

## بررسی تاثیر اندازه ذرات، دانه‌بندی و قطعه بتنی در رفتار و مقاومت برشی

### خاک‌های دانه‌ای، با تاکید بر ناحیه برش

مقاله علمی - پژوهشی

علی لکی روحانی\*، دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

فرزاد موسی‌خانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

علیرضا معظمی، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rou001@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۲۳۰-۲۱۳

#### چکیده

اندازه ذرات خاک‌های دانه‌ای و دانه‌بندی آنها تاثیر زیادی بر رفتار برشی آنها دارند. تحقیق در مورد ناحیه برش در آزمایش برش مستقیم، اهمیت زیادی در پروژه‌های مرتبط با تسلیح خاک با استفاده از ژئوگرید دارد. هدف این مقاله بررسی آزمایشگاهی رفتار برشی خاک‌های دانه‌ای با اندازه ذرات متفاوت می‌باشد. آزمایشات برش مستقیم بزرگ مقیاس در سه بخش انجام شده‌اند. بخش اول آزمایشات مربوط به نوع خاک دانه‌ای با دانه‌بندی و اندازه ذرات متفاوت می‌باشد. بخش دوم مربوط به آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های ترکیبی است و در بخش سوم تاثیر یک قطعه بتنی بر روی مقاومت برشی خاک دانه‌ای بررسی می‌شود. مطابق با نتایج بدست آمده با بزرگتر شدن اندازه ذرات، پوش گسیختگی برشی بالاتر رفته و نمونه از مقاومت برشی بالاتری برخوردار می‌شود، با بزرگ شدن اندازه ذرات، زاویه اصطکاک مصالح و زاویه اتساع نیز افزایش می‌یابد. یافته اصلی پژوهش انجام شده اینست که مصالح قرار گرفته در ناحیه برش تاثیر زیادی در مقاومت و رفتار نمونه دارد. در نمونه‌های ترکیبی اگر ماسه در ناحیه برش قرار داشته باشد، اگرچه بالا و پایین نمونه از شن باشد، رفتار و مقاومت نمونه نزدیک به ماسه خالص است و اگر شن در ناحیه برش قرار گیرد هرچند بالا و پایین نمونه ماسه باشد، رفتار و مقاومت برشی نمونه ترکیبی نزدیک به نمونه شنی می‌شود. همچنین ضخامت ناحیه برش وابسته به ابعاد ذرات است، با بزرگ شدن دانه‌بندی ضخامت ناحیه برش افزایش می‌یابد. وجود قطعه بتنی در ناحیه برش، باعث افزایش مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه ماسه‌ای می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پوش گسیختگی، اثر اندازه، زاویه اتساع، آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس، صفحه برش

#### ۱- مقدمه

شده که حداکثر اندازه ذرات باید یک دهم عرض جعبه باشد. حتی اگر خاک دانه‌ای در این محدوده باشد، همچنان کیفیت و کمیت دانه‌بندی و اندازه ذرات می‌تواند بر روی نتایج حاصل از آزمایش تاثیرگذار باشد. اندازه ذرات مصالح دانه‌ای و ترکیب مصالح در ناحیه برش، پارامتر کنترل کننده مقاومت نمونه

آزمایش برش مستقیم قدیمی‌ترین، ساده‌ترین و پرکاربردترین آزمایش آزمایشگاهی برای سنجش مقاومت خاک‌های دانه‌ای تحکیم‌یافته و زهکشی‌شده است. نحوه انجام آزمایش و خصوصیات جعبه دستگاه در استاندارد ASTM D3080 به تفصیل شرح داده شده است. همچنین در این استاندارد گفته

و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مخلوط، با افزایش درصد مصالح درشت‌دانه (ماسه) کاهش می‌یابد، اما چسبندگی نمونه‌ها با افزایش درشت‌دانه افزایش می‌یابد تا یک مقدار مشخصی و سپس با افزایش درشت‌دانه، کاهش می‌یابد (Alshameri et al. 2016). توسعه روش‌های عددی بالاخص روش عددی اجزا مجزا و استفاده از نرم‌افزارهای مبتنی بر این روش‌ها منجر به شبیه‌سازی رفتار خاک‌های دانه‌ای و بررسی رفتار تنش- کرنشی آنها شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از روش اجزا مجزا نشان می‌دهد که افزایش اندازه ذرات ماسه، باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی مصالح می‌شود (Sitharam and Nimbkar 2000). شبیه‌سازی‌های دوبعدی به روش اجزا مجزا نشان می‌دهند که شکل ذرات تاثیر چشمگیری بر روی خصوصیات مکانیکی مصالح دانه‌ای دارد، با افزایش نظم ذرات در نمونه، نمونه‌ها راحتتر متراکم می‌شوند و تخلخل بیشینه و کمینه آنها افزایش می‌یابد، و با کاهش نظم ذرات در نمونه، نسبت تنش برشی بیشینه، نسبت تنش برشی نهایی و اتساع نمونه افزایش می‌یابد (Tian et al. 2018).

با وجود مطالعات فوق همچنان ابهامات متعددی در ارتباط با اثر اندازه ذرات بر روی ناحیه برش و رفتار برشی مصالح دانه‌ای وجود دارد که انگیزه اصلی مطالعات انجام شده در این مقاله می‌باشد. هدف از این مقاله بررسی رفتار برشی ۴ نوع مصالح دانه‌ای با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس بوده است. در کنار این هدف اصلی، رفتار برشی ترکیبات مختلفی از این ۴ نوع مصالح نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین وجود جسم بزرگ در ناحیه برش تاثیر چشمگیری در مقاومت برشی مصالح دانه‌ای دارد که در این مقاله به آن پرداخته شده است. در ادامه ابتدا مصالح مصرفی در این مقاله معرفی شده و خصوصیات آنها ارائه می‌شود، سپس در بخش دیگر مقاله نتایج آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس انجام شده بر روی نمونه‌ها آورده شده است و در بخش آخر نتیجه‌گیری کلی ارائه می‌شود.

## ۲- معرفی مصالح مصرفی و نتایج آزمایش

### دانه‌بندی

مصالح مورد استفاده در این مطالعه ۴ نوع مصالح دانه‌ای شامل ماسه شکسته و شن شکسته بوده که از معدن ماسه و شن

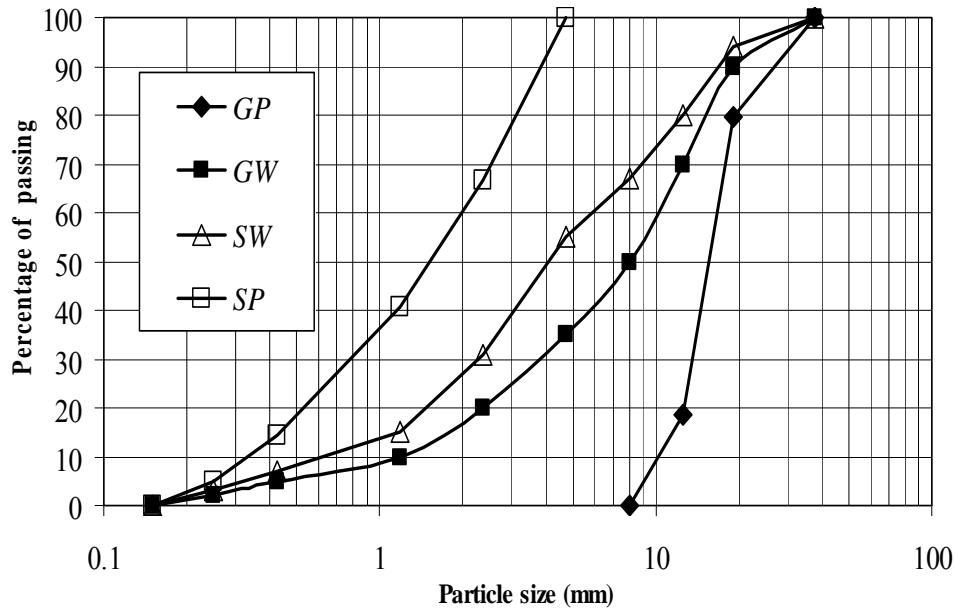
در جعبه آزمایش برش مستقیم هستند و چون توزیع تنش برشی در ناحیه برش توزیع یکنواختی نیست، مطالعه تاثیر متقابل این پارامترها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و زمانی که نمونه خاک دانه‌ای متراکم شده در جعبه آزمایش، ترکیبی از دو یا چند مصالح می‌شود، پیچیدگی مساله بیشتر هم می‌شود. تاکنون مطالعات آزمایشگاهی مختلفی بر روی خاک‌های دانه‌ای مسلح به ژئوتکستایل و ژئوگرید با تمرکز بر ناحیه برش انجام شده است (Lakirouhani and Abbasian 2018; Chen et al. 2022; Lakirouhani et al. 2018). اما در ارتباط با اثر اندازه ذرات و مصالح ترکیبی بر ناحیه برش و رفتار برشی مصالح دانه‌ای مطالعات کمی انجام شده است و تمرکز این مقاله بر این موضوع است.

