



بررسی رفتار فصل مشترک مصالح خاکی فیلتر - هسته‌ی بتن آسفالتی با دستگاه برش مستقیم - مطالعه‌ی موردی: سد میجران

اشکان قلی‌پور نوروزی^{۱*}، رسول اجل لوئیان^۲، میثم بیات^۱

۱- گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۲- گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

کلمات کلیدی:

سد خاکی

هسته‌ی بتن آسفالتی

دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس

فصل مشترک مصالح خاکی - بتن

آسفالتی

نسبت اندرکنش

خلاصه: اخیراً، مزایای هسته‌ی بتن آسفالتی در مقایسه با هسته‌ی رسی، تمایل به استفاده از هسته‌ی بتن آسفالتی در سدهای خاکی را افزایش داده است. با توجه به اهمیت رفتار بین وجهی بتن آسفالتی هسته و مصالح خاکی فیلتر در پایداری این سدها و نیاز به بررسی دقیق‌تر رفتار پیچیده‌ی مصالح در فصل مشترک هسته- فیلتر، در این پژوهش، رفتار بین وجهی مصالح خاکی فیلتر- هسته‌ی بتن آسفالتی، در سد خاکی میجران (استان مازندران)، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس استفاده شده است. مصالح خاکی، شامل شن رس دار همراه با ماسه (GC) و شن بد دانه‌بندی شده همراه با ماسه (GP)، مطابق دانه‌بندی مورد استفاده در ساخت سد میجران بوده‌اند. در این مطالعه، اثر عواملی چون تراکم نسبی مصالح فیلتر و سرعت بارگذاری، بر پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی) و پارامترهای قفل و بست (زاویه‌ی اتساع و سختی برشی)، همچنین نسبت اندرکنش در فصل مشترک مصالح خاکی فیلتر و بتن آسفالتی هسته ارزیابی شده است. در این بررسی، نسبت اندرکنش به صورت نسبت زاویه‌ی اصطکاک بین وجهی مصالح خاکی و بتن آسفالتی، به زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح خاکی تعریف شده است. بر اساس نتایج حاصل، با افزایش تراکم نسبی از حالت سست به متراکم، میزان افزایش نسبت اندرکنش در مصالح GP در سطح تماس با بتن آسفالتی، در مقایسه با مصالح GC در سطح تماس، بیشتر بوده است. از سوی دیگر، تأثیر سرعت بارگذاری بر نسبت اندرکنش، در هر دو دسته‌ی مصالح GC و GP در سطح تماس، مشابه بوده است.

۱- مقدمه
خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی در سراسر جهان، مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۳].

در مقایسه با یک هسته‌ی خاکی، قرارگیری و تراکم بتن آسفالتی، حساسیت کمتری نسبت به شرایط آب و هوایی نامساعد دارد. بتن آسفالتی، عملاً نفوذناپذیر، انعطاف‌پذیر، مقاوم در برابر فرسایش و پیری، کارا و قابل تراکم بوده و امکان ساخت هسته‌ی بدون درز را فراهم می‌سازد. هسته‌ی بتن آسفالتی نازک، باید با جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل‌های اعمال شده توسط خاکریز و همچنین تغییر مکان‌های تفاضلی در فونداسیون سد هماهنگ باشد [۴]. اندرکنش بتن آسفالتی و مصالح خاکی فیلتر در سد با هسته‌ی بتن آسفالتی، نقش مهمی در عملکرد این نوع سدها ایفا می‌کند. مهم‌ترین پارامترهای فصل مشترک، شامل پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی) و پارامترهای قفل و بست (سختی برشی و زاویه‌ی اتساع) هستند [۵]. به طور کلی، وقتی دو نوع مصالح متفاوت در مجاورت با یکدیگر قرار می‌گیرند، رفتار مصالح در سطح تماس بین آن‌ها، به دلیل

سد خاکی، سازه یا تأسیساتی است که بر روی رودخانه یا مسیل، با استفاده از مصالح بدون ملات، به منظور ذخیره و بالا آوردن سطح آب در پشت آن ساخته می‌شود. به عبارت دیگر، سد خاکی مانند سد بتنی، هم باید بتواند سطح آب را در پشت خود بالا بیاورد و در مقابل فشار آب مقاومت کند و هم قادر به ذخیره‌ی آب باشد، یعنی در مقابل آب غیرقابل نفوذ باشد [۱]. سدهای خاکی بزرگ در جهان، با مصالح مختلفی ساخته می‌شوند و سه پیشنهاد برای ساخت آن‌ها وجود دارد: ۱- هسته‌ی خاکی؛ ۲- رویه‌ی بتن مسلح یا آسفالت یا ژئوممبرین در بالادست؛ و ۳- هسته‌ی بتن آسفالتی. بیش از ۵۰ سال است که بتن آسفالتی به عنوان یک لایه‌ی انعطاف‌پذیر و غیرقابل نفوذ در سدها مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. از زمان ساخت سد Kleine Dhuenn به عنوان اولین سد خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی متراکم در جهان، با ارتفاع ۳۵ متر در آلمان در سال ۱۹۶۲، ساخت سدهای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Ashkancivil70@gmail.com



ماسه‌ی تیزگوشه و گردگوشه) در نظر گرفته شده‌اند. کی‌منش و همکاران (۲۰۱۴) [۱۱]، در مطالعه‌ی خود، اثر مقدار قیر را بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی، تحت چرخه‌های ذوب - یخبندان مورد بررسی قرار داده و تغییرات حساسیت رطوبتی، با تغییرات ایجاد شده در نمونه‌ی ساخته شده با مقدار قیر بهینه، مقایسه گشته‌اند.

وانگ^۱ و هوگ^۲ (۲۰۱۶) [۱۲]، مطالعه‌ای با هدف توسعه‌ی یک مدل مصالح ساده شده، برای انواع مختلف شرایط بارگذاری که یک هسته‌ی آسفالتی در سد خاکی دستخوش آن‌ها می‌شود، انجام داده‌اند. در مطالعه‌ی عبدالعزیز^۳ و همکاران (۲۰۱۷) [۱۳]، اثر چرخه‌های ذوب- یخبندان بر ترک خوردگی ناشی از خستگی و شیار شدگی روسازی‌های آسفالتی، با استفاده از تحلیل عددی و آزمون‌های آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش انجام شده توسط سئو^۴ و همکاران (۲۰۱۷) [۱۴]، توسعه‌ی یک مخلوط بتن آسفالتی برای سد سنگریزه‌ای با هسته‌ی آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. وانگ و همکاران (۲۰۱۸) [۱۵]، به بررسی رفتار فصل مشترک بین هسته‌ی آسفالتی و ناحیه‌ی انتقال شنی در سدهای خاکی پرداخته‌اند. مرگابایسا^۵ (۲۰۱۹) [۱۶]، در مطالعه‌ی خود، عملکرد سد خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی و سد خاکی با هسته‌ی رسی را مورد ارزیابی قرار داده است. در این مطالعه، برای تحلیل سد، از نرم‌افزار PLAXIS ۸٫۵ و برای تحلیل نشست، از Geo Studio ۲۰۱۲ استفاده شده است. کنگ^۶ و همکاران (۲۰۲۰) [۱۷]، یک بررسی آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر چرخه‌های ذوب- یخبندان بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی انجام داده‌اند. گمدا^۷ (۲۰۲۰) [۱۸]، پژوهشی با هدف جایگزین کردن هسته‌ی رسی با هسته‌ی آسفالتی در سد سنگریزه‌ای Gidabo واقع در جنوب اتیوپی انجام داده است. این کار، با استفاده از نرم‌افزار Geo Studio ۲۰۱۲ انجام شده است.

حامد^۸ و همکاران (۲۰۲۰) [۱۹]، آزمایش‌های برش مستقیم را بر روی خاک آلی خالص در پنج سرعت بارگذاری مختلف و بر روی نمونه‌های خاک- فولاد، خاک- چوب و خاک- بتن، در سرعت بارگذاری ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام داده‌اند. نتایج حاصل، کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک آلی را با افزایش سرعت بارگذاری در مقادیر مختلف رطوبت

تغییر ماهیت مکانیکی، دچار تغییر می‌شود. حال، اگر یکی از این دو مصالح را مصالح انعطاف‌پذیری مانند خاک تشکیل دهد، به دلیل اثراتی همچون تغییرات تنش در خاک، رطوبت خاک، نوع دانه‌بندی، اندازه و شکل ظاهری دانه‌ها، این مسئله، پیچیدگی‌های خاص خود را پیدا می‌کند و رفتار در سطح مشترک این مصالح، نیاز به بررسی دقیق‌تری دارد. به عنوان مثال، وقتی از شمع‌ها در پی‌سازی استفاده می‌شود، به دلیل تفاوت در نوع مصالح شمع نسبت به خاک، بحث اندرکنش خاک - سازه مطرح می‌شود؛ یا وقتی از سپری‌ها در زیر سدهای خاکی و بنادر استفاده می‌شود، مسئله‌ی اندرکنش آب- خاک- سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مثال‌های بالا سبب شده است که تحقیقات زیادی بر روی اندرکنش انواع مصالح از جمله فولاد، بتن و چوب، با مصالح خاکی مختلف انجام گیرد و دستاوردهای آن در مسائل طراحی و اجرا مورد استفاده قرار گیرد [۶]. در رابطه با تحلیل استاتیکی و دینامیکی سد با هسته‌ی بتن آسفالتی به صورت آزمایشگاهی، همچنین مدل‌سازی عددی این نوع سد، پژوهش‌ها و مطالعاتی صورت گرفته است که به برخی از این مطالعات اشاره می‌گردد.

فیضی خانکندی و میرقاسمی (۲۰۰۸) [۷]، رفتار لرزه‌ای بتن آسفالتی مورد استفاده در سدهای خاکی را تحت بارهای زلزله مورد بررسی قرار داده‌اند. در مطالعه‌ای که توسط موسوی خوانساری (۲۰۱۰) [۸] انجام شده است، دو نوع سد سنگریزه‌ای با هسته‌ی آسفالتی و هسته‌ی رسی، برای رودخانه‌ی شور مس سرچشمه در استان کرمان، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. مطالعه‌ی دیگری که توسط تاج‌دینی و همکاران (۲۰۱۲) [۹] انجام شده، رفتار مکانیکی فصل مشترک بین ماسه‌ی طبیعی فیلتر و بتن آسفالتی، با انجام آزمایش‌های برش مستقیم کوچک مقیاس مورد بررسی قرار گرفته و تحلیل عددی نیز با کاربرد نرم‌افزار FLAC3D انجام شده است. اخترپور و خدایی (۲۰۱۳) [۱۰]، رفتار لرزه‌ای بتن آسفالتی مورد استفاده به عنوان هسته‌ی نفوذناپذیر در سدهای خاکی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی نمونه‌ها، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه محوری یکنواخت و سیکلی انجام شده‌اند. در پژوهش انجام شده توسط تاج‌دینی و همکاران (۲۰۱۴) [۵]، خواص مکانیکی مصالح ماسه‌ای در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با استفاده از دستگاه برش مستقیم کوچک مقیاس که سطح برش آن، به عنوان سطح تماس در نظر گرفته شد، در دو حالت خشک و اشباع ارزیابی شده است. در این ارزیابی، پارامترهای مختلف تأثیرگذار در مقاومت برشی بین این دو ماده، از جمله میزان سربار، تأثیر رطوبت (شرایط خشک و اشباع)، درصد تراکم، نوع و مقدار قیر و نوع خاک (مصالح

-
- 1 1 Wang
 - 2 2 Höeg
 - 3 3 Abdelaziz
 - 4 4 Seo
 - 5 5 Merga Bayisa
 - 6 6 Cong
 - 7 7 Gameda
 - 8 8 Hamed

با مرور ادبیات موضوعی و مطالعات پیشین، می‌توان دریافت که در اکثر مطالعاتی که قبلاً در رابطه با سدهای خاکی و سنگریزه‌ای با هسته‌ی بتن آسفالتی انجام شده‌اند، رفتار لرزه‌ای و دینامیکی این نوع سدها مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعاتی نیز در رابطه با تحلیل استاتیکی این نوع سدها و با کاربرد مدل‌سازی عددی انجام شده‌اند. در این مطالعات، تأثیر عواملی چون جنس و درجه‌ی نفوذ قیر، میزان رطوبت، تنش نرمال، تراکم نسبی و تیز گوشگی مصالح سنگی، بر پارامترهای مقاومت برشی ارزیابی شده است. در مجموع، می‌توان گفت که مطالعات کمی راجع به بررسی استاتیکی رفتار فصل مشترک مصالح خاکی- هسته‌ی بتن آسفالتی در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای با هسته‌ی بتن آسفالتی، به صورت آزمایشگاهی وجود دارد. در مطالعات مذکور، برای بررسی رفتار فصل مشترک، از دستگاه برش مستقیم با جعبه‌ی کوچک استفاده شده است. لذا، با وجود محدودیت‌هایی که به علت انجام آزمایش با جعبه‌ی برش کوچک مقیاس در نتایج حاصل وجود دارد، نیاز به انجام پژوهش با دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس، به منظور بررسی رفتار المان سطح تماس احساس می‌شود. از سوی دیگر، با وجود تأثیرگذاری عواملی چون تراکم نسبی مصالح خاکی و سرعت بارگذاری بر رفتار فصل مشترک، این عوامل، در مطالعات مرتبط با سدهای هسته‌ی بتن آسفالتی، چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، جهت بررسی رفتار فصل مشترک مصالح خاکی- بتن آسفالتی، از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس استفاده شده و تأثیر عواملی مانند تراکم نسبی مصالح خاکی فیلتر و سرعت بارگذاری در دستگاه برش مستقیم، در شرایط خشک مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. همچنین، استفاده از مصالح خاکی مخلوط از دو طبقه‌ی GC (شن رس‌دار همراه با ماسه) و GP (شن بد دانه‌بندی شده، همراه با ماسه) به عنوان مصالح فیلتر و هسته‌ی بتن آسفالتی و با توزیع دانه‌بندی مورد استفاده در سد میجران در استان مازندران، وجه تمایز دیگر مطالعه‌ی فعلی با مطالعات قبلی است.

