

نقش نانورس و نانوآهک هیدراته در حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی

امیر کاوسی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
پیمان برقبانی (مسئول مکاتبات)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

Email: kavussia@modares.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۰۴

دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۱۵

چکیده:

مواد نانو در سالهای اخیر برای بهبود خواص رئولوژیکی قیر و افزایش مشخصات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بالا بودن هزینه‌های تولید نانو مواد، از جمله موانعی است که استفاده از اینگونه مواد را محدود به کارهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی کرده و مانع کاربرد گسترده آنها در پروژه‌ها شده است. در این تحقیق سعی شده با استفاده از روشهای فنی مناسب که انجام آنها از نظر اقتصادی نیز توجیه پذیر باشد، آهک هیدراته به نانوآهک هیدراته تبدیل شود. سپس اثر آن بر حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی حاوی نانورس و آهک هیدراته مقایسه شود. با استفاده از آسیاب گلولهای سیارهای^۱ در مدت زمان و سرعت چرخش معین و با استفاده از عامل کنترل کننده فرآیند، میانگین اندازه ذرات آهک هیدراته از ۷۶۰ نانومتر به ۲۸۱ نانومتر رسید. میانگین اندازه ذرات نانوآهک هیدراته با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و همچنین نمودارهای دستگاه تشخیص داده شد. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم مخلوط آسفالتی در دو حالت خشک و اشباع نشان داد که نسبت مقاومت کششی مخلوط اصلاح شده با پنج درصد نانوآهک هیدراته (از وزن قیر)، ۵۲ درصد نسبت به نمونه شاهد و نوزده درصد نسبت به نمونه اصلاح شده با بیست درصد آهک هیدراته (از وزن قیر) افزایش داشته است. به علاوه افزودن دو درصد نانورس (Closite 30B) باعث افزایش ۴۹ درصدی نسبت مقاومت کششی شده است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، نانوآهک هیدراته، نانورس، حساسیت رطوبتی

۱. مقدمه

وزن گلوله‌ها، از پارامترهای موثر در اندازه نهایی ذرات هستند. در تحقیقی دیگر [Goh et al., 2011] اثر محلول‌های ضدیخ بر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو مواد، مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق نتیجه آن بود که مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با ۱/۵٪ نانورس و ۱/۵٪ میکرو الیاف کربنی، حداکثر نسبت مقاومت کششی را در مقایسه با دیگر نمونه‌ها داشتند.

با توجه به اینکه اکثر افزودنی‌های در سطح نانو باعث سخت‌شدگی و افزایش مقاومت قیر در برابر شیار افتادگی می‌شوند، بررسی تاثیر برخی از این افزودنی‌ها بر دیگر خواص مخلوط‌های آسفالتی مانند حساسیت رطوبتی لازم به نظر می‌رسد. نانو موادی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نانورس و نانواهک هیدراته هستند. با توجه به این که یکی از انتقاداتی که به کاربرد نانو مواد در روسازی وارد می‌شود، قیمت گران آنهاست، در این تحقیق سعی شده است نانواهک هیدراته با استفاده از روش‌های فیزیکی و کم هزینه، تولید شود. در تحقیق حاضر با استفاده از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای^۲، میانگین اندازه ذرات آهک هیدراته از ۷۶۰ نانومتر به ۲۸۰ نانومتر رسید که کاهش ۶۰ درصدی اندازه ذرات را نسبت به کارهای محققین دیگر نشان می‌دهد. تصاویر SEM و نمودارهای دستگاه DLS تایید کننده‌ی نانسایز شدن ابعاد ذرات آهک هیدراته می‌باشند. در ادامه‌ی تحقیق، تاثیر نانواهک هیدراته تولید شده با دو افزودنی آهک هیدراته و نانورس بر حساسیت رطوبتی یک نوع مخلوط آسفالتی مورد مقایسه قرار گرفت.

۲. مواد و مصالح مورد استفاده

۲-۱ مصالح سنگی و آهک هیدراته

در این تحقیق از یک نوع مصالح سنگی یکی از کارخانه‌های اطراف تهران استفاده شده و آهک هیدراته نیز که برای تبدیل به نانو ذرات مورد استفاده قرار گرفت، از یکی از کارخانه‌های

بر اساس تعریف طرح ملی نانو فناوری در آمریکا، این فناوری به دانش کنترل ماده در ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر اطلاق می‌شود، به طوری که اثرات منحصر بفرد این ابعاد منجر، به ظهور کاربردهای جدیدی از ماده می‌شود [Koo, 2006]. در سالهای اخیر به علت پیشرفت‌های زیاد در این زمینه و مشاهده پتانسیل بسیار بالای مواد در سطح نانو، از مرزهای مهندسی مواد و شیمی خارج شده و زمینه برای فعالیت‌های بین رشته‌ای و دستکاری مواد به منظور اصلاح خواص آنها در دیگر شاخه‌های فناوری نیز فراهم شده است [Steyn, 2008]. پیش زمینه استفاده از نانو مواد در قیر و مخلوط‌های آسفالتی به کاربرد آنها در اصلاح خواص پلیمرها تحت عنوان نانوکامپوزیت‌های پلیمری بازمی‌گردد. افزودنی‌هایی که تاکنون برای اصلاح قیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند در ابعاد میکرومتری قادر به کنترل خواص و ویژگی‌های قیر بوده‌اند. اما نانو مواد با سطح ویژه بالای خود در سطوح نانومتری باعث تقویت و کنترل برخی از خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند. شن و همکاران [Shen et al., 2011] از نانواهک هیدراته با میانگین اندازه ذرات ۶۶۰ نانومتر استفاده کرد که باعث افزایش ۱۵ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی و افزایش ۸ درصدی نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها^۱ (TSR) شد. همچنین نتایج تحقیقات او افزایش ۴۰ درصدی پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ را نشان داد. عمر خستگی قیر در تحقیق او مورد بررسی قرار نگرفت. محققین دیگر [Cheng et al., 2011] نیز اثر نانواهک هیدراته با اندازه ذرات ۶۶۰ نانومتر را بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم^۲ (WMA) با استفاده از سه نوع مصالح بررسی کردند. افزایش ۱۰ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم از نتایج این تحقیق بود. صباح و همکاران [Sabah et al., 2013] با استفاده از آسیاب گلوله‌ای، عمل ریز کردن ذرات آهک هیدراته را انجام دادند. نتیجه آن بود که سرعت چرخش و

