

## تحلیل و قیاس ویژگی‌های میکروساختاری مغزه‌های آسفالتی میدانی

### و نمونه‌های آسفالتی آزمایشگاهی در انرژی‌های تراکمی مختلف

#### مقاله پژوهشی

علی نصرالله تبارآهنگر<sup>\*</sup>، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی علوم و فناوری آریان، تهران، ایران

محمودرضا کی‌منش، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور تهران، ایران

میثم رحیمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، آزمایشگاه مکانیک خاک استان قم، قم، ایران

<sup>\*</sup>پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [alinasrahangar@gmail.com](mailto:alinasrahangar@gmail.com)

دریافت: ۹۸/۱۱/۰۵ - پذیرش: ۹۹/۰۳/۱۰

صفحه ۱۳۶-۱۲۵

#### چکیده

در اکثر روش‌های طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی به علت پیچیدگی تعیین پارامترهای میکرو، پارامترهای ماکرو مورد توجه بوده و تعیین می‌گردند. اما مخلوط‌های آسفالتی گرم غیر همگن هستند و بنابراین پارامترهای ماکرو به تنهایی نمی‌توانند رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم را توصیف نمایند. در این مقاله تحلیل و ارزیابی پارامترهای میکرو آرایش سنگدانه‌ها در نمونه‌های آسفالتی میدانی در قیاس با نمونه‌های آزمایشگاهی در انرژی‌های تراکمی مختلف انجام می‌گردد. پردازش تصویر و کمی‌سازی پارامترهای ساختار داخلی مخلوط‌ها با استفاده از عکس‌های دوبعدی حاصل از برش نمونه‌ها و نرم افزار iPAS2 انجام گردید. یافته‌های مقایسه میان پارامترهای میکرو نمونه‌های میدانی و آزمایشگاهی نشان داد که تعداد نقاط تماس در مغزه‌ها نزدیک به تعداد نقاط تماس نمونه‌های مارشالی بوده‌اند که با انرژی تراکمی متوسط ساخته شده‌اند. همچنین معین گردید که با بررسی نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی از نگاه میکرو می‌توان به اطلاعات جدید و مفیدی دست یافت که ضرورت استفاده از پارامترهای میکرو را در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی تایید می‌نماید.

#### واژه‌های کلیدی: سنگدانه، نمونه‌های میدانی، نقاط تماس، طول تماس

#### ۱- مقدمه

مخلوط ممکن است پارامترهای ماکرو یکسانی داشته باشند اما رفتار مکانیکی آنها متفاوت باشد. این به این دلیل است که مخلوط‌های آسفالتی گرم غیرهمگن هستند و خصوصیات اجزای تشکیل‌دهنده آن مانند فضای خالی، سنگدانه‌ها و قیر متفاوت است. در روش طرح اختلاط شارپ فاز اول نیز حجم اجزا شامل حجم فضای خالی، حجم فضای خالی در سنگدانه‌ها، حجم قیر، حجم سنگدانه‌ها و دانه‌بندی سنگدانه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند. رسیدن به یک ترکیب حجمی معین میان اجزا هدف اصلی این طرح اختلاط می‌باشد. اما مخلوط‌ها ممکن است دارای طرح یکسانی باشد اما گاهی رفتار مکانیکی آنها کاملاً متفاوت باشد. این بدان معنی است که

مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در اکثر مطالعات بر روی رفتار ماکروسکوپی مخلوط‌های آسفالتی گرم تمرکز شده است. در واقع در این مطالعات فرض شده که مخلوط‌های آسفالتی همگن می‌باشند. دلیل اصلی این موضوع آن است که بخاطر طبیعت پراکنش تصادفی سنگدانه‌ها و فضاهای خالی در مخلوط‌های آسفالتی کمی نمودن پارامترهای میکرو در ساختار داخلی روسازی کار دشواری می‌باشد (ماساد، موهانسن و شاشیده، ۱۹۹۵). برای مثال در روش‌های طرح اختلاط مخلوط که در سرتاسر جهان انجام می‌گردد پارامترهای ماکرو مخلوط‌های آسفالتی گرم مانند وزن مخصوص، استقامت مارشال و یا استقامت ویم مورد توجه قرار می‌گیرند. دو نمونه

سوارس در سال ۲۰۱۲ نیز با تحقیق بر روی نرم افزارهای مختلف نتایج مشابهی گرفته‌اند. اثر پارامترهای میکروساختاری شامل تعداد نقاط تماس، طول تماس و جهت تماس بر عملکرد شیارشدگی مخلوط توسط روحی در سال ۲۰۱۱ و روحی، تاشمن و بهیا در سال ۲۰۱۲ با استفاده از نرم‌افزار ipAS2 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که همبستگی زیادی بین پارامترهای میکروساختاری و عملکرد شیارشدگی مخلوط وجود داشته است. همچنین ماساد و کوتای در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که پارامترهای میکروساختاری از جمله تعداد نقاط تماس، توزیع جهتی سنگ‌دانه‌ها و توزیع فضایی سنگ‌دانه‌ها بر عملکرد شیارشدگی مخلوط موثرند. کی و وانگ در سال ۲۰۱۳ نشان دادند که بین نوع قیر و تعداد نقاط تماس همبستگی مناسبی وجود ندارد بنابراین مدل پیش بینی برای شیارشدگی را بر اساس تعداد نقاط تماس و نوع قیر پیشنهاد داد. بر اساس این مدل تعداد نقاط تماس اثر بیشتری بر عملکرد شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی گرم نسبت به نوع قیر داشته‌اند. بررسی‌های شاهین، مایا و سوزان در سال ۲۰۱۳ نشان داد که همبستگی ضعیفی بین جهت‌داری سنگ‌دانه‌ها و عملکرد شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی وجود داشت. ابوبکر، ارشدی، ایرلینگسون و بهیا در سال ۲۰۱۶ و کی منش و همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که رابطه بسیار خوبی بین طول کل تماس و عملکرد شیارشدگی مخلوط وجود داشت.

