

دوفصلنامه علمی - ترویجی کارافن

شماره چهل و پنجم، بهار و تابستان 1398 (صص 127-150)

شاپای چاپی: 2382-9796 شاپای الکترونیکی: 2538-4430

<http://karafan.tvu.ac.ir>



## مقایسه اثر افزودنی‌های نوین بر مشخصه‌های فنی بتن آسفالتی با دانه‌بندی قشر رویه

رامین بیات\*

مربی، آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

حسن طاهرخانی

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

محمدرضا حبیبی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

تاریخ پذیرش نهایی: 1398/05/20

تاریخ دریافت مقاله: 1398/04/15

### چکیده

در چند دهه اخیر استفاده از افزودنی‌ها در بتن آسفالتی به طور گسترده‌ای رواج یافته است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نانورس و الیاف پلی‌پروپیلن اشاره کرد. از این افزودنی‌ها در مهندسی عمران و به‌ویژه روسازی برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. در این پژوهش، با افزودن درصد‌های مختلف نانورس و الیاف پلی‌پروپیلن به صورت مجزا و مشترک در مخلوط آسفالتی و انجام آزمایش‌های مارشال، آنالیز داده‌ها و ترسیم نمودارهای لازم، مشاهده شد که افزایش مقاومت مارشال، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی و درصد فضای خالی مصالح سنگی، نسبت مستقیم با این افزودنی‌ها دارند، و با روانی، درصد فضای پُر شده با قیر و وزن مخصوص، نسبت معکوس دارند. با توجه به نتایج و حدود مشخصات،

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [ramin.bayat67@gmail.com](mailto:ramin.bayat67@gmail.com)

درصد بهینه برای ترکیب نانورس و الیاف، 3 درصد نانورس و 0/3 درصد الیاف به دست آمد که بهترین تأثیرات را در بین حالت‌های آزمایش روی مخلوط آسفالتی داشته است. نتایج نشان می‌دهد نانورس نقش پُرکنندگی بالایی داشته، چسبندگی بین مصالح و قیر را بهبود بخشیده، افزایش حجم قیر را در پی داشته و در نهایت موجب افزایش ضخامت غشای قیری در اطراف سنگدانه‌ها می‌شود. در ضمن الیاف خاصیت مسلح‌کنندگی داشته، جذب مصالح و قیر شده است و با مخلوط واکنش شیمیایی دارد.

#### واژگان کلیدی:

الیاف پلی‌پروپیلن، بتن آسفالتی، دانه‌بندی، قشر رویه، نانورس.

## 1. مقدمه

شبکه راه‌ها بخش قابل توجهی از ثروت‌های ملی هر کشور را تشکیل می‌دهند. ساخت، نگهداری و ترمیم روسازی‌های آسفالتی اغلب اعتبارات مالی هنگفتی را به خود اختصاص می‌دهند و معمولاً هزینه‌های نگهداری بعدی از هزینه‌های اولیه ساخت به مراتب بیشتر است؛ بنابراین لازم است تا به کارگیری روسازی با کیفیت مطلوب و عمر مناسب همواره مدنظر قرار گیرد؛ از این رو راهکارهایی که منجر به افزایش دوام، کیفیت و عمر روسازی آسفالتی و جلوگیری از خرابی‌های زودرس لایه‌های آسفالتی می‌شوند، همواره مورد توجه پژوهشگران و دست‌اندرکاران صنعت راهسازی بوده‌اند.<sup>(1)</sup>

قشر رویه، آخرین قشر آسفالتی است که در تماس مستقیم با بارهای وارده از ترافیک و عوامل جوئی محیط قرار می‌گیرد؛ از این رو باید طوری طراحی و اجرا شود که در مقابل اثرات سوء آب، یخبندان و تغییرات دما از پایایی و مقاومت لازم برخوردار باشد.<sup>(14و)</sup>

روسازی‌ها به مرور زمان و با توجه به شیوه بهره‌برداری، حجم ترافیک و شرایط آب‌وهوای منطقه‌ای که راه از آن عبور می‌کند و مشخصه‌های فنی و اجرایی اولیه، به تدریج فرسوده شده و خرابی در آن‌ها پدید می‌آید. وسعت و شدت این خرابی‌ها علاوه بر عوامل گفته شده، تابعی از شرایط و شیوه نگهداری راه است که باید با آغاز بهره‌برداری از سیستم، به طور اصولی و مستمر انجام شود. خرابی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر در اثر دو عامل ترک خوردگی یا شیارشدگی روی می‌دهد. عامل شیارشدگی عموماً در اثر عبور بارهای بیش از توان روسازی است، ولی ترک‌ها معمولاً در اثر تکرار عبور وسایل نقلیه با وزن‌های مختلف و انقباض و انبساط روسازی در اثر تغییرات دمایی به وجود می‌آید. از میان این دو مکانیزم، ترک‌های خستگی به مقدار زیاد در روسازی آسفالتی دیده می‌شود.<sup>(31)</sup>

مقاومت مخلوط‌های آسفالتی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مصالح آسفالتی است که چه در طراحی مخلوط‌های آسفالتی و چه در طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زمانی که یک روسازی انعطاف‌پذیر تحت تأثیر بارهای تکراری ناشی از وسایل نقلیه قرار می‌گیرد، لایه روسازی به صورت یک تیر خمشی عمل کرده و در زیر بار چرخ و در سطح روسازی، تنش‌های فشاری به وجود می‌آید و در پایین‌ترین لایه آسفالتی تنش‌ها یا کرنش‌های کششی ایجاد می‌شود. چنان‌چه تنش‌ها و کرنش‌های کششی ناشی از تکرار بارگذاری وسایل نقلیه در زیر لایه‌های آسفالتی از تنش‌های مجاز کششی یا کرنش‌های مجاز کششی آن لایه آسفالتی تجاوز کند، به ایجاد ترک‌هایی در زیر لایه آسفالتی می‌انجامد که در نهایت به سطح روسازی انتقال می‌یابد.<sup>(1)</sup> استفاده از نانوفناوری و الیاف‌های پلیمری برای بهبود رفتار مخلوط‌های آسفالتی، یکی از مفاهیم نوپدید در سال‌های اخیر است. امروزه استفاده از نانورس و الیاف، تأثیر بسزایی در خواص مکانیکی و فیزیکی مخلوط‌های آسفالتی دارد.

## 2. پیشینه تحقیق

در رابطه با استفاده از فناوری نانو و الیافها در روسازی آسفالتی در ایران و سایر کشورها، تحقیقاتی صورت گرفته است که در این بخش به اختصار به آنها پرداخته می‌شود. خدادادی (1386) در تحقیقی به این نتیجه دست یافت که کاربرد نانورس در کارایی درازمدت آسفالت بسیار مؤثر است و افزایش تنها دو درصد نانورس به قیر، سبب افزایش تعداد سیکل‌های طی شده برای رسیدن به مراحل دوم و سوم شکست خمشی می‌شود.<sup>(4)</sup> همچنین جهرمی و همکاران (2009) استفاده از دو نوع ساختار لایه‌ای و پراکنشی را در ترکیب نانورس در قیر و پلیمر بررسی کردند. ساختار لایه‌ای بیشترین تقویت را در بستر پلیمری ایجاد می‌کند و برای بررسی نوع ساختار نانورس می‌توان از آنالیز XRD بهره گرفت.<sup>(14)</sup> چانگ<sup>1</sup> (2009) در پژوهشی نتیجه گرفت استفاده از نانورس در مخلوط آسفالتی سبب افزایش عمر روسازی‌های آسفالتی می‌شود.<sup>(17)</sup> استین<sup>2</sup> و همکاران (2009) در پژوهشی با عنوان عملکردهای نانوفناوری در مهندسی روسازی بر افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نانورس تأکید کردند.<sup>(18)</sup> گایل<sup>3</sup> (2006) در پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد خود با عنوان تأثیر نانورس بر خواص رئولوژی قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی نتیجه گرفت مخلوط آسفالتی با افزایش نانورس تا سه درصد، به نسبت مخلوط بدون نانورس، استحکام بالاتری دارد.<sup>(15)</sup>

