بررسی اثر شن دانه‌ها بر مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای

*امیر حمیدی، نیما سلیمی، وحید یزدانجو:
گروه مهندسی عمران، دانشگاه تربیت معلم تهران
hamidi@tmu.ac.ir

تاریخ: دریافت ۸۹/۱۱/۱۰ **پذیرش**۹۰/۰۳/۱۷

چکیده

امروزه محدودیت منابع قرضه دارای ذرات خاک استفاده شده در فعالیت‌های رایج مهندسی، باعث رواج هر چه بیش‌تر استفاده از دانه‌های شنی با اندازه‌های درشت تا مرز قلوه سنگ در خاک‌ریزها شده است. به‌کارگیری ذرات درشت‌دانه در شیب‌ها و خاک‌ریزها مستلزم در نظر گرفتن تأثیرات آن‌ها در مخلوط شدن با خاک‌های ریزتر است. محدودیت ابعاد دستگاه‌های آزمایشگاهی متعارف مانع از انجام آزمایش بر روی نمونه‌های دانه‌درشت می‌شود. به همین سبب در این تحقیق تلاش شده است با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس، تأثیر درصد، شکل و اندازهٔ شن‌دانه بر رفتار مکانیکی مخلوط‌های ماسه‌ای مشخص شود. تعداد ۳۹ آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس، بر مخلوط خاک ماسه‌ای و شن‌دانه‌های گردگوشه و تیزگوشه با حداکثر قطر دانه‌های ۱۲/۵ و ۲۵/٤ میلی‌متر در درصدهای شن صفر، ۲۰، ٤۰ و ٦۰ ترتیب داده شد. نتایج نشان داد که مقاومت برشی خاک ماسه‌ای با افزایش درصد شن‌دانه افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که شن‌های تیزگوشه و درشت‌تر نسبت به شن‌های گردگوشه و کوچک‌تر به میزان بیش‌تری مقاومت برشی و زاویهٔ اصطکاک مخلوط‌های شن و ماسه را افزایش می‌دهند. در این راستا روابطی نیز برای تقریب زاویهٔ اصطکاک و مقاومت برشی خاک مخلوط شن و ماسه‌ای بر حسب درصد و نوع شن‌دانه ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت برشی، مخلوط شن و ماسه، درصد شن‌دانه، شکل شن‌دانه، اندازهٔ شن دانه

*نویسنده مسئول

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]

مقدمه

مقاومت برشی مخلوط‌های شن و ماسه‌ای از جمله مسائل مهم مطرح در مهندسی ژئوتکنیک است. اما به‌دلیل آثار اندازهٔ نمونهٔ آزمایشگاهی، عمدهٔ بررسی‌ها با حذف بخش دانه‌درشت‌تر مخلوط انجام شده است. از جمله فرگاتزی[۱] و همکاران (۱۹۹۰و ۱۹۹۲) با معرفی مفهوم چگالی زمینهٔ دور به تشریح اثرات درشت‌دانه‌ها بر تراکم، مقاومت برشی و ویژگی‌های تغییرشکل خاک مخلوط پرداختند [۱]، [۲]. بنا به تعریف نامبردگان، خمیرهٔ دانه‌ریزتر خاک به دو بخش زمینهٔ نزدیک که شامل قسمت نزدیک به دانه‌های درشت‌تر و زمینهٔ دور که عبارت از قسمت دورتر از دانه‌های درشت‌تر است قابل تفکیک است. پژوهش‌گران مذکور بیان کردند که در صورت شناوری شن‌دانه‌ها در ماتریس ماسه‌ای، ویژگی‌های مقاومتی خاک با ماتریس زمینهٔ دور کنترل می‌گردد. بر اساس این نظریه، وجود شن‌دانه در خاک ماسه‌ای، چگالی زمینهٔ دور را کم کرده و سبب کاهش مقاومت مخلوط می‌شود.