مطالعات آزمایشگاهی متعدد انجام شده بر روی ماسه‌های طبیعی نشان می‌دهند که رفتار درشت مقیاس ماسه‌ها با تغییر اندازه دانه‌ها و همچنین شکل دانه‌ها تغییر می‌کند (Altuhafi Fatin et al. 2016; Sarkar et al. 2020; Wang et al. 2020). نتایج بدست آمده از مطالعات تئوری و آزمایشگاهی انجام شده با استفاده از دستگاه برش مستقیم نشان می‌دهد که اندرکنش بین دانه‌ها با اندازه‌های متفاوت در نمونه‌های ماسه‌ای، دلیل اصلی اثر اندازه در خاک‌ها می‌باشد (Gu et al. 2022). همچنین مطالعه دیگری که با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس انجام شد نشان می‌دهد که با افزایش بزرگترین اندازه دانه در نمونه‌ها، زاویه اصطکاک داخلی مصالح افزایش می‌یابد (El Naggat et al. 2021). مطالعات انجام شده بر روی رفتار تنش- کرنش ماسه‌ها در منطقه‌ای از شانگهای با استفاده از آزمایشات سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده و تحکیم یافته زهکشی نشده نشان می‌دهد که اثر دانسیته نسبی وابستگی زیادی به اندازه متوسط دانه‌ها (D50) دارد (Tiwari et al. 2020). تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده با استفاده از دستگاه سه‌محوری واقعی بزرگ مقیاس نشان می‌دهد که شکل و شکستگی ذرات ماسه بر روی بخش غیر خطی منحنی‌های تنش- کرنش و مقاومت برشی خاک‌های دانه‌ای تاثیرگذار هستند (Wang et al. 2019).

اگرچه برخی از مطالعات ذکر شده در بالا نشان دادند که با افزایش اندازه دانه‌ها، زاویه اصطکاک داخلی مصالح افزایش می‌یابد، اما برخی از مطالعات دیگر نتیجه‌ای خلاف نتیجه بالا نشان داده‌اند، به عنوان مثال آزمایشات برش مستقیم انجام شده بر روی مخلوط‌های رس و ماسه نشان دادند که مقاومت برشی

بررسی کرد. شکل ۱ نمودار دانه‌بندی این ۴ نوع مصالح را نشان می‌دهد و در جدول ۱ طبقه‌بندی آنها به روش یکنواخت و مشخصات فیزیکی آنها آورده شده است. در جدول ۱ اندازه در این جدول مشاهده می‌شود، با ریزتر شدن دانه‌بندی، درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

واقع در منطقه نیکپی در استان زنجان تهیه شده است. دانه‌بندی مصالح به نحوی هستند که شامل مصالح دانه‌ریز و درشت‌دانه می‌شوند و بنابراین اثر اندازه دانه را می‌توان متوسط ذرات  $D_{50}$ ، ضریب خمیدگی  $C_c$  و ضریب یکنواختی  $C_u$ ، توده ویژه  $G_s$ ، دانسیته خشک کمینه  $\gamma_{d \min}$ ، دانسیته خشک بیشینه  $\gamma_{d \max}$  و درصد رطوبت بهینه  $\omega_{opt}$  برای هر یک از مصالح آورده شده است. همانطور که



شکل ۱. نمودارهای دانه‌بندی برای ۴ نوع مصالح انتخابی

جدول ۱. خصوصیات دانه‌بندی ۴ نوع مصالح

$\omega_{opt}$ (%)	$\gamma_{d \max}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{d \min}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	$G_s$	$C_u$	$C_c$	$D_{50}$ (mm)	علامت اختصاری نمونه	شرح نمونه بر اساس طبقه‌بندی انجام شده به روش یکنواخت
2.1	1.874	1.706	2.63	1.64	0.99	16	<b>GP</b>	شن با دانه‌بندی ضعیف
6.1	2.067	1.618	2.63	7.7	1.17	8	<b>GW</b>	شن با دانه‌بندی خوب
9.7	2.095	1.613	2.62	9.23	1.24	4	<b>SW</b>	ماسه با دانه‌بندی خوب
10	1.993	1.595	2.61	5.71	0.91	1.6	<b>SP</b>	ماسه با دانه‌بندی ضعیف

### ۳- آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس

هر آزمایش استخراج شده است. دستگاه آزمایش بزرگ مقیاس به صورت کنترل جابجایی بوده و سرعت انجام آزمایش ۱ میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شده است. لازم به ذکر است که آزمایشات در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه زنجان انجام شده‌اند. شکل ۲ دستگاه آزمایش بزرگ مقیاس مورد استفاده را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمایشات برش مستقیم بزرگ مقیاس ( $30 \times 30 \text{ cm}^2$ )، نمونه‌ها در درصد رطوبت بهینه در جعبه برش متراکم شده و دانسیته نسبی برای همه نمونه‌ها  $D_r = 70\%$  انتخاب شده است. آزمایش‌ها در سه تنش نرمال  $1, 2, 3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  انجام شده‌اند و نمودارهای تنش- کرنش برای



شکل ۲. دستگاه آزمایش برش مستقیم، مورد استفاده در آزمایشات

### ۴- نتایج آزمایش برش مستقیم

آزمایش‌ها در سه بخش انجام شده است که به ترتیب نتایج هر بخش آورده شده و در مورد آن بحث می‌شود. ابتدا بر روی چهار نوع مصالح با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ آزمایش برش انجام شده که در مورد نتایج آن بحث می‌شود. پس از آن برای مطالعه بر روی ناحیه برش و تاثیر مصالح قرار گرفته در ناحیه برش بر رفتار نمونه، نمونه در ارتفاع به چند بخش با دانه‌بندی متفاوت تقسیم شده و مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در بخش آخر آزمایش‌ها، داخل نمونه و در ناحیه مرکزی برش، قطعه‌ای بتنی با اندازه‌ای نامتعارف قرار داده شده و اثر آن بر روی رفتار برشی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

### ۴-۱- آزمایش برش مستقیم بر روی ۴ نوع مصالح

#### انتخابی

در این قسمت نتایج آزمایش برش مستقیم انجام شده بر روی ۴ نوع مصالح با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ آورده شده است. جدول ۲ مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی و شکل ۳، پوش‌های مقاومت برشی را برای ۴ نوع مصالح نشان می‌دهد. در جدول ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش تنش نرمال، مقاومت پیک برشی افزایش می‌یابد و شکل ۳ نشان می‌دهد که هرچقدر دانه‌بندی مصالح درشت‌تر می‌شود، پوش گسیختگی برشی آن بالاتر رفته و زاویه اصطکاک داخلی مصالح و مقاومت برشی آن بیشتر می‌شود. شکل ۴ به طور نمونه نمودارهای جابجایی قائم در مقابل جابجایی افقی برای ماسه  $SW$  را برای

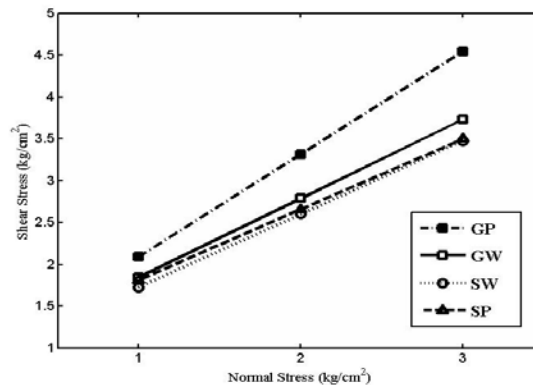
دانه‌بندی مصالح، مقاومت نمونه افزایش یافته اما اتساع آن نیز در حین برش، افزایش می‌یابد (شکل ۶). شکل ۸ زاویه اتساع را در مقابل تنش نرمال برای سه سربرار مختلف و چهار نوع مصالح نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که با افزایش سربرار، زاویه اتساع کمتر شده و همچنین مصالح درشت‌دانه‌تر، اتساع بیشتری دارند.