جهرمی (1390) نیز در دو تحقیق مختلف نتیجه‌گیری کرد کاربرد نانورس در قیر، درصد قیر بهینه را اندکی افزایش داده و از حساسیت آن می‌کاهد و افزودن این نانوافزودنی، مدول برجهندگی قیر را بالا می‌برد. این افزایش در دمای پایین مشهودتر است که می‌تواند ناشی از پخش خوب نانورس‌ها در قیر باشد. همچنین این اصلاح‌کننده توانایی بهبود رفتار خستگی - به‌ویژه در دمای پایین را ندارد.<sup>(13و3)</sup> قاسمی<sup>4</sup> و همکاران (2012) در مطالعات خود نشان دادند آسفالت اصلاح‌شده با نانوسیلیس دارای سختی بیشتری نسبت به نمونه اصلاح‌نشده است، به طوری که افزودن 2 درصد نانوسیلیس بیشترین تأثیر را در بهبود مشخصه‌های فیزیکی مخلوط آسفالتی دارد.<sup>(19)</sup> خدایی و همکاران نیز در پژوهشی نتیجه گرفتند افزودن نانورس به قیر، سفتی، ویسکوزیته (چسبندگی) و مقاومت برشی قیر را افزایش می‌دهد که این امر به کاهش روانی مخلوط آسفالتی می‌انجامد.<sup>(13)</sup>

شکرچی‌زاده و همکاران (1387) در پژوهشی پی بردند که معمولاً دو نوع نانورس به نام‌های رس و نانوفیل در اصلاح قیر استفاده می‌شود که در این میان، رس تأثیرات بهتری دارد و این یعنی در اصلاح قیر باید به نوع نانورس نیز توجه کرد.<sup>(6)</sup> تن‌زاده و همکاران (1391) در تحقیقی اعلام کردند در

1. Chong, K. P  
3. Ghile, D. B

2. Steyn, W. J. M  
4. Ghasemi

محیط‌های با درجه حرارت بالا، عملکرد آسفالت بسیار پیچیده بوده و مقدار مدول دینامیکی آسفالت کمتر می‌شود. آن‌ها با استفاده از فناوری نانو در آسفالت از طریق یک ماده با ساختار پلیمری، قیر اصلاح‌شده پلیمری تشکیل دادند که نقش مهمی در اصلاح مدول دینامیکی آسفالت به همراه داشت. (2) ژن‌پینگ‌یو<sup>1</sup> و همکاران (2003) در پژوهشی با عنوان آسفالت اصلاح‌شده با نانورس که به بحث درباره شیوه آماده‌سازی و ویژگی‌های آن اشاره داشت، بیان کردند که مقاومت آسفالت حاوی نانورس در برابر شیارشدگی بیشتر است و ویژگی‌های قیر را بهتر از SBS اصلاح می‌کند. (16)

فیروززی و همکاران (1391) در مطالعات خود نتیجه گرفتند با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و سیمان به مخلوط آسفالتی، روانی آن کاهش یافته و وزن مخصوص افزایش می‌یابد. بررسی‌های مائورر<sup>2</sup> و همکاران (2006) نشان داد استفاده از الیاف‌هایی همچون پلی‌پروپیلن می‌تواند در کاهش ترک‌های آسفالت مؤثر واقع شوند. (23) ابطحی و همکاران (2011) در پژوهشی از الیاف شش و دوازده میلی‌متری در آسفالت استفاده کردند و نتیجه گرفتند افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به مخلوط آسفالتی در فرایند خشک، مقاومت مارشال و حجم فضای خالی مصالح سنگی را افزایش و روانی را کاهش می‌دهد. (20) ابراهیمی<sup>3</sup> (2009) در تحقیقی نتیجه گرفت پلی‌پروپیلن موجب کاهش روانی می‌شود و قابلیت افزایش مقاومت مارشال را نیز دارد. (33) عبدالرحیم<sup>4</sup> و همکاران (2005) در پژوهش‌شان به این نتیجه رسیدند که بهره‌گیری از الیاف پلی‌پروپیلن موجب افزایش مقاومت آسفالت می‌شود. (34) جنگ<sup>5</sup> و همکاران (1998) در تحقیقات خویش، مفهوم مکانیک شکست را روی اثرات بتن آسفالتی اصلاح‌شده با الیاف، ارزیابی کردند. آن‌ها اعلام داشتند که با این روش مقدار سختی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ اما از سوی دیگر، مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت کششی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند. (24)

براون<sup>6</sup> و همکاران (1998) و تپکین (2007) نیز مطالعاتی روی الیاف پلی‌آستر، پلی‌پروپیلن و دیگر الیافی که برای اصلاح آسفالت استفاده می‌شود، انجام دادند. در این پژوهش از آزمایش‌های مقاومت مارشال، مقاومت کشش غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی، حساسیت ذوب و انجماد، مدول برجهندگی و تغییر نمودار تکرارشونده استفاده شد. هیچ‌کدام از مخلوط‌های اصلاح‌شده با الیاف، در برابر خرابی ناشی از ذوب، انجماد و رطوبت، مقاومت نشان ندادند. همچنین در مخلوط‌های اصلاح‌شده با الیاف هیچ نوع افزایشی در پتانسیل قیرزدگی مشاهده نشد. (25 و 22) تپکین (2008) در پژوهشی به این نتیجه رسید که افزودن پلی‌پروپیلن به بتن آسفالتی در حالت خشک، سبب افزایش مقاومت

1. Zhanping You  
3. Ebrahimi, M  
5. Jenq, Y. S

2. Maurer  
4. Abdul-Rahim  
6. Brown, S F

مارشال، کاهش عدد روانی و افزایش عمر خستگی می‌شود.<sup>(26)</sup> تپکین و همکاران (2009) در پژوهش دیگری روی اضافه کردن الیاف به مخلوط آسفالتی در حالت مرطوب کار کردند و دریافتند که مناسب‌ترین نوع پلی‌پروپیلن M-03 است. آزمایش‌های خزش دینامیکی تحت بارگذاری نشان‌دهنده این بود که نمونه‌های اصلاح‌شده نسبت به نمونه‌های شاهد، از 5 تا 12 مرتبه بهبود یافته‌اند. تپکین به این نتیجه رسید که اصلاح آسفالت به وسیله الیاف پلی‌پروپیلن، روش مؤثری برای بهبود خواص مکانیک آسفالت است و منجر به بهبود در عمر سرویس‌دهی آن‌ها می‌شود.<sup>(27)</sup>

حجازی و همکاران (1387) به بررسی کاربرد مواد نساجی گوناگون برای تسلیح مکانیکی بتن آسفالتی پرداختند. آن‌ها در مقاله خود به این نتیجه رسیدند که از میان الیاف مختلف مورد بررسی، الیاف شیشه به دلیل دارا بودن مدول یانگ بالا، و پلی‌پروپیلن به دلیل پایین بودن نقطه ذوب، نسبت به سایر الیاف‌ها، قادر به افزایش مقاومت فشاری آسفالت هستند.<sup>(8)</sup> کومار و همکاران (2009) نیز به بررسی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با الیاف پرداختند و نتیجه گرفتند در روش اختلاط خشک، با افزایش درصد الیاف، مقاومت مارشال بیشتر شده است تا جایی که با افزودن 0/5 درصد الیاف، مقاومت مارشال تا حدود 32 درصد بیشتر می‌شود. از سوی دیگر، عدد روانی نیز با اضافه شدن الیاف بیشتر شده و درصد قیر بهینه نیز اندکی افزایش می‌یابد.<sup>(21)</sup>

### 3. مواد و روش‌ها

#### 3-1. نانورس

نانورس‌ها<sup>1</sup> کانی‌هایی هستند که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها در حد نانومتر باشد. این مواد به دلیل ارزانی و دردسترس بودن، توجه زیادی را در زمینه فناوری نانو به خود جلب کرده‌اند. همچنین اندازه کوچک این مواد قادرشان ساخته است تا بتوانند با دیگر مواد موجود در این زمینه، رقابت کنند. نانورس در حقیقت ترکیبی از سیلیکات‌های معدنی است. بسته به ترکیب و مورفولوژی، نانو ذرات در دسته‌بندی‌های مختلفی قرار می‌گیرند که ابعاد آن‌ها کمتر 100nm است و سطح ویژه‌ای معادل 750 متر مربع بر گرم دارند.<sup>(9)</sup>

نانورس‌ها شامل صفحات کوچک و نامنظم رسی هستند که در حدود 1 نانومتر ضخامت و کمتر از 1 میکرومتر طول دارند. در شرایط مناسب، فضاهای خالی بین صفحه‌های رس می‌تواند به وسیله مونومرها، اولیگومرها (زنجیره‌های کوتاه پلیمری) یا پلیمرها اشغال شود. در اثر افزایش فاصله بین صفحات، رس‌ها متورم می‌شوند و پلیمرها به فضای بین دو صفحه راه می‌یابند. در این حالت وضعیت

صفحات نسبت به هم به دو صورت پراکنشی یا لایه‌ای خواهد بود. برای تشخیص نوع ساختار نانورس در قیر، از تکنیک اشعه ایکس استفاده می‌شود.