اوانس[۲] و ژو[۳] و (۱۹۹۵) این نظریه را برای مقاومت تناوبی خاک‌های مخلوط شن و ماسه‌ای تأیید کردند [۳]. اما محققان دیگر چون والخو[٤](۲۰۰۱)، کوکوشو[٥] و همکاران (۲۰۰٤)، افزایش مقاومت با درصد شن‌دانه را نشان دادند [٤]، [٥].

یاگیز[٦] (۲۰۰۱) به بررسی اثر شکل شن‌دانه بر مقاومت برشی خاک مخلوط پرداخت. بر اساس این تحقیق دانه‌های شنی تیزگوشه‌تر موجب افزایش بیش‌تری در مقاومت برشی خاک ماسه‌ای نسبت به دانه‌های گردگوشه‌تر می‌شوند [٦].

سیمونی[۷] و هولزبای[۸](۲۰۰٦) با بررسی رفتار برشی مخلوط‌های شن و ماسه‌ای با دانه‌بندی‌های متفاوت، ارتباط واحدی بین ویژگی‌های مقاومت و اتساع خاک به‌صورت مستقل از دانه‌بندی و حداکثر اندازهٔ شن دانه‌ها به‌دست آوردند [۷]. این روابط به‌وسیلهٔ حمیدی و همکاران (۲۰۰۹) برای محدودهٔ تنش‌های ماورای حد خردشدگی شن‌دانه‌ها بسط و توسعه پیدا کرد [۸]، [۹].

---

۱. Fragaszy ۲. Evans ۳. Zhou ۴. Vallejo
۵. Kokusho ۶. Yagiz ۷. Simoni ۸. Houlsby

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

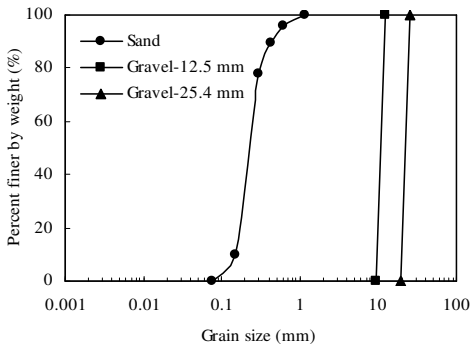
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]

به‌طور کلی خصوصیت‌های مقاومت برشی خاک‌های مخلوط شن و ماسه‌ای متأثر از عواملی چون دانسیتهٔ نسبی مخلوط، فشار سربار، درصد، شکل و اندازهٔ شن‌دانه است. در این پژوهش سعی بر آن است که اثر درصد، شکل و اندازهٔ شن‌دانه بر مقاومت برشی خاک مخلوط ارزیابی شود.

برنامهٔ بررسی‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق از خاک ماسه‌ریز با دانه‌بندی یک‌نواخت سواحل بابلسر به‌عنوان خاک مبنا استفاده گردید. همچنین دو نوع شن گردگوشه و تیزگوشه و از هر یک با دو اندازه ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر به‌عنوان شن‌دانه استفاده شدند. شن‌دانه‌ها در سه درصد وزنی ۲۰، ٤۰ و ٦۰ با خاک ماسه‌ای مخلوط شدند. شکل ۱ نمایی از مصالح مصرفی و شکل ۲ منحنی دانه‌بندی آن‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۱. مصالح مصرفی در این تحقیق a) ماسه b) شن تیزگوشه c) شن گردگوشه

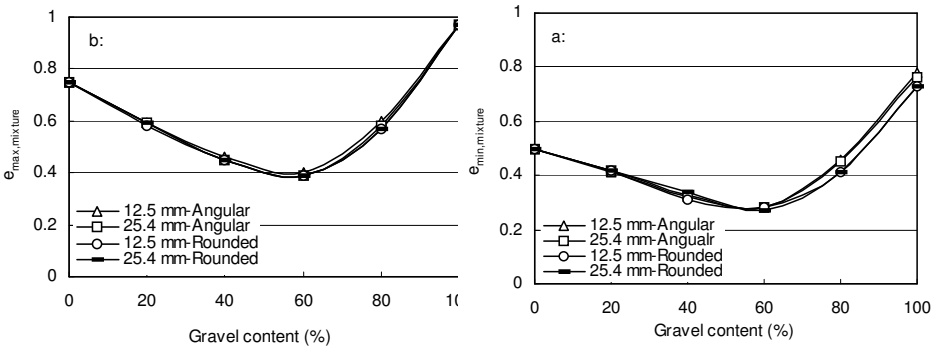


شکل ۲. مصالح استفاده شده در این تحقیق

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]

