

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی آزمایشگاهی تاثیر فیلر ضایعات زغال سنگ بر پدیده عریان شدگی
مخلوط‌های آسفالتی گرم

نگارنده: علیرضا داننده

استاد راهنما

دکتر حسین قاسم زاده

بهمن ۱۳۹۵

تقدیر و تشکر

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از استاد فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر حسین قاسم زاده به عنوان استاد راهنما که همواره اینجانب را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم.

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه تلاش های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند.

به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.

به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند.

به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه راهم بود.

بارالها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته ی آنان جامه ی عمل بپوشانم.

پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کهن سال عنایت بفرما.

با تشکر فراوان

تعهدنامه

اینجانب علیرضا داندنده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه استفاده از ضایعات زغال سنگ برای بهبود رفتار عریان شدگی قیر تحت راهنمایی دکتر حسین قاسم زاده به عنوان استاد راهنمای اول متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام << دانشگاه صنعتی شاهرود >> و یا << Shahrood University of Technology >> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

خرابی های ناشی از رطوبت شامل عریان شدگی و شن زدگی از جمله خرابی های شایع به ویژه در نقاط مرطوب و تحت شرایط یخبندان می باشد که موجب کاهش عمر روسازی می گردد. عملکرد روسازی آسفالتی به چسبندگی میان قیر و سنگدانه وابسته است لذا هنگامی که این چسبندگی از بین می رود، روسازی دچار اضمحلال و تخریب می شود. از آنجاییکه این خرابی در اثر رطوبت ایجاد شده و یا توسط رطوبت تشدید می شود، به آن آسیب دیدگی رطوبتی نیز می گویند. این آسیب منجر به کاهش سختی، کاهش مقاومت سازه ای لایه های روسازی راه، کاهش چسبندگی بین قیر - سنگدانه و یا کاهش مقاومت پیوستگی قیر می شود. در مورد چگونگی بروز عریان شدگی نمی توان تنها به اثر رطوبت بسنده کرد. گاهی حتی بدون حضور آب در اثر عوامل مختلفی همچون مصالح سنگی نامرغوب، نوع قیر، بارگذاری، شرایط اقلیمی و ... نیز این پدیده مشاهده شده است. لذا می توان از اثر آب به عنوان یک دلیل عمده عریان شدگی یاد نمود. برای بهبود مقاومت در برابر رطوبت، بسیاری از محققین نقش فیلر در افزایش چسبندگی قیر به سنگدانه و در نتیجه بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار داده اند در این تحقیق به کمک فیلر زغال سنگ ضایعاتی اقدام به ساخت نمونه های حاوی صفر، ۱۲/۵٪، ۲۵٪ و ۵۰٪ وزنی فیلر به جای پودر سنگ آهک شده است و عملکرد نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور تعیین مقاومت مخلوطها در برابر رطوبت و عریان شدگی از آزمایش های لاتمن اصلاح شده (AASHTO T283)، استقامت مارشال (ASTM D1075) و آب جوشان (ASTM D3625) استفاده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش درصد پودر زغال سنگ، نسبت مقاومت کششی و فشاری نمونه ها افزایش یافت. همچنین در آزمایش آب جوشان نیز افزایش درصد زغال سنگ باعث بهبود چسبندگی قیر و سنگدانه ها شد.

واژه های کلیدی: ضایعات زغال سنگ، فیلر، عریان شدگی، چسبندگی قیر و سنگدانه، لاتمن، مارشال

فهرست مطالب

فصل اول

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- ضرورت انجام تحقیق ۳
- ۳-۱- اهمیت تحقیق ۴
- ۴-۱- نوآوری ۴
- ۵-۱- ساختار تحقیق ۵

فصل دوم

- ۱-۲- مقدمه ۸
- ۲-۲- آزمایش‌های و استانداردهای مربوط به پدیده عریان شدگی ۱۱
- ۳-۲- مروری بر کارهای انجام شده ۱۵
- ۴-۲- کاربرد زغال سنگ در آسفالت ۳۸

فصل سوم

- ۱-۳- مقدمه ۴۲
- ۲-۳- مواد مصرفی ۴۲
- ۱-۲-۳- سنگ دانه ۴۲
- ۱-۱-۲-۳- دانه بندی مصالح سنگی ۴۳
- ۲-۱-۲-۳- آزمایش سایش لس آنجلس (ASTM-D131) ۴۵

- ۳-۲-۱-۳- آزمایش ارزش ماسه‌ای (ASTM-D2419) ۴۶
- ۳-۲-۱-۴- آزمایش تعیین وزن مخصوص و جذب آب درشت‌دانه (ASTM-C127) ۴۷
- ۳-۲-۱-۵- آزمایش تعیین وزن مخصوص و جذب آب ریزدانه (ASTM-C128) ۴۸
- ۳-۲-۱-۶- آزمایش درصد افت وزنی مصالح (دوام) ۴۹
- ۳-۲-۲- قیر مصرفی ۵۰
- ۳-۲-۱- آزمایش درجه نفوذ (ASTM-D5) ۵۰
- ۳-۲-۲- آزمایش نقطه نرمی (ASTM-D36) ۵۲
- ۳-۲-۳- فیلر مصرفی ۵۳
- ۳-۲-۱- فیلر آهکی ۵۴
- ۳-۲-۳- پودر زغال‌سنگ ضایعاتی ۵۴
- ۳-۳- طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها ۵۶
- ۳-۳-۱- آزمایش محاسبه درصد فضای خالی (رایس) (ASTM-D2041) ۶۲
- ۳-۳-۲- مقاومت فشاری و روانی مارشال ۶۵
- ۳-۴- آزمایش‌های ارزیابی جریان شدگی نمونه‌های آسفالتی ۶۶
- ۳-۴-۱- آزمایش استاندارد شده آب جوشان (ASTM-D3625) ۶۷
- ۳-۴-۲- آزمایش لاتمن اصلاح شده (ASTM-T283) ۶۸
- ۳-۴-۳- آزمایش استقامت مارشال (ASTM-D1075) ۶۹

فصل چهارم

- ۱-۴- مقدمه ۷۲
- ۱-۲-۴- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه‌های شاهد ۷۲
- ۲-۲-۴- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه‌های حاوی ۱۲.۵٪ پودر زغال سنگ ضایعاتی به‌عنوان فیلر ۷۵
- ۳-۲-۴- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه‌های حاوی ۲۵٪ پودر زغال سنگ ضایعاتی به‌عنوان فیلر .. ۷۸
- ۴-۲-۴- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر زغال سنگ ضایعاتی به‌عنوان فیلر .. ۸۱
- ۳-۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری مارشال ۸۴
- ۴-۴- نتایج آزمایش لاتمن اصلاح‌شده ۸۶
- ۵-۴- نتایج آزمایش استانداردشده آب جوشان ۸۸

فصل پنجم

- ۱-۵- مقدمه ۹۲
- ۲-۵- تحلیل نتایج ۹۲
- ۳-۵- مقایسه و بررسی نتایج دو آزمون MSR و TSR ۹۴
- ۴-۵- پیشنهاد ادامه تحقیق ۹۴
- منابع ۹۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- دستگاه آزمایش مسیر چرخ هامبورگ (HWTT)(۷) ۱۳
- شکل ۲-۲- نمونه‌هایی از خرابی‌های ناشی از عریان شدگی ۱۶
- شکل ۳-۲- توضیح مکانیزم حساسیت رطوبتی (۱۲) ۱۸
- شکل ۴-۲- دانه‌بندی مصالح سنگی (۱۶) ۲۵
- شکل ۵-۲- مقاومت مارشال در نمونه‌های ساخته‌شده با فیلر معمولی (۲۰) ۳۴
- شکل ۶-۲- مقاومت مارشال نمونه‌های ساخته‌شده با فیلر سیمان (۲۰) ۳۴
- شکل ۷-۲- مقاومت مارشال نمونه‌های ساخته‌شده با آهک هیدراته (۲۰) ۳۵
- شکل ۸-۲- مقاومت مارشال نمونه‌های ساخته‌شده با محلول ضد عریان شدگی و فیلر معمولی (۲۰) ۳۵
- شکل ۹-۲- مقایسه تاثیر افزودنی‌های مختلف در مقاومت عریان شدگی مخلوط آسفالتی (۲۰) ۳۶
- شکل ۱۰-۲- دانه‌بندی مصالح سنگی (۴) ۳۸
- شکل ۱۱-۲- مقایسه MSR و TSR در ۳ فیلر موجود (۴) ۴۰
- شکل ۱-۳- سنگ‌دانه‌های مصرفی ۴۲
- شکل ۲-۳- منحنی دانه‌بندی ۴۴
- شکل ۳-۳- توزین قیر (۲۲) ۵۸
- شکل ۴-۳- دستگاه مخلوط‌کن (۲۲) ۵۹
- شکل ۵-۳- ریختن مصالح آغشته به قیر در قالب (۲۲) ۶۰
- شکل ۶-۳- چکش مارشال (۲۲) ۶۱
- شکل ۷-۳- نمونه متراکم نشده داخل ارلن ۶۳
- شکل ۸-۳- نمونه‌ها داخل حمام آب ۶۵

- شکل ۳-۹- آزمایش آب جوشان (۸) ۶۷
- شکل ۳-۱۰- میزان پوشش قیری مصالح سنگی بعد از آزمایش (۸) ۶۸
- شکل ۳-۱۱- اندازه‌گیری مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه (۹) ۶۹
- شکل ۳-۱۲- دستگاه مقاومت مارشال (۲۲) ۷۰
- شکل ۴-۱- نمودار درصد وزنی قیر-مقاومت مارشال ۷۴
- شکل ۴-۲- نمودار درصد وزنی قیر- روانی ۷۴
- شکل ۴-۳- نمودار درصد وزنی قیر- وزن مخصوص آسفالت ۷۴
- شکل ۴-۴- نمودار درصد وزنی قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی ۷۵
- شکل ۴-۵- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه ۷۵
- شکل ۴-۶- نمودار درصد قیر- مقاومت مارشال ۷۷
- شکل ۴-۷- نمودار درصد قیر- روانی ۷۷
- شکل ۴-۸- نمودار درصد قیر- وزن مخصوص آسفالت ۷۷
- شکل ۴-۹- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی ۷۸
- شکل ۴-۱۰- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه ۷۸
- شکل ۴-۱۱- نمودار درصد قیر- مقاومت مارشال ۸۰
- شکل ۴-۱۲- نمودار درصد قیر- روانی ۸۰
- شکل ۴-۱۳- نمودار درصد قیر- وزن مخصوص ۸۰
- شکل ۴-۱۴- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی ۸۱
- شکل ۴-۱۵- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه ۸۱
- شکل ۴-۱۶- نمودار درصد قیر- مقاومت مارشال ۸۳

- شکل ۴-۱۷- نمودار درصد قیر- روانی ۸۳
- شکل ۴-۱۸- نمودار درصد قیر- وزن مخصوص آسفالت ۸۳
- شکل ۴-۱۹- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی ۸۴
- شکل ۴-۲۰- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه ۸۴
- شکل ۴-۲۱- نتایج MSR ۸۶
- شکل ۴-۲۲- نتایج TSR ۸۷
- شکل ۴-۲۳- نتایج آزمایش آب جوشان ۸۸
- شکل ۴-۲۴- مقایسه نسبت مقاومت کششی و فشاری ۸۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ عوامل موثر در خرابی رطوبتی روسازی‌های آسفالتی ۱۰
- جدول ۲-۲- خلاصه آزمایش‌های مربوط به پدیده عریان شدگی ۱۵
- جدول ۳-۲- خلاصه نظریه‌های مورد استفاده برای توضیح پدیده عریان شدگی (۱۱) ۱۷
- جدول ۴-۲- مشخصات قیر خالص اولیه (۱۵) ۲۳
- جدول ۵-۲- دانه‌بندی مصالح آهکی (۱۵) ۲۳
- جدول ۶-۲- دانه‌بندی مصالح مخلوط بازالتی-آهکی (۱۵) ۲۴
- جدول ۷-۲- مشخصات فیزیکی قیر (۱۸) ۲۸
- جدول ۸-۲- دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در مخلوط آسفالت (۱۸) ۲۸
- جدول ۹-۲- طرح اختلاط نهایی نمونه‌ها (۱۸) ۲۹
- جدول ۱۰-۲- دانه‌بندی مصالح سنگی مصرفی (۱۹) ۳۱
- جدول ۱۱-۲- دانه‌بندی مصالح مصرفی (۲۰) ۳۲
- جدول ۱۲-۲- وزن مخصوص فیلرهای مصرفی (۲۰) ۳۳
- جدول ۱۳-۲- نتایج آزمایش‌های قیر مصرفی (۲۰) ۳۳
- جدول ۱۴-۲- خلاصه مقالات بررسی شده ۳۶
- جدول ۱۵-۲- مشخصات قیر مصرفی (۴) ۳۹
- جدول ۱-۳- مشخصات مصالح سنگی ۴۳
- جدول ۲-۳- دانه‌بندی مصالح سنگی ۴۴
- جدول ۳-۳- دانه‌بندی‌های انتخابی ۴۵

- جدول ۳-۴- انتخاب تعداد گلوله‌ها برحسب دانه‌بندی ۴۵
- جدول ۳-۵- مشخصات فیزیکی قیر مصرفی ۵۰
- جدول ۳-۶- آنالیز شیمیایی (Coal-Waste Powder) CWP ۵۶
- جدول ۴-۱- مشخصات نمونه‌های شاهد ۷۲
- جدول ۴-۲- مشخصات نمونه‌های حاوی ۱۲/۵٪ افزودنی ضایعات ۷۶
- جدول ۴-۳- مشخصات نمونه‌های حاوی ۲۵٪ افزودنی ضایعات ۷۹
- جدول ۴-۴- مشخصات نمونه‌های حاوی ۵۰٪ افزودنی ضایعات ۸۲
- جدول ۴-۵- حساسیت رطوبتی نمونه‌های شاهد ۸۵
- جدول ۴-۶- حساسیت رطوبتی نمونه‌های ۱۲.۵٪ ضایعات زغال سنگ ۸۵
- جدول ۴-۷- حساسیت رطوبتی نمونه‌های ۲۵٪ ضایعات زغال سنگ ۸۵
- جدول ۴-۸- حساسیت رطوبتی نمونه‌های ۵۰٪ ضایعات زغال سنگ ۸۶
- جدول ۴-۹- نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده ۸۷
- جدول ۴-۱۰- نتایج آزمایش آب جوشان ۸۸

فصل اول

معرفی پژوهش

در سالهای اخیر افزایش حجم ترافیک و بارهای محوری ناشی از فشار لاستیک وسایل نقلیه عامل بسیار مهمی در بحث افزایش هزینه‌های نگهداری و مرمت روسازی راه بوده است. یکی از خرابی‌های شایع روسازی، خرابی‌های ناشی از رطوبت است که شامل عریان شدگی و شن زدگی می‌شود. عریان شدگی، یکی از عمده‌ترین خرابی‌هایی است که در مخلوط‌های آسفالتی پدیدار می‌شود. از آنجایی که این خرابی در اثر رطوبت ایجاد شده و یا توسط رطوبت تشدید می‌شود، به آن آسیب‌دیدگی رطوبتی نیز می‌گویند. این آسیب منجر به کاهش سختی، مقاومت سازه‌ای لایه‌های روسازی و کاهش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه شده و سرانجام به تخریب ساختمان راه منتهی می‌شود. در مورد چگونگی بروز عریان شدگی نمی‌توان تنها به اثر رطوبت بسنده نمود. گاهی حتی بدون حضور آب در اثر عواملی همچون مصالح سنگی نامناسب و نامرغوب، نوع قیر، اثر تراکم نامناسب، وجود گردوغبار روی سنگ‌دانه‌ها، درصد فضای خالی، نوع ترافیک، شرایط اقلیمی و ... این پدیده مشاهده شده است. لذا می‌توان از اثر آب به‌عنوان یک دلیل عمده برای عریان شدگی یاد نمود [۱]. یکی از مهمترین عواملی که برای جلوگیری از بروز پدیده عریان شدگی باید انجام داد اختلاط مناسب مصالح سنگی و قیر است. مصالح سنگی لایه‌های آسفالت باید قادر باشند که قیر را به‌خوبی به خود جذب کنند تا عمل چسبیدن سنگ‌دانه‌ها به یکدیگر به‌خوبی انجام شود. هراندازه اندود قیری به سنگ‌دانه‌ها بهتر بچسبد، سازه روسازی پایدارتر شده و استقامت و دوام مخلوط افزایش می‌یابد. استفاده از انواع مصالح سنگی در روسازی‌ها نشان داده است که سنگ‌های آهکی به‌خوبی قیر را جذب کرده و به خاطر دارا بودن بار الکتریکی سطحی مثبت در مجاورت آب نیز نسبتاً پایدار است و به سنگ‌های آب‌گریز موسوم‌اند. در مقابل سنگ‌های اسیدی، اندود قیری را در سطح خود نگه نداشته و به دلیل دارا بودن بار الکتریکی سطحی منفی به سنگ‌های آب‌دوست معروف‌اند. تشخیص نوع بار سطحی سنگ‌دانه‌ها بسیار مهم است. برای مثال در صورت به‌کارگیری امولسیون‌های قیری در تهیه مخلوط، می‌توان از قیرهای کاتیونیک (+) برای سنگ‌های اسیدی و از قیرهای آنیونیک (-) برای سنگ‌های آهکی استفاده کرد.

باید توجه داشت علاوه بر ترکیب شیمیایی همان گونه که در بالا ذکر گردید جنس سنگدانه‌ها و ویژگی‌های قیر تأثیر زیادی در عملکرد مخلوط آسفالتی به‌ویژه در شرایط مرطوب دارد. یکی دیگر از عوامل مهم و مؤثر در بهبود مقاومت در برابر رطوبت، فیلر است که نقش اساسی در افزایش چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها، قفل و بست بین دانه‌ها و پر کردن فضای خالی دارد. علاوه بر این فیلر می‌تواند بر روانی، سختی، دوام، عمر خستگی و شیار شدگی مخلوط آسفالتی نیز تأثیرگذار باشد [۲]. به‌طور کلی فیلر به مصالحی اطلاق می‌شود که از الک شماره ۲۰۰ عبور می‌کند و باید عاری از مواد رسی و آلی باشد. دانه‌بندی فیلر طبق آیین‌نامه سازمان برنامه و آیین‌نامه‌های ASTM و انیستیتو آسفالت است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، فیلر به دو صورت مکانیکی و فیزیکی - شیمیایی می‌تواند باعث بهبود چسبندگی قیر - سنگدانه شود. از نقطه‌نظر مکانیکی، فیلر باعث افزایش کندروانی قیر می‌شود و قیر با کندروانی بزرگ‌تر، چسبندگی بیشتری به سنگدانه دارد. از نقطه‌نظر فیزیکی - شیمیایی نیز برخی فیلرها واکنش‌های شیمیایی شدید و مؤثری در سطح تماس قیر - سنگدانه ایجاد می‌کنند که موجب افزایش چسبندگی قیر و سنگدانه می‌گردند [۳].

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

همان‌طور که از بخش قبل می‌توان نتیجه گرفت انتخاب فیلر مناسب در مخلوط‌های آسفالتی بسیار ضروری است. به علت کاهش منابع طبیعی، افزایش روزافزون فعالیت‌های عمرانی و راه‌سازی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی و جنبه‌های زیست‌محیطی، محققین به دنبال پیدا کردن جایگزینی مناسب برای مصالح مصرفی در ساخت جاده‌ها می‌باشند. همچنین علاوه بر مواد ضایعاتی به‌دست‌آمده از پروژه‌های ساختمانی، ضایعات و مواد پسماند به‌دست‌آمده از کارخانه‌های صنعتی و معادن باعث افزایش نیاز به محل دپوی مواد پسماند شده است. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از مواد پسماند در ساخت راه‌ها توسط سازمان‌های مرتبط با محیط‌زیست و راه انجام‌شده است. در تحقیقات اخیر، استفاده از آهک ضایعاتی بازیافتی، فیلر ضایعاتی فسفات، خاکستر زباله‌های جامد شهری سوزانده شده و مواد سرامیکی ضایعاتی به‌عنوان فیلر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در این بین

زغال سنگ یکی از رایج ترین منابع تولید انرژی است که حجم تولید آن در جهان حدود ۵/۵ میلیارد تن در سال و در ایران تقریباً ۳۰۰ میلیون تن در سال است. پس از بهره روی از آن ها به مقاصد گوناگون، حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد از آن ها به صورت باطله دفن یا دپو می شود. در حال حاضر میلیون ها تن زغال سنگ ضایعاتی به صورت دپو شده در کشور موجود است. به نظر می رسد یکی از راه های رهایی از معضل دپوی این مصالح، استفاده از آن ها در صنعت ساخت و ساز به ویژه راه سازی باشد. فرآوری زغال سنگ شامل فرآیندهای فیزیکی است که با مرتب کردن دانه بندی و کاهش مواد معدنی موجود در آن، مانند خاکستر و گوگرد، موجب بهبود کیفیت آن می شود. مهم ترین عملیاتی که روی زغال سنگ صورت می گیرد شامل غربالگری، شستشو، خرد کردن و جداسازی مواد مایع و جامد یا آبگیری است. البته آماده سازی زغال سنگ فراتر از این موارد است و دارای عملیاتی پیچیده است که باعث می شود بخشی از زغال سنگ که برای استفاده مناسب نیست به عنوان ضایعات جداسازی شود و به صورت باطله در محلی در نزدیکی معدن دپو می شود.

۱-۳- اهمیت تحقیق

علاوه بر دلایل زیست محیطی ذکر شده در بخش قبل، انتظار می رود پودر زغال سنگ ضایعاتی با داشتن خاصیت پوزولانی و با دارا بودن سیلیس و آلومینا بتواند باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی شود. همچنین استفاده از آن ها از نظر هزینه بسیار ناچیز یا حتی رایگان است [۴]. در مشاهدات تجربی نیز این ضایعات پس از بارندگی به ظاهر چسبندگی مناسبی را با سنگ های اطراف خود ایجاد می کنند. هدف از تحقیق حاضر نیز، ارزیابی تأثیر فیلر زغال سنگ ضایعاتی بر پدیده عریان شدگی مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی در مقادیر مختلف است.

۱-۴- نوآوری

با مروری بر کارهای انجام گرفته تاکنون، تقریباً می توان گفت که تاکنون تحقیق جامعی در زمینه بررسی تأثیر ضایعات زغال سنگ بر پدیده عریان شدگی انجام نشده است.

۱-۵- ساختار تحقیق

این پایان‌نامه در ۵ فصل تهیه شده است. در فصل دوم ابتدا به معرفی آزمایش‌ها و استانداردهای مرتبط با پدیده عریان شدگی پرداخته می‌شود و در ادامه نگاهی گذرا به بیشینه مطالعاتی در این زمینه خواهیم داشت. سرانجام در بخش آخر نیز به بررسی مقالاتی که در آن‌ها از زغال سنگ به عنوان افزودنی در آسفالت استفاده شده است می‌پردازیم.

در فصل سوم مراحل و روند انجام پژوهش شرح داده می‌شود. در ابتدا به بررسی مشخصات و ویژگی‌های مصالح مصرفی از جمله سنگ‌دانه‌ها، قیر، فیلر آهکی و ضایعات پرداخته می‌شود و آزمایش‌های هر کدام به تفکیک بیان می‌شود. در بخش بعدی نحوه ساخت نمونه‌های آسفالتی به روش مارشال توضیح داده می‌شود و آزمایش‌های مربوط به هر پارامتر آسفالت ذکر می‌شود. در بخش انتهایی نیز سه استاندارد که در بررسی پدیده عریان شدگی در این پژوهش به کار رفته‌اند شرح داده می‌شوند.

در فصل چهارم در بخش اول نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی به منظور یافتن درصد قیر مناسب، بیان می‌شود. در ادامه با یافتن درصد قیر مناسب برای هر گروه، نتایج حاصل از سه آزمایش مقاومت فشاری مارشال، لاتمن اصلاح شده و آب جوشان ذکر شده و در نهایت به بررسی و مقایسه نتایج با یکدیگر پرداخته می‌شود.

و سرانجام در فصل پنجم و پایانی به تحلیل نتایج به دست آمده در فصل چهارم و نتیجه‌گیری کلی در مورد تأثیرات ضایعات زغال سنگ در آسفالت پرداخته می‌شود.

فصل دوم

ادبیات پژوهش

در این فصل ابتدا بیشینه پدیده عریان شدگی به اجمال معرفی می شود. سپس به آزمایش‌های و استانداردهای مربوط به این پدیده پرداخته می‌شود. از جمله آزمایش‌های مرتبط می‌توان به آزمایش چرخ هامبورگ، آزمایش آب جوشان و آزمایش لاتمن اصلاح‌شده اشاره کرد که در این بین، آزمایش چرخ هامبورگ به این دلیل که به‌طور مستقیم مکانیسم عریان شدگی را بررسی نمی‌کند، رواج کمتری دارد. در ادامه فصل به بررسی اجمالی آزمایش‌های و مقالات مرتبط با اثرات تخریبی عریان شدگی پرداخته و در بخش پایانی فصل به روش‌های اصلاحی و افزودنی‌هایی اشاره می‌شود که منجر به افزایش مقاومت مخلوط در برابر عریان شدگی می‌گردد.