ذرات فیلر با شبکه بلوری منظم، در یک پلیمر با ساختار نامنظم، می‌توانند یک نانوکامپوزیت بسازند. این مواد به‌عنوان افزودنی برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها و بهبود قابل توجه خواص مواد پلیمری به کار می‌روند و دارای انواع مختلفی هستند از جمله: مونت‌موریلونیت، بنتونیت، کائولینیت، هالوسیت، هکتوریت که مونت‌موریلونیت‌ها معمول‌ترین نوع آن‌ها به شمار می‌روند.<sup>(9 و 10)</sup>

نانورس‌ها مونت‌موریلونیت‌های طبیعی هستند که توسط نمک آمونیوم چهارعضوی اصلاح شده‌اند و به‌عنوان افزودنی در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی بسیار کارایی دارند. اصلاح‌کننده این ماده MT2EOH است که متنومدار از متیل، پیه، هیدروکسیل و آمونیوم چهار عضوی است.

مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی نانورس‌ها طبق جدول شماره 1 است. گفتنی است نانورس استفاده‌شده در این پژوهش از شرکت نانوثانی تهیه شده است.<sup>(10)</sup>

#### جدول 1. مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی نانورس<sup>(10)</sup>

| نوع کانی                 | مونت موریلونیت             |
|--------------------------|----------------------------|
| اصلاح‌کننده ارگانیک      | MT2EOH                     |
| درصد رطوبت               | کمتر از 2 درصد             |
| افت وزنی در برابر اشتعال | حدود 30 درصد               |
| چگالی                    | 5-7 (gr/cm <sup>3</sup> )  |
| اندازه ذرات              | 1-2 nm                     |
| مساحت سطح ویژه           | 500-750 m <sup>2</sup> /gr |
| فاصله خالی بین ذرات      | 60 A <sup>0</sup>          |
| PH                       | 7/3-7/6                    |
| مقدار هدایت الکتریکی     | 25 MV                      |
| ضریب تبادل یونی          | 48 (meg/100gr)             |

#### 3-2. الیاف پلی‌پروپیلن

این نوع الیاف با مصرف سالانه 35 میلیون تُن و اختصاص 21 درصد از مصرف جهانی پلیمرهای اساسی، رتبه دوم پرمصرف‌ترین پلیمر را به خود اختصاص داده‌اند. قابلیت افزایش پُرکنندگی، تقویت‌کنندگی و دیگر خواص آن، پلی‌پروپیلن را به پلیمری پرمصرف و پرترفدار تبدیل کرده است. این الیاف که از طریق پلیمریزاسیون پروپیلن به صورت پلیمر خطی تهیه می‌شوند و به اختصار پ -

پ نامیده می‌شوند، پس از پیداشدن کاتالیست زیگلراناتا تولید شدند. این کاتالیست تولید پلی‌پروپیلن ایزوتاکتیک را که قادر به متبلورشدن است، امکان‌پذیر ساخت. الیاف و نخ‌های نواری که دو کاربرد پلی‌پروپیلن هستند، نسبتاً به آسانی به روش ذوب ریسی تهیه می‌شوند. آسان بودن تولید این نوع الیاف و پایین بودن هزینه تولید، استقبال بسیار گسترده‌ای را از آن به همراه داشته است. (12 و 28)

ماده اولیه تولید پلی‌پروپیلن را  $CH_2=CHCH_3$  تشکیل می‌دهد که به صورت تولیدی جانبی در تولید اتیلن به روش شکستن مولکول نفت در صنعت پتروشیمی نمودار می‌شود. گازهای مایع حاوی پروپیلن، دیگر ماده این منبع را تشکیل می‌دهند. الیاف پلی‌پروپیلن از پلیمریزاسیون پروپیلن در شرایط دما و فشار نسبتاً ملایم و در حضور کاتالیست معروف زیگلر - ناتا شکل می‌گیرد. وجود این کاتالیست، پلیمری به صورت ایزوتاکتیک را تشکیل می‌دهد که قادر به متبلورشدن تا حدود 90 درصد است. با توجه به سرعت تولید، الیاف تولیدشده ممکن است تا شش برابر طول اولیه خود کشیده شوند تا خواص مکانیکی مطلوب را به دست آورند. (8)

در این پژوهش از الیاف پلی‌پروپیلن شرکت صنایع نساجی نگین رز سپاهان اصفهان با طول برش 19 میلی‌متر با مشخصه‌های فنی جدول شماره 2 استفاده شد.

**جدول 2. مشخصه‌های فنی الیاف پلی‌پروپیلن**

| نوع جنس                         | پلی‌پروپیلن 100 درصد       |
|---------------------------------|----------------------------|
| رنگ ظاهری                       | سفید                       |
| وزن مخصوص                       | 0/91 (gr/cm <sup>3</sup> ) |
| قطر                             | 19 میکرون                  |
| محدوده ذوب                      | 160-165 درجه سانتی‌گراد    |
| دمای نرم‌شدگی                   | 140-165 درجه سانتی‌گراد    |
| مقاومت کششی                     | Mpa 400                    |
| طول برش                         | 18 میلی‌متر                |
| مدول الاستیسیته                 | Gpa 4/1                    |
| ازدیاد طول                      | بیشتر از 80 درصد           |
| مقاومت در برابر اسیدها و قلیاها | بالا                       |

### 3-3. سنگدانه‌ها

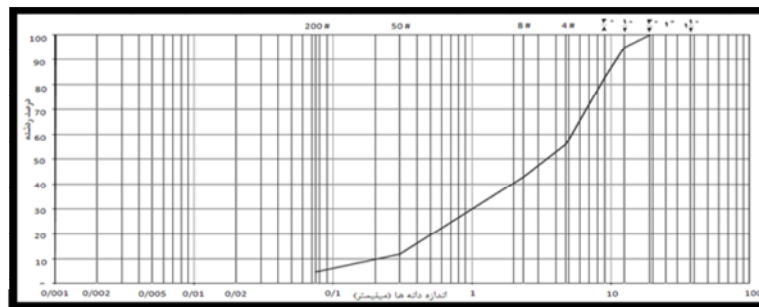
برای طرح اختلاط این پژوهش از مصالح سنگی کارخانه آسفالت شرکت جهاد نصر کرمانشاه واقع در کمربندی کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب استفاده شد. ابتدا سنگدانه‌ها از معادن سنگ کوهی یا



قلوه‌سنگ‌های درشت رودخانه‌ای تهیه و طی دو مرحله جداگانه در سنگ‌شکن‌های فکی و سپس دوآر (کوبیت) شکسته شدند. پس از شکسته‌شدن، با روش سرندکردن دانه‌بندی‌شده و در قسمت‌های مجزا به صورت مصالح درشت‌دانه، میان‌دانه و ریزدانه انبار شدند. نسبت اختلاط مصالح طبق جدول شماره 3 و دانه‌بندی آن طبق نمودار شماره 1 است.

