

بررسی رابطه مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی گرم با مشخصات فنی مصالح سنگی (مطالعه موردی)

مقاله علمی - پژوهشی

شاهین شعبانی*، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
جلال ایوبی نژاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
پیمان رشیدیان، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
سجاد کفاش زاده، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shabani@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۵۳۶-۵۲۱

چکیده

میزان مصرف قیر در مخلوط‌های آسفالت گرم روسازی راه‌ها از لحاظ اقتصادی و فنی بسیار مهم می‌باشد. از طرفی کارکرد بتن آسفالتی به عنوان یکی از لایه‌های روسازی راه به شدت تحت تاثیر کیفیت سنگدانه‌ها است. مصالح سنگی یکی از مهمترین مواد تشکیل دهنده روسازی آسفالتی و بتنی هستند که حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد حجم آسفالت گرم را شامل می‌شوند. خواص فیزیکی و مکانیکی این مصالح نقش مهمی در عملکرد روسازی ایفا می‌کند. در این مقاله تاثیر، درصد تورق، وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی و ارزش ماسه‌ای در میزان قیر بهینه مخلوط آسفالتی گرم بیند (۱۹-۰) میلی‌متر از ۸ معدن منتخب (رودخانه‌ای) در ۸ پروژه متفاوت در استان کرمان بررسی شده است. در مقایسه نتایج و تجزیه و تحلیل آزمایشات مصالح سنگی با مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی هر پروژه مشخص گردید. رابطه تغییرات وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی و ارزش ماسه‌ای با تغییرات مقدار قیر بهینه نسبت عکس و رابطه تغییرات درصد تورق مصالح سنگی با تغییرات مقدار قیر بهینه نسبت مستقیم دارد. به طوری که مشاهده شد با تغییر به میزان ۰.۰۱ گرم/سانتی متر مکعب در وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی، ۳ درصد در هم ارزش ماسه‌ای و ۲.۴۹ درصد در تورق مصالح سنگی ۱، درصد تغییر در میزان قیر بهینه ایجاد می‌شود. بنابراین با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت می‌توان جهت کاهش میزان قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی گرم از مصالح سنگی با چگالی بالا و درصد تورق پایین و ارزش ماسه‌ای بیشتر استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ارزش ماسه‌ای، درصد تورق، قیر بهینه، مخلوط آسفالتی گرم، وزن مخصوص حقیقی

۱- مقدمه

می‌افتد که این امر منجر به کاهش کیفیت عملکرد لایه آسفالتی اجرا شده می‌شود. غنی زاده و حیدرآبادی زاده و ضیائی (۱۴۰۰) یکی از هدف‌های طرح مخلوط‌های آسفالتی تعیین قیر بهینه بر اساس میانگین درصد قیری که بیشترین استقامت مارشال بیشترین وزن مخصوص و مناسب‌ترین مقدار فضای خالی که

اهداف اولیه طرح و اجرای روسازی‌های آسفالتی حصول عملکرد بهینه روسازی آسفالتی در شرایط آب و هوای مختلف با آمد شد زیاد و بار محوری سنگین می‌باشد. در صورت کم بودن فضای خالی و اشباع شدن توسط قیر، قیرزدگی اتفاق

وی پیشنهاد داد که بر اساس روابط حجمی باید حداقل فضای خالی مصالح سنگی ۱۵ درصد، حجم فضای خالی مخلوط آسفالتی (۵-۳) درصد، حجم پر شده با قیر (۸۵-۷۵) درصد، باشد. او در کامل کردن نظریه خود، فضای خالی مصالح سنگی را متناسب با بیشترین اندازه اسمی دانه‌ها دانست به طوری که در مصالح ریز دانه، فضای خالی مصالح سنگی از ۱۵ درصد بیشتر و در مصالح درشت دانه از ۱۵ درصد کمتر است اسمیت و هسپ (۲۰۰۲). در حال حاضر طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی گرم در ایران بر اساس روش مارشال و مارشال اصلاح شده انجام می‌شود و با توجه به این روش‌ها درصد قیر بهینه برای هر نوع مصالح به دست می‌آید. تحقیقات اخیر در ایران نشان می‌دهد که مطالعات مکتوب اندکی بر روی کاهش درصد قیر بهینه انجام شده است.

به عنوان مثال، شمشیری و همکاران ۱۳۹۳ اثر نوع دانه بندی را بر روی مشخصات مارشال و قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی بررسی نمودند. آنها دریافتند درصد قیر متناظر با استقامت مارشال حداکثر، برای دانه‌بندی شماره ۵ مندرج در نشریه ۲۳۴ کمتر از نمونه‌های متناظر در دیگر دانه‌بندی‌ها است شمشیری، حسینی و عبدی (۱۳۹۳). معماریان ۱۳۹۴ اثر مصالح سنگی استان تهران را بر روی قیر بهینه مورد بر رسی قرار داد. تحقیقات ایشان نشان داد جنس زمین شناسی مصالح بر روی درصد قیر بهینه تاثیر بسیار مهمی دارد. معماریان (۱۳۹۴) با توجه به تحقیقات گذشته، در این مقاله نقش مشخصات فنی مصالح سنگی بر روی درصد قیر بهینه بر رسی شده است به طوری که با کمترین مقدار قیر، مشخصات مخلوط‌های آسفالتی در حد قابل قبول و استاندارد قرار گیرد.

۲- روش تحقیق

هدف کلی از این پژوهش بررسی تاثیر مشخصات فنی مصالح سنگی (رودخانه‌ای) در میزان قیر بهینه مخلوط آسفالتی گرم می‌باشد. در این پژوهش سعی بر آن است تا با تکیه بر نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌های درصد تورق، هم ارز ماسه‌ای، وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی و مقایسه فنی بین آنها با میزان قیر بهینه هر مخلوط شناخت مسئله صورت پذیرد.

