

اثر پرکننده بر ویژگی‌های حجمی و غشای قیری بتن آسفالتی*

(یادداشت پژوهشی)

سعید غفارپور جهرمی^(۱)علی خدایی^(۲)

چکیده پرکننده کوچکترین بخش مصالح سنگی بتن آسفالتی است که با پرکردن فضاهای خالی، به دلیل نرمی، ویژگی‌های سطحی و ترکیب شیمیایی می‌تواند نقش یک ماده فعال واکنش‌زا را بازی می‌کند. پرکننده بخش کوچکی از بتن آسفالتی را تشکیل می‌دهد، ولی با توجه به توانایی جذب به نسبت زیاد قیر، تغییرهای جزئی در مقدار و یا ویژگی‌های آن می‌تواند، روی نقش قیر به‌عنوان یک ماده چسبنده و پایدار کننده مصالح سنگی اثر بگذارد. یکی از عوامل‌های تعیین کننده کم‌قیری یا پر‌قیری مخلوط‌های بتن آسفالتی، ضخامت غشایی است که می‌تواند معیاری برای ناپایداری مخلوط باشد. در این پژوهش با به کارگیری دو گونه پرکننده با ویژگی‌های هندسی، فیزیکی و شیمیایی متفاوت، اثرگذاری آنها بر نسبت‌های حجمی و ضخامت غشایی مخلوط‌های بتن آسفالتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پرکننده‌های مورد بررسی شامل سیمان پرتلند و گورد سنگ آهکی هستند که هر یک در دو سطح ویژه و نرمی متفاوت در ساخت نمونه‌های مارشال استفاده شده و آزمایش می‌شوند. همچنین بر اساس تعریف‌های معمول و جدید از ضخامت غشایی، اثر نوع، میزان و نرمی پرکننده بر ضخامت غشایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتیجه‌های این بررسی نشان می‌دهد پایداری مارشال و نسبت‌های حجمی مخلوط بتن آسفالتی مانند وزن مخصوص، حجم منفذها، جذب قیر و قیر بهینه‌افزون بر نوع پرکننده به سطح مخصوص و نرمی آن نیز وابسته است. همچنین ضخامت غشایی با حجم منفذهای سنگدانه‌ها و حجم هوای مخلوط وابستگی نزدیکی دارد.

واژه‌های کلیدی بتن آسفالتی، پرکننده، نرمی و سطح مخصوص پرکننده، نسبت‌های حجمی، ضخامت غشایی

Effect of Filler on Volumetric Properties and Film Thickness of Asphalt Mixtures

S. Ghaffarpour Jahromi

A. Khodaii

Abstract Mineral filler is the finest fraction of aggregate used in concrete asphalt that can fill the void with effective interface in the mixture. It is essential for producing a mixture which is dense, cohesive, durable and resistance to the water penetration. Small change in the amount or the properties of the filler can cause the paving mixture to appear excessively dry or rich and film thickness can be a good parameter to predict concrete asphalt stability. It is generally believed that an asphalt paving mixture should have an adequate asphalt film thickness around the aggregate particles to ensure reasonable durability (resistance to aging) of the mixture. This study focuses on comparing volumetric properties and film thickness of the asphalt concrete using different fillers with a view to the geometry, physical and chemical properties. The fillers are limestone mineral and portland cement that used in two different specific surface in the construction of Marshall test specimens. The range of the changes depends on the filler interaction with bitumen. Volumetric properties were investigated in the study are density, VFB, VTM, VMA. Other properties are Marshall stability, flow, optimum binder and film thickness. Results show that kind, content and filler properties have different effects on the volumetric properties and film thickness.

Key Words Asphalt Mixtures, Filler, Volumetric Properties, Film Thickness

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۷/۱/۲۱ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/۳/۱۶ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسؤل: استادیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

(۲) دانشیار، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

مقدمه

در سال های اخیر، بررسی کارهای پژوهشی گوناگون نشان می دهد، که همه پژوهشگران بر ناکافی بودن معیارهای حجمی در طراحی مخلوط های بتن آسفالتی نظر دارند و نمی توانند تنها با این معیارها از دوام و کارایی روسازی های آسفالتی در تمامی شرایط اطمینان حاصل کنند [1]. تغییرشکل های همیشگی در لایه های روسازی ناشی از جمع شدن کرنش های مومسان در اثر تکرار بارگذاری و باربرداری است و با توجه به رشد فزاینده حجم و وزن خودروها، روی شرایط بهره برداری از راه اثر می گذارد. نسبت های حجمی و به ویژه فضای خالی مخلوط (VTM)، از عامل های مهم در ایجاد این پدیده است و کاهش آن می تواند میزان تغییرشکل ها را افزایش دهد [2]. خستگی و دوام مخلوط های بتن آسفالتی ارتباط مستقیمی با حجم منفذهای سنگدانه ها (VMA) و حجم قیر در مخلوط (VBE) دارد. تا حد مشخصی با افزایش حجم منفذهای سنگدانه ها (VMA) و حجم قیر در مخلوط (VBE) می توان عمر خستگی و دوام را افزایش داد، ولی از سوی دیگر مقابل با افزایش بیش از حد VMA و VBE، تغییرشکل ماندگار نیز افزایش یافته و مقاومت در برابر گودی زیرچرخ (Rutting) کاهش می یابد [3].

یکی از روش های طراحی مخلوط های آسفالتی استفاده از روش های طراحی حجمی مانند روش مارشال است این روش بر معیارهای تجربی و حجمی مانند حجم منفذهای سنگدانه (VMA)، حجم هوای مخلوط (VTM)، حجم پر شده با قیر (VFB)، حجم قیر (VBE) و چگالی استوار است. در این بین VMA اهمیت بیشتری دارد [4]. کارایی نامناسب برخی مخلوط های بتن آسفالتی که بر اساس معیارهای تجربی و حجمی طراحی می شوند، باعث شده تا پژوهشگران ضخامت غشایی قیر را نیز در ارزیابی دوام و کارایی مخلوط های آسفالتی مؤثر بدانند. بنابراین در سال های اخیر بسیاری از طراحی مخلوط های بتن آسفالتی، بر اساس دستیابی به بیشترین دانسیته (کمترین VMA) و مناسب ترین نسبت مقدار قیر

