اثر اندازهٔ دانه‌های خاک درشت‌دانه بر رفتار برشی آن

غلامحسین توکلی مهرجردی*، فریبا مترجمی؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ فنی مهندسی، تهران

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۳/۲۷ پذیرش ۹۵/۰۸/۱۰

چکیده

ارزیابی پارامترهای مقاومت برشی خاک در پروژه‌های عمرانی و مباحث پایداری از دیرباز بسیار حائز اهمیت بوده است. در این پژوهش، به‌منظور بررسی تأثیر اندازهٔ دانه‌های مصالح درشت‌دانه بر پارامترهای مقاومت برشی و رفتار اتساعی خاک، تعدادی آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس در حالت خشک انجام گرفته است. متغیرهای این پژوهش شامل سه نوع خاک درشت‌دانه بد دانه‌بندی شده با میانگین قطر ذرات ۳، ٦ و ۱۲ میلی‌متر، دو دانسیته نسبی ۵۰ و ۷۰ درصد و سربارهای قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال بوده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازهٔ دانه‌های خاک و دانسیته نسبی به‌دلیل افزایش قفل و بست بین دانه‌ها، تمایل به اتساع بیش‌تر شده و مقاومت برشی حداکثر نیز افزایش یافته است. به‌عبارت دیگر، مقاومت برشی نمونه‌ها با قطر میانگین ٦ و ۱۲ میلی‌متر نسبت به نمونه با قطر میانگین ۳ میلی‌متر به‌ترتیب حدود ۵ و ٢٤ درصد افزایش داشته است. هم‌چنین افزایش اندازهٔ دانه‌های خاک موجب افزایش نسبت مقاومت برشی ماندگار به مقاومت برشی حداکثر شده و خاک به افت مقاومتی کم‌تری دچار شده است، به موازات آن زاویهٔ اصطکاک داخلی، حداکثر زاویهٔ اتساع و زاویهٔ اصطکاک در حجم ثابت، افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: خاک درشت‌دانه، اندازهٔ دانه‌های خاک، دانسیته نسبی، پارامترهای مقاومت برشی، زاویه اتساع

* **نویسنده مسئول** ghtavakoli@khu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

مقدمه

مقاومت برشی، عمده‌ترین عامل در تعیین رفتار خاک است. مقاومت برشی، مقاومتی است که خاک می‌تواند برای تاب آوردن در برابر گسیختگی و لغزش در امتداد هر صفحه دل‌خواه، بسیج کند. رفتار برشی خاک‌های درشت‌دانه را محققان متعددی بررسی کرده‌اند [۸]. رفتار مقاومتی و اتساعی مخلوط‌های حاوی شن و ماسه با انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس تحت سربار ۹۰ کیلوپاسکال بررسی کردند. مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل یک نوع ماسه خوب دانه‌بندی شده با قطر میانگین ذرات ۰/۷ میلی‌متر و دو نوع شن بد دانه‌بندی شده و شن خوب دانه‌بندی شده به‌ترتیب با قطر میانگین ذرات ٤/٥ و ۷/٥ میلی‌متر است. در این تحقیق تفاوت رفتاری ماسهٔ سیلیکا با مخلوط‌های شن و ماسه‌ای که با اضافه کردن درصدهایی از دو نوع شن به ماسه درست شدند بررسی شده است. نتایج نشان داد با اضافه کردن شن به مخلوط و با افزایش دانسیته نسبی موجب افزایش زاویهٔ اصطکاک حداکثر و به‌تبع آن زاویهٔ اتساع حداکثر و زاویهٔ اصطکاک در حجم ثابت افزایش می‌یابد. از دیگر پژوهش‌های انجام شده می‌توان به بررسی رفتار مقاومتی و اتساعی مخلوط‌های شن و ماسه بد دانه‌بندی شده با دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس تحت سربارهای ۱۵۰، ۳۰۰ و ٤٥۰ کیلوپاسکال که فراتر از حد خردشدگی دانه‌ها است اشاره کرد [٦]، [۷]. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش درصد شن، میزان تراکم و سربار، مقاومت برشی مخلوط افزایش می‌یابد. هم‌چنین کیم و ها (۲۰۱٤) [۱۰] اثر اندازهٔ دانه‌ها بر مقاومت برشی خاک غیرمسلح و مسلح شده با ژئوگرید را روی سه نوع خاک ماسه خوب دانه‌بندی شده با حداکثر قطر دانه‌های ٤/٥، ۷/٥ و ۱٥/۹ میلی‌متر تحت سربارهای ۹۸، ۱۹٦ و ۲۹٤ کیلوپاسکال تحت آزمایش برش بزرگ مقیاس، بررسی کردند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی این تحقیق، در خاک‌های غیرمسلح با افزایش اندازهٔ دانه‌ها، زاویهٔ اصطکاک داخلی حداکثر افزایش می‌یابد. در پژوهش‌های محققان گذشته بررسی اثر اندازهٔ دانه‌های خاک بر رفتار مقاومتی و اتساعی خاک‌های مخلوط شن و ماسه انجام شده است. اما در پژوهش حاضر، مجموعه منظمی از آزمایش‌های برش بزرگ مقیاس روی نوعی خاک ماسه بد دانه‌بندی شده با قطر میانگین دانه‌های ۳ میلی‌متر و دو نوع شن بد دانه‌بندی شده با قطر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

میانگین دانه‌های ٦ و ١٢ میلی‌متر تحت سربارهای ١٠٠، ٢٠٠ و ٣٠٠ کیلوپاسکال به‌منظور بررسی اثر اندازه دانه‌ها بر رفتار اتساعی و مقاومت برشی نمونه‌ها انجام شده است.

