

استفاده از روش تاگوچی در تحلیل رفتار آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی

مقاله علمی - پژوهشی

بابک گلچین*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
سجاد ابیضی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
رامین مشک‌آبادی، استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b.golchin@uma.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

صفحه ۹۸-۸۱

چکیده

افزایش شدید قیمت قیر و رویکردهای زیست محیطی استفاده از مخلوط‌های آسفالت بازیافتی را گسترش داده است. این مخلوط‌ها با درصدهای مختلف از مصالح بازیافتی و مصالح جدید شامل قیر و مصالح سنگی تهیه می‌شوند. لازم است اثر پارامترهای مختلف آزمایشگاهی به سرعت و با تعداد ساخت نمونه کمتر آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله از یک روش ریاضی برای تحلیل سریع رفتارهای آزمایشگاهی استفاده شده است. بدین منظور از روش تاگوچی با ۳ عامل تأثیر گذار شامل درصد مصالح بازیافتی (در سه سطح شامل ۰، ۲۵ و ۵۰ درصد) نوع مصالح بازیافتی (در دو سطح شامل دو منبع تهیه مختلف) و درصد قیر (در ۳ سطح شامل ۴، ۵ و ۶ درصد) برای طراحی آزمایش استفاده گردید. پس از طراحی آزمایش و تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی مشخصات مقاومتی و حجمی مخلوط‌های آسفالتی تعیین شد. داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار مینی‌تب و در شرایط آرایه‌ی L18 مورد تحلیل قرار گرفتند. در این تحلیل میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی بر نتایج آزمایشگاهی با روش سیگنال به نویز و آنالیز واریانس تعیین شدند. نتایج نشان داد که درصد مصالح بازیافتی به صورت قابل توجهی رفتارهای مقاومتی و حجمی مخلوط‌های بازیافتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این در حالی است که بر خلاف انتظار اثر منبع تهیه مصالح بازیافتی در مقایسه با سایر پارامترهای ورودی بسیار کمتر است.

واژه‌های کلیدی: بازیافت آسفالت، تاگوچی، طراحی آزمایش، قیر

۱- مقدمه

استفاده می‌شود (شفابخش و رضائیان، ۱۳۸۹). از آنجا که قیر موجود در خرده آسفالت بازیافتی در طی مدت زمان اجرا و خدمت‌دهی به تدریج فرسوده و سخت می‌شود (عامری و تقی‌نژاد، ۱۳۸۶) و نیز مصالح سنگی جدید برای اصلاح دانه‌بندی مخلوط‌های بازیافتی به کار می‌رود. بنابراین، بررسی میزان اثر عوامل تشکیل دهنده این مخلوط‌ها و ترکیب بهینه مواد شامل قیر موجود در خرده آسفالت بازیافتی، قیر جدید، مصالح سنگی جدید و نوع خرده

بازیافت گرم آسفالت شامل عملیاتی است که طی آن آسفالت تراشیده شده از روسازی آسفالتی موجود با و یا بدون مصالح سنگی جدید در حضور مواد قیری و احتمالاً ترکیبات جوان‌کننده در یک کارخانه مرکزی آسفالت و یا در محل به طریق گرم مطابق مشخصات آسفالت گرم با هم مخلوط شده و در سطح راه پخش و کوبیده می‌شود (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۵). امروزه تکنولوژی بازیافت در شاخه‌های مختلف علوم از جمله تکنولوژی تولید آسفالت

از این روش‌ها است که در طراحی آزمایش و تحلیل داده‌های مربوطه به کار گرفته می‌شود. از این روش در زیر شاخه‌های مختلف علوم و تکنولوژی استفاده شده است. در تکنولوژی بتن از روش تاگوچی برای بررسی اثر مقدار سیمان، مولاریته هیدروکسید سدیم و دمای فرآوری بر رفتار مقاومتی و جذب آب مخلوط‌های بتن حاوی خاکستر بادی استفاده شد (مهتا و همکاران، ۲۰۱۷). از روش تاگوچی برای طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری بر اساس معیارهای طراحی بتن در آیین‌نامه‌های کشور هند نیز استفاده شده است (پروستی و پرادهان، ۲۰۲۰). در علوم مکانیک خاک از روش تاگوچی در تحلیل و بررسی رفتار فرسایشی خاک‌ها تحت شرایط ذوب و یخبندان استفاده گردیده است (سون و همکاران، ۲۰۱۸). در بررسی رفتار فلزات، گروهی از پژوهشگران از این روش در بهینه‌سازی پارامترهای موثر در تراش فولاد P20 با دستگاه سی‌ان‌سی استفاده کردند (راجو و همکاران، ۲۰۱۹). در مهندسی شیمی از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی فرایند تولید سوخت از منابع طبیعی به وسیله روغن کرچک بهره گرفته شد (کارماکار، داوانه و هالدر، ۲۰۱۹). همچنین در تکنولوژی آسفالت روش تاگوچی در بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی متخلخل حاوی الیاف آرامید و پلی‌الفین استفاده شده است (سلبی آکودو و همکاران، ۲۰۱۹). در کشور ما نیز از روش تاگوچی در طراحی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها استفاده شده است. جدول ۱ نمونه‌ای از این پژوهش‌ها را نشان می‌دهد.

هدف پژوهش حاضر تهیه و تست نمونه‌های آزمایشگاهی مختلف مخلوط‌های آسفالت بازیافتی با درصد‌های مختلف خرده آسفالت و با درصد‌های مختلف قیر از منابع مختلف بازیافتی و در ادامه ارزیابی نتایج آزمایشگاهی به روش تاگوچی است. در این روش درصد تأثیر هر یک از پارامترها بر نتایج مقاومتی و حجمی مخلوط‌ها تعیین می‌شود. همچنین سهم سایر عوامل غیر قابل کنترل بر روی نتایج آزمایشگاهی مشخص می‌گردد. مهم‌ترین مزیت این روش کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت است.

آسفالت بازیافتی ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر در خصوص بازیافت آسفالت تحقیقات مختلفی صورت گرفته‌است. در پژوهشی اثر سیمان و آهک بر تغییر شکل دایمی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی به روش سرد با قیر امولسیون بررسی شده‌است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سیمان و آهک موجب کاهش درصد فضای خالی و افزایش وزن مخصوص نمونه‌ها و همچنین باعث افزایش استقامت مارشال نمونه‌ها می‌شود (نیازی و قاضی زاده، ۱۳۸۷). در تحقیقی دیگر استفاده از مصالح بازیافت آسفالت در لایه اساس روسازی بررسی شده است که در این تحقیق نتایج مثبت استفاده از مصالح بازیافت آسفالتی در لایه اساس و تأثیر آن بر پارامترهای روسازی ارائه شده است (علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۹۲). در پژوهشی دیگر ارزیابی مقاومت آسفالت بازیافتی با استفاده از مخلوط سیمان، آهک، ماسه و فیلر مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بدون استفاده از قیر و یا کف قیر می‌توان از مخلوط سیمان و فیلر برای باربری آسفالت تراشیده شده استفاده کرد (نجار و میر اشرف، ۱۳۹۵). گروهی از محققین در مالزی از روش سطح پاسخ در تحلیل رفتار مخلوط‌های آسفالت بازیافتی حاوی یک افزودنی گرم به نام آر-اچ استفاده کردند (حمزه، گانگات و گلچین، ۲۰۱۷). ایشان نشان دادند که دمای تراکم آسفالت گرم یک پارامتر معنادار در محاسبه قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی گرم است. در یک پژوهش دیگر، مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی به روش شبکه عصبی مدل شد. نتایج تحقیق نشان داد که افزایش مقدار خرده آسفالت در مخلوط آسفالتی مقدار ضریب برجهنگی را افزایش می‌دهد (منصوریان، غنی‌زاده و گلچین، ۲۰۱۸). طرح‌های مختلف آزمایشگاهی، زمانی که تعداد نمونه‌ها و پارامترهای آزمایشگاهی افزایش می‌یابد، مدت و هزینه‌های مربوطه را به شدت افزایش می‌دهند. پژوهشگران همیشه با چنین محدودی‌هایی مواجه هستند. امروزه ریاضیات و آمار به کمک محققین آمده‌اند تا تعداد آزمایش و هزینه‌های آنها را کاهش داده و با کمک تحلیل‌های ریاضی نتایج قابل توجهی را ارائه دهند. روش تاگوچی یکی

