

# ارزیابی مشخصات مخلوط‌های آسفالتی گرم کف قیری تولید شده با استفاده از دو نوع قیر (WMA-Foam)

لیلا هاشمیان، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

امیر کاوسی (نویسنده مسئول)، دانشیار گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

Email: Kavussia@modares.ac.ir

## چکیده

استفاده از کف قیر به منظور کاهش کندروانی قیر و اختلاط سهل تر آن با مصالح دانه‌ای سال‌ها در مخلوط‌های سرد کاربرد داشته است؛ ولیکن در سال‌های اخیر، نوع جدیدی از مخلوط‌ها با بکارگیری این تکنولوژی معرفی شده‌اند که کیفیتی مشابه با مخلوط آسفالت داغ مشابه را دارا می‌باشند و با نام مخلوط‌های گرم کف قیری شناخته می‌شوند. برای این مخلوط‌ها که در دمای کمتری نسبت به مخلوط داغ مشابه تهیه و متراکم می‌شوند، هنوز روش طرح اختلاط مشخصی وجود ندارد. نگرانی عمده در مورد جایگزین کردن مخلوط‌های گرم کف قیری با آسفالت داغ مشابه، مقاومت کمتر در برابر تغییر شکل و تاثیر رطوبت به دلیل کاهش سختی قیر و احتمال عدم چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها در اثر وجود حرارت کمتر در زمان اختلاط و تراکم می‌باشد. در این تحقیق، با بکارگیری روش ترکیب دو نوع قیر شل و سفت که قیر اول بصورت خالص و گرم شده به مصالح درشت دانه و قیر دوم بصورت کف قیر به کل مخلوط اضافه می‌شود، نمونه‌های گرم کف قیری در دماهای متفاوت تولید و متراکم شدند. ویژگی‌های ظاهری و مقاومتی نمونه‌ها با استفاده از روش مارشال تعیین و با محدوده مشخصات آسفالت داغ مشابه مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که امکان کاهش دمای اختلاط با بکارگیری این روش تا حد ۳۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به آسفالت داغ مشابه فراهم می‌شود. همچنین درصد فضای خالی مخلوط به عنوان موثرترین پارامتر به منظور تعیین محدوده دمای اختلاط و تراکم شناخته شد. به منظور بررسی حساسیت رطوبتی نمونه‌ها از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی نمونه‌های خشک و اشباع استفاده شد. نتایج نشان داد که حساسیت رطوبتی نمونه‌های گرم کف قیری از محدوده تعیین شده برای آسفالت داغ مشابه بیشتر می‌باشد؛ ولیکن استفاده از افزودنی‌های ضد‌عریان‌شدگی تا حد مطلوبی این نقص را جبران می‌سازد. نتایج آزمایش مقاومت در برابر شیار افتادگی چرخ نیز نشان داد که با وجود بیشتر بودن تغییر شکل نمونه‌های گرم نسبت به نمونه‌های داغ مشابه، با افزودن پودر آهک شکفته می‌توان تغییر شکل مخلوط را تا حد آسفالت داغ مشابه کاهش داد. نهایتاً از نتایج بدست آمده، روشی برای طرح اختلاط مخلوط‌های گرم کف قیری ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت گرم، کف قیر، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت در برابر تغییر شکل، حساسیت رطوبتی، طرح اختلاط.

۱. مقدمه

- کاهش شدت اکسیدشدن قیر: کاهش دمای اختلاط تا حد زیادی از اکسیدشدن قیر ممانعت به عمل می‌آورد که این امر باعث افزایش عمر خستگی و دوام مخلوط می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهند که با افزایش دمای اختلاط از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، به ازای افزایش هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت اکسیدشدن قیر دوبرابر خواهد شد [۶]؛ بنابراین کاهش ۳۰ درجه سانتی‌گراد دمای اختلاط، در افزایش عمر خستگی تاثیر بسزایی خواهد داشت. به منظور کاهش کندروانی قیر روش‌های متفاوتی به کار گرفته می‌شود که می‌توان عمدتاً آنها را به روش‌های تبدیل قیر به صورت کف قیر، استفاده از موادی نظیر افزودنی‌های کف‌زا، موم‌های مصنوعی، افزودنی‌های شیمیایی و قیرهای امولسیون ویژه تقسیم‌بندی نمود [۳].

تاکنون تحقیقات بسیاری جهت تدوین روشی برای طرح اختلاط WMA انجام شده است که هنوز هم در دست بررسی هستند [۷]. از جمله مواردی که در مورد طرح اختلاط این نوع مخلوط‌ها باید در نظر گرفته شود انتخاب صحیح دمای تولید و تراکم مخلوط است چراکه این دماها باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که کیفیت مخلوط‌های WMA با HMA مشابه برابری کند. از این رو، به منظور ارائه طرح اختلاط مناسب، دماهای تولید و تراکم مخلوط در آزمایشگاه باید به نحوی انتخاب شوند که در شرایط واقعی نیز بتوان برای تولید و تراکم مخلوط از آنها استفاده نمود [۸].

در میان انواع روش‌های تولید مخلوط‌های WMA، روش تبدیل قیر به کف تنها روشی است که برای تولید، نیاز به هیچ‌گونه افزودنی نداشته و در این روش فقط از تغییر فیزیکی قیر به کف قیر استفاده می‌شود که این تغییر باعث کاهش چشمگیر کندروانی قیر برای مدت کوتاهی شده و امکان اختلاط آن با مصالح را در دمایی کمتر از دمای تولید HMA میسر می‌سازد. پس از بین رفتن کف، قیری که روی سنگدانه‌ها را پوشانده‌است، بصورت اولیه خود باز می‌گردد [۹].

در این تحقیق به منظور تولید مخلوط آسفالت گرم کف قیری، از روش ترکیب دو نوع قیر با کندروانی متفاوت استفاده شده‌است که در ذیل تشریح شده‌است.

مخلوط‌های آسفالتی عمدتاً به دو گروه سرد (CMA) و داغ (HMA) تقسیم می‌شوند که هرکدام بنا بر ویژگی‌های متمایز خود، در روسازی‌های آسفالتی موارد کاربرد خاصی را دارا می‌باشند. تاکنون مخلوط‌های آسفالت داغ بیشترین استفاده را در قشر رویه راه‌های با ترافیک متوسط تا سنگین و مخلوط‌های سرد بیشترین کاربرد را به عنوان رویه در راه‌های با ترافیک سبک و یا اساس تثبیتی به خود اختصاص داده‌اند. نسل جدیدی از مخلوط‌های آسفالتی که می‌توان گروه سوم این دسته‌بندی قلمداد نمود با نام مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) شناخته می‌شوند.

مخلوط‌های WMA با کیفیتی مشابه و برابر با مخلوط‌های HMA، اما در درجه حرارتی پایین‌تر (حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد کمتر) تولید می‌شوند و بنابراین به لحاظ کاربردی، شاید در روسازی‌های انعطاف‌پذیر در جایگاهی یکسان با مخلوط‌های HMA قرار گیرند.

اصل کلی تولید WMA بر پایه کاهش کندروانی قیر به منظور امکان اختلاط آن با مصالح دانه‌ای در درجه حرارت کمتر از HMA استوار است که این امر مزایای بسیاری را به دنبال دارد و به طور خلاصه می‌توان از اهم آنها به موارد زیر اشاره نمود:

- کاهش مصرف انرژی: به دلیل کاهش مصرف سوخت، کاهش فرسایش کارخانه آسفالت و افزایش راندمان تولید، کاهش مصرف انرژی تا حد ۳۵ درصد گزارش شده‌است [۱].

- کاهش تولید آلاینده‌ها: دودها و گرد و غبار تولید شده در فرآیند تولید آسفالت داغ برای سلامت انسان و محیط زیست بسیار مضر تشخیص داده شده‌اند [۲]. تولید WMA امکان کاهش این آلاینده‌ها را تا حد مجاز برای حفظ محیط زیست فراهم می‌کند [۳ و ۴].

- افزایش کارایی: کاهش کندروانی قیر، باعث افزایش کارایی مخلوط و در نتیجه تراکم‌پذیری بهتر و اجرای آسان‌تر می‌شود که این امر، امکان اجرا در شرایط آب و هوایی سرد و امکان افزایش فواصل حمل آسفالت را ممکن می‌سازد [۵].

در برابر ترک خوردگی‌های حرارتی مخلوط می‌شود [۱۲]. نتایج آزمایشات خستگی نیز نشان داد که عمر خستگی این نوع مخلوط‌های WMA عموماً از مخلوط‌های HMA مشابه کمی بیشتر می‌باشد [۱۳].

### ۳. روش تحقیق

در این تحقیق، به منظور دستیابی به یک روش طرح اختلاط مناسب برای مخلوط WMA-Foam، در ابتدا به تعیین روشی برای دستیابی به درجه حرارت‌های مناسب تولید و تراکم پرداخته شد. به این منظور، با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال، ابتدا اقدام به تعیین درصد قیر بهینه مخلوط HMA مشابه شد و با استفاده از آن، مخلوط‌های WMA-Foam در درجه حرارت‌های مختلف تولید و تراکم شدند و ویژگی‌های ظاهری و مقاومتی آنها بدست آمد. از نتایج بدست آمده، محدوده درجه حرارت قابل قبول اختلاط و تراکم نمونه‌های WMA-Foam تعیین شد.

با توجه به نتایج آزمایشات مذکور در بند ۲ و از آنجا که عمدتاً ارزیابی مقاومت مخلوط‌ها در برابر رطوبت با آزمایش کشش غیرمستقیم و ارزیابی مقاومت در برابر تغییر شکل با آزمایش شیار افتادگی چرخ صورت می‌گیرند [۱۱ و ۳]، لذا در مرحله بعدی، به منظور بررسی حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر تغییر شکل مخلوط‌های WMA-Foam، اقدام به انجام آزمایشات مقاومت کششی غیرمستقیم (AASHTO T2۸۳) و شیار افتادگی چرخ (EN ۱۲۶۹۷-۲۲) بر روی نمونه‌های WMA-Foam تولید شده در درجه حرارت‌های اختلاط و تراکم مناسب گردید. نهایتاً تاثیر افزودنی‌های پودر آهک شکفته و یک نوع افزودنی مایع بر ویژگی‌های نمونه‌های WMA-Foam و نحوه تاثیر آنها در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

### ۳-۱ انتخاب سنگدانه‌ها

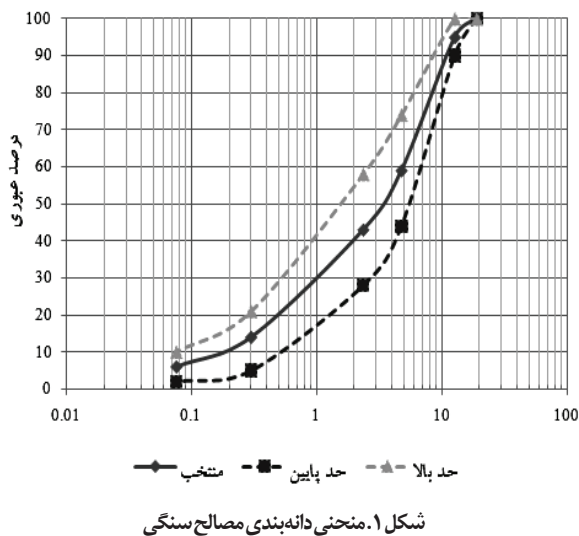
مصالح سنگدانه‌ای از مخازن سرد کارخانه آسفالت آکام شن واقع

## ۲. مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری تولید شده با استفاده از دو نوع قیر (WMA-Foam)

در این روش برای ساخت مخلوط از ترکیب یک نوع قیر شل (با درجه نفوذ حداقل ۲۰۰) و یک نوع قیر سفت (با درجه نفوذ بین ۱۰ تا ۱۰۰) استفاده می‌شود. در مرحله اول، مصالح سنگی درشت دانه (بزرگ‌تر از ۴ میلی‌متر) با قیر شل به صورت مایع پوشش داده شده و در مرحله بعد قیر سفت به صورت کف قیر به کل مصالح اضافه می‌شود. علت استفاده از قیر شل، اطمینان کامل از پوشش مصالح درشت دانه توسط کف قیر عنوان شده است و معمولاً ۲۰ الی ۳۰ درصد قیر کل مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد. اما تعیین درصد نهایی هر کدام از قیرهای شل و سفت براساس تامین درجه نفوذ نهایی قیر مورد نظر مخلوط و پوشش مصالح درشت دانه تعیین می‌شود [۱۰].

از جمله مشکلات عمده‌ای که در جایگزین کردن آسفالت گرم کف قیری با HMA می‌توان اشاره نمود، بیشتر بودن حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر تغییر شکل این نوع مخلوط‌ها نسبت به HMA مشابه است. دلیل بیشتر بودن حساسیت رطوبتی مخلوط را می‌توان کاهش درجه حرارت تولید مخلوط و امکان عدم خشک شدن کامل سنگدانه‌ها و نیز نرم‌تر بودن قیر به دلیل کاهش سختی آن در حین فرآیند اختلاط و تراکم عنوان کرد. همچنین کاهش مقاومت در برابر تغییر شکل را نیز می‌توان به دلیل کاهش سختی قیر به دلیل کاهش فرآیند اکسیداسیون آن قلمداد نمود. از اینرو کنترل این دو پارامتر و اصلاح آنها در صورت نیاز توسط افزودنی‌های مناسب در مرحله طرح اختلاط اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد [۳].

نتایج آزمایشات تحقیقاتی روی مخلوط‌های WMA تولید شده با استفاده از تکنولوژی کف قیر نشان داد که تفاوت عمده‌ای بین مدول دینامیکی مخلوط‌های WMA و HMA مشابه وجود ندارد [۱۱]. بررسی ترک‌های ناشی از تغییرات درجه حرارت بر روی نمونه‌های WMA و HMA مشابه نیز نشان داد که استفاده از این تکنولوژی باعث بهبود مقاومت



### ۲-۳ انتخاب قیر

به منظور تولید نمونه های HMA، از قیر ۶۰-۷۰ و برای تولید آسفالت WMA-Foam با استفاده از دو نوع قیر، از قیر ۵۰-۴۰ به عنوان قیر سفت (کف قیر) و از قیر ۴. V.B. به عنوان قیر شل استفاده شد. نتایج آزمایشات انجام شده بر روی این قیرها در جداول ۳ و ۴ آورده شده است

در منطقه شهریار در غرب تهران انتخاب شد. این مصالح از نوع رودخانه ای بوده و عمدتاً از جنس سیلیس می باشند. دانه بندی مصالح بر اساس حد وسط منحنی های دانه بندی شماره ۴ نشریه ۱۰۱ [۱۴] مختص به دانه بندی قشر توپکا انتخاب شد (شکل ۱). به منظور افزایش دقت آزمایشات، دانه بندی منتخب برای تمام مخلوط های داغ و گرم با الک کردن و توزین مصالح عبوری از هر الک، مطابق جدول ۱ کاملاً یکسان در نظر گرفته شد.

نتایج آزمایشات مرغوبیت مصالح سنگی و نیز وزن مخصوص و جذب آب مصالح در جدول ۲ آورده شده است. ملاحظه می شود که جذب آب مصالح ریزدانه کمی از محدوده تعیین شده در مشخصات بیشتر می باشد.

جدول ۱. درصد های وزنی عبوری مصالح سنگی از الک

اندازه الک میلی متر	درصد وزنی مصالح عبوری		
	منتخب	حد بالا	حد پایین
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۷	۹۵	۱۰۰	۹۰
۴/۷۶	۵۹	۷۴	۴۴
۲/۳۶	۴۳	۵۸	۲۸
۰/۳	۱۴	۲۱	۵
۰/۰۷۶	۶	۱۰	۲

جدول ۲. نتایج آزمایش های مصالح سنگی

آزمایش	استاندارد	نتیجه آزمایش	محدوده مشخصات
سایش لوس آنجلس	AASHTO T-۹۶	۱۴ درصد	حداکثر ۳۰ درصد
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم	AASHTO T-۱۰۴	ریزدانه: ۰/۵ درصد	حداکثر ۱۲ درصد
		درشت دانه: ۰/۲ درصد	حداکثر ۸ درصد
شکستگی در یک وجه و بیشتر	ASTM D-۵۸۲۱	۹۹ درصد	-----
شکستگی در دو وجه و بیشتر	ASTM D-۵۸۲۱	۹۷ درصد	حداکثر ۹۰ درصد
چسبندگی قیر به مصالح	AASHTO-T۱۸۲	بیش از ۹۵ درصد	حداقل ۹۵ درصد
تطویل و تورق	(BS-۸۱۲)	-----	-----
		۲۰ درصد	-----
ارزش ماسه ای مصالح ریزدانه (SE)	AASHTO T۱۷۶	۶۰ درصد	حداقل ۵۰ درصد
درصد جذب آب مصالح مانده روی الک ۸		۲/۵۴	۲/۵
درصد جذب آب مصالح عبوری از الک نمره ۸ و مانده روی الک ۲۰۰		۳/۱۴	۲/۵
وزن مخصوص حقیقی کل مخلوط مصالح سنگی		۲/۵۳	-----

ارزیابی مشخصات مخلوط‌های آسفالتی گرم کف قیری تولید شده...

جدول ۳. مشخصات قیرهای ۶۰-۷۰ و ۵۰-۴۰

RTFOT	لعاب نازک قیر (TFO)		ویسکوزیته کینماتیک (cSt) در دماهای:			کشش در ۲۵°C (cm)	نقطه اشتعال در ۲۵°C	وزن مخصوص در ۲۵°C	نقطه نرمی °C	درجه نفوذ در ۲۵°C (۰/۱ mm)	آزمایش
	افت وزنی (درصد)	نفوذ باقیمانده	افت وزنی (درصد)	۱۳۵°C	۱۲۰°C						
ASTM D1۸۷۲	ASTM D1۷۵۴		ASTM D1۷۰			ASTM D1۱۳	ASTM D۹۲	ASTM D۷۰	ASTM D۳۶	ASTM D۵	استاندارد نوع قیر
۰/۳	۴۰	۰/۰۲	۳۹۶/۳	۸۳۷/۱	۱۰۸۲	<۱۰۰	۳۱۹	۱/۰۱۷	۵۰	۶۰	۶۰-۷۰
----	۳۸/۳	۰/۰۰	----	----	----	<۱۰۰	۳۴۲	۱/۰۲	۵۳/۹	۴۴/۱	۴۰-۵۰

جدول ۴. مشخصات قیر V.B. مورد استفاده

ویسکوزیته کینماتیک (cSt) در دماهای:				نقطه نرمی °C	درجه نفوذ در ۲۵°C (۰/۱ mm)	آزمایش
۱۳۰°C	۱۲۰°C	۱۱۰°C	۱۰۰°C			
ASTM D1۷۰				ASTM D۳۶	ASTM D۵	روش استاندارد
۸۱/۷	۲۲۶	۳۸۰	۶۶۷/۹	۳۹/۵	۲۶۰	مشخصات

۳-۳ بررسی خصوصیات کف قیر

در آزمایشگاه، پس از داغ کردن قیر تا دمای ۱۶۰ الی ۱۸۰ درجه سانتی گراد و تبدیل آن به کف قیر، دو پارامتر مهم اندازه گیری و ثبت می شوند که عبارتند از: نسبت انبساط و نیمه عمر. این دو مشخصه کف قیر را بصورت زیر می توان تعریف کرد [۸]:

- نسبت انبساط: حجم حداکثر کف قیر به حجم اولیه قیر که در حقیقت شاخصی است از کاهش کندروانی قیر و افزایش قابلیت اختلاط کف قیر با مصالح، نسبت به قیر عادی.

- نیمه عمر: این شاخص که با واحد ثانیه اندازه گیری می شود، زمان رسیدن حجم کف به نصف حجم حداکثر است که نشان دهنده میزان پایداری کف قیر و زمان موجود برای اختلاط

آن با مصالح می باشد.

با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی تولید کف قیر WLB1۰ مشخصات اصلی کف قیر تولید شده با قیر ۴۰-۵۰ مطابق شکل ۲ بدست آمد. دمای قیر در هنگام تولید کف ۱۷۰ درجه سانتی گراد انتخاب شد. با توجه به شکل ۲، با افزایش میزان آب از ۱/۵ درصد به ۲ درصد، نسبت انبساط افزایش زیادی پیدا کرده است اما با افزایش بیشتر مقدار آب تولید کف قیر، افزایش قابل ملاحظه ای در نسبت انبساط مشاهده نمی شود؛ حال آنکه نیمه عمر کف قیر با افزایش میزان آب از ۲ درصد دچار افت قابل ملاحظه ای می شود. با توجه به اینکه لازم است درصد آبی برای تولید کف قیر انتخاب شود که مقدار مناسبی از هر دوی این پارامترها را بدست دهد،

#### ۴-۲ تعیین درصد‌های اختلاط قیرهای شل و سفت

به منظور تعیین درصد مناسب ترکیب قیر شل و سفت، از انجام آزمایش درجه نفوذ بر روی درصد‌های متفاوت (در حالت مایع) استفاده شد. درصد‌های قیرهای شل و سفت در ابتدا بر اساس مقادیر توصیه شده در بند ۲ به ترتیب ۳۰ و ۷۰ درصد قیر کل مخلوط انتخاب شدند. با توجه به اینکه هدف دستیابی به درجه نفوذ قیر مورد استفاده در مخلوط HMA کنترلی یعنی قیر ۷۰-۶۰ بود، این درصد‌ها برای رسیدن به درجه نفوذ مشابه با قیر مذکور اصلاح شدند. نتایج آزمایش درجه نفوذ در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. درجه نفوذ قیرهای ترکیبی (۱/ میلی متر)

درصد قیر شل (V.B)	درصد قیر سفت (۵۰-۴۰)	درجه نفوذ قیر ترکیبی
۳۰	۷۰	۸۶
۱۵	۸۵	۶۲

بر اساس نتایج بدست آمده از جدول ۶، درجه نفوذ قیر حاصل از ترکیب ۱۵ درصد قیر شل و ۸۵ درصد قیر سفت برابر با ۶۲ و تقریباً معادل با قیر ۷۰-۶۰ انتخابی برای تولید مخلوط HMA بدست آمد، لذا این مقادیر برای تولید WMA-Foam انتخاب شدند. به منظور اطمینان از پوشش مصالح درشت دانه توسط این مقدار قیر شل، چگونگی پوشش مصالح بزرگتر از الک ۴ به طور دقیق مورد کنترل قرار گرفت. کنترل چشمی پوشش مصالح درشت دانه با قیر شل نیز مناسب بودن این میزان قیر را برای تولید مخلوط مورد تایید قرار داد.

در نهایت، با توجه به انتخاب درصد قیر کل مناسب برای تولید مخلوط‌ها برابر با ۵/۸ درصد وزنی کل مخلوط، درصد قیر شل برابر با ۰/۸۷ درصد و درصد قیر سفت برابر با ۴/۹۳ درصد وزنی کل مخلوط انتخاب شد.

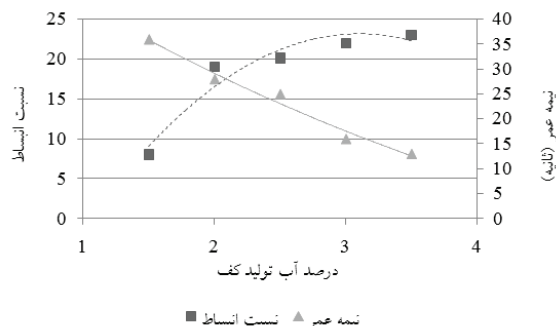
جدول ۵. نتایج آزمایشات مارشال مخلوط HMA

مخلوط HMA	وزن مخصوص بالک	فضای خالی (درصد)	VMA* (درصد)	VFB* (درصد)	مقاومت فشاری (kN)	روانی مارشال (میلی متر)	OBC* (درصد)
نتایج آزمایش	۲/۲۶	۴/۳	۱۵/۶	۷۳/۶	۱۲/۹	۳/۵	۵/۸
حدود مشخصات**	-	۳-۵	-	۶۵-۷۵	بیش از ۸	۲-۳/۵	-

\* VMA: فضای خالی مصالح سنگی، VFB: فضای خالی پر شده با قیر، OBC: درصد قیر بهینه

\*\* بر اساس نشریه ۱۰۱ [۱۴]

بنابراین انتخاب میزان آب به مقدار ۲ درصد وزنی کل قیر مخلوط، برای تولید کف قیر مناسب تشخیص داده شد.

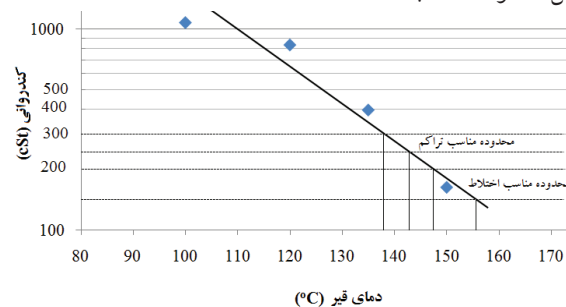


شکل ۲. نسبت اتساط و نیمه عمر کف قیر ۵۰-۴۰

#### ۴. طرح اختلاط

##### ۴-۱ تعیین درصد قیر مناسب

به منظور تعیین درصد قیر مناسب برای تولید مخلوط‌های WMA-Foam، ابتدا اقدام به تعیین درصد قیر مناسب تولید مخلوط HMA مشابه از روش مارشال شد. بر اساس نتایج چارت درجه حرارت- کندروانی (شکل ۳)، دماهای اختلاط و تراکم به ترتیب برابر با ۱۵۰ و ۱۴۰ درجه سانتی گراد انتخاب شدند. نتایج حاصل از آزمایشات مارشال مخلوط HMA در جدول ۵ خلاصه شده اند. قیر بهینه تولید مخلوط HMA برابر با ۵/۸ درصد وزنی کل مخلوط محاسبه شد.



شکل ۳. چارت درجه حرارت- کندروانی قیر ۷۰-۶۰

## ارزیابی مشخصات مخلوط‌های آسفالتی گرم کف قیری تولید شده...

آمدن مقادیر قابل قبول برای سایر پارامترها (با چشم‌پوشی از روانی مارشال)، درصد فضای خالی مخلوط از حد تعیین شده در مشخصات بیشتر بود. لذا می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که درصد فضای خالی نسبت به سایر پارامترها، حساسیت بیشتری به تغییرات دما داشته است و انتخاب دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های WMA-Foam بر اساس این معیار، می‌تواند منجر به انتخاب معقولی شود.

بر اساس نتایج جدول ۶، در تمام موارد، اعداد بدست آمده برای روانی مارشال نمونه‌ها از مشخصات لازم برای آسفالت HMA مشابه بیشتر بدست آمد که این مسئله ممکن است نشان دهنده کاهش سختی قیر مخلوط‌های WMA-Foam به جهت کمتر بودن دمای اختلاط و تراکم باشد. در نهایت با توجه به نتایج، دماهای قابل قبول برای اختلاط و تراکم مخلوط‌های WMA-Foam بدین ترتیب تعیین شدند: الف: دماهای اختلاط ۱۲۰ و تراکم ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، ب: دماهای اختلاط ۱۳۰، تراکم ۱۱۵ و ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد.

### ۵. بررسی حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر

#### تغییر شکل

همان‌گونه که در قسمت مقدمه ذکر شد، از نگرانی‌هایی که

### ۴-۳ انتخاب محدوده مناسب دماهای تولید و تراکم

مخلوط‌های WMA عموماً در دمایی بالاتر از نقطه جوش آب یا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شوند. بنابراین در این مرحله، دمای تولید ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان اولین دمای تولید انتخاب شد. بنابر نتایج بدست آمده، دمای اختلاط تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داده شد. به طور خلاصه ویژگی‌های این مخلوط‌ها در دماهای متفاوت اختلاط در جدول ۷ آورده شده است.

بر اساس ارقام مندرج در جدول ۷، نتایج مناسبی در درجه حرارت‌های اختلاط ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد بدست نیامد. ولیکن در دماهایی اختلاط و تراکم به ترتیب ۱۲۰ و ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، مشخصات بدست آمده برای مخلوط WMA-Foam بسیار به مشخصات مخلوط HMA مشابه نزدیک بود. در واقع، تمام نتایج به استثنای پارامتر روانی مارشال در محدوده تعیین شده در مشخصات قرار داشت. کاهش دمای تراکم به میزان کمتر در این درجه حرارت اختلاط، نتایج مناسبی را در بر نداشت.

با افزایش دمای اختلاط به ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، امکان کاهش دمای تراکم تا حد ۲۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای اختلاط فراهم شد. ولیکن با کاهش بیشتر دمای تراکم، با وجود بدست

جدول ۷. ویژگی‌های ظاهری مخلوط WMA-Foam تولید شده در دماهای ۱۰۰ الی ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد

روانی مارشال (میلی‌متر)	وزن مخصوص بالک	VFB* (درصد)	VMA* (درصد)	فضای خالی (درصد)	مقاومت فشاری (kN)	متوسط درجه حرارت تراکم (°C)	درجه حرارت اختلاط (°C)
۴/۱۰	۲/۲۱	۶۳/۳۰	۱۷/۶۸	۶/۴۹	۷/۱۳	۹۵	۱۰۰
۵/۲	۲/۲۲	۶۴/۲۸	۱۷/۶۶	۶/۲۳	۷/۴۸	۱۰۰	۱۱۰
۵/۹	۲/۲۱	۶۲/۶۶	۱۷/۸۳	۶/۶۶	۷/۷۸	۹۵	۱۲۰
۵/۲	۲/۲۵	۷۱/۱۵	۱۶/۰۵	۴/۶۲	۸/۷۵	۱۰۵	
۵/۹	۲/۲۳	۶۷/۰۴	۱۶/۸۶	۵/۵۶	۸/۹۵	۹۵	
۵/۳	۲/۲۶	۷۲/۹۶	۱۵/۷۱	۴/۲۵	۱۰/۱۲	۱۰۵	۱۳۰
۵/۲	۲/۲۷	۷۴/۴۲	۱۵/۴۵	۳/۹۵	۱۰/۳۳	۱۱۵	
۲-۳/۵	---	۶۵-۷۵	---	۳-۵	بیش از ۸		حدود مشخصات



از افزودنی‌های ضد عریان شدگی عبارت از پودر آهک شکفته و یک نوع افزودنی مایع (Wet-fix BE) و بررسی اثر آنها بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها شد. بر اساس مطالعات پیشین افزودن ۱/۵ یا حداکثر ۲ درصد پودر آهک شکفته به مخلوط‌های WMA تاثیر بسزایی در کاهش حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها خواهد داشت [۱۵]. مقدار متداول توصیه شده برای افزودنی‌های ضد عریان شدگی مایع نیز براساس توصیه شرکت سازنده بین ۰/۲ الی ۰/۵ درصد وزنی می‌باشد [۱۶]. با توجه به اختلاف زیاد نسبت TSR بدست آمده برای مخلوط WMA-Foam با حد تعیین شده در مشخصات (۸۰ درصد) از حداکثر مقادیر توصیه شده یعنی ۲ درصد پودر آهک شکفته (جایگزین ۲ درصد مصالح عبوری از الک ۲۰۰) و ۰/۵ درصد افزودنی مایع به عنوان افزودنی‌های ضد عریان شدگی استفاده شد. نتایج بدست آمده در جدول ۹ آورده شده‌اند.

بر اساس نتایج جدول ۹، هر دو نوع افزودنی تاثیر بسزایی در افزایش مقادیر TSR داشتند ولیکن افزودن ۲ درصد پودر آهک شکفته به مخلوط WMA-Foam نتایج بهتری به دنبال داشته است.

#### ۲-۵ بررسی مقاومت در برابر تغییر شکل

به منظور بررسی مقاومت مخلوط‌های WMA-Foam در برابر تغییر شکل، از آزمایش شیار افتادگی چرخ بر اساس استاندارد EN ۱۲۶۹۷-۲۲ استفاده شد. به این منظور، از مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده در آزمایشگاه، نمونه‌های مکعبی شکل با ابعاد ۳۰۵ در ۳۰۵ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر تهیه شدند. نمونه‌ها پس از قرارگیری

در مورد استفاده از مخلوط‌های WMA-Foam وجود دارد، حساسیت رطوبتی بیشتر و مقاومت در برابر تغییر شکل کمتر این مخلوط‌ها نسبت به HMA مشابه می‌باشد. بنابراین در این قسمت به بررسی این دو پارامتر پرداخته شده‌است.

#### ۱-۵ بررسی حساسیت رطوبتی

به منظور کنترل حساسیت رطوبتی نمونه‌های WMA-Foam، آزمایش کشش غیرمستقیم مطابق با استاندارد AASHTO T283 بر روی نمونه‌های خشک و اشباع انجام شد. دماهای اختلاط و تراکم نمونه‌ها نیز بر اساس نتایج قسمت قبل انتخاب شدند. نتایج حاصل از انجام این آزمایش را می‌توان در جدول ۸ مشاهده نمود.

جدول ۸. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌های WMA-Foam

ITS** (درصد)	ITS*(kPa)		درصد فضای خالی (درصد)		دمای تراکم (°C)	دمای اختلاط (°C)
	خشک	اشباع	خشک	اشباع		
۵۷	۴۹۰	۸۶۰	۷/۰۳	۷/۰۷	۱۱۵	۱۳۰
۵۲	۴۲۴	۸۲۰	۷/۶۸	۷/۶۲	۱۰۵	
۴۵	۳۱۵	۶۹۸	۷/۲۲	۷/۱۹	۱۰۵	۱۲۰

\*\*:مقاومت کششی غیرمستقیم

\*\*\*:نسبت مقاومت کششی = (مقاومت کششی اشباع تقسیم بر مقاومت کششی خشک)

نتایج بدست آمده از جدول ۸ نشان می‌دهند که مقادیر بدست آمده برای TSR نمونه‌های WMA-Foam از میزان تعیین شده در آیین نامه روسازی راه‌های ایران برای مخلوط‌های HMA (۸۰ درصد) کمتر می‌باشند. لذا در این مرحله، اقدام به استفاده

جدول ۹. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌های WMA-Foam حاوی افزودنی‌های ضد عریان شدگی

TSR (درصد)	ITS (kPa)		درصد فضای خالی		نوع و میزان افزودنی	دمای تراکم (°C)	دمای اختلاط (°C)
	خشک	اشباع	خشک	اشباع			
۹۹	۹۲۹	۹۳۸	۷/۰۱	۶/۹۷	۲ درصد پودر آهک شکفته	۱۱۵	۱۳۰
۹۸	۸۳۱	۸۴۶	۶/۹۸	۷/۰۴		۱۰۵	
۹۴	۷۷۷	۸۲۸	۷/۲۲	۷/۲۹	۰/۵ درصد افزودنی مایع	۱۰۵	۱۲۰
۷۷	۷۹۸	۱۰۴۰	۶/۱۸	۶/۲۱		۱۱۵	
۷۰	۷۱۱	۱۰۰۹	۷/۴۹	۷/۴۴		۱۰۵	
۷۷	۶۷۹	۸۸۳	۷/۵۶	۷/۵۷	۱۰۵	۱۲۰	



## ارزیابی مشخصات مخلوط‌های آسفالتی گرم کف قیری تولید شده...

نتایج جدول ۱۰ نشان می‌دهند که تفاوت زیادی مابین مقاومت شیار افتادگی چرخ نمونه‌های WMA-Foam و HMA کنترلی وجود دارد و عمق شیار در مخلوط‌های WMA تقریباً دو برابر مخلوط HMA مشابه می‌باشد، ولیکن با افزودن ۲ درصد پودر آهک شکفته به نمونه‌های مخلوط WMA نتایجی یکسان با مخلوط HMA مشابه بدست می‌آید. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که پودر آهک در افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل نمونه‌های WMA-Foam بسیار موثر بوده است.

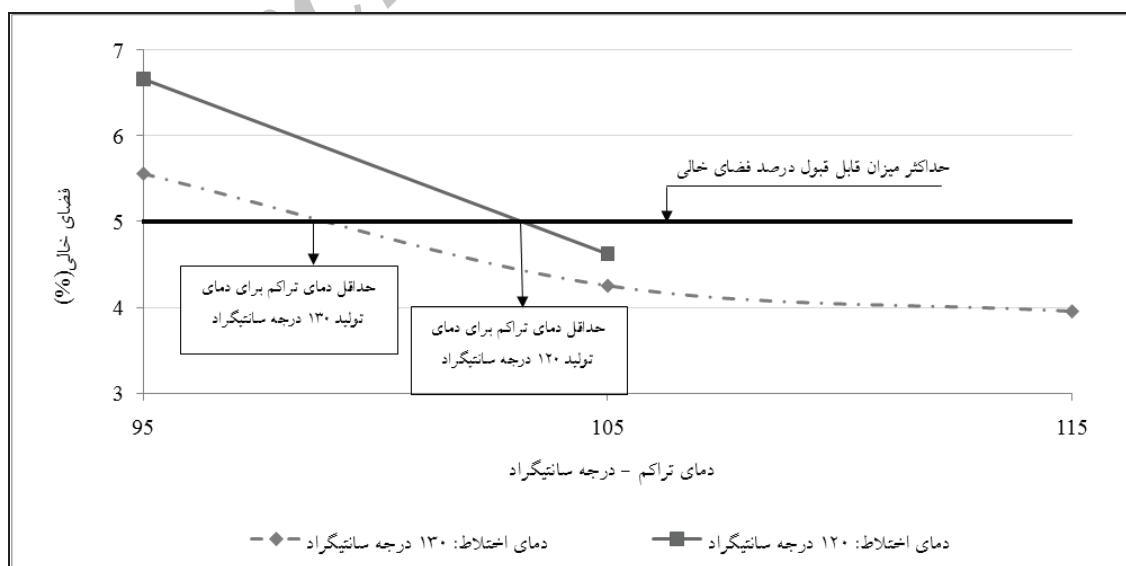
### ۶. بحث

بر اساس نتایج آزمایشات مارشال بر روی مخلوط WMA-Foam نشان داده شد که انتخاب دماهای اختلاط و تراکم مخلوط بر اساس درصد فضای خالی موجود در مخلوط می‌تواند مناسب باشد. شکل ۴ نشان می‌دهد که بر این اساس، محدوده‌ای قابل قبول برای دماهای اختلاط و تراکم بدست می‌آید و انتخاب دمای اختلاط بالاتر باعث امکان کاهش بیشتر دمای تراکم می‌گردد. انتخاب نهایی این دماها را می‌توان بر اساس شرایط واقعی اجرا و بررسی ارجحیت انتخاب دمای تولید کمتر یا تراکم پایین‌تر انجام داد.

در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت، به مدت ۵ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد (داخل محفظه دستگاه) قرار داده شده و به میزان ۱۲۰۰ سیکل تحت بارگذاری چرخ استاندارد آزمایش به صورت رفت و برگشتی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده به صورت عمق شیار افتادگی در پایان هر آزمایش گزارش شد. نمونه‌های WMA-Foam اصلاح شده (با ۲ درصد پودر آهک شکفته) در درجه حرارت‌های اختلاط و تراکم مناسب (بر اساس نتایج قبل)، تولید شدند و تحت شرایط استاندارد مورد آزمایش شیار افتادگی چرخ قرار گرفتند. در این مرحله، به منظور کنترل نتایج بدست آمده با HMA مشابه، نمونه‌هایی نیز از مخلوط HMA مشابه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. کلیه نتایج در جدول ۱۰ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱۰. نتایج آزمایش شیار افتادگی چرخ بر روی WMA-Foam اصلاح شده و HMA مشابه (بدون افزودنی)

نوع مخلوط	دمای اختلاط (°C)	دمای تراکم (°C)	عمق شیار افتادگی (mm)
HMA	۱۵۰	۱۴۵	۳/۶۰
WMA	۱۳۰	۱۱۵	۶/۲۰
	۱۲۰	۱۰۵	۶/۸۰
WMA + ۲ درصد پودر آهک شکفته	۱۳۰	۱۱۵	۳/۱۰
	۱۳۰	۱۰۵	۳/۶۰
	۱۲۰	۱۰۵	۳/۴۰



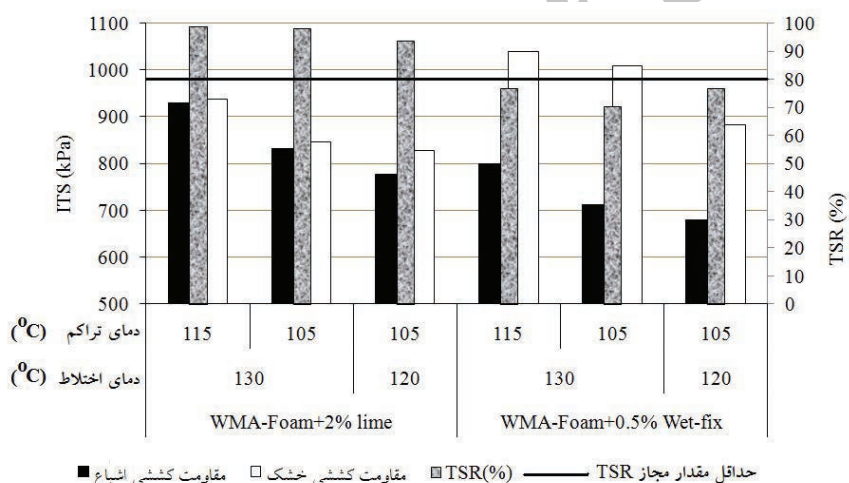
شکل ۴. تعیین محدوده دمای اختلاط و تراکم مخلوط WMA-Foam بر اساس درصد فضای خالی مخلوط

مقایسه مقادیر مقاومت کششی خشک و اشباع نمونه‌ها با یکدیگر در شکل ۴ نشان می‌دهد که کاهش تولید دمای اختلاط و تراکم منجر به کاهش مقاومت کششی نمونه‌های WMA-Foam شده‌است که این امر را می‌توان به نرم‌تر بودن قیر در دماهای اختلاط و تراکم قابل قبول، مقادیر TSR از حد مشخصات تعیین شده برای مخلوط‌های WMA-Foam، بیشتر بوده، ولیکن استفاده از افزودنی‌های ضدعریان شدگی در حد مطلوبی قادر به رفع این مشکل بوده‌است. در بین دو افزودنی بکار برده شده، ۲ درصد پودر آهک شکفته برتری داشته است. مقایسه مقادیر شیار افتادگی چرخ و نیز روانی مارشال نمونه‌های

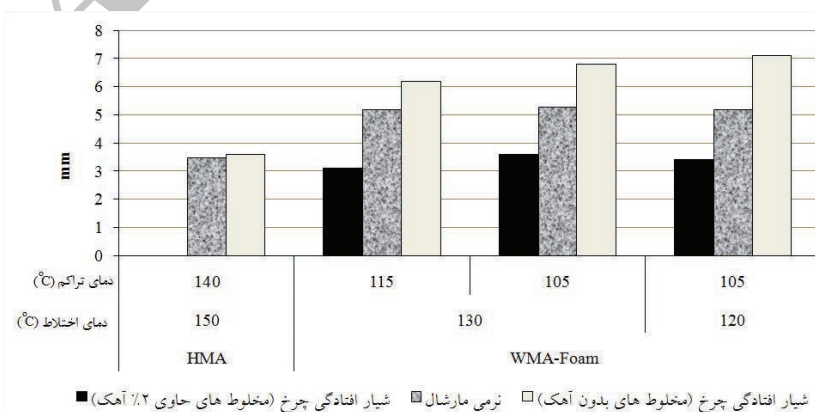
مقایسه مقادیر شیار افتادگی چرخ و نیز روانی مارشال نمونه‌های

مقایسه مقادیر شیار افتادگی چرخ و نیز روانی مارشال نمونه‌های

مقایسه مقادیر شیار افتادگی چرخ و نیز روانی مارشال نمونه‌های



شکل ۵. تعیین محدوده دمای اختلاط و تراکم مخلوط WMA-Foam بر اساس درصد فضای خالی مخلوط



شکل ۶. مقایسه مقادیر روانی مارشال و شیار افتادگی نمونه‌های مخلوط WMA-Foam و HMA مشابه

## ارزیابی مشخصات مخلوط‌های آسفالتی گرم کف قیری تولید شده...

و یک نوع قیر سفت بصورت کف قیر، امکان تولید مخلوط WMA-Foam با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از آسفالت داغ مشابه فراهم می‌آید.

- میزان درصد فضای خالی مخلوط بشدت تحت تاثیر دمای اختلاط است، لذا این پارامتر می‌تواند معیار مناسبی برای بهینه سازی دماهای اختلاط و تراکم مخلوط‌های WMA-Foam باشد.

- به منظور بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های WMA-Foam اقدام به انجام آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های خشک و اشباع شد. نتایج نشان داد کاهش دمای اختلاط و دمای تراکم باعث کاهش مقاومت کششی مخلوط می‌گردد. نتیجه این امر، افزایش حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها بود.

- استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی پودر آهک شکفته و افزودنی مایع مورد استفاده در این تحقیق، در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های WMA-Foam بسیار موثر بود.

- با انجام آزمایش شیار افتادگی چرخ بر روی نمونه‌های مخلوط‌های WMA-Foam حاوی پودر آهک و HMA مشابه بدون افزودنی، این نتیجه حاصل شد که مقاومت در برابر تغییر شکل دو مخلوط تقریباً یکسان است. مقایسه روانی مارشال نمونه‌های WMA-Foam بدون آهک با HMA مشابه نشان داد که تغییر شکل نمونه‌های WMA-Foam به طور محسوسی از نمونه‌های HMA بیشتر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از افزودنی‌های مناسبی نظیر پودر آهک می‌تواند در جبران این مشکل نیز موثر باشد.

### ۸. سپاسگزاری

بدینوسیله از همکاری سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران و زحمات بی‌دریغ مدیریت و مسئولان محترم آزمایشگاه قیر و آسفالت مرکز تحقیقات ژئوتکنیک و مقاومت مصالح شهرداری تهران، همچنین مدیریت محترم شرکت نفت جی که در راستای انجام این تحقیق نهایت پشتیبانی را نمودند، کمال تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

### ۱-۶ مراحل طرح اختلاط پیشنهادی

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات فوق‌الذکر، مراحل زیر جهت طرح اختلاط مخلوط‌های WMA-Foam تولید شده با دو نوع قیر پیشنهاد می‌شود:

ا. تعیین درصد قیر کل مخلوط با استفاده از طرح اختلاط مخلوط HMA مشابه.

ب. تعیین درصد‌های قیر شل و سفت با استفاده از آزمایش درجه نفوذ برای دستیابی به مشخصات قیر مشابه با مخلوط HMA کنترلی و بررسی دقیق پوششش مصالح درشت دانه پس از اختلاط با قیر شل (انتخاب قیر شل معادل با ۱۵ الی ۳۰ درصد وزنی کل قیر مخلوط).

ج. تعیین محدوده درجه حرارت مناسب تولید و تراکم مخلوط WMA-Foam بر اساس شاخص درصد فضای خالی مخلوط (انتخاب دمای اختلاط حدود ۲۰ الی ۳۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از HMA مشابه).

د. انتخاب درجه حرارت مناسب اختلاط و تراکم نهایی مخلوط WMA-Foam در محدوده بدست آمده از مرحله قبل بر اساس شرایط اجرایی.

ه. انجام آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی نمونه‌ها و کنترل حساسیت رطوبتی مخلوط WMA-Foam در دمای اختلاط و تراکم مورد نظر و تعیین درصد افزودنی‌های ضد عریان شدگی در صورت نیاز (ترجیحاً پودر آهک شکفته).

و. کنترل مقاومت مخلوط اصلاح شده در برابر تغییر شکل در دمای مذکور با استفاده از آزمایش شیار افتادگی چرخ، در صورت نیاز استفاده از افزودنی‌هایی موثر نظیر پودر آهک شکفته.

### ۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور ارائه روشی برای طرح اختلاط مخلوط‌های کف قیری، اقدام به تولید نمونه‌ها و تراکم آنها در دماهایی کمتر از دمای تولید HMA مشابه شد. با بررسی ویژگی‌های نمونه‌ها نتایج ذیل بدست آمد:

- با استفاده از روش ترکیب یک نوع قیر شل بصورت خالص

[9] Jenkins, K., Molenaar, A., Martin, V. and Groot J. (2002), "Foamed Asphalt Products Using Warmed Aggregates", Journal of Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol:71, U.S.A.

[10] Larsen, O. and Robertus, C. (2005), "Process and System for Production of a Warm Foam Mix Asphalt Composition", Patent No. 6,846,354 B2, U.S.A.

[11] Angelo, J. D., Harm, E., Bartosze, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R. and YeatonHuang, B. (2008), "Warm-Mix Asphalt: European Practice", Federal Highway Administration, US Department of Transportation (FHWA), Report No.FHWA-PL-08-007, USA, February.

[12] Hajj, E., Sebaaly, P. and Kasozi, A. (2009), "Laboratory Evaluation of WMA Mixture on Chism Street in Reno Nevada", University of Nevada Reno, USA.

[13] Corrigan, M., Paugh C., Gibson, N. and Kutay, M. (2007), "Warm Mix Asphalt Laboratory Characterization", Technical Working Group Meeting (WMA TWG), Baltimore, Maryland, USA, December.

۱۴- نشریه ۱۰۱ (۱۳۸۲)، "مشخصات فنی عمومی راه"، قوانین و مقررات معاونت امور فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری.

15- Hurley, G.C., Prowell, B. D. (2006), "Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt", Journal of Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol: 75, U.S.A., pp: 41-90.

16- AKZONOBEL (2009), "Product Information-Surficants- Wetfix BE", Akzo Nobel Surface Chemistry AB, Stenungsund, Sweden, Websit:<http://www.surfactants.akzonobel.com>.

۹. پانویس‌ها

- 1- Cold Mix Asphalt
- 2- Hot Mix Asphalt
- 3- Warm Mix Asphalt
- 4- Vacuum Bottom

۱۰. مراجع

[1] Cervarich, M.B. (2003), "Cooled and Ready to Serve?", Roads and Bridges Vol. 41, No. 9, pp 38-39.

[2] National Institute for Occupational Safety and Health (2000), "Hazard Review – Health Effects of Occupational Exposure to Asphalt", U.S.A.

[3] Kvasnak, A., Prowell, B., Hurley, G., West, R., Kreich, T., Osborn, L., Frank, B. and Peregrine, K. (2009), "Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies", Interim Report, Volume 3: Experimental Plan, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, U.S.A.

[4] Kristjansdottir, O., Muench, ST., Michael, L. and Burke, G. (2007), "Assessing the Potential for Warm Mix Asphalt Technology Adoption", Transportation Research Board, 86th Annual Meeting, Washington D.C., USA.

[5] Newcomb, D. (2007), "Warm Mix Asphalt Pavements – An Overview", Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol:84, Symposium Session: "Innovative Construction Practices", TX, U.S.A., March 11-14.

[6] Hunter, Robert N. (2003), "Asphalt in Road Construction", Thomas Telford Publishing, 2nd Publish, U.K.

[7] Bonaquist, R. (2009), "Issues With Design of Warm Mix Asphalt", Journal of Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol:86, Govremment Industry Forum, U.S.A., March 15-18.

[8] Prowell, B. D. and Hurley, G.C. (2007), "Warm Mix Asphalt: Best Practices", National Asphalt Paving Association, U.S.A, December.