شکل ۹ زاویه اصطکاک داخلی مصالح را در مقابل اندازه متوسط ذرات ( $D_{50}$ ) نشان می‌دهد، همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، با افزایش اندازه متوسط ذرات، زاویه اصطکاک داخلی مصالح افزایش پیدا می‌کند. شکل ۱۰ نیز زاویه اتساع را در مقابل اندازه متوسط ذرات ( $D_{50}$ ) برای سربرارهای قائم متفاوت، نشان می‌دهد.

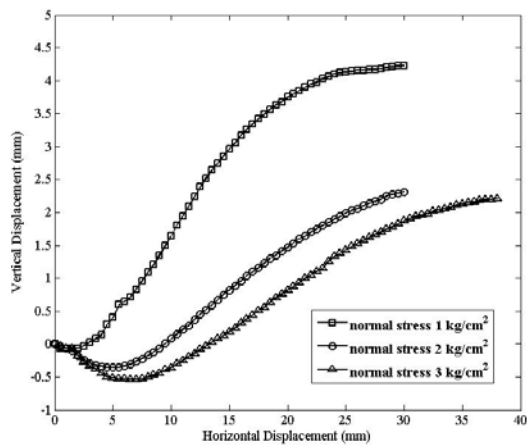
سه سربرار مختلف را نشان می‌دهد، در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش سربرار قائم اولیه بر روی نمونه، اتساع نمونه در حین برش کاهش می‌یابد اما کاهش حجم اولیه آن بیشتر می‌شود. شکل ۵ نمودارهای تنش برشی در مقابل جابجایی برشی برای ماسه  $SW$  را برای سه سربرار مختلف نشان می‌دهد، در این نمودارها دیده می‌شود که با افزایش تنش نرمال، رفتار نمونه از نرم‌کنشی به سخت‌کنشی تغییر می‌کند و شیب اولیه منحنی‌ها که بیانگر سختی نمونه است نیز افزایش می‌یابد. افزایش سربرار باعث افزایش تنش برشی بیشینه (پیک) نیز می‌شود. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب مقایسه جابجایی قائم در مقابل جابجایی برشی و مقایسه تنش برشی در مقابل جابجایی برشی برای ۴ نوع مصالح تحت سربرار قائم ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌باشد. در شکل ۷ دیده می‌شود که با درشت‌تر شدن

جدول ۲. مقاومت برشی بیشینه (پیک) بدست آمده در هر سربرار برای چهار نوع مصالح همراه با زاویه اصطکاک داخلی

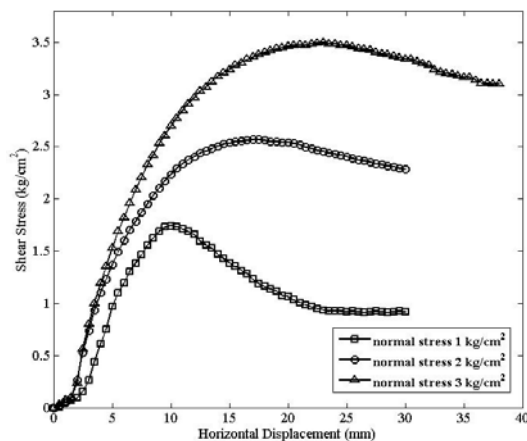
$\phi$ (°)	$3 \frac{kg}{cm^2}$	$2 \frac{kg}{cm^2}$	$1 \frac{kg}{cm^2}$	مقدار تنش نرمال نوع مصالح
50.8	4.511	3.377	2.058	GP
43.3	3.717	2.811	1.831	GW
41.3	3.496	2.565	1.742	SW
40.9	2.977	2.088	1.247	SP



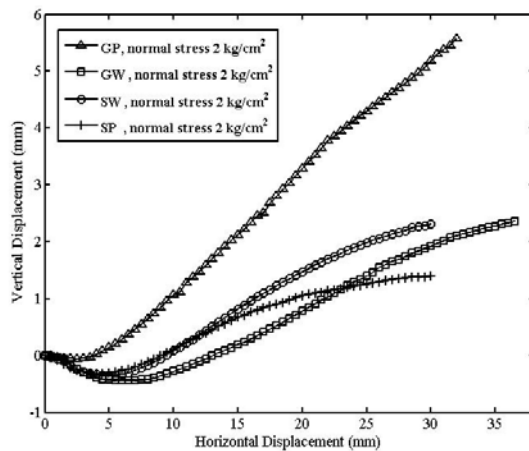
شکل ۳. مقایسه پوش‌های گسیختگی برای ۴ نوع مصالح



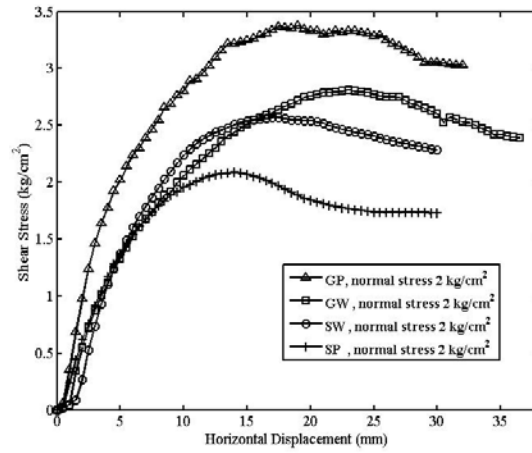
شکل ۴. نمودارهای جابجایی قائم در مقابل جابجایی افقی برای ماسه SW برای سه سربار مختلف



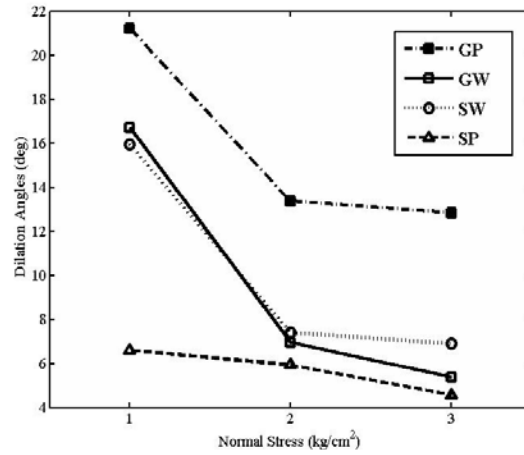
شکل ۵. نمودارهای تنش برشی در مقابل جابجایی برشی برای ماسه SW برای سه سربار مختلف



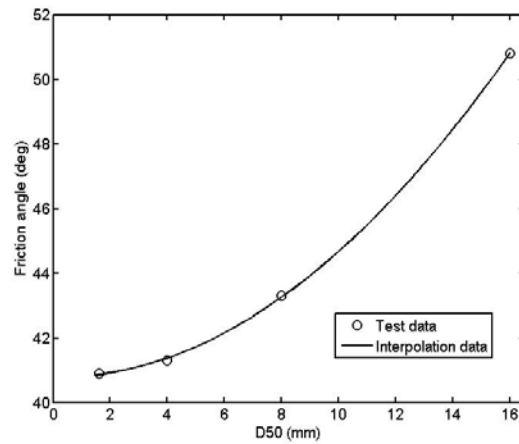
شکل ۶. نمودارهای جابجایی قائم در مقابل جابجایی افقی در تنش نرمال  $2 \frac{kg}{cm^2}$  برای چهار نوع مصالح