جدول ۱. نمونه‌هایی از کاربرد روش تاگوچی در ایران

ردیف	موضوع تحقیق	متغیرهای مستقل	متغیرهای وابسته	نرم افزار	مراجع
۱	بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سبک نیمه‌سازه‌ای ساخته شده با سبکدانه‌های پومیس	نوع پومیس	آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها	Minitab	رحمانی و همکاران، ۲۰۱۷
۲	بهینه‌سازی استحکام خمشی رزین اپوکسی	نوع رزین، غلظت رقیق کننده، نوع عامل پخت، غلظت عامل پخت	آزمون خمش سه نقطه‌ای و آزمایش استحکام خمشی	Minitab	منجری، بابایی و سعادت، ۱۳۹۴
۳	بهینه‌سازی شاخص‌های هندسی صفحه مستغرق در بستر رسوبی کانال مستقیم	طول صفحه، ارتفاع صفحه، زاویه برخورد جریان با صفحه	عمق آب شکستگی در لبه های ابتدایی و انتهایی صفحه، حجم آب شکستگی در پایین دست	SSIIM, Minitab	رستم آبادی، صالح آبادی و ذراتی، ۲۰۱۳
۴	بهینه‌سازی شرایط عملیاتی لیچینگ باطری‌های دور ریز نیکل-کادمیم	دما، نرمالیت، زمان و نسبت اسید به فاز جامد	مقدار انحلال، درصد وزنی نیکل کادمیم و آهن در محلول لیچینگ	Minitab	خیاطی و مرتضایی، (۲۰۱۲)
۵	تحلیل تجربی پوسته‌های کامپوزیتی به منظور جذب انرژی	قطر داخلی، طول و ضخامت چیدمان لایه‌های الیاف تقویت کننده	جذب انرژی مخصوص پوسته‌های کامپوزیتی تولید شده	Minitab	حسینی و شریعتی، ۲۰۱۵
۶	یافتن طرح اختلاط بهینه بتن های سبکدانه سازه‌ای	نسبت وزنی ماسه به شن، عیار سیمان، نسبت وزنی آب به سیمان و نسبت وزنی فوق روان کننده به سیمان	آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی	Minitab, Qualitek_4	بابالو و اجلالی، ۲۰۰۶

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح خرده آسفالت بازیافتی (RAP)

درصد و برای نمونه نوع دوم ۵/۳ درصد تعیین شد. درجه نفوذ قیر خرده آسفالت منع اول ۳۵ دهم میلی‌متر و خرده آسفالت نوع دوم ۳۱ دهم میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نقطه نرمی قیر خرده آسفالت نوع اول ۵۷ درجه سانتی‌گراد بود در حالی که نقطه نرمی خرده آسفالت نوع دوم برابر ۷۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. این نشان می‌دهد که قیر خرده آسفالت نوع دوم سفت تر از قیر خرده آسفالت نوع اول است. شاخص تطویل مصالح سنگی خرده آسفالت نوع یک و دو به ترتیب ۳/۵ و ۱۱ به دست آمد.

مصالح خرده آسفالت بازیافتی مورد استفاده در این پژوهش از دو پروژه مختلف بهسازی و اصلاح روسازی در راه‌های برون شهری استان آذربایجان شرقی تهیه شدند. شکل ۱ تصویری از دپو و انبار مصالح خرده آسفالتی مصرفی را نشان می‌دهد. این مصالح به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد حرارت دیدند و سپس دانه بندی شدند. جدول ۲، دانه‌بندی نمونه‌های خرده آسفالت را از دو منبع مختلف نشان می‌دهد. برای تعیین مقدار درصد قیر موجود در خرده آسفالت از دستگاه سانتریفیوژ استفاده شد. درصد قیر مصالح خرده آسفالت برای نمونه نوع اول برابر ۴/۳



شکل ۱. دیو و انبار مصالح خرده آسفالت

جدول ۲. دانه بندی خرده آسفالت حاوی سنگدانه‌های با پوشش قیری برای نمونه‌های تهیه شده

مشخصات	نمونه نوع دوم		نمونه نوع اول		اندازه الک
	وزن نمونه دانه بندی (۱/۲۰۰گرم)		وزن نمونه دانه بندی (۷/۲۰۰گرم)		
	درصد وزنی باقی مانده روی هر الک	درصد وزنی رد شده از هر الک	درصد وزنی باقی مانده روی هر الک	درصد وزنی رد شده از هر الک	
دانه بندی هدف					
۱۰۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰	اینچ (۳/۴)
۹۰-۱۰۰	۱۴۶/۳	۸۷/۸	۱۷۵/۵	۸۵/۵	اینچ (۱/۲)
-	۱۰۸/۶	۷۸/۸	۸۶/۳	۷۸/۳	اینچ (۳/۸)
۴۴-۷۴	۲۴۱	۵۸/۷	۳۱۹/۷	۵۱/۸	شماره (۴)
۲۸-۵۸	۲۵۰/۸	۳۷/۸	۲۶۶/۴	۲۹/۷	شماره (۸)
-	۲۵۷/۶	۱۶/۳	۲۳۱/۴	۱۰/۶	شماره (۱۶)
-	۱۱۷	۶/۶	۹۲/۷	۲/۹	شماره (۳۰)
۵-۲۱	۵۰/۱	۲/۴	۲۵/۲	۰/۸	شماره (۵۰)
-	۲۲/۳	۰/۵	۷	۰/۲	شماره (۱۰۰)
۲-۱۰	۳/۸	۲	۱/۶	۰/۰۷	شماره (۲۰۰)
-	۲/۶	-	۰/۹	-	Pan

۲-۲- مصالح جدید

مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی علاوه بر قیر موجود در مصالح خرده آسفالت، قیر جدید نیز مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور از قیر خالص ۱۰۰-۸۵ به عنوان یک قیر نرم استفاده شد. آزمایشهای درجه نفوذ، خاصیت انگمی (شکل پذیری) و نقطه نرمی بر روی این قیر صورت گرفت. نتایج آزمایش در جدول ۳ آورده شده است.

برای اصلاح دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی از مصالح سنگی جدید با درصد سایش لوس آنجلس ۲۰ درصد استفاده گردید. این مصالح دارای شخص تورق ۱۴ بودند. این مصالح با نسبت مشخصی با خرده آسفالت‌های بازیافتی ترکیب شدند تا ترکیب دانه بندی مصالح سنگی جدید با دانه‌بندی خرده آسفالت بازیافتی در محدوده مجاز دانه‌بندی آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران قرار گیرد. برای تهیه

جدول ۳. مشخصات قیر جدید به کار رفته

نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)			خاصیت انگمی (سانتی متر)			درجه نفوذ (دهم میلی متر)			نوع قیر
نتایج	حد استاندارد		نتایج	حد استاندارد		نتایج	حد استاندارد		
	حداکثر	حداقل		حداکثر	حداقل		حداکثر	حداقل	
آزمایش	۵۲	۴۵	>۱۰۰	-	۱۰۰	آزمایش	۱۰۰	۸۵	۸۵-۱۰۰

انجام شد. این آزمایش‌ها مطابق با آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران در بررسی طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی انتخاب شدند.

۲-۴- تحلیل نتایج آزمایشگاهی

تاگوچی از دو روش متفاوت برای تحلیل داده‌ها استفاده می‌کند. روش اول، یک روش استاندارد است که در آن نتیجه یک آزمایش و یا مقدار میانگین بدست آمده از تکرار یک آزمایش به واسطه اثر عمده پردازش می‌شود. روش دوم که آن را برای آزمایشات همراه با تکرار توصیه می‌کند استفاده از نسبت سیگنال به نویز (S/N) در تحلیل است. تحلیل سیگنال به نویز با استفاده از تغییرات نتایج، بهترین و قوی‌ترین شرایط کاری را تعیین می‌کند. در این پژوهش، در گام نخست، نسبت سیگنال به نویز برای داده‌های آزمایشگاهی مورد تحلیل قرار گرفته است. از طرفی، آنالیز واریانس یکی از روش‌های آماری متداول است که به منظور بررسی میزان تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر خروجی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنالیز واریانس در تعیین میزان اهمیت هر کدام از پارامترها و تأثیرات متقابل آنها بر هم مفید است. همچنین با این روش می‌توان تعیین کرد که کدام یک از پارامترها نیاز به کنترل دارند و کدام‌ها نیاز به کنترل ندارند. با استفاده از معادله ۱ می‌توان درصد تأثیر هر کدام از پارامترها را تعیین نمود:

$$P_c = \frac{S_{si} - Df \times M_{se}}{S_{st}} \times 100$$

آزمایش‌ها از نرم افزار مینی‌تب استفاده شده است که یکی از نرم‌افزارهای جامع آماری با قابلیت بالا برای طراحی سیستماتیک آزمایش‌ها است.

