسه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مخلوط‌های دارای شن دانه تیز گوشه مقاومت و اتساع بالاتری را نسبت به مخلوط‌های دارای شن دانه گرد گوشه ارائه می‌دهند. افزون بر این، مخلوط‌های دارای شن دانه درشت‌تر، مقاومت اوج، زاویه اصطکاک داخلی و اتساع بیشتری را در مقایسه با مخلوط‌های دارای شن دانه ریزتر نشان می‌دهند. تأثیرات شکل و اندازه شن دانه بر ویژگی‌های مقاومتی و رفتار برشی خاک با ازدیاد درصد شن، چگالی نسبی و فشار سربار افزایش می‌یابد.

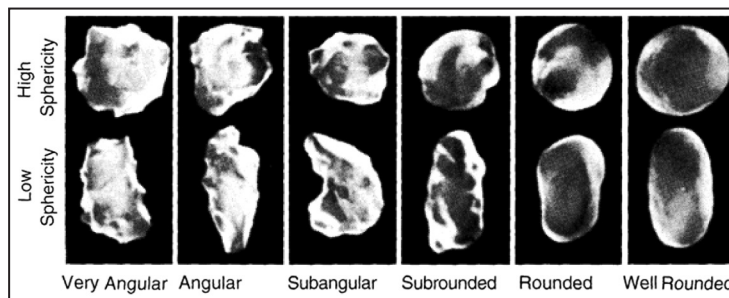
## سپاسگزاری

آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت معلم تهران انجام شده‌اند. نگارندگان مقاله مراتب تشکر خود را از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت معلم تهران اعلام می‌دارند.

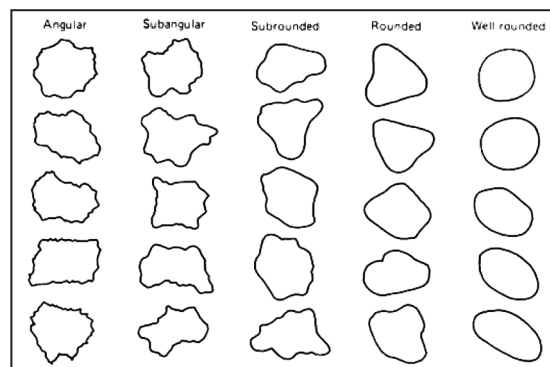
همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، آزمایش‌های برش مستقیم بر خاک مخلوط دارای شن دانه گرد گوشه در دو اندازه ۱۲/۵ و ۲۵/۴ میلی‌متر انجام گرفت تا تأثیر اندازه شن دانه بر رفتار برشی خاک مخلوط مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. شکل ۱۴ نشان‌دهنده تغییرات تنش برشی با تغییر شکل برشی در مخلوط‌های دارای شن دانه با اندازه‌های متفاوت در چگالی نسبی ۶۰ درصد است. بر اساس این شکل، مخلوط‌های دارای شن دانه‌های درشت‌تر مقاومت برشی بالاتری از خود نشان می‌دهند. این موضوع با استفاده از شکل ۱۵ نیز قابل بررسی است. در این شکل، تغییرات اتساع با تغییر شکل برشی برای مخلوط‌های دارای شن دانه با اندازه‌های مختلف ارائه شده است. بر این اساس، اتساع مخلوط‌های دارای شن دانه‌های درشت‌تر به دلیل غلظت آنها روی یکدیگر و تغییر مکان قائم زیادتر، بیشتر است. این موضوع منجر به مقاومت برشی بیشتر مخلوط‌های دارای شن دانه درشت‌تر خواهد شد. افزون بر این، تفاوت منحنی‌ها با ازدیاد درصد شن دانه افزایش می‌یابد.

شکل ۱۶ پوش گسیختگی را در مخلوط‌های دارای ۴۰ درصد شن دانه در اندازه‌های مختلف در چگالی‌های نسبی متفاوت ارائه می‌کند. بر اساس این شکل، پوش گسیختگی مخلوط‌های دارای شن دانه درشت‌تر بالاتر از پوش گسیختگی برای نمونه‌های دارای شن ریزتر است. افزون بر این، انحنای پوش با ازدیاد درصد شن افزایش یافته است.

