

## تأثیر دانه‌بندی مصالح بر خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی

ابراهیم سنگ‌سفیدی<sup>۱</sup>، مریم سنگ‌سفیدی<sup>۲</sup> و حسن زیاری<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

با توجه به این که دانه‌بندی بخش اعظمی از حجم و جرم یک مخلوط را به خود اختصاص می‌دهد، بدیهی است که جزء مهمی از مخلوط آسفالتی بوده و نقش مهمی در انتخاب مخلوط بهینه داشته باشد. در این مطالعه سه دانه‌بندی در محدوده مشخصات دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه روسازی ایران جهت ساخت مخلوط آسفالتی و همچنین آزمایش‌های مارشال، حساسیت رطوبتی و خزش دینامیکی برای مقایسه خصوصیات عملکردی مخلوط‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. شیارشدگی با استفاده از پارامتر عدد روانی اندازه‌گیری شده و به منظور ارزیابی مکانیزم حساسیت رطوبتی ترکیبی از آزمایش‌های بصری و مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت مشخص شده است که دانه‌بندی حد پایین آیین‌نامه در مقایسه با سایر دانه‌بندی‌های مورد بررسی در این تحقیق، بهترین نتایج عملکردی را دارد. همچنین در این مطالعه روشی برای کمی‌سازی نتایج آب جوشان (در استاندارد ASTM) با استفاده از پردازش تصویر در نرم‌افزار MATLAB ارائه شده است.

**واژگان کلیدی:** دانه‌بندی، طرح مخلوط، مخلوط بهینه، تغییر شکل دائمی، حساسیت رطوبتی.

### ۱- مقدمه

مقاومت لغزشی و مقاومت در برابر آسیب رطوبتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱]. لذا با توجه به این که سهم زیادی از یک مخلوط آسفالتی را سنگ‌دانه‌های آن تشکیل می‌دهد، دانه‌بندی مصالح سنگی تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مخلوط آسفالتی خواهد گذاشت، به طوری که تأثیرات دانه‌بندی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم همواره موضوعی در حال تحقیق و بررسی بوده است [۲].

معمولاً حدود دانه‌بندی‌های مناسب توسط آیین‌نامه‌های فنی، به صورت محدوده مشخصات تعیین می‌شوند. محدوده مشخصات معرفی شده، اغلب به صورت دو منحنی حدی هستند که منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی باید بین این دو منحنی و تا حد امکان در وسط و به موازات آن‌ها قرار بگیرد [۲]. البته باید توجه داشت که دانه‌بندی‌های پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه‌های فنی فقط جنبه راهنما داشته و اگر در منطقه‌ای استفاده از دانه‌بندی‌هایی به غیر از آن چه که این آیین‌نامه‌ها مشخص کرده‌اند نتیجه خوبی داده باشد، می‌توان از این‌گونه دانه‌بندی‌ها استفاده کرد [۳].

در حال حاضر در کشور از محدوده‌های دانه‌بندی ارائه شده توسط نشریه شماره ۲۳۴ [۴] و بالاخص دانه‌بندی شماره ۴ این نشریه (دانه‌بندی مناسب برای لایه توپکا و بیندر)، بیشتر از سایر

ارائه یک طرح اقتصادی برای سازه و اسکلت روسازی همانند سایر سازه‌های مهندسی دیگر بسیار با اهمیت است و یک روسازی با طراحی اولیه نامناسب، هزینه‌های تعمیر زیادی را بر پروژه تحمیل خواهد کرد [۱]. از این رو طراحی اولیه ساختمان روسازی، با توجه به این که ساخت و نگهداری روسازی را در آینده به صورت مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از مهم‌ترین پارامترها که برای ارائه طرح اختلاط مناسب روسازی در گام اول باید در نظر گرفته شود، تعیین اسکلت دانه‌بندی مناسب برای مخلوط است. به گونه‌ای که خصوصیات مصالح در دسترس و همچنین شرایط محیطی و ترافیکی که انتظار می‌رود روسازی در آینده با آن مواجه شود، در این انتخاب در نظر گرفته شده باشد.

طرح مخلوط آسفالتی مانند سایر مخلوط‌ها شامل انتخاب اجزای سازنده آن برای دست‌یابی به خواص عملکردی مناسب برای روسازی می‌باشد. همان‌طور که در بند قبل نیز ارائه شده است، می‌توان گفت دانه‌بندی مهم‌ترین ویژگی یک مخلوط آسفالتی است که تقریباً تمام خصوصیات مهم آن، شامل پایداری، ماندگاری، نفوذپذیری، کارآیی، مقاومت خستگی،

قابل انجام است. چهارچوب این روش بسیار ساده است: "دو ویژگی یا شرایط مختلف با هم مقایسه و ارزیابی می‌شوند" [۵]. در این تحقیق دانه‌بندی حد وسط به‌عنوان نمونه کنترل استفاده شده است و خصوصیات عملکردی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های ساخته شده با دانه‌بندی‌های مختلف نسبت به این دانه‌بندی مقایسه می‌شوند.

قابل ذکر است که دانه‌بندی‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل یک دانه‌بندی نزدیک حد پایین آیین‌نامه، معرف دانه‌بندی درشت (B)، یک دانه‌بندی نزدیک حد بالای آیین‌نامه، معرف دانه‌بندی ریز (U) و همچنین یک دانه‌بندی معرف حد وسط (M) در محدوده دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه می‌باشد. در این مقاله ابتدا خصوصیات فیزیکی هریک از این دانه‌بندی‌ها مورد بررسی قرار گرفته و سپس برای تعیین دقیق رفتار مخلوط‌های ساخته شده با هریک از دانه‌بندی‌های مورد بررسی، علاوه بر انجام آزمایش‌های عملکردی بر روی مخلوط، سطوح شکست مخلوط‌ها در آزمایش کشش غیر مستقیم مورد بررسی قرار گرفت و همچنین برای تعیین دقیق‌تر مکانیزم حساسیت رطوبتی هریک از دانه‌بندی‌ها از آزمایش آب جوشان و تحلیل عکس‌های دیجیتالی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

## ۲-۱- خصوصیات مصالح مورد استفاده

مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه‌های آسفالتی شامل سنگدانه‌های آهکی درشت‌دانه (شن) و ریزدانه (ماسه)، فیلر (مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰) و قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می‌باشند که شرح و نحوه تهیه آن‌ها در ادامه ارائه خواهد شد.

### ۲-۱-۱- سنگدانه‌های آهکی درشت‌دانه (شن) و ریزدانه (ماسه)

انواع سنگدانه‌های به کار رفته در ساخت نمونه‌های آسفالتی از معدن شن و ماسه اسب‌چران (کارخانه آسفالت کندوان پارس)، واقع در شهرستان رودهن، که از نوع مصالح کوهی است، تهیه شده است. سنگدانه‌های موجود در این معدن به صورت ۶-۰، ۱۲-۶، ۱۸-۱۲ و  $>18$  طبقه‌بندی شده‌اند که اعداد ذکر شده معرف اندازه سنگدانه‌ها به میلی‌متر است. جهت رسیدن به دانه‌بندی مورد استفاده در آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران و نیز سایر دانه‌بندی‌های استفاده شده در این پروژه، سنگدانه‌ها مجدداً الک شده و در اندازه‌های مورد نیاز جمع‌آوری شده‌اند. در قسمت‌های

محدوده‌های تعیین شده برای کارهای تحقیقاتی استفاده می‌شود. بنابر پیشنهاد این نشریه از دانه‌بندی که در داخل محدوده مشخصات قرار گرفته باشد و از الک شماره ۸ به پایین به موازات دو حد فوقانی و تحتانی دانه‌بندی انتخابی باشد، برای تهیه دانه‌بندی کارگاهی استفاده می‌شود. ولی اغلب محققین تمایل به استفاده از دانه‌بندی حد وسط محدوده مشخصات (جهت ساخت مخلوط کنترل) برای انجام تحقیقات خود دارند و حتی برای انجام مقایسه بین دانه‌بندی‌های خارج از محدوده آیین‌نامه با دانه‌بندی‌های پیشنهادی، از دانه‌بندی حد وسط به عنوان نماینده محدوده مشخصات استفاده کرده و نتیجه‌گیری می‌کنند [۵].

