



مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای مختلف بر مدول برجهندگی آسفالت

سید محمد هاشمی، منوچهر لطیفی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری دانشکده فنی دانشگاه تهران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران

mlhashemi@yahoo.com

خلاصه

در تحقیق حاضر، نمونه‌های متعددی به روش تراکم ژبراتورری ساخته شده‌اند. این نمونه‌ها در درصد‌های قیر متفاوت و با تعداد دوران ژبراتورری مختلف تهیه شده و مورد آزمایش کشش غیر مستقیم و مقاومت مارشال قرار گرفته‌اند. هر سری از آزمایشها در دمای معین انجام گرفته و نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصله از آزمایشها، تأثیر پارامترهای مختلف شامل درصد قیر، میزان تراکم و دما روی مدول برجهندگی بررسی شده است. بر این اساس، مدول برجهندگی آسفالت با افزایش درصد قیر و دما کاهش یافته و با افزایش میزان تراکم افزایش پیدا می‌کند. در انتها نیز با تعیین مقاومت مارشال نمونه‌ها نمودارهایی ارائه شده است که با استفاده از این نمودارها می‌توان با در دست داشتن یکی از دو پارامتر مدول برجهندگی یا مقاومت مارشال دیگری را به دست آورد.

کلمات کلیدی: مدول برجهندگی، مقاومت مارشال، کشش غیر مستقیم، تراکم ژبراتورری

مقدمه

برای به دست آوردن اثر عوامل مختلف روی لایه آسفالتی نیاز به شناخت درست مواد و مصالح تشکیل دهنده این لایه داریم. عواملی همچون چگونگی بارگذاری و نحوه ساخت و اجرای رویه‌های آسفالتی بر مقاومت و دوام این رویه‌ها تأثیر اساسی دارند. برای تحلیل و به دست آوردن اثر تنش‌ها، کرنش‌ها و سایر پارامترهای موجود برای شناخت رفتار بتن آسفالتی، تئوری‌های مختلفی پیشنهاد شده و مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله این تئوری‌ها می‌توان به تئوری ویسکوالاستیک، تئوری لایه‌ای خطی و تئوری ویسکوپلاستیک اشاره نمود. در بین این تئوری‌ها بهترین تئوری برای تحلیل تنش‌ها و کرنش‌ها و روابط بین آنها تئوری الاستیک خطی است که هم از نظر سادگی و هم از نظر دقت جوابگوی نیاز طراح است [۱]. مدول برجهندگی همچنین تنها پارامتر معرف کلیه خواص مکانیکی آسفالت در روش آستو برای طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر است.

توضیح پارامترهای مورد بررسی:

در این تحقیق اثر سه عامل دما، درصد قیر و میزان تراکم که از مهمترین عوامل مؤثر بر رفتار مکانیکی رویه‌های آسفالتی هستند، روی مدول برجهندگی بتن آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- دما:

با وجود اینکه کشور ما در منطقه معتدل قرار گرفته ولی به دلیل دارا بودن مناطق کوهستانی و گستردگی آن، دارای هر سه نوع منطقه آب هوایی سرد، معتدل و گرم می‌باشد. از سویی بر اساس آیین‌نامه **ASTM-D4123** دمای انجام آزمایش کشش غیر مستقیم برای هر کدام از مناطق آب و هوایی فوق به ترتیب برابر ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد است. به همین دلیل در این تحقیق، آزمایش‌ها در این سه دما انجام شده‌اند.

۲- درصد قیر:

برای بررسی اثرات تغییرات درصد قیر روی مدول برجهندگی سعی شده تا درصد قیر نمونه‌ها به نوعی انتخاب شوند که بتن آسفالتی ساخته شده حداکثر شباهت را با آسفالت‌های مورد استفاده در کشور داشته باشد. از این رو محدوده تغییرات درصد قیر بین ۴ تا ۶ درصد انتخاب شده و نمونه‌ها با ۵



درصد قیر شامل ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ درصد ساخته شده‌اند.

