

# بررسی اثرات دانه‌بندی و شکل سنگدانه‌ها بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای

محمدرضا سالک بافقی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران  
محمد مهدی خبیری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [mkhabiri@yazd.ac.ir](mailto:mkhabiri@yazd.ac.ir)

دریافت: 1395/08/12 – پذیرش: 1396/02/15

## چکیده

مقاومت لغزندگی بر اساس تعریف به معنای نیروی بازدارنده و مقاومی است که توسط اندرکنش بین روسازی و چرخ قفل شده ایجاد می‌شود. مخلوط‌های با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای<sup>1</sup> (SMA)، مخلوط‌های آسفالتی گرمی می‌باشند که به دلیل وجود درصد بیشتری از مصالح سنگی درشت دانه مقاومت بالایی در برابر لغزندگی دارند. با توجه به اهمیت استفاده از مخلوط‌های SMA به عنوان یک لایه‌ی رویه مقاوم در برابر بار و لغزندگی و توجه خاصی که اخیراً در کشورمان برای استفاده از این نوع مخلوط‌ها صورت گرفته است، در این تحقیق به منظور ارزیابی مقاومت لغزندگی این نوع از مخلوط‌ها، تاثیر پارامترهای مختلف خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی، از قبیل میزان قیر، نوع مصالح، دانه‌بندی و حداکثر اندازه اسمی مصالح<sup>2</sup> (NMA) و شکل مصالح سنگی درشت دانه بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی SMA مورد بررسی قرار گرفت. اثر بافت ریز نمونه‌های آسفالتی به کمک دستگاه پاندول انگلیسی و بافت درشت نمونه‌های آسفالتی به روش پخش ماسه انجام پذیرفت. در ساخت نمونه‌های آسفالتی SMA از چهار نوع مصالح آهنکی، سیلیسی، سرباره فولاد و سنگدانه بازیافتی از روسازی‌های آسفالتی و یک نوع قیر (60/70) به همراه الیاف پشم سنگ استفاده شد. مخلوط‌های SMA دارای چهار نوع دانه‌بندی با حداکثر اندازه اسمی مصالح 19، 12/5، 9/5 و 4/75 میلیمتر بودند. روش طراحی مخلوط‌های SMA بر اساس روش ارایه شده در استانداردهای بین‌المللی انجام گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مصالح سرباره از لحاظ مقاومت لغزندگی عملکرد بهتری نسبت به مصالح سنگی دیگر دارد و همچنین مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی SMA رابطه مستقیمی با افزایش مقدار حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها دارند و دیگر اینکه سنگدانه‌های مکعبی از مقاومت لغزندگی بیشتری به اندازه 5 تا 10 درصد نسبت به سنگدانه‌های سوزنی و پولکی برخوردار می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: مقاومت لغزندگی، مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA)، پاندول انگلیسی، اندازه اسمی مصالح (NMA)، شکل مصالح سنگی

## 1- مقدمه

وزنی مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهند. از این رو مشخصات سنگدانه‌ها تاثیر مستقیم و به سزایی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی دارد. سنگدانه‌های به کار رفته در مخلوط‌های آسفالتی تاثیر مهم و به سزایی در کاهش یا افزایش مقاومت لغزندگی سطح روسازی دارد. دانه‌بندی مصالح سنگی نیز بر خصوصیات مختلف روسازی آسفالتی تاثیر مهم و بسزایی دارد. با تغییر در دانه‌بندی مصالح، رفتار و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و

افزایش عمر و اجرای رویه آسفالتی مقاوم در برابر آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین و تغییرات دما و فراهم نمودن رویه‌ای غیرلغزنده همراه با تامین جریان مطمئن آمد و شد مورد توجه دست اندرکاران صنعت راهسازی می‌باشد. از طرف دیگر ساخت رویه‌های آسفالتی مقاوم در برابر تغییر شکل برای جاده‌های با آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین حائز اهمیت است. سنگدانه‌های مخلوط‌های آسفالتی بیش از 90 درصد

همچنین نوع مخلوط آسفالتی تغییر می‌کند. خصوصیات مقاومتی، شیارشدگی، مقاومت لغزندگی، درصد قیر بهینه و غیره با نوع دانه‌بندی رابطه دارند و تغییر دانه‌بندی می‌تواند باعث عملکرد بهتر خواص حجمی، مقاومتی و لغزندگی روسازی یا بالعکس شود.

شکل سنگدانه‌ها تاثیر قابل توجهی بر مشخصات مقاومت لغزشی دارد و همچنین فاکتور مهمی در تعیین سختی دانه‌ها و مقاومت در برابر سایش است. فرآیند تولید مصالح چه در سنگدانه‌های طبیعی و چه مصنوعی کنترل‌کننده شکل آن‌ها است. گوشه‌دار بودن سنگدانه‌ها در کیفیت مقاومت لغزشی موثر است اما حفظ این زاویه و گوشه‌دار بودن بستگی به مشخصات سنگدانه (Mineralogical) و مقدار سایش و صیقل شدن در اثر عبور ترافیک دارد (Hamzah, et.al., 2010).

مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای به دلیل وجود درصد بیشتری از مصالح سنگی درشت دانه و دانه‌بندی باز، باعث زهکشی و تخلیه آب‌های سطح روسازی شده و مقاومت لغزندگی را افزایش می‌دهند. همچنین مخلوط‌های آسفالتی SMA به دلیل اینکه از بافت درشت برخوردار می‌باشند در سرعت‌های بالا باعث افزایش سطح تماس لاستیک با سطح روسازی شده و باعث افزایش مقاومت لغزندگی<sup>3</sup> می‌شوند. مخلوط‌های آسفالتی SMA نشان داده‌اند که کمتر دچار تغییر شکل شده و خرابی‌هایی نظیر گودی مسیر چرخ و قیر زدگی در این مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های آسفالتی معمولی کمتر دیده می‌شود و در نتیجه رویه‌های به مراتب مقاوم‌تری در برابر لغزندگی می‌باشند (Pourtahmasb, Karim, 2014).

نیاز به افزایش ایمنی در سطح مسیرهای حرکتی به شدت احساس می‌شود (Chan, Huang, 2010)، با توجه به رابطه نزدیک بین افزایش مقاومت لغزندگی و کاهش تصادفات، بررسی عوامل موثر در مقاومت لغزندگی و همچنین ارزیابی راهکارهای افزایش مقاومت لغزندگی ضروری به نظر می‌رسد که در این راستا با توجه به عملکرد مطلوب مخلوط‌های آسفالتی SMA در برابر لغزندگی، تاثیر دانه‌بندی و شکل سنگدانه‌ها بر مقاومت لغزندگی این نوع مخلوط‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نقش سنگدانه‌ها در مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، هدف اصلی انجام این تحقیق را می‌توان در موارد، ارزیابی تاثیر دانه‌بندی بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی SMA به کمک اندازه‌گیری بافت ریز

توسط دستگاه پاندول انگلیسی<sup>4</sup> BPT و بافت درشت توسط آزمایش پخش ماسه<sup>5</sup> و همچنین بررسی تاثیر شکل مصالح سنگی (مکعبی، سوزنی و پولکی) بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های SMA خلاصه نمود.

در ابتداء طرح اختلاط و درصد قیر بهینه نمونه‌های آسفالتی SMA با 4 نوع دانه‌بندی با اندازه‌های اسمی 19، 12/5، 9/5 و 4/75 میلیمتر و 4 نوع مصالح آهکی، سیلیسی، سرباره فولاد و سنگدانه بازیافتی مطابق با استانداردهای بین المللی نظیر گزارش 425 پروژه NCHRP9-8<sup>6</sup> بدست آمد (Brown, Cooley, 1999) و سپس با ساخت نمونه‌های 6 اینچی با دانه‌بندی و مصالح مختلف در درصد قیرهای متفاوت، تاثیر دانه‌بندی، درصد قیر و نوع مصالح سنگی بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های SMA با استفاده از دستگاه آونگ انگلیسی و آزمایش پخش ماسه مورد بررسی قرار گرفت. در بخش دوم برنامه آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر شکل مصالح سنگی بر مقاومت لغزندگی، نمونه‌هایی با استفاده از سه شکل سنگدانه‌ی مکعبی، سوزنی و پولکی ساخته و با استفاده از دستگاه آونگ انگلیسی مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس از مقطع نمونه عکس گرفته شد و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در نهایت با استفاده از نرم افزار SPSS<sup>7</sup> تحلیل آماری برای بررسی معنی دار بودن نتایج آزمایشگاهی و ارایه درخت گروه‌بندی آنها انجام گردید.

## 2- پیشینه تحقیق

جنبه‌های گوناگونی از مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، تا به امروز در مطالعات مختلف مورد توجه بوده است، که اغلب بر رفتار مقاومت در برابر بار آن توجه شده است، البته پژوهشهایی در زمینه عملکرد وظیفه‌ای این نوع مخلوط انجام شده، نظیر مطالعات حمزه<sup>8</sup> و همکاران که عمق بافت درشت مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق ایشان، دو نمونه آسفالتی SMA با اندازه اسمی 14 میلیمتر، دو نمونه آسفالتی SMA با اندازه اسمی 12/5 میلیمتر و دو نمونه کنترل (آسفالت معمولی) با دانه‌بندی پیوسته مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش اندازه اسمی سنگدانه، عمق بافت درشت افزایش یافته است و همچنین نمونه‌های SMA نسبت به نمونه‌های آسفالت معمولی (نمونه کنترل) از عمق بافت بیشتری

برخوردار می‌باشند و با افزایش عمق بافت درشت، مقاومت لغزندگی و مقدار BPN افزایش می‌یابد (Hamzah, Mohamed, 2004)

احدی و همکاران در تحقیقی تاثیر بافت درشت روسازی در کنترل لغزندگی و کاهش تصادفات جاده‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در نتایج مطالعات آنها مشاهده می‌شود عمق متوسط بافت درشت برای دانه بندی پیوسته شماره 5 نسبت به دانه بندی شماره 4 پیوسته، کمتر است که به دلیل وجود مقدار ریزدانه بیشتر و مقدار درشت دانه کمتر از دانه بندی شماره 4 است. بنابراین برای خروج آب سطحی (زهکشی) برای دانه بندی شماره 4 بهتر است که تماس لاستیک با آب سطح جاده کمتر باشد. به این ترتیب نیروی اصطکاک به وجود آمده در اثر ترمز وسیله نقلیه روی سطح جاده عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد و در نهایت ایمنی و افزایش کنترل در تصادفات جاده‌ای فراهم می‌شود (Ahadi, Mansorkhaki, 2010). با افزایش ابعاد و فاصله بین سنگدانه‌ها، بافت روسازی درشت‌تر می‌شود و باعث افزایش مقاومت لغزندگی می‌شود اما تحقیقات نشان داده است که با افزایش بیش از حد اندازه اسمی سنگدانه و به تبع آن افزایش فاصله بین سنگدانه‌ها (افزایش فاصله بین سنگدانه) بافت سطحی روسازی از حالت منظم و یکنواخت به بافت سطحی نامنظم تبدیل شده و باعث کاهش مقاومت لغزندگی می‌شود (Yorong, Kapalim, 2009, Lee, Choo, 2005).