با استفاده از پوش گسیختگی، مقادیر زاویه اصطکاک داخلی مخلوط‌های دارای شن دانه با اندازه‌های مختلف تعیین شد. شکل ۱۷ نشانگر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصد شن دانه در مخلوط‌های آزمایش شده در چگالی‌های نسبی مختلف است. بر اساس این شکل، افزایش درصد شن موجب ازدیاد زاویه اصطکاک داخلی می‌شود. افزون بر این، زاویه اصطکاک داخلی مخلوط‌های دارای شن دانه درشت‌تر بیشتر از مقدار آن در مخلوط‌های دارای شن دانه ریزتر است. این تفاوت با ازدیاد درصد شن افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه میان نتایج این پژوهش با بررسی‌های Yagiz (2001) در تراکم نسبی ۶۰ درصد که در شکل ۱۷-b نشان داده شده است،



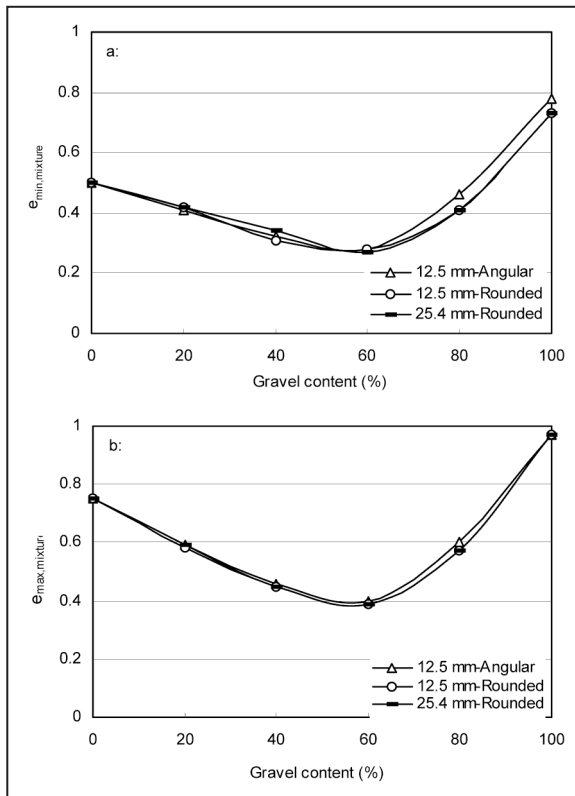
شکل ۱- طبقه‌بندی دانه‌ها بر اساس شکل و نسبت کرویت ذرات خاک (Krumbein, 1941).



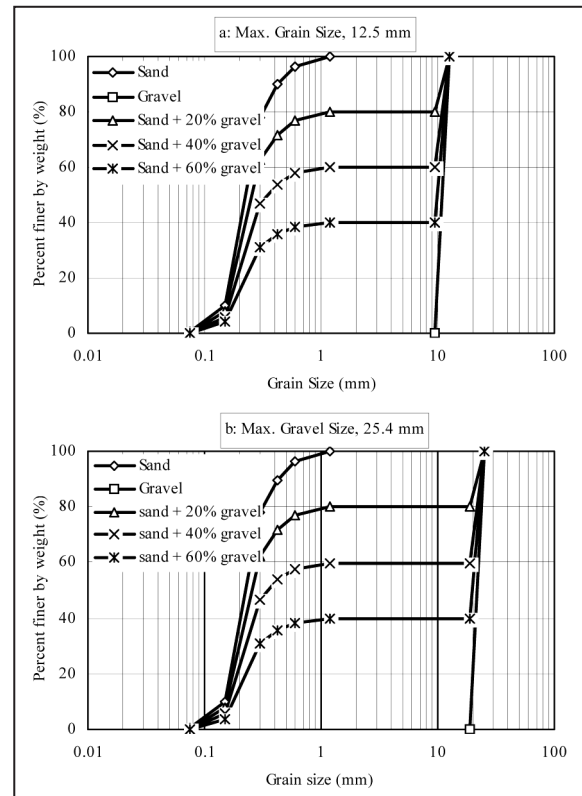
شکل ۲- طبقه‌بندی دانه‌ها بر اساس گردی ذرات (Mitchell & Soga, 2005).



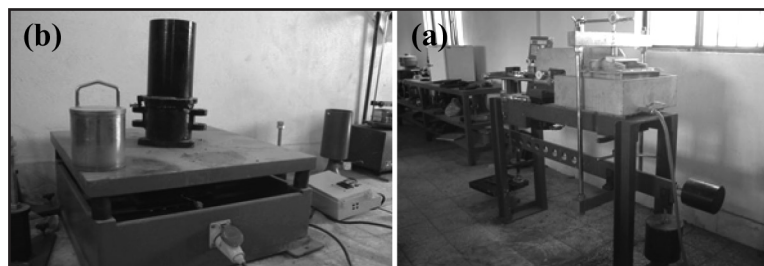
شکل ۳- مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها (a) خاک ماسه‌ای پایه، (b) شن تیز گوشه و (c) شن گرد گوشه.



شکل ۵- تغییرات نسبت تخلخل کمینه و بیشینه خاک مخلوط با درصد شن دانه (a) نسبت تخلخل کمینه (b) نسبت تخلخل بیشینه.



