بررسی روش های آزمایشگاهی در ارزیابی کارایی مخلوط های آسفالتی

سبحان سلیمانی گلسفیدی[۱]، سید علی صحاف[۲]

چکیده

تغییر در پارامترهای طرح مخلوط آسفالتی از جمله نوع چسباننده، دانه بندی، تکنولوژی ساخت متفاوت نظیر مخلوط های آسفالتی وارم و همچنین استفاده از افزودنی های اصلاح کننده قیر نظیر پودر لاستیک، روان کننده ها و غیره سبب تغییر در کارایی مخلوط های آسفالتی خواهد شد. جهت ارزیابی کارایی مخلوط های آسفالتی تاکنون روش های آزمایشگاهی متفاوتی استفاده شده است. به طور کلی کارایی از طریق سه روش، شامل گرانروی چسباننده، بررسی خصوصیات حجمی نمونه از طریق تراکم پذیری مخلوط با روش مارشال یا ژیراتوری و بررسی انرژی مورد نیاز جهت اختلاط مخلوط با استفاده از دستگاه های سنجش نیروی کارپذیری ارزیابی می گردد. روش های ذکر شده در این مقاله با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ارزیابی شده و رویکردی مناسب جهت انتخاب نوع روش ارزیابی کارایی ایجاد می گردد.

واژه‌های کلیدی: کارایی، تراکم پذیری، ویسکوزیته، مخلوط آسفالتی

۱- مقدمه

کارایی[۳]، سهولت اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی را توصیف می کند[۱]. در مخلوط های آسفالتی حاوی افزودنی های سخت کننده نظیر پودر لاستیک باعث کاهش قابل توجه کارایی مخلوط آسفالتی شده و به دمای اختلاط بالاتر و زمان اختلاط طولانی تری برای مخلوط آسفالتی نیاز دارد. این افزایش دمای ساخت تا ۵۰ درجه سانتی گراد بالاتر از مخلوط آسفالتی داغ[۴](HMA) خواهد بود [۲]. دمای تولید و ساخت عوامل مهمی هستند که بر کارایی مخلوط آسفالتی تأثیر می گذارند [۳]. این تغییرات در دمای ساخت باعث تغییر در کارایی مخلوط آسفالتی می شود[۴]. تلاش های زیادی توسط محققان صنعت روسازی در سراسر جهان برای بهبود کارایی مخلوط های آسفالتی انجام شده است. اعتقاد بر این است که فناوری وارم میکس آسفالت[۵] (WMA) یک روش عملی و موثر است. استفاده از افزودنی و فناوری های مختلف وارم میکس می تواند ۱۵ تا ۳۰ درجه سانتی گراد در دمای اختلاط کاهش ایجاد نماید[۵و۶].

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استادیار راه و ترابری دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

[3] Workability
[4] Hot Mix Asphalt
[5] Warm Mix Asphalt

کاهش دمای اختلاط می تواند باعث ضعف پوشش قیر شده و بنابراین مخلوط آسفالتی را مستعد آسیب رطوبتی نماید. کاهش دمای تراکم می تواند تراکم مخلوط را مشکل کرده یا حتی منجر به تراکم ناکافی شود. گزارش شده است که بیش از ۸۰ درصد خرابی های زودرس از جمله خرابی رطوبتی و ترک خوردگی روسازی آسفالتی به دلیل تراکم ناکافی است. بنابراین، انتخاب دمای اختلاط و تراکم بسیار مهم است[۷].

به طور رایج، ویسکوزیته قیر برای تعیین دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی داغ استفاده می شود. دماهای تراکم به دست آمده با این روش به طور مستقیم بر کارایی مخلوط آسفالتی تأثیر می گذارد، زیرا از شرایط چسباننده یکسان استفاده می شود. اما با افزایش استفاده از چسباننده های آسفالتی اصلاح شده و انواع جدید مخلوط های آسفالتی نظیر آسفالت ماستیک درشت دانه[1] اهمیت انتخاب دمای اختلاط و تراکم مناسب مشخص می شود[۸].

دمای اختلاط و تراکم وارم میکس آسفالت را با استفاده از آزمایش ویسکوزیته قیر و آزمایش های تراکم مخلوط می توان تعیین نمود[۹]. با این وجود، پژوهش های انجام شده تا حال حاضر، تلاش کرده اند تا میزان کارایی را که می تواند دمای اختلاط و تراکم مخلوط های آسفالتی به ویژه وارم میکس را تعیین کند، اما هنوز هیچ روش استاندارد و مناسب وجود ندارد. هدف اصلی این مطالعه بررسی روش های آزمایشگاهی برای شناسایی دمای تولید و اختلاط مخلوط های آسفالتی به ویژه وارم میکس از طریق ویسکوزیته قیر، تراکم مارشال، ژیراتوری و خصوصیات حجمی مخلوط، و همچنین استفاده از دستگاه های ساده اما کاربردی جهت دستیابی به این اهداف می باشد.