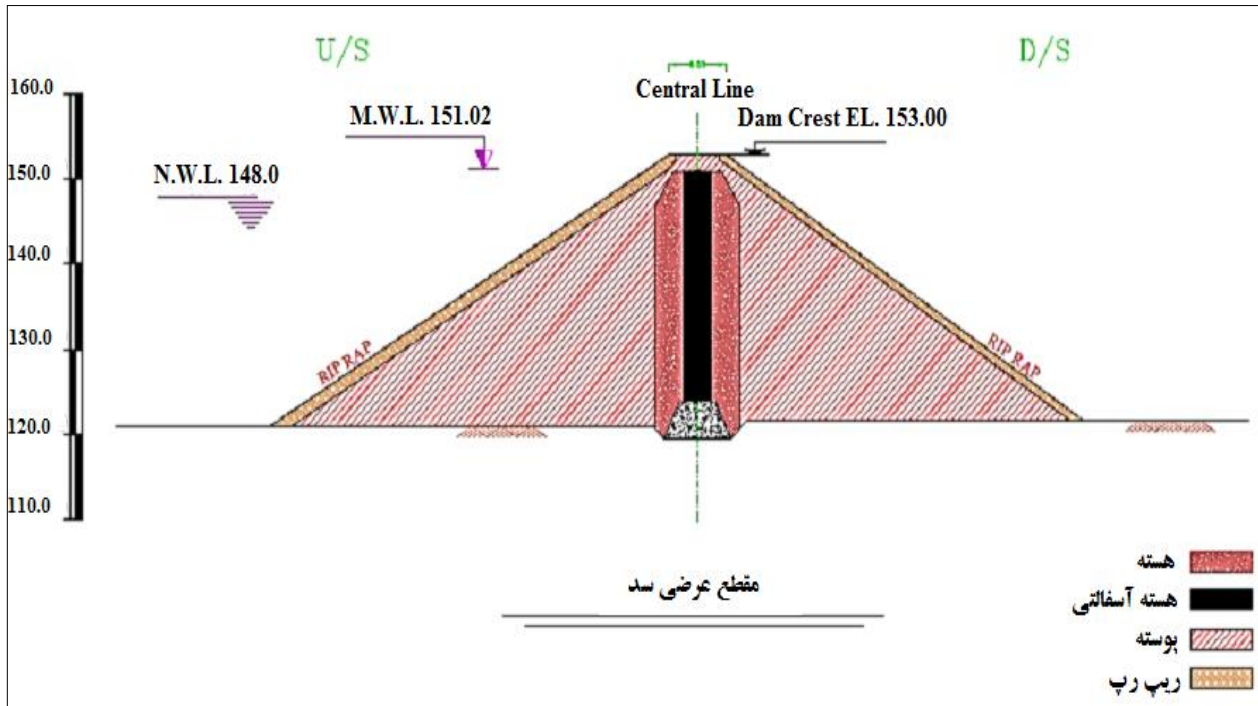
۲- دستگاه مورد استفاده، مصالح و روش آزمایش

۲-۱- معرفی مطالعه‌ی موردی

سد میجران، سدی خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی در ۲۰ کیلومتری رامسر است که بر روی رودخانه‌ی نساورد قرار دارد. ارتفاع سد از پی، ۵۹ متر بوده و عملیات اجرایی آن، در سال ۱۳۸۲ به اتمام رسیده است [۲۵]. مقطع عرضی سد میجران، در شکل ۱ نشان داده شده است.

نشان داده‌اند. در مطالعه‌ی ژانگ^۱ و همکاران (۲۰۲۰) [۲۰]، عوامل مؤثر بر ویژگی‌های مکانیکی فصل مشترک شمع- خاک رس، با چهار مقدار رطوبت و تحت تنش‌های نرمال و سرعت‌های بارگذاری مختلف، با انجام آزمایش برش مستقیم بررسی شده‌اند. بر اساس نتایج، سرعت بارگذاری، تأثیر اندکی بر مشخصه‌های مکانیکی فصل مشترک شمع- خاک داشته است. برن^۲ و همکاران (۲۰۲۰) [۲۱]، اثر سرعت‌های بارگذاری مختلف در آزمایش‌های برش مستقیم را بر تغییرات ویژگی‌های مقاومتی نمونه‌های ماسه با توزیع اندازه‌ی ذرات گوناگون، در شرایط خشک و اشباع مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این مطالعه، حاکی از افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و مقاومت برشی حداکثر، با افزایش سرعت بارگذاری، به ویژه برای سرعت‌های بالاتر از یک میلی‌متر بر دقیقه بوده‌اند. غفاری^۳ و بینای^۴ (۲۰۲۱) [۲۲]، اثر سرعت بارگذاری را بر رفتار برشی مخلوط‌های رس- ماسه، با استفاده از آزمایش سه محوری مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در این بررسی، ۸ نوع مخلوط مختلف رس- ماسه با نسبت‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته و نمونه‌ها، تحت سرعت‌های بارگذاری ۰/۱، ۱ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه و ۳ فشار همه جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال آزمایش شده‌اند. نتایج این بررسی نشان داده‌اند که بسته به مقدار فشار همه جانبه، تغییر سرعت بارگذاری، اثرات مختلفی بر مقاومت نمونه‌ها در درصد‌های مختلف رس و ماسه دارد. بک^۵ و همکاران (۲۰۲۱) [۲۳] برای مقایسه و نشان دادن اثر سرعت‌های مختلف بر مقاومت‌های برشی حداکثر و ماندگار، آزمایش‌های برش مستقیم را بر روی سه نمونه‌ی خاک رس با خاصیت‌های خمیری کم و زیاد انجام داده‌اند. بر اساس نتایج، افزایش سرعت بارگذاری، افزایش چسبندگی و کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌ها را به دنبال داشته است. در مطالعه‌ی انجام شده توسط راج بیهت^۶ (۲۰۲۲) [۲۴]، مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش حلقه برای بررسی تأثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت باقی‌مانده‌ی خاک‌های رس با پلاستیسیته‌ی کم، متوسط و بالا، در شرایط زهکشی شده انجام شده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که سرعت‌های بارگذاری پایین از ۰/۰۷۳ تا ۰/۱۶۲ میلی‌متر بر دقیقه، تأثیر چندانی بر مقاومت باقی‌مانده نداشته و در سرعت‌های بالاتر، از ۰/۲۳۳ تا ۰/۵۸۶ میلی‌متر بر دقیقه، اثر مثبت سرعت بارگذاری بر مقاومت باقی‌مانده اثبات شده است.

- 1 9 Zhang
- 2 10 Beren
- 3 11 Ghaffari
- 4 12 Binay
- 5 13 Bek
- 6 14 Raj Bhat



شکل ۱. مقطع عرضی سد میجران [۲۶]

Fig. 1. Cross section of Mijran dam [20]

الک (ASTM-D۴۲۲) [۲۸]، آزمایش دانه‌بندی به روش هیدرومتری (ASTM-D۴۲۲)، آزمایش تعیین حدود آتربرگ (ASTM-D۴۳۱۸) [۲۹]، آزمایش تعیین وزن مخصوص حداکثر ($\gamma_{d \max}$) (ASTM-D۱۵۵۷) [۳۰] و آزمایش تعیین وزن مخصوص حداقل ($\gamma_{d \min}$) (ASTM-D۴۲۵۴) [۳۱] بوده‌اند. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح خاکی، در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی آن‌ها، در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج دانه‌بندی و منحنی‌های حاصل، همچنین نتایج آزمایش حدود آتربرگ، نمونه‌های شن مورد استفاده، مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد (استاندارد ASTM-D۲۴۸۷)، به ترتیب، از طبقه‌ی GC (شن رس‌دار همراه با ماسه) و طبقه‌ی GP (شن بددانه‌بندی شده، همراه با ماسه) بوده‌اند.

۲-۳-۲- بتن آسفالتی

۲-۳-۱- طرح اختلاط بتن آسفالتی

در این پژوهش، برای طرح اختلاط بتن آسفالتی هسته، از روش اصلاح شده‌ی مارشال، مطابق استاندارد ASTM-D۵۵۸۱ [۳۲] استفاده شده است. مراحل مختلف آزمایش مارشال در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲-۲- دستگاه مورد استفاده

در این پژوهش، به منظور ارزیابی مقاومت برشی مصالح دانه‌ای (شن)، همچنین مقاومت برشی المان سطح تماس مصالح دانه‌ای - بتن آسفالتی، انجام آزمایش‌ها، با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس (۱۵۲ × ۳۰۴/۸ × ۳۰۴/۸ میلی‌متر مکعب)، با روش تحکیم نیافته - زهکشی نشده (UU) یا روش سریع، مطابق استاندارد ASTM-D۳۰۸۰ [۲۷] در دو حالت خشک و اشباع، تحت تنش‌های نرمال مختلف و شرایط کنترل کرنش صورت گرفته و اثر عوامل مختلف بررسی شده است. دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس مورد استفاده در این پژوهش، در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۳-۲- مصالح

۲-۳-۱- مصالح خاکی

مصالح خاکی مورد استفاده در این پژوهش، از شرکت آکام شن در اطراف تهران تهیه شده است. این مصالح، شامل ۲ نوع شن تیزگوشه بوده‌اند. آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح خاکی، شامل آزمایش دانه‌بندی با



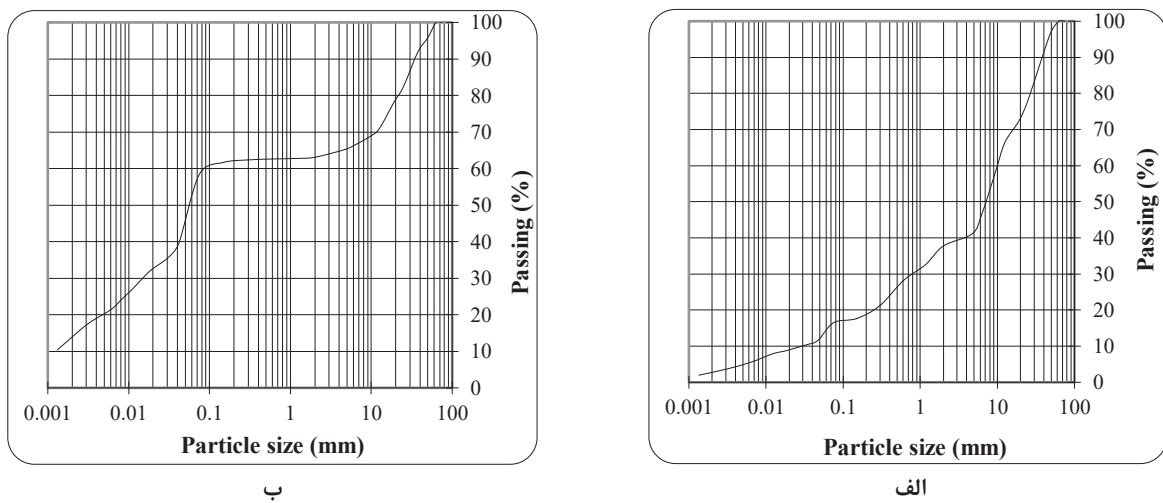
شکل ۲. دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس مورد استفاده در پژوهش

Fig. 2. Large-scale direct shear machine used in the research

جدول ۱. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح خاکی

Table 1. The results of the tests performed on soil materials

$\gamma_{d \max}$ (kN/m^3)	$\gamma_{d \min}$ (kN/m^3)	طبقه‌بندی بر اساس سیستم متحد	PI (%)	PL (%)	LL (%)	مصالح مورد استفاده
۲۱/۲۴	۱۶/۶۵	GP	NP	-----	"غیرقابل تعیین"	نمونه‌ی ۱
۱۹/۶۰	۱۴/۴۸	GC	۱۲	۱۸	۳۰	نمونه‌ی ۲



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی الف) مصالح خاکی از طبقه‌ی GP و ب) مصالح خاکی از طبقه‌ی GC

Fig. 3. Gradation curve: a) soil materials from the GP class; and b) soil materials from the GC class



شکل ۴. مراحل مختلف آزمایش مارشال: الف) مصالح سنگی؛ ب) قیر؛ ج) اختلاط مصالح و قیر؛ د) قالب‌گیری نمونه‌های مارشال؛ ه) نمونه‌های آسفالتی آماده شده؛ و) حمام آب گرم؛ ز) تراکم کننده (چکش) مارشال؛ ح) جک مارشال

Fig. 4. Different stages of Marshall's test: a) aggregates; b) bitumen; c) mixing materials and bitumen; d) Molding Marshall samples; e) prepared asphalt samples; f) hot water bath; g) Marshall's compactor (hammer); h) Marshall's jack

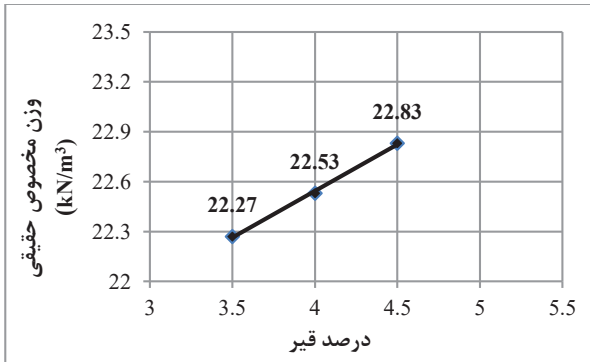
۲-۳-۳- روش آزمایش

بازسازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش برش مستقیم، با استفاده از مقادیر وزن مخصوص حداقل و حداکثر حاصل و مقادیر تراکم نسبی مورد نظر و با در نظر گرفتن ابعاد جعبه‌ی برش مستقیم صورت گرفته است.