۳- میزان تراکم:

در این تحقیق تغییر در میزان تراکم نمونه با تغییر در تعداد دورانه‌های ژیراتوری، ایجاد شده است. برای انتخاب تعداد دورانه‌ها، از جدول روش **Super pave** استفاده شده است. مطابق این جدول نمونه‌ها با سه دوران ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ دور ساخته شده‌اند. در جدول شماره ۱ استاندارد روش **Super pave** برای تعداد دوران لازم، بر اساس ترافیک مسیر، نشان داده شده است.

جدول ۱: تعداد دورانه‌های لازم برای تراکم نمونه بر اساس میزان ترافیک

ترافیک با فرض دوره طرح ۲۰ ساله (میلیون محور استاندارد)	تعداد دورانه‌ها		
	N _{initial}	N _{design}	N _{max}
<0.3	6	50	75
0.3<~<3	7	75	115
3<~<30	8	100	160
30<	9	125	205

انتخاب منحنی دانه‌بندی

در این تحقیق سعی شده تا نمونه‌های آسفالتی از هر نظر حداکثر تطابق را با آسفالت‌های مورد استفاده در کشور داشته باشد. از این رو از میان دو نوع دانه‌بندی پیوسته و دانه‌بندی باز، نوع اول برای ساخت نمونه‌های آسفالتی انتخاب شد.

برای اینکه دقیقاً درصد‌های مورد استفاده از هر اندازه سنگ‌دانه مشخص باشد نیاز به یک فرمول برای منحنی دانه‌بندی احساس می‌شد زیرا در جداول ارائه شده در مراجع مختلف یک محدوده از درصد‌ها برای قطر مشخصی از سنگ‌دانه پیشنهاد شده است. از سوی دیگر در این جداول فقط به تعداد محدودی از قطر‌ها و اندازه‌الک‌ها اشاره شده و در صورتی که نیاز به استفاده از الک با قطر دیگری احساس می‌شد، درصد مانده روی آن الک مشخص نبود.

بنا به دلایل فوق و پس از انجام بررسی‌های لازم، منحنی دانه‌بندی فولر برای ساخت نمونه‌های آسفالتی مناسب تشخیص داده شد. فرمول منحنی دانه‌بندی فولر در رابطه شماره نشان ۱ داده شده است.

$$P = \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^n \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه **P** درصد رد شده از الک، **d** قطر الک مورد نظر و **d_{max}** قطر بزرگترین سنگ‌دانه مورد استفاده است. منحنی دانه‌بندی مورد استفاده کاملاً با محدوده پیشنهادی آیین‌نامه روسازی ایران (آیین‌نامه ۲۳۴) برای دانه‌بندی رویه‌های آسفالتی مطابقت دارد.

۳- تعداد نمونه‌های ساخته شده برای هر آزمایش و نحوه میانگین‌گیری

برای افزایش دقت، در هر یک از حالت‌های مورد بررسی آزمایش‌ها روی دو نمونه مشابه انجام شده‌اند. در این بخش میانگین نتیجه به دست آمده از آزمایش روی دو نمونه به عنوان جواب نهایی گزارش شده است، اما در دو مورد زیر از گزارش میانگین نتایج به عنوان نتیجه نهایی خودداری شده است:
۱- در مواردی که بین نتیجه دو نمونه مشابه که در یک حالت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، تفاوت زیادی مشاهده شده، مجدداً نمونه‌های مشابه تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در این حالت در صورت تشابه بین نتایج آزمایش‌های اولیه و ثانویه، میانگین چهار عدد به دست آمده به عنوان نتیجه نهایی گزارش شده است. اما اگر در آزمایش ثانویه دو عدد به دست آمده به هم نزدیک بوده و تفاوت چندانی میان آنها وجود نداشت، نتیجه آزمایش ثانویه به عنوان نتیجه نهایی گزارش شده است.