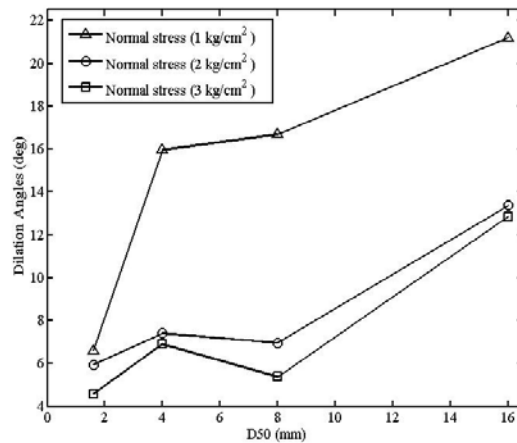
شکل ۷. تنش برشی در مقابل جابجایی افقی در تنش نرمال  $2 \frac{kg}{cm^2}$  برای چهار نوع مصالح



شکل ۸. زاویه اتساع در مقابل تنش نرمال برای چهار نوع مصالح و سه سربار مختلف



شکل ۹. زاویه اصطکاک داخلی در مقابل اندازه متوسط دانه‌ها (D50) برای مصالح مختلف



شکل ۱۰. زاویه اتساع درمقابل اندازه متوسط ذرات (D50) برای تنش‌های نرمال مختلف

#### ۴-۲- نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های ترکیبی و لایه‌ای

۱۱ تا ۱۹ آورده شده است که به تفصیل در ادامه توضیح داده می‌شوند. جدول ۳ مقادیر بیشینه (پیک) مقاومت برشی به‌دست آمده برای هر سری از نمونه‌های ترکیبی و برای تنش‌های نرمال مختلف را ارائه می‌دهد و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب پوش‌های گسیختگی برشی بدست آمده برای نمونه‌های ترکیبی دولایه‌ای و سه‌لایه‌ای را نشان داده است. در شکل‌های ۱۳ تا ۱۷ به طور نمونه منحنی‌های تنش برشی و جابجایی قائم را در مقابل جابجایی برشی نمایش می‌دهند و در دو شکل ۱۸ و ۱۹ نیز به ترتیب زاویه اتساع در مقابل تنش نرمال برای نمونه‌های دولایه‌ای و سه‌لایه‌ای آورده شده است. شرح نتیجه بدست آمده برای هر سری از نمونه‌های ترکیبی آورده شده است.

نمونه‌های سری اول  $S-G$ : رفتار این نمونه‌ها که در آن نیمه بالایی جعبه برش از ماسه و نیمه پایینی جعبه برش از شن بود، بسیار مشابه رفتار نمونه اولیه  $SW$  است، که نشان‌دهنده تاثیر چشمگیر ماسه در ناحیه برش است. پوش گسیختگی موهر- کولمب این سری از نمونه‌ها نیز مشابه پوش گسیختگی بدست آمده از نمونه‌های ماسه خالص است.

نمونه‌های سری دوم  $S-G$ : مقاومت این نمونه‌ها مابین دو نمونه ماسه خالص و شن خالص است و البته چنین نتیجه‌ای انتظار می‌رفت. چون در این نمونه‌ها نیمی از محفظه برش توسط ماسه و نیم دیگر توسط شن پر شده است. در همه نمودارهای تنش برشی- جابجایی برشی و یا پوش‌های گسیختگی، این وضعیت را می‌توان مشاهده کرد. به عبارت دیگر، جمع مقاومت نوارهای طولی در نمونه، معادل با مقاومت

در این قسمت نمونه‌هایی در ۶ دسته به صورت ترکیبی از ۴ نوع مصالح اولیه تهیه می‌شود. برای تهیه نمونه‌ها در این بخش فقط از دو نوع مصالح  $SW$  (ماسه با دانه‌بندی خوب) و  $GP$  (شن با دانه‌بندی بد) استفاده شده که به اختصار فقط از علائم  $S$  (ماسه) و  $G$  (شن) برای نام‌گذاری آنها استفاده می‌شود.

نمونه‌های سری اول  $S-G$ : در این نمونه، نیمه بالایی جعبه برش از ماسه و نیمه پایینی جعبه برش از شن پر می‌شود (لایه‌بندی افقی).

نمونه‌های سری دوم  $S-G$ : یک سمت از کل جعبه برش از ماسه و در سمت دیگر شن، متراکم می‌شود، یعنی دو لایه در کنار هم به صورت موازی قرار می‌گیرند (لایه‌بندی قائم).

نمونه‌های سری سوم  $G-S-G$ : کل جعبه برش در ارتفاع به‌صورت افقی به سه ناحیه مساوی تقسیم شده و لایه‌ی میانی ماسه و دو لایه بالایی و پایینی از شن پر شده است.

نمونه‌های سری چهارم  $S-G(3cm)-S$ : کل جعبه برش در ارتفاع به‌صورت افقی به سه ناحیه مساوی تقسیم شده بدین صورت که لایه‌ی میانی به ضخامت ۳ سانتی‌متر از شن و لایه‌های بالایی و پایینی با ضخامت‌های یکسان از ماسه هستند. نمونه‌های سری پنجم  $S-G(5cm)-S$ : مشابه نمونه‌های سری چهارم با این تفاوت که ضخامت لایه میانی شن ۵ سانتی‌متر است.

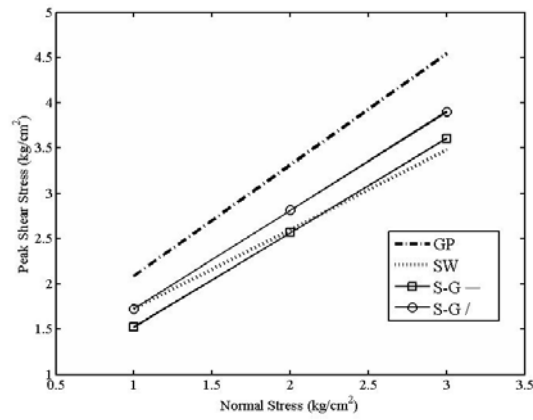
نمونه‌های سری ششم  $S-G(7cm)-S$ : مشابه نمونه‌های قبل می‌باشد با این تفاوت که ضخامت لایه میانی شن ۷ سانتی‌متر است. نتایج این بخش از مطالعات در جدول ۳ و شکل‌های

نمونه‌های سری ششم  $S-G(7cm)-S$ : این نمونه‌ها نیز مشابه نمونه قبل اما با ضخامت شن ۷ سانتی‌متر است. در این حالت مقاومت بازم افزایش یافته و نزدیک به حالت شن یکدست می‌شود. پوش گسیختگی برشی موهر- کولمب برای این نمونه کمی پایین‌تر از نمونه شن یکدست است. در نمودارهای تنش برشی در مقابل جابجایی برشی نیز مشاهده می‌شود که منحنی‌های مربوط به این نمونه پایین‌تر از شن یکدست است اما تنش باقیمانده آنها در نهایت یکی می‌شوند. این بیانگر این مطلب است که ضخامت ناحیه برش وابسته به اندازه ذرات است و مقدار و ضخامت ثابتی ندارد. برای مصالح با دانه‌بندی کوچکتر، ضخامت کمتری دارد اما برای مصالح درشت‌تر ضخامت بیشتری دارد. البته تعیین مشخصات ناحیه برش نیاز به مطالعات بیشتری دارد و مسلماً استفاده از روش‌های عددی برای مدل‌سازی آزمایش برش مستقیم کمک شایانی می‌تواند در این ارتباط داشته باشد. نکته آخر اینکه این نمونه که دارای بیشترین مقاومت بعد از مصالح  $GP$  است، دارای بیشترین زاویه اتساع نیز می‌باشد (شکل ۱۹).