جدول 3. نسبت اختلاط مصالح سنگی مخلوط آسفالتی

| مشخصات مصالح سنگی   | درصد اختلاط مصالح سنگی |
|---------------------|------------------------|
| شن 25-4/75 میلی‌متر | صفر                    |
| شن 19-4/75 میلی‌متر | 7                      |
| شن 12-0 میلی‌متر    | 31                     |
| ماسه 6-0 میلی‌متر   | 52                     |
| فیلر                | 10                     |



نمودار 1. دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی

#### 3-4. قیر مصرفی

قیر مصرفی در این پژوهش از قیرهای خالص 60/70 است. آزمایش‌های لازم روی قیر نمونه‌برداری شده انجام شد که نتایج آن در جدول شماره 4 آمده است. طبق استاندارد MS-2، مشخصه‌های فنی قیرهای خالص استفاده‌شده در راهسازی که براساس درجه نفوذ تقسیم‌بندی شده‌اند، باید با مشخصه‌ها مطابقت داشته باشند. همچنین با توجه به استاندارد، دمای تراکم، و با توجه به کندروانی قیر اختلاط مخلوط‌های آسفالتی تعیین می‌شود. بدین‌منظور کندروانی قیر خالص نمونه‌برداری شده در سه دمای متفاوت 120، 135، 160 درجه سانتی‌گراد تعیین و با رسم منحنی، تغییرات کندروانی قیر برحسب دما، محدوده دمای تراکم و اختلاط مخلوط آسفالتی مشخص شدند. همچنین نمونه‌های مخلوط آسفالتی برای انجام آزمایش‌های طرح اختلاط، در آن دماها مخلوط و

متراکم شدند. بر همین اساس دمای اختلاط لایه توپکا در محدوده 144-150 درجه سانتی‌گراد و دمای تراکم آن در محدوده 134-138 درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. گفتنی است در این پژوهش از درصد قیر بهینه 5 درصد استفاده شده که با روش مارشال به دست آمده است.<sup>(11)</sup>

#### جدول 4. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی قیر

| مشخصه‌های قیرهای خالص طبق استاندارد ASTM <sup>(20)</sup> |     | نتایج ASTM   | روش آزمایش |       | آزمایش‌های قیرهای خالص                              |
|--|-----|--------------|------------|-------|---|
|  |     |              | AASHTO     | ASTM  |   |
| -  | -   | 1/016        | T228       | D70   | وزن مخصوص در 25°C                                   |
| 70   | 60  | 69           | T49        | D5    | درجه نفوذ در 25°C (100 گرم - 5 ثانیه)               |
| 56   | 49  | 49/1         | T53        | D36   | نقطه نرمی (ساجمه - حلقه) بر حسب سانتی‌گراد          |
| -  | 100 | بیشتر از 100 | T51        | D113  | مقدار کشش در 25°C بر حسب سانتی‌متر                  |
| -  | 99  | 99/53        | T44        | D2042 | حلالیت در تری‌کلر و اتیلن                           |
| -  | 232 | 310          | T48        | D92   | درجه اشتعال (رو باز - کلوند) سانتی‌گراد             |
| -  | -   | 654          | T201       | D2170 | ویسکوزیته کینماتیک در 120°C (سانتی‌استکس)           |
| -  | -   | 331          | T201       | D2170 | ویسکوزیته کینماتیک در 135°C (سانتی‌استکس)           |
| -  | -   | 122          | T201       | D2170 | ویسکوزیته کینماتیک در 160°C (سانتی‌استکس)           |
| 0/8  | -   | 0/05         |            |       | افت حرارتی درصد                                     |
| -  | -   | 40           |            |       | درجه نفوذ پس از آزمایش افت حرارتی                   |
| -  | 54  | 57/97        |            |       | نسبت درصد درجه نفوذ پس از آزمایش به درجه نفوذ اولیه |
|  | 50  | بیشتر از 100 |            |       | مقدار کشش قیر پس از آزمایش در 25°C                  |
| -  | -   | -0/65        |            |       | حساسیت حرارتی قیر:                                  |
| -  | -   | -0/91        |            |       | PI - (بر حسب درجه نفوذ در 25°C و نقطه نرمی قیر)     |
|  |     |              |            |       | PVN - (بر حسب درجه نفوذ در 25°C و غلظت)             |

#### 4. آزمایش‌ها و نتایج

##### 4-1. اختلاط نانورس و مخلوط آسفالتی

در طرح اختلاط آسفالت، شن درشت‌دانه و ریزدانه، ماسه، فیلر و قیر با درصد‌های مشخص مخلوط

می‌شوند. با توجه به اینکه فیلر ریزدانه‌ترین بخش مخلوط است، نانورس به نسبت درصد وزنی مورد استفاده، جایگزین آن بخش از فیلر می‌شود. برای اختلاط نانورس و قیر در آزمایشگاه، ابتدا باید قیر را تا حدی ذوب کرد که کندروانی کینماتیک آن معادل  $170 \pm 2$  سانتی‌استوکس باشد و درحالی‌که مخلوط‌کن در حال هم‌زدن آن است، به‌مرور نانورس را به آن افزود (عموماً توسط نمک‌پاش) تا کامل و به صورت همگن مخلوط شده و از توده‌شدن نانورس در قیر جلوگیری شود. در زمان اختلاط به دلیل بالا بودن دما، نفوذ و تماس حباب‌های هوا با قیر اجتناب‌ناپذیر بوده و اکسیداسیون تسریع می‌شود؛ از این رو پارامترهای گوناگونی همچون زمان، سرعت و دمای اختلاط برای کل نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است تا پدیده پیرشدگی نسبتاً یکسان باشد. پس از اختلاط قیر و نانورس باید به مخلوط حاصله مابقی مصالح را که در گرمخانه گرم شده‌اند، افزود و مخلوط کرد تا زمانی که قیر تمامی فضای روی سنگدانه‌ها را پوشش دهد. در حین اختلاط باید دمای قیر دائم کنترل شود. برای ساخت نمونه‌های آسفالتی، سه نمونه برای هر درصد نانورس تهیه می‌شود. با توجه به اینکه طبق استاندارد ASTM نسبت فیلر نباید کمتر از 10 درصد وزنی مخلوط باشد، در این پژوهش از 5-1 درصد نانورس برای اختلاط استفاده شده است. به منظور ساخت نمونه‌های آسفالتی، سه نمونه برای هر درصد الیاف تهیه می‌شود که در این پژوهش از درصدهای 0/1-0/5 درصد الیاف برای اختلاط استفاده شده است.<sup>(11و12)</sup>

#### 4-2. اختلاط الیاف PP با مخلوط آسفالتی

برای اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن به مخلوط آسفالتی، سه روش وجود دارد:

##### 4-2-1. روش خشک

در این روش ابتدا سنگدانه‌ها و قیر براساس استاندارد ASTM D1559 حرارت داده و آماده شدند. سنگدانه‌ها را از گرمخانه بیرون آورده و الیاف به سنگدانه‌ها اضافه و مخلوط شدند، سپس قیر به آن‌ها افزوده شد. در این روش مشاهده شد که الیاف جمع شده و هیچ‌گونه اختلاطی رخ نداد. در عمل این روش برای اختلاط مناسب نبود، به همین دلیل تلاش شد تا الیاف به روش متفاوتی به مخلوط اضافه شود تا اختلاط مناسب و همگنی صورت پذیرد.

##### 4-2-2. روش تر

در این روش ابتدا مصالح سنگی و قیر طبق استاندارد ASTM D1559 آماده‌سازی شد. الیاف

پلی پروپیلن که از قبل آماده شده بود، به قیر داغ و روان اضافه و محصول به دست آمده به سنگدانه اضافه شد و کاملاً با هم مخلوط شدند. در این روش نیز به دلیل جذب قیر توسط الیاف، گلوله گلوله شدن رخ داد که منجر به عدم اختلاط مناسب الیاف با سنگدانه‌ها می‌شود؛ از این رو این روش هم برای اختلاط مناسب نیست.

### 3-2-4. روش مختلط

به دلیل اینکه در دو روش پیشین اختلاط همگنی بین الیاف و مخلوط آسفالتی صورت نمی‌پذیرفت و نموداراتی در جهت افزودن وجود دارد، روش دیگری بررسی شد که نتایج بهتری را در پی داشت. در این روش نیز طبق روش‌های پیشین، مصالح سنگی و قیر طبق استاندارد ASTM D1559 آماده شدند. سنگدانه‌ها را که از قبل در گرمخانه حرارت دیده بودند، داخل ظرفی ریخته و سپس قیر حرارت دیده به مرور به آن اضافه شد و حدود 5-10 ثانیه توسط همزن مخلوط شدند. سپس الیاف را که رشته‌رشته شده بودند از هم جدا و به مرور به مخلوط افزودیم. پس از اضافه شدن الیاف به مخلوط، کل مخلوط به هم زده شد. پس از افزودن الیاف به روش گفته شده مشاهده شد که الیاف کاملاً همگن با مخلوط آمیخته شده‌اند و بدین ترتیب بهترین روش این خواهد بود که در این پژوهش از روش مختلط برای ساخت و انجام آزمایش‌ها استفاده شود.