در بتن آسفالتی را نتیجه می‌دهد می‌باشد. گلچین و همکاران (۱۴۰۲) یک طرح اختلاط مناسب شامل درصد قیری با درصد فضای خالی کافی به منظور جلوگیری از بروز شیارشدگی ناشی از جریان پلاستیک، افزایش مقاومت و کاهش شکنندگی آن و نیز درصد فضای خالی کم جهت جلوگیری از نفوذ آب و هوا است. درصد فضای خالی زیاد در لایه‌های آسفالتی به آب اجازه می‌دهد در این حفره‌ها حرکت نماید. اکثر طرح اختلاط‌ها ۳ تا ۵ درصد فضای خالی را پیشنهاد می‌دهند. وقتی درصد فضای خالی کمتر از ۵ درصد باشد، مواد مخلوط آسفالتی اکثراً در برابر رطوبت غیرقابل نفوذ هستند. اگر درصد فضای خالی بیشتر از ۸ درصد باشد، رطوبت می‌تواند به راحتی در داخل مصالح نفوذ کند. کانداهال (۱۹۹۲). ساخت رویه‌های آسفالتی مقاوم در برابر تغییر شکل برای جاده‌های با آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین حائز اهمیت است. سنگ دانه‌های مخلوط‌های آسفالتی بیش از ۹۰ درصد وزنی مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهند. از این رو مشخصات سنگ دانه‌ها تاثیر مستقیم و بسزایی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی دارد چیت سازان (۱۴۰۲). افزایش درصد ذرات متورق و سوزنی در بتن آسفالتی در عملکرد آن تاثیر نامطلوبی دارد. که از آن جمله می‌توان به کاهش پایداری، کاهش کارایی، کاهش ضریب برجهندگی اشاره کرد. سنگدانه‌های پولکی و سوزنی در مخلوط آسفالتی مقاومت کمتری در برابر تغییر شکل برشی دارند و همچنین این ذرات تراکم پذیری کمتر و شکست (خردشدگی) بیشتری دارند. جیان شیوچن و همکاران (۲۰۰۵) ذرات پولکی و سوزنی مقاومت مارشال بتن آسفالتی را تحت تاثیر قرار می‌دهند و با افزایش این ذرات مقدار شاخص کارایی و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد سیسوسه بروتو و همکاران (۲۰۰۵). وجود درصد های مختلف ذرات متورق و سوزنی در بتن آسفالتی سبب تغییراتی در عمق شیار شدگی و نیز جابه جایی و جهت دار شدن سنگ دانه‌ها می‌شود. جی اس چن و همکاران (۲۰۰۵). استفاده از معیارهای حجمی در طراحی روسازی بتن آسفالتی را اولین بار در دهه ۵۰ میلادی مک لود کانادایی مطرح کرد. وی برای بار نخست معیار حداقل فضای خالی مصالح سنگی را در طراحی مخلوط‌های آسفالتی در قشر رویه را پیشنهاد داد، با این فرض که فضای خالی مصالح سنگی نقش کنترل کننده بر رفتار بتن آسفالتی دارد و رفتار آن را کنترل می‌کند (رشیدیان، کی منش، ایوبی نژاد، ۱۴۰۲).

جدول ۱. مشخصات محور مورد ارزیابی

نام محور	مسیر برگشت کنار	مسیر برگشت کنار	مسیر رفت کنار	مسیر برگشت	مسیر رفت	مسیر رفت	مسیر برگشت
گذر غربی کرمان	گذر غربی کرمان	گذر غربی کرمان	گذر غربی کرمان	کرمان - بافت	کرمان - بم	کرمان - بم	کرمان - بم
قطعه ۴	قطعه ۳	قطعه ۳	قطعه ۱	قطعه ۳	قطعه ۳	قطعه ۳	قطعه ۴
۱۰ کیلومتر	۲۰ کیلومتر	۱۵ کیلومتر	۱۵ کیلومتر	۲۰ کیلومتر	۲۵ کیلومتر	۲۰ کیلومتر	۱۵ کیلومتر
دارای ۲ خط عبور اصلی درجه ۱	دارای ۲ خط عبور اصلی درجه ۱	دارای ۲ خط عبور اصلی درجه ۱	دارای ۲ خط عبور اصلی درجه ۱	دارای ۲ خط عبور اصلی درجه ۱	دارای ۲ خط عبور اصلی درجه ۱	دارای ۲ خط عبور اصلی درجه ۱	دارای ۲ خط عبور اصلی درجه ۱
بیابانی	بیابانی	بیابانی	بیابانی	نیمه خشک معتدل تا سرد	گرم و خشک	گرم و خشک	گرم و خشک

۲-۱- انتخاب محورهای مورد مطالعه

در این پژوهش از نتایج آزمایشگاهی مصالح سنگی ۸ معدن منتخب (رودخانه‌ای) در ۸ پروژه متفاوت در استان کرمان استفاده شده است جدول شماره ۱ مشخصات محورها را نشان می‌دهد.

۲-۲- جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات

جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات در این پژوهش از نوع آزمایشگاهی و میدانی می‌باشد. ابتدا از مصالح سنگی تولید شده در هر سنگ‌شکن اقدام به نمونه‌گیری شده و بر روی نمونه‌های اخذ شده آزمایش‌های درصد تورق، هم ارز ماسه‌ای، وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی مطابق استاندارد AASHTO T166-AASHTO T176 -BS-812 انجام سپس اقدام به تهیه مخلوط آسفالتی و تعیین قیر بهینه آن شده است.

انجام آزمایش‌های مکانیکی

آزمایش‌های قیر

قیر انتخابی برای این تحقیق از نوع ۷۰-۶۰ بوده و کلیه الزامات استاندارد را براساس آیین نامه ایران (جدول ۱-۱۴ نشریه ۱۰۱) تامین کرده است. جدول ۲، مشخصات قیر مصرفی در پژوهش را نشان می‌دهد.

تعیین هم ارز ماسه‌ای

آزمایش هم ارز ماسه‌ای روشی برای تعیین میزان تمیزی ماسه از ریز دانه‌ها (رس، لای) می‌باشد و هدف تعیین نسبت حجم

ماسه به حجم کل خاک (ماسه، لای، رس) است. در واقع این آزمایش را می‌توان مکمل آزمایش دانه‌بندی دانست زیرا در آن حجم ماسه به کل خاک (ماسه، رس، لای) تعیین می‌گردد و در حقیقت نشان می‌دهد که تمیزی ماسه در چه حد است. آزمایش هم ارز ماسه مطابق استاندارد AASHTO-T176 انجام شد. بدین صورت که مقدار ۱۱۰ گرم از مصالح رد شده از الک نمره ۴ را در استوانه آزمایش که تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر از محلول استوکس پر شده با قیف مخصوص قرار می‌دهیم، استوانه آزمایش را به مدت ۱۰ دقیقه به صورت ایستاده قرار داده و سپس درپوش آن را در جای خود قرار داده و آن را به حالت افقی بین دو دست گرفته و به چپ و راست حرکت داده به طوری که طول جابجایی استوانه تقریباً ۲۰ سانتی متر باشد در مدت ۲۰ ثانیه ۹۰ بار استوانه را به چپ و راست حرکت می‌دهیم. پس از آن استوانه در حالت ایستاده قرار داده شده و میله شستشو را در داخل استوانه آزمایش قرار می‌دهیم به نحوی که نازل خروجی از کف استوانه شروع به شستشو نموده و تمام مواد ریز دانه رسی را همزمان با چرخش استوانه، رو به بالا شستشو داده و همزمان با پاک سازی دیواره حجم استوانه را به ۱۵ اینچ می‌رسانیم. با زمان‌گیری به مدت ۲۰ دقیقه استوانه آزمایش به صورت ایستاده و بدون هیچ گونه لرزشی قرار داده می‌شود. در پایان زمان عدد رس رسوب کرده را قرائت و با فرو کردن آرام میله نشان دار عدد ماسه را قرائت می‌کنیم نتایج تراز رس و ماسه در جدول شماره ۳ آورده شده است با مشخص شدن تراز رس و ماسه درصد ارزش ماسه مطابق رابطه ۱ محاسبه شد.

(۱)

$$SE = \frac{h}{H} * 100$$

SE : درصد ارزش ماسه‌ای
 h : سطح ارتفاع ماسه در استوانه
 H : سطح ارتفاع رس در استوانه



شکل ۱. تجهیزات آزمایش هم ارز ماسه‌ای

تعیین وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی

با توجه به تعریف فوق وزن مخصوص مصالح سنگی درشت، ریز و فیلر به ترتیب مطابق استانداردهای AASHTO-T84, T85, AASHTO-T100 مشخص شد که نتایج آن در جدول شماره ۴ آورده شده است. پس از آن جهت تعیین وزن مخصوص هر مخلوط مطابق رابطه شماره ۲ دانه بندی هر ترکیب با استفاده از الک‌های ردیف ۴ جدول دانه‌بندی پیوسته مخلوط‌های آسفالتی (نشریه ۱۰۱ مشخصات فنی عمومی راه) انجام شد تا درصد عبوری از الکها و تفکیک مصالح درشت، ریز و فیلر مشخص شود. نتایج دانه‌بندی، درصد ترکیب مصالح و وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی در جدول شماره ۵ ارائه شده است.