۲-۳- طراحی آزمایش

عوامل مورد بررسی در این تحقیق، نوع خرده آسفالت بازیافتی از منابع مختلف، مقادیر مختلف خرده آسفالت بازیافتی و مقادیر مختلف قیر هستند و خروجی‌های مورد بررسی شامل استحکام مارشال، روانی مارشال، درصد فضای خالی آسفالت، درصد فضای خالی سنگدانه‌ها، درصد فضای خالی سنگدانه‌هایی که با قیر پر می‌شود و وزن مخصوص آسفالت می‌باشند. در جدول ۴ پارامترهای مورد بررسی و همچنین سطوح مورد استفاده، نشان داده شده است. در این تحقیق از روش تاگوچی که یک روش مناسب برای کاهش تعداد آزمایش‌های لازم، بررسی میزان اثرگذاری پارامترها، تحلیل سیگنال به نویز و انتخاب سطوح مناسب از سطوح مورد بررسی است استفاده شده است. در واقع روش تاگوچی این امکان را می‌دهد که اطلاعات مهمی با تعداد آزمایش‌های بسیار کمتری فراهم گردد. برای این منظور از بین آرایه‌های موجود از آرایه‌های متعامد L_{18} برای سه پارامتر موثر استفاده شد. پارامتر اول دارای دو سطح و دو پارامتر دیگر دارای سه سطح هست. جدول ۵، طراحی آزمایش توسط آرایه‌های متعامد L_{18} را برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در ادامه، نمونه‌های آزمایشگاهی براساس این جدول تهیه شدند و آزمایش‌های مقاومتی (استحکام و روانی مارشال) و آزمایش‌های حجمی (وزن مخصوص، درصد فضای خالی، درصد فضای خالی پر شده با قیر و درصد فضای خالی مصالح سنگی) بر روی نمونه‌ها

(۱)

که در آن S_{st} مجموع مربعات، Df درجه آزادی، M_{se} میانگین مربعات خطا و S_{st} مجموع تمام مربعات می‌باشند. در این پژوهش به منظور تجزیه و تحلیل نتایج طراحی

جدول ۴. پارامترهای مورد بررسی و سطوح هر کدام از آنها

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
نوع RAP	منبع ۱	منبع ۲	
درصد RAP	۰	۲۵	۵۰
درصد قیر	۴	۵	۶

جدول ۵. آزمایش‌های طراحی شده بر اساس آرایه متعامد L₁₈

شماره آزمایش	نوع RAP	درصد RAP	درصد قیر
۱	۱	۰	۴
۲	۱	۰	۵
۳	۱	۰	۶
۴	۱	۲۵	۴
۵	۱	۲۵	۵
۶	۱	۲۵	۶
۷	۱	۵۰	۴
۸	۱	۵۰	۵
۹	۱	۵۰	۶
۱۰	۲	۰	۴
۱۱	۲	۰	۵
۱۲	۲	۰	۶
۱۳	۲	۲۵	۴
۱۴	۲	۲۵	۵
۱۵	۲	۲۵	۶
۱۶	۲	۵۰	۴
۱۷	۲	۵۰	۵
۱۸	۲	۵۰	۶

۳- نتایج و بحث

جدول ۶ نتایج آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در این جدول به ازای تغییر نوع خرده آسفالت، درصد خرده آسفالت و مقدار قیر، رفتار حجمی و مقاومتی مصالح تعیین شده است.

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته

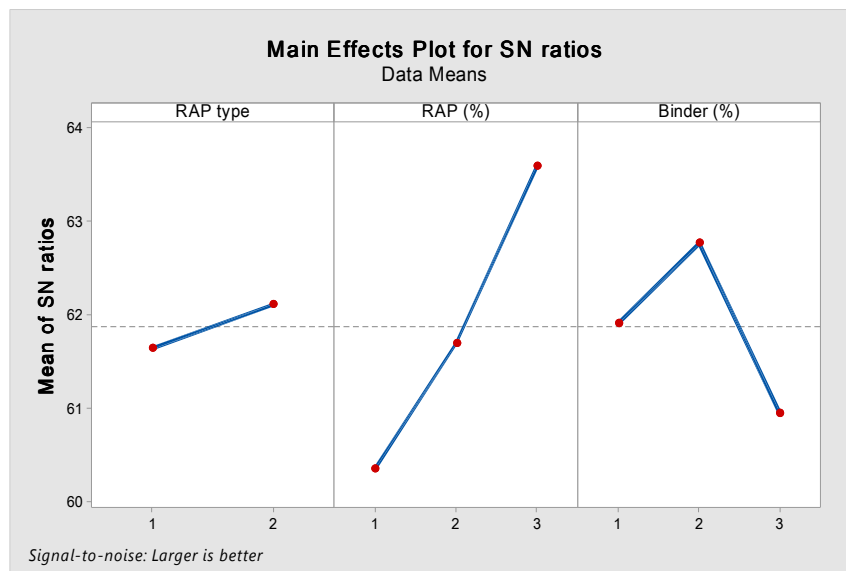
	Rap type	RAP%	Binder%	Strength	Flow	VFB	Air Voids	Unit Weight	VMA	Price
۱	۱	۰	۴	۱۱۴۵	۱,۹	۸۱,۳	۲,۲۲	۲,۵۳۱	۱۱,۷۵	۷۹۱۳۲۰
۲	۱	۰	۵	۱۱۰۸	۳,۱	۹۰,۵۷	۱,۲۵	۲,۵۱۶	۱۳,۲	۸۷۹۱۵۰
۳	۱	۰	۶	۸۸۷	۳,۴	۱۰۰	۰	۲,۵۰۸	۱۴,۴	۹۶۶۹۸۰
۴	۱	۲۵	۴	۱۰۷۱	۱,۶	۶۰,۹۱	۵,۷۵	۲,۴۱۶	۱۴,۷۱	۶۴۸۵۱۳
۵	۱	۲۵	۵	۱۴۵۹	۳,۱۵	۸۷,۲۸	۱,۷۰	۲,۴۸۱	۱۳,۳۵	۷۳۶۸۱۸
۶	۱	۲۵	۶	۹۸۸	۳,۶	۹۷,۹۲	۰,۳	۲,۴۷۷	۱۴,۳۸	۸۲۵۱۲۳

۷	۱	۵۰	۴	۱۳۴۲	۲,۵	۵۸,۸۷	۶,۱	۲,۳۸۳	۱۴,۸۲	۵۰۵۷۰۵
۸	۱	۵۰	۵	۱۹۴۳	۳,۱	۸۲,۵	۲,۴۱	۲,۴۳۹	۱۳,۷۵	۶۰۱۹۶۳
۹	۱	۵۰	۶	۱۲۰۱	۴,۱	۹۹,۰۸	۰,۱۳	۲,۴۵۸	۱۳,۹۹	۶۹۰۷۴۳
۱۰	۲	۰	۴	۱۱۴۵	۱,۹	۸۱,۱	۲,۲۲	۲,۵۳۱	۱۱,۷۵	۷۹۱۳۲۰
۱۱	۲	۰	۵	۱۱۰۸	۳,۱	۹۰,۶	۱,۲۵	۲,۵۱۶	۱۳,۲	۸۷۹۱۵۰
۱۲	۲	۰	۶	۸۸۷	۳,۴	۱۰۰	۰	۲,۵۰۸	۱۴,۴	۹۶۶۹۸۰
۱۳	۲	۲۵	۴	۱۳۴۲	۲,۱	۵۷,۱	۶,۶۶	۲,۳۹۳	۱۵,۵۳	۶۲۶۰۸۰
۱۴	۲	۲۵	۵	۱۱۹۷	۴,۴	۷۱,۹	۴,۴۳	۲,۴۱۲	۱۵,۷۵	۷۱۴۳۸۵
۱۵	۲	۲۵	۶	۱۲۹۳	۳	۹۴,۷	۰,۷۸	۲,۴۶۵	۱۴,۸۰	۸۰۲۶۹۰
۱۶	۲	۵۰	۴	۱۴۷۸	۳	۴۶,۴	۹,۶۹	۲,۲۹۴	۱۸,۰۹	۴۶۰۸۴۰
۱۷	۲	۵۰	۵	۱۶۲۰	۳,۹۵	۶۵	۵,۸۹	۲,۳۵۳	۱۶,۸۴	۵۴۹۶۲۰
۱۸	۲	۵۰	۶	۱۵۹۰	۳,۵	۹۰,۸	۱,۳۸	۲,۴۲۹	۱۵,۰۸	۶۳۸۴۰۰

۳-۱- استحکام مارشال

نمودار سیگنال به نویز مربوط به پارامتر استقامت مارشال در شکل ۲ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد نوع خرده آسفالت بازیافتی بر مقاومت تأثیر چندانی ندارد، در حالی که پارامترهای درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر دارای اثر قابل توجهی هستند. همچنین مشاهده می‌گردد که درصد خرده آسفالت بازیافتی در سطح سه و درصد قیر در سطح دو، سطوح موثرتری بر استحکام مارشال هستند.