### 3-4. اختلاط مشترک نانورس و الیاف در مخلوط آسفالتی

در این بخش نیز روال کار همچون مراحل گفته شده در قسمت‌های پیشین است، با این تفاوت که در ساخت نمونه‌های آسفالتی همراه با نانورس و الیاف پلی پروپیلن به صورت مشترک، باید ابتدا قیر را گرم کرده، سپس درحالی که همزن فعال است نانورس را به مرور بدان افزود، سپس مابقی مصالح را که در گرمخانه حرارت داده شده‌اند به مخلوط قیر و نانورس اضافه کرد، و درنهایت الیاف رشته‌رشته را به مخلوط نهایی اضافه کنیم تا الیاف کاملاً جذب قیر و سنگدانه‌ها شود. در این روش از درصد‌های 1-5 درصد نانورس و 0/1-0/5 درصد الیاف به صورت مشترک استفاده شد. برای هر کدام از درصد‌های مشترک سه نمونه ساخته شد و درنهایت در این بخش 75 نمونه برای درصد‌های مختلف نانورس و الیاف، به صورت مختلط به دست آمد.

روش ساخت و تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی برای اختلاط آسفالت براساس روش استاندارد ASTM-D1559 انجام می‌شود. در این روش نمونه‌های مخلوط آسفالتی متراکم شده، در استوانه‌ای با ارتفاع حدود 63/5 و قطر 101/6 میلی‌متر (4 اینچ) تهیه قرار می‌گیرد. پس از عمل اختلاط که با

دستگاه مخلوط‌کن یا دستی انجام می‌شود و پس از اطمینان از پوشش کامل مصالح سنگی با قیر، نمونه مخلوط آسفالتی به داخل قالب فلزی مربوطه که دارای قطر 101/6 میلی‌متر (4 اینچ) و ارتفاع حدود 75 میلی‌متر است، ریخته و متراکم می‌شود. دمای تراکم معادل دمایی است که در آن، کندروانی قیر برابر  $30 \pm 280$  سانتی‌استوکس شود و عمل تراکم با چکش فلزی انجام می‌شود که دارای سطح مقطع به نمودار دایره (به قطر 98/4 میلی‌متر) و به وزن 4/5 کیلوگرم است و از ارتفاع مشخص 457 میلی‌متری (18 اینچ) به طور آزاد سقوط می‌کند. تعداد ضربه‌های تراکم 75 ضربه برای هر طرف نمونه انتخاب می‌شود (شکل شماره 1).<sup>(11)</sup>

پس از تعیین وزن مخصوص مخلوط‌های آسفالتی متراکم‌شده، نمونه‌ها به مدت 30 تا 40 دقیقه در آب  $60 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و پس از آن بلافاصله مقدار استحکام و روانی آن به وسیله دستگاه جک مارشال براساس روش استاندارد ASTM-D1559 تعیین می‌شود. در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی به روش مارشال، مقادیر وزن مخصوص حقیقی مخلوط آسفالتی، وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی، وزن مخصوص قیر، حداکثر وزن مخصوص مخلوط آسفالتی، استحکام مارشال و روانی مخلوط آسفالتی متراکم شده تعیین می‌شود. سایر کمیت‌های مورد نظر براساس روابط محاسبات طرح اختلاط، به روش مارشال تعیین می‌شوند.<sup>(11)</sup>



شکل 1. نمونه‌های آسفالتی مسلح‌شده با الیاف و نانو

#### 4-4. ارزیابی نتایج

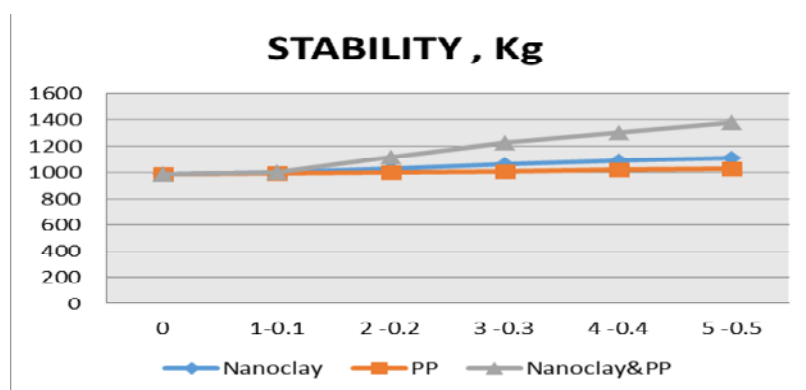
##### 4-4-1. مقاومت مارشال

استحکام و مقاومت مارشال تابع نوع، مقدار و مشخصه‌های فیلر است. نانورس فضای بین ذرات درشت‌دانه را پر کرده و سبب افزایش مقاومت، تراکم و درنهایت باربری می‌شود. این نانوافزودنی

ضربه‌پذیری را افزایش داده و تغییر نمودار نسبی را کاهش می‌دهد. با توجه به نقش پرکنندگی بالای نانورس و نتایج حاصل از آزمایش‌ها و نمودارهای مربوطه می‌توان اظهار داشت مقاومت مارشال با افزایش درصد نانورس افزایش می‌یابد؛ به طوری که نمونه حاوی 5 درصد نانورس نسبت به نمونه بدون نانورس، حدود 13 درصد مقاومت بیشتری دارد.

با توجه به ویژگی مسلح کردن مخلوط آسفالتی توسط الیاف و نیز استفاده از آن در قیر و مصالح به صورت مختلط که موجب جذب همگن آن در مخلوط شده است، الیاف پلی‌پروپیلن سبب افزایش مقاومت مخلوط می‌شود. نتایج آزمایش نشان می‌دهد با افزایش درصد الیاف، مقاومت بالا می‌رود؛ به طوری که نمونه حاوی 0/5 درصد الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه بدون الیاف، حدود 4 درصد مقاومت بیشتری دارد. نکته قابل توجه در نتایج آزمایش این است که با افزایش درصد الیاف، روند رشد مقاومت کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند جذب شدن الیاف به قیر باشد که در این صورت با افزایش درصد قیر می‌توان مقاومت را افزایش داد.

با توجه به اینکه نانورس و الیاف پلی‌پروپیلن هر دو خاصیت مقاومتی دارند، و نتایج هر دو به تنهایی مقاومت مارشال را افزایش داده است، در نمودار نیز ملاحظه می‌شود که مقاومت افزایش یافته است و در صورت افزودن 5 درصد نانورس و 0/5 درصد الیاف، مقاومتی معادل 1382 کیلوگرم ثبت شده می‌شود که نشان از افزایش 140 درصدی نسبت به نمونه شاهد است (نمودار 2).

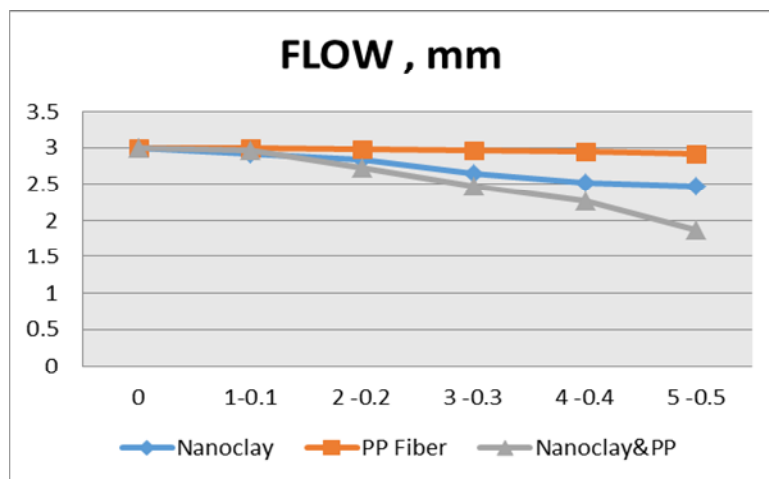


نمودار 2. مقایسه نتایج مقاومت مارشال افزودنی‌ها

#### 4-4-2. روانی

روانی مارشال نیز تابع نوع، مقدار و مشخصات فیلر است. با توجه به اینکه نانورس چسبندگی بین فضای قیر و سنگدانه‌ها را بهبود می‌بخشد، روانی کاهش خواهد یافت. با بررسی نمودار مربوطه

ملاحظه می‌شود با افزایش درصد نانورس، روانی نمونه‌ها کاهش می‌یابد؛ به طوری که نمونه حاوی بالاترین درصد نانورس نسبت به نمونه غیرمسلح، حدود 21 درصد روانی کمتری دارد. طبیعی است که افزایش یا کاهش الیاف در قیر و مصالح سنگی روانی مخلوط را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج آزمایش مارشال نشان می‌دهد با افزایش درصد الیاف، روانی مخلوط کاهش می‌یابد و نمونه حاوی بالاترین درصد الیاف نسبت به نمونه غیرمسلح، حدود 2 درصد روانی کمتری دارد. با توجه به نتایج آزمایش روانی و نمودار، و با توجه به اختلاط نانورس با قیر و جذب الیاف به مصالح سنگی، روانی نمونه‌ها کاهش یافته است؛ به طوری که در ترکیب بیشترین درصد نانورس و الیاف، روانی به میزان 161 درصد کاهش داشته است. البته گفتنی است روانی نمونه‌ها از 5 درصد نانورس و 0/3 الیاف، از حدود مشخصات طبق نشریه 234 خارج می‌شود (نمودار 3).