### ۳- ساختار داخلی مخلوطهای آسفالتی گرم

برای توصیف ساختار داخلی مخلوطهای آسفالتی گرم از پارامترهای میکرو نشان دهند آرایش سنگدانه‌ها استفاده می‌شود. مروری بر تحقیقات قبلی نشان داد که مهمترین پارامترهای میکرو که در ارزیابی ساختار داخلی مخلوطهای آسفالتی در نظر گرفته شده بودند. (شکل ۱ و شکل ۲).

- تعداد نقاط تماس

- طول تماس

- جهت تماس

- توزیع فضایی

- توزیع جهتی

در پردازش تصویر عکسهای دیجیتالی وقتی پیکسل‌های پیرامونی دو سنگ‌دانه در یک فاصله مشخص باشند این دو

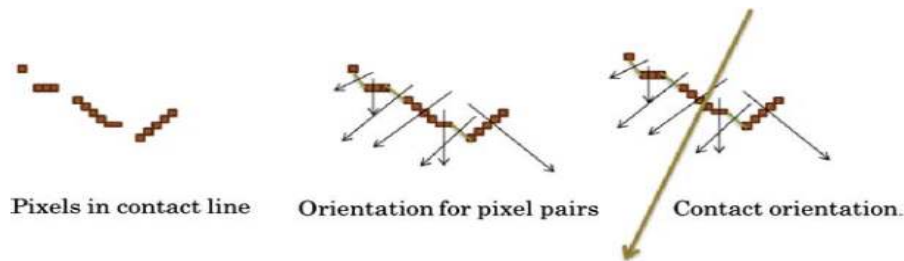
رفتار مصالح علاوه بر اینکه به مقدار فضای خالی (پارامتر ماکرو) به توزیع فضای خالی (پارامتر میکرو) بستگی دارد و یا اینکه رفتار مخلوط علاوه بر دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها به پارامترهای میکرو مانند تعداد نقاط تماس، طول تماس و جهت‌گیری تماس بستگی دارد (وانگ، ۲۰۱۱ و کوک، ییلماز و تورهان، ۲۰۱۲، کی منش و همکاران ۲۰۱۷). در این مقاله پارامترهای میکروساختاری در نمونه‌های آسفالتی میدانی مخلوطهای آسفالتی گرم مورد بحث و بررسی و با نمونه‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌گردند.

### ۲- پیشینه تحقیق

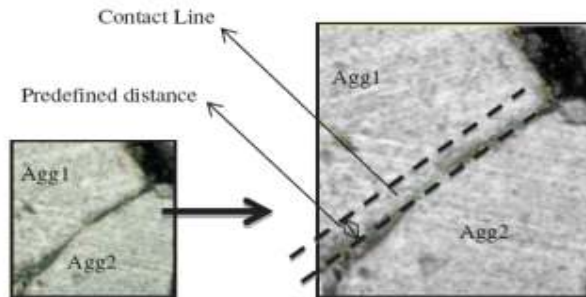
تحلیل هریک از پارامترهای میکرو مخلوطهای آسفالتی به تنهایی و یا در ارتباط با سایر پارامترها می‌تواند اطلاعات مفیدی را در خصوص رفتار مکانیکی مخلوط‌ها ارائه نماید. برای بررسی رفتار مخلوطهای آسفالتی با استفاده از پارامترهای میکروساختاری، محققین زیادی در سال اخیر از روش سی تی اسکن سه بعدی با اشعه ایکس و پردازش تصویر استفاده نموده‌اند (جینگ، زندوگ، یانگ و زانگ، ۲۰۱۵، وانگ، زانگ، چن، یو و فانگ، ۲۰۱۶، هونینگ، ییکویی و سینگو، ۲۰۱۶، شاهین، مایا و سوزان، ۲۰۱۶ و هاسن، خان، رابریگ و پرستی، ۲۰۱۵). با این وجود استفاده از سی تی اسکن سه بعدی با اشعه ایکس و پردازش تصویر دارای مشکلاتی مانند عدم تفکیک صحیح سنگ‌دانه‌ها و نویزهای تصویری می‌باشد که استفاده از این روش را با چالش مواجه کرده است (کوتای، آرامبول و گیسون، ۲۰۱۰). هرچند برنو، پارلا و سیلارو در سال ۲۰۱۱ و کیونگین، بیان، لی، جیاوو، تائو و زینگ در سال ۲۰۱۵ روشهایی برای حل این مشکلات ارائه نمودند و مدعی شده‌اند نتایج آنها همبستگی مناسبی با داده‌های کنترل شده داشته است. در سالهای اخیر پردازش تصاویر دوبعدی و تعیین پارامترهای مانند تعداد نقاط تماس، طول تماس، زاویه تماس و جهت سنگ‌دانه‌های به عنوان ساختار داخلی روسازی مورد توجه قرار گرفته است. ماساد، موهانسن و شاشیده‌در در سال ۱۹۹۹ از تکنیک‌های پردازش تصویر دیجیتالی برای کمی‌سازی توزیع، جهت‌داری و شکل سنگ‌دانه‌های درشت استفاده نموده‌اند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با استفاده از تکنیکهای پردازش تصویر عکس‌های دو بعدی، پارامترهای میکروساختاری مخلوط را می‌توان تعیین نمود. بسا، برانکو و

می‌شود که مجموعه این نقاط خط تماس را در عکس‌های دو بعدی شکل می‌دهند. همچنین پیکسل‌های تماس با استفاده از خطوط مستقیم به یکدیگر متصل شده و شیب عمود بر این خط محاسبه می‌گردد که بردار متناسب با این شیب همان بردار عمود بر جهت خط تماس می‌باشد. طول تماس و جهت آن هر دو پارامترهای مهمی هستند که ساختار داخلی مخلوط را توصیف می‌نمایند (کوئن، کوتای، روحی و بهیا، ۲۰۱۲).