نقش نانورس و نانوآهک هیدراته در حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی

جدول ۱. مشخصات آهک هیدراته و مصالح سنگی

نتایج آزمایش XRF											درصد عناصر
درصد افت وزنی در اثر حرارت L.O.I	درصد سولفات‌ها بر حسب SO ₃	درصد اکسید									
		Sr	P ₂ O ₅	سدیم Na ₂ O	پتاسیم K ₂ O	منیزیم MgO	کلسیم CaO	آهن Fe ₂ O	آلومینیم Al ₂ O ₃	سیلیسیم SiO ₂	
۱۰/۹۴	۰/۰۳۹	۰/۰۳۳	۰/۱۶۵	۱/۹۸۴	۲/۶۳۳	۲/۰۴۴	۱۴/۳۱	۳/۴۶۶	۱۰/۹۸	۵۲/۷۴	فیلر مصالح سنگی
۲۳/۹	۰/۵۲۷	۰/۰۲۵	۰/۰۲۶	-	۰/۰۵۸	۰/۴۵۱	۷۳/۷۷	۰/۲۱۶	۰/۲۱۷	۰/۸۰۲	آهک هیدراته

جدول ۲. مشخصات قیر مورد استفاده

نتیجه آزمایش	محدوده آیین نامه		روش آزمایش	نوع آزمایش
	حداکثر	حداقل		
۹۵/۸	۱۰۰	۸۵	ASTM D5	درجه نفوذ (۱/۰ میلی‌متر)
۴۵/۷	۵۲	۴۵	ASTM D36	نقطه نرمی قیر (°C)
+۱۰۰	-	۱۰۰	ASTM D113	قابلیت کشسانی در ۲۵°C (سانتی‌متر)
۱/۰۱۳	۱/۰۱۷	۱/۰۱۳	ASTM D70	وزن مخصوص (g/cm ³)
۲۶۴/۸	۱۰۰۰	۲۰۰	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیکی در دمای ۱۳۵°C (سانتی‌استوکس)

جدول ۳. مشخصات نانورس مورد استفاده (Cloisite 30B)

نتیجه	ویژگی
مونتوریلونیت	پایه
MT2EtOH	اصلاح کننده آلی
کمتر از ۲ درصد	درصد رطوبت
۲۲۷	وزن مخصوص (kg/m ³)
$d_{001} = 1.85nm$	آزمایش XRD
%۱۰	کوچک تر از ۲ میکرومتر
%۵۰	کوچک تر از ۶ میکرومتر
%۹۰	کوچک تر از ۱۳ میکرومتر

سیلیس درفیلر مصالح سنگی (در حدود ۵۰ درصد) و مقادیر زیاد کلسیم در فیلر آهک هیدراته (حدود ۷۰ درصد) بود. آهک هیدراته مورد استفاده الزامات استاندارد ASTM C1۰۹۷-۹۵ را نیز برآورده کرد. میانگین اندازه ذرات آهک هیدراته مورد استفاده با استفاده از دستگاه DLS^۱، ۷۶۰ نانومتر تعیین شد.

صنعتی تهیه شد. دانه‌بندی مصالح سنگی براساس حد وسط دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴) انتخاب شد.

همانطور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، نتایج آنالیز شیمیایی مصالح (با انجام آزمایش XRF) حاکی از وجود مقادیر زیاد

۲-۲ قیر

قیر مورد استفاده از نوع قیر با درجه نفوذ ۱۰۰-۸۵ پالایشگاه اصفهان بود که مشخصات آن در جدول شماره ۲ آورده شده است.

۲-۳ نانورس

نانورس مورد استفاده در این تحقیق از نوع مونتموریلونیت و با نام تجاری Cloisite 30B بوده که مشخصات آن در جدول ۳ آمده است. اصلاح کننده مورد استفاده باعث تغییر خاصیت سطح نانورس از حالت آبدوست به حالت آبگریز می شود.

۳. روش تولید نانوآهک هیدراته

از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای برای تولید نانوذرآهک هیدراته استفاده شد. در این نوع آسیاب که تصویر آن در شکل ۱ آمده است، چهار پارامتر سرعت چرخش، زمان چرخش، نسبت گلوله به پودر^۵ و عامل کنترل کننده فرآیند^۶ (PCA) از متغیرهای فرآیند آسیاب بودند.