فرض این مطالعه بر این است که دانه‌بندی بهینه در یک محدوده مشخصات لزوماً دانه‌بندی حد وسط آن نمی‌باشد و برای این منظور دانه‌بندی‌های مختلفی در محدوده دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه (به عنوان پرکاربردترین دانه‌بندی مورد استفاده در کارهای تحقیقاتی و اجرایی)، با استفاده از مصالح یکی از معادن قرضه فعال منطقه تعیین شده و آزمایش‌های مارشال، حساسیت رطوبتی و تغییر شکل دائمی بر روی آن‌ها انجام شده است و با توجه پاسخ‌های عملکردی حاصل از هر یک از آزمایش‌ها، تأثیر دانه‌بندی بر روی نتایج تفسیر شده و در نهایت دانه‌بندی بهینه با توجه به تحلیل صورت گرفته بر روی نتایج تعیین می‌شود.

تحقیقات مشابهی در این راستا انجام شده است، به عنوان مثال [۶]، تأثیر دانه‌بندی مصالح آیداهو، بر طرح مخلوط آسفالتی را مورد بررسی قرار داده است. برای این منظور چهار معدن مصالح انتخاب و برای هر معدن، سه دانه‌بندی در محدوده مشخصات مورد نظر تهیه و با استفاده از روش ویم مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دادند که دانه‌بندی مربوط به هر معدن تأثیر خاص خود را بر نتایج طرح اختلاط می‌گذارد. در این تحقیق فقط از نتایج حاصل از طرح اختلاط برای نتیجه‌گیری استفاده شده و آزمایش عملکردی قابل توجهی بر روی نمونه‌ها انجام نشده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، روش آزمایشگاهی برای انجام تحقیق استفاده شده است. یکی از مشخصه‌های اساسی این روش تحقیق، استفاده از یک نمونه کنترل (شاهد) می‌باشد. به عبارتی دیگر انتخاب گروه کنترل، یکی از پایه‌های این روش تحقیق را تشکیل می‌دهد. تحقیق آزمایشگاهی اصولاً روشی است که در آزمایشگاه

مربوط به دانه بندی براساس نشریه ۲۳۴، از محدوده مشخصات دانه بندی مورد نظر خارج نشوند. در جدول (۲) دانه بندی های مورد بررسی برای این مطالعه و همچنین محدوده دانه بندی شماره ۴ آورده شده است.

بعد دانه بندی های مذکور و الک های استفاده شده برای ساخت دانه بندی های مختلف ارائه خواهد شد. به منظور اطمینان از مرغوبیت مصالح سنگی به کار رفته، آزمایش وزن مخصوص و درصد جذب آب بر روی مصالح انجام شد که نتیجه آن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۲- دانه بندی های مورد بررسی

شماره الک	اندازه الک (mm)	درصد عبوری				
		تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳ (M)	تیپ ۴ (U)	تیپ ۵ (D)
in ۱	۲۵	-	-	-	-	-
in ۳/۴	۱۹	-	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
in ۱/۲	۱۲/۵	۱۰۰	۹۰	۹۲	۹۲	۹۲
in ۳/۸	۹/۵	-	-	۸۲	۸۵	۸۲
۴ #	۴/۷۵	۷۴	۴۴	۵۸	۶۶	۵۱
۸ #	۲/۳۶	۵۸	۲۸	۴۱	۵۰	۳۲
۱۶ #	۱/۱۸	-	-	۳۱	۳۸	۲۴
۳۰ #	۰/۶	-	-	۲۲	۲۷	۱۷
۵۰ #	۰/۳	۲۱	۵	۱۳	۱۸	۱۰
۱۰۰ #	۰/۱۵	-	-	۸	۱۲	۷
۲۰۰ #	۰/۰۷۵	۱۰	۲	۵	۸	۵

توضیحات:

تیپ (۱) حد بالای دانه بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران.

تیپ (۲) حد پایین دانه بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران.

تیپ (۳) حد وسط دانه بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران، که به صورت اختصاری با (M) نمایش داده می شود.

تیپ (۴) دانه بندی حد بالای طراحی شده، که به صورت اختصاری با (U) نمایش داده می شود.

تیپ (۵) دانه بندی حد پایین طراحی شده، که به صورت اختصاری با (D) نمایش داده می شود.

### ۲-۱-۲- فیلر (مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰)

در این تحقیق از پودر سنگ به عنوان فیلر استفاده شده است که وزن مخصوص آن ۲/۷۰۲ می باشد.

### ۲-۱-۳- قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰

قیر مصرفی که قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می باشد، از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده است. این قیر برای مصرف در اکثر نقاط کشور مناسب است [۴] و مشخصات آن بر اساس آزمایش های انجام شده مطابق جدول (۱) می باشد.

جدول ۱- نتایج آزمایشات بر روی قیر ۶۰-۷۰

مشخصات قیر	نتیجه آزمایش	استاندارد مورد استفاده
درجه نفوذ (دهم میلی متر)	۶۲	ASTM-D5
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	۴۹	ASTM-D36
چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۰۱۱	ASTM-D70

### ۲-۲- دانه بندی های انتخاب شده

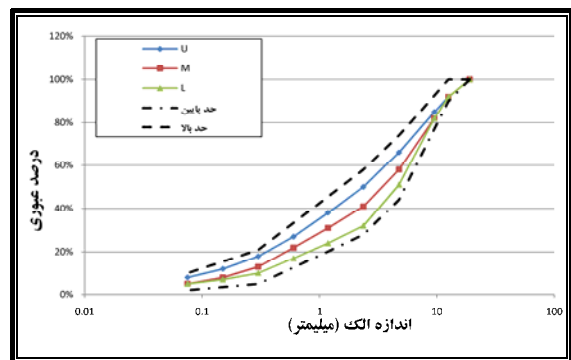
همان طور که ذکر شد، بنا به پیشنهاد آیین نامه طرح روسازی راه های ایران، محدوده دانه بندی شماره ۴ این آیین نامه هم برای لایه آستر (ببندر) و هم برای لایه رویه (توپکا) مناسب است، لذا، برای انجام بررسی های بیشتر در این مطالعه، این محدوده دانه بندی مورد استفاده قرار گرفته است. سه دانه بندی انتخاب شده در این محدوده شامل یک دانه بندی معرف حد وسط (M)، یک دانه بندی معرف حد بالا (U) و یک دانه بندی معرف حد پایین (B) برای این محدوده دانه بندی می باشد. این دانه بندی ها به گونه ای انتخاب شده اند که با اعمال رواداری های

جدول ۳- نتایج آزمایشات وزن مخصوص و جذب آب بر روی مصالح سنگی

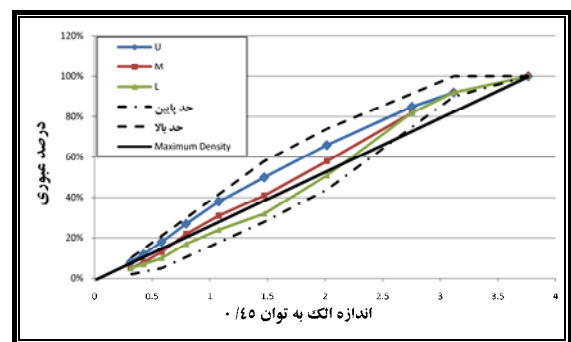
اندازه مصالح	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص حقیقی (gr/cm <sup>3</sup> )	درصد جذب آب	استاندارد
مانده روی الک شماره ۸	۲/۷۰۹	۲/۶۵۴	۰/۸	AASHTO-T85
رد شده از الک شماره ۸	۲/۷۱۹	۲/۶۱۷	۱/۴	AASHTO-T84

### ۲-۲-۱- نمایش دانه بندی

در شکل های (۱) و (۲) نمودار دانه بندی های معرفی شده در جدول (۲)، قابل مشاهده است. در شکل (۱) روش متداول نمایش دانه بندی (محور افقی نماینده اندازه الک بر حسب میلی متر در مقیاس لگاریتمی و محور قائم درصد عبوری از هر الک) و در شکل (۲) از روش نمایش دانه بندی به روش FHWA (محور افقی برای نمایش مقیاس ریاضی اندازه الک (بر حسب میلی متر) به توان ۰/۴۵ و محور عمودی جهت نمایش درصد عبوری) استفاده شده است. دانه بندی چگالی حداکثر به صورت یک خط مستقیم از نقطه مبدأ (۰) به حداکثر اندازه الک، برای عبور ۱۰۰٪ بر روی نمودار دانه بندی با توان ۰/۴۵، ترسیم می شود (در شکل (۲) با استفاده از خط سیاه و ضخیم تر نمایش داده شده است) [۷].



