



بررسی اثر افزودن گوگرد بر پارامترهای طرح مارشال و دوام مخلوط های آسفالتی

یونس نیازی^۱، محمد احمدی^۲

۱- استادیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری دانشگاه فردوسی مشهد

Ahmadi_1981@yahoo.com

خلاصه

در مقاله حاضر تلاش شده است تا با جایگزینی بخشی از قیر مصرفی با گوگرد به بررسی پارامترهای طرح مارشال و دوام مخلوط های آسفالت گوگردی و مقایسه آن با مخلوط های آسفالتی متعارف بپردازیم. به این منظور، ابتدا درصد قیر بهینه مخلوط های گوگردی در نسبت های قیر/گوگرد ۲۰/۸۰ و ۳۰/۷۰ به دست آمده است. در مرحله بعد روند تغییرات پارامترهای طرح مارشال با افزودن گوگرد مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تحلیل شده اند. بررسی ها نشان می دهد که افزودن گوگرد تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای طرح مارشال ندارد. سپس بر روی نمونه های تهیه شده از مخلوط های آسفالت گوگردی و آسفالت متعارف آزمایش دوام صورت گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه شده اند. تحلیل نتایج نشان می دهد که افزودن گوگرد تأثیر قابل توجهی بر افزایش دوام مخلوط آسفالتی دارد.

کلمات کلیدی: مخلوط های آسفالتی، گوگرد، پارامترهای طرح مارشال، دوام

مقدمه

وجود گوگرد مازاد در پالایشگاههای گاز کشور، توجه به کاربردهای جدید آن را ضروری ساخته است. یکی از این کاربردها استفاده از گوگرد در تهیه مخلوط های آسفالتی است که منجر به بهبود برخی از ویژگیهای فنی مخلوط های آسفالتی می شود [۱]. البته این موضوع از زمانهای گذشته مورد توجه بوده است [۲]. طی سالهای اخیر، کاربرد گوگرد در مخلوط های آسفالتی دچار فراز و نشیب بسیار شده است که مهمترین عامل اثرگذار بر آن تغییر قیمت نسبی گوگرد و قیر در بازارهای جهانی بوده است [۳]. اما بحران انرژی و گران شدن مشتقات نفتی در دهه ۱۹۷۰ باعث پیشرفتهای خوبی در این زمینه گردید. در سالهای اخیر تحقیقات وسیعی در این رابطه در کانادا، آمریکا، انگلستان، کویت و عربستان انجام شده است [۴]. نظر به اهمیت موضوع در مقاله حاضر تلاش شده است تا با جایگزینی بخشی از قیر مصرفی با گوگرد به بررسی پارامترهای طرح مارشال و دوام مخلوط های آسفالت گوگردی بپردازیم.

مصالح مصرفی

مصالح سنگی

مصالح سنگی بکار رفته در این تحقیق دارای وزن مخصوص $2/67 \frac{gr}{cm^3}$ می باشد. برای انجام این تحقیق از دانه بندی شماره ۴ از دانه بندیهای پیوسته آیین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران (نشریه ۲۳۴) استفاده شده است. علت انتخاب این دانه بندی که برای استفاده در لایه توپکا توصیه شده است، بررسی دوام در سطحی ترین لایه آسفالت است که بیش از سایر لایه ها در معرض شرایط محیطی و فشار ناشی از عبور ترافیک قرار دارد.

قیر

قیر مورد استفاده در این تحقیق قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می باشد. قیر مورد نیاز از پالایشگاه تهران تهیه شده و مشخصات آن پس از انجام آزمایش، مطابق جدول (۱) تعیین گردید.

گوگرد

گوگرد مورد نیاز برای انجام این تحقیق از پالایشگاه گاز شهید هاشمی نژاد (خانگیران سرخس) تهیه شده است و درجه خلوص آن بیش از ۹۹/۵٪ می باشد [۱].