عامل کنترل کننده فرآیند به گروهی از افزودنی‌ها اطلاق می شود که در فرآیند آسیاب کاری استفاده می شوند. این مواد با ایجاد تعادل بین شکستن پیوند مواد و اتصال دوباره آنها در فرآیند آسیاب کاری، در نهایت باعث ایجاد ساختاری پایدار می شوند [Pilar et al., 2007]. با انجام آزمایش و انتخاب دوره‌های متفاوت و بررسی محصول تولید شده، ترکیب بهینه‌ای از پارامترها برای دستیابی به کوچک‌ترین سایز ممکن به دست آمد. در ابتدا آسیاب کاری بدون

به کار بردن PCA انجام شد. در خلال فرآیند آسیاب، هر ۲ ساعت نمونه‌برداری برای تعیین اندازه ذرات صورت گرفت. انتخاب سرعت‌های بیش از ۳۰۰ دور بر دقیقه باعث به هم چسبیدن ذرات آهک هیدراته می شد. بر اساس مروری بر مطالعات در زمینه آسیاب پودرهای سرامیکی [Granados-Correa et al. 2009, Ozan Gezerman and Didem Corbacioglu, 2012]، نسبت گلوله به پودر ۵:۱ به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بازدهی بیشتر، انتخاب شد.

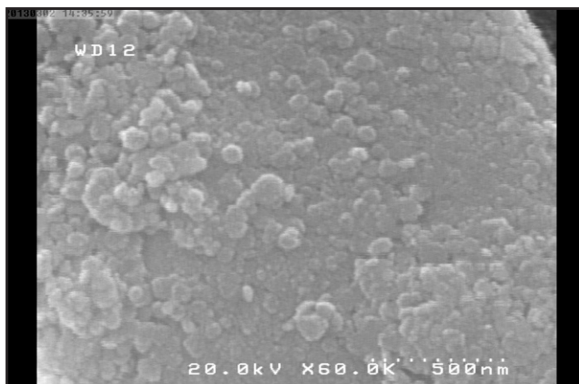
عملیات آسیاب کردن با به کار بردن PCA به میزان ۵٪ وزنی آهک هیدراته نیز انجام شد. از ایزوپروپانول به عنوان PCA در این تحقیق استفاده شد. ایزوپروپانول از خانواده‌ی الکل‌ها بوده و با ایجاد دافعه بین ذرات نانو آهک هیدراته، از به هم چسبیدن آنها به یکدیگر جلوگیری می کند.

۴. تعیین اندازه ذرات نانوآهک هیدراته

از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM^۷ و دستگاه DLS برای تعیین شکل و میانگین اندازه ذرات نانوآهک هیدراته استفاده شد. برای تعیین توزیع اندازه ذرات، لازم بود آهک هیدراته درون مایعی به صورت معلق درآید. به همین منظور از اتانول برای آماده‌سازی نمونه‌ها استفاده شد. قبل از انجام آزمایش DLS، نمونه‌های محلول به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک^۸ در معرض امواج فراصوت قرار گرفتند تا کاملاً همگن شوند. در



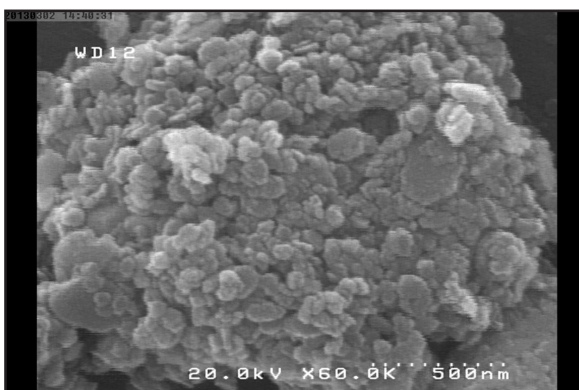
شکل ۱. آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای مورد استفاده



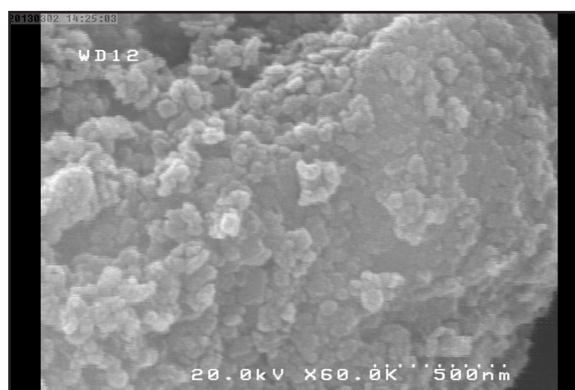
شکل ۳. تصویر SEM ابعاد آهک هیدراته پس از ۲ ساعت آسیاب شدن



شکل ۲. تصویر SEM ابعاد آهک هیدراته قبل از عملیات آسیاب



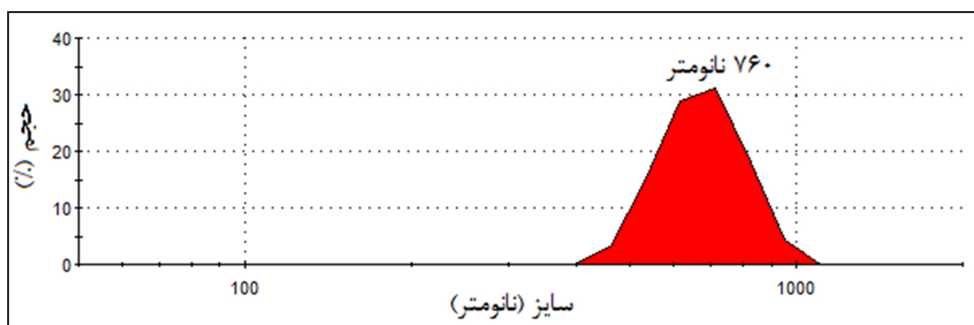
شکل ۵. تصویر SEM ابعاد ذرات آهک هیدراته پس از ۶ ساعت آسیاب شدن