شکل ۱- نمایش دانه بندی به روش مرسوم



شکل ۲- روش FHWA برای نمایش دانه بندی

سنگی بر روی خط حداکثر چگالی یا نزدیک آن واقع شده باشد، نسبت فضای خالی در مصالح سنگی عمدتاً ناکافی بوده و فضای کمی برای قیر وجود خواهد داشت. چنین مخلوط هایی در عمل طول عمر کمی از خود نشان می دهند. به علاوه این مخلوط ها نسبت به تغییر میزان قیر آسیب پذیر بوده و مشکلاتی را در خصوصیات مخلوط به وجود می آورد [۷].

### ۲-۳- ارائه طرح اختلاط

روش مارشال، جزء روش های طرح اختلاط تجربی می باشد. روش های تجربی مبتنی بر انتخاب درصد قیر براساس چندین متغیر و با در نظر گرفتن محدوده های قراردادی است که حاصل تجربیات می باشد [۲]. معیار انتخاب درصد قیر بهینه (OBC) در بین مؤسسات مختلف متفاوت است. انتخاب مقدار قیر بهینه در روش انجمن ملی روسازی آسفالتی (NAPA) که در این مطالعه نیز از این روش استفاده شده است، براساس درصد قیر متناظر با درصد فضای خالی حد وسط حدود عنوان شده توسط آیین نامه (معمولاً ۴ درصد) می باشد و بقیه معیارها بر این اساس کنترل می گردند [۲].

جهت تعیین درصد قیر بهینه برای هر یک از دانه بندی ها، نمونه هایی با درصدهای مختلف قیر (سه نمونه برای هر درصد قیر) تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. بر اساس نتایج طرح اختلاط مقدار قیر بهینه برای دانه بندی های مختلف در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴- مقدار قیر بهینه برای دانه بندی های مختلف دانه بندی

مورد نظر

D	M	U	دانه بندی مورد نظر
۵/۱٪	۵/۳٪	۵/۸٪	مقدار قیر بهینه

### ۲-۴- تعیین ضخامت غشای قیری

ضخامت غشای قیری<sup>۱</sup> روی سطح مصالح یکی از پارامترهایی است که برخی از خصوصیات مخلوط آسفالتی به آن وابسته می باشند. ضخامت غشای قیری در مخلوط، به عنوان یکی از عناصر کلیدی در ماندگاری و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی مد نظر است. ضخامت نازک قیر بر روی سطح ذرات مصالح یکی از دلایل اصلی برای پیرشدگی زودرس قیر است و همچنین یکی از دلایل کاهش ماندگاری در مخلوط، بدون توجه به مقدار VMA می باشد [۱].

خط حداکثر چگالی نمایانگر حالتی از دانه بندی برای مخلوط آسفالتی است که در آن ذرات مصالح سنگی به یکدیگر نزدیک بوده و به عبارت دیگر از کمترین مقدار منافذ در مصالح سنگی (VMA) برخوردار می باشد. در مواردی که دانه بندی مصالح

## ۲-۴-۱- مساحت سطح مصالح

مساحت سطح<sup>۱</sup> مصالح یکی از خصوصیات دانه‌بندی بوده و با توجه به این که بر مقدار قیر مورد نیاز برای پوشاندن مصالح تأثیر می‌گذارد، دارای اهمیت بالایی است. افزایش سطح مصالح و یا کاهش مقدار قیر بهینه، ضخامت غشای قیر روی سطح مصالح را کاهش می‌دهد و مخلوطی با ماندگاری ناکافی تولید خواهد کرد [۱].

برای محاسبه مساحت سطح مصالح از دانه‌بندی مصالح استفاده می‌شود. این محاسبات نتیجه حاصل ضرب درصد عبوری مصالح از هر الک در "فاکتور مساحت سطح"<sup>۲</sup> (مطابق با جدول (۵) (برگرفته از MS-2)) محاسبه می‌شوند. با استفاده از مساحت سطح مصالح می‌توان ضخامت غشای قیری بر روی سطح مصالح را در مقدار قیر بهینه و یا هر مقدار قیر دیگری محاسبه کرد.

## جدول ۵- فاکتور مساحت سطح

اندازه الک (میلی‌متر)	فاکتور مساحت سطح
۱۹	۰/۴۱
۱۲/۵	۰/۴۱
۹/۵	۰/۴۱
۴/۷۵	۰/۴۱
۲/۳۶	۰/۸۲
۱/۱۸	۱/۶۴
۰/۶۰	۲/۸۷
۰/۳۰	۶/۱۴
۰/۱۵	۱۲/۲۹
۰/۰۷۵	۳۲/۷۷

مقدار مساحت سطح هر یک از دانه‌بندی‌های معرفی شده در این مطالعه در جدول (۶) آورده شده است.

## ۲-۴-۲- ضخامت غشای قیری

بر اساس مقدار مساحت سطح محاسبه شده و با استفاده از روش ارائه شده در [۸] و [۹]، ضخامت غشای قیری بر اساس رابطه (۱) برای هر دانه‌بندی مطابق جدول (۶) خواهد بود.

$$F_{be} = \frac{981 \times P_{be}}{SST \times (100 - P_b)} \quad (1)$$

که در آن:

$SST$ : مساحت سطح ( $m^2/kg$ )

$P_b$ : در صد قیر

$P_{be}$ : مقدار قیر مؤثر می‌باشد.

## جدول ۶- مقدار قیر مساحت سطح و ضخامت غشای قیری برای

## دانه‌بندی‌های مختلف

D	M	U	دانه‌بندی مورد نظر
۴/۸۸	۵/۵۴	۷/۶۹	مساحت سطح مصالح ( $m^2/kg$ )
۸/۹۹	۸/۷۳	۶/۸۸	ضخامت غشای قیری (میکرون)

## ۲-۵- ساخت نمونه‌ها

در این مطالعه نمونه‌های مارشال مطابق استاندارد ASTM D1559 ساخته شده و برای تراکم نمونه‌ها با استفاده از چکش مارشال اتوماتیک، ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه‌ها وارد شده است. مصالح دانه‌بندی شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۷۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد در اون قرار گرفته تا آب موجود در میان دانه‌های مصالح سنگی تبخیر شود [۱۰] و همچنین قیر مورد نیاز برای تهیه نمونه‌ها تا دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد قبل از عملیات اختلاط برای تهیه نمونه گرم شده است.

پس از ارائه طرح اختلاط و تعیین مقدار قیر بهینه، برای انجام آزمایش‌های مورد نیاز، اقدام به ساخت نمونه‌ها شد. نمونه‌های ساخته شده به شرح جدول (۷) می‌باشد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای انجام آزمایش‌های مارشال و خزش دینامیکی نیاز به فضای خالی ۴٪ می‌باشد. ولی آزمایش حساسیت رطوبتی نیاز به ساخت نمونه‌هایی با درصد فضای خالی برابر ۱/۷±۷ دارد [۱۱]. لذا برای دستیابی به این مقدار فضای خالی بین تعداد ضربات چکش مارشال در مخلوط‌هایی که در مقدار قیر بهینه آماده شده بودند، صحیح و خطا انجام شد [۱۲] و در نهایت برای دانه‌بندی‌های M، U و B تعداد ضربات متناظر برای دستیابی به مقدار فضای خالی مزبور به ترتیب ۶۲، ۵۵ و ۵۲ ضربه محاسبه شد.

## ۳- انجام آزمایش‌ها

همان‌طور که ذکر شد، برای ارزیابی و مقایسه مخلوط‌های ساخته شده با دانه‌بندی‌های متفاوت، اقدام به انجام آزمایش‌های مارشال، حساسیت رطوبتی و خزش دینامیکی شده است. در ادامه روند انجام هر یک از آزمایش‌ها و نتایج آن‌ها ارائه خواهد شد.