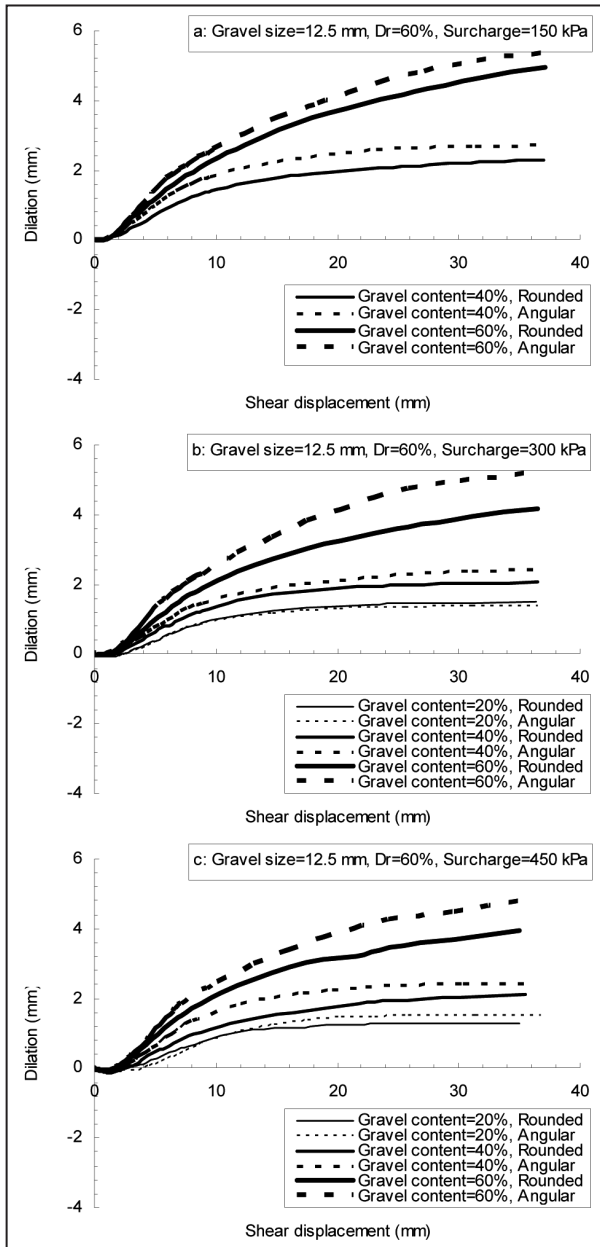
شکل ۴- دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها (a) مخلوط دارای شن دانه با اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر و (b) مخلوط دارای شن دانه با اندازه ۲۵/۴ میلی‌متر.



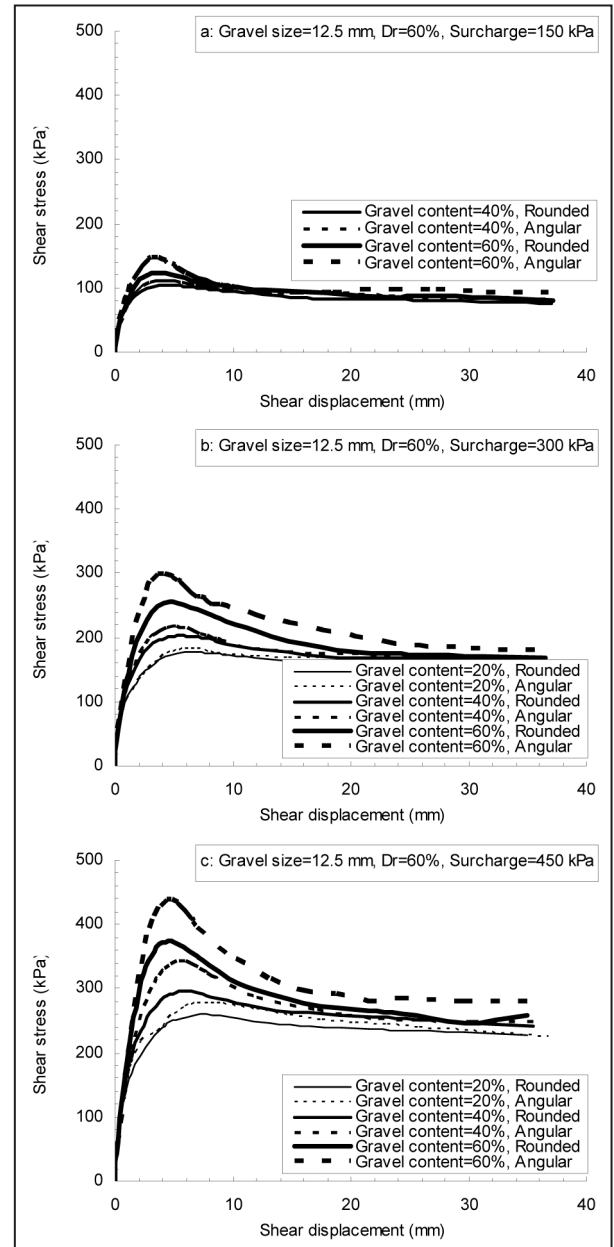
شکل ۶- نمایی از دستگاه‌های به کار رفته در انجام آزمایش‌ها (a) دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس و (b) میز و بیره برای تعیین نسبت تخلخل بیشینه و کمینه.