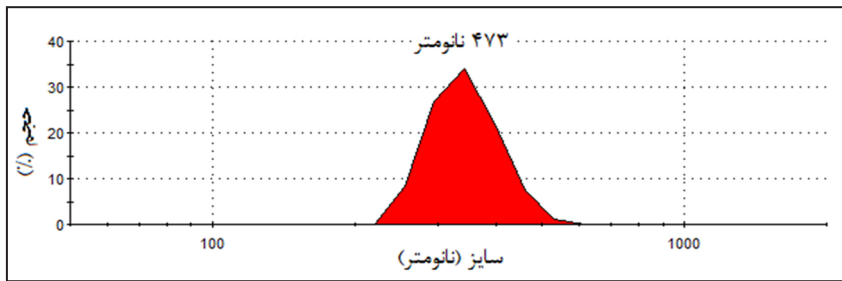
شکل ۴. تصویر SEM ابعاد ذرات آهک هیدراته پس از ۴ ساعت آسیاب شدن

سطح ویژه‌ی آهک هیدراته نیز در اثر به وجود آمدن این ساختار است. هرچه سطح ویژه افزودنی‌های قیر بیشتر باشد، اندرکنش بهتری بین قیر و اصلاح کننده صورت می‌گیرد. در تصاویر ۶ الی ۹ نمونه‌های از نمودارهای توزیع اندازه ذرات آهک هیدراته آسیاب شده با PCA آورده شده است. محور افقی مشخص کننده اندازه ذرات بر حسب نانومتر و محور قائم نشان‌دهنده درصد ذرات است. میانگین اندازه ذرات با قلم بزرگ تر در این اشکال

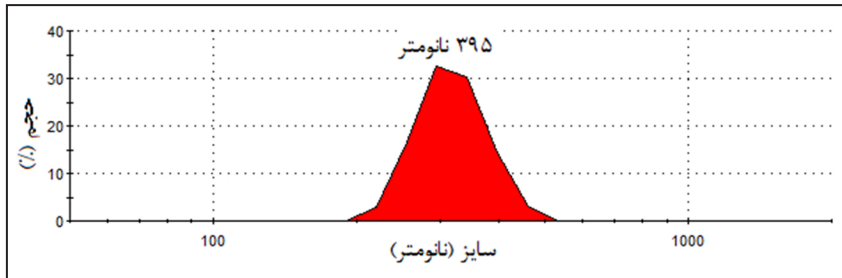
شکل‌های ۲ الی ۵ تصاویر SEM آهک هیدراته آسیاب شده با حضور PCA بر حسب مدت زمان آسیاب مشاهده می‌شود. همان گونه که در تصاویر SEM فوق‌الذکر مشاهده می‌شود، آهک هیدراته دارای ساختاری صفحه‌ای و مسطح است. صفحات آهک هیدراته پس از آسیاب شدن به صورت ذرات کروی به هم پیوسته در می‌آیند. با افزایش زمان آسیاب (تا ۶ ساعت) تعداد صفحاتی که به شکل ذرات کروی درآمده اند، افزایش می‌یابد. افزایش



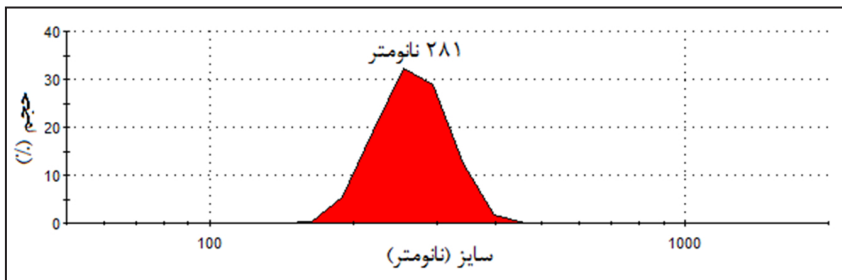
شکل ۶. توزیع اندازه ذرات آهک هیدراته قبل از آسیاب



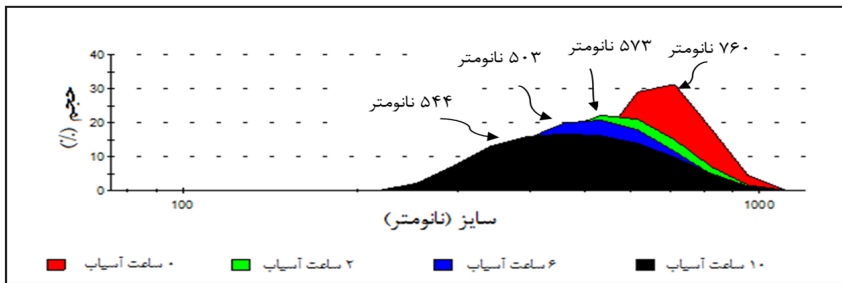
شکل ۷. توزیع اندازه ذرات بعد از ۲ ساعت آسیاب شدن



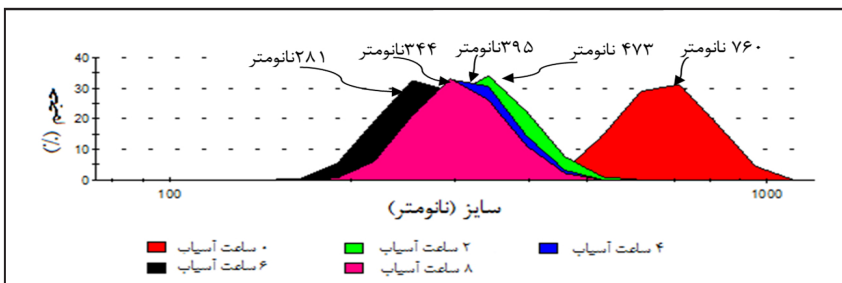
شکل ۸. توزیع اندازه ذرات بعد از ۴ ساعت آسیاب شدن



شکل ۹. توزیع اندازه ذرات بعد از ۶ ساعت آسیاب شدن



شکل ۱۰. توزیع اندازه ذرات آهک هیدراته پس از آسیاب بدون PCA



شکل ۱۱. توزیع اندازه ذرات آهک هیدراته پس از آسیاب با PCA

نشان داده شده است.

