

ارائه مدل تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آسفالت با استفاده از پارامترهای آزمایش مارشال

حسن زیاری، استاد، مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

حسن دیوانداری*، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

حسین شالچی طوسی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه پیام نور، مرکز بین‌الملل عسلویه

Email: Divandari@iauns.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۷/۰۳ - پذیرش: ۹۶/۰۵/۰۸

چکیده

روسازی راه‌ها بخش قابل ملاحظه‌ای از ثروت ملی هر کشوری را تشکیل داده و همه‌ساله سرمایه هنگفتی صرف نگهداری، تعمیر و ترمیم آن می‌گردد. یکی از شایع‌ترین خرابی‌های روسازی‌های انعطاف‌پذیر، که عمدتاً ناشی از ضعف مقاومت برشی آسفالت می‌باشد، شیارشدگی است. راهکار اصولی جلوگیری از ایجاد چنین پدیده مخربی، استفاده از مخلوط‌هایی است که مقدار پارامترهای مؤثر در مقاومت برشی آسفالت در آن‌ها کنترل شده باشد. پارامترهای چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) آسفالت، در نهایت تعیین‌کننده میزان مقاومت برشی روسازی هستند. بهترین روش جهت تعیین C و ϕ آسفالت، انجام آزمون سه‌محوری نمونه‌های آسفالتی می‌باشد. اما دلایلی همچون پُرهزینه بودن انجام این آزمون و همچنین عدم وجود دستگاه سه‌محوری آسفالت در کشور، انجام این آزمایش را عملاً ناممکن ساخته است. از طرفی، دستگاه مارشال در دورافتاده‌ترین کارگاه‌ها نیز موجود بوده و به جهت انجام طرح اختلاط به صورت وسیع در ایران استفاده می‌گردد. به همین دلیل، در این پژوهش، سعی گردید روابطی جهت تعیین C و ϕ آسفالت با استفاده از پارامترهای مارشال ارائه شود. روابط به‌دست آمده نشان می‌دهند که ارتباط مناسبی بین پارامترهای مقاومت برشی آسفالت با روانی و استحکام مارشال وجود دارد. با استفاده از این معادلات، همزمان با ارائه طرح اختلاط در آزمایشگاه و پیش از تولید کارخانه‌ای آسفالت، حدود C و ϕ نیز برای آن تعیین می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان از تولید انبوه آسفالت با پتانسیل بالای شیارشدگی جلوگیری کرد.

واژه‌های کلیدی: چسبندگی آسفالت، زاویه اصطکاک داخلی آسفالت، آزمایش سه‌محوری

۱. مقدمه

با توجه به جایگاه و اهمیت شبکه راه‌ها در سیستم حمل و نقل کشور، حفظ و نگهداری وضعیت رویه راه‌ها در حد مطلوب و قابل قبول از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین، شناخت انواع خرابی‌های روسازی و تعیین علل و دلایل به وجود آمدن آنها باعث پیشگیری از ایجاد خرابی‌ها و نیز موجب افزایش طول عمر روسازی‌ها خواهد گردید. ضمن آنکه می‌توان با اتخاذ راهکارهای فنی و مناسب، نسبت به ترمیم روسازی‌ها اقدام نمود (عامری و نادران، ۱۳۸۳). شیارشدگی^۱ یکی از انواع خرابی‌های روسازی‌های انعطاف‌پذیر است که عمدتاً از ضعف مقاومت برشی آسفالت ناشی شده و همه ساله منجر به تحمیل هزینه‌های گزاف می‌گردد. اثبات شده است که می‌توان با لحاظ پارامترهای مقاومت برشی شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در طرح مخلوط‌های آسفالتی از وقوع شیارشدگی جلوگیری نمود (زیاری و دیواندری، ۲۰۱۳). از طرفی، در ایران، از روش مارشال که یک روش تجربی و فاقد پارامترهای دخیل در مقاومت برشی آسفالت است، به‌عنوان روش مرسوم طرح مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. مدلی که بتواند با استفاده از پارامترهای مارشال، مقادیر C و ϕ را پیش‌بینی کند، در هنگام ارائه طرح اختلاط، وضعیت مقاومت برشی را مشخص نموده و بدین ترتیب از تولید آسفالت با پتانسیل بالای شیارشدگی در مقیاس کارخانه‌ای جلوگیری می‌گردد.

۲. تعریف مسئله

۱-۲. اهمیت تحقیق

بیشتر خرابی‌هایی که در طول عمر مفید روسازی‌های انعطاف‌پذیر رخ می‌دهند عمدتاً از نوع تغییرشکل‌های دائمی^۲ در مسیر چرخ وسایط نقلیه (شیارافتادگی) و همچنین از نوع ترک‌های ناشی از خستگی^۳ و ترک‌های حرارتی^۴ می‌باشند. اما شیارشدگی که به‌عنوان عامل اصلی خرابی زودرس در اکثر راه‌ها مطرح است از اهمیت نسبی بیشتری برخوردار بوده و به علل زیر از مضرترین خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی محسوب می‌گردد:

الف) گسترش شیارشدگی با گذشت زمان باعث کاهش ایمنی و عمر خدمت‌دهی روسازی می‌گردد.

ب) این پدیده می‌تواند ظرفیت زهکشی روسازی را کاهش داده و به تجمع آب و پدیده هیدروپلانینگ^۵ منتج گردد. همچنین باعث تسریع خرابی روسازی بر اثر رطوبت گردیده و به بروز تصادفات ترافیکی نیز منجر شود (فن و لین، ۲۰۱۱).

ج) شیارشدگی می‌تواند سبب ایجاد قیرزدگی^۶ شود و با کاهش اصطکاک، ایمنی مسیر را تحت تأثیر قرار دهد.

د) شیارشدگی با کاهش ضخامت روسازی، موجب افزایش احتمال شکست روسازی بر اثر ترک‌های خستگی می‌گردد.

برای کاهش احتمال ایجاد پدیده شیارشدگی، لازم است ابتدا معیارهای دخیل در مقاومت برشی آسفالت (معیارهای مقاومت برشی موهر- کلمب) شامل

۴- Temperature cracking

۵- Hydroplaning

۶- Bleeding

۱- Rutting

۲- Permanent deformation

۳- Fatigue cracking

قیر و زاویه اصطکاک داخلی سنگدانه‌ها، تأمین‌کننده مقاومت برشی آسفالت هستند و افزایش این مقاومت بر کاهش پتانسیل شیارشدگی مخلوط، نقش تعیین‌کننده‌ای دارد (دیواندری و همکاران، ۱۳۹۴). از طرفی، با بررسی تحقیقات انجام شده، مشخص می‌گردد که استحکام و روانی^۳ مارشال تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عمق شیار به- وجود آمده در روسازی انعطاف‌پذیر دارند. در پژوهش- های پیشین، ارتباط مستقیم بین نسبت استحکام به روانی مارشال با عدد روانی^۴ اثبات شده است (عامری و همکاران، ۱۳۸۹؛ سنگ‌سفیدی و همکاران، ۱۳۹۴). بدین ترتیب می‌توان انتظار داشت که بین پارامترهای روانی و استحکام مارشال از یکسو و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آسفالت از سوی دیگر، رابطه‌ای وجود داشته باشد (لو و همکاران، ۱۹۹۳).