به سطح جانبی سنگدانه ها (ضخامت بهینه غشای قیری) انجام شده اند [5-10]. سطح جانبی سنگدانه ها از حاصل ضرب ضریب های سطحی کم انستیتو آسفالت، معرفی کرده در درصد عبوری الک های مختلف تعیین می شود. رویه های آسفالتی در ابتدای ساخت با میانگین حجم هوا ۷ تا ۸ درصد ساخته می شوند و فشردگی دوباره ثانویه ناشی از کوبش غلطک یا تکرار بار ترافیک، از تخلخل آن به صورت محدودی به مقدار ۳ تا ۵ درصد می کاهد زیرا حجم هوای اضافی در مخلوط از فشردگی بیش از حد آن پیشگیری می کند. اگر حجم هوا کمتر از آستانه بحرانی یعنی ۲/۵ تا ۳ درصد باشد، توانایی نهفته جاری شدن و تغییرشکل های ماندگار افزایش می یابد [11]. از سوی دیگر با افزایش فشردگی، فاصله بین سطح ذرات کاهش یافته و ضخامت غشایی افزایش می یابد [12].

بخش کوچکتر از ۷۵ میکرون مصالح سنگی به عنوان پرکننده شناخته می شود که نقش مهمی بر دوام، ویژگی های مکانیکی و نسبت های حجمی مخلوط دارد. از پرکننده برای پر کردن فضاها در بتن آسفالتی استفاده می شود که می تواند عملکرد خنثی یا فعال داشته باشد. در پرکننده های خنثی، ویژگی های فیزیکی مانند دانه بندی، بافت سطحی، نرمی و سطح مخصوص دارای اهمیت است؛ ولی در پرکننده های فعال افزون بر ویژگی های فیزیکی، بافت و ترکیب شیمیایی و اندرکنش آن با قیر، اهمیت دارد. مصالح پرکننده ها باید بدون هیچ گونه از مواد آلی و کانی های رسی و دامنه خمیری آن کمتر از ۴ باشد و از نظر دانه بندی، دست کم ۷۰ درصد ذرات از الک ۲۰۰ بگذرند [13,14]. کاربرد از پرکننده های مختلف در بتن آسفالتی موضوع جدیدی نمی باشد و پژوهش های بسیاری تاکنون پیرامون ویژگی های پرکننده و اثر گذاری کمی آن بر رفتار بتن آسفالتی انجام شده است. در این پژوهش از ۲ نوع پرکننده ها معمول یعنی گرد سنگ و سیمان پرتلند با ویژگی های فیزیکی و شیمیایی متفاوت استفاده می شود و اثرگذاری آن ها بر نسبت های حجمی و ضخامت غشایی مخلوط بتن آسفالتی مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرد.

بازبینی پژوهش‌های پیشین

استفاده از معیارهای حجمی در ارزیابی و طراحی روسازی بتن آسفالتی را نخستین بار در دهه ۵۰ میلادی Mclaod کانادایی مطرح کرد. وی برای بارنخست معیار "حداقل حجم منفذهای سنگدانه" (Minimum VMA) را در طراحی بادوام مخلوط‌های آسفالتی در قشر رویه پیشنهاد داد با این فرض که VMA نقش مؤثرتری و کنترل‌کننده‌ای بر رفتار بتن آسفالتی دارد و رفتار آن را در اختیار می‌گیرد. [15]. وی پیشنهاد کرد بر اساس روابط حجمی، وی پیشنهاد کرد باید "VMA دست کم"، ۱۵ درصد، حجم منفذها بین ۳ تا ۵ درصد، حجم اشغال شده با قیر (VFB) ۷۵ تا ۸۵ درصد و حجم قیر مخلوط دست کم ۱۰ درصد (۴/۵ درصد وزنی) باشد. او در کامل کردن نظریه خود، VMA را متناسب با بیشترین اندازه اسمی دانه‌ها دانست به طوری که در مصالح دانه‌ای ریزدانه، کمترین VMA از ۱۵ درصد فراتر می‌رود و در مصالح دانه‌ای درشت دانه از ۱۵ درصد کمتر است [16].

به بیان دیگر، نسبت قیر به سطح جانبی سنگدانه‌ها، عامل مؤثرتری در دستیابی به مخلوط پایدار و بادوام و در اختیار گرفتن ویژگی‌های آن است. این نسبت به عنوان "ضخامت غشای قیری" یا "ضریب ظرفیت قیر" شناخته می‌شود. پژوهش‌های Kandhal and Chakraborty با ارائه رابطه‌ای در گمانه زنی ضخامت غشایی، نشان می‌دهد که ضخامت غشای قیری وابستگی خوبی با ضریب برجهندگی مخلوط دارد و ضخامت متوسط در مخلوط‌های فشرده شده با ۸ درصد حجم هوا، حدود ۹ تا ۱۰ میکرون می‌باشد [17]. از آنجا که ضخامت غشای قیری را به آسانی نمی‌توان تعیین کرد، Kandhal و همکارانش پیشنهاد کردند که معیار "VMA کمترین" را می‌توان با معیار حداقل مقدار قیری که ضخامت غشای ۸ میکرون را فراهم کند، جایگزین کرد [7]. با این حال پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که نظریه "VMA کمینه" و ضخامت غشای قیری معیارهای کاملی برای اطمینان از دوام و کارایی مخلوط بتن آسفالتی نمی‌باشند. ضخامت غشایی وابستگی خوبی با تغییر شکل ماندگار (Rutting) دارد و VMA با دوام مخلوط وابسته