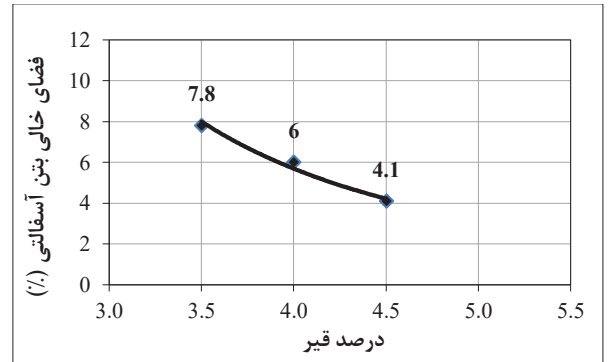
به منظور بررسی اثر پارامترهای متغیر، یعنی نوع مصالح فیلتر، تراکم نسبی مصالح فیلتر و سرعت بارگذاری، بر پارامترهای مقاومتی مصالح خاکی فیلتر و فصل مشترک بتن آسفالتی هسته- مصالح خاکی فیلتر (مصالح سطح تماس)، ۲ دسته آزمایش انجام شده است. در دسته‌ی اول آزمایش‌ها، برای بررسی تأثیر نوع مصالح و تراکم نسبی، مصالح خاکی (از طبقات GC و GP)، با تراکم‌های نسبی ۰/۵۰٪، ۰/۶۵٪ و ۰/۸۰٪، همچنین فصل مشترک بتن آسفالتی ساخته شده با درصد قیر بهینه (۰/۴٪) و مصالح خاکی با تراکم‌های نسبی ۰/۵۰٪، ۰/۶۵٪ و ۰/۸۰٪، تحت ۳ تنش نرمال ۱۰۰ kPa، ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa در دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس، با روش UU در شرایط خشک، با سرعت بارگذاری ۱ mm/min تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. در این مرحله، ۱۲ نمونه آماده شده است. دسته‌ی دوم آزمایش‌ها، برای بررسی تأثیر سرعت بارگذاری آزمایش برش مستقیم، بر روی مصالح GC و GP با تراکم نسبی ۰/۶۵٪، همچنین فصل مشترک بتن آسفالتی ساخته شده با

توزیع اندازه‌ی ذرات مصالح سنگی مورد استفاده، مطابق منحنی دانه‌بندی فولر مورد استفاده در ساخت سد میجران و در محدوده‌ی ۱۹-۰ میلی‌متر و همچنین، در محدوده‌ی دانه‌بندی پیشنهادی ICOLD بوده و مشخصات وزنی- حجمی مخلوط آسفالتی مورد نظر، بر اساس استانداردهای AASHTO-T166 [۳۳] و AASHTO-T245 [۳۴] تعیین شده‌اند. قیر مصرفی، قیر ۶۰/۷۰ بوده که از پالایشگاه تهران تهیه شده و در مقادیر ۰/۳/۵٪، ۰/۴٪ و ۰/۴/۵٪ وزن کل بتن آسفالتی استفاده شده است. نمودارهای حاصل از آزمایش مارشال، در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

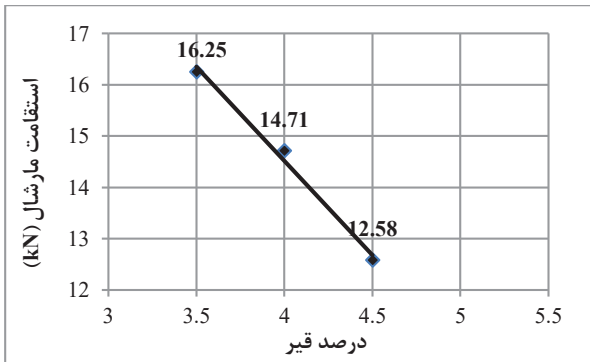
از آنجایی که درصد قیری که سبب بیشترین مقدار استقامت مارشال می‌شود، ممکن است همان درصد قیری نباشد که بیشترین وزن مخصوص را سبب می‌شود و یا به ازای آن، مقدار فضای خالی بتن آسفالتی، مناسب‌ترین نباشد، بنابراین، بر اساس روش معمول، مقدار قیری که برای ساخت بتن آسفالتی به کار می‌رود، میانگین مقادیری است که بیشترین استقامت مارشال، بیشترین وزن مخصوص و مناسب‌ترین مقدار فضای خالی را در بتن آسفالتی سبب می‌شود [۳۵]. با توجه به نتایج و نمودارهای حاصل از آزمایش مارشال (شکل ۵)، مقدار قیر بهینه جهت تهیه‌ی نمونه‌های بتن آسفالتی، معادل ۴ درصد انتخاب شده است.



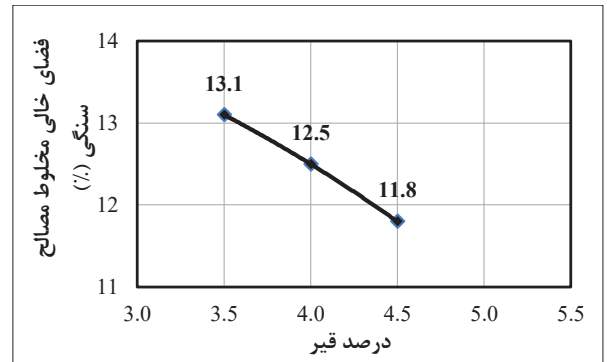
ب



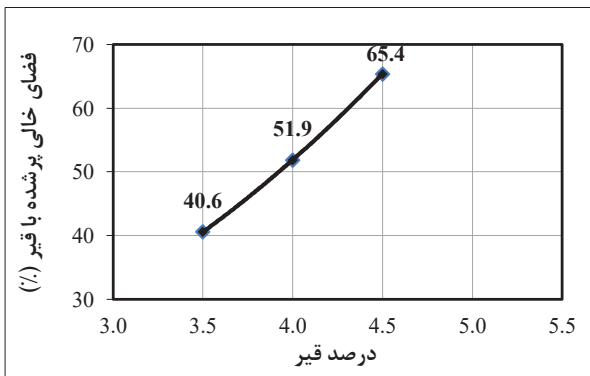
الف



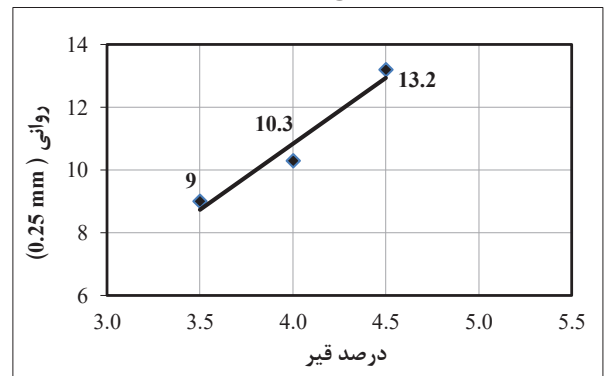
د



ج



و



ه

شکل ۵. منحنی‌های تغییرات کمیت‌های آسفالتی، حاصل از آزمایش مارشال: الف) تغییرات فضای خالی - درصد قیر؛ ب) تغییرات وزن مخصوص حقیقی - درصد قیر؛ ج) تغییرات فضای خالی مخلوط مصالح سنگی - درصد قیر؛ د) استقامت مارشال - درصد قیر؛ ه) تغییرات روانی - درصد قیر؛ و) تغییرات فضای خالی پر شده با قیر - درصد قیر

Fig. 5. Curves of changes in asphalt quantities, resulting from Marshall's test: a) void ratio - bitumen content; b) unit weight - bitumen content; c) percent of voids in the total mix - bitumen content; d) Marshall stability - bitumen content; e) flow value - bitumen content; f) percent of voids filled with bitumen - bitumen content



شکل ۶. نحوه‌ی قرارگیری مصالح خاکی و بتن آسفالتی در جعبه‌ی برش

Fig. 6. Mode of placing soil materials and asphalt concrete in the shear box

حالات سست (تراکم نسبی ۰.۵۰٪)، تراکم متوسط (تراکم نسبی ۰.۶۵٪) و متراکم (تراکم نسبی ۰.۸۰٪)، همچنین نمونه‌هایی حاوی مصالح خاکی با تراکم نسبی مختلف و بتن آسفالتی ساخته شده با مقدار قیر ۰.۴٪، آماده شده و در دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس و با روش UU، تحت تنش‌های نرمال ۱۰۰ kPa، ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa، با سرعت بارگذاری ۱ mm/min و در شرایط خشک مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. تمامی آزمایش‌ها، تا کرنش محوری ۱۵٪ ادامه یافته‌اند. نام و مشخصات نمونه‌های ساخته شده، به شرح جدول ۲ بوده و نمونه‌های بتن آسفالتی ساخته شده با ابعاد جعبه‌ی برش مستقیم بزرگ مقیاس، در شکل ۷ نشان داده شده است.

نمودارهای تغییرات تنش برشی - جابه‌جایی افقی، برای هر دو دسته‌ی نمونه‌های حاوی مصالح GC و GP، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، در شکل ۸ نشان داده شده است.

با مشاهده‌ی نمودارهای فوق، می‌توان دریافت که تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، با افزایش تراکم نسبی، در هر دو دسته‌ی مصالح GC و مصالح GC سطح تماس، منحنی تنش - کرنش روند مشخصی را طی نموده و با افزایش کرنش برشی، افزایش تنش برشی رخ داده است، ولی به طور کلی، مقادیر تنش برشی در مصالح سطح تماس، کوچک‌تر بوده و تنش برشی در کرنش‌های کوچک‌تری به حالت اوج رسیده است. در واقع، افزایش تراکم نسبی در تنش‌های نرمال بالاتر، منجر به نمایش رفتار ثابت و مشخصی در تنش‌های برشی شده است. همچنین، با بررسی نمودارهای تنش برشی - جابه‌جایی افقی برای مصالح GP و مصالح GP در سطح تماس با بتن آسفالتی تحت شرایط خشک مشاهده می‌شود که با افزایش تراکم نسبی در تغییر مکان‌های افقی کوچک، تنش برشی روند مشخصی را دنبال نموده

درصد قیر بهینه (۰.۴٪) و مصالح خاکی با تراکم نسبی ۰.۶۵٪، تحت تنش‌های نرمال مذکور، با روش UU در شرایط خشک و با ۴ سرعت بارگذاری ۰.۵ mm/min، ۱ mm/min، ۱/۵ mm/min و ۳ mm/min انجام شده‌اند. در این مرحله نیز، ۱۶ نمونه تهیه شده است. لازم به ذکر است که در شرایط خشک، خاک دانه‌ای، با رطوبت طبیعی خود، داخل جعبه‌ی برش، بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص خشک حداقل و حداکثر و مقدار تراکم نسبی مورد نظر بازسازی می‌شود. به عبارت دیگر، در این شرایط، در جعبه‌ی برش آب نریخته و نمونه اشباع نمی‌شود.