تخلخل حداکثر و حداقل مخلوط‌های شن و ماسه‌ای بر اساس استانداردهای ASTM-D4253 و ASTM-D4254 محاسبه شدند [۱۰]. نتایج در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس شکل مذکور حد شناوری شن‌دانه‌ها در خمیره ماسه‌ای در حدود ٦۰ درصد است.



شکل ۳. a) تخلخل حداقل و b) تخلخل حداکثر مخلوط‌های شن و ماسه

همچنین چگالی ویژهٔ ماسه و شن استفاده شده بر اساس استاندارد ASTM-D854 به‌ترتیب ۲/۷٤ و ۲/٦٤ محاسبه شد [۱۰].

آزمایش‌ها در دانسیتهٔ نسبی مخلوط برابر ٦۰ درصد انجام شدند. بر این اساس ابتدا وزن مخصوص خشک نظیر این دانسیتهٔ نسبی محاسبه شد و با احتساب حجم جعبه برش ۱۷۰×۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متری، وزن خاک لازم تعیین شد. سپس بر اساس درصد وزنی شن مورد نظر، وزن لازم برای هر یک از دانه‌های ماسه و شن معین شد.

نمونه‌ها با رطوبت ۵ درصد و در سه لایه تهیه شدند. وزن محاسبه شده برای هر لایه در قالب ریخته شد و با یک کوبه و اندازه‌گیری دقیق ارتفاع، تا یک سوم ارتفاع کل جعبه متراکم گردید. پیش از قرار دادن لایهٔ بعدی، خراش‌هایی در رویه لایهٔ قبل ایجاد شد تا درگیری مناسبی بین لایه‌ها به‌وجود آید.

آزمایش‌ها در سه سربار ۱۵۰، ۳۰۰ و ٤۵۰ کیلوپاسکال انجام شدند. پس از اعمال سربار، بار برشی با سرعت ۰/٦۵ میلی‌متر بر دقیقه اعمال و نیروی برشی و تغییر مکان قائم و برشی برای انجام محاسبات ثبت گردیدند. جدول ۱ متغیرهای مورد نظر در آزمایش‌ها را ارائه می‌کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]

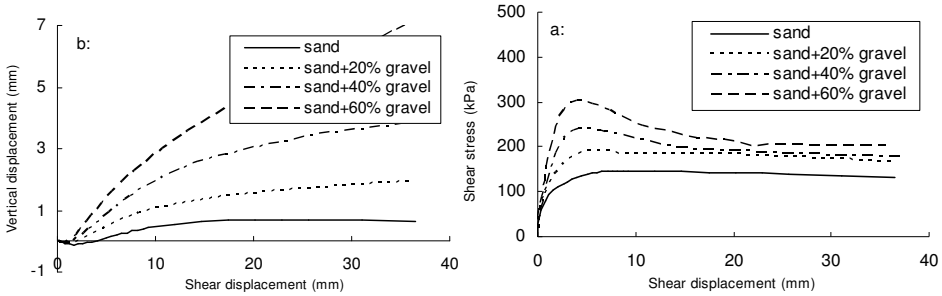
جدول ۱. متغیرهای درنظر گرفته شده در آزمایش‌ها

متغیر	مقادیر
درصد شن	۰، ۲۰، ٤۰ و ٦۰
شکل شن	گردگوشه و تیزگوشه
اندازهٔ شن	۱۲/۵ و ۲۵/٤ میلی‌متر
فشار سربار	۱۵۰، ۳۰۰ و ٤۵۰ کیلوپاسکال
دانسیتهٔ نسبی	٦۰ درصد

تأثیر درصد شن‌دانه بر مقاومت برشی مخلوط

شکل ٤ تغییرات تنش برشی-تغییر مکان برشی و تغییرمکان قائم-تغییر مکان برشی را برای مخلوط حاوی ٦۰ درصد شن گردگوشه با حداکثر اندازهٔ ۲۵/٤ میلی‌متر تحت سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، مقاومت برشی خاک مخلوط با افزایش درصد شن‌دانه ازدیاد می‌یابد.

