مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۲-۳۰، شماره‌ی ۴/۱، ص. ۳۵-۴۴

Original Article

بررسی خواص مکانیکی مصالح ماسه‌یی در فصل مشترک با بتن آسفالتی

رضا مهین‌روستا* **(استادیار)**
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
حسن طاهرخانی (استادیار)
میلاد تاج‌دینی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

هسته‌های بتن آسفالتی برای اولین بار در سال ۱۹۴۸ به‌عنوان المان آب‌بند در سدهای سنگ‌ریزه‌یی مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده از این‌گونه هسته‌ها در مناطق سردسیر و پر باران و لرزه‌خیز نسبت به هسته‌ی رسی توصیه شده است. به دلیل مجاورت مصالح بتن آسفالتی هسته و مصالح ماسه‌یی اطراف، رفتار در سطح مشترک این دو ماده پیچیده می‌شود و برای رفع این ابهام، نیاز به بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی سطح تماس آنها احساس می‌شود. بر این اساس، در این نوشتار آزمایش‌هایی با دستگاه برش مستقیم کوچک‌مقیاس (۲/۵ cm × ۱۰ × ۱۰)، که سطح برشی آن به‌عنوان سطح تماس در نظر گرفته شد، انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها کاهش پارامترهای مکانیکی در مصالح سطح تماس نسبت به مصالح ماسه‌یی را نشان داد. همچنین نسبت اندرکنش تعیین شد که در محدوده‌یی مشخص قرار داشت.

واژگان کلیدی: بتن آسفالتی، مصالح ماسه‌یی، مصالح سطح تماس، اندرکنش، آزمایش برش مستقیم کوچک‌مقیاس.

reza.mahinroosta@gmail.com
taherkhani.hasan@znu.ac.ir
milad_tajdini@ alum.sharif.edu

۱. مقدمه

اگر چه به دلیل فراوانی خاک رس و خاصیت نفوذپذیری کم آن، استفاده از این نوع مصالح به‌عنوان المان آب‌بند سدهای خاکی بسیار متداول است؛ لیکن این مغزه‌ها دارای معایبی از جمله: مقاومت برشی کم، خاصیت تراکم‌پذیری، زمان طولانی اجرا، نیاز به حجم مصالح بالا، نیاز به کنترل‌های دقیق نظیر تراکم و... را می‌توان نام برد که باعث شده است تا مهندسان به موارد دیگر از سدهای خاکی مانند: سد خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی تمایل پیدا کنند. از جمله عواملی که باعث تمایل به استفاده از این‌گونه هسته‌ها شده است، عبارت‌اند از: عرض بسیار کم هسته، حساسیت کم‌تر آن نسبت به شرایط آب و هوایی، خاصیت خود التیام‌دهی قیر، مقاومت برشی بالا و... .

اندرکنش مصالح بتن آسفالتی و فیلتر اطراف آن در این‌گونه سدها اهمیت ویژه‌یی دارد. از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی در سطح تماس بتن آسفالتی و فیلتر اطراف می‌توان به پارامترهای اصطکاکی (نظیر ضریب اصطکاک) و پارامترهای مقاومت قفل و بستی (نظیر سختی برشی و زاویه‌ی اتساع) اشاره کرد.[۱و۲]

اندرکنش مصالح بتن آسفالتی و فیلتر اطراف نقش بسزایی در پایداری سد ایفا می‌کنند، اما متأسفانه تحقیقات کافی در این مورد صورت نگرفته است. پژوهش‌های پیشین در مورد اندرکنش بین خاک‌های مختلف و بتن آسفالتی نشان می‌دهند که پارامترهای سطح مشترک، تابع عواملی از جمله: نوع و جنس قیر و مصالح خاکی مورد استفاده، بارهای وارده، دما، زمان و... هستند.[۱و۲] به‌عنوان یک مقایسه، پژوهشگران متعددی بر روی اندرکنش خاک‌های مختلف و مصالح بتنی و فولادی تحقیق کرده‌اند،[۳] که نتایج آنها در مسائل طراحی و اجرا به‌کار گرفته می‌شود؛ این در حالی است که در مورد اندرکنش خاک و مصالح آسفالتی فعالیت چندانی انجام نشده است.

به‌طور کلی در مورد بدنه‌ی سدهای خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی، ۳ دسته مدل‌سازی صورت گرفته است؛ پژوهش بر روی خود المان هسته‌ی آسفالتی (نظیر مقاومت‌های برشی وکششی و...)، مطالعات عددی و همچنین مطالعات بر روی مدل‌های فیزیکی (نظیر آزمایش میزلرزه و سانتریفیوژ) که رفتار اندرکنشی بین بتن آسفالتی و فیلتر اطراف آن در دو مورد اخیر بیشتر مورد بحث قرار می‌گیرد.

در تحلیل‌های عددی، پژوهشگرانی در سال ۲۰۰۲، نتایج آنالیزهای خطی معادل و غیرخطی انجام‌شده بر روی یک سد با هسته‌ی بتن آسفالتی را ارائه دادند و نتیجه گرفتند که نواحی انتقالی اطراف هسته در طول زلزله، تغییرشکل‌های زیادی را متحمل می‌شوند؛ در حالی که هسته تقریباً کشسان مانده است و نشست چندانی نمی‌کند.[۴] بنابراین لازم است اندرکنش بین بتن آسفالتی و مصالح خاکی اطراف آن به ویژه در تنش‌های کم به دقت بررسی شوند.

همچنین پژوهشگرانی در سال ۲۰۰۵، به بررسی اندرکنش هسته‌ی بتن آسفالتی

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۶/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۱/۴، پذیرش ۱۳۹۱/۱۱/۱۷.

و فیلتر ماسه‌یی اطراف آن با استفاده از میزلرزه پرداخته شد. ایشان برای این منظور، یک مدل بزرگ‌مقیاس ۱:۱۰۰ را مورد مطالعه قرار دادند و میز تحت شتاب‌های ۰٫۳-۰٫۰۵ g قرارگرفت. ایشان با استفاده از نتایج آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش مدول کشسانی خاک و کاهش ویسکوزیته آسفالت، فشار وارد بر خاک از طرف هسته‌ی بتن آسفالتی افزایش می‌یابد.[۵]

در پژوهش دیگری در همان سال اثر مقاومت قفل و بست ضعیف در عملکرد روسازی با درنظرگرفتن خواص سطح تماس بین لایه‌ی روسازی و اساس بررسی شد. بر طبق تحقیقات صورت‌گرفته، توزیع تنش در لایه‌های روسازی در مناطق سطح تماس به شدت بر شرایط چسبندگی و قفل و بست بین لایه‌ها تأثیر می‌گذارد، به طوری که افزایش در سطح تنش وارد بر لایه منجر به کاهش ظرفیت باربری روسازی می‌شود.[۶] همچنین در پژوهش مذکور با استفاده از یک آنالیز غیرخطی از ضرایب اصطکاک ۲-۰٫۳ برای پاسخ‌های مکانیکی روسازی استفاده شد و این نتیجه به‌دست آمد که با ضرایب اصطکاک بین ۱٫۵-۰٫۸ مقاومت قفل و بستی بهینه می‌شود.

در تحقیقی دیگر (۲۰۰۶) به بررسی مقاومت قفل و بستی بین دو لایه‌ی روسازی و اساس پرداخته شد و این نتیجه به‌دست آمد که خواص سطح تماس بیشتر به مواد سطح تماس بستگی دارند تا به مقدار قیری که در سطح تماس ریخته می‌شود.[۷] آنها در آزمایش‌های خود از دستگاه برشی ناتینگهام (که شباهت زیادی به دستگاه برش مستقیم دارد) استفاده کردند و درون جعبه‌های دستگاه از قلوه‌سنگ آغشته به قیر به‌عنوان ماده‌ی اساس و از دو ماده‌ی سنگریزه‌ی مخلوط با بتونه‌ی قیری و آسفالت متخلخل با درصد تخلخل ۱۵٪ به‌عنوان لایه‌ی روسازی و همچنین از ۴ سطح تماس مختلف مقدار قیر استاندارد، مقدار قیر بیش از حد استاندارد، قیر آغشته به گل و سطح بدون قیر در سطح تماس بین دو لایه استفاده کردند. ایشان در پژوهش خود به اهمیت بیشتر نوع مصالح در سطح تماس نسبت به قیر مورد استفاده در این سطح تأکید کردند و نشان دادند برای دستیابی به یک قفل و بست مناسب، مقدار تراکم بالا در سطح تماس مورد نیاز است و بدین منظور استفاده از سنگریزه‌ی مخلوط با بتونه قیری در مقایسه با آسفالت متخلخل چندین برابر بهتر است.