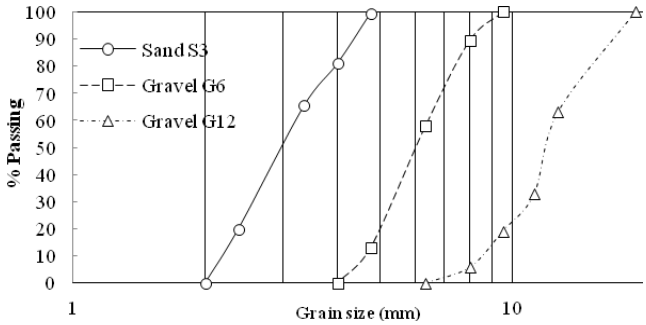
مشخصات مصالح و برنامه آزمایش‌ها

مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل یک نوع ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) با قطر میانگین ذرات ٣ میلی‌متر و دو نوع شن بد دانه‌بندی شده (GP) با قطر میانگین ذرات ٦ و ١٢ میلی‌متر است. منحنی دانه‌بندی هر سه نوع خاک بر اساس طبقه‌بندی سیستم متحد مطابق با شکل ١ است. مشخصات فنی خاک آزمایش شده در جدول ١ خلاصه شده است.

جدول ١. مشخصات فنی سه نوع خاک استفاده شده در آزمایش‌ها

نوع خاک	ماسه	شن	
	S3	G6	G12
D_{60} (mm)	٣/٢٢	٦/٤٥	١٢/٥٥
D_{50} (mm)	٣	٦	١٢
D_{30} (mm)	٢/٥٧	٥/٢٩	١٠/٨٦
D_{10} (mm)	٢/١٩	٤/٥٨	٨/٤٥
ضریب انحناء (C_c)	٠/٩٤	٠/٩٥	١/١١
ضریب یکنواختی(C_u)	١/٤٧	١/٤١	١/٤٩
ردهٔ خاک بر اساس سیستم متحد	SP	GP	GP
	١٦/٠	١٥/٦	١٥/٥
	١٤/٥	١٤/٣	١٤/٠
	٢/٦٧	٢/٦٦	٢/٦٥
	٠/٨١	٠/٨٣	٠/٨٥
	٠/٦١	٠/٦٧	٠/٦٧
	١٥/٢٢	١٤/٩٣	١٤/٧٦
	١٥/٥٣	١٥/٢٠	١٥/٠٦

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]



شکل ۱. توزیع دانه‌بندی برای هر سه نوع خاک

به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، با توجه به مشخصات فنی خاک (جدول ۱)، وزن هر نمونه با توجه به ابعاد جعبهٔ برش مستقیم ۱۸۰×۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر، در هر دانسیته نسبی محاسبه شده و نمونه‌ها در سه لایه در جعبه برش، متراکم شده است. کوبش لایه‌ها به‌آرامی و با استفاده از کوبه دستگاه برش انجام شده است. پس از ساخت نمونه، فشار سربار مورد نظر اعمال شده است.

در این دستگاه، نیروی برشی اعمال شده تابع میزان تغییرمکان برشی جعبه برش است که این تغییرمکان، به شکل یک مقدار ثابت انتخابی از طرف کاربر است. طبق استاندارد ASTM D5321-08 میزان تغییرمکان باید چنان آهسته باشد تا هیچ‌گونه اضافه فشار حفره‌ای در حین آزمایش به‌وجود نیاید. در صورتی که شرایط انجام آزمایش، بدون اضافه فشار آب حفره‌ای باشد، می‌توان حداکثر میزان تغییر مکان ۱ میلی‌متر بر دقیقه را انتخاب کرد. از آن‌جاکه در این تحقیق در همه آزمایش‌ها مصالح استفاده شده از نوع درشت دانه است و در شرایط خشک انجام گرفته است، میزان تغییر مکان ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده است. هم‌چنین طبق استاندارد باید فاصله‌ای بین قسمت تحتانی و فوقانی جعبه برش لحاظ شود تا از اصطکاک بین دو نیمه جلوگیری شود ولی این فاصله نباید آنقدر زیاد باشد که دانه‌های خاک از فضای خالی دچار ریزش شود. بدین‌منظور، فاصلهٔ بین دو جعبه ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد [۸]. شکل ۲ نمای کلی از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس را نشان می‌دهد.

بدین‌ترتیب، به‌منظور بررسی اثر اندازهٔ دانه‌های خاک بر رفتار برشی توده خاک، ۱۸ آزمایش برش مستقیم مطابق با جدول ۲ انجام شده است. پارامترهای متغیر شامل سربار قائم،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

قطر میانگین ذرات خاک و دانسیته نسبی آن است. در جدول ۲ نام اختصاری آزمایش در سه قسمت A-B-C ارائه شده است که A نوع خاک همراه با قطر میانگین ذرات، B دانسیته نسبی و C مقدار سربار قائم را مشخص می‌کند.