جدول ۱- متغیرهای به کار گرفته شده در انجام آزمایش‌ها.

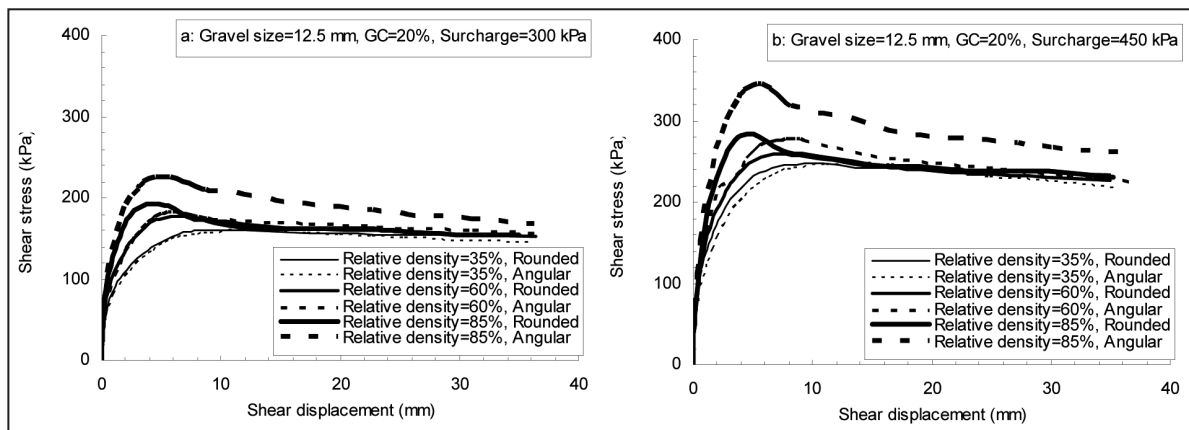
متغیر	واحد	مقدار
درصد شن	%	۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰
چگالی نسبی	%	۳۵ و ۸۵
فشار سربار	kPa	۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰
شکل شن دانه	-	تیز گوشه و گرد گوشه
اندازه شن دانه	mm	۱۲/۵ و ۲۵/۴



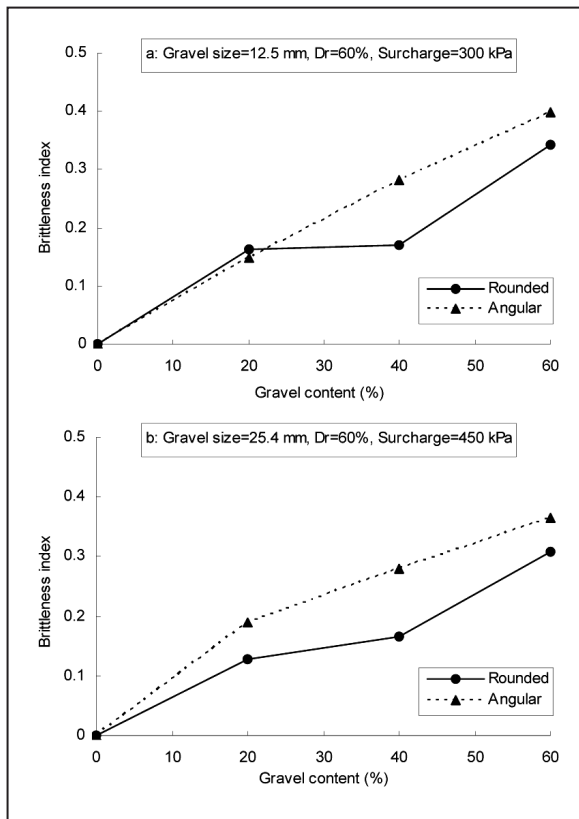
شکل ۸- تغییرات اتساع با تغییر شکل برشی برای مخلوط دارای شن دانه با شکل های مختلف در سربارهای متفاوت (a) ۱۵۰ kPa (b) ۳۰۰ kPa (c) و ۴۵۰ kPa.