(۲)

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}}$$

P_1, P_2, P_3 : به ترتیب درصد مصالح درشت دانه، ریزدانه و فیلر

G_1, G_2, G_3 : به ترتیب وزن مخصوص مصالح درشت دانه، ریزدانه و فیلر

وزن مخصوص مصالح سنگی در فضای خالی آسفالت کوبیده شده و فضای خالی مصالح سنگی اثر قابل ملاحظه‌ای دارد. علت این تاثیر تخلخل دانه‌های مصالح سنگی و جذب قیر در مصالح سنگی می‌باشد. طباطبایی (۱۳۹۶) در این پژوهش معادن منتخب از نوع رودخانه‌ای می‌باشد و از آنجائیکه یکی از اهداف این پژوهش بررسی تاثیر وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی در میزان قیر بهینه مخلوط آسفالتی است مصالح سنگی در مقدارهای مختلف باهم ترکیب شدند به نحوی که علاوه بر داشتن یکنواختی در ترکیب مصالح، وزن مخصوص متفاوتی نسبت به هم داشته باشند تا شناخت مسئله صورت بگیرد. مطابق نشریه ۱۰۱ مصالح سنگی درشت دانه بخشی از مخلوط مصالح سنگی است که روی الک شماره ۴ باقی می‌ماند و مصالح ریزدانه بخشی از مخلوط مصالح سنگی است که از الک شماره ۴ عبور کرده و روی الک ۲۰۰ باقی می‌ماند.

جدول ۲. نتایج دانه‌بندی، وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی و درصد ترکیب مصالح سنگی

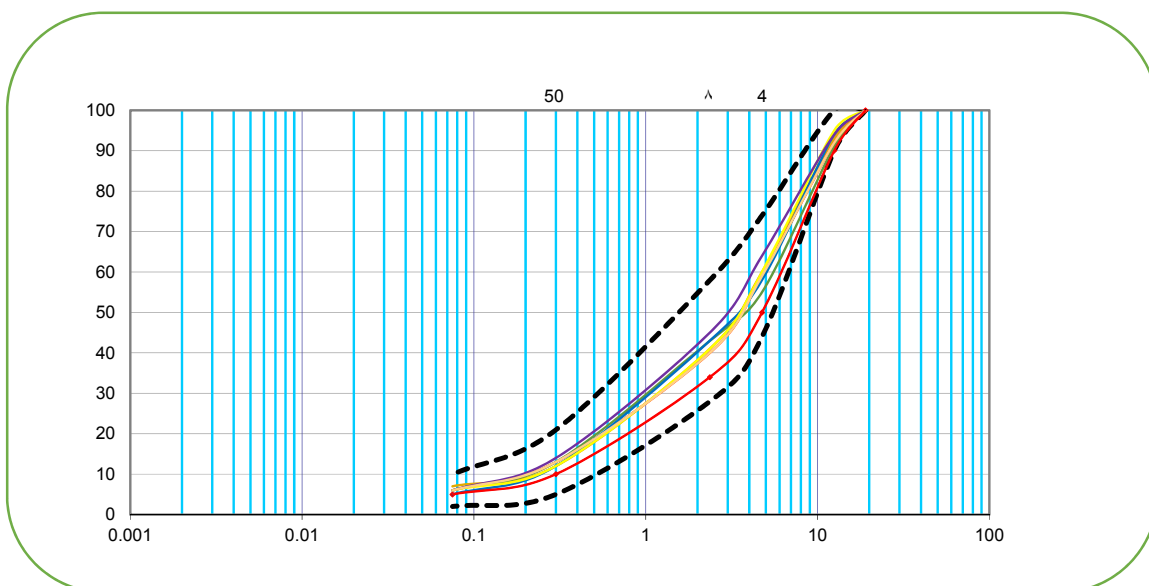
دانه بندی مصالح سنگی (درصد عبوری از الک‌ها)								اندازه الک (میلیمتر)
آزمایش ۸	آزمایش ۷	آزمایش ۶	آزمایش ۵	آزمایش ۴	آزمایش ۳	آزمایش ۲	آزمایش ۱	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۳/۴ اینچ
۹۰	۹۲	۹۴	۹۵	۹۴	۹۱	۹۲	۹۳	۱/۲ اینچ
۵۰	۵۹	۶۴	۶۰	۵۸	۵۵	۵۹	۶۰	شماره ۴
۳۴	۴۰	۴۵	۴۱	۴۳	۴۳	۴۰	۴۱	شماره ۸
۱۰	۱۳	۱۴	۱۲	۱۲	۱۳	۱۳	۱۲	شماره ۵۰
۵	۶	۶	۶	۵	۶	۶	۷	شماره ۲۰۰
۲,۶۲۶	۲,۶۳۶	۲,۶۳۲	۲,۶۲۶	۲,۶۴۲	۲,۶۲۴	۲,۶۱۳	۲,۶۲۹	وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی (گرم / سانتی متر مکعب)
نسبت اختلاط مصالح سنگی (درصد)								
۱۰	۸	۶	۵	۶	۹	۸	۷	شن متوسط (۱۲-۱۹) میلیمتر
۴۰	۳۳	۳۰	۳۵	۳۶	۳۶	۳۳	۳۳	شن ریز (۶-۱۲) میلیمتر
۵۳	۵۳	۵۸	۵۴	۵۳	۴۹	۵۳	۵۳	ماسه (۰-۶) میلیمتر
۵	۶	۶	۶	۵	۶	۶	۷	فیلر

جدول ۳. نتایج آزمایش تعیین هم ارز ماسه‌ای

آزمایش ۸	آزمایش ۷	آزمایش ۶	آزمایش ۵	آزمایش ۴	آزمایش ۳	آزمایش ۲	آزمایش ۱	مشخصه
۴,۹	۴,۹	۵,۲	۴,۸	۴,۶	۴,۶	۴,۷	۴,۸	سطح ارتفاع ماسه (اینچ)
۸	۷,۹	۹	۸	۷	۷	۷,۵	۸	سطح ارتفاع رس (اینچ)
۶۱	۶۲	۵۸	۶۰	۶۶	۶۶	۶۳	۶۰	درصد هم ارز ماسه‌ای