پژوهشگران دیگری نیز (۲۰۰۹) یک سد خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی به ارتفاع ۱۱۰ متر و با ضخامت هسته‌ی ۱ متر (مطالعه‌ی موردی سد گرم‌رود)، را با استفاده از مدل هذلولی (Duncan and Chang ۱۹۷۰) در برنامه‌ی FLACمدل‌سازی کردند.[۸] ایشان نتیجه گرفتند که نواحی انتقالی (فیلتر)، در مقایسه با هسته، رفتاری کاملاً خمیری از خود نشان می‌دهند و عملاً تغییرمکان زیادی در فصل مشترک بتن آسفالتی و فیلتر ماسه‌یی اتفاق می‌افتد که این مسئله در نزدیکی تاج سد محسوس‌تر است؛ بنابراین بهتر است این نوع از سدها، ارتفاع کوتاهی داشته باشند.

در مطالعه‌یی در سال ۲۰۰۶، تحقیقات عددی و آزمایشگاهی بر روی سد میجران به ارتفاع ۶۰ متر انجام شد، که در آن با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ، نمونه‌ی کوچک‌مقیاس سد میجران به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر تحت شتاب ۱۰۰ g مدل‌سازی شد و تحت بار ضربه‌یی قرار گرفت.[۹] نتایج این مطالعه نشان داد در حالی که هیچ‌گونه ترک‌خوردگی یا گسیختگی در سطح بتن آسفالتی مشاهده نمی‌شود، فیلتر ماسه‌یی اطراف آن دچار نشست شده است و تحلیل‌های عددی انجام‌شده مطابقت خوبی با نتایج مدل فیزیکی دارد.

پژوهشگرانی نیز (۲۰۰۷) با استفاده از دستگاه میزلرزه، یک سد خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی به ارتفاع ۳۰ متر با مقیاس ۱:۷۵ را بر روی یک پی آبرفتی مدل کردند.[۱۰] شتاب‌های مختلفی بر سد اعمال کردند و نتیجه گرفتند که عملکرد پوسته، ناحیه‌ی انتقالی و هسته‌ی آسفالتی در لرزش یک بعدی اعمال‌شده بسیار متفاوت است، به طوری‌که پوسته و ناحیه‌ی انتقالی در شتاب‌های بین ۰٫۲g تا ۰٫۶g بسیار ناپایدار است، در حالی که هسته‌ی آسفالتی حتی در شتاب‌های بالاتر و بعد از تحمل تعداد سیکل‌های بارگذاری قابل توجه (دست‌کم ۵۰ سیکل) به‌طور قابل ملاحظه‌یی پایدار باقی مانده است. همچنین در هسته‌ی آسفالتی علی‌رغم تحمل تغییرشکل قابل توجه، ترک ظاهری مشاهده نشده و هسته همچنان نقش خود را به‌عنوان سیستم آب‌بند حفظ کرده است.

بنابراین، رفتار سدهای خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی بسیار پیچیده است و این پیچیدگی بیشتر ناشی از اندرکنش هسته‌ی بتن آسفالتی با مصالح اطراف آن است. بدین ترتیب این مسئله با آزمایش‌های متفاوت باید بررسی شود، تا پارامترهای سطح تماس بین بتن آسفالتی و مصالح فیلتر اطراف آن به نحو مطلوبی به‌دست آید. لذا در این نوشتار سعی بر آن است که پارامترهای مختلف تأثیرگذار در مقاومت برشی بین این دو ماده از جمله: میزان سربار، تأثیر رطوبت اشباع، درصد تراکم، جنس قیر و نوع خاک، بررسی شوند.

۲. دستگاه، مصالح و روش انجام آزمایش

۱.۲. دستگاه

جهت بررسی اندرکنش مخلوط بتن آسفالتی و مصالح ماسه‌یی از دستگاه برش مستقیم کوچک‌مقیاس (۲٫۵ cm × ۱۰ × ۱۰) استفاده شده است. در این آزمایش ابتدا مصالح تحت تنش قائم معینی قرارگرفتند و سپس تنش برشی با سرعت ثابت به مصالح ماسه‌یی و سطح تماس وارد شد تا نمونه گسیخته شود (آزمایش کرنش کنترل). دستگاه برش شامل دو جعبه‌ی ثابت و متحرک است که جعبه‌ی بالایی دستگاه ثابت و جعبه‌ی پایینی توسط سیستم دیجیتالی، که به منظور تنظیم سرعت دلخواه برش طراحی شده است، با حرکت افقی خود باعث برش مصالح می‌شود.

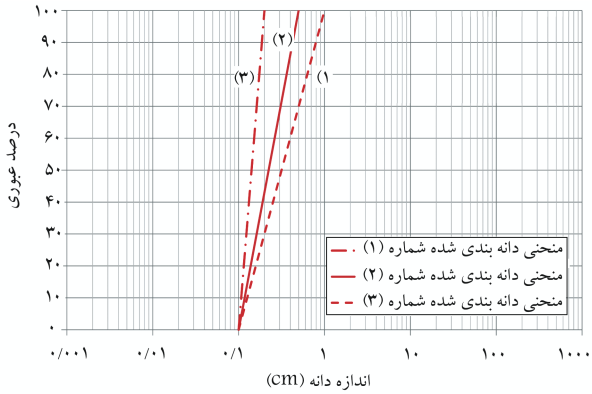
۲.۲. مصالح

اغلب آزمایش‌های به‌کارگرفته در این کار پژوهشی بر روی مصالح ماسه‌ی شسته‌ی گردگوشه انجام شده است. برای این منظور ابتدا ۳ نوع خاک با $D_{\max} = ۱$ cm، $D_{\max} = ۰٫۵$ cm و $D_{\max} = ۰٫۲$ cm و همگی با $D_{\min} = ۰٫۱$ cm مورد آزمایش قرار گرفتند. چهار مرتبه آزمایش دانه‌بندی انجام شد و از آنجا که این منحنی‌ها اختلاف قابل توجهی از خود نشان ندادند و تقریباً بر هم منطبق بودند، برای آزمایش نیاز به استفاده از منحنی دانه‌بندی میانگین نبود. برای تهیه‌ی پوش‌های مربوط مطابق شکل ۱، آزمایش دانه‌بندی انجام شد. در جدول ۱، خواص اصلی دانه‌بندی مصالح براساس طبقه‌بندی متحد آمده است.

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی مصالح ماسه‌یی، آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص کمینه به روش استاندارد ASTM D۴۲۵۴-۹۱، وزن مخصوص بیشینه به روش میزلرزه‌ی ASTM D۴۲۵۳-۹۳ نیز انجام شده است، که نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

برای تهیه‌ی مخلوط بتن آسفالتی از مصالح با دانه‌بندی منحنی فولر (میانی) مطابق شکل ۲ استفاده شده است. توزیع اندازه بندی دانه‌ها در این منحنی مطابق رابطه‌ی ۱ است:[۱۱]

$$P_i = \left(\frac{D_i}{D_{\max}}\right)^{۰/۴۱} \times ۱۰۰ \qquad (۱)$$



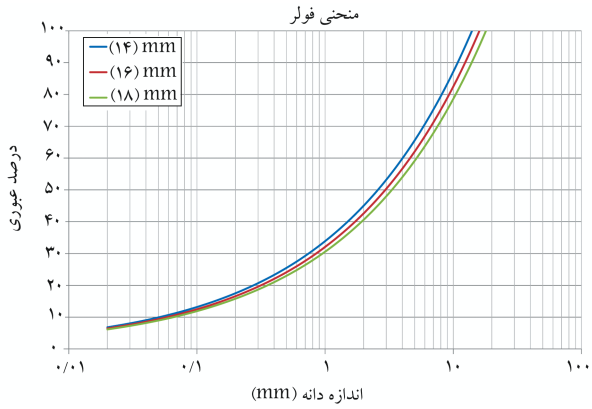
شکل ۱. منحنی دانه‌بندی‌های مورد استفاده در آزمایش.

جدول ۱. طبقه بندی خاک‌های مورد استفاده مطابق با پوش فیلتر ماسه‌یی.

توصیف خاک	C_c	Cu	کمینه‌ی قطر دانه (mm)	بیشینه‌ی قطر دانه (mm)	نوع مصالح
SP	۳٫۹	۸٫۸	۱	۱۰	ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۱
SW	۲	۶٫۶	۱	۵	ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۲
SP	۳٫۲	۴٫۶	۱	۲	ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۳

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح ماسه‌یی.