جدول ۱- مشخصات قیر مورد استفاده در تحقیق

شماره استاندارد	حدود قابل قبول آیین نامه	مقدار به دست آمده از آزمایش	واحد	شرح آزمایش
ASTM-D5	۶۰-۷۰	۶۴	0.1 mm	درجه نفوذ
ASTM-D2170	۲۰۰ <	۳۱۸	Cst.	کندروانی جنبشی
ASTM-D70	۰/۸۵-۱/۰۷۶	۱/۰۱۳	gr/cm ³	وزن مخصوص
ASTM-D36	۴۹-۵۶	۵۲	°C	نقطه نرمی

روش تهیه قیر گوگردی

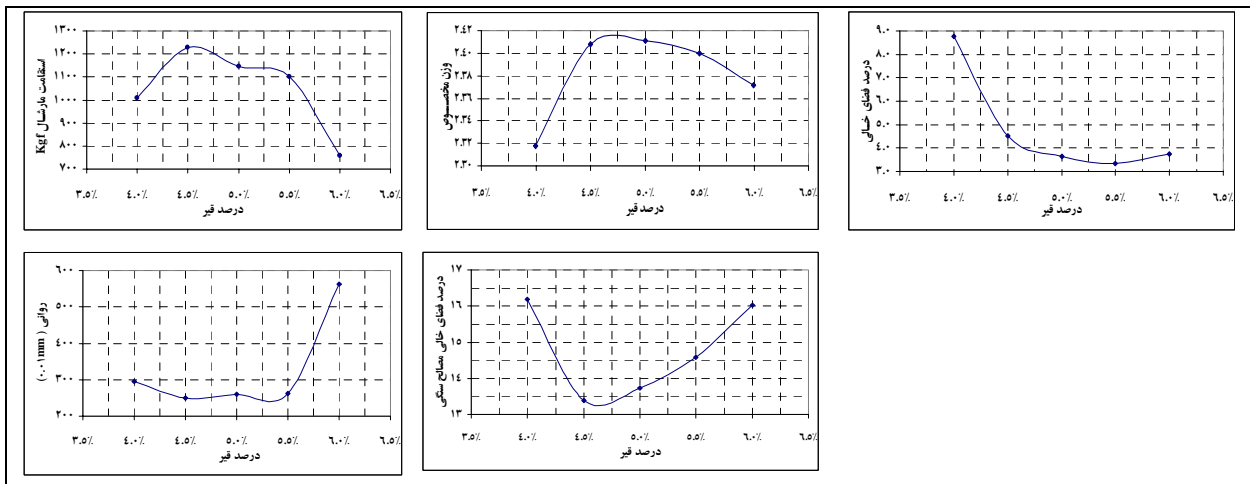
در تجربیات مشابه در کشورهای دیگر برای ترکیب گوگرد با مخلوط آسفالتی از دو روش استفاده شده است: یکی افزودن گوگرد مذاب به قیر و سپس استفاده از این مخلوط در تهیه آسفالت و دیگری افزودن پودر گوگرد به مصالح سنگی و قیر در زمان اختلاط آنها با یکدیگر [۵]. نظر به این که مخلوط تهیه شده در روش اول همگن تر است، در این تحقیق از روش اول استفاده شده است. برای اختلاط قیر با گوگرد، پس از گرم کردن قیر و ذوب گوگرد در دمای ۱۳۵°C هر دو ماده با هم مخلوط شده و با استفاده از همزن سریع که تنش برشی شدیدی اعمال می کند، به مدت ۹۰ ثانیه با یکدیگر مخلوط شدند. به این ترتیب مخلوطی همگن به دست می آید که کندروانی آن در مقایسه با قیر خالص کمتر است و رنگ قهوه ای تیره شبیه به امولسیون قیر دارد.

طرح مخلوط های آسفالتی

برای انجام آزمایش مارشال روی نمونه های آسفالت گوگردی، باتوجه به تجربیات محققان قبلی [۲،۵،۶]، سه نسبت مختلف قیر/گوگرد شامل ۰/۱۰۰ یا نمونه کنترل، ۲۰/۸۰ و ۳۰/۷۰ مورد استفاده قرار گرفت.

در اولین گام به منظور طرح مخلوط، ۱۵ نمونه مارشال کنترل (نسبت قیر به گوگرد ۰/۱۰۰) در ۵ درصد مختلف قیر ساخته شد و نتایج آزمایش مارشال این نمونه ها به دست آمده و نمودارهای مارشال آن ترسیم گردید. نتایج آزمایش مارشال نمونه های کنترل در شکل (۱) درج شده است.