با توجه به اینکه یکی از اهداف این تحقیق پیدا کردن میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی بر متغیرهای خروجی و نیز تعیین سطوح بهینه هر کدام از پارامترها هست، از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده شده است. این پارامتر، مشخصات عملکردی فرایند را تعیین کرده و باعث کاهش انحراف از مقادیر هدف می‌شود. متناسب با هر کدام از عوامل خروجی از معیارهای "هرچه کمتر بهتر" و نیز "هر چه بیشتر بهتر" استفاده شده است.



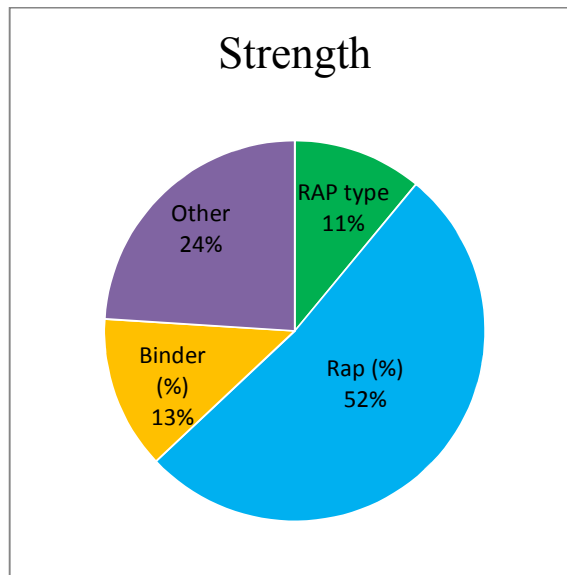
شکل ۲. تأثیر سطوح عوامل بر استحکام مارشال

آنالیز واریانس صورت گرفته برای استحکام مارشال در جدول ۷ نشان داده شده است. در تحلیل واریانس، پارامترهایی که دارای P-value کمتر از ۰/۰۵ هستند پارامترهای تأثیرگذار و معنادار هستند. با این تعریف، درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر خالص در استحکام مارشال پارامترهای معنا داری هستند ولی نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر چندانی ندارد.

جدول ۷. آنالیز واریانس نسبت S/N استحکام مارشال

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-value
Rap type	۱	۱۴۷۹۲	۱۴۷۹۲	۱۴۷۹۲	۰/۵۳	۰/۴۸
Rap	۲	۷۱۳۷۲۸	۷۱۳۷۲۸	۳۵۶۸۶۴	۱۲/۸۴	۰/۰۰۱
Binder	۲	۲۱۱۹۴۴	۲۱۱۹۴۴	۱۰۵۹۷۲	۳/۸۱	۰/۰۵۲
Error	۱۲	۳۳۳۴۰۳	۳۳۳۴۰۳	۲۷۷۸۴		
Total	۱۷	۱۲۷۳۸۶۸				

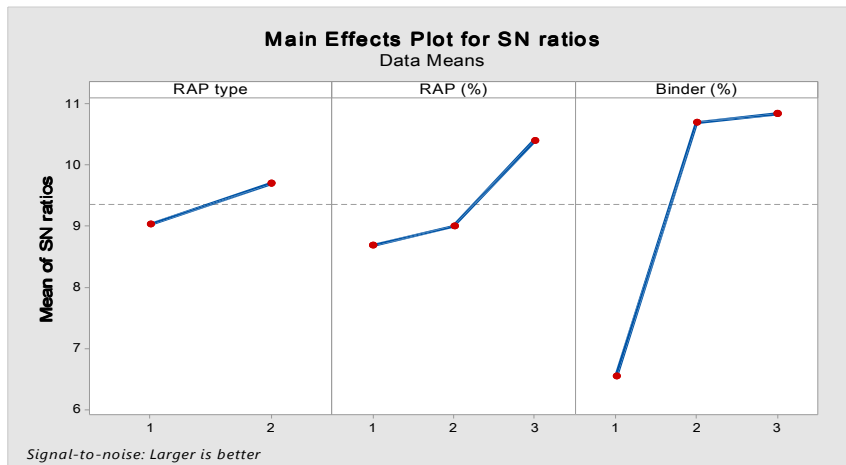
در شکل ۳ میزان درصد تأثیر پارامترهای ورودی بر روی استحکام مارشال نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد درصد خرده آسفالت بازیافتی دارای بیشترین تأثیر و درصد قیر خالص دارای کمترین تأثیر بر روی استحکام مارشال می‌باشند. همچنین پارامترهای دیگری وجود دارند که استحکام مارشال را تحت تأثیر قرار می‌دهند.



شکل ۳. درصد تأثیر عوامل تأثیر گذار بر استحکام مارشال

۳-۲ روانی مارشال (Flow)

شکل ۴ مقدار سیگنال به نویز پارامتر روانی مارشال (Flow) را نشان می‌دهد، به طوری که نوع خرده آسفالت بازیافتی بر روانی مارشال تأثیر چندانی ندارد، در حالی که درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر اثر قابل توجهی



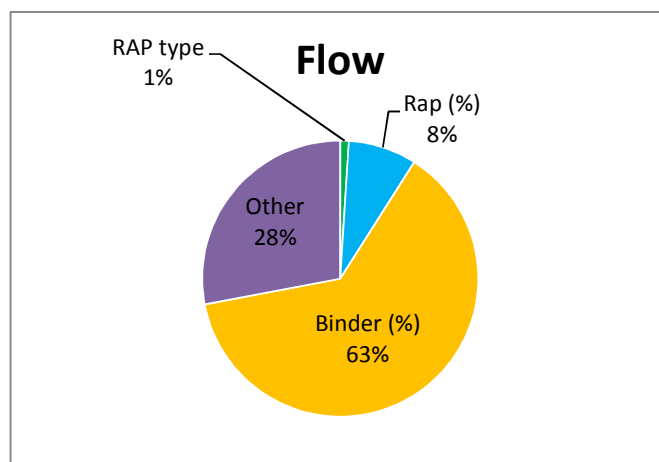
شکل ۴. تأثیر سطوح عوامل بر روانی مارشال

با محاسبه درصد تأثیر پارامترها بر روی روانی مارشال شکل ۵ نشان می‌دهد که درصد قیر خالص دارای بیشترین تأثیر و نوع و درصد خرده آسفالت بازیافتی تأثیر چندانی بر روی روانی مارشال ندارند.

جدول ۸ آنالیز واریانس مقادیر نسبت S/N را برای روانی مارشال نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که درصد قیر خالص پارامتر معنادار و تأثیرگذاری است ولی نوع خرده آسفالت بازیافتی و درصد آن پارامتر چندان تأثیر گذاری بر روی روانی مارشال نمی‌باشند.