نوع مصالح	$\gamma(d)\,\max$ (gr/cm^3)	$\gamma(d)\,\min$ (gr/cm^3)
ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۱	۱٫۸۷	۱٫۶۱
ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۲	۱٫۸۵	۱٫۵۷
ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۳	۱٫۸۴	۱٫۵۱

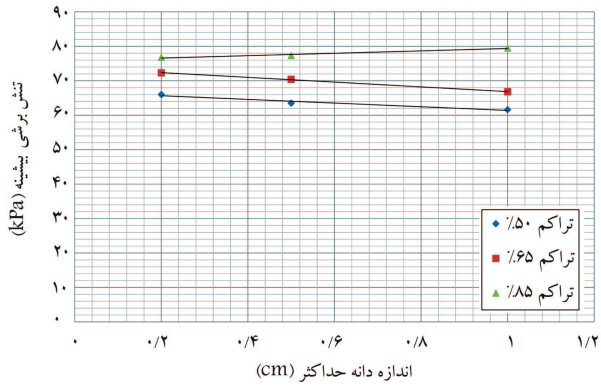


شکل ۲. منحنی دانه‌بندی فولر.[۱۱]

که در این رابطه، P_i درصد وزنی دانه‌های عبوری از الک، D_i اندازه‌ی قطر الک و $D_{\max}$ اندازه‌ی بزرگ‌ترین دانه‌ی مورد استفاده در مخلوط است. جهت متراکم‌کردن و تهیه‌ی نمونه‌ی بتن آسفالتی از دستگاه مارشال استاندارد ۶ اینچی ASTM D۶۹۲۷-۰۶ استفاده شده است. در تهیه‌ی مخلوط بتن آسفالتی از دو نوع قیر B۶۰ و B۸۰ استفاده شده است که خواص مکانیکی آنها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی مخلوط بتن آسفالتی.

مدول کشسانی مخلوط بتن آسفالتی (MPa)	ضریب پواسون	بازه‌ی دانه‌بندی مخلوط بتن آسفالتی (mm)	درصد قیر مورد استفاده	نوع قیر مورد استفاده
۱۸۰	۰٫۳۴	۰ – ۱۶	۶٫۱	B۶۰
۱۷۰	۰٫۳۶	۰ – ۱۶	۶٫۱	B۸۰



شکل ۳. تأثیر اندازه‌ی دانه در تنش برشی در تراکم‌های مختلف برای وضعیت خشک.

۳.۲. روش انجام آزمایش

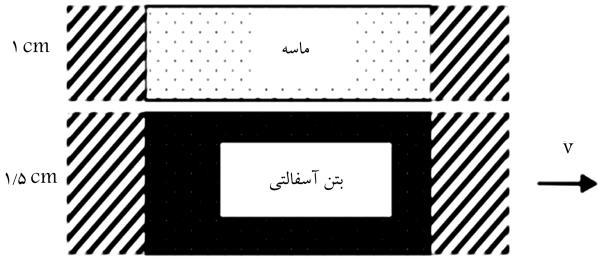
با توجه به مقادیر چگالی کمینه و بیشینه و همچنین چگالی نسبی موردنظر، وزن مصالحی که باید در داخل جعبه‌ی برش مستقیم قرارگیرند و برای رسیدن به چگالی موردنظر مهیا شوند، به‌دست آمد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش‌های برش مستقیم (مطابق با استاندارد ASTM D۳۰۸۰) ابتدا برای ۳ نوع دانه‌بندی خاص مطابق با دانه‌بندی‌های شکل ۱ و مشخصات جدول ۱ برای یافتن تأثیر اندازه‌ی دانه‌ها با اعمال تنش قائم اولیه (۰٫۸ kg/cm^2) در دو حالت خشک و اشباع انجام شد. براساس توصیه‌ی استاندارد فوق، بیشینه‌ی قطر دانه‌های قابل استفاده در دستگاه برش مستقیم باید از یک ششم ضخامت نمونه‌ی آزمایش کم‌تر باشد، که باتوجه به ضخامت ۲٫۵ سانتی‌متری نمونه در دستگاه مورد آزمایش، بیشینه‌ی قطر دانه‌ها باید ۰٫۴۲ سانتی‌متر باشد. با این حال آزمایش برش مستقیم بر روی دانه‌های بزرگ‌تر هم انجام شده است. در شکل ۳، تأثیر اندازه‌ی دانه‌ها در مقاومت برشی نمونه‌ی آزمایش مشاهده می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که افزایش بیشینه‌ی قطر دانه‌ها در محدوده‌ی سایز دانه‌های منتخب، تأثیر آن‌چنانی در مقدار مقاومت برشی نمی‌گذارد، هر چند که در چگالی‌های کم و زیاد به ترتیب کاهش و افزایش کوچکی در مقاومت برشی مشاهده می‌شود. با توجه به این مطلب، دانه‌بندی نوع دوم برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرارگرفت، چرا که هم در بازه‌ی توصیه‌ی استاندارد آزمایش است و هم اینکه تا حد امکان، نمونه‌ی خاک درشت انتخاب شده است.

با توجه به انتخاب اندازه‌ی دانه‌ی میانگین، ادامه‌ی آزمایش‌ها در ۴ حالت: ۱. آزمایش برش مستقیم کوچک‌مقیاس بر روی نمونه‌های ماسه‌یی خشک؛ ۲. آزمایش برش مستقیم کوچک‌مقیاس بر روی نمونه‌های ماسه‌یی اشباع؛ ۳. آزمایش

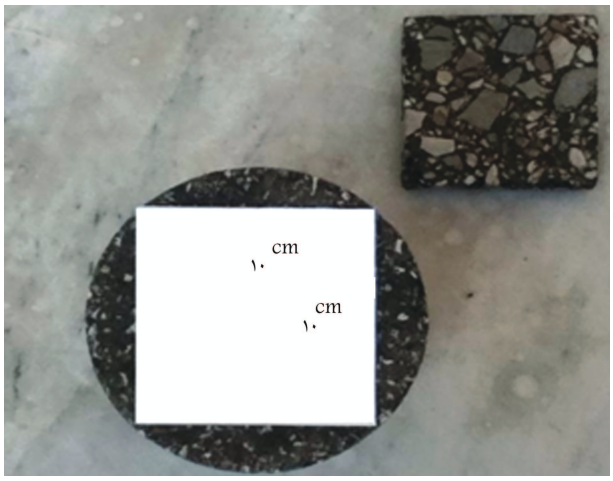
برش مستقیم کوچک‌مقیاس بر روی نمونه‌های سطح تماس ماسه با بتن آسفالتی در حالت خشک؛ ۴. آزمایش برش مستقیم کوچک‌مقیاس بر روی نمونه‌های سطح تماس ماسه با بتن آسفالتی در حالت اشباع انجام شد. بدین منظور نمونه‌هایی با چگالی نسبی ۵۰٪، ۶۵٪ و ۸۵٪ از ماسه در جعبه‌ی برش مستقیم تهیه شد، تا این آزمایش‌ها با اعمال ۳ تنش قائم اولیه‌ی ۰٫۸، ۲٫۸ و ۴٫۸ (kg/cm^2) آغازشود. پس از قرارگیری وزنه‌های مربوط با اعمال تنش عمودی، با انتخاب سرعت برشی ۰٫۱ mm/min، به نمونه اجازه‌ی برش داده شد و نیروی برشی تا مرحله‌ی پس از گسیختگی نیز ادامه یافت. این روش انجام آزمایش بر روی نمونه‌هایی که به دو روش خشک و اشباع برش خورده‌اند، یکسان است و تفاوت آن‌ها فقط این است که در آزمایش شرایط اشباع، نمونه پیش از برش اشباع کامل شد. برای آزمایش مصالح سطح تماس نیز همین آزمایش‌ها با شرایط یکسان (اعم از بار قائم وارده و شرایط تراکم) انجام شد، با این تفاوت که در فک پایینی دستگاه به ضخامت cm ۱٫۵ بتن آسفالتی و در فک بالایی دستگاه فیلتر ماسه‌یی به ضخامت cm ۱ قرار گرفت، که در شکل ۴ مدل این مصالح در دستگاه برش مستقیم نشان داده شده است.

این تذکر لازم است که نمونه‌های بتن آسفالتی پس از تهیه در دستگاه مارشال به قطر (۱۵٫۲۴ cm) ۶ in به‌صورت یک مکعب مستطیل به ابعاد ۱۰ × ۱۰ × ۱٫۵ cm از نمونه‌ی استوانه‌یی مطابق شکل ۵ خارج شده است، تا قابل استفاده در دستگاه برش مستقیم باشد.

در ادامه، عوامل تأثیرگذار در مقدار پارامترهای سطح تماس نظیر تنش قائم، چگالی نسبی، رطوبت اشباع، نوع قیر و نوع خاک که به کمک آزمایش برش مستقیم انجام شده است، بررسی شده‌اند.



شکل ۴. نمای مدل مصالح سطح تماس در دستگاه برش مستقیم.

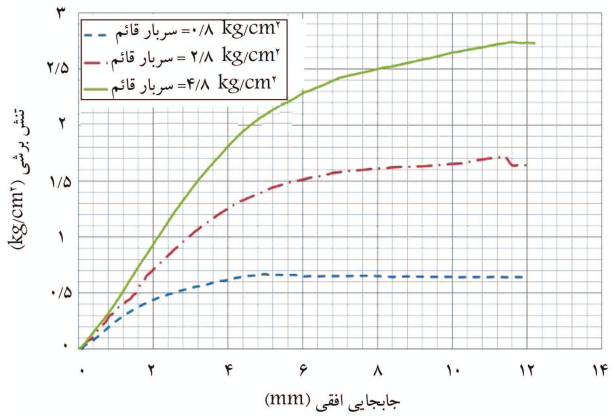


شکل ۵. خارج‌کردن مکعب مورد استفاده در دستگاه برش مستقیم از نمونه‌ی مارشال.