سنگدانه در تماسند. این فاصله مشخص توسط کاربر معین می‌گردد. همچنین همه پیکسل‌های پیرامونی دو سنگدانه که در این فاصله باشند مشخص می‌شود. برای هر پیکسل سنگدانه شماره یک فقط و فقط یک پیکسل در پیرامون سنگدانه شماره دو در نظر گرفته می‌شود که فاصله آنها کمتر از فاصله مشخص شده کاربر می‌باشد. اگر چند پیکسل وجود داشته باشد نزدیکترین آن انتخاب می‌گردد. پیکسل وسط هر جفت از پیکسل‌های بین دو سنگدانه‌ها به عنوان نقطه تماس فرض



شکل ۱. پارامترهای میکرو طول تماس و نقطه تماس (روحی و همکاران، ۲۰۱۲)



شکل ۲. روش تعیین بردار نرمال برای خط تماس (روحی و همکاران، ۲۰۱۲)

می‌باشد که متوسط ناهمسانگردی توزیع جهت تماس را در عکسهای دوبعدی نشان می‌دهد که عبارت است از:

$$\Delta_c = \frac{1}{M} \left[ \left( \sum_{i=1}^M \cos 2\theta_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^M \sin 2\theta_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

که در آن  $\theta_i$  زاویه تماس در عکسهای دوبعدی و  $M$  تعداد نقاط تماس می‌باشند. به لحاظ تئوری مقدار صفر برای شاخص بزرگی بردار نشان‌دهنده توزیع کاملاً تصادفی زوایای تماس و مقدار ۱۰۰ (واحد) نشان دهنده یک جهت بودن کامل همه زوایا می‌باشد. برخی از محققین در پیش‌بینی عملکرد مخلوطهای آسفالتی گرم از یکی از پارامترهای میکرو و یا

روحی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ از ترکیب پارامترهای ذکر شده شاخص جدیدی به نام شاخص ساختار داخلی (ISI) تعریف نمودند که عبارت است از:

$$ISI = \sum_{i=1}^N CL_i * \sin(AAC_i) \quad (1)$$

که در آن  $CL_i$  طول تماس و  $AAC_i$  زاویه عمود بر خط تماس در نقطه تماس  $i$ ام می‌باشد. در سالهای اخیر تعدادی از محققین شاخص بزرگی بردار را مورد توجه قرار داده‌اند (۱۳، ۱۵). شاخص بزرگی بردار ( $\Delta_c$ ) نشانه‌ای از ساختار داخلی روسازی

#### ۴-۱- تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی و میدانی

در این پژوهش از نمونه‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های میدانی (مغزه‌ها) استفاده شده است. برداشت مغزه‌های میدانی از لایه‌های آسفالتی متراکم شده بر اساس استاندارد ASTM D5361 انجام گردید. مغزه‌های میدانی از ۲۱ نقطه برداشت شده‌اند. اندازه اسمی سنگدانه‌های مخلوطهای آسفالتی برای ۱۳ نمونه ۹/۵ میلی‌متر و برای بقیه نمونه‌ها ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. برای ۶ نقطه (۳ نقطه برای هراندازه اسمی) نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده است. برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، مخلوطهای آسفالتی شل از پشت دستگاه فینیشر برداشت شده‌اند (AASHTO T168). قطر همه نمونه‌ها ۴ اینچی بوده و از قیر ۶۰-۷۰ استفاده شده است (جدول ۱ و جدول ۲).

ترکیبی از آنها استفاده کرده‌اند. اما معین است که تنها هندسه تماس به تنهایی نمی‌تواند بیانگر رفتار مخلوطهای آسفالتی در عملکرد مقابل برش و شیارشدگی باشد. انتقال بار در مخلوطهای آسفالتی تحت تاثیر برهمکنش میان سنگدانه‌ها و قیر در محل تماس مجاورت سنگدانه‌ها می‌باشد، بنابراین برهمکنش بین قیر و سنگدانه‌ها و یا در واقع کیفیت تماس نیز بر عملکرد مخلوطهای آسفالتی گرم تاثیرگذار می‌باشد (ماساد و همکاران، ۲۰۱۲).

#### ۴-مصلح و روش تحقیق

- مراحل این تحقیق عبارتند از:
- تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی
  - تهیه نمونه‌های میدانی
  - تهیه عکسهای دیجیتالی
  - پردازش تصویرهای دیجیتالی

جدول ۱. نمودار حد وسط دانه‌بندی‌های پیوسته شماره ۴ و ۵ مطابق با نشریه ۲۳۴

اندازه الک	۰/۰۷۵	۰/۳	۲/۳۶	۴/۷۵	۹/۵	۱۲/۵	۱۹
دانه بندی پیوسته شماره ۴ (اندازه اسمی ۱۲/۵ میلیمتر)							
درصد عبوری	۶	۱۳	۴۳	۵۹	-	۹۵	۱۰۰
دانه بندی پیوسته شماره ۵ (اندازه اسمی ۹/۵ میلیمتر)							
درصد عبوری	۶	۱۵	۴۹/۵	۷۰	۹۵	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۲. مشخصات قیر مورد استفاده

اندازه الک	ویسکوزیته (ثانیه)	درجه نرمی (سانتیگراد)	درجه نفوذ (دهم میلیمتر)
	ASTM D88	ASTM D36	ASTM D5
درصد عبوری	۱۹۵	۶۲	۴۷/۵

#### ۴-۲- تهیه و پردازش عکسهای دیجیتالی

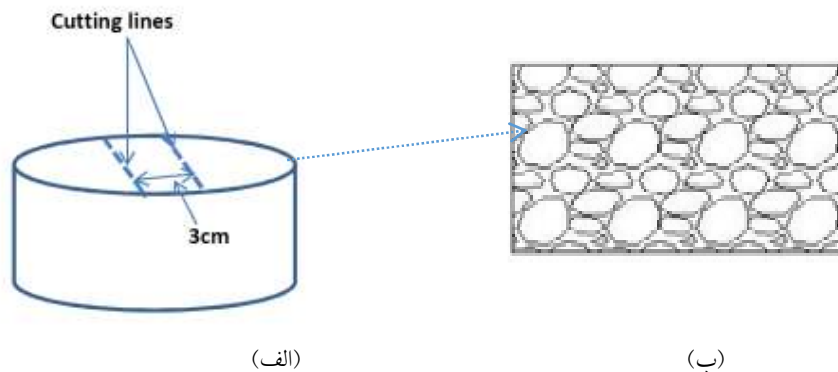
در قالب نرم افزاری برای تعیین پارامترهای میکروساختاری مخلوطهای آسفالتی ارایه نموده‌اند که این نرم افزار توسط روحی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ تکمیل گردید. در واقع با این نرم افزار پردازش عکسهای دو بعدی و کمی سازی خصوصیات ساختار داخلی مخلوطهای آسفالتی انجام می‌گردد. توابع نرم افزار به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. دسته اول توابعی هستند که پردازش تصویر را انجام می‌دهند و دسته دوم