شکل ۲. نمای کلی از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس

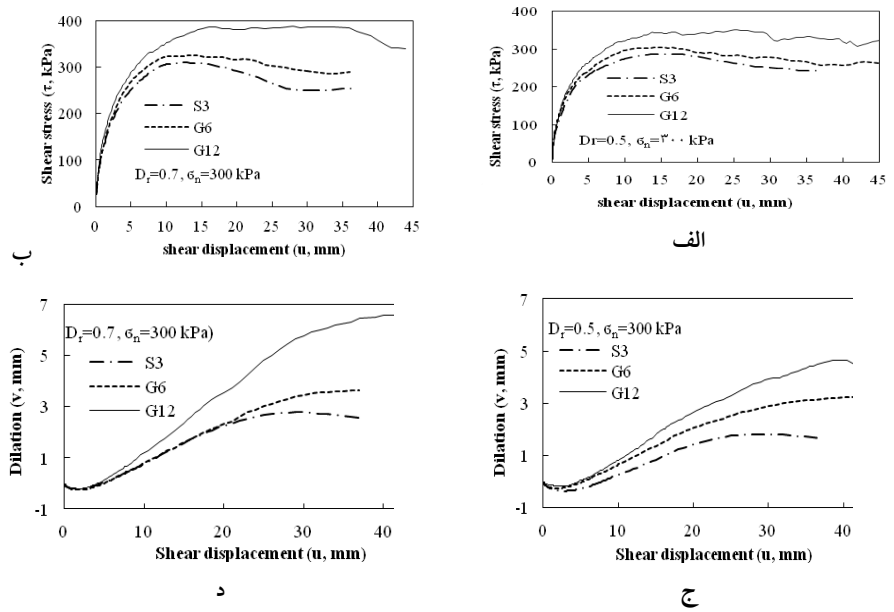
جدول ۲. برنامه آزمایش‌ها

شمارهٔ آزمایش	نوع خاک	دانسیتهٔ نسبی D_r (%)	سربار قائم σ_n (kPa)	نام آزمایش
۱	ماسه (D_{50}=3 mm)	۵۰	۱۰۰	S3-50-100
۲			۲۰۰	S3-50-200
۳			۳۰۰	S3-50-300
٤		۷۰	۱۰۰	S3-70-1
٥			۲۰۰	S3-70-200
٦			۳۰۰	S3-70-300
۷	شن (D_{50}=6 mm)	۵۰	۱۰۰	G6-50-100
۸			۲۰۰	G6 -50-200
۹			۳۰۰	G6 -50-300
۱۰		۷۰	۱۰۰	G6-70-100
۱۱			۲۰۰	G6-70-200
۱۲			۳۰۰	G6-70-300
۱۳	شن (D_{50}=12 mm)	۵۰	۱۰۰	G12-50-100
۱٤			۲۰۰	G12-50-200
۱٥			۳۰۰	G12-50-300
۱٦		۷۰	۱۰۰	G12-70-100
۱۷			۲۰۰	G12-70-200
۱۸			۳۰۰	G12-70-300

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

تحلیل و تفسیر نتایج

منحنی تغییرمکان برشی- تنش برشی و تغییرمکان قائم برای هر سه نوع خاک تحت سربار قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال با دانسیتهٔ نسبی ۵۰ و ۷۰ درصد در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۳ در همهٔ نمونه‌ها با تراکم نسبی متوسط و متراکم، با افزایش تغییرمکان برشی، تنش برشی افزایش یافته و به‌مقدار حداکثر (τ_{max}) رسیده و سپس به‌مقداری مشخص (τ_{cv}) کاهش می‌یابد. این مقدار تنش برشی مشخص، تنش برشی ماندگار نامیده می‌شود. در همهٔ نمونه‌ها با تراکم نسبی متوسط و متراکم، در ابتدا به‌دلیل فرورفتن دانه‌ها در یک‌دیگر حجم نمونه کاهش یافته و سپس به‌دلیل غلطیدن دانه‌ها روی یک‌دیگر، دچار اتساع شده است. در مقادیر بزرگ تغییرمکان برشی، حجم نمونه تقریباً ثابت شده است (شکل ۳ ج و د). چنان‌که مشاهده می‌شود با افزایش اندازه دانه‌ها قفل و بست بین دانه‌ها افزایش یافته، در نتیجه تمایل به اتساع نیز بیش‌تر شده و مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد.



شکل ۳: رفتار برشی و اتساعی برای سه نوع خاک تحت سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال با دانسیته نسبی (الف و ج) ۵۰ درصد و (ب و د) ۷۰ درصد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

زاویهٔ اصطکاک و چسبندگی

در جدول ۳ پارامترهای مقاومت برشی، زاویهٔ اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی (c) هرسه نوع خاک خلاصه شده است. با توجه به نتایج جدول ۳، با افزایش اندازه دانه‌های خاک و دانسیتهٔ نسبی پارامترهای مقاومت برشی افزایش می‌یابد. با فرض پوش خطی موهر، با افزایش اندازهٔ دانه‌های خاک، چسبندگی ظاهری در خاک‌های درشت دانه مشاهده شده است. رخداد چسبندگی ظاهری در تودهٔ خاک درشت‌دانه مخصوصاً در خاک با ذرات بزرگ‌تر می‌تواند به‌دلیل اندرکنش زیاد بین‌دانه‌ای و مقاومت در برابر خرد شدن درشت‌دانه‌ها به‌دلیل کرنش برشی زیاد باشد.