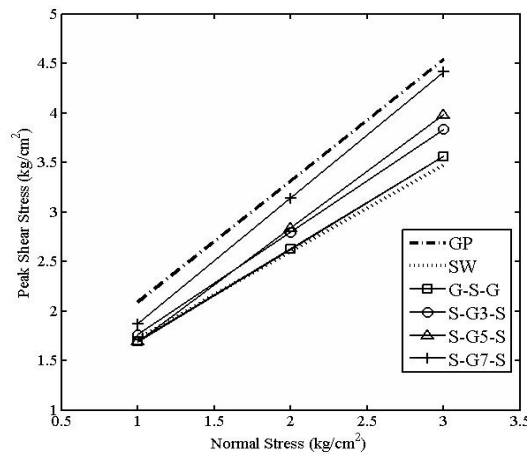
کل نمونه می‌شود. همچنین مطابق شکل ۱۸، بیشترین زاویه اتساع در بین نمونه‌های دولایه‌ای، متعلق به همین نمونه‌ها است. نمونه‌های سری سوم  $G-S-G$ : رفتار این نمونه کاملاً منطبق بر نمونه ماسه‌ای است. از این نتیجه می‌شود که صرفاً مصالح قرار گرفته در ناحیه برش، در رفتار برشی و مقاومت نمونه در آزمایش برش مستقیم نقش دارند و مصالح قرار گرفته در بالا و پایین ناحیه برش، بی‌تاثیر هستند. نمونه‌های سری چهارم  $S-G(3cm)-S$ : مطابق با نتیجه گرفته شده برای حالت قبل در این نمونه که میانه آن از شن و بالا و پایین آن از ماسه متراکم شده است، انتظار می‌رود که مقاومت آن از نمونه‌های ماسه‌ای خالص بیشتر شود. اگر به نمودارها و جدول مقاومت نگاه شود، مقاومت این نمونه پایین نمونه ماسه و شن قرار گرفته است. یعنی قرارگرفتن ۳ سانتی‌متر شن در میانه ماسه و در ناحیه برش باعث شده که نمونه ۸۵٪ مقاومت نمونه شنی را داشته باشد. نمونه‌های سری پنجم  $S-G(5cm)-S$ : این نمونه مشابه نمونه قبل است با این تفاوت که ضخامت ناحیه شن میانی ۵ سانتی‌متر است. بنابراین، مقاومت آن نسبت به حالت قبل بیشتر شده است.

جدول ۳. مقادیر پیشینه (پیک) مقاومت برشی بدست آمده برای نمونه‌های ترکیبی و زاویه اصطکاک داخلی

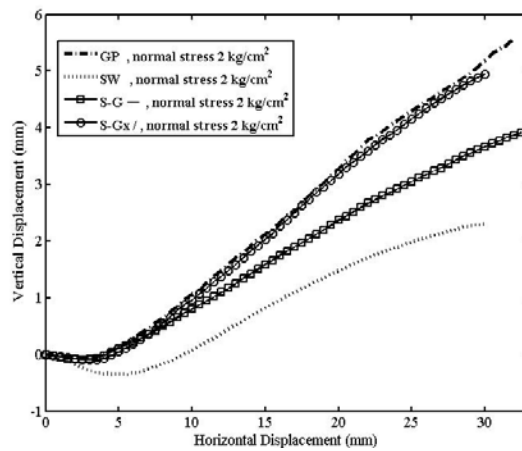
$\phi(^{\circ})$	$3 \frac{kg}{cm^2}$	$2 \frac{kg}{cm^2}$	$1 \frac{kg}{cm^2}$	تنش نرمال	
50.8	4.511	3.337	2.058	$GP$	یک‌لایه‌ای
41.3	3.496	2.565	1.742	$SW$	
46.1	3.639	2.5	1.557	$S-G-$	دولایه‌ای
47.4	3.89	2.834	1.712	$S-G $	
43	3.58	2.583	1.712	$G-S-G$	سه‌لایه‌ای
45.9	3.812	2.84	1.742	$S-G(3cm)-S$	
48.9	3.961	2.876	1.67	$S-G(5cm)-S$	
51.8	4.475	3.019	1.933	$S-G(7cm)-S$	



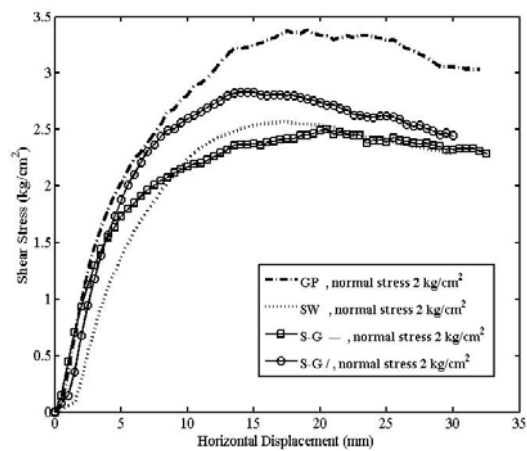
شکل ۱۱. پوش‌های گسیختگی موهر کولمب برای نمونه‌های ترکیبی دو لایه‌ای



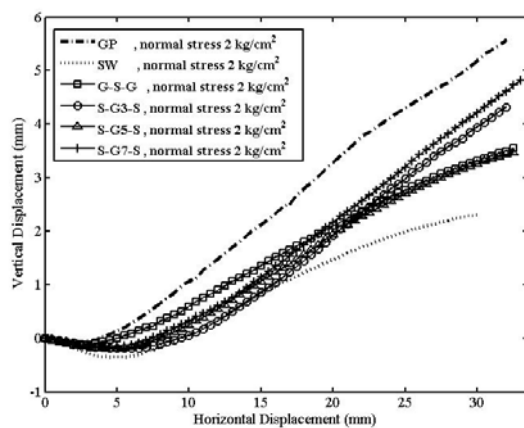
شکل ۱۲. پوش‌های گسیختگی برشی موهر کولمب برای نمونه‌های ترکیبی سه لایه‌ای



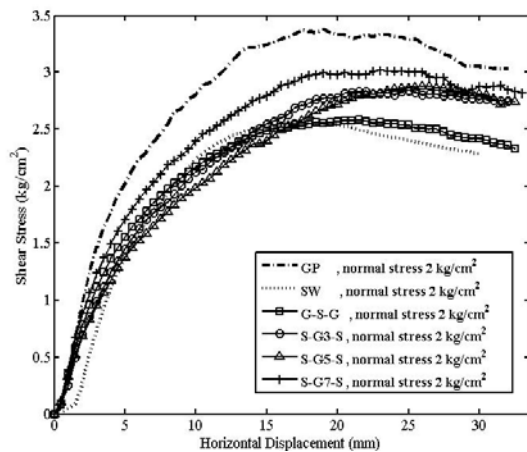
شکل ۱۳. نمودار جابجایی قائم درمقابل جابجایی افقی در تنش نرمال ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای نمونه‌های ترکیبی دو لایه‌ای



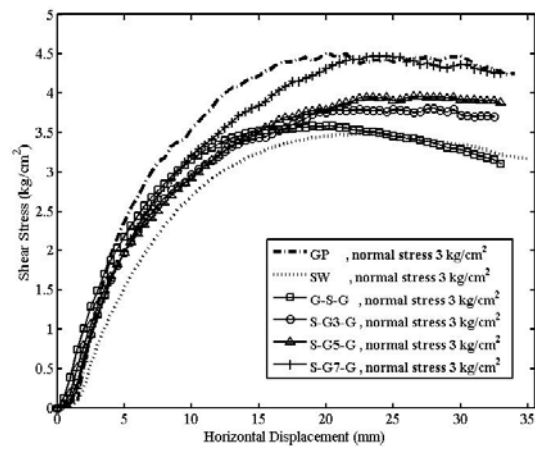
شکل ۱۴. نمودار تنش برشی درمقابل جابجایی افقی در تنش نرمال ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای نمونه‌های ترکیبی دو لایه‌ای