است. از این رو، نسبت VMA به سطح جانبی سنگدانه به عنوان شاخص اثر گذار، در اختیار گرفتن کیفیت و دوام مخلوط پیشنهاد شده است [18]. پژوهش دیگری روی مخلوط‌های فشرده شده با ۴ درصد حجم هوا نشان می‌دهد که VMA و ضخامت غشای قیری، معیارهای مناسبی در بیان سخت‌شدگی نسبی و در اختیار گرفتن دوام مخلوط نمی‌باشند و مصالح درشت‌دانه با غشای نازکی از قیر و مصالح بسیار ریزدانه (پرکننده) پوشیده می‌شوند [19]. استفاده از پرکننده‌های مختلف در بتن آسفالتی موضوع جدیدی نمی‌باشد. پرکننده در بتن آسفالتی ظرفیت باربری، مقاومت فشاری و برشی را افزایش می‌دهد و تغییر شکل نسبی را کاهش می‌دهد. با این وجود افزایش بیش از حد پرکننده سبب کاهش تخلخل در مخلوط شده و کارهای فشرده سازی را مشکل می‌کند که کاهش ایستادگی را به دنبال خواهد داشت [14,20]. Richardson از نخستین پژوهشگرانی بود که اثرگذاری پرکننده‌های معدنی را مورد بررسی قرار داد. پرکننده افزون بر پرکردن منفذهای خالی، در ترکیب نیز اندرکنش فیزیکی-شیمیایی دارد [22]. Anani دریافت که تغییر مقدار پرکننده، به صورت مستقیم با حجم منفذها وابسته است و روی ضریب برجهندگی و نفوذپذیری را اثر می‌گذارد [20]. میزان چسبندگی قیر و مصالح سنگی نیز زیر اثر ویژگی‌های پرکننده قرار دارد و رفتار مکانیکی، میزان قیر بهینه، دوام و نفوذپذیری مخلوط به نوع قیر، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پرکننده وابسته است [23]. آهک گونه‌ای پرکننده نوعی پرکننده فعال است که با مولکول‌های قطبی قیر واکنش می‌دهد و با بهبود چسبندگی قیر، مقاومت کششی و ضریب برجهندگی مخلوط افزایش و تغییر شکل نسبی کاهش می‌یابد [24].

مواد و مصالح مورد استفاده

مصالح سنگی و قیر مصرفی: در این پژوهش دانه‌بندی مشخصی با بیشترین اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر بر اساس آیین‌نامه روسازی ایران، به کار رفت و مبنای ساخت همه مخلوط‌ها شد. منحنی دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱) و ویژگی‌های مصالح سنگی در

پرکننده: در این پژوهش از دو گونه پرکننده با ویژگی های فیزیکی متفاوتی مانند دانه بندی، سطح مخصوص، نرمی، بافت سطحی و جذب سطحی متفاوت و همچنین ترکیبات شیمیایی مختلف استفاده شد که شامل سیمان پرتلند معمولی و گرد سنگ آهک هستند. سیمان، ترکیبی از آهک، سیلیس، آلومین و اکسید آهن با بیش از ۶۰ درصد CaO و دیگر ترکیبات شیمیایی است که افزون بر نقش پرکننده، با قیر نیز، واکنش خواهد داد. در کشور ما بیشتر پرکننده هایی با ترکیبات آهکی در ساخت آسفالت به کار می روند که کارکرد مناسبی در بهبود چسبندگی و ویژگی های بتن آسفالتی دارد. ویژگی های هر یک از پرکننده ها در جدول (۳) و (۴) آمده است. برای دریافتن اثر ویژگی های فیزیکی و به ویژه نرمی پرکننده، هر یک از پرکننده ها با آسیاب گلوله ای، دوباره به مدت ۶۰ دقیقه، آسیاب شدند. آسیاب دوباره سبب افزایش سطح مخصوص و نرمی پرکننده ها می شود و توزیع دانه بندی را تغییر می دهد. تغییرات سطح مخصوص در جدول ویژگی های پرکننده ها و تغییر دانه بندی در شکل (۲) آمده است.

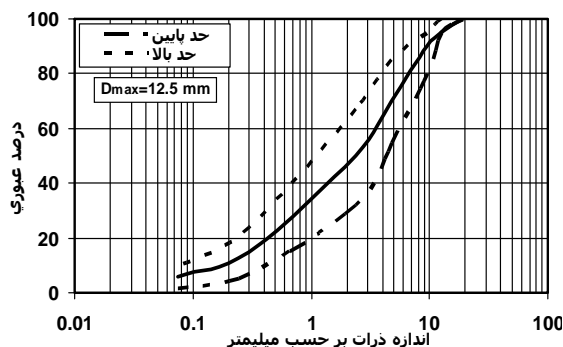
جدول ۳ ویژگی های فیزیکی پودرسنگ

اطراف ساوه	معدن استخراج شده
۲/۷۲	چگالی ویژه
۱۰۵ m ² /kg	قبل از آسیاب شدن
۲۳۵ m ² /kg	پس از آسیاب مجدد
زبر- گوشه دار- مکعبی	بافت سطحی

جدول ۴ ویژگی های فیزیکی شیمیایی سیمان

سیمان تهران	کارخانه
تیپ I	تیپ سیمان
۳/۱۵	چگالی ویژه
۳۲۵ m ² /kg	قبل از آسیاب شدن
۵۴۵ m ² /kg	پس از آسیاب مجدد
نرم- ناهموار	بافت سطحی

جدول (۱) آمده است. قیر مصرفی در این تحقیق از نوع ۶۰-۷۰ (معادل AC-10) با ویژگی های رئولوژیکی نباهه جدول (۲) است که هماهنگی بیشتری با شرایط آب و هوایی کشور ما دارد.



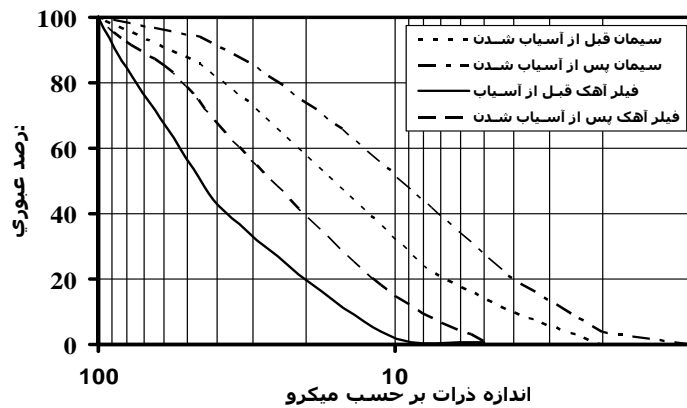
شکل ۱ دانه بندی مصالح سنگی

جدول ۱ ویژگی های مصالح سنگی

مصالح درشت دانه (ASTM C 127)	
۲/۶۲	وزن مخصوص واقعی g/cm ³
۲/۶۴	وزن مخصوص ظاهری g/cm ³
۰/۲۳	درصد جذب آب
مصالح ریزدانه (ASTM C 128)	
۲/۶۸	وزن مخصوص واقعی g/cm ³
۲/۷۱	وزن مخصوص ظاهری g/cm ³
۰/۳۲	درصد جذب آب