۲- استفاده از عامل کنترل کننده فرآیند (PCA) که باعث جلوگیری از لخته شدن نانو ذرات آهک هیدراته می‌شود. لازم به ذکر است که میانگین اندازه ذرات دو هفته پس از ساخت نانوذرات تعیین شد که نشان‌دهنده پایدار بودن این ماده است.

۵. اختلاط قیر و افزودنیها

در این تحقیق، هر سه نوع افزودنی (نانواهک هیدراته، نانورس، آهک هیدراته) با استفاده از همزن با برش زیاد^۹ با قیر مخلوط شدند. بر اساس مروری بر مراجع، سرعت دوران، دما و زمان اختلاط نانورس با قیر به ترتیب 5200 rpm ، 155°C و 30 دقیقه انتخاب شدند [Ghaffarpour Jahromi and Ahmadi, 2011]. Liu, 2011]. برای اختلاط آهک هیدراته نیز 3500 rpm ، 160° و 20 دقیقه و برای نانواهک هیدراته 40 دقیقه انتخاب شد [Diab et al., 2013 Kabir, 2008 and]. در جدول ۴ جزئیات اختلاط این افزودنی‌ها آمده است.

۶. طرح اختلاط

از روش مارشال (ASTM D-1559) برای طرح اختلاط مخلوط آسفالتی حاوی افزودنیهای فوق‌الذکر استفاده شد. درصد قیرهای $4/5$ تا $6/5$ درصد برای یافتن میزان قیر بهینه بکار برده شدند. در انتها بر اساس نمودارهای طرح اختلاط، مقدار 6% به عنوان میزان قیر بهینه مخلوط تعیین شد. با این میزان قیر بهینه، درصد فضای خالی در بازه 3 تا 5 درصد قرار گرفته و روانی حاصل از آزمایش مارشال نیز بین 2 تا 3 میلیمتر قرار گرفت تا الزامات آیین‌نامه روسازی‌های آسفالتی ایران (نشریه شماره ۲۳۴) نیز تامین شود. با توجه به نمودار دما-ویسکوزیته قیر، دماهای مناسب برای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی با تعیین حدود کندروانی مطلوب برای اختلاط (170 ± 20 سانتی استوکس) و تراکم (280 ± 30 سانتی استوکس) به ترتیب 140°C و 132°C به دست آمد.

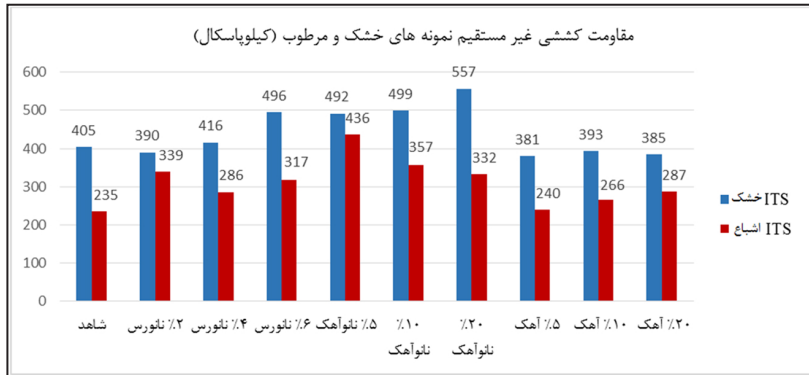
شکل ۱۰ توزیع اندازه ذرات آهک هیدراته آسیاب شده بدون حضور PCA را نشان می‌دهد. سایز ذرات از 760 نانومتر، پس از 2 ساعت آسیاب شدن به 573 نانومتر، پس از 6 ساعت آسیاب به 503 نانومتر و پس از 10 ساعت آسیاب به 544 نانومتر رسید. شکل ۱۱ توزیع اندازه ذرات آهک هیدراته آسیاب شده با حضور PCA را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود کوچک ترین سایز ذرات پس از 6 ساعت آسیاب حاصل می‌شود که 281 نانومتر است. پس از 6 ساعت، میانگین اندازه ذرات به علت افزایش انرژی سطحی و جذب ذرات توسط یکدیگر زیاد شده، و در 8 ساعت به 344 نانومتر میرسد.

در حالی که آسیاب بدون PCA انجام شده است، نمودار توزیع اندازه ذرات با افزایش زمان آسیاب به سمت چپ منتقل شده و عرض نمودار نیز بیشتر شده است. به عبارت دیگر میتوان نتیجه گرفت که با افزایش زمان آسیاب، ذرات آهک هیدراته بیشتر به یکدیگر می‌چسبند. اما در حالتی که PCA بکار برده شده است، به علت عدم چسبندگی بین ذرات، عرض نمودار تغییری نکرده است. تحقیقات پیشین [Shen et al., 2011] نشان می‌دهد با بکارگیری دستگاه سایش لس آنجلس، میانگین اندازه ذرات آهک هیدراته در مدت 90 دقیقه از $1,3$ میکرون به 660 نانومتر می‌رسد و افزایش زمان آسیاب تاثیری در اندازه ذرات نخواهد داشت. در تحقیق حاضر، نانواهک تولید شده با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای، دارای میانگین اندازه ذرات 280 نانومتر بود که کاهش 60 درصدی نسبت به کارهای گذشته را نشان می‌دهد. علت کمتر شدن سایز ذرات نانواهک هیدراته تولید شده در این تحقیق را نسبت به کارهای محققین گذشته میتوان در دو عامل زیر خلاصه کرد:

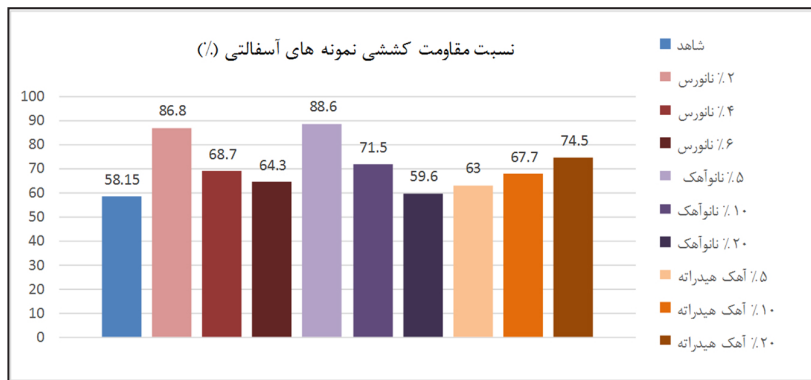
۱- استفاده از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای که دارای انرژی و سرعت بیشتری نسبت به دستگاه‌های دیگر است.

جدول ۴. شرایط اختلاط قیر و افزودنی‌ها

افزودنی	مدت زمان اختلاط (دقیقه)	سرعت همزن (rpm)	دمای اختلاط (° C)
نانوآهک هیدراته	۴۰	۳۵۰۰	۱۶۰
نانورس	۳۰	۵۲۰۰	۱۵۵
آهک هیدراته	۲۰	۳۵۰۰	۱۵۵



شکل ۱۲. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های آسفالتی (ITS) حاوی افزودنی های مختلف



شکل ۱۳. نسبت مقاومت کششی (TSR) نمونه های آسفالتی حاوی افزودنی های مختلف

۷. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) مطابق با استاندارد AASHTO T283 بر روی نمونه های خشک و نمونه های اشباع شده در آب انجام شد. پس از اختلاط، نمونه های متراکم نشده، به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق و پس از آن به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. سپس برای فراهم کردن شرایط تراکم، نمونه ها به مدت ۲ ساعت در دمای تراکم قرار گرفتند. برای رسیدن به درصد فضای خالی 7 ± 0.5 درصد که برای انجام آزمایش ITS در شرایط خشک و اشباع توصیه شده

است، تعداد ضربات چکش مارشال (با روش سعی و خطا) ۷۱ ضربه انتخاب شد. نمونه ها پس از ساخت به دو دسته تقسیم شدند. دسته اول (نمونه های خشک) قبل از آزمایش به مدت ۲ ساعت درون پوشش پلاستیکی در دمای C ۲۵ قرار گرفتند. دسته دوم پس از اشباع شدن در شرایط خلأ (۷۰ تا ۸۰ درصد)، حداقل به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد و سپس ۲۴ ساعت در آب ۶۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند تا شرایط ذوب و یخبندان شبیه سازی شود. پس از این مراحل، نمونه ها به مدت ۲ ساعت در آب ۲۵ درجه سانتیگراد گذاشته شدند تا به

دمای موردنظر برای انجام آزمایش برسند. نتایج این آزمایش در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آمده است.

۸. تحلیل نتایج

مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ی اصلاح شده با ۲۰ درصد نانواهک در حالت خشک، دارای بیشترین مقدار در بین نمونه‌ها بوده و افزایش ۳۷ درصدی نسبت به نمونه شاهد داشته است. علت این افزایش را می‌توان در افزایش ویسکوزیته قیر اصلاح شده و همچنین افزایش سختی مخلوط آسفالتی دانست. با افزایش درصد نانورس و نانواهک هیدراته در مخلوط‌ها، مقاومت کششی در حالت خشک افزایش می‌یابد. علت این امر، افزایش ویسکوزیته قیر و در نهایت سخت شدگی مخلوط‌های اصلاح شده است.

با افزایش میزان نانورس و نانواهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی، مقدار TSR کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، افزایش میزان نانورس و نانواهک هیدراته با زیاد شدن فاصله بین $ITS_{خشک}$ و $ITS_{مرطوب}$ همراه است.

$ITS_{خشک}$ این نمونه‌ها به دلایل مذکور در بند پیش افزایش یافته است. اما $ITS_{مرطوب}$ به همان نسبت افزایش نیافته است و بعضاً کاهش نیز داشته است. همین امر موجب کاهش TSR شده است. نمونه اصلاح شده با ۵٪ نانواهک هیدراته دارای بیشترین مقدار TSR در بین نمونه‌ها است. افزایش بیشتر مقدار نانواهک هیدراته باعث کاهش نسبت مقاومت کششی شده است. این در حالی است که با افزایش درصد آهک هیدراته از ۵ تا ۲۰ درصد وزنی قیر، TSR مخلوط آسفالتی افزایش یافته است. شاید این دو روند را اینگونه بتوان توجیه کرد که نانواهک هیدراته به علت دارا بودن سطح مخصوص بیشتر، در درصد‌های کمتری در مقایسه با آهک هیدراته باعث افزایش نسبت مقاومت کششی می‌شود.

نتایج نشان دادند که افزودن ۵٪ نانواهک هیدراته، باعث افزایش

۵۲ درصدی TSR در مقایسه با نمونه شاهد شده است. همچنین این مقدار ۱۹٪ بیش از نمونه اصلاح شده با ۲۰٪ آهک هیدراته بود. این بدان معنی است که می‌توان به جای ۲۰٪ آهک هیدراته، از ۵٪ نانواهک هیدراته با ۱۹٪ TSR بیشتر استفاده کرد.