جدول ۸ آنالیز واریانس نسبت S/N روانی مارشال

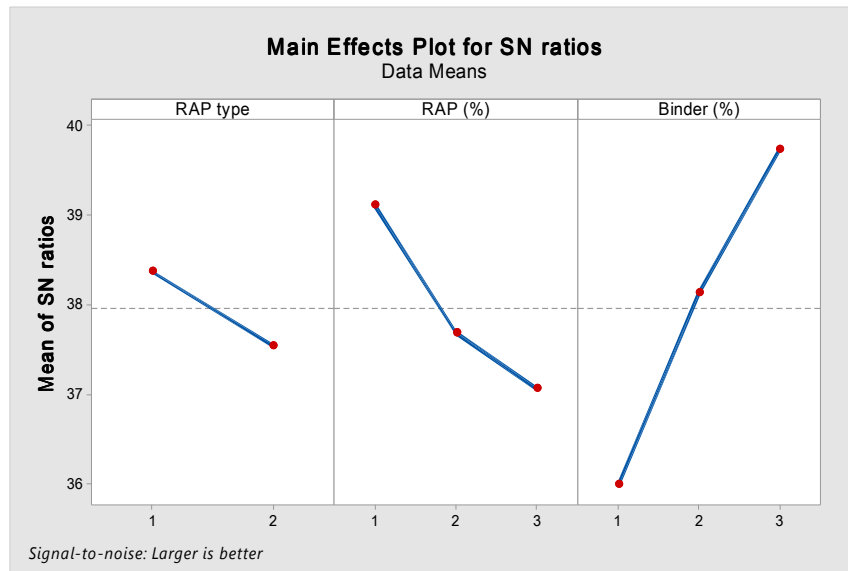
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-value
Rap type	۱	۰/۲۰۰۶	۰/۲۰۰۶	۰/۲۰۰۶	۱/۰۳	۰/۳۳۱
Rap	۲	۰/۹۷۸۶	۰/۹۷۸۶	۰/۴۸۹۳	۲/۵۱	۰/۱۲۳
Binder	۲	۶/۹۳۷۸	۶/۹۳۷۸	۳/۴۶۸۹	۱۷/۷۷	۰
Error	۱۲	۲/۳۴۲۵	۲/۳۴۲۵	۰/۱۹۵۲		
Total	۱۷	۱۰/۴۵۹۴				



شکل ۵. درصد تأثیر عوامل تأثیر گذار بر روانی مارشال

۳-۳- درصد فضای خالی سنگدانه‌هایی که با قیر پر می‌شوند

نمودار سیگنال به نویز پارامتر درصد فضای خالی سنگدانه‌هایی که با قیر پر می‌شوند در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که نوع خرده آسفالت بازیافتی، درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر هر سه پارامترهای موثری بر میزان تشکیل فضای خالی سنگدانه‌ها هستند، اما میزان قیر مصرفی عامل تأثیرگذارتری است.



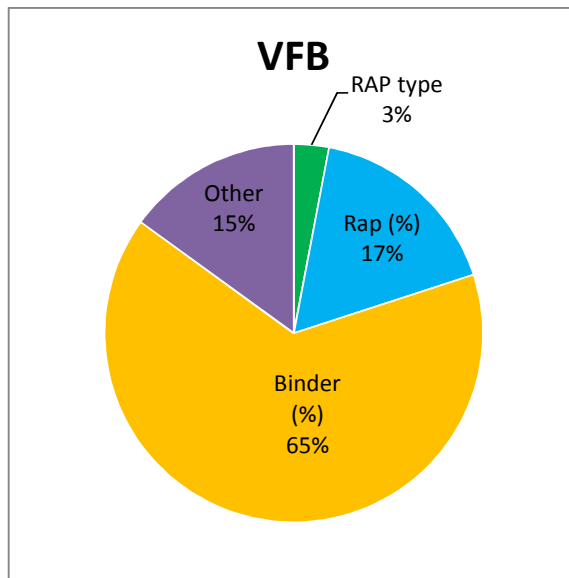
شکل ۶. تأثیر سطوح عوامل بر درصد فضای خالی سنگدانه‌هایی که با قیر پر می‌شوند

در شکل ۷ درصد تأثیر عوامل مورد بررسی را بر روی میزان درصد فضای خالی سنگدانه‌هایی که با قیر پر می‌شوند نمایش داده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که نوع خرده آسفالت بازیافتی و درصد آن تأثیرچندانی بر روی فضای خالی سنگدانه‌ها ندارند در حالی که درصد قیر خالص اثر قابل توجهی دارد.

جدول ۹ آنالیز واریانس صورت گرفته بر روی مقادیر S/N نتایج به دست آمده از درصد فضای خالی سنگدانه‌هایی که با قیر پر می‌شوند را نشان می‌دهد. درصد قیر خالص مصرفی و درصد خرده آسفالت بازیافتی پارامترهای معنادار و مهمی هستند و نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر چندانی ندارند.

جدول ۹. آنالیز واریانس نسبت S/N درصد فضای خالی سنگدانه‌هایی که با قیر پر می‌شوند

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-value
Rap type	۱	۲۰۴/۴۲	۲۰۴/۴۲	۲۰۴/۴۲	۴/۹۲	۰/۰۴۷
Rap	۲	۹۰۵/۷۶	۹۰۵/۷۶	۴۵۲/۸۸	۱۰/۸۹	۰/۰۰۲
Binder	۲	۳۲۳۵/۴	۳۲۳۵/۴	۱۶۱۷/۷	۳۸/۹	۰
Error	۱۲	۴۹۹/۰۵	۴۹۹/۰۵	۴۱/۵۹		
Total	۱۷	۴۸۴۴/۶۳				

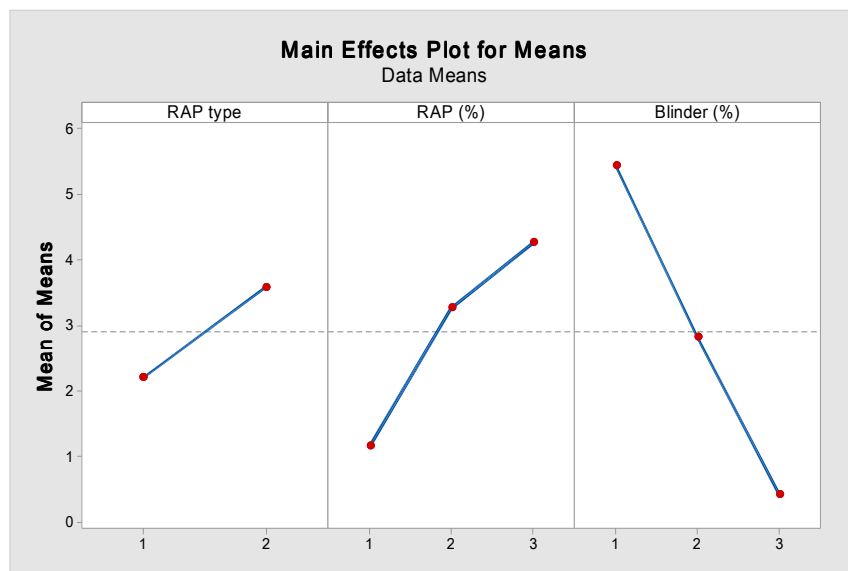


شکل ۷. درصد تأثیر عوامل تأثیر گذار بر درصد فضای خالی سنگدانه‌هایی که با قیر پر می شوند

۳-۴- درصد فضای خالی آسفالت

قابل توجهی دارند. همچنین درصد خرده آسفالت در سطح سه و درصد قیر مصرفی در سطح یک پارامترهای مناسبی برای بهبود درصد فضای خالی آسفالت هستند.

شکل ۸ نمودار میانگین را برای درصد فضای خالی آسفالت کوبیده شده نشان می‌دهد. نوع خرده آسفالت بازیافتی بر درصد فضای خالی آسفالت کوبیده شده تأثیر چندانی ندارد در حالی که درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر اثر



شکل ۸. تأثیر سطوح عوامل بر درصد فضای خالی آسفالت

مصرفی و درصد خرده آسفالت بازیافتی پارامترهای معنادار و مهمی هستند و نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر اندکی دارد.