جدول ۲ ویژگی های قیر مصرفی

۵۴ °C	نقطه نرمی
۶۳ mm	نفوذ در دمای ۲۵ درجه
۲۴۳ °C	درجه اشتعال
+ ۰/۴	نشانه نفوذ
> ۱۰۰ cm	شکل پذیری در دمای ۲۵
۱۴	نقطه شکست فراس
۰/۰۵ %	افت حرارتی
۱/۰۲۵	چگالی در دمای ۲۵ درجه
۲۵۰۰۰۰ cSt	در دمای ۵۰
۱۰۰۰۰۰ cSt	در دمای ۶۰
۲۰۰۰۰ cSt	در دمای ۷۲
۷۵ %	مالتین
۲۷/۲ %	آسفالتین



شکل ۲ توزیع ذرات پرکننده پیش و پس از آسیاب دوباره

روش ساخت نمونه‌ها

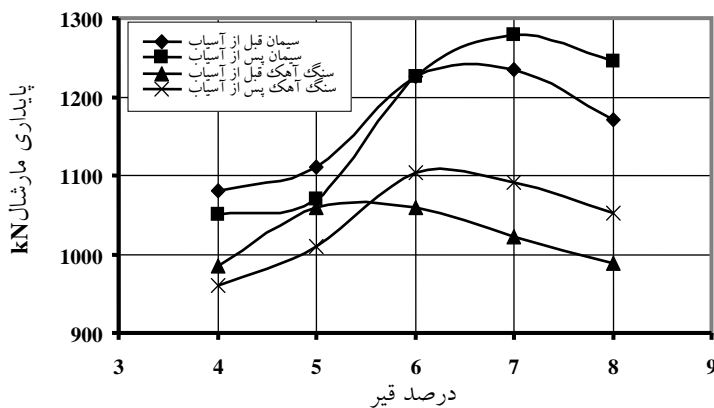
در ساخت همه نمونه‌ها، دانه‌بندی مصالح سنگی، میزان پرکننده و نوع قیر ثابت در نظر گرفته شد؛ ولی نوع و ویژگی‌های پرکننده و همچنین میزان قیر تغییر کرده است. برای این هدف یک بار از پرکننده گرد سنگ و سیمان با دانه‌بندی و نرمی اولیه و بار دیگر از پرکننده‌ها پس از آسیاب دوباره استفاده شد. آیین‌نامه روسازی، نسبت وزنی پرکننده به قیر را به $0/6$ تا $1/2$ محدود کرده است و در این پژوهش، میزان پرکننده ۵ درصد وزن مصالح سنگی در نظر گرفته شد و همه نمونه‌ها نیابه روش مارشال (ASTM-D1559) ساخته شدند. بر اساس وزن کل مصالح سنگی و پرکننده، درصد‌های مختلف قیر از ۴ درصد تا ۸ درصد (با نمو یک درصد) انتخاب و بر پایه این درصدها در نمونه‌ها ساخته شدند. نمونه‌های مارشال قطری برابر ۱۰۲ و ارتفاعی حدود ۶۳ میلی‌متر دارند و با فرض سطح آمد و شد سنگین، همه نمونه‌ها از هر طرف با ۷۵ ضربه با دستگاه، فشرده شدند. سنگدانه و قیر پیش از مخلوط شدن به ترتیب تا دمایی حدود ۱۷۰ و ۱۴۰ درجه گرم و در دمایی حدود ۱۴۵ درجه فشرده شدند. وزن مخصوص و درصد جذب قیر، روی مخلوط بتن آسفالتی نکوبیده، به روش رایس ASTM-D2041 تعیین و درصد فضای خالی نمونه‌ها نیز، به روش انستیتو آسفالت، ایجاد شد.

اثر گذاری پرکننده‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی و

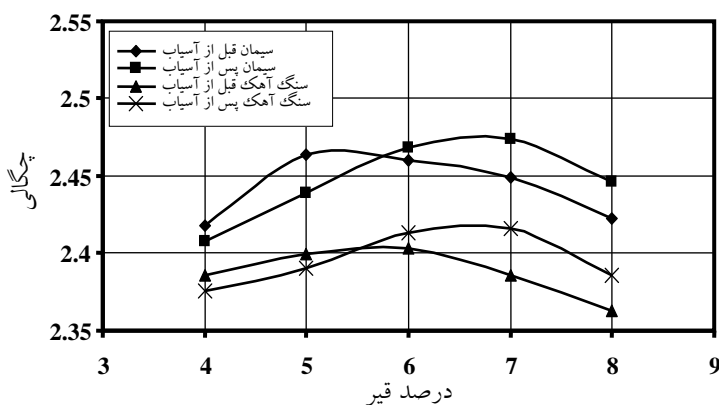
نسبت‌های حجمی

نتیجه‌های حاصل از تحلیل آزمایش مارشال و رایس شامل پایداری، دانسیته، حجم منفذهای و حجم هوای مخلوط بر حسب درصد قیر در شکل (۳) تا (۶) آمده است. همان‌گونه که در شکل (۳) مشخص شده است، در همه پرکننده‌ها، با افزایش میزان قیر (نسبت قیر به پرکننده)، محکم‌شدگی مارشال ابتدا افزایش یافته و سپس روند کاهشی دارد. همچنین با افزایش نرمی پرکننده‌ها، سطح مخصوص، افزایش می‌یابد و درصد قیر بهینه و مقاومت مارشال اندکی افزایش می‌یابد. روند مشابهی را می‌توان در اثرگذاری پرکننده روی وزن مخصوص مشاهده کرد (شکل (۴)). با افزایش میزان قیر، ضخامت غشای قیری نیز افزایش یافته و با کاهش اصطکاک بین دانه‌ها باعث فشردگی پذیری بهتر مخلوط می‌شود که حاصل آن افزایش وزن مخصوص خواهد بود. افزایش وزن مخصوص، افزایش پایداری مارشال را نیز به دنبال خواهد داشت. با ادامه افزایش قیر، ضخامت غشای قیری نیز ضخیم‌تر می‌شود و با دور کردن دانه‌ها، جاگیری و قفل و بست بین آنها نیز کاهش می‌یابد و حاصل آن کاهش وزن مخصوص و محکم‌شدگی مخلوط است. شکل (۳) و (۴) نشان می‌دهند که اگر میزان قیر و به