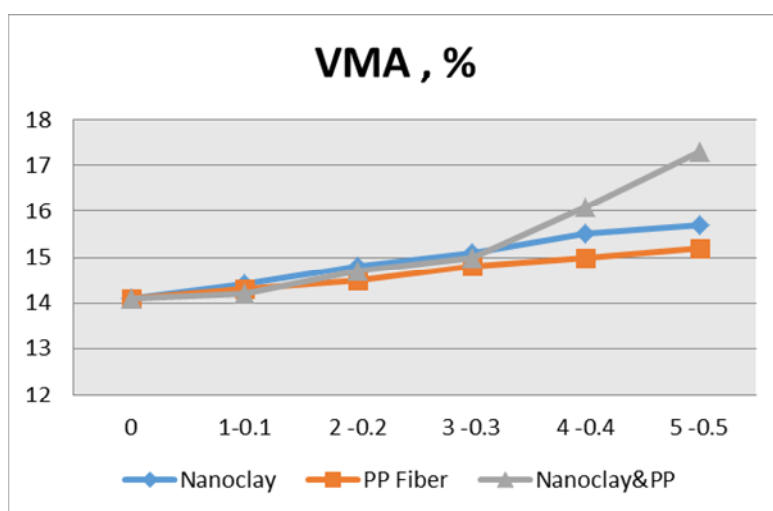


نمودار 3. مقایسه نتایج روانی افزودنی‌ها

#### 3-4-4. حجم فضای خالی مصالح سنگی (VMA)

در طرح مخلوط آسفالتی، حداقل حجم منافذ در سنگدانه‌ها تابع بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌هاست که با ریزتر شدن سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه وجود نانورس موجب افزایش ضخامت غشای قیری در اطراف سنگدانه‌ها می‌شود، نمودار نشان‌دهنده افزایش درصد فضای خالی مصالح سنگی حاوی نانورس است، به طوری که در نهایت حدود 12 درصد فضای خالی مصالح سنگی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج آزمایش و نمودار باید گفت، حجم فضای خالی مصالح سنگی با وجود الیاف افزایش می‌یابد؛ به طوری که در نهایت در 0/5 درصد استفاده از الیاف، حدود 7 درصد فضای خالی مصالح سنگی افزایش می‌یابد.

با توجه به اینکه هر دو افزودنی به صورت مجزا موجب کاهش درصد فضای خالی مصالح سنگی شده‌اند، همان‌طور که در نمودار نیز دیده می‌شود، ترکیب این دو نیز نتیجه مشابهی در کاهش درصد فضای خالی مصالح سنگی دارد. گفتنی است با توجه به درصد قیر بهینه و مندرجات نشریه 234، درصد فضای خالی در این آزمایش‌ها از 3 درصد نانورس و 0/3 درصد الیاف، مورد پذیرش خواهد بود (نمودار 4).



نمودار 4. مقایسه نتایج VMA افزودنی‌ها

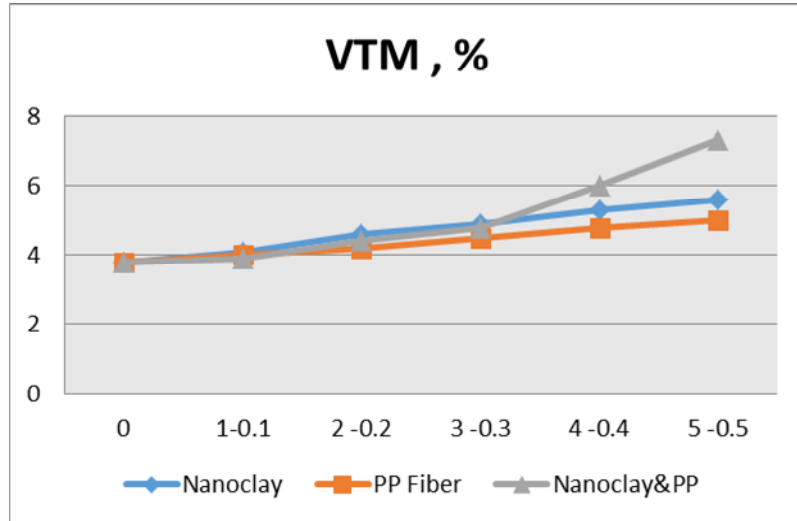
#### 4-4-4. حجم فضای خالی کل مخلوط (VTM)

با افزایش درصد نانورس در مخلوط، فضای خالی کل مخلوط افزایش می‌یابد و در 5 درصد میزان آن معادل 5/6 است که این مقدار نشان‌دهنده افزایش 48 درصدی نسبت به مخلوط بدون نانورس است. این موضوع می‌تواند ناشی از واکنش‌های شیمیایی نانورس با مخلوط باشد. این نتیجه می‌تواند موجب کاهش قیرزدگی به‌ویژه در فصول گرم و مناطق دارای آب‌وهوای گرم شود و توان برابری را نیز افزایش دهد.

با افزایش درصد الیاف در مخلوط، حجم فضای خالی کل مخلوط افزایش می‌یابد و در 0/5 درصد، میزان آن معادل 3/75 است که نشانگر افزایش 32 درصدی نسبت به مخلوط بدون الیاف است. این موضوع می‌تواند ناشی از واکنش‌های شیمیایی الیاف پلی‌پروپیلن با مخلوط باشد.

افزودن درصدهای بیشتر ترکیب نانورس و الیاف موجب افزایش درصد فضای خالی مخلوط می‌شود. نتایج حاصل از نمودار بیانگر رشد 192 درصدی فضای خالی در 5 درصد نانورس و 0/5 درصد الیاف است. نکته قابل توجه این است که درصد فضای خالی در ترکیب 3 درصد نانورس و 0/5 درصد الیاف، از حدود مشخصات خارج می‌شود (نمودار 5).





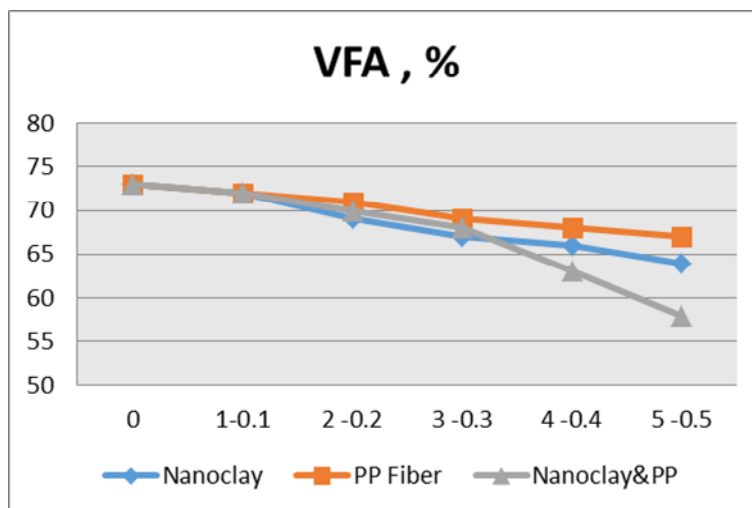
نمودار 5. مقایسه نتایج VTM افزودنی‌ها

#### 4-4-5. حجم فضای پرشده با قیر (VFA)

با افزودن درصدهای مختلف نانورس به مخلوط آسفالتی، ضخامت غشای قیری نیز افزایش می‌یابد که این مسئله منجر به کاهش عریان‌شدگی در آسفالت خواهد شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از نمودار، ملاحظه می‌شود که با افزایش نانورس، درصد فضای پرشده با قیر کاهش یافته است که در 5 درصد افزودنی، کاهش معادل 14 درصد قابل‌مشاهده است.