افزودن ۲٪ نانورس به قیر باعث افزایش ۴۹ درصدی TSR شده است. به این ترتیب با استفاده از این آزمایش می‌توان به درصد بهینه این مواد در مخلوط آسفالتی نیز رسید. افزایش بیشتر میزان نانورس باعث کاهش TSR شده است. شاید علت این امر را بتوان سخت شدگی بیش از حد مخلوط‌های اصلاح شده با ۴ و ۶ درصد نانورس دانست که باعث افزایش $ITS_{خشک}$ شده اما $ITS_{مرطوب}$ آنها تغییر چندانی نداشته و در نتیجه TSR کاهش یافته است.

تنها دو مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ۲٪ نانورس و ۵٪ نانواهک هیدراته، الزامات آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) را در مورد حداقل مقدار نسبت مقاومت کششی (۸۰٪) تامین کرده‌اند.

۹. تحلیل آماری نتایج

آزمون t برای بررسی چگونگی تغییر یا عدم تغییر میانگین TSR نمونه‌ها و با فرض نرمال بودن توزیع میانگین داده‌ها انجام شد. این آزمون برای مقایسه میانگین نمونه‌های اصلاح شده با میانگین نمونه‌های شاهد انجام گرفت. نمونه شاهد با شماره ۱ و نمونه‌های اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانورس، نانواهک هیدراته و آهک هیدراته به ترتیب از ۲ تا ۱۰ شماره گذاری شدند. فرضیه‌های "صفر" و "جایگزین" برای مقایسه نمونه شماره ۲ با نمونه شاهد عبارتند از (μ میانگین داده‌ها است):

فرضیه صفر: $\mu_2 > \mu_1$ فرضیه جایگزین: $\mu_2 < \mu_1$

این فرضیه به همین صورت برای داده‌های ۳ تا ۱۰ نیز موجود است.

آماره t_0 به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$t_0 = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \times \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{(n_1 - 1)s_x^2 + (n_2 - 1)s_y^2}} \quad (1)$$

در این رابطه n_1 و n_2 تعداد تکرارهای هر تست است که هر دو برابر ۳ هستند. \bar{x} و \bar{y} میانگین هر سری از داده‌ها هستند. S_x و S_y انحراف معیار داده‌ها هستند. t_{cr} نیز با توجه به سطح اطمینان فرض شده (۹۰ درصد) و درجه آزادی ($n_1 + n_2 - 2 = 4$) از جداول مربوطه، ۱٫۵۳۳ به دست می‌آید. در صورتی که $t_0 > t_{cr}$ باشد، فرضیه صفر رد نخواهد شد. در جدول ۵ نتایج این آزمون آماری برای تمامی داده‌ها آورده شده است.

با توجه به جدول ۵، فرضیه صفر در مورد نمونه‌های زیر رد نمی‌شود و از لحاظ آماری، میانگین TSR این نمونه‌ها بیشتر از نمونه شاهد است:

۲٪ نانورس، ۵٪ و ۱۰٪ نانواهک، ۱۰٪ و ۲۰٪ آهک

فرضیه صفر در مورد دیگر نمونه‌ها رد می‌شود و نمی‌توان در مورد افزایش TSR این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد اظهار نظری داشت.

۹. نتیجه‌گیری

۱- با بکارگیری دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای و بدون استفاده از عامل کنترل کننده فرآیند (PCA)، میانگین اندازه ذرات آهک هیدراته پس از ۶ ساعت آسیاب، ۵۰۳ نانومتر اندازه‌گیری شد. با استفاده از عامل کنترل کننده فرآیند، میانگین اندازه ذرات پس از

۶ ساعت آسیاب به ۲۸۱ نانومتر رسید. در هر دو حالت، با افزایش زمان آسیاب به دلیل به هم چسبیدن ذرات، میانگین اندازه ذرات افزایش یافت. به این ترتیب مدت زمان ۶ ساعت به عنوان زمان بهینه برای آسیاب شناسایی شد.

۲- عرض نمودار توزیع اندازه ذرات در حالت بدون استفاده از PCA با افزایش زمان آسیاب افزایش یافت اما در حالت استفاده از PCA، عرض نمودار با افزایش زمان آسیاب تغییر چندانی نیافت. علت این امر، نقش PCA در جلوگیری از به هم پیوستن دوباره‌ی ذرات نانواهک هیدراته پس از شکسته شدن پیوند بین آنها است.

۳- با توجه با آزمون آماری انجام شده، نتیجه گرفته شد که میانگین TSR نمونه‌های اصلاح شده با ۲٪ نانورس، ۵٪ و ۱۰٪ نانواهک، ۱۰٪ و ۲۰٪ آهک بیشتر از نمونه‌ی شاهد بودند.

۴- نتایج نشان دادند که افزودن ۵٪ نانواهک هیدراته، باعث افزایش ۵۲ درصدی TSR در مقایسه با نمونه شاهد شده است. همچنین این مقدار ۱۹٪ بیش از نمونه اصلاح شده با ۲۰٪ آهک هیدراته بود.

۵- نمونه اصلاح شده با ۵٪ نانواهک هیدراته دارای بیشترین مقدار TSR (۸۸/۶٪) در بین نمونه‌ها بوده است. افزایش بیشتر مقدار نانواهک هیدراته باعث کاهش نسبت مقاومت کششی شده است. سطح مخصوص زیاد نانواهک هیدراته، باعث شده است این ماده در درصد‌های پایین باعث بهینه شدن نسبت مقاومت کششی شود.