جدول ۴. نتایج وزن مخصوص مصالح سنگی

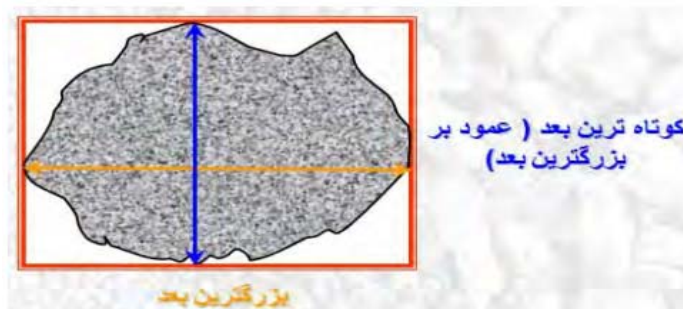
آزمایش ۸	آزمایش ۷	آزمایش ۶	آزمایش ۵	آزمایش ۴	آزمایش ۳	آزمایش ۲	آزمایش ۱	مشخصه
۲,۶۲۸	۲,۶۴۶	۲,۶۳۹	۲,۶۲۶	۲,۶۶	۲,۶۳۲	۲,۶۱۴	۲,۶۳۷	وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی مانده روی الک ۴ (gr/cm ³)
۲,۶۱۴	۲,۶۱۹	۲,۶۱۶	۲,۶۱۵	۲,۶۲۱	۲,۶۰۴	۲,۶۰	۲,۶۱۱	وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۲۰۰ (gr/cm ³)
۲,۷۳۵	۲,۷۳۳	۲,۷۳۸	۲,۷۳۹	۲,۷۳۷	۲,۷۳۵	۲,۷۳۲	۲,۷۳۰	وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰ (gr/cm ³)



شکل ۲. دانه بندی ترکیب مصالح سنگی (منحنی دابندی پیوسته شماره ۴ نشریه ۱۰۱ مشخصات فنی عمومی راه)



شکل ۳. تعیین درصد وزنی سنگ دانه‌های پولکی با استفاده از صفحه شیاردار



شکل ۴. نسبت ابعاد سنگ دانه

تعیین درصد تورق مصالح سنگی

درصد ذرات پولکی شکل، درصد وزنی مصالح سنگی است که ضخامت آنها کمتر از ۰,۶ اندازه متوسط دانه‌ها می‌باشد امیری، خبیری، نژاد کورکی (۱۴۰۰). این آزمایش مطابق استاندارد BS-812 که برای تعیین درصد ذرات پولکی شکل از یک صفحه مخصوص شیار دار که عرض شیارها ۰,۶ اندازه متوسط دو الک متوالی است انجام شد. بدین صورت که مصالح سنگی رد شده از الک ۱/۲ اینچ و مانده روی الک اینچ را انتخاب و وزن می‌کنیم سپس سنگ دانه‌ها را از شیار ۱/۲ و ۳/۸ اینچ دستگاه تعیین تورق عبور داده آن دسته از سنگ دانه‌ها که از شیار مورد نظر عبور نمی‌کنند جزء سنگ دانه‌های سالم و آنهایی که عبور می‌کنند سنگ دانه‌های ناسالم از نظر تورق هستند. سپس آن دسته از مصالح که از شیار عبور کرده (ناسالم از نظر تورق) را وزن می‌کنیم. از تقسیم جمع وزن مصالح رد شده از میان شیارها نسبت به وزن اولیه مطابق رابطه شماره ۳ درصد ذرات پولکی شکل محاسبه می‌گردد. نتایج آزمایش‌های تعیین درصد پولکی مصالح سنگی در جدول شماره ۶ ارائه شده است.

(۳)

$$\text{درصد تورق} = \frac{\text{وزن دانه های رد شده از شیارها}}{\text{وزن کل نمونه}} * 100$$

تعیین درصد قیر بهینه

مقدار درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی مطابق پیشنهادات نشریه MS-2 انستیتو آسفالت، با توجه به درصد قیرنظیر فضای خالی (۳-۶) در محورها الی ۸ ترتیب ۴/۷، ۴/۸، ۴/۷، ۴/۶، ۴/۸، ۴/۸، ۴/۷، ۴/۵، ۴/۵، ۴/۷، ۴/۵ درصد نسبت به وزن مخلوط آسفالت انتخاب گردید. شایان ذکر است که سایر پارامترهای مخلوط آسفالتی: پایداری مارشال، روانی مارشال، درصد فضای خالی، درصد فضای خالی پر شده با قیر، به ازای درصد قیر بهینه انتخابی تعیین و مقادیر آنها با معیار طرح اختلاط به روش مارشال مقایسه گردید، که نتایج آزمایش‌های ذکر شده در جدول ۷، ارائه شده است. همانگونه که از نتایج آزمایش‌ها در جدول ۷ مشهود است مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در محدوده مجاز می‌باشند. بنابراین انتخاب درصد قیرهای بهینه در هر یک از آزمایش‌ها نسبت به وزن مخلوط آسفالت بلامانع خواهد بود.

۳- تحلیل و بررسی نتایج

۳-۱- تفسیر کیفی

شکل شماره ۵ اثر مشخصات فنی مصالح سنگی بر روی قیر بهینه را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود درصد قیر بهینه با هم ارز ماسه‌ای و وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی نسبت عکس و با درصد تورق نسبت مستقیم دارد. به طوری که در بیشترین مقدار قیر بهینه ۴,۸۵ درصد هم ارز ماسه‌ای و وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی دارای کمترین مقدار و برابر ۵۸ درصد و ۲,۶۱۳ گرم / سانتی متر مکعب و درصد تورق دارای بیشترین مقدار برابر ۱۹ درصد می‌باشد. در کمترین مقدار قیر بهینه ۴,۶ درصد هم ارز ماسه‌ای و وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی دارای بیشترین مقدار و برابر ۶۶ درصد و ۲,۶۴۸ گرم / سانتی متر مکعب و درصد تورق دارای کمترین مقدار برابر ۱۳ درصد می‌باشد.

جدول ۶. نتایج آزمایش تعیین درصد تورق

مشخصه	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵	آزمایش ۶	آزمایش ۷	آزمایش ۸
وزن دانه‌های عبور کرده از شیار (گرم)	۲۰۱,۶	۲۶۶	۴۰۳	۲۰۰	۳۳۳	۲۲۴	۱۹۶	۳۷۸
وزن کل نمونه (گرم)	۱۱۲۰	۱۴۰۰	۲۲۴۰	۱۵۴۰	۱۹۶۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۲۱۰۰
درصد تورق	۱۸	۱۹	۱۸	۱۳	۱۷	۱۶	۱۴	۱۸