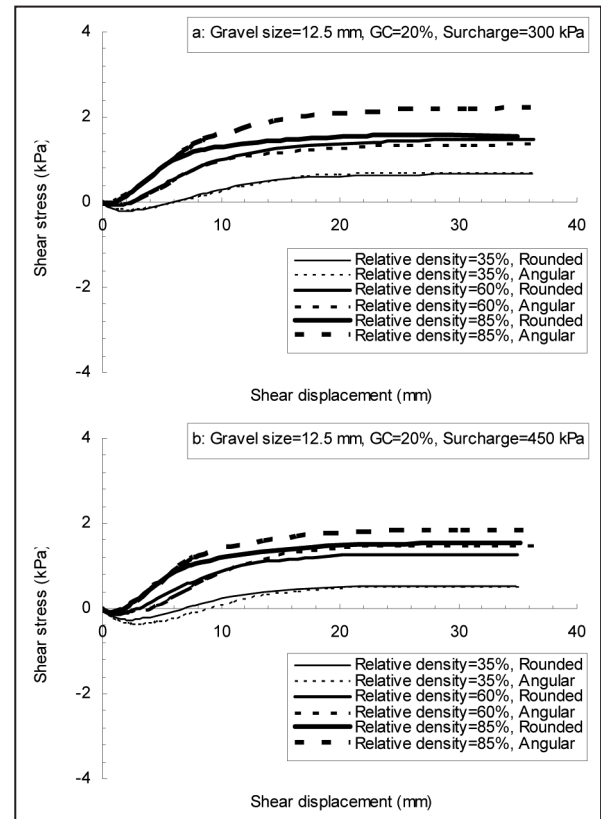
شکل ۷- تغییرات تنش برشی با تغییر شکل برشی برای مخلوط دارای شن دانه با شکل های مختلف در سربارهای متفاوت (a) ۱۵۰ kPa (b) ۳۰۰ kPa (c) و ۴۵۰ kPa.



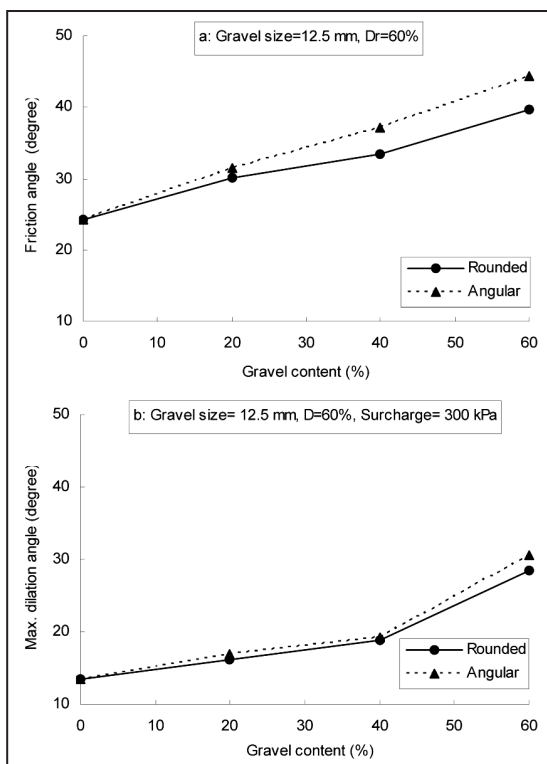
شکل ۹- تغییرات تنش برشی با تغییر شکل برشی برای مخلوط های دارای شن دانه با شکل های مختلف در چگالی های نسبی متفاوت (a) ۳۰۰ kPa (b) و ۴۵۰ kPa.



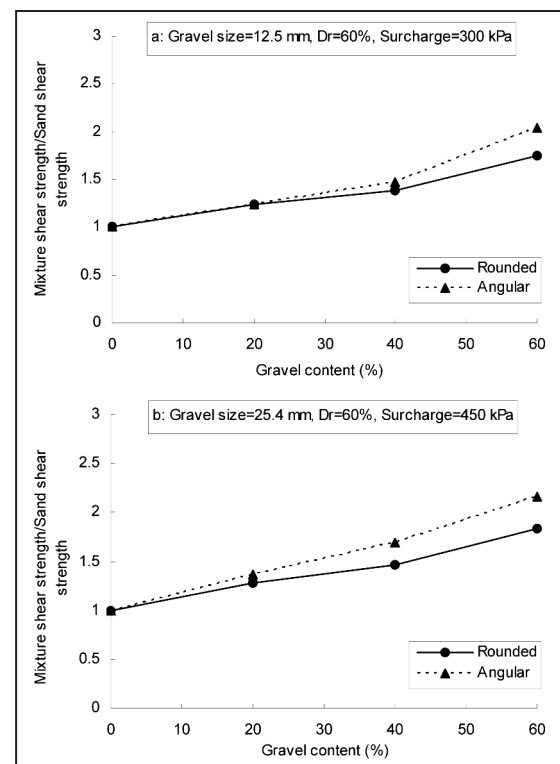
شکل ۱۱- تغییرات شاخص تردی با درصد شن برای مخلوط‌های دارای شن‌دانه با شکل‌های مختلف (a) ۳۰۰ kPa و (b) ۴۵۰ kPa.