جدول ۳. پارامترهای مقاومت برشی خاک‌ها با فرض خطی بودن پوش گسیختگی

Soil Type	D_{50} (mm)	D_r=۰/۵		D_r=۰/۷	
		φ_{peak} (Deg.)	c (kPa)	φ_{peak} (Deg.)	c (kPa)
S3	۳	٤۱/۹	۲/٤	٤۳/۷	٦/۳
G6	٦	٤۳/٥	٦/۳	٤٥/۲	٦/٥
G12	۱۲	٤٦/٤	۱۲/۲	٤۹/٥	۱۲/۹

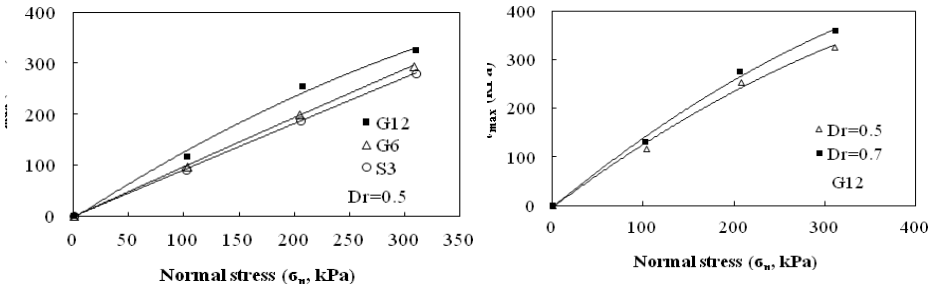
با توجه به شکل ٤ پوش گسیختگی موهر غیرخطی بوده و با توجه به ماهیت غیرچسبنده بودن خاک این پوش از مبدا فضای تنش‌های عمودی و برشی می‌گذرد؛ برای خاک شنی با D_{50}=12 mm در دو دانسیته ۵۰ و ۷۰ درصد پوش گسیختگی به صورت غیرخطی ترسیم و با تقریب خوبی با رابطهٔ درجه دوم تخمین زده شده است. به‌منظور محاسبهٔ زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی ظاهری در هر نقطه از منحنی، معادله خط مماس در هر نقطه مطابق رابطهٔ (۱) به‌دست آمده است. شیب خط مماس ($m = \frac{d\tau}{d\sigma_n}$) در هر نقطه از منحنی، معادل تانژانت زاویهٔ اصطکاک داخلی و عرض از مبدا آن، معادل چسبندگی ظاهری است. رابطهٔ (۲) و (۳) معادلهٔ پوش گسیختگی در فضای ($\tau - \sigma_n$) به‌ترتیب برای درصدهای تراکم ۵۰ و ۷۰ درصد برای خاک G12 است.

$$\tau = m\,\sigma_n + c \qquad (۱)$$

$$D_r = 0.5 \rightarrow \tau = -0.001\,{\sigma_n}^2 + 1.399\,\sigma_n - 4.048,\ R^2 = 0.994 \qquad (۲)$$

$$D_r = 0.7 \rightarrow \tau = -0.001\,{\sigma_n}^2 + 1.538\,\sigma_n - 3.745,\ R^2 = 0.996 \qquad (۳)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]



شکل ٤. پوش غیرخطی گسیختگی موهر-کلمب الف) خاک G12 تحت تراکم نسبی ۵۰ و ۷۰ درصد، ب) هر سه نوع خاک با تراکم نسبی ۵۰ درصد

نتایج محاسبه پارامترهای مقاومت برشی تحت سربارهای مختلف و دانسیتهٔ نسبی ۵۰ و ۷۰ درصد برای خاک G12 در جدول ٤ خلاصه شده است. با توجه به جدول ٤ و شکل ٤ با افزایش دانسیتهٔ نسبی پوش گسیختگی به‌سمت بالا حرکت کرده و پارامترهای مقاومت برشی افزایش می‌یابد. در یک دانسیتهٔ نسبی مشخص با افزایش سربار قائم زاویهٔ اصطکاک داخلی کاهش و چسبندگی ظاهری افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر پوش گسیختگی افقی‌تر می‌شود. هم‌چنین مطابق با شکل ٤ ب با کاهش اندازهٔ دانه‌های خاک پوش منحنی گسیختگی به‌سمت پایین حرکت کرده و از انحنای آن کاسته شده است.

جدول٤. پارامترهای مقاومت برشی خاک G12 فرض غیرخطی بودن پوش گسیختگی تحت سربارهای مختلف

Soil Type	D_{50} (mm)	D_r	σ_n (kPa)	φ_{peak} (Deg.)	c (kPa)
G12	۱۲	۰/۵	۱۰۰	۵۰/۱	۵/۹
			۲۰۰	٤٤/۹	۳۵/۹
			۳۰۰	۳۸/٦	۸۵/۹
		۰/۷	۱۰۰	۵۳/۲	٦/۲
			۲۰۰	٤۸/۷	۳٦/۲
			۳۰۰	٤۳/۲	۸٦/۲

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

اعداد به‌دست آمده از جدول ٤ بیان‌گر آن است که هرچند با افزایش سربار موجب کاهش زاویهٔ اصطکاک شده است، از طرفی، منجر به افزایش چشم‌گیر چسبندگی ظاهری شده و در کل این تغییرات، افزایش مقاومت برشی را در پی داشته است.