عریان شدگی یکی از خرابی‌های اصلی روسازی آسفالتی است که به دلیل نفوذ آب بین قیر و مصالح سنگی به وجود می‌آید. نیروی نفوذ آب به درون مخلوط قیر و مصالح سنگی، روسازی را خراب می‌کند. آب می‌تواند در منافذ مصالح سنگی وجود داشته باشد و یا اینکه از طریق تراوش به درون ترک‌های مخلوط آسفالتی ظاهر شود. آب بانفوذ در سرتاسر قشر قیر و پس از رسیدن به سطح تماس قیر و مصالح سنگی و نقاط فعال موجود در سطح مصالح سنگی، پیوند بین قیر و مصالح سنگی را تضعیف می‌کند. مکانیزم‌های مختلفی به شرح زیر برای خرابی عریان شدگی وجود دارد.

تفکیک : جدا شدن قیر از سطح سنگ‌دانه توسط آب بدون گسیختگی قشر قیر

جایگزینی : ورود قیر به سطح سنگ‌دانه‌ها به دلیل پوشش قیری کم روی مصالح

آب‌دار شدن قیر : تشکیل امولسیون درون قیر و از بین رفتن چسبندگی قیر به مصالح. رنگ قهوه‌ای قیر در آسفالت عریان شده و تشکیل لایه نازک قیر غوطه‌ور در آب، نشانه امولسیون شدن آب در قیر است.

فشار منفذی : وجود آب درون آسفالت منجر به ایجاد فشار منفذی تحت بار ترافیک می‌گردد که باعث گسستن قیر از سطح سنگ‌دانه‌ها و رشد ترک‌های ریز درون ملات قیر می‌شود. عریان شدگی آسفالت

در اثر فشار منفذی، در سطح مرز بین لایه‌ها اتفاق می‌افتد. معمولاً ابتدا لایه بیندر متلاشی شده و سپس لایه سطحی هم تجزیه می‌شود.

آب شستگی : این فرآیند در سطح روسازی اشباع از آب در اثر عبور چرخ روی می‌دهد. آب در زیر چرخ به درون لایه آسفالتی مکیده می‌شود و یک گرادیان فشار منفذی ایجاد می‌کند که در حضور نمک‌ها در منافذ مصالح سنگی تراوش می‌کند و باعث کنده شدن قیر در اثر آب می‌شود.

عریان شدگی معمولاً از پایین روسازی‌های آسفالتی گرم شروع شده و به سمت بالا حرکت می‌کند. برای تشخیص عریان شدگی لازم است که مغزه آسفالتی تهیه‌شده و موردبررسی قرار گیرد. در برخی از موارد عریان شدگی، پیوستگی و چسبندگی قیر و مصالح سنگی به حدی تضعیف می‌شود که مغزه را نمی‌توان به‌صورت سالم درآورد. به‌طورکلی عوامل مؤثر در خرابی رطوبتی را می‌توان در جدول زیر خلاصه کرد.

جدول ۱-۲ عوامل موثر در خرابی رطوبتی روسازی های آسفالتی

ردیف	عامل
۱	مصالح سنگی از جنس سیلیسی
۲	مصالح سنگی آلوده به گردوغبار
۳	وجود ذرات رس در سطح سنگدانه‌ها
۴	قیرها با خاصیت اسیدی بالا
۵	طراحی آسفالت با قیر بهینه کم و دانه بندی باز
۶	تراکم کم و فضای خالی زیاد
۷	زهکشی نامناسب
۸	وجود بخار آب بین لایه های روسازی

در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی، شمار زیادی از روسازی‌ها در آمریکا فرسودگی ناشی از حساسیت رطوبتی را تجربه کردند. خرابی‌های زیادی از جمله شیار شدگی، شن زدگی و ترک در بسیاری از روسازی‌ها مشاهده می‌شد. یکی از مهم‌ترین دلایل این اتفاق، این بود که حساسیت نسبت به رطوبت در مخلوط آسفالتی به خوبی پیش‌بینی نشده بود. صرف‌نظر از علت بروز این خرابی ناگهانی ناشی از رطوبت، آزمایش‌های و روش‌هایی نیاز بود که به کمک آن‌ها بتوان رفتار مخلوط آسفالتی گرم را در حضور رطوبت شناسایی کرد. نتیجه چندین سال تحقیق و بررسی، یافتن استانداردها و آزمایش‌هایی مانند آب جوشان، لاتمن، لاتمن اصلاح‌شده (کشش غیرمستقیم)، استقامت مارشال، فشاری غرقاب و مسیر چرخ هامبورگ بود. از میان این آزمون‌ها، آزمون لاتمن اصلاح‌شده و آب جوشان از فراوانی و محبوبیت بسیاری در میان سایر روش‌ها برخوردارند [۵].

۲-۲- آزمایش‌های و استانداردهای مربوط به پدیده عریان شدگی

تاکنون روش‌های زیادی برای ارزیابی فاکتورهای تأثیرگذار بر چسبندگی قیر و سنگ‌دانه ارائه شده است. آزمایش‌های ارزیابی پتانسیل عریان شدگی مصالح سنگی در مخلوط‌های آسفالتی به دو دسته تقسیم می‌شوند :

۱. آزمایش‌های بصری

که در این آزمایش‌های میزان عریان شدگی تخمین زده شده و زمان شکست مخلوط‌های آسفالتی در حالات مختلف در حضور آب در نظر گرفته می‌شود.

۲. آزمایش‌های مکانیکی

شامل آزمایش‌هایی است که تغییر در خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی را در حضور آب و در شرایط مختلف اندازه‌گیری می‌کنند.

توسعه آزمایش‌های تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از سال ۱۹۳۰ آغاز شده و تاکنون روش‌های زیادی برای ارزیابی فاکتورهای تأثیرگذار بر چسبندگی قیر و سنگ‌دانه ارائه شده است. از این جمله آزمایش شیار شدگی مسیر چرخ هامبورگ را می‌توان نام برد. البته به دلیل هزینه‌بر بودن و زمان‌بر بودن، معمولاً از این آزمایش برای تعیین مکانیزم خرابی ناشی از رطوبت استفاده می‌شود. این آزمایش به شرایط اجرا، تطابق با شرایط محلی، زمان و چگونگی نفوذ رطوبت در محل بسیار وابسته است و لذا کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. از دیگر آزمایش‌های متداول برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌توان به آزمایش‌های آب جوشان، غوطه‌وری استاتیک، لاتمن و لاتمن اصلاح‌شده اشاره نمود. در این میان آزمایش‌های لاتمن اصلاح‌شده و آب جوشان به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین آزمایش‌های می‌باشند. در ادامه توضیح مختصری در مورد این آزمایش‌ها داده می‌شود.

• آزمایش مسیر چرخ هامبورگ (HWTT)

این آزمایش تحت استاندارد AASHTO-T324 است. نمونه‌های مخلوط آسفالتی در اشکال استوانه یا مسطح (دال) قابل استفاده‌اند. نمونه‌های استوانه‌ای دارای قطر ۶ اینچ و ارتفاع ۲/۵ اینچ می‌باشند. نمونه‌های مسطح نیز دارای طول ۱۲/۶ اینچ، عرض ۱۰/۲ اینچ و ضخامت متغیر بین ۳/۲ - ۱/۶ اینچ می‌باشند. نمونه‌ها به گونه‌ای متراکم می‌شوند که فضای خالی موجود بین ۸ - ۶٪ باشد. سپس نمونه‌ها را در حمام آب ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌دهند. روش آزمایش بدین صورت است که یک جفت چرخ فولادی به کمک دستگاه LVDT با دقت ۰/۱ میلی‌متر (۰/۰۰۴ اینچ) بر روی سطح نمونه‌های آسفالت چرخانده می‌شوند. چرخ‌های فولادی دارای قطر ۸ اینچ و عرض ۱۱/۸۵ اینچ می‌باشند و توانایی گذراندن ۵۵ - ۵۱ چرخش در هر دقیقه را دارند. وزن هر چرخ ۱۵۸ پوند است. در ۲ حالت دستگاه آزمایش به‌طور خودکار آزمایش را تمام می‌کند. یا به تعداد از پیش تعیین شده چرخش چرخ‌های فولادی برسیم و یا عمق شیار شدگی به میزان ۰/۸ اینچ رسیده باشد، هر کدام که زودتر اتفاق بیفتد. به‌طور معمول تعداد ۲۰۰۰۰ چرخش را برای چرخ‌ها در نظر می‌گیرند. مدت زمان انجام آزمایش در حدود ۷ ساعت است. البته گاهی اوقات نمونه‌ها سریع‌تر به شکست رسیده و آزمایش مدت زمان کمتری می‌گیرد. پارامترهای خروجی به کمک رسم منحنی عمق شیار شدگی - تعداد چرخش به دست می‌آیند [۷]. در تصویر ۱-۲ دستگاه آزمایش را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱-۲- دستگاه آزمایش مسیر چرخ هامبورگ (HWTT) (۷)

• آزمایش استاندارد شده آب جوشان (ASTM-D3625)

از این آزمایش برای ارزیابی مخلوط آسفالتی نامتراکم استفاده می‌شود. در این آزمایش، مصالح سنگی و قیر در دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد مخلوط شده و در دمای اتاق قرار می‌گیرد. سپس ۲۵۰ گرم از آن در آب جوش به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفته و پس از آن مخلوط را خشک کرده و به صورت چشمی درصدی از سطح مصالح سنگی که با قیر پوشانده شده است برآورد می‌شود. مبنای محک نمونه‌ها در عمل، پوشش ۹۵٪ است. این روش فقط یک ارزیابی مقدماتی برای برهنگی بوده و هیچ بررسی مقاومتی صورت نمی‌گیرد. لازم به ذکر است تعیین میزان عریان شدگی مصالح با این روش مشکل است [۸].

• آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO-T283)

روش آزمایش به این صورت است که ابتدا ۶ نمونه با درصد فضای خالی ۶ - ۸٪ ساخته می‌شوند و در ادامه نمونه‌ها را به روش مارشال متراکم کرده و در ۲ گروه ۳ تایی خشک و اشباع تقسیم می‌شوند. نمونه‌های خشک توسط پلاستیک پوشانده شده و پس از گذراندن ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه

سانتی‌گراد، مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. نمونه‌های دیگر داخل دستگاه خلأ به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه تحت فشار ۶۷-۱۳ KPa قرار گرفته و پس از گذراندن این مدت به گونه‌ای اشباع می‌شوند که درجه اشباع آن‌ها بین ۸۰-۵۵٪ (AASHTO T283-99) و یا بین ۸۰-۷۰٪ (AASHTO T283-03) شود. پس از آن نمونه‌ها توسط سلفون پوشانده شده و تحت یک چرخه ذوب - یخبندان قرار می‌گیرند به این ترتیب که به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. در پایان نمونه‌های اشباع به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس در دمای اتاق تحت نرخ بارگذاری ۵۵ میلی‌متر بر دقیقه مقاومت کششی این نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری می‌شود. نتیجه آزمایش (TSR^۱) از تقسیم مقاومت کششی نمونه‌های اشباع به مقاومت کششی نمونه‌های خشک به دست می‌آید [۹].

• آزمایش نسبت مقاومت مارشال (ASTM-D1075)

برای ارزیابی حساسیت رطوبتی در روش مارشال (MSR^۲) باید نسبت متوسط مقاومت ۳ نمونه آزمایشگاهی مارشال که ۲۴ ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته (M_S) به متوسط مقاومت ۳ نمونه دیگر که ۳۰ دقیقه در داخل آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته (M_d) محاسبه شود. بر اساس دستورالعمل موجود، مقدار نسبت فوق نباید از ۰/۷۵ کمتر باشد [۱۰].

در انتها خلاصه آزمایش‌های شرح داده شده را در جدول زیر مرور می‌شود.

¹Tensile Strength Ratio

² Marshall Stability Ratio

جدول ۲-۲- خلاصه آزمایش‌های مربوط به پدیده عریان شدگی

نام آزمایش	استاندارد	نوع آزمایش	خلاصه آزمایش
آب جوشان	ASTM-D3625	بصری	۲۵۰ گرم از مخلوط نامتراکم به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوش قرار داده می‌شود.
لاتمن اصلاح شده	AASHTO-T283	مکانیکی	۶ نمونه در ۲ گروه خشک و اشباع ساخته و پس از گذراندن شرایط آزمایشگاهی، نتیجه به صورت نسبت مقاومت کششی نمونه‌های اشباع به خشک بیان می‌شود.
نسبت مارشال	ASTM-D1075	مکانیکی	به صورت نسبت مقاومت فشاری ۳ نمونه مستغرق در آب به مدت ۲۴ ساعت به مقاومت فشاری ۳ نمونه مستغرق در آب به مدت ۳۰ دقیقه
مسیر چرخ هامبورگ	AASHTO-T324	مکانیکی	محاسبه عمق شیار شدگی نمونه بعد از گذراندن حدود ۲۰۰۰۰ چرخش لاستیک

۲-۳- مروری بر کارهای انجام شده

نظریه‌های گوناگونی در مورد توصیف پدیده عریان شدگی بیان شده است. این تئوری‌ها به‌طور کلی بیانگر این هستند که آسیب رطوبتی در حضور آب و فشار منفذی رخ می‌دهد و ویژگی‌های سنگ‌دانه و قیر بر آن تأثیرگذار است. مهندسين راه از این واقعیت که آسیب رطوبتی تحت تأثیر ویژگی‌های سنگ‌دانه و قیر در حضور آب است مطلع می‌باشند. آن‌ها به دنبال تکنیک‌های خاصی به‌منظور تشخیص شروع آسیب رطوبتی در روسازی و جلوگیری از دخالت آب در پیوند قیر - سنگ‌دانه

می‌باشند. در تصاویر زیر نمونه‌هایی از پدیده عریان شدگی را به صورت دانه‌دانه شدن مصالح سنگی و ایجاد ترک مشاهده می‌کنید



شکل ۲-۲- نمونه‌هایی از خرابی‌های ناشی از عریان شدگی

در جدول زیر خلاصه‌ای از تئوری‌هایی که محققین با آن تئوری‌ها پدیده عریان شدگی را توصیف کرده‌اند بیان شده است [۱۱].

جدول ۲-۳- خلاصه نظریه‌های مورد استفاده برای توضیح پدیده عریان شدگی (۱۱)

نظریه	اصول کلی	تحقیقات انجام شده
نظریه زاویه تماسی و نظریه چسبندگی مکانیکی	به دلیل اینکه زاویه تماسی آب از زاویه تماسی قیر کمتر است، قیر از سنگدانه جدا می‌شود.	تیلور ^۱ و خسلا ^۲ (۱۹۸۳)، استوارت ^۳ (۱۹۹۰) و هیکس ^۴ و همکاران (۱۹۹۱)
نظریه انرژی سطحی یا آرایش مولکولی	به دلیل اینکه انرژی سطحی آب از انرژی سطحی قیر کمتر است، قیر از سنگدانه جدا می‌شود.	تیلور و خسلا (۱۹۸۳)، استوارت (۱۹۹۰) و هیکس و همکاران (۱۹۹۱)
نظریه واکنش شیمیایی	تغییر میزان PH آب اطراف سنگدانه‌ها بر آب‌های میکروسکوپی موجود بر سطح سنگدانه اثر می‌گذارد و باعث ایجاد بار مخالف می‌گردد و لایه‌های ۲ گانه الکتریکی اطراف قیر و سنگدانه تشکیل می‌شود.	تیلور و خسلا (۱۹۸۳) و هیکس و همکاران (۱۹۹۱)
نظریه شستشوی هیدرولیکی یا فشار منفذی	فشار آب منفذی که در اثر نفوذ آب در لایه‌های آسفالتی و تراکم تحت اثر عبور وسایل نقلیه ایجاد می‌شود به لایه قیر فشار می‌آورد و باعث خرابی آن می‌شود.	تیلور و خسلا (۱۹۸۳)، هیکس و همکاران (۱۹۹۱) و کندهال (۱۹۹۴)
نظریه امولسیون خودساز	چسبندگی بین قیر و سنگدانه به جهت تشکیل امولسیون خودساز کاهش می‌یابد.	تیلور و خسلا (۱۹۸۳) و هیکس و همکاران (۱۹۹۱)

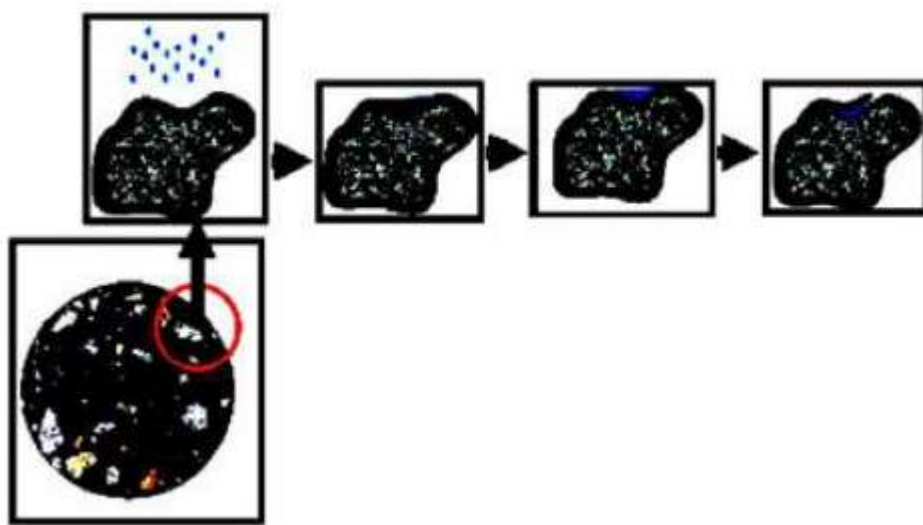
¹ Taylor

² Khosla

³ Stuart

⁴ Hichks

نتیجه تحقیقات نشان می‌دهد که رطوبت می‌تواند انسجام و پیوستگی آسفالت را کاهش دهد. کیم و لوتیف^۱ معتقدند رطوبت به‌طور معمول سختی قیر اطراف سنگ‌دانه را در طی فرآیند پخش رطوبت در اطراف سنگ‌دانه کم می‌کند و قدرت پیوند بین قیر و سنگ‌دانه را کاهش می‌دهد. کاهش در مقاومت داخلی باعث خرابی‌هایی همچون شیارشدگی، دانه‌دانه شدن (شن زدگی) و ترک‌های خستگی می‌شود. در شکل زیر این مکانیزم شرح داده شده است [۱۲].



شکل ۲-۳- توضیح مکانیزم حساسیت رطوبتی (۱۲)

مکانیزم های آسیب رطوبتی بسیار پیچیده می‌باشند و تلاش‌های زیادی برای ساده‌سازی آنها انجام شده است. با این وجود تشخیص مکانیزم های شکست سیستم قیر - سنگ‌دانه در حضور آب دشوار است و مکانیزم های داخلی هم‌زمانی معمولاً بهترین نتیجه را در خصوص فرآیند آسیب رطوبتی دارند.

در مخلوط‌های آسفالتی، پیوستگی به‌عنوان یکپارچگی کلی ماده در هنگامی که تحت بار یا فشار است، تعریف می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که رطوبت می‌تواند رئولوژی آسفالت را تغییر و پیوستگی آن

¹ Kim and Lutif

را کاهش دهد. فرام^۱ در سال ۱۹۷۴ میلادی مقداری سنگدانه پوشیده شده با لایه‌های قیر را در آب غوطه‌ور ساخت و مشاهده کرد یک ماده قهوه‌ای شکل در سطح آسفالت تشکیل می‌شود. او همچنین مشاهده کرد که یک امولسیون در آسفالت تشکیل می‌شود و وقتی این امولسیون به لایه قیری نفوذ می‌کند اتصال بین قیر و سنگدانه شکسته می‌شود. آب همچنین از طریق اشباع و انبساط سیستم فضای خالی به دلیل چرخه ذوب و انجماد با تغییرات دما، بر روی پیوستگی آسفالت تاثیر می‌گذارد [۱۳].

وقتی منافذ درون مخلوط آسفالتی توسط آب حاصل از بارندگی، ذوب یخ، بالا آمدن آب زیرزمینی و ... پر می‌شود، افزایش دما باعث انبساط آب درون منافذ می‌شود. اگر نفوذپذیری مخلوط آسفالتی به اندازه کافی زیاد باشد، آب منبسط شده از مخلوط خارج می‌گردد. در غیر این صورت، فشار هیدروستاتیکی ایجاد می‌گردد که این فشار بخصوص در گوشه‌های سنگدانه که فشار زیاد است و لایه قیری نازک‌تر است باعث خرابی لایه قیری می‌شود. این فشار همچنین ممکن است باعث افزایش نفوذ آب به لایه‌های قیر شود. کندهال^۲ و همکارانش در سال ۱۹۸۹ میلادی بر روی تاثیر فشار آب منفذی بر پدیده عریان شدگی آزمایش‌هایی را انجام دادند. آن‌ها دریافتند که در طول روز آب و بخار آب در لایه‌های روسازی انباشته می‌شود و در نتیجه در طول شب روکش آسفالتی در وضعیت اشباع قرار می‌گیرد. در این حالت، فشار آب منفذی که تغییرات انبساط حرارتی و تغییرات چرخه‌ای فشار ناشی از بارگذاری و باربرداری آن را افزایش می‌دهد، پیوند قیر - سنگدانه را از بین می‌برد و در نتیجه عریان شدگی رخ می‌دهد. آن‌ها دریافتند که عبور چرخ خودرو باعث اعمال فشار مثبت و سپس فشار منفی به آب موجود در حفره‌های سطحی می‌شود. این چرخه فشار و کشش باعث تسریع فرآیند عریان شدگی می‌گردد [۱۴].

¹ Fromm

² Kandhall

تعدادی از پارامترهای مربوط به سنگ‌دانه که بر پیوند قیر - سنگ‌دانه اثر می‌گذارند عبارت‌اند از : بافت سطحی، نفوذ درز و ترک‌ها در آسفالت، زاویه‌داری سنگ‌دانه‌ها، پیرشدگی سنگ‌دانه‌ها در اثر شرایط محیطی، پوشش‌های جذب‌شده بر سطح سنگ‌دانه و خاصیت سنگ‌دانه‌های خشک در برابر سنگ‌دانه‌های مرطوب. بافت سطحی سنگ‌دانه بر قابلیت پوشش اولیه خوب، که لازمه جلوگیری از عریان‌شدگی است، اثر می‌گذارد. چنگ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ نشان دادند پیوند چسبندگی بین گرانیت ویژه و قیر از پیوند بین سنگ‌دانه‌های آهکی و قیر بیشتر است. آن‌ها با اندازه‌گیری انرژی سطحی پایه، بین قیر و سنگ‌دانه به این نتیجه رسیدند و واحد پیوند، انرژی در واحد مساحت سطح در نظر گرفته شد. البته وقتی که انرژی در واحد جرم سنگ‌دانه به‌عنوان واحد پیوند در نظر گرفته شد، انرژی پیوندی برای سنگ‌دانه آهکی بسیار بیشتر از سنگ‌دانه سیلیسی بود [۱۴]. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که اگر سنگ‌دانه‌های استفاده‌شده، ضعیف و شکننده باشند، در حین غلتک زدن در مرحله ساخت یا تحت بار ترافیکی سنگین سنگ‌دانه‌ها می‌شکنند و علاوه بر اینکه سطح عریان شده ایجاد می‌شود، باعث تماس بیشتر رطوبت با سنگ‌دانه‌های شکسته و در نتیجه آسیب رطوبتی بیشتر آن‌ها می‌شود.

جاذبه بین نوار قیری و سطوح سنگ‌دانه، چسبندگی نامیده می‌شود. گسیختگی چسبندگی در قیر و سنگ‌دانه‌ها در محل فصل مشترک قیر و سنگ‌دانه اتفاق می‌افتد. مکانیزم‌هایی که بر عدم چسبندگی سنگ‌دانه - قیر تمرکز دارند معمولاً دارای پیچیدگی هستند. آب با دو مکانیزم می‌تواند باعث از بین رفتن چسبندگی گردد : انفصال و جابجایی. انفصال جدایی قیر از سطوح سنگ‌دانه با نواری از آب، بدون شکستگی مشهود در لایه قیری است. درحالی‌که جابجایی، خروج قیر از سطوح سنگ‌دانه با استفاده از آب است. به‌عبارت‌دیگر، انفصال به دلایلی نظیر خشک نشدن کافی سنگ‌دانه می‌باشد که باعث می‌شود لایه قیری بدون شکست و به‌طور کامل از سطح سنگ‌دانه جدا شود. درحالی‌که جابجایی به دلیل گسیختگی قیر با پوشش نادرست سنگ‌دانه در حین اختلاط است. انفصال یا جابجایی ممکن است با نظریه انرژی سطحی یا نظریه واکنش شیمیایی قابل توضیح باشد. نظریه انرژی سطحی،

چسبندگی را به عنوان یک پدیده ترمودینامیک مرتبط با انرژی سطحی مواد در نظر می‌گیرد. اکثر سنگ‌دانه‌ها بار الکتریکی سطحی دارند. قیر که شامل هیدروکربن‌های سنگین است، فعالیت قطبی کمی دارد. از طرف دیگر، آب قطبیت بالایی دارد. بنابراین در سیستم آب - قیر - سنگ‌دانه، آب می‌تواند قیر را از سطوح سنگ‌دانه جدا کند زیرا کاهش انرژی آزاد سطحی سیستم به شکل یک وضعیت پایدار ترمودینامیکی از انرژی آزاد سطحی مینیمم بهتر است. نظریه واکنش شیمیایی، پدیده انفصال و جابجایی را از چشم‌انداز دیگری توضیح می‌دهد. تحقیق در مورد ترکیب شیمیایی قیر و سنگ‌دانه نشان می‌دهد که این دو ماده می‌توانند پیوند شیمیایی همچون پیوند کووالانسی تشکیل دهند. در سال ۲۰۰۳ میلادی چنگ^۱ و همکارانش یک مدل گسیختگی چسبندگی را به منظور تحلیل شکست پیوند چسبندگی سنگ‌دانه و قیر در حضور آب ایجاد کردند. آن‌ها فرض کردند که گسیختگی پیوند چسبندگی به طور قطع به انرژی سطحی سیستم سنگ‌دانه - قیر وابسته است. آن‌ها کار چسبندگی قیر به سنگ‌دانه را بر اساس فرضیه انرژی آزاد سطحی محاسبه کردند. با استفاده از مدل مزبور، پتانسیل آسیب‌دیدگی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را به دست آوردند. به منظور اطمینان از صحت جواب‌های این مدل، نتایج این مدل را با آزمایش‌های تغییر شکل دائمی تحت بار ترافیکی مقایسه کردند و مشاهده کردند که نتیجه کار آن‌ها نزدیک به شرایط واقعی است [۱۲].