اندازه سنگدانه‌ها در کیفیت مقاومت لغزشی روسازی موثر است، البته این اندازه باید با توجه به نوع روسازی و طراحی مخلوط انتخاب شود. اصولاً سنگدانه‌های درشت نسبت به سنگدانه‌های ریز در مخلوط آسفالت سهم بیشتری در مقاومت لغزشی دارند. در تحقیقی که توسط ژانگ<sup>8</sup> و همکاران در سال 2013 انجام شد مطالعه عددی تاثیر اندازه سنگدانه بر روی مقاومت لغزندگی آسفالت متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از سه نوع سنگدانه با اندازه 12 و 16 و 18 میلیمتر استفاده شد و سطح تماس دال روسازی با لاستیک در شرایط وجود آب شبیه سازی شد. نتایج نشان داد که سنگدانه با اندازه بزرگتر به دلیل زهکشی بهتر و ضخامت کمتر آب موجود بر روی سطح روسازی مقاومت لغزندگی بیشتری دارد (Zhang, Ong, 2013). همچنین در تحقیقی که در سال 2014 انجام شد اثر بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها بر روی مقاومت لغزندگی مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت، که

نشان می‌دهد هرچه حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها بزرگتر باشد عدد اصطکاک نیز بیشتر است (Fakhri, Taribakhash, 2014).

در مطالعاتی که توسط فوا<sup>9</sup> در زمینه انواع دانه‌بندی انجام شده است این نتیجه بدست آمد که دانه بندی باز موفقیت بیشتری در خروج آب و زهکشی آن در بین تایر و سطح راه دارد و در نتیجه شیب کاهش نمودار سرعت در مقابل مقاومت لغزشی در دانه بندی باز کمتر است (Fwa, Choo, 2003). در تحقیقی در سال 2013، برای جرم و همکاران مقاومت لغزندگی بین آسفالت متخلخل و آسفالت متداول را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از دانه بندی شماره 4 نشریه 234 برای مخلوط آسفالتی معمولی (HMA<sup>10</sup>) و دانه‌بندی شماره 1 نشریه 234 برای آسفالت متخلخل استفاده شده است. سنگدانه‌های مورد استفاده از مصالح رودخانه‌ای شکسته بوده و دو قیر 85/100 و 85/100 اصلاح شده با پلیمر SBS<sup>11</sup> برای ساخت نمونه‌ها به کار برده شده است. دو نمونه آسفالت معمولی با قیر خالص 85/100 و قیر خالص 85/100 اصلاح شده با پلیمر و چهار نمونه آسفالت متخلخل با دو دانه بندی مختلف و دو نوع قیر ساخته شد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که آسفالت متخلخل (نمونه‌های PFC<sup>12</sup>) مقاومت لغزندگی بهتری در مقایسه با مخلوط آسفالتی معمولی دارد. آسفالت متخلخل به دلیل دانه بندی باز، امکان زهکشی و تخلیه آب بین سطح راه و تایر در آن وجود دارد و به همین دلیل نسبت به آسفالت معمولی که از دانه بندی پیوسته در آن استفاده شده است عملکرد بهتری از لحاظ مقاومت لغزندگی دارد. نمونه PFC-1 به دلیل اینکه از درشت دانه بیشتری نسبت به نمونه PFC-2 برخوردار است مقاومت لغزندگی در آن بیشتر می‌باشد. البته نمونه‌های با دانه بندی باز، از لحاظ پارامترهای مرتبط با طرح اختلاط مانند استقامت مارشال و درصد فضای خالی مخلوط دارای مقادیر مناسبی نیست و مشاهده می‌شود افزودن پلیمر در نمونه‌ها باعث افزایش عدد اصطکاک شده است (Barazijomor, Fakhari, 2013).

در تحقیقی در سال 1387، عامری و همکاران تاثیر نوع دانه بندی از دو جنس مصالح آهکی شکسته و سرباره کوره آهن گدازی بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی را مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحقیق از دو نوع دانه بندی پیوسته و باز شماره 5 آیین نامه روسازی راه‌های ایران استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که دانه بندی باز نسبت به دانه بندی پیوسته

نتایج بدست آمده در سایر تحقیقات به وضوح مشاهده می‌گردد اثر شکل و دانه بندی بر عملکرد مواد آسفالتی تاثیرگذار است، اما تحقیق جامعی که مقایسه اثرات همزمان این عوامل را دنبال نماید مشاهده نگردید و اثر شکل سنگدانه های مصالح سنگی بر عملکرد مقاومت لغزشی مخلوط آسفالتی به طور مشخص مورد توجه قرار نگرفته است.

### 3- طرح اختلاط و برنامه آزمایشگاهی

در ابتدا نمونه‌های آسفالتی با توجه به طرح اختلاط نمونه‌های SMA جهت رسیدن به درصد قیر بهینه تهیه و سپس نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش آونگ انگلیسی برای ارزیابی مقاومت لغزندگی، با درصد قیر بهینه ساخته شدند. در این قسمت گردشکار این تحقیق رسم شده است که روش و مراحل کار آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق به طور مختصر در شکل (1) نشان داده می‌شود.

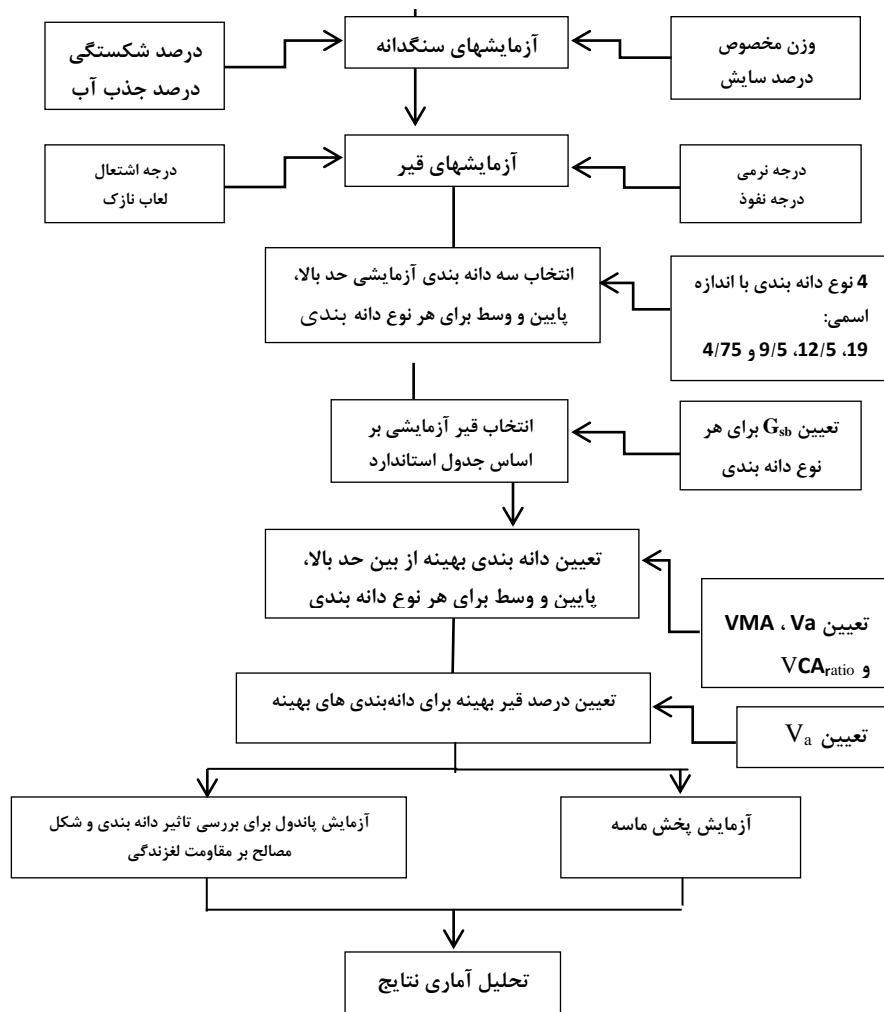
### 3-2- مصالح مصرفی

سنگدانه‌های آهکی شکسته کوهی که از منطقه کوهستانی شهرستان تفت و سنگدانه‌های سیلیسی از ضایعات معدن سنگ آهن بافق و سنگدانه‌های سرباره فولاد که از کارخانه فولاد آلیاژی یزد تهیه شدند. سنگدانه‌های بازیافتی از روسازی‌های آسفالتی سطح استان یزد (درصد قیر موجود 2/8 درصد) و فیلر مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها، از جنس خود مصالح می‌باشند. قیر با درجه نفوذ 60/70 که از پالایشگاه اصفهان و الیاف پشم سنگ از کارخانه پشم سنگ ایران تهیه شد. شکل (2) سنگدانه‌های استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

مصالح سنگی مصرفی در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای باید از سختی و استحکام کافی برخوردار و تحت تاثیر بارهای وارده ناشی از آمد و شد وسایل نقلیه مقاومت لازم را دارا باشند و نباید در اثر تنشهای ناشی از وزن آنها شکسته و خرد شوند. سختی مصالح با انجام آزمایش سایش لوس آنجلس مطابق استاندارد ASTM C131 بدست می‌آید (ASTM, 2005). نتیجه آزمایش در جدول (1) آمده است. گزارش 425 مربوط به پروژه NCHRP9-8<sup>18</sup> و نشریه شماره 206، طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی SMA (IMPO, 2000) مقدار مجاز سایش به روش لوس آنجلس برای سنگدانه‌های استفاده شده در مخلوط‌های SMA را حداکثر 30 درصد پیشنهاد کرده که مصالح مورد استفاده مقدار مجاز را پوشش می‌دهند.