مخلوط مصالح سنگی

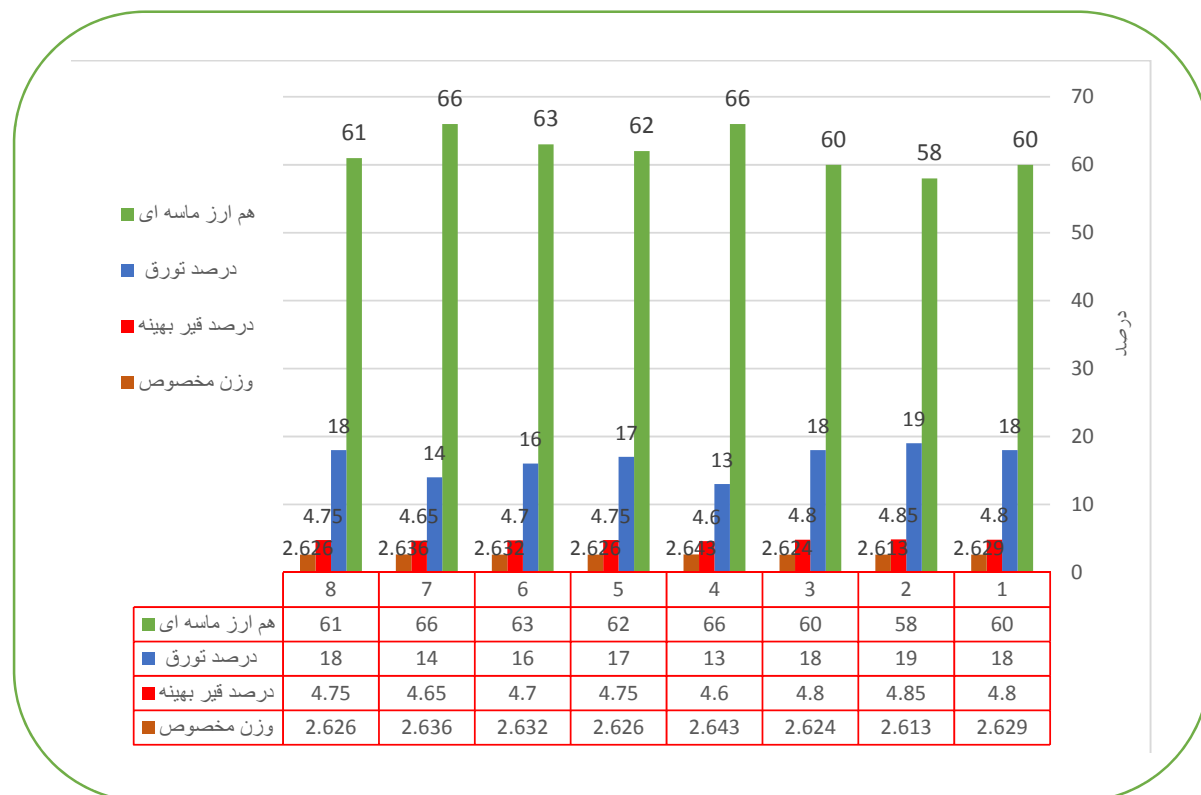
شماره ۶ ارتباط وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی با درصد قیر بهینه را یک تابع خطی با ضریب همبستگی ۰/۸۶ و رابطه $y = -8.9695x + 28.314$ را نشان می‌دهد. می‌توان با جایگذاری مقدار وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی در مقدار x درصد قیر بهینه مخلوط را محاسبه کرد.

با مقایسه درصد قیر بهینه هر مخلوط با وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی متناظر با آن مشاهده شد درصد قیر بهینه با وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی نسبت عکس دارد. به طوری که با افزایش وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی درصد قیر بهینه کاهش می‌یابد و نمودار شکل

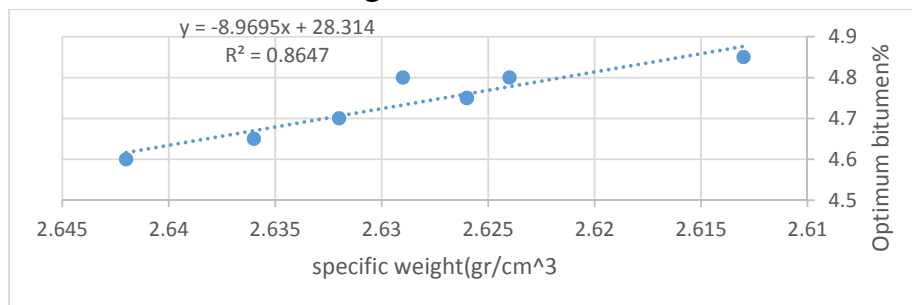
۲-۳- ارتباط درصد قیر بهینه با وزن مخصوص حقیقی

جدول ۷. نتایج آزمایش‌های قیر

مشخصه	طبقه بندی ترافیک	تراکم، تعداد ضربات به هر سمت	مقاومت مخلوط بر حسب کیلوگرم	روانی بر حسب میلی متر	درصد فضای خالی	درصد فضای خالی پر شده با قیر
نتایج آزمایش ۱	سنگین	۷۵	۱۳۰۰	۲,۶	۴,۷	۶۶
نتایج آزمایش ۲	سنگین	۷۵	۱۳۰۰	۲,۶	۴,۶	۶۶
نتایج آزمایش ۳	سنگین	۷۵	۱۲۸۰	۲,۶	۴,۴	۶۸
نتایج آزمایش ۴	سنگین	۷۵	۱۳۸۰	۲,۶	۴,۶	۷۱
نتایج آزمایش ۵	سنگین	۷۵	۱۳۵۰	۲,۵	۴,۸	۷۰
نتایج آزمایش ۶	سنگین	۷۵	۱۳۲۰	۲,۷	۴,۵	۶۹
نتایج آزمایش ۷	سنگین	۷۵	۱۳۸۰	۲,۷	۴,۸	۶۸
نتایج آزمایش ۸	سنگین	۷۵	۱۳۵۰	۲,۶	۴,۶	۶۹
حدود آئین نامه	-	-	حداقل ۸۰۰	۲-۳/۵	۳-۶	۶۰-۷۵



شکل ۵. نمودار بررسی رابطه مشخصات فنی مصالح سنگی با درصد قیر بهینه



شکل ۶. نمودار رابطه درصد قیر بهینه با وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی

۳-۳- ارتباط درصد قیر بهینه با درصد تورق مصالح سنگی

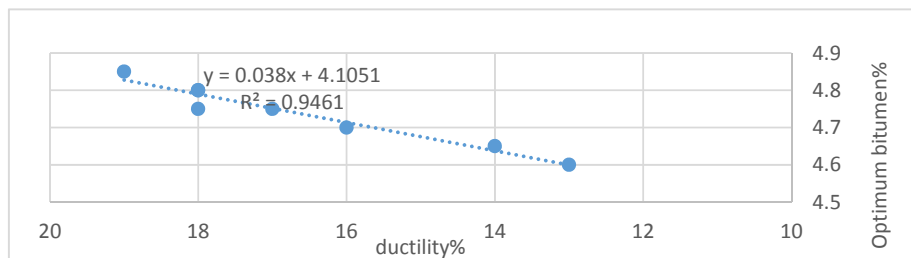
تورق مصالح سنگی با درصد قیر بهینه را یک تابع خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۴ و رابطه $y=0.038x+4.1051$ را نشان می‌دهد. می‌توان با جایگذاری مقدار درصد تورق مصالح سنگی در مقدار X درصد قیر بهینه مخلوط را محاسبه کرد.

با مقایسه درصد قیر بهینه هر مخلوط با درصد تورق مصالح سنگی متناظر با آن مشاهده شد درصد قیر بهینه با درصد تورق مصالح سنگی نسبت مستقیم دارد. به طوری که با افزایش درصد تورق درصد قیر بهینه افزایش و با کاهش درصد تورق، درصد قیر بهینه کاهش می‌یابد و نمودار شکل شماره ۷ ارتباط درصد

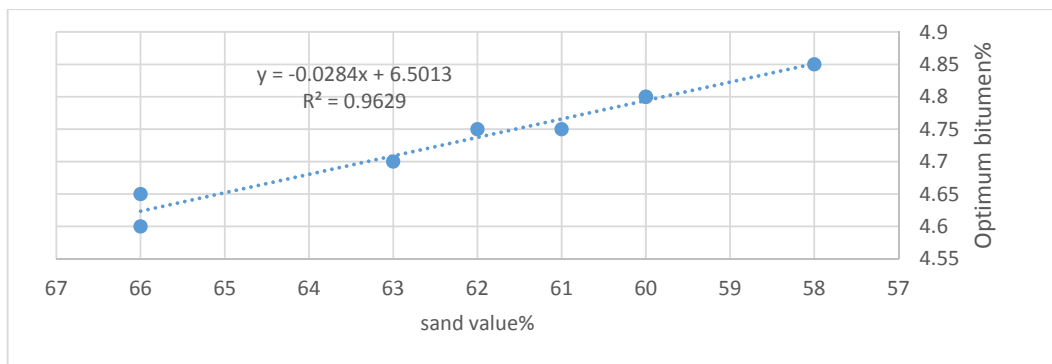
۳-۴-ارتباط درصد قیر بهینه با هم ارز ماسه‌ای

می‌توان با جایگذاری مقدار درصد هم ارز ماسه‌ای در مقدار X درصد قیر بهینه مخلوط را محاسبه کرد.