با توجه به نمودارهای شکل (۱) درصد قیر بهینه برای نمونه های آسفالت کنترل معادل ۴/۶٪ تعیین گردید. سپس با توجه به روابط (۱) و (۲) و وزن مخصوص قیر گوگردی و همچنین درصد قیر گوگردی مورد نیاز برای ساخت نمونه های آسفالت گوگردی به دست آمد. در این دو رابطه که بر مبنای روش حجم معادل تدوین شده است [۶]، فرض بر این است که با جایگزین شدن بخشی از قیر با گوگرد پارامترهای حجمی مخلوط نظیر درصد فضای خالی نباید تغییر کند. زیرا حجم فضای خالی آسفالت مترکم شده نقش تعیین کننده ای در دوام و سایر ویژگی های فنی مخلوط آسفالتی دارد.



شکل ۱- نمودارهای طرح مارشال نمونه های آسفالت کنترلی

$$SG_{SA} = \frac{100}{\frac{P_S}{SG_s} + \frac{P_A}{SG_A}} \quad (1)$$



$$P_{SA} = \frac{\frac{SG_{SA}}{SG_A} \times P_A \times 100}{\frac{SG_{SA}}{SG_A} \times P_A + (100 - P_A)} \quad (2)$$

که در روابط فوق:

SG_A : وزن مخصوص قیر که در این تحقیق برابر ۱/۰۱۳ در نظر گرفته می شود.

SG_S : وزن مخصوص گوگرد مایع که برابر ۱/۹۵۱ در نظر گرفته می شود.

SG_{SA} : وزن مخصوص قیر گوگردی که از رابطه (۱) محاسبه می شود.

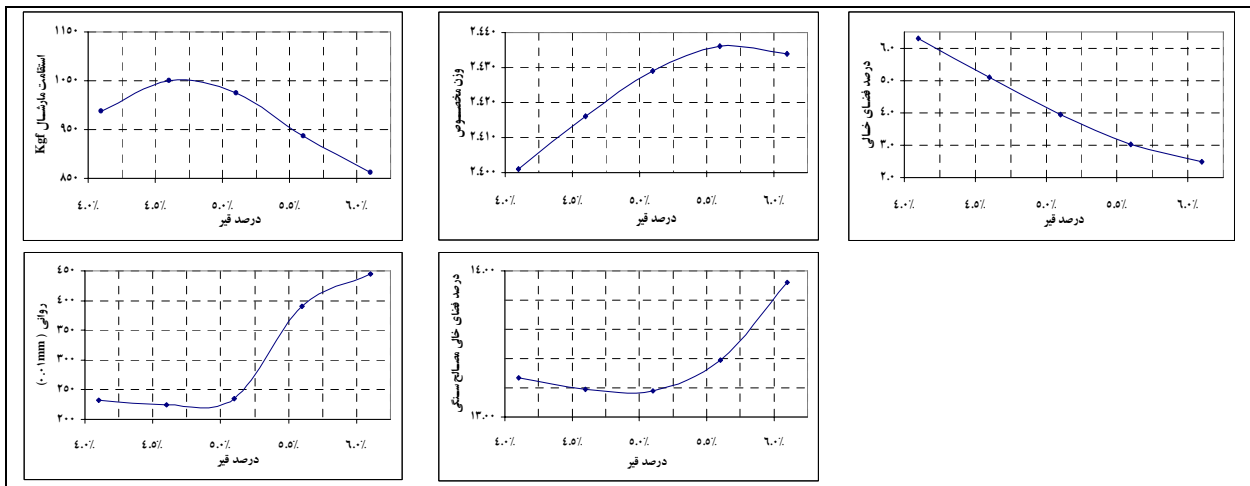
P_A, P_S, P_{SA} : که به ترتیب درصد قیر، درصد گوگرد و درصد قیر گوگردی در مخلوط می باشند.

در جدول (۲) نتایج روابط فوق به ازای نسبت های مختلف قیر/گوگرد درج شده است.