در بررسی پژوهش‌های پیشین، به‌طورخاص موضوعی تحت عنوان موضوع تحقیق حاضر یافت نگردید. اما محققین متعددی سعی کردند تا با استفاده از آزمایش‌های ساده و ارائه روابط، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را تخمین بزنند. در سال ۱۳۸۰، برای تعیین این دو پارامتر، روابطی بر اساس نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و کشش غیرمستقیم، ارائه گردید (منصور خاکی و همکاران، ۱۳۸۰). در پژوهش‌های دیگری، روابطی جهت تخمین چسبندگی آسفالت با استفاده از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم آسفالت ارائه شد. نتایج این تحقیق حاکی از ارتباط مستقیم بین این دو پارامتر بود (زیاری و همکاران، ۱۳۸۶؛ زانیوسکی و سرینیواسان، ۲۰۰۴). در تحقیقات انجام شده توسط فوآ و تن (۲۰۰۵) و فوآ و همکاران (۲۰۰۴) نیز

چسبندگی^۱ (C) و زاویه اصطکاک داخلی آسفالت^۲ (ϕ) را تعیین نموده و سپس نسبت به ارزیابی مقاومت برشی و پتانسیل شیارشدگی آسفالت اقدام نمود (زیاری و همکاران، ۱۳۸۶). اما با توجه به دشواری و عدم دسترسی به آزمایش سه‌محوری آسفالت در ایران، ضرورت استفاده از روش‌های آسان‌تر، ارزان‌تر و در دسترس‌تر، نمایان می‌گردد. بنابراین، در این پژوهش، با توجه به فراوانی، ارزانی و کاربرد بسیار زیاد و دسترسی آسان به تجهیزات مارشال، که حتی در آزمایشگاه‌های مستقر در دوردست- ترین کارگاه‌های کشور نیز یافت می‌شود، تلاش شد تا با استفاده از انجام آزمایش‌های مارشال و سه‌محوری، مدل ریاضی که بیانگر ارتباط بین پارامترهای مارشال و C و ϕ آسفالت می‌باشد، تعیین گردد تا نهایتاً بتوان نسبت به ارزیابی مقاومت برشی آسفالت مطابق با رابطه (۱) اقدام نمود:

$$\tau = \sigma \tan \phi + C \quad (1)$$

که τ مقاومت برشی آسفالت (Pa)، σ تنش قائم (Pa)، ϕ زاویه اصطکاک داخلی (درجه) و C چسبندگی (Pa) می‌باشد.

۲-۲. هدف پژوهش

هدف کلی از انجام این تحقیق، ارائه مدلی جهت تخمین عوامل مؤثر در تعیین مقاومت برشی روسازی‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای طرح اختلاط به روش مارشال می‌باشد.

۳. مبانی و پیشینه پژوهش

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، چسبندگی

۳- Stability and flow

۴- Flow number (Fn)

۱- Cohesion

۲- Internal friction angle

برای انجام آزمایش از ۲۰۰ تا ۷۰۰ کیلوپاسکال تعریف گردیده است. آزمون سه محوری روی نمونه‌های آسفالتی در دو حالت CU و CD انجام پذیرفته است. زیرا تمرکز تحقیق بر آسفالت متخلخل بوده است. حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها (NMAS)، ۱۴ میلی‌متر انتخاب شده بود. در تحقیقات این دانشگاه اظهار گردیده که انجام آزمایش با فرض رفتار ویسکوالاستوپلاستیک برای آسفالت، مسئله را بسیار بسیار پیچیده نموده و در صورت چنین فرضی، اطلاعات مناسبی جهت انجام تنظیمات دستگاه در دسترس نخواهد بود. نتیجه‌گیری نهایی بدین صورت بیان گردیده که در تست سه محوری با سرعت کند و آرام روی نمونه‌های آسفالت متراکم خوب دانه-بندی شده، حاوی ۵٪ قیر، رفتار آسفالت به سنگدانه‌ها وابسته بوده و قیر اثر کمی داشته است. اما در آسفالت با دانه‌بندی باز و با قیر بیشتر، قیر در رفتار مقاومت تنش- کرنش تأثیر بیشتری داشته و غالب خواهد بود (ایری و پراتاپا، ۲۰۱۳). خلاصه کلیه موارد مذکور و البته توضیحات بیشتر در خصوص جزئیات آزمایش سه محوری آسفالت، در جدول ۱ آمده است.

۴. فرضیات پژوهش

(۱) با توجه به اینکه رفتار مصالح آسفالتی به عنوان مصالح متخلخل پر شده با قیر، مشابه رفتار مصالحی است که با تئوری مقاومت و شکست موهر-کلمب ارزیابی می‌شوند، بنابراین می‌توان برای مخلوط‌های آسفالتی نیز دو پارامتر مستقل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را تعریف و مورد بررسی قرار داد. این فرض که مقدار این دو پارامتر می‌تواند تحت تأثیر استحکام و روانی مارشال باشد، چندان دور از ذهن نیست. چرا که تحقیقات انجام شده متعدد نشان داده که استحکام مارشال تحت تأثیر سنگدانه‌ها (دانه‌بندی، حداکثر اندازه اسمی،

مدل‌های ساده‌ای جهت تعیین این دو پارامتر ارائه شده است.

در ادامه، سوابق انجام آزمایش‌های سه محوری آسفالت ارائه می‌گردد. در گزارش NCHRP-465 آمریکا که معتبرترین پژوهش در بین تحقیقات مذکور می‌باشد، فرضیات اولیه زیر برای انجام آزمایش سه محوری مخلوط‌های آسفالتی مدنظر قرار گرفته شده است:

دو دمای پیشنهادی برای انجام آزمایش، ۳۷/۸ و ۵۴/۴ درجه سلسیوس می‌باشد. شکل نمونه‌ها استوانه‌ای و با نسبت قطر به ارتفاع ۲:۳ یا ۱۵۰:۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. سه فشار محیطی (σ_۳)، با مقادیر ۱۳۸، ۲۷۶، ۴۱۴ کیلوپاسکال (۲۰، ۴۰، ۶۰ psi) برای انجام آزمایش استفاده شده است. حداقل ظرفیت بارگذاری قائم دستگاه ۱۰۰ کیلونیوتن بوده است (NCHRP 465؛ جنکینز و ابلز، ۲۰۰۸). نرخ بارگذاری ۱/۲۷ میلی‌متر بر دقیقه تعریف شده است. رفتار آسفالت الاستوپلاستیک فرض گردیده و از رفتار ویسکوز آسفالت صرف‌نظر گردیده است (NCHRP 465).

در تحقیقات انجام پذیرفته در دانشگاه سیدنی استرالیا در ارتباط با آزمایش سه محوری روی نمونه‌های آسفالتی، پارامترهای زیر برای انجام آزمایش مدنظر قرار گرفته شده است:

دمای انجام آزمایش، ۲۵ درجه سلسیوس انتخاب شده است. هر چند که در نتایج این تحقیق بیان شده که دما تأثیری بر نتیجه آزمایش نخواهد داشت. شکل نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای و با نسبت قطر به ارتفاع (۱:۲) یا (۷۰:۱۴۰) میلی‌متر بوده که البته به وسیله مغزه‌گیری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۸/۵ X ۱۵ X ۴۵ سانتی‌متر به دست آمده است. محدوده اعمال فشار محیطی (σ_۳)،

شکستگی (... می‌باشد و میزان و نوع قیر (که تأمین‌کننده چسبندگی آسفالت است) نیز به شدت روانی آسفالت را تحت تأثیر قرار می‌دهد (ذوقی و مرادی، ۱۳۹۵؛ زیاری و دیواندری، ۲۰۱۳).