به‌علاوه میزان تغییرمکان قائم نیز با ازدیاد درصد شن افزایش می‌یابد. ازدیاد تغییر مکان قائم بدان معنی است که تحت سربار مورد نظر، کار بیش‌تری در راستای قائم انجام می‌گیرد. بنا بر این برای ایجاد برش در خاک نیاز به اعمال تنش برشی بیش‌تری است که دلیلی بر افزایش مقاومت برشی با ازدیاد درصد شن‌دانه در مخلوط است.



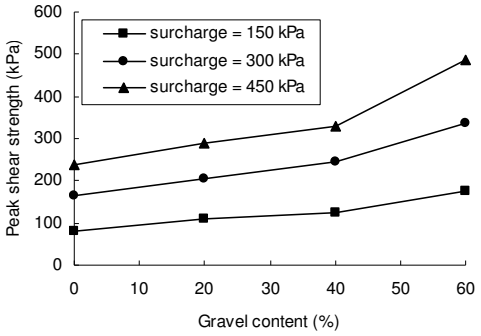
شکل ٤. تغییرات a) تنش برشی و b) تغییرمکان قائم با تغییرمکان برشی

همچنین شکل ۵ تغییرات مقاومت برشی مخلوط شن و ماسه را در دانسیتهٔ نسبی ٦۰ درصد و سربارهای مختلف با درصد شن گردگوشه ۲۵/٤ میلی‌متری نشان می‌دهد. بر اساس این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]

شکل مقاومت برشی با ازدیاد درصد شن و فشار سربار افزایش می‌یابد.

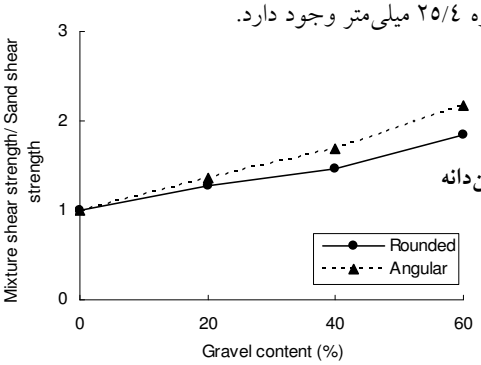


شکل ۵. تغییرات مقاومت برشی با درصد شن و فشار سربار

تأثیر شکل شن‌دانه بر مقاومت برشی مخلوط

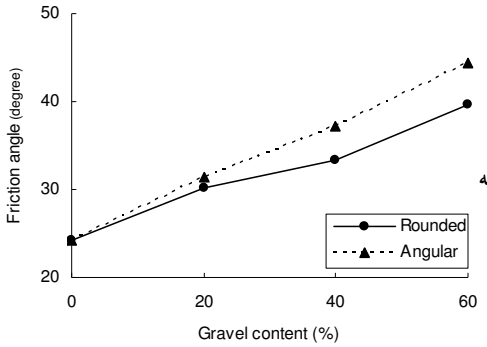
شکل ٦ تغییرات نسبت مقاومت مخلوط شن و ماسه به مقاومت ماسه فاقد شن را در تراکم یک‌سان و فشار سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال با درصد شن نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، مقاومت مخلوط حاوی شن تیزگوشه همواره بیش از مقدار نظیر مخلوط حاوی شن گردگوشه است. مانند حالت قبلی، علت این موضوع را نیز می‌توان به تیزگوشه بودن دانه‌ها نسبت داد که موجب ایجاد تغییر مکان قائم (اتساع) بیش‌تر می‌گردد. هم‌چنین برهمین اساس، تأثیر شکل شن‌دانه بر مقاومت برشی مخلوط با ازدیاد درصد شن افزایش می‌یابد بدین ترتیب که تفاوت منحنی‌های مربوط به مخلوط‌های حاوی شن‌دانه گرد یا تیزگوشه در درصدهای شن بالاتر مشهودتر است.