زهکشی سطحی یا زیرسطحی نامناسب، به آب موردنیاز برای عریان شدگی اجازه می‌دهد در سیستم روسازی باقی بماند. آب سطحی می‌تواند از طریق ترک‌های سطحی پایین برود. آب همچنین می‌تواند از زیرسیستم روسازی، توسط نیروهای بالابرنده و مویینه یا افزایش تراکم بخار ناشی از آب موجود در اساس و زیراساس، وارد گردد. ساخت بزرگراه‌های چند خطه، عریض کردن جاده‌های موجود، عدم شیب عرضی مناسب و شیب ملایم جاده در طول آن، همه سبب ایجاد عریان شدگی می‌شود. راه‌های چهار خطه خراب‌شده، بدون اینکه زهکشی جدیدی ایجاد شود با گرفتن شانه‌ها و قسمت میانی به

¹ Cheng et al

راه‌های شش خطه تبدیل می‌شوند. در راه‌های چهار خطه معمولاً عریان شدگی در خط‌های کناری رخ می‌دهد، زیرا بارهای سنگین‌تر از این خطوط عبور می‌کنند. بر اساس تحقیقاتی که در دانشگاه آیداهو انجام شده است مشخص گردید که فضای خالی آسفالت ممکن است به وسیله آب پر شود که این پر شدن می‌تواند به وسیله نفوذ آب از لایه‌های زیرین یا از سطح جاده صورت می‌گیرد. هنگامی که هوا گرم می‌شود آبی که خلل و فرج را پر کرده است، منبسط شده و ایجاد یک فشار درونی می‌نماید. این فشار می‌تواند چسبندگی سطح مصالح با قیر را از بین ببرد.

گورکم^۱ و سنگوز^۲ در سال ۲۰۰۸ از آهک هیدراته و قیر اصلاح شده پلیمری در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم برای بررسی پدیده عریان شدگی استفاده کردند. قیر پلیمری مورد استفاده به دو صورت قیر اصلاح شده الاستومری (SBS PMB) و قیر اصلاح شده پلاستومری (EVA PBM) بود. آن‌ها از روش اضافه کردن آهک هیدراته خشک به مصالح مرطوب که یکی از روش‌های رایج اختلاط است استفاده کردند. در این روش آهک خشک به مصالح مرطوب که بین ۳-۵٪ حاوی آب هستند اضافه می‌شود و یا آهک خشک به مصالح خشک اضافه شده و سپس آب، گردپاشی می‌شود. همچنین پلیمرهای اصلاح شده به صورت پودر به مخلوط اضافه شدند. در این تحقیق از قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ استفاده شده است. همچنین از دو نوع مصالح سنگی آهکی و بازالتی برای تهیه نمونه استفاده شد. آزمایش‌های سایش لوس آنجلس، دوام به کمک سولفات سدیم، وزن مخصوص، ارزش ماسه‌ای و شکستگی بر روی مصالح انجام شد. میزان پلیمر الاستومری استفاده شده در نمونه‌ها ۲-۶٪، پلیمر پلاستومری ۳-۷٪، آهک هیدراته ۱، ۱/۵ و ۲٪، فضای خالی به میزان ۷٪ و تعداد نمونه‌ها برای بررسی ۱۵۶ نمونه است. مشخصات قیر مصرفی و دانه‌بندی مصالح را در جداول بعدی مشاهده می‌کنید.

¹ Gorkom

² Sengoz

جدول ۲-۴- مشخصات قیر خالص اولیه (۱۵)

درجه نفوذ (۰/۱ میلی متر)	۶۳
نقطه نرمی (سانتی گراد)	۴۹
ویسکوزیته (Pa.s)	۰/۵۱
افت وزنی (%)	۰/۰۷
شکل پذیری (میلی متر)	۱۰۰
وزن مخصوص	۱/۰۳
درجه اشتعال (سانتی گراد)	۲۶۰

جدول ۲-۵- دانه بندی مصالح آهکی (۱۵)

اندازه الک	درصد عبوری
۰/۷۵	۱۰۰
۰/۵	۹۰/۵
۰/۳۷	۸۰/۵
شماره ۴	۴۷/۳
شماره ۱۰	۳۳
شماره ۴۰	۱۳/۵
شماره ۸۰	۹
شماره ۲۰۰	۵/۳

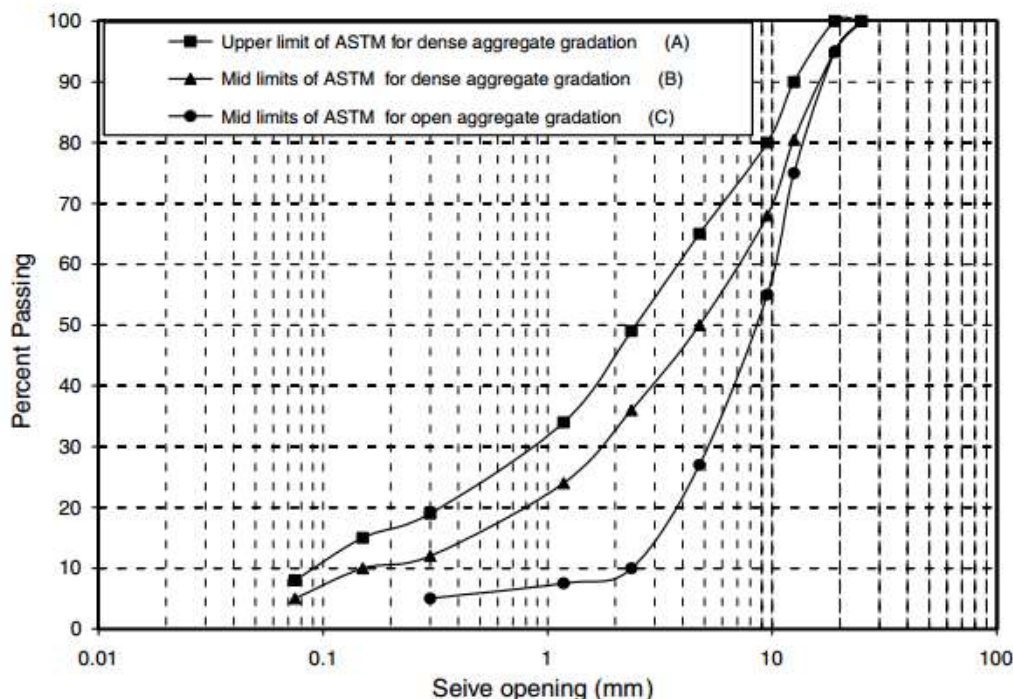
جدول ۲-۶- دانه‌بندی مصالح مخلوط بازالتی-آهکی (۱۵)

دانه‌بندی مخلوط (%)	۵-۰ میلی‌متر (آهک)	-۵ ۱۲.۵ میلی‌متر (بازالت)	-۱۲.۵ ۱۹ میلی‌متر (بازالت)	
	۴۰	۴۵	۱۵	درصد مخلوط
				اندازه الک
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰.۷۵
۹۰/۵	۱۰۰	۱۰۰	۳۵/۷	۰.۵
۸۰/۵	۱۰۰	۸۹	۲/۵	۰.۳۷
۴۷/۳	۱۰۰	۱۶	۰/۴	شماره ۴
۳۳	۸۱	۱/۲	۰/۳	شماره ۱۰
۱۳/۵	۳۳	۰/۷	۰/۲	شماره ۴۰
۹	۲۲	۰/۴	۰/۱۵	شماره ۸۰
۵/۳	۱۳	۰/۲	۰/۱	شماره ۲۰۰

نتایج کاملاً رضایت‌بخش بود بطوری‌که هم آهک هیدراته و هم هر دو نوع قیر پلیمری عملکرد فوق‌العاده مناسبی به نسبت قیر معمولی در جهت کاهش حساسیت رطوبتی داشتند. یک تفاوت برجسته بین نمونه‌هایی که از یک نوع قیر پلیمری در تولیدشان استفاده شده بود، این بود که به‌طور مثال در یک درصد وزنی مشخص از قیر پلیمری (به‌طور مثال ۳٪ وزنی مخلوط)، نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح آهکی-بازالتی آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به عریان شدگی داشتند. این اخلاف را می‌توان به پیوند ضعیف بین مصالح سنگی بازالتی و قیر نسبت داد. در این بین نمونه‌هایی که از قیر

الاستومری ساخته شده بودند، در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده از قیر پلاستومری مقاومت بیشتری در برابر عریان شدگی از خود نشان دادند. از طرفی نتایج نشان داد اضافه کردن آهک هیدراته به نمونه‌هایی که از مصالح بازالتی ساخته شده‌اند، تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی دارد [۱۵].

ابو قدیس^۱ و همکارش در سال ۲۰۰۴ به بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی به کاررفته در مخلوط آسفالتی، در پدیده عریان شدگی پرداختند. تاثیر مشخصات مصالح به کمک پارامترهای مختلف در طرح اختلاط مانند ۳ نوع دانه‌بندی گوناگون مصالح سنگی، دو نوع آسفالت، دو حالت خشک و اشباع و دو نوع قیر متفاوت ارزیابی شد. در مجموع ۷۲ نمونه به‌طور مساوی از مصالح سنگی آهک شکسته و بازالت ساخته شدند. برای هرکدام از مصالح سنگی از ۳ نوع دانه‌بندی A، B و C استفاده شد. در شکل پایین دانه‌بندی این ۳ حالت را مشاهده می‌کنید.



شکل ۲-۴- دانه‌بندی مصالح سنگی (۱۶)

¹ Abu-Qudais

همچنین از دو نوع قیر با طبقه‌بندی عملکردی PG-۷۰-۱۰ و درجه نفوذ AC-۶۰/۷۰ و طبقه‌بندی PG-۵۸-۲۲ و درجه نفوذ AC-۸۰/۱۰۰ استفاده شد.

برای به دست آوردن درصد قیر بهینه از آزمایش تراکم مارشال به‌جای روش تراکم ژیراتوری استفاده کردند، زیرا نمونه‌های آسفالتی که با مصالح بازالتی تهیه‌شده و به کمک روش ژیراتوری متراکم شده بودند دارای درصد فضای خالی زیادی بودند. روش کار به این ترتیب بود که ۳ نمونه از هر درصد قیر (۳٪، ۳/۵٪، ۴٪، ۴/۵٪ و ۵٪) به کمک دانه‌بندی نوع C و (۴/۵٪، ۵٪، ۵/۵٪، ۶٪ و ۶/۵٪) به کمک دانه‌بندی‌های A و B ساخته شدند. درصد قیر بهینه به‌صورت متوسط درصدی که بیشترین استقامت، بیشترین وزن مخصوص و درصد فضای خالی ۴٪ را شامل می‌شود، محاسبه شد. برای نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح آهکی به‌صورت ۵/۶٪، ۵/۳٪ و ۴/۲٪ به ترتیب برای دانه‌بندی نوع A، B و C بود. نتایج برای نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح بازالتی نیز به ترتیب برابر با ۵/۷٪ (نوع A)، ۵/۴٪ (نوع B)، و ۴/۴٪ (نوع C) بود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نوع مصالح سنگی مصرفی تاثیر عمده‌ای بر مقاومت مخلوط می‌گذارد. بر این اساس نمونه‌هایی که از مصالح سنگی آهکی ساخته‌شده بودند نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده از مصالح بازالتی مقاومت بهتری در مقابل عریان شدگی از خود نشان دادند. همچنین عامل مهم بعدی در مقاومت مخلوط نوع دانه‌بندی مخلوط بود. به این ترتیب که نمونه‌هایی که از حد بالای نمودار دانه‌بندی برای تراکم خود استفاده کرده بودند مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌هایی که از حد وسط استفاده کرده بودند، از خود نشان دادند [۱۶].

باس^۱ و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۵ دو نمونه مختلف، یکی به‌صورت کرگیری شده از محل و دیگری نمونه آزمایشگاهی متراکم شده به کمک روش ژیراتوری را تحت آزمایش‌های لاتمن اصلاح‌شده و چرخ هامبورگ قرار دادند. نمونه‌های موردبررسی شامل ۳ نمونه مخلوط آسفالتی گرم متراکم شده در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و یک نمونه مخلوط آسفالتی داغ متراکم شده در دمای

¹ Buss

۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بودند. برای آزمایش هامبورگ ابتدا تمام نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس تحت آزمایش قرار گرفتند. فشار چرخ در این آزمایش برابر با ۷۱/۷ کیلوگرم بود. عمق شیار شدگی به کمک LVDT اندازه‌گیری شد. نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر نمونه‌های کرگیری شده نسبت به نمونه‌های ژیراتوری در برابر حساسیت رطوبتی در آزمایش هامبورگ بودند [۱۷]. لازم به ذکر است که نتایج آزمایش هامبورگ وابستگی زیادی به درجه حرارت دارند و هرچه درجه حرارت بالا باشد نتایج مورد قبول‌تر است.

همچنین محققین ایرانی بسیاری نیز بر روی این پدیده تحقیق و آزمایش کرده‌اند. منصور فخری و محمد بوالحسینی در سال ۱۳۸۹ تاثیر استفاده هم‌زمان فیلر آهکی و آنتی‌استریپینگ مایع را بر روی خرابی عریان شدگی مخلوط آسفالتی بررسی کردند که از نسبت مقاومت مارشال، به‌عنوان پارامتر ارزیابی مقاومت آسفالت در مقابل خرابی عریان شدگی استفاده شد. آن‌ها از قیر ۶۰-۷۰-AC شرکت نفت پاسارگاد برای ساخت نمونه‌ها استفاده کردند که مشخصات آن مطابق جدول ۲-۷ است. مصالح سنگ‌دانه‌ای رسوبی شکسته شده با دانه‌بندی استاندارد مطابق جدول ۲-۸ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است و آهک شکفته شده عبوری از الک ۲۰۰ به‌عنوان فیلر به‌کاررفته است.

جدول ۲-۷- مشخصات فیزیکی قیر (۱۸)

حد اکثر استاندارد	حداقل استاندارد	نتایج	روش آزمایش	آزمایش‌های قیر خالص
۷۰	۶۰	۶۵	ASTM-D5	درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)
۵۶	۴۹	۵۵	ASTM-D36	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
-	۱۰۰	۱۰۰	ASTM-D113	مقدار کشش (میلی‌متر)
-	۲۳۲	۲۸۸	ASTM-D2042	درجه اشتعال (سانتی‌گراد)
۱	-	۰/۴۷	ASTM-D1754	افت وزنی در اثر حرارت
-	-	۱۰۲۷	ASTM-D70	وزن مخصوص

جدول ۲-۸- دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در مخلوط آسفالت (۱۸)

اندازه الک (میلی‌متر)	% وزنی رد شده از الک
۱۹	۱۰۰
۱۲/۵	۹۰-۱۰۰
۴/۷۵	۴۴-۷۴
۲/۳۶	۲۸-۵۸
۰/۳	۵-۲۱
۰/۰۷۵	۲-۱۰

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا مصالح سنگی را به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه قرار دادند تا در درجه حرارت بین ۱۷۰-۱۴۰ درجه سانتی‌گراد تمامی دانه‌ها به مقدار موردنیاز گرم شوند و ضمناً آب موجود در میان دانه‌های مصالح سنگی تبخیر شود. سپس به ۶ سری ۳ تایی تقسیم کردند و قیری که قبلاً تا دمای ۱۳۷ درجه سانتی‌گراد گرم شده بود را به ۱۲۰۰ گرم از مصالح اضافه کردند. درصد قیر هر سری به ترتیب ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ درصد انتخاب گردید. پس از ترسیم نمودارها بهترین درصد قیر برای استفاده در طرح، برابر ۵.۵ درصد محاسبه شد. سپس مواد ضد عریان شدگی آهک و آنتی استریپینگ را به نسبت‌های موجود در جدول ۲-۹ به نمونه‌ها اضافه کردند و درنهایت آزمایش‌های اصلی را بر روی این نمونه‌ها انجام دادند.

جدول ۲-۹- طرح اختلاط نهایی نمونه‌ها (۱۸)

شماره	اسم	آهک %	آنتی استریپینگ
۱	L1	۱/۵	۰
۲	L2	۳	۰
۳	L3	۵	۰
۴	L4	۷	۰
۵	A1	۰	۰/۰۰۱۵
۶	A2	۰	۰/۰۰۳
۷	A3	۰	۰/۰۰۵
۸	A4	۰	۰/۰۰۷۵
۹	LA1	۱/۵	۰/۰۰۱۵
۱۰	LA2	۱/۵	۰/۰۰۳
۱۱	LA3	۱/۵	۰/۰۰۵

۱۲	LA4	۱/۵	۰/۰۷۵
۱۳	LA1'	۳	۰/۰۰۱۵
۱۴	LA2	۳	۰/۰۳
۱۵	LA3'	۳	۰/۰۵
۱۶	LA4	۳	۰/۰۷۵
۱۷	LA1''	۵	۰/۰۰۱۵
۱۸	LA2	۵	۰/۰۳
۱۹	LA3	۵	۰/۰۵
۲۰	LA4''	۵	۰/۰۷۵

آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از هر کدام از این مواد نقش مثبت در کاهش حساسیت رطوبتی نمونه را دارند و به کار بردن هم‌زمان این دو ماده علاوه بر از بین بردن تقریباً کامل جداشدگی، دارای اجرای آسان‌تر و کارایی بالاتر و همچنین قابلیت اطمینان بالاتر نسبت به حالت تک ماده‌ای بوده و از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر است [۱۸].

همچنین علیزاده و همکاران نیز در سال ۱۳۹۲ تاثیر دو نوع افزودنی ضد عریان شدگی شامل پودر آهک شکفته و یک نوع افزودنی مایع (Zycosoil) را مورد بررسی قرار دادند. به منظور بررسی حساسیت رطوبتی نمونه‌ها از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم^۱ (ITS) بر روی نمونه‌های خشک و اشباع استفاده شد. تحقیق انجام‌گرفته شامل مخلوط آسفالتی داغ بدون افزودنی، دو نوع افزودنی مخلوط آسفالتی گرم یک نوع دانه‌بندی و یک نوع قیر (قیر ۶۰/۷۰-AC) و مواد افزودنی ضد عریان کننده‌ی آهک هیدراته و زایکوسویل و سنگ‌دانه‌های سیلیسی است. همچنین مواد افزودنی ساسوبیت

¹ Indirect Tensile Strength

و ردیست برای تولید مخلوط آسفالت گرم در این آزمایش استفاده شد. ساسوبیت یک ماده‌ی کریستالین ریز هیدروکربن پلی اتیلنی چربی‌دار بلند زنجیر است که از تبخیر زغال‌سنگ تولید می‌شود. ساسوبیت به دلیل توانایی در کاهش ویسکوزیته قیر، هم در طول فرآیند اختلاط آسفالت و هم در طول فرآیند ریختن، به‌عنوان بهبوددهنده روانی آسفالت شناخته می‌شود. این کاهش ویسکوزیته امکان کاهش دماهای کار را به‌اندازه ۲۰ الی ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌دهد. ردیست نیز یک ماده شیمیایی است که برای بهبود برخی ویژگی‌های مخلوط آسفالتی گرم توسعه‌یافته است. دمای ذوب این ماده حدود ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد است، بنابراین در هنگام به هم زدن، به‌سرعت در قیر با دمای بالا پخش می‌شود. مصالح سنگی از کارخانه آسفالت ماکادام شرق در جنوب شرقی تهران انتخاب شد و آزمایش‌های ارزش ماسه‌ای، افت وزنی در مقابل سولفات سدیم، حدود اتربرگ، سایش لس‌آنجلس، شاخص تورق، چسبندگی قیر به مصالح سنگی و تعیین میزان شکستگی بر روی آن‌ها انجام شد. دانه‌بندی مصالح به شرح زیر است.

جدول ۲-۱۰- دانه‌بندی مصالح سنگی مصرفی (۱۹)

اندازه الک	حدود مشخصات دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴	دانه‌بندی منتخب
۰/۷۵ اینچ	۱۰۰	۱۰۰
۰/۵ اینچ	۹۰-۱۰۰	۹۷
شماره ۴	۴۴-۷۴	۶۴
شماره ۸	۲۸-۵۸	۳۷
شماره ۵۰	۵-۲۱	۱۰
شماره ۲۰۰	۲-۱۰	۶.۷

نتیجه‌گیری به این صورت بود که مقدار ITS خشک و اشباع به‌دست‌آمده در درصد‌های مختلف آهک هیدراته و زایکوسویل برای نمونه‌های مخلوط گرم حاوی ردیست دارای بیشترین مقدار بود ولی مقدار ITS خشک برای نمونه‌های مخلوط گرم حاوی ساسوبیت بیشتر از مخلوط داغ و ITS اشباع آن کمتر از نمونه‌های داغ است. اضافه کردن این مواد در مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی مقاومت کششی غیرمستقیم خشک نمونه‌ها نداشت اما نسبت TSR با اضافه نمودن این مواد به بالاتر از حد قابل قبول (۰/۸) می‌رسد [۱۹].

منصور فخری و همکارش با استفاده از آزمایش‌های مارشال به بررسی تغییرات مقاومت رطوبتی نمونه‌های مخلوط آسفالتی پرداختند. بدین منظور با استفاده از مقادیر مختلف قیر خالص و انواع مختلف فیلر شامل آهک هیدراته، سیمان و خاک‌سنگ، نمونه‌های آسفالتی ساخته‌شده و تحت شرایط کاملاً خشک و اشباع مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین علاوه بر بررسی تاثیر فیلرهای مختلف، نمونه‌هایی نیز با استفاده از یک نوع مایع افزودنی ضد عریان شدگی ساختند و تحت آزمایش قرار دادند. دانه‌بندی مخلوط‌ها بر اساس نشریه ۲۳۴ در جدول زیر آورده شده است. دانه‌بندی مزبور مطابق دانه‌بندی شماره ۴ جدول ۹-۱ نشریه ۲۳۴ برای آستر و رویه است که دانه‌بندی پیوسته دارد.

جدول ۲-۱۱- دانه‌بندی مصالح مصرفی (۲۰)

اندازه الک (mm)	۱۹	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۱/۱۸	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵	۰/۰۷۵
درصد وزنی رد شده	۱۰۰	-۱۰۰	-	-۷۴	-۵۸	-	-	۵-۲۱	-	۲-۱۰
		۹۰		۴۴	۲۸					

بر روی مصالح سنگی، آزمایش‌های تعیین درصد جذب آب و وزن مخصوص نیز به عمل آمد. در خصوص بخش فیلر مطابق استاندارد ASTM-C188 آزمایش تعیین وزن مخصوص انجام

گرفت. برای فیلر معمولی از آب و برای سیمان و پودر آهک از نفت استفاده شده است. نتایج در جدول بعدی آمده است.

جدول ۲-۱۲- وزن مخصوص فیلرهای مصرفی (۲۰)

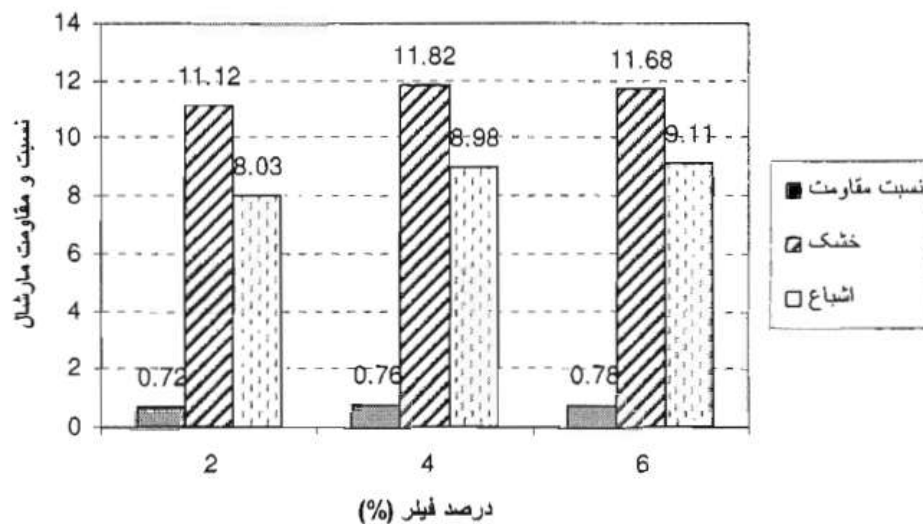
سیمان	فیلر معمولی	آهک	نوع وزن مخصوص
۳۱۰۷	۲۵۸۲	۲۳۷۸/۰۸	G (Kg/m ³)

قیلر مصرفی در این تحقیق قیلر خالص ۶۰/۷۰-AC بود. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی آن را می‌توانید در جدول ۲-۱۳ ملاحظه بفرمایید.