۲- در مواردی که نتیجه آزمایش‌ها بر خلاف انتظار بوده و با روند آزمایش‌های قبلی شباهت نداشته، مجدداً نمونه‌های بتن آسفالتی مشابه تهیه شده و آزمایش با شرایط مشابه روی آنها انجام شده است. در این صورت اگر نتیجه به دست آمده همان یافته قبلی را تأیید کرده، همان نتایج اولیه به عنوان نتیجه نهایی گزارش شده‌اند. اما در غیر این صورت اگر نتیجه آزمایش دوم با روند آزمایش‌های قبلی و شکل کلی نمودارهای ترسیمی تطابق داشته، نتیجه آزمایش دوم به عنوان نتیجه نهایی گزارش شده است.

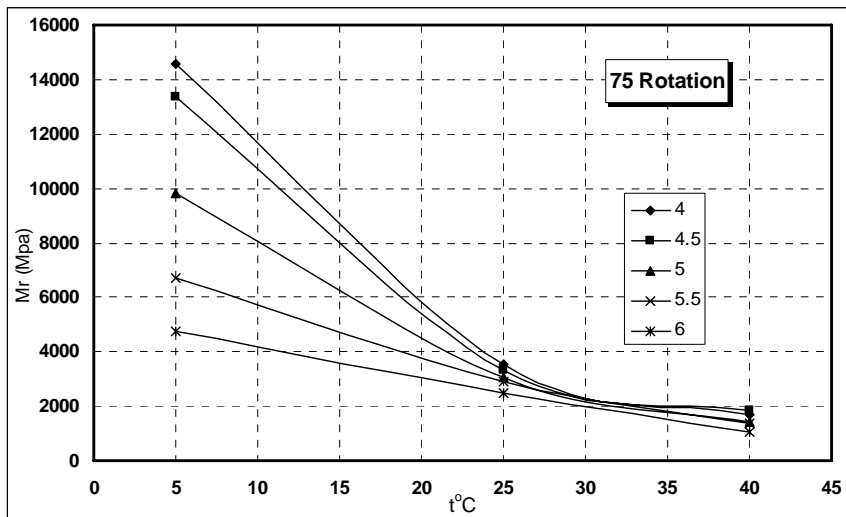


نتایج آزمایش‌های کشش غیر مستقیم

در این تحقیق نمودارها در چند گروه دسته بندی شده‌اند و برای تشخیص اینکه هر گروه نشان دهنده کدام دسته از نمودارهاست، این گروهها نامگذاری شده‌اند. به عنوان مثال گروه دوران ثابت به این معناست که در این گروه در هر نمودار، تمامی اعدادی که برای رسم نمودار استفاده شده‌اند، از آزمایش روی نمونه‌هایی به دست آمده‌اند که این نمونه‌ها همگی با تعداد دوران برابر ساخته شده‌اند.

۱- نتایج نمودارهای دوران ثابت

۱- با افزایش دما مقدار مدول برجهندگی به شدت کاهش پیدا می‌کند. این کاهش فرم یک منحنی را دارد که شکستگی آن در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد می‌باشد. به این معنا که وقتی دما به ۲۵ درجه سانتیگراد می‌رسد، آهنگ کاهش مدول برجهندگی با افزایش دما کاهش پیدا می‌کند.
۲- با افزایش درصد قیر، روند نزولی نمودار مدول برجهندگی در برابر دما از حالت منحنی به فرم خطی تغییر می‌کند. به این معنا که در شکل‌های ۱ تا ۳، نمودار رسم شده برای ۴ درصد قیر حالت منحنی دارد، اما این منحنی به تدریج با افزایش درصد قیر نرمتر می‌شود تا در ۶ درصد قیر تقریباً حالت خطی به خود می‌گیرد. زیرا آهنگ کاهش مدول برجهندگی با افزایش درصد قیر، در دمای ۵ درجه سانتیگراد بیشتر از دو دمای دیگر است. این موضوع باعث می‌شود تا فرم نمودارها که در ابتدا حالت منحنی دارند به تدریج تغییر کند تا آنجا که در منحنی رسم شده برای نمونه‌هایی که ۶ درصد قیر داشته‌اند، مدول برجهندگی به قدری کاهش می‌یابد که نمودار به جای حالت منحنی، فرم تقریباً خطی پیدا می‌کند.