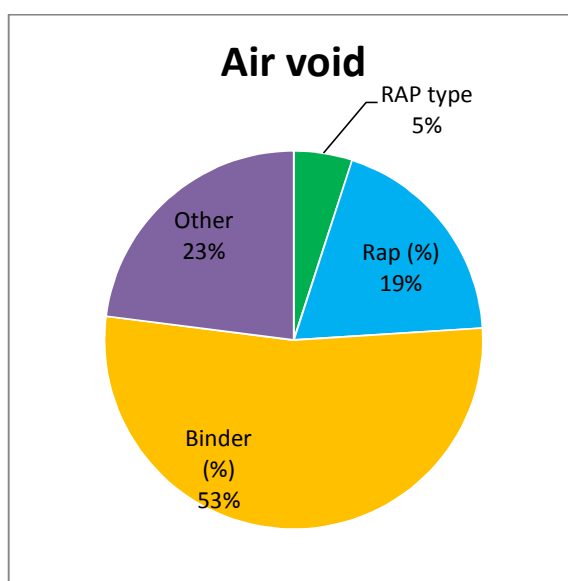
جدول ۱۰ آنالیز واریانس مقادیر S/N را برای درصد فضای خالی آسفالت نشان می‌دهد. درصد قیر خالص

جدول ۱۰. آنالیز واریانس نسبت S/N درصد فضای خالی آسفالت

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-value
Rap type	۱	۸/۵۹۷	۸/۵۹۷	۸/۵۹۷	۴/۷۳	۰/۰۵
Rap	۲	۳۰/۲۶۳	۳۰/۲۶۳	۱۵/۱۳۲	۸/۳۲	۰/۰۰۵
Binder	۲	۷۵/۳۰۲	۷۵/۳۰۲	۳۷/۶۵۱	۲۰/۷	۰
Error	۱۲	۲۱/۸۳	۲۱/۸۳	۱/۸۱۹		
Total	۱۷	۱۳۵/۹۹۳				

درصد تأثیر پارامترهای ورودی بر روی درصد فضای داخلی آسفالت در شکل ۹ نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر خالص

اثر قابل توجهی دارد و نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر چندانی ندارد.

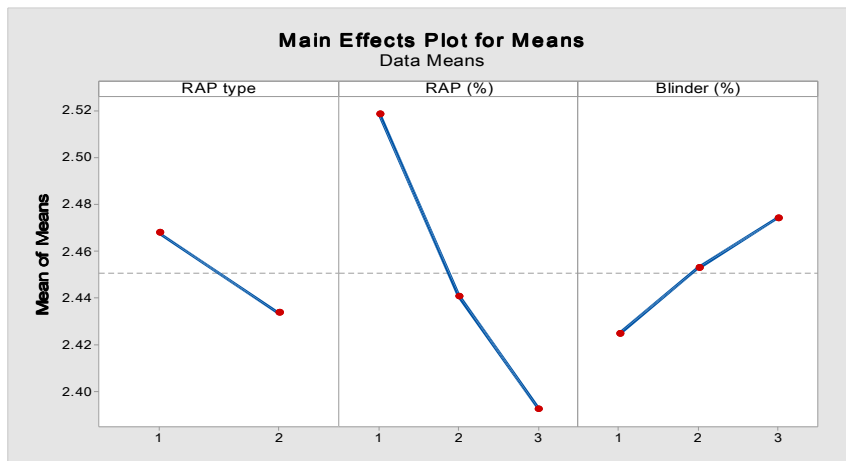


شکل ۹. درصد تأثیر عوامل تأثیر گذار بر درصد فضای خالی آسفالت

۳-۵- وزن مخصوص آسفالت

درصد قیر اثر قابل توجهی دارد. مشاهده می‌شود که درصد خرده آسفالت در سطح یک و درصد قیر مصرفی در سطح سه دارای سطوح موثرتری می‌باشند.

نمودار میانگین‌ها برای پارامتر وزن مخصوص آسفالت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که نوع خرده آسفالت بازیافتی و درصد خرده آسفالت بازیافتی بر وزن مخصوص آسفالت تأثیر چندانی ندارد در حالتی که



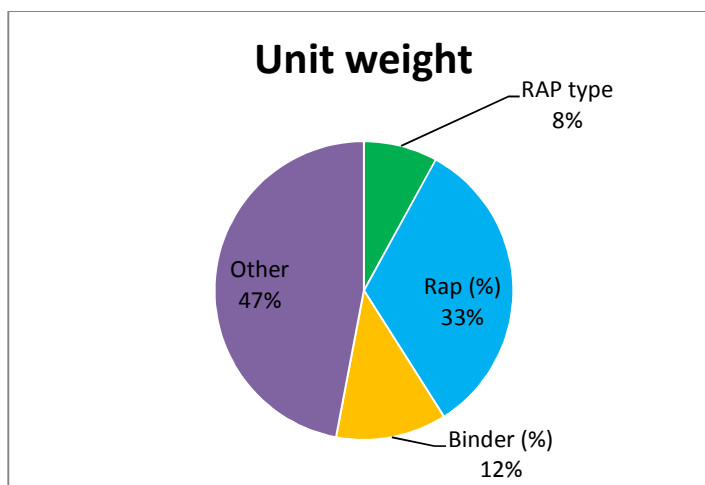
شکل ۱۰. تأثیر سطوح عوامل بر وزن مخصوص آسفالت

با محاسبه درصد تأثیر پارامترها بر روی وزن مخصوص آسفالت که در شکل ۱۱ نشان داده شده است مشاهده می‌شود که درصد خرده آسفالت بازیافتی تأثیر شگرفی دارد ولی درصد قیر خالص و نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر چندانی ندارد.

جدول ۱۱ آنالیز واریانس صورت گرفته بر خروجی وزن مخصوص آسفالت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر خالص مصرفی پارامترهای معنادار و مهمی هستند و نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر اندکی دارند.

جدول ۱۱. آنالیز واریانس نسبت S/N وزن مخصوص آسفالت

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-value
Rap type	۱	۰/۰۰۵۲۷	۰/۰۰۵۲۷	۰/۰۰۵۲۷	۴/۴۴	۰/۰۵۷
Rap	۲	۰/۰۴۸۲۵۶	۰/۰۴۸۲۵۶	۰/۰۲۴۱۲۸	۲۰/۳۱	۰
Binder	۲	۰/۰۰۷۳۹۷	۰/۰۰۷۳۹۷	۰/۰۰۳۶۹۹	۳/۱۱	۰/۰۸۱
Error	۱۲	۰/۰۱۴۲۵۶	۰/۰۱۴۲۵۶	۰/۰۰۱۱۸۸		
Total	۱۷	۰/۰۷۵۱۸۰				

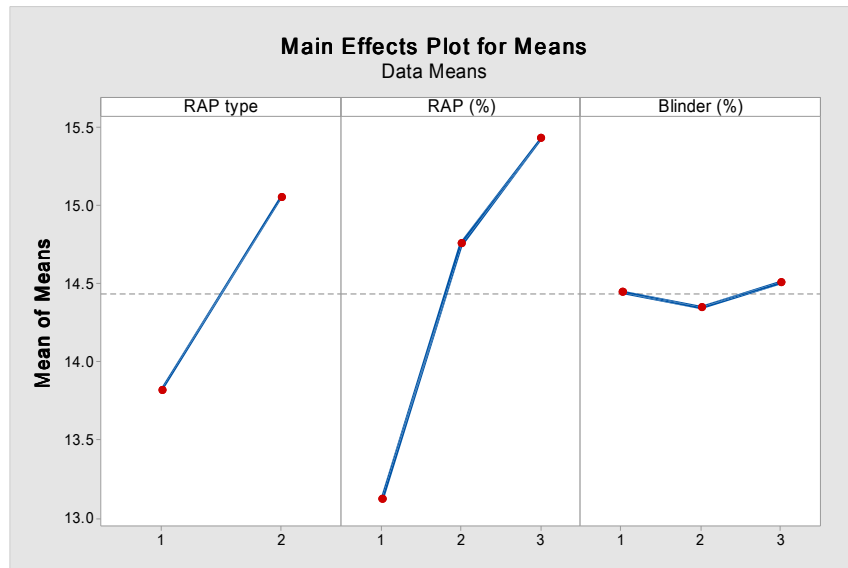


شکل ۱۱. نمودار درصد تأثیر عوامل تأثیرگذار بر وزن مخصوص آسفالت

۳-۶- درصد فضای خالی سنگدانه‌ها (VMA)

قیر مصرفی اثر چندانی ندارد. مشاهده می‌شود نوع خرده آسفالت در سطح دو و درصد خرده آسفالت بازیافتی در سطح سه سطوح مناسبی از پارامترها می‌باشند.