زاویه اتساع

شکل ۵ تغییرات پارامتر بی‌بعد تنش (نسبت تنش برشی به تنش قائم مؤثر) و هم‌چنین تغییرات میزان اتساع را نسبت به تغییرشکل برشی هر سه نوع خاک نشان می‌دهد. به‌منظور محاسبهٔ میزان اتساع (dv/du) از دو مقدار قرائت شده تغییرمکان قائم (u) و تغییرمکان برشی (v) استفاده شده است. به‌عبارت دیگر می‌توان از رابطهٔ (٤) برای محاسبهٔ زاویهٔ اتساع استفاده کرد.

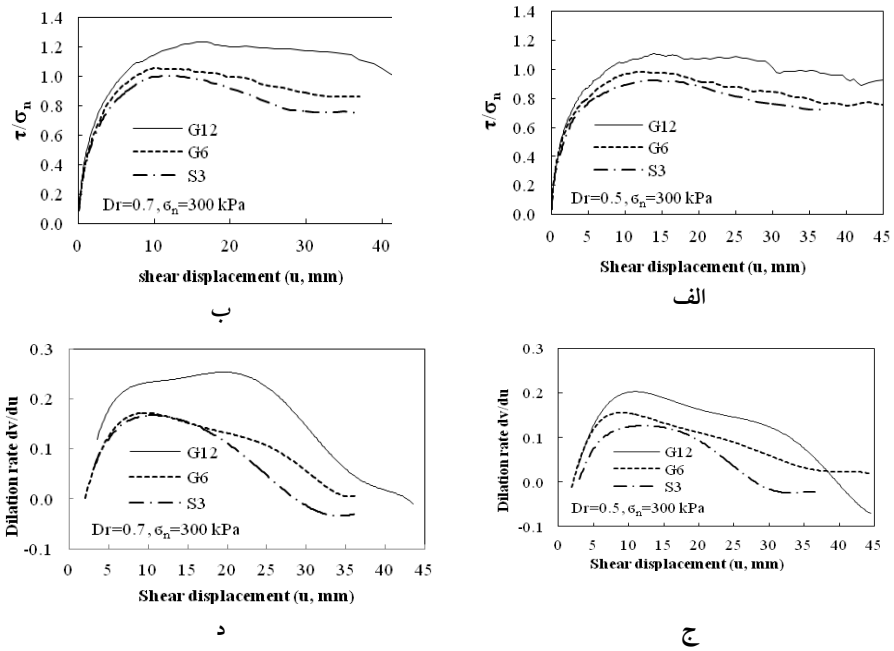
$$\tan\Psi = \frac{dv}{du} \qquad (٤)$$

که در آن Ψ زاویهٔ اتساع خاک است. برای تعیین زاویهٔ اتساع حداکثر (ψ_{max})، حداکثر میزان اتساع $((dv/du)_{max})$ متناظر با نقطه ماکزیمم منحنی میزان اتساع- تغییرمکان برشی درنظر گرفته شده است (شکل ۵). با توجه به شکل ۵ حداکثر زاویهٔ اتساع و حداکثر نسبت $((\tau/\sigma_n)_{max})$ تقریباً در یک تغییرمکان برشی رخ می‌دهد. به‌عبارت دیگر، بیش‌ترین مقاومت برشی در برابر حرکت در صفحه گسیختگی مربوط به لحظه‌ای است که نمونه بیش‌ترین میزان اتساع را از خود نشان داده است. بدین‌ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که میزان اتساع حداکثر ارتباط مستقیمی با مقاومت برشی حداکثر دارد. به‌عبارت دیگر، افزایش میزان اتساع حداکثر بیان‌گر افزایش مقاومت برشی حداکثر بوده است.

با توجه به شکل ۵ الف و ب واضح است که با افزایش اندازهٔ دانه‌ها، نسبت تنش برشی به تنش نرمال (τ/σ_n) افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند به‌دلیل افزایش حجم بیش‌تر نمونه با اندازهٔ دانه‌های بزرگ‌تر و در نتیجه مشارکت بیش‌تر زاویهٔ اتساع در افزایش مقاومت برشی باشد. شکل ۵ اثر تراکم نسبی بر منحنی‌های نسبت تنش برشی، تغییرمکان قائم و میزان اتساع در مقابل تغییرمکان برشی برای نمونه G12 تحت سربار قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ مشخص است با افزایش دانسیتهٔ نسبی، فضای خالی بین دانه‌ها کاسته،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

مقاومت نمونه در برابر کاهش حجم افزایش یافته و در پی آن اتساع بیش‌تر و مقاومت برشی نمونه افزایش می‌یابد.



شکل ۵. رفتار برشی و اتساعی برای سه نوع خاک تحت سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال با دانسیتهٔ نسبی الف و ج) ۵۰ درصد، ب و د) ۷۰ درصد