با مقایسه درصد قیر بهینه هر مخلوط با هم ارز ماسه ای متناظر با آن مشاهده شد درصد قیر بهینه با درصد هم ارز ماسه‌ای نسبت عکس دارد. به طوری که با افزایش هم ارز ماسه‌ای درصد قیر بهینه کاهش می‌یابد. و نمودار شکل شماره ۸ ارتباط هم ارز ماسه ای با درصد قیر بهینه را یک تابع خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۶ و رابطه $y = -0.0284x + 6.5013$ را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودار رابطه درصد قیر بهینه با درصد تورق مصالح سنگی



شکل ۸. نمودار رابطه درصد قیر بهینه با هم ارز ماسه‌ای

۴- مقایسه آماری

۸ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود اختلاف میان ضریب تغییرات درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه در بخش ۳-۲ با درصد قیر بهینه محاسبه شده به روش

مقادیر درصد قیر بهینه محاسبه شده به روش آزمایشگاهی با مقادیر درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه‌های به دست آمده از پژوهش با هم مقایسه شد، که نتایج آن در جدول شماره

پژوهش با انحراف از استاندارد، داده‌های به دست آمده از روش آزمایشگاهی می‌توان با فرض اینکه انحراف‌های استاندارد باهم برابرند درستی مدل‌های رگرسیون خطی ارائه شده برای هر کدام از روابط پژوهش را با آزمون آماری F مورد راستی آزمایی قرار داد.

آزمایشگاهی ۰,۰۰۲ و اختلاف میان ضریب تغییرات درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه در بخش‌های ۳-۳ و ۴-۳ با درصد قیر بهینه محاسبه شده به روش آزمایشگاهی ۰,۰۰۱ است. با توجه به این اختلاف‌های ناچیز در ضریب تغییرات و انحراف از استاندارد داده‌های هر کدام از روابط بدست آمده از

۴-۱- بررسی مدل رگرسیون خطی رابطه درصد قیر بهینه با متغیرهای مستقل، وزن مخصوص حقیقی، هم ارز ماسه‌ای و تورق مصالح سنگی با استفاده از آزمون آماری F

متغیرهای توصیفی و تحت کنترل محقق نیست موثر باشد. هدف از انجام تحلیل رگرسیون شناسایی مدل خطی این رابطه است. بعد از انجام مراحل رگرسیون می‌توان صحت مدل ایجاد شده و کارایی آن را با استفاده از تحلیل واریانس سنجید. اساس کار در تحلیل واریانس، تجزیه واریانس متغیر وابسته به دو بخش است، بخشی از تغییرات یا پراکندگی توسط مدل رگرسیون قابل نمایش است و بخش دیگر توسط جمله خطا تعیین می‌شود.

استفاده از داده‌ها به منظور کشف رابطه بین آنها اساس داده کاوی است. یکی از ابزار سنجش رابطه و مدل‌سازی استفاده از ابزار آماری رگرسیون است. رگرسیون خطی یک رویکرد مدل خطی بین متغیر (پاسخ) با یک یا چند متغیر (توصیفی) است. در این روش فرض بر این است که یک یا چند متغیر توصیفی که مقدار آنها مستقل از بقیه متغیرها یا تحت کنترل محقق است می‌تواند در پیش بینی متغیر پاسخ که مقدارش وابسته به

جدول ۸. مقایسه آماری نتایج حاصل از آزمایش‌ها

ردیف	میانگین درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق روش آزمایشگاهی	میانگین درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	میانگین درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	میانگین درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	انحراف از معیار درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	انحراف از معیار درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق روش آزمایشگاهی
۱	۴,۷۳۷۵	۴,۷۳۲۵	۴,۷۳۶۹	۴,۷۴۰۵	۰,۰۷۶۹	۰,۰۸۳۴۵
ردیف	انحراف از معیار درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	انحراف از معیار درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	انحراف از معیار درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق روش آزمایشگاهی	ضریب تغییرات درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	ضریب تغییرات درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	ضریب تغییرات درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش
۱	۰,۰۸۱۱	۰,۰۸۱۷	۰,۰۱۸	۰,۰۱۶	۰,۰۱۷	۰,۰۱۷

خطا (MSE)، میانگین مربعات رگرسیون (MSR) بوجود می‌آیند. فرمول‌ها و روابط مربوط به محاسبه آماره F در جدول شماره ۸ و نتایج بررسی معادلات خطی رگرسیون ارائه شده در این پژوهش در جدول شماره ۱۰ آورده شده است.

به طوری که بیشتر تغییرات متغیر وابسته توسط مدل رگرسیون توصیف می‌شود. برای محاسبه واریانس از روی هر یک از مجموع مربعات کافی است حاصل را بر تعداد اعضایشان تقسیم کنیم. به این ترتیب مقادیر جدیدی به نام میانگین مربعات

جدول ۸. فرمول‌ها و روابط آماره F

منشاء تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F
رگرسیون	K-1	$SSR = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$MSR = \frac{SSR}{K-1}$	$F = \frac{MSR}{MSE}$
خطا	n-K	$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$	$MSE = \frac{SSE}{n-k}$	
کل	n-1			

SSR: مجموع مربعات تفاضل مقدارهای پیش‌بینی شده از میانگین

SSE: مجموع مربعات خطا

MSE: میانگین مربعات خطا

MSR: میانگین مربعات رگرسیون

K: تعداد پارامترهای مدل

n: تعداد متغیرهای مستقل

جدول ۹. جدول تابع احتمال متغیر تصادفی F

d1 \ d2	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۱۶۱.۴	۱۹۹.۵	۲۱۵.۷	۲۲۴.۶	۲۳۰.۲	۲۳۴	۲۳۶.۸	۲۳۸.۹	۲۴۰.۵	۲۴۱.۹
۲	۱۸.۵۱	۱۹	۱۹.۱۶	۱۹.۲۵	۱۹.۳	۱۹.۳۳	۱۹.۳۵	۱۹.۳۷	۱۹.۳۸	۱۹.۴
۳	۱۰.۱۳	۹.۵۵	۹.۳۸	۹.۱۲	۹.۰۱	۸.۹۴	۸.۸۹	۸.۸۵	۸.۸۱	۸.۷۹
۴	۷.۷۱	۶.۹۴	۶.۵۹	۶.۳۹	۶.۲۶	۶.۱۶	۶.۰۹	۶.۰۴	۶	۵.۹۶
۵	۶.۶۱	۵.۷۹	۵.۴۱	۵.۱۹	۵.۰۵	۴.۹۵	۴.۸۸	۴.۸۲	۴.۷۷	۴.۷۴
۶	۵.۹۹	۵.۱۴	۴.۷۶	۴.۵۳	۴.۳۹	۴.۲۸	۴.۲۱	۴.۱۵	۴.۱	۴.۰۶
۷	۵.۵۹	۴.۷۴	۴.۳۵	۴.۱۲	۳.۹۷	۳.۸۷	۳.۷۹	۳.۷۳	۳.۶۸	۳.۶۴
۸	۵.۳۲	۴.۴۶	۴.۰۷	۳.۸۴	۳.۶۹	۳.۵۸	۳.۵	۳.۴۴	۳.۳۹	۳.۳۵
۹	۵.۱۲	۴.۲۶	۳.۸۶	۳.۶۳	۳.۴۸	۳.۳۷	۳.۲۹	۳.۲۳	۳.۱۸	۳.۱۴
۱۰	۴.۹۶	۴.۱	۳.۷۱	۳.۴۸	۳.۳۳	۳.۲۲	۳.۱۴	۳.۰۷	۳.۰۲	۲.۹۸