1- Surface area

2- Surface area factor

جدول ۷- خصوصیات نمونه‌های مورد نیاز برای هر آزمایش

آزمایش	آزمایش مارشال	آزمایش خزش دینامیکی	آزمایش حساسیت رطوبتی
استاندارد	ASTM D1559	Australian: AS 2891.12.1	AASHTO T -283
تعداد نمونه مورد نیاز	۹ (۳ نمونه برای هر دانه‌بندی)	۹ (۳ نمونه برای هر دانه‌بندی)	۱۸ (۶ نمونه برای هر دانه‌بندی)
درصد فضای خالی مورد نیاز	٪۴	٪۴	۷±٪۱

## ۳-۱- آزمایش مارشال

آزمایش مارشال در مهندسی راه هم برای طرح مخلوط و هم برای ارزیابی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد و با وجود این که روش مارشال اساساً یک روش تجربی است، ولی برای مقایسه مخلوط‌ها در شرایط خاص قابل استفاده است [۱۳]. در این مقاله از آزمایش مارشال برای تعیین پایداری، روانی و خارج قسمت مارشال مخلوط‌ها استفاده شده است. استقامت مارشال به طور چشمگیری با زاویه اصطکاک داخلی مصالح و ویسکوزیته قیر در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۱۴]. به طور کلی می‌توان گفت که مقدار استقامت مارشال نشان دهنده توانایی مخلوط آسفالتی برای مقاومت در برابر شیارشدگی و برآمدگی تحت بارگذاری‌های سنگین ترافیکی می‌باشد [۱۵]. روانی مقدار تغییر شکل عمودی نمونه در هنگام اعمال مقدار بار ماکزیمم می‌باشد. روانی بالا نشان‌دهنده یک مخلوط پلاستیک است که تحت بارگذاری ترافیکی تغییر شکل بالایی را تجربه خواهد کرد. در حالی که مقادیر پایین روانی نشان‌دهنده یک مخلوط با مقدار فضای خالی بیشتر از مقدار نرمال و مقدار قیر ناکافی می‌باشد [۱۴]. مقدار خارج قسمت مارشال از حاصل تقسیم استقامت مارشال به روانی بدست می‌آید. این پارامتر گاهی اوقات برای تعیین خصوصیات مخلوط استفاده می‌شود و مقدار بالای آن نشان‌دهنده مخلوط سفت‌تر<sup>۱</sup> است. به عبارت دیگر یک مخلوط با مقدار خارج قسمت مارشال بالا در مقابل تغییر شکل‌های دائمی مقاومت بیشتری دارد [۱۴]. پارامتر خارج قسمت مارشال با توجه به این که هر دو مشخصه روانی و پایداری مارشال را در بر می‌گیرد (رابطه (۲)) [۱۳]، در حال حاضر معیاری برای تعیین مقاومت مواد در برابر تغییر شکل دائمی، تنش‌های برشی و شیارشدگی در شرایط خدمت دهی مسیر می‌باشد [۱۶].

$$MQ = \frac{M_S}{M_F} \quad (1)$$

که در آن :

$M_Q$ : خارج قسمت مارشال،

$M_S$ : استقامت مارشال و

$M_F$ : روانی مارشال می‌باشد.

شایان ذکر است که این پارامتر تنها در یک دما آزمایش می‌شود و نشان‌دهنده تنها یک نقطه از منحنی تغییرات سختی است.

## ۳-۲- آزمایش خزش دینامیکی

در این مطالعه آزمایش خزش دینامیکی با استفاده از دستگاه UTM-5 به منظور اعمال تنش محوری تکراری به نمونه مخلوط آسفالتی و اندازه‌گیری تغییر شکل قائم با استفاده از سنسورهای جابجایی متغیر خطی (LVDT)، انجام شده است. داده‌های ورودی شامل ابعاد نمونه (قطر و ارتفاع)، تنش پیش‌بارگذاری، فرکانس اعمال تنش و مقدار تنش تماسی با استفاده از نرم‌افزار دستگاه کنترل می‌شود. همچنین قابل ذکر است که نرم‌افزار دستگاه در بردارنده چندین استاندارد بین‌المللی می‌باشد که در این کار تحقیقاتی یک پالس مربعی با فرکانس ۰/۵ هرتز (۵۰۰ میلی ثانیه برای بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی ثانیه برای استراحت) بر اساس استاندارد استرالیا (AS 2891.12.1) انتخاب شده است. یکی از مهم‌ترین اهداف آزمایش خزش دینامیکی، مطالعه عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیار افتادگی می‌باشد و مهم‌ترین پارامتر به دست آمده از این آزمایش، کرنش تجمعی است که به نوعی به مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی بستگی دارد، لذا، در این مطالعه، از این آزمایش برای مقایسه بین انواع مختلف نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است [۱۷].

آزمایش خزش دینامیکی خروجی‌های متعددی دارد که می‌تواند برای تخمین پتانسیل تغییر شکل دائمی در مخلوط مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله از خروجی عدد روانی، که از نمودار خزش (نمودار کرنش پلاستیک تجمعی در برابر تعداد سیکل بارگذاری) به دست می‌آید، به عنوان یک پارامتر برای مقایسه مخلوط‌های مختلف استفاده شده است. نقطه یا سیکلی که تغییر شکل‌های برشی پلاستیک خالص در نمونه اتفاق می‌افتد، عدد روانی نامیده می‌شود. در این سیکل نمونه به طور چشمگیری شروع به تغییر شکل کرده و مصالحی که اسکلت مخلوط را می‌سازند شروع به حرکت در کنار یکدیگر می‌کنند.

$$TSR(\%) = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100 \quad (3)$$

که در آن  $ITS_{wet}$  میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت عمل‌آوری شده و  $ITS_{dry}$  میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت خشک می‌باشد.

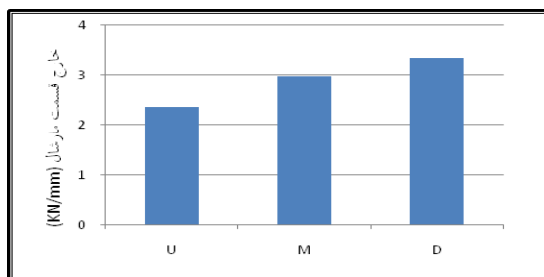
#### ۴- ارائه و تحلیل نتایج

##### ۴-۱- نتایج آزمایش مارشال

مقادیر استقامت و روانی مارشال که با استفاده از آزمایش مارشال به دست می‌آید، در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دانه‌بندی حد وسط ( $M$ ) و حد پایین ( $D$ ) دارای بیشترین مقاومت مارشال می‌باشند، که می‌توان دلیل آن را قفل و بست بیشتر مصالح در این دو دانه‌بندی نسبت به دانه‌بندی حد بالا عنوان کرد. بیشترین مقدار روانی هم برای نمونه‌های با دانه‌بندی حد بالا تعیین شده است که دلیل آن ریزدانه بیشتر در اسکلت این دانه‌بندی و همچنین ضخامت کمتر غشای قیری اطراف سنگدانه‌ها می‌باشد. همان‌طور که باتوجه به شکل (۴) ملاحظه می‌شود، مقدار خارج قسمت مارشال برای دانه‌بندی حد پایین بیشتر از سایر دانه‌بندی‌های می‌باشد.



شکل ۳- مقادیر استقامت و روانی مارشال برای مخلوط‌های با دانه‌بندی‌های مختلف



شکل ۴- مقدار خارج قسمت مارشال برای مخلوط‌های با دانه‌بندی‌های مختلف

بایستی ذکر شود که عدد روانی به عنوان شاخص شیارشدگی برای مخلوط آسفالتی شناخته می‌شود [۱۸]. در طول ۴۰ سال گذشته مدل‌های ریاضی مختلفی، که معروف‌ترین آن‌ها مدل نیمه لگاریتمی بارکسدیل در سال ۱۹۷۲ و مدل تی‌سنگ و لیتون در سال ۱۹۸۹ می‌باشد، برای برازش منحنی خزش و تخمین عدد روانی در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله از روش مرحله‌ای که در سال ۲۰۰۹ ارائه شده [۱۸]، برای تعیین مقدار عدد روانی استفاده شده است.

##### ۳-۳- آزمایش حساسیت رطوبتی

آزمایش کشش غیر مستقیم در اصل یک آزمایش قطری است که در آن نمونه استوانه‌ای تحت اثر نیروی فشاری وارد بر سطح جانبی آن قرار می‌گیرد. این نحوه بارگذاری سبب به وجود آمدن تنش‌های کششی در امتداد قطر بارگذاری شده می‌گردد و در نتیجه نمونه در امتداد قطر بارگذاری شده می‌شکند [۳].