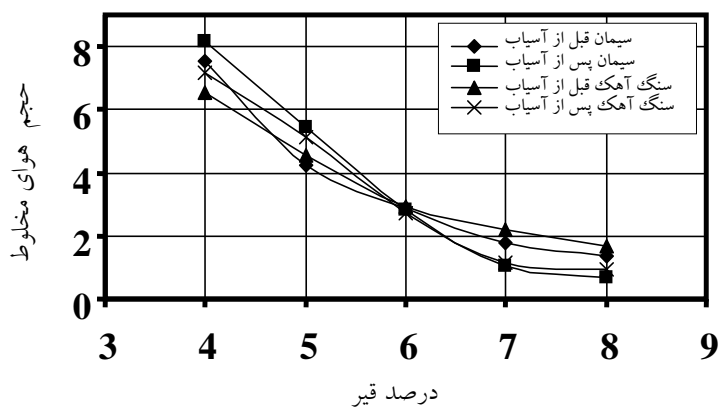
عبارتی نسبت قیر به پرکننده اندک باشد (کمتر از ۵ درصد)، نمونه های دارای پرکننده با نرمی زیاد (آسیاب دوباره)، استحکام مارشال و وزن مخصوص کمتری در مقایسه با نمونه های دارای پرکننده معمولی دارند. اما با افزایش میزان قیر، چگالی این نمونه ها از نمونه های دارای پرکننده پیش از آسیاب بیشتر می شود.



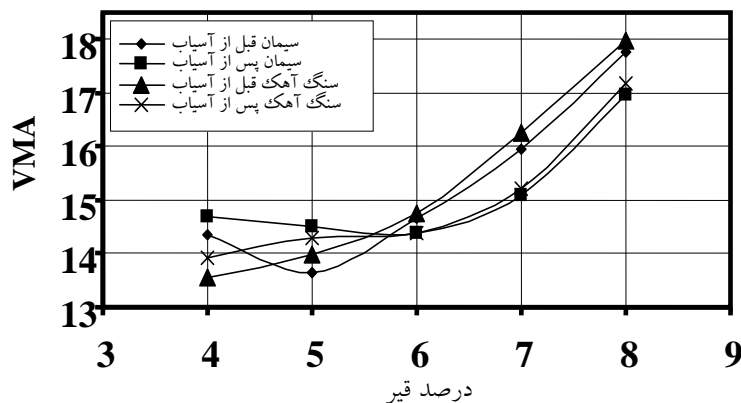
شکل ۳ تغییرات استحکام مارشال بر حسب درصد قیر



شکل ۴ تغییرات وزن مخصوص بر حسب درصد قیر



شکل ۵ تغییرات حجم هوا بر حسب درصد قیر



شکل ۶ تغییرات حجم منفذهای سنگدانه بر حسب درصد قیر

بتن آسفالتی، ضخامت غشای قیری در اطراف سنگدانه‌ها است. برپایه تعریف‌های نخستین (Hveem and Edwards), ضخامت غشایی به طور تجربی از تقسیم حجم مؤثر قیر بر سطح مخصوص مصالح سنگی و با رابطه زیر بیان می‌شود [25]:

$$T_F = \frac{V_{be}}{S_a \cdot M_s} \rho_w \quad (1)$$

در این رابطه T_F بیانگر ضخامت غشایی (میکرون)، V_{be} حجم مؤثر قیر (لیتر)، S_a سطح جانبی کل سنگدانه (m^2/kg)، M_s جرم سنگدانه (kg)، ρ_w چگالی آب (g/cm^3).

با افزایش سطح جانبی ذرات، ضخامت غشایی نیز کاهش می‌یابد. آنچه روشن است که همه ذرات مخلوط دارای ضخامت غشایی یکسانی نمی‌باشند و ذرات ریزدانه، اندود قیری بیشتری نسبت به ذرات درشت‌دانه دارند. همچنین ذرات بسیار ریز که پرکننده نیز بخشی از آن است، در قیر پخش شده و جزئی از لایه اندودی می‌شوند. تعیین سطح مخصوص مصالح سنگی بسیار پیچیده و وابسته به روش‌های تجربی است. سطح جانبی مصالح سنگی به روش پیشنهادی انستیتو آسفالت (Hveem-Edwards), بابت بهره‌گیری از نتیجه‌های آزمایش دانه‌بندی و ضرایب سطح مطابق جدول (۵) تعیین شده است.

همان‌گونه که در جدول (۵) آمده است، ذرات

همچنین این اشکال به خوبی نشان می‌دهد؛ که مخلوط دارای سیمان، از مقاومت بالاتری در مقایسه با مخلوط دارای آهک برخوردار است. از آنجا که سیمان و آهک هر دو دارای ترکیبات کلسیمی (CaO) هستند، به نظر می‌رسد، سیمان به دلیل کوچکتر بودن ذرات آن (به خصوص پس از آسیاب دوباره)، سطح تماس بیشتری با قیر داشته و در نتیجه اندرکنش و فعالیت شیمیایی شدیدتری با قیر دارد.

شکل (۵) نشان می‌دهد که میزان هوای مخلوط‌های بتن آسفالتی (V_a) و منفذهای سنگدانه‌ها (VMA)، وابستگی کمتری به نرمی پرکننده‌ها دارند و رفتار به نسبت همانند و نزدیکی روند تغییرات آنها بیشتر تابع میزان قیر و گونه پرکننده است تا نرمی پرکننده‌ها. همه نمونه‌ها در درصد قیر حدود ۶ درصد، دارای حجم هوای یکسانی حدود ۳ درصد و منفذهای سنگدانه‌ها نیز، حدود 14.5 درصد هستند. حجم منفذهای سنگدانه‌ها (VMA) در نمونه‌های دارای پرکننده با نرمی زیاد (آسیاب‌شده) با افزایش قیر (بیش از ۶٪)، حدود ۱ درصد کمتر از نمونه‌های دارای پرکننده پیش از آسیاب است که بیانگر کارپذیری و فشردگی پذیری بهتر این گونه مخلوط‌های بتن آسفالتی است.

