بسم الله الرحمن الرحيم

باسمه تعالی

تأییدیه اعضای هیئت داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

اعضای هیئت داوران نسخه نهایی پایان‌نامه‌ی آقای **محمدرضا قربانی نیک** تحت عنوان: **بررسی اندرکنش پارامترهای مؤثر بر عریان‌شدگی مخلوطهای آسفالتی گرم(WMA) دارای آهک و افزودنی نانو** را از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تائید می‌کنند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	**امیر کاووسی**	**دانشیار**	
۲- استاد مشاور	**علی خدایی**	**دانشیار**	
۳- استاد ناظر (داخلی)	**امین میرزا بروجردیان**	**استادیار**	
۴- استاد ناظر (خارجی)	**فریدون مقدس‌نژاد**	**دانشیار**	
۵- نماینده گروه راه و ترابری	**امین میرزا بروجردیان**	**استادیار**	

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده مهندسی عمران‌ومحیط‌زیست گروه راه‌وترابری

پایان‌نامه برای اخذ مدرک کارشناسی ارشد

عنوان

بررسی اندرکنش پارامترهای مؤثر بر عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) دارای آهک و افزودنی نانو

نگارش

محمدرضا قربانی نیک

استاد راهنما

دکتر امیر کاووسی

استاد مشاور

دکتر علی خدایی

تقدیم به

پدرم کوهی استوار و حامی من در طول تمام زندگی که سپیدی را بر تخته سیاه زندگیم نگاشت

مادرم سنگ صبوری که الفبای زندگی به من آموخت و تار مویی از او به پای من سیاه نماند

همسرم که همواره یار و مشوقم بوده و گام هایم را در پیمودن راه تحصیل استواری بخشید

و

لاله های سرخ سرزمینم که در بیداد ژخیمان و آتش کینه و تجاوز شکفتند و بهاری جاودان برای ایران به ارمغان آوردند. سروهای سرافراز کشورم که در خاک و خون غلطیدند

تا میهن اسلامی راست قامت و پایدار باقی بماند.

تشکر و قدردانی

اکنون که با لطف و عنایت خداوند منان، نگارش این پایان‌نامه به پایان رسید، بر خود لازم می-دارم که از زحمات، حمایت‌ها و تشویق‌های افراد بزرگواری که در تحقق این امر مرا یاری نمودند تشکر نمایم.

در ابتدای امر، خداوند را شاکرم که لطف او شامل من شد تا دریچه‌ای از علم بر من گشوده شود. سپس از **دکتر امیر کاووسی** و **دکتر علی خدایی** نهایت سپاس و قدردانی را دارم که بی‌وقفه بر راهنمایی و مشاوره‌ی من تلاش نمودند. ایشان بر تمام مزاحمت‌های من صبوری نمودند و بی‌دریغ پاسخ-گوی پرسش‌های من در تمامی ایام سال و اوقات شبانه‌روز بودند. از خداوند برای ایشان بهترین جایگاه