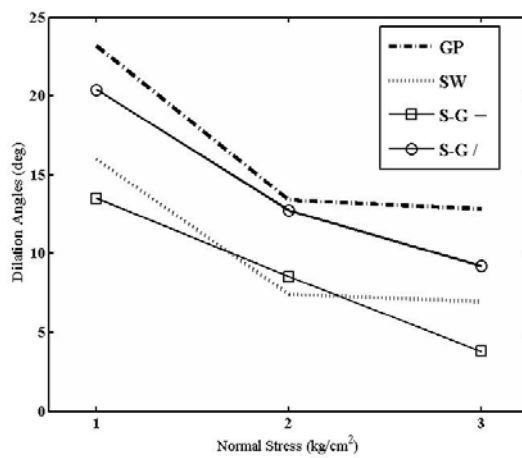
شکل ۱۵. نمودار جابجایی قائم درمقابل جابجایی افقی در تنش نرمال ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای نمونه‌های ترکیبی سه لایه‌ای



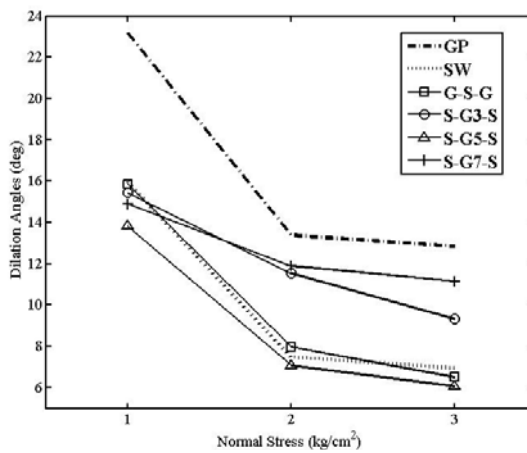
شکل ۱۶. نمودار تنش برشی درمقابل جابجایی افقی در تنش نرمال ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای نمونه‌های ترکیبی سه لایه‌ای



شکل ۱۷. نمودار تنش برشی درمقابل جابجایی افقی در تنش نرمال ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای نمونه‌های ترکیبی سه لایه‌ای



شکل ۱۸. نمودار زاویه اتساع درمقابل تنش نرمال در نمونه‌های دو لایه‌ای



شکل ۱۹. نمودار زاویه اتساع درمقابل تنش نرمال در نمونه‌های سه لایه‌ای

۴-۳- نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌هایی که در ناحیه برش دارای جسم بزرگ می‌باشند

این بخش از مطالعات آزمایشگاهی اختصاص دارد به بررسی اثر جسم با اندازه نامتعارف (بزرگ) در ناحیه برش. نمونه‌های آزمایشگاهی این بخش صرفاً با خاک نوع *SW* ساخته شده‌اند. برای جسم با اندازه بزرگ از قطعات بتنی با

سطح مقطع ۵×۵ سانتی‌متر مربع و ارتفاع‌های مختلف استفاده شده است. این قطعات بتنی می‌توانند نماینده‌ای از شمع‌های بتنی باشند که برای تسلیح شیب‌های ماسه‌ای استفاده می‌شوند. نام و شرح هر سری نمونه‌ها به این صورت است:

نمونه‌های سری اول *OS1*: نمونه با یک قطعه بتنی به ارتفاع ۵ سانتی‌متر واقع در وسط ناحیه برش

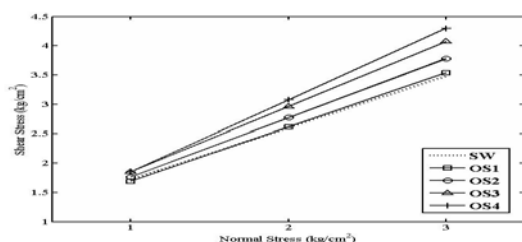
نمونه‌های سری دوم *OS2*: نمونه با یک قطعه بتنی به ارتفاع ۷ سانتی‌متر واقع در وسط ناحیه برش

نمونه‌های سری سوم *OS3*: نمونه با یک قطعه بتنی به ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر واقع در وسط ناحیه برش

نمونه‌های سری چهارم *OS4*: نمونه با ۴ قطعه بتنی به ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر در چهار گوشه

در جدول ۴ بیشینه مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های فوق آورده شده است و در شکل ۲۰ پوش‌های گسیختگی برشی موهر- کولمب نشان داده شده است. شکل‌های ۲۱ و ۲۲ جابجایی قائم در مقابل جابجایی برشی برای دو سربار مختلف را نمایش می‌دهد و شکل‌های ۲۳ و ۲۴ نمودارهای تنش برشی در مقابل جابجایی افقی هستند. همانطور که در شکل ۲۳ و ۲۴ مشاهده می‌شود، وجود قطعه بتنی در ناحیه برش باعث شده رفتار نمونه از نرم‌کنشی

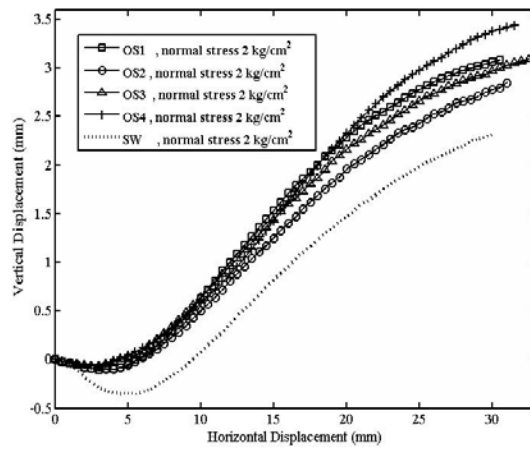
به سخت‌کنشی بالخصوص در سربارهای کم، تبدیل شود. همچنین مقاومت برشی نمونه‌های حاوی قطعات بتنی به‌طور چشمگیری بیشتر از نمونه‌های ماسه‌ای می‌شود. با افزایش ارتفاع قطعه بتنی به دلیل مشارکت بیشتر قطعه در عمق نمونه و در نتیجه نیاز به انرژی بیشتر برای چرخش آن در اثر برش، مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد قطعات به‌طور فزاینده‌ای مقاومت نمونه بیشتر می‌شود. این نتیجه منطبق بر نتیجه مشابه دیگر بدست آمده توسط محققین دیگر است (Fakhimi and Hosseinpour 2008).



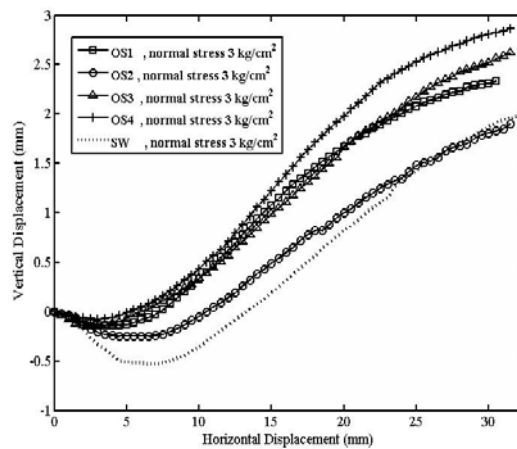
شکل ۲۰. پوش‌های گسیختگی برشی موهر-کولمب برای نمونه‌های با جسم بزرگ

جدول ۴. بیشینه مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه‌های با جسم بزرگ

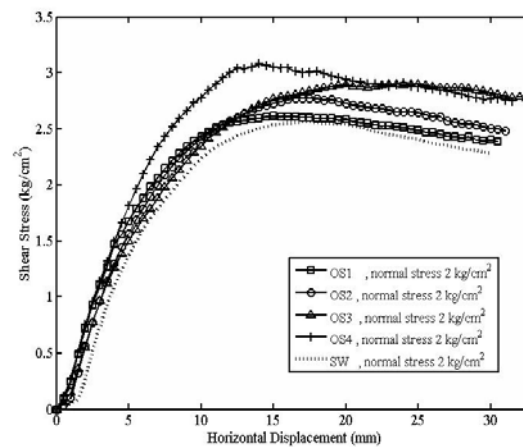
$\phi$	3	2	1	تنش نرمال
41	3.496	2.565	1.742	<i>SW</i>
42.67	3.538	2.613	1.694	<i>OS1</i>
45.15	3.777	2.774	1.766	<i>OS2</i>
48	4.105	2.899	1.885	<i>OS3</i>
50.66	4.296	3.078	1.855	<i>OS4</i>