شکل ۷ نیز تغییرات زاویهٔ اصطکاک مخلوط را با درصد شن‌گرد یا تیزگوشه ۱۲/۵ میلی‌متری نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، نیز زاویهٔ اصطکاک در مخلوط حاوی شن‌دانه گردگوشه همواره بیش‌تر از مقدار نظیر در خاک حاوی شن گردگوشه است. مشابه این شرایط برای خاک مخلوط حاوی شن گرد یا تیزگوشه با اندازه ۲۵/٤ میلی‌متر وجود دارد.



شکل ٦. تغییرات نسبت مقاومت برشی مخلوط به مقاومت برشی ماسه با درصد شن‌دانه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]



شکل ۷. تغییرات زاویهٔ اصطکاک با درصد شن در مخلوط‌های حاوی شن‌گرد یا تیزگوشه

با انجام برازش خطی به داده‌های شکل، روابط زیر برای تخمین زاویهٔ اصطکاک در مخلوط‌های شن و ماسه‌ای پیشنهاد می‌گردد. در این روابط φ زاویهٔ اصطکاک بر حسب درجه و GC درصد شن مخلوط است:

– در مخلوط حاوی شن گردگوشه با حداکثر اندازهٔ ۱۲/۵ میلی‌متر:

$$\varphi = 0.24GC + 24.7^{\circ} \qquad (۱)$$

– در مخلوط حاوی شن گردگوشه با حداکثر اندازه ۲۵/٤ میلی‌متر:

$$\varphi = 0.32GC + 24.7^{\circ} \qquad (۲)$$

– در مخلوط حاوی شن تیزگوشه با حداکثر اندازهٔ ۱۲/۵ میلی‌متر:

$$\varphi = 0.33GC + 24.3^{\circ} \qquad (۳)$$

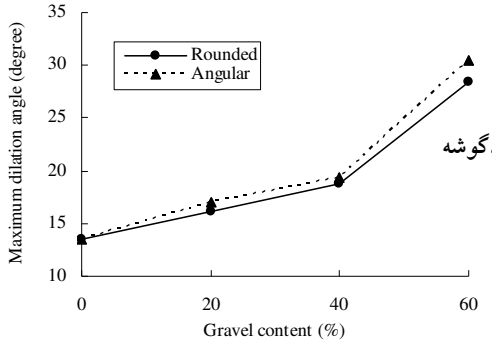
– در مخلوط حاوی شن تیزگوشه با حداکثر اندازهٔ ۲۵/٤ میلی‌متر:

$$\varphi = 0.39GC + 24.0^{\circ} \qquad (٤)$$

در شکل ۸ تغییرات زاویهٔ اتساع حداکثر در برابر درصد شن برای مخلوط‌های حاوی دو نوع شن گردگوشه و تیزگوشه اندازهٔ ۱۲/۵ میلی‌متر در تراکم نسبی ٪٦۰ نشان داده شده است. بر این اساس، افزایش درصد شن منجر به افزایش زاویهٔ اتساع حداکثر خاک می‌شود. مخلوط حاوی شن تیزگوشه به‌ویژه در درصدهای بالاتر از ٤۰ به میزان بیش‌تری زاویهٔ اتساع حداکثر را افزایش می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

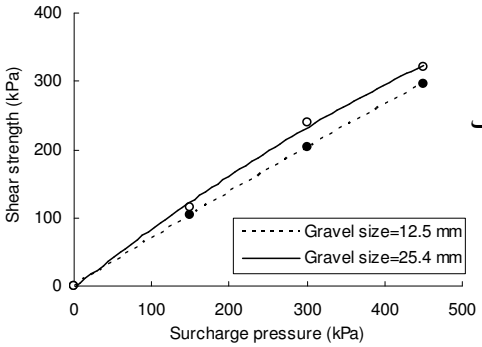
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]