پس از ساخت نمونه‌های مربوطه، با استقرار صفحه‌ی بارگذاری بر روی نمونه و اعمال تنش نرمال مورد نظر (۱۰۰ kPa، ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa)، نیروی برشی با سرعت مربوط به هر دسته از نمونه‌ها اعمال شده است. لازم به ذکر است که در آزمایش برش مستقیم به روش استاندارد ASTM-D3080، کرنش حداکثر، به ۲۰٪ محدود می‌شود و اغلب، انتظار گسیختگی را در کرنش ۱۰٪ الی ۲۰٪ داریم. نحوه‌ی قرارگیری بتن آسفالتی و مصالح خاکی دانه‌ای در جعبه‌ی برش، مطابق شکل ۶ بوده است. سطح برش، به عنوان فصل مشترک بتن آسفالتی هسته - مصالح خاکی فیلتر در نظر گرفته شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱ بررسی تأثیر تراکم نسبی بر پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت قفل و بست

به منظور بررسی تأثیر تراکم نسبی بر رفتار مصالح خاکی و فصل مشترک مصالح خاکی - بتن آسفالتی، نمونه‌هایی شامل مصالح خاکی در

جدول ۲. مشخصات نمونه‌ها جهت بررسی تأثیر تراکم نسبی

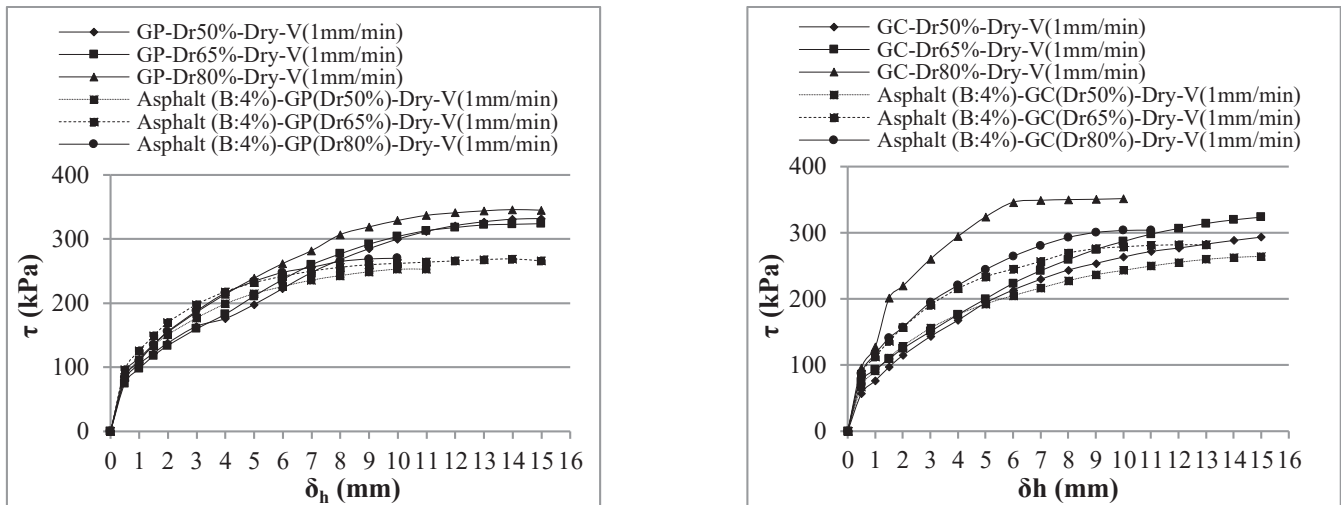
Table 2. Characteristics of samples to investigate the effect of relative density

مشخصات نمونه	نام نمونه	ردیف
نمونه‌های حاوی مصالح GC با تراکم‌های نسبی ۰.۵۰، ۰.۶۵٪ و ۰.۸۰٪، در شرایط خشک و با سرعت بارگذاری ۱ mm/min	GC-Dr (50, 65, 80) %-Dry-V(1mm/min)	۱
نمونه‌های حاوی مصالح GC با تراکم‌های نسبی ۰.۵۰، ۰.۶۵٪ و ۰.۸۰٪، و بتن آسفالتی ساخته شده با مقدار قیر ۰.۴٪، در شرایط خشک و با سرعت بارگذاری ۱ mm/min	Asphalt (B:4 %-GC(Dr:50, 65, 80 %-Dry -V(1mm/min)	۲
نمونه‌های حاوی مصالح GP با تراکم‌های نسبی ۰.۵۰، ۰.۶۵٪ و ۰.۸۰٪، در شرایط خشک و با سرعت بارگذاری ۱ mm/min	GP-Dr (50, 65, 80 %-Dry-V(1mm/min)	۳
نمونه‌های حاوی مصالح GP با تراکم‌های نسبی ۰.۵۰، ۰.۶۵٪ و ۰.۸۰٪، و بتن آسفالتی ساخته شده با مقدار قیر ۰.۴٪، در شرایط خشک و با سرعت بارگذاری ۱ mm/min	Asphalt (B:4 %-GP(Dr:50, 65, 80 %-Dry -V(1mm/min)	۴



شکل ۷. نمونه‌های بتن آسفالتی ساخته شده با ابعاد جعبه‌ی برش مستقیم بزرگ مقیاس

Fig. 7. Asphalt concrete samples made with large-scale direct shear box dimensions



شکل ۸. تغییرات تنش برشی - جابه‌جایی افقی برای مصالح خاکی و مصالح سطح تماس، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ kPa

Fig. 8. Shear stress-horizontal displacement changes for soil materials and interface materials, under dry conditions and normal stress of 300 kPa

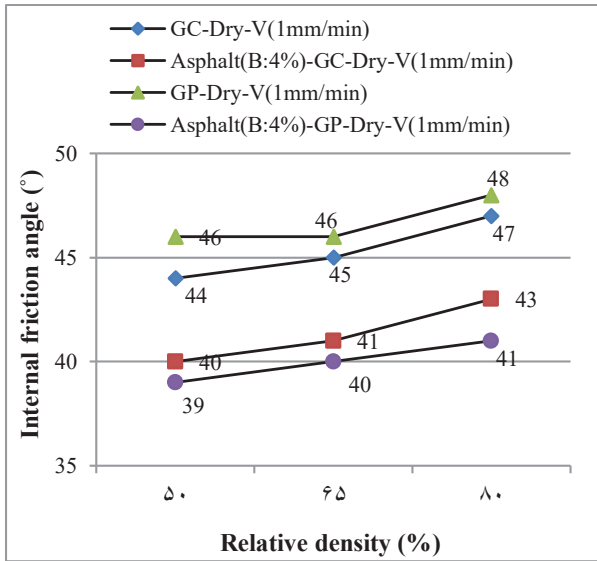
۳-۱-۱- تأثیر تراکم نسبی بر پارامترهای مقاومت برشی

پس از ترسیم نمودارهای تغییرات تنش برشی - تنش نرمال (منحنی‌های پوش گسیختگی) برای هر یک از نمونه‌ها، پارامترهای مقاومت برشی به دست آمده و تغییرات این پارامترها در مقابل تراکم نسبی، برای نمونه‌های مختلف، در شکل ۹ نشان داده شده است.

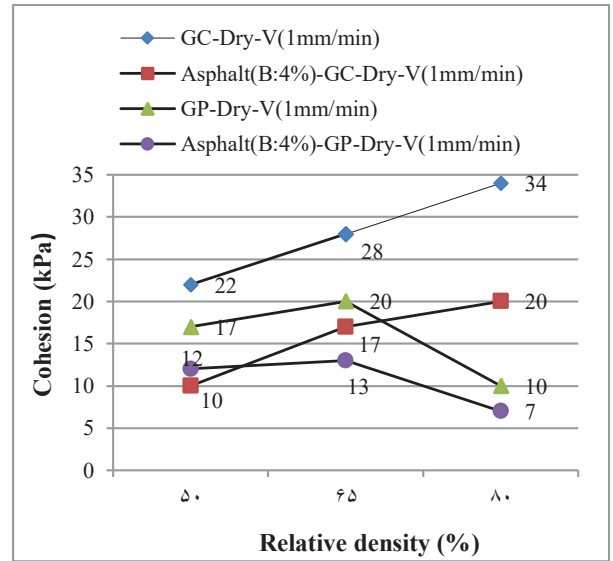
با توجه به روند تغییرات پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) حاصل از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس، می‌توان دریافت که در مصالح GC و مصالح GP در سطح تماس، با افزایش تراکم نسبی از حالت سست به حالات تراکم متوسط و متراکم، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی روندی صعودی داشته‌اند. میزان افزایش چسبندگی در مصالح GC با تراکم متوسط و متراکم، نسبت به مقدار آن در حالت سست، به ترتیب، معادل $\frac{27}{3}\%$ و $\frac{54}{54}\%$ بوده است. به طور کلی، در مقایسه با میزان افزایش چسبندگی، میزان افزایش زاویه اصطکاک داخلی در مصالح GC با تراکم متوسط و متراکم، نسبت به مقادیر آن در حالت سست، شیب کمتری داشته و در محدوده‌ی $\frac{6}{82}\%$ - $\frac{2}{3}\%$ به دست آمده است. میزان افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مصالح سطح تماس با تراکم نسبی متوسط و زیاد در مقایسه با شرایط سست، به ترتیب، در بازه‌های 100% - 70% و 75% - 25% حاصل شده است.

و در هر دو دسته‌ی مصالح GP و مصالح GP در سطح تماس، در تغییر مکان‌های افقی بزرگ، افزایش تراکم نسبی، منجر به افزایش تنش برشی شده است. به طور کلی، در شرایط خشک، مصالح GP، در مقایسه با مصالح GP در سطح تماس، تحت تنش برشی بزرگ‌تری به گسیختگی رسیده‌اند. همانطور که در شکل‌های فوق دیده می‌شود، مصالح متراکم، در تغییر مکان‌های افقی (یا کرنش‌های محوری) کوچک‌تری گسیخته شده‌اند.

در مجموع، می‌توان گفت که افزایش تراکم نسبی، موجب افزایش تنش برشی حداکثر در لحظه‌ی گسیختگی و به عبارتی، افزایش مقاومت برشی در هر دو دسته‌ی مصالح GC و GP و مصالح سطح تماس آن‌ها در حالت خشک شده است. دلیل افزایش مقاومت برشی با افزایش تراکم نسبی، افزایش مقاومت ذرات شن موجود در سطح شکست در مقابل چرخش و واژگون شدن می‌باشد. به طور کلی، مقادیر تنش برشی حداکثر، در مصالح GC سطح تماس، در مقایسه با مصالح GC، به علت کاهش اصطکاک و قفل و بست بین‌دانه‌ی مصالح پایین‌تر بوده‌اند. حال آن که مقادیر تنش برشی حداکثر در مصالح GP، بیشتر از مقادیر این پارامتر در مصالح سطح تماس بوده‌اند. افزایش تنش برشی حداکثر با افزایش تراکم نسبی، با مطالعه‌ی حمیدی و همکاران (۲۰۰۹) [۳۶] و مطهری طبری و شوش پاشا (۱۳۹۵) [۳۷] مطابقت دارد.



ب



الف

شکل ۹. روند تغییرات الف) چسبندگی و ب) زاویه اصطکاک داخلی، در مقابل تراکم نسبی برای مصالح خاکی و مصالح سطح تماس، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ kPa

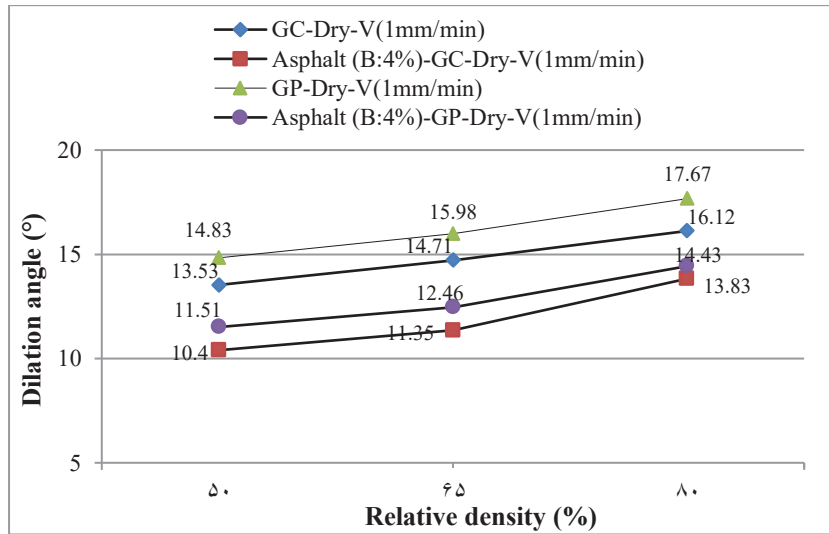
Fig. 9. Changes trend of a) cohesion and b) internal friction angle, versus relative density for soil materials and interface materials, under dry conditions and normal stress of 300 kPa

است. در مصالح GP و مصالح سطح تماس، با افزایش تراکم نسبی به ۸۰٪، زاویه اصطکاک داخلی، در مقایسه با مقدار آن در تراکم نسبی ۵۰٪، به ترتیب، افزایشی معادل ۴/۳۵٪ و ۵/۱۳٪ داشته است.

در نگاه اول، اثر تراکم نسبی بر تنش برشی حداکثر و زاویه اصطکاک خاک را می‌توان با پدیده‌ی قفل و بست بین دانه‌ها توضیح داد. اما این قضیه را می‌توان از دیدگاه انرژی نیز مشاهده نمود. مقدار انرژی که بارهای خارجی بر خاک وارد می‌کنند، در دو راه صرف می‌شود: ۱) غلبه بر مقاومت اصطکاکی بین ذرات و ۲) اتساع خاک در مقابل فشار وارده. هر چه خاک متراکم‌تر باشد، اتساع بیشتری در طی برش رخ می‌دهد. از این رو، انرژی بیشتری باید صرف شود تا برش در خاک رخ دهد و در نتیجه، باز هم نیروی بیشتر و زاویه اصطکاک بزرگ‌تری مشاهده می‌شود. به هر حال، هر دو توضیح، به یک نتیجه می‌رسند و تمایل به زاویه اصطکاک بزرگ‌تر برای خاک متراکم‌تر همیشه وجود دارد [۴۱]. همچنین، بسیاری از مراجع بر این باورند که چسبندگی حاصل از نتایج آزمایش برش مستقیم برای خاک‌های دانه‌ای، چسبندگی ظاهری است. با افزایش تنش حاصل از فشار قائم، تمایل به خرد شدن ذرات خاک افزایش یافته و افزایش مقاومت در خاک، تنها مکانیزم اصطکاکی نبوده و مقداری چسبندگی نیز در این مقاومت دخیل است.

افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با افزایش تراکم نسبی، برای خاک درشت‌دانه در دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس، در پژوهش صورت گرفته توسط کمک‌پناه و جنگلی (۱۳۹۱) [۳۸] نیز گزارش شده است. همچنین، افزایش زاویه اصطکاک داخلی حاصل از آزمایش برش مستقیم، با افزایش تراکم نسبی در مصالح درشت‌دانه، در نتایج مطالعات قبلی (سزر) و همکاران (۲۰۱۱) [۳۹]؛ متولیان و حمیدی (۱۳۹۵) [۴۰] ارائه گردیده است. دلیل افزایش زاویه اصطکاک داخلی با افزایش تراکم نسبی، آن است که افزایش تراکم، نقش به‌سزایی در قفل و بست مصالح و افزایش اصطکاک بین ذره‌های مصالح دارد. در مقایسه‌ی مصالح GC و مصالح GC در سطح تماس با بتن آسفالتی، می‌توان دریافت که در مصالح سطح تماس، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی روندی نزولی طی نموده‌اند.