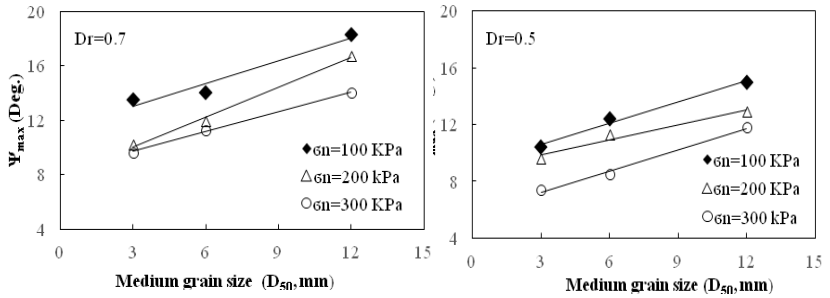
شکل ٦، تغییرات زاویهٔ اتساع حداکثر خاک را با توجه به تغییرات اندازهٔ دانه‌های خاک، سربار قائم و دانسیته نسبی ارائه می‌دهد. با توجه به شکل ٦، اتساع با افزایش اندازه دانه‌های خاک و دانسیته نسبی، افزایش و با افزایش سربار قائم، کاهش می‌یابد. هر چند افزایش سربار موجب کاهش اتساع و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک (جدول ٤) می‌شود ولی با افزایش تنش مؤثر بین دانه‌ها، موجب محدودیت بیش‌تر در برابر حرکت و غلتیدن و به‌روز چسبندگی ظاهری و در نتیجه موجب افزایش مقاومت برشی می‌شود. در جدول ۵ نتایج نسبت ضریب مقاومتی نمونه‌های G6 و G12 نسبت به نمونه S3 خلاصه شده است. با توجه به نتایج جدول ۵ ملاحظه می‌شود در تراکم‌های‌نسبی ۵۰ و ۷۰ درصد همواره این نسبت بزرگ‌تر از یک است و با افزایش اندازهٔ دانه‌های خاک، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. هم‌چنین با ۲ و ٤ برابر شدن قطر میانگین ذرات، نسبت ضریب مقاومتی برشی به‌ترتیب حدود ۵ و ۲٤ درصد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

افزایش یافته است. در این تحقیق از سه نوع خاک درشت دانه با قطرهای میانگین (۳، ٦ و ۱۲ میلی‌متر) استفاده شده است و با افزایش اندازه دانه‌های خاک درشت‌دانه، مقاومت برشی حداکثر در تغییرمکان‌های برشی بیش‌تر رخ می‌دهد و در هنگام گسیختگی دچار افت مقاومتی کم‌تر می‌شود (جدول ٦). اما با افزایش دانسیته نسبی، به‌دلیل کاهش تخلخل و افزایش اصطکاک بین آن‌ها، نمونه تمایل به فشردگی اولیه کم‌تر و اتساع بیش‌تر داشته، در نهایت منجر به افزایش مقاومت برشی حداکثر و نهایی شده است. این نتایج با نتایج حمیدی و همکاران (۲۰۱۲) که بر اساس آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس روی سه نوع خاک درشت‌دانه شامل ماسه خوب دانه‌بندی شده و دو نوع شن خوب دانه‌بندی شده به‌ترتیب با قطر میانگین دانه‌ها معادل ٤، ۷/۹ و ۱۰ میلی‌متر است، مطابقت دارد. بر اساس نتایج این تحقیق با افزایش اندازه دانه‌ها، موجب افزایش تنش برشی حداکثر می‌شود و در تغییرمکان برشی بیش‌تری رخ می‌دهد. در حالی که با افزایش دانسیتهٔ نسبی، تنش برشی حداکثر افزایش یافته ولی در تغییر مکان برشی کم‌تری رخ می‌دهد و منجر به افزایش سختی خاک می‌شود.

جدول ۵. نتایج نسبت ضریب مقاومتی نمونه‌های G6 و G12 نسبت به نمونه‌های S3

			σ_n=۱۰۰ (kPa)	σ_n=۲۰۰ (kPa)	σ_n=۳۰۰ (kPa)
$(\tau/\sigma_n)_{max\ G6}/(\tau/\sigma_n)_{max\ S3}$	$\frac{(D_{50})_{G6}}{(D_{50})_{S3}}$ =۲	Dr=۰/۷	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵
		Dr=۰/۵	۱/۰٤	۱/۰۷	۱/۰۵
$(\tau/\sigma_n)_{max\ G12}/(\tau/\sigma_n)_{max\ S3}$	$\frac{(D_{50})_{G12}}{(D_{50})_{S3}}$ =٤	Dr=۰/۷	۱/۲٤	۱/۲۹	۱/۲۳
		Dr=۰/۵	۱/۲۵	۱/۲٤	۱/۲۰



ب الف

شکل ٦. تغییرات زاویه اتساع حداکثر در خاک‌های مختلف برای تراکم نسبی الف) ۵۰ درصد، ب) ۷۰ درصد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

جدول ٦. نتایج نسبت مقاومت برشی ماندگار به مقاومت برشی حداکثر

D_r	Soil type			
		σ_n= 100 (kPa)	σ_n= 200 (kPa)	σ_n= 300 (kPa)
0.5	S3	0.77	0.77	0.86
	G6	0.86	0.88	0.91
	G12	0.89	0.90	0.96
0.7	S3	0.79	0.82	0.82
	G6	0.85	0.88	0.90
	G12	0.92	0.93	0.98

به‌منظور مقایسه عددی نتایج تغییرمکان نمونه‌های آزمایش شده، در جدول ۷ ارائه شده است. با مقاسیه نتایج ارائه شده در جدول ۷ افزایش دو عامل اندازه دانه‌ها و تراکم نسبی موجب کاهش مقدار تغییرمکان قائم منفی (کاهش فشردگی اولیه) و افزایش حداکثر تغییرمکان قائم مثبت (افزیش حجم بیش‌تر) می‌شود این در حالی که اثر افزایش سربارقائم عملکرد معکوس بر مقادیر تغییرمکان قائم مثبت و منفی دارد.