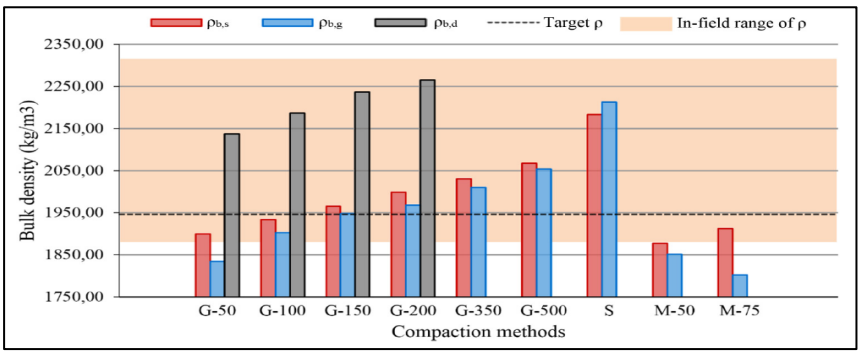
۲- تاثیر روش تراکم(استاتیکی، ضربه ای و ژیراتوری) بر کارایی مخلوط های آسفالتی

ارزیابی کارایی از طریق تست های تراکم به دو صورت انجام می شود:

الف-استفاده از تراکم ژیراتوری و بررسی تغییرات در خصوصیات حجمی

ب-استفاده از تراکم استاتیکی و ضربه ای و بررسی تغییرات در خصوصیات حجمی

بر اساس شکل ۱، وزن مخصوص نمونه های متراکم شده با روش ژیراتوری(G)، استاتیکی(S) و ضربه ای مارشال(M) نشان داده شده است.

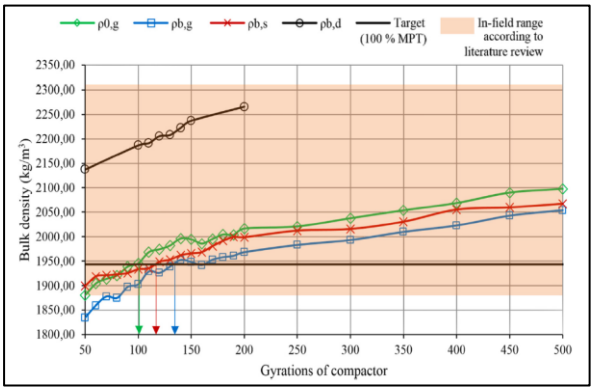


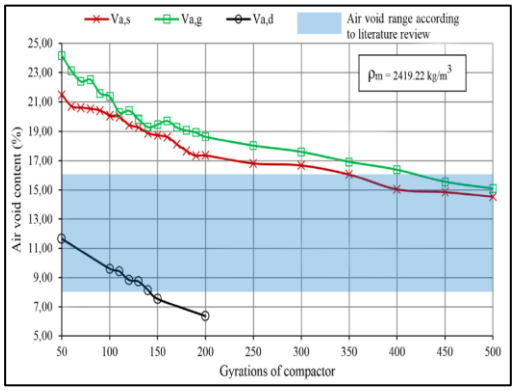
شکل ۱- وزن مخصوص نمونه های متراکم شده با روش ژیراتوری(G)، استاتیکی(S) و ضربه ای مارشال(M)[۱۰]

همانطور که انتظار می رود با افزایش تعداد چرخش ها[2]، وزن مخصوص افزایش می یابد. بر اساس وزن مخصوص های میدانی[3] مشاهده می شود که نمونه های ساخته شده با روش ژیراتوری، توانایی ایجاد فضای خالی و وزن مخصوص مشابه با مخلوط اجرا شده در میدان را دارند و نسبت به سایر روش های تراکم، نتایج قابل قبول تری ارائه می نمایند. با اعمال یک بار

[1] Stone Matrix asphalt
[2] Gyrations
[3] Field

استاتیکی به میزان ۲۱ مگاپاسکال مشاهده می شود که وزن مخصوص نمونه ها به مقادیر حداکثر رسیده و حتی از وزن مخصوص نمونه های ژیراتوری با ۵۰۰ چرخش نیز تراکم بیشتری ایجاد شده است. لذا استفاده از تراکم استاتیکی سبب عبور وزن مخصوص از مقدار طرح خواهد شد(شکل ۲ و ۳).



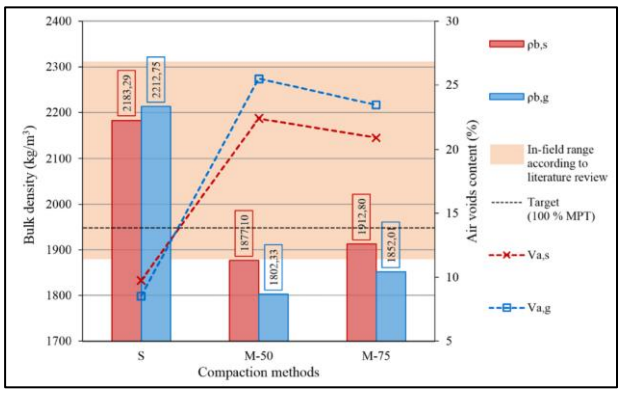


شکل ۲- تغییرات درصد فضای خالی مخلوط[۱۰]

شکل ۳- تغییرات وزن مخصوص مخلوط های متراکم شده با ژیراتوری [۱۰]

بر اساس پژوهش های سایر محققین نیز می توان دریافت که استفاده از تراکم استاتیکی دقت لازم در تراکم نمونه های مخلوط های آسفالتی را ندارد. به علت فشار بارگذاری افزایشی در نمونه، سنگدانه ها شکسته شده و قیر تحت فشار قرار می گیرد و سبب ایجاد وزن مخصوص های بیش از حد انتظار می شود.