۲) به دلیل تحمیلی و غیر واقعی بودن خط مسیر برش و عدم دقت کافی، جهت تعیین پارامترهای C و ϕ از آزمون برش مستقیم آسفالت استفاده نشد و در این پژوهش از آزمایش سه‌محوری بدین منظور استفاده گردید.

۳) در این تحقیق، بنا به دلایل زیر، آزمون سه‌محوری با فرض رفتار الاستوپلاستیک برای مخلوط آسفالتی انجام پذیرفته است:

الف) به جهت ایجاد ارتباط منطقی بین پارامترهای مارشال و نتایج آزمون سه‌محوری آسفالت، می‌بایست هر دو آزمایش در شرایط دمایی کاملاً یکسان انجام گردد. اما به دلیل وجود محدودیت‌هایی مانند عدم وجود محفظه کنترل دما در دستگاه سه‌محوری و همچنین به طول انجامیدن این آزمون با توجه به سرعت بارگذاری مورد نظر (حدود ۰/۳ میلی‌متر در دقیقه برای آزمایش سه‌محوری در قیاس با سرعت ۵۰/۸ میلی‌متر در دقیقه برای آزمایش مارشال) که موجب ایجاد افت دما در حین انجام آزمایش می‌گردد، این آزمون در دمای محیط (۲۵ درجه سلسیوس) انجام می‌پذیرد. در این دما، رفتار آسفالت به الاستوپلاستیک نزدیک‌تر بوده و ویژگی‌های ویسکوز قیر کمتر وارد عمل و نمایان خواهد شد.

ب) در بیشتر تحقیقات، مانند تحقیقات فوآ، تحقیقات دانشگاه سیدنی استرالیا و گزارش NCHRP-465 نیز به دلیل پیچیدگی‌های بسیار زیاد در فرض ویسکوالاستوپلاستیک، پژوهش‌ها با در نظر گرفتن فرض

الاستوپلاستیک انجام گردیده است. ضمن اینکه بعضاً در برخی دیگر از تحقیقات، مانند تحقیقات دیارتمان تگزاس آمریکا و استاندارد سه‌محوری آفریقای جنوبی، آزمایش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام گردیده و در تحقیقات دانشگاه سنگاپور نیز دمای ۲۸ درجه سلسیوس یکی از دماهای مورد نظر جهت انجام آزمون سه‌محوری بوده است (تان و همکاران، ۱۹۹۴؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ جنکینز و ابلز، ۲۰۰۸؛ فوآ و همکاران، ۲۰۰۴).

ج) علاوه بر اثر دما و درصد قیر، همزمانی و احتمال رخداد عوامل دیگری اعم از تعدد، ترکیب و سرعت بارگذاری ترافیکی، سطح تنش (شدت بارگذاری)، نوع و تراکم سنگدانه‌ها، اصطکاک داخلی، دانه‌بندی، درصد فضای خالی سنگدانه‌ها و چسبندگی و قابلیت شکل‌پذیری قیرها نیز بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی و به عبارت دیگر بر رفتار برگشت‌پذیری یا تغییرشکل‌های پایدار تأثیرگذارند که این عوامل موجب ایجاد پیچیدگی‌های فراوان در رفتار آسفالت خواهند شد. بنابراین، در نظر گرفتن فرض ویسکوالاستوپلاستیک، انجام پژوهش را دشوار و بسیار پیچیده خواهد نمود (ایری و پراتاپا، ۲۰۱۳).

د) ویسکوز بودن قیر بیشتر در پژوهش‌هایی مورد توجه قرار می‌گیرد که در طول انجام آزمایش اولاً دما و ثانیاً سرعت بارگذاری تغییر نماید. اما در این پژوهش، هر دو عامل در طول انجام آزمون ثابت خواهند بود.

۴) در تحقیق حاضر، منطقی‌تر به دلایل زیر جهت انجام آزمون سه‌محوری، شرایط UU^1 اعمال گردیده است:

اولاً، با توجه به اینکه تمرکز این پژوهش بر آسفالت متخلخل نمی‌باشد، لذا اندازه‌گیری میزان خروج آب مد نظر نبوده و بنابراین جهت انجام آزمون سه‌محوری عملاً

واقع در جاده تهران- رودهن تهیه گردیده و قیر مورد استفاده در دو نوع ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ محصول پالایشگاه تهران می باشد. فیلر مصرفی نیز از جنس پودر سنگ آهک تهیه گردیده است.

قبل از ساخت نمونه های آسفالتی مورد نظر، به لحاظ کسب اطمینان از کیفیت مصالح سنگی، ابتدا آزمایش های کنترل کیفیت مصالح اعم از دانه بندی، درصد سایش، سلامت، درصد جذب آب، درصد شکستگی، تطویل و تورق بر اساس دستورالعمل استانداردهای موجود انجام و پس از مقایسه با شاخص های پذیرش و حصول اطمینان از کیفیت، نسبت به انجام آزمایش های مورد نظر پژوهش اقدام شده است. جهت ساخت نمونه ها از حد وسط دانه بندی های پیوسته شماره ۴ و ۵ نشریه ۲۳۴ مربوط به دانه بندی مخلوط مصالح سنگی مورد استفاده در لایه آستر و رویه، طبق شکل های ۱ و ۲ استفاده شده است.

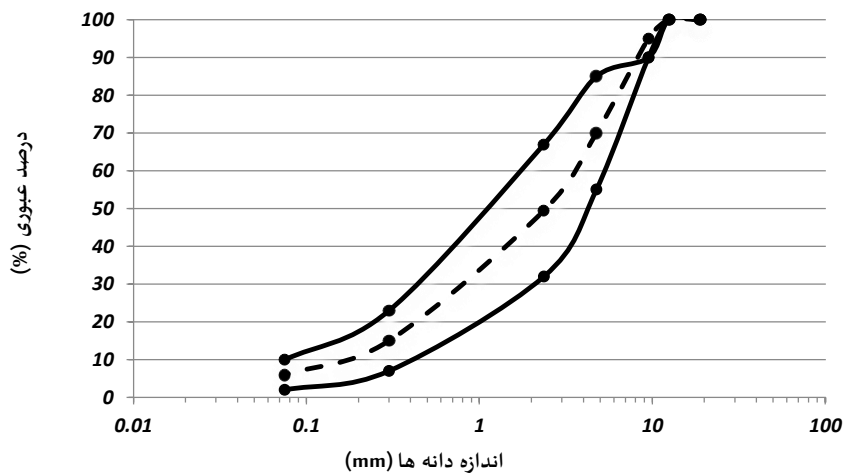
به فرایند اشباع هیچ گونه نیازی نخواهد بود و مقوله زهکشی نمونه ها در تنظیمات و فرضیات لحاظ نمی گردد (ایری و پراتاپا، ۲۰۱۳). ثانیاً، با توجه به اینکه آسفالت ساخته شده چه در آزمایشگاه و چه در عمل، آسفالت متراکم شده است، بنابراین مقوله تحکیم نیز مورد نظر نمی باشد. ثالثاً با توجه به اینکه بارگذاری جاده ها از نوع استاتیک نمی باشد، لذا شرایط UU برای مدل سازی بارگذاری دینامیک (ترافیک) بسیار مناسب خواهد بود.