از طرفی، در هر دو دسته‌ی مصالح GP و مصالح سطح تماس، با افزایش تراکم نسبی از ۵۰٪ به ۸۰٪، مقدار چسبندگی کاهش یافته است. میزان کاهش چسبندگی در تراکم نسبی ۸۰٪ برای مصالح GP و مصالح سطح تماس در مقایسه با تراکم نسبی ۵۰٪، به ترتیب، برابر ۴۱/۲٪ و ۴۱/۷٪ بوده است. از سوی دیگر، تحت این شرایط، مقدار زاویه اصطکاک داخلی در هر دو دسته‌ی مصالح GP و مصالح سطح تماس، روندی افزایشی داشته



شکل ۱۰. روند تغییرات زاویه‌ی اتساع- تراکم نسبی، برای مصالح خاکی و مصالح سطح تماس، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa

Fig. 10. Changes trend of dilation angle- relative density for soil materials and interface materials, under normal stress of 300 kPa

تماس، در تراکم نسبی متوسط و بالا، نسبت به مقادیر آن در شرایط تراکم نسبی پایین، به ترتیب، در محدوده‌های ۱۹/۱۴٪ - ۸/۷۲٪ و ۳۲/۹۸٪ - ۹/۱۳٪ بوده است. میزان این افزایش برای مصالح GP و مصالح GP سطح تماس، به ترتیب، در بازه‌های ۱۹/۱۵٪ - ۷/۷۵٪ و ۲۵/۴۰٪ - ۸/۲۵٪ به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زوایای اتساع، در مصالح سطح تماس، نسبت به مصالح خاکی، مقادیر کمتری داشته‌اند. دلیل کاهش زاویه‌ی اتساع در مصالح سطح تماس، آن است که بتن آسفالتی در مقایسه با مصالح خاکی، صلبیت بیشتر و در نتیجه، تغییر حجم کمتری حین برش دارد. در مجموع، می‌توان گفت که زاویه‌ی اتساع ابتدا توسط تراکم نسبی کنترل شده و بعداً با افزایش سطح تنش نرمال، شروع به کاهش می‌کند. روابط ارائه شده توسط بولتون^۱ (۱۹۸۶) و روت^۲ (۱۹۹۰) نیز مؤید این نتیجه هستند. افزایش زاویه‌ی اتساع با افزایش تراکم نسبی در خاک‌های درشت‌دانه، در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (مطهری طبری و شوش پاشا (۲۰۱۶) [۳۷] و مسعودیان (۱۳۹۱) [۴۳]).

در منحنی تنش برشی برحسب تغییر مکان افقی، می‌توان پارامتری را تعیین کرد که بیان‌کننده‌ی سختی مصالح در آزمایش برش مستقیم است که به آن سختی برشی می‌گویند. سختی برشی، مقاومت نمونه در برابر تغییر مکان برشی تحت نیروی برشی اعمال شده، قبل از رسیدن به مقاومت برشی

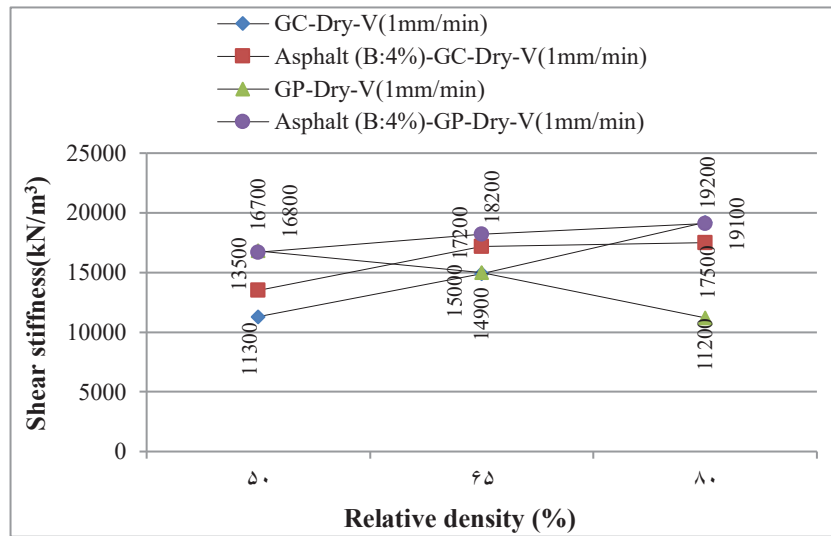
۳-۱-۲- تأثیر تراکم نسبی بر پارامترهای قفل و بستی (زاویه‌ی اتساع و سختی برشی) اتساع، معیار تغییر حجم خاک در زمانی است که خاک به واسطه‌ی برش دچار پیچش می‌شود. اگر یک توده‌ی خاک در جهات جانبی محدود شود، زاویه‌ی اتساع را می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد [۴۲]:

$$\Psi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{d(\delta v)}{d(\delta h)} \right) \quad (1)$$

در واقع، اتساع، به صورت تغییر کرنش حجمی نسبت به تغییر کرنش برشی تعریف می‌شود. خط مماس بر نمودار تغییر مکان قائم نسبت به تغییر مکان افقی نمونه، در قسمت صعودی آن و به خصوص در بخشی که خاک بیشترین نرخ افزایش تغییر مکان قائم را نسبت به تغییر مکان افقی دارد، بیانگر زاویه‌ی اتساع خاک است. تغییرات زاویه‌ی اتساع در مقابل تراکم نسبی، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با بررسی مقادیر زاویه‌ی اتساع حاصل برای مصالح خاکی (GC و GP)، همچنین نمونه‌های سطح تماس، مشاهده می‌شود که در تمام نمونه‌ها، در تنش نرمال ثابت، با افزایش تراکم نسبی، مقدار زاویه‌ی اتساع افزایش یافته است. میزان افزایش زاویه‌ی اتساع در مصالح GC و مصالح GC در سطح

1 1 Bolton

2 2 Wroth



شکل ۱۱. روند تغییرات سختی برشی- تراکم نسبی، برای مصالح خاکی و مصالح سطح تماس، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa

Fig. 1. Changes trend of shear stiffness- relative density for soil materials and interface materials, under normal stress of 300 kPa

نسبی پایین، برای مصالح GC و مصالح GC در سطح تماس، به ترتیب، در محدوده‌های ۳۱/۸۶٪-۶۹/۹۱٪ و ۲۹/۶۳٪-۲۷/۴۱٪ به دست آمده است. همچنین، در مصالح GP و مصالح GP سطح تماس مشاهده می‌شود که تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، در شرایط خشک، با افزایش تراکم نسبی از ۵۰٪ به ۸۰٪، در مصالح GP، سختی برشی کاهش یافته و در مصالح سطح تماس، سختی برشی افزایش یافته است. میزان کاهش و افزایش سختی برشی در تراکم نسبی ۸۰٪ نسبت به مقدار آن در تراکم نسبی ۵۰٪، برای مصالح GP و مصالح GP در سطح تماس، به ترتیب، در بازه‌های ۳۳/۳۳٪-۱۰/۷۱٪ و ۸/۹۸٪-۱۴/۴۰٪ محاسبه شده است.

۳-۱-۳- تأثیر تراکم نسبی بر نسبت اندرکنش

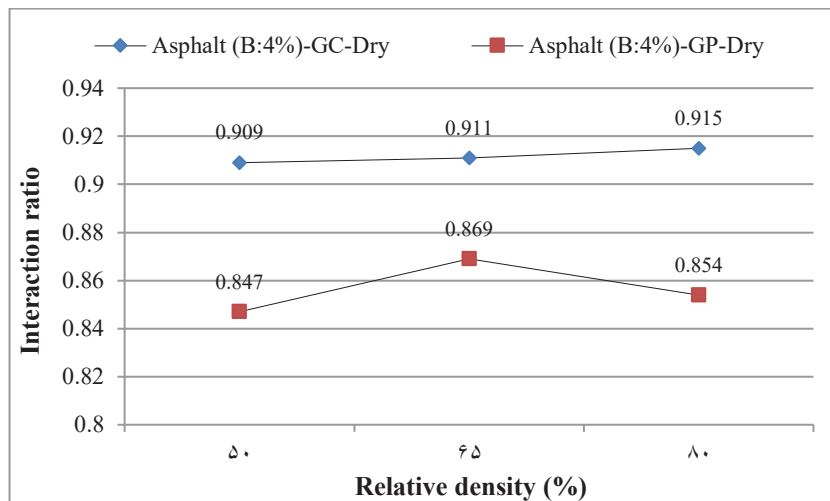
در این مطالعه، زاویه‌ی اصطکاک بین وجهی بین مصالح خاکی و بتن آسفالتی تعیین شده و به منظور مقایسه‌ی مقادیر آن با مقادیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح خاکی، پارامتر نسبت اندرکنش تعریف شده است. نسبت زاویه‌ی اصطکاک داخلی فصل مشترک به زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح شنی (δ/ϕ) ، نسبت اندرکنش نامیده می‌شود. تغییرات نسبت اندرکنش در مقابل تراکم نسبی برای مصالح GC در سطح تماس و مصالح GP در سطح تماس، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

اوج است. سختی برشی، در حقیقت، شیب خط مماس در نمودار تنش برشی برحسب تغییر مکان افقی در مبدأ مختصات یا نقطه‌ی تغییر مکان افقی صفر است [۴۴]. سختی برشی، با تقسیم تنش برشی ظاهری اعمال شده بر تغییر مکان برشی حاصل محاسبه می‌شود (شیب منحنی قبل از مقاومت برشی حداکثر). این توضیح را می‌توان با رابطه‌ی زیر نشان داد:

$$k_s = \frac{d\tau}{d(\delta h)} \quad (2)$$

تغییرات سختی برشی به ازای مقادیر مختلف تراکم نسبی، برای مصالح خاکی و مصالح سطح تماس، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

با بررسی مقادیر سختی برشی حاصل و روند تغییرات سختی برشی- تراکم نسبی برای مصالح GC و مصالح GC در سطح تماس، می‌توان دریافت که تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، در هر دو دسته‌ی مصالح GC و مصالح سطح تماس، با افزایش تراکم نسبی از حالت سست به حالات تراکم متوسط و متراکم، سختی برشی روندی صعودی داشته است. میزان افزایش سختی برشی در حالات تراکم متوسط و بالا، نسبت به مقادیر آن در تراکم



شکل ۱۲. تغییرات نسبت اندرکنش برحسب تراکم نسبی، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ kPa

Fig. 2. Changes of the interaction ratio in terms of relative density, under dry conditions and normal stress of 300 kPa

نمایش ترسیمی مقادیر نسبت اندرکنش در مقابل تراکم نسبی در شکل ۱۲ در هر دو دسته‌ی مصالح GC و GP در سطح تماس با بتن آسفالتی، حاکی از افزایش نسبت اندرکنش با افزایش تراکم نسبی است. دلیل این افزایش، فرورفتگی بیشتر مصالح شنی در بتن آسفالتی و ایجاد قفل و بست بیشتر بین این مصالح و مخلوط بتن آسفالتی، در نتیجه‌ی تراکم بیشتر مصالح شنی بوده است. به عبارت دیگر، با افزایش تراکم مصالح، میزان تماس ذرات با یکدیگر، همچنین سطوح تماس بین مصالح و مخلوط بتن آسفالتی افزایش یافته و این موضوع، افزایش نسبت اندرکنش را به دنبال داشته است. میزان افزایش نسبت اندرکنش در مصالح GC و GP در سطح تماس در تراکم‌های نسبی متوسط و بالا، نسبت به تراکم نسبی پایین، به ترتیب، در محدوده‌ی ۰/۶۶-۰/۷۲٪ و ۰/۲۶-۰/۸۳٪ بوده است.