نمودار میانگین‌ها برای پارامتر درصد فضای خالی سنگدانه‌ها در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که نوع خرده آسفالت بازیافتی و درصد خرده آسفالت بازیافتی بر درصد فضای خالی سنگدانه‌ها تأثیر قابل توجهی دارند در حالی که درصد



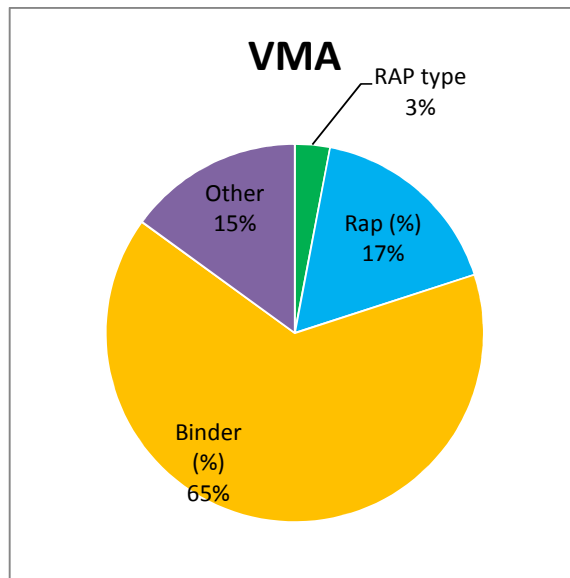
شکل ۱۲. تأثیر سطوح عوامل بر وزن مخصوص آسفالت

در شکل ۱۳ درصد تأثیر هر کدام از پارامترهای بررسی شده بر روی درصد فضای خالی سنگدانه‌ها نشان داده شده است. می‌توان مشاهده نمود که درصد خرده آسفالت بازیافتی و نوع خرده آسفالت تأثیر شگرفی دارد ولی درصد قیر خالص تأثیر چندانی ندارد.

جدول ۱۲ آنالیز واریانس بر روی مقادیر درصد فضای خالی سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد. درباره درصد فضای خالی سنگدانه‌ها درصد خرده آسفالت بازیافتی و نوع خرده آسفالت بازیافتی پارامترهای مهم و تأثیرگذاری هستند و درصد قیر خالص مصرفی تأثیر اندکی دارد.

جدول ۱۲، آنالیز واریانس نسبت S/N و وزن مخصوص آسفالت

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-value
Rap type	۱	۶/۸۳۳	۶/۸۳۳	۶/۸۳۳	۴/۴۸	۰/۰۵۶
Rap	۲	۱۶/۹۵۶	۱۶/۹۵۶	۸/۴۷۸	۵/۵۶	۰/۰۲
Binder	۲	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۳۹	۰/۰۳	۰/۹۷۵
Error	۱۲	۱۸/۲۹۷	۱۸/۲۹۷	۱/۵۲۵		
Total	۱۷	۴۲/۱۶۳				

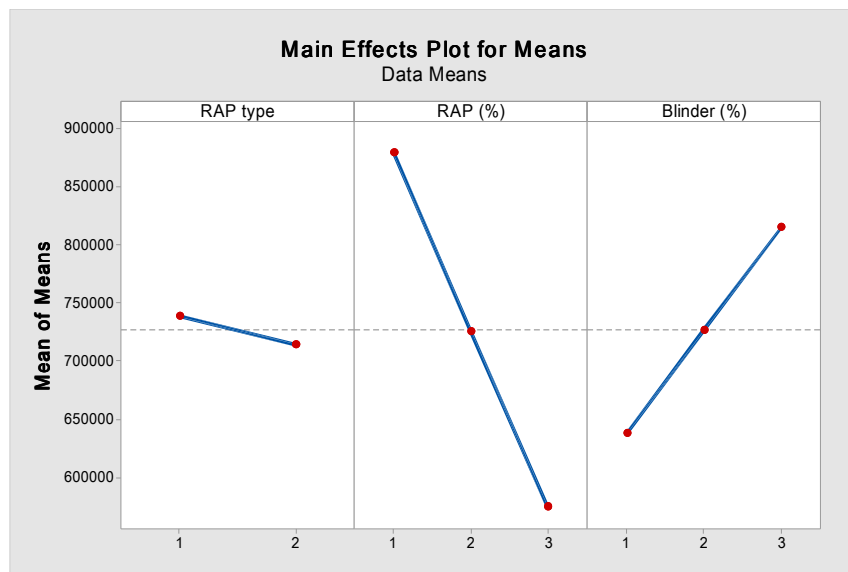


شکل ۱۳. درصد تأثیر عوامل تأثیر گذار بر درصد فضای خالی سنگدانه‌ها

۳-۷- هزینه

جدول ۱۳ آنالیز واریانس پارامتر هزینه را نشان می‌دهد. درصد قیر خالص مصرفی و درصد خرده آسفالت بازیافتی پارامترهای مهم و تأثیرگذاری هستند و نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر چندانی ندارد.

نمودار میانگین‌ها برای پارامتر هزینه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که درصد خرده آسفالت بازیافتی و قیر پارامترهای تأثیرگذار می‌باشند و نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر چندانی ندارد. همچنین درصد خرده آسفالت در سطح یک و درصد قیر مصرفی در سطح سه سطوح مناسبی از پارامترهای موثر در هزینه می‌باشند.

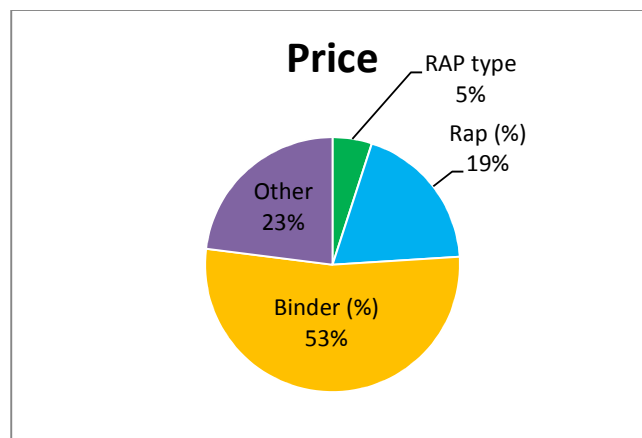


شکل ۱۴. تأثیر سطوح عوامل بر هزینه

جدول ۱۳. آنالیز واریانس نسبت S/N هزینه

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-value
Rap type	۱	۲۶۱۲۴۴۰۱۳۹	۲۶۱۲۴۴۰۱۳۹	۲۶۱۲۴۴۰۱۳۹	۱۶/۴۱	۰/۰۰۲
Rap	۲	۲/۷۸۳۵۹E+۱۱	۲/۷۸۳۵۹E+۱۱	۱/۳۹۱۷۹E+۱۱	۸۷۴/۴۳	۰
Binder	۲	۹۴۹۰۰۱۷۹۲۶۷	۹۴۹۰۰۱۷۹۲۶۷	۴۷۴۵۰۰۸۹۶۳۴	۲۹۸/۱۲	۰
Error	۱۲	۱۹۰۹۹۷۸۷۳۰	۱۹۰۹۹۷۸۷۳۰	۱۵۹۱۶۴۸۹۴		
Total	۱۷	۳/۷۷۷۸۱E+۱۱				

درصد تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر هزینه در شکل ۱۵ بیانگر این است که درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر خالص تأثیر قابل توجهی بر هزینه دارند، ولی نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر چندانی ندارد.