۵) در این تحقیق، عامل تغییر شکل ماندگار مربوط به لایه رویه آسفالتی مد نظر بوده و گسیختگی لایه آسفالتی ناشی از ضعف سختی لایه های زیرین آسفالت مورد نظر نمی باشد.

۵. روش تحقیق

۵-۱. مواد و مصالح مورد استفاده

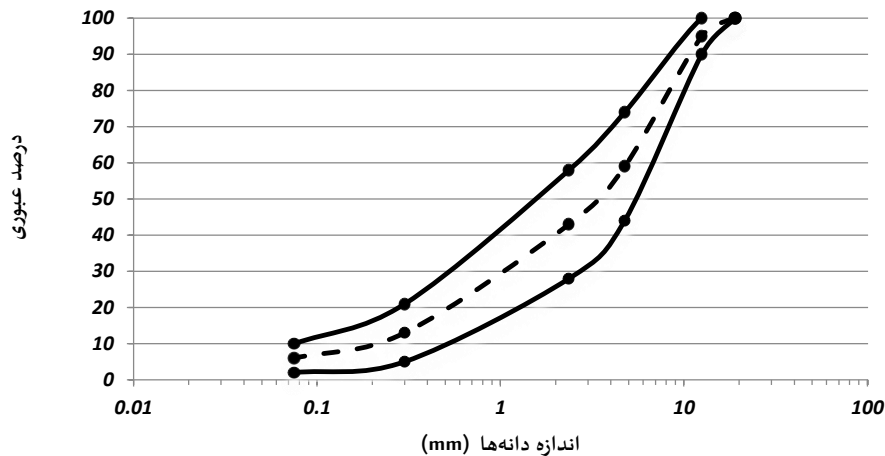
مواد به کار رفته در این پژوهش شامل: یک نوع سنگدانه، دو نوع قیر و یک نوع فیلر می باشد. مصالح- سنگی در این تحقیق از نوع آهکی و از معدن اسب چران



ارائه مدل تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آسفالت با استفاده از پارامترهای آزمایش مارشال

شکل ۱. نمودار حدود بالا، وسط و پایین دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ مطابق با نشریه ۲۳۴

۱- Undrained unconfined



شکل ۲. نمودار حدود بالا، وسط و پایین دانه‌بندی پیوسته شماره ۵ مطابق با نشریه ۲۳۴

شرایط مورد نظر آیین‌نامه، جهت ساخت نمونه‌ها استفاده گردیده است.

۲-۵. تعیین تعداد ترکیب‌های لازم

نام‌گذاری ترکیب‌های به‌کار رفته در تحقیق مطابق با جدول ۲ می‌باشد.

آزمایش‌های لازم جهت بررسی کیفیت قیر مصرفی شامل درجه نفوذ، درجه نرمی، کندروانی، درجه اشتعال، درجه خلوص و قابلیت شکل‌پذیری به منظور حصول اطمینان از انطباق ویژگی‌های قیر مصرفی با شاخص‌های پذیرش کیفی و مرغوبیت آن نیز انجام پذیرفت. فیلر مورد استفاده در این پژوهش نیز پودرسنگ معدن ساوه بوده که پس از عبور از الک نمره ۲۰۰ و اطمینان از برآورده سازی

جدول ۲. انواع و مشخصات ترکیبات مورد نظر

D	C	B	A	نام ترکیب
شماره ۵	شماره ۵	شماره ۴	شماره ۴	دانه‌بندی (حد وسط)
پودرسنگ	پودرسنگ	پودرسنگ	پودرسنگ	فیلر
۱۰۰-۸۵	۶۰-۷۰	۱۰۰-۸۵	۷۰-۶۰	نوع قیر

۳-۵. تعیین درصد قیر بهینه

ساخت مجموعاً ۷۲ نمونه استوانه‌ای و انجام آزمایش‌های مارشال مطابق با جدول ۳ تعیین گردید.

درصد قیر بهینه (OBC)^۱ هر یک از ترکیبات پس از

جدول ۳. درصد قیر بهینه به دست آمده برای ترکیبات مورد نظر

نام ترکیب	A	B	C	D
درصد قیر بهینه	۵/۸	۵/۷	۵/۹	۵/۸

۴-۵. ساخت نمونه‌های آسفالت با تراکم کننده

دورانی (SGC)

از ارتفاع ۴۵ سانتی متری انجام می‌پذیرد که به دلیل تغییر ارتفاع نمونه (۱۵۰ میلی‌متر) این تعداد ضربه دیگر از توجیه منطقی برخوردار نخواهد بود. بنابراین، به جهت عدم تأمین این شرایط در روش مارشال، روش تراکم ژیراتوری به عنوان روشی مناسب، مورد استفاده قرار گرفته است.

پس از تعیین درصد قیر بهینه برای هر یک از ترکیبات مورد نظر، جهت ساخت نمونه‌های اصلی آزمایش، به علل زیر از روش تراکم سوپریو (تراکم دورانی، SGC)^۲ به جای روش مارشال استفاده گردیده است:

ج) در روش تراکم ژیراتوری، سرعت و دقت در تهیه نمونه‌ها نسبت به روش مارشال، به دلیل نزدیک‌تر و سازگارتر بودن شرایط ساخت نمونه‌ها با واقعیت (به لحاظ تراکم)، مناسب‌تر می‌باشد. زیرا در ساخت نمونه‌ها با روش ژیراتوری به دلیل انحراف زاویه قالب به میزان ۱/۲۵ درجه نسبت به حالت قائم و تجزیه نیرو یا تنش وارده و ایجاد مؤلفه افقی نیرو یا عکس‌العمل سطح (نیروی برشی) باعث می‌شود علاوه بر مؤلفه قائم نیرو که به صورت فشاری اعمال می‌گردد (نه ضربه‌ای)، اعمال مؤلفه عکس‌العمل سطح یا تنش برشی نیز در قفل و بست بهتر سنگدانه‌ها تأثیر مطلوب‌تری ایجاد نموده و تراکم واقعی‌تری در نمونه‌ها به لحاظ چگالی، امتداد سنگدانه‌ها و یکنواختی و شباهت نمونه‌ها به نمونه‌های واقعی و کارگاهی ایجاد نماید. چرا که پدیده شیارشدگی صرفاً ناشی از تراکم نامناسب آسفالت نبوده، بلکه عمدتاً ناشی

الف) با توجه به اینکه هدف این تحقیق تعیین ارتباط و همبستگی میان نتایج آزمایش‌های مارشال و سه‌محوری می‌باشد بنابراین باید ساخت نمونه‌های آسفالتی، جهت انجام هر دو آزمایش، در شرایطی کاملاً یکسان انجام پذیرد. اما از آنجا که ملاک انجام آزمون سه‌محوری در این پژوهش تأمین شرایط مذکور در گزارش NCHRP 465 است، بنابراین تأمین نسبت قطر به ارتفاع ۲:۳ (نمونه‌های با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر) به وسیله قالب‌های آزمایش مارشال، امکان‌پذیر نخواهد بود. بنابراین با توجه به قابلیت ساخت نمونه‌های آسفالت به ارتفاع مذکور به وسیله قالب تراکم کننده سوپریو، تمامی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری ساخته شدند.