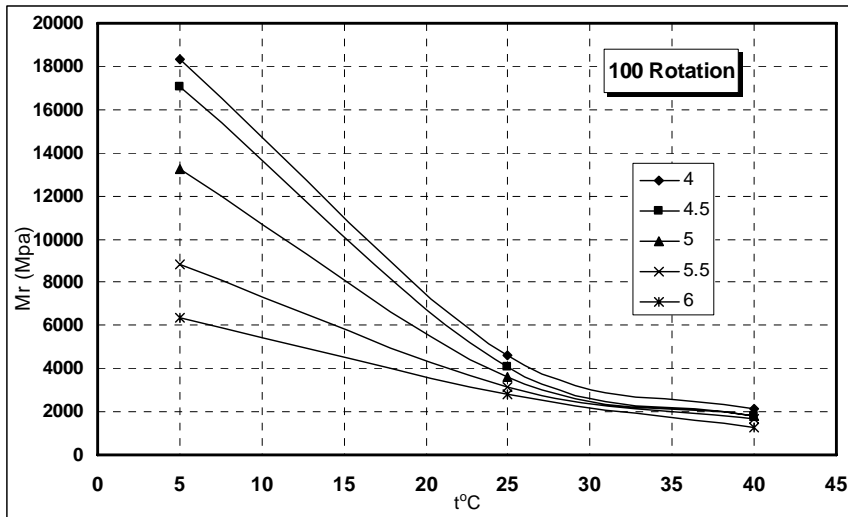


شکل ۱: تغییرات مدول برجهندگی با دما - نمونه‌های ساخته شده با ۷۵ دور دوران

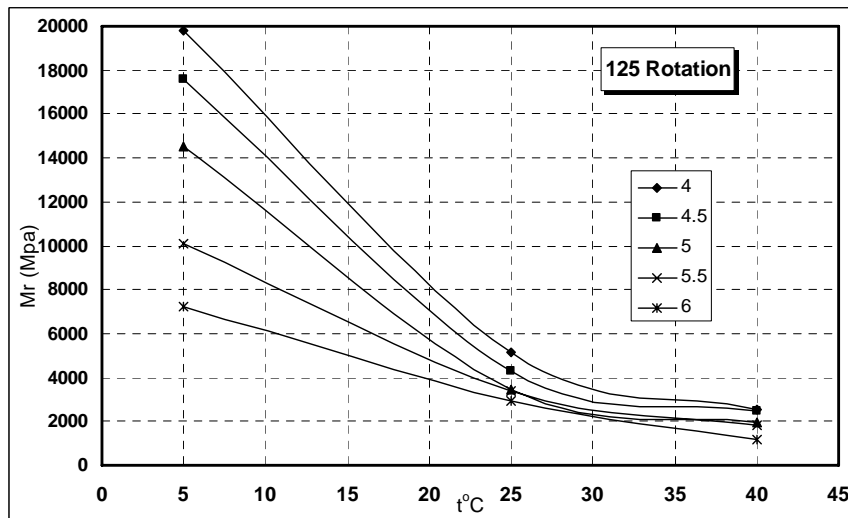
۲- نتایج به دست آمده از نمودارهای دما ثابت:

با افزایش تعداد دورانها ژبراتوروی یا به عبارت دیگر با افزایش تراکم نمونه‌های آسفالتی مقدار مدول برجهندگی نیز افزایش پیدا می‌کند. این افزایش به صورت خطی نیست و با افزایش تعداد دورانها، آهنگ افزایش مدول برجهندگی کاهش پیدا می‌کند که این موضوع در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است.