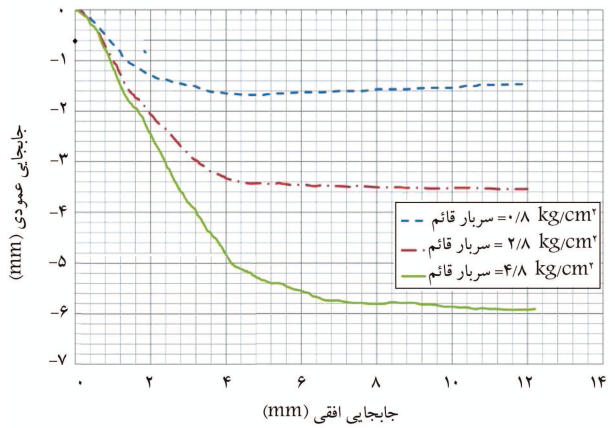
۳. بررسی آزمایش‌های مقاومت برشی

۱.۳. آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های ماسه‌یی

شکل ۶، منحنی‌های تنش برشی بر حسب تغییرمکان افقی (δ_h) و تغییرمکان عمودی (δ_v) بر حسب تغییرمکان افقی مربوط به شرایطی که مصالح ماسه‌یی با چگالی نسبی ۸۵٪ و تحت تنش قائم اولیه ۰٫۸، ۲٫۸ و ۴٫۸ (kg/cm^2) درحالت خشک توسط دستگاه برش مستقیم برش خورده است، را نشان می‌دهد. از منحنی‌های تنش برشی بر حسب تغییرمکان افقی مصالح ماسه‌یی می‌توان دریافت که در مصالح پس از رسیدن به تنش برشی بیشینه، که این مرحله با رفتار سخت‌شوندگی خاک همراه است، گسیختگی رخ می‌دهد و سپس در آنها تنش برشی کاهش می‌یابد و درنهایت ثابت می‌شود. البته این شکل از تنش برشی بر حسب تغییرمکان مربوط به مصالح متراکم است. همچنین در این منحنی‌ها دیده می‌شود نمونه‌هایی که تحت تنش قائم اولیه‌ی کوچک‌تر ($\sigma_n = 0.8\ kg/cm^2$) قرارگرفته‌اند، پس از رسیدن به بیشینه‌ی تنش برشی در تغییرمکان افقی کوچک‌تری به مقدار تقریباً ثابتی از تنش برشی می‌رسند. در منحنی تغییرمکان قائم برحسب تغییرمکان افقی نیز مشاهده می‌شود که مصالح پس از نشست اولیه، رفتاری اتساعی از خود بروز می‌دهند. این امر در نمونه‌های اشباع هم مشاهده شده است، که در قسمت‌های بعدی نیز به برخی از نتایج آن‌ها اشاره شده است.

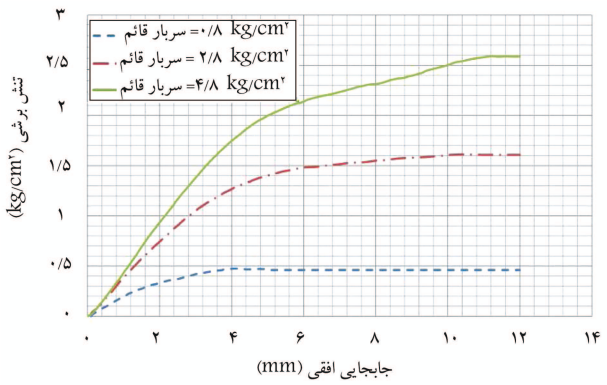


الف) منحنی تنش برشی - تغییر مکان افقی ؛

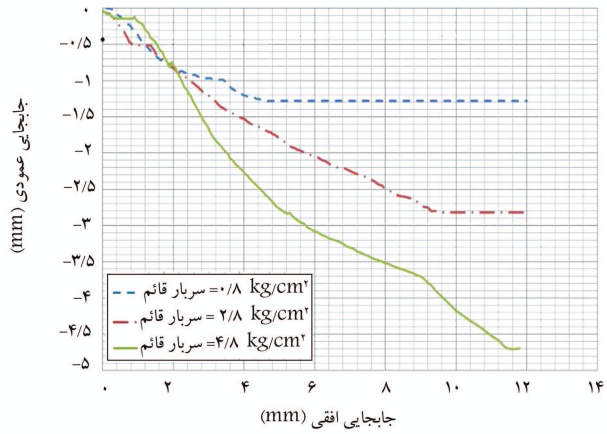


ب) تغییر مکان قائم - تغییر مکان افقی .

شکل ۶. رفتار مصالح ماسه‌یی در شرایط خشک تحت تنش‌های قائم ۰٫۸، ۲٫۸ و ۴٫۸ (kg/cm^2).



الف) منحنی تنش برشی - تغییر مکان افقی ؛



ب) تغییر مکان قائم - تغییر مکان افقی .

شکل ۷. رفتار مصالح سطح تماس در شرایط خشک تحت تنش‌های قائم ۰/۸، ۲/۸ و ۴/۸ (kg/cm^2).

۲.۳. آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های سطح تماس

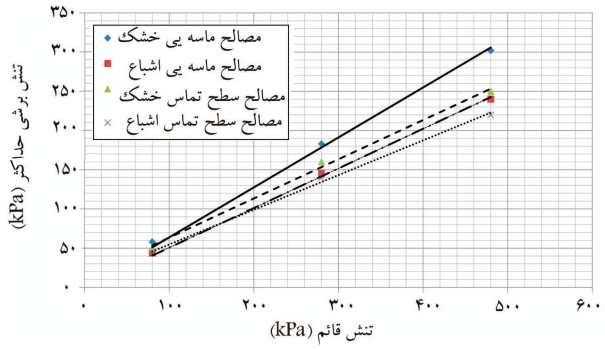
آزمایش‌های سطح تماس نیز با میزان تراکم مشابهی که در آزمایش‌های برش نمونه‌ی ماسه به‌کار رفته بود، برای سه تنش قائم اولیه ۰/۸، ۲/۸ و ۴/۸ (kg/cm^2) تکرار شد. همان‌طورکه در شکل ۷ مشاهده می‌شود، از لحاظ کیفی این منحنی‌ها تقریباً به مصالح ماسه‌یی شباهت دارند و تفاوت آن‌ها کاهش مقاومت بیشینه و رفتار اتساعی نامحسوس‌تر آن، در شرایط متناظر مصالح سطح تماس نسبت به مصالح ماسه‌یی است.

۳.۳. تحلیل نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی

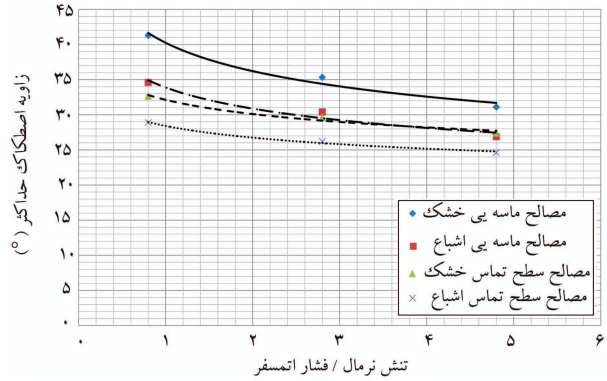
۱.۳.۳. پوش گسیختگی، زاویه‌ی اصطکاک بیشینه و داخلی در شرایط خشک و اشباع برای مصالح ماسه‌یی و مصالح سطح تماس

در شکل‌های ۸ و ۹، به ترتیب منحنی تغییرات تنش برشی بیشینه بر حسب تنش قائم و زاویه‌ی اصطکاک بیشینه بر حسب نسبت تنش قائم بر فشار اتمسفر (Pa) برای مصالح ماسه‌ی شسته و مصالح سطح تماس در دو حالت خشک و اشباع آمده است. با توجه به شکل ۸، پوش گسیختگی در هرحالت تقریباً خطی است، بنابراین معیار خطی موهر ـ کولمب ($\tau_p = \sigma_n \tan(\varphi) + c$) برای تعریف رفتار این مصالح مناسب است. مصالح تقریباً ریزدانه‌اند و شکستگی و اتساع قابل‌توجهی با بالارفتن سطح تنش در آنها صورت نمی‌پذیرد.

مشاهده می‌شود که در حالت اشباع پوش گسیختگی در سطح پایین‌تری از



شکل ۸. منحنی تغییرات بیشینه‌ی تنش برشی بر حسب تنش قائم (پوش گسیختگی) برای مصالح ماسه‌ی شسته و سطح تماس با تراکم $D_r = ۶۵٪$ در شرایط خشک و اشباع.