لذا به هیچ عنوان استفاده از تراکم استاتیکی جهت بررسی کارایی مخلوط های آسفالتی پیشنهاد نمی شود زیرا منجر به ارائه نتایج خلاف تراکم میدانی می شود. تراکم پذیری ضربه ای نمونه ها از طریق چکش مارشال با ۵۰ و ۷۵ ضربه بررسی شد و مشخص گردید که ۵۰ ضربه مارشال، وزن مخصوص کمتر از ۵۰ چرخش ژیراتوری را ایجاد می نماید. اما استفاده از ۷۵ ضربه مارشال جهت بررسی تراکم پذیری مخلوط های آسفالتی مشاهده گردید که وزن مخصوص حاصل، مشابه با وزن مخصوص های ناشی از ۶۰ و ۷۰ چرخش ژیراتوری می باشد. اگر چه وزن مخصوص ناشی از ۷۵ ضربه مارشال، بالاتر از حد پایین وزن مخصوص میدانی مشاهده شد اما همچنان به عنوان وزن مخصوص حد پایین درنظر می شود. به همین علت همانطور که در مورد تراکم استاتیکی گفته شد، در مورد تراکم مارشال نیز می توان گفت که به علت ارائه نتایج پارامترهای حجمی و وزن مخصوص مغایر با نتایج میدانی استفاده از تراکم مارشال نیز توصیه نمی شود. همچنین بیان شده است که تراکم مارشال به علت نداشتن توانایی ورز دادن، امکان تنظیم ذرات سنگدانه را طی تراکم نداشته و لذا وزن مخصوص های کمتری را ارائه خواهد نمود(شکل ۴).



شکل ۴- وزن مخصوص و درصد فضای خالی مخلوط های متراکم شده با روش استاتیکی و ضربه ای[۱۰]

همچنین قالب های مارشال امکان خروج آب مخلوط های سرد[1] را طی تراکم نداده که همین مساله تراکم از طریق روش مارشال را در این نوع از مخلوط های آسفالتی زیر سوال می برد. نهایتا از طریق مقایسه خواص حجمی مخلوط، کارایی و تراکم پذیری با روش ژیراتوری، استاتیکی و ضربه ای بررسی و روش ژیراتوری به عنوان روشی مناسب جهت بررسی کارایی و تراکم پذیری مشابه با حالت میدانی جهت تراکم مخلوط های آسفالتی توصیه شده است.

۳- ارزیابی کارایی از طریق بررسی شاخص انرژی تراکم و شاخص کارایی با استفاده از روش ژیراتوری

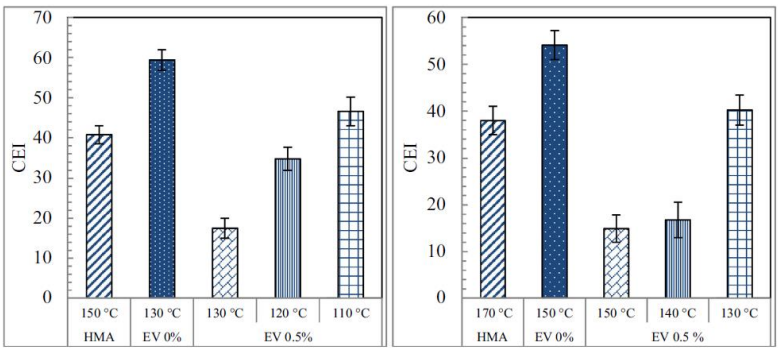
- در این روش، درجه تراکم عبارتست از درصدی از وزن مخصوص حداکثر تئوریک نمونه های متراکم شده. انرژی تراکم از طریق مساحت تجمعی زیر منحنی "درجه تراکم-تعداد چرخش" محاسبه می شود. شاخص انرژی تراکم[2](CEI) عبارتست از ۸ چرخش مانده به ۹۲ درصد درجه تراکم که نشان دهنده سهولت در تراکم پذیری است. شاخص کارایی[3](WI) عبارتست از:

$$WI=100/A \quad (۱)$$

که پارامتر A، ثابت خط رگرسیون در نمودار "درصد هوا- تعداد چرخش" می باشد.

۳-۱- تاثیر دمای تراکم بر کارایی مخلوط

بر اساس ارزیابی شاخص انرژی تراکم CEI مشخص گردید که افزودنی های وارم میکس باعث کاهش انرژی تراکم مورد نیاز جهت رسیدن به تراکم مورد نظر می شوند(شکل ۵).

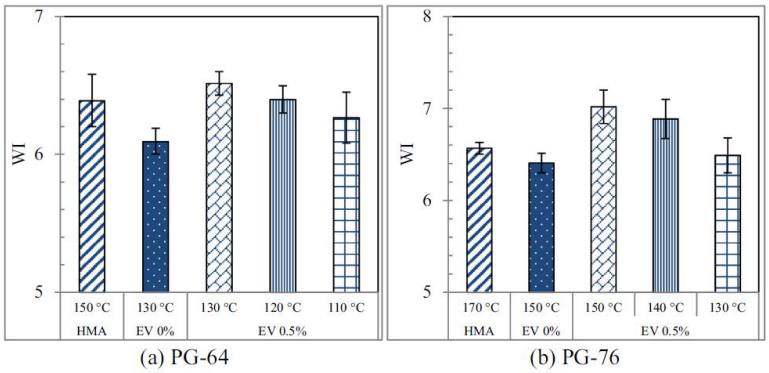


(a) PG-64 (b) PG-76

شکل ۵- بررسی شاخص انرژی تراکم CEI مخلوط های وارم میکس[۱۱]

همچنین هنگامی که دمای تراکم افزایش می یابد تفاوت در انرژی تراکم در مخلوط های با و بدون افزودنی وارم میکس قابل توجه تر خواهد بود. مخلوط های با شاخص انرژی تراکم CEI کمتر، ساخت پذیری بهتری دارند و ترجیح داده می شوند اما باید توجه داشت که چنانچه شاخص انرژی تراکم CEI خیلی کم باشد معرف یک مخلوط وارونده[4]بوده و باید از آن اجتناب نمود. بر اساس شکل ۶، مشاهده می شود که با کاهش دمای تراکم، شاخص کارایی WI کاهش می یابد. افزایش در شاخص کارایی WI با دمای تراکم مربوط به تاثیرات روغنکاری مخلوط که ناشی از ویسکوزیته مناسب قیر حین تراکم می باشد.