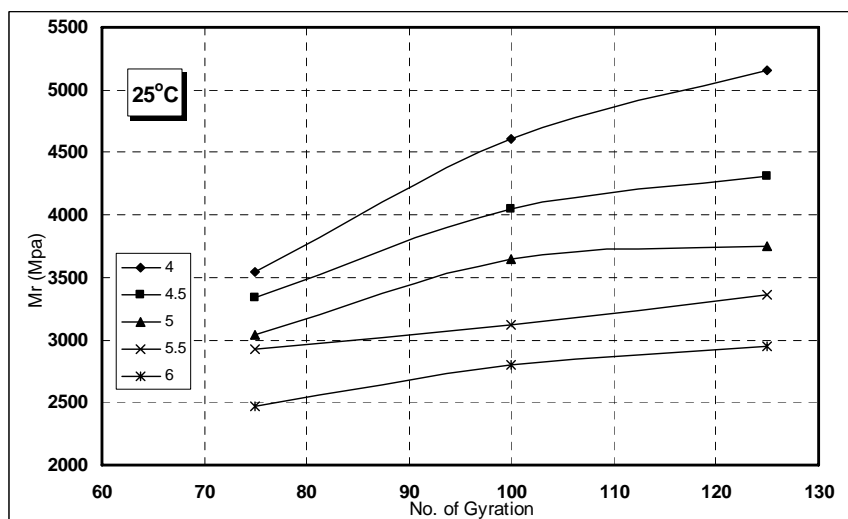
تعداد دورانهای ژبراتوروی در واقع بیان کننده تعداد عبور غلتک از روی بتن آسفالتی است. بدیهی است هر چه تعداد دفعات عبور غلتک از روی لایه آسفالتی افزایش یابد، مقدار تراکم بتن آسفالتی نیز اضافه می‌شود. اما از جایی به بعد دیگر اضافه کردن تعداد دورانها اثر چندانی روی تراکم نمونه نخواهد داشت که این موضوع نیز تأییدی بر شباهت روش تراکم ژبراتوروی و روش تراکم غلتکی است. زیرا در تراکم غلتکی نیز پس از تعداد معینی عبور غلتک، تراکم به میزان تقریباً ثابتی می‌رسد.



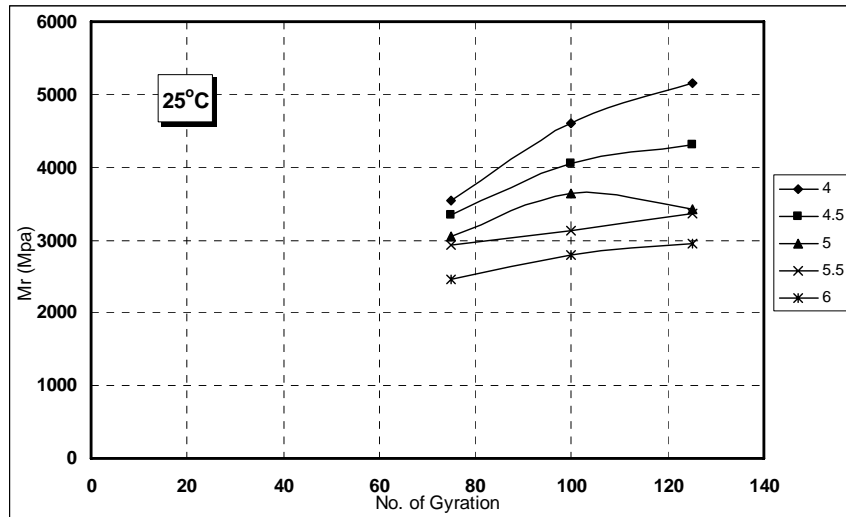
شکل ۲: تغییرات مدول برجهندگی با دما - نمونه‌های ساخته شده با ۱۰۰ دور دوران