جهت تهیه عکسهای دوبعدی نمونه‌ها از دو طرف برش داده (شکل ۳) و با دوربین دیجیتالی عکس دوبعدی تهیه گردید. حداقل کیفیت تصاویر ۲۵ پیکسل بر میلیمتر (۰/۴ میلیمتر بر پیکسل). از سطح ۶۳ میلیمتر در ۹۵ میلیمتر برای تحلیل استفاده شده است. در این تحقیق برای تعیین پارامترهای میکرو، پردازش تصویر عکسهای دوبعدی با نرم افزار ipas انجام گردیده است. کوئن و همکارانش در سال ۲۰۱۲ روشی

توابعی هستند که تحلیل میکروساختاری را انجام می‌دهند. در این نرم افزار با استفاده از این توابع که عملیات توابعی در نرم افزار متلب می‌باشند عکسهای رنگی RGB تبدیل به عکسهای باینری (سیاه و سفید) می‌گردند. در واقع این عمل و تعیین پارامترهای آرایش سنگدانه‌ها با بکارگیری ماتریسی از تصویر دیجیتال انجام می‌گردد. یک تصویر دیجیتال به صورت یک تابع دو بعدی  $f(x,y)$  تعریف می‌شود که  $x$  و  $y$  مختصات فضایی و مقدار  $f$  به ازای هر  $x$  و  $y$  شدت تصویر در آن نقطه تعریف می‌شود. در واقع یک تصویر دو بعدی به صورت یک ماتریس  $M*N$  است که هر عضو این ماتریس دارای مکان و مقدار مشخصی می‌باشد که از این اعضا تحت عنوان پیکسل یاد می‌شود.

#### تحلیل خصوصیات اسکلت سنگدانه‌ها

برای تعیین فاصله مشخصی که نشان‌دهنده تماس دو سنگدانه باشند محققین مختلفی از جمله کوئن و همکاران در سال ۲۰۱۲، وانگ در سال ۲۰۱۱ و کی و همکاران در سال ۲۰۱۳ مقدار یک چهارم حداقل اندازه سنگدانه مورد تحلیل را پیشنهاد نموده‌اند. حداقل اندازه سنگ توسط این محققین  $2/36$  یا  $4/75$  میلیمتر انتخاب شده‌اند. که در این تحقیق  $2/36$  میلیمتر در نظر گرفته شده است. تعداد نقاط تماس، طول تماس، جهت تماس و جهت سنگدانه‌ها با استفاده از پردازش تصویر تعیین گردید.



شکل ۳. الف: روش برش نمونه ب: سطح  $63$  میلی‌متر در  $95$  میلی‌متر برای تحلیل

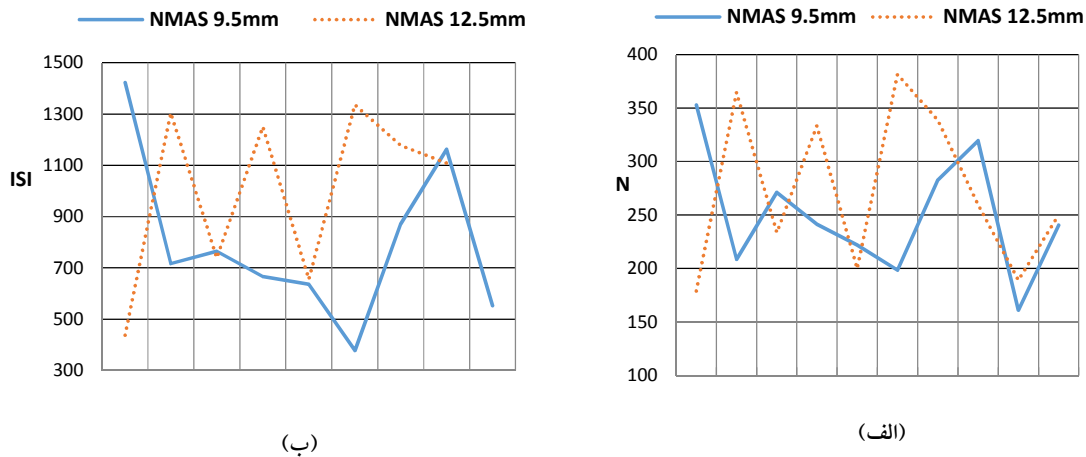
### ۵- نتایج و تحلیل

#### ۵-۱- تعداد نقاط، طول و جهت تماس

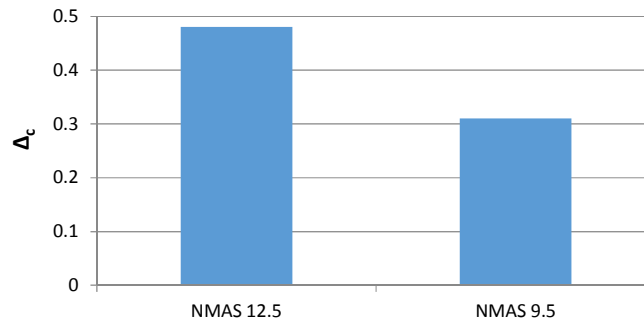
تعداد نقاط تماس در نمونه‌ها برای هر اندازه اسمی سنگدانه‌ها ( $9/5$  میلی‌متر یا  $12/5$  میلی‌متر) در شکل ۴ الف نمایش داده شده است. با افزایش اندازه اسمی سنگدانه‌ها، تعداد نقاط تماس افزایش می‌یابد. البته این روند دارای نوسان بوده است. مقادیر شاخص ساختار داخلی مخلوط برای هر اندازه اسمی سنگدانه‌ها ( $9/5$  میلی‌متر یا  $12/5$  میلی‌متر) در شکل ۴ ب نمایش داده شده است. با افزایش اندازه اسمی سنگدانه‌ها، تعداد نقاط تماس افزایش می‌یابد. البته در قیاس با تعداد نقاط تماس این روند دارای نوسان کمتری بوده است. بنظر می‌رسد مزیت شاخص تعداد نقاط تماس آن است که