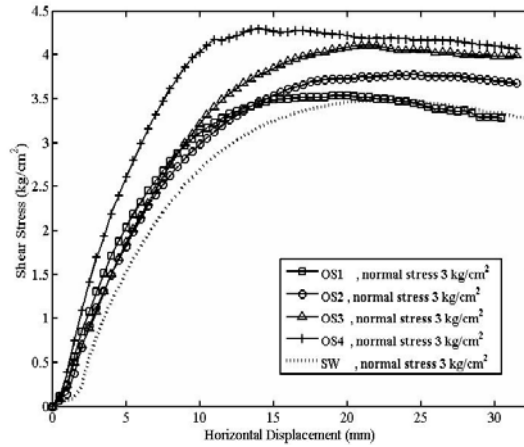
شکل ۲۱. نمودار جابجایی قائم در مقابل جابجایی افقی در تنش نرمال ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



شکل ۲۲. نمودار جابجایی قائم در مقابل جابجایی افقی در تنش نرمال ۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



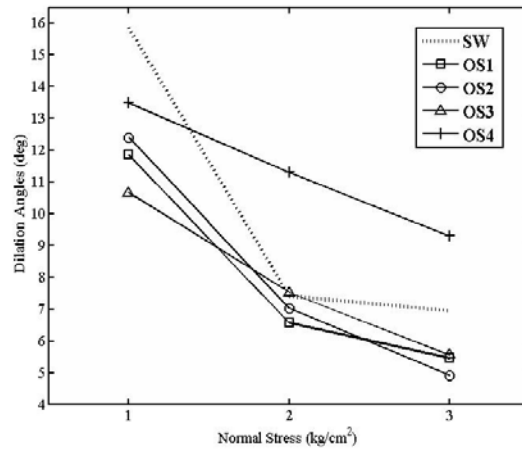
شکل ۲۳. نمودار تنش برشی در مقابل جابجایی افقی در تنش نرمال ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



شکل ۲۴. نمودار تنش برشی در مقابل جابجایی افقی در تنش نرمال ۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع

داده و باعث تسلیح نمونه شده است. فقط نمونه OS4 در سربارهای بیش از ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع زاویه اتساع بیشتری را نشان می‌دهد.

در مورد تاثیر جسم بزرگ بر روی زاویه اتساع، مساله قدری پیچیده‌تر است. مطابق شکل ۲۵، در اغلب موارد وجود جسم بزرگ باعث کاهش اتساع شده که البته این نیز انتظار می‌رود. چرا که جسم بزرگ مقاومت را در ناحیه برش افزایش



شکل ۲۵. زاویه اتساع بر حسب تنش نرمال

مطابق با رابطه ۱ ارائه شده توسط Guth، مشخصات مکانیکی مخلوط دارای جسم بزرگ، تابعی از مشخصات مکانیکی مصالح خالص است (Guth 1945):

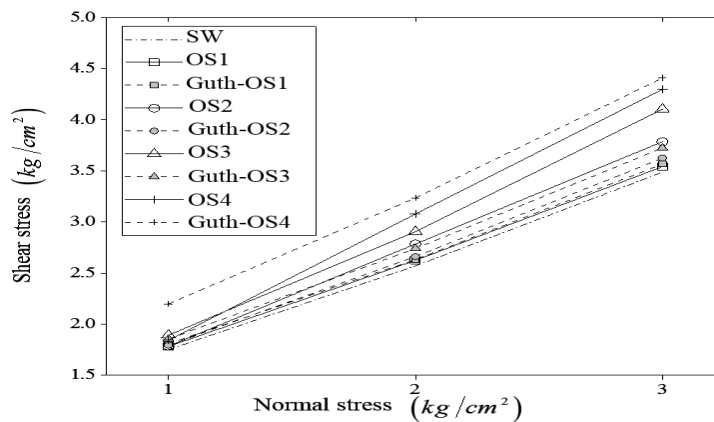
$$P^* = P(1 + 2.5C) \quad (1)$$

با پوش‌های گسیختگی به دست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم در این مقاله، انجام می‌شود که در شکل ۲۶ نمایش داده شده است. در این شکل خط چین مربوط به ماسه خالص SW است که به منظور مقایسه به شکل اضافه شده است. نتایج مربوط به آزمایشات برش مستقیم ماسه همراه با جسم بزرگ

در این رابطه  $P^*$  مشخصات مکانیکی مصالح دارای جسم بزرگ است و  $P$  مشخصات مکانیکی مصالح خالص است و  $C$  چگالی حجمی جسم بزرگ داخل نمونه است. در این بخش مقایسه‌ای بین پوش‌های گسیختگی بدست آمده از رابطه فوق

مشاهده می‌گردد، انطباق نسبتاً خوبی بین این دو دسته پوش وجود دارد.

با علامت‌های OS نشان داده شده‌اند و پوش‌های بدست آمده بر اساس مشخصات مکانیکی رابطه ارائه شده توسط Guth 1945 نیز با Guth-OS نشان داده شده‌اند. همانگونه که



شکل ۲۶. مقایسه پوش‌های گسیختگی بدست آمده با استفاده از رابطه Guth 1945 و نتایج آزمایشات برش مستقیم

## ۵- نتیجه‌گیری

۴- در صورتی‌که نمونه به سه لایه مساوی تقسیم شود و لایه میانی که ناحیه برش در آن قرار می‌گیرد، از ماسه باشد و دو لایه پایینی و بالایی از شن، رفتار نمونه مشابه ماسه یکدست است که دوباره تاثیر چشمگیر مصالح ماسه را در ناحیه برش تایید می‌کند.

۵- اگر نمونه به سه لایه تقسیم شود و لایه میانی از شن و دو لایه پایینی و بالایی از ماسه باشند، با افزایش ضخامت لایه شن، مقاومت نمونه نزدیک به مقاومت نمونه شن خالص می‌شود. به نحوی‌که اگر شن میانی ۳ سانتی‌متر ضخامت داشته باشد، نمونه ۸۵٪ بیشینه مقاومت نمونه شنی را دریافت می‌کند و اگر ۷ سانتی‌متر ضخامت داشته باشد، نمونه بین ۹۰ تا ۱۰۰ درصد (وابسته به مقدار سربار وارده) مقاومت نمونه شن خالص را خواهد داشت.

۶- ضخامت ناحیه برش وابسته به اندازه ذرات است، و با درشت‌تر شدن دانه‌بندی مصالح، ضخامت بیشتر می‌شود.

۷- وجود قطعه با اندازه بزرگ (قطعه مکعبی بتنی) در ناحیه برش باعث می‌شود رفتار نمونه ماسه‌ای از نرم‌کنشی به سخت‌کنشی بالاحص در سربارهای کم، تبدیل شود.

۸- وجود قطعه با اندازه بزرگ در ناحیه برش، باعث افزایش چشمگیر مقاومت برشی نمونه ماسه‌ای می‌شود. همچنین زاویه اصطکاک داخلی نمونه نیز افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد قطعات با اندازه بزرگ داخل نمونه، مقاومت نمونه به طور فزاینده‌ای بیشتر می‌شود.