[1] Cold Mix Asphalt
[2] Compaction Energy Index
[3] Workability Index
[4] Tender Mix

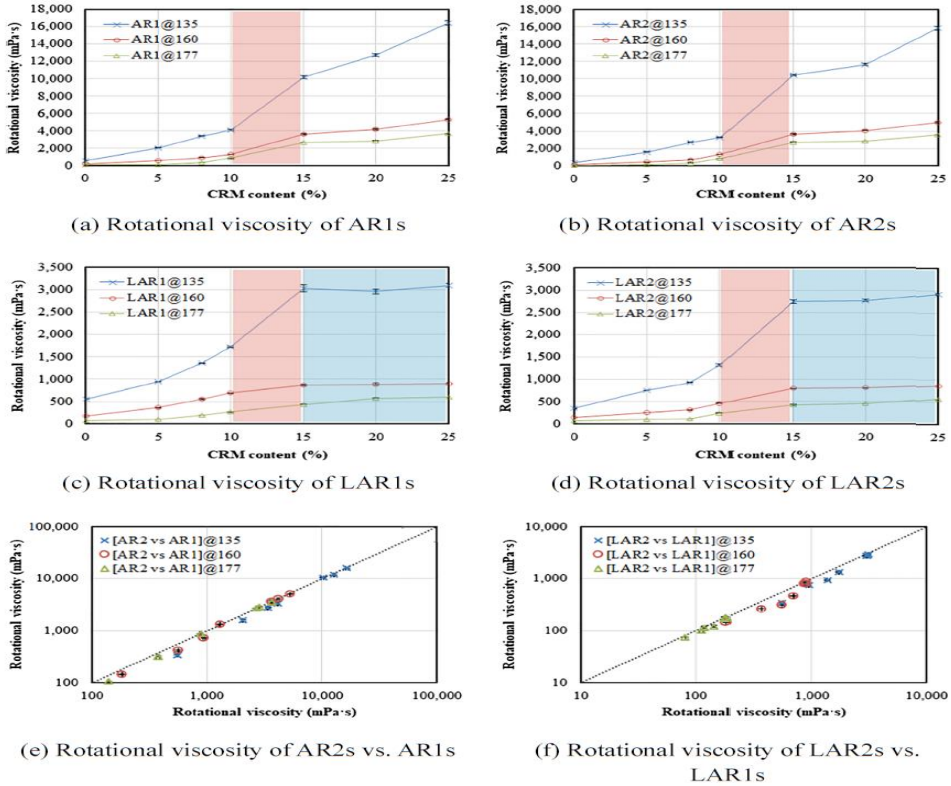


(a) PG-64 (b) PG-76

شکل ۶- رابطه بین شاخص کارایی WI و دمای تراکم[۱۱]

۴- ارزیابی کارایی از طریق بررسی ویسکوزیته قیر و تعداد چرخش ژیراتوری جهت تراکم

استفاده از تعداد چرخش ژیراتوری جهت دستیابی به وزن مخصوص مورد نظر، شاخص مناسب جهت بررسی کارایی مخلوط می تواند باشد. همچنین استفاده از ویسکوزیته چرخشی در ۳ دمای مختلف جهت بررسی کارایی قیرهای لاستیکی نیز توصیه شده است. با مشاهده شکل ۷ می توان دریافت که صرف نظر از نوع قیر و دمای آزمایش، با افزایش درصد لاستیک در قیر، ویسکوزیته چرخشی[1] افزایش می یابد. یک افزایش چشمگیر هنگامی که درصد پودر لاستیک از ۱۰ به ۱۵ درصد افزایش می یابد، در مقدار ویسکوزیته قیر لاستیکی(AR[2]) دیده می شود.



(a) Rotational viscosity of AR1s (b) Rotational viscosity of AR2s

(c) Rotational viscosity of LAR1s (d) Rotational viscosity of LAR2s

(e) Rotational viscosity of AR2s vs. AR1s (f) Rotational viscosity of LAR2s vs. LAR1s

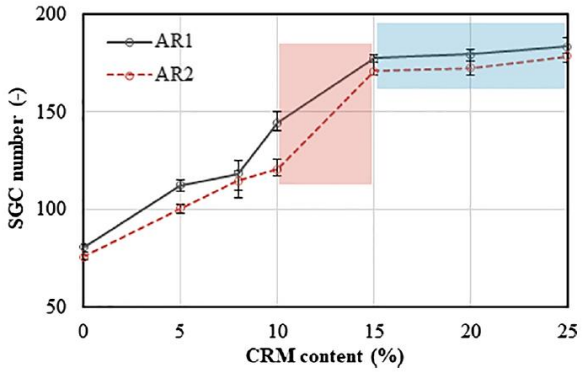
شکل ۷- ویسکوزیته چرخشی قیرهای لاستیکی AR و فاز مایع قیر لاستیکی LAR در دماهای مختلف[۱۲]