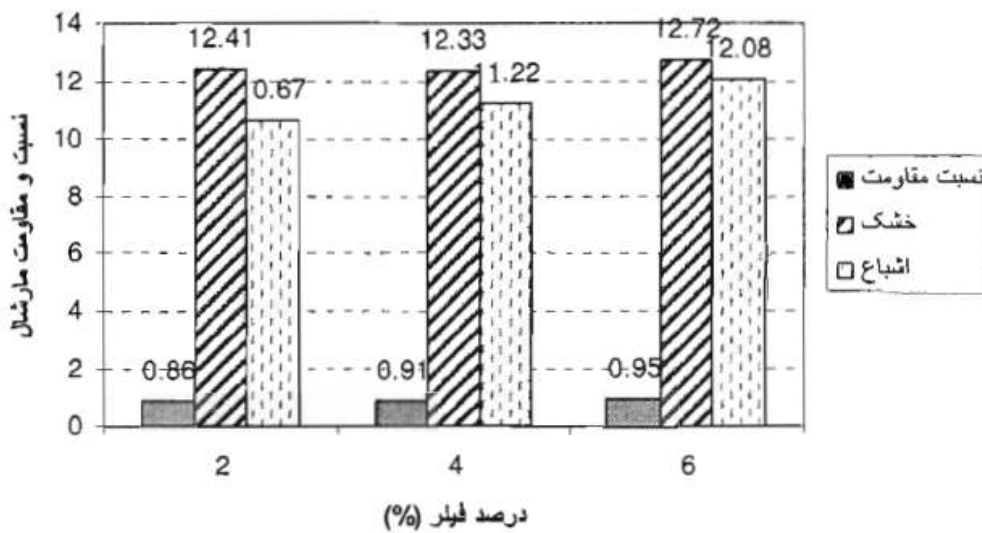
جدول ۲-۱۳- نتایج آزمایش‌های قیلر مصرفی (۲۰)

نتایج	آزمایش‌های قیلر خالص
۶۲/۳	درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)
۵۳/۵	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
۱۰۰	مقدار کشش (سانتیمتر)
۲۸۴	درجه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)
۰/۳۷	افت وزنی در اثر حرارت
۱۰۲۰	وزن مخصوص

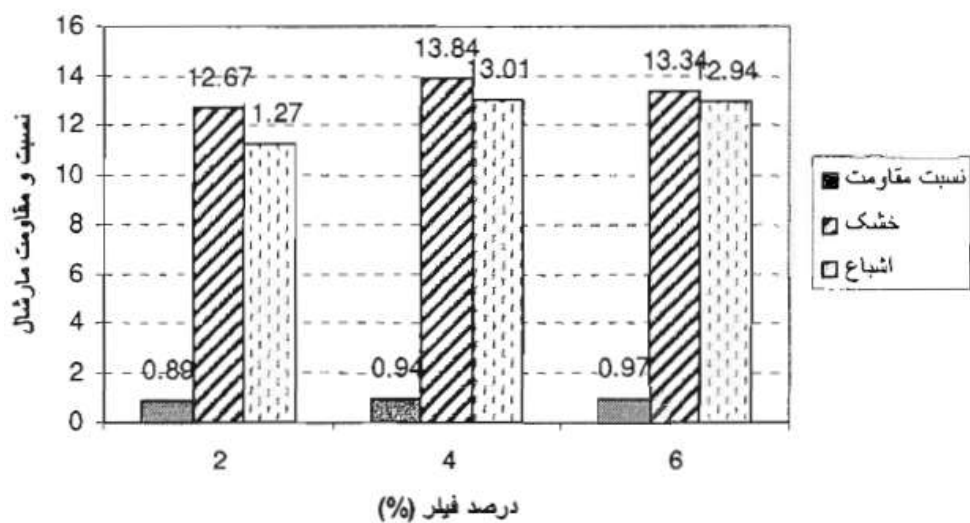
نتایج سه نوع فیلر مصرفی و همچنین مایع افزودنی ضد عریان شدگی در نمودارهای ۲-۵ تا ۲-۹ قابل مشاهده است.



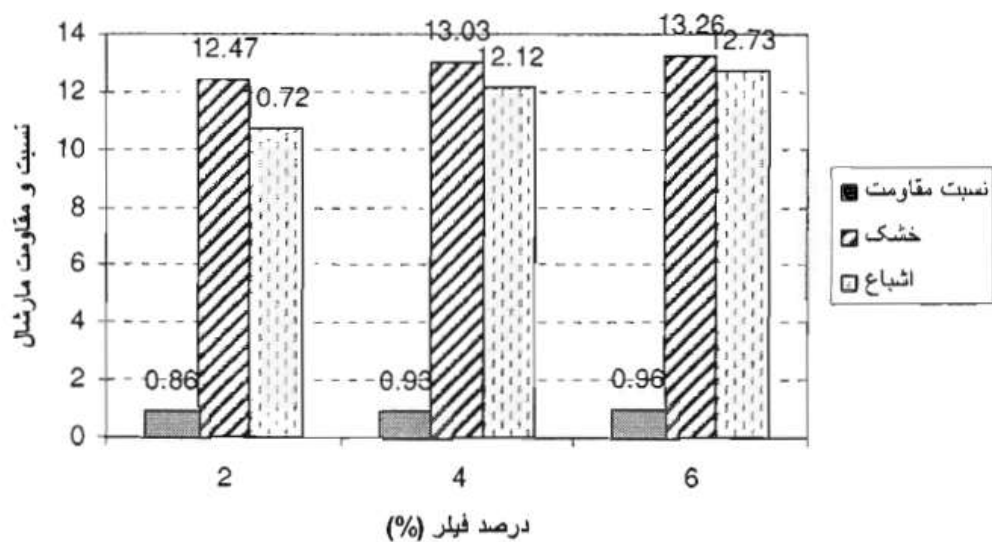
شکل ۲-۵- مقاومت مارشال در نمونه‌های ساخته‌شده با فیلر معمولی (۲۰)



شکل ۲-۶- مقاومت مارشال نمونه‌های ساخته‌شده با فیلر سیمان (۲۰)



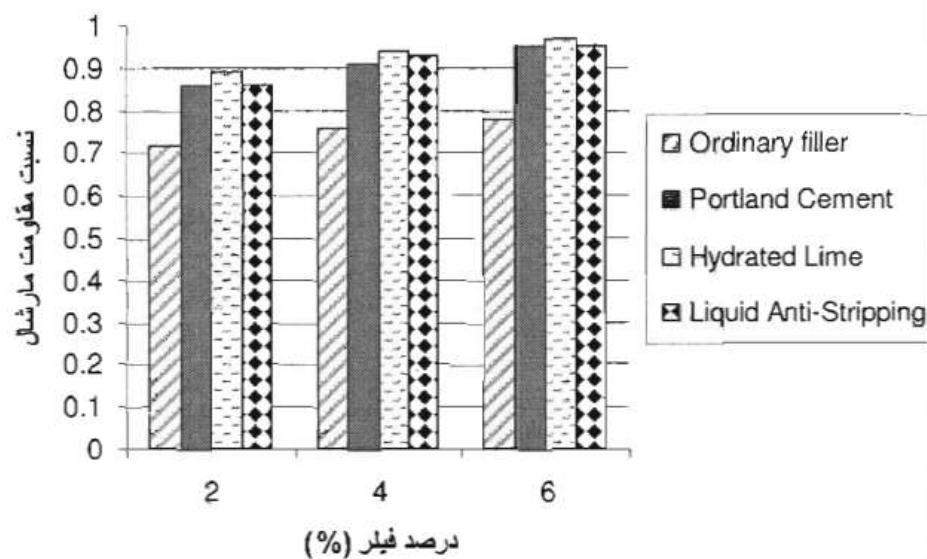
شکل ۲-۷. مقاومت مارشال نمونه‌های ساخته‌شده با آهک هیدراته (۲۰)



شکل ۲-۸. مقاومت مارشال نمونه‌های ساخته‌شده با محلول ضد عریان شدگی و فیلر معمولی

(۲۰)

در نهایت در نمودار ۲-۹ مقایسه انواع این افزودنی‌ها آورده شده است.



شکل ۲-۹- مقایسه تاثیر افزودنی‌های مختلف در مقاومت عریان شدگی مخلوط آسفالتی (۲۰)

آن‌ها دریافتند که افزودن آهک هیدراته، مایع ضد عریان شدگی و سیمان به ترتیب بیشترین تاثیر را در افزایش مقاومت در برابر این پدیده خواهد داشت و با توجه به وجود منابع آهک و سیمان در داخل کشور، استفاده از آن‌ها در مواردی که امکان بروز عریان شدگی وجود دارد، مناسب خواهد بود. همچنین ارائه یک افزودنی مشخص برای تمامی حالات منطقی نبوده و در اولین گام باید اقدام به شناسایی مشخصات مصالح سنگی نموده تا با بررسی جنبه‌های اقتصادی و شرایط پروژه، بهترین تصمیم گرفته شود [۲۰].

جدول ۲-۱۴- خلاصه مقالات بررسی شده

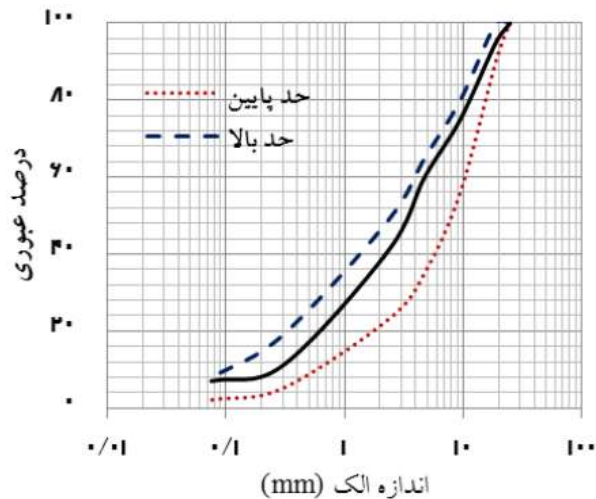
عنوان مقاله	تاریخ انتشار (میلادی)	نام نویسنده	خلاصه مقاله
Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete	۲۰۰۹	Cagri Gorkem, Burak Sengoz	بررسی پدیده عریان شدگی در مخلوط آسفالتی تهیه شده از آهک هیدراته و ۲

نوع قیر اصلاح شده پلیمری			prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime
بررسی خواص شیمیایی و فیزیکی مصالح سنگی در مخلوط‌های ساخته شده از مصالح آهکی و بازالتی	Saad Abo-Qudais, Haider Al-Shweily	۲۰۰۷	Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behavior
مقایسه نمونه‌های میدانی و آزمایشگاهی به کمک آزمایش‌های لاتمن و هامبورگ	Ashley Buss , R. Christopher Williams, Scott Schram	۲۰۱۵	Evaluation of moisture susceptibility tests for warm mix asphalts
بررسی تاثیر توأم فیلر آهکی و مایع ضد عریان شدگی به کمک آزمایش نسبت مقاومت مارشال	منصور فخری و محمد بوالحسنی	۲۰۱۰	بررسی تاثیر استفاده هم‌زمان فیلر آهکی و آنتی استریپینگ مایع بر روی خرابی عریان شدگی بتن آسفالتی گرم
بررسی تاثیر پودر آهک و افزودنی ضد عریان شدگی بر روی نمونه‌های آسفالتی	علی علیزاده، حامد عمرانی، سعید منجم	۲۰۱۳	بررسی تاثیر مواد ضد عریان شدگی بر روی مخلوط‌های آسفالتی گرم
بررسی انواع مختلف فیلر شامل آهک هیدراته، سیمان و خاک سنگ بر عریان شدگی نمونه‌های خشک و اشباع آسفالتی	منصور فخری، پژوهان توسطی خیری	۱۳۸۷	بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزودنی های مختلف بر پدیده عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم

۴-۲- کاربرد زغال سنگ در آسفالت

در این بخش مقالاتی بررسی می شود که از زغال سنگ به عنوان افزودنی در مخلوط آسفالتی استفاده شده است.

مدرس و همکارش در سال ۱۳۹۴ به بررسی تاثیر پودر و خاکستر زغال سنگ ضایعاتی به عنوان فیلر در مخلوط پرداختند. در این تحقیق با بهره گیری از فیلر زغال سنگ ضایعاتی، اقدام به ساخت نمونه های حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزنی فیلر به جای پودر سنگ آهک شده و عملکرد مخلوط با آزمایش های مقاومت مارشال و کشش غیرمستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه پودر زغال سنگ ضایعاتی در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد سوزانده شد و تبدیل به خاکستر گردید. این خاکستر به عنوان فیلر در مخلوط استفاده و با فیلرهای دیگر مقایسه شد. از سنگ دانه شکسته شده و تیز گوشه در تهیه مخلوطها استفاده شد. دانه بندی مورد استفاده، یک دانه بندی پیوسته با حداکثر اندازه ۲۵ میلی متر بوده است. آزمایش دانه بندی مطابق با استاندارد ASTM-D3515 انجام شد و در نتایج در نمودار زیر ارائه شده است [۴].



شکل ۲-۱۰- دانه بندی مصالح سنگی (۴)

قیر مصرفی در این تحقیق شامل قیر خالص AC-۸۵/۱۰۰ تولیدی پالایشگاه تهران بود. مشخصات قیر در جدول پایین قابل مشاهده است.

جدول ۲-۱۵- مشخصات قیر مصرفی (۴)

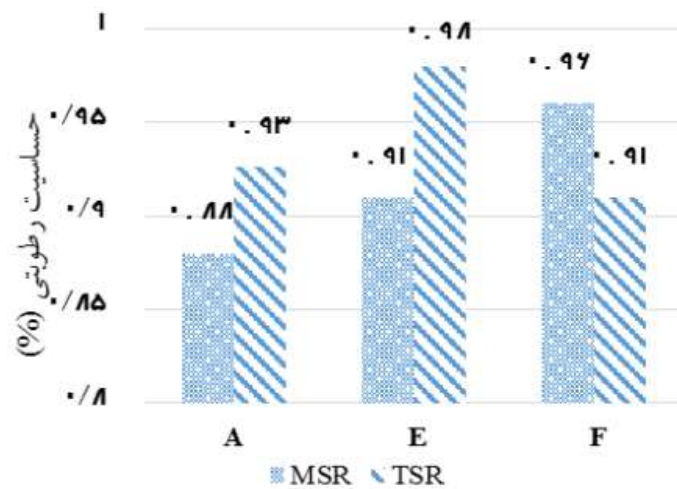
ویژگی	نتیجه
نقطه نرمی (C)	۴۸
درجه نفوذ (mm)	۹۱/۷۲
درجه اشتعال (C)	۳۱۰
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۰/۹۹۸

از روش مارشال برای تهیه نمونه‌ها استفاده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده قیر بهینه برابر ۵/۲ درصد انتخاب گردید. در جدول زیر انواع حالت‌های نمونه‌های ساخته شده (از هر حالت ۳ نمونه) ارائه شده است

ترکیب	توضیحات
A	۱۰۰٪ سنگ آهک
B	۷۵٪ زغال سنگ + ۲۵٪ سنگ آهک
C	۵۰٪ زغال سنگ + ۵۰٪ سنگ آهک
D	۲۵٪ زغال سنگ ضایعاتی + ۷۵٪ سنگ آهک
E	۱۰۰٪ زغال سنگ
F	۱۰۰٪ خاکستر زغال سنگ

نمودار ۲-۱۶- ترکیب‌های مورد استفاده (۴)

در نمودار زیر نتایج نهایی آزمایش‌های قابل مشاهده است.



شکل ۲-۱۱- مقایسه MSR و TSR در ۳ فیلر موجود (۴)

بر اساس نتایج به دست آمده فیلر زغال سنگ چه به صورت پودر و یا خاکستر می‌تواند به عنوان جایگزین مناسب برای سنگ آهک پیشنهاد شود. اما با توجه به آنکه فرآیند تبدیل ضایعات زغال سنگ به خاکستر، هزینه‌های اضافی به پروژه تحمیل نموده و آلودگی‌هایی به همراه دارد در نهایت استفاده از پودر زغال سنگ به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی توصیه می‌شود.

همان‌طور که ملاحظه شد اقدامات بسیاری برای شناسایی عوامل عریان شدگی و همچنین جلوگیری از بروز این پدیده یا کاهش آن انجام شده است. در این تحقیق نیز هدف یافتن روشی کاربردی‌تر و آسان‌تر نسبت به روش‌های پیشین است که از نقطه نظر اقتصادی نیز مورد قبول باشد. در نتیجه تصمیم بر این گرفته شد که از ضایعات زغال سنگ به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی استفاده شده و تاثیر آن بر مقاومت عریان شدگی نمونه بررسی شود. همچنین یا این کار مشکلات محیط زیستی ناشی از دپوی این ضایعات نیز تا حدودی رفع می‌گردد.

فصل سوم

انجام پژوهش

۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به بررسی مشخصات و ویژگی‌های مواد مصرفی از جمله سنگ‌دانه‌ها، قیر، فیلر آهکی و ضایعات زغال‌سنگ پرداخته می‌شود. سپس استانداردهای هر کدام جداگانه شرح داده می‌شود. در ادامه طرح اختلاط نمونه‌ها به روش مارشال بیان می‌شود. در بخش بعدی استانداردهای مرتبط با پارامترهای نمونه‌های آسفالتی ذکر می‌شود و در بخش پایانی سه آزمایشی که برای بررسی پدیده عریان‌شدگی در این پژوهش استفاده شده است به تفصیل شرح داده می‌شود.

۳-۲- مواد مصرفی

۳-۲-۱- سنگ‌دانه

مصالح سنگی شکسته کوهی از کارخانه آسفالت راه‌سازان کویر واقع در شهر میامی انتخاب شدند. دانه‌بندی مورد استفاده، دانه‌بندی پیوسته با حداکثر اندازه ۲۵ میلی‌متر بوده است. آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM-D3515 انجام شده است. مشخصات مصالح در جدول ۳-۱ قابل رویت است.



شکل ۳-۱- سنگ‌دانه‌های مصرفی

جدول ۳-۱- مشخصات مصالح سنگی

ویژگی	استاندارد	واحد	نتیجه	محدوده مجاز
سایش لس آنجلس	ASTM-C131	%	۲۵	حداکثر ۲۵
وزن مخصوص درشت‌دانه	ASTM-C127	gr/cm ³	۲/۷۷	-
جذب آب درشت‌دانه	ASTM-C127	%	۰/۲۹	حداکثر ۲/۵
ارزش ماسه‌ای	ASTM-D2419	%	۷۸	حداقل ۵۰
وزن مخصوص ریزدانه	ASTM-C128	gr/cm ³	۲/۷۱	-
جذب آب ریزدانه	ASTM-C128	%	۲/۲	حداکثر ۲/۵
افت وزنی با سولفات سدیم(ریز دانه)	ASTM-C88	%	۷/۵	حداکثر ۱۲
افت وزنی با سولفات سدیم(درشت دانه)	ASTM-C88	%	۸/۴	حداکثر ۸

در ادامه هر یک از استانداردهای بالا شرح داده می‌شود.

۳-۲-۱-۱- دانه‌بندی مصالح سنگی

دانه‌بندی مورد استفاده، دانه‌بندی پیوسته با حداکثر اندازه ۲۵ میلی‌متر و با توجه به ستون ۴

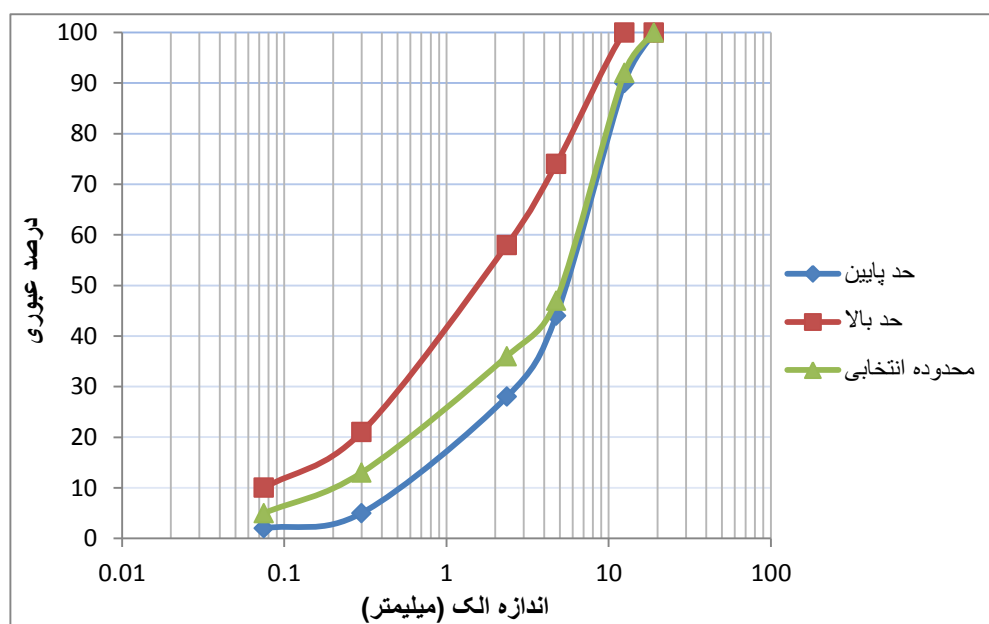
جدول ۹-۱ نشریه ۲۳۴ است [۲۱]. آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM-D3515

انجام شد. نتایج در جدول زیر قابل مشاهده است.

جدول ۲-۳ دانه‌بندی مصالح سنگی

درصد وزنی رد شده از الک	شماره دانه‌بندی اندازه الک
۱۰۰	۱۹ میلی‌متر
۹۰-۱۰۰	۱۲/۵ میلی‌متر
۲۴-۷۴	۴/۷۵ میلی‌متر
۲۸-۵۸	۲/۳۶ میلی‌متر
۵-۲۱	۰/۳ میلی‌متر
۲-۱۰	۰/۷۵ میلی‌متر

منحنی دانه‌بندی نیز به شرح زیر است.



شکل ۲-۳ - منحنی دانه‌بندی

۳-۲-۱-۲- آزمایش سایش لس آنجلس (ASTM-D۳۱)

در این آزمایش مقاومت ساییدگی دانه‌های سنگی درشت‌دانه کوچک‌تر از ۳۷/۵ میلی‌متر به وسیله دستگاه لس آنجلس انجام می‌شود. ابتدا به کمک جدول ۳-۳ یکی از دانه‌بندی‌های مشخص شده انتخاب می‌شود. سپس با توجه به دانه‌بندی انتخاب شده، از جدول ۳-۴ تعداد گلوله‌ها تعیین می‌شود.

جدول ۳-۳- دانه‌بندی‌های انتخابی

وزن نمونه به گرم				اندازه غربال به میلی‌متر	
D	C	B	A	مانده روی غربال	رد شده از غربال
-	-	-	۱۲۵۰±۲۵	۲۵	۳۷/۵
-	-	-	۱۲۵۰±۲۵	۱۹/۱	۲۵
-	-	۲۵۰۰±۱۰	۱۲۵۰±۱۰	۱۲/۵	۱۹/۱
-	-	۲۵۰۰±۱۰	۱۲۵۰±۱۰	۹/۵	۱۲/۵
-	۲۵۰۰±۱۰	-	-	۶/۳	۹/۵
-	۲۵۰۰±۱۰	-	-	۴/۷۵	۶/۳
۵۰۰±۱۰		-	-	۲/۳۶	۴/۷۵

جدول ۳-۴- انتخاب تعداد گلوله‌ها برحسب دانه‌بندی

۱۲ گلوله	دانه بندی گروه A
۱۱ گلوله	دانه بندی گروه B
۸ گلوله	دانه بندی گروه C
۶ گلوله	دانه بندی گروه D

طبق جدول دانه‌بندی B انتخاب شد. سپس مصالح عبوری از الک مشخص شده را شسته و روی ترازو به اندازه ۵ کیلوگرم وزن می‌شود. نمونه وزن شده را داخل دستگاه ریخته و به کمک جدول ۳-۳ تعداد ۱۱ گلوله انتخاب می‌شود. دستگاه لس آنجلس دارای یک دریچه در بالا برای ریختن نمونه و گلوله‌ها و یک سینی برای ریختن نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش است. دستگاه باید ۵۰۰ دور بچرخد که این تعداد دور در تنظیمات مانیتوری که در کنار دستگاه است قابل اعمال است. بعد از اتمام کار دستگاه، استوانه را می‌چرخانیم و نمونه و گلوله‌های داخل آن را روی سینی ریخته شده و با الک نمره ۱۲ الک می‌شود و مانده روی این الک را ۲ باره شسته و توسط ترازو وزن می‌شود. در نهایت به کمک رابطه ۳-۱، درصد سایش مصالح مشخص می‌شود.

$$\text{درصد سایش} = \frac{\text{وزن نهایی} - \text{وزن اولیه}}{\text{وزن نهایی}} \times 100$$

(رابطه ۳-۱)

۳-۲-۱-۳- آزمایش ارزش ماسه‌ای (ASTM D ۴۱۹)

آزمایش هم ارزش ماسه‌ای به اختصار هم‌ارز ماسه (S.E) را که در تعیین مرغوبیت مصالح جهت راه‌سازی، بتن‌سازی، آسفالت و لایه‌های زهکشی و... به کار می‌رود، می‌توان مکمل آزمایش دانه‌بندی دانست و عملاً برای تعیین نسبت حجم ماسه به کل حجم خاک (ماسه، لای و رس) و همچنین تعیین میزان جذب آب ریزدانه و تورم آن‌هاست و به‌طور خلاصه تعیین می‌نماید که ماسه تا چه حد تمیز است. هرچه درصد ریزدانه داخل ماسه‌ها کمتر باشد، ماسه تمیزتر است. این مقدار برای لایه رویه آسفالتی باید حداقل ۵۰ باشد.