ضخامت غشای قیری

یکی از عامل‌های اثرگذار و کنترل‌کننده نابودی و خرابی

الک ۲۰۰ برابر با ۳۲/۷۷ است) [27]:

$$S = 135A + 12B + 2.3C \quad (2)$$

در این رابطه، S سطح جانبی ویژه (m^2/kg)، A درصد وزنی کوچکتر از ۸۰ میکرومتر، B درصد وزنی بین ۸۰ میکرومتر تا ۰/۳۱۵ میلیمتر و C درصد وزنی ذرات بین ۰/۳۱۵ میلیمتر تا ۵ میلیمتر است. مقایسه روابط فوق نشان می‌دهد در تعیین سطح جانبی پژوهشگران یکسان نظر نمی‌دهند جدول (۶) سطح جانبی مصالح سنگی را بر اساس هر سه روش مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۶ مقایسه سطح جانبی پرکننده ها به روش های مختلف

پس از آسیاب دوباره	پیش از آسیاب		
۵/۶۰۵	۵/۶۰۵	روش انستیتو آسفالت	
۳۱/۲۱۷	۲۰/۲۱۷	دارای سیمان	آزمایش
۱۵/۷۱۷	۹/۲۱۷	دارای گرد سنگ	بلین
۹/۹۲۲	۹/۹۲۲	روش پیشنهادی Duriez	

ضخامت غشایی وابستگی شدیدی با سطح جانبی دارد و تا کنون روش مناسبی برای تعیین مقدار واقعی ضخامت غشایی و سطح جانبی ارائه نشده است، بنابراین، نمی‌توان دقت هر روش را در گمانه زنی سطح جانبی به درستی صحیحی تعیین کرد. روش انستیتو آسفالت کمترین مقدار و آزمایش بلین، بیشترین مقدار سطح مخصوص را بیان می‌کند. به عبارتی روش انستیتو آسفالت، مقدار دست بالایی برای ضخامت غشایی ارائه می‌دهد و فرض می‌کند بخشی از ذرات بسیار ریز در قیر پخش شده و جزئی از ضخامت غشایی می‌شوند [12]. شکل (۷) وابستگی بین ضخامت غشایی و مقدار قیر را براساس کمترین، بیشترین و میانگین مقدارهای سطح مخصوص ارائه شده (جدول (۶)) نشان می‌دهد.

برای انعطاف پذیری و نفوذپذیری مخلوط‌های بتن آسفالتی، پیشنهاد شده است ضخامت غشایی بین ۸-۶

ریزتر، ضریب سطح بزرگتری دارند که بیانگر سهم بزرگتر آنان در سطح جانبی است. در روشی که انستیتو آسفالت ارائه داده تنها درصد مصالح رد شده از هر الک، در محاسبات به کار می‌رود که برای دقت آن به ویژه برای ذرات بسیار ریز باید اندیشه کرد. از این رو، دیگر پژوهشگران نیز دقت این روش را در تعیین سطح مخصوص ذرات پرکننده، با انجام آزمایش بلین مورد مقایسه قرار داده‌اند. نتیجه های یک بررسی نشان می‌دهد که بسته به گونه و کانی شناسی ذرات پرکننده، سطح جانبی حاصل از آزمایش نفوذپذیری هوا (بلین ASTM C204) بین ۶ تا ۱۰ برابر بزرگتر از سطح جانبی حاصل از روش انستیتو آسفالت می‌باشد [26].

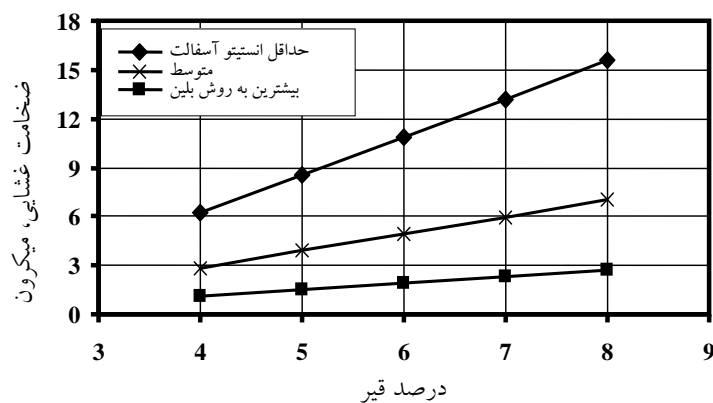
جدول ۵ تعیین سطح مخصوص ذرات

اندازه الک	درصد عبوری	ضریب سطح	سطح مخصوص
۱۹	۱۰۰	۰/۴۱	۰/۴۱
۱۲/۵	۹۵	۰/۴۱	۰/۴۱
۹/۵	۸۰	۰/۴۱	۰/۴۱
۴/۷۵	۶۵	۰/۸۲	۰/۲۶۶
۲/۳۶	۴۹	۱/۶۴	۰/۴۰۲
۱/۱۸	۲۸	۲/۸۷	۰/۴۶
۰/۶	۲۰	۶/۱۴	۰/۵۴۷
۰/۳	۱۵	۱۲/۲۹	۰/۹۲۱
۰/۱۵	۷/۶	۳۲/۷۷	۰/۹۳۴
۰/۰۷۵	۵		۱/۶۳۸
سطح جانبی مصالح سنگی m^2/kg			۵/۶۰۵

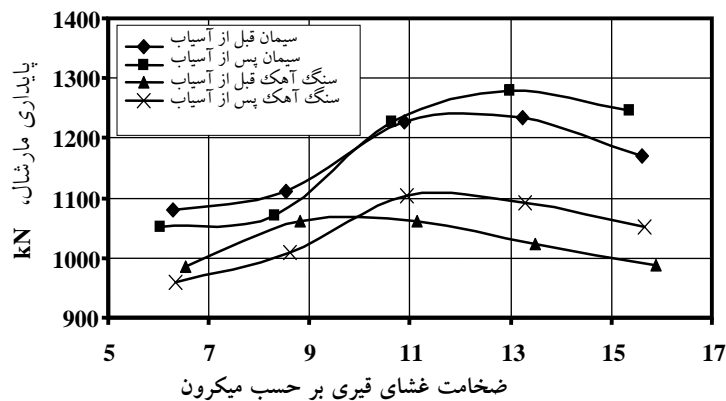
آزمایش بلین روی پرکننده ها پیش و پس از آسیاب مجدد انجام شده است و نتیجه های آن در جدول (۳) و (۴) آمده است که بیانگر سطح جانبی به نسبت بزرگتری در مقایسه با روش انستیتو آسفالت است. در روش پیشنهادی Duriez ضریب سطح برای ذرات بسیار ریز پرکننده بسیار بیشتر از مقدار پیشنهادی انستیتو آسفالت است (نبا به جدول (۵)) برای ذرات عبوری از