ب) اعمال تراکم استاندارد در روش مارشال برای ترافیک سنگین، با تعداد ۷۵ ضربه به طرفین نمونه به وسیله چکشی استاندارد به وزن تقریبی ۴/۵ کیلوگرم و

۵-۵. آزمون سه محوری

به دلیل عدم دسترسی به دستگاه سه محوری آسفالت اجباراً می بایست این آزمون به وسیله دستگاه های سه محوری خاک و یا سه محوری سنگ انجام پذیرد که در این تحقیق بنا به دلایل زیر از دستگاه سه محوری خاک استفاده شده است:

(۱) عدم وجود اطمینان کافی در استفاده از دستگاه سه محوری ویم که در آن تعیین C و ϕ به وسیله دستگاه آرمسترانگ، اما به صورت غیرمستقیم، انجام می شود (منصور خاکی و همکاران، ۱۳۸۰).

(۲) عدم وجود دقت کافی در استفاده از آزمایش برش مستقیم به دلیل غیر واقعی بودن خط مسیر برش. زیرا در این آزمون به نمونه اجازه گسیختگی و شکست در ضعیف ترین صفحه داده نمی شود. بلکه اجباراً در صفحه جدایی دو نیمه فوقانی و تحتانی برش رخ خواهد داد. در حالی که آزمایش سه محوری که مورد تأیید اغلب صاحب نظران مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک است، شرایط بارگذاری ترافیکی و واقعی آسفالت روسازی را به صورت مطلوب تری شبیه سازی می نماید.

(۳) تأمین بارگذاری قائم مورد نیاز (KN ۱۰۰) (NCHRP 465؛ جنکینز و ابلز، ۲۰۰۸).

(۴) مدل سازی با دستگاه سه محوری خاک نسبت به سه محوری سنگ دقیق تر می باشد. زیرا محدوده اعمال تنش همه جانبه در دستگاه سه محوری خاک از ۰/۰۱ تا ۱ مگاپاسکال بوده، ولی در دستگاه سه محوری سنگ حداقل ۰/۴ مگاپاسکال می باشد.

(۵) دستگاه سه محوری خاک توانایی اعمال هر سه فشار همه جانبه (σ_3) مذکور در گزارش NCHRP-465

از عدم چفت و بست نامناسب سنگدانه های مخلوط آسفالتی می باشد. بنابراین، متراکم شدن آسفالت در این روش به شرایط واقعی که توسط غلتک ها انجام می گیرد، شبیه تر خواهد بود.

(د) شکستن احتمالی سنگدانه ها در متراکم نمودن به روش مارشال از دیگر معایب ساخت نمونه ها به روش مارشال است که خود عاملی برای تغییر دانه بندی خواهد بود. ضمن آنکه شکست سنگدانه ها سبب بالارفتن سطح مخصوص سنگدانه ها و تغییر در میزان قیر بهینه خواهد گردید.

(ه) در ساخت نمونه ها به روش مارشال، اشاره دقیقی به درصد فضای خالی نمونه ها نگردیده و به طور کلی فضای خالی بین ۳ تا ۵ درصد توصیه شده است. اما این موضوع در روش ژیراتوری از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. بنابراین، فضای خالی ۴٪ که هم تأمین کننده هدف مارشال و هم سوپریو می باشد، برای ساخت نمونه ها در این تحقیق، تعیین گردید. بر این اساس، ضابطه قطع تراکم، رسیدن به یک دانسیته مشخص، یعنی رسیدن به تراکمی به میزان ۹۶٪ دانسیته ماکزیمم آزمایشگاهی در حین تراکم، خواهد بود.

نهایتاً با توجه به چهار نوع ترکیب مورد نظر در این پژوهش، تعداد ۴۸ نمونه با این روش ساخته شد که از این تعداد ۲۴ نمونه جهت انجام آزمایش سه محوری (با ارتفاع ۱۵۰ میلی متر) و تعداد ۲۴ نمونه نیز جهت انجام آزمایش مارشال (با ارتفاع حدود ۷۵ میلی متر) ساخته شدند. به عبارت دیگر، برای شرایط یکسان دانه بندی و قیر، سه نمونه جهت انجام آزمایش استحکام و روانی مارشال و سه نمونه جهت انجام آزمون سه محوری ساخته شد.

فشار آب مطرح نمی‌باشد. اما با این وجود آزمایش سه-محوری در شرایط UU با حداقل سرعت بارگذاری ۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام پذیرفت. بدین ترتیب، نمونه‌های آسفالت ساخته شده با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر، پس از توزین و اندازه‌گیری دقیق ارتفاع، به وسیله یک غشاء کاملاً آب-بند پوشیده و پس از جاگذاری لقمه‌های سنگی در سر و ته نمونه‌ها، درون سلول دستگاه قرار گرفتند. سپس، جهت اعمال فشار محصورکننده (σ_3) به آن، سلول کاملاً با آب پر شده و با اتصال لوله هوا به سلول، فشار همه-جانبه اعمال گردید (شکل ۳). پس از اتمام آماده‌سازی سلول، روی هر نمونه، یکی از سه مقادیر فشار ۱۳۸، ۲۷۶ و ۴۱۴ کیلوپاسکال (۲۰، ۴۰ و ۶۰ psi)، مطابق گزارش NCHRP-465 به‌عنوان فشار محیطی (σ_3) اعمال گردید. نهایتاً، پس از انجام آزمایش، با ترسیم دایره‌های موه‌ر و برآزش خط مماس بر این دایره‌ها، مقادیر C و ϕ تعیین گردید. شکل ۴ مقایسه ظاهری ابعاد نمونه را قبل و بعد از انجام آزمون سه‌محوری نمایش می‌دهد.

را تأمین نمود. در حالی که با توجه به حداقل ظرفیت اعمال فشار همه‌جانبه دستگاه سه‌محوری سنگ (Mpa) ۰/۴، تنها می‌توان فشار همه‌جانبه ۴۱۴ کیلوپاسکال را جهت اعمال به نمونه‌های آسفالت تأمین نمود.

۶) فضای سلول دستگاه سه‌محوری سنگ محدودیت دارد، زیرا به وسیله این سلول صرفاً نمونه‌های آسفالتی با نسبت ابعادی (۱:۲) و با قطرهای ۵۴، ۶۱، ۶۷، ۷۸ و ۸۴ میلی‌متر را می‌توان مورد آزمایش قرار داد. در حالی که در این پژوهش نسبت قطر به ارتفاع (۲:۳) و قطر ۱۰۰ میلی‌متر (به دلیل تطابق قطر نمونه‌ها جهت انجام آزمایش مارشال) مورد نظر بوده و صرفاً دستگاه سه‌محوری خاک در این خصوص مناسب می‌باشد.

قابل ذکر است که اصولاً در شرایط زهکشی نشده (U)، سرعت بارگذاری باید کند باشد. در غیر این صورت بارگذاری قائم به یکباره و دفعتاً به فشار آب تبدیل خواهد شد. اما به دلیل اینکه در این تحقیق فرایند اشباع نمونه‌های آسفالت مد نظر نبوده، بنابراین بحث ایجاد



شکل ۳. آماده‌سازی نمونه آسفالت با روکش غشاء آب‌بند. شکل ۴. مقایسه ظاهری ابعاد نمونه قبل و بعد از انجام آزمون

نهایتاً، پس از انجام آزمون‌های مورد نظر، میانگین

۶. نتایج و تحلیل آن‌ها

نتایج حاصل از آزمایش هر سه نمونه در شرایط یکسان دانه‌بندی و نوع قیر، مطابق جدول ۴، تعیین گردید.