شکل ۸. تغییرات زاویهٔ اتساع با درصد شن‌دانه برای مخلوط حاوی شن تیز یا گردگوشه

تأثیر اندازهٔ شن‌دانه بر مقاومت برشی مخلوط

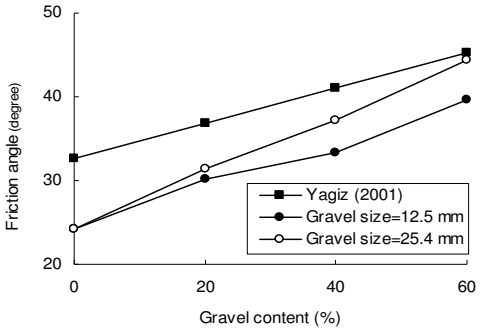
شکل ۹ پوش گسیختگی خاک ماسه‌ای مخلوط با ٤٠ درصد شن گردگوشه به اندازه‌های ۱۲/۵ و ۲۵/٤ میلی‌متری را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل پوش گسیختگی مخلوط دارای شن با اندازهٔ بزرگ‌تر در بالای پوش نظیر مخلوط با اندازهٔ شن‌دانه کوچک‌تر قرار دارد که نشان‌گر مقاومت برشی بیش‌تر در فشار سربار یک‌سان است. مشابه توضیح‌هات قبل، دلیل این موضوع نیز بروز تغییر مکان قائم بیش‌تر در زمان حرکت شن دانه‌های درشت‌تر بر روی یک‌دیگر است که منجر به انجام کار بیش‌تر در راستای قائم و لزوم نیروی برشی بیش‌تر خواهد شد. همچنین شکل مذکور نشان می‌دهد که میزان خمیدگی پوش گسیختگی با ازدیاد اندازهٔ شن‌دانه افزایش می‌یابد.



شکل ۹. پوش گسیختگی مخلوط حاوی ٤٠ درصد شن گردگوشه به اندازه‌های مختلف

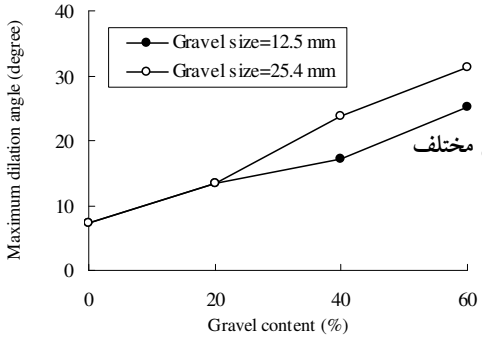
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]

شکل ۱۰ نیز تغییرات زاویهٔ اصطکاک مخلوط ماسه و شن گردگوشه را با اندازهٔ شن‌دانه نشان می‌دهد. مطابق شکل وجود شن‌دانه درشت‌تر در مخلوط سبب افزایش زاویهٔ اصطکاک آن خواهد شد. همچنین نتایج تحقیقات یاگیز (۲۰۰۱) نیز در شکل ارائه شده است. چنان که ملاحظه می‌گردد در همهٔ حالت‌ها افزایش زاویهٔ اصطکاک با درصد شن‌دانه را خواهیم داشت.



شکل ۱۰. زاویهٔ اصطکاک مخلوط حاوی شن گردگوشه به اندازه‌های مختلف

شکل ۱۱ تغییرات زاویهٔ اتساع حداکثر خاک مخلوط ماسه با شن گردگوشه در دو اندازهٔ ۱۲/۵ و ۲۵/٤ میلی‌متر را در برابر درصد شن موجود در مخلوط برای سربار ۳ کیلوگرم بر مترمربع و تراکم نسبی ٪٦۰ نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور مشاهده می‌شود که زاویهٔ اتساع حداکثر خاک‌های مخلوط شن و ماسه با افزایش درصد شن افزایش می‌یابد که این افزایش برای شن با اندازهٔ ۲۵/٤ میلی‌متر در مقایسه با شن سایز ۱۲/۵ میلی‌متر بیش‌تر بوده و در درصدهای بالاتر این اختلاف بیش‌تر خواهد شد.