محدوده‌ی تغییرات تنش برشی- تغییر مکان افقی حاصل از آزمایش برش مستقیم، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، برای نمونه‌های حاوی مصالح GC و GP، در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

با مشاهده‌ی تغییرات تنش برشی- تغییر مکان افقی برای نمونه‌های مورد آزمایش تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف، می‌توان دریافت که در تمام نمونه‌ها، تحت یک تنش نرمال ثابت، افزایش کرنش برشی، منجر به افزایش تنش برشی شده است. همچنین، در هر دو دسته‌ی مصالح خاکی GC و GP و مصالح سطح تماس، با افزایش سرعت بارگذاری، تنش برشی افزایش یافته است. به دلیل کاهش قفل و بست و تماس بین ذره‌ای مصالح خاکی، ناشی از وجود بتن آسفالتی و ماهیت انعطاف‌پذیر آن، مقادیر تنش برشی، در مصالح سطح تماس، کمتر از این مقادیر در مصالح خاکی به دست آمده است. افزایش تنش برشی در نتیجه‌ی افزایش سرعت بارگذاری، در

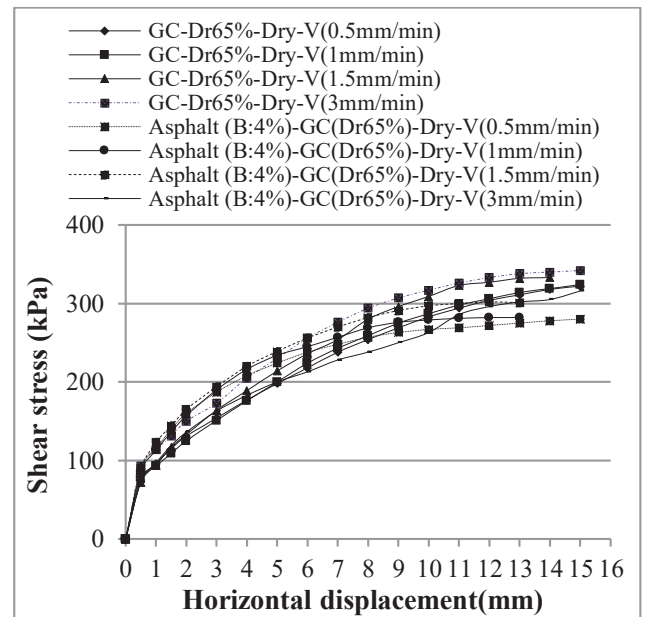
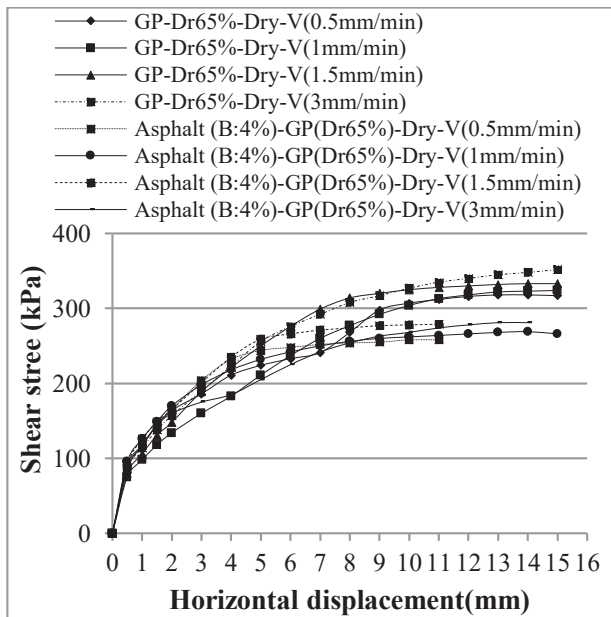
۲-۳- بررسی تأثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت قفل و بست

به منظور بررسی تأثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی) و پارامترهای قفل و بست (زاویه‌ی اتساع و سختی برشی) نمونه‌ها، مصالح خاکی در تراکم نسبی ثابت ۰/۶۵٪، همچنین نمونه‌های حاوی بتن آسفالتی و مصالح خاکی در تراکم نسبی ثابت ۰/۶۵٪، در شرایط خشک و در ۴ سرعت بارگذاری مختلف (mm/min)

جدول ۳. مشخصات نمونه‌ها جهت بررسی تأثیر سرعت بارگذاری

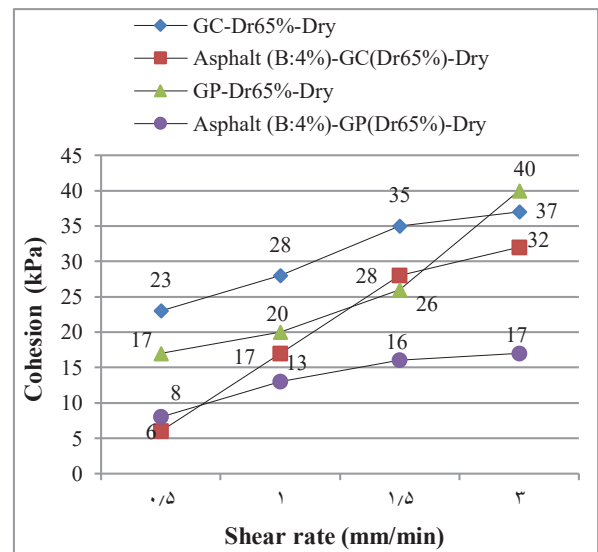
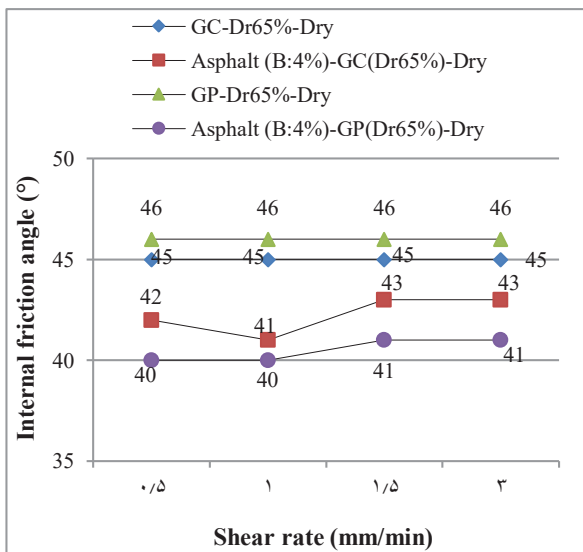
Table 3. Characteristics of samples to investigate the effect of shear rate

ردیف	نام نمونه	مشخصات نمونه
۱	GC(65%)-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)	نمونه‌های ساخته شده با خاک GC، تراکم نسبی ۰/۶۵، تحت شرایط خشک و با سرعت‌های بارگذاری ۰/۵ mm/min، ۱ mm/min و ۳ mm/min
۲	Asphalt (B:4 %)-GC(65%)-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)	نمونه‌های حاوی بتن آسفالتی ساخته شده با ۴٪ قیر و خاک GC با تراکم نسبی ۰/۶۵، تحت شرایط خشک و با سرعت‌های بارگذاری ۰/۵ mm/min، ۱ mm/min و ۳ mm/min
۳	GP(65%)-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)	نمونه‌های ساخته شده با خاک GP، تراکم نسبی ۰/۶۵، تحت شرایط خشک و با سرعت‌های بارگذاری ۰/۵ mm/min، ۱ mm/min و ۳ mm/min
۴	Asphalt (B:4 %)-GP(65%)-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)	نمونه‌های حاوی بتن آسفالتی ساخته شده با ۴٪ قیر و خاک GP با تراکم نسبی ۰/۶۵، تحت شرایط خشک و با سرعت‌های بارگذاری ۰/۵ mm/min، ۱ mm/min و ۳ mm/min



شکل ۱۳. تغییرات تنش برشی - تغییر مکان افقی برای مصالح خاکی و مصالح سطح تماس، تحت شرایط خشک، سرعت‌های بارگذاری مختلف و تنش نرمال ۳۰۰ kPa

Fig. 13. Shear stress-horizontal displacement changes for soil materials and interface materials, under dry conditions, different shear rates and normal stress of 300 kPa



شکل ۱۴. روند تغییرات الف) چسبندگی و ب) زاویه‌ی اصطکاک داخلی در مقابل سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی و مصالح سطح تماس، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ kPa

Fig. 14. Changes trend of a) cohesion and b) internal friction angle, versus shear rate for soil materials and interface materials, under dry conditions and normal stress of 300 kPa

می‌شود، پس از رسیدن مقاومت برشی نمونه به مقدار حدی خود، این انرژی کرنشی آزاد می‌شود. مقدار انرژی کرنشی آزاد شده، تابعی از سرعت بارگذاری است که مقاومت برشی اندازه‌گیری شده را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۱].

۳-۲-۱- تأثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای مقاومت برشی

با ترسیم منحنی‌های پوش گسیختگی حاصل از آزمایش برش مستقیم، پارامترهای مقاومت برشی به دست آمده و روند تغییرات این پارامترها در مقابل سرعت بارگذاری، در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

با بررسی تغییرات چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌ها، به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف، مشاهده می‌شود که در هر دو دسته‌ی مصالح GC و مصالح سطح تماس، با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار چسبندگی افزایش یافته است. همچنین، با افزایش سرعت بارگذاری، میزان افزایش چسبندگی، نسبت به مقدار آن در سرعت ۰/۵ mm/min بیشتر شده است. با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ mm/min به ۳ mm/min، میزان افزایش چسبندگی در مصالح GC و مصالح سطح تماس، به ترتیب، ۶۰/۹٪ و ۴۳۳/۳۳٪ (افزایش حدود ۴/۳۳ برابر) بوده است؛ به طوری که مقدار چسبندگی در مصالح GC، از ۲۳ kPa، به ۳۷ kPa و در مصالح سطح تماس، از ۶ kPa به ۳۲ kPa رسیده است. در رابطه با تغییرات زاویه‌ی

کرنش‌های بالاتر مشهودتر است. افزایش تنش برشی با افزایش سرعت بارگذاری، قبلاً در مطالعات مختلفی گزارش شده است (نش^۱ و دیکسون^۲، ۱۹۶۱؛ یامامورو^۳ و لید^۴، ۱۹۹۳؛ المهادیب^۵، ۲۰۰۵؛ افزاری و همکاران، ۱۳۹۷). این افزایش را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که در سرعت‌های برش پایین، نمونه فرصت و زمان کافی برای تغییر شکل داشته و اثر سرعت بر مقاومت محدودتر است. در سرعت‌های برش بالا، ذرات مصالح برای مدت زمان طولانی‌تری در تماس با یکدیگر بوده و خاک زمان کافی برای تغییر شکل ندارد و تغییر شکل آن به تأخیر می‌افتد. به بیان دیگر، در سرعت‌های برش بالا، زمان کمتری برای وقوع گسیختگی و باز آرایش ذرات مصالح وجود دارد. لذا برای تشکیل سطح برش، تمام این تماس‌های بین ذره‌ای بایستی تسلیم شوند که این موضوع، منجر به افزایش مقاومت برشی مصالح می‌شود. به طور کلی، در آزمایش‌های برش، نیروهای برشی اعمال شده، به واسطه‌ی رینگ‌های بار اندازه‌گیری می‌شوند. از آنجایی که این رینگ‌ها انعطاف‌پذیر بوده و همزمان با اعمال نیروی برشی، انرژی کرنشی ذخیره

- 1 1 Nash
- 2 2 Dixon
- 3 3 Yamamuro
- 4 4 Lade
- 5 5 Al-Mhaidib

مطالعات قبلی در رابطه با تأثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای مقاومت برشی استناد نمود.

۳-۲-۲- تأثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای قفل و بستنی (زاویه‌ی اتساع و سختی برشی)

تغییرات زاویه‌ی اتساع به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف و تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

با بررسی مقادیر زاویه‌ی اتساع حاصل و روند تغییرات آن در مقابل سرعت‌های بارگذاری مختلف، می‌توان دریافت که در مصالح GC، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، با افزایش سرعت از ۰/۵ mm/min به ۱ mm/min و سپس ۱/۵ mm/min، کاهش زاویه‌ی اتساع و با افزایش سرعت بارگذاری به ۳ mm/min، افزایش زاویه‌ی اتساع رخ داده است. میزان کاهش زاویه‌ی اتساع در سرعت‌های بارگذاری ۱ mm/min و ۱/۵ mm/min، در مقایسه با مقدار آن در سرعت بارگذاری اولیه (۰/۵ mm/min)، به ترتیب، معادل ۱/۳۲٪ و ۳/۲۴٪ بوده است. میزان افزایش رخ داده در مقدار زاویه‌ی اتساع در سرعت بارگذاری ۳ mm/min، نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ mm/min، معادل ۰/۹٪ محاسبه شده است. در مصالح GC در سطح تماس، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، در ابتدا با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ mm/min به ۱ mm/min، اندکی کاهش، معادل ۷/۵۶٪ و سپس با افزایش سرعت بارگذاری به ۱/۵ mm/min و ۳ mm/min، افزایش زاویه‌ی اتساع، معادل ۹/۹۴٪، نسبت به مقادیر زاویه‌ی اتساع در سرعت بارگذاری ۰/۵ mm/min مشاهده شده است.

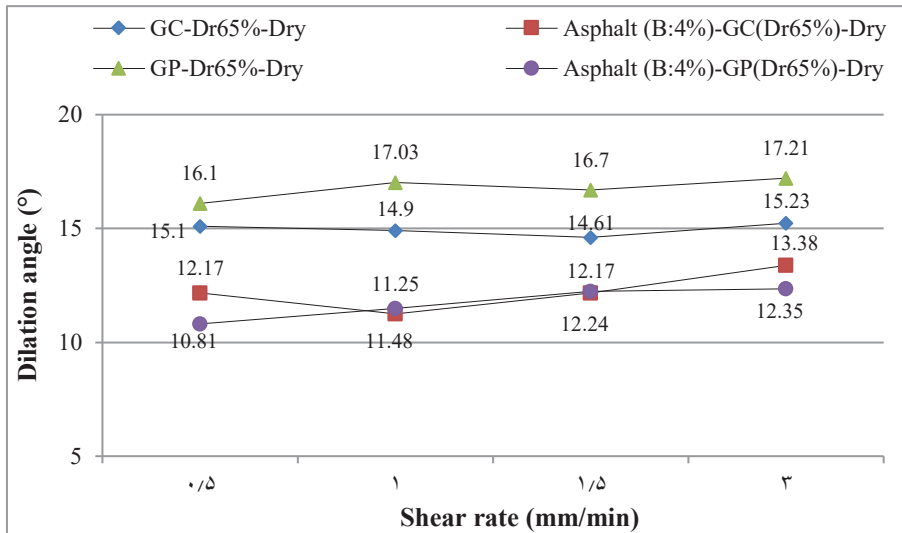
همچنین، با مشاهده‌ی روند تغییرات زاویه‌ی اتساع در مقابل سرعت بارگذاری برای نمونه‌های حاوی مصالح GP، می‌توان نتیجه گرفت که تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، افزایش سرعت بارگذاری، افزایش زاویه‌ی اتساع را در هر دو دسته‌ی مصالح GP و مصالح GP سطح تماس به دنبال داشته است. میزان افزایش زاویه‌ی اتساع در سرعت‌های بارگذاری بالاتر از ۰/۵ mm/min، در مقایسه با مقدار آن در سرعت ۰/۵ mm/min، برای مصالح GP و مصالح GP سطح تماس، به ترتیب، در محدوده‌های ۳/۷۳٪ تا ۶/۸۹٪ و ۱۴/۲۵٪ تا ۶/۲٪ حاصل شده است.