با توجه به نتایج حاصل از نمودار، باید گفت با افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن در مخلوط آسفالتی، درصد فضای پرشده با قیر کاهش یافته است و در 5 درصد، کاهش معادل 8 درصد نسبت به نمونه بدون الیاف دیده می‌شود.

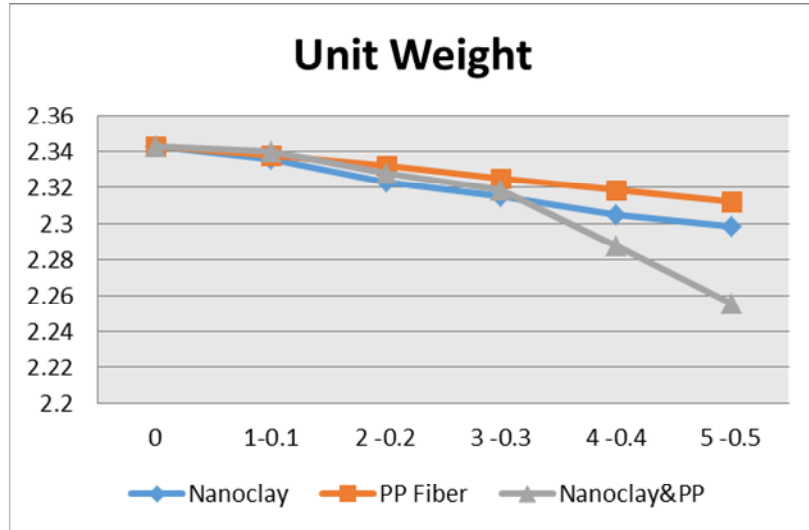
با استفاده از ترکیب نانورس و الیاف در مخلوط آسفالتی، درصد فضای پرشده با قیر کاهش می‌یابد. این کاهش درصد از 4 درصد نانورس و 0/2 درصد الیاف، از حدود مشخصات خارج می‌شود و در نهایت در بیشترین درصد مورد استفاده این دو افزودنی، 125 درصد کاهش درصد فضای پرشده با قیر نسبت به نمونه شاهد، قابل مشاهده است (نمودار 6).



نمودار 6. مقایسه نتایج VFA افزودنی‌ها

#### 4-4-6. وزن مخصوص

با افزایش درصد نانورس در مخلوط، وزن مخصوص کاهش می‌یابد که این مسئله می‌تواند ناشی از افزایش حجم قیر و افزایش حجم مصالح سنگی در مخلوط باشد. با توجه به نمودار، وزن مخصوص مخلوط حاوی 5 درصد نانورس، در حدود یک درصد کمتر از مخلوط آسفالتی بدون افزودنی است. با افزایش درصد الیاف در مخلوط، وزن مخصوص کاهش می‌یابد که این مسئله می‌تواند ناشی از افزایش حجم مصالح سنگی در مخلوط باشد. با توجه به نمودار، وزن مخصوص مخلوط حاوی 0/5 درصد الیاف، در حدود یک درصد کمتر از مخلوط آسفالتی بدون افزودنی است. وزن مخصوص نمونه‌ها با افزایش درصد مشترک نانورس و الیاف کاهش می‌یابد و تقریباً از 3 درصد نانورس و 0/4 درصد الیاف، با مقدار بیشتری این کاهش رخ می‌دهد (نمودار 7).



نمودار 7. مقایسه نتایج وزن مخصوص افزودنی‌ها

### 5. نتیجه‌گیری

چند سالی است که کاربرد نانومواد و الیاف‌ها در بهبود رویه‌های روسازی آسفالتی و بتنی، مورد توجه محققان حوزه راه‌کار گرفته است. همین امر سبب شده است تا آزمایش‌های گوناگونی برای اثبات این مدعا انجام گیرد. نتایج آزمایش‌ها تا میزان زیادی بر کارآمدی استفاده از این افزودنی‌ها دلالت دارد.

استحکام و مقاومت مارشال تابع مقدار و مشخصه‌های نانورس است. نانورس فضای بین ذرات درشت‌دانه را پر کرده و سبب افزایش مقاومت، تراکم و درنهایت باربری می‌شود. این نانوافزودنی ضربه‌پذیری را افزایش داده و تغییر نمودار نسبی را نیز کاهش می‌دهد. برای اختلاط این ماده با قیر لازم است پس از ذوب‌شدن قیر و درحالی‌که مخلوط‌کن فعال است، این ماده به‌مرور به قیر افزوده و مخلوط شود؛ در غیر این صورت پدیده گلوله‌شدن رخ می‌دهد.

الیاف پلی‌پروپیلن ذاتاً خاصیت مسلح‌کردن دارد و استفاده از آن در قیر و مصالح سنگی در صورت اختلاط همگن، موجب افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی می‌شود. اختلاط این ماده با مخلوط آسفالتی می‌تواند به سه روش تر، خشک و مختلط انجام پذیرد که بهترین روش که مخلوط همگنی را حاصل می‌کند، روش مختلط است. در این روش ابتدا باید قیر و مصالح سنگی را مخلوط کرد و سپس الیاف را به مخلوط اولیه افزود.

با توجه به افزودن درصدهای 0/1-0/5 درصد الیاف پلی پروپیلن با طول برش 18 میلی متر و درصدهای 5-1 نانورس با درجه خلوص 99/9 درصد و ترکیب این درصدها با یکدیگر و انجام آزمایش‌های مارشال انجام شده روی نمونه‌های آسفالتی و محاسبات لازم، می‌توان به طور خلاصه نتایج زیر را بیان کرد:

1. با توجه به نتایج حاصل از کاربرد نانورس و الیاف در نمونه‌های آسفالتی به‌تنهایی و به صورت مشترک، ملاحظه می‌شود که اثر مشترک این دو افزودنی محسوس‌تر از اثر هریک به صورت مجزا است و تأثیر بسزایی در افزایش مقاومت مارشال به صورت ترکیب مشترک ایفا می‌کنند؛
2. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش روانی برای هر سه حالت و نمودار، روانی نمونه‌های هر سه حالت تقریباً تا 2 درصد نانورس و 0/2 درصد الیاف و ترکیب مشترک این دو تقریباً برابر بوده و از این درصدها به بعد، روانی نمونه‌های همراه با ترکیب دو افزودنی با سیر نزولی بیشتری کاهش می‌یابد و در نهایت روانی آن از حدود مشخصات خارج می‌شود؛
3. با توجه به نتایج برای هر سه حالت و نمودار، درصد فضای خالی مصالح سنگی نمونه‌های هر سه حالت تقریباً تا 3 درصد نانورس و 0/3 درصد الیاف و ترکیب مشترک این دو تقریباً برابر بوده و از این درصدها به بعد، درصد فضای خالی مصالح سنگی ترکیب مشترک، رشد قابل توجهی داشته و در این میان درصد فضای خالی مصالح سنگی الیاف، کمترین افزایش را دارد؛
4. ملاحظه می‌شود که با حضور افزودنی‌ها، درصد فضای خالی کل مخلوط نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نمودار در حالت ترکیبی، از 3 درصد نانورس و 0/3 درصد الیاف، به نسبت دو حالت دیگر VTM رشد بیشتری داشته است؛
5. با توجه به نتایج به دست آمده از سه حالت آزمایش و مقایسه آن‌ها، بیشترین کاهش مربوط به ترکیب افزودنی‌ها و کمترین آن مربوط به الیاف است. با توجه به نمودار، تا 1 درصد نانورس و 0/1 درصد الیاف، تقریباً روند نزولی هر سه نمودار برابر است و از آن درصدها به بعد شیب تغییرات متغیر می‌شود؛
6. وزن مخصوص نمونه‌های هر سه حالت با افزایش درصد افزودنی‌ها نسبت عکس دارد. با توجه به نمودار، تا 3 درصد نانورس و 0/3 درصد الیاف، نانورس بیشترین کاهش را دارد، اما از این درصد به بعد ترکیب نانورس و الیاف، سیر نزولی بیشتری را طی می‌کند؛
7. با توجه به نتایج حاصل از ترکیب نانورس و الیاف و بررسی حدود مشخصه‌ها برای قشر رویه،

درصد بهینه برای این دو افزودنی برای استفاده در دانه‌بندی قشر رویه عبارت است از 3 درصد نانورس و 0/3 درصد الیاف که نتایج در این درصدها به شرح جدول شماره 5 است:

**جدول 5. نتایج حاصل از درصد بهینه برای ترکیب نانورس و الیاف پلی پروپیلن**

| مشخصه | استحکام | روانی | VMA | VTM | VFA | وزن مخصوص |
|-------|---------|-------|-----|-----|-----|-----------|
| مقدار | 1231    | 2/48  | 15  | 4/8 | 68  | 2/319     |

8. این افزودنی‌ها به بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی قشر رویه می‌انجامد و با توجه به تأثیرات قابل توجه در نتایج مارشال، استفاده از آن در افزایش باربری آسفالت توصیه می‌شود؛

9. با توجه به کاربردهای این ماده، بحث استفاده از آن را می‌توان را به‌ویژه در مسیر عبور وسایل نقلیه با ترافیک سنگین مورد بررسی قرار داد.