#### ۵-۲- توزیع جهتی تماس

متوسط شاخص بزرگی بردار در نمونه‌ها برای هر اندازه اسمی سنگدانه‌ها ( $9/5$  میلی‌متر یا  $12/5$  میلی‌متر) در شکل ۵ نمایش داده شده است. با افزایش اندازه اسمی سنگدانه‌ها، متوسط شاخص بزرگی بردار افزایش یافته است. بنابراین، زوایای تماس دارای یکنواختی بیشتری بوده‌اند.



شکل ۴. الف- تعداد نقاط تماس (N) در نمونه برای اندازه‌های اسمی (NMA) ۹/۵ و ۱۲/۵ میلی‌متری ب- شاخص ساختار داخلی روسازی (ISI) در نمونه برای اندازه‌های اسمی ۹/۵ و ۱۲/۵ میلی‌متری



شکل ۵. متوسط شاخص بزرگی بردار ( $\Delta_c$ ) در نمونه‌ها برای اندازه‌های اسمی (NMA) ۹/۵ و ۱۲/۵ میلی‌متری

ساختار داخلی مخلوط بزرگتر داشته‌اند. انتظار می‌رود که مخلوط‌هایی که سنگ‌دانه‌های درشت کمتری داشته‌اند ساختار ضعیف‌تری در مقابل تغییر شکل دارند زیرا ارتباط مستقیمی میان تعداد نقاط تماس و شاخص ساختار داخلی روسازی با مقاومت شیارشدگی مخلوط وجود دارد. در واقع تعداد نقاط تماس بیشتر و شاخص ساختار داخلی مخلوط بزرگ‌تر نشان دهنده مسیرهای تنش بیشتر در امتداد بارگذاری می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که از نگاه ساختار داخلی روسازی تعداد سنگ‌دانه‌های درشت‌تر مطلوب می‌باشد. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای میکروساختاری مخلوط‌های آسفالتی باید در طرح اختلاط و انتخاب تکنیک‌های تراکم مورد توجه قرار بگیرند.

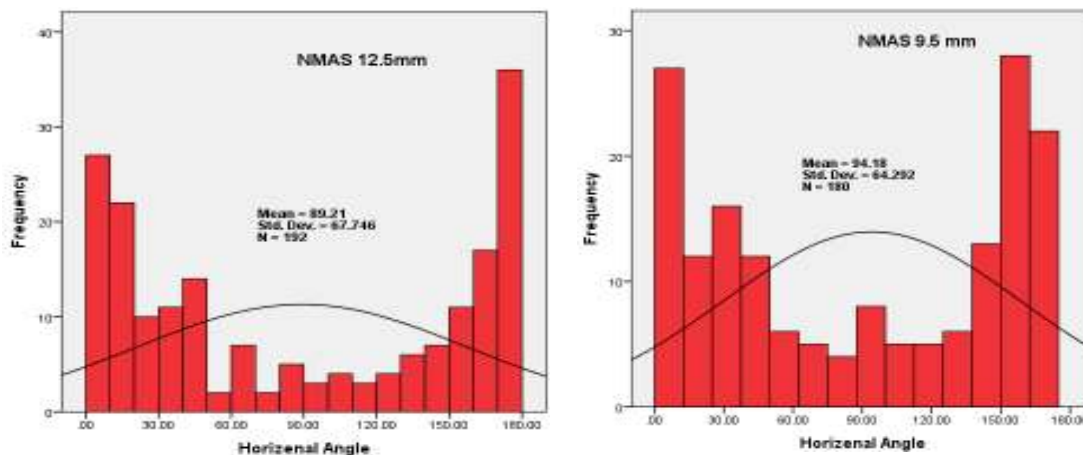
توزیع جهتی طول‌های تماس در نمونه‌ها برای هر اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها (۹/۵ میلی‌متر یا ۱۲/۵ میلی‌متر) در شکل ۶ نمایش داده شده است. هیستوگرام توزیع نرمال نمایش داده شده است. متوسط ضریب کشیدگی برابر با منهای ۱/۷ می‌باشد. توزیع تمرکز داده‌ها در هیستوگرام نشان می‌دهد که بخشی مهمی از زوایای تماس در امتداد جهت بارگذاری نمی‌باشند. معین است جهت تماس اثر مهمی بر عملکرد طول‌ها و نقاط تماس دارد و اگر بردار عمود بر صفحه تماس به امتداد بارگذاری نزدیک باشد، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در مقابل شیارشدگی و تغییرات شکل بهتر خواهد بود.

همانگونه که از شکل‌های ۴، ۵ و ۶ معین است مخلوط‌های با سنگ‌دانه درشت‌تر تعداد نقاط تماس بیشتر و شاخص

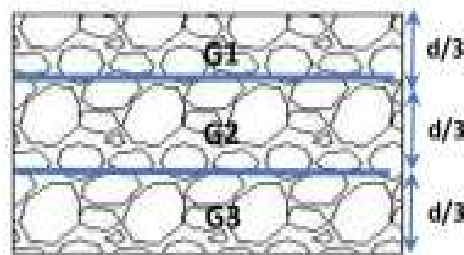
## ۲-۵- توزیع فضایی سنگدانه‌ها

قسمت تقسیم شدند (شکل ۷). این سه قسمت عبارتند از: سنگدانه‌ها در یک سوم بالایی (G1)، سنگدانه‌ها در یک سوم میانی (G2) و سنگدانه‌ها در یک سوم پایینی (G3).