جدول ۲- درصد بهینه قیر گوگردی بر مبنای روش حجم معادل

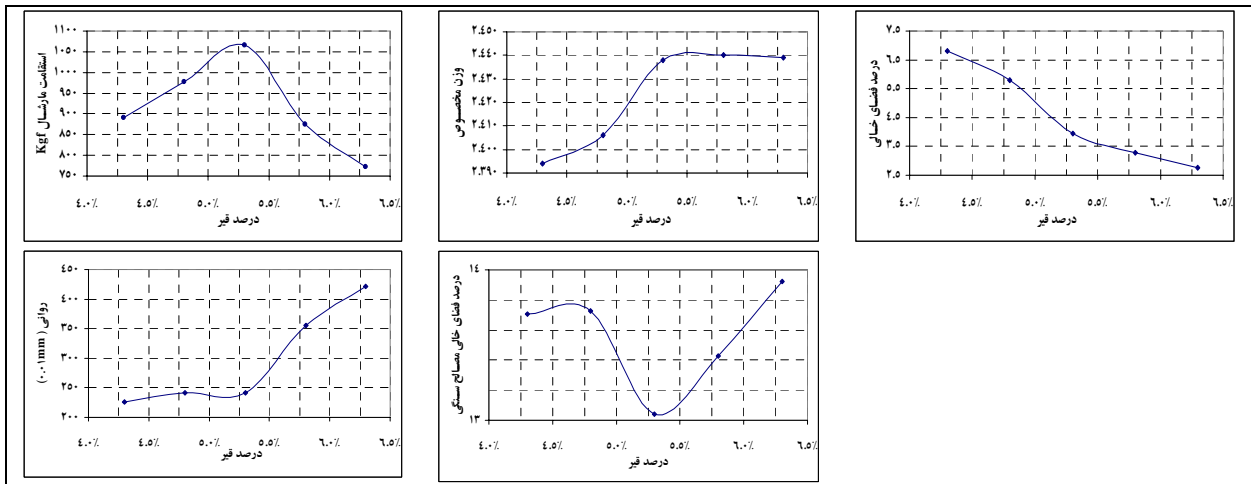
نسبت قیر/گوگرد	وزن مخصوص قیر گوگردی SG_{SA}	درصد بهینه قیر گوگردی بر مبنای روش حجم معادل P_{SA}
۲۰/۸۰	۱/۱۲۱	۵/۱٪
۳۰/۷۰	۱/۱۸۴	۵/۳٪

با محاسبه درصد ماده چسباننده در مخلوط قیر گوگردی، برای بررسی نحوه تغییر سایر پارامترهای طرح مارشال مخلوط با تغییر درصد ماده چسباننده، ۱۵ نمونه مارشال دیگر در هریک از نسبت های مختلف قیر/گوگرد ساخته شد و با انجام آزمایش مارشال روی آنها، نمودارهای مارشال ترسیم گردیده و با محاسبه درصد قیر بهینه، نتیجه حاصل با روش حجم معادل مقایسه گردید. در شکل های (۲) و (۳) نمودارهای طرح مارشال مخلوط آسفالت گوگردی با نسبت قیر/گوگرد ۲۰/۸۰ و ۳۰/۷۰ به ترتیب درج شده است.



شکل ۲- نمودارهای طرح مارشال نمونه های آسفالت گوگردی با نسبت قیر/گوگرد ۲۰/۸۰

با توجه به اشکال (۲) و (۳) درصد ماده چسباننده بهینه در نسبت قیر/گوگرد ۲۰/۸۰ معادل ۵/۱٪ و در نسبت ۳۰/۷۰ معادل ۵/۳٪ تعیین گردید که با نتیجه جدول (۲) کاملاً منطبق است.



شکل ۳- نمودارهای طرح مارشال نمونه های آسفالت گوگردی با نسبت قیر/گوگرد ۳۰/۷۰

تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش مارشال

با توجه به نتایج آزمایش مارشال مخلوط آسفالت گوگردی و مخلوط آسفالتی کنترل که در اشکال (۱)، (۲) و (۳) به صورت خلاصه درج شده است، به بررسی نحوه تغییر پارامترهای طرح مارشال با افزودن نسبت های مختلف قیر/گوگرد به مخلوط می پردازیم:

استقامت مارشال

کاربرد گوگرد میزان حداکثر استقامت را کاهش می دهد. البته این کاهش جزئی است و در حدود ۱۰٪ تا ۱۵٪ از میزان استقامت مارشال مخلوط آسفالتی کنترل را تشکیل می دهد. همچنین با افزایش سهم گوگرد از ۲۰٪ به ۳۰٪ در ماده چسباننده قیری، روند کاهش استقامت مارشال باز هم ادامه می یابد. به نظر می رسد مهمترین علت این پدیده کاهش کندروانی قیر گوگردی در مقایسه با قیر معمولی باشد که منجر به کاهش جزئی در استقامت مارشال و بهبود کارایی مخلوط شده است.