آزمایش بر روی دانه‌های کوچک‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر (الک شماره ۴) انجام می‌شود. ابتدا ۱۰۰ گرم از مصالح جدا می‌شود. سپس استوانه مدرج تا علامت ۴ اینچ (۱۰ سانتیمتر) از محلول شستشو پر می‌شود. با استفاده از قیف، نمونه داخل لوله آزمایش ریخته شده و مدت ۱۰ دقیقه انتظار لازم است تا کاملاً خیس شود. با چوب‌پنبه در لوله را بسته، لوله به‌صورت افقی ۹۰ بار در مدت ۳۰ ثانیه که دامنه رفت‌وآمد ۳۰ سانتیمتر است، تکان داده می‌شود. لوله را عمودی روی میز قرار داده، پس از برداشتن

چوب‌پنبه، با آب‌پاشی به‌وسیله بطری پلاستیکی حاوی محلول شستشو، جدار لوله شسته تا علامت ۱۵ اینچ (۳۷/۵ سانتیمتر) پر می‌شود. محلول ۲۰ دقیقه بی حرکت روی میز گذاشته می‌شود و پس از سپری شدن این زمان ارتفاع مخلوط داخل استوانه خوانده می‌شود. (H_1)

سنبه فولادی به آهستگی در لوله آزمایش پایین برده می‌شود و انتهای آن روی ماسه قرار داد می‌شود و به کمک نشانه متصل به میله سنبه بر روی استوانه، عددی که نشانه مزبور در برابر آن قرار گرفته است خوانده می‌شود. (H_2)

این آزمایش حداقل باید ۲ بار انجام شود و در نهایت درصد ارزش ماسه‌ای محاسبه می‌شود.

۳-۲-۱-۴- آزمایش تعیین وزن مخصوص و جذب آب درشت‌دانه (ASTM-C2۷)

برای تعیین وزن مخصوص و درصد جذب آب درشت‌دانه و از استاندارد ASTM C127 استفاده شده است. از این روش آزمایش می‌توان وزن مخصوص، وزن مخصوص خشک (OD)، وزن مخصوص SSD، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب سنگ‌دانه‌ها را محاسبه کرد. وسایل مورد نیاز شامل ترازو، سبد سیمی با سوراخ‌های ۳/۳۵ میلی‌متری یا ریزتر، مخزن آب و الک‌های استاندارد است. روش انجام آزمایش به صورتی است که ابتدا نمونه‌ها را تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک کرده، سپس آن را برای ۱ تا ۳ ساعت در دمای محیط قرار داده تا خنک شود. سپس سنگ‌دانه‌ها برای ۲۴ ساعت در آب با دمای محیط قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها را از آب بیرون آورده و روی یک پارچه جاذب رطوبت پهن کرده تا لایه سطحی آب رو سنگ‌دانه‌ها از بین برود. وزن نمونه را که در حالت اشباع با سطح خشک است به دست آورده شود. بلافاصله پس از تعیین وزن نمونه اشباع با سطح خشک در هوا، نمونه را درون سبد سیمی قرار داده و وزن ظاهری آن در آب ۲۱ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثبت می‌شود. سپس نمونه را تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک نموده و ۱ تا ۳ ساعت در هوای محیط خنک می‌شود. در پایان وزن خشک نیز ثبت می‌شود. با

داشتن ۳ وزن ذکرشده، با استفاده روابط موجود در استاندارد ASTM C127 وزن مخصوص‌ها و درصد جذب آب به دست می‌آید.

۳-۲-۱-۵- آزمایش تعیین وزن مخصوص و جذب آب ریزدانه (ASTM-C128)

برای تعیین وزن مخصوص و درصد جذب آب ریزدانه و از استاندارد ASTM C128 استفاده شده است. از این روش آزمایش می‌توان وزن مخصوص، وزن مخصوص خشک (OD)، وزن مخصوص SSD، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب سنگ‌دانه‌ها را محاسبه کرد. وسایل مورد نیاز شامل ترازو، پیکنومتر، قالب مخروطی ناقص و میله متراکم کننده مخصوص و دستگاه دمنده هوای گرم است. در روش انجام آزمایش ابتدا نمونه در یک ظرف مناسب تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده است. پس از سرد شدن نمونه، سنگ‌دانه‌های ریز به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور قرار داده شده‌اند. در ادامه آب اضافی روی سنگ‌دانه‌ها به‌طوری‌که ریزدانه‌ها بیرون ریخته نشوند، تخلیه می‌شود. نمونه را روی یک سطح صاف و غیر جاذب پهن و صاف کرده، و در معرض جریان هوای گرم قرار داده می‌شود. این کار تا زمانی که نمونه اشباع با سطح خشک می‌رسد ادامه می‌یابد. برای اطلاع از وضعیت اشباع با سطح خشک، مخروط قالب رو یک سطح صاف و غیر جاذب رطوبت از طرف قطر بزرگ قرار داده می‌شود. قسمتی از ریزدانه‌ها را به صورت سست داخل مخروط ریخته تا از مخروط سرریز کند. سنگ‌دانه‌های ریز به‌آرامی با ۲۵ ضربه درون قالب مورد تراکم قرار داده می‌شود. برای هر ضربه میله تقریباً از فاصله ۵ میلی‌متری روی سنگ‌دانه‌ها رها می‌شود. ماسه سست از روی قالب کنار زده شده و قالب به‌صورت عمودی بالا کشیده می‌شود. اگر سنگ‌دانه‌ها رطوبت سطحی داشته باشند به شکل قالب مانده و چنانچه ریزش کمی داشته باشند، یعنی ریزدانه به حالت اشباع با سطح خشک رسیده است. در ادامه قسمتی از پیکنومتر را با آب پر کرده و مقدار ۵۰۰ گرم از ریزدانه اشباع با سطح خشک را درون آن ریخته و با افزودن آب پیکنومتر تا ۹۰ درصد حجم آن پر می‌شود. سپس پیکنومتر به‌صورت دستی تکان داده شده و ۲۰ دقیقه منتظر مانده تا حباب‌ها خارج شود و تا خط نشانه پر می‌شود. وزن نمونه حاوی آب و ریزدانه ثبت می‌شود. سپس

سنگ‌دانه‌های ریز را از پیکنومتر خارج کرده و در دمای ۱۱۰ درجه خشک می‌شوند. پس از سرد شدن نمونه وزن خشک ریزدانه‌ها نیز ثبت می‌شود. وزن پیکنومتر با آب نیز ثبت می‌شود. با داشتن وزن‌های ذکر شده و با استفاده از روابط استاندارد ASTM C128 وزن مخصوص‌های مورد نیاز و درصد جذب آب ریزدانه‌ها به دست می‌آید.

۳-۲-۱-۶- آزمایش درصد افت وزنی مصالح (دوام)

مصالح سنگی که در ساختن آسفالت‌ها به کار می‌روند باید در برابر عوامل جوی مقاوم باشند. مصالحی که در اثر یخبندان و یا در اثر تغییرات رطوبت شکسته و خرد می‌شوند نباید در لایه‌های آسفالتی روسازی مصرف شوند. نشانه‌ای از مقاومت مصالح سنگی در برابر عوامل جوی به کمک آزمایش دوام و استفاده از سولفات سدیم یا منیزیم انجام می‌گیرد. نحوه انجام آزمایش به این ترتیب است که مقدار معینی از مصالح سنگی پس از آنکه به مدت ۱۶ تا ۱۸ ساعت در محلول اشباع‌شده سولفات سدیم و سا سولفات منیزیم قرار گرفت از محلول خارج‌شده و در یک گرمخانه با گرمای ثابت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد تا کاملاً خشک شود. این عمل چندین بار (معمولاً ۵ بار) تکرار می‌شود. پس از آن نمونه مصالح به کمک جریان آب کاملاً شسته شده و پس از خشک شدن در گرمخانه با استفاده از الک دانه‌بندی جدید آن تعیین می‌شود. با مقایسه دانه‌بندی جدید مصالح با دانه‌بندی اولیه آن، مقدار متوسط افت وزنی مصالح سنگی که در اثر خرد و شکسته شدن دانه‌ها به وجود آمده است تعیین می‌شود. آزمایش تعیین مقاومت مصالح سنگی در برابر عوامل جوی معمولاً فقط در مواردی به کار می‌رود که اطلاعات تجربی کافی در مورد نحوه عملکرد مصالح سنگی موردنظر در شرایط جوی موردبحث موجود نباشد. مصالح سنگی در برابر سولفات منیزیم مقاومت کمتری در مقایسه با سولفات سدیم از خود نشان می‌دهند و لذا میزان افت آن‌ها بیشتر است. طبق آیین نامه سازمان برنامه و بودجه، افت مصالح سنگی در آزمایش دوام پس از آنکه به تعداد ۵ بار با استفاده از محلول سولفات سدیم مورد آزمایش قرار گرفت نباید از ۰.۸٪ وزنی مصالح بیشتر شود. آیین نامه ASTM حداکثر افت

مصالح سنگی را وقتی به تعداد ۵ بار با استفاده از محلول سولفات سدیم و یا سولفات منیزیم مورد آزمایش قرار می‌گیرد به ترتیب به ۱۲٪ و ۱۸٪ محدود می‌کند.

۳-۲-۲- قیر مصرفی

در این تحقیق از قیر خالص ۶۰/۷۰ AC- پالایشگاه پاسارگاد تهران استفاده شده است. مشخصات قیر مصرفی به شرح جدول زیر است.

جدول ۳-۵- مشخصات فیزیکی قیر مصرفی

آزمایش	واحد	استاندارد	نتایج
درجه نفوذ	دهم میلی‌متر	ASTM-D5	۶۵
نقطه نرمی	سانتی‌گراد	ASTM-D36	۵۵
مقدار کشش	میلی‌متر	ASTM-D113	۱۰۰
افت وزنی	٪	ASTM-D1754	۰/۰۴۷
درجه اشتعال	سانتی‌گراد	ASTM-D92	۲۸۸
وزن مخصوص	gr/cm ³	ASTM-D70	۱/۰۲۷

در ادامه به شرح هر یک از استانداردهای مرتبط با مشخصات فیزیکی قیر پرداخته می‌شود.

۳-۲-۲-۱- آزمایش درجه نفوذ (ASTM-D5)

آزمایش درجه نفوذ قیر برای تعیین سختی نسبی قیرهای دمیده و قیرهای خالص استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای درجه نفوذ در نام‌گذاری قیرهای خالص و قیرهای دمیده است. قیرهای خالص تنها بر این اساس نام‌گذاری می‌شوند اما معیار نام‌گذاری قیرهای دمیده علاوه بر درجه نفوذ قیر، درجه نرمی قیر نیز است. به‌عنوان نمونه، قیرهای ۴۰-۵۰، ۶۰-۷۰، ۸۵-۱۰۰ و ... از جمله قیرهای خالص معمول در راه‌سازی می‌باشند. دو عددی که همراه قیر خالص می‌آید بیانگر آن است که درجه نفوذ قیر

در این محدوده قرار دارد. برحسب تعریف، درجه نفوذ قیر عبارت است از مقدار طولی (برحسب میلی‌متر) است که یک سوزن استاندارد با شکل معین تحت اثر باری معادل ۱۰۰/۰ گرم در مدت ۵ ثانیه در قیری که در درجه حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد است ، نفوذ نماید. یکی از موارد کاربردی نتایج این آزمایش آن است که هر چه آب‌وهوای منطقه‌ای که قرار است قیر را در آنجا استفاده نماییم گرم‌تر باشد یا میزان آمدوشد بیشتر و بار وسایل نقلیه سنگین‌تر باشد ، باید از قیری با درجه نفوذ بیشتر استفاده نمود و بالعکس هرچه آب‌وهوای منطقه مورد نظر سردتر باشد ، باید از قیرهای با درجه نفوذ کمتری استفاده نمود. بنابراین هرچه قیر سخت‌تر باشد، درجه نفوذ آن کمتر و هرچه درجه نفوذ قیر بیشتر باشد قیر نرم‌تر خواهد بود. قیرهایی که درجه نفوذ آن‌ها حدود ۸۰ باشد، در آسفالت‌هایی نظیر بتن آسفالتی و قیرهای با درجه نفوذ بیشتر در ماکادام قیر و آسفالت سرد بکار برده می‌شوند.

در صورتی که آزمایش درجه‌ی نفوذ را در دمایی مساوی با نقطه‌ی نرمی قیر انجام دهیم برای همه‌ی قیرها درجه‌ی نفوذ ۸۰۰ به دست می‌آید لذا پارامتری به نام درجه نفوذ تعریف شده است که نشانه‌ی حساسیت قیر به تغییرات دما است. هرچه نشانه‌ی درجه نفوذ کمتر باشد حساسیت قیر به تغییرات دما بیشتر است. برای قیرهای راه‌سازی نشانه‌ی درجه نفوذ از ۲- تا ۲+ متغیر است. این نشانه برای قیرهای قطران از ۲- کوچک‌تر و برای قیرهای دمیده از ۲+ بزرگ‌تر است.

روش آزمایش بدین‌صورت است که ابتدا مقداری قیر را حدود ۶۰ درجه یا تا دمایی بالاتر از نقطه نرمی گرم می‌نماییم و سپس درون ظرف مخصوص می‌ریزیم. این ظرف دارای ۵/۵ سانتیمتر قطر و ۳/۵ سانتیمتر ارتفاع است. باید دقت شود که سطح قیر کاملاً صاف و بدون حباب باشد. جهت صاف نمودن سطح قیر می‌توان از کاردک استفاده نمود. ظرف حاوی قیر در معرض هوای آزمایشگاه قرار داده می‌شود تا قیر سرد شود. سپس ظرف قیر در داخل حمام آب گرم با درجه حرارت ۲۵ درجه قرار داده می‌شود تا پس از یک ساعت و نیم قیر با آب داخل حمام به تعادل برسد.

سپس ظرف از درون حمام آب گرم خارج می‌شود و سطح آن با دستمال نخی خشک می‌شود. طوری ظرف زیر دستگاه تعیین درجه نفوذ قرار داده می‌شود که نوک سوزن و نوک تصویر آن در سطح براق قیر بر روی هم منطبق شوند. حال درجه دستگاه صفر می‌شود و با زدن کورنومتر، سوزنی که وزن آن با متعلقاتش ۱۰۰ گرم است رها می‌شود و طی ۵ ثانیه مقدار نفوذ سوزن روی صفحه مدرج قرائت می‌شود و یادداشت می‌شود. این آزمایش برای هر نمونه (هر ظرف) ۵ تا ۱۰ بار انجام می‌شود و مقادیر به دست آمده یادداشت می‌شود. توجه نمایید که مقادیر به دست آمده برحسب دهم میلی‌متر است. باید دقت نمایید که فواصلی سوزن در قیر نفوذ می‌کند از یکدیگر فاصله تقریباً یکسانی داشته باشند و به لبه ظرف بیش از حد نزدیک نباشد تا خطای آزمایش کم شود. این تعداد آزمایش سبب می‌شود که خطای آزمایش کاهش یابد. میانگین اعداد به دست آمده همان میزان درجه نفوذ قیر خواهد بود.

۳-۲-۲-۲-۳- آزمایش نقطه نرمی (ASTM-D۳۶)

نقطه نرمی قیر عبارت است از درجه حرارتی که در آن قیر حالت نرمی پیدا می‌کند. به طور کلی می‌توان گفت که همه قیرها در این درجه حرارت به یک گرانروی مشخص می‌رسند. نقطه نرمی قیر به روش‌های مختلفی اندازه‌گیری می‌شود که یکی از این روش‌ها، روشی به نام حلقه و گلوله است که در آن نقطه نرمی را درجه حرارتی که در آن گلوله‌ها از حلقه عبور نموده و به سطح برنجی تحتانی به فاصله ۲۵ میلی‌متری برسد، تعریف می‌کنند. روش انجام این آزمایش بدین صورت است که ابتدا حلقه‌ها را روی سطح شیشه‌ای که به روغن آغشته است، قرار می‌دهیم. روغن سبب می‌شود که قیر به شیشه نچسبد. عمق این حلقه‌ها در حدود ۸ میلی‌متر است. قیر را که قبلاً داغ شده است به آرامی در داخل حلقه‌ها می‌ریزیم به طوری که حلقه کاملاً پر شود. چون عملاً پر کردن حلقه‌ها به صورت کامل بسیار مشکل است بهتر است به اندازه‌ای قیر در داخل آن‌ها ریخته شود که نیاز به ریختن مجدد نداشته باشد اما اگر کمی زیادتر ریخته شد، مشکلی پیش نخواهد آمد، چراکه پس از سرد شدن قیر داخل حلقه‌ها، سطح حلقه‌ها را با کاردک صاف خواهیم نمود تا اضافه قیر حلقه‌ها برداشته شود. برای

صاف نمودن سطح قیر لازم است که کاردک داغ شده را با زاویه ۴۵ درجه روی سطح حلقه‌ها بکشیم. سطح زیرین حلقه‌ها نیز به جهت استفاده از سطح شیشه‌ای، خودبه‌خود صاف خواهد شد. پس از سرد شدن قیر و صاف نمودن سطح آن، حلقه‌ها در جای خود در داخل بشر قرار داده می‌شود. سپس بشر تا حدود ۵ سانتی‌متر بالای حلقه‌ها از آب مقطر پر می‌شود. البته لازم است گفته شود که در آزمایشگاه به علت محدودیت‌های موجود از آب معمولی استفاده می‌شود.

حال مجموعه بشر در دستگاه گرم‌کن قرار داده می‌شود تا دمای آب درون آن به ۲۵ درجه سانتی‌گراد برسد که برای نیل به این هدف لازم است بشر به مدت ۱۵ دقیقه در گرم‌کن بماند. در پایان ۱۵ دقیقه باید دمای آب داخل بشر به ۲۵ درجه سانتی‌گراد رسیده باشد. اکنون بشر را از گرم‌کن بیرون آورده و ساچمه‌ها در مرکز حلقه‌ها روی قیر قرار داده می‌شود و بشر روی چراغ گذاشته می‌شود. نکته بسیار مهم در این آزمایش، روند گرمادهی به بشر و محتوی آن یعنی قیر است. از آنجاکه این آزمایش به حرارت بسیار حساس است، پس لازم است که در همه آزمایش‌ها از یک سرعت حرارت دهی استفاده شود. بنابراین حرارت نیز به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که در هر دقیقه ۵ درجه به دمای آب افزوده شود و این مهم در حین حرارت دادن با دماسنج کنترل می‌شود. عملیات گرمادهی آن قدر ادامه می‌یابد تا ساچمه‌های روی قیرها به سطح تیغه فلزی زیرحلقه‌ها برسند و برای هرکدام دمایی که این عمل اتفاق افتاده است قرائت و یادداشت می‌شود. سپس متوسط دو دمای به‌دست‌آمده به‌عنوان نقطه نرمی قیر در نظر گرفته می‌شود.

۳-۲-۳- فیلر مصرفی

در این آزمایش از ۲ نوع مختلف فیلر استفاده شده است.

۱- فیلر آهکی

۲- پودر زغال‌سنگ ضایعاتی

۳-۲-۳-۱- فیلر آهکی

از رایج‌ترین فیلرهای مصرفی که خاصیت ضد عریان شدگی نیز دارد فیلر آهکی است که به‌طور مؤثری استعداد عریان شدگی را در مخلوط آسفالتی تعدیل می‌کند. توجه شود که این ماده چندمنظوره به کار می‌رود یعنی علیرغم کنترل حساسیت رطوبتی دارای مزایای دیگری نیز به شرح زیر است:

الف - به‌عنوان یک فیلر سختی مخلوط را افزایش و شیار شدگی را کاهش می‌دهد.

ب - مقاومت در برابر ترک خوردگی را در دمای پایین بهبود می‌بخشد.

پ - پیرشدگی آسفالت و اثرات مضر آن را به‌طور مطلوبی اصلاح می‌کند.

ت - با ایجاد واکنش بین ذرات، باعث تعدیل پایداری در برابر رطوبت و دوام می‌شود.

با این توصیف و با توجه به سهولت دسترسی به این ماده در کشور، در این تحقیق به‌عنوان فیلر اصلی استفاده شده است.

۳-۲-۳-۲- پودر زغال سنگ ضایعاتی

زغال سنگ یکی از رایج‌ترین منابع تولید انرژی است که از پسماند مواد گیاهی دوران قدیم زمین‌شناختی تشکیل شده است و به‌عنوان یکی از رایج‌ترین منابع تولید انرژی در جهان به شمار می‌رود. بخش بزرگی از جرم زغال سنگ، کربن است. از دیگر ترکیبات زغال سنگ هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن و گوگرد است. قسمت اعظم این ذخایر تقریباً ۲۵۰ میلیون سال پیش پدید آمدند بدین صورت که گیاهان بعد از خشک شدن و از بین رفتن به داخل باتلاق‌ها می‌افتادند و بر اثر خروج اکسیژن، پوشش گیاهی به ماده‌ای لجن مانند به نام پیت (Peat) تبدیل می‌شد. پیت در زیر فشار خشک و سخت شد و به زغال سنگ تبدیل شد. در فرآیند تولید صنعتی زغال سنگ، زغال‌ها شسته، دانه‌بندی و سازگار برای کاربردهای مختلف می‌شوند. مهم‌ترین عملیاتی که روی زغال سنگ صورت می‌گیرد شامل غربالگری، شستشو، خرد کردن و جداسازی مواد مایع و جامد است. برای شستشوی

زغال سنگ معمولاً از دو روش فرآوری فلوتاسیون و جیگ استفاده می‌شود. فلوتاسیون دارای ذرات ریزتری نسبت به جیگ بوده ولی خواص کمتری از زغال سنگ مینا را دارا است. در نهایت ضایعات به دست آمده در فضایی آزاد در نزدیکی محل کارخانه دپو می‌شود. پودر زغال سنگ ضایعاتی (CWP) با داشتن خاصیت پوزولانی و با دارا بودن سیلیس و آلومینا می‌تواند خواص مشابه پوزولان نوع F داشته و باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی شود. طبق آمار منتشر شده در سال ۲۰۱۱ میلادی، تولید سالانه زغال سنگ در دنیا در حدود ۷/۷ میلیارد تن است که بیشترین سهم مربوط به چین و آمریکا است که پس از بهره‌وری از آن به مقاصد گوناگون صدها میلیون تن از آن به صورت باطله دپو می‌شود. به نظر می‌رسد یکی از راه‌حل‌های این مشکل استفاده از این دپو در صنعت ساخت‌وساز و به‌ویژه راه‌سازی باشد. همچنین استفاده از آن‌ها از نظر اقتصادی به صرفه بوده و در اغلب موارد رایگان است.

در این تحقیق از زغال سنگ ضایعاتی موجود در محل دپوی معدن زغال سنگ واقع در شهر دامغان استفاده شده است. این ضایعات پس از خشک شدن کامل به صورت مصالح ریزتر از ۰/۰۷۵ و به‌عنوان فیلر آماده گردید.

همچنین ترکیب شیمیایی ضایعات توسط آزمایش اشعه ایکس (XRF) و طبق استاندارد ASTM-E1621-05 انجام شد و ترکیبات شیمیایی آن مطابق جدول زیر است.

جدول ۳-۶- آنالیز شیمیایی CWP (Coal-Waste Powder)

درصد	عنوان
۳۳/۵	SiO ₂
۱۴/۴۵	AL ₂ O ₃
۳/۷۴	Fe ₂ O ₃
۰/۸۵۴	MgO
۰/۵۱۰	CaO
۰/۲۴	Na ₂ O
۲/۳۳	K ₂ O
۰/۰۳	MnO
۰/۰۹۸۱	TiO ₂

۳-۳- طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها

روش‌های مختلفی برای طرح آسفالت وجود دارد که یکی از این روش‌ها، روش مارشال است. در هر طرح آسفالت باید معیارهایی تعیین و مشخص گردد که بر اساس آن‌ها آسفالت ساخته می‌شود. این معیارها عبارت‌اند از:

- (۱) وزن مخصوص واقعی آسفالت متراکم شده
- (۲) درصد حجمی فضای خالی آسفالت متراکم شده
- (۳) مقاومت فشاری آسفالت متراکم شده
- (۴) تغییر شکل نسبی آسفالت متراکم شده
- (۵) درصد حجمی فضای خالی مصالح سنگی در آسفالت متراکم شده

برای تعیین معیارهای فوق لازم است بر روی نمونه‌های ساخته‌شده به روش مارشال، آزمایش‌هایی صورت پذیرد. در این بخش ابتدا روند ساخت نمونه‌ها شرح داده می‌شود و سپس به آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌ها به منظور تعیین مشخصات نمونه‌های آسفالتی پرداخته می‌شود.

همان‌طور که ذکر شد از روش مارشال برای تهیه نمونه‌ها طبق دستورالعمل استاندارد ASTM-D1559 استفاده شده است. آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۴ اینچ (۱۰ سانتی‌متر) و ارتفاع ۲/۵ اینچ (۶/۲۵ سانتی‌متر) انجام می‌شود. عمل تراکم نمونه آسفالت ساخته‌شده با چکش ۱۰ پوندی (۴/۵ کیلوگرمی) و ارتفاع سقوط چکش ۴۵ سانتی‌متری صورت می‌پذیرد. تعداد ضربات نیز بسته به میزان ترافیک طرح مسیر موردنظر متفاوت است.