۶- با افزایش میزان آهک هیدراته در قیر از ۵ تا ۲۰ درصد وزنی

جدول ۵. پارامترهای آماری خروجی آزمایشات

نمونه	۲٪ نانورس	۴٪ نانورس	۶٪ نانورس	۵٪ نانواهک	۱۰٪ نانواهک	۲۰٪ نانواهک	۵٪ آهک	۱۰٪ آهک	۲۰٪ آهک
میانگین	۰٫۸۶۸	۰٫۶۸۷	۰٫۶۴۳	۰٫۸۸۶	۰٫۷۱۵	۰٫۵۹۶	۰٫۶۳	۰٫۶۷۷	۰٫۷۴۵
واریانس	۰٫۰۶۳۷	۰٫۰۲	۰٫۰۵۱۵	۰٫۰۹۴۲	۰٫۰۰۱۴	۰٫۰۱۶۵	۰٫۰۰۳۹۷	۰٫۰۰۰۲	۰٫۰۲۴۳
آماره t_0	۱٫۸۴۵	۱٫۰۸	۰٫۴۳۴	۱٫۶۴۶	۲٫۳۱	۰٫۱۵۸	۰٫۷۴۹	۱٫۷۵۸	۱٫۵۶۱
t_{cr}	۱٫۵۳۳	۱٫۵۳۳	۱٫۵۳۳	۱٫۵۳۳	۱٫۵۳۳	۱٫۵۳۳	۱٫۵۳۳	۱٫۵۳۳	۱٫۵۳۳

-Cheng, J., Shen, J. and Xiao, F. (2011) "Moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing nanosized hydrated lime", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.23, No.11, pp.1552-1559.

-Diab, A., You, Z. P. and Wang, H. N. (2013) "Using modified creep and recovery tests to evaluate the foam-based warm mix asphalt contained nano hydrated lime", *Advanced Materials Research*, Vol.646, No., pp.90-96.

-Ghaffarpour Jahromi, S. and Ahmadi, N. A. (2011) "Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures", *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol.4, No.6, pp.941-944.

-Goh, S. W., Akin, M., You, Z. and Shi, X. (2011) "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture", *Construction and Building Materials*, Vol.25, No.1, pp.195-200.

-Granados-Correa, F., Bonifacio-Martinez, J. and Serrano-Gomez, J. (2009) "The ball milling effect on tribasic calcium phosphate and its chromium (VI) ion sorption properties", *Journal of the Chilean Chemical Society*, Vol.54, No., pp.252-255.

-Kabir, S. (2008) "Effect of hydrated lime on the laboratory performance of superpave mixtures", *Master of Science Thesis, Louisiana State University*.

-Koo, J. (2006) "Polymer nanocomposites", *United States, McGraw-Hill*.

-Liu, G. (2011) "Characterization and identification of bituminous materials modified with montmorillonite

قیر، TSR از ۶۳ تا ۷۴/۵ درصد افزایش یافته است. اما با افزایش میزان نانواهک هیدراته از ۵ تا ۲۰ درصد وزنی قیر، مقدار TSR از ۸۸/۶ تا ۵۹/۶ درصد کاهش یافته است. میتوان نتیجه گرفت نانواهک هیدراته به علت دارا بودن سطح مخصوص بیشتر و اندرکنش بهتر با قیر، در درصدهای کمتری در مقایسه با آهک هیدراته، باعث افزایش نسبت مقاومت کششی می‌شود.

۷- افزودن ۲٪ نانورس به قیر باعث افزایش ۴۹ درصدی TSR شده است. افزایش بیشتر میزان نانورس باعث کاهش TSR گردید. شاید علت این امر را بتوان سخت شدگی مخلوطهای اصلاح شده با ۴ و ۶ درصد نانورس دانست که باعث افزایش $ITS_{خشک}$ شده اما $ITS_{مرطوب}$ آنها تغییر چندانی نداشته و در نتیجه TSR کاهش یافته است.

۸- همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، تنها با دو مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ۲٪ نانورس و ۵٪ نانواهک هیدراته، الزامات آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) در مورد حداقل مقدار نسبت مقاومت کششی (۸۰٪) تامین شده است.

۱۰. پی نوشتها

1. Tensile Strength Ratio
2. Warm Mix Asphalt
3. Planetary ball mill
4. Dynamic Light Scattering
5. Ball to Powder Ratio
6. Process Control Agent
7. Scanning Electron Microscopy
8. Ultrasonic
9. High Shear Mixer
10. Indirect Tensile Strength

۱۱. مراجع

nanoclay”, Master of Science Thesis, Wuhan University of Technology.

-Ozan Gezerman, A. and Didem Corbacioglu, B. (2012) “Use of uniform-sized balls to improve the manufacturing of CaCO₃ in ball mills”, International Journal of Modern Chemistry, Vol.1, No.3, pp.116-124.

-Pilar, M., Suñol, J. J., Bonastre, J. and Escoda, L. (2007) “Influence of process control agents in the development of a metastable Fe–Zr based alloy”, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol.353, No.8-10, pp.848-850.

-Sabah, E., Özdemir, O. and Koltka, S. (2013) “Effect of ball mill grinding parameters of hydrated lime fine grinding on consumed energy”, Advanced Powder Technology, Vol.24, No.3, pp.647-652.

-Shen, J., Huang, B., Shu, X. S. and Tang, B. (2011) “Size effect of sub nano-scaled hydrated lime on selected properties of HMA”, International Journal of Pavement Research and Technology, Vol.4, No.4, pp.252-257.

-Steyn, W. (2008), “Research and application of nanotechnology in transportation”, 27th Annual Southern African Transport Conference, 2008 South Africa.