جدول ۱۰. نتیجه محاسبات تحلیل واریانس مدل‌های رگرسیون خطی ارائه شده در پژوهش

مدل رگرسیون خطی رابطه بین قیر بهینه با وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی				
آماره F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منشاء تغییرات
۳۷,۵۴	۰,۰۴۱۳	۰,۰۴۱۳	۱	رگرسیون
	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۶۶	۶	خطا
	۵,۹۹	آماره F با احتمال وقوع ۰,۰۵ (مطابق جدول شماره ۹)		
مدل رگرسیون خطی رابطه بین قیر بهینه با تورق مصالح سنگی				
آماره F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منشاء تغییرات
۱۰۶,۲۰	۰,۰۴۶۰۲	۰,۰۴۶۰۲	۱	رگرسیون
	۰,۰۰۰۴۳	۰,۰۰۲۶	۶	خطا
	۵,۹۹	آماره F با احتمال وقوع ۰,۰۵ (مطابق جدول شماره ۹)		
مدل رگرسیون خطی رابطه بین قیر بهینه با هم‌ارز ماسه‌ای				
آماره F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منشاء تغییرات
۱۴۹,۳۰	۰,۰۴۶۷	۰,۰۴۶۷	۱	رگرسیون
	۰,۰۰۰۳۱۳	۰,۰۰۱۸۸	۶	خطا
	۵,۹۹	آماره F با احتمال وقوع ۰,۰۵ (مطابق جدول شماره ۹)		

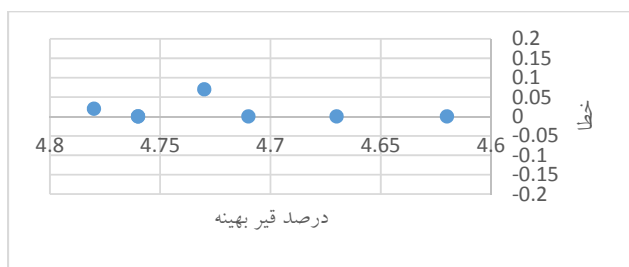
متغیر وابسته را در خود جای دهد. در نتیجه مدل مناسبی توسط روش رگرسیون ارائه شده است.

مقدار محاسبه شده برای F مطابق نتایج جدول شماره ۳ بزرگتر از مقدار جدول تابع احتمال متغیر تصادفی F بر اساس درجه آزادی است پس مدل رگرسیون توانسته است بیشتر تغییرات

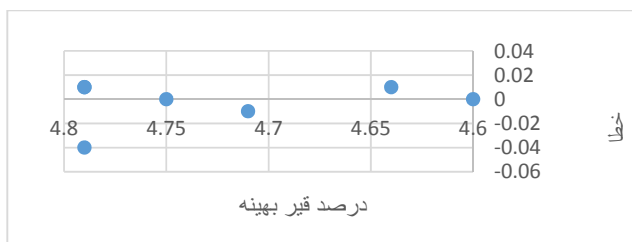
۲-۴- بررسی تصادفی بودن خطا در رگرسیون‌های خطی ارائه شده پژوهش

می‌توان رای به تصادفی بودن خطا داد. مقادیر متغیر وابسته واقعی و مقادیر متغیر وابسته به دست آمده از روابط پژوهش و خطای متناظر بین آنها در جدول شماره ۱۱ و نمودار آنها در شکل‌های شماره ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود هیچ الگوی خاصی وجود ندارد.

در مدل رگرسیون، خطا (اختلاف بین مقادیر متغیر وابسته واقعی با مقادیر متغیر وابسته به دست آمده از رابطه رگرسیون) باید تصادفی باشد، بطوری که اگر مقدارهای پیش بینی شده در محور افقی و خطای متناظر آن در محور عمودی یک نمودار ظاهر شوند اگر در این نمودار الگوی خاصی مشاهده نشود



شکل ۹. نمودار نقطه‌ای نمایش رابط بین مقادیر به دست آمده از رابطه بخش (۲-۳) و خطاها



شکل ۱۰. نمودار نقطه‌ای نمایش رابط بین مقادیر به دست آمده از رابطه بخش (۳-۳) و خطاها

جدول ۱۱. نتایج مقدار متغیرهای وابسته واقعی و متغیرهای وابسته به دست آمده از پژوهش

ردیف	مشخصه	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵	آزمایش ۶	آزمایش ۷	آزمایش ۸
۱	درصد قیر بهینه	۴٫۸	۴٫۸۵	۴٫۸	۴٫۶	۴٫۷۵	۴٫۷	۴٫۶۵	۴٫۷۵
۲	درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه بخش ۲-۳	۴٫۷۳	۴٫۸۸	۴٫۷۸	۴٫۶۲	۴٫۷۶	۴٫۷۱	۴٫۶۷	۴٫۷۶
۳	خطا (بین ردیف ۱ و ۲)	۰٫۰۷	-۰٫۰۳	۰٫۰۲	-۰٫۰۲	-۰٫۰۱	-۰٫۰۱	-۰٫۰۲	-۰٫۰۱
۴	درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه بخش ۳-۳	۴٫۷۹	۴٫۸۳	۴٫۷۹	۴٫۶۰	۴٫۷۵	۴٫۷۱	۴٫۶۴	۴٫۷۹
۵	خطا (بین ردیف ۱ و ۴)	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	-۰٫۰۱	۰٫۰۱	-۰٫۰۴
۶	درصد قیر بهینه محاسبه شده مطابق رابطه بخش ۴-۳	۴٫۸۰	۴٫۸۵	۴٫۸۰	۴٫۶۳	۴٫۷۴	۴٫۷۱	۴٫۶۳	۴٫۷۷
۷	خطا (بین ردیف ۱ و ۶)	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	-۰٫۰۳	۰٫۰۱	-۰٫۰۱	۰٫۰۲	-۰٫۰۲

۵- نتیجه گیری

-با افزایش به میزان ۰,۰۱ گرم /سانتی متر مکعب در وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی با درصد قیر بهینه ۲,۴۹ درصد در تورق مصالح سنگی ۰,۱ درصد تغییر در میزان قیر بهینه ایجاد می شود.