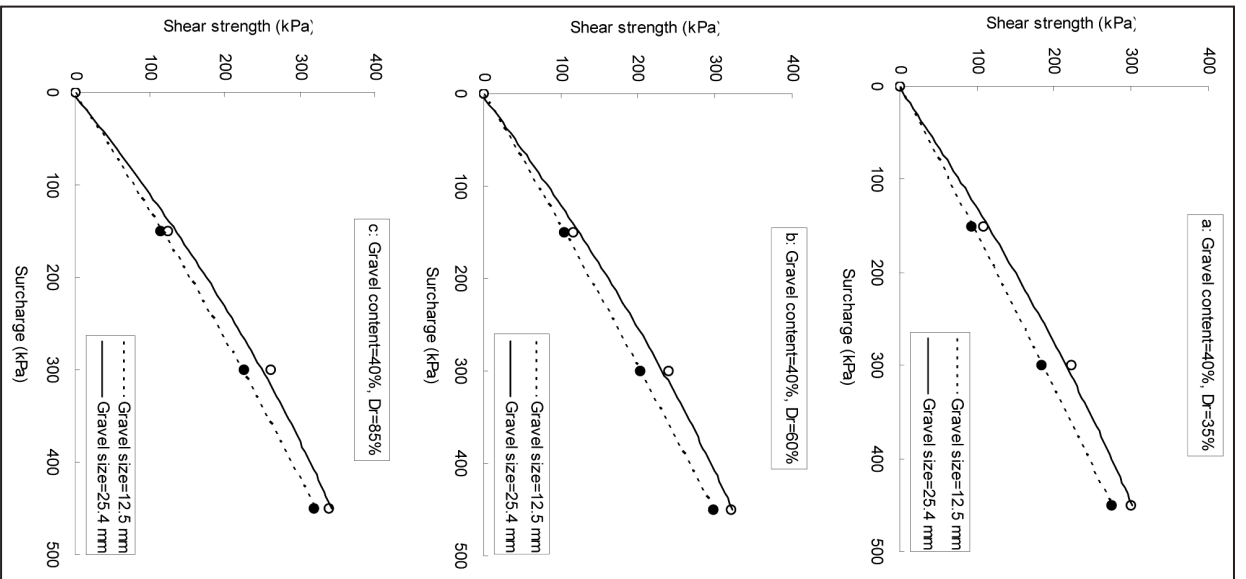
شکل ۱۰- تغییرات اتساع با تغییر شکل برشی برای مخلوط‌های دارای شن‌دانه با شکل‌های مختلف در چگالی‌های نسبی متفاوت (a) ۳۰۰ kPa و (b) ۴۵۰ kPa.



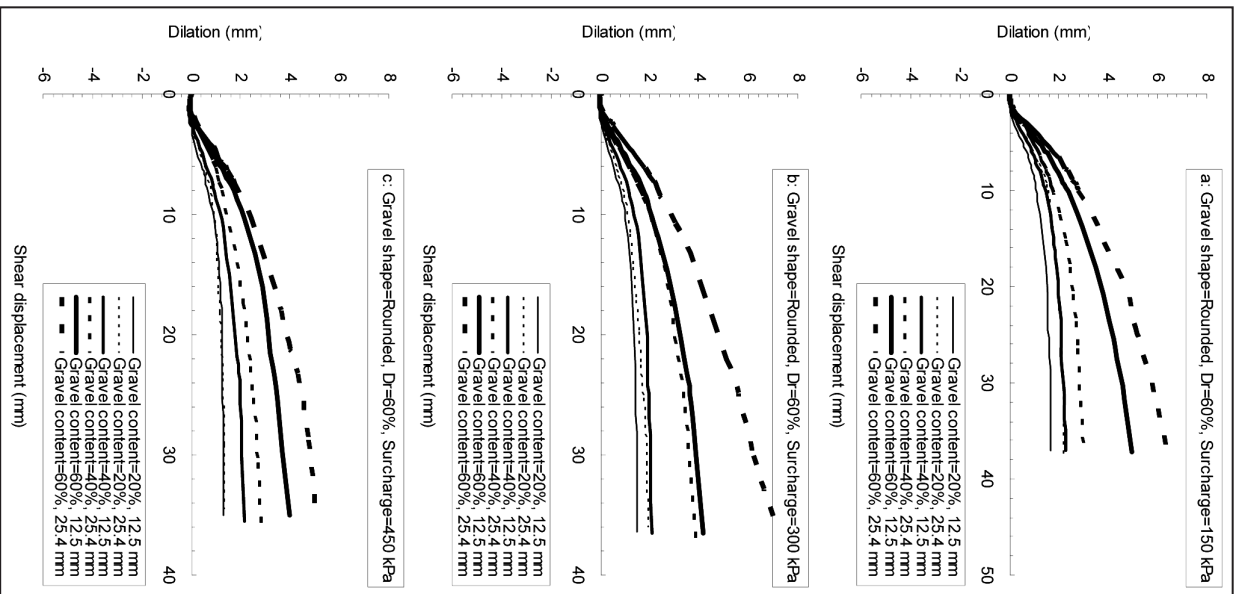
شکل ۱۳- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع بیشینه با درصد شن برای مخلوط‌های دارای شن‌دانه با شکل‌های مختلف (a) زاویه اصطکاک داخلی و (b) زاویه اتساع بیشینه.