[1] Rotational Viscosity
[2] Asphalt Rubberized

با افزایش درصد پودر لاستیک بیش از ۱۵ درصد ویسکوزیته فاز مایع قیر لاستیکی(LAR) در یک مقدار ثابت محدود خواهد شد. به عبارتی ویسکوزیته قیر لاستیکی(AR) ناشی از ۲ مکانیزم می باشد:

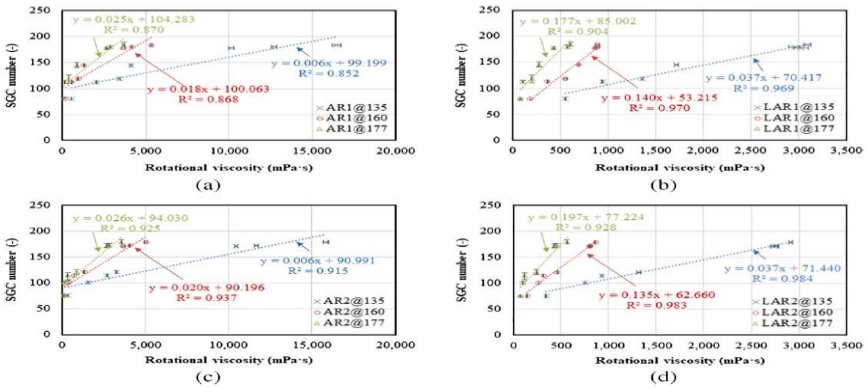
۱-ویسکوزیته فاز مایع ۲-تاثیر ذرات لاستیک در قیر

فاز مایع به عنوان یک سوسپانسیون و ذرات لاستیک به عنوان مواد جامد معلق در نظر گرفته می شود. منطقی است که با افزایش ذرات لاستیک، ویسکوزیته قیر لاستیکی افزایش یابد زیرا از جریان پذیری قیر لاستیکی می کاهد. چون فاز مایع قیر لاستیکی فاقد ذرات لاستیک می باشد(لاستیک در آن حل شده) لذا ویسکوزیته آن تحت تاثیر قیر پایه می باشد. شکل ۸، تعداد چرخش ژیراتوری قیرهای لاستیکی را در دمای تراکم ۱۷۷ درجه سانتیگراد نشان می دهد. همانطور که انتظار می رود، تعداد چرخش بالاتر معرف کارایی کمتر می باشد. تعداد چرخش های ژیراتوری روندی مشابه با ویسکوزیته را برای قیرهای لاستیکی نشان می دهد. یک مرحله افزایش چشمگیر در تعداد چرخش ها هنگامی که درصد لاستیک از ۱۰ به ۱۵ درصد افزایش می یابد، دیده می شود. با این وجود بر خلاف ویسکوزیته قیرهای لاستیکی، تعداد چرخش زیراتوری با افزایش درصد لاستیک از ۱۵ درصد، با شیب ملایمی افزایش می یابد.



شکل ۸- کارایی قیرهای لاستیکی AR در دمای ۱۷۷ درجه سانتیگراد[۱۲]

شکل ۹ رابطه بین ویسکوزیته قیرهای لاستیکی(یا فاز مایع قیر لاستیکی) را با تعداد چرخش ژیراتوری نشان می دهد. ضریب آماره R^2 نزدیک به یک، نشان دهنده همبستگی زیاد این دو متغیر می باشد. این موضوع امکان استفاده از ویسکوزیته چرخشی برای تعیین دمای ساخت مخلوط های حاوی قیر لاستیکی را تایید می نماید. البته باید توجه شود که همبستگی به نوع قیر پایه وابسته است. همبستگی بین فاز مایع قیر لاستیکی LAR با تعداد چرخش ژیراتوری، بیش از همبستگی بین قیر لاستیکی AR با تعداد چرخش ژیراتوری است. لذا ویسکوزیته فاز مایع قیر لاستیکی، بهتر می تواند کارایی مخلوط آسفالتی را بازتاب دهد. چون تنها تفاوت در فاز مایع و قیر لاستیکی وجود ذرات لاستیک می باشد لذا از این مساله در جهت ایجاد محدودیت در استفاده از ذرات لاستیک می توان استفاده نمود. توصیه می شود جهت ارزیابی کارایی از قیر لاستیکی فاقد ذرات لاستیک استفاده شود. همچنین مشاهده می شود که با افزایش دما، ضریب آماره R^2 کاهش می یابد. علت این موضوع این است که با افزایش دما، تاثیر ذرات لاستیک افزایش می یابد و نسبت فاز مایع در قیر لاستیکی کاهش می یابد.



شکل ۹- همبستگی بینه تعداد چرخش ژیراتوری و ویسکوزیته چرخشی[۱۲]

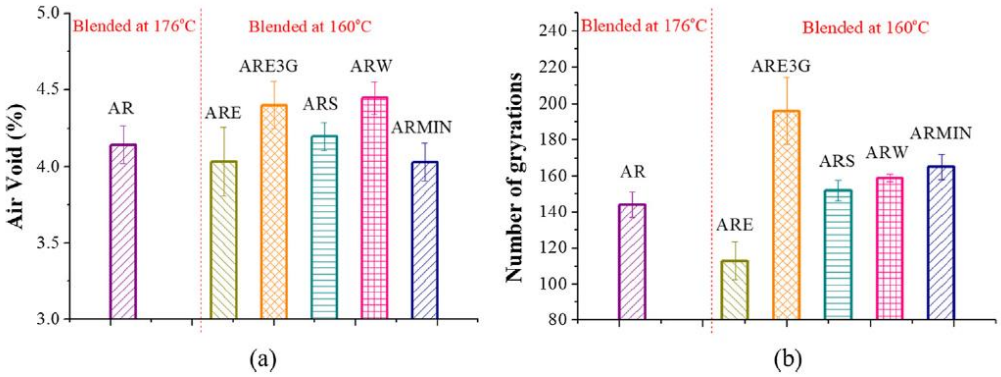
۵- ارزیابی کارایی از طریق بررسی درصد هوای نمونه مارشال و تعداد چرخش با روش تراکم ژیراتوری

ارزیابی کارایی از دو طریق ذیل می تواند انجام شود:

۱-نمونه ها با ۷۵ ضربه مارشال متراکم شده و درصد هوای نمونه، پارامتر معرف کارایی باشد.