عملکرد بهتری از لحاظ مقاومت لغزندگی دارد. دلیل آن می‌تواند زهکشی مناسب و متخلخل بودن نمونه باشد. (Ameri, 2009) در تحقیقات ابراهیم<sup>13</sup> آسی، در سال 2007 به منظور بررسی مخلوط‌های آسفالتی مختلف، نمونه‌هایی با استفاده از روش طرح مارشال و 0/5٪ و 1٪ بیش از درصد قیر بهینه، نمونه‌هایی با استفاده از روش طرح اختلاط روسازی<sup>14</sup> ممتاز، نمونه‌های SMA و نمونه‌هایی با 30٪ سرباره، تهیه شد. سپس با استفاده از آزمایش آونگ انگلیسی، مقاومت در برابر لغزندگی نمونه‌ها اندازه گیری گردید. نتایج نشان داد که استفاده از سرباره در مخلوط آسفالتی و آسفالت با دانه بندی استخوانی موجب افزایش عدد آونگ انگلیسی می‌شود. همچنین، مخلوط‌های آسفالتی که به روش طرح اختلاط روسازی ممتاز ساخته شده‌اند از مقاومت لغزندگی بالایی برخوردارند (Asi, 2007).

در تحقیقی که در سال 2014 توسط یونس<sup>15</sup> احمد و همکاران انجام شد تاثیر سه شکل سنگدانه بر خصوصیات آسفالت مورد بررسی قرار گرفت. در تحقیق مورد اشاره از سه شکل مکعبی، سوزنی و پولکی برای بررسی تاثیر شکل استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داده است که سنگدانه مکعبی مقاومت مارشال، وزن مخصوص، نسبت مارشال، مدول سختی و مقاومت کششی غیر مستقیم را نسبت به سنگدانه‌های سوزنی و پولکی افزایش می‌دهد ولی روانی و فضای خالی را کاهش می‌دهد (Younesahmad, Hashem, 2014). در تحقیقی که توسط شاه<sup>16</sup> و همکاران در سال 2010 انجام شد، اثر شکل سنگدانه‌ها بر روی مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط خشک و مرطوب مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق سه شکل مختلف مورد بررسی قرار گرفت: گوشه دار، سوزنی و پولکی. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد که سنگدانه‌های گوشه دار بالاترین مقاومت لغزندگی و سنگدانه‌های پولکی کمترین مقاومت لغزندگی را دارا می‌باشند. همچنین تحت شرایط مرطوب سطح روسازی، مقاومت لغزندگی کاهش می‌یابد (Shah, Abdolalh, 2010). در تحقیقی دیگر که توسط بوراک<sup>17</sup> و همکاران در سال 2014 انجام شد اثر شکل سنگدانه‌ها بر روی خصوصیات سطحی روسازی انعطاف پذیر بررسی شد، در این مطالعات از دو نوع سنگدانه بازالتی و آهکی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد نمونه سنگ‌های بازالتی که با ضربه خرد شدند، بالاترین ضریب اصطکاک را دارا می‌باشند (Burak, Onsonri, 2010). با توجه به



شکل 1. گردشکار روش تحقیق به کاررفته



شکل 2. سنگدانه های استفاده شده در این تحقیق

اجزاء تشکیل دهنده الیاف پشم سنگ را نشان می‌دهد.

### 3-3- طرح اختلاط نمونه‌های SMA

در این تحقیق از چهار نوع دانه‌بندی با حداکثر اندازه اسمی مصالح 19، 12/5، 9/5 و 4/75 و چهار نوع مصالح آهکی، سیلیسی، سرباره و آسفالت بازیافتی استفاده شده است. روش طراحی مخلوط‌های SMA به منظور تعیین دانه‌بندی بهینه برای مخلوط‌های مختلف (دانه‌بندی با اندازه اسمی مختلف) و درصد قیر بهینه بر اساس روش ارایه شده در گزارش 425 مربوط به پروژه NCHRP 9-8 انجام گرفته است (Brown, Cooley, 1999). در این حالت دانه‌بندی بهینه لازمست به نحوی انتخاب شود که برای رسیدن به درصد حفرات هوا (Va) مورد نظر (3 تا 4 درصد)، کمترین مقدار قیر حاصل شود.

دانه‌بندی بهینه برای مخلوط‌های مختلف به شرح زیر به دست آمد:

- حداکثر اندازه اسمی مصالح 19 میلیمتر: حد پایین

- حداکثر اندازه اسمی مصالح 12/5 میلیمتر: حد وسط

- حداکثر اندازه اسمی مصالح 9/5 میلیمتر: حد وسط

- حداکثر اندازه اسمی مصالح 4/75 میلیمتر: حد پایین

شکل (3) نمودار دانه‌بندی‌های مربوط به مخلوط‌هایی با حداکثر اندازه اسمی مصالح مختلف مورد استفاده را نشان می‌دهد. توان 0/45 خط منحنی است که بر اساس فرمول فولر حداکثر چگالی دانه‌بندی را نشان می‌دهد، یعنی هرچه منحنی دانه‌بندی به این خط نزدیک‌تر باشد چگالی مخلوط بیشتر می‌شود. پس از تعیین دانه‌بندی بهینه، میزان قیر بهینه برای مخلوط تعیین می‌شود.

به منظور تعیین قیر بهینه باید میزان قیر را تغییر داد سپس با توجه به وزن مخصوص حقیقی نمونه متراکم شده ( $G_{mb}$ ) و حداکثر وزن مخصوص تئوری مخلوط ( $G_{mm}$ ) میزان حفرات هوا ( $V_a$ ) بدست می‌آید و منحنی  $V_a$  در برابر قیر رسم شده و با استفاده از درون‌یابی میزان قیر بهینه در نقطه‌ای که درصد هوا 4 درصد باشد، انتخاب می‌شود.

در این مرحله برای دانه‌بندی بهینه 9 نمونه مارشال (3 نمونه در 3 درصد قیر مختلف) در درصد قیرهای مختلف برای هر یک از مصالح (آهکی، سیلیسی، سرباره و آسفالت بازیافتی) ساخته می‌شود. جدول (3) درصد قیر بهینه مخلوط‌های مختلف را نشان می‌دهد.

وزن مخصوص مصالح سنگی در محاسبات مربوط به مشخصات مخلوط آسفالتی در طرح اختلاط به خصوص در تعیین فضای خالی مخلوط آسفالتی کوبیده شده و فضای خالی مصالح سنگی اثر قابل ملاحظه‌ای دارد، آزمایش وزن مخصوص و جذب آب برای مصالح درشت دانه و ریزدانه به ترتیب مطابق استاندارد ASTM C127 و ASTM C128 به طور جداگانه انجام شده و نتایج آن برای محاسبات درصد قیر بهینه در آزمایش مارشال استفاده می‌گردد (ASTM, 2005). نتیجه آزمایش وزن مخصوص و جذب آب بر روی سنگدانه‌های مصرفی در جدول (1) آورده شده است. همان طور که در جدول (1) مشاهده می‌شود وزن مخصوص سرباره از مصالح دیگر بیشتر و درصد جذب آب خرده آسفالت کمتر از مصالح دیگر می‌باشد. پروژه NCHRP9-8 و نشریه 206 مقدار مجاز جذب آب مصالح را حداکثر 2 درصد در نظر گرفته است که مطابق جدول (1) درصد جذب آب مصالح مصرفی در حد مجاز می‌باشد. درصد ذرات سوزنی شکل، درصد وزنی مصالح سنگی است که طول آنها 1/8 اندازه متوسط دانه‌ها باشد. همچنین درصد ذرات پولکی شکل، درصد وزنی مصالح سنگی است که ضخامت آنها کمتر از 0/6 اندازه متوسط دانه‌ها باشد (مطابق استاندارد BS812-105). مقدار مجاز درصد ذرات سوزنی و پولکی طبق گزارش NCHRP9-8 و نشریه 206 حداکثر 20 درصد می‌باشد که مقادیر جدول (1) در حد مجاز می‌باشد. نتایج این آزمایش در جدول (1) آورده شده است. گزارش NCHRP9-8 و نشریه 206 حداقل درصد شکستگی مصالح را 90 درصد در نظر گرفته است که نتایج جدول (1) در حد مجاز می‌باشد (IMPO, 2000).