زاویهٔ اصطکاک حداکثر و زاویهٔ اصطکاک در حجم ثابت

شکل ۷، کردار تأثیر اندازهٔ دانه‌های خاک و دانسیتهٔ نسبی بر زاویهٔ اصطکاک حداکثر و زاویهٔ اصطکاک در حجم ثابت را ارائه می‌دهد. با استناد به شکل ۷ الف و نتایج جدول ۳ ملاحظه می‌شود که با افزایش اندازهٔ دانه‌ها و تراکم نسبی، زاویهٔ اصطکاک حداکثر و زاویهٔ اصطکاک در حجم ثابت ($dv/du \approx 0$) نیز افزایش می‌یابد. در واقع به موجب افزایش اندازهٔ دانه‌ها سطح تماس اصطکاکی و قفل و بست بین دانه‌ها افزایش و در نتیجه مقاومت برشی حداکثر نیز افزایش می‌یابد و در پی آن، موجب افزایش زاویهٔ اصطکاک حداکثر می‌شود. هم‌چنین با افزایش دانسیتهٔ نسبی فضای خالی بین دانه‌ها کاهش یافته و تمایل به اتساع بیش‌تر شده و با افزایش حجم بیش‌تر، مقاومت برشی حداکثر افزایش می‌یابد.

به‌منظور مقایسهٔ روند تغییرات زاویهٔ اصطکاک خاک با زاویهٔ اتساع خاک شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود زاویهٔ اصطکاک حداکثر و زاویهٔ اتساع حداکثر برای هر سه نوع خاک، تقریبا در یک تغییرمکان برشی اتفاق افتاده است. هم‌چنین مشخص است که

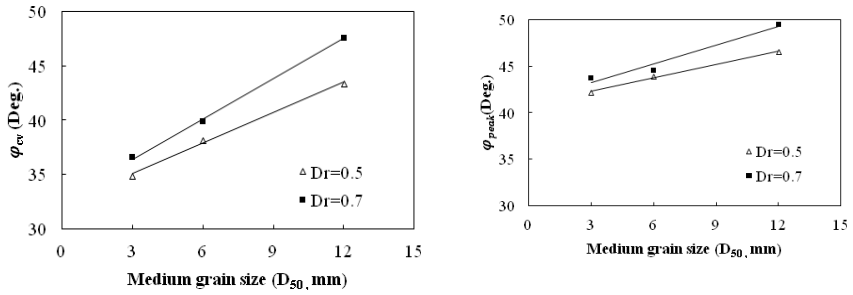
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

روند تغییرات زاویهٔ اتساع خاک، زاویهٔ اصطکاک خاک و هم‌چنین نسبت مقاومت برشی به تنش قائم (شکل ۵) یک‌سان است زاویهٔ اصطکاک حداکثر و زاویهٔ اتساع حداکثر، با افزایش دانه‌های خاک در تغییرمکان برشی بزرگ‌تر و با افزایش دانسیتهٔ نسبی در تغییرمکان برشی کم‌تری رخ داده است

جدول ۷. نتایج تغییرمکان برشی و تغییرمکان قائم نمونه‌های آزمایش شده

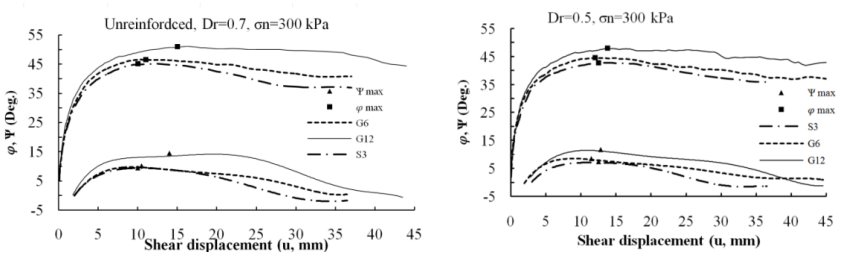
نام آزمایش	تغییرمکان برشی در τ_{max} (mm)	حداکثر تغییرمکان قائم منفی (mm)	حداکثر تغییرمکان قائم مثبت (mm)
S3-UR-50-100	۹/٦	−۰/۳٦	۱/۸۲
S3-UR-50-200	۱۲/۵	−۰/۳٦	۲/۲۳
S3-UR-50-300	۱٤/۵	−۰/۲۱	۲/۷۳
S3-UR-70-	۹/۰	−۰/۲	۲/۷۹
S3-UR-70-200	۱۰/۵	−۰/۱۵	۲/۸۵
S3-UR-70-300	۱۳/۵	−۰/۰۵	٤/۱۳
G6-UR-50-100	۱۳/۵	−۰/۲۵	۳/۳٦
G6 -UR-50-200	۱٤/۵	−۰/۱۸	۳/٦۹
G6 -UR-50-300	۱٦/۰	−۰/۱۲	۳/۷۲
G6-UR-70-100	۱۳/۵	−۰/۲٤	۳/٦۳
G6-UR-70-200	۱٤/۰	−۰/۱٦	۳/۸٤
G6-UR-70-300	۱۵/۵	−۰/۰۲	۵/۰٤
G12-UR-50-100	۱۷/۵	−۰/۱۸	٤/٦٦
G12-UR-50-200	۲۰/۰	−۰/۱۸	۳/۵۹
G12-UR-50-300	۲۲/۵	−۰/۰۲	۵/۱۷
G12-UR-70-100	۱٦/۵	−۰/۲۱	٦/۵۷
G12-UR-70-200	۱۹/۰	−۰/۱۱	۷/۰۲
G12-UR-70-300	۱۷/۵	−۰/۰۲	۷/٦۳