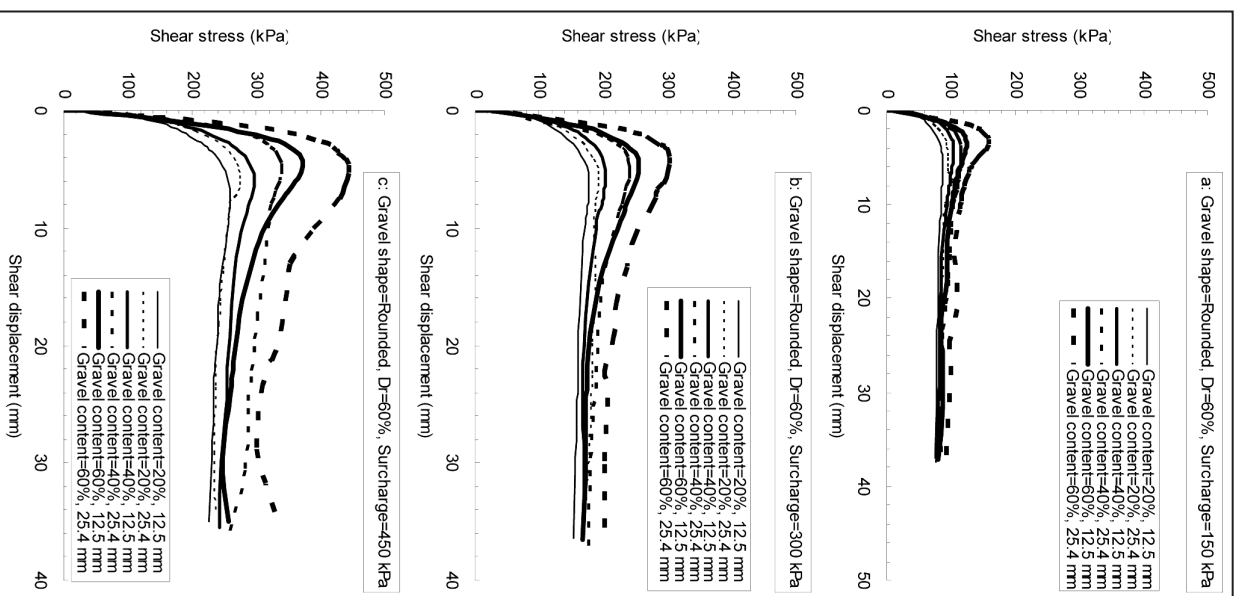
شکل ۱۲- تغییرات نسبت مقاومت مخلوط به مقاومت ماسه با درصد شن برای مخلوط‌های دارای شن‌دانه با شکل‌های مختلف (a) ۳۰۰ kPa و (b) ۴۵۰ kPa.



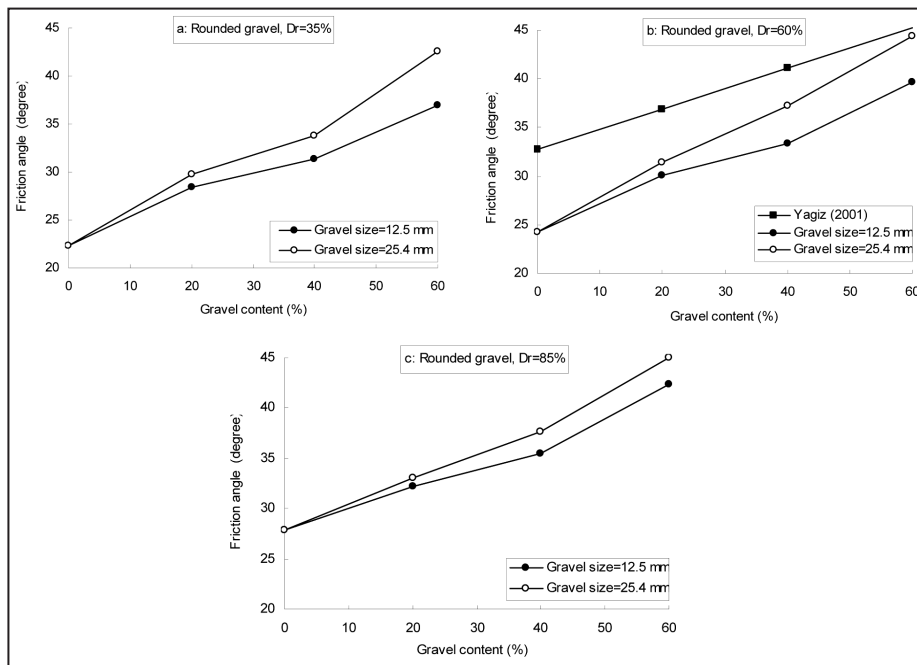
شکل ۱۴- پوش گسیختگی بدست آمده برای مخلوط‌های دارای شن دانه با اندازه‌های مختلف در چگالی‌های نسبی متفاوت (a) ۳۵٪، (b) ۶۰٪ و (c) ۸۵٪.