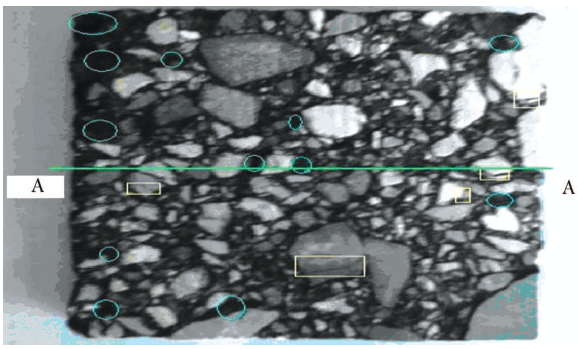
شکل ۹. منحنی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بیشینه بر حسب نسبت تنش قائم اولیه بر فشار اتمسفر برای مصالح ماسه‌ی شسته و سطح تماس با تراکم $D_r = ۶۵٪$ در شرایط خشک و اشباع.

حالت خشک قرار می‌گیرد. نکته‌ی قابل ذکر در مورد شکل ۸ این است که نمونه‌های ماسه‌یی و سطح تماس درحالت اشباع نسبت به وضعیت خشک تحت تنش برشی پایین‌تری به گسیختگی می‌رسند و با بالارفتن تنش قائم اولیه، اختلاف میان پوش گسیختگی مصالح در حالت‌های خشک و اشباع بیشتر شده است. همچنین برای حالت سطح تماس به دلیل وجود حفره‌ها در بتن آسفالتی که در اثر فشار دستگاه برش مستقیم به وجود می‌آید، بر طبق رابطه‌ی خطی موهر ـ کولمب پارامتر چسبندگی (c) نیز نمایان می‌شود، که همان عرض از مبدأ پوش گسیختگی است؛ در حالی که در مصالح ماسه‌یی، به‌دلیل نداشتن خاک عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰، این پارامتر در مقاومت برشی نقشی ندارد؛ که در نتیجه باعث کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی در مصالح سطح تماس می‌شود، که این زاویه در سطح تماس با δ معرفی می‌شود. در شکل ۱۰، نمایی از بتن آسفالتی پس از برش، که در آن حفره‌ها و ترک‌هایی ایجاد شده است، نشان داده شده است.

زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی (φ_p) مصالح ماسه‌یی از رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید:

$$\varphi_p = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_p}{\sigma_n}\right) \qquad (۲)$$

که در این رابطه، (τ_p) بیشینه‌ی مقدار تنش برشی است. در شکل ۹ دیده می‌شود که زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی مصالح ماسه‌ی گردگوشه (شسته) و سطح تماس برای هر دو حالت خشک و اشباع، رابطه‌ی غیرخطی با تنش قائم دارد و با افزایش تنش عمودی کاهش زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی مصالح ماسه شسته و سطح تماس



شکل ۱۰. حفره‌ها و ترک‌های ایجادشده در بتن آسفالتی در اثر فشار دستگاه برش مستقیم.

وجود دارد. با توجه به شکل ۹، زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی مصالح اشباع کم‌تر از مصالح خشک به‌دست آمده است. براساس شکل ۹، رابطه‌ی ۳ ارتباط بین زاویه‌ی اصطکاک بیشینه و تنش قائم را بیان می‌کند:[۱۲]

$$\varphi_p = \varphi_0 \left[\frac{\sigma_n}{P_a}\right]^{-D} \qquad (۳)$$

در این رابطه، (φ_0) زاویه‌ی اصطکاک مصالح به ازاء فشار قائم مساوی با ۱ اتمسفر بر روی نمونه و D مقداری ثابت براساس نوع مصالح انتخاب می‌شود که این دو پارامتر را می‌توان از روابط غیرخطی به‌دست‌آمده از شکل ۹ به‌دست آورد. پژوهشگران علاوه بر رابطه‌ی ۳، رابطه‌ی ۴ را نیز برای ارتباط زاویه‌ی اصطکاک بیشینه با تنش قائم بر روی نمونه‌های دانه‌یی ارائه دادند:[۱۲]

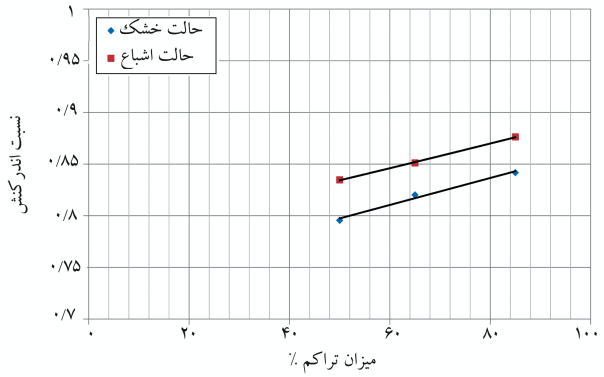
$$\varphi_P = \varphi_0 - \Delta\varphi Log\left[\frac{\sigma_n}{P_a}\right] \qquad (۴)$$

که در این رابطه، $\Delta\varphi$ مقدار کاهش زاویه‌ی اصطکاک مصالح به ازاء ۱۰ برابر افزایش تنش قائم بر روی آن است. در جدول ۳، مقادیر D و $\Delta\varphi$ برای مصالح ماسه‌ی شسته و سطح تماس مورد استفاده در دو حالت خشک و اشباع ارائه شده است. همچنین جهت مقایسه‌ی مقدار φ_0 به‌دست‌آمده از دو رابطه‌ی ۳ و ۴، می‌توان به جدول ۴ مراجعه کرد که البته مقدار φ_0 از دو رابطه‌ی مذکور اختلاف چندانی وجود ندارد. در شکل ۸، چنانچه پوش گسیختگی مصالح ماسه‌ی شسته و سطح تماس در نظر گرفته شود، با توجه به رابطه‌ی خطی موهر ـ کولمب، شیب آن خط، مقدار تانژانت زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح (φ) را بیان می‌کند، که در جدول ۴ این مقادیر برای مصالح ماسه‌ی شسته و سطح تماس در دو حالت خشک و اشباع آمده است.

مقادیر به‌دست‌آمده از جدول ۴ این امر بدیهی را نشان می‌دهد که زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح ماسه‌یی و سطح تماس درحالت خشک بیشتر از اشباع است. این مسئله به این دلیل است که در نمونه‌های اشباع به‌دلیل اثر روان‌کنندگی آب در نقاط تماس بین‌دانه‌یی، اصطکاک بین ذرات ماسه در زمان برش و تماس آنها کاهش می‌یابد و دانه‌ها آسان‌تر بر روی هم حرکت می‌کنند. همچنین اختلاف بین زاویه‌ی اصطکاک داخلی در مصالح ماسه‌یی بین دو وضعیت خشک و اشباع از همین مقدار در مصالح سطح تماس بیشتر است و این به آن دلیل است که در اثر برش، ترک‌ها و شکستگی‌های بیشتری در مصالح ماسه‌یی نسبت به مصالح سطح تماس به‌وجود می‌آید و در وضعیت اشباع مقادیر بیشتری آب بین دانه‌ها قرار گرفته است و اثر روان‌کنندگی آب در بین دانه‌ها، تأثیر خود را بیشتر نشان می‌دهد و زاویه‌ی اصطکاک داخلی بیشتر کاهش می‌یابد.

نسبت ضرایب اصطکاک داخلی مصالح سطح تماس به مصالح ماسه‌یی (δ/φ) نسبت اندرکنش تعریف می‌شود؛ در شکل ۱۱، مقایسه‌ی تغییرات نسبت اندرکنش در مقابل درصد تراکم ($D_r - \delta/\varphi$) نشان داده شده است. با افزایش تراکم برای دو حالت خشک و اشباع افزایش نسبت اندرکنش مشاهده می‌شود که این رابطه تقریباً خطی است. این روند در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش تراکم مصالح ماسه‌یی، قفل و بست آن‌ها با مخلوط بتن آسفالتی نیز بیشتر می‌شود. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که برای حالت اشباع این نسبت از حالت خشک بیشتر است.

در جدول ۵، مقادیر نسبت اندرکنش (δ/φ) بر حسب تراکم نسبی (D_r) و همچنین پارامتر مقاومت چسبندگی برای مصالح سطح تماس برای مصالح ماسه‌ی



شکل ۱۱. مقادیر نسبت اندرکنش δ/φ بر حسب تراکم نسبی در دو حالت خشک و اشباع.

جدول ۴. مقایسه‌ی مقادیر پارامترهای روابط ۳ و ۴ و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (از پوش خطی موهر ـ کولمب) مصالح ماسه‌ی گردگوشه (شسته) و سطح تماس در شرایط خشک و اشباع.

نوع آزمایش	D	φ_0 از رابطه ۳ (درجه)	φ_0 از رابطه ۴ (درجه)	$\Delta\varphi$ (درجه)	φ (درجه)
مصالح ماسه‌ی شسته‌ی خشک	−۰/۱۵	۴۰/۲	۴۰/۵	۸/۲	۳۳
مصالح ماسه‌ی شسته‌ی اشباع	−۰/۱۳	۳۳/۹	۳۴	۵/۵	۲۸/۸
مصالح سطح تماس خشک	−۰/۰۹	۳۲/۱	۳۱/۷	۵/۴	۲۷
مصالح سطح تماس اشباع	−۰/۰۸	۲۸/۴	۲۷/۹	۴/۴	۲۴/۵

جدول ۵. مقادیر نسبت اندرکنش δ/φ بر حسب تراکم مصالح.