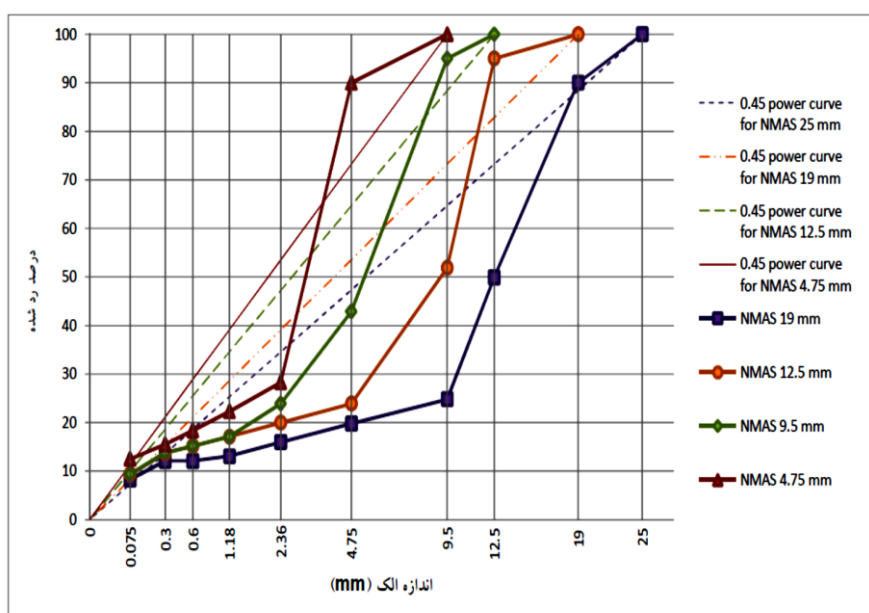
الیاف در مخلوط‌های آسفالتی SMA به منظور جلوگیری از ریزش قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی SMA با توجه به سهولت دسترسی و رعایت مسائل ایمنی، بهداشتی و زیست محیطی از پشم سنگ که یک نوع الیاف معدنی می‌باشد استفاده شده است. مقدار الیاف پشم سنگ برای ساخت نمونه‌ها، مطابق گزارش NCHRP9-8 و نشریه شماره 206، 0/4 درصد نسبت به وزن کل مخلوط در نظر گرفته شده است. طول الیاف مصرفی در ساخت نمونه‌های آسفالتی در حدود یک میلیمتر بوده است که گزارش NCHRP9-8 و نشریه شماره 206 حداکثر طول الیاف را 6 میلیمتر در نظر گرفته است جدول (2) ترکیب شیمیایی

جدول 1. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق

درصد جذب آب (%)	وزن مخصوص مصالح سنگی ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )		دانه بندی	آزمایش درصد شکستگی			آزمایش سایش لوس آنجلس	نوع مصالح
	وزن مخصوص ظاهری	وزن مخصوص واقعی		درصد شکستگی (%)	درصد تورق (%)	درصد تطویل (%)		
0/6	2/734	2/689	درشت دانه	97	12	10	22	آهکی
1/4	2/674	2/594	ریز دانه					
1/4	2/558	2/45	درشت دانه	100	18	13	20	سیلیسی
1/9	2/606	2/374	ریز دانه					
1/7	2/938	2/83	درشت دانه	100	16	12	18	سرباره
2	2/89	2/755	ریز دانه					
0/6	2/66	2/55	درشت دانه	92	19	17	25	آسفالت باز یافتی
1/2	2/615	2/478	ریز دانه					

جدول 2. ترکیب شیمیایی اجزاء تشکیل دهنده الیاف پشم سنگ

نوع ترکیب	فرمول شیمیایی	مقدار بر حسب درصد
اکسید سیلیسیم	$\text{SiO}_2$	60
اکسید آلومینیوم	$\text{Al}_2\text{O}_3$	15
اکسید آهن	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6/3
اکسید کلسیم	$\text{CaO}$	6/4
اکسید منیزیم	$\text{MgO}$	3/8
اکسید سدیم	$\text{Na}_2\text{O}$	3/6
اکسید پتاسیم	$\text{K}_2\text{O}$	0/9
افت وزنی در مقابل حرارت	-	2/9



شکل 3. منحنی‌های دانه‌بندی مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق

جدول 3. درصد قیر بهینه و مقاومت مارشال مخلوط‌های مختلف

نوع مصالح نوع دانه‌بندی	مشخصات	آهکی	سیلیسی	سرباره	آسفالت بازیافتی
19 میلیمتر (حد پایین)	قیر بهینه %	6/14	6/1	6/3	4/8
	مقاومت مارشال (کیلوگرم)	660	695	745	555
12/5 میلیمتر (حد وسط)	قیر بهینه %	6/3	6/2	6/5	5/1
	مقاومت مارشال (کیلوگرم)	740	770	840	565
9/5 میلیمتر (حد وسط)	قیر بهینه %	6/5	6/4	6/7	5/3
	مقاومت مارشال (کیلوگرم)	870	880	980	695
4/75 میلیمتر (حد پایین)	قیر بهینه %	6/7	6/5	6/8	5/6
	مقاومت مارشال (کیلوگرم)	995	1040	1185	815

الک شماره 4 را جدا کرده سپس طبق استاندارد BS812-105 سنگدانه‌های سوزنی و پولکی را با استفاده از تجهیزات آزمایش مربوطه از دیگر سنگدانه‌ها جدا می‌شوند. در این تحقیق به منظور ارزیابی تاثیر شکل مصالح سنگی بر مقاومت لغزندگی، نمونه‌های الف، ب، ج، 80 درصد مکعبی، ب، 80 درصد مکعبی-20 درصد سوزنی، و ج، 80 درصد مکعبی-20 درصد پولکی، در دو دانه‌بندی با اندازه اسمی 19 و 12/5 میلیمتر ساخته شدند (به منظور تاثیر دانه‌بندی و وجود ذرات ریزدانه در دانه‌بندی با اندازه اسمی 9/5 و 4/75 میلیمتر از دو دانه‌بندی درشت دانه 19 و 12/5 میلیمتر استفاده شد) و مقاومت لغزندگی آنها بوسیله دستگاه پاندول انگلیسی اندازه‌گیری شد. مطابق گزارش NCHRP9-8 حداکثر درصد ذرات سوزنی و پولکی برای مخلوط‌های آسفالتی SMA، 20 درصد می‌باشد. به همین منظور در ساخت هر نمونه از 20 درصد ذرات سوزنی و یا پولکی تجاوز نشد. به دلیل تاثیر ناچیز وجود 10 درصد ذرات سوزنی و پولکی بر مقاومت لغزندگی نتایج آن در تحقیق ذکر نشد و نمونه‌ها از سنگدانه مصالح آهکی ساخته شدند. شکل (5) تصویری از سنگدانه‌های مکعبی، پولکی و سوزنی را نشان می‌دهد.

### 3-4- آزمایش‌های ارزیابی مقاومت لغزندگی

پس از ساخت نمونه‌های 6 اینچی که نحوه ساخت و متراکم کردن آن در بخش قبل بیان شد، به منظور ارزیابی مقاومت لغزندگی نمونه‌ها در دانه بندی و مصالح مختلف (4 نوع دانه‌بندی با 4 نوع مصالح) از دستگاه پاندول انگلیسی مطابق استاندارد ASTM E303 استفاده شد. آزمایش در شرایط خشک

همانگونه که در جدول (3) مشاهده می‌شود در هر چهار نوع مصالح با کاهش اندازه اسمی درصد قیر بهینه افزایش می‌یابد (مطابق نتایج حافظ و همکاران (Hafez, Kamal, 2015)). همچنین از بین مصالح مختلف در دانه‌بندی یکسان، سرباره بیشترین درصد قیر بهینه و آسفالت بازیافتی کمترین درصد قیر بهینه را دارا بودند (مطابق نتایج عامری و همکاران (Ameri, Behnod, 2012)). سرباره به دلیل وزن مخصوص بیشتر و درصد فضای خالی و خلل و فرج بیشتری که دارد برای رسیدن به فضای خالی 4 درصد نیاز به قیر بیشتری دارد. آسفالت بازیافتی نیز به دلیل داشتن درصد قیر موجود (2/8 درصد) و جذب قیر کمتر، درصد قیر بهینه کمتری دارد. همچنین مصالح آهکی به دلیل وزن مخصوص بیشتر نسبت به مصالح سیلیسی، جذب قیر بیشتری دارند و در نتیجه درصد قیر بهینه بالاتری نسبت به مصالح سیلیسی دارند (مطابق نتایج کائو و همکاران (Cao, Liao, 2013)). شکل (4) بخشی از نمونه‌های 6 اینچی ساخته شده را نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی تاثیر شکل مصالح سنگی بر مقاومت لغزندگی از سه شکل مکعبی، سوزنی و پولکی سنگدانه استفاده شد. مطابق استاندارد BS812-105، سنگدانه‌های مکعبی، پولکی و سوزنی به صورت زیر تعریف می‌شوند (BS-812-2009): مکعبی: دارای گوشه‌های لبه‌دار و نسبت ابعاد وجه‌ها نزدیک به یک باشد.

پولکی: ضخامت آنها کمتر از 0/6 اندازه متوسط دانه‌ها باشد. سوزنی: طول آنها 1/8 اندازه متوسط دانه‌ها باشد. برای انتخاب شکل سنگدانه، ابتدا مصالح مانده روی



و مرطوب سطح نمونه‌ها انجام گرفت. آزمایش پخش ماسه به منظور تعیین عمق بافت درشت نمونه‌ها و رابطه عمق بافت درشت با مقاومت لغزندگی انجام شد. آزمایش پخش ماسه بر روی نمونه‌های سیلیسی با 4 نوع دانه‌بندی و درصد قیرهای مختلف انجام گرفت.

#### 4- نتایج آزمایشگاهی و تحلیل نتایج

پس از ساخت نمونه‌های آسفالتی SMA، آزمایش مقاومت لغزندگی با استفاده از دستگاه آونگ انگلیسی مطابق استاندارد ASTM E303 انجام گرفت. نتایج به دست آمده از انجام آزمایش به صورت جدول و نمودار، به همراه تفسیر نتایج در این قسمت ارائه شده است.

#### 4-1- نتایج آزمایش BPN نمونه‌های آسفالتی

##### SMA و تحلیل آن

به منظور ارزیابی مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی از پاندول انگلیسی استفاده شده است. جهت بررسی تاثیر نوع مصالح بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های SMA از چهار نوع مصالح آهکی، سیلیسی، سرباره و آسفالت بازیافتی استفاده شده است. برای بررسی تاثیر نوع دانه‌بندی و اندازه اسمی بر مقاومت لغزندگی، نمونه‌های SMA در اندازه‌های اسمی 19، 12/5، 9/5 و 4/75 میلیمتر ساخته شد شکل (6) رابطه بین دانه‌بندی و اندازه اسمی با مقاومت لغزندگی را برای انواع مصالح نشان می‌دهند.