توزیع یکنواخت سنگدانه‌ها در نمونه یکی از موارد مهم در ساختار داخلی روسازی است که بر عملکرد روسازی تاثیر گذار می‌باشد. برای بررسی توزیع فضایی، عکس‌ها به سه



شکل ۶. توزیع جهتی طول‌های تماس در نمونه‌ها برای هر اندازه اسمی سنگدانه‌ها (۹/۵ میلی‌متر یا ۱۲/۵ میلی‌متر)

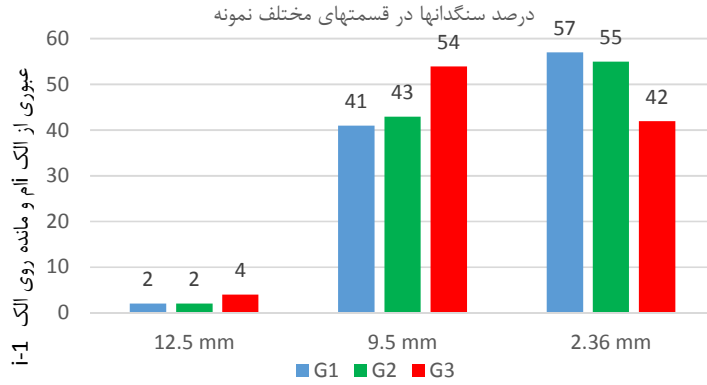


شکل ۷. تقسیم بندی سنگدانه‌ها برای توزیع فضایی

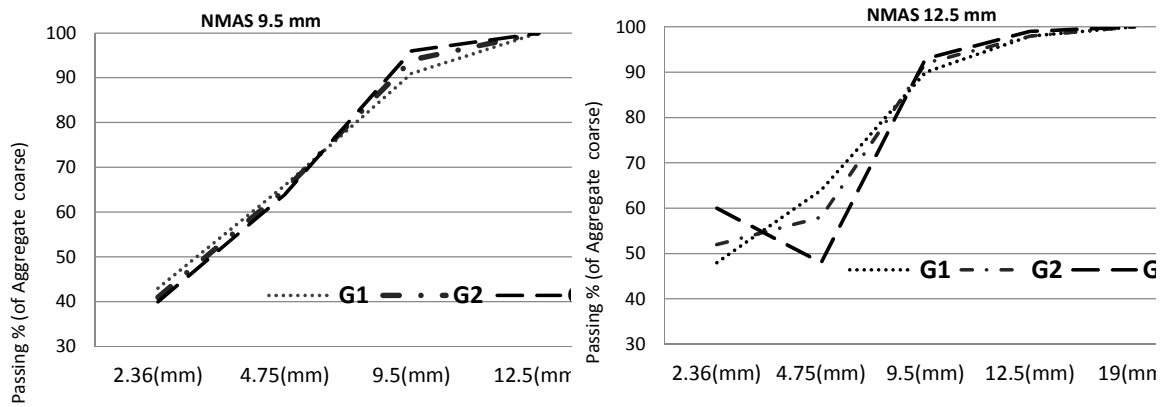
## ۳-۵- انرژی تراکم

برای ساخت نمونه‌های مارشال، مخلوط آسفالتی گرم شل از پشت ماشین فینیشر تهیه گردید. برای ۶ نقطه، نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از ۳۵، ۵۰، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ ضربه به هر طرف ساخته شد. پردازش و تحلیل تصویرها نشان داد که با افزایش تعداد ضربه‌ها (افزایش انرژی تراکم)، تعداد نقاط تماس در نمونه‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). البته نرخ تغییرات شیب افزایشی متغیر می‌باشد. تعداد نقاط تماس در مغزه‌ها نزدیک به نمونه‌هایی بودند که با تعداد ۴۵ تا ۶۵ ضربه در هر طرف ساخته شده‌اند.

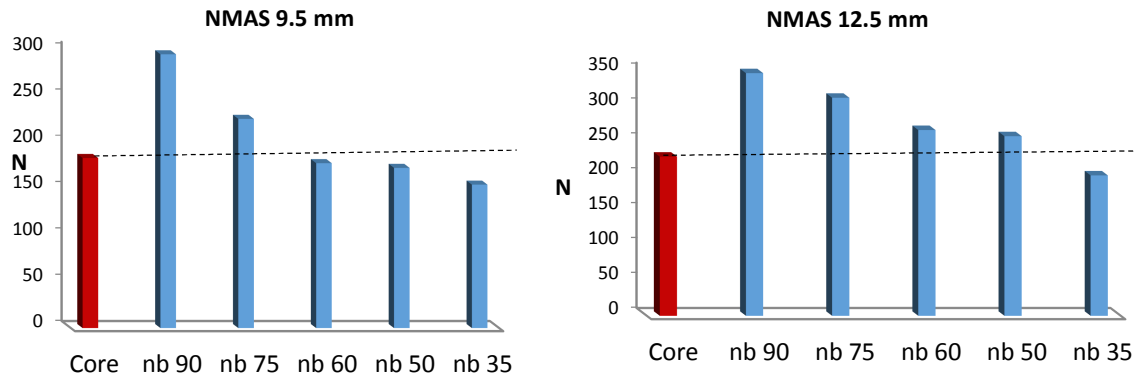
نمونه‌ای از درصد سنگدانه‌ها در قسمت‌های مختلف نمونه با اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۹/۵ میلی‌متر در شکل ۸ نشان داده شده است. بررسی مختلف نشان می‌دهد که اختلاف توزیع سنگدانه‌ها در قسمت‌های مختلف قابل توجه است. همانگونه که در شکل ۹ نمایش داده شده است توزیع سنگدانه‌های درشت‌تر (اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۱۲/۵ میلی‌متر) دارای پراکندگی بیشتری بوده است. علاوه بر این در یک سوم پایینی درصد سنگدانه‌های درشت‌تر بیشتر بوده است. برای نمونه‌هایی با اندازه اسمی سنگدانه ۹/۵ میلی‌متر توزیع سنگدانه‌ها نسبت به عمق یکنواخت بوده است.