استفاده از انواع دیگر نانومواد و الیاف‌ها با درصدهای مختلف در مخلوط آسفالتی و نیز در دانه‌بندی قشر آستر همراه با درصدهای مختلف قیر به‌عنوان کارهای آتی، توصیه می‌شود.

## منابع

1. معاونت فنی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک (1387)، مخلوط‌های آسفالتی و قیر، تهران: انتشارات شرکت مادر تخصصی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک.
2. تن‌زاده، ج.، تن‌زاده، ز. (1391)، بررسی تأثیر مواد نانو و پلیمری در بهبود خصوصیات عملکردی قیر و تغییرات مدول دینامیک آسفالت به‌عنوان یک ماده ویسکو الاستو پلاستیک، نهمین کنگره ملی مهندسی عمران، اصفهان: دانشگاه اصفهان.
3. غفارپور جهرمی، س. (1390)، تأثیر نانورس و کرینات کلسیم رسوبی بر رفتار مهندسی مخلوط‌های آسفالتی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان: دانشگاه سمنان.
4. خدادادی، ا.، کوکی، م. و صالحی، س. (1386)، اثر افزودنی نانورس بر عملکرد درازمدت روسازی‌های آسفالتی، دومین همایش دانشجویی فناوری نانو، کاشان: دانشگاه کاشان.
5. اکبری مطلق، ع. (1390)، مقاوم‌سازی جاده‌ها با استفاده از نانو لوله کربنی، اراک: چهارمین همایش ملی مقاوم‌سازی و حفظ بناهای ماندگار.
6. شکرچی‌زاده، م.؛ باباپور، ح.؛ حاجی‌سامی، ب. (1387)، مقاومت در برابر ساییدگی روسازی بتنی حاوی مواد نانو، تهران: چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران.
7. فیروزی، ف. و همکاران (1391)، بررسی کاربرد سیمان و الیاف پلی‌پروپیلن در مخلوط آسفالت بازیافتی به روش سرد با امولسیون قیر، اصفهان: نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران.
8. حجازی س. م.؛ شیخ‌زاده م.؛ ابطحی س. م.؛ سمنانی د. (1387)، بررسی کاربرد مواد نساجی گوناگون برای تسلیح مکانیکی بتن آسفالتی و تحلیل نتایج حاصل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، تهران: چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران.
9. نوری، ا.؛ خدایاری، م. (1389)، مقدمه‌ای بر فناوری نانو، چاپ سوم، تهران: انتشارات سازش.
10. شرکت نانوئانی (1391)، مشخصه‌های فنی محصولات نانو شرکت راک وود، مشهد.
11. بیات، ر.؛ طلعت اهری، س. (1396)، «بررسی آزمایشگاهی اثرات نانوکلوذیت بر خصوصیات فیزیکی مخلوط‌های آسفالت»، دنیای نانو، شماره 48، صص 20-25.
12. بیات، ر.؛ طاهرخانی، ح. (1395)، «عملکرد الیاف پلی‌پروپیلن بر شیارشدگی و حساسیت رطوبتی الیه بیندر روسازی آسفالتی بر پایه فرایند مختلط»، پژوهش نفت، شماره 86، صص 143-154.
13. Asphalt Institute (1984), "Mix Design Method for Asphalt Concrete and other Hot-Mix

- Types”, MS-2.
14. ASTM Standard Specification (1988), Section 4, Vol. 03-04.
  15. Jahromi, S. G., Ahmadi, N. L., (2011), “Engineering Properties of Nanoclay Modified Asphalt Concrete Mixtures”, *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, pp. 941-944.
  16. Jahromi, S. G., Khodaii, A. (2009), “Effects of Nanoclay on Rheological Properties of Bitumen Binder”, *Construction and Building Materials*, 23. 8.
  17. Ghile D. B. (2006), “Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures”, M. S. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
  18. You, Z., Mills-Beale, J., Justin, F., Roy, S., Odegard, G. M., Dai, Q., Goh, S. W., (2010), *Nanoclaymodified asphalt materials: Preparation and characterization*, *Constr. Build. Mater*, 25. 2, pp. 1072-1078.
  19. Chong, K. P., (2003), *Nanotechnology in civil engineering*, 1<sup>st</sup> Int. Symp.on Nanotechnology in Construction, Paisley, Scotland, pp. 13-21.
  20. Steyn, W. J. M., (2009), “Potential applications of nanotechnology in pavement engineering”, *ASCE Jnl of Transportation Engineering*, 135. 10, pp. 764-772.
  21. Ghasemia, M. Marandia, B. Tahmoosib, M. kamalia, R. J. (2012), “Modification of Stone Matrix Asphalt with Nano-SiO<sub>2</sub>”, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, pp. 1338-1344.
  22. Abtahi, S. M. (2011), “Production of Polypropylene-reinforced Asphalt Concrete Mixtures Based on Dry Procedure and Superpave Gyratory Compactor”, *Iranian Polymer Journal*.
  23. Kumar P., Mehndiratta H. C., Immadi S. (2009), “Investigation on fiber Modified bituminous mixes”, *TRB Annual Meeting*.
  24. Brown, S F., Rowlett, R. D., & Boucher, J L. (1998), “Asphalt modification. Proceedings of the conference on the United States strategic highway research program”, *Sharing the benefits, ICE*, pp. 181- 203.
  25. Maurer D. A., & Malasheskie G. (2006), “Field performance of fabrics and fibers to retard reflective cracking”, pp. 13-23.
  26. Jenq, Y. S., Chwen- Jang, L., & Pei, L. (1998), “Analysis of crack resistance of asphalt concrete overlays”, *A fracture mechanics approach Transportation Research Record*, No. 1388, pp. 160-166.
  27. Tapkın, S. (2007), “The effect of polypropylene fibers on asphalt performance”, *Building and Environment*, Vo. 43, Issue 6, pp. 1065-1071.
  28. Tapkın, S., Tuncan, A., & Tuncan, M. (2008), “Repeated creep behavior of polypropylene fiber-reinforced bituminous mixtures,” *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 135. 4, pp. 240- 249.
  29. S. Tapkın, U. Usar, A. Tuncan and M. Tuncan. (2009), “Repeated creep behavior of polypropylene fiber-reinforced bituminous mixtures”, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, pp. 240-249.
  30. ITEM 400HS. (1999), “Standard specification for asphalt concrete-high stress using polypropylene fibers, Ohio Department of Transportation”, *Construction and Materials Specifications*.

31. Colorado Department of Transportation (CDOT), (2009), "Standard Method of Test for Linear Kneading Compaction of Bituminous Mixture", *Colorado Procedure Laboratory* 5116.
32. *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*, 1997.
33. Xicheng Qi and Witzac W. (2001), "Time-Dependent Permanent Deformation Models for Asphalt mixtures", *Transportation Research Board*, pp. 83-93.
34. Maurer, Dean, A., Malasheskie., (1998), "Field performance of fabrics and fibers to retard reflective cracking", *Transportation Research Record*, 1248, pp. 13-23.
35. Ebrahimi, M., (2010), *The effect of polypropylene fiber on marshall stability and flow*, Famagusta: E. M. U.
36. Abdul-Rahim, Al-Hadidy. (2005), "Evaluation of pyrolysis polypropylene modified asphalt paving material", *Al-Rafidain Engineering*, pp. 33-45.