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]



ب الف

شکل ۷ : تاثیر اندازه دانه‌های خاک و دانسیته‌نسبی بر (الف) زاویه اصطکاک حداکثر و (ب) زاویه اصطکاک درحجم ثابت



ب الف

شکل ۸. تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی و زاویهٔ اتساع در برابر تغییرمکان برشی با دانسیتهٔ نسبی الف)۵۰، ب) ۷۰ درصد تحت سربارقائم ۳۰۰ کیلوپاسکال برای انواع خاک‌ها

نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌منظور بررسی آزمایشگاهی تأثیر اندازهٔ دانه‌های خاک و دانسیته نسبی بر رفتار برشی و اتساعی خاک‌های درشت‌دانه انجام شده و این نتایج به‌دست آمده است:

- در خاک‌های درشت‌دانه با تراکم نسبی متوسط و متراکم، با افزایش تغییرمکان برشی، تنش برشی افزایش یافته و به مقدار حداکثر خود (τ_{max}) می‌رسد و سپس تقریباً به مقداری ثابت (τ_{cv}) کاهش می‌یابد. این مقدار تنش برشی ثابت، تنش برشی ماندگار نامیده می‌شود.
- همهٔ نمونه‌ها در ابتدای تغییرمکان برشی، کاهش حجم اندکی داشته و با افزایش تغییرمکان برشی دجار افزایش حجم می‌شوند. با افزایش تغییرمکان برشی ابتدا میزان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

اتساع به حداکثر رسیده و سپس کاهش می‌یابد و در انتهای آزمایش مقدار آن ثابت می‌شود و در برخی موارد نمونه در تغییرمکان زیاد کاهش حجم از خود نشان می‌دهد (میزان اتساع منفی).

- هر چند افزایش سربار موجب کاهش اتساع می‌شود ولی با افزایش مقاومت دانه‌ها در برابر حرکت و غلتیدن، موجب افزایش مقاومت برشی می‌شود.
- با افزایش اندازهٔ دانه‌های خاک و دانسیتهٔ نسبی مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. این موضع بیش‌تر به‌دلیل افزایش اتساع نمونه با توجه به منحنی‌های تغییر حجم نمونه است. با افزایش اتساع نمونه‌ها، قفل و بست بین دانه‌ها و درگیری آن‌ها بیش‌تر شده و موجب افزایش مقاومت نمونه شده و به‌تبع آن موجب افزایش زاویهٔ اصطکاک حداکثر، زاویهٔ اصطکاک در حجم ثابت و زاویه اتساع حداکثر می‌شود.
- با افزایش اندازه دانه‌های خاک و دانسیتهٔ نسبی مقاومت برشی حداکثر در تغییرمکان برشی بزرگ‌تری رخ می‌دهد.
- پوش گسیختگی همهٔ نمونه‌ها منحنی از درجه ۳ است. با افزایش سربار قائم، شیب مماس بر منحنی افقی‌تر می‌شود به‌عبارتی با افزایش سربار قائم زاویهٔ اصطکاک داخلی کاهش و چسبندگی ظاهری افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش اندازهٔ دانه‌های خاک و دانسیته نسبی پوش گسیختگی به‌سمت بالا حرکت کرده و انحنای آن بیش‌تر می‌شود.
- مقاومت برشی نمونه با قطر میانگین ٦ و ۱۲ میلی‌متر نسبت به نمونه با قطر میانگین ۳ میلی‌متر به‌ترتیب حدود ۵ و ٢٤ درصد افزایش داشته است.
- با افزایش اندازه دانه‌های خاک و دانسیتهٔ نسبی، نسبت مقاومت برشی ماندگار بر مقاومت برشی حداکثر افزایش می‌یابد، به‌عبارتی افت مقاومتی کاهش می‌یابد

منابع

1. American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soil. ASTM D422-07 (2007).
2. American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. ASTM D4254-12 (2007).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]

3. American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. ASTM-D4253-12 (2012).
4. American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM-D854-12 (2012).
5. American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method. ASTM-D5321-08 (2008).
6. Hamidi A., Yazdanjou V., Salimi N., "Shear Strength Characteristics of Sand-Gravel Mixtures", International Journal of Civil Engineering, 3 (1) (2009-a) 29-38.
7. Hamidi A., Alizadeh M., Soleimani S. M., "Effect of Particle Crushing on Shear Strength (2009-b).
8. Simoni A., Houlsby G. T., "The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures, Geotechnical Engineering Journal, 24(3) (2006) 523-549
9. Mohr O., "WelcheUmstandeBedingen die Elastizitatsgrenze and den Bruch einesMateriales", Zeitschrift des VereinesDeutcherIngenieure, vol. 44, pp. 1524-1530 (1900) 1572-1577.
10. Kim D., Ha S., "Effect of Particle Size on the Shear Behavior of Coarse Grained Soil Reinforced with Geogrid", materials, volume 7 (2014) 963-979.
11. Hamidi A., Azini E., Masoudi B., "Impact of gradation on the shear strength-dilation behavior of well", Scientia Iranica, 19(3) ((2012)) 393-402.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.1.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.277]