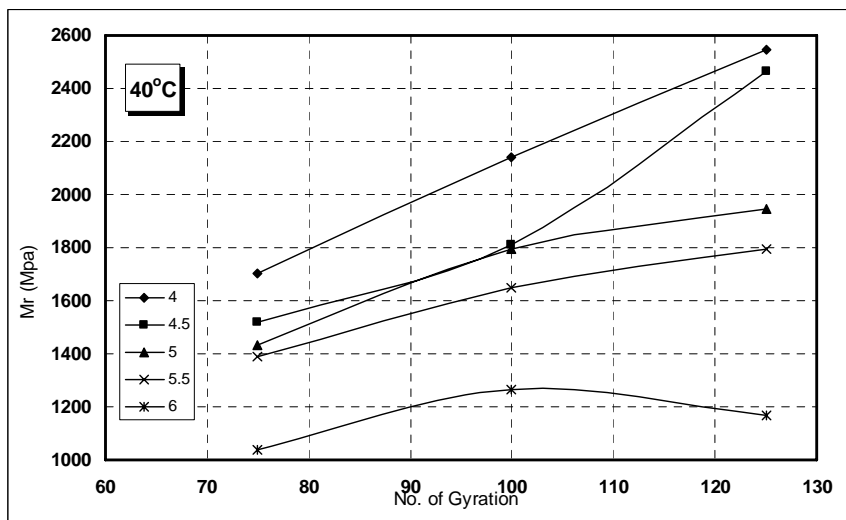
شکل ۳: تغییرات مدول برجهندگی با دما - نمونه‌های ساخته شده با ۱۲۵ دور دوران



شکل ۴: تغییرات مدول برجهندگی با تعداد دوارن - آزمایش‌های انجام شده در دمای ۵ درجه سانتیگراد



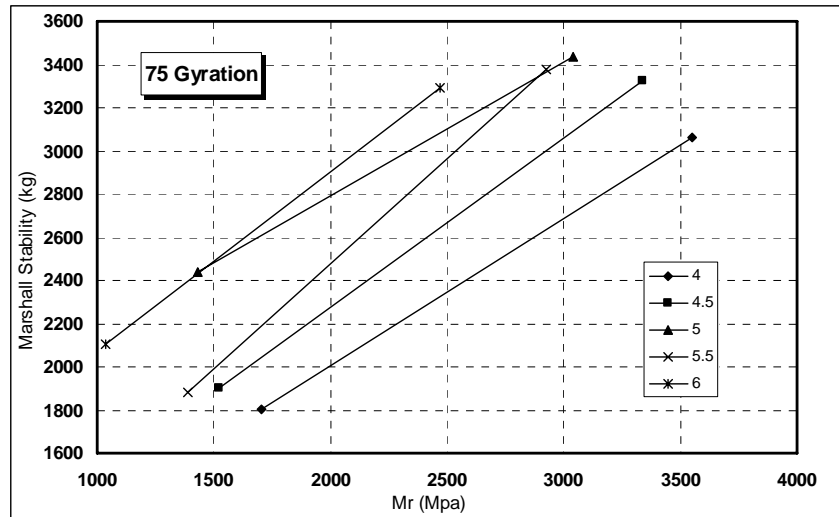
شکل ۵: تغییرات مدول برجهندگی با تعداد دوارن - آزمایشهای انجام شده در دمای ۵ درجه سانتیگراد



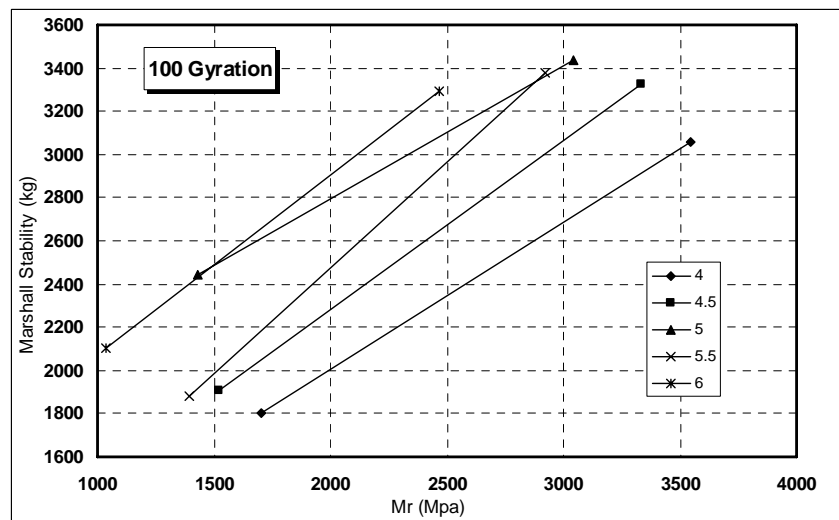
شکل ۶: تغییرات مدول برجهندگی با تعداد دوارن - آزمایشهای انجام شده در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد

ترکیب نتایج آزمایشهای کشش غیر مستقیم با نتایج آزمایشهای مارشال

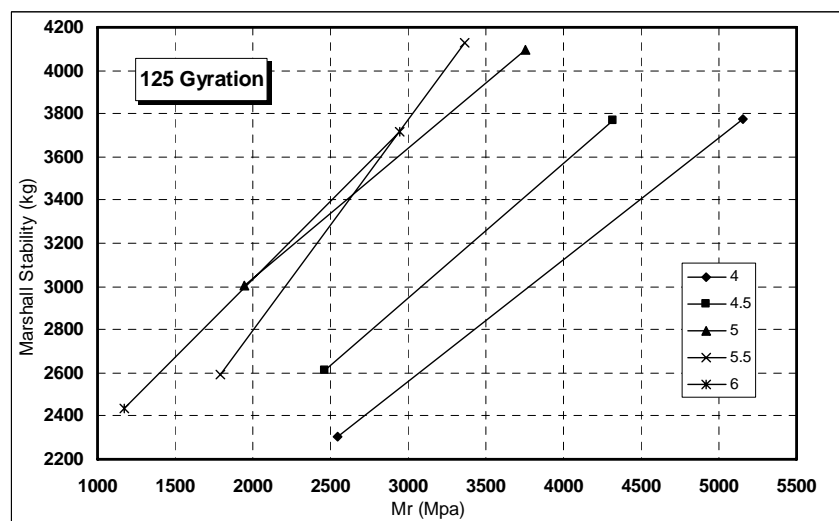
شکلهای شماره ۷ تا ۹ نمودارهای کاربردی این تحقیق هستند و در صورتی که یکی از دو پارامتر مقاومت مارشال یا مدول برجهندگی لایه آسفالتی مشخص باشد، می توان پارامتر دیگر را با استفاده از این نمودارها تعیین نمود. دلیل ارائه نمودارها به این صورت این است که در بین سه عامل دما، درصد قیر و میزان تراکم تنها عاملی که اثر آن کاملاً قطعی است و حتی یک مورد استثنا در تمامی آزمایشهای انجام شده وجود ندارد که اثر این عامل را نقض کرده باشد، عامل دماست. بدین معنا که همواره با افزایش دما مقدار مقاومت مارشال و مدول برجهندگی کاهش می یابد. در صورتی که این موضوع در مورد میزان تراکم و درصد قیر دارای موارد استثنا می باشد و ضمن آزمایشهای انجام شده، مواردی وجود دارد که با تغییر درصد قیر یا میزان تراکم، تغییر چندانی در مقاومت مارشال یا مدول برجهندگی مشاهده نمی شود. به همین جهت این نمودارها برای مقادیر مختلف تراکم به صورت مجزا رسم شده اند. همچنین تعداد دورانهایی نظیر هر منحنی نیز در کنار نمودار مشخص شده است و تنها نکته ای که در نمودارها نشان داده نشده، مقدار دما است و این نکته نیز با توجه به مطالب فوق کاملاً واضح است، به این معنا که در هر منحنی، نقطه ای که در بالا قرار دارد و مقدار مدول برجهندگی و مقاومت مارشال بیشتری دارد، مربوط به نتیجه آزمایش در ۲۵ درجه سانتیگراد و نقطه دیگر مربوط به نتیجه آزمایش در ۴۰ درجه سانتیگراد است.