جدول ۴. میانگین نتایج آزمایش‌های سه‌محوری و مارشال در ترکیبات مختلف

(F)	(S)	(C) چسبندگی (kPa)	(ϕ) زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	ترکیب	ردیف
نرمی (mm)	استقامت مارشال (kg.f)				
۲/۹	۱۰۹۴	۳۷۵/۱۴	۳۹	دانه‌بندی شماره ۴، قیر ۷۰-۶۰ (A1)	۱
۲/۸	۱۱۲۶	۳۵۱/۹۵	۴۱	دانه‌بندی شماره ۴، قیر ۷۰-۶۰ (A2)	۲
۳/۲	۱۰۵۱	۳۵۳/۱۴	۳۷	دانه‌بندی شماره ۴، قیر ۱۰۰-۸۵ (B1)	۳
۳/۱	۱۰۹۰	۳۵۷/۹۴	۳۸	دانه‌بندی شماره ۴، قیر ۱۰۰-۸۵ (B2)	۴
				-	
۳/۱	۹۶۰	۴۰۹/۰۷	۳۷	دانه‌بندی شماره ۵، قیر ۷۰-۶۰ (C1)	۵
۳/۰	۹۹۶	۳۹۵/۰۳	۳۸	دانه‌بندی شماره ۵، قیر ۷۰-۶۰ (C2)	۶
۳/۴	۹۰۱	۳۹۳/۳۷	۳۵	دانه‌بندی شماره ۵، قیر ۱۰۰-۸۵ (D1)	۷
				-	
۳/۳	۹۴۹	۴۰۳/۲۳	۳۶	دانه‌بندی شماره ۵، قیر ۱۰۰-۸۵ (D2)	۸
				-	

بیان نمود. در ادامه، سعی می‌شود ضمن تحلیل آماری نتایج، امکان ارائه رابطه مناسب بین پارامترهای مقاومت برشی و استحکام و روانی مارشال را بررسی نمود.

۶-۱. مرحله اول، آمار توصیفی

پارامترهای مقاومت مارشال و روانی به عنوان متغیر مستقل و پارامترهای ϕ و C تحت عنوان متغیر وابسته، فرض شدند. شاخص‌های توصیفی داده‌ها در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

همانطور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، برای نوع قیر ثابت، به طور متوسط زاویه اصطکاک داخلی در آسفالت‌های ساخته شده با دانه‌بندی ۴ بیشتر از دانه‌بندی ۵ است که علت آن را می‌توان به بافت درشت‌تر مصالح سنگی در آسفالت ساخته شده با دانه‌بندی ۴ دانست. همچنین، مشاهده می‌شود که با فرض ثابت ماندن نوع دانه‌بندی، نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با قیر ۷۰-۶۰، به طور متوسط چسبندگی بیشتری دارند که علت آن را می‌توان ویسکوزیته بیشتر این قیر نسبت به قیر ۱۰۰-۸۵

۲-۶. مرحله دوم، بررسی نرمال بودن متغیرهای

وابسته

فراوانی‌های مشاهده شده و مورد انتظار تفاوتی وجود ندارد. به عبارت دیگر، توزیع جامعه نرمال است (نوفرستی، ۱۳۹۳). بنابراین، با توجه به Z آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در جدول ۶، فرض صفر آماری، یا نرمال بودن نتایج و داده‌ها، پذیرفته می‌شود. شکل‌های ۵ و ۶ نیز نرمال بودن متغیرهای وابسته ϕ و C را نشان می‌دهند.

جهت بررسی نوع توزیع داده‌های متغیر وابسته، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف مطابق با جدول ۶ استفاده شد. اگر مقدار Z آزمون کولموگروف-اسمیرنوف کوچکتر از $+1/96$ و بزرگتر از $-1/96$ باشد، به لحاظ آماری با ۹۵٪ اطمینان می‌توان نتیجه گرفت که بین

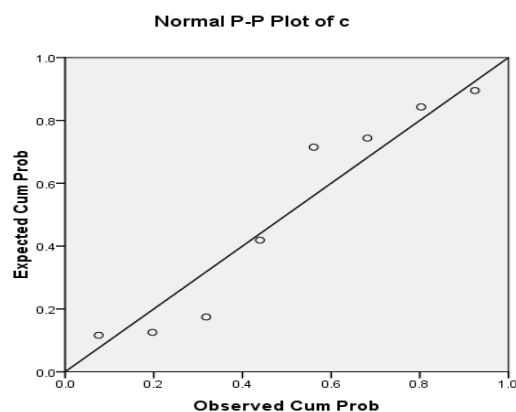
جدول ۵. آمار توصیفی نتایج آزمایش‌ها

شاخص‌های پراکندگی	شاخص‌های مرکزی		شاخص‌های شکل توزیع		تعداد نمونه-های آزمایش	شاخص مرکزی (میانگین)
	انحراف	وارianس	انحراف	چولگی		
	آماري	آماري	آماري	آماري	آماري	آماري
(F): روانی	۰/۳۵۸۳۱۹۰	۰/۱۲۸	۶۷۱۳	۰/۷۵۲	۲/۸۶۲۵۰	۸
(S): استقامت مارشال	۸۱/۰۱۵۷۶۱	۶۵۶۳/۵۵۴	۱/۴۸۱	۰/۷۵۲	۳ E ۱/۰۲۰۸۸	۸
(C): چسبندگی	۲۳/۳۰۷۱۱۸	۵۴۳/۲۲۲	۱/۴۸۱	۰/۷۵۲	۳۷۹/۷۶۸۷۵	۸
(ϕ): زاویه اصطکاک داخلی	۱/۸۴۶۸۱۲	۳/۴۱۱	۱/۴۸۱	۰/۷۵۲	۳۷/۶۲۵۰۰	۸

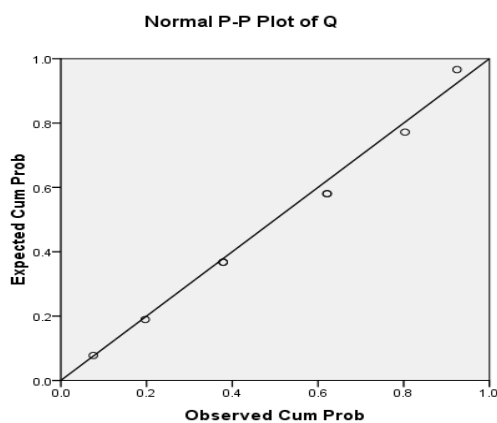
جدول ۶. آزمون کولموگروف-اسمیرنوف

ϕ	C	S	F	تعداد نمونه‌های آزمایش
زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	مقاومت مارشال	روانی	
۸	۸	۸	۸	
۱E۳/۷۶۲۵۰	۲ E۳/۷۹۷۶۹	۳ E۱/۰۲۰۸۸	۲/۸۶۲۵۰	میانگین
۰ E۱/۸۴۶۸۱۲	۱ E۲/۳۳۰۷۱۲	۱E۸/۱۰۱۵۷۶	۰/۳۵۸۳۱۹	پارامترهای نرمال انحراف معیار
۰/۱۷	۰/۲۱۵	۰/۱۷۸	۰/۳۹۹	مطلق
۰/۱۷	۰/۲۰۱	۰/۱۴۹	۰/۲۵۴	بیشترین کران اختلاف مثبت