روش آزمایش بدین‌صورت است که ابتدا نمونه‌های مصالح سنگی که قبلاً دانه‌بندی شده است در آون ریخته و به مدت ۲۴ ساعت در گرمچال قرار داده می‌شود به طوری که دمای آن به حدود ۱۶۰-۱۷۰ درجه سانتی‌گراد برسد و رطوبت سنگ‌دانه‌ها گرفته شود. لازم به یادآوری است که نمونه‌های دانه‌بندی شده همگی دارای وزن ۱۲۰۰ گرم و دانه‌بندی کاملاً یکسان می‌باشند؛ علت این امر آن است که بتوان تاثیر این دو عامل را در آزمایش حذف کرد. تعداد این نمونه‌ها باید ۲۱ عدد باشد که ۳ عدد از آن‌ها به عنوان ذخیره تهیه می‌شوند و در صورتی که حین ساخت نمونه آسفالت خطایی صورت گرفت، مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین باید ۱۸ نمونه آسفالتی ساخته شود. این ۱۸ نمونه به ۶ گروه ۳ تایی تقسیم خواهند شد که هر گروه دارای درصد قیر یکسانی است. مقادیر درصد قیری که به سنگ‌دانه افزوده خواهد شد به قرار روبه‌رو است: ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵

جهت شروع فرایند آزمایش، ابتدا یک عدد قالب با تمام ضمایم در گرمچال قرار داده می‌شود تا با سنگ‌دانه‌ها هم‌دما شود و هم‌زمان یک آون را از گرمچال بیرون آورده و درون ظرف مخلوط‌کن ریخته می‌شود و ظرف روی ترازویی قرار داده می‌شود که هم‌وزن در کفه مقابل ترازو، وزنه وجود دارد. از فرمول زیر درصد وزنی قیر لازم محاسبه می‌شود:

$$\frac{X}{1200+X} \times 100 = 4 \rightarrow X = 50gr$$

(رابطه ۳-۳)



شکل ۳-۳- توزین قیر (۲۲)

لازم به ذکر است که رابطه بالا برای هر گروه مساوی با درصد قیر مربوط به آن گروه قرار داده می شود. در کفهای که وزنه‌ها قرار دارند ۵۰ گرم وزنه اضافه می شود و سپس قیر مذاب به آرامی در ظرف مخلوط کن ریخته می شود. این کار تا زمانی ادامه پیدا می کند که نشانه دو کفه روبروی هم بایستند و وزن دو کفه برابر شود. در اینجا یادآور می شویم که نباید دمای قیر بیش از ۱۳۷ درجه سانتی‌گراد باشد زیرا در دمای بالای ۱۳۷ درجه مشخصات قیر تغییر خواهد کرد. بنابراین باید سعی شود دمای قیر در حدود ۱۳۷-۱۳۰ درجه سانتی‌گراد باشد.

به وسیله کاردک‌ها سنگ‌دانه‌ها با قیر ریخته شده مخلوط می شود و سپس برای مخلوط شدن کامل در دستگاه مخلوط کن قرار داده می شود. برای آنکه در حین مخلوط شدن، دمای مخلوط کاهش نیابد باید گرم کن مخصوص زیر کاسه مخلوط کن قرار داده شود. مدت ۵ دقیقه عمل مخلوط کردن ادامه می یابد اما باید توجه نمود که زمان مناسب برای قطع نمودن عمل هم زدن توسط خود فرد آزمایشگر تعیین می شود؛ بدین صورت که باید تمامی سنگ‌دانه‌ها به قیر آغشته شده باشند و سنگ‌دانه‌ای خشک

و به اصطلاح سفید نمانده باشد. احیانا پس از پایان میکس سنگ‌دانه‌های سفید مشاهده شد ، با کاردک آن‌ها مخلوط می‌شوند تا کیفیت مطلوب حاصل شود.



شکل ۳-۴- دستگاه مخلوطکن (۲۲)

حال قالب از گرمچال بیرون آورده می‌شود و ابتدا به اندازه ۲-۳ سانتی‌متر مصالح ریزدانه به وسیله کاردک‌ها در قالب ریخته می‌شود و سپس سایر مصالح به‌طور یکنواخت به داخل قالب افزوده می‌شود. توجه داشته باشید که قبلا قالب به روغن آغشته شده است ؛ این عمل سبب می‌شود که نمونه در پایان راحت‌تر از قالب بیرون بیاید و به بدنه قالب نچسبد. قالب مارشال از ۳ قسمت تشکیل شده است که عبارت‌اند از :

• استوانه اصلی (قالب)

• سری قالب

• کفی قالب

قالب و سری قالب به صورت نری و مادگی می باشند که به راحتی بر روی یکدیگر قرار می گیرند. پس ریختن تمام مخلوط به داخل قالب، با کاردک آن ها را در داخل قالب اندکی مخلوط نموده تا از یکنواختی آن اطمینان حاصل شود. این کارها باید در زمان اندکی انجام می شود تا از افت چشمگیر دما جلوگیری شود.



شکل ۳-۵- ریختن مصالح آغشته به قیر در قالب (۲۲)

حال نمونه زیر چکش تراکم مارشال قرار داده می شود. سطح چکش قبلا به روغن آغشته شده است. دستگاه های تراکم مختلفی در بازار موجود است که ساده ترین آن چکش دستی است. امروزه بیشتر آزمایشگاه ها مجهز به چکش مارشال دیجیتالی می باشند. اگر از چکش های دیجیتالی استفاده می کنید، تعداد ضربه را روی ۷۵ ضربه تنظیم نمایید. در صورت استفاده از چکش های دستی باید

نمونه ۷۵ بار بافاصله زمانی یکسان کوبیده شود. پس از کوبیدن ۷۵ ضربه، قالب بیرون آورده و برگردانده می شود تا از سمت دیگر آن زیر چکش قرار داده شود. این سمت نمونه نیز با ۷۵ ضربه کوبیده می شود.



شکل ۳-۶- چکش مارشال (۲۲)

حال با گچ روی نمونه میزان درصد قیر افزوده شده به آن نوشته می شود و در محلی امن قرار داده می شود تا در دمای محیط سرد شوند. در مورد تعداد ضربات باید این نکته در نظر گرفته شود که این تعداد بسته به نوع ترافیک طرح مسیر می تواند مقادیر ۲۵ ، ۵۰ و ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه را اختیار نماید.

این مراحل برای سایر نمونه ها انجام می شود و البته باید توجه داشته داشت که میزان درصد قیر هر گروه به درستی افزوده شود [۲۲].

در این مرحله وزن مخصوص واقعی، درصد فضای خالی، مقاومت فشاری و تغییر شکل نسبی نمونه‌های متراکم شده محاسبه می‌شود.

۳-۳-۱- آزمایش محاسبه درصد فضای خالی (رایس) (ASTM-D۲۰۴۱)

فضای خالی در یک نمونه متراکم شده به حباب‌های هوای درون نمونه اطلاق می‌شود که به صورت درصد حجمی نسبت به حجم نمونه کوبیده شده بیان می‌گردد. حد مجاز فضای خالی با توجه به نوع آسفالت ۳ تا ۸ درصد و میزان بهینه آن برابر ۵ درصد است. میزان فضای خالی آسفالت از جمله پارامترهای بسیار مهم در طرح آسفالت است زیرا در نظر نگرفتن این پارامتر می‌تواند عمر مفید راه و عملکرد آن را به شدت تحت تاثیر بگذارد. در صورتی که درصد فضای خالی آسفالت کمتر از یک درصد باشد، سبب بیرون زدن قیر از آسفالت می‌شود و در صورتی که بیش از حد مجاز باشد، استحکام و مقاومت آسفالت را کاهش می‌دهد و راه نفوذ آب به داخل آسفالت را فراهم نموده که سبب فروپاشی بافت مستحکم آسفالت خواهد شد.

برای قشر رویه حداقل ۳ درصد فضای خالی می‌تواند حالت انعطاف‌پذیر آسفالت را حفظ نموده و از بروز پدیده قیر زدگی جلوگیری نماید. از جمله عواملی که در میزان فضای خالی آسفالت مؤثرند، عبارت است از دانه‌بندی مصالح سنگی، درصد قیر آسفالت و کوبیدگی قشر آسفالت؛ که این عوامل برای حصول به میزان درصد فضای خالی مناسب توسط آیین‌نامه‌ها کنترل می‌شود زیرا حدود مجاز دانه‌بندی کاملاً مشخص بوده و حداقل و حداکثر کوبیدگی نسبی آسفالت نیز تعیین شده و نیز درصد قیر مناسب به کمک آزمایش مارشال با رعایت درصد فضای خالی تعیین می‌شود.

هرچه عمل غلتک زنی و تراکم بیشتر باشد، درصد فضای خالی آسفالت کاهش می‌یابد که حداقل کوبیدگی نسبی مطابق آیین‌نامه برابر ۹۷٪ نسبت به تراکم ماکزیمی است که در آزمایشگاه به دست می‌آید اما از آنجاکه شرایط آزمایشگاه و عمل با یکدیگر تطابق ندارند، درصد فضای خالی آسفالت

همواره بیشتر از آن است که پیش‌بینی می‌شود؛ بنابراین برای رسیدن به ۳٪ فضای خالی در قشر رویه آسفالت لازم است حداقل کوبیدگی نسبی را به ۹۸ تا ۹۹٪ افزایش داد.

روش آزمایش بدین‌صورت است که ابتدا نمونه‌ها داخل سینی گذاشته، سپس به مدت ۱۰ دقیقه درون گرم‌کن قرار داده می‌شود تا خوب بازشوند. ارلن تمیز و وزن می‌شود. ارلن به‌اندازه‌ای از آب پر می‌شود که بعد از زدن چند ضربه با کف دست به دهانه آن، دیگر آبی از آن خارج نشود. بار دیگر بدنه بیرونی آن خشک می‌شود و مورد توزین قرار داده می‌شود.

حال یک نمونه از گرم‌کن خارج شده و اجازه داده می‌شود تا سرد شود. سپس به روش چارک کردن مقدار ۱۲۰ گرم مخلوط آسفالت جدا شده و درون ارلن خشک و تمیز ریخته می‌شود. مقداری آب در ارلن ریخته می‌شود به‌طوری‌که حدود ۲ سانتی‌متر از سطح مخلوط آسفالت بالاتر بیاید. سر ارلن با درپوش به‌خوبی بسته می‌شود و ارلن به دستگاه تخلیه هوا متصل می‌شود تا هوای درون منافذ مخلوط آسفالت خارج شود. برای تسریع این عمل، هرچند دقیقه یک‌بار ارلن تکان داده می‌شود. عملیات مکش هوا تا زمان خروج کامل حباب‌های هوا از میان خلل و فرج مخلوط آسفالت ادامه می‌یابد.



شکل ۳-۷- نمونه متراکم نشده داخل ارلن

پس از خروج کامل هوا، ارلن از دستگاه جدا شده و تا زیر لوله نازل از آب پر می‌شود و مورد توزین قرار داده می‌شود. این مراحل برای سایر نمونه‌ها انجام داده می‌شود و نتایج در جدولی یادداشت می‌شود.

درصد فضای خالی آسفالت و مصالح سنگی مطابق فرمول‌های زیر به دست خواهد آمد:

$$G_{mm} = \frac{A}{A-B}, \quad B = D - C \quad (\text{رابطه ۴-۳})$$

A: وزن نمونه آسفالتی در هوا

D: وزن ارلن محتوی آب تا خط نشانه و نمونه بدون هوا

C: وزن ارلن پر از آب

G_{mm} : وزن مخصوص ماکزیمم آسفالت

$$P_{gm} = 100 \times \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \quad (\text{رابطه ۵-۳})$$

P_{gm} : نسبت وزن مخصوص‌هایی محاسباتی آسفالت

G_{mb} : وزن مخصوص واقعی آسفالت که از آزمایش مارشال به دست آمده است

$$V_V = 100 - P_{gm} \quad (\text{رابطه ۶-۳})$$

V_V : درصد حجمی فضای خالی آسفالت

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}} \quad (\text{رابطه ۷-۳})$$

G_{sb} : وزن مخصوص قیر واقعی (gr/cm^3)

P_3, P_2, P_1 : درصد مصالح سنگی درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر

G_3, G_2, G_1 : وزن مخصوص مصالح سنگی درشت‌دانه، ریزدانه و فیلر (gr/cm^3)

$$V.M.A = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \rho_s \quad (\text{رابطه ۸-۳})$$

V.M.A: درصد فضای خالی مصالح سنگی

ρ_s : درصد قیر آسفالت

۳-۳-۲- مقاومت فشاری و روانی مارشال

مقاومت فشاری یا تاب فشاری مارشال عبارت است از حداکثر باری که نمونه تحت آزمایش مارشال بدون اینکه شکستگی در آن ایجاد شود، تحمل می‌نماید. این مقاومت به‌تنهایی معیار پایداری محسوب نمی‌شود بلکه باید جهت تعیین این معیار، دو پارامتر مقاومت فشاری مارشال و روانی باهم بررسی شوند. تغییر شکل نسبی آسفالت یا همان روانی به میزان وارفتگی یا به‌عبارت‌دیگر تغییر شکل آسفالت تحت بار وارده اطلاق می‌شود. هر چه تغییر شکل نسبی بیشتر باشد، میزان وارفتگی آسفالت تحت تاثیر بار بیشتر خواهد بود. تعریف دیگری که می‌توان از روانی ارائه داد عبارت است از میزان فشردگی نمونه قبل از شکستن که در جهت عمود بر آن است.

روش آزمایش بدین‌صورت است که نمونه‌ها را پس از خارج کردن از قالب و انجام آزمایش تعیین وزن مخصوص واقعی، به مدت ۳۰ الی ۴۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای 60 ± 1 درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شوند. در طول این مدت لازم است با دماسنج پیوسته دمای حمام آب را کنترل نماییم تا در محدوده موردنظر باشد. علت انتخاب این شرایط برای نمونه‌ها آن است که بتوان حتی‌الامکان بدترین شرایطی را که ممکن است در عمل آسفالت ایجاد شود، را فراهم نمود.



شکل ۳-۸- نمونه‌ها داخل حمام آب

قبل از آنکه نمونه در بین دو فک دستگاه قرار داده شود، لازم است فکها مانند نمونه‌ها گرم شود و سپس روغن‌کاری شود. سپس نمونه در داخل فکها قرار داده می‌شود و گیج‌ها صفر می‌شوند. حال می‌توان دستگاه را روشن کرده و بارگذاری را شروع کرد. چون دستگاه خودکار است، زمانی که نمونه دچار شکستگی شد، می‌توان به راحتی از روی مانیتور مقادیر مقاومت و وارفتگی را قرائت نمود. هنگامی نمونه دچار شکست می‌شود، درجه بارگذاری افزایش مقاومتی را نشان نمی‌دهد و ثابت می‌ماند؛ دقیقاً در همین لحظه است که باید مقدار وارفتگی قرائت شود. در این مرحله باربرداری نموده و نمونه از بین فکها خارج می‌شود و مطابق فرمول زیر مقاومت مارشال به دست می‌آید.

(رابطه ۳-۹) ضریب تصحیح \times قرائت درجه گیج مقاومت = نیروی مقاومت آسفالت

علت اعمال ضریب تصحیح آن است که نمونه‌ها برای آنکه قابل مقایسه با یکدیگر باشند لازم است از شرایط یکسانی برخوردار باشند اما از آنجاکه حجم نمونه‌ها یکسان نیست و غالباً ضخامت نمونه‌ها نیز از ۴ اینچ کمتر است، بنابراین تصحیح نمونه‌ها برحسب ضخامت و حجم ضرورت می‌یابد. میزان وارفتگی یا روانی نیز مستقیماً از گیج روانی برحسب یک‌دهم میلی‌متر به دست می‌آید.

۳-۴- آزمایش‌های ارزیابی عریان شدگی نمونه‌های آسفالتی

با توجه به آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران کد ۲۳۴، تاثیر آب بر مخلوط‌های آسفالتی و کاهش چسبندگی و مقاومت حاصل از اشباع این مخلوط‌ها در برابر آب باید با آزمایش‌های استاندارد کنترل شود و نتایج مطابق مشخصات زیر باشد.

الف- نسبت متوسط مقاومت فشاری سه نمونه آزمایشگاهی مارشال که ۲۴ ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب 60 ± 1 درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند به متوسط مقاومت سه نمونه دیگر که ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در داخل آب 60 ± 1 درجه سانتی‌گراد یا ۲ ساعت در گرمخانه الکتریکی با همان دما نگهداری شده‌اند نباید کمتر از ۷۵ درصد باشد.

ب- نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک با روش AASHTO-T283 نباید کمتر از ۰/۸ درصد باشد.

علاوه بر دو آزمایش بالا، از آزمایش تجربی آب جوشان نیز برای ارزیابی پتانسیل عریان شدگی نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است.

در ادامه هر سه آزمایش ذکر شده به تفصیل شرح داده می‌شود.

۳-۴-۱- آزمایش استاندارد شده آب جوشان (ASTM-D۳۶۲۵)

از این آزمایش برای ارزیابی مخلوط آسفالتی نامتراکم استفاده می‌شود. در این آزمایش، مصالح سنگی و قیر در دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد مخلوط شده و در دمای اتاق قرار داده می‌شوند. سپس ۲۵۰ گرم از آن در آب جوش به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده می‌شود. پس از آن مخلوط را خشک کرده و به صورت چشمی درصدی از سطح مصالح سنگی که با قیر پوشانده شده است تخمین زده می‌شود. مبنای محک نمونه‌ها در عمل، پوشش ۹۵٪ است. این روش فقط یک ارزیابی مقدماتی برای برهنگی بوده و هیچ بررسی مقاومتی صورت نمی‌گیرد. لازم به ذکر است تعیین میزان عریان شدگی مصالح با این روش مشکل است [۸]. در ادامه تصاویری از آزمایش و وضعیت مصالح بعد از آزمایش را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳-۹- آزمایش آب جوشان (۸)



شکل ۳-۱۰- میزان پوشش فیبری مصالح سنگی بعد از آزمایش (۸)

۳-۴-۲- آزمایش لاتمن اصلاح شده (ASTM-T283)

این روش توسط Kanhal ارائه شده و در سال ۱۹۸۵ مورد قبول آستو قرار گرفت. روش آزمایش به این صورت است که ابتدا ۶ نمونه به قطر ۱۴ اینچ و ارتفاع ۲.۵ اینچ با درصد فضای خالی ۶ - ۸٪ ساخته می‌شوند و در ادامه نمونه‌ها را به روش مارشال متراکم کرده و در ۲ گروه ۳ تایی خشک و اشباع به گونه‌ای تقسیم می‌شوند که متوسط فضای خالی برای هر سری تقریباً برابر باشد. نمونه‌های خشک توسط پلاستیک پوشانده شده و پس از گذراندن ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. نمونه‌های دیگر داخل دستگاه خلأ به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه تحت فشار ۶۷-۱۳ KPa قرار گرفته و پس از گذراندن این مدت به گونه‌ای اشباع می‌شوند که درصد اشباع آن‌ها بین ۵۵-۸۰٪ (AASHTO T283-99) و یا بین ۷۰-۸۰٪ (AASHTO T283-03) شود. پس از آن نمونه‌ها توسط سلفون پوشانده شده و در یک کیسه پلاستیکی به همراه ۱۰ میلی‌متر آب تحت یک چرخه ذوب - یخبندان قرار می‌گیرد به این ترتیب که به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. در پایان نمونه‌های اشباع به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس در دمای اتاق تحت نرخ بارگذاری ۵۵ میلی‌متر بر دقیقه مقاومت کششی این نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری

می‌شود. نتیجه آزمایش (TSR^1) از تقسیم مقاومت کششی نمونه‌های اشباع به مقاومت کششی نمونه‌های خشک به دست می‌آید [۹].

$$TSR = \frac{\text{مقاومت کششی نمونه های اشباع}}{\text{مقاومت کششی نمونه های خشک}} \quad (\text{رابطه ۳-۱۰})$$

حداقل مقدار قابل قبول برای TSR ، $0/8$ است.



شکل ۳-۱۱- اندازه‌گیری مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه (۹)

۳-۴-۳- آزمایش استقامت مارشال ($ASTM-D1075$)

این آزمایش تحت استاندارد $ASTM-D1075$ است. در این روش 1200 گرم مصالح سنگی در دمای 140 تا 170 درجه به مدت 24 ساعت در گرمخانه نگهداری شده و سپس قیر مطابق استاندارد تا دمای 140 درجه گرم شده و با نسبت‌های وزنی 4 ، $4/5$ ، 5 ، 5.5 ، 6 ، $6/5$ درصد با مصالح مخلوط می‌گردد. پس از اختلاط مناسب، نمونه‌ها را در قالب‌های استوانه‌ای به قطر 4 اینچ و ارتفاع 2.5 اینچ

¹Tensile Strength Ratio

ریخته و به کمک چکش ۴.۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۴۶ سانتی‌متر از هر طرف ۷۵ ضربه برای تراکم، به نمونه‌ها وارد می‌شود. برای ارزیابی حساسیت رطوبتی در روش مارشال (MSR^1) باید نسبت متوسط مقاومت ۳ نمونه آزمایشگاهی مارشال که ۲۴ ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرارگرفته (M_S) به متوسط مقاومت ۳ نمونه دیگر که ۳۰ دقیقه در داخل آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرارگرفته (M_d) محاسبه شود. بر اساس دستورالعمل موجود، مقدار نسبت فوق نباید از ۰/۷۵ کمتر باشد [۲۲]. نمایی از دستگاه مقاومت مارشال در تصویر بعدی قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۲- دستگاه مقاومت مارشال (۲۲)

¹ Marshall Stability Ratio

فصل چهارم

یافته‌های پژوهش

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی برای دستیابی به قیر بهینه بیان می‌شود. در ادامه فصل نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، لاتمن اصلاح شده و آب جوشان ذکر می‌شود و در انتهای فصل به کمک نمودارها، نتایج باهم مقایسه می‌شود.

۴-۲- نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها به منظور محاسبه درصد قیر بهینه

۴-۲-۱- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه‌های شاهد

نمونه‌های شاهد مخلوط آسفالتی در ۶ گروه ۳ تایی و با درصد قیرهای به ترتیب ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ ساخته شده‌اند. در جدول زیر مشخصات هر گروه به تفکیک قابل مشاهده است.

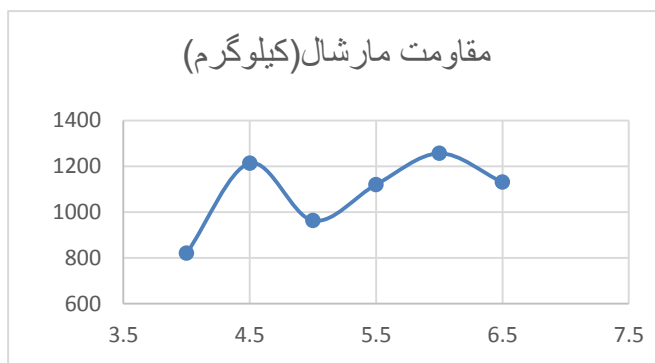
جدول ۴-۱- مشخصات نمونه‌های شاهد

نمونه	وزن خشک (gr)	وزن غوطه‌وری	ارتفاع نمونه (Cm)	مقاومت مارشال (Kg)	روانی (mm)	وزن مخصوص واقعی (Kg/m ³)	وزن مخصوص حداکثر	درصد فضای خالی مصالح سنگی	درصد فضای خالی نمونه
۱	۱۲۴۹	۷۲۲	۶/۶۵	۸۴۰	۳/۳	۲/۳۷	۲/۴۸	۱۲/۵۴	۴/۴۵
۲	۱۲۴۴	۷۱۷	۶/۸	۸۴۰	۳/۴	۲/۳۶	۲/۴۸	۱۲/۵۴	۴/۸۳
۳	۱۲۴۵	۷۲۰	۶/۶	۸۰۰	۳/۲	۲/۳۶	۲/۴۸	۱۲/۵۴	۴/۴
۴	۱۲۵۳	۷۳۰	۶/۶	۱۰۹۰	۴	۲/۳۹	۲/۴۸	۱۲/۰۷	۳/۵
۵	۱۲۵۵	۷۳۲	۶/۶	۱۳۵۰	۴/۵	۲/۴	۲/۴۸	۱۲/۰۷	۳/۶
۶	۱۲۴۶	۷۲۰	۶/۶	۱۲۰۰	۴/۵	۲/۳۷	۲/۴۸	۱۲/۰۷	۳/۶
۷	۱۲۴۸	۷۲۰	۶/۶۵	۹۵۰	۷	۲/۳۶	۲/۴۷	۱۳/۳۸	۴/۴۵
۸	۱۲۵۱	۷۲۳	۶/۶	۸۴۰	۵	۲/۳۷	۲/۴۷	۱۳/۳۸	۴/۰۵
۹	۱۲۵۷	۷۲۶	۶/۶۵	۱۱۰۰	۶/۲	۲/۳۷	۲/۴۷	۱۳/۳۸	۴/۰۵

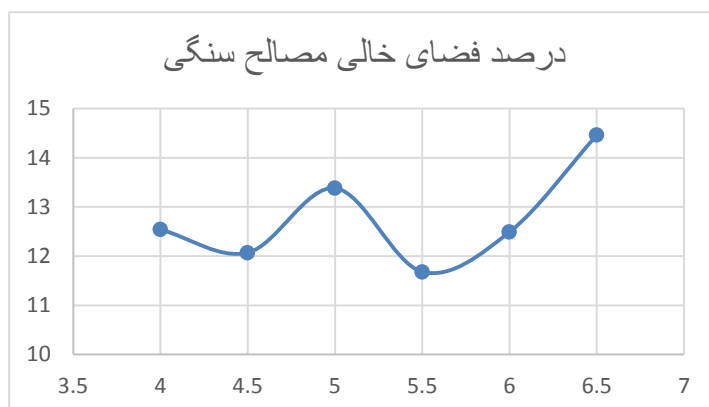
۳/۹۵	۱۱/۶۸	۲/۵۳	۲/۴۳	۶	۱۰۹۰	۶/۵	۷۴۵	۱۲۶۵	۱۰
۳/۹۵	۱۱/۶۸	۲/۵۳	۲/۴۳	۶	۱۱۵۰	۶/۶	۷۴۲	۱۲۵۹	۱۱
۳/۴	۱۱/۶۸	۲/۵۳	۲/۴۲	۶/۵	۱۰۹۰	۶/۵	۷۴۵	۱۲۶۸	۱۲
۳/۶	۱۲/۴۹	۲/۵	۲/۴۳	۷/۵	۱۴۰۰	۶/۵	۷۵۰	۱۲۷۵	۱۳
۳/۶	۱۲/۴۹	۲/۵	۲/۴۱	۸	۱۲۷۰	۶/۶	۷۴۳	۱۲۶۹	۱۴
۳/۶۵	۱۲/۴۹	۲/۵	۲/۴۱	۷/۳	۱۱۰۰	۶/۶	۷۴۰	۱۲۶۵	۱۵
۳/۳	۱۴/۴۶	۲/۴۵	۲/۳۸	۸/۵	۱۱۲۰	۶/۶	۷۳۰	۱۲۶۰	۱۶
۳/۲	۱۴/۴۶	۲/۴۵	۲/۳۷	۸/۷	۱۱۳۰	۶/۶	۷۵۲	۱۲۹۹	۱۷
۳/۲	۱۴/۴۶	۲/۴۵	۲/۳۷	۸/۳	۱۱۴۰	۶/۶	۷۳۵	۱۲۷۱	۱۸

همان‌طور که در ابتدا نیز ذکر شد درصد قیر برای نمونه‌های شاهد از ۴ شروع شده و تا ۶/۵ ادامه پیدا می‌کند که البته با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد درصد قیر بهینه جایی در حدود ۴/۵ تا ۶ است و نیازی به آزمایش درصدهای خارج از این محدوده نیست.