تغییرات سختی برشی به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف، برای نمونه‌های حاوی مصالح خاکی و نمونه‌های سطح تماس، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، در شکل ۱۶ ارائه شده است.

اصطکاک داخلی در نتیجه‌ی تغییر سرعت بارگذاری، می‌توان گفت که در مصالح GC، افزایش سرعت بارگذاری، تأثیری بر مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی نداشته و مقدار آن ثابت مانده است. در مصالح GC سطح تماس، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ mm/min به ۱ mm/min، کاهش به میزان ۱ درجه داشته و با افزایش بیشتر سرعت بارگذاری به ۱/۵ mm/min و ۳ mm/min، افزایش یافته و از مقدار ۴۱ درجه به ۴۳ درجه رسیده است.

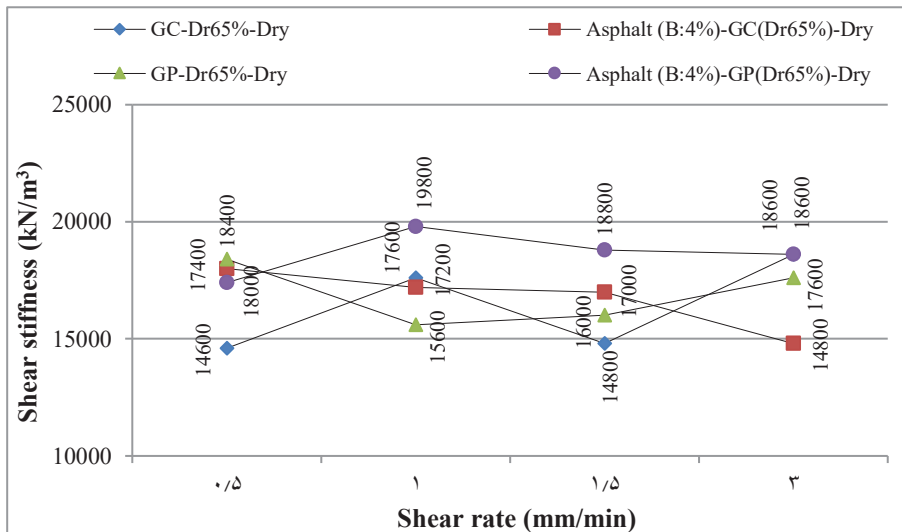
با مشاهده‌ی روند تغییرات چسبندگی در مقابل سرعت بارگذاری برای نمونه‌های حاوی مصالح GP، می‌توان دریافت که در هر دو دسته‌ی مصالح GP و مصالح GP سطح تماس، افزایش سرعت بارگذاری، منجر به افزایش مقادیر چسبندگی شده است. میزان افزایش مقادیر چسبندگی در سرعت‌های بالاتر از ۰/۵ mm/min، نسبت به مقادیر آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ mm/min، برای مصالح GP و مصالح GP سطح تماس، به ترتیب، در بازه‌ی ۱۳۵/۳٪-۱۱۷/۶۵٪ و ۱۱۲/۵٪-۶۲/۵٪ بوده است. در مورد نحوه‌ی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف، می‌توان چنین گفت که با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی در مصالح GP ثابت مانده و در مصالح GP سطح تماس نیز، با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ mm/min به ۱ mm/min، زاویه‌ی اصطکاک داخلی در مقدار ۴۰ درجه ثابت مانده است. با افزایش سرعت بارگذاری به ۱/۵ mm/min و ۳ mm/min، افزایش اندکی معادل ۲/۵٪ در مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی رخ داده، به گونه‌ای که زاویه‌ی اصطکاک داخلی، از مقدار ۴۰ درجه به ۴۱ درجه تغییر یافته است.

اکثر مطالعات قبلی انجام شده راجع به تأثیر تغییر سرعت بارگذاری بر مقادیر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی، بر روی خاک‌های ماسه‌ای انجام شده‌اند که به عنوان مثال، می‌توان به مطالعه‌ی انجام شده توسط المهادیب (۲۰۰۵) [۴۵] اشاره نمود که در نتایج آن، افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح ماسه با افزایش سرعت بارگذاری گزارش شده است. در مطالعه‌ی افرازی و همکاران (۱۳۹۷) [۴۶]، با افزایش سرعت برش، افزایش چسبندگی گزارش شده، ولی تغییر قابل توجهی در زاویه‌ی اصطکاک داخلی رخ نداده است. برن و همکاران (۲۰۲۰) [۲۱] نیز، در نتایج مطالعه‌ی خود، افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و کاهش چسبندگی ماسه را با افزایش سرعت بارگذاری گزارش نموده‌اند. در مجموع، با توجه به تنوع مصالح مورد استفاده و محدوده‌های سرعت بارگذاری مورد آزمایش، نمی‌توان به نتایج



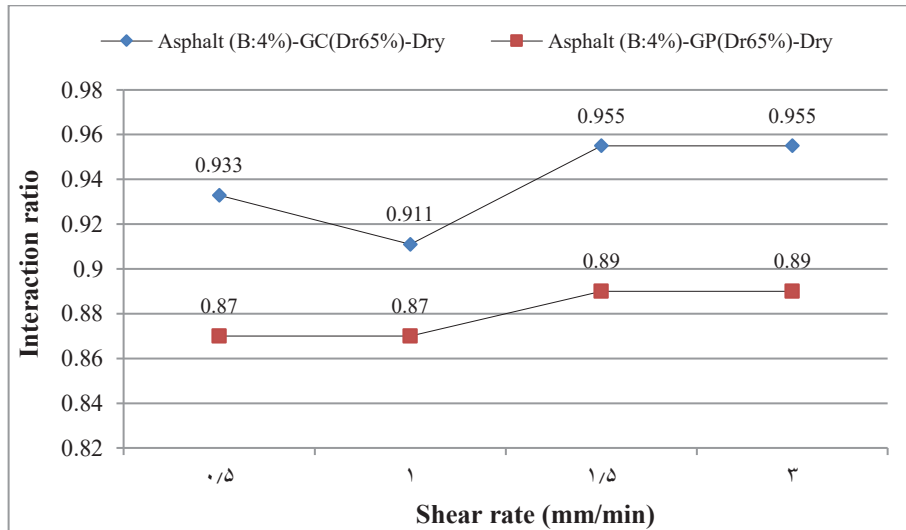
شکل ۱۵. روند تغییرات زاویه‌ی اتساع- سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی و مصالح سطح تماس، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa

Fig. 15. Changes trend of dilation angle- shear rate for soil materials and interface materials, under normal stress of 300 kPa



شکل ۱۶. روند تغییرات سختی برشی- سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی و مصالح سطح تماس، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa

Fig. 6. Changes trend of shear stiffness- shear rate for soil materials and interface materials, under normal stress of 300 kPa



شکل ۱۷. تغییرات نسبت اندرکنش برحسب سرعت بارگذاری برای مصالح GC و GP، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ kPa

Fig.17. Changes of the interaction ratio in terms of shear rate, under dry conditions and normal stress of 300 kPa

بررسی مقادیر نسبت اندرکنش مصالح GC و روند تغییرات آن در مقابل سرعت بارگذاری، نشان می‌دهد که با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ mm/min به ۱ mm/min، نسبت اندرکنش کاهش یافته و با افزایش سرعت بارگذاری به ۱/۵ mm/min و سپس ۳ mm/min، افزایش یافته و به مقداری ثابت رسیده است. میزان افزایش و کاهش نسبت اندرکنش نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ mm/min، معادل ۲/۳۶٪ بوده است. همچنین، با مقایسه‌ی مقادیر نسبت اندرکنش مصالح GP تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف، می‌توان دریافت که با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ mm/min به ۱ mm/min، نسبت اندرکنش در مقدار ۰/۸۷ ثابت مانده است. با افزایش سرعت بارگذاری از ۱ mm/min به ۱/۵ mm/min و ۳ mm/min، نسبت اندرکنش، افزایشی معادل ۲/۳٪ داشته و در مقدار ۰/۸۹ ثابت شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رفتار فصل مشترک مصالح خاکی فیلتر- هسته‌ی بتن آسفالتی، با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس در سد میجران مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج کلی حاصل از این مطالعه، به شرح زیر است:

در مصالح GC در سطح تماس با بتن آسفالتی، با افزایش تراکم نسبی،

با بررسی مقادیر سختی برشی در سرعت‌های بارگذاری مختلف، چنین نتیجه می‌شود که در مصالح GC، با افزایش سرعت از ۰/۵ mm/min به ۳ mm/min، افزایش سختی برشی رخ داده است. در مصالح GC سطح تماس نیز، تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، با افزایش سرعت بارگذاری، روندی نزولی در سختی برشی، نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری mm/min ۰/۵ مشاهده شده است. میزان افزایش و کاهش سختی برشی، برای مصالح GC و مصالح GP سطح تماس، به ترتیب، در محدوده‌های ۲۷/۷۷٪-۲۷/۴۰٪ و ۱۷/۷۷٪-۱۷/۴۰٪ به دست آمده است.

از سوی دیگر، مشاهده‌ی روند تغییرات سختی برشی در مقابل سرعت بارگذاری برای مصالح GP و مصالح سطح تماس، بیانگر آن است که تحت تنش نرمال ۳۰۰ kPa، افزایش سرعت بارگذاری، منجر به کاهش سختی برشی در مصالح GP و افزایش سختی برشی در مصالح GP سطح تماس، نسبت به مقادیر آن‌ها در سرعت بارگذاری ۰/۵ mm/min شده است. میزان کاهش و افزایش این مقادیر، به ترتیب، به صورت ۱۵/۲۲٪-۴/۳۵٪ و ۱۳/۸٪-۶/۹٪ به دست آمده است.

۳-۲-۳- آثیر سرعت بارگذاری بر نسبت اندرکنش

تغییرات نسبت اندرکنش در مقابل سرعت‌های بارگذاری مختلف، در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

چسبندگی، زاویه‌ی اتساع و سختی برشی، در سرعت‌های بالاتر از mm/۰/۵ min، در مقایسه با مقادیر آن‌ها در سرعت mm/۰/۵، به ترتیب، در محدوده‌ی ۱۱۲/۵٪ - ۶۲/۵٪، ۱۴/۲۵٪ - ۶/۲٪ و ۱۳/۸٪ - ۶/۹٪ حاصل شده است. در مصالح GP سطح تماس نیز، با افزایش سرعت بارگذاری از mm/۰/۵ به mm/۱، زاویه‌ی اصطکاک داخلی در مقدار ۴۰ درجه ثابت مانده است. با افزایش سرعت بارگذاری به mm/۱/۵ و mm/۳ افزایش اندکی معادل ۲/۵٪ در مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی رخ داده، به گونه‌ای که زاویه‌ی اصطکاک داخلی، از مقدار ۴۰ درجه به ۴۱ درجه تغییر یافته است.

با افزایش تراکم نسبی، تحت شرایط خشک، در هر دو دسته‌ی مصالح GC و مصالح GP در سطح تماس، افزایش نسبت اندرکنش رخ داده است. میزان افزایش نسبت اندرکنش با افزایش تراکم نسبی، در مصالح GP در سطح تماس، بیش از میزان افزایش آن در مصالح GC در سطح تماس بوده است. میزان افزایش نسبت اندرکنش در مصالح GP و GC در سطح تماس، در تراکم‌های نسبی متوسط و بالا، نسبت به مقدار آن در تراکم نسبی پایین، به ترتیب، در محدوده‌های ۲/۶٪ - ۰/۸۳٪ و ۰/۶۶٪ - ۰/۲۲٪ بوده است.

در مصالح GC در سطح تماس با بتن آسفالتی، با افزایش سرعت بارگذاری از mm/۰/۵ به mm/۱، کاهش نسبت اندرکنش، معادل ۲/۳۶٪ و با افزایش بیشتر سرعت به mm/۱/۵ و mm/۳، افزایش نسبت اندرکنش، معادل ۲/۳۶٪ مشاهده گردیده است. در مصالح GP در سطح تماس، با افزایش سرعت بارگذاری از mm/۰/۵ به mm/۱، نسبت اندرکنش در مقدار ۰/۸۷ ثابت مانده است. با افزایش سرعت بارگذاری از mm/۱ به mm/۱/۵ و mm/۳، نسبت اندرکنش، افزایشی معادل ۲/۳٪ داشته و در مقدار ۰/۸۹ ثابت شده است.