روانی مارشال

کاربرد گوگرد منجر به مقدار جزئی کاهش روانی آسفالت می شود. مقدار کاهش روانی در حدود ۱۰٪ تا ۲۰٪ از روانی مارشال مخلوط های آسفالتی کنترل است. همچنین با افزایش سهم گوگرد از ۲۰٪ به ۳۰٪، تغییر محسوسی در روانی نمونه های مارشال دیده نمی شود. با افزایش درصد قیر در مخلوط آسفالتی نیز همانطور که در شکل های (۱)، (۲) و (۳) مشخص است روند افزایش روانی مارشال سیر صعودی می یابد.

درصد فضای خالی نمونه آسفالتی

جایگزین شدن گوگرد با ۲۰٪ تا ۳۰٪ از قیر مصرفی منجر به افزایش درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی به میزان ۰/۳٪ در درصد قیر بهینه شده است. بجز در درصد قیر بهینه، در سایر درصدها هیچ روند خاصی بین درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی کنترلی و مخلوط های گوگردی مشاهده نمی شود. اما افزایش سهم گوگرد از ۲۰٪ به ۳۰٪ در چسباننده قیری منجر به افزایش درصد فضای خالی در مخلوط آسفالتی شده است. میزان این افزایش بین ۰/۳٪ تا ۰/۷٪ برای درصدهای مختلف ماده چسباننده متغیر است.

درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA)

افزودن گوگرد تغییرات این پارامتر را بسیار محدودتر می کند. به این معنی که فضای خالی مصالح سنگی در مخلوط کنترل بین ۱۳/۳۸٪ و ۱۶/۱۹٪ متغیر است، در حالیکه دامنه تغییرات این پارامتر در مخلوط آسفالت گوگردی بین ۱۳/۰۴٪ و ۱۳/۹۲٪ می باشد. فضای خالی مصالح سنگی تا حدودی از درصد چسباننده قیری در مخلوط متأثر است. البته این تأثیر فقط تا حدی است که چسباننده قیری به عنوان یک روان کننده بر تراکم پذیری دانه های مصالح سنگی اثرگذار است [۷]. علت کاهش درصد فضای خالی مصالح سنگی نمونه های گوگردی نسبت به آسفالت کنترل نیز می تواند همین عامل باشد. یعنی کاهش کندروانی قیر گوگردی عاملی است برای تراکم بهتر مخلوط و در نتیجه کاهش پارامتر درصد فضای خالی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی.

**وزن مخصوص**

جایگزینی گوگرد با بخشی از قیر، موجب افزایش وزن مخصوص نمونه های مخلوط آسفالتی می شود. این افزایش در حدود ۱/۵٪ تا ۲٪ وزن مخصوص مخلوط های آسفالتی کنترل در درصد قیر متناظر می باشد. همچنین بررسیهای دقیق تر نشان می دهد که تفاوت محسوسی بین وزن مخصوص مخلوط های آسفالتی با نسبت قیر/گوگرد ۲۰/۸۰ با وزن مخصوص مخلوط های آسفالتی با نسبت قیر/گوگرد ۳۰/۷۰ وجود ندارد.

آزمایش دوام

چسبندگی بین سطح سنگدانه ها و قیر ممکن است با نفوذ آب به زیر لعاب نازک قیر و جدا شدن آن از سطح سنگدانه از بین برود [۸]. تاکنون آزمایشهای مختلفی برای اندازه گیری پتانسیل از بین رفتن چسبندگی بین قیر و سنگدانه ها بر اثر وجود رطوبت ابداع شده است. از آنجا که روش *AASHTO-T283* کامل ترین شیوه در انجام آزمایش دوام است، در تحقیق حاضر از این روش برای ارزیابی دوام مخلوط های آسفالتی گوگردار استفاده شده است.