شکل (۸) تغییرات پایداری مارشال بر حسب ضخامت غشایی را نشان می‌دهد. ضخامت غشایی ارتباط مستقیمی با مقدار قیر دارد؛ به همین سبب، تغییرات شکل (۸) مانند شکل (۳) است و ضخامت غشایی بهینه، متناسب با درصد قیر بهینه می‌باشد. شکل (۹) و (۱۰) به ترتیب بیانگر ارتباط بین حجم هوا (V_a) و حجم منفذهای (VMA)، در همه نمونه‌ها با ضخامت غشایی است. همان گونه که مشخص است با افزایش ضخامت غشایی، حجم هوای مخلوط کاهش می‌یابد؛ همچنان‌که این افزایش با افزایش حجم منفذهای مصالح سنگی همراه است. همچنین وابستگی خوبی بین حجم هوا و ضخامت غشایی در همه مخلوط‌ها وجود دارد.

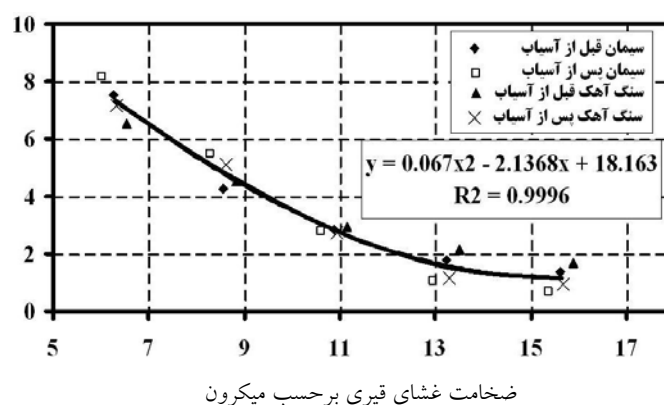
میکرون باشد. ضخامت غشای قیری در بیشتر مخلوط‌های آسفالتی بین ۵-۱۵ میکرون است. اگر ضخامت غشای قیری اندک باشد، احتمال ترد شدن، ترک‌خوردگی و جداشدگی دانه‌ها افزایش می‌یابد و اگر بیش از حد ضخیم باشد، پتانسیل تغییر شکل‌های ماندگار مخلوط افزایش می‌یابد؛ بنابراین NCAT ضخامت ۸ میکرونی را پیشنهاد داده است [28]. بررسی پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد، هم فکری میان پژوهشگران روی روش انستیتو آسفالت بیش از دیگر روش‌ها است؛ که همین دلیل، این روش مبنای مقایسه نتیجه‌ها قرار گرفت. شکل (۷) نشان می‌دهد بر اساس روش انستیتو آسفالت، ضخامت غشایی با افزایش قیر از ۶ به ۱۵ میکرون افزایش می‌یابد.



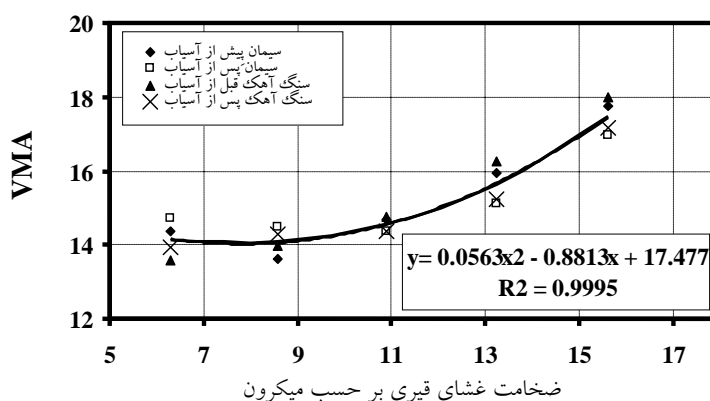
شکل ۷ تغییرات ضخامت غشایی بر حسب درصد قیر



شکل ۸ تغییرات پایداری مارشال بر حسب ضخامت غشایی



شکل ۹ ارتباط حجم هوای مخلوط و ضخامت غشایی



شکل ۱۰ ارتباط حجم منفذها سنگدانه و ضخامت غشایی

ذرات را به طور کامل پوشش دهد. در پرکننده سیمانی به دلیل کوچکتر بودن ابعاد ذرات سیمان، سطح جانبی بزرگتر و سطح تماس بیشتری با قیر فراهم است که حاصل آن فعل و انفعالات شیمیایی بیشتر با قیر است. اگر نسبت قیر به پرکننده کم باشد، مقاومت مارشال و وزن مخصوص کاهش یافته و حجم هوا افزایش می یابد؛ اما با افزایش میزان قیر تا حد معینی، وزن مخصوص و استحکام مارشال افزایش و در مقابل حجم منفذهای کاهش می یابد. این نتیجه بیانگر آن است که در تعیین قیر بهینه، باید به اندازه ذرات پرکننده نیز توجه شود. مقایسه روابط مختلف در تعیین ضخامت غشایی نشان می دهد، این مشخصه تابعی از میزان قیر و سطح جانبی ذرات

جمع بندی و نتیجه گیری

یکی از معیارهای مهم در طراحی مخلوط های آسفالتی، بررسی نسبت های حجمی مانند وزن مخصوص و حجم منفذها در مخلوط است و پرکننده نقش اساسی در تغییرات حجمی مخلوط دارد. نوع، میزان و ویژگی های فیزیکی، هندسی و شیمیایی پرکننده روی نسبت های حجمی و ضخامت غشای قیری اطراف سنگدانه ها اثر می گذارند. با کوچک شدن ابعاد، اندازه و دانه بندی ذرات پرکننده، سطح ویژه آنها افزایش یافته و سطح تماسی بزرگتری با قیر حاصل می شود که حاصل آن پراکنش همگن ذرات پرکننده در قیر و جذب سطحی بالاتر خواهد بود. همچنین مقدار قیر بیشتری نیاز است تا سطح

افزایش می‌یابد. تحلیل آماری نشان داد که ارتباط منطقی بین غشای قیری و مؤلفه‌های حجمی مخلوط وجود دارد. با افزایش غشای قیری حجم هوای مخلوط (V_a) کاهش و حجم منفذهای سنگدانه (VMA) افزایش پیدا می‌کند.