-۰/۱۱۸	-۰/۲۱۵	-۰/۱۷۸	-۰/۳۹۹	منفی
۰/۴۸	۰/۶۰۸	۰/۵۰۴	۱/۱۳۰	Z آزمون کولموگروف- اسمیرنوف



شکل ۵. نمودار بیانگر نرمال بودن متغیر وابسته C



شکل ۶. نمودار بیانگر نرمال بودن متغیر وابسته ϕ

الف) آزمون تحلیل معنی‌دار بودن رگرسیون

چندگانه

جداول ۷ و ۸ ضرایب تعیین و همبستگی بین متغیرهای مستقل S و F با متغیرهای وابسته C و ϕ را نشان می‌دهند.

۳-۶. مرحله سوم، آزمون فرضیات پژوهش

برای آزمون همبستگی میان متغیرهای مستقل نرمی و استقامت مارشال با متغیرهای وابسته چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، از آزمون معنی‌دار رگرسیون چندگانه و آزمون خطی بودن استفاده شده است.

جدول ۷. ضریب تعیین و ضریب همبستگی بین متغیرهای مستقل S و F با متغیر وابسته C

ارائه مدل تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آسفالت با استفاده از پارامترهای آزمایش مارشال

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تعیین شده	ضریب تعیین اصلاح شده	خطای استاندارد	دوربین- واتسون
۱	۰/۸۶۸	۰/۷۵۴	۰/۶۵۵	۱۳/۶۸۸۰۶۴	۲/۲۳۰

جدول ۸ ضریب تعیین و ضریب همبستگی بین متغیرهای مستقل S و F با متغیر وابسته ϕ

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تعیین	ضریب تعیین اصلاح شده	خطای استاندارد	دوربین- واتسون
۲	۰/۸۸۲	۰/۷۷۷	۰/۶۸۸	۱/۰۳۱۲۹۴	۲/۲۳۹

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضرایب تعیین برابر ۰/۷۵۴ و ۰/۷۷۷ است و می‌توان گفت که مدل‌ها معنی‌دار می‌باشند. ضمناً مقدار آماره آزمون دوربین- واتسون نیز به‌دلیل آنکه در بازه ۱/۵ تا ۲/۵ قرار گرفته است نشان-دهنده عدم همبستگی بین خطاها است. با این وجود، مطابق با جداول ۹ و ۱۰، برای تصمیم‌گیری از تحلیل واریانس رگرسیون استفاده شده است.

جدول ۹. آنالیز واریانس رگرسیون ارتباط C با F و S

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
رگرسیون	۲۸۶۵/۷۳۷	۲	۱۴۳۲/۸۶۸	۷/۶۴۸	۰/۰۳۰
باقیمانده	۹۳۶/۸۱۶	۵	۱۸۷/۳۶۳		
مجموع	۳۸۰۲/۵۵۲	۷			

جدول ۱۰. آنالیز واریانس رگرسیون ارتباط ϕ با F و S

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
رگرسیون	۱۸/۵۵۷	۲	۹/۲۷۹	۸/۷۲۴	۰/۰۲۳
باقیمانده	۵/۳۱۸	۵	۱/۰۶۴		
مجموع	۲۳/۸۷۵	۷			

بنابراین، با توجه به مقدار $\text{sig} = 0.03 < 0.05$ فرض صفر آماری، یعنی عدم همبستگی رد شده و معادله رگرسیونی مربوط به ارتباط ϕ با F و S نیز پذیرفته می‌شود. همچنین، با توجه به مقدار $\text{sig} = 0.023 < 0.05$ فرض صفر آماری، یعنی عدم همبستگی رد شده و معادله رگرسیونی مربوط به ارتباط C با F و S پذیرفته می‌شود.

(ب) آزمون هم‌خطی بودن

هم‌خطی زمانی اتفاق می‌افتد که یک رابطه دقیق بین دو یا چند متغیر وجود دارد. مقادیر sig ضرایب در جداول ۱۱ و ۱۲ رد فرض صفر، یعنی رد صفر بودن ضرایب رگرسیونی، را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱. مقدار sig ضرایب در مدل اول

Sig.	T	ضرایب استاندارد نشده		مدل
		Beta	انحراف خطا	
۰/۰۰۱	۷/۰۲۵	-	۱۰۰/۸۱۷	۱ (ثابت)
۰/۳۲۵	-۱/۰۹	-۰/۲۶۸	۱۵/۹۸۷	F
۰/۰۱۲	-۳/۸۶۰	-۰/۹۴۹	۰/۰۷۱	S

جدول ۱۲. مقدار sig ضرایب در مدل دوم

Sig.	T	ضرایب استاندارد نشده		مدل
		Beta	انحراف خطا	
۰/۰۳۷	۲/۸۳۴	-	۶/۲۷۳	۲ (ثابت)
۰/۸۷۴	-۰/۱۶۷	-۰/۰۴	۰/۴۲۴	F
۰/۰۱۶	۳/۵۷۲	۰/۸۶۱	۰/۰۰۵	S

۶-۴. مرحله چهارم، مدل سازی

با استفاده از نتایج به دست آمده از مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در نمونه‌های مختلف و رابطه مقاومت برشی، آشکار می‌شود که به طور متوسط نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با دانه‌بندی شماره ۴ و با قیر ۶۰-۷۰ که بیشترین زاویه اصطکاک داخلی و بیشترین چسبندگی را دارند، بیشترین مقاومت برشی را نیز دارا می‌باشند. این نتیجه با انتظارات قبلی نیز سازگاری دارد. زیرا در عمل نیز برای مناطق با پتانسیل شیارشدگی بالا (دمای بیشتر و ترافیک سنگین‌تر)، به طور معمول از مصالح درشت‌دانه‌تر و قیر با درجه نفوذ کمتر در ساخت آسفالت استفاده می‌شود. بر اساس روابط همبستگی به دست آمده، مشخص می‌گردد که پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آسفالت با پارامترهای مارشال

نهایتاً، مدل‌هایی مطابق با روابط (۲) و (۳) که بیانگر ارتباط بین پارامترهای مارشال و پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آسفالت می‌باشند تعیین گردید:

$$C = 708.282 - 17.425F - 0.273S \quad (۲)$$

$$\phi = 17.775 - 0.071F + 0.02S \quad (۳)$$

که C چسبندگی (کیلوپاسکال)، ϕ زاویه اصطکاک داخلی (درجه)، F روانی مارشال (میلی‌متر) و S استقامت مارشال (کیلوگرم نیرو) می‌باشند.