برای انجام آزمایش دو سری نمونه استوانه ای متراکم شده تهیه می شود به نحوی که میانگین فضای خالی آنها تقریباً با هم برابر باشد (۶٪ تا ۸٪). برای مخلوط های با دانه بندی پیوسته، یک سری از نمونه ها داخل کیسه های پلاستیکی قرار گرفته و کاملاً ایزوله شده و ۲ ساعت در حمام آب با دمای 25°C قرار گرفته سپس مورد آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم قرار می گیرد.

دومین مجموعه از نمونه ها برای مدتی زیر آب و تحت خلأ نسبی قرار می گیرد، به نحوی که درصد آب جذب شده به نمونه ها به ۵۵ تا ۸۰٪ حجم فضای خالی نمونه ها برسد. سپس نمونه ها در معرض یک نوبت یخندان و ذوب یخ قرار گرفته و در نهایت در دمای 25°C مورد آزمایش کشش غیرمستقیم قرار می گیرد. مقاومت کششی هر یک از نمونه ها با توجه به حداکثر بار اعمال شده و ابعاد نمونه محاسبه گشته و در نهایت شاخص مقاومت باقیمانده از رابطه (۳) به دست می آید [۸].

$$S_{f2} = \left(\frac{S_{f2}}{S_{f1}} \right) \times 100 \quad (3)$$

S_{f1} : میانگین مقاومت کششی نمونه های چرخه کنترل

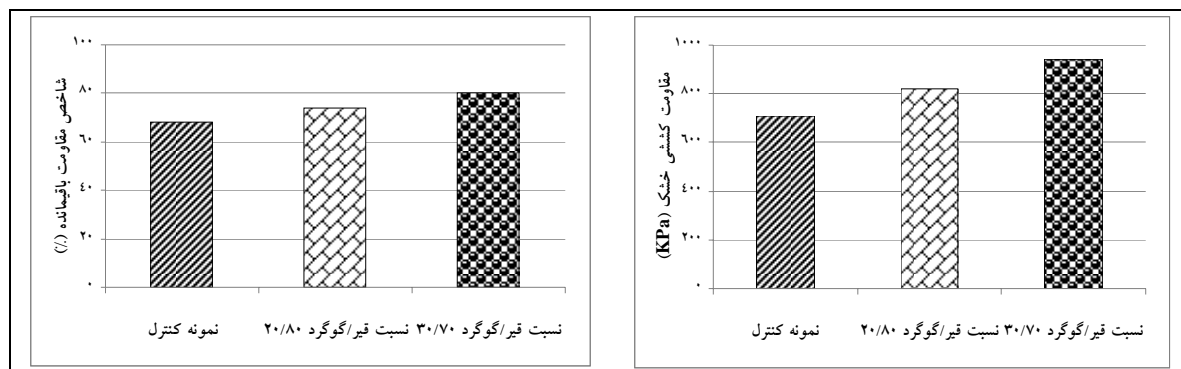
S_{f2} : میانگین مقاومت کششی نمونه های چرخه دوام

نتایج آزمایش دوام

برای انجام آزمایش دوام روی نمونه های ساخته شده، ۱۸ نمونه مارشال شامل ۶ نمونه مارشال برای مخلوط آسفالت کنترل، ۶ نمونه مارشال برای مخلوط آسفالت گوگردی با نسبت قیر/گوگرد ۲۰/۸۰ و تعداد ۶ نمونه مارشال برای مخلوط آسفالت گوگردی با نسبت قیر/گوگرد ۳۰/۷۰ تهیه گردید. نتایج آزمایش در جدول (۳) درج شده است. در نمودار شکل (۴) نیز روند تغییرات دوام مخلوطهای آسفالتی با جایگزینی مقادیر مختلف گوگرد با قیر، با توجه به داده های جدول (۳) ترسیم شده است.