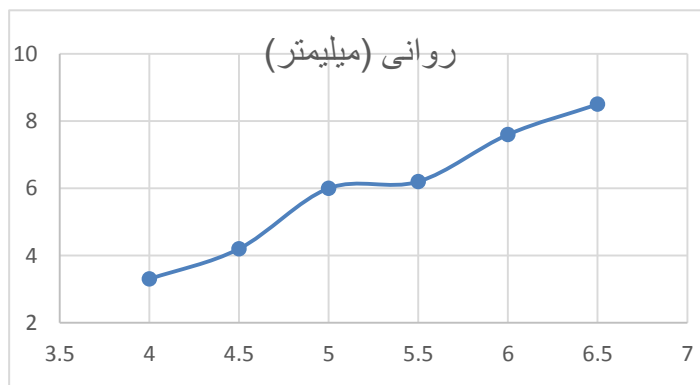
در ادامه با رسم نمودارهای مقاومت مارشال-درصد قیر، روانی-درصد قیر، وزن مخصوص-درصد قیر، فضای خالی نمونه-درصد قیر و فضای خالی مصالح سنگی-درصد قیر، درصد بهینه و مناسب قیر به دست می‌آید. در تمامی نمودارها محور افقی درصد قیر است.



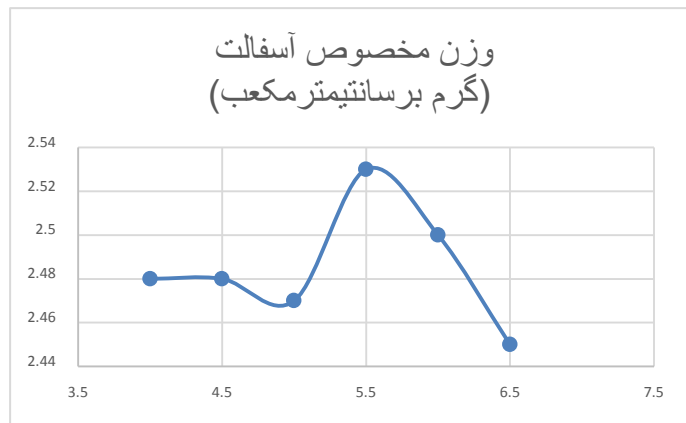
شکل ۴-۱- نمودار درصد وزنی قیر-مقاومت مارشال



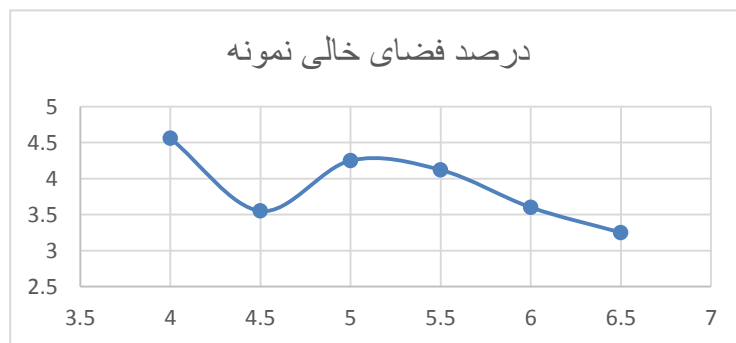
شکل ۴-۲- نمودار درصد وزنی قیر- روانی



شکل ۴-۳- نمودار درصد وزنی قیر- وزن مخصوص آسفالت



شکل ۴-۴- نمودار درصد وزنی قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی



شکل ۴-۵- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه

با تحلیل و بررسی نمودارهای بالا درصد قیر بهینه برای نمونه های شاهد برابر ۴/۲۵ است.

۴-۲-۲- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه های حاوی ۱۲.۵٪ پودر زغال سنگ ضایعاتی

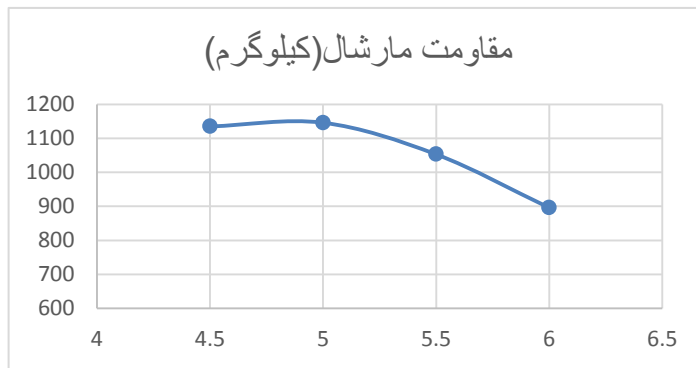
به عنوان فیلر

در این بخش نمونه ها در ۴ گروه ۳ تایی و با درصد قیرهای به ترتیب ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ ساخته شده اند و

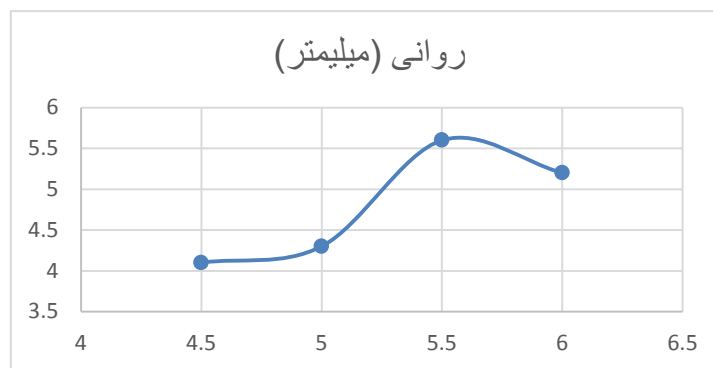
به ترتیب قبل قیر بهینه برای این گروه نیز محاسبه می شود.

جدول ۴-۲- مشخصات نمونه‌های حاوی ۱۲/۵٪ افزودنی ضایعات

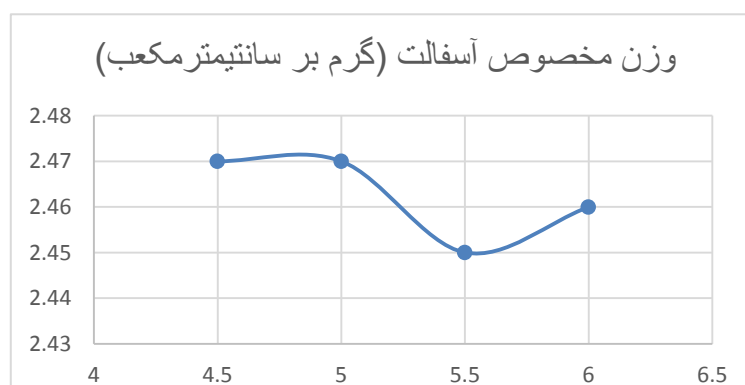
نمونه	وزن خشک (gr)	وزن غوطه‌وری	ارتفاع نمونه (Cm)	مقاومت مارشال (Kg)	روانی (mm)	وزن مخصوص واقعی (Kg/m ³)	وزن مخصوص حداکثر	درصد فضای خالی مصالح سنگی	درصد فضای خالی نمونه
۱	۱۲۶۷	۷۳۳	۶/۸	۹۷۰	۴/۳	۲/۳۷	۲/۴۷	۱۲/۰۱	۴/۰۴
۲	۱۲۵۶	۷۳۰	۶/۶	۹۷۰	۴	۲/۳۹	۲/۴۷	۱۲/۰۱	۳/۲۳
۳	۱۲۸۹	۷۵۲	۶/۷	۱۳۰۰	۴/۱	۲/۴	۲/۴۷	۱۲/۰۱	۲/۸۳
۴	۱۲۷۲	۷۴۳	۶/۶	۱۰۶۰	۴	۲/۴	۲/۴۷	۱۱/۷	۲/۸۳
۵	۱۲۷۲	۷۴۵	۶/۵	۱۳۹۰	۶/۵	۲/۴۱	۲/۴۷	۱۱/۷	۲/۴۳
۶	۱۲۷۶	۷۵۰	۶/۶	۹۹۰	۶/۴	۲/۴۲	۲/۴۷	۱۱/۷	۲/۰۲
۷	۱۲۶۸	۷۴۴	۶/۶	۱۰۷۰	۵/۵	۲/۴۲	۲/۴۵	۱۲/۲	۱/۲۲
۸	۱۲۷۳	۷۳۹	۶/۷	۱۱۰۰	۵/۲	۲/۳۸	۲/۴۵	۱۲/۲	۲/۸۵
۹	۱۲۶۶	۷۴۰	۶/۵	۹۹۰	۶	۲/۴	۲/۴۵	۱۲/۲	۲/۰۴
۱۰	۱۲۵۶	۷۳۳	۶/۳	۷۷۰	۵	۲/۴	۲/۴۶	۱۲/۸۵	۲/۴۳
۱۱	۱۲۸۰	۷۴۲	۶/۵	۸۸۰	۵/۵	۲/۳۸	۲/۴۶	۱۲/۸۵	۳/۲
۱۲	۱۲۷۵	۷۴۷	۶/۵	۱۰۴۰	۵/۵	۲/۴۱	۲/۴۶	۱۲/۸۵	۲/۰۳



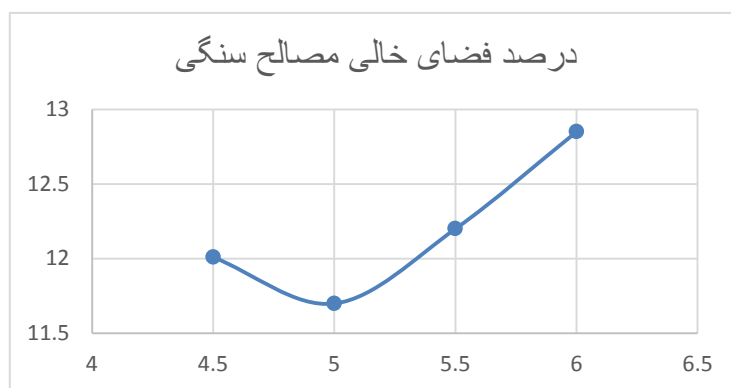
شکل ۴-۶- نمودار درصد قیر- مقاومت مارشال



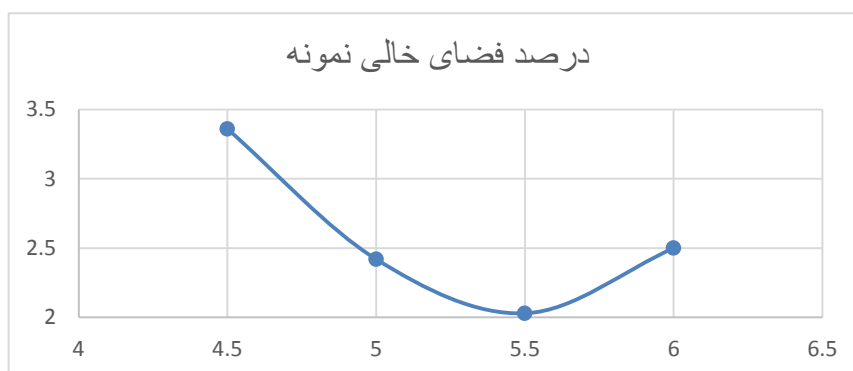
شکل ۴-۷- نمودار درصد قیر- روانی



شکل ۴-۸- نمودار درصد قیر- وزن مخصوص آسفالت



شکل ۴-۹- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی



شکل ۴-۱۰- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه

با توجه به نتایج ارائه شده در نمودارهای بالا درصد قیر بهینه برای این گروه برابر با $4/5$ است.

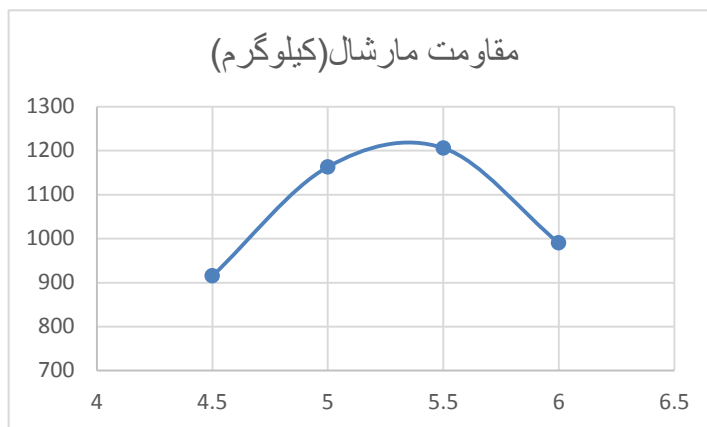
۴-۲-۳- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه‌های حاوی ۲۵٪ پودر زغال سنگ ضایعاتی به‌عنوان

فیلر

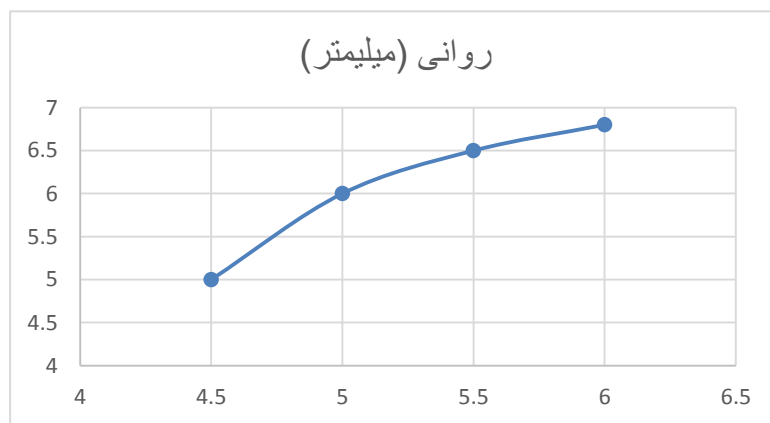
در این بخش نمونه‌ها در ۴ گروه ۳ تایی و با درصد قیرهای به ترتیب $4/5$ ، 5 ، $5/5$ و 6 ساخته شده‌اند و به ترتیب قبل قیر بهینه برای این گروه نیز محاسبه می‌شود.

جدول ۴-۳- مشخصات نمونه‌های حاوی ۲۵٪ افزودنی ضایعات

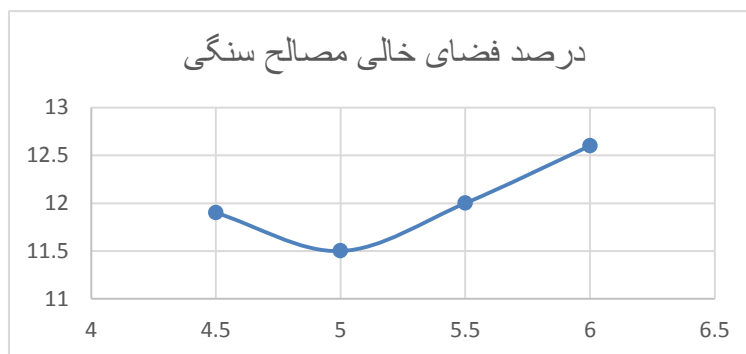
نمونه	وزن خشک (gr)	وزن غوطه‌وری	ارتفاع نمونه (Cm)	مقاومت مارشال (Kg)	روانی (mm)	وزن مخصوص واقعی (Kg/m ³)	وزن مخصوص حداکثر	درصد فضای خالی مصالح سنگی	درصد فضای خالی نمونه
۱	۱۲۵۸	۷۳۳	۶/۶	۱۳۹۰	۶	۲/۳۷	۲/۴۵	۱۱/۹	۳/۲۶
۲	۱۲۶۲	۷۲۵	۶/۷	۹۰۰	۵	۲/۳۵	۲/۴۵	۱۱/۹	۴/۰۸
۳	۱۲۶۵	۷۲۶	۶/۷	۹۳۰	۵	۲/۳۵	۲/۴۵	۱۱/۹	۴/۰۸
۴	۱۲۷۱	۷۳۰	۶/۷۵	۹۵۰	۵/۵	۲/۳۵	۲/۴۵	۱۱/۵	۴/۰۸
۵	۱۲۷۰	۷۳۵	۶/۶	۱۳۰۰	۶/۵	۲/۳۷	۲/۴۵	۱۱/۵	۳/۲۶
۶	۱۲۸۵	۷۵۰	۶/۶	۱۲۴۰	۶/۳	۲/۴	۲/۴۵	۱۱/۵	۲/۰۴
۷	۱۲۸۳	۷۴۲	۶/۷	۱۳۴۰	۶/۵	۲/۳۷	۲/۴۴	۱۲	۲/۸۶
۸	۱۲۶۸	۷۴۰	۶/۶	۱۱۵۰	۷	۲/۴	۲/۴۴	۱۲	۲/۰۴
۹	۱۲۶۷	۷۳۷	۶/۷	۱۱۳۰	۶/۲	۲/۳۹	۲/۴۴	۱۲	۲/۰۵
۱۰	۱۲۶۵	۷۳۱	۶/۶۵	۱۰۳۰	۶/۵	۲/۳۷	۲/۴۲	۱۲/۶	۱/۲۵
۱۱	۱۲۸۵	۷۴۵	۶/۶	۱۰۹۰	۷/۵	۲/۳۸	۲/۴۲	۱۲/۶	۰/۸
۱۲	۱۲۷۴	۷۳۹	۶/۶	۸۵۰	۶	۲/۳۸	۲/۴۲	۱۲/۶	۰/۸



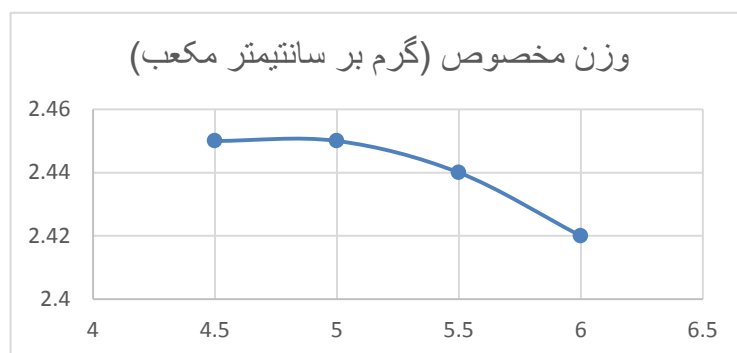
شکل ۴-۱۱ - نمودار درصد قیر- مقاومت مارشال



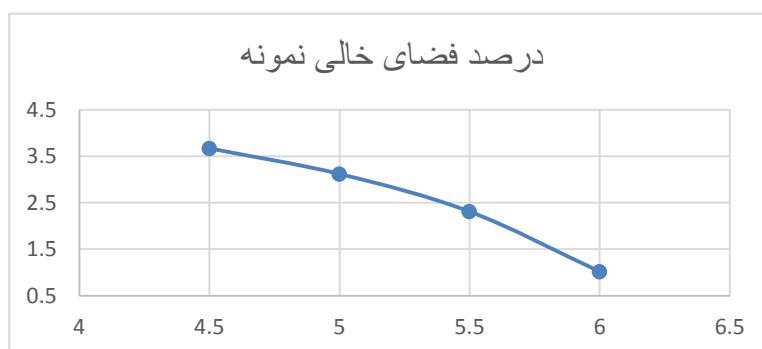
شکل ۴-۱۲ - نمودار درصد قیر- روانی



شکل ۴-۱۳ - نمودار درصد قیر- وزن مخصوص



شکل ۴-۱۴- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی



شکل ۴-۱۵- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه

درصد قیر بهینه برای نمونه های این گروه نیز برابر با ۴/۲۵ است.

۴-۲-۴- محاسبه درصد قیر بهینه نمونه های حاوی ۵۰٪ پودر زغال سنگ ضایعاتی به عنوان

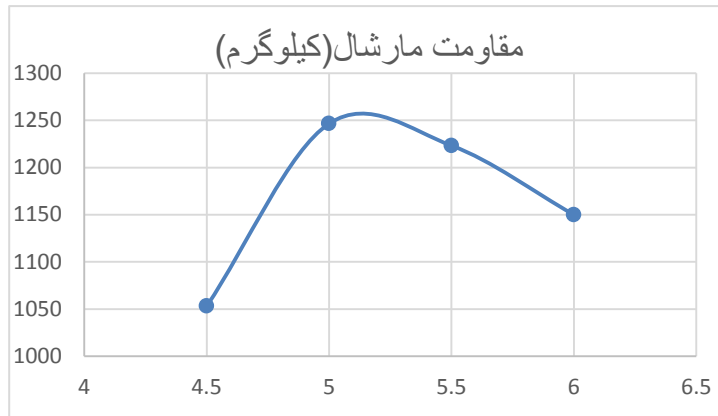
فیلر

در این بخش نمونه ها در ۴ گروه ۳ تایی و با درصد قیرهای به ترتیب ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶

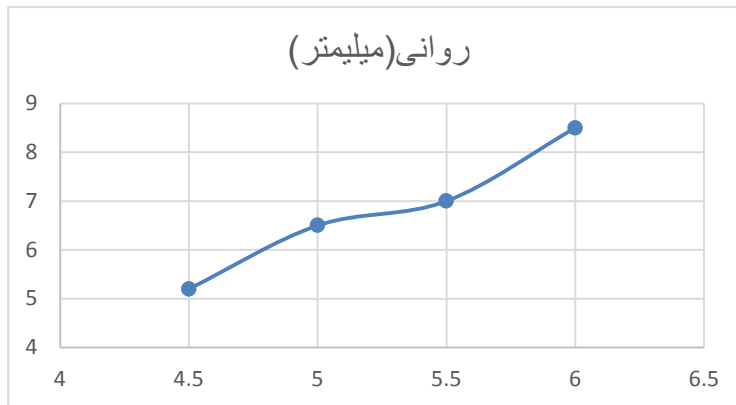
ساخته شده اند و به ترتیب قبل قیر بهینه برای این گروه نیز محاسبه می شود.