شکل ۷: تغییرات مدول برجهندگی با مقاومت مارشال - نمونه‌های ساخته شده با ۷۵ دور دوران



شکل ۸: تغییرات مدول برجهندگی با مقاومت مارشال - نمونه‌های ساخته شده با ۱۰۰ دور دوران



شکل ۹: تغییرات مدول برجهندگی با مقاومت مارشال - نمونه‌های ساخته شده با ۱۲۵ دور دوران



نتایج کلی

۱- اهمیت عامل دما

همانطور که در بخش نتایج به دست آمده از نمودارها نیز اشاره شد مقدار تغییرات مدول برجهندگی در برابر دما، از دو پارامتر دیگر یعنی درصد قیر و مقدار تراکم بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که اصلی‌ترین پارامتر تأثیرگذار روی مدول برجهندگی در بین این سه پارامتر، عامل دماست و لذا هنگام طراحی رویه‌های آسفالتی توجه به آب و هوای منطقه‌ای و تغییرات دمایی منطقه مورد نظر در طول شب و روز از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین مقدار اختلاف دمای کلی منطقه در فصول مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همانطور که اشاره شد بر اساس نتایج آزمایشها مقدار متوسط مدول برجهندگی، با افزایش دما از ۵ به ۴۰ درجه سانتیگراد، ۸۶ درصد کاهش پیدا می‌کند. به علاوه این موضوع در مورد متوسط نتایج صادق است و هنگامی که صحبت از اصل نتایج به میان می‌آید این اختلاف افزایش پیدا می‌کند. لذا با توجه به اینکه در اکثر نقاط کشور ما اختلاف دمای فصلی بیش از این مقدار است، اهمیت توجه به عامل دما و در نظر گرفتن اثر آن در طراحی‌های رویه‌های آسفالتی روشن‌تر می‌شود. نکته مهم دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که اهمیت عامل دما برای مناطقی که در آنها دما در فصل زمستان کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند، بیش از سایر نقاط است. زیرا نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اثر عامل دما بر مدول برجهندگی در دماهای پایین بسیار شدیدتر است. از این رو در طراحی رویه‌های آسفالتی همواره باید توجه و دقت بیشتر روی مناطقی باشد که در فصل زمستان کاهش دمای زیادی دارند، زیرا در این مناطق آسفالت تا حد زیادی انعطاف‌پذیری خود را از دست داده و حالت شکننده پیدا می‌کند.

۲- شرایط مناسب استفاده از قیر ۶۰-۷۰

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، مشخص است که بهترین آب و هوا برای استفاده از قیر ۶۰-۷۰ آب و هوای معتدل است و در آب و هوای سرد در صورتی که از این نوع قیر برای ساخت آسفالت استفاده شود، آسفالت بسیار سخت و شکننده خواهد شد و امکان به وجود آمدن ترک‌های طولی و عرضی در آن بسیار زیاد است. تغییر شکل‌های بسیار بزرگ نمونه‌های آسفالتی حین انجام آزمایش‌های کشش غیر مستقیم در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد و همچنین مقاومت مارشال به دست آمده از این نمونه‌ها نشان می‌دهد، در صورتی که در مناطق گرم از قیر ۶۰-۷۰ استفاده شود، آسفالت به دست آمده از مدول برجهندگی و مقاومت مارشال اندکی برخوردار است و به لحاظ استقامت دارای ضعف می‌باشد. همچنین در صورت استفاده از قیر ۶۰-۷۰ در مناطق گرمسیری و به خصوص در راههایی که در آنها بخشی از ترافیک عبوری را خودروهای سنگین تشکیل می‌دهند، امکان به وجود آمدن تغییر شکل ماندگار بسیار زیاد خواهد بود. در نتیجه بهتر است تا حد امکان در مناطقی که از آب و هوای گرمی برخوردارند از قیرهایی با درجه نفوذ کمتر استفاده شود.

مراجع

1. Almudaiheem, J., and Al-Sugair, F., "Effect of Loading Magnitude on Measured Resilient Modulus of Asphalt Concrete Mixes." Transportation Research Record, No.1317, Transportation Research Board, Washington, DC, pp.139-144, 1991.
2. Brown, E.R., and Foo, Kee Y., "Evaluation of Variability in Resilient Modulus Test Results (ASTM D 4123)", ASTM Journal of Testing & Evaluation, Vol. 19 No 1, p 1-13, 1991.
3. Asphalt Institute. (2001). Superpave Mix Design. Superpave Series No.2 (SP-02). Asphalt Institute. Lexington, Ky.