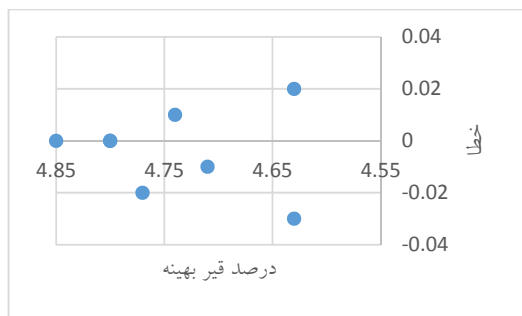
-میزان مصرف قیر در مخلوط های آسفالت گرم روسازی راهها از لحاظ اقتصادی بسیار مهم می باشد. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می دهد، می توان جهت کاهش میزان قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی گرم از مصالح سنگی با چگالی بالا، درصد تورق پایین و ارزش ماسه ای بیشتر استفاده کرد.

در این پژوهش مقادیر درصد تورق، هم ارز ماسه ای و وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی با درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی مقایسه گردید و نتایج زیر به دست آمد.

-درصد تورق مصالح سنگی با درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی نسبت مستقیم دارد و رابطه آنها یک تابع خطی با ضریب هم بستگی ۰,۹۴ می باشد.

-درصد هم ارز ماسه ای با درصد قیر بهینه نسبت عکس دارد و رابطه آنها یک تابع خطی با ضریب هم بستگی ۰,۹۶ می باشد.

-وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی با درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی نسبت عکس دارد و رابطه آنها یک تابع خطی با ضریب هم بستگی ۰,۸۶ می باشد.



شکل ۱۱. نمودار نقطه ای نمایش رابط بین مقادیر به دست آمده از رابطه بخش (۳-۴) و خطها

۶- مراجع

-رشیدیان، پیمان، کی منش، محمودرضا، ایوبی نژاد، جلال (۱۴۰۲). مقایسه درصد فضای خالی نمونه های مارشال با مغزه های گرفته شده از لایه آسفالتی اجرا شده. *پژوهشنامه حمل و نقل*، شماره ۷۵، ۲۱۰-۱۹۵.

-شمشیری، سیامک، سمیه، حسینی و عبدی، علی (۱۳۹۳). بررسی تاثیر نوع دانه بندی بر نتایج آزمایش مارشال مخلوط های بتن آسفالتی گرم. *ششمین همایش ملی قیر و آسفالت ایران*.

- طباطبایی، امیر محمد (۱۳۹۶). روسازی راه. مرکز نشر دانشگاهی.

- غنی زاده، علیرضا، حیدرآبادی زاده، نسرین و ضیایی، آرش (۱۴۰۰). مدل سازی عدد جریان مخلوط های آسفالتی با استفاده از روش رگرسیون چند جمله ای تکاملی. *پژوهشنامه حمل و نقل*. شماره ۶۸، ۲۸-۱۶.

- اسلامی شهر بابکی، پوریا، خبیری، محمد مهدی و خانی سانج، حامد (۱۳۹۷). آنالیز حساسیت و ارایه مدل ریاضی برای تعیین درصد قیر بهینه در آسفالت با استخوان بندی سنگ دانه ای. *فصلنامه علمی جاده*، شماره ۹۳، ۱۲-۱.

- امینی، فریناز، خبیری، محمد مهدی و نژاد کرکی، فرهاد (۱۴۰۰). کاهش آلودگی صوتی و تامین ایمنی رانندگان وسایل نقلیه با اصلاح شکل ودانه بندی مصالح سنگی رویه جاده. *فصلنامه علمی جاده*، شماره ۷۴، ۶۳-۷۴، ۱۰۸.

- چیت سازان، آذین (۱۴۰۲). ارزیابی آزمایشگاهی جایگزینی مصالح سنگی معمولی با مصالح خرده شیشه با رویکرد مقابله با آلودگی زیست محیطی. *پژوهشنامه حمل و نقل*، شماره ۷۶، ۴۹۹-۴۸۹.

- Chen, J., Wong, S., & Lin, K. (2005). Quantification of movements of flat and elongated particles in hot mix asphalt subject to wheel load test. *Mat. Structure* 38, 395–402.
- Kandhal, P.S., N.A.P. Association, and N.C.F.A. (1992). Technology, Moisture susceptibility of HMA mixes: identification of problem and recommended solutions. *National Asphalt Pavement*.
- Shiuhchen, J., Chang, M., & Lin, K. (2005). Influence of coarse aggregate shape on the strength of asphalt concrete mixtures. *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 1062–1075.
- Siswosoebrotho, B., Ginting, k., & Soedirdjo T. (2005). Work ability and resilient modulus of asphalt concrete mixtures containing flaky aggregates shape. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 1302–1312.
- Smith, B.J., Hesp,s., (2002). Crack pinning In Asphalt Mastic and concrete, Regular Fatigue studies. *Journal of Transportation Research Board*, Vol. 3, No. 1728, 75-81.
- گلچین، بابک، علیان، محمد و مشک آبادی، رامین (۱۴۰۲). بررسی اثر الیاف پارافیبر بر مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی گرم کارخانه‌ای و انتخاب یک ترکیب مناسب. *پژوهشنامه حمل و نقل*. شماره ۷۶، ۱۰۲-۸۵.
- معماریان، علی (۱۳۹۴). اثر مصالح سنگی استان تهران در قیر بهینه. *هفتمین همایش ملی قیر و آسفالت ایران*.
- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۰). آیین نامه روسازی راه های آسفالتی ایران. نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، موسسه قیر و آسفالت ایران، تجدید نظر اول.
- معاونت و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۲). مشخصات فنی عمومی راه. نشریه ۱۰۱ تجدید نظر دو.
- AASHTO T 166-16 (2016). Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens.
- ASTM D2041 - 03a - (2016). Standard Test Method For Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous paving Mixtures.

Investigating the Relationship between the Optimal Bitumen Amount of Warm Asphalt Mixture and the Technical Characteristics of Stone Materials (Case Study)

*Shahin Shabani, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.
Jalal Ayoubnejad, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran,
Iran.*

*Peyman Rashidian, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Payam Noor University
(PNU), Tehran, Iran.*

*Sajjad Kaffashzadeh, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Payam Noor University
(PNU), Tehran, Iran.*

E-mail: shabani@pnu.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

One of the important parameters in the asphalt mixture from the economic and technical point of view is the amount of bitumen consumption. On the other hand, the performance of asphalt concrete as one of the road pavement layers is strongly influenced by the quality of aggregates. Stone materials are one of the most important components of asphalt and concrete pavements, which include about 75 to 85% of the volume of hot asphalt. Physical, chemical and mechanical properties of these materials play an important role in pavement performance. In this article, the effect of ductility percentage, true specific weight of stone material mixture and sand value on the optimal bitumen content of hot binder asphalt mixture (0-19) mm from 8 selected mines in 8 different projects in Kerman Province. By comparing the results and analysis of stone materials tests, the optimal amount of bitumen in the asphalt mixture of each project it turned out. The relationship between the changes in the actual specific gravity of the mixture of stone materials and sand with changes in the amount of optimal bitumen has a reverse ratio, and the relationship between the changes in the ductility percentage of stone materials and the changes in the amount of optimal bitumen has a direct relationship. So it was observed that with a change of 0.01 g/cm³ in the specific weight of the stone material mixture, 3% in the equivalent of value sand and 2.49% in the ductility stone materials, 0.1% change in the amount of optimal bitumen is created. Therefore, using the results of this research, it can be concluded that in order to reduce the amount of bitumen consumed in hot asphalt mix, high density stone materials and low ductility percentage and higher sand value can be used.

Keywords: Sand Value, Ductility Percentage, Optimal Bitumen, Warm Asphalt Mix