جدول ۴-۴ - مشخصات نمونه‌های حاوی ۵۰٪ افزودنی ضایعات

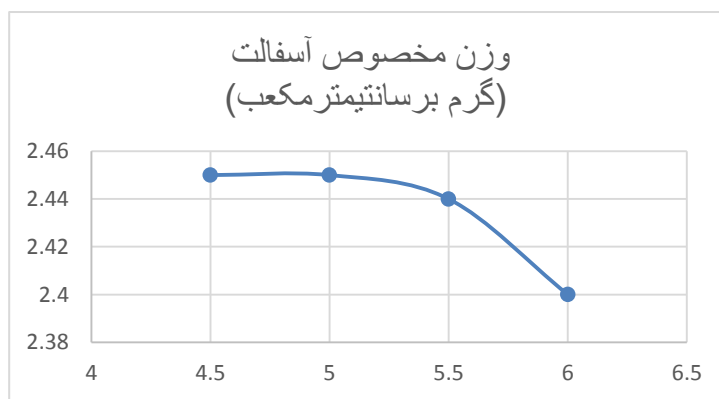
نمونه	وزن خشک (gr)	وزن غوطه‌وری	ارتفاع نمونه (Cm)	مقاومت مارشال (Kg)	روانی (mm)	وزن مخصوص واقعی (Kg/m ³)	وزن مخصوص حداکثر	درصد فضای مصالح سنگی	درصد فضای خالی نمونه
۱	۱۲۴۷	۷۳۰	۶/۵	۱۲۰۰	۵/۲	۲/۴۱	۲/۴۵	۱۱/۷۵	۱/۶۳
۲	۱۲۴۸	۷۳۰	۶/۶	۹۶۰	۵/۵	۲/۴۱	۲/۴۵	۱۱/۷۵	۱/۶۳
۳	۱۲۴۸	۷۲۸	۶/۶	۱۰۰۰	۵/۲	۲/۴	۲/۴۵	۱۱/۷۵	۲/۰۴
۴	۱۲۶۵	۷۴۵	۶/۶	۱۱۵۰	۶	۲/۴۳	۲/۴۵	۱۱/۳	۰/۸
۵	۱۲۵۱	۷۳۷	۶/۵۵	۱۳۵۰	۷	۲/۴۳	۲/۴۵	۱۱/۳	۰/۸
۶	۱۲۴۸	۷۳۵	۶/۵۵	۱۲۴۰	۶	۲/۴۳	۲/۴۵	۱۱/۳	۰/۸
۷	۱۲۷۰	۷۴۸	۶/۶	۱۳۵۰	۷/۵	۲/۴۳	۲/۴۴	۱۱/۹۵	۰/۴۱
۸	۱۲۵۸	۷۴۰	۶/۵	۱۲۰۰	۶/۵	۲/۴۳	۲/۴۴	۱۱/۹۵	۰/۴۱
۹	۱۲۶۱	۷۳۹	۶/۶	۱۱۲۰	۷/۵	۲/۴۱	۲/۴۴	۱۱/۹۵	۱/۲
۱۰	۱۲۸۰	۷۴۴	۶/۷	۱۱۵۰	۹/۵	۲/۳۸	۲/۴	۱۲/۵	۰/۸
۱۱	۱۲۶۴	۷۳۶	۶/۵	۱۱۸۰	۷/۵	۲/۳۹	۲/۴	۱۲/۵	۰/۴
۱۲	۱۲۶۷	۷۳۵	۶/۶۵	۱۱۲۰	۸	۲/۳۸	۲/۴	۱۲/۵	۰/۸



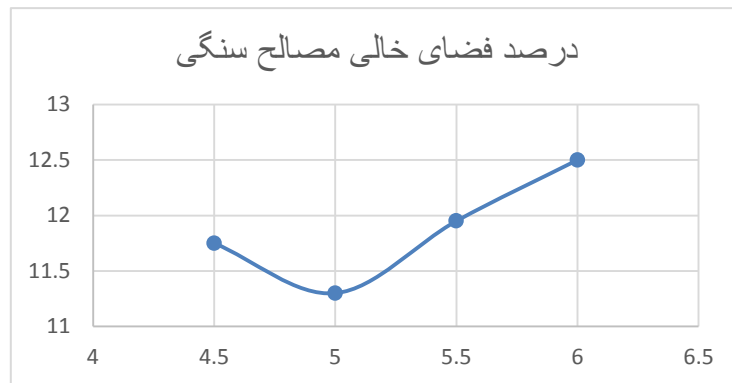
شکل ۴-۱۶ - نمودار درصد قیر - مقاومت مارشال



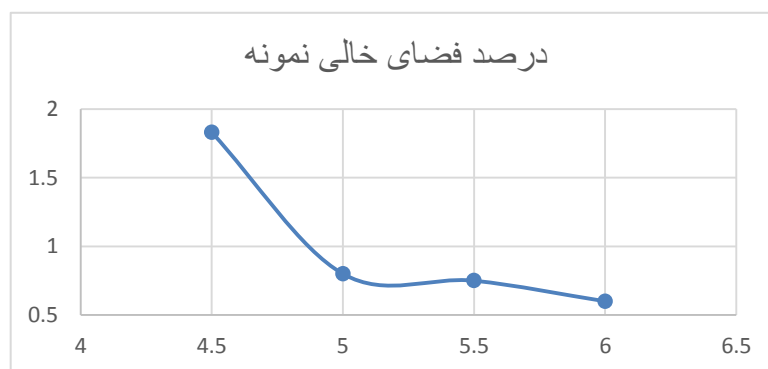
شکل ۴-۱۷ - نمودار درصد قیر - روانی



شکل ۴-۱۸ - نمودار درصد قیر - وزن مخصوص آسفالت



شکل ۴-۱۹- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی مصالح سنگی



شکل ۴-۲۰- نمودار درصد قیر- درصد فضای خالی نمونه

و سرانجام درصد قیر بهینه برای آخرین گروه از نمونه ها نیز برابر با ۴٪ است.

۴-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری مارشال

ابتدا نتایج نمونه‌های شاهد و ۳ درصد مختلف افزودنی را جداگانه در جداول زیر بررسی کرده و در ادامه آن‌ها را با یکدیگر مقایسه می‌نماییم.

جدول ۴-۵- حساسیت رطوبتی نمونه‌های شاهد

نمونه اشباع			نمونه خشک			شماره
روانی	مقاومت مارشال	وزن خشک	روانی	مقاومت مارشال	وزن خشک	
۵/۵	۱۲۲۰	۱۲۴۶	۵	۸۲۰	۱۲۵۲	۱
۶	۸۹۰	۱۲۴۹	۴/۸	۹۳۰	۱۲۴۷	۲
۵/۵	۹۰۰	۱۲۴۸	۴/۵	۱۲۲۰	۱۲۵۰	۳

جدول ۴-۶- حساسیت رطوبتی نمونه‌های ۱۲.۵٪ ضایعات زغال‌سنگ

نمونه اشباع			نمونه خشک			شماره
روانی	مقاومت مارشال	وزن خشک	روانی	مقاومت مارشال	وزن خشک	
۵/۳	۹۰۰	۱۲۴۹	۴/۳	۹۷۰	۱۲۶۷	۱
۴/۸	۷۹۰	۱۲۵۰	۴	۹۷۰	۱۲۵۶	۲
۵	۱۱۶۰	۱۲۵۰	۴/۱	۱۳۰۰	۱۲۸۹	۳

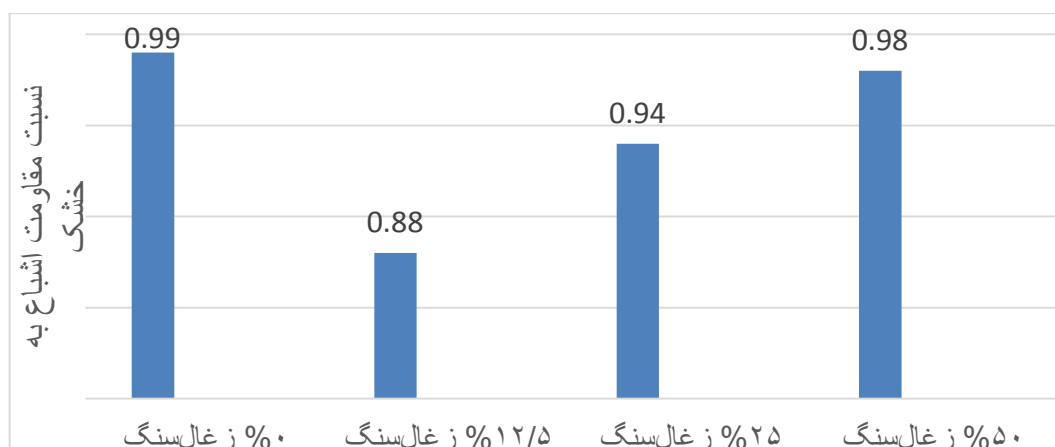
جدول ۴-۷- حساسیت رطوبتی نمونه‌های ۲۵٪ ضایعات زغال‌سنگ

نمونه اشباع			نمونه خشک			شماره
روانی	مقاومت مارشال	وزن خشک	روانی	مقاومت مارشال	وزن خشک	
۵/۷	۸۹۰	۱۲۴۲	۶/۶	۹۱۰	۱۲۴۲	۱
۶/۵	۱۰۰۰	۱۲۴۵	۴/۸	۹۱۰	۱۲۴۹	۲
۴/۸	۸۵۰	۱۲۴۴	۴/۹	۱۱۰۰	۱۲۵۱	۳

جدول ۴-۸- حساسیت رطوبتی نمونه‌های ۵۰٪ ضایعات زغال‌سنگ

شماره	نمونه خشک			نمونه اشباع		
	وزن خشک	مقاومت مارشال	روانی	وزن خشک	مقاومت مارشال	روانی
۱	۱۲۴۳	۶۹۰	۳/۹	۱۲۴۲	۷۷۰	۴/۱
۲	۱۲۴۵	۱۲۰۰	۴/۵	۱۲۴۴	۹۲۰	۵
۳	۱۲۴۷	۸۲۰	۷	۱۲۴۴	۸۷۰	۴/۵

برای مقایسه بهتر نتایج حاصل از آزمایش از نمودار پایین کمک گرفته می‌شود.



شکل ۴-۲۱- نتایج MSR

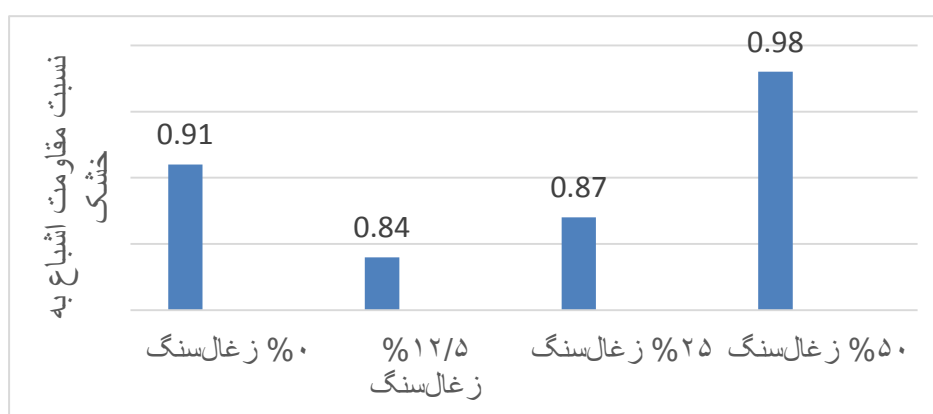
۴-۴- نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده

در این بخش نیز به مانند آزمایش قبلی نتایج نمونه‌های شاهد و سایر نمونه‌های حاوی افزودنی در جدول زیر قابل مشاهده است.

جدول ۹-۴- نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده

نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک	مقاومت کششی (KPa)	درصد اشباع شدگی	درصد فضای خالی	وزن مخصوص (میانگین)	حالت نمونه	نمونه
۰/۹۱	۶۴۴	۷۸	۳/۷	۲/۳۶	معمولی	شاهد
	۵۸۸		۳/۴	۲/۳۶۶	اشباع	
۰/۸۴	۷۳۴	۷۷	۳/۷	۲/۳۷۹	معمولی	زغال سنگ %۱۲/۵
	۶۱۶		۳/۸	۲/۳۷۵	اشباع	
۰/۸۷	۷۴۸	۷۸	۴/۱	۲/۳۴۹	معمولی	زغال سنگ %۲۵
	۶۵۲		۳/۸	۲/۳۵۷	اشباع	
۰/۹۸	۶۶۴	۷۸	۴/۲	۲/۳۳۸	معمولی	زغال سنگ %۵۰
	۶۵۲		۴/۷	۲/۳۲۶	اشباع	

نتایج به صورت شماتیک در نمودار زیر قابل مشاهده است.



شکل ۴-۲۲- نتایج TSR

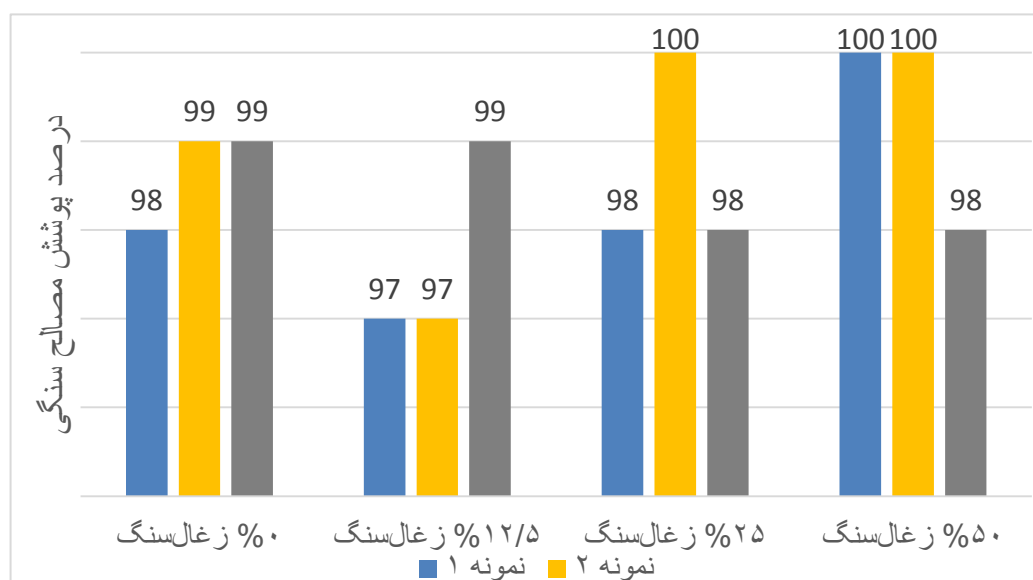
۴-۵- نتایج آزمایش استاندارد شده آب جوشان

همان طور که در شرح آزمایش ذکر شد این آزمایش تجربی بوده و با خطا همراه است از این رو برای بالا بردن دقت در هر درصد زغال سنگ، ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت.

جدول ۴-۱۰- نتایج آزمایش آب جوشان

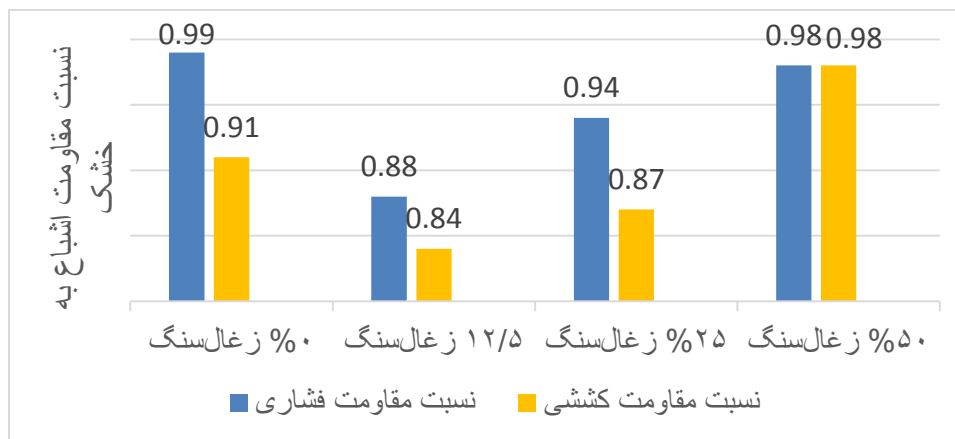
درصد وزنی فیلر زغال سنگ	درصد پوشش مصالح سنگی
۰	۹۸،۹۹،۹۹
۱۲/۵	۹۷،۹۷،۹۹
۲۵	۹۸،۱۰۰،۹۸
۵۰	۱۰۰،۱۰۰،۹۸

نمودار پایین تکمیل کننده نتایج آزمایش است.



شکل ۴-۲۳- نتایج آزمایش آب جوشان

برای اینکه درک بهتری از تاثیر فیلر زغال سنگ بر مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها داشته باشیم در نمودار بعدی نتایج دو آزمایش مقاومت فشاری و لاتمن باهم مقایسه می‌شود.



شکل ۴-۲۴ - مقایسه نسبت مقاومت کششی و فشاری

فصل پنجم

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۵-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی و تحلیل یافته‌های پژوهش که در فصل قبل آمده است پرداخته می‌شود و در انتها به بحث و جمع‌بندی کلی پیرامون نتایج پرداخته می‌شود.

۵-۲- تحلیل نتایج

در ابتدا به بررسی چرایی استفاده از درصد‌های مختلف افزودنی پودر زغال‌سنگ پرداخته می‌شود. همان‌طور که ذکر شد در این پژوهش به ترتیب ۱۲/۵، ۲۵ و ۵۰ درصد افزودنی ضایعات استفاده شد اما در ابتدا قرار بود تا ۱۰۰٪ جایگزینی انجام شود. طی بررسی‌های انجام‌شده روی نمونه‌های ۵۰٪ افزودنی مشاهده گردید فضای خالی نمونه‌های آسفالتی به‌شدت نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش می‌یابد در نتیجه به‌جای بالا بردن این درصد، حد وسط بین نمونه‌های شاهد و نمونه‌های ۵۰٪ در نظر گرفته شد و با بررسی نتایج مشاهده گردید فضای خالی بیشتر شده و درصدی میان نمونه‌های شاهد و نمونه‌های ۵۰٪ است. در نهایت تصمیم بر این شد که مقدار افزودنی زغال‌سنگ بیشتر از ۵۰٪ جایگزینی وزنی نباشد.

حال در ادامه به بررسی تاثیر پودر زغال‌سنگ بر پارامترهای مختلف آسفالت پرداخته می‌شود.

با افزایش درصد زغال‌سنگ، مقاومت مارشال به مقدار جزئی افزایش می‌یابد. همچنین روانی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد.

وزن مخصوص‌ها تقریباً در یک بازه یکسان است و تغییرات چشمگیر نیست.

همان‌طور که در ابتدای همین بخش نیز ذکر شد فضای خالی نمونه‌های آسفالتی با افزایش درصد زغال‌سنگ به‌شدت کاهش یافت که این کاهش به مقدار کمتر در مورد فضای خالی مصالح سنگی نیز صادق است.

در بخش آزمایش‌های عریان شدگی به‌طور کلی زغال‌سنگ یا باعث بهبود عملکرد شده و یا تاثیر خاصی نداشته است بدین معنی که در هیچ حالتی باعث تضعیف عملکرد نمونه‌ها نمی‌شود.

- در آزمایش آب جوشان با بررسی‌های انجام‌شده مشاهده گردید نمونه‌های شاهد به‌خودی‌خود عملکرد قابل قبولی داشتند. زمانی که کمترین مقدار افزودنی به نمونه‌ها اضافه شد افت نسبی در پوشش مصالح مشاهده شد اما با افزایش درصد ضایعات، پوشش مصالح سنگی با قیر بیشتر شد و در بالاترین درصد حتی عملکردی بهتر از نمونه‌های شاهد داشت به‌طوری‌که در ۲ بار از ۳ بار تکرار آزمایش در پوشش مصالح هیچ‌گونه عریان شدگی مشاهده نشد.

- در آزمایش مقاومت فشاری به‌مانند قبل نمونه‌های شاهد عملکرد خوبی را از خود به‌جای گذاشتند. با اضافه کردن افزودنی به مقدار ۱۲/۵ درصد در ابتدا شاهد افت نسبت تا ۰/۸۸ هستیم اما با اضافه کردن درصد افزودنی نسبت مقاومت نیز افزایش‌یافته و در بالاترین درصد تقریباً برابر با نسبت نمونه‌های شاهد می‌شود. نکته جالب این است که با افزایش درصد زغال‌سنگ هم متوسط مقاومت فشاری خشک نمونه‌ها و هم متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های اشباع کاهش می‌باید به‌طوری‌که در ابتدا برای نمونه‌های خشک این مقدار برابر با ۳۲۴۰ کیلوپاسکال است که با روند کاهش به مقدار ۲۶۱۰ کیلوپاسکال می‌رسد و همچنین متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های اشباع در کمترین درصد افزودنی ۲۸۵۰ کیلوپاسکال است که با افزایش درصد افزودنی این مقدار کاهش می‌باید و در نهایت به ۲۵۶۰ کیلوپاسکال برای درصد ۵۰ می‌رسد.

- و اما در آخرین آزمایش که مربوط به نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها می‌شود (لاتمن اصلاح‌شده)، به‌مانند ۲ آزمایش قبل نسبت مقاومت نمونه‌های شاهد قابل‌قبول بوده (۰/۹۱) و این مقدار با افزودن اولین درصد از پودر ضایعات کاهش می‌باید و به ۰/۸۴ می‌رسد اما به‌مانند قبل با افزایش درصد این نسبت نیز افزایش می‌باید و در بالاترین درصد حتی نمونه‌های شاهد نیز عملکرد بهتری دارند و به نسبت ۰/۹۸ می‌رسد.

در این بخش نیز نکته قابل تأمل این است که نه تنها مانند آزمایش قبلی با افزایش درصد افزودنی کاهشی در مقاومت نمونه‌ها مشاهده نمی شود بلکه در برخی موارد این مقدار نیز افزایش می‌یابد.

در بخش نمونه‌های خشک، مقدار متوسط مقاومت در ابتدا از ۷۳۴ کیلوپاسکال به ۷۴۸ افزایش می‌یابد و سپس به ۶۶۴ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد. اما متوسط مقاومت نمونه‌های اشباع که در ابتدا ۶۱۶ کیلوپاسکال است به ۶۵۲ افزایش می‌یابد و همین مقدار برای درصد بعدی نیز باقی می‌ماند.

۵-۳- مقایسه و بررسی نتایج دو آزمون MSR و TSR

در تمامی درصدها نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها یا کمتر از نسبت مقاومت فشاری است یا نهایتاً با آن برابر است. در نمونه‌های شاهد این نسبت در بخش مقاومت کششی ۰/۹۱ و در بخش مقاومت فشاری ۰/۹۹ است. با افزودن اولین درصد ضایعات نسبت مقاومت فشاری به ۰/۸۸ و کششی به ۰/۸۴ کاهش می‌یابد. در درصد بعدی این مقدار به ۰/۹۴ برای مقاومت فشاری نمونه‌ها و ۰/۸۷ برای مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و در نهایت در بالاترین درصد این نسبت برابر با ۰/۹۸ برای هر دو حالت فشاری و کششی است.

می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که در مجموع نمونه‌های آسفالتی در فشار به نسبت کشش مقاومت‌پذیری بیشتری دارند.

۵-۴- پیشنهاد ادامه تحقیق

- با توجه به اثر مثبت فیلر پودر زغال‌سنگ بر مقاومت عریان شدگی آسفالت، می‌توان اثر این فیلر بر سایر خصوصیات مکانیکی آسفالت از قبیل عمر خستگی و مدول برجهندگی آسفالت نیز بررسی شود.
- بررسی اثر استفاده از ضایعات زغال‌سنگ به‌عنوان جایگزین ریزدانه یا ماسه در آسفالت
- بررسی اثر استفاده از خاکستر صنعتی زغال‌سنگ به‌عنوان فیلر در آسفالت

منابع

- [1]- Santucci, L. (2003) , Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements, Technology Transfer Program, Institute of Transportation Studies, Pavement Research Center, UC Berkeley
- [2]- Kezhen, Y. Hong-bin Xu, Heng-long Zhang. (2013). Effect of mineral filler on properties of warm asphalt mastic containing sasobit. Constr. Build. Master.
- [۳]- اسمعیلی ، علی محمد ، (۱۳۷۸) ، تاثیر نوع و میزان فیلر بر خواص مخلوط‌های آسفالتی ، نشریه ژئوتکنیک و مقاومت مصالح
- [۴]- مدرس ، امیر ، (۱۳۹۴) ، تاثیر فیلر ضایعات زغال سنگ و خاکستر آن بر دوام مخلوط آسفالت گرم و مقایسه آن با پودر سنگ آهک ، مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، سال اول ، شماره اول
- [5]- Solaimanian, M. , J. Harvey, M. Tahmoressi and V. Tandon, (2003), Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-mix Asphalt Pavements. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar, San Diego, CA, Tran
- [6]- Yong-Rak Kim et al. (2008), Evaluation of Moisture Damage Mechanisms and Effects of Hydrated lime in Asphalt Mixture through measurements of Mixture Component Properties and Performance Testing, Journal of materials in civil engineering
- [7]- AASHTO T234, Hamburg Wheel-Track Testing Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)
- [8]- ASTM D3625, Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water
- [9]- AASHTO T283, Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave
- [10]- **ASTM D1075**, Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures

[۱۱]- عامری ، منصور ، (۱۳۹۱) ، بررسی مکانیزم عریان شدگی و عوامل موثر در بروز آن ، کنفرانس

ملی زیرساخت‌های حمل‌ونقل

[12]- Pinto, I. , Y.Kim , and H.Ban , Moisture Sensitivity of hot mix asphalt (HMA) mixture in Nebraska-Phase II , 2009

[13]- Harvey , J. T. and Q.Lu , investigation of conditions for Moisture Damage in Asphalt Concrete and Appropriate laboratory Test Methods, 2005

[14]- Viswanathan, A.G. , Investigation of moisture sensitivity of hot mix asphalt concrete, West Virginia University, 2006

[15]- Gorkem, Cagri. Sengoz, Burak, (2008), predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime, Construction and Building Materials

[16]- Abo-Qudais, Saad et al, (2005), Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behavior, Construction and Building Materials

[17]- Buss, Ashley et al, (2015), Evaluation of moisture susceptibility tests for warm mix asphalts, Construction and Building Materials

[۱۸]- فخری، منصور. بوالحسنی، محمد ، (۱۳۸۹) ، بررسی تاثیر استفاده هم‌زمان فیلر آهکی و آنتی استریپینگ مایع بر روی خرابی عریان شدگی بتن آسفالتی گرم ، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران

[۱۹]- علیزاده، علی. عمرانی، حامد. منجم، سعید ، (۱۳۹۲) ، بررسی تاثیر مواد ضد عریان شدگی بر روی مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) ، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران

[۲۰]- فخری، منصور. خیری، پژوهان ، بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزودنی‌های مختلف بر پدیده عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم ، چهارمین همایش قیر و آسفالت ایران

[۲۱]- آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴- تجدیدنظر دوم) ، دفتر امور فنی و تدوین معیارهای سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۲

[22]- ASTM-D1559, **MARSHALL MIX DESIGN AND ANALYSIS**

Abstract

The presence of water in the production and operation process of hot asphalt pavement makes problem and may cause either the loss of the adhesion between bitumen and aggregates or loosening it. This damage, which would cause the removal of the asphalt surface materials, is known as stripping. In the present study, the samples containing zero, 12.5 %, 25 %, and 50 % by weight of coal-waste filler instead of limestone powder are constructed and their performance are evaluated. Some tests including modified Lottman (AASHTO T283), Marshal Stability (ASTM D1075) and boiling water tests (ASTM D3625) are used in order to determine the resistance of the mixtures against moisture and stripping. The results showed that the ratio of compression and tensile strength of samples enhanced by increasing the percentage of coal powder. In addition, increasing the percentage of coal in boiling water test improved the adhesion between the bitumen and aggregates.

Keywords: coal waste, filler, stripping, adhesion of the bitumen and aggregates



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

**Laboratory evaluation of the effect of coal-waste filler on stripping
of hot-mix asphalts**

By: Alireza Danandeh

Supervisor:

Dr. Hossein Ghasemzadeh Tehrani

February 2017