۷. بحث و نتیجه گیری

- (۳) افزایش چسبندگی قیر باعث کاهش روانی آسفالت می‌شود که در رابطه (۲) مشخص شده است.
- (۴) اگر چسبندگی قیر تحت تأثیر افزایش مقدار آن، افزایش یابد، می‌توان انتظار داشت که با توجه به نقش روغن‌کاری قیر روی مصالح، باید مقاومت مخلوط کاهش یابد که این استدلال رابطه معکوس چسبندگی و استقامت مارشال را توجیه می‌نماید.
- (۵) با توجه به میانگین مقادیر استقامت و روانی مارشال، تأثیرگذاری بیشتر استقامت مارشال بر زاویه اصطکاک داخلی مخلوط و همچنین اثر ملموس روانی بر چسبندگی از دو رابطه کاملاً مشخص است که البته با واقعیت نیز کاملاً منطبق می‌باشد.

۸. سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند بدینوسیله از همکاری پرسنل مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC) و عوامل محترم آزمایشگاه مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی استان تهران به دلیل مهیا ساختن شرایط انجام آزمایش‌های تکمیلی، تشکر و قدردانی نمایند.

ارتباط معنی‌داری داشته و بنابراین می‌توان پس از انجام آزمایش‌های مارشال، به‌جای آزمون سه‌محوری، از روابط به‌دست آمده، پارامترهای C و ϕ را تعیین و در طرح مخلوط‌های آسفالتی جهت لحاظ مقاومت برشی آسفالت استفاده نمود تا طرح مخلوط مطلوب‌تری به جهت کنترل شیارشدگی حاصل گردد. البته همانگونه که اشاره شد، در استفاده از روابط به‌دست آمده محدودیت‌هایی شامل: نوع و دانه‌بندی مصالح سنگی، قیر و فیلر مورد استفاده، دما و شرایط انجام آزمایش سه‌محوری وجود دارد.

با بررسی بیشتر دو رابطه به‌دست آمده در این پژوهش، نتایج زیر حاصل می‌گردد:

- (۱) استقامت مارشال با زاویه اصطکاک داخلی رابطه مستقیم دارد. زیرا افزایش درگیری سنگدانه‌های مخلوط، باعث افزایش مقاومت آن می‌گردد.
- (۲) افزایش روانی، می‌تواند ناشی از کمبود ویسکوزیته قیر یا افزایش مقدار قیر باشد. هر دو عامل ذکر شده بر کاهش زاویه اصطکاک آسفالت مؤثر می‌باشند. زیرا باعث سُر خوردن مصالح سنگی روی یکدیگر می‌شوند. بدین ترتیب، مطابق رابطه (۳)، روانی و زاویه اصطکاک داخلی، رابطه معکوس دارند.

۹. مراجع

- پژوهشکده حمل و نقل. ۱۳۸۷. "بررسی آزمایشگاهی اثر نوع دانه‌بندی و فضای خالی در بتن آسفالتی بر شیار جای چرخ و قیرزدگی در راه‌های کشور". وزارت راه و ترابری، پژوهشکده حمل و نقل، شرکت ساخت و توسعه زیربناهای حمل و نقل کشور.
- دیواندری، ح.، مدرس، ا.، حسینی علی آباد، س. م. و رستمی انکاس، م. ۱۳۹۴. "ارائه مدل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و پارامترهای مارشال". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، (۲): ۵۴-۶۱.

- ذوقی، ح. و مرادی، ع. ۱۳۹۵. "ارزیابی مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالتی در جایگزین کردن با سنگدانه‌ها". کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، ۷ خرداد، تهران.
- زیاری، ح.، ایزدی، ا. و نصراله تبار آهنگر، ع. ۱۳۸۶. "تعیین پارامتر چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از تست مقاومت کششی غیرمستقیم". سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۱ تا ۱۳ اردیبهشت.
- زیاری، ح.، دیواندری، ح.، شفابخش، غ. و حسامی، س. ۱۳۹۲. "ارائه مدل پیش‌بینی پتانسیل شیارشدگی آسفالت با استفاده از پارامترهای خروجی متراکم کننده ژیراتوری". پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۰(۱): ۲۹-۴۳.
- سنگ‌سفیدی، ا.، سنگ‌سفیدی، م. و زیاری، ح. ۱۳۹۴. "تأثیر دانه‌بندی مصالح بر خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی". نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۵(۴): ۴۵-۶۰.
- عامری، م.، مقدس نژاد، ف. و میرزاحسینی، م. ۱۳۸۹. "ارائه مدل پیش‌بینی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای حاصل از طرح اختلاط مارشال و بررسی تأثیر این پارامترها بر عدد روانی". پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت، دانشگاه فردوسی، مشهد.
- عامری، م. و نادران، ع. ۱۳۸۳. "بررسی پارامترهای مؤثر بر گسیختگی برشی روسازی‌های آسفالتی". دومین همایش قیر و آسفالت ایران، مؤسسه قیر و آسفالت ایران، ۲ تا ۴ آذر، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- منصور خاکی، ع.، عامری، م. و عربانی، م. ۱۳۸۰. "روش تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آسفالت بر اساس آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و کشش غیرمستقیم". مجله بین‌المللی علوم و مهندسی، ۱۲(۲): ۱۶۷-۱۷۹.
- نوفرستی، م. ۱۳۹۳. "آمار (مفاهیم، روش‌ها و کاربردها)". انتشارات رسا، چاپ بیست و هفتم.
- Airey, D. and Prathapa, R. 2013. "Triaxial Testing of Asphalt". 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, pp. 301-307.
- Fan, S. H. and Lin, L. 2011. "Investigations and countermeasures analysis of rutting in highway asphalt concrete pavements". *Adv. Civ. Eng.*, 255-260: 3263-3267.
- Fwa, T. F. and Tan, S. A. 2005. "C- ϕ characterization model for design of asphalt mixtures and asphalt pavements". *J. ASTM Int.*, 2(3), DOI: 10.1520/JAI12262.
- Fwa, T. F., Tan, S. A. and Zhu, L. Y. 2001. "Reexamining C- ϕ concept for asphalt paving mix design". *J. Transport. Eng.*, 127(1).
- Fwa, T. F., Tan, S. A. and Zhu, L. Y. 2004. "Rutting prediction of asphalt pavement layer using C- ϕ model". *J. Transport. Eng.*, 130(5).
- Jenkins, K. J. and Ebels, L. J. 2008. "Determination of Triaxial Shear Parameters Using Simple Triaxial Test". Stellenbosch, South Africa.
- Low, B. H., Tan, S. A. and Fwa, T. F. 1993. "Analysis of Marshall Test behavior with triaxial test determined material properties". *ASTM Int.*, 21(3): 192-198.
- Report. NCHRP 465, "Triaxial Shear Strength Specimens".
- Tan, S. A., Low, B. H. and Fwa, T. H. 1994. "Behavior of asphalt concrete mixtures in triaxial compression". *ASTM Int.*, 22(3): 195-203.
- Texas Department of Transport, 2013. "Triaxial Compression for Disturbed Soils and Base Materials". August.
- Wang, L., Meng, X., Pan, L. and Zhang, J. 2013. "The triaxial test research of asphalt-rubber mixture". *Adv. Mater. Res.*, 598: 603-607.
- Zaniewski, J. P. and Srinivasan, G. 2004. "Evaluation of Indirect Tensile Strength to Identify Asphalt Concrete Rutting Potential". Asphalt Technology Program, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown, West Virginia.
- Ziari, H. and Divandari, H. 2013. "Presenting asphalt mixtures flow number prediction model using gyratory curves". *Int. J. Civ. Eng.*, 11(2): 125-133.