شکل ۱۱. تغییرات زاویهٔ اتساع با درصد شن‌دانه برای مخلوط حاوی شن با اندازه‌های مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]

با بررسی نتایج همهٔ آزمایش‌ها روابط (۵) تا (۸) برای محاسبهٔ مقاومت برشی مخلوط شن و ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده تا درصد شن‌دانه ٦٠، قابل ارائه است. در تمامی این روابط تراکم نسبی مخلوط ٦٠ درصد لحاظ شده است:

– در مخلوط حاوی شن گردگوشه با حداکثر اندازهٔ ۱۲/۵ میلی‌متر:

$$q = 0.58\sigma_v \times GC + q_0 \qquad (۵)$$

– در مخلوط حاوی شن گردگوشه با حداکثر اندازهٔ ۲۵/٤ میلی‌متر:

$$q = 0.86\sigma_v \times GC + q_0 \qquad (٦)$$

– در مخلوط حاوی شن تیزگوشه با حداکثر اندازهٔ ۱۲/۵ میلی‌متر:

$$q = 0.85\sigma_v \times GC + q_0 \qquad (۷)$$

– در مخلوط حاوی شن تیزگوشه با حداکثر اندازهٔ ۲۵/٤ میلی‌متر:

$$q = 1.12\sigma_v \times GC + q_0 \qquad (۸)$$

در این روابط q مقاومت برشی خاک مخلوط بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و q_0 مقاومت برشی خاک ماسه‌ای فاقد شن در سربار نظیر خاک مخلوط (σ_v) و تراکم نسبی ٦٠ درصد است.

نتیجه‌گیری

رفتار برشی خاک مخلوط شن و ماسه در درصدها، شکل‌ها و اندازه‌های مختلف شن‌دانه بررسی گردید. بر اساس این تحقیق، افزایش درصد شن‌دانه در خاک موجب ازدیاد مقاومت برشی آن می‌شود. همچنین شن دانه‌های تیزگوشه یا درشت‌تر افزایش بیش‌تری در پارامترهای مقاومتی خاک به‌وجود می‌آورند. دلیل اصلی این موضوع افزایش تغییر مکان قائم (اتساع) حین برش با ازدیاد درصد، تیزگوشگی و اندازه شن‌دانه عنوان شد.

روابطی نیز برای تعیین زاویهٔ اصطکاک و مقاومت برشی مخلوط شن و ماسه‌ای بر حسب درصد، شکل و اندازه شن‌دانه موجود در مخلوط ارائه شد. بر اساس این روابط تخمین مناسبی از زاویهٔ اصطکاک و مقاومت برشی خاک حاصل می‌گردد که به‌عنوان تقریبی مناسب قابل استفاده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]

منابع

1. Fragaszy, R. J., Su, W., Siddiqi, F. H. "Effect of oversized particles on the density of clean granular soils". ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 13, No. 2 (1990) 106-114.
2. Fragaszy, R. J., Su, W., Siddiqi, F. H. and Ho, C. L. "Modeling strength of sandy gravel". Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 118, No. 6 (1992) 920-935.
3. Evans, M. D. and Zhou, S. "Liquefaction behavior of sand-gravel composites". Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 121, No. 3 (1995) 287-298.
4. Vallejo, L. E. "Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 38, No. 5 (2001) 1097-1104.
5. Kokusho, T., Hara, T. and Hiraoka, R. "Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, ASCE, Vol. 130, No. 6 (2004) 621-629.
6. Yagiz, S. "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, Vol. 60, No. 4 (2001) 321-323.
7. Simoni, A. and Houlsby, G. T. "The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures". Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 24, No. 3 (2006) 523-549.
8. Hamidi, A., Yazdanjou, V. and Salimi, N. "Shear strength characteristics of sand-gravel mixtures". International Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 3, No. 1 (2009) 29-38.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]

9. Hamidi, A., Alizadeh, M. and Soleimani, M. "Effect of particle crushing on shear strength and dilation characteristics of sand-gravel mixtures". International Journal of Civil Engineering, Vol. 7, No. 1 (2009) 62-72.

10. ASTM "Annual Book of ASTM Standards". Soils and Rock Division, West Conshohocken, Philadelphia (1998).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.2.2]