طبق AASHTO T283 حساسیت رطوبتی با استفاده از مقایسه مقاومت کششی غیر مستقیم ( $ITS$ ) سه نمونه اشباع شده، که در آب با دمای  $60 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده‌اند به  $ITS$  سه نمونه با طرح اختلاط و ابعاد مشابه در شرایط عمل‌آوری شده خشک، در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، قابل محاسبه است. نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش  $ITS$  با استفاده از چکش مارشال تا درصد فضای خالی ۶-۸ درصد کوبیده شده‌اند (این مقدار، فضای خالی است که در عمل پس از ساخت روسازی در مخلوط آسفالتی وجود خواهد داشت [۱۹]). در این مطالعه بارگذاری بر روی هر نمونه پس از تعیین مقدار ماکزیمم مقاومت کششی تا مرز ایجاد ترک قائم بر روی نمونه ادامه می‌یابد [۱۱]. مقدار مقاومت کششی با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$ITS = \frac{2P}{\pi.t.D} \quad (2)$$

که در آن:

$ITS$ : مقاومت کششی بر حسب کیلو پاسکال،

$P$ : بیشترین مقدار بار بر حسب کیلو نیوتن،

$t$ : ضخامت نمونه بر حسب متر و

$D$ : قطر نمونه بر حسب متر می‌باشد.

نسبت مقاومت کششی با استفاده از رابطه (۴) ارائه می‌شود.

۴-۱-۱- نتایج تحلیل واریانس

همان طور که ملاحظه می شود تأثیر دانه بندی بر نتایج

استحکام و خارج قسمت مارشال در سطح اطمینان ۰/۰۵٪ معنی دار (Significant) می باشد، در حالی که تأثیر آن بر روانی چشمگیر نمی باشد.

در جداول (۸) تا (۱۰) نتایج تحلیل واریانس صورت گرفته با استفاده از نرم افزار SPSS بر روی نتایج استقامت، روانی و خارج قسمت مارشال ارائه خواهد شد.

جدول ۸- نتایج تحلیل واریانس استحکام مارشال برای دانه بندی های مختلف

متغیر وابسته: استقامت مارشال					
Sig.	F	میانگین مربعات	درجات آزادی	نوع ۳ مجموع مربعات	منبع
۰/۰۰۲	۲۱/۷۰۶	۲/۴۳۰	۲	۴/۸۶۱	مدل اصلاح شده
۰/۰۰۰	۶۳۲۴	۷۰۸/۰۹۲	۱	۷۰۸/۰۹۲	اینترسپت
۰/۰۰۲	۲۱/۷۰۶	۲/۴۳۰	۲	۴/۸۶۱	دانه بندی
		۰/۱۱۲	۶	۰/۶۷۲	خطا
			۹	۷۱۳/۶۲۵	مجموع
			۸	۵/۵۳۳	مدل اصلاح شده

جدول ۹- نتایج تحلیل واریانس روانی مارشال برای دانه بندی های مختلف

متغیر وابسته: روانی مارشال					
Sig.	F	میانگین مربعات	درجات آزادی	نوع ۳ مجموع مربعات	منبع
۰/۰۹۴	۳/۵۹۲	۰/۲۶۰	۲	۰/۵۱۹	مدل اصلاح شده
۰/۰۰۰	۱۱۸۷	۸۵/۸۰۹	۱	۸۵/۸۰۹	اینترسپت
۰/۰۹۴	۳/۵۹۲	۰/۲۶۰	۲	۰/۵۱۹	دانه بندی
		۰/۰۷۲	۶	۰/۴۳۴	خطا
			۹	۸۶/۷۶۲	مجموع
			۸	۰/۹۵۳	مدل اصلاح شده

جدول ۱۰- نتایج تحلیل واریانس خارج قسمت مارشال برای دانه بندی های مختلف

متغیر وابسته: خارج قسمت مارشال					
Sig.	F	میانگین مربعات	درجات آزادی	نوع ۳ مجموع مربعات	منبع
۰/۰۳۲	۶/۴۹۱	۰/۷۸۷	۲	۱/۵۷۵	مدل اصلاح شده
۰/۰۰۰	۶۳۳	۷۹/۷۷۹	۱	۷۹/۷۷۹	اینترسپت
۰/۰۳۲	۶/۴۹۱	۰/۷۸۷	۲	۱/۵۷۵	دانه بندی
		۰/۱۲۱	۶	۰/۷۲۸	خطا
			۹	۷۹/۰۸۲	مجموع
			۸	۲/۳۰۲	مدل اصلاح شده

۴-۲- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

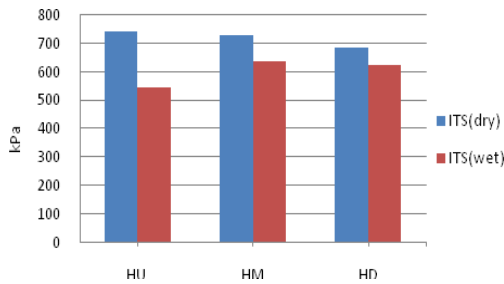
و بست بیشتر مصالح درشت از یک طرف و ضخامت غشای قیر بیشتر آن عنوان کرد.

مقدار عدد روانی محاسبه شده برای هریک از دانه بندی ها در جدول (۱۱) آورده شده است. همان طور که با توجه به نتایج خارج قسمت مارشال پیش بینی می شد، مقاومت دانه بندی حد پایین نسبت به دیگر دانه بندی ها در مقابل تغییر شکل دائمی بیشتر است. می توان علت آن را فضای خالی کمتر در بخش درشت دانه این دانه بندی (با توجه به شکل (۲)) و در نتیجه قفل

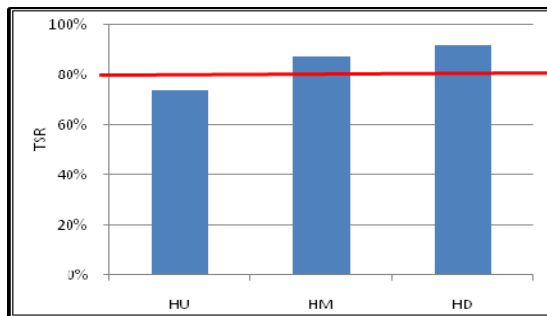
جدول ۱۱- مقدار عدد روانی برای دانه بندی های مختلف (سیکل)

نوع دانه بندی	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
U	۱۲۹۴	۸۴۲	۱۰۱۴
M	۲۴۳۶	۱۶۷۲	۱۸۷۴
D	۲۶۸۰	۳۲۸۸	۲۷۳۶





شکل ۵- نتایج  $ITS_{dry}$  و  $ITS_{wet}$  برای دانه‌بندی‌های مختلف



شکل ۶- مقادیر TSR در مخلوط‌های با دانه‌بندی‌های مختلف

#### ۴-۳-۱- تحلیل واریانس

در جداول (۱۴) تا (۱۶) تحلیل واریانس صورت گرفته بر روی مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک و عمل‌آوری شده و همچنین نسبت مقاومت کششی ارائه شده است. با توجه به این جداول ملاحظه می‌شود که تأثیر دانه‌بندی بر روی نتایج سه پارامتر مورد بررسی در این بخش معنی‌دار است، ولی تأثیر آن بر روی نتایج TSR بیشتر می‌باشد.

#### ۴-۲-۱- نتایج تحلیل واریانس

جدول (۱۲) نتایج تحلیل واریانس صورت گرفته بر روی نتایج آزمایش خزش دینامیکی برای مخلوط‌های ساخته شده با دانه‌بندی‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود تأثیر دانه‌بندی بر روی نتایج معنی‌دار است.