شکل ۸. درصد سنگدانه‌ها در قسمت‌های مختلف نمونه (اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۹/۵ میلی‌متر)



شکل ۹. درصد سنگدانه‌ها در قسمت‌های مختلف نمونه (اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۹/۵ میلی‌متر)



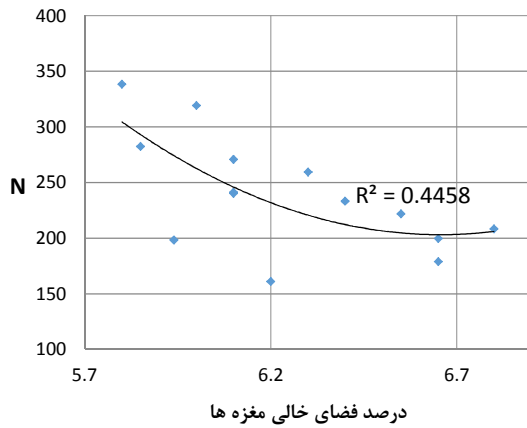
شکل ۱۰. تعداد نقاط تماس برای نمونه‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های میدانی (۹/۵ میلی‌متر یا ۱۲/۵ میلی‌متر)

استفاده شده است. اما همانطور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد تعداد نقاط تماس در نمونه‌های میدانی با نمونه‌های اولیه آزمایشگاهی متفاوت است. تعداد نقاط تماس میدانی شبیه به

برای طرح اختلاط اولیه آزمایشگاهی نمونه‌های میدانی از روش مارشال استفاده شده است. که در این روش با فرض بارگذاری سنگین ترافیکی از ۷۵ ضربه برای هر طرف نمونه



فضای خالی با تعداد نقاط تماس در شکل ۱۱-الف نمایش داده شده است. معین است با افزایش تعداد نقاط تماس مقدار فضای خالی کاهش یافته است هر چند همبستگی بالایی بین درصد فضای خالی و تعداد نقاط تماس وجود نداشت. تغییرات وزن مخصوص با تعداد شاخص ساختار داخلی مخلوط در شکل ۱۱-ب نمایش داده شده است. معین است با همبستگی نسبتاً مناسبی، با افزایش وزن مخصوص مقدار شاخص ساختار داخلی مخلوط بزرگتر شده است.

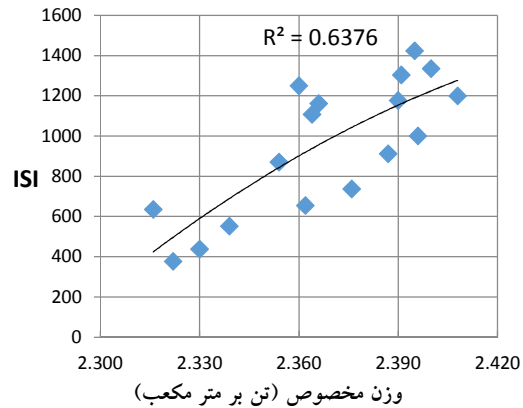


شکل ۱۱.ب- تغییرات فضای خالی با تعداد نقاط تماس برای نمونه‌های میدانی

نمونه‌های بودند که با ۵۰ ضربه به هر طرف یعنی با فرض ترافیک متوسط ساخته شده بودند.

#### ۵-۴- خصوصیات حجمی

درصد فضای خالی و وزن مخصوص از خصوصیات مهمی هستند که در تحلیل ماکرو مخلوطهای آسفالتی مد نظر قرار می‌گیرد. وورال کوک و همکارانش نشان دادند که در همه دماهای تراکم با افزایش تعداد عبور غلتک (افزایش انرژی تراکمی) درصد فضای خالی کاهش می‌یابد (۲۰). تغییرات



شکل ۱۱.الف- تغییرات وزن مخصوص با شاخص ساختار داخلی مخلوط برای نمونه‌های میدانی

#### ۵-نتیجه گیری

توزیع فضایی سنگدانه‌ها در نمونه‌ها نشان داد که یکنواختی مناسبی در نمونه‌ها وجود نداشت. مقایسه نمونه‌های آزمایشگاهی و میدانی نشان داد که تعداد نقاط تماس در نمونه‌های میدانی (با فرض اولیه طرح اختلاط برای ترافیک سنگین)، با نمونه‌های اولیه آزمایشگاهی متفاوت است. تعداد نقاط تماس میدانی شبیه به نمونه‌های بودند که با ۵۰ ضربه به هر طرف یعنی با فرض ترافیک متوسط ساخته شده بودند. با افزایش تعداد نقاط تماس مقدار فضای خالی کاهش یافته است و با همبستگی نسبتاً مناسبی، با افزایش وزن مخصوص مقدار شاخص ساختار داخلی مخلوط بزرگتر شده است.

در نگاه کلی بررسی خصوصیات میکرو مغزه‌های آسفالتی با استفاده از پردازش تصویر منجر به اطلاعات جدید و مفیدی گردید که تایید می‌کند که پارامترهای میکرو ساختاری

هدف اصلی از این مقاله تحقیق روی خصوصیات میکروساختاری مغزه‌های آسفالتی با استفاده از پردازش تصویر می‌باشد. تعداد نقاط تماس، شاخص ساختار داخلی مخلوط، شاخص بزرگی بردار، توزیع جهتی تماس و توزیع فضایی سنگدانه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. در یک روند عمومی با افزایش اندازه اسمی سنگدانه‌ها، تعداد نقاط تماس تماس و شاخص ساختار داخلی مخلوط افزایش یافته است که در مقایسه با تعداد نقاط تماس شاخص ساختار داخلی مخلوط دارای نوسان کمتری بوده است. بر اساس شاخص بزرگی بردار، با افزایش اندازه سنگدانه‌ها یکنواختی بیشتری در جهت‌های طول تماس وجود داشته است. هیستوگرام توزیع جهتی طول‌های تماس نشان می‌دهد که بخش مهمی از طول‌های تماس در امتداد بارگذاری نبوده‌اند. همچنین بررسی

-Kutay, M., Arambula, E., Gibson, N., Youtcheff, J. (2010) "Three-dimensional image processing methods to identify and characterize aggregates in compacted asphalt mixtures International Journal of Pavement Engineering" Vol. 11, No. 6, pp.511-528.

- Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N. Harman, T., (1995), "Application of Digital Image Processing to Quantitative Study of Asphalt Concrete Microstructure" Transportation Research Record 1492/ 1995 pp.53-60.

-Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N., Harman T., (1999), "Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis" journal of computing in civil engineering, pp. 88-95.

-Masad, E., Kutay, M., E., (2012), "Characterization of the Internal Structure of Asphalt Mixtures," Transportation Research Circular E-C161, pp.2-16.

- NCHRP Report 673 (2018), "A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary", Transportation Research Board Washington D.C.

-Qinglin Guo, Yanshan Bian, Lili Li, Yubo Jiao, Jinglin Tao, Chengxiu Xiang, (2015), "Stereological estimation of aggregate gradation using digital image of asphalt mixture" Construction and Building Materials, Vol. 94, pp. 458-466.

-Roohi Sefidmazgi, N., Tashman, L. & Bahia, H. (2012) "Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis," Road Materials and Pavement Design, pp 21-37.

-Shaheen, M., Al-Mayah, A., Tighe, S., (2016), "A novel method for evaluating hot mix asphalt fatigue damage: X-ray computed tomography" Construction and Building Materials, Vol. 113, pp. 121-133.

-Roohi Sefidmazgi, N. (2011), "Defining Effective Aggregate Skeleton in Asphalt Mixture Using Digital Imaging," Master of Science Civil & Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison.

مخلوطهای آسفالتی باید در طرح اختلاط و انتخاب تکنیکهای تراکم مورد توجه قرار بگیرند.

## ۶- مراجع

-Aaron R. Coenen, M. Emin Kutay, Nima Roohi Sefidmazgi & Hussain U. Bahia (2012), "Aggregate structure characterization of asphalt mixtures using two-dimensional image analysis," Road Materials and Pavement Design, pp. 433-454.

-A. T. Papagiannakis and E. A. Masad, (2008), "Pavement Design and Materials" The John Wiley & Sons, Inc., pp.552.

-Bruno, L. Parla, G., Celauro, C., (2012), "Image analysis for detecting aggregate gradation in asphalt mixture from planar images" Construction and Building Materials, Vol. 28, pp. 21-30.

-Hassan, N. A., Khan, R., Raaberg, J., Lo Presti, D., (2015), "Effect of mixing time on reclaimed asphalt mixtures: An investigation by means of imaging techniques" Construction and Building Materials Vol.99, pp. 54-61.

-Hu, J. Qian, Z., Liu, Y., Zhang, M., (2015), "High-temperature failure in asphalt mixtures using micro-structural investigation and image analysis" Construction and Building Materials, Vol. 84, pp. 136-145.

-Iuri S. Bessa, Veronica T.F. Castelo Branco, Jorge B. Soares (2012) "Evaluation of different digital image processing software for aggregates and hot mix asphalt characterizations," Construction and Building Materials, Vol.37, pp. 370-378.

Keymanesh, M. R., Nasrollahtabar, A., & Shahryari, N. (2018). Internal Structure Features of Asphalt Mixture for Field Samples. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 6(1), 10-20.

Kemanesh, M., Ziari, H., Nasrollahtabar, A., & Shahryari, N. (2017). Analysis of Microstructural Parameters and Indirect Tensile Strength in Evaluation of Hot Mixture Asphalt Rutting Performance.

-Xu, H., Tan, Y., Yao, X., (2016), "X-ray computed tomography in hydraulics of asphalt mixtures: Procedure, accuracy, and application" Construction and Building Materials, Vol. 108, pp. 10–21.

- Xu Cai, Duanyi Wang, (2013), "Evaluation of rutting performance of asphalt mixture based on the granular media theory and aggregate contact characteristics" Road Materials and Pavement Design, Vol.14, No.2, pp.325-340.

-Vural kok, b., yilmaz, m., turhan, i., (2012), "Comparison of the Volumetric Properties and Stabilities of Field and Laboratory Compacted Asphalt Concrete" 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul, 13-15th.

-Wang, H. Zhang, R. Chen, Y. You, Z. and Fang, J., (2016), "Study on microstructure of rubberized recycled hot mix asphalt based X-ray CT technology" Construction and Building Materials, Vol. 121, pp. 177–184.

-Wang, L., (2011), "Mechanics of Asphalt Microstructure and Micromechanics" The McGraw-Hill Companies, Inc.

# **Analysis and Comparison of the Microstructural Characteristics of Field Asphaltic Cores and Laboratory Asphaltic Samples in Different Compaction Energies**

*Ali Nasrollahatabar Ahangar, Assistant Professor, Civil department, Aryan Institute of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Mahmood Reza Keymanesh, Assistant Professor, Transportation department, Faculty of Engineering, Payam Noor University of Tehran, Iran.*

*Meysam Rahimi, M.Sc., Grad., Laboratory of Soil Mechanics of Qom Province, Qom, Iran.*

*E-mail: [alinasrahangar@gmail.com](mailto:alinasrahangar@gmail.com)*

Received: January 2020-Accepted: July 2020

## **ABSTRACT**

In most mix design methods, hot mixture asphalt (HMA) is considered to be a single object and only its macroscopic parameters are determined. This is because the microstructure of HMA is very complicated. Asphalt mixture is heterogeneous in nature; therefore, macroscopic parameters alone cannot describe the mechanical behavior of the mixture. In this paper, the analysis and evaluation of microstructure parameters of aggregates in field asphaltic samples are compared to laboratory samples in different compaction energies. Image processing and quantification of the internal structure parameters of the mixtures were performed using two-dimensional images from the cut-off of samples and iPAS2 software. The results of the comparison between the parameters of micro and field samples showed that the number of contact points in the cores was close to the number of contact points of Marshall Samples, which were made with moderate compaction energy. It was also determined that by examining mixtures of asphalt mixtures, new and useful information can be obtained that confirms the necessity of using micro parameters in the mixing design of asphalt mixtures.

**Keywords:** Aggregate Particles, Field Samples, Contact Length, Contact Points