D_r (٪)	خشک		اشباع	
	δ/φ	C (kg/cm^2)	δ/φ	C (kg/cm^2)
۵۰	۰٫۷۹	۰٫۱۸۰	۰٫۸۳	۰٫۱۲۳
۶۵	۰٫۸۲	۰٫۲۷۸	۰٫۸۵	۰٫۲۶۰
۸۵	۰٫۸۴	۰٫۳۷۲	۰٫۸۷	۰٫۳۵۳

شسته و سطح تماس در دو حالت خشک و اشباع آمده است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، نسبت اندرکنش و همچنین مقدار چسبندگی با افزایش تراکم نسبی افزایش می‌یابند.

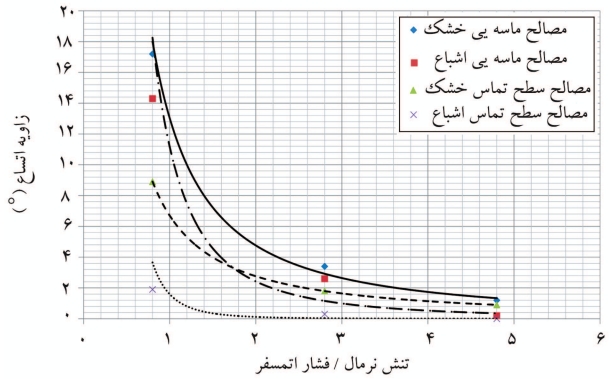
۲.۳.۳. زاویه‌ی اتساع و سختی برشی مصالح ماسه‌یی و سطح تماس در شرایط خشک و اشباع

با مراجعه به نمودارهای به‌دست‌آمده از آزمایش، می‌توان دو پارامتر سختی برشی (K_s) و زاویه‌ی اتساع (ψ) را مطابق رابطه‌های ۵ و ۶ تعریف کرد:

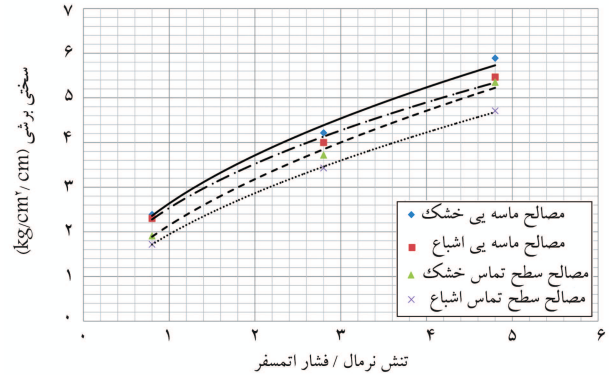
$$K_s = \left.\frac{d\tau}{d(\delta_h)}\right|_{\delta_h=0} \quad (۵)$$

$$\psi = \tan^{-1}\left[\frac{d(\delta_v)}{d(\delta_h)}\right]_{\max} \quad (۶)$$

شکل‌های ۱۲ و ۱۳، تغییرات زاویه‌ی اتساع و سختی برشی بر حسب نسبت تنش قائم اولیه بر فشار اتمسفر را برای مصالح ماسه‌یی و سطح تماس در دو حالت خشک و اشباع نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش تنش قائم اولیه بر روی نمونه، زاویه‌ی اتساع به‌صورت غیرخطی کاهش یافته است. در جدول ۶ نیز نسبت دو پارامتر سختی برشی و زاویه‌ی اتساع برای مصالح سطح تماس و مصالح ماسه‌یی نشان داده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، نمونه‌ی سطح تماس نسبت به مصالح ماسه‌یی، زاویه‌ی اتساع کم‌تری از خود نشان می‌دهد؛ که این به سبب تغییر حجم ناچیز مصالح بتن آسفالتی، به‌دلیل صلب‌بودن نسبت به مصالح ماسه‌یی است. همچنین در حالت اشباع مقدار زاویه‌ی اتساع کوچک‌تر است و کاهش کم‌تری از خود نشان می‌دهد، که این مطلب با توجه به تأثیر مثبت زاویه‌ی اتساع در مقاومت برشی مصالح تأیید می‌شود. مقدار سختی برشی نیز با افزایش تنش قائم به‌صورت غیرخطی بیشتر شده است و با بالارفتن تنش قائم اولیه مصالح سخت‌تر شده‌اند. با مقایسه‌ی نمودارهای سختی برشی و زاویه‌ی اتساع این نتیجه به‌دست می‌آید که مصالح ماسه‌یی در دو حالت خشک و اشباع، مقدار سختی برشی و زاویه‌ی اتساع بیشتری نسبت به مصالح سطح تماس دارند.



شکل ۱۲. تغییرات زاویه‌ی اتساع با نسبت تنش قائم اولیه مصالح سطح تماس و ماسه‌یی در دو حالت خشک و اشباع.



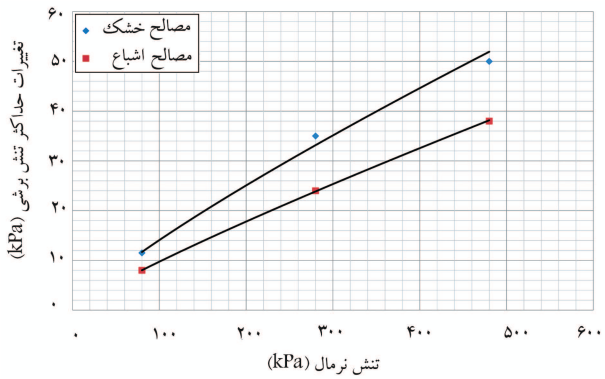
شکل ۱۳. تغییرات سختی برشی با نسبت تنش قائم اولیه‌ی مصالح سطح تماس در دو حالت خشک و اشباع.

۴. عوامل مؤثر در رفتار مصالح ماسه‌یی و مصالح سطح تماس

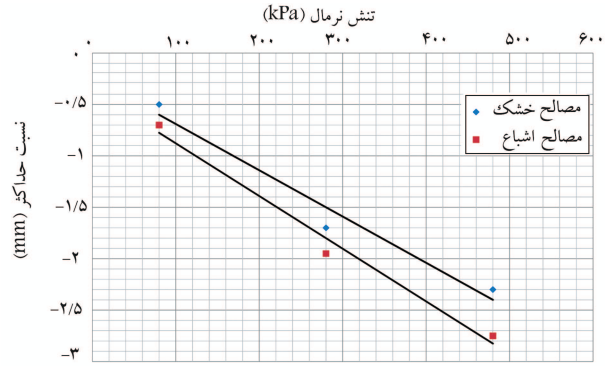
مصالح سطح تماس به‌دلیل ساختن محیطی ناهمگون، رفتار متفاوتی نسبت به مصالح ماسه‌یی، که همگون است، از خود نشان می‌دهند. در مصالح سطح تماس به علت کاهش مقاومت قفل و بستی، نوعی نقص (جدایش) ایجاد شده است و از خود مقاومت برشی کم‌تری نشان می‌دهند. البته اگر مصالح بتن آسفالتی در دمای بسیار بالا (در عمل ۱۶۰°C) با مصالح ماسه‌یی تماس داده و کوبیده شود، قفل و بست بین این دو ماده بیشتر می‌شود که تا حدود زیادی این نقیصه را جبران می‌کند.[۱۳] همچنین تراکم‌های بالای مصالح ماسه‌یی، نیروهای قائم بالا (معمولاً در نزدیکی کف سد)، استفاده از قیر سخت‌تر و مصالح ماسه‌یی تیزگوشه‌تر از عوامل تأثیرگذار در بالابردن مقاومت برشی بین این مصالح است.

جدول ۶. نسبت پارامترهای سختی برشی و زاویه‌ی اتساع بیشینه‌ی مصالح سطح تماس به مصالح ماسه‌یی در دو حالت خشک و اشباع.

تنش قائم اولیه (KPa)	خشک		اشباع	
	K_s سطح تماس/K_s ماسه	ψ سطح تماس/ψ ماسه	K_s سطح تماس/K_s ماسه	ψ سطح تماس/ψ ماسه
۸۰	۰٫۷۹	۰٫۴۹	۰٫۷۴	۰٫۸۳
۲۸۰	۰٫۸۸	۰٫۷۰	۰٫۸۴	۰٫۹۱
۴۸۰	۰٫۹۱	۰٫۸۶	۰٫۸۶	-



شکل ۱۴. اثر تنش قائم اولیه در میزان تغییرات تنش برشی مصالح سطح تماس نسبت به نمونه‌ی ماسه‌یی.

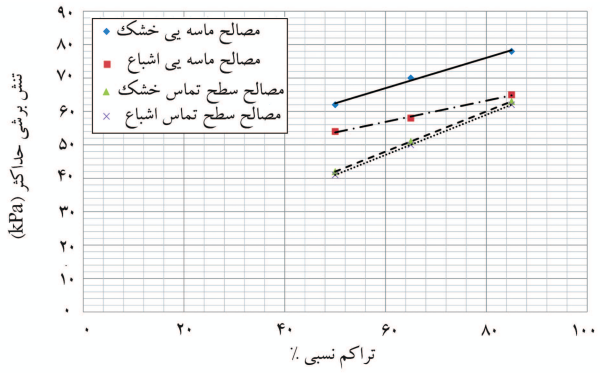


شکل ۱۵. اثر تنش قائم اولیه در میزان تغییرات نشست بیشینه‌ی سطح تماس نسبت به نمونه‌ی ماسه‌یی.

۱.۴. اثر تنش قائم در تغییر مقاومت برشی و نشست بیشینه‌ی سطح تماس نسبت به نمونه‌ی ماسه‌یی

جهت بررسی اثر تنش قائم در میزان تغییرات مقاومت برشی و نشست سطح تماس نسبت به نمونه‌ی ماسه‌یی، آزمایش برش مستقیم کوچک‌مقیاس با اعمال سه تنش ۰٫۸، ۲٫۸ و ۴٫۸ (kg/cm^2) برای مصالح ماسه‌یی و سطح تماس در دو حالت خشک و اشباع انجام گرفته است. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب اثر تنش قائم در میزان تغییرات تنش برشی بیشینه و همچنین تغییرات نشست برای دو حالت خشک و اشباع مصالح مشاهده می‌شود. اگر میزان تنش برشی بیشینه‌ی مصالح ماسه‌یی از همین مقدار در مصالح سطح تماس کاسته شود، نمودار شکل ۱۴ حاصل می‌شود. در صورتی که نشست بیشینه‌ی مصالح ماسه‌یی از همین مقدار در مصالح سطح تماس کم شود، نمودار شکل ۱۵ حاصل خواهد شد.

همان‌طورکه در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ ملاحظه می‌شود، مصالح سطح تماس نسبت به مصالح ماسه‌یی در سطح تنش پایین‌تری گسیخته می‌شوند و نشست کم‌تری دارند و میزان تغییرات این دو مقدار با افزایش میزان تنش قائم اولیه افزوده می‌شود؛ زیرا با افزایش تنش قائم اولیه، سطح تماس بین دانه‌یی افزایش می‌یابد و شکستگی بیشتری در دانه‌ها اتفاق می‌افتد. در مورد مصالح اشباع نیز این مطلب شایان ذکر است که در وضعیت اشباع (آبگیری سد) به دلیل نقش «روانکاری» آب، میزان مقاومت برشی کم‌تر و نشست بیشتری نسبت به مصالح خشک مشاهده می‌شود. زیرا آب باعث کاهش قفل و بست در مصالح می‌شود و از آنجا که خاک خوب دانه‌بندی شده است، افزایش نشست آن توجیه‌پذیر است.



شکل ۱۶. تغییرات تنش برشی بیشینه بر حسب درصد تراکم برای مصالح ماسه‌یی و مصالح سطح تماس در دو حالت خشک و اشباع.

۲.۴. اثر چگالی نسبی در اندرکنش مصالح سطح تماس

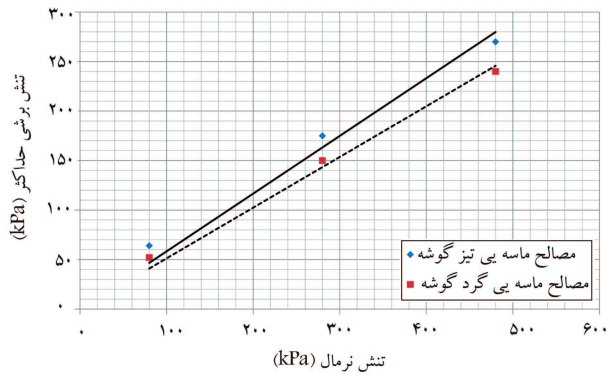
آزمایش‌های اندرکنش برای سه حالت با تراکم‌های ۵۰٪ (خاک شل)، ۶۵٪ (تراکم متوسط) و ۸۵٪ (خاک متراکم) نیز انجام گرفت. در اینجا نیز تنش‌های اولیه‌ی ۰٫۸، ۲٫۸ و ۴٫۸ (kg/cm^2) به ترتیب به نمونه‌ها اعمال شد و آزمایش‌های تحت شرایط خشک و اشباع انجام شدند. در شکل ۱۶، تغییرات تنش برشی بیشینه بر حسب درصد تراکم برای دو حالت مصالح ماسه‌یی و مصالح سطح تماس در دو حالت خشک و اشباع نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که افزایش تراکم نقش بسزایی در قفل و بست مصالح دارد و سبب افزایش مقاومت برشی آن می‌شود. در حالت اشباع نیز تراکم‌های بالا مقاومت بیشتری نسبت به تراکم‌های پایین ازخود نشان می‌دهد. در حقیقت با افزایش تراکم اصطکاک بین ذره‌یی مصالح افزایش می‌یابد، اما به‌عنوان مقایسه‌ی بین مصالح ماسه‌یی و مصالح سطح تماس این مطلب بیانگر این است که مصالح سطح تماس در مقایسه با مصالح ماسه‌یی نیروی اصطکاکی کم‌تری تحمل می‌کند که کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و در نتیجه مقاومت برشی را در پی دارد.

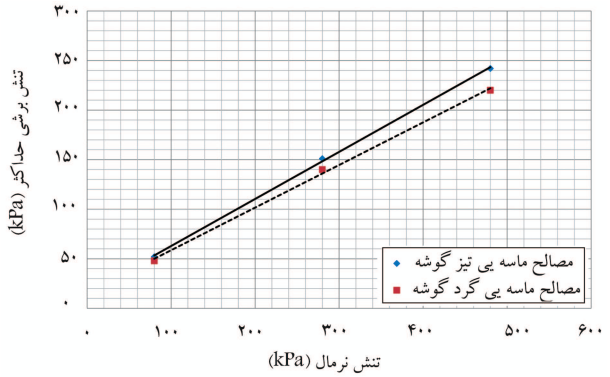
۳.۴. تأثیر تغییر نوع خاک

در این مرحله نوع خاک تغییرکرد، و از مصالح ماسه‌یی تیزگوشه با مشخصات مکانیکی $\gamma_{d\,max} = ۱٫۸۷\,gr/cm^3$ ، $\gamma_{d\,min} = ۱٫۶۳\,gr/cm^3$ و $G_s = ۲٫۸۳$ مطابق دانه‌بندی شماره‌ی ۲ در شکل ۱ مورد آزمایش قرار گرفت. در این قسمت از کار پژوهشی، شرایط خاک اشباع (به‌دلیل بحرانی‌تربودن شرایط) و $D_r = ۶۵٪$ جهت مقایسه انتخاب شد. در اینجا نیز تنش‌های اولیه‌ی ۰٫۸، ۲٫۸ و ۴٫۸ (kg/cm^2) به ترتیب به نمونه‌ها اعمال شد. نمودار شکل ۱۷، پوش منحنی‌های دو نوع خاک را در حالت اشباع نشان می‌دهد. همان طورکه مشاهده می‌شود، در مصالح ماسه‌یی تیزگوشه به‌دلیل قفل و بست بیشتر نسبت به مصالح گردگوشه، زاویه‌ی اصطکاک داخلی (شیب نمودار) افزایش می‌یابد. در شکل ۱۸، نیز پوش دو منحنی مصالح سطح تماس نشان داده شده است، که در اینجا علاوه بر افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی مقاومت چسبندگی (عرض از مبدأ نمودار) بین مصالح سطح تماس نیز افزایش پیدا کرده است، که دلیل آن نفوذ مؤثرتر مصالح تیزدانه در مخلوط بتن آسفالتی است.

شایان ذکر است که زاویه‌ی اتساع در مصالح ماسه‌یی و مصالح سطح تماس گردگوشه در این حالت، ۵٫۷ و ۱٫۹ درجه بوده است که این مقادیر برای مصالح



شکل ۱۷. منحنی تغییرات بیشینه‌ی تنش برشی بر حسب تنش قائم (پوش گسیختگی) برای مصالح ماسه‌یی در حالت اشباع.



شکل ۱۸. منحنی تغییرات بیشینه‌ی تنش برشی بر حسب تنش قائم (پوش گسیختگی) برای مصالح سطح تماس در حالت اشباع.

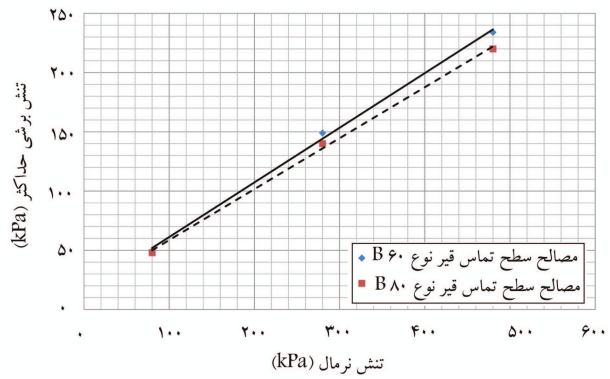
جدول ۷. مقادیر نسبت اندرکنش δ/φ و مقاومت چسبندگی برای مصالح سطح تماس ماسه‌ی شسته و تیزگوشه.

D_r (٪)	ماسه‌ی تمیز		ماسه‌ی تیزگوشه	
	δ/φ	C (kg/cm^2)	δ/φ	C (kg/cm^2)
۶۵	۰٫۸۵	۰٫۲۶	۰٫۸۵	۰٫۲۷۸

تیزگوشه و مصالح سطح تماس به ترتیب به ۷٫۱ و ۳٫۵ درجه افزایش پیدا کرده است. که دلیلش آن است که قفل و بست بهتر مصالح تیزگوشه در حین برش سبب افزایش حجم و بلندشدگی نمونه می‌شود. در جدول ۷، مقدار نسبت اندرکنش و همچنین پارامتر مقاومت چسبندگی برای مصالح سطح تماس ماسه‌ی شسته و تیزگوشه مقایسه شده است.

۴.۴. تأثیر نوع قیر در مقاومت برشی سطح تماس

در این کار پژوهشی برای بررسی تأثیر خود مخلوط بتن آسفالتی در نتایج پژوهش، مطابق با دانه‌بندی منحنی فولر و از قیر B۸۰ (که پس از قیر B۶۰ بیشترین فراوانی را در ساخت بتن آسفالتی دارد) برای تهیه‌ی مخلوط بتن آسفالتی استفاده شد. این نوع قیر از قیر B۶۰ نرم‌تر است و چسبندگی پایین‌تری دارد. در این مرحله، نمونه تحت سه تنش قائم اولیه‌ی ۰٫۸، ۲٫۸ و ۴٫۸ (kg/cm^2) قرارگرفت. در اینجا نیز جهت مقایسه از مصالح با تراکم $D_r = ٪۶۵$ و حالت اشباع در آزمایش استفاده شد. در شکل ۱۹، پوش موهر ـ کلمب برای دو حالت مصالح سطح تماس



شکل ۱۹. منحنی تغییرات بیشینه‌ی تنش برشی بر حسب تنش قائم (پوش گسیختگی) برای دو نوع قیر مورد استفاده‌ی مصالح سطح تماس در حالت اشباع.

جدول ۸. مقادیر نسبت اندرکنش δ/φ و مقاومت چسبندگی برای مصالح سطح تماس قیر B۶۰ و B۸۰.

D_r (٪)	مصالح سطح تماس قیر B۶۰		مصالح سطح تماس قیر B۸۰	
	δ/φ	C (kg/cm^2)	δ/φ	C (kg/cm^2)
۶۵	۰٫۸۵	۰٫۲۶۰	۰٫۸۲	۰٫۲۹۹

با مخلوط بتن آسفالتی B۶۰ و B۸۰ نشان داده شده است. در اینجا کاهش زاویه‌ی اصطکاک بین‌دانه‌یی و افزایش مقاومت چسبندگی نسبت به حالتی که از قیر B۶۰ استفاده شد، مشاهده شد؛ که این مسئله با توجه به نرم‌تربودن قیر B۸۰ و در نتیجه فرورفتگی بیشتر ماسه در مخلوط بتن آسفالتی توجیه‌پذیر است. البته این تغییر چندان قابل ملاحظه نیست و می‌توان این دو حالت را یکسان در نظرگرفت. لازم به ذکر است که بنا به نیازهای طراحی از قیر بسیار نرم‌تر B۱۸۰ در برخی از سدهای کشورهای نروژ و آلمان و... استفاده شده است، که این نوع قیر در پالایشگاه ایران تولید نمی‌شود.

در جدول ۸، مقدار نسبت اندرکنش و همچنین پارامتر مقاومت چسبندگی برای مصالح سطح تماس دو نوع قیر مقایسه شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آزمایش برش مستقیم کوچک‌مقیاس بر روی مصالح ماسه‌یی و مصالح سطح تماس آن با بتن آسفالتی در دو حالت خشک و اشباع انجام شده است. اثر پارامترهای قفل و بستی در مصالح سطح تماس مورد ارزیابی قرارگرفتند و برخی از نتایج حاصل از آزمایش به این شرح هستند:

ـ به‌طورکلی نسبت اندرکنش (نسبت زاویه‌ی اصطکاک سطح تماس به زاویه‌ی اصطکاک نمونه‌ی ماسه) در مصالح سطح تماس ماسه و بتن آسفالتی، از همین نسبت برای مصالح سطح تماس فولادی و بتنی با ماسه‌ی بیشتر به‌دست آمد (در مصالح با صلبیت بالا این نسبت معمولاً بین $\frac{1}{2}$ تا $\frac{2}{3}$ است، در حالی که در این پژوهش که بر روی مصالح بتن آسفالتی در اندرکنش با مصالح ماسه‌یی انجام شده است، این نسبت دست‌کم ۰٫۷۹ بوده است). دلیل این مطلب، اصطکاک

داخلی و درگیری و قفل و بست بیشتر بین مصالح بتن آسفالتی با ماسه، نسبت به مصالح فولادی و بتنی است.

-- نسبت اندرکنش در حالت خشک کم‌تر از حالت اشباع به‌دست می‌آید، به‌طوری که در حالت خشک، $۰/۷۹ < \delta/\varphi < ۰/۸۴$ و در حالت اشباع $۰/۸۳ < \delta/\varphi < ۰/۸۷$ حاصل می‌شود؛ که با افزایش تراکم این مقدار به سمت کران بالای بازه افزایش می‌یابد.

-- میزان مقاومت چسبندگی برای مصالح سطح تماس با افزایش چگالی نسبی افزایش خطی دارد و در حالت اشباع این مقدار از حالت خشک کم‌تر است.

-- در سطح تماس با بتن آسفالتی مصالح ماسه‌یی تیزگوشه، مقاومت برشی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، مقاومت چسبندگی، و زاویه‌ی اتساع بیشتری نسبت به مصالح گردگوشه به‌وجود می‌آید.

-- تغییر نوع قیر و نرم‌کردن آن در مخلوط بتن آسفالتی، موجب کاهش بسیار جزئی زاویه‌ی اصطکاک داخلی و افزایش مقاومت چسبندگی در مصالح سطح تماس می‌شود.

منابع (References)

1. Christiane, R. and Manfred, N. "Interlayer bonding of binder base and subbase layers of asphalt pavements:Long-term performance", *Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research EMPA*, Ueberlandstr, **129**, 8600 Duebendorf, Switzerland (2009).
2. Lee, A.W. "Characteristics of friction between concrete slab and base", *KSCE Journal of Civil Engineering December*, **4**4, pp. 265-275 (2000).
3. Bowles, J.E., *Foundation Analysis and Design*, 3rd edition Mc Graw-Hill (1982).
4. Ghanooni, S. and Mahin Roosta, R. "Seismic analysis and design of asphaltic concrete core dams", *Journal of Hydropower and Dams*, (2002).
5. Davidenko, V.V. and Khorkov, V.I. "Design and construction of earthquake-proof soil dams with asphalt concrete cores in the northern", *Constructional-Climatic Zone Power Technology and Engineering*, **39**(3), pp.125-130 (1999).
6. Kruntcheva, M.R., Collop, A.C. and Thom, N.H. "Properties of asphalt concrete layer interfaces", *J. Mater. Civ. Eng.*, **18**(3), pp. 467-471 (2006).
7. Kruntcheva, M.R., Collop, A.C. and Thom, N.H. "Effect of bond condition on flexible pavement performance", *ASCE Journal of Transportation Engineering*, **131**(11), pp. 880-888 (2005).
8. Feizi-Khankandi, S., Ghalandarzadeh, A., Mirghasemi, A.A. and Hoeg, K. "Seismic analysis of the garmrood embankment dam with asphaltic concrete core", *Soils and Foundations*, **49**(2), pp. 153-166 (2009).
9. Salemi, S. "Dynamic behaviour investigation of asphaltic concrete cores rockfill dams", Phd Dissertation, IUST University, Iran (2005).
10. Mirdamadi, A., Ghalandarzadeh, A. and Feizi-Khanakandi, S. "Dynamic performance of asphalt core in asphaltic concrete core dams by means of 1G shaking table model tests", *International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering,* IS-Tokyo (2009).
11. Hoeg, K., *Asphaltic Concrete Cores for Embankment*, Norwegian Geotechnical Institute, Norway (1993).
12. Charles, J.A. and Watts, K.S. "The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill", *Geotechnique,* **30**(4), pp. 353-367 (1980).
13. ICOLD (International Commission on Large Dams), *Bituminus Cores for Fill Dams*, Bulletin 84, Paris (1992).