۲-تعداد چرخش های ژیراتوری جهت دستیابی به ارتفاع ۴۰ میلیمتر معرف کارایی باشد.

لذا درصد هوای کمتر در یک نمونه مارشال یا تعداد چرخش ژیراتوری کمتر، معرف کارایی بهتر خواهد بود. بر اساس اندازه گیری درصد هوای نمونه های مارشال در شکل ۱۰، مشاهده می شود که درصد هوای نمونه های لاستیکی وارم میکس بین ۴ الی ۴/۵ درصد در مقایسه با ۴/۱ درصد برای نمونه های لاستیکی است. لذا افزودنی های وارم میکس توانسته اند با کاهش دمای اختلاط به کارایی لازم نیز دست یابند. در میان افزودنی های وارم میکس،Evotherm-DAT و آسفامین کمترین درصد هوا را داشتند که نشان می دهد بهترین کارایی را ایجاد نموده اند. تراکم پذیری نمونه لاستیکی حاوی ساسوبیت در دماهای پایین بسیار نزدیک به نمونه لاستیکی بدون وارم میکس است. درصد هوای نمونه لاستیکی حاوی Evotherm-3G و پارافین وکس کمی بزرگتر از درصد هوای نمونه لاستیکی بدون افزودنی وارم میکس است. دلیل محتمل این موضوع، درصد کم Evotherm-3G (۰/۵ درصد وزنی قیر لاستیکی) می تواند باشد که توسط قیر و ذرات لاستیک جذب شده و کارایی لازم را نتوانسته ایجاد نماید. نتایج مشابهی از طریق تست های ژیراتوری در شکل ۱۰ بدست می آید. تعداد چرخش های ژیراتوری اکثر نمونه های لاستیکی وارم میکس مشابه با نمونه لاستیکی بدون وارم میکس جهت رسیدن به ارتفاع یکسان نمونه بوده است. تنها نمونه لاستیکی وارم میکس حاوی Evotherm-3G ، ۵۲ چرخش ژیراتوری بیشتر در مقایسه با نمونه لاستیکی بدون وارم میکس نیاز داشته است. بر اساس هر دو معیار ارزیابی مشاهده شد که میان افزودنی های وارم میکس مختلف به ترتیب Evotherm-DAT، ساسوبیت، آسفامین، پارافین وکس و Evotherm-3G بهترین کارایی را ایجاد نموده اند.

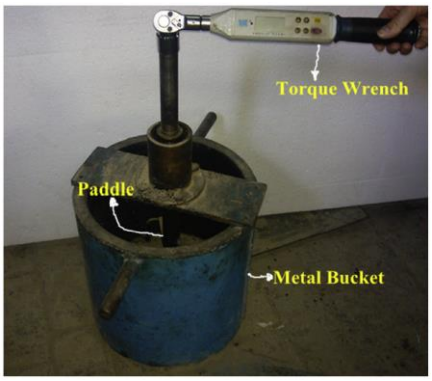


شکل ۱۰- ارزیابی کارایی از طریق a) درصد هوای نمونه های مارشال b) تعداد چرخش زیراتوری[۱۳]

۶- ارزیابی کارایی با استفاده از دستگاه PWD[1]

۶-۱- معرفی دستگاه PWD

جهت ارزیابی کارایی از دستگاه PWD مطابق با شکل ۱۱ می توان بهره برد. این دستگاه از یک سطل فلزی(جهت نگهداری مخلوط)، یک پره(به دور محوری که روی سطل محکم شده است می چرخد و مخلوط را فشار می دهد تا کارایی اندازه گیری شود) و یک آچار گشتاور[2] (برای اندازه گیری گشتاور به پره متصل شده است) تشکیل شده است. این دستگاه مقاومت مخلوط ها را از طریق پره چرخشی در سطل با سرعت ثابت و دمای مشخص اندازه گیری می کند. سپس مقاومت به واحد گشتاور تبدیل شده و به صورت خودکار به صفحه نمایش روی آچار گشتاور منتقل می شود.



شکل ۱۱- دستگاه ارزیابی کارایی PWD [۱۴]