#### جدول ۱۲- نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی برای دانه‌بندی‌های

مورد نظر (کیلوپاسکال)

نوع دانه‌بندی	$ITS_{dry}$	$ITS_{wet}$	TSR
U	۷۴۱/۸۷	۵۴۵/۴۵	٪۷۴
M	۷۳۰/۴۹	۶۳۵/۶۱	٪۸۷
D	۶۸۴/۳۶	۶۲۵	٪۹۱

#### ۴-۳-۲- نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

همان‌طور که در جدول (۱۳) مشخص است، دانه‌بندی حد بالا بیشترین مقدار ITS در حالت خشک را دارد و همچنین تفاوت قابل ملاحظه‌ای در مقدار متوسط ITS در حالت خشک بین دو دانه‌بندی حد وسط و حد پایین وجود ندارد. مرجع [۱۱] مقدار حداقلی برای ITS در حالت خشک مشخص نکرده است ولی مقادیر جدول (۱۳) از مقدار حداقل مورد نیاز ۴۴۸ کیلو پاسکال که توسط SC DOT [۲۰] مشخص شده است بیشتر می‌باشد. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی برای درک بهتر در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که دانه‌بندی حد بالا حداقل مقدار TSR را برآورده نمی‌سازد، لذا جزو دانه‌بندی‌های حساس در برابر رطوبت در نظر گرفته می‌شود.

#### جدول ۱۳- نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی برای دانه‌بندی‌های

مورد نظر (کیلوپاسکال)

نوع دانه‌بندی	$ITS_{dry}$	$ITS_{wet}$	TSR
U	۷۴۱/۸۷	۵۴۵/۴۵	٪۷۴
M	۷۳۰/۴۹	۶۳۵/۶۱	٪۸۷
D	۶۸۴/۳۶	۶۲۵	٪۹۱

#### جدول ۱۴- نتایج تحلیل واریانس $ITS_{dry}$ برای دانه‌بندی‌های مختلف

متغیر وابسته: $ITS_{dry}$					
Sig.	F	میانگین مربعات	درجات آزادی	نوع ۳ مجموع مربعات	منبع
۰/۰۲۰	۸/۱۰۴	۷۲۸۴/۷۸۴	۲	۱۴۵۶۹/۵۶۹	مدل اصلاح شده
۰/۰۰۰	۳۶۲۹	۳۲۶۱۸۳۶	۱	۳۲۶۱۸۳۶	اینترسپت
۰/۰۲۰	۸/۱۰۴	۷۲۸۴/۷۸۴	۲	۱۴۵۶۹/۵۶۹	دانه‌بندی
		۸۹۸/۹۱۲	۶	۵۳۹۳/۴۷۴	خطا
			۹	۳۲۸۱۷۹۹	مجموع
			۸	۱۹۹۶۳	مدل اصلاح شده

جدول ۱۵- نتایج تحلیل واریانس ITS<sub>wet</sub> برای دانه بندی های مختلف

متغیر وابسته: ITS <sub>wet</sub>					
منبع	نوع ۳ مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
مدل اصلاح شده	۵۵۶۸/۰۶۳	۲	۲۷۸۴/۰۳۱	۷/۴۴۷	۰/۰۲۴
اینترسپت	۴۶۵۱۳۸۲	۱	۴۶۵۱۳۸۲	۱۲۴۴	۰/۰۰۰
دانه بندی	۵۵۶۸/۰۶۳	۲	۲۷۸۴/۰۳۱	۷/۴۴۷	۰/۰۲۴
خطا	۲۲۴۳/۰۰۶	۶	۳۷۳/۸۳۴		
مجموع	۴۶۵۹۱۹۳	۹			
مدل اصلاح شده	۷۸۱۱/۰۶۹	۸			

جدول ۱۶- نتایج تحلیل واریانس TSR برای دانه بندی های مختلف

متغیر وابسته: TSR					
منبع	نوع ۳ مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
مدل اصلاح شده	۰/۰۵۲	۲	۰/۰۲۶	۱۲/۹۷۸	۰/۰۰۷
اینترسپت	۶/۳۴۹	۱	۶/۳۴۹	۳۱۹۶	۰/۰۰۰
دانه بندی	۰/۰۵۲	۲	۰/۰۲۶	۱۲/۹۷۸	۰/۰۰۷
خطا	۰/۰۱۲	۶	۰/۰۰۲		
مجموع	۶/۴۱۲	۹			
مدل اصلاح شده	۰/۰۶۳	۸			

#### ۴-۴- بررسی سطح شکست در آزمایش کشش غیرمستقیم

در این مطالعه، هنگام انجام آزمایش ITS پس از ثابت شدن مقدار عدد قرائت شده توسط دستگاه، بارگذاری آن قدر ادامه داده شد تا ترک ایجاد شده در راستای قطر نمونه امتداد یابد، سپس نمونه‌ها از محل شکست به دو قسمت تقسیم می‌شوند. سطوح شکست زبر نشان‌دهنده قفل و بست مناسب‌تر مصالح در یکدیگر و در نتیجه مقاومت کششی بالاتر می‌باشد و از طرفی سطوح صاف در محل شکست نشان‌دهنده مخلوطی با ریزدانه بیشتر و درگیری کمتر مصالح با یکدیگر است.

در شکل (۸) نمایی از سطوح شکست برای دانه بندی‌های مورد استفاده در این تحقیق، نشان داده شده است. در این شکل مخلوط‌های ساخته شده با دانه بندی حد بالا، حد وسط و حد پایین به ترتیب از سمت راست به چپ آورده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، مخلوط‌های ساخته شده با دانه بندی حد پایین، دارای سطحی زبرتر می‌باشند که حاکی از قفل و بست بیشتر مصالح در یکدیگر می‌باشد و با تغییر دانه بندی به سمت دانه بندی حد بالا، این سطح صاف تر می‌شود. این موضوع اتکای مؤثر کمتر مصالح به یکدیگر، در مخلوط‌های ساخته شده با دانه بندی حد بالا را نشان می‌دهد.

#### ۴-۵- نتایج پردازش عکس‌های آزمایش آب جوشان

ASTM D3625 روشی را استاندارد کرده است که می‌توان از آن برای تعیین کاهش چسبندگی در مخلوط متراکم نشده، تحت تأثیر آب جوش استفاده کرد. در این روش نمونه مخلوط آسفالتی، به مدت ۱۰ دقیقه در ظرفی از آب جوش قرار داده می‌شود و پس از خنک شدن، مشاهدات بصری برای تعیین میزان پوشش قیر باقی‌مانده بر روی مصالح انجام می‌شود. این آزمایش به عنوان یک شاخص جهت تعیین حساسیت نسبی مصالح پوشیده شده با قیر نسبت به آب می‌باشد. برای این که آزمایش از حالت کاملاً کیفی بر مبنای مشاهدات محقق، به حالت کمی تبدیل شود، آنالیز عددی بر روی عکس‌هایی که با استفاده از دوربین دیجیتال گرفته شده بود به عمل آمد. در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار نمایش عکس ACDsee، هر یک از عکس‌ها با یک اندازه ثابت برش زده شده و سپس با در نظر گرفتن یک رنگ مشخص به عنوان آستانه تبدیل به عکس سیاه و سفید شدند. نواحی سیاه در عکس‌ها نشان‌دهنده مصالح پوشیده شده با قیر و نواحی سفید نشان‌دهنده نقاط و یا مصالحی می‌باشند که دچار عریان‌شدگی شده‌اند. برای محاسبه مساحت هریک از نواحی مذکور با استفاده از برنامه‌ای که در محیط نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است، تعداد پیکسل‌های با رنگ مشکی و همچنین تعداد پیکسل‌های

دانه‌بندی‌های مورد بررسی دارند، که می‌تواند نشان دهنده مقاومت بالای مخلوط ساخته شده با این دانه‌بندی در برابر خستگی باشد، لذا نتیجه می‌شود که برای تمام معادن، دانه‌بندی حد وسط لزوماً بهترین دانه‌بندی انتخابی نمی‌باشد.

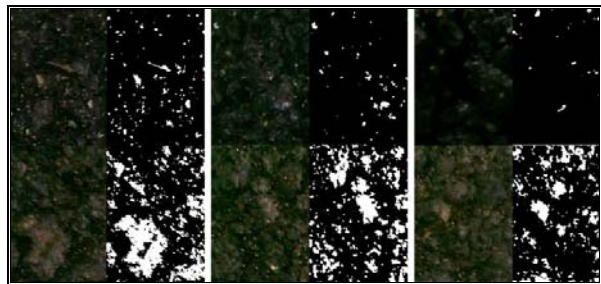
البته با توجه به این که پیش‌بینی می‌شود رفتار عملکردی مخلوط‌های ساخته شده برای هر منبع مصالح منحصر به فرد باشد، پیشنهاد می‌شود که برای هر منبع قرضه آزمایش‌های مشابه این تحقیق، حداقل در حد آزمایش مارشال برای دانه‌بندی‌های متفاوت صورت گیرد. با در نظر گرفتن این مطلب که دانه‌بندی‌های درشت‌تر رفتار بهتری در برابر تغییر شکل‌های دائمی دارند و دانه‌بندی‌های ریزتر از عملکرد خستگی مناسب‌تری برخوردار می‌باشند، به نظر می‌رسد که دانه‌بندی مناسب بایستی بر اساس عملکردی که از مخلوط انتظار می‌رود تعیین شود. در مطالعه حاضر هدف انتخاب دانه‌بندی مناسب به صورتی بود که مخلوط حاصل عملکرد مناسبی در برابر خزش و رطوبت داشته باشد.