شکل ۱۵. درصد تأثیر عوامل تأثیر گذار بر هزینه

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تلاش شد توانایی روش تاگوچی در طراحی آزمایش و تحلیل نتایج در مطالعات رفتار مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی نمایش داده شود. استفاده از روش تاگوچی هزینه‌ی (زمانی و ریالی) بسیار کم‌تری نسبت به روش‌های متداول آزمایشگاهی به دنبال دارد. در روش تاگوچی علاوه بر شناسایی ترکیب مناسب از پارامترها، می‌توان تأثیر کلی متغیرها و حتی درصد این تأثیرات را بررسی کرد. به عنوان مثال، با توجه به شرایط آیین نامه‌ای، می‌توان ۵۰ درصد خرده آسفالت را در مخلوط آسفالتی با حضور ۵ درصد قیر خالص برای تولید آسفالت بازیافتی گرم با مصالح ۸۵-۱۰۰ استحصال شده از نوع خرده آسفالت نوع یک به کار برد. تحلیل نتایج با تاگوچی بیان می‌کند که نوع خرده آسفالت بازیافتی در مقایسه با دیگر پارامترها تأثیر چندانی بر مولفه‌های استقامتی و حجمی آسفالت بازیافتی نشان نمی‌دهد. در یک توضیح بیشتر می‌توان گفت که نوع خرده

آسفالت بازیافتی بر استحکام مارشال تأثیر چندانی ندارد، در حالی که پارامترهای درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر دارای اثر قابل توجهی هستند. در پارامتر روانی مارشال، درصد قیر خالص دارای بیشترین تأثیر بوده ولی نوع خرده آسفالت، تأثیر چندانی ندارند. درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر خالص اثر قابل توجهی بر درصد فضالی خالی مخلوط آسفالتی دارد در حالی که نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر چندانی ندارد. بر میزان فضای خالی سنگدانه‌ها که با قیر پر می‌شود، نوع خرده آسفالت بازیافتی، درصد خرده آسفالت بازیافتی و درصد قیر هر سه پارامترهای موثری هستند. اما میزان قیر مصرفی عامل تأثیرگذارتری است. نوع خرده آسفالت بازیافتی و درصد خرده آسفالت بازیافتی بر وزن مخصوص آسفالت تأثیر چندانی ندارد در حالی که درصد قیر اثر قابل توجهی دارد. تحلیل تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر هزینه‌ها بیانگر این است که درصد خرده آسفالت

- نیازی. ی. و جلیلی قاضی‌زاده م.، (۱۳۸۷)، "تأثیر سیمان و آهک بر تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی به روش سرد با قیر امولسیون"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال ۵، شماره ۴.

- نجار. ش. و میراشرف. ع.، (۱۳۹۵)، "ارزیابی مقاومتی آسفالت بازیافتی با استفاده از مخلوط سیمان آهک ماسه و فیلر"، دومین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین پژوهشی در مهندسی عمران معماری و مدیریت شهری".

- Hamzah, M. O., Gungat, L., & Golchin, B., (2017), "Estimation of optimum binder content of recycled asphalt incorporating a wax warm additive using response surface method", *International Journal of Pavement Engineering*, 18(8), pp.682-692.

- Karmakar, B., Dhawane, S. H., & Halder, G., (2018), "Optimization of biodiesel production from castor oil by Taguchi design", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), pp.2684-2695.

- Mansourian, A., Ghanizadeh, A. R., & Golchin, B., (2018), "Modeling of Resilient Modulus of Asphalt Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement Using Feed-Forward and Generalized Regression Neural Networks", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 6(1), pp.132-147.

-Mehta, A., Siddique, R., Singh, B. P., Aggoun, S., Łagód, G., & Barnat-Hunek, D., (2017), "Influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by Taguchi method", *Construction and Building Materials*, 150, pp.817-824.

-Prusty, J. K., & Pradhan, B., (2020), "Multi-response optimization using Taguchi-Grey relational analysis for composition of fly ash-ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, 241, pp.118049.

-Sun, B. Y., Xiao, J. B., Li, Z. B., Ma, B., Zhang, L. T., Huang, Y. L., & Bai, L. F., (2018), "An analysis of soil detachment capacity under freeze-thaw conditions using the Taguchi method", *Catena*, 162, pp.100-107.

- Raju, R., Sivalingam, V., Sun, J., Natarajan, M., & Zhao, Y., (2019), "Experimental and Taguchi-based grey approach of laser metal deposition technique on nickel-based superalloy", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72(1), pp.205-214.

-Slebi-Acevedo, C. J., Pascual-Muñoz, P., Lastra-González, P., & Castro-Fresno, D., (2019), "Multi-Response Optimization of Porous Asphalt Mixtures Reinforced with Aramid and Polyolefin Fibers Employing the CRITIC-TOPSIS Based on Taguchi Methodology", *Materials*, 12(22), pp.3789-3813.

بازیافتی و درصد قیر خالص تأثیر مهمی بر هزینه دارند ولی نوع خرده آسفالت بازیافتی تأثیر مهمی ندارد.

۵- مراجع

- علی‌اکبری‌بیدختی. م.، (۱۳۹۲)، "استفاده از مصالح بازیافتی آسفالت RAP در لایه اساس روسازی"، اولین کنفرانس ملی زیر ساخت‌های حمل‌ونقل تهران، پژوهشکده حمل‌ونقل، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- بابالو. ح. و اجلالی، (۲۰۰۶)، "یافتن طرح اختلاط بهینه بتن‌های سبک‌دانه سازه‌ای با استفاده از روش تاگوچی"، آنالیز سازه-زلزله، سال ۳، شماره ۳، ص. ۱۸-۲۴.

- حسینی. س. و شریعتی، م.، (۲۰۱۵)، "تحلیل آماری تاگوچی در طراحی آزمایش‌های تجربی پوسته‌های کامپوزیتی به منظور جذب انرژی"، مهندسی مکانیک مدرس، سال ۱۵، شماره ۷، ص. ۳۴۵-۳۵۲.

- خیاطی جانقربان. ک. و مرتضایی. م.، (۲۰۱۲)، "بهینه‌سازی شرایط عملیاتی لیچینگ باتری‌های دور ریز نیکل-کادمیم با روش تاگوچی"، نشریه علوم و مهندسی جداسازی، سال ۳، شماره ۲، ص. ۶۷-۷۴.

- رحمانی، ح.، یزدانی، م.، یزدانی، م. و نیکودل، م.، (۲۰۱۷)، "کاربرد روش تاگوچی در بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سبک نیمه‌سازه‌بی ساخته‌شده با سبک‌دانه‌های پومیس"، مهندسی عمران، ۳۲۲ (۴۱)، ص. ۱۰۱-۱۰۸.

- رستم‌آبادی. م.، صالحی نیشابوری، س. و زراتی. ا.، (۲۰۱۳)، "بهینه‌سازی شاخص‌های هندسی صفحه مستغرق در بستر رسوبی کانال مستقیم با روش تاگوچی و GRA"، مهندسی عمران مدرس، سال ۱۳، شماره ۲، ص. ۷۹-۹۳.

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۸۵) "مشخصات فنی اجرایی بازیافت گرم آسفالت" معاونت امور فنی دفتر امور فنی تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله (نشریه شماره ۳۴۱).

- شفابخش. غ. و رضائیان. م.، (۱۳۸۹)، "بررسی تأثیر درصد و نوع افزودنی‌ها بر پارامترهای مقاومتی مخلوط‌های بازیافت سرد با کف قیر"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال هفتم، شماره اول، ص. ۵۳.

- عامری. م. و تقی‌نژاد عمران. ع.، (۱۳۸۶)، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر تراشه‌های خرده آسفالت بر روی خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی گرم"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره دوم، ص. ۱۵۷.

- بابایی. س.، منجری. ز. و سعادت‌تقروودی. م.، (۱۳۹۴)، "بهینه‌سازی استحکام خمشی رزین اپوکسی با استفاده از روش طراحی آماری تاگوچی"، نشریه علمی پژوهشی مواد پیرانژی، سال ۱۰، شماره ۴، ص. ۱۱-۱۸.

The Use of Taguchi Method for Analyzing the Laboratory Performance of Recycled Asphalt Mixtures

*Babak Golchin, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,
University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.*

*Sajjad Abyazi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Ahar Branch,
Islamic Azad University, Ahar, Iran.*

*Ramin Meshkabadi, Assistant Professor, Department of Engineering Sciences, Faculty
of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Namin, Iran.*

E-mail: b.golchin@uma.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: November 2021

ABSTRACT

The recent increase in bitumen prices and environmental considerations has expanded the use of recycled asphalt mixtures. These mixtures are prepared with different percentages of recycled and new materials including bitumen and aggregate. Sometimes it is necessary to examine the effect of different laboratory parameters quickly and with a smaller number of samples. In this paper, the Taguchi method with 3 effective factors including the percentage of recycled materials (in three levels of 0, 25 and 50%), type of recycled materials (in two levels of two different sources) and the percentage of bitumen (in 3 levels of 4, 5 and 6%) was used to design experiments for rapid analysis of laboratory samples. The strength and volumetric characteristics of asphalt mixtures were determined and analyzed using Minitab software in L18 orthogonal array. The effect of each of the input parameters on the obtained results was determined by signal-to-noise ratio and analysis of variance. The results showed that the percentage of recycled materials significantly affects the strength and volumetric behavior of recycled mixtures. Contrary to expectations, the effect of the source of recycled materials is less than other input parameters.

Keywords: Recycled Asphalt, Taguchi Method, Design of Experiment, Bitumen