در تحلیل و بررسی تاثیر دانه‌بندی و NMAS بر مقاومت لغزندگی با توجه به شکل (6) مشاهده می‌شود که در هر 4 نوع مصالح مورد استفاده، دانه‌بندی با حداکثر اندازه اسمی 12/5 میلیمتر دارای بیشترین مقدار BPN می‌باشد و در واقع با افزایش مقدار NMAS مقدار BPN هم افزایش می‌یابد (مطابق نتایج ژانگ و همکاران (Zhang, Ong, 2013) و فخری (Fakhri, Taribakhash, 2014)). از دلایل این امر می‌توان به

دیاگرام فولر این نمونه‌ها اشاره کرد که در شکل (4) نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد هرچه منحنی دانه‌بندی به خط توان 0/45 نزدیکتر باشد چگالی دانه‌بندی بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه نمونه‌های با NMAS بیشتر دارای فاصله بیشتری نسبت به خط فولر می‌باشند در نتیجه از چگالی کمتر و به تبع آن از دانه‌بندی بازتری برخوردار می‌باشند که این امر باعث افزایش مقدار BPN آنها می‌شود. یکی از نتایج دیگری که از شکل (6) قابل برداشت می‌باشد این است که نمونه با حداکثر اندازه اسمی 19 میلیمتر دارای مقدار BPN کمتری نسبت به نمونه با حداکثر اندازه اسمی 12/5 میلیمتر می‌باشد که دلیل این امر بافت سطحی نامنظم‌تر نمونه‌های NMAS 19 mm به دلیل افزایش فاصله بین سنگدانه‌ها است. مطابق نتایج یورنگ و لی می‌توان نتیجه گرفت بافت سطحی منظم نمونه نیز در افزایش مقاومت لغزندگی تاثیر می‌گذارد و تنها با توجه به معیار NMAS نمی‌توان در مورد مقاومت در برابر لغزندگی پیش‌بینی ارائه نمود. همچنین شکل (6) نشان دهنده تاثیر بسزای رطوبت در کاهش مقدار BPN مصالح می‌باشد. مقاومت لغزندگی نمونه‌ها در حالت مرطوب 10 تا 20 درصد نسبت به حالت خشک کمتر می‌باشد و این مطلب نشان دهنده تاثیر بسزای رطوبت سطح راه در افزایش تصادفات می‌باشد (مطابق نتایج فونیتس (Fuents, 2009)).

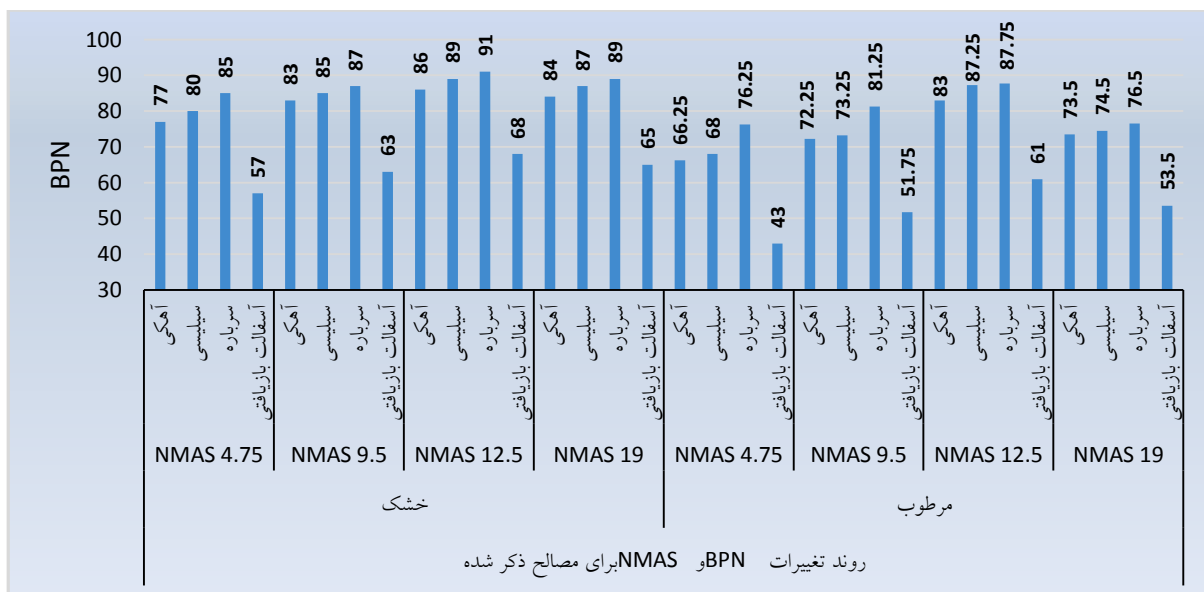
با توجه به شکل (6) مشاهده می‌شود که در دانه‌بندی‌های یکسان، سرباره بیشترین مقاومت لغزندگی و آسفالت بازیافتی کمترین مقاومت لغزندگی را دارا می‌باشند. سرباره به دلیل بافت ریز و سطح زبر و شکل گوشه‌داری که دارد نسبت به مصالح دیگر مقاومت لغزندگی بیشتری دارد (مطابق نتایج شائوپینگ (Shaoping, et al., 2007)، یونگ جی (Youngjie, et al., 2006)، آسی (Asi, 2007)، لیاپیس (Liapis, Likoydis, 2012)). مصالح آسفالت بازیافتی به دلیل اینکه بر اثر عبور ترافیک طی چند سال صیقل یافته‌اند و شکل گرد گوشه به خود گرفته‌اند از لحاظ مقاومت لغزندگی عملکرد ضعیفی دارند. همچنین مصالح سیلیسی مقاومت لغزندگی بیشتری نسبت به مصالح آهکی دارند.



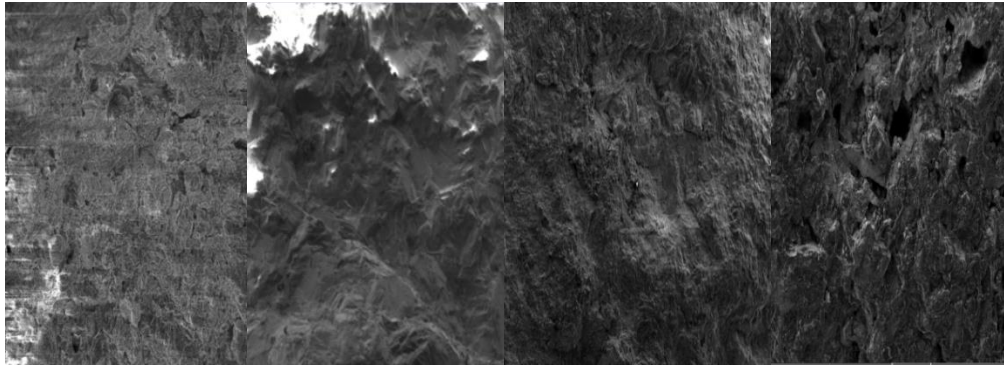
شکل 4. نمونه 15 سانتیمتری ساخته شده و نمایش تاثیر اندازه اسمی بر شکل ظاهری نمونه‌ها



شکل 5. تصویری از سنگدانه‌های مکعبی، پولکی و سوزنی



شکل 6. نمودار تغییرات عدد BPN نسبت به تغییرات نوع مصالح و شرایط سطحی و اندازه اسمی سنگدانه‌ها



الف) سرباره (ب) سیلیس (ج) آهکی (د) آسفالت بازیافتی

شکل 7. تصویر میکروسکوپی از بافت سطح 4 نوع سنگدانه

#### 4-2- نتایج آزمایش پخش ماسه و تحلیل نتایج

به منظور بررسی تاثیر نوع دانه‌بندی و اندازه اسمی سنگدانه‌ها در بافت درشت، نمونه‌های SMA در اندازه‌های اسمی 19، 12/5، 9/5 و 4/75 میلیمتر ساخته شد و همچنین به منظور بررسی تاثیر میزان قیر بر بافت درشت، نمونه‌ها در درصد قیر بهینه ساخته شد، روند تغییرات بافت درشت بر حسب NMAS در شکل (8) آورده شده است. همانگونه که در شکل (8) مشخص است بافت درشت (MTD) و مقدار NMAS رابطه مستقیمی دارند و این بدان معنا می‌باشد که با افزایش مقدار NMAS مقدار بافت درشت و در نتیجه مقاومت لغزندگی افزایش می‌یابد مطابق نتایج حمزه (Hamzah, et.al., 2004). در بین نمونه‌های SMA نمونه با NMAS 19 میلیمتر دارای بیشترین و نمونه با NMAS 4/75 میلیمتر دارای کمترین بافت درشت می‌باشند. دانه‌بندی با اندازه اسمی بیشتر حجم بیشتری از ماسه را برای پر کردن فضای خالی سطح خود نیاز دارد و در نتیجه با افزایش حجم ماسه بر روی سطح نمونه مقدار بافت درشت افزایش می‌یابد.

#### 4-3- ارزیابی تاثیر شکل و تحلیل نتایج

همانگونه که بیان شد سه نمونه 100 درصد مکعبی، 80 درصد مکعبی-20 درصد پولکی و 80 درصد مکعبی-20 درصد سوزنی با مصالح آهکی در دو دانه‌بندی 19 و 12/5 میلیمتر در درصد قیر بهینه ساخته شدند و مقاومت لغزندگی آنها در شرایط خشک و مرطوب به وسیله دستگاه پاندول اندازه گیری شد که نتایج آن در شکل (9) آورده شده است، که تاثیر شکل مصالح سنگی بر مقاومت لغزندگی را در دو دانه‌بندی با اندازه اسمی 12/5 و 19 میلیمتر نشان می‌دهد.

در بررسی تاثیر نوع مصالح بر مقاومت لغزندگی، به تحلیل بافت سطحی سنگدانه‌ها با استفاده از تصویر میکروسکوپی از بافت سطحی آنها پرداخته شده است. شکل (7) تصویر میکروسکوپی از بافت سطح 4 نوع سنگدانه را نشان می‌دهد.