است. همیشه نظر کسانی در تعیین سطح جانبی وجود ندارد، ولی رابطه انستیتو آسفالت، بیشتر مورد قبول است و نتیجه‌های کوچکتری را برای سطح جانبی نشان می‌دهد. با افزایش میزان قیر، ضخامت غشای قیری

مراجع

1. Terhi, K. and Pellinen A., "The Effect of Volumetric Properties on Mechanical Behavior of Asphalt Mixtures", Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting, Washington, (2003).
2. Cooley L., Brown, E., Hanson, D., and Fletcher, M., "Characterization of Asphalt-Filler Mortars with Superpave Binder Tests", *J. Assn. of Asphalt Paving Technologists*, 67, pp. 42-65, (1998).
3. Christensen, D., and Bonaquist, R., "Advanced Asphalt Technologies", NCHRP Projects 9-25 and 9-31, Draft Final Report, (2004).
4. Kandhal, P., and Chakraborty, S., "Evaluation of Voids in the Mineral Aggregate for HMA Paving Mixtures", NCAT Report 96-4, National Center for Asphalt Technology, (1996).
5. Hinrichsen, J., and Heggen, J., "Minimum Voids in Mineral Aggregate in Hot-Mix Asphalt Based on Gradation and Volumetric Properties", Transportation Research Record, No. 1545, Washington, pp. 75-79, (1996).
6. Anderson, R.M., and Bahia H., "Evaluation and Selection of Aggregate Gradations for Asphalt Mixtures Using Superpave", Transportation Research Record, No. 1583, Washington, pp. 91-97, (1997).
7. Kandhal, P.S., and Chakraborty S., "Evaluation of Voids in the Mineral Aggregate for HMA Paving Mixtures", National Center for Asphalt Technology, Report 96-4, (1996).
8. Ninghui, W., Chuangmin, L., and Chao, Q. "Measurement Method of Critical Voids in the Mineral Aggregate of AC-20", *ASCE Proceedings of the Second International Conference on Transportation Engineering*, (2009).
9. Nukunya, B., Roque, R., Tia, M., and Birgisson, B., "Evaluation of VMA and Other Volumetric Properties as Criteria for the Design and Acceptance of Superpave Mixtures", *J. of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 79, pp. 38-69, (2002).
10. Coree B.J., and Hislop, W. P. "A Laboratory Investigation into the Effects of Aggregate-related Factors on Critical VMA in Asphalt Paving Mixtures", *J. of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 79, pp. 70-131, (2002).
11. Brown, E. R., and Cross, S. A., "A National Study of Rutting in Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements", *J. of the Association of the Asphalt Paving Technologist*, 61 pp. 535-582, (1992).
12. Radovskiy, B., "Analytical Formulas for Film Thickness in Compacted Asphalt Mixture", Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting, Washington, (2003).
13. Li, X., Williams C. R., Mihai, O., Marasteanu, R. and Johnson, E., "Investigation of In-Place Asphalt

- Film Thickness and Performance of Hot-Mix Asphalt Mixtures", *J. of Mat. in Civil Eng.*, 21(6), pp. 262-270, (2009).
14. Ramadan, K. Z. and Ashteyat, A. M., " Utilization of white cement bypass dust as filler in asphalt concrete mixtures", *Canadian J. of Civil Eng.*, 36(2), pp. 191-195, (2009).
 15. McLeod N. W., "Relationships between Density, Bitumen Content, and Voids Properties of Compacted Bituminous Paving Mixtures", *Proceedings of Highway Research Board*, 35, (1956).
 16. Smith, B. J. and Hesp, S., "Crack Pinning in Asphalt Mastic and Concrete: Regular Fatigue Studies", *Int. Transp. Res. Rec. 1728*, Washington, pp. 75-81, (2002).
 17. Kandhal, P.S. and Chakraborty, S., "Evaluation of Voids in the Mineral Aggregate for HMA Paving Mixtures", National Center for Asphalt Technology, Report 96-4, (1996).
 18. Brown, E. R., Michael, L., Dukatz, E., Scherocman, J., Huber, G., Sines, R., D'Angelo, J. and Williams, C., "Performance of Coarse-Graded Mixes at WesTrack-Premature Rutting", FHWA Final Report RD 99-134, (1998).
 19. Nukunya, B., Roque, R., Tia, M. and Birgisson, B., "Evaluation of VMA and Other Volumetric Properties as Criteria for the Design and Acceptance of Superpave Mixtures", *J. of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 79, pp. 38-69, (2002).
 20. Anani, B. A., and Swailmi, S. H., "Effects of Field Control of Filler Contents and Compaction on Asphalt Mix Properties", *Transportation Research*, 1217, pp. 29-37, (1986).
 21. Richardson, C., "*The Modern Asphalt Pavement*", John Wiley & Sons, Inc., New York, (1941).
 22. Lesueur, D. and Little, D. N., "Effect of Hydrated Lime on Rheology, Fracture, and Aging of Bitumen" *Int. Transp. Res. Rec. 1661*, Washington, pp. 93-105, (1998).
 23. Hopman, P., Vanelstraete, A., Verhasselt, A. and Walter, D., "Effects of Hydrated Lime on the Behaviour of Mastics and on Their Construction Ageing", *Proc. of the Durable and Safe Road Pavements, Int. Conf., Poland*, 1, pp. 59-67, (1999).
 24. Randy, C. W. and Robert, S. J., "Evaluation of Lime Kiln Dust as a Mineral Filler in Stone Matrix Asphalt", *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, (2006).
 25. The Asphalt Institute, "*Mix design methods for asphalt concrete and other hot mix types*", 6th edition, (1993).
 26. Chapuis, R.P. and Legare, P., "A Simple Method for Determination the Surface Area of Fine Aggregates and Fillers in Bituminous Mixtures", ASTM STP 1147, Philadelphia, (1992).
 27. Duriez, M. and Arrambide, J., "*Nouveau Traite de Materiaux de Construction*", Paris, (1962).
 28. Kandhal, P.S., Foo, K.Y. and Mallick, R.B., "A Critical Review of VMA Requirements in SuperPave", NCAT Report, 98-1, Auburn University, (1998).