هدف از این مقاله بررسی اثر اندازه ذرات، دانه‌بندی و وجود جسم بزرگ بر روی رفتار برشی خاک‌های دانه‌ای بوده است. برای این منظور ۴ نوع مصالح دانه‌ای با اندازه و دانه‌بندی متفاوت اما از یک جنس و قرصه انتخاب شدند. آزمایشات برش مستقیم بزرگ مقیاس به سه صورت متفاوت بر روی این مصالح انجام شد. دسته اول آزمایشات بر روی مصالح خالص، سری دوم آزمایشات بر روی نمونه‌های ترکیبی و گروه سوم آزمایشات بر روی نمونه‌های حاوی جسم بزرگ بتنی انجام شدند. مطابق با نتایج بدست آمده:

۱- با بزرگتر شدن اندازه ذرات، پوش‌های گسیختگی موهر- کولمب مصالح بالاتر رفته و نمونه از مقاومت برشی بیشتری برخوردار می‌شود، و به همین ترتیب زاویه اصطکاک داخلی مصالح و زاویه اتساع نیز افزایش می‌یابد.

۲- اگر نیمه بالایی محفظه برش از ماسه و نیمه پایینی آن از شن پر شود (نمونه ترکیبی دولایه افقی)، رفتار نمونه مشابه رفتار ماسه خالص است که بیانگر اثر چشمگیر ماسه در ناحیه برش است. پوش گسیختگی موهر- کولمب این نمونه نیز مشابه نمودار ماسه خالص می‌شود.

۳- اگر همه محفظه برش به دو نیم تقسیم شود و نیمی از شن و نیمی از ماسه پر شود (نمونه ترکیبی دولایه قائم)، مقاومت نمونه حاصل مابین دو نمونه ماسه و شن یکدست خواهد بود، به عبارت دیگر می‌توان گفت: مقاومت برشی هر نمونه معادل با جمع مقاومت برشی نوارهای طولی در نمونه خواهد بود و اثر جانبی این نوارها بر روی یکدیگر ناچیز است.

۶- مراجع

- Lakirouhani, A., Bahrehdar, M., & Hosseini, S. M. (2018). Investigation About Shear Behavior Of Sand Reinforced With Geotextile With Emphasis On Shear Zone. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 34.2(2.1), 99-108. [doi.org/10.24200/j30.2018.1345](https://doi.org/10.24200/j30.2018.1345)
- Lakirouhani, A., & Abbasian, M. (2018). Investigation of Soil-Geogrid Interface in Direct Shear test, with Emphasis on the size of Apertures of Geogrid and Different Compaction Degrees of Soil. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(5), 949-960. [doi.org/10.22060/ceej.2017.12726.5258](https://doi.org/10.22060/ceej.2017.12726.5258)
- Sarkar, D., Goudarzy, M., König, D., & Wichtmann, T. (2020). Influence of particle shape and size on the threshold fines content and the limit index void ratios of sands containing non-plastic fines. *Soils and Foundations*, 60(3), 621-633. [doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.006](https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.006)
- Sitharam, T. G., & Nimbkar, M. S. (2000). Micromechanical Modelling of Granular Materials: Effect of Particle Size and Gradation. *Geotechnical & Geological Engineering*, 18(2), 91-117. [doi.org/10.1023/A:1008982027109](https://doi.org/10.1023/A:1008982027109)
- Tian, J., Liu, E., Jiang, L., Jiang, X., Sun, Y., & Xu, R. (2018). Influence of particle shape on the microstructure evolution and the mechanical properties of granular materials. *Comptes Rendus Mécanique*, 346(6), 460-476. [doi.org/10.1016/j.crme.2018.03.006](https://doi.org/10.1016/j.crme.2018.03.006)
- Tiwari, B., Ye, G., Li, M., Khalid, U., & Yadav, S. K. (2020). Strength and dilatancy behaviors of deep sands in Shanghai with a focus on grain size and shape effect. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(6), 1214-1225. [doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.01.010](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.01.010)
- Wang, S., Lei, X.-W., Meng, Q.-S., Xu, J.-L., Xie, L.-F., & Li, Y.-J. (2020). Influence of Particle Shape on the Density and Compressive Performance of Calcareous Sand. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(1), 49-62. [doi.org/10.1007/s12205-020-0145-8](https://doi.org/10.1007/s12205-020-0145-8)
- Wang, Y., Shao, S., & Wang, Z. (2019). Effect of Particle Breakage and Shape on the Mechanical Behaviors of Granular Materials. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 7248427. [doi.org/10.1155/2019/7248427](https://doi.org/10.1155/2019/7248427)
- Alshameri, B., Bakar, I., Madun, A., Abdeldjouad, L., & Dahlan, S. H. (2016). Effect of Coarse Materials Percentage in the Shear Strength. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 136(1), 012017. [doi:10.1088/1757-899X/136/1/012017](https://doi.org/10.1088/1757-899X/136/1/012017)
- Altuhafi Fatin, N., Coop Matthew, R., & Georgiannou Vasiliki, N. (2016). Effect of Particle Shape on the Mechanical Behavior of Natural Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(12), 04016071. [doi:10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001569](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001569)
- ASTM-D3080 (1998). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions.
- Chen, J.-N., Ren, X., Xu, H., Zhang, C., & Xia, L. (2022). Effects of Grain Size and Moisture Content on the Strength of Geogrid-Reinforced Sand in Direct Shear Mode. *International Journal of Geomechanics*, 22(4), 04022006. [doi:10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002309)
- El Nagggar, H., Zahran, K., & Moussa, A. (2021). Effect of the Particle Size on the TDA Shear Strength and Stiffness Parameters in Large-Scale Direct Shear Tests. *Geotechnics*, 1(1), 1-17. [doi.org/10.3390/geotechnics1010001](https://doi.org/10.3390/geotechnics1010001)
- Fakhimi, A., & Hosseinpour, H. (2008). *The role of oversize particles on the shear strength and deformational behavior of rock pile material*. The 42nd US Rock Mechanics Symposium (USRMS), American Rock Mechanics Association, 2008.
- Gu, R., Fang, Y., Jiang, Q., Li, B., & Feng, D. (2022). Effect of particle size on direct shear deformation of soil. *Geomechanics and Engineering*, 28 (2), 135-143. [doi.org/10.12989/GAE.2022.28.2.135](https://doi.org/10.12989/GAE.2022.28.2.135)
- Guth, E. (2004). Theory of Filler Reinforcement. *Journal of Applied Physics*, 16(1), 20-25. [doi.org/10.1063/1.1707495](https://doi.org/10.1063/1.1707495)
- Hasanzadehshooiili, H., Mahinroosta, R., Lakirouhani, A., & Oshtaghi, V. (2014). Using artificial neural network (ANN) in prediction of collapse settlements of sandy gravels. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(6), 2303-2314. [doi.org/10.1007/s12517-013-0858-9](https://doi.org/10.1007/s12517-013-0858-9)

# Investigating the Effect of Particle Size, Granulation and Concrete Block on the Behavior and Shear Strength of Granular Soils, with Emphasis on the Shear Zone

*Ali Lakirouhani, Associate Professor, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.*

*Farzad Mousakhani, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,  
University of Zanjan, Zanjan, Iran.*

*Alireza Moazzami, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.*

*E-mail: rou001@znu.ac.ir*

Received: June 2023- Accepted: November 2023

## **ABSTRACT**

The particle sizes of granular soils have a great effect on their shear behavior. The purpose of this article is to investigate the shear behavior of granular soils with different particle sizes. The large-scale direct shear tests are conducted in three parts. The first part of the experiments is related to 4 types of granular soil with different particle size. The second part is related to the tests performed on composite samples and in the third part, the effect of a concrete block on the shear strength of granular soil is investigated. According to the results, as the particle size of the material increases, the push of the shear failure increases and the sample has higher shear strength, in the same way, as the size of the particles increases, the friction angle of the materials and the dilation angle increases. The main finding of this article is that the materials located in the shear zone have a great impact on the strength of the sample. In composite samples, if the sand is compacted in the shear zone, although the top and bottom of the sample is gravel, the behavior and strength of the sample is close to that of pure sand. The thickness of the shear zone is dependent on the size of the particles, the thickness of the shear zone increases as the grain size increases. The concrete block in the shear zone increases the shear strength and internal friction angle of the sand sample.

**Keywords:** Failure Push, Size Effect, Dilation Angle, Large Scale Direct Shear Test, Shear Plane