دانه‌بندی حد پایین انتخابی دارای ضخامت غشای قیر بیشتری بر روی سطح مصالح می‌باشد و از طرف دیگر به دلیل وجود فضای خالی کمتر (به خصوص در بخش درشت‌دانه) تماس سنگ به سنگ در مخلوط‌های ساخته شده با این دانه‌بندی بیشتر از سایر دانه‌بندی‌ها است. این فاکتورها روی هم رفته باعث می‌شود مخلوط حاصل رفتار خزشی و حساسیت رطوبتی مناسبی از خود نشان دهد.

انجام آزمایش آب جوشان نشان داد که میزان عریان‌شدگی در دانه‌بندی‌های حد بالا بیشتر از سایر دانه‌بندی‌ها است و دانه‌بندی حد پایین کم‌ترین مقدار عریان‌شدگی را داراست که می‌توان دلیل آن را ضخامت غشای قیر کمتر مخلوط‌های ساخته شده با دانه‌بندی حد بالا دانست.

تحلیل واریانس صورت گرفته نشان می‌دهد که تأثیر دانه‌بندی بر روی رفتار خزشی مخلوط‌های حاصل بیشتر از سایر پارامترهای عملکردی دیگر است.

با رنگ سفید مشخص شد و به این ترتیب سهم هریک از رنگ‌ها در عکس و در نتیجه میزان نواحی عریان شده تعیین شدند. روال معرفی شده در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل دانه‌بندی حد پایین، وسط و بالا، به ترتیب از سمت راست به چپ آورده شده‌اند. در این شکل همچنین عکس‌های ردیف بالا و پایین به ترتیب مربوط به حالت قبل و بعد از آزمایش می‌باشد. برای هر نمونه دو عکس در هر ردیف نشان داده شده است که عکس سمت راست (برای هر نمونه) نشان‌دهنده عکس سیاه و سفید شده سمت چپ می‌باشد.



شکل ۷- تحلیل عکس صورت گرفته بر روی نمونه‌ها

نتایج حاصل از تحلیل صورت گرفته بر روی عکس‌ها در جدول (۱۷) آورده شده است. با توجه به شکل (۷) و نتایج جدول (۱۷) ملاحظه می‌شود، دانه‌بندی حد بالا در میان سایر دانه‌بندی‌ها بیشترین مقدار عریان‌شدگی را از خود نشان می‌دهد.

جدول ۱۷- نتایج پردازش تصویر نمونه‌ها

نوع دانه‌بندی	حد بالا (U)	حد وسط (M)	حد پایین (D)
سهم پیکسل‌های سفید	٪۱۲-٪۳۲	٪۱۰-٪۱۹	٪۸-٪۱۷

## ۵- نتیجه‌گیری

همان‌طور که نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد، برای این منبع قرضه، دانه‌بندی حد پایین از نظر پارامترهای عملکردی (خارج قسمت مارشال، تغییر شکل دائمی و حساسیت رطوبتی) رفتار مناسب‌تری نسبت به دانه‌بندی‌های دیگری که در این تحقیق بررسی شده‌اند، نشان می‌دهد. همچنین دانه‌بندی حد بالا در کل دارای خصوصیات عملکردی مناسبی نمی‌باشد. قابل ذکر است که مخلوط‌های ساخته شده با این دانه‌بندی تنش‌کششی غیر مستقیم در حالت خشک بالاتری نسبت به سایر



شکل ۸- نمایی از سطوح شکست برای دانه‌بندی‌های مورد استفاده در تحقیق

- ۶- مراجع
- [1] Nhat, T., "The Relationship of Bitumen Content, Aggregate Surface Area and Extraction Time Using Asphalt Ignition Furnace", Masters Thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Faculty of Civil Engineering, 2008.
- [2] منصورخاکی، ع.، یعقوبی، ا.، "مقایسه پارامترهای طرح مارشال دانه‌بندی آستر آیین‌نامه ایران با دانه‌بندی‌های به دست آمده از رابطه فولر"، هشتمین کنگره بین‌المللی عمران، سال ۱۳۸۸، شیراز.
- [3] طباطبایی، ا. م.، "روسازی راه". مرکز نشر دانشگاهی، چاپ دوازدهم، سال ۱۳۸۵.
- [4] "آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران"، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، سال ۱۳۸۱.
- [5] یعقوبی، ا.، "بررسی اثر دانه‌بندی بر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی"، پایان‌نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، زمستان ۱۳۸۵.
- [6] Clark, W., Wright, J., "Effect of Idaho Aggregate Gradation on Asphalt Paving Mix", research project number 87, Idaho Transportation Department. 1980.
- [7] "طرح مخلوط گرم آسفالت به روش LC"، انتشارات مؤسسه قیر و آسفالت ایران، شماره ۸، ۱۳۸۵.
- [8] Sengoz, B., Agar, A., "Effect of Asphalt Film Thickness on the Moisture Sensitivity Characteristics of Hot-Mix Asphalt", Building and environment, 2007. 42(10): p. 3621-3628.
- [9] Canadian Standard. "Asphalt Film Thickness Determination, in Asphalt Mixes", Strandart Test Procedure Manual, Saskatchewan Highways and Transportation, 2001.
- [10] زیاری، ح.، "راهنمای کاربردی آزمایش‌های قیر و آسفالت"، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ اول، ۱۳۸۵.
- [11] AASHTO standard. "Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing", American Association of State Highway and Transportation Officials, 1997.
- [12] Parker, F., "A Field Study Of Stripping Potential Of Asphalt Concrete Mixtures", Project No. 2019- 6, Sponsered by The State of Alabama Highway Department, August 1989.
- [13] Othman, A. M., "Impact of Polypropylene Application Method on Long-Term Aging of Polypropylene-Modified HMA", Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22, 1012.
- [14] Abukhettala, M. E., "The Relationship between Marshall Stability, Flow and Rutting of The New Malaysian Hot-Mix Asphalt Mixtures", Masters Thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Faculty of Civil Engineering. 2006.
- [15] Sangita., Tabrez. A. K., Shabina, R., Shirma, D. K., "Effect of Waste Polymer Modifier on the Properties of Bituminous Concrete Mixes", Construction and Building Materials, 2011.
- [16] Hinisliolu, S., Aar, E., "Use of Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix", Materials letters, 2004, 58 (3-4), 267-271.
- [17] ایزدی، ا.، "ارزیابی نقش مصالح سنگی در پدیده شیار-افتادگی"، پایان‌نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، زمستان ۱۳۸۵.
- [18] Goh, S.W., You, Z., "A Simple Stepwise Method to Determine and Evaluate the Initiation of Tertiary Flow for Asphalt Mixtures under Dynamic Creep Test", Construction and Building Materials, 2009, 23 (11), 3398-3405.
- [19] Williams, R. Ch., Brekah, T. M., "Evaluation of Hot Mix Asphalt Moisture Sensitivity Using

the Nottingham Asphalt Test Equipment", Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Report No. IHRB Project TR-555, 2010.

- [20] Putman, B. J., Amirkhanian, S. N., "Utilization of Waste Fibers in Stone Matrix Asphalt Mixtures", Resources, conservation and recycling, 2004, 42 (3), 265-274.

**EXTENDED ABSTRACT**

## The Effect of Aggregate Gradation on Performance of Asphalt Mixture

Ebrahim Sangsefidi <sup>a</sup>, Maryam Sangsefidi <sup>b</sup>, Hasan Ziari <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

<sup>b</sup> School of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

**Received:** 9 February 2015; **Accepted:** 15 August 2015

---

### Keywords:

Aggregate gradation, Mixture design, Optimum mixture, Permanent deformation, Moisture susceptibility

---

### 1. Introduction

An adequate and economical design for a pavement structure is just as important as a design for any other engineering structure [1]. It is possible to improve the characteristics of the asphalt mixture, using its components, aggregates and bitumen.