جدول ۳- نتایج آزمایش دوام مخلوط کنترل و مخلوط های گوگردی

شخص مقاومت باقیمانده	میانگین مقاومت کششی (Kpa)	میانگین درصد فضای خالی	میانگین وزن مخصوص	نحوه عمل آوری	نوع نمونه
۰/۶۸	۷۰۷	۶/۳۹	۲/۳۵۷	سیکل کنترل	مخلوط کنترل
	۴۷۹	۶/۴۰	۲/۳۵۷	سیکل دوام	
۰/۷۴	۸۱۹	۶/۸۴	۲/۳۵۶	سیکل کنترل	آسفالت گوگردی با نسبت قیر/گوگرد ۲۰/۸۰
	۶۰۲	۶/۸۵	۲/۳۵۶	سیکل دوام	
۰/۸۰	۹۴۱	۶/۲۱	۲/۳۸۰	سیکل کنترل	آسفالت گوگردی با نسبت قیر/گوگرد ۳۰/۷۰
	۷۵۵	۶/۲۴	۲/۳۷۹	سیکل دوام	



شکل ۴- نمودار تغییرات مقاومت کششی و شاخص مقاومت باقیمانده با افزودن گوگرد به مخلوط آسفالتی

نمودار شکل (۴) نشان می‌دهد که جایگزینی ۲۰٪ از قیر مصرفی با گوگرد موجب افزایش مقاومت کششی مخلوط به میزان حدوداً ۱۶٪ شده است. افزایش سهم گوگرد در ماده چسباننده از ۲۰٪ به ۳۰٪ سبب ۱۵٪ دیگر افزایش در مقاومت کششی مخلوط شده است. همچنین چنانچه ۲۰٪ از قیر مصرفی با گوگرد جایگزین شود، شاخص مقاومت کششی باقیمانده ۸٪ افزایش می‌یابد و رساندن سهم گوگرد به ۳۰٪ از ماده چسباننده سبب ۶٪ دیگر افزایش در شاخص مقاومت کششی باقیمانده خواهد شد.

بنابراین هر چه مقدار گوگرد در ترکیب قیر گوگردی بیشتر باشد، میزان افزایش مقاومت کششی خشک و دوام بیشتر است که نشان از تأثیر مثبت کاربرد گوگرد بر افزایش میزان چسبندگی قیر گوگردی دارد. به نظر می‌رسد مهمترین عامل در افزایش مقاومت کششی و دوام مخلوطهای آسفالتی گوگردی تغییر در ساختمان شیمیایی ماده چسباننده (قیر گوگردی) و افزایش قدرت چسبندگی آن با مصالح سنگی است.

نتیجه گیری

انجام آزمایش مارشال بر روی مخلوط های آسفالت گوگردی نشان داد که جایگزینی ۲۰٪ تا ۳۰٪ از قیر با گوگرد تأثیر چشمگیری بر پارامترهای طرح مارشال نداشته و فقط تغییرات جزئی در آنها پدید می‌آورد. همچنین مقادیر پارامترهای طرح مارشال در نسبتهای قیر/گوگرد ۲۰/۸۰ و ۳۰/۷۰ بسیار نزدیک به هم بوده و شباهت های فراوانی بین آنها وجود دارد. نتایج آزمایش دوام نیز حاکی از آن است که کاربرد ۲۰٪ تا ۳۰٪ گوگرد در مخلوط قیر/گوگردی موجب افزایش مقاومت کششی و دوام مخلوط آسفالتی می‌شود که نشان از تأثیر مثبت کاربرد گوگرد بر افزایش میزان چسبندگی قیر گوگردی دارد.

مراجع

- [1] On Line: <http://www.khangiran.com/> وب سایت پالایشگاه گاز خانگیران سرخس
- [2] Kennepohl G.J.A. et al. (1975) Conventional paving mixes with sulfur-asphalt binders. *Association of asphalt pavement technology journal*, **44**, 485-518.
- [3] Roberts, Freddy et al. (2000) *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*, Second edition, Third Printing, National Center for Asphalt Technology, NCAT, USA.
- [4] اکبرنیا، حسن و همکاران (۱۳۸۱) کاربرد گوگرد در مخلوط های آسفالت معمولی، نشریه تحقیق در علوم و مهندسی نفت، ۴۵، ۳۷-۳۰.
- [5] Akili W. (1983) On the use of sulphur in sand-asphalt applications. *Association of asphalt pavement technology journal*, **52**, 561-584.
- [6] Kandhal P. (1982) Evaluation of sulfur extended asphalt binders in bituminous paving mixtures. *Association of asphalt pavement technology journal*, **51**, 189-222.
- [7] Lavin, Patrick (2003) *Asphalt Pavements, A practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects*. Spon Press, USA.
- [8] Hunter, Robert (2000) *Asphalts in road construction*. Thomas Telford, UK.