شکل ۱۵- تغییرات انبساط با تغییر شکل برشی برای مخلوط دارای شن دانه با اندازه‌های مختلف در سربارهای متفاوت (a) ۱۵۰ kPa، (b) ۳۰۰ kPa و (c) ۴۵۰ kPa.



شکل ۱۴- تغییرات تنش برشی با تغییر شکل برشی برای مخلوط دارای شن دانه با اندازه‌های مختلف در سربارهای متفاوت (a) ۱۵۰ kPa، (b) ۳۰۰ kPa و (c) ۴۵۰ kPa.



شکل ۱۷- تغییرات زاویه اصطکاک با درصد شن برای مخلوط‌های دارای شن‌دانه با اندازه‌های مختلف در چگالی‌های نسبی متفاوت (a) ۳۵٪، (b) ۶۰٪ و (c) ۸۵٪.

## References

- ASTM, 1998- Annual book of ASTM standards: soils and rock division, West Conshohocken, Philadelphia, U.S.A.
- Bishop, A.W. & Green, D. G., 1956- The influence of end restraints on compressive strength of a cohesionless soil, *Géotechnique*, 15: 243-266.
- Bolton, M. D., 1986- The strength and dilatancy of sands, *Géotechnique*, 36(1): 65-78.
- Bolton, M. D., 1987- Discussion on the strength and dilatancy of sands, *Géotechnique*, 37(1): 219-226.
- Evans, M. D. & Zhou, Sh., 1995- Liquefaction behavior of sand-gravel composites, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, 121(3): 287-298.
- Fragaszy, R. J., Su, W. & Siddiqi, F. H., 1990- Effect of oversized particles on the density of clean granular soils, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 13(2): 106-114.
- Fragaszy, R. J., Su, W., Siddiqi, F. H. & Ho, C. L., 1992- Modeling strength of sandy gravel, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, 118(6): 920-935.
- Hamidi, A., Yazdanjou, V. & Salimi, N., 2009a- Shear strength characteristics of sand-gravel mixtures, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 3(1): 29-38.
- Hamidi, A., Alizadeh, M. & Soleimani, N., 2009b- Effect of particle crushing on shear strength and dilation characteristics of sand-gravel mixtures, *International Journal of Civil Engineering*, 7(1): 61-72.
- Kokusho, T., Hara, T. & Hiraoka, R., 2004- Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, 130(6): 621-629.
- Kuenza, K., Towhata, I., Orense, R. P. and Wassan, T., 2004- Undrained torsional shear tests on gravelly soils, *Landslides*: 1(3): 185-194.
- Krumbein, W. C., 1941- Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, *Journal of Sedimentary Petrology*, 11(2): 64-72.
- Krumbein, W. C. & Sloss, L. L., 1963- Stratigraphy and sedimentation, 2<sup>nd</sup> edition. W.H. Freeman publishing company, San Francisco.
- Mitchell, J. K. & Soga, K., 2005- Fundamentals of soil behavior, 3<sup>rd</sup> edition. John Wiley and Sons Inc., U.S.A.
- Poulos, S. J., 1981- The steady state of deformation, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, 107(GT5): 553-562.
- Powers, M. C., 1953- A new roundness scale for the sedimentary particles, *Journal of Sedimentary Petrology*, 23: 117-119.
- Simoni, A. & Houslyby, G. T., 2006- The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures, *Geotechnical and Geological Engineering Journal*, 24(3): 523-549.
- Taylor, D. W., 1948- Fundamentals of soil mechanics, John Wiley and Sons Inc., U.S.A.
- Thevanayagam, S., Liang, J. & Shentant, T., 2000- Contact index and liquefaction potential of silty and gravelly soils. in: 14<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Texas in Austin, PP 21-24.
- Vallejo, L. E. & Luis, E., 2001- Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5): 1097-1104.
- Wadell, H., 1932- Volume, shape and roundness of rock particles, *Journal of Geology*, 40: 443-451.
- Yagiz, S., 2001- Brief note on the influence of shape and percentage of gravel on the shear strength of sand and gravel mixture, *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 60(4):321-323.