به طور کلی، به دلیل ساختار ناهمگن مصالح سطح تماس، در مقایسه با ساختار همگن مصالح خاکی، رفتار مصالح خاکی و مصالح سطح تماس، متفاوت است. به طور کلی، مصالح سطح تماس، به علت کاهش اصطکاک و قفل و بست بین‌دانه‌ای مصالح، مقاومت برشی کمتری نسبت به مصالح خاکی دارند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه و تأثیر جزئی درصد قیر بتن آسفالتی بر مقاومت برشی مصالح سطح تماس، می‌توان با افزایش تراکم نسبی مصالح و افزایش سرعت بارگذاری، این کاهش را تا حدودی جبران نمود.

در این مطالعه، با محاسبه‌ی نسبت اندرکنش به صورت نسبت زاویه‌ی اصطکاک مصالح سطح تماس به زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح خاکی،

افزایش تنش برشی حداکثر، افزایش چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی، افزایش زاویه‌ی اتساع و سختی برشی تحت شرایط خشک مشاهده شده است. میزان افزایش چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، زاویه‌ی اتساع و سختی برشی در تراکم نسبی متوسط و بالا، نسبت به مقادیر متناظر در تراکم نسبی پایین، به ترتیب، در محدوده‌های ۱۰۰٪ - ۷۰٪، ۷/۵٪ - ۲/۵٪، ۳۲/۹۸٪ - ۹/۱۳٪ و ۲۹/۶۳٪ - ۲۷/۴۱٪ بوده است.

در مصالح GP در سطح تماس با بتن آسفالتی، افزایش تراکم نسبی، افزایش تنش برشی حداکثر، کاهش چسبندگی و افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی تحت شرایط خشک را به دنبال داشته است. همچنین، افزایش تراکم نسبی، منجر به افزایش زاویه‌ی اتساع و سختی برشی تحت شرایط خشک در مصالح مذکور شده است. میزان کاهش چسبندگی، معادل ۴۱/۷٪ و همچنین، میزان افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی، زاویه‌ی اتساع و سختی برشی، در تراکم‌های نسبی متوسط و بالا، نسبت به مقادیر آن‌ها در تراکم نسبی پایین، به ترتیب، در بازه‌های ۵/۱۳٪ - ۲/۵۶٪، ۸/۲۵٪ - ۸/۲۵٪ و ۱۴/۴٪ - ۸/۹۸٪ بوده است.

در مصالح GC در سطح تماس با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری تحت شرایط خشک، منجر به افزایش تنش برشی حداکثر، افزایش چسبندگی و کاهش سختی برشی شده است. میزان افزایش چسبندگی در سرعت‌های بارگذاری بالاتر از mm/۰/۵، در مقایسه با مقدار آن در سرعت بارگذاری mm/۰/۵، معادل ۴۳۳/۳۳٪ (افزایش حدود ۴/۳۳ برابر) بوده است. در این شرایط، میزان کاهش سختی برشی نیز، در محدوده‌ی ۱۷/۷۷٪ - ۴/۴۴٪ به دست آمده است.

در مصالح GC سطح تماس، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، با افزایش سرعت بارگذاری از mm/۰/۵ به mm/۱، کاهش به میزان ۱ درجه داشته و با افزایش بیشتر سرعت بارگذاری به mm/۱/۵ و mm/۳ افزایش یافته و از مقدار ۴۱ درجه به ۴۳ درجه رسیده است. در رابطه با تغییرات زاویه‌ی اتساع، در این دسته از مصالح، با افزایش سرعت بارگذاری از mm/۰/۵ به mm/۱، اندکی کاهش معادل ۷/۵۶٪ و سپس با افزایش سرعت بارگذاری به mm/۱/۵ و mm/۳، افزایشی معادل ۹/۹۴٪ نسبت به مقادیر زاویه‌ی اتساع در سرعت بارگذاری mm/۰/۵ مشاهده شده است.

در مصالح GP در سطح تماس با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری تحت شرایط خشک، منجر به افزایش تنش برشی حداکثر، افزایش چسبندگی، افزایش زاویه‌ی اتساع و افزایش سختی برشی شده است. میزان افزایش

- [7] S. Feizi Khankandi, A.A. Mirghasemi, A. Ghalandarzadh, K. Hoeg, Cyclic triaxial tests on asphalt concrete as a water barrier for embankment dam, *Soils and foundations*, 48(3) (2008) 319-332.
- [8] M.M. Khansari, Investigating and comparison of two types of rockfill dams with asphaltic core and clay core of the Salt river dam in Kerman province, in: *The First National Conference of Water Resources of Iran (INCWR)*, The regional water company of Kermanshah, Kermanshah, The regional water company of Kermanshah, Kermanshah, 2010, pp. 609-618.
- [9] M. Tajdini, A. Rostami, M.M. Karimi, H. Taherkhani, Evaluation of the geo-mechanical parameters of the interface between asphalt concrete and sand with applying direct shear test and numerical modeling, *Advanced Materials Research*, 587 (2012) 116-121.
- [10] A. Akhtarpour, A. Khodaii, Experimental study of asphaltic concrete dynamic properties as an impervious core in embankment dams, *Construction and Building Materials*, 41 (2013) 319-334.
- [11] M.R. Keymanesh, S. Kie-Badroodi, P.J. Haghightapour, An examination of the effect of bitumen content on the performance of moisture susceptibility of asphalt mixture under freeze-thaw cycles, *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 3(6) (2014) 909-914.
- [12] W. Wang, K. Höeg, Simplified material model for analysis of asphalt core in embankment dams, *Construction and Building Materials*, 124 (2016) 199-207.
- [13] A. Abdelaziz, C.-H. Ho, J. Shan, A. Almonnieay, Effect of freeze-thaw cycles on fatigue cracking and rutting of asphalt pavements, in: *Pavement and Asset Management*, CRC Press, 2019, pp. 199-205.
- [14] J.-W. Seo, D.-W. Park, T.H.M. Le, Development of an asphalt concrete mixture for Asphalt Core Rockfill Dam, *Construction and Building Materials*, 140 (2017) 301-309.
- [15] W. Wang, S. Feng, Y. Zhang, Investigation of interface between asphalt core and gravel transition zone in embankment dams, *Construction and Building Materials*, تغییرات نسبت اندرکنش در مقابل مقادیر مختلف تراکم نسبی و سرعت بارگذاری ترسیم شده است. تغییرات نسبت اندرکنش در مقابل تراکم نسبی برای مصالح مختلف، در کتاب بولز [۴۷] ارائه شده است. بر اساس نمودار ترسیم شده در این کتاب، برای طراحی سازه‌هایی چون شمع‌های ورقه‌ای و دیوارهای حائل، نسبت اندرکنش بین ۰/۵-۰/۶۶ برابر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، نسبت اندرکنش، برای مقادیر مختلف تراکم نسبی در شرایط خشک، برای مصالح GC و GP، به ترتیب، در محدوده‌های ۰/۹۱۵-۰/۹۰۹ و ۰/۸۶۹-۰/۸۴۷ و برای مقادیر مختلف سرعت بارگذاری در شرایط خشک، برای مصالح GC و GP، به ترتیب، در بازه‌های ۰/۹۵۵-۰/۹۱۱ و ۰/۸۹۰-۰/۸۷۰ به دست آمده است.

منابع

- [1] M. Fatahian, M. Yousofzadeh, Y. Koohzadian, Analysis Of Foundation And Fuselage Of Dams In Static And Quasi-Static By Using Numerical Models, *Journal of Engineering & Construction Management*, 1(2) (2016) 11-15.
- [2] H. Shafiei, M.S. Eskandari, A review of the embankment dam with asphalt concrete core, *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 5(8) (2016) 111-114.
- [3] J. Gao, F. Dang, Z. Ma, Y. Xue, J. Ren, Improvement methods for reduction of the high stress of ultra-high asphalt concrete core dams, *Applied Sciences*, 9(21) (2019) 4618.
- [4] K. Höeg, Asphaltic concrete cores for embankment dams, Norwegian Geotechnical Institute Publicatie 1993.
- [5] M. Tajdini, R. Mahinroosta, H. Taherkhani, An investigation on the mechanical properties of granular materials in interface with asphaltic concrete, *Construction and Building Materials*, 62 (2014) 85-95.
- [6] M. Tajdini, A. Arjroodi, A. Mahpour, Investigation of Parameters Interface of Asphaltic Concrete and Sand, *Journal of Transportation Research*, 16(2) (2019) 189-198.

- Mazandaran Regional Water Company, Soil and Water Resources Engineering Company.
- [27] ASTM-D3080, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions, in West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [28] ASTM-D422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, in West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [29] ASTM-D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, in West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [30] ASTM-D1557, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), in West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [31] ASTM-D4254, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, in West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [32] ASTM-D5581, Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 inch-Diameter Specimen), in West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [33] AASHTO-T166, Bulk Specific Gravity (G_m) of Compacted Asphalt Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens, in American Association of State and Highway Transportation Officials.
- [34] AASHTO-T245, Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures using Marshall Apparatus, in American Association of State and Highway Transportation Officials.
- [35] M. Fakhri, A. Ghanizadeh, Determination of Optimum Bitumen Content In Marshall Mix Design Method Using a Nonlinear Programming Model, *Journal of Transportation Research*, 3(4) (2007) 305-314.
- [36] A. Hamidi, V. Yazdanjou, N. Salimi, Shear strength characteristics of sand-gravel mixtures, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 3(1) (2009) 29-38.
- [37] S.A.M.a.E. Shooshpasha, Comparison of the relative 185 (2018) 148-155.
- [16] N. Merga Bayisa, Relative performance evaluation of asphaltic concrete core embankment dam and clay core embankment dam: By Plaxis software application, *American Journal of Science, Engineering and Technology*, 4(1) (2019) 18-29.
- [17] L. Cong, M. Ren, J. Shi, F. Yang, G. Guo, Experimental investigation on performance deterioration of asphalt mixture under freeze–thaw cycles, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 9(3) (2020) 218-228.
- [18] D. Gameda, The Alternative Design of Gidabo Embankment Dam: by Introducing Asphalt Concrete Core Southern Ethiopia, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 11(3) (2020) 1158-1175.
- [19] M. Hamed, W.S. Sidik, H. Canakci, F. Celik, R.N. Georgees, Characterization of shear strength and interface friction of organic soil, *Key engineering materials*, 857 (2020) 203-211.
- [20] M. Zhang, S. Sang, Y. Wang, X. Bai, Factors influencing the mechanical characteristics of a pile–soil interface in clay soil, *Frontiers in Earth Science*, 7 (2020) 364.
- [21] M. Beren, I. Cobanoglu, S.B. Celik, O. Undul, Shear rate effect on strength characteristics of sandy soils, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 57(4) (2020) 281-287.
- [22] J. Ghaffari, R. Binay, Investigation of loading rate effect on the shear strength of clay-sand mixture in triaxial test, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(4) (2021) 21-21.
- [23] A. Bek, G. Jeftić, S. Strelec, J. Jug, INFLUENCE OF SHEAR RATE ON THE SOIL'S SHEAR STRENGTH, *Environmental Engineering-Inženjerstvo okoliša*, 8(1-2) (2021) 39-47.
- [24] D. Raj Bhat, Shear rate effect on residual strength of typical clay soils, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1) (2022) 1-16.
- [25] <https://fa.wikipedia.org>.
- [26] Mijran Reservoir Dam Monitoring (in Persian),

- [42] M. Budhu, Soil Mechanics and Foundations. John Wiley& Sons, 2000.
- [43] A. Masoudian, An experimental investigation of dilative behavior of rockfill materials using direct shear box, M.Sc. thesis on Civil Engineering -Soil Mechanics and Foundation Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch(in Persian). , 2012.
- [44] F. Musa Khani, A. Laki Rouhani, laboratory examination of the effects of particle size and change of normal stress on internal friction angle and dilation angle and shear stiffness of granular soils with direct shear test, in: the first National Conference of Geotechnical Engineering , Ardebil, 2013, pp. 1-8 (in Persian).
- [45] A.I. Al-Mhaidib, Shearing rate effect on interfacial friction between sand and steel, in: The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, OnePetro, 2005.
- [46] M. Afrazi, M. Yazdani, A. Fakhimi, M. Alitalesh, Numerical analysis of effective parameters in direct shear test by hybrid discrete-finite element method, Modares Civil Engineering journal, 18(3) (2018) 13-24.
- [47] J.E. Bowles, Foundation analysis and design, 1988.
- density effect on the behaviour of coarse-grained soils in the large-scale and small-scale direct shear tests, in: 4.th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 2016, pp. 1-12(in Persian).
- [38] A. Komak Panah, E. Gangali, Investigation on the Effect of Specimen Size and Degradation of the Soils in the Strength Parameters in Direct Shear Test, Modares Civil Engineering journal, 12(4) (2013) 99-106.
- [39] A. Sezer, S. Altun, B. Ahmet Goktepe, Relationships between shape characteristics and shear strength of sands, Soils and Foundations, 51(5) (2011) 857-871.
- [40] S.M.a.A. Hamidi, Investigating the effect of coarse-grained gravel size on the strength - dilation relationship of mixed soils, in: The fourth national conference of applied research in civil engineering , architecture and urban management, Khajeh Nasiral-din Tusi industrial university, Tehran (in Persian) 2016.
- [41] R.J. Fragaszy, W. Su, F.H. Siddiqi, Effects of oversize particles on the density of clean granular soils, Geotechnical Testing Journal, 13(2) (1990) 106-114.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Gholipour Norozi, R. Ajalloeian, M. Bayat, *Static examination of the interface behavior of the filter soil material-the asphaltic concrete core using direct shear apparatus- Case study: Mijran dam, Amirkabir J. Civil Eng., 55(2) (2023) 407-430.*

DOI: [10.22060/ceej.2022.20861.7548](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20861.7548)