Aggregates make up high proportion of volume and mass of asphalt mix; hence, it is predicted to have an enormous impact on the mixture properties. Major characteristics of aggregate are stiffness, shape, texture and gradation, that only gradation can be changed for a special mine. Aggregate gradation is the distribution of particle sizes expressed as a percentage of the total weight [2] and considered as the centerpiece property of aggregate which needs a careful consideration due to its effect on mix properties and performance of HMA mixtures, including air void, stability, stiffness, durability, permeability, workability, fatigue resistance, frictional resistance, resistance to moisture damage [1, 2] and also rutting resistance of asphalt concrete under traffic and environmental loads. So this parameter is considered as a very important parameter in the process of mixture design.

Usually pavement design codes supply proposed aggregate gradations by an upper and a lower limit. It has been the custom for researchers and contractors to choose a gradation between these limits (in particular, the gradation that is located in the middle of the band is more preferable).

As the moisture damage was the first distress identified in HMA, significant effort has been made to define moisture susceptibility mechanisms and predict its occurrence [3]. Moisture damage is a widespread problem and it generally starts at the bottom of an asphalt layer or where the water content is the highest. Sengoz and Agar [4] introduced moisture damage as the major causes of premature pavement failure which diminish the performance and service life of the pavement and determined aggregate properties as a main factor that influences moisture damage.

### 2. Methodology

#### 2.1. Mixture design

To achieve the primary objective of this study, three gradations were tried for mix design. These consist of gradations that are denoted by simple symbols, L, M and U, which represent, lower bound, mid-range and upper bound gradations, respectively. The structure of these gradations becomes coarser from the upper limit to the lower limit. To determine the structure of these gradations (percent passing each sieve), the acceptance criterion of the local code for gradation was chosen so that the finally selected gradations meet band limit.

To determine the Optimum Asphalt Content (OAC) by weight of total mix, for each aggregate gradation, Marshall mix design procedures (ASTM D 1559) were followed. Three specimens of each asphalt content (4.5%, 5%, 5.5%, 6% and 6.5% for mixes prepared using gradation U, and 4%, 4.5%, 5.0%, 5.5% and 6.0%, for mixes

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: ebrahim.sangsefidi@gmail.com (Ebrahim Sangsefidi), ma.sangsefidi@gmail.com (Hasan Ziari), h.ziari@iust.ac.ir (Maryam Sangsefidi).

prepared using gradations M and L) were prepared and compacted using 75-blows/face (heavy traffic). Once Specimens have been compacted using Marshall Hammer, they were tested for stability, flow, air voids, unit weight, and Voids in Mineral Aggregate (VMA). The OAC was determined based on these parameters. It was calculated as the asphalt content that meets 4.0% air voids, in accordance with local code specification. Then the OAC was checked whether it achieved the specification limits of the other parameters (stability, flow, unit weight, and VMA). The resulting optimum asphalt contents were 5.8%, 5.3%, and 5.1% for mixes prepared using gradations U, M, and L, respectively.

### 3. Test method and results

Three mixes were prepared to evaluate each mixture. The moisture sensitivity of these mixes was evaluated using two commonly used test methods: AASHTO T-283 and ASTM D3625; and the dynamic creep test were carried out using a UTM-5 according to Australian code 2891.12.1. The mixtures were prepared at OAC, based on the Marshall laboratory compaction method and tested by performance related, mechanical test methods. The loose specimens used in the Texas boiling test were prepared by mixing 100 gm of the aggregate with the OAC. The results from these tests were analyzed to evaluate the effect of introduced gradations on performance of the HMA mixtures. The following section describes several laboratory performance related tests, which were used.

#### 3.1. Dynamic creep test

The dynamic creep test was performed to measure the resistance of asphalt concrete to tertiary deformation (flow). Finally, the mixture's response characteristics and flow number are obtained. The dynamic creep test was carried out using a UTM-5 to apply repeated axial stress pulse to asphalt specimens and measuring the vertical deformation with Linear Variable Displacement Transducers (LVDTs). In this research a square pulse wave with frequency of 0.5 Hz (by setting 500 ms for the pulse width and 1500 ms for the rest period) was chosen according to Australian code AS 2891.12.1.

An increase in FN is accompanied with an increase in Marshall Quotient. It is possible to draw a comparison between the trend of FN and Marshall Quotient results. Also, results of the dynamic creep indicate that there is an obvious direct relationship between G/S (Gravel to Sand ratio) and FN. On the other hand it could be concluded that stone-on-stone contact between coarse aggregate particles can increase the load bearing capacity in these mixes and hence minimize the potential for rutting

#### 3.2. Moisture susceptibility tests

Many variables affect the amount of water damage in asphalt concrete layer. In this study AASHTO T283 and ASTM D 3625 were carried out in order to determine the moisture susceptibility mechanism of mixtures. Research work demonstrated that the modified Lottman test (AASHTO T283) or the Root-Tunnicliff test (ASTM D 4867) was more effective than the Boiling water test (ASTM D 3625) [3] but in this study a combination of these methods and visual inspection tests were used to evaluate the moisture susceptibility.

The test results from AASHTO T-283 were used to distinguish the effect of aggregate gradation on the moisture sensitivity of hot mix asphalt concrete. HMA prepared using U gradation shows the highest result for dry ITS and the greatest reduction due to conditioning and eventually demonstrate the lowest TSR and so poor moisture performance. This is a reflection of the thin asphalt film thickness in mixtures manufactured using such a gradation that diminishes the strength of mixture in wet conditions. Overall, it can be concluded that the gradation L has the lowest decrease in ITS due conditioning which means it has the highest moisture resistance.

The results of ASTM D3625 were used to distinguish the effect of aggregate gradation on occurrence of stripping and also to convert the qualitative results of this test (based on researcher observation) to quantitative ones. To achieve this aim a numerical analysis was performed on digital images taken after applying the test on each specimen. In this test it is important to determine which parts of the aggregates were stripped. For this, at first all images were cropped in a fixed dimension and then these pictures were converted to black and white images, considering a specific color as a threshold color. Black areas are aggregates covered with bitumen and white areas are aggregates which have lost their bitumen coating and have been stripped. Finally, each color (black and white) portion was determined using a computer code written in MATLAB. In this program the number of each color's pixels was determined.

The results showed that Texas boiling test was able to assess the effect of aggregate gradation on the stripping of HMA. Taking into account that the results of this table evaluate the potential of stripping and so "adhesion failure" mechanism, a similar trend in TSR results indicates that the most important reason for moisture susceptibility for

this special mine is “adhesion failure”, and also it can be concluded that “adhesion failure” is more noticeable for HMA prepared using finer gradation.

#### **4. Conclusion**

The main aim of this study was to determine the effect of various gradations on performance of HMA and contrary to general belief, the middle range of gradation does not produce the best results. As a result of this study, the convenient selection of gradation in the process of mixture design has a considerable influence on performance of the mixture, furthermore the results can help designer to use potential of the resource as much as possible.

Based on the clear evidence of this study, it seems difficult to realize appropriate aggregate gradation in advance without conducting any test.

The change in aggregate gradation not only affects the moisture performance, but also can influence on moisture susceptibility mechanism. It was observed that as selected gradation gets finer, the “adhesion failure” becomes dominant mechanism.

It was observed that the resistance to permanent deformation (rutting) is largely affected by aggregate gradation and L gradation withstand permanent deformation considerably high, as it was expected.

#### **5. References**

- [1] Nhat, T., “The Relationship of Bitumen Content, Aggregate Surface Area, and Extraction Time Using Asphalt Ignition Furnace”, 2008.
- [2] Abukhattala, M. E., “The relationship Between Marshall Stability, Flow and Rutting of The New Malaysian Hot-Mix Asphalt Mixtures”, 2006.
- [3] Kim, S., et al., “Evaluation of Hot Mix Asphalt Moisture Sensitivity Using the Nottingham Asphalt Test Equipment”, 2005: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University.
- [4] Sengoz, B., Agar, E., “Effect of Asphalt Film Thickness on The Moisture Sensitivity Characteristics of Hot-Mix Asphalt”. *Building and environment*, 2007. 42(10): p. 3621-3628.