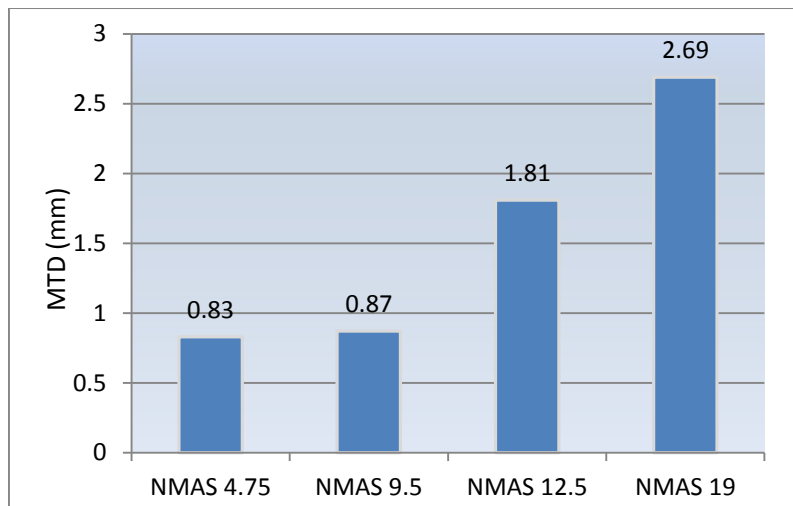
همان طور که از شکل (7) مشاهده می‌شود، سرباره (شکل 7-الف) از بافت ریز و خلل و فرج بیشتری نسبت به سنگدانه‌های دیگر برخوردار است و از نظر عدد پاندول انگلیسی که بافت ریز را اندازه گیری می‌کند عملکرد بهتری دارد. همچنین شکل (7-د) بافت سطح آسفالت بازیافتی را نشان می‌دهد که به دلیل استفاده شدن این سنگدانه‌ها در لایه رویه روسازی و عبور ترافیک سطح صاف و صیقلی دارند. در مقایسه بافت سطح سنگ سیلیس و آهک همان گونه که از تصویر بافت این دو نوع سنگدانه مشخص است بافت سنگ سیلیس ریزتر و زبرتر می‌باشد و در نتیجه مقاومت لغزندگی بهتری نسبت به سنگ آهک دارد.

با توجه به نتایج استحکام مارشال نمونه‌های SMA که در جدول (3) مشخص شده است، نمونه‌های با اندازه اسمی (NMAS) بزرگتر استقامت مارشال کمتری دارند. با در نظر داشتن این موضوع می‌توان به این نتیجه رسید که هرگاه مقاومت روسازی از نظر سازه‌ای برای یک پروژه مهم باشد از مخلوط‌های SMA با NMAS کمتر استفاده شود و هرگاه برای یک پروژه مقاومت لغزندگی از درجه اهمیت بیشتری برخوردار باشد از مخلوط‌های SMA با NMAS بیشتر پیشنهاد می‌شود.

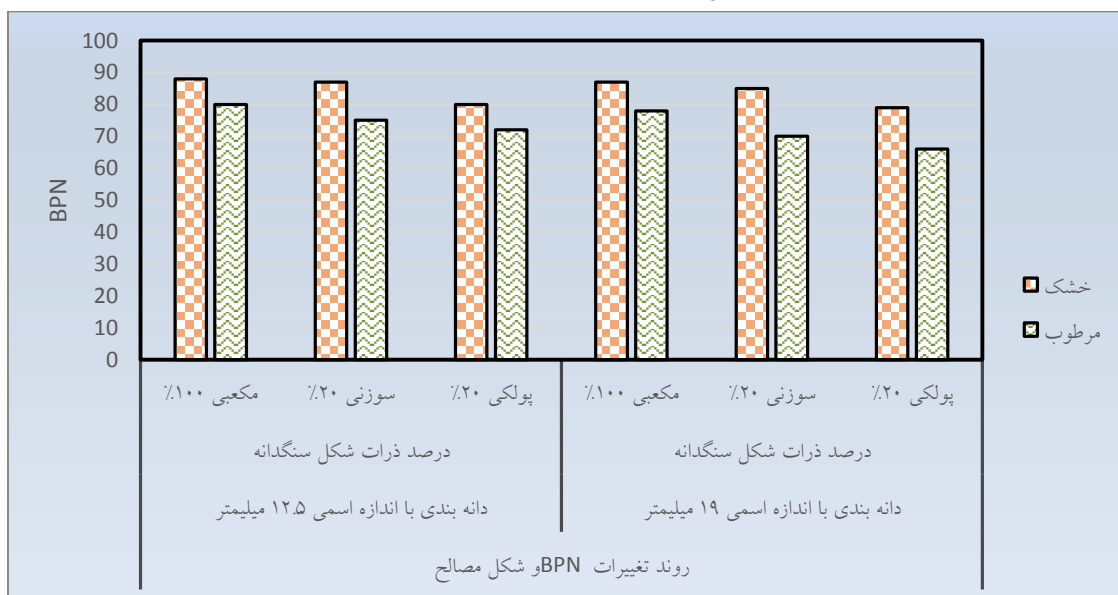
همانگونه که مشخص است در هر دو دانه‌بندی، سنگدانه مکعبی بالاترین مقاومت لغزندگی و سنگدانه پولکی کمترین مقاومت لغزندگی را دارد. سنگدانه مکعبی به دلیل گوشه‌دار بودن و سطح تماس بیشتری که با سطح لاستیک ایجاد می‌کند در برابر لغزندگی عملکرد بهتری دارد (مطابق با نتایج شاه و همکاران (Shah,Abdollah,2010)). همچنین این شکل نشان می‌دهد که سطح مرطوب مقاومت لغزندگی کمتری نسبت به سطح خشک دارد. در بررسی تاثیر دانه‌بندی نیز در هر سه نمونه (100% مکعبی، 20% سوزنی و 20% پولکی) دانه‌بندی با اندازه اسمی 12/5 میلیمتر همان طور که قبلاً هم گفته شد به دلیل بافت سطحی منظم مقاومت لغزندگی بیشتری نسبت به

دانه‌بندی با اندازه اسمی 19 میلیمتر دارد.

برای بررسی و تحلیل تاثیر شکل مصالح سنگی بر مقاومت لغزندگی، از سطح دو نمونه (نمونه 100 درصد مکعبی و نمونه 80 درصد مکعبی-20 درصد سوزنی) برش افقی زده شد تا تاثیر شکل مکعبی و سوزنی بر مقاومت لغزندگی نمایش داده شود (مطابق با تحقیقات بسا Bessa, (Branco, 2012)). به دلیل اینکه در برش افقی سطح نمونه، شکل پولکی قابل تشخیص نمی‌باشد، تنها از دو نمونه مکعبی و سوزنی برش زده شد. برای بررسی درصد ذرات مکعبی و سوزنی در نمونه، شکل (10) تصویر سطح دو نمونه بعد از برش، در نرم افزار فتوشاپ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.



شکل 8. روند تغییرات MTD و NMAS



شکل 9. روند تغییرات BPN و شکل مصالح

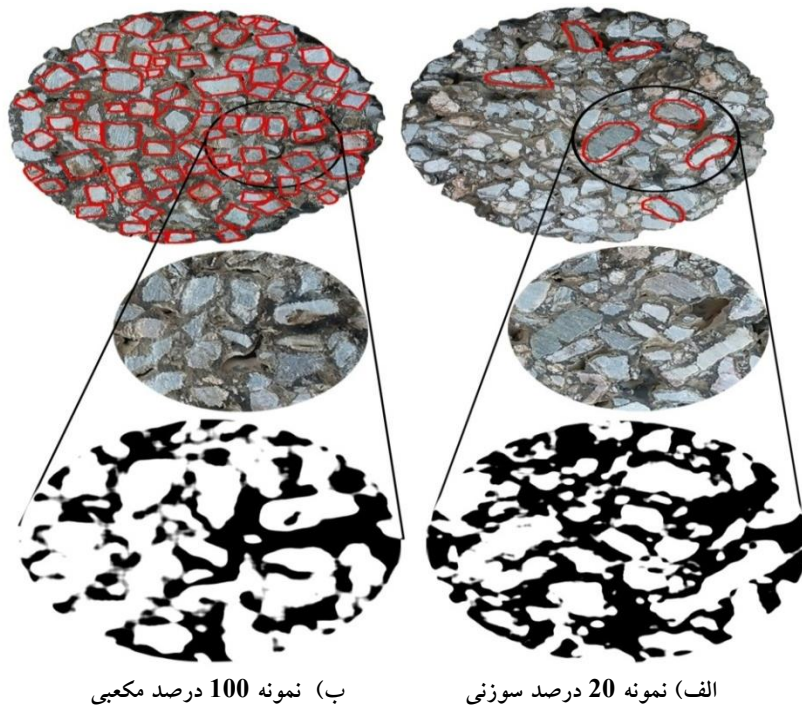
#### 4-4- تحلیل آماری نتایج

سه نمونه 100 درصد مکعبی، 80 درصد مکعبی-20 درصد پولکی و 80 درصد مکعبی-20 درصد سوزنی با مصالح آهکی در دو دانه بندی 19 و 12/5 میلیمتر در درصد قیر بهینه ساخته شدند و مقاومت لغزندگی آنها در شرایط خشک و مرطوب بوسیله دستگاه پاندول اندازه گیری شد.

بر روی نتایج تحلیل آماری با کمک نرم افزار SPSS صورت گرفت (Foutohi, 2009). با فرض نرمال بودن نتایج با توجه به تعداد زیاد نتایج آزمایشگاهی (بیش از 400 تکرار) آزمونهای آماری با سطح معنی داری بالا برای داده‌ها در ادامه ارائه گردید. نتایج آزمون Paired Samples T Test نشان داد بین میانگین عدد BPN در حالت خشک و مرطوب تفاوت معنی داری وجود دارد.

با استفاده از آزمون ANOVA نشان داده شد زمانی که دو حالت خشک و مرطوب به صورت جداگانه بررسی می‌گردد، در هر دو حالت شکل مصالح (100 درصد مکعبی، 80 درصد مکعبی-20 درصد پولکی و 80 درصد مکعبی-20 درصد سوزنی) به طور معنی داری موجب تغییر در میانگین عدد BPN می‌گردد.

