

روشی برای طرح اختلاط و بررسی رفتار مخلوطهای کف قیری

لیلا هاشمیان^{۱*}، امیر کاوسی^۲

۱- دانشجوی دکترای عمران، راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار بخش مهندسی عمران، گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

l.hashemian@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: مرداد ۱۳۸۳، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۶)

چکیده - آسفالت کف قیری را می توان حاصل اختلاط کف قیر با مصالح دانه ای در دما و رطوبت عادی دانست. کف قیر، قیر حجیم شده ای است که از تزریق آب سرد و هوای فشرده به درون قیر داغ تولید می شود. نتیجه این عمل کاهش بسیار زیاد ویسکوزیته قیر و فراهم آوردن امکان ترکیب آن با مصالح در دما و رطوبت طبیعی آنها است و لذا این نوع مخلوطها را می توان جزو خانواده مخلوطهای آسفالت سرد به حساب آورد. با وجود مزایای متعدد مخلوطهای کف قیری، در حال حاضر طرح اختلاط استاندارد برای آنها وجود ندارد. در این تحقیق به منظور به دست آوردن طرح اختلاط مناسب آزمایشگاهی نمونه های کف قیری در آزمایشگاه ساخته و برای بررسی خواص مکانیکی نمونه ها از آزمایشهای کشش غیرمستقیم و مارشال استفاده شد. پس از تعیین قیر بهینه، به منظور بررسی نقش افزودن فیبرهای سیمان و آهک، نمونه هایی حاوی درصدهایی از هر یک از این فیبرها و همچنین به کارگیری ترکیبی از آنها در مخلوط ساخته شد. به دلیل عدم امکان اندازه گیری تخلخل نمونه ها با روشهای متداول برای آسفالت گرم (نظیر روش رایس)، از روشی غیرمستقیم برای بررسی تخلخل نمونه ها استفاده شد. آزمایش مقاومت فشاری نیز بر روی نمونه ها انجام شد و از بررسی نتایج آن، رابطه ای بین مقاومت کششی خشک و مقاومت فشاری به دست آمد.

کلید واژگان: کف قیر، نسبت مارشال، کشش غیرمستقیم، مقاومت فشاری، نفوذپذیری.

۱- مقدمه

در ساختار راه، ضمن حفظ کیفیت و تأمین خصوصیات مورد نیاز و نیز دستیابی به ظرفیت باربری دلخواه و مناسب بر اساس مشخصات روسازی طرح - که از مهمترین نتایج آن حذف حمل و نقلهای اضافی و در نتیجه صرفه جویی در زمان و هزینه تمام شده ساخت راه است - توجه بیشتری به استفاده از این روشها معطوف شده است. به طور کلی هدف از تثبیت مواد با قیر در روشهای اختلاط سرد، افزایش مقاومت برشی (چسبندگی) و مقاومت در برابر خستگی و رطوبت است.

اصلاح خاک ضعیف بستر، تثبیت زیراساس و اساس با استفاده از مواد افزودنی مانند سیمان، آهک و قیر به منظور دستیابی به روسازی با مشخصات بهتر، در کشور ما همواره مرسوم بوده است. امروز با توجه به پیشرفت روزافزون تکنولوژی و به بازار آمدن دستگاهها و ماشین آلات پیشرفته، با توجه به فواید متعدد این روشها مانند مزایای زیست محیطی از دیدگاه محفوظ ماندن منابع طبیعی و امکان استفاده از دامنه وسیعتری از مصالح محلی

این فرایند باعث می‌شود که کف قیر به شکل حبابهای کوچک قیر به وجود آید، که بر اثر سرد شدن، لایه قیر منقبض می‌شود و با ترکیدن حبابها، کف قیر از بین می‌رود. مخلوط کف قیری را باید در زمان وجود کف تولید کرد زیرا بر اثر بالا رفتن حجم قیر و کاهش قابل ملاحظه ویسکوزیته، پخش آن بین سنگدانه‌ها بسیار ساده‌تر انجام می‌شود. هر چه حجم کف در حین اختلاط بیشتر باشد، عمل پخش ساده‌تر است [۲].

در صورت استفاده از درصد بیشتری آب برای تولید کف، حجم کف تولید شده بالا می‌رود حال آنکه زمان بقای آن کوتاه می‌شود. بنابراین لازم است برای تولید کف، درصد آبی انتخاب شود که حجم و زمان بقای مناسبی را به دست دهد. به این منظور تنظیم دو پارامتر زیر در تولید کف قیر بسیار مهم است:

نیمه عمر کف: زمان رسیدن حجم کف از حداکثر به نصف برحسب ثانیه،
نسبت انبساط: نسبت حداکثر حجم کف قیر به حداقل آن (ERM)^۱.

۳- خصوصیات مخلوط کف قیری

در حین اختلاط، کف قیر باعث چسباندن ذرات، به ویژه مواد ریزدانه به هم می‌شود. ریزدانه‌ها، یا ریزدانه‌های طبیعی مخلوط هستند یا فیلرهای فعالی که به مخلوط اضافه شده‌اند. عامل چسبندگی ذرات درشت دانه به یکدیگر، ملاتی است که از ترکیب قیر و ریزدانه‌ها تولید شده. در حین اختلاط، مقداری قیر نیز به مصالح درشت‌دانه چسبیده و باعث پوشش نسبی آنها می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که برای تولید ملات، وجود ریزدانه در مخلوط مهم و اجتناب‌ناپذیر است، به گونه‌ای که در بیشتر تحقیقات، این مقدار به ۵٪ محدود شده است [۳].

روشهای اختلاط سرد، بیشتر برای ساخت یک قشر اساس مقاوم کاربرد دارند و متداول‌ترین روشهای شناخته شده برای این منظور، استفاده از تثبیت مواد با قیرهای امولسیون و کف قیر است. البته تا چندی پیش، بیشترین کاربرد این روش به قیرهای امولسیونی اختصاص داشت که دلیل آن را می‌توان انجام نشدن تحقیقات در زمینه فناوری کف قیر به مدت ۴۰ سال پس از کشف آن دانست. پس از آن با تولید ماشین‌آلات تولید کف قیر، استفاده و تحقیقات کاربردی این روش توسعه زیادی یافت و کاوشها و پژوهشهای بسیاری برای توسعه این روش انجام شد که همچنان ادامه دارد، اما هنوز روش طراحی دقیقی برای آسفالت کف قیر ارائه نشده است [۱].

۲- کف قیر و پیامدهای آن

تولید کف قیر، با تزریق آب سرد به درون قیر داغ در دمای ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود. وقتی قطره آب (در دمای محیط) با قیر در دمای مذکور تماس پیدا می‌کند، موارد زیر رخ خواهند داد:

قیر انرژی گرمایی خود را صرف گرم کردن قطره آب تا دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد می‌سازد که این منجر به سرد شدن قیر می‌شود.

بیشتر گرمای انتقال یافته از قیر، باعث می‌شود که آب به بخار تبدیل شود و این بخار با فشار به درون فاز پیوسته قیر راه می‌یابد.

بخار آب پیوسته افزایش حجم دارد تا اینکه لایه نازکی از قیر سرد شده - که کشش سطحی آن از فشار حباب بخار درون بیشتر است - آن را مهار می‌کند.

در فاز انبساط بخار، کشش سطحی قیر پیوسته افزایش می‌یابد تا اینکه با فشار درون حباب به تعادل برسد.

به دلیل هدایت کم گرمایی بخار آب و لایه نازک قیر، حباب تا مدتی پایدار می‌ماند و این دوره تا چند ثانیه به طول می‌انجامد.

1. Maximum Expansion Ratio

به طور کلی، صرفه جویی قابل ملاحظه در زمان و هزینه کلی پروژه با استفاده صحیح و منطقی از این نوع مخلوط.

در میان معایب این مخلوطها به موارد می توان زیر اشاره کرد:

نیاز به تجهیزات ویژه تولید کف قیر و رعایت کامل و دقیق موارد ایمنی به دلیل داغ بودن قیر تا دمای حدود ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه سانتیگراد،

نیاز به ماشین آلات ویژه اجرا به دلیل نیاز به اختلاط سریع مصالح و قیر در زمان کوتاه بقای کف، نیاز به وجود حداقل میزان ریزدانه برای پخش شدن مناسب قیر.

۴- روش تحقیق

۴-۱- انتخاب سنگدانه ها

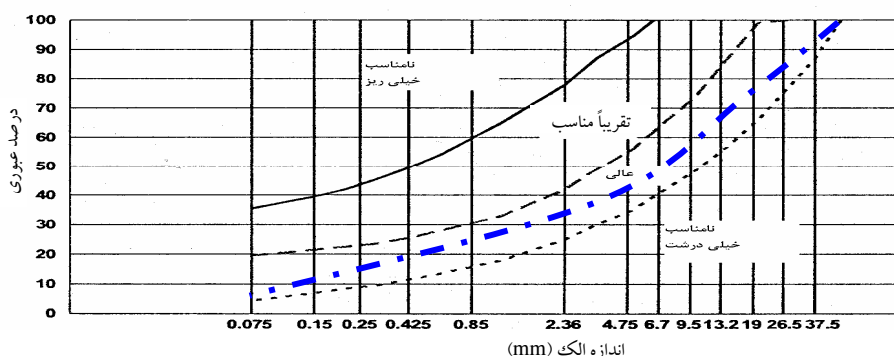
سنگدانه های مصرف شده برای ساخت آسفالت کف قیری از یک معدن متداول تولید آسفالت گرم انتخاب شد. خصوصیات مصالح به طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. آزمایش دانه بندی بر روی مصالح و مقایسه آن با منحنیهای توصیه شده [۳] نشان داد که دانه بندی مصالح برای ساخت آسفالت کف قیری در محدوده مناسبی قرار دارد. شکل ۱ نشان دهنده منحنی دانه بندی مصالح است.

مخلوطهای کف قیری، بسته به درصد و کیفیت هر یک از اجزای تشکیل دهنده، ویژگیها و خواص مختلفی را از خود نشان می دهند. برای بالا بردن خواص مقاومتی مخلوط می توان چند درصد فیلر به آن اضافه کرد. به طور معمول از سیمان و آهک به عنوان فیلر در ترکیب استفاده می شود.

به طور کلی به عنوان مهمترین مزایای آسفالت کف قیری به موارد زیر می توان اشاره کرد:

افزایش مقاومت برشی و کاهش حساسیت رطوبتی، انعطاف پذیری و مقاومت در برابر خستگی، امکان به کارگیری تنوع زیادی از مصالح در ساختار مخلوط، استفاده از قیر کمتر نسبت به سایر مخلوطهای آسفالتی، کوتاه بودن زمان اجرا به دلیل قابلیت تراکم سریع، صرفه جویی در مصرف انرژی به دلیل نیاز نداشتن به گرم کردن سنگدانه ها،

مزایای زیست محیطی به دلیل تولید نشدن مواد فرار قیر در حین اختلاط و امکان استفاده از مصالح نامرغوبتر نسبت به آسفالت گرم و در نتیجه حفظ قرضه های مرغوب، امکان انبار کردن آسفالت به مدت چند ساعت، امکان اجرا در شرایط نامساعد جوی، امکان اجرا در صورت مرطوب بودن سنگدانه ها، در این حالت می توان درصد آب را که در حدود ۷۰٪ تا ۸۵٪ رطوبت بهینه است، کاهش داد.



شکل ۱ دانه بندی مصالح مورد استفاده

جدول ۱ ویژگیهای مصالح

ارزش ماسه‌ای (درصد)	حذب آب (درصد)	PI	رطوبت بهینه (درصد)	حداکثر چگالی خشک (g/cm ³)
۴۳	۳	---	۷/۵	۲/۲
سایش به روش لس آنجلس (درصد)				
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)				
				۰/۵

۴-۲- انتخاب قیر

قیر مورد استفاده، قیر ۱۰۰-۸۵ پالایشگاه تبریز بود. دمای قیر در هنگام تولید کف قیر ۱۶۰ درجه انتخاب شد. به منظور تولید کف قیر در آزمایشگاه از دستگاه آزمایشگاهی تولید کف قیر شرکت ویرتگن آلمان به نام WLB10 استفاده شد. شکل ۲ این دستگاه را نشان می‌دهد. پس از به دست آوردن مشخصات اصلی کف (شکل ۳) و مقایسه آن با مقادیر توصیه شده [۳] قیر انتخاب شده برای ساخت کف، مناسب تشخیص داده شد.



شکل ۲ دستگاه آزمایشگاهی تولید کف قیر (WLB10)

۴-۳- فیلرهای فعال

برای بررسی نقش و تأثیر فیلرهای فعال در ساختار مخلوط، از پودر سیمان و آهک با درصدهایی که در ادامه آورده شده است، استفاده شد.

۵- به دست آوردن طرح اختلاط

۵-۱- آماده‌سازی و عمل آوری نمونه‌ها

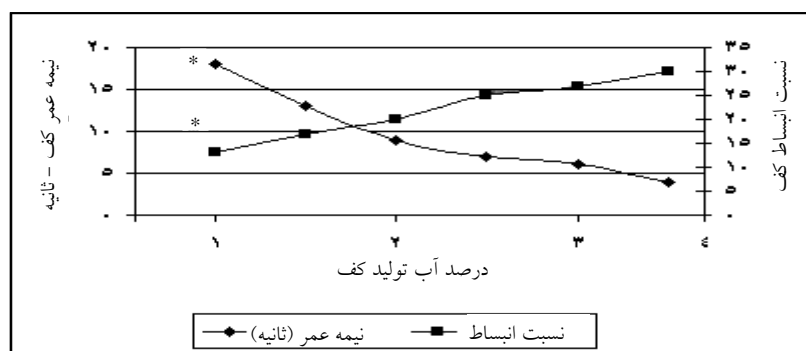
برای انجام آزمایشهای مکانیکی، نمونه‌های استوانه‌ای مارشال

برای طرحهای مختلف ساخته شد. نمونه‌ها در هر طرف با وارد کردن ۷۵ ضربه متراکم شد. پس از تراکم، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری و سپس از قالب خارج شد و برای عمل آوری، بر اساس دستورالعمل مورد استفاده در آفریقای جنوبی [۳] به مدت ۷۲ ساعت در گرمخانه با دمای ۴۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. سپس برای انجام آزمایش مارشال، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در آب ۶۰ درجه و برای انجام آزمایش ITS اشباع، ۲۴ ساعت در آب با دمای ۲۵ درجه قرار داده شد.

۵-۲- آزمایشهای مکانیکی

به منظور ارزیابی خصوصیات مخلوط و به دست آوردن طرح بهینه، از آزمایشهای مارشال و کشش غیرمستقیم (ITS) خشک و اشباع استفاده شد. بدین ترتیب که در طرح اولیه، ابتدا نمونه‌هایی با ترکیب درصدهای مختلف قیر و مصالح ساخته شد. تغییرات قیر در برابر مقاومت مخلوط بررسی شد و درصد بهینه قیر به دست آمد (جدول ۱). برای تنظیم حساسیت رطوبتی نمونه‌ها معیار TSR^۲ (حاصل تقسیم مقاومت کششی اشباع به خشک) محاسبه شد و برای تنظیم انعطاف‌پذیری نمونه از معیار نسبت مارشال (Q^۳)، حاصل تقسیم مقاومت مارشال به نرمی نمونه) استفاده شد. مقادیر مورد قبول برای نتایج آزمایشها به صورت زیر انتخاب می‌شود [۳]:

1. Indirect Tensile Strength
2. Tensile Strength Ratio
3. Marshall Quotient



*: هر عدد میانگین انجام سه آزمایش است.

شکل ۳ خصوصیات کف قیر

علت این مسأله را می‌توان به دلایل زیر مربوط دانست:
 ۱- کم بودن فیلهای طبیعی موجود در مخلوط، که باعث پخش نامناسب کف قیر در مخلوط می‌شود (فیلر در محدوده پایین منحنی دانه‌بندی قرار داشت و مقدار آن ۶٪ بود).
 ۲- جذب کم قیر در مصالح و نبود چسبندگی مناسب بین مصالح و قیر. مصالح از جنس آذرین و سیلیسی بود که جذب آب بالا و جذب قیر کمی دارد.
 برای جبران مشکلات بالا افزودن چند درصدی فیلر فعال سیمان یا آهک ممکن است راه حل مناسبی باشد.

۳-۵- افزودن سیمان و آهک

بر اساس نتایج به دست آمده از مخلوطهای حاوی فیلر مصالح سنگی مورد استفاده، درصد بهینه قیر برابر ۳٪ تعیین شد. به منظور بررسی نقش افزودن در فیلر سیمان و آهک به مخلوط، با ثابت نگهداشتن درصدهای قیر و فیلر مخلوط، این دو فیلر برحسب درصدهای مختلف مورد آزمایش، جایگزین فیلر مصالح شدند.

۱-۳-۵- تعیین درصد بهینه سیمان

با توجه به نتایج طرحهای قبل، قیر بهینه ۳٪ انتخاب و ثابت نگاه داشته شد و تغییرات سیمان از ۰ تا ۲ درصد بررسی شد. نتایج حاصل در جدول ۳ آورده شده است.

حداقل مقاومت کششی خشک ۳۰۰ کیلوپاسکال
 حداقل مقاومت کششی اشباع ۲۰۰ کیلوپاسکال
 حداقل مقاومت مارشال ۷۰۰ کیلوگرم
 حداقل TSR ۶۵٪
 Q بین ۲۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم بر میلیمتر

۱-۲-۵- تعیین درصد بهینه قیر

درصد بهینه قیر بر اساس آیین‌نامه مورد استفاده در این تحقیق [۳] برحسب بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) انتخاب می‌شود. البته پارامترهای اصلی مارشال (مقاومت و روانی) نیز برای تکمیل اطلاعات مربوط به نمونه‌های تهیه شده در درصدهای مختلف قیر، تعیین شد تا با محاسبه پارامتر نسبت مارشال (Q) چگونگی انعطاف‌پذیری نمونه‌ها نیز مطالعه شود. برای تهیه نمونه‌ها دامنه تغییرات قیر از ۲/۵٪ تا ۵٪ (با فاصله ۰/۵٪) انتخاب شد. درصد رطوبت ترکیب، ۸۵٪ رطوبت بهینه مصالح انتخاب شد. نتایج حاصل در جدول ۲ آورده شده است.
 از انجام آزمایشهای فوق، این نتایج به دست آمد:
 - درصد بهینه قیر برابر ۳٪ به دست آمد؛

- با وجود دانه‌بندی مناسب سنگدانه‌ها و قرار گرفتن منحنی دانه‌بندی در محدوده توصیه شده، برای هیچیک از درصدهای قیر مورد آزمایش، مقادیر حداقل برای مقاومت مارشال و مقاومت ITS قید شده در بند ۵-۲ حاصل نشد.

جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایشهای تعیین درصد بهینه قیر در طرح

Q (kg/mm)	مارشال		TSR (%)	کشش غیرمستقیم (kPa)		چگالی (g/cm ³)	رطوبت (%)	قیر (%)	آهک (%)	سیمان (%)
	روانی (mm)	مقاومت (kg)		اشباع	خشک					
۵۴	۲/۵	۱۳۵	۱۱	۲۳	۲۱۴	۲/۲۴	۶/۴	۲/۵	۰	۰
۱۱۳	۲/۴	۲۷۰	۲۷	۶۳	۲۳۶	۲/۲۴	۶/۴	۳	۰	۰
۱۲۷	۲/۱	۲۶۱	۲۷	۶۳	۲۳۳	۲/۲۳	۶/۴	۳/۵	۰	۰
۱۲۹	۲	۲۵۷	۲۶	۵۸	۲۲۶	۲/۲۲	۶/۴	۴	۰	۰
۱۰۹	۲/۲	۲۳۹	۲۴	۴۵	۱۸۷	۲/۲۱	۶/۴	۴/۵	۰	۰
۱۰۵	۲/۱	۲۲۵	۲۰	۳۵	۱۷۷	۲/۱۸	۶/۴	۵		

جدول ۳ نتایج حاصل از آزمایشهای تعیین درصد بهینه سیمان در طرح

Q (kg/mm)	مارشال		TSR (%)	کشش غیرمستقیم (kPa)		چگالی (g/cm ³)	رطوبت (%)	قیر (%)	آهک (%)	سیمان (%)
	روانی (mm)	مقاومت (kg)		اشباع	خشک					
۹۴	۲/۷	۲۵۵	۲۳	۵۲	۲۲۵	۲/۲۳	۷/۲	۳	۰	۰
۱۰۱	۲/۷	۲۷۳	۳۷	۸۰	۲۱۸	۲/۲۲	۷/۲	۳	۰	۰/۵
۳۱۸	۲/۳	۷۳۱	۶۰	۱۲۷	۲۱۱	۲/۲۱	۷/۲	۳	۰	۱
۶۱۱	۱/۹	۱۱۶۰	۶۱	۲۲۰	۳۶۰	۲/۲۳	۷/۲	۳	۰	۱/۵
۷۶۴	۱/۶	۱۲۲۲	۷۴	۲۵۰	۳۳۷	۲/۲	۷/۲	۳	۰	۲

از انجام آزمایشهای فوق، این نتایج به دست آمد:

سیمان بهینه ۱/۵٪ بود،

نتایج آزمایشهای مقاومتی به حد مطلوب رسید،

با افزودن سیمان، افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت مخلوط

مشاهده می‌شود. علت این مسأله را می‌توان چنین حدس زد:

۱- سیمان به عنوان فیلر، پخش کف قیر بین سنگدانه‌ها

را بهتر می‌سازد.

۲- نقش مهمتر سیمان، عملکرد آن به عنوان افزودنی

ضد عریان‌شدگی است.

۵-۳-۲- تعیین درصد بهینه رطوبت ترکیب

در طرحهای قبل، رطوبت ترکیب ۸۵٪ رطوبت بهینه مصالح

فرض شد. در این قسمت برای بررسی رطوبت بهینه ترکیب،

مقادیر قیر برابر ۳٪ و سیمان برابر ۱/۵٪ ثابت فرض شده و

اثر تغییرات رطوبت از ۶۰٪ تا ۱۲۰٪ رطوبت بهینه (۷/۲٪)

بررسی شد. نتایج در جدول ۴ مشاهده می‌شود. از انجام آزمایشهای فوق، این نتیجه به دست آمد:

رطوبت بهینه ترکیب، برابر ۸۵٪ رطوبت بهینه مصالح به دست آمد که مقدار نسبتاً زیادی بود و حاکی از جذب بالای آب در مصالح است.

۳-۳-۵- بررسی اثر آهک

به منظور بررسی اثر افزودن فیلر آهک به جای سیمان و استفاده همزمان از این دو در ترکیب، در این مورد نیز رطوبت ترکیب، برابر ۸۵٪ رطوبت بهینه مصالح و درصد قیر معادل در ۳٪ ثابت نگهداشته شد. به جای سیمان یکبار از ۱/۵٪ آهک و یکبار از ترکیب ۰/۷۵٪ آهک و ۰/۷۵٪ سیمان استفاده شد. نتایج در جدول ۵ مشاهده می‌شود. با بررسی نتایج ملاحظه می‌شود که استفاده از آهک یا ترکیب آهک و سیمان نیز نتایج قابل قبولی را در پی داشته است.

۶- آزمایشهای تکمیلی

پس از به دست آوردن طرحهای قابل قبول، به منظور تحقیق و بررسی بیشتر و تکمیل نتایج، نفوذپذیری و مقاومت فشاری تک محوری اندازه‌گیری شد. نحوه انجام آزمایشها و تحلیل نتایج حاصل از آنها در این قسمت آورده می‌شود.

۶-۱- بررسی نفوذپذیری

تعیین نفوذپذیری مخلوطهای آسفالت گرم به روش رایس انجام می‌شود اما با کاربرد این روش در مخلوطهای کف قیری، این کار امکان پذیر نشد. علت را می‌توان به این موضوع نسبت داد که در مخلوطهای آسفالت گرم، هنگام به دست آوردن چگالی نظری، فرض بر آن است که تمامی سنگدانه‌ها قیراندود بوده

که این قیر تقریباً همان قیر بهینه به دست آمده از طرح اختلاط مصالح آسفالتی است و آب موجود در استوانه شیشه‌ای، فقط نقش پرکننده فضای خالی بین سنگدانه‌ها را دارد، اما در مورد مخلوط کف قیری فرض بر آن است که قیر بهینه به دست آمده از طرح اختلاط، پوشاننده تمامی ذرات مخلوط نیست، بلکه ملات متشکل از قیر و ریزدانه‌های موجود در مخلوط است که باعث پوشاندن دانه‌های بزرگتر می‌شود و در بسیاری مواقع، دانه‌های درشت‌تر کاملاً قیراندود نیستند، لذا برای انجام آزمایش رایس - که برای به دست آوردن چگالی نظری تمام ذرات باید قیراندود باشند (برای جلوگیری از جذب آب مصالح) - باید سنگدانه‌ها را با قیر بسیار بیشتری نسبت به قیر بهینه، اندود کرد که این مسئله باعث غیرواقعی و تکرارناپذیر شدن آزمایش شده و نتیجه مطلوبی به دست نمی‌دهد. البته با توجه به اینکه در به دست آوردن قیر بهینه، از مستقیم استفاده می‌شود نه از منحنی تخلخل، نبود این پارامتر در روند به دست آوردن طرح اختلاط تأثیری ندارد. به منظور بررسی نفوذپذیری مخلوط آسفالت کف قیری و مقایسه آن با آسفالت گرم، به روش زیر عمل شد:

۱- با استفاده از مصالح دانه‌ای به کار رفته در ساخت آسفالت کف قیر، نمونه‌های مارشال آسفالت گرم ساخته شد. به همین ترتیب تعدادی نمونه مارشال از آسفالت کف قیر ساخته شد.

۲- پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، هر یک از نمونه‌ها به‌طور جداگانه در ظرفی مدرج قرار گرفت و تا ارتفاع مشخصی بر روی آن آب ریخته شد.

۳- پس از گذشت ۷۲ ساعت، افت ارتفاع نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که نتایج در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۴ نتایج حاصل از آزمایشهای تعیین درصد بهینه رطوبت ترکیب در طرح

Q (kg/mm)	مارشال		TSR (%)	کشش غیرمستقیم (kPa)		چگالی (g/cm ³)	رطوبت (%)	قیر (%)	آهک (%)	سیمان (%)
	مقاومت (kg)	روانی (mm)		خشک	اشباع					
۶۴۲	۹۳۱	۱/۴۵	۶۰	۲۰۱	۳۳۴	۲/۲۵	۵/۶	۳	۰	۱/۵
۶۳۳	۱۰۴۴	۱/۶۵	۵۹	۲۲۲	۳۷۴	۲/۲۴	۶/۴	۳	۰	۱/۵
۶۱۸	۱۱۷۵	۱/۹	۶۸	۲۶۰	۳۸۰	۲/۲۴	۷/۲	۳	۰	۱/۵
۷۸۷	۱۴۴۰	۱/۸۳	۷۵	۲۵۳	۳۳۷	۲/۲۳	۷/۷	۳	۰	۱/۵
۷۰۳	۱۳۷۰	۱/۹۵	۶۷	۲۱۵	۳۲۳	۲/۲۳	۸/۲	۳	۰	۱/۵
۶۹۱	۱۳۳۴	۱/۹۳	۷۴	۲۰۷	۲۸۱	۲/۲۳	۹	۳	۰	۱/۵
۴۲۹	۷۶۳	۱/۷۸	۸۲	۱۹۴	۲۳۶	۲/۲۱	۹/۵	۳	۰	۱/۵
۴۸۱	۷۳۶	۱/۵۳	۵۸	۱۳۲	۲۲۷	۲/۱۹	۱۰/۳	۳	۰	۱/۵
۴۰۳	۴۸۴	۱/۲	۶۵	۱۰۴	۱۶۱	۲/۱۶	۱۱/۱	۳	۰	۱/۵

جدول ۵ نتایج حاصل از آزمایشهای بررسی اثر استفاده از آهک و آهک - سیمان

Q (kg/mm)	مارشال		TSR (%)	کشش غیرمستقیم (kPa)		چگالی (g/cm ³)	رطوبت (%)	قیر (%)	آهک (%)	سیمان (%)
	مقاومت (kg)	روانی (mm)		خشک	اشباع					
۴۱۵	۱۰۷۸	۲/۶	۷۹	۲۷۱	۳۴۳	۲/۲۲	۷	۳	۱/۵	۰
۴۹۷	۱۱۰۸	۲/۲۳	۶۷	۳۶۸	۲۴۷	۲/۲۳	۷/۱	۳	۰/۷۵	۰/۷۵

جدول ۶ نتایج حاصل از آزمایشهای نفوذپذیری

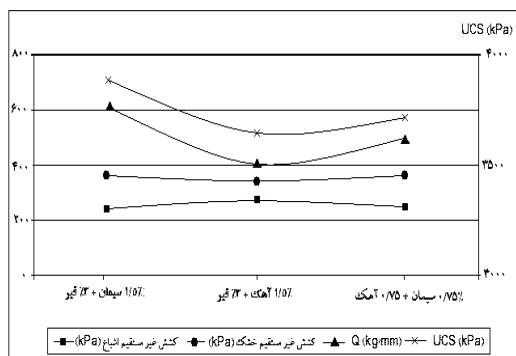
کاهش ارتفاع آب (Cm)	تخلخل (%)	مارشال		مقاومت کششی (kPa)		قیر (%)	رطوبت (%)	چگالی (g/cm ³)	نمونه
		مقاومت (kg)	روانی (mm)	خشک	اشباع				
۱/۴	۸/۵	۷۷۶	۲/۲۵	۴۷۹	۲۱۸	۳/۲	۷/۸	۲/۱۱	کف قیر
۱/۱	۷/۲	۸۸۵	۳/۱	۵۰۲	۳۳۴	۳/۶	۷/۲	۲/۱	
۱	۶/۶	۱۲۵۳	۱/۷	۶۵۸	۳۰۰	۳/۸	۷/۲	۲/۱۳	
۰/۷	۴/۹	۶۲۰	۲/۱	-	-	۵/۲	-	۲/۹	آسفالت
۰/۷	۴/۵۵	۶۲۷	۲/۳	-	-	۵/۴	-	۲/۳	
۰/۵	۳/۱۸	۱۰۲۳	۳/۸	-	-	۵/۸	-	۲/۳۲	

مشاهده می شود که افت ارتفاع آب در نمونه های آسفالت کف قیر، حدود دو برابر نمونه های آسفالت گرم است. برای به دست آوردن محدوده ای برای تخلخل، با توجه به تحقیقات گزارش شده [۴] نموداری بر اساس تخلخل و افت سطح آب آسفالت گرم ترسیم و یک منحنی فرضی از آن عبور داده شد. از امتداد این منحنی با توجه به افت سطح آب نمونه های کف قیری، عددی برای تخلخل نمونه ها به دست آمد. منحنی

موردنظر در شکل ۴ مشاهده می شود، ضمن اینکه اعداد به دست آمده برای تخلخل در جدول ۶ (قسمت هاشور خورده) آورده شده است. لازم است ذکر شود که در به دست آوردن این اعداد، جذب آب مصالح دانه ای آسفالت کف قیر در نظر گرفته نشده، لذا می توان چنین گفت که اعداد به دست آمده برای تخلخل نمونه های کف قیری، دست بالا است.

۷- بحث

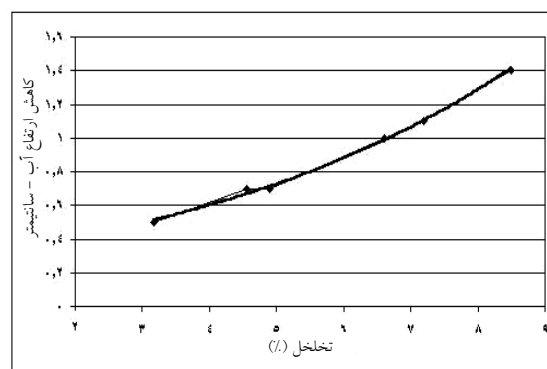
نتایج حاصل از آزمایشها در شکل ۵ خلاصه شده است. از بررسی این شکل، موارد زیر حاصل می‌شود:



شکل ۵ مقایسه کلی نتایج آزمایشها

۱- با بررسی طرح حاوی ۳٪ قیر و ۱/۵٪ سیمان، این نتیجه حاصل می‌شود که بیشترین مقدار مقاومت کششی خشک و مقاومت فشاری به این طرح اختصاص دارد، اما با بررسی تغییرات Q مشاهده می‌شود که افزایش درصد قیر به میزان ۰/۵٪ می‌تواند در بهبود بخشیدن خواص انعطاف‌پذیری بسیار مفید باشد. از بررسی کشش غیرمستقیم اشباع و TSR می‌توان به این نتیجه رسید که حساسیت رطوبتی این طرح نسبت به طرحهای حاوی آهک بیشتر است و در واقع بیشترین حساسیت رطوبتی به این طرح اختصاص دارد.

۲- با بررسی طرح حاوی ۳٪ قیر و ۱/۵٪ آهک، این نتیجه حاصل می‌شود که کمترین مقدار مقاومت کششی خشک و مقاومت فشاری به این طرح اختصاص دارد و با بررسی نتایج حاصل از آزمایش مارشال به صورت Q، مشاهده می‌شود که این طرح انعطاف‌پذیری مناسبی دارد و با توجه به اینکه تمامی نتایج آزمایشها بر روی این طرح قابل قبول است، می‌تواند برای ساخت آسفالت کف قیری استفاده شود. از بررسی کشش غیرمستقیم اشباع و TSR می‌توان به این نتیجه رسید که حساسیت رطوبتی این طرح



شکل ۶ رابطه تخلخل و افت سطح آب در نمونه‌های کف قیری و آسفالت گرم متخلخل

۶-۲- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)

گرچه در دستورالعملهای فنی برای کنترل مخلوطهای کف قیری، استفاده از نسبت مقاومت کششی (ITS) به مقاومت فشاری (UCS) توصیه نشده، اما برای تعیین این خصوصیات مخلوطهای شاخص تعیین شده در این تحقیق (سه نمونه جدول ۷)، این دو آزمایش انجام و نتایج آن در جدول مذکور آورده شد. آزمایشهای ITS و UCS به روش استاندارد A14 از آیین‌نامه [۵] TMH1 آفریقای جنوبی انجام شد.

جدول ۷ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

توضیحات طرح	مقاومت کششی خشک (kPa)	مقاومت فشاری (kPa)	ITS/UCS
۱/۵٪ سیمان + ۳٪ قیر	۳۷۰	۳۸۸۵	۰/۰۹۵
۱/۵٪ آهک + ۳٪ قیر	۳۴۳	۳۶۴۹	۰/۰۹۴
۱/۵٪ سیمان + ۳٪ قیر	۳۶۸	۳۷۲۴	۰/۰۹۹

رابطه UCS و ITS

همانگونه که در جدول ۷ ملاحظه می‌شود مقاومت کششی خشک در حدود ۰/۱ مقاومت فشاری به دست آمد.

1. Unconfined Compressive Strength

به دست آمدن رطوبت بهینه برای آنها - که برابر ۰/۸۵ رطوبت بهینه مصالح بود - جذب بالای آب در مصالح دانه‌ای تأیید شد.

افزودن فیلرهای سیمان و آهک و همچنین مخلوط این دو (به نسبت یک به یک) به میزان ۱/۵٪ به مخلوطهای کف قیری نتایج بهتری را به دست داد. همچنین نتایج آزمایشهای کشش غیرمستقیم در شرایط اشباع نشان داد که افزودنیهای سیمان و آهک، ضمن تصحیح منحنی دانه‌بندی، نقش افزودنی ضد عریان‌شدگی نیز داشتند.

مقایسه طرحهای حاوی سیمان، آهک و همچنین ترکیب این دو به‌عنوان فیلر فعال نشان داد که مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم و نیز مقاومت فشاری طرحهای حاوی سیمان، از طرحهای دیگر بیشتر بوده؛ ضمن اینکه با بررسی نسبت مارشال (Q)، این نتیجه حاصل شد که صلبیت این طرحها از طرحهای دیگر بیشتر بود. همچنین با کاهش درصد سیمان طرح نسبت به آهک، صلبیت نمونه‌ها کاهش و انعطاف‌پذیری آنها افزایش یافته است. با بررسی مقاومت کششی نمونه‌ها در شرایط و مقایسه مقادیر TSR، نتیجه شد که با افزایش درصد سیمان طرح نسبت به آهک، حساسیت رطوبتی نمونه‌ها افزایش یافته است.

مقایسه میزان نفوذپذیری نمونه‌های کف قیری با نمونه‌های آسفالت گرم ساخته شده از مصالح نشان داد که نفوذپذیری نمونه‌های کف قیر، حدود دو برابر نمونه‌های آسفالتی است.

مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری با مقاومت کششی غیرمستقیم خشک نشان داد که رابطه‌ای بین مقاومت کششی خشک با مقاومت فشاری وجود دارد. براساس نتایج به دست آمده برای نمونه‌های بررسی شده در این تحقیق، مقاومت کششی خشک نمونه‌ها در حدود ۱۰٪ مقاومت فشاری آنها است.

نسبت به طرحهای حاوی سیمان کمتر است و در واقع کمترین حساسیت رطوبتی به این طرح اختصاص دارد.

۳- با بررسی طرح حاوی ۳٪ قیر و ۰/۷۵٪ آهک +۰/۷۵٪ سیمان، این نتیجه حاصل می‌شود که حد وسط مقدار مقاومت کششی خشک و مقاومت فشاری به این طرح اختصاص دارد. با بررسی نسبت مارشال (Q)، مشاهده می‌شود که این طرح ضمن داشتن مقاومت مناسب، انعطاف‌پذیری لازم را نیز دارد و در مقایسه با دو طرح دیگر از نظر شرایط کلی در بهترین وضعیت قرار دارد و می‌تواند برای ساخت آسفالت کف قیری استفاده شود. از بررسی کشش غیرمستقیم اشباع و نسبت TSR، می‌توان به این نتیجه رسید که حساسیت رطوبتی این طرح نسبت به طرح حاوی سیمان تنها کمتر و نسبت به طرح حاوی آهک تنها بیشتر است.

۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

به منظور انجام آزمایشهای مکانیکی، نمونه‌های مارشال با آسفالت کف قیری تهیه شد و برای به دست آوردن طرح اختلاط بهینه، نمونه‌ها به دو روش آزمایش کشش غیرمستقیم و مارشال بررسی شد. برای تنظیم حساسیت رطوبتی نمونه‌ها، از آزمایش کشش غیرمستقیم در شرایط اشباع و برای تنظیم انعطاف‌پذیری نمونه‌ها، از پارامتر نسبت مارشال استفاده شد.

با وجود دانه‌بندی مناسب سنگدانه‌ها از افزودن فقط کف قیر به مخلوط، نتیجه مطلوبی به دست نیامد و بر طبق بررسیهای انجام شده، علت این مسأله، جذب بالای آب و جذب پایین قیر در مصالح دانه‌ای و نیز کم بودن فیلر طبیعی در مخلوط (حد پایین منحنی دانه‌بندی) باید باشد. بررسی اثر تغییر رطوبت مخلوطهای کف قیری و

and use of foamed bitumen treated materials”, First Edition, Published by Asphalt Academy, Pretoria, South Africa, September 2002.

- [4] Prowell Brain D., “Investigation of Pavement Permeability: Old Bridge Road”, Virginia, USA, 2001.
- [5] TMH1, “Standard Methods of Testing Road Building Materials”, South Africa, 1985.

۹- منابع

- [1] Martin Kendal, Bruce Baker, Peter Evans & Jothi Rammujan, “Foamed Bitumen Stabilization”, Southern Region Symposium Australia, 1999.
- [2] Jekins KJ. MFC van de Ven and JLA de Groot, “Characterization of foamed bitumen”, 7th Conference on Asphalt Pavements, South Africa, 1999.
- [3] Technical Guideline (TG2), “The design