۶-۲- روش انجام آزمایش کارایی با دستگاه PWD

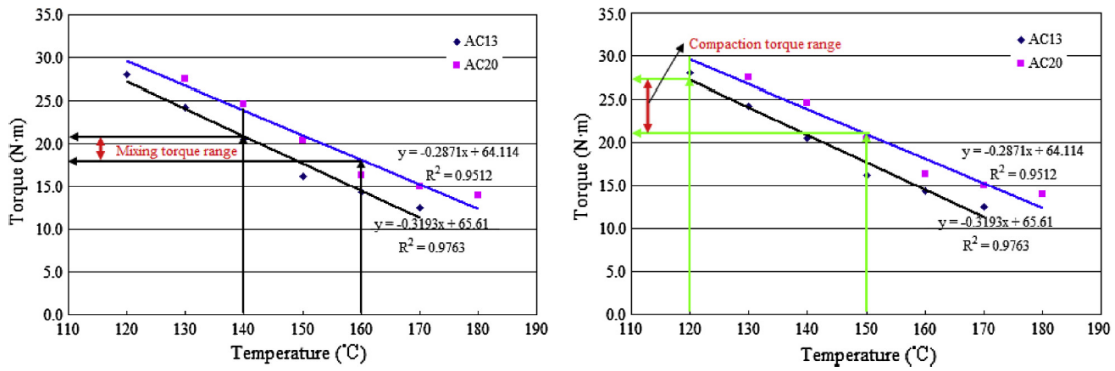
آزمون کارایی برای مخلوط های مختلف با استفاده از دستگاه PWD انجام می شود. همه مخلوط های همزده شده تا دمای کمی بالاتر از دمای اختلاط(وابسته به دمای محیط، افزایش ۵ الی ۱۰ درجه سانتی گراد) گرمتر شده و هنگامی که ۱۵ کیلوگرم نمونه گرم شده درون سطل قرار گرفت، مخلوط با استفاده از پره با سرعت ثابت یک دور در ۳ ثانیه فشار داده شده

[1] The prototype workability device
[2] Torque Wrench

و نیروی گشتاور روی آچار گشتاور قرائت می شود. در هر چرخش حداقل ۵ بار قرائت نیرو لازم است. اولین قرائت به دلیل نیروی شروع حرکت مخلوط معمولا بیشتر از بقیه قرائت ها است. قرائت های بعدی معمولا مشابه هستند زیرا مقدار گشتاوری هستند که مخلوط در حال حرکت بوده است. پس از اتمام اندازه گیری گشتاور در یک درجه حرارت خاص، باید مخلوط موجود در سطل خارج شده و دوباره گرم شود تا در دمای پایین دیگری که در کوره ها مورد نیاز است، گرم شود. سپس روش مشابه تکرار می شود تا تمام دمای برنامه ریزی شده آزمایش شود. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از پیرشدگی زیاد قیر، دمای آزمون باید از بالا به پایین باشد.

۶-۳- تعیین محدوده گشتاور معیار

به منظور ارائه محدوده گشتاور معیار مخلوط با قیر خالص چندین آزمایش در محدوده دمای ۱۲۰ الی ۱۸۰ درجه (وابسته به طرح) برای قیرهای پایه مطابق با شکل ۱۲ انجام می شود.



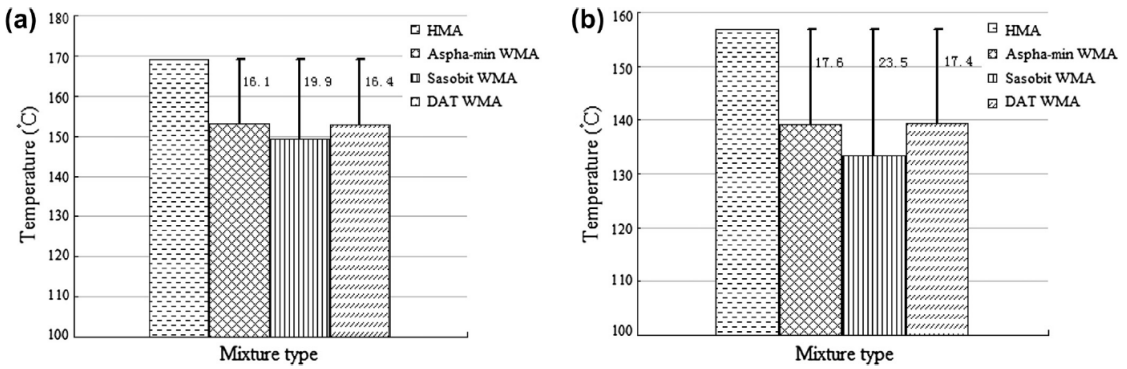
شکل ۱۲- برازش مدل های رگرسیونی گشتاور-دما جهت تعیین محدوده گشتاور معیار مخلوط[۱۴]

۶-۴- نحوه ارزیابی کارایی و تعیین دمای اختلاط و تراکم

دامنه های دمایی مخلوط آسفالتی داغ و سه نوع مخلوط آسفالتی وارم میکس برای ارزیابی کاهش دمای تولید مخلوط های وارم میکس مطابق با جدول ۳-۳ تعیین می شود. در مقایسه با مخلوط آسفالتی داغ، دمای اختلاط و تراکم انواع مخلوط های وارم میکس حداقل ۱۶ درجه سانتیگراد کاهش می یابد.

جدول ۱- دامنه دمایی جهت اختلاط و تراکم مخلوط های حاوی افزودنی های مختلف وارم میکس [۱۴]

نوع مخلوط	محدوده دمای محاسبه شده جهت اختلاط(سانتیگراد)			محدوده دمای محاسبه شده جهت تراکم(سانتیگراد)		
	حد بالا	حد پایین	حد متوسط	حد بالا	حد پایین	حد متوسط
HMA	۱۷۳/۳	۱۶۵/۱	۱۶۹/۲	۱۶۵/۰	۱۴۸/۶	۱۵۶/۸
Aspha-min WMA	۱۵۳/۴	۱۵۲/۷	۱۵۳/۱	۱۴۲/۷	۱۳۵/۶	۱۳۹/۲
Sasobit WMA	۱۵۱/۴	۱۴۷/۲	۱۴۹/۳	۱۴۲/۳	۱۲۴/۲	۱۳۳/۳
DAT WMA	۱۵۶/۷	۱۴۸/۹	۱۵۲/۸	۱۴۵/۵	۱۳۳/۳	۱۳۹/۴



شکل ۱۳- کاهش دمای اختلاط و تراکم مخلوط های وارم میکس شده حاوی افزودنی های مختلف[۱۴]

نتایج نشان می دهد که دمای تعیین شده اختلاط و تراکم مخلوط وارم میکس بسیار واقع بینانه تر بوده و دامنه کاهش تقریبا با مخلوط های وارم میکس با قیر اصلاح شده مطابقت دارد. بنابراین روش استفاده از دامنه گشتاور برای تعیین دمای اختلاط و تراکم مخلوط های وارم میکس و دمای معادل گشتاور منطقی است(شکل ۱۳). این روش مشابه با استفاده از منحنی دمای معادل است.

۷- جمع بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به نکات مطرح شده در این مطالعه، موارد زیر مختصرا به عنوان جمع بندی ارائه می گردد:

- از طریق مقایسه خواص حجمی مخلوط، کارایی و تراکم پذیری با سه روش ژیراتوری، استاتیکی و ضربه ای بررسی و روش ژیراتوری به عنوان روشی مناسب جهت بررسی کارایی و تراکم پذیری مشابه با حالت میدانی جهت تراکم مخلوط های آسفالتی توصیه شده است.
- مخلوط های با شاخص انرژی تراکم کمتر، ساخت پذیری بهتری دارند و ترجیح داده می شوند اما باید توجه داشت که چنانچه شاخص انرژی تراکم خیلی کم باشد معرف یک مخلوط وارونده بوده و باید از آن اجتناب نمود.
- استفاده از تعداد چرخش ژیراتوری جهت دستیابی به وزن مخصوص مورد نظر، شاخص مناسب جهت بررسی کارایی مخلوط می تواند باشد. همچنین استفاده از ویسکوزیته چرخشی در دماهای مختلف جهت بررسی کارایی قیرهای حاوی افزودنی نظیر پودرلاستیک نیز توصیه شده است.
- روش استفاده از دامنه گشتاور هنگام استفاده از دستگاه سنجش کارایی، جهت تعیین دمای اختلاط و تراکم مخلوط های وارم میکس و دمای معادل گشتاور نتایج قابل قبولی ارائه می دهد.

مراجع

[1] Bennert, T., Reinke, G., Mogawer, W., & Mooney, K. (2010). Assessment of workability and compactability of warm-mix asphalt. *Transportation research record*, *2180*(1), 36-47.
[2] Yu, H., Leng, Z., Zhou, Z., Shih, K., Xiao, F., & Gao, Z. (2017). Optimization of preparation procedure of liquid warm mix additive modified asphalt rubber. *Journal of cleaner production*, *141*, 336-345.
[3] Wang, F., Li, N., Hoff, I., Wu, S., Li, J., Barbieri, D. M., & Zhang, L. (2020). Characteristics of VOCs generated during production and construction of an asphalt pavement. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *87*, 102517.

[4] Yang, X., You, Z., Perram, D., Hand, D., Ahmed, Z., Wei, W., & Luo, S. (2019). Emission analysis of recycled tire rubber modified asphalt in hot and warm mix conditions. *Journal of hazardous materials*, *365*, 942-951.
[5] Oliveira, J. R., Silva, H. M., Abreu, L. P., & Fernandes, S. R. (2013). Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures. *Journal of Cleaner Production*, *41*, 15-22.
[6] Rodríguez-Alloza, A. M., Gallego, J., Pérez, I., Bonati, A., & Giuliani, F. (2014). High and low temperature properties of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives. *Construction and Building Materials*, *53*, 460-466.
[7] Mo, L., Li, X., Fang, X., Huurman, M., & Wu, S. (2012). Laboratory investigation of compaction characteristics and performance of warm mix asphalt containing chemical additives. *Construction and Building Materials*, *37*, 239-247.
[8] Bennert, T., Reinke, G., Mogawer, W., & Mooney, K. (2010). Assessment of workability and compactability of warm-mix asphalt. *Transportation research record*, *2180*(1), 36-47.
[9] WU, C. F., ZENG, M. L., WANG, M. W., & Xia, Y. (2010). Determination of the mixing and compaction temperatures for warm mix asphalt with Sasobit. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, *37*(8), 1-5.
[10] Orosa, P., Pasandín, A. R., & Pérez, I. (2021). Compaction and volumetric analysis of cold in-place recycled asphalt mixtures prepared using gyratory, static, and impact procedures. *Construction and Building Materials*, *296*, 123620.
[11] Teh, S. Y., & Hamzah, M. O. (2019). Asphalt mixture workability and effects of long-term conditioning methods on moisture damage susceptibility and performance of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, *207*, 316-328.
[12] Yu, H., Deng, G., Zhang, Z., Zhu, M., Gong, M., & Oeser, M. (2021). Workability of rubberized asphalt from a perspective of particle effect. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *91*, 102712.
[13] Yu, H., Leng, Z., Dong, Z., Tan, Z., Guo, F., & Yan, J. (2018). Workability and mechanical property characterization of asphalt rubber mixtures modified with various warm mix asphalt additives. *Construction and Building Materials*, *175*, 392-401.
[14] Wang, C., Hao, P., Ruan, F., Zhang, X., & Adhikari, S. (2013). Determination of the production temperature of warm mix asphalt by workability test. *Construction and Building Materials*, *48*, 1165-1170.