در شکل (10-الف) تعداد ذرات سوزنی با خطوط قرمز نشان داده شده است. همان طور که مشخص است حدود 20 درصد سنگدانه‌های تشکیل دهنده سوزنی می‌باشند و بقیه سنگدانه‌ها تقریباً مکعبی هستند. شکل (10-ب) سنگدانه‌های مکعبی را نشان می‌دهد که تقریباً 100 درصد سنگدانه‌های نمونه را تشکیل می‌دهد. برای بررسی نحوه قرار گیری ذرات مکعبی و سوزنی در کنار هم، در هر دو نمونه، قسمتی از سطح نمونه انتخاب شد و با نرم افزار فتوشاپ قسمتی انتخاب و افکت گذاری شد. در این تصاویر قسمت سنگدانه با رنگ سفید و قسمت حفرات و قیر با رنگ مشکی نشان داده شده است. همان طور که از تصویر نمونه ب مشخص است سنگدانه‌های مکعبی به دلیل وجه شکسته و زاویه گوشه داری که دارند تماس بیشتری با هم دارند و نقاط سطح تماس سنگدانه‌ها در این نمونه بیشتر است و در نتیجه سطح تماس بیشتری با لاستیک ایجاد کرده و مقاومت لغزندگی بالایی دارند. تصویر سیاه و سفید نمونه الف که قسمتی از نحوه قرار گیری سنگدانه سوزنی با دیگر سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد مشخص است که سنگدانه‌های سوزنی به دلیل وجه شکسته کمتر و گوشه‌داری کمی که نسبت به سنگدانه مکعبی دارند باعث کاهش تعداد نقاط سطح تماس سنگدانه‌ها می‌شوند و با افزایش فاصله بین سنگدانه‌ها مقاومت لغزندگی کاهش می‌یابد.



شکل 10. تصویری از سطح دو نمونه مکعبی و سوزنی و نمایش موقعیت سنگدانه‌ها درون آسفالت

به منظور بررسی تاثیر نوع دانه بندی و اندازه اسمی سنگدانه ها در بافت درشت، نمونه های SMA در اندازه های اسمی 19، 12/5، 9/5 و 4/75 میلیمتر مقایسه دو به دو میانگین اعداد MTD برای چهار اندازه اسمی نمونه های ساخته شده با استفاده از آزمون Independent-samples T Test نشان داد تنها در مقایسه دو دانه بندی 19 و 12/5 میلیمتر تفاوت معنی داری بین میانگین اعداد MTD وجود ندارد. در سایر حالت ها تفاوت معنی دار دیده شده است. تحلیل نتایج با استفاده از

آزمون ANOVA نشان داد بین میانگین عدد BPN نمونه ها با اندازه های اسمی متفاوت تفاوت معنی داری وجود دارد. جدول (5) مقایسه زوجی بین نمونه های مختلف را نشان می دهد. دومین سطر جدول نشان می دهد که اختلاف میانگین عدد BPN بین دو اندازه 4/75 و 12/5 معنی دار بوده است و سطر پنجم نشان می دهد که اختلاف میانگین عدد BPN بین دو اندازه اسمی 12/5 و 9/5 نیز معنی دار بوده است.

جدول 5. مقایسه زوجی بین حالات مختلف سنگدانه (خروجی نرم افزار)

(I) NMAS	(J) NMAS	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
4.75	9.5	-5.06250	2.54892	.198	-11.6819	1.5569
	12.5	-12.20000*	2.54892	.000	-18.8194	-5.5806
	19	-5.70625	2.54892	.117	-12.3256	.9131
9.5	4.75	5.06250	2.54892	.198	-1.5569	11.6819
	12.5	-7.13750*	2.54892	.029	-13.7569	-5.5181
	19	-.64375	2.54892	.994	-7.2631	5.9756
12.5	4.75	12.20000*	2.54892	.000	5.5806	18.8194
	9.5	7.13750*	2.54892	.029	.5181	13.7569
	19	6.49375	2.54892	.057	-1.256	13.1131
19	4.75	5.70625	2.54892	.117	-.9131	12.3256
	9.5	.64375	2.54892	.994	-5.9756	7.2631
	12.5	-6.49375	2.54892	.057	-13.1131	.1256

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

با توجه به تعداد حالات مختلف مورد بررسی در این تحقیق تقسیم بندی حالات از نتایج با کمک ابزار درخت گروه بندی از نرم افزار SPSS امکان پذیر است، درخت گروه بندی<sup>19</sup> و رگرسیون CART یک ابزار قوی برای داده کاوی می باشد. با استفاده از مدل درخت تقسیم بندی و رگرسیون می توان عوامل موثر بر متغیرهای مستقل را دسته بندی نمود، برای مثال تعیین عوامل موثر بر رفتار لغزشی آسفالت، تحلیل تصادفات ترافیکی و غیره با کمک مدل کارت انجام می گیرد. همچنین کارت یک وسیله قوی برای پیش بینی و طبقه بندی عوامل موثر می باشد. درخت گروه بندی نتایج این تحقیق در شکل (11) نمایش داده شده، که در آن با توجه به عدد پاندول اصطکاک برای حالات مختلف بهترین تقسیم بندی صورت گرفته است، در گره اول به طور معنی داری نتایج عدد پاندول در نمونه های ساخته شده از مصالح بازیافتی کمتر از سایر گروه از مصالح است. همچنین نشان می دهد در مصالح سنگدانه غیر بازیافتی به طور معنی

داری تفاوت بین سطح مرطوب و خشک وجود دارد. معنی دار بودن تفاوت بین عدد اصطکاک در مصالح بازیافتی در دو حالت مرطوب و خشک همچنین قابل مشاهده است. در گروه مصالح غیر بازیافتی، هم در حالت مرطوب و خشک دانه بندی با اندازه اسمی 12/5 میلیمتر با سایر حالت های دانه بندی از نظر عدد اصطکاک متفاوت و از آنها بیشتر است. در این تقسیم بندی مشاهده می شود که اندازه اسمی، نوع سنگدانه و حالت مرطوب و خشک در تقسیم بندی گروه ها نقش داشته و شکل سنگدانه ها در این تقسیم بندی توسط این تحلیل آماری دخالت داده نشده است، بدین معنی که در تقسیم بندی گروه ها نقش آن کمتر از سه متغیر قبلی است.

## 5- نتیجه گیری

مقاومت لغزندگی سطح رویه از پارامترهای مهم در مبحث ایمنی جاده ها به ویژه در انواع مخلوط های آسفالتی

روسازی می‌شود.

با توجه به مرور منابع و نتایج این مطالعه، اجرای رویه‌های آسفالتی SMA با دو نوع مصالح آهکی و سرباره در دو قطعه از یک مسیر و اندازه‌گیری مقاومت لغزندگی آنها پس از عبور چند ساله ترافیک و مقایسه تصادفات در دو قطعه پیشنهاد می‌شود. با توجه به تاثیر تغییرات درجه حرارت در مقاومت لغزندگی سطح روسازی، انجام آزمایش آونگ انگلیسی بر روی نمونه‌های آسفالتی SMA در دماهای مختلف نیز پیشنهاد می‌گردد.

## 6- سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت اداره کل راه و شهرسازی استان یزد طی قرارداد شماره 76/546 در تاریخ مهرماه 1394 پایان یافت، لازم است از مدیران و کارشناسان این اداره در جهت کمک به انجام این تحقیق سپاسگزاری شود.

## 7- پی‌نوشت‌ها

- 1- Stone Matrix Asphalt
- 2- Nominal Maximum Aggregate Size
- 3- Skid Resistance
- 4- British Pendulum Tester
- 5- Sand Patch
- 6- Statistics Is a Software Package Used for Statistical Analysis
- 7- Hamzah, M.O.
- 8- Zhang, L.
- 9- Fwa.
- 10- Hot Mix Asphalt
- 11- SBS-Modified Asphalt
- 12- Open – Graded Friction Course
- 13- Asi, I.
- 14- Superpave
- 15- Younes Ahmed, H.
- 16- Shah, S.M.R.
- 17- Burak, S.
- 18- National Cooperative Highway Research Program
- 19- Classification and Regression Tree (CART) models

می‌باشد. به این معنی که هرگاه ضریب اصطکاک کافی بین سطح تماس لاستیک خودرو و سطح روسازی وجود نداشته باشد، نرخ تصادفات نیز بیشتر خواهد بود. به ویژه در شرایط وجود رطوبت در سطح روسازی خطر لغزندگی و سرخوردن وسایل نقلیه افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان با بررسی و اندازه‌گیری مقاومت لغزندگی روسازی آسفالتی مختلف، مناطقی را که از لحاظ مقاومت لغزشی در حد مطلوب قرار ندارند شناسایی و برای رفع آن تمهیدات خاصی را اندیشید.

در این تحقیق خصوصیات اصطکاک مخروطه‌های آسفالتی SMA با چهار نوع دانه‌بندی با اندازه‌های اسمی مختلف و چهار نوع مصالح با درصد‌های مختلف قیر بررسی گردید که نتایج پژوهش به شرح زیر است:

- با افزایش اندازه اسمی سنگدانه‌ها، مقاومت لغزندگی به طور متوسط 5 الی 10 درصد افزایش می‌یابد. البته دانه‌بندی با اندازه اسمی 19 میلیمتر به دلیل بافت سطحی نامنظم مقاومت لغزندگی کمتری نسبت به دانه‌بندی با اندازه اسمی 12/5 میلیمتر دارد.

- مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی SMA با افزایش درصد قیر کاهش می‌یابد. شدت این کاهش در نمونه‌های با اندازه اسمی 19 میلیمتر بیشتر می‌باشد.

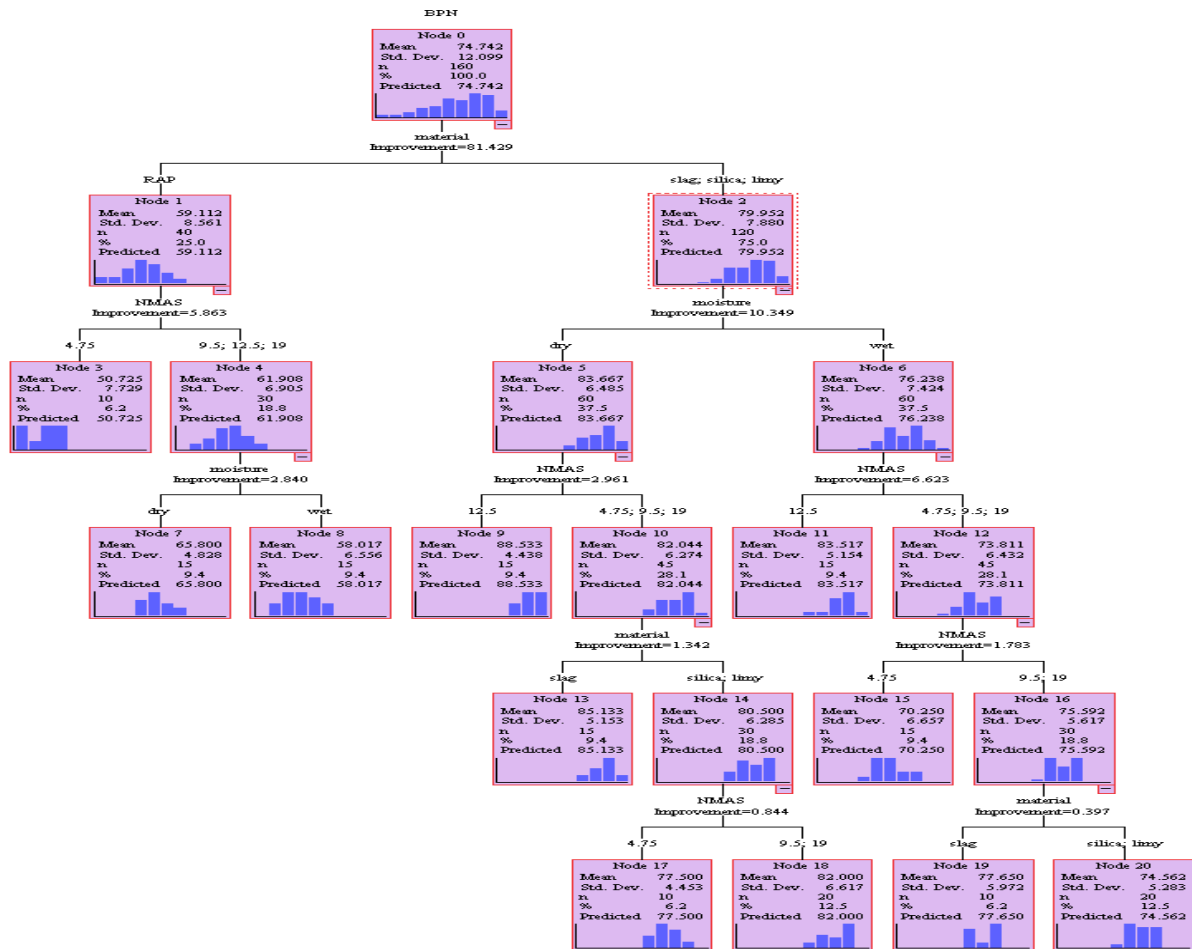
- با افزایش درصد عبوری مصالح از الک شماره 4 (افزایش درصد ریزدانه مصالح) مقاومت لغزندگی کاهش می‌یابد.

- در بررسی رابطه بین عمق بافت درشت (MTD) و اندازه اسمی، با افزایش اندازه اسمی سنگدانه‌ها مقدار بافت درشت و در نتیجه مقاومت لغزندگی افزایش می‌یابد.

- با افزایش درصد عبوری مصالح از تمام الک‌ها (افزایش درصد ریزدانه مصالح) مقدار بافت درشت کاهش می‌یابد.

- در بررسی تاثیر شکل مصالح سنگی بر مقاومت لغزندگی، نمونه‌های با 100 درصد سنگدانه درشت دانه مکعبی نسبت به نمونه‌هایی با 20 درصد مصالح سوزنی و پولکی، از مقاومت لغزندگی بیشتری به اندازه 5 تا 10 درصد برخوردار می‌باشند.

- شرایط مرطوب سطح روسازی باعث کاهش 10 تا 20 درصدی مقاومت لغزندگی نسبت به حالت سطح خشک



شکل 11. گروه بندی نتایج آزمایشهای نوع، دانه بندی و شکل سنگدانه ها در مخلوط SMA

## 8- مراجع

-ASTM C131, "Standard Test Method for Resistance to Degradation of small- Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, American Society for Testing and Materials.

-ASTM C127, "Standard Test Method for Density, Relative Density and Absorption of Coarse Aggregate, American Society for Testing and Materials.

-ASTM C128, "Standard Test Method for Density, Relative Density and Absorption of Fine Aggregate, American Society for Testing and Materials.

-Ahadi,M.R. and Mansorkhaki,A.,(2010), Effect of macro-texture pavement on skid control and crash reduction, Transportation Engineering Journal,Vol.1 No.4.pp10.[in Persian].

-Ameri, M.(2009), Investigation of Stone gradation effect on asphalt pavement skid resistance,4<sup>th</sup> National civil engineering conference, Tehran university,pp10[in persian].

-Ameri, M., Behnood, A., (2012), "Experimental Investigation of Stone Matrix Asphalt Mixtures Containing Steel Slag", Scientia Iranica, 19(5), pp.1244-1219.



- Fakhri, M., Taribakhsh, M., (2014), "Studing the Effect of Gradation and Macro Texture Generating by the Method of Gravel Distribution, on the Skid Resistance of the Concrete Pavements", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol.43, Issue.4.
- Fwa, T., Choo, Y., Liu, Y., (2003), "Effect of aggregate spacing on skid resistance of asphalt pavement", *The Journal of Transportation Engineering*, ASCE 129(4): pp.420
- Fuentes, L.G., (2009), "Investigation of the Factors Influencing Skid Resistance and the International Friction Index", A Thesis Submitted in Partial of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy, university of south Florida.
- Foutohi, A. (2009), "Spss Manual Book", Sheigan publishing, pp.540.
- Iranian management and planning Organization (2000), "Design and laboratory evaluation of asphalt mixture with Stone mastic asphalt-SMA", Publishing number 206, Frist Edition, Iran, pp.88.
- Hamzah, M.O., Mohamed, A., (2004), "Texture Depth Determination Stone Mastic Asphalt", 3<sup>th</sup> Euraspphalt and Eurobitume Congress Vienna.
- Hamzah, M.O., Ahmad Puzi, M.A., and Azizli, K.A.M., (2010), "Properties of Geometrically Cubical Aggregates and ITS Mixture Design", *IJRRAS* 3(3).
- Hafez, I., Kamal, M.A., and Mirza, M.W., (2015), "An Experimental Study to Select aggregate gradation for Stone Mastic Asphalt", *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 38:1, pp.1-8.
- Liapis, I., Likoydis, S., (2012), "Use of Electric Arc Furnace Slag in Thin Skid – Resistant Surfacing", *Procedia- Social and*
- ASTM E303, (1993), "Test Method for Measuring Frictional Properties Using the British Pendulum Tester", American Society for Testing and Materials.
- Asi, I. M., (2007), "Evaluating Skid Resistance of Different Asphalt Concrete Mixes", *Building and Environment*, 42(1), pp.325-329.
- BaraziJomoor, N., Fakhri, M., (2013), "Comparing Effect of Skid Resistance on Porous Asphalt Mix and Conventional Hot Mix Asphalt", *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 3(2), pp.838- 842.
- Brown, E.R., Cooley, L.A., and JR., (1999), "Designing Stone Matrix Asphalt Mixture for Rut-Resistant Pavement", NCHRP, Report No.425, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington.
- Burak, S., Onson, A., (2014), "Effect of Aggregate Shape on the Surface Properties of Flexible Pavement", *Journal of Civil Engineering*, 18(5): pp.1364-1371.
- BS 812: Section 105.1, 105.2, Determination of Aggregate Particle Shape (Flakiness and Elongation index).
- Bessa, S., Branco, C., (2012), "Evaluation of Different Digital Image Processing Software for Aggregates and Hot Mix Asphalt Characterization", *Construction and Building Material*, 37, pp.370- 378.
- Chan, C.Y., Huang, B., (2010), "Investigating Effect Of Asphalt Pavement Condition on Traffic accidents in Tennessee Base on The Pavement Management System", Volume 44, Issue 3, pp. 150-161.
- Cao, W., and Liu, S., (2013), "Comparison of Stone Matrix Asphalt Mixture Using Basalt and Limestone aggregates", *Construction and Building Materials* 41, pp.474-479.

-Shah,S.M.R., Abdullah, M.E, (2010)," Effect Aggregate Shape on Skid Resistane of Compact Hot Mix Asphalt", Second International Conference on Computer and Network Technology, Bangkok, Thailand.

-Yorong, L., kapilan, S., (2001), "Effect of Aggregate Properties on Pavement Skid Resistance", Journal of the Easstern Asia Society for Transportation Studies, Vol.4, No.1

-Younes Ahmed, H., Hashem, M.D., (2014), "Investigation of Aggregate Particles Shape on Characteristics of Hot Mix Asphalt", Journal of Engineering Sciences Assiut University Faculty of Engineering, Vol.42, No.6, pp. 1349- 1366.

-Zhang, L., Ong, G.P., (2013), "A Numerical Study on the Influence of Aggregate Size on Skid Resistance Performance of Porous Pavements", Journal of the Easstern Asia Society for Transportation Studies, Vol.9.

Behavior Sciences 48, pp.907- 918.

-LEE, Y.P., Choo,Y.S., (2005), "Effect of Pavement Surface Texture on British Pendulum Test", Journal of the Easstern Asia Society for Transportation Studies, Vol.6, pp.1247 – 1257.

-Shaopeng, W., Yongjie, X., and Qunshan, Y., (2007), "Utilization of Steel Slag as Aggregates For Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures", Building and Environment, (42): pp.2580–2585.

-Yongjie, X., Shaopeng, W., Haobo, H., and Jin, Z., (2006), "Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture", Journal of Hazardous Materials, B138, pp. 261–268.

-Pourtahmasb, M.S., Karim, M.R., (2014), "Performance Evaluation Of Stone Mastic Asphalt and Hot Mix Asphalt Mixture", Advance in Materials Science and Engineering, pp.12.