کاهش تغییر شکـل دائم در روسازي با استفـاده از آسفـالت سیمان دار (آسفالت مرکب)

علی خدائی[1] *؛ امیرکاووسی [2]؛ زهرا میرعزیزی[3]

چکیده

آسفالت متخلخل اشباع شده در سیمان (قشر مرکب) مخلوطی آسفالتی با درصد ریزدانه بسیار کم (حدود ۲٪) و درصد تخلخل زیاد (حدود۲۰٪) است که با دوغاب سیمان پر شده است. این نوع آسفالت یک مخلوط انعطاف‌پذیر و مقاوم و رویه‌ای مناسب از لحاظ تامین اصطکاک برای روکش جاده‌ها است. با استفاده از قیر مناسب در مخلوط می‌توان آن را در مناطق با دماهای مختلف استفاده نمود. آسفالت مرکب در مقایسه با بتن آسفالتی متداول، حساسیت کمتری نسبت به حرارت دارد. برای ارزیابی این نوع مخلوط، نمونه‌هایی از یک مخلوط آسفالتی متخلخل با درصدهای متفاوت دوغاب سیمان (۴٪ ،۳۲٪ و۴۵٪) اشباع شده و آزمایش‌های مارشال، خزش و کشش غیر مستقیم (با دستگاه UTM) در دماهای ۱۰- صفر و ۴۰ درجه سانتی‌گراد بر روی آن‌ها انجام گرفت.

نتایج بدست آمده نشان دهنده کاهش مقاومت در اثر افزایش دما برای مخلوط‌های مختلف بوده است. نمونه‌های با ۳۲٪ دوغاب سیمان بعنوان نمونه‌های بهینه، بیش‌ترین مقاومت را داشتند ولی گرانروی آنها کمتر از حد مجاز استاندارد بوده است. همین نتایج با آزمایش کشش غیر مستقیم نیز بدست آمدند. نتایج تحقیقات نشان دادند که مخلوط‌های اشباع شده در دوغاب سیمان علاوه بر تامین خصوصیات مخلوط‌های آسفالت متخلخل (مانند مقاومت در برابر اصطکاک) اشکالات این مخلوط‌ها را که مانند مقاومت پائین در دمای بالا را ندارند.

کلمات کلیدي

آسفالت متخلخل، مقاومت کششی غیر مستقیم، تغییر شکل دائم.

Using Combi-layer to Limit Permanent Deformation in Road Pavements

A. khodaii; A. kavusi; Z.mirazizi

ABSTRACT

Porous bituminous mixes that are saturated in cement slurries are named “combi-layer”. These types of mixes consist of coarse aggregates and contains little fines and have a high air voids content (of up to 20%). The porous property of combi-layer makes these mixes to be flexible while the saturated cement slurry improves their resistance to deformation and rutting. This research mechanical properties of one type of porous mix saturated with cement slurry at different cement concentration were investigated. Marshall, Creep and Indirect Tensile Tests were conducted on day and saturated samples. The ITS tests were performed at (-10 , zero , 40ºC). The results showed that samples saturated at 32% cement had both high strength and appropriate flexibility . Hence with this type of mixes it would be possible to have the benefits of porous mixes (i.e. drainages, skid resistance …) while these mixes have enough strength to resist deformation.

KEYWORDS

Porous Asphalt, Indirect tensile strength, deformation.

تاریخ دریافت مقاله:۱۳۸۶/۱/۱۴

تاریخ اصلاحات مقاله:۱۳۸۹/۳/۲۳

۱*نویسنده مسئول و دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: khodaii@aut.ac.ir

۲ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی – بخش مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس: kavussi@Yahoo.co.uk

۳ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر: mirazizii@gmail.com

۱- مقدمه

لایه مرکب آسفالت و بتن، ماده‌ای انعطاف‌پذیر، مقاوم و مناسب برای روکش جاده است و به‌دلیل وجود سیمان، حساسیت کمتری نسبت به حرارت در دماهای بالا دارد، این مخلوط که مرکب از آسفالت متخلخل و ترکیب آن با دوغاب سیمان است حساسیت تغییر شکل دائمی در دماهای بالا را کاهش می‌دهد[۹].

لایه مرکب، یک نوع آسفالت با تخلخل زیاد (حدود ۲۵٪) است که با دوغاب سیمان اشباع شده است. این آسفالت به‌عنوان محیطی بین بتن سیمانی و بتن آسفالتی متداول با خواص مشابه بتن در دماهای بالا است [۹].

اوایل سال ۱۹۵۰ در فرانسه استفاده از بتن آسفالتی و مقاومت آن در برابر تغییر شکل مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه این نوع روسازی در سال ۱۹۶۰ ساخته شده اما نقص‌هایی در طراحی آن وجود داشته است. اولین پیشنهاد برای ساختار دانه‌بندی آسفالت متخلخل با نام Salviacim برای ارتش آمریکا گزارش شده است [۳]. (Rone 1976, Anderton 2000)

دانه بندی پیشنهاد شده منجر به ساختار آسفالت متخلخل با درصد تخلخل حدود ۱۵ تا ۲۵٪ شد که اندازه آن به طور معمول ۱۰٪ کمتر از دانه‌بندی استاندارد موجود است. تخلخل کم دلیل اصلی گسیختگی ملات سیمان در نمونه‌های آزمایش شده بود و در سال ۱۹۷۰ در آلمان کاربرد بتن آسفالتی با درصد بالای تخلخل بررسی شد [۵]. در این تحقیق نشان داده شده است که درصد فضای خالی و اندازه خلل و فرج زیاد سبب نفوذ دوغاب سیمان به کل لایه‌های آسفالت متخلخل می‌شود. لایه مرکب نسبت به تغییر شکل دائمی مقاوم بوده و خواص مکانیکی آن در دماهای بالا، خوب است [۳]، [۹].

خواص مکانیکی این نوع آسفالت از لحاظ کشش و فشار متفاوت بوده و باعث افزایش مقاومت سطح روسازی در برابر فشار بارهای سنگین می شود. در هلند از آسفالت مرکب برای افزایش مقاومت سطح به‌ویژه محل توقف هواپیماها، مسیرهای تاکسی‌رو، بزرگراهها و مانند آن استفاده می‌شود [۹].

۲- مشخصات آسفالت مرکب

۲-۱- دانه بندی

دانه‌بندی مخلوط آسفالت مرکب بطور کلی از نوع باز یا متخلخل (Porous mix) است [۹] که اندازه اسمی دانه‌های آن در نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۹ میلی‌متر و در آلمان ۲۰ میلی‌متر تعیین شده است [۳]. دانه‌بندی استفاده شده در این تحقیق براساس پیشنهاد سازمان مدیریت و طبق جدول (۱) است با این تفاوت که به‌دلیل نیاز به ایجاد فضای خالی زیاد (حدود ۲۰٪)، این دانه‌بندی فیلر (مواد عبور کرده از الک شماره ۲۰۰) ندارد.

در صد شکستگی مصالح مورد استفاده در یک جبهه ۹۵٪ و در دو جبهه ۷۸٪ و هم‌ارز ماسه‌ای آن ۴۲٪ بوده است. بنابراین با مشخصات نشریه ۱۰۱ برابری دارد [۳].

۲-۲- قیر

قیر مصرفی از نوع قیرهای خالص است که باید همگن و فاقد آب باشد و هنگامی که تا ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شود کف نکند. انتخاب نوع قیر با توجه به نوع دانه‌بندی مصالح سنگی، شرایط آب و هوایی محل اجرای طرح، میزان ترافیک و براساس یکی از روش‌های تجربی شناخته شده انجام می‌شود. بطور کلی قیرهای با درجه نفوذ کم برای مسیرهای با ترافیک سنگین یا خیلی سنگین با آب و هوای گرم و خشک و قیرهای نرم در آب و هوای سرد کاربرد دارند [۱].

قیر مورد استفاده در این پروژه از نوع قیر خالص ۶۰/۷۰ پالایشگاه تهران که برای شرایط اقلیمی گرم و معتدل ایران مناسب است انتخاب شده است. آزمایش‌های قیر بر اساس روش‌های موجود در استاندارد AASHTO روی نمونه‌های انتخاب شده انجام شد که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۱): دانه بندی استفاده شده برای ساخت نمونه‌های آسفالت متخلخل

شماره الک	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۰۷۵
محدوده دانه بندی	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۶۰-۱۰۰	۱۵-۴۰	۴-۱۲	۲-۵
دانه بندی مصالح مورد استفاده	۱۰۰	۹۰	۶۰	۱۵	۴	۲

جدول (۲): مشخصات قیر ۶۰/۷۰ پالایشگاه تهران

آزمایش	واحد	نتیجه	روش استاندارد
درجه نفوذ در $25^{o}c$	۰/۱میلی‌متر	۶۴	AASHTO-T_{49}
نقطه نرمی	^{o}C	۴۵	AASHTO-T_{53}
خاصیت انگمی در $25^{o}c$	cm	۱۰۰	AASHTO-T_{51}
نقطه اشتعال	^{o}C	۳۲۱	AASHTO-T_{48}

۳- طرح اختلاط

هدف کلی از طرح مخلوط‌های آسفالت متخلخل و بتن آسفالتی، انتخاب مناسب‌ترین و با صرفه‌ترین مخلوط مصالح سنگی و قیر است که ویژگی‌هایی را برای پوشش‌های آسفالتی تأمین نماید که عبارتند از [۷]، [۸].

- قیر کافی برای ایجاد ثبات و دوام داشته باشد.
- مقاومت آن به اندازه‌ای باشد که بتواند بارهای ناشی از ترافیک را بدون تغییر شکل تحمل کند.
- فضای خالی مناسب در آن وجود داشته باشد تا با افزایش درجه حرارت محیط و تراکم اضافی ناشی از عبور و مرور ترافیک، قیرزدگی و کاهش مقاومت پیدا نکند و همچنین این فضای خالی مقداری باشد که باعث ارتقاء عملکرد سیمان شود.
- طرح اختلاط در این تحقیق بر اساس روش ASTM-D1559 مارشال انجام شده است. برای بدست آوردن درصد قیر بهینه، آسفالت متخلخل در آزمایشگاه با مقدار ۳، ۳/۵، ٤و ٤/۵٪ قیر استفاده شد که با ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های طرح اختلاط براساس روش فوق مقدار ٤٪ قیر بهینه برای ساخت نمونه‌های آسفالت متخلخل انتخاب شد.

پس از تعیین مقدار قیر بهینه، ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی با درصد فضای خالی مناسب انجام گرفت. برای ساخت نمونه‌های لایه مرکب باید نمونه با بیشترین تخلخل ممکن باشد[۳]. در نتیجه با اعمال تعداد ضربات مختلف با چکش مارشال، امکان ساخت و خروج نمونه سالم از قالب مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با انجام آزمایش‌های وزن مخصوص و تعیین درصد حجمی فضای خالی نمونه‌های آسفالتی، تعداد اعمال ضربه به طرفین نمونه برای بدست آوردن ۲۰٪ تخلخل برابر ۴۵ ضربه بدست آمد. بنابراین همه نمونه های آزمایش با این درصد ساخته شدند.

بعد از ساخت هر نمونه، با استفاده از قانون ارشمیدس، وزن مخصوص واقعی آسفالت و با آزمایش رایس، وزن مخصوص حداکثر نمونه آسفالت اندازه گیری شد.

پس از ساخت نمونه‌ها به آن‌ها زمان داده شد تا بطور کامل سرد شوند، سپس با جک هیدرولیکی آن‌ها را از قالب خارج کرده و در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها در دوغاب سیمان قرار گرفتند تا تمام خلل و فرج آن‌ها با دوغاب سیمان اشباع شوند.

٤- استفاده از دوغاب سیمان

برای کاهش حساسیت تغییر شکل دائمی مخلوط در دماهای بالا، از دوغاب با درصدهای مختلف سیمان استفاده شده است [۹]. نمونه‌های ساخته شده مارشال را درون دوغاب سیمان قرار داده تا دوغاب سیمان درون خلخل و فرج‌ها نفوذ کند.

فضای خالی زیاد و اندازه خلل و فرج‌ها باعث می‌شود تا دوغاب سیمان به کل ضخامت آسفالت پر خلل و فرج نفوذ نماید. ابتدا از کمترین مقدار سیمان برابر با ۴٪ (نسبت سیمان به آب) استفاده شده و نمونه‌های ساخته شده در آن قرار داده شدند، اما این دوغاب روان بوده و درون خلل و فرج‌ها ثابت نمی‌ماند و از طرف دیگر نمونه‌جاری می‌شود. سپس برای یافتن درصد سیمان مناسب، از دوغاب ۴۵٪ (نسبت سیمان به آب) استفاده گردید. با این مقدار درصد سیمان، دوغاب غلیظی بدست آمد. این دوغاب نیز مشکل دیگری را بوجود آورد، زیرا ۴۵٪ درصد سیمان بعلت غلیظ بودن به کندی داخل خلل و فرج نفوذ می‌کرد.

برای بهینه کردن درصد دوغاب سیمان مقادیر درصد سیمان به تدریج از کمترین مقدار اولیه افزایش و از بیش‌ترین مقدار آن کاهش داده شد و در پایان از ۳۲٪ دوغاب سیمان استفاده گردید، که این درصد مقداری متعادل (نه خیلی غلیظ و نه روان) بوده و به خوبی در خلل و فرج نمونه‌ها نفوذ کرده و ثابت می‌ماند. بیش‌تر خلل و فرج داخلی به این ترتیب پوشانده شده و مانند نمونه های بتنی، شکل گرفتند.

۵- آزمایش‌ها

به‌طور کلی سه آزمایش مارشال، خزش و کشش غیر مستقیم ITS به شرح زیر انجام گرفتند:

۵-۱- آزمایش مارشال

در این آزمایش که طبق روشASTM D 1559 انجام گرفت پس از آنکه نمونه‌های استوانه‌ای شکل بتن آسفالتی به مدت ۳۰ دقیقه در آب گرم با درجه حرارت ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، از آب خارج شده و بین فک‌های دستگاه آزمایش مارشال قرار گرفته و تحت فشار واقع می‌شوند تا گسیخته شوند. بیش‌ترین نیروی لازم برای گسیخته شدن نمونه و تغییر

شکل قطری اندازه‌گیری شده و نتایج در شکل (۱) آورده شده است.

۵-۲- آزمایش خزش استاتیکی

آزمایش خزش استاتیکی طبق استاندارد BS: 598-PART3 با بارگذاری نمونه استوانه‌ای و اعمال یک نیروی فشاری در راستای محور نمونه انجام شده است. در این آزمایش عامل رفتار خزشی Creep modules (MPa) و Creep compliance (1/Mpa) نمونه‌های استوانه‌ای آسفالت با بارگذاری فشاری اندازه گیری شده است. این آزمایش با اعمال بارهای محوری استاتیک انجام شده و کرنش‌های محوری ثبت گردیده است. آزمایش خزش برای اندازه‌گیری زمان جریان (Flow time)، ضریب نرمی و مدول خزش در درجه حرارت $40^{\circ}C$ استفاده می‌شود [٤].

این آزمایش به‌وسیله دستگاه UTM انجام گرفت. در این سیستم فشار ثابت برابر ۲۰۷ Kpa (۳۰ Psi) وارد گردید.

نمونه‌های انتخاب شده در آزمایش خزش استاتیکی نیز به روش توضیح داده شده ساخته شدند و نمونه‌های آزمایش با غشاء ثابت در محفظه محیط قرار داده شده‌اند و دستگاه مجهز به سنسورهای دما بوده که در مرکز آن نصب شده و دمای را تعیین می‌کرد. پس از آن‌که دما به تعادل رسید، میزان بارگذاری در هر بخش مورد بررسی قرار گرفت. دو طرف هر نمونه یک صفحه فلزی قرار گرفتند که در بالا و پایین نمونه نصب می‌شود سپس بار به مرکز آن‌ها وارد می‌شود. هر دستگاه مجهز به دو سنسور LVDT محوری است که به سخت‌افزار نصب می‌شوند، LVDT ها را برای دامنه خطی تنظیم کرده و تغییر شکل دائمی را محاسبه می‌نمایند. نمونه‌های تحت فشار ثابت ۱۰۰kN در ۱۰۰۰۰ ثانیه تحت بارگذاری قرار گرفتند و نتایج آزمایش در جدول (٤) آورده شده است.

۵-۳- آزمایش کشش غیر مستقیم

آزمایش کشش غیرمستقیم براساس استاندارد D۴۱۲۳: ASTM با بارگذاری نمونه استوانه‌ای به صورت اعمال یک نیروی فشاری استاتیکی یا تکراری در راستای طولی نمونه انجام می‌شود. این نوع بارگذاری تنش‌های کششی یکنواختی عمود بر جهت اعمال بار و در طول قطر عمودی ایجاد می‌کند که در پایان باعث گسیختگی به‌صورت شکست در طول قطر عمودی نمونه می‌شود. همه نمونه‌های انتخاب شده در آزمایش کشش غیرمستقیم نیز به روش توضیح داده شده قبلی ساخته شدند.

نتایج انجام آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند که آزمایش کشش غیر مستقیم یکی از مناسب‌ترین آزمایش‌ها برای بدست آوردن مشخصات کششی مصالح روسازی است. دلایل اصلی این موضوع عبارتند از:

۱- گسیختگی موثر از وضعیت سطحی نیست.
۲- گسیختگی در ناحیه‌ای که تنش‌های کششی یکنواخت است ایجاد می‌شود.
۳- آزمایش می‌تواند تحت بارهای استاتیکی یا دینامیکی انجام شود.
٤- انجام آزمایش به‌نسبت ساده است[۲]، [٦].

در این آزمایش می‌توان اثر رطوبت و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را نیز مورد ارزیابی قرار داد. این آزمایش برای اندازه‌گیری خزش و مقاومت مخلوط آسفالتی در درجه حرارت متوسط و کم (کمتر از ۲۰ درجه) استفاده می‌شود. بار فشاری در سرتاسر محور قطری نمونه استوانه‌ای اعمال می‌شود. روش آزمایش به‌گونه‌ای است که تنش کششی بطور یکنواخت در سرتاسر صفحه قطری قرار می‌گیرد. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم در جداول (۵) و (۶) و شکل‌های (۴) و (۵) آورده شده است.

۶- بحث

۶-۱- آزمایش مارشال

نتایج آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های آسفالت مرکب در جدول (۳) آورده شده و روند تغییرات عوامل مارشال نیز در نمودار (۱) دیده می‌شود.

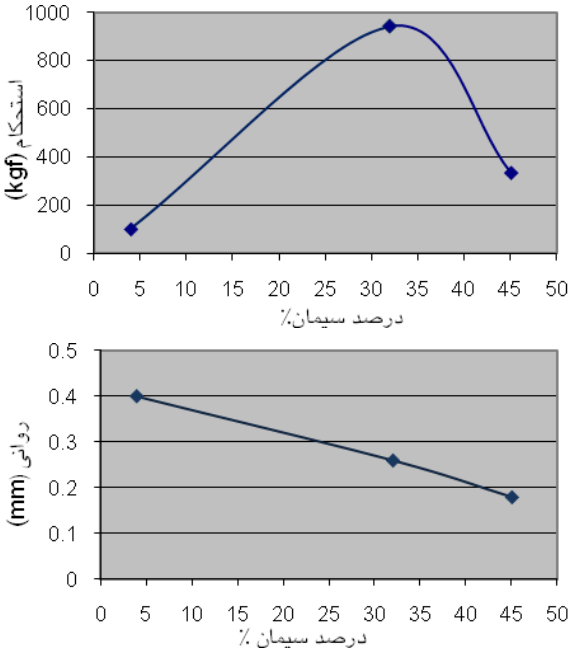
۶-۱-۱-مقایسه مقاومت و روانی مارشال نمونه‌های آسفالت متخلخل اشباع شده در دوغاب سیمان (آسفالت مرکب)

همان‌طور که در نمودار (۱) دیده می‌شود نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص و درصد بهینه دوغاب سیمان برابر با ۳۲٪، پایداری مارشال حدود ۹۴۱ kg دارند. علت مقاومت به درصد دوغاب سیمان و نفوذ کامل آن به داخل خلل و فرج‌ها است. در نتیجه درصد بهینه ۳۲٪ دوغاب سیمان، به‌طور کامل در داخل نمونه‌ها نفوذ کرده و قفل و بست بهتری را در نمونه‌ها ایجاد می‌کند که باعث افزایش مقاومت خواهد شد.

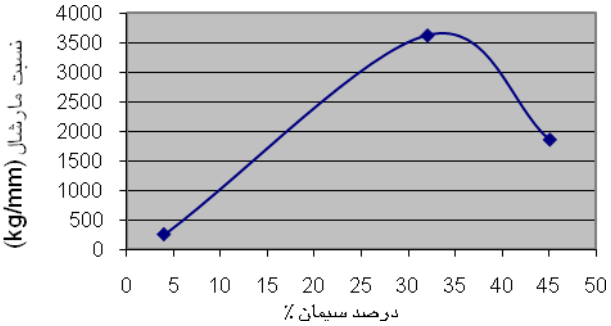
جدول (۳): نتایج آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های آسفالت مرکب

درصد دوغاب سیمان	٪۳۲ سیمان			٪۴۵ سیمان			٪۴ سیمان
استحکام مارشال (kg)	۹۱۵	۹۲۶/۹	۹۸۳/۳	۳۲۸/۹	۳۱۳/۹۵	۳۵۸/۸	۱۰۰
روانی مارشال (mm)	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۴

پایین بودن مقاومت مارشال نمونه‌های اشباع شده در ۴۵٪ و ۴٪ دوغاب سیمان، شاید به‌علت نفوذ نکردن کامل دوغاب سیمان در داخل خلل و فرج‌ها باشد، در این نمونه‌ها فقط سطح پوشش داده شدند و داخل آن‌ها خالی از دوغاب سیمان بوده است. شاید این امر باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها شده باشد. با افزایش درصد سیمان مقدار روانی کاهش می‌یابد. حداکثر روانی مربوط به ۴٪ دوغاب سیمان است که حدود ۰/۴ میلی‌متر است و میزان روان بودن ۳۲٪ درصد بهینه دوغاب سیمان نزدیک به ۰/۲۶ میلی‌متر است که این مقدار با توجه به مقاومت مارشال ۹٤۱ kg مناسب است.



شکل (۱): نتایج آزمایش مارشال نمونه‌های آسفالت مرکب



شکل (۲): نسبت مارشال نمونه‌های آسفالت مرکب

۶-۱-۲-بررسی نسبت مارشال

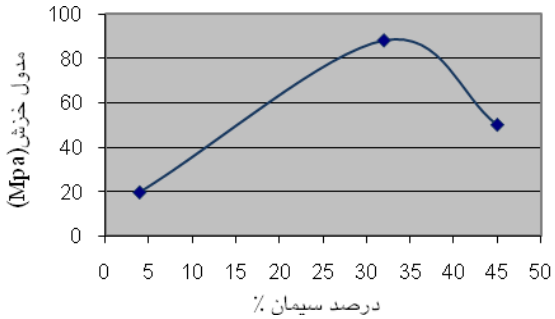
نسبت مقاومت به روان بودن را نسبت مارشال می‌گویند. بیشتر بودن نسبت مارشال در یک نمونه به معنی سختی بیشتر آن مخلوط است. عوامل اثرگذار در افزایش نسبت مارشال شامل افزودن مصالح سنگی درشت، استفاده از ماسه زبرتر، استفاده از ماسه شکسته و قیر سخت‌تر است. نسبت مارشال در برخی استانداردها بعنوان عامل تعیین‌کننده در طراحی در نظر گرفته می‌شود [۶]. شکل (۲) نسبت مارشال نمونه‌های آسفالت اشباع شده در دوغاب سیمان را نسبت به درصد سیمان مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار شکل (۲) ۳۲٪ درصد دوغاب دارای بیش‌ترین نسبت مارشال است که این میزان برابر ۳۶۲/۲۰ kg/mm است که نشان‌دهنده سختی بیشتر این نمونه نسبت به نمونه‌های بدون دوغاب سیمان است.

۶-۲- آزمایش خزش

جدول (۴): نتایج آزمایش خزش از دستگاه UTM در دمای $40\ ^{\circ}C$

درصد دوغاب سیمان	٪۴۵ سیمان	٪۳۲ سیمان	٪۴ سیمان
Creep modules (MPa)	۵۰/۳۸	۸۸/۲۷	۲۰
Flaw time (s)	۶۰۰۸	۶۰۰۸	۶۰۰۸
Creep compliance (1/Mpa)	۰/۰۲۱	۰/۰۱۱	۰/۰۲۱

نتایج بدست آمده از آزمایش خزش بر روی نمونه‌های آسفالت متخلخل اشباع شده در دوغاب سیمان با قیر خالص در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در جدول (۴) و شکل (۳) ارائه شده است. ۳۲٪ سیمان بهینه دارای ضریب خزش ۸۸/۲۷ Mpa و ضریب نرمی خزش (1/Mpa) ۰/۰۱۱ است. این درصد سیمان در مخلوط باعث رسیدن به بیش‌ترین مقاومت خزشی و کم‌ترین ضریب نرمی (compliance) شده است. این امر شاید به‌علت نفوذ کامل دوغاب سیمان در داخل خلل و فرج‌ها باشد که باعث افزایش مقاومت نمونه‌های آسفالتی شده است.



شکل (۳): آزمایش خزش نمونه‌های مرکب

۶-۳- آزمایش کشش غیر مستقیم

همان‌طور که در شکل (۴) و (۵) مشخص است، با افزایش دما مقاومت کاهش می‌یابد که البته ۳۲٪ سیمان بیش‌ترین مقدار مقاومت را دارد (در دمای صفر درجه‌سانتی‌گراد kpa ۴۵۹/۴ و در دمای ۱۰- درجه‌سانتی‌گراد مقاومت kpa ۶۱۷/۳ است). دیده شود افزایش دما از ۱۰- به صفر درجه‌سانتی‌گراد موجب افت ۲۵ درصدی در مقاومت کششی می‌شود که این کاهش مقاومت به‌دلیل حساسیت قیر نسبت به درجه حرارت است.

شکل (۶)، تغییر شکل نمونه‌های آسفالتی اشباع شده دوغاب سیمان را در دماهای صفر و ۱۰- درجه سانتی‌گراد نشان داده است. می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های با ۳۲٪ دوغاب سیمان دارای کم‌ترین میزان تغییر شکل (حدود mm ۰/۵۷۴) هستند که این کاهش نشان دهنده نفوذ کامل دوغاب سیمان درون خلل و فرج‌هاست. سیمان درصد گیرایی بالایی دارد که با نفوذ کامل خود درون خلل و فرج‌ها حساسیت حرارتی، انعطاف پذیری و تغییر شکل دائم نمونه را کاهش می‌دهد.

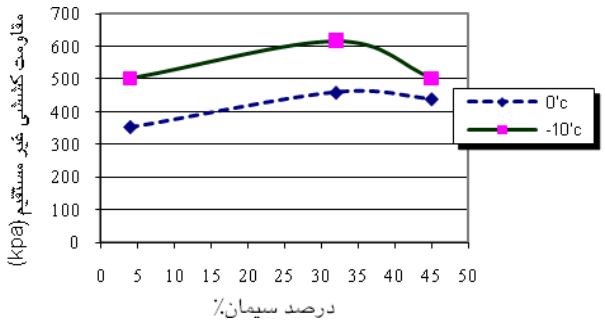
محققان مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها را اندازه‌گیری کرده‌اند و نتایج نشان دهنده کاهش مقاومت با افزایش دما است. در این تحقیق برای یک میزان درصد سیمان بهینه مقاومت در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد فقط ۲۰٪ مقاومت در دمای صفر درجه بوده است.

جدول (۵): نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم با دستگاه UTM در دمای $0^{\circ}C$

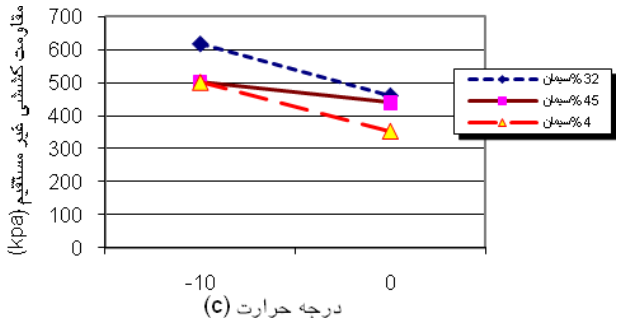
درصد دوغاب سیمان	۴۵٪ سیمان	۳۲٪ سیمان	۴٪ سیمان
حداکثر مقاومت (KN)	۵/۸۲۴	۵/۶۲۹	۴/۳۲۱
مقاومت کششی غیرمستقیم (kpa)	۴۳۹/۰	۴۵۹/۴	۳۵۲/۶۷
تغییر شکل (mm)	۱/۵۸۷	۰/۵۷۴	۰/۹۸

جدول (۶): نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم با دستگاه UTM در دمای $-10^{o}C$

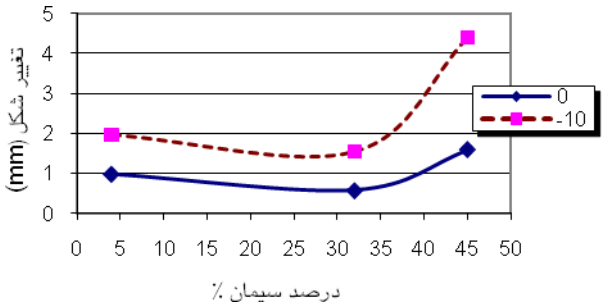
درصد دوغاب سیمان	۴۵٪ سیمان	۳۲٪ سیمان	۴٪ سیمان
حداکثر مقاومت (KN)	۶/۵۸۱	۷/۹۱۲	۶/۲۶۴
مقاومت کششی غیرمستقیم (kpa)	۵۰۲/۲	۶۱۷/۳	۵۰۱/۲
تغییر شکل (mm)	۴/۴۰۸	۱/۵۵۱	۱/۹۵۴



شکل (۴): مقاومت ITS نمونه‌های آسفالت متخلخل اشباع شده در دوغاب سیمان



شکل (۵): مقاومت ITS نمونه‌های آسفالت اشباع شده در دوغاب سیمان در مقابل افزایش دما



شکل (۶): تغییر شکل نمونه‌های آسفالتی اشباع شده در دوغاب سیمان بر حسب درصد سیمان

۷- نتایج

جمع‌بندی نتایج بدست آمده از این تحقیق عبارتند از:

۱- نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص بهینه ۴٪ و دوغاب سیمان بهینه ۳۲٪ بیش‌ترین مقاومت را دارند. این افزایش

مقاومت به‌دلیل نفوذ کامل دوغاب سیمان درون خلل و فرج‌ها تشخیص داده شده است.

۲- با نفوذ کامل دوغاب سیمان قفل و بست بهتری ایجاد شده و نمونه‌ها مانند نمونه‌های بتنی شکل گرفته‌اند. اما چنانچه دوغاب سیمان به‌طور کامل درون خلل و فرج‌ها نفوذ نکند مقاومت نمونه‌ها کمتر شود.

۳- با افزایش درصد دوغاب سیمان، روان بودن کاهش می‌یابد. میزان روانی در ۳۲٪ دوغاب سیمان نزدیک‌به mm ۰/۲۶ است که این میزان نشان‌دهنده سختی مخلوط، مقاومت بیشتر نمونه‌ها در برابر عوامل جوی و محیطی و کاهش تغییرات در برابر گرما است.

۴- نمونه‌های سخت‌تر دارای نسبت مارشال بیش‌تری هستند، بطوری که نمونه‌های با ۳۲٪ دوغاب سیمان بیش‌ترین نسبت مارشال را دارند. این موضوع سخت بودن این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دیگر را نشان می‌دهد. دلیل اصلی این سختی نفوذ کامل دوغاب سیمان درون خلل و فرج‌ها نمونه‌ها تشخیص داده شده است.

۵- نمونه‌های اشباع شده در ۳۲٪ دوغاب سیمان بر خلاف نمونه‌های با ۴٪ و ۴۵٪، مقاومت کششی غیر مستقیم بالایی دارند. علت این اختلاف نیز پر شدن تخلخل نمونه‌ها با دوغاب سیمان است.

۶- نتایج تغییر شکل‌های بدست آمده از آزمایش ITS نشان دادند که نمونه‌های سخت‌تر تغییر شکل کمتری از خود نشان می‌دهند بطوری که نمونه‌های با ۳۲٪ دوغاب سیمان کم‌ترین میزان تغییر شکل را دارند.

۸- مراجع

[۱] مشخصات فنی عمومی راه، نشریه (۱۰۱)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، تجدیـد نظر اول، ۱۳۸٤.

[۲] مهندس سرائی پور، م. آسفالت ، انتشارات دانشگاه تهران.

[۳] Ary Setyawan*"Design and properties of hot mixture porous asphalt for Semi-Flexible pavement applications*" Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil UNS, Jln. Ir. Sutami No.36A Surakarta 57126.

[٤] Becker Y. Mendez M.P, Rodrguez, Vision tecnologica vol.9, No.1.2001 .

[٥] Daines M,E,"*Trials of porous asphalt and rolled asphalt on the A 38 at Burton*" TRRL Research Report 323.1992.

[٦] Dach lanjt T.,K.A. Zamulari, A.B. sterting and T . Toole. *"The Improved design procedure for hot mix asphalt"* "East's 97, Seoul, korea,29-31,1997.

[۷] Hardiman , "*The Improvement of Water Drainage Function and Abrasion Loss of Conventional Porous Asphalt*" Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies , Vol. 5, pp.671- 678,2005.

[۸] G.C. Page. *"Open Graded Friction Courses"*: Florid's Experience Transportation Research Record 1427, TRB, National Research council, Washington D.C,PP1-4. 1993.

[۹] Martin F.C Van de Ven and Andre A.A Molenaar. *"Mechanical characterization of Combi-layer"* pp1-19, AAPT2004 .