Archive of SID

تأثیر خصوصیات فیزیکی- هندسی فیلرهای نوین و سنتی بر مشخصات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی

سعید غفارپور جهرمی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
علی خدایی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
E-mail: ghf_saeed@aut.ac.ir

چکیده

فیلر یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی است که با پرکردن فضاهای خالی، به دلیل نرمی و خصوصیات سطحی و ترکیب شیمیایی، نقش یک ماده فعال را ایفا می‌کند. در این پژوهش با بررسی ویژگی‌های هندسی، فیزیکی و شیمیایی چهار نوع فیلر مختلف، خصوصیات رئولوژیکی مخلوط قیر- فیلر و مشخصات مکانیکی مخلوط بتن آسفالتی با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی ارزیابی می شود. در این پژوهش از سیمان پرتلند معمولی و پودرسنگ سیلیسی به عنوان فیلرهای متداول و سنتی و از نانورس و کربنات کلسیم رسوبی به عنوان فیلرهای نوین و جدید استفاده شد. با ساخت نمونه‌های بتن آسفالتی در مقیاس مارشال، مشخصات مکانیکی مختلفی چون استقامت مارشال، روانی، کشش‌غیرمستقیم، مدول برجهندگی، خزش دینامیک و خستگی قطری با استفاده از دستگاه UTM25 مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد رفتار مهندسی مخلوط‌های بتن آسفالتی تابع نوع و میزان فیلراست.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، فیلر، نانورس، کربنات کلسیم رسوبی، مشخصات مکانیکی.

۱. مقدمه

مطالعات و تحقیقات مختلف نشان داده است که فیلر به عنوان بخشی از مصالح آسفالتی، نقش محسوسی بر رفتار و مشخصات مکانیکی و نسبتهای حجمی مخلوط‌های بتن آسفالتی دارد. فیلر علاوه بر این که همانند ماده‌ای خنثی، نقش پرکننده را در مخلوط دارد، به دلیل دانه‌بندی بسیار ریز و بافت سطحی خاص، می‌تواند اندرکنش شدیدی با قیر داشته باشد و با تقویت خاصیت چسبندگی، رفتار مکانیکی مخلوط را بهبود بخشد[۱]. در دستورالعمل‌های راه توصیه می‌شود که مصالح فیلر بایستی عاری از مواد آلی و کانی‌های رسی باشند و دامنه خمیری آن کمتر از ٤ و از نظر دانه‌بندی به گونه‌ای باشد که حداقل ٦٥ درصد ذرات از الک ۲۰۰ بگذرند. همچنین به منظور محدود کردن مصرف فیلر در مخلوط، حداکثر نسبت وزنی فیلر به قیر به ۲۰ تا ۵۰ درصد محدود شده است [۲]. اگرچه کاربرد مواد و مصالح مختلف به عنوان فیلر در چند دهه اخیر رواج بسیاری یافته است، اما بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه به بررسی تجربی و تأثیر کمی فیلر بر رفتار مکانیکی و نسبت‌های حجمی بتن آسفالتی متمرکز بوده است، به عبارتی تأثیر نوع، مقدار و خصوصیات فیزیکی فیلر بیش از اثر خصوصیات هندسی، فیزیکی و شیمیایی چون ترکیبات شیمیایی، سطح مخصوص، شکل هندسی و بافت سطحی مورد توجه قرار گرفته است.

خصوصیات هندسی، فیزیکی و شیمیایی فیلر و به‌ویژه شکل ظاهری و بافت سطحی، بر میزان قیر بهینه و در نتیجه رفتار خمیر

*تاریخ دریافت: ۸٦/۹/۲٤- تاریخ پذیرش: ۸۷/٦/۱۵

www.SID.ir

Archive of SID

فیلر- قیر اثرگذار است. فیلرهای مختلف هرچند دانه‌بندی یکسانی داشته باشند، به دلیل سطح ظاهری متفاوت، عملکردهای متفاوتی را در رفتار مخلوط بتن آسفالتی باعث می‌شوند، زیرا هرچه تغییرات ظاهری نامنظم‌تر باشند، فضای خالی بیشتری بین ذرات ریز فیلر به وجود خواهد آمد. این به آن معنی است که حتی با ثابت ماندن نسبت فیلر به قیر(F/B)، فیلرها به دلیل شکل و بافت ظاهری متفاوت، رفتار رئولوژیکی متفاوتی نشان می دهند. تحقیقات نشان داده اند که در دمای یکسان، میزان کندروانی و نقطه نرمی با افزایش سطح جانبی ذرات افزایش می‌یابد و برعکس، درجه نفوذ پذیری و نیز شکل‌پذیری کاهش می‌یابد[۳]. بنابراین اگر هدف، دستیابی به رفتار رئولوژیکی یکسانی باشد، بایستی نسبت فیلر به قیر با افزایش سطح جانبی ذرات، کاهش یابد. بر این اساس حداکثر درصد مجاز فیلر بایستی براساس عملکرد تعیین شود. علاوه بر این فیلرهای فعال با ترکیب شیمیایی خود سبب ایجاد واکنش‌ها و فعل‌وانفعالات متفاوتی با قیر می‌شوند و چسبندگی قیر با سنگدانه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند[٤].

بنابراین فیلرهای مختلف که از نظر دانه‌بندی، شکل ذرات، سطح جانبی، حجم منافذ، ترکیب معدنی و مشخصات فیزیکی- شیمیایی بسیار متفاوت هستند، می‌توانند اثرات متفاوتی بر مشخصات مخلوط داشته باشند، بنابراین در این تحقیق با بررسی چهار نوع فیلر مختلف، رفتار رئولوژیکی مخلوط قیر- فیلر و مشخصات مکانیکی مخلوط بتن آسفالتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲. بازبینی ادبیات فنی

اگرچه کاربرد مواد و مصالح مختلف به عنوان فیلر در چند دهه اخیر رواج بسیاری یافته است، اما بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه به بررسی تجربی و تأثیر کمی فیلر بر رفتار مکانیکی و نسبت‌های حجمی بتن آسفالتی متمرکز بوده‌اند، به عبارتی تأثیر نوع، مقدار و خصوصیات فیزیکی فیلر بیش از اثر خصوصیات هندسی، فیزیکی و شیمیایی چون ترکیبات شیمیایی، سطح مخصوص، شکل هندسی و بافت سطحی مورد توجه قرار گرفته است. تا کنون محققان بسیاری تأثیر فیلر بر رفتار مخلوطهای آسفالتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. فیلر از مهم ترین اجزای تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی است که با پرکردن فضاهای خالی، به دلیل نرمی و خصوصیات سطحی و ترکیب شیمیایی نقش یک ماده فعال را ایفا می‌کند و چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود رفتار مکانیکی، میزان قیر بهینه، دوام و نفوذپذیری، تابع خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فیلر باشد [۵]. آهک هیدراته به عنوان نوعی فیلر فعال توانسته است رفتار مکانیکی مخلوط‌های بتن آسفالتی به ویژه رفتار خزشی در دماهای زیاد را بهبود بخشد[٦].تحقیقات Dallas و همکارانش (۲۰۰۵) نشان می دهند که آهک نوعی فیلر فعال است که نقش اصلی را در رشد و تجمع ریزترکها و تغییر شکل پلاستیک و الاستیک مخلوط در دماهای کم و زیاد دارد. این پدیده متأثر از اندرکنش شیمیایی ترکیبات فیلر آهکی با قیر است[۷].

تحقیقات انجام شده توسط Bahia و Smith نشان داد که رفتار خستگی مخلوطهای بتن اسفالتی، ارتباط نزدیکی با مشخصات قیر، مشخصات فیلر و اندرکنش بین آنها دارد و بروز ریزترک‌ها و رشد آنها تحت تأثیر مشخصات فیلر قرار دارد[۸و۹].

کاوسی و همکارنشان (۱۹۹۷) با بررسی چهار نوع فیلر مختلف (سنگ آهک، خاکستربادی، کائولین و کوارتز)، مشخصات رئولوژیکی خمیر فیلر- قیر و مشخصات مکانیکی مخلوط بتن آسفالتی را با استفاده از آزمایش مارشال مورد ارزیابی قرار دادند[۱۰]. مطالعات Brown و همکارانش (۱۹۹۸) نشان دادند که آهک هیدراته نوعی فیلر فعال است که می‌تواند رفتار خزشی مخلوط بتن آسفالتی را بهبود بخشد و پدیده عریان‌شدگی را به تأخیر اندازد [۱۱]. Buttlar و همکارانش (۱۹۹۹) با بررسی میکرومکانیزم و عملکرد فیلرهای آهکی و همچنین کنترل تغییرات فیزیکی و شیمیایی مخلوط‌های قیری به این نتیجه رسیدند که فعالیت شیمیایی آهک با قیر می‌تواند رفتار مخلوط‌های بتن آسفالتی را تحت اثر بارهای سیکلی بهبود بخشد[۱۲].

۳. مواد و مصالح مورد استفاده

۳-۱ مصالح سنگی و قیر مصرفی

در این مطالعه از یک دانه‌بندی مشخص و ثابت بر اساس آیین‌نامه روسازی ایران (مناسب برای رویه) استفاده شد و این دانه‌بندی مبنای ساخت تمامی نمونه‌ها شد. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در شکل۱ آمده است. همچنین قیر مورد استفاده در این تحقیق از نوع ۷۰-٦۰ (معادل AC-10) با مشخصات رئولوژیکی مطابق جدول (۱) است.

www.SID.ir

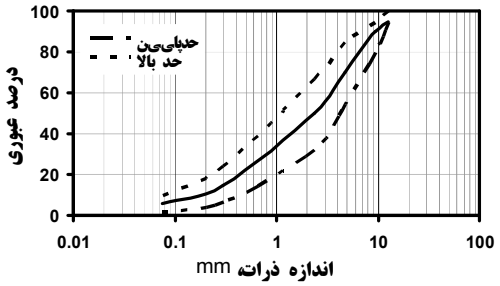
 Archive of SID

۳-۲ نانورس

استفاده از مواد و مصالح در مقیاس نانو امروزه توسعه فراوانی یافته‌است و نانوذرات که نانورس از آن جمله است به میزان بسیار اندکی می‌تواند مشخصات فیزیکی و مکانیکی پلیمرها را با پخش ذرات رس در مقیاس نانو تا حد زیادی بهبود بخشد. نانورس حاصل تصفیه و جداسازی صفحات رس از یکدیگر است که به دلیل خنثی بودن صفحات، جذب آب در آنها وجود ندارد و رفتار آنها با کانی‌های رس بسیار متفاوت است. نانورس دارای سطح مخصوص فعال و بسیار بزرگی (۷۰۰ تا ۸۰۰ مترمربع در هر گرم) است که باعث می‌شود همواره اندرکنش شدیدی بین نانورس و محیط اطرافش (مثلا قیر یا پلیمر) وجود داشته باشد. عملکرد مناسب نانورس‌ها منوط به پراکنش مناسب آن در ماتریس (قیر یا پلیمر) یعنی جایگیری بهینه و مناسب ترموپلاستیک‌ها در بین صفحات به شکل بین‌لایه‌ای یا لایه‌لایه است. پراکنش مناسب نانورس نیز تابع دمای اختلاط، ویسکوزیته پلیمر، میزان نانورس، سرعت اختلاط و مشخصات نانورس است. از نانورس در اصلاح رفتار قیرها به ندرت استفاده شده است که دلیل آن ساختار شیمیایی بسیار پیچیده قیر در مقایسه با پلیمر است همچنین نانورس بایستی با ماتریس (پلیمر یا قیر) سازگار باشد و برای قیر لازم است از نانورس آلی[1] استفاده شود. با افزودن درصد کمی نانورس به پلیمرها، مقاومت مکانیکی، دوام، پایداری حرارتی و مقاومت در برابر حلال‌های آلی بهبود می‌یابد و نفوذپذیری در مقابل اکسیژن، دی‌اکسید کربن، نیتروژن و بخار آب کاهش پیدا می‌کنند. مشخصات نانورس بکار گرفته شده در این تحقیق در جدول(۲) آمده است.

جدول ۱. مشخصات قیر مصرفی

نقطه نرمی		٥٤
نفوذ در دمای ۲۵ درجه		٦٣
درجه اشتعال		٢٤٣
نشانه نفوذ		+ ۰/٤
شکل‌پذیری در دمای ۲۵		>۱۰۰
نقطه شکست فراس		١٤
افت حرارتی		٪ ۰/۰۵
چگالی در دمای ۲۵ درجه		۱/۰۲۵
کندروانی	در دمای ۵۰	۲۵۰/۰۰۰
	در دمای ٦۰	۱۰۰/۰۰۰
	در دمای ۷۲	۲۰/۰۰۰
مالتین		٪۷۵
آسفالتین		٪۲۷/۲



شکل۱. دانه‌بندی مصالح سنگی

جدول ۲. مشخصات فیزیکی نانورس

نام تجاری	Nanofil 15
پایه	مونتموریونیت
قطر ذرات	μm<75
قطر متوسط ذرات D_{50}	μm8-10
ضخامت لایه	1.8 nm
نسبت طول به عرض صفحات	>100
وزن مخصوص (kg/m^3)	٤٨۰ Kg/m^3
چگالی	۲
سطح مخصوص	۷٦۰m^2/gr
درصد رطوبت	٪ ۳>
پایداری حرارتی	۳۰۰ ^0C
حد خمیری	٪ ۸۵
ظرفیت تبادل یونی	۱۰۰meq/100gr

۳-۳ کربنات کلسیم رسوبی

کربنات کلسیم رسوبی(CaO_3) یا PCC از مشتقات آهک، حاصل یک سنتز مهار شده با مورفولوژی و اندازه ذرات بسیار کوچک است. از خردکردن، آسیاب کردن و تصفیه رسوبی سنگ آهک، PCC با درجه خلوص بالا (حدود ۹۹ نسبت به روش آسیابی) حاصل می‌شود که کاربرد فراوانی در صنعت دارد. PH یک مول از این ماده در یک لیتر آب، حدود ۹ است، یعنی در مقایسه با آهک خنثی است. افزودن این ماده به پلیمرها و انجام واکنش شیمیایی مناسب می‌تواند خصوصیات مکانیکی آنها را افزایش دهد. مشخصات کربنات کلسیم مصرفی در جدول(۳) آمده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۳. مشخصات کربنات‌کلسیم رسوبی

وزن مولکولی	۱۰۰ g/mol
درجه اسیدیته	۹/۲
وزن مخصوص	۷۵۰ kg/m^3
چگالی ویژه	۲/۷
سطح مخصوص	۹/۲m^2/gr
قطر متوسط ذرات	۲-٤ μm
گرمای ویژه	۰/۱۹
سختی در دمای ۲۰	۳
ضریب شکست نور	۱/٤۷ – ۱/٦۷
نوع کریستال	شش ضلعی
مصرف جهانی در سال	٦ میلیون تن
بافت سطحی	نرم- چین‌دار

۳-٤ سیمان پرتلند

استفاده از سیمان پرتلند به عنوان فیلر در مخلوط‌های بتن آسفالتی قدمت بسیاری دارد. سیمان ترکیبی از آهک، سیلیس، آلومین و اکسیدآهن است که بیش از ٦۰ درصد آن CaO و بقیه آن متشکل ازدیگر ترکیبات شیمیایی مثل SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, K_2O_3 است. ترکیبات سیمان پرتلند ضمن واکنش با قیر می‌توانند عملکرد و رفتار مخلوط‌های بتن آسفالتی را بهبود بخشد. مشخصات سیمان مصرفی در جدول(٤) آمده است.

۳-۵ پودر سنگ سیلیسی

یکی از متداول‌ترین فیلرهای معدنی در ساخت بتن آسفالتی، پودر سنگ آهکی یا سیلیسی است. ترکیب شمیایی سیلیس خاصیت اسیدی دارد و اغلب نقش پرکننده خنثی در مخلوط را دارد. افزودن پودر سنگ سیلیسی، مقاومت مخلوط را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، اما شکل‌پذیری و عملکرد رفتاری تحت شرایط اشباع، کاهش می‌یابد [۱]. جدول(۵) مشخصات پودر سنگ مصرفی را نشان می‌دهد.

٤. رفتار رئولوژیکی قیر با فیلرهای مختلف

در اولین گام ابتدا تأثیر هر چهار نوع فیلر بر خصوصیات رئولوژیکی ماتریس قیر- فیلر مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. با انتخاب نسبتهای حجمی متفاوت شامل ٤ ، ۱۰ و ۲۵ درصد، فیلرها به آرامی به قیر مذاب در دمای ۱٤۰ درجه افزوده شدند. به منظور حذف تأثیر پیرشدگی و هوازدگی قیر در زمان اختلاط، تمامی فیلرها در یک دمای یکسان (۱٤۰ درجه)، با سرعت ثابت (۳۰۰ دور در دقیقه) و در مدت زمان یکسان (۲۰ دقیقه) با قیر مخلوط شدند. سپس آزمایشهای تجربی و رئولوژیکی مختلفی چون درجه نفوذ، نقطه نرمی و شکل‌پذیری بر روی نمونه‌ها انجام شدند که نتایج حاصل در شکل‌های ۲ ، ۳ و ٤ آمده است. همچنین تأثیر سطح مخصوص ذرات فیلر بر مشخصات رئولوژیکی مخلوط حاصل در شکل ۵ ، ٦ و ۷ آمده است.

جدول ٤. مشخصات سیمان

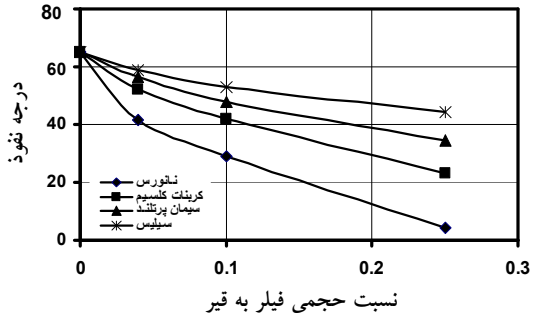
درجه اسیدی بودن	۱۲
درصد آهک	٪ ۱۲
وزن مخصوص	۱۲۰۰Kg/m^3
قطر متوسط ذرات	۳۰ – ۵۰ μm
چگالی ویژه	۳/۱۵
سطح مخصوص	۳۲۵۰ Cm^2/gr
سختی در دمای ۲۰ درجه	٤
MgO	٪ ۳/٤
SO_2	٪ ۲/۲
بافت سطحی	نرم- ناهموار

جدول ۵. مشخصات پودرسنگ سیلیسی

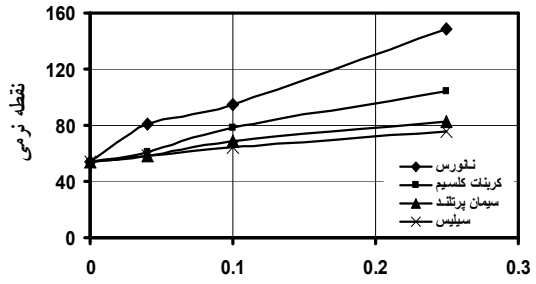
ترکیب شیمیایی	SiO2+AL2O3
وزن مخصوص	۱۷۰۰Kg/m3
چگالی ویژه	۲/۷۲
قطراسمی ذرات	٤۰ – ۱۰۰ μm
سطح مخصوص	۱۰۵۰Cm2/gr
درجه اسیدی بودن	۷
بافت سطحی	زبر-گوشه‌دار-مکعبی

www.SID.ir

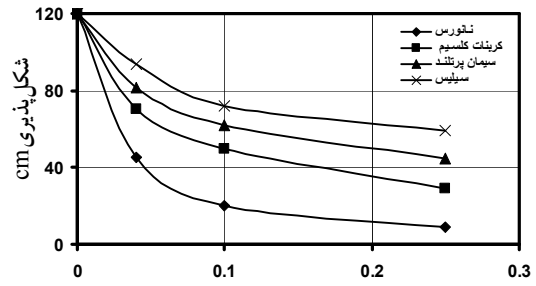
Archive of SID



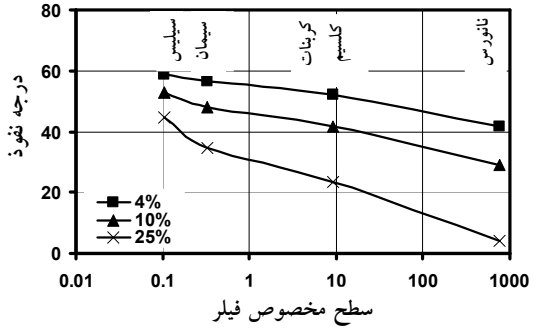
شکل۲. تغییرات درجه نفوذ بر حسب نسبت حجمی فیلر



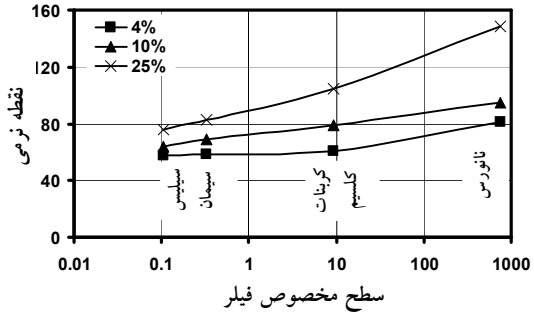
شکل ۳. تغییرات نقطه نرمی برحسب نسبت حجمی فیلر



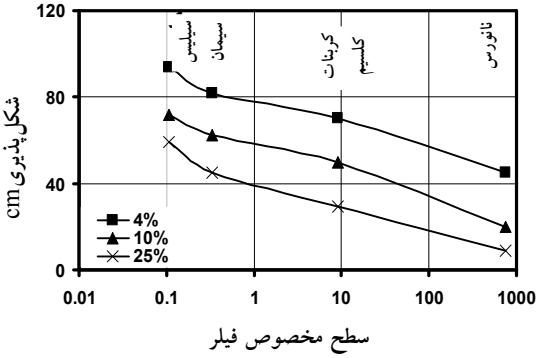
شکل٤. تغییرات شکل‌پذیری بر حسب نسبت حجمی فیلر



شکل ۵. تغییرات درجه نفوذ و سطح مخصوص فیلر



شکل ٦. تغییرات نقطه نرمی و سطح مخصوص فیلر



شکل۷. تغییرات شکل‌پذیری و سطح مخصوص فیلر

٤-١ ارزیابی و مقایسه نتایج

همان گونه که نتایج نشان می‌دهند، درجه نفوذ، شکل پذیری و نقطه نرمی تابعی از نوع و خصوصیات فیلر و همنین نسبت فیلر به قیر است. این آزمایشها در دمای ۲۵ درجه انجام شده اند، بنابراین انتظار می‌رود تغییرات دما بر رفتار رئولوژیکی اثرگذار باشد. نانورس به دلیل سطح مخصوص بسیار زیاد، کمترین درجه نفوذ و شکل‌پذیری و همچنین بالاترین نقطه نرمی را در مقایسه با دیگر فیلرها دارد. با افزایش سطح مخصوص و مقدار فیلر، غلظت مخلوط به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این موضوع با مقایسه نتایج حاصل از فیلر نانورس با سطح مخصوص بسیار زیاد (۷۰۰ مترمربع در هر گرم) با فیلر پودر سنگ (۱۰۵۰ سانتیمترمربع در هر گرم) قابل مقایسه است. سطح مخصوص زیاد فیلر از یک طرف جذب قیر را افزایش داده و از طرف دیگر اندرکنش و واکنش شیمیایی شدیدی را با قیر باعث می‌شود که نتیجه آن سختی مخلوط و کاهش شکل‌پذیری است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٦. مشخصات ابعاد نمونه، دما و شرایط بارگذاری در آزمایش‌ها

آزمایش	ابعاد نمونه (mm)	روش بارگذاری	مشخصات بارگذاری	ضربان بار		دما (^{o}C)
				بارگذاری	استراحت	
مارشال و روانی	٦٥ * ١٠٢	با سرعت ثابت	٠/٨٥ mm/s	------	----	٢٠
کشش‌غیرمستقیم	٣٥ * ١٠٢	با سرعت ثابت	٠/٨٥ mm/s	-----	-----	٢٠
مدول برجهندگی	٣٥ * ١٠٢	بارنیم‌سینوسی	١٠ ٪ مقاومت کششی غیرمستقیم، ٥ پالس	٢٥٠ ms	١٢٥٠ ms	٢٠
خستگی قطری	٣٥ * ١٠٢	سیکلی- کنترل تنش	٥٠٠ KPa و ٤٠٠، ٣٠٠، ٢٠٠	١٢٥ ms	٥٠ ms	٥
خزش دینامیک	٥٥ * ١٠٢	بارنیم‌سینوسی	٥٠٠ KPa, 1HZ و ٤٠٠، ٣٠٠، ٢٠٠	٢٠٠ ms	٨٠٠ ms	٥٠

علاوه بر سطح مخصوص، شکل هندسی، بافت سطحی و منافذ فیلر نیز با مقدار قیر مصرفی در ارتباط است. اگر نسبت فیلر به قیر ثابت فرض شود، با افزایش زبری و تخلخل فیلر، مقدار قیر بهینه افزایش می‌یابد، زیرا بخشی بیشتری از قیر جذب سطح ذرات می‌شود، بنابراین اگر بخواهیم مشخصه رئولوژیکی خاصی ثابت باشد، در فیلرهایی که سطح ویژه نسبتاً بالایی دارند و یا به دلیل بافت سطحی یا تخلخل قابلیت جذب زیادی دارند، میزان قیر بهینه به طور محسوسی افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که افزایش میزان قیر همواره باعث بهبود عملکرد مخلوط نمی‌شود و می‌تواند برخی رفتارها بخصوص رفتار خزشی را تضعیف کند و از لحاظ اقتصادی نیز به صرفه نباشد.

٥. فیلر و رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی

در دومین گام، به منظور ارزیابی نقش خصوصیات فیزیکی، هندسی و شیمیایی فیلرهای مختلف بر رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایشهایی با ساخت نمونه‌های مارشال برنامه‌ریزی شد. متغیر اصلی در ساخت نمونه‌ها، نسبت وزنی فیلر است. آیین‌نامه روسازی، درصد فیلر مجاز را کمتر از ١٠ درصد وزنی می‌داند، بنابراین نسبت وزنی فیلر به کل مصالح سنگی برابر با ٢، ٤ و ٧ درصد درنظر گرفته شد. فیلر پس از خشک شدن در گرمخانه ابتدا با قیر مذاب (١٤٠ درجه) ترکیب شد و سپس به سنگدانه افزوده شد. میزان فیلر بر مقدار قیر بهینه اثرگذار است. بنابراین ابتدا طبق روش مارشال مقدار قیر بهینه برای درصد فیلرهای مختلف، تعیین شد. عملکرد واقعی نانورس منوط به ترکیب صحیح با قیر خواهد بود.

٥-١ ساخت نمونه‌ها

بر اساس وزن کل مصالح سنگی و فیلر، درصدهای مختلف قیر از ٤ درصد تا ١٠ درصد (٤، ٥، ٦، ٧ و ١٠ درصد) انتخاب و ملاک عمل در ساخت نمونه‌ها قرار گرفتند و به روش مارشال، درصد قیر بهینه در هر نسبت فیلر تعیین شد. نمونه‌های مارشال طبق استاندارد ASTM D1559 قطری معادل ١٠٢ و ارتفاع تقریبی ٧٠-٦٥ میلیمتر دارند. حدود ١٢٠٠ گرم مخلوط در سیلندر مارشال ریخته شده و با فرض سطح ترافیک سنگین، تمامی نمونه‌ها از هر طرف با ٧٥ ضربه توسط دستگاه متراکم شدند. سنگدانه و قیر قبل از اختلاط به ترتیب تا دمای ١٧٠ و ١٥٥ درجه گرم شدند. دمای تراکم مخلوط نیز حدود ١٤٥ درجه بود.

٥-٢ تست‌های آزمایشگاهی

رفتار مهندسی نمونه‌ها با انجام آزمایشهای عملکردی مختلفی چون پایداری مارشال، کشش غیر مستقیم، خستگی قطری، مدول برجهندگی و خزش دینامیک مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. با توجه به امکانات آزمایشگاهی، تمامی آزمایشها روی نمونه مارشال انجام گرفت و در برخی از آنها ارتفاع نمونه تا حد مناسبی با برش کاهش داده شد، مثلاً در آزمایش خزش، ارتفاع نمونه‌ها ٥٥ میلیمتر به طور کاملا مستقیم با اره الماسه ظریف برش داده شده و با سمباده پرداخت شد. همچنین قبل از آزمایش سطح تماس صفحه و نمونه بایستی با گریس کاملا" آغشته شود تا از اثر تغییرات جانبی و تنش برشی ناشی از اصطکاک تماسی کاسته شود. ابعاد نمونه، مشخصات بارگذاری و دمای انجام تمامی آزمایشها در جدول ٦ آمده است. نسبت پواسون در

www.SID.ir

Archive of SID

محاسبه مدول برجهندگی ۰/۳۵ فرض شد. نتایج حاصل در شکل‌های ۸ تا ۱۵ آمده است.

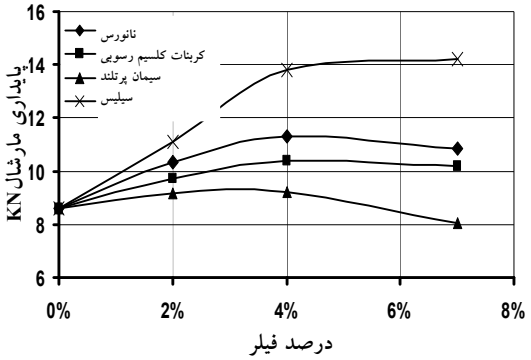
۵-۳ ارزیابی و مقایسه نتایج

با استناد به نتایج حاصل از آزمایشهای انجام شده، مقایسه نتایج در این شرایط بسیار پیچیده و تابع پارامترهای مختلفی است، اما می‌توان به نوعی تأثیر فیلرهای مختلف را در رفتار مکانیکی مخلوط آسفالتی به خوبی دید.

درصد قیر بهینه: مقدار قیر بهینه تابع نوع، مقدار و مشخصات فیلر است (شکل ۸). اگر نسبت وزنی فیلر یکسان باشد، نانورس بیشترین مقدار و پودرسنگ سیلیسی کمترین مقدار قیر بهینه را دارد. با افزایش میزان فیلر، درصد قیر بهینه نیز افزایش می‌یابد و نرخ افزایش تابع نوع و مشخصات فیلر بوده و نانورس جهش بیشتری دارد.

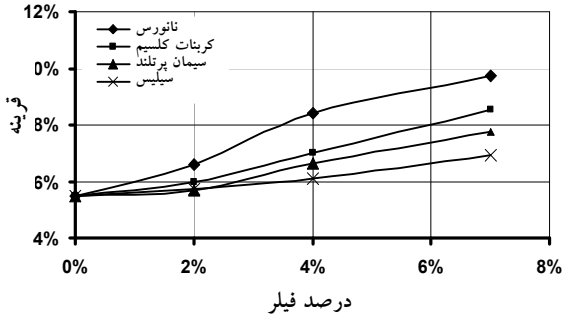
استحکام مارشال: استحکام و پایداری مارشال تابع نوع و مقدار فیلر است. مقایسه نتایج در شکل ۹ نشان می‌دهد که پودرسنگ بیشترین استحکام مارشال را دارد، اما با افزایش میزان فیلر، استحکام آن کاهش می‌یابد، در حالی که در دیگر مخلوط‌ها، با افزایش میزان فیلر، مقاومت مارشال با آهنگ نسبتاً ملایمی در حال افزایش است.

روانی مارشال: روانی مارشال نیز تابع نوع، مشخصات و میزان فیلر مصرفی است (شکل ۱۰). با افزایش درصد فیلر، روانی کاهش می‌یابد، اما آهنگ کاهش آن در فیلرهای مختلف متفاوت است، به طوری که پودرسنگ، تغییرات کمتری را در مقایسه با کربنات‌کلسیم رسوبی و نانورس نشان می‌دهد، به عبارتی سرعت کاهش روانی در این دو نوع فیلر بیشتر است.

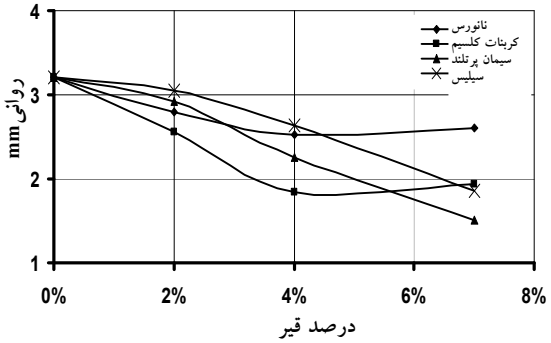


شکل ۸. پایداری مارشال و نسبت وزنی فیلر

کشش غیرمستقیم: مقایسه نتایج در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های بتن آسفالتی، بستگی به نوع، خصوصیات و میزان فیلر دارد. اگر میزان فیلر اندک باشد، مقاومت کششی مخلوط‌های پودرسنگ بزرگ‌تر از دیگر مخلوط‌ها است اما با افزایش مقدار فیلر، مقاومت کششی کاهش می‌یابد. نانورس در مقایسه با دیگر فیلرها در نسبتهای بالا، مقاومت کششی بیشتری دارد.



شکل ۹. درصد قیر بهینه و نسبت وزنی فیلر



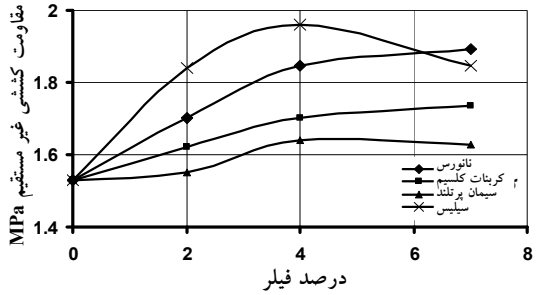
شکل ۱۰. میزان روانی و نسبت وزنی فیلر

مدول برجهندگی: شکل ۱۲ نشان می‌دهد مدول برجهندگی وابستگی منحصربفردی با نوع و میزان فیلر دارد. آزمایش در ۵ پالس با سطح تنشی معادل ۱۰ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم انجام شد. در مخلوط‌های حاوی پودرسنگ با افزایش نسبتا" اندکی در مقدار فیلر، مدول برجهندگی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته، اما با افزایش میزان فیلر، مقدار آن به شدت کاهش می‌یابد. کربنات کلسیم رسوبی و نانورس با نرخ کمتری در مقایسه با فیلر پودرسنگ، مدول برجهندگی را افزایش می‌دهند که بیانگر تأثیر این نوع فیلر بر افزایش خاصیت الاستیک مخلوط است.

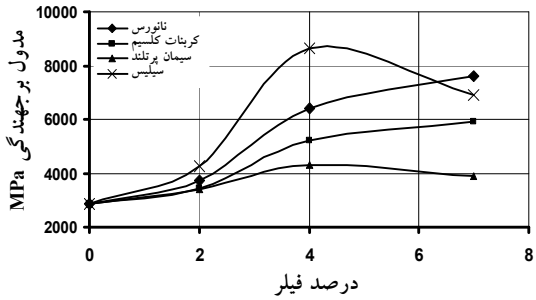
www.SID.ir

Archive of SID

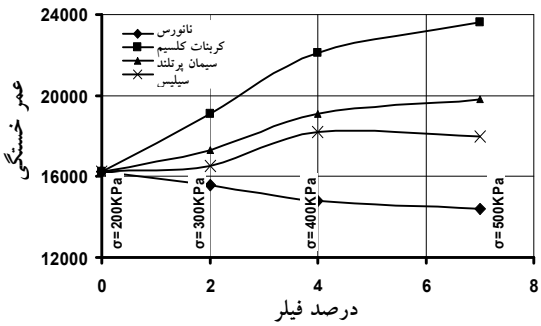
خستگی قطری: شکل ۱۳ بیانگر آزمایش خستگی قطری در دمای ۵ درجه و در چهار سطح تنش است. اگر نسبت فیلر یکسان باشد، مخلوط‌های حاوی پودرسنگ در تعداد سیکل کمتری دچار اضمحلال شده و نانورس کمترین مقاومت را در برابر خستگی نشان می‌دهد. این پدیده نشان می‌دهد که افزودن نانورس باعث رفتار ترد و شکننده مخلوط می‌شود. کربنات کلسیم رسوبی بهترین عمر خستگی را در نسبتهای بالا نشان می‌دهد . همچنین مقایسه رفتار خستگی و مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های حاوی پودرسنگ نشان می‌دهد که پودرسنگ مقاومت مخلوط را تحت بارهای استاتیکی افزایش می‌دهد، درحالی که در مقابل بارهای دینامیکی اثر کمتری دارد.



شکل ۱۱.مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت وزنی فیلر



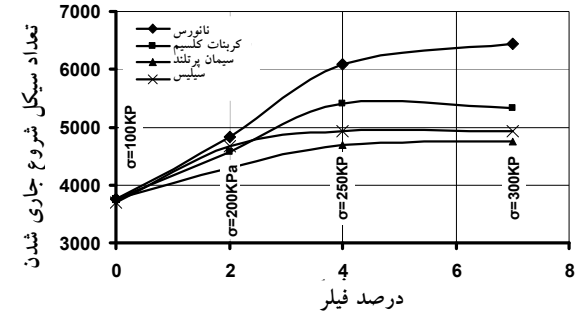
شکل۱۲. مدول برجهندگی و نسبت وزنی فیلر



شکل۱۳. عمر خستگی و نسبت وزنی فیلر در دمای ۵ درجه

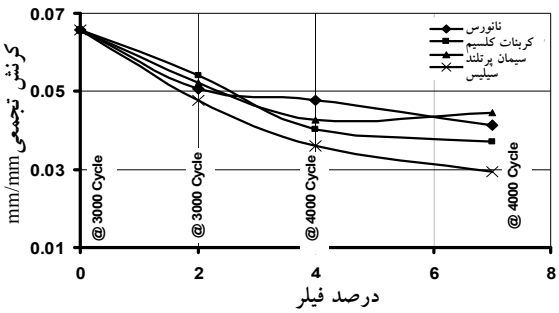
خزش دینامیک: ارتباط بین کرنش تجمعی محوری بر حسب تعداد سیکل بارگذاری که منحنی خزش دینامیکی نامیده می‌شود در شکل ۱٤ نشان داده شده است. منحنی خزش از سه ناحیه متمایز تشکیل شده است، ناحیه اول که بیانگر تغییرشکل‌های اولیه و موضعی است، ناحیه دوم دارای رفتار خطی و ناحیه سوم ناحیه خرابی نمونه است. تعداد سیکل تا شروع ناحیه سوم به عنوان شاخص سیلان (Flow Number) شناخته می‌شود که با FN نشان داده می‌شود. رفتار خزش مخلوط‌های مختلف در دمای ۵۰ درجه در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در نسبت‌های اندک، پودرسنگ و در نسبت‌های بالا، نانورس داری بیشترین عمر خزشی است. با افزایش نسبت فیلر به قیر، کرنش تجمعی در تمامی فیلرها کاهش می‌یابد، اما سرعت کاهش در مخلوط‌های حاوی پودرسنگ بسیار سریع تر است. همان گونه که از شکل ۱٦ مشخص است، مخلوط‌های حاوی فیلرنانورس تحت خزش مقاومت نسبتا بالاتری در مقایسه با دیگر فیلرها دارند. شکل ۱٦ بیانگر کرنش تجمعی محوری نمونه در سیکل ۳۰۰۰ و سیکل ٤۰۰۰ است.

شکل ۱٤. تغییرات کرنش تجمعی با تعدادسیکل در خزش دینامیک



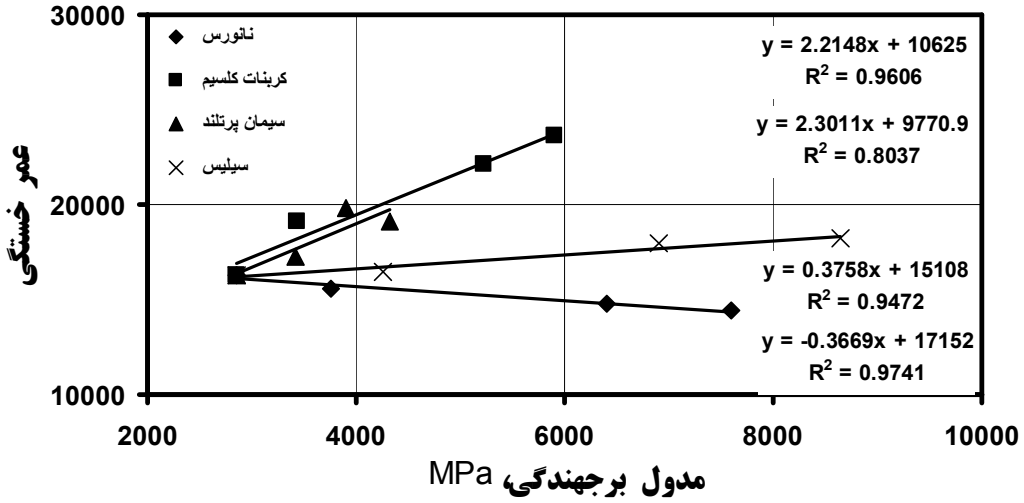
شکل ۱۵. تعداد سیکل جاری شدن و نسبت وزنی فیلر

www.SID.ir

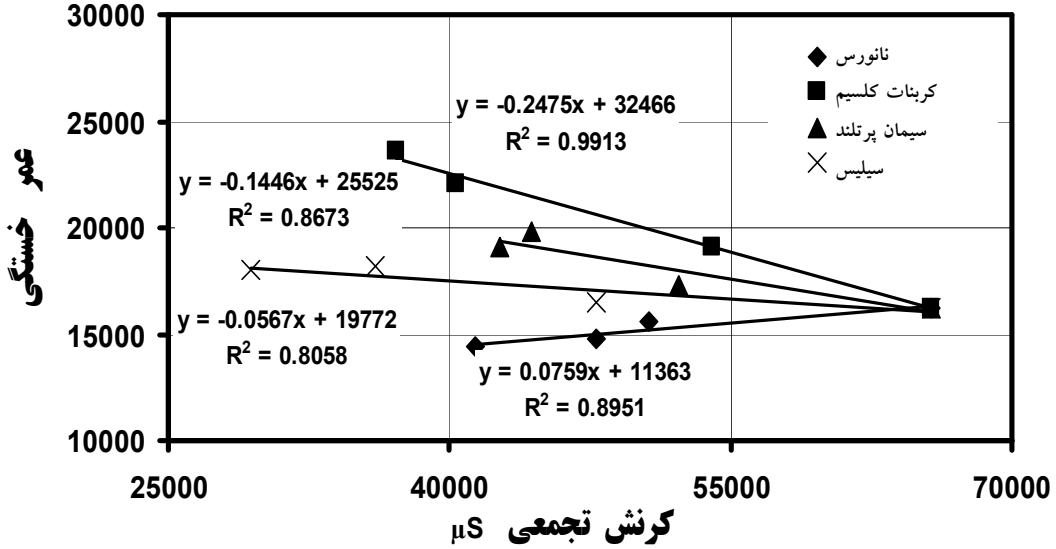


شکل ۱۶. کرنش تجمعی محوری و نسبت وزنی فیلر

ارتباط بین پارامترهای مکانیکی: شکل ۱۷ بیانگر ارتباط بین عمر خستگی و مدول برجهندگی (سفتی) و شکل ۱۸ بیانگر ارتباط بین عمر خستگی و تغییرشکل ماندگار مخلوط‌های مختلف است. در تمامی مخلوط‌ها به جز نانورس (شکل ۱۷) بین مدول برجهندگی و خستگی رابطه مستقیمی با ضریب همبستگی نزدیک به یک وجود دارد و بر عکس در شکل ۱۸ تغییرشکل ماندگار با خستگی ارتباط معکوس داشته، اما ضریب همبستگی همچنان نزدیک به یک است.



شکل ۱۷. ارتباط بین مدول برجهندگی و خستگی نمونه



شکل ۱۸. ارتباط بین کرنش تجمعی در سیکل ۴۰۰۰ و خستگی نمونه

www.SID.ir

Archive of SID

٦. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایشها و ارزیابی انجام شده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد:

• فیلر عملکرد و رفتار مخلوط‌های آسفالتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و حوزه این تأثیر به گونه‌ای است که نمی‌توان فیلر را فقط به عنوان یک پرکننده قلمداد کرد، بلکه بسته به خصوصیات فیزیکی، هندسی و شیمیایی آن، ابعاد وسیع‌تری دارد.

• برخی فیلرها که عموماً از مواد معدنی خنثی و بدون هیچگونه فعل‌وانفعال شیمیایی ساخته شده‌اند، عملکرد خنثی در مخلوط دارند و فقط نقش پرکننده را بازی می‌کنند، اما خصوصیات فیزیکی و هندسی آنها چون دانه‌بندی، شکل هندسی، سطح مخصوص و بافت سطحی می‌تواند عملکرد مکانیکی و رفتار مهندسی مخلوط را تحت تأثیر قرار دهند. برعکس برخی فیلرها که با فعل و انفعالات شیمیایی ساخته شده‌اند و اندرکنش شدیدی با قیر دارند، با افزایش غلظت ماتریس قیر- فیلر می‌توانند چسبندگی و استحکام مخلوط بتن آسفالتی را افزایش دهند.

• سطح مخصوص و بافت سطحی از مشخصات مهم فیلر هستند. افزایش سطح مخصوص باعث افزایش جذب و غلظت ماتریس فیلر- قیر شده و مقدار قیر بهینه را افزایش می‌دهد. همچنین تغییرات در میزان کندروانی، درجه نفوذ و شکل‌پذیری ماتریس قیر- فیلر بارزترین پیامد اثرات ناشی از خصوصیات سطحی فیلر هستند.

• نقش فیلر در ماتریس قیر- فیلر متفاوت از نقش آن در مخلوط بتن آسفالتی است. در ماتریس قیر- فیلر، اندرکنش بین قیر و فیلر مطرح است درحالی که در مخلوط بتن آسفالتی اندرکنش قیر، سنگدانه و فیلر وجود دارد. اندرکنش قیر، سنگدانه و فیلر تابعی از چسبندگی بین سطح سنگدانه‌ها با قیر است که فیلر بر این چسبندگی اثرگذار است.

• پودرسنگ سیلیسی مقاومت مخلوط را تحت بار استاتیکی افزایش می‌دهد، اما در مقابل، بار دینامیکی تاثیر کمتری دارد. احتمالاً این پدیده ناشی از عملکرد پودرسنگ سیلیسی در کاهش حجم منافذ مخلوط است.

• نقش نانورس تحت بار سیکلی بسیار متفاوت است و تحت آزمایش خزش سیکلی مقاومت بیشتری در مقایسه با آزمایش خستگی قطری از خود نشان می‌دهد. همچنین کربنات کلسیم رسوبی عملکرد بهتری نسبت به دیگر فیلرها تحت رفتار خستگی دارد.

• رفتار مخلوط بتن آسفالتی تحت تأثیر نوع، مقدار و خصوصیات فیزیکی، هندسی و شیمیایی فیلر است، به طوری که نتایج آزمایشهای مکانیکی مختلف ثابت کردند که پیوند بین قیر به عنوان ماده چسبنده و سنگدانه به عنوان المان سازه‌ای باربر، تابع مشخصات فیلر مصرفی است. همچنین خصوصیات رئولوژیکی ماتریس قیر- فیلر که وظیفه انتقال و پخش بار در بین سنگدانه‌ها را برعهده دارد، تابع نوع و میزان فیلر است.

• هرچند اثرات دما در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته است، اما انتظار می‌رود تغییرات رئولوژیکی باعث تغییر رفتار مخلوط در دماهای مختلف شود. پودرسنگ سیلیسی خاصیت اسیدی دارد اما کربنات کلسیم رسوبی و سیمان نقش قلیایی دارند و انتظار می‌رود عملکرد خوبی در دماهای بالا داشته باشند.

• در تمامی فیلرها بجز نانورس، بین مدول برجهندگی (سفتی) و خستگی مخلوط‌ها ارتباط مستقیم و بین کرنش تجمعی ماندگار و خستگی رابطه معکوس وجود دارد.

٧. مراجع

1. Anderson, D. A. and Goetz, W. H. (1973) "Mechanical behavior and reinforcement of mineral filler-asphalt mixtures", Proc. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 42, pp. 37-66.

2. Kandal, P.S., Lynn, C.Y. and Parker, F. (1998) "Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures." NCAT Report No. 98-2.

3. Harris, B. M. (1995) "Stuart analysis of mineral fillers and mastics used in stone matrix asphalt." J. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, pp. 54-95.

4. Anderson, D. A. (1987) "Guidelines for use of dust in hot mix asphalt concrete mixture", Proc. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 56, pp. 492-516.

5. Cooley L., Stroup A., Gardiner, M., Brown, E. R., Hanson, D. I. and Fletcher, M. O. (1998) "Characterization of asphalt-filler mortars with superpave binder tests." J. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67, pp. 42-65.

6. Little, Dallas N and Epps, J.A. (2001) "Hydrated lime – More than just a filler", National Lime Association, USA.

www.SID.ir

7. Little, Dallas N. and Petersen, Claine J. (2005) "Unique effects of hydrated lime filler on the performance, Related properties of asphalt cements: Physical and chemical interactions revisited", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 17, No. 2, ASCE, /2005/2-207–218.

8. Bahia, H, Zhai, H. Bonnetti, K and Kose, S. (1999) "Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders." J. Assn. of Asphalt Paving Technologists, Vol. 68, pp. 1-34.

9. Smith. B. J. and S. Hesp. (2000) "Crack pinning in asphalt mastic and concrete." Regular Fatigue Studies In Tarns. Res. Rec. 1728, TRB, Washington, D. C., pp. 75-81.

10. Kavussi, A. and Hicks. R. G. (1997) "Properties of bituminous mixtures containing different fillers." J. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 66, pp. 153-186.

11. Brown, E.R. and Cross, S.A. (1989) "A Study of in-place rutting of asphalt pavements." National Center for Asphalt Technology (NCAT), Report 89-02.

12. Buttlar, W. G., Bozkurt, D., A. Khateeb, G. G., and Waldorf, A. S. (1999) "Understanding asphalts mastic behavior through micromechanics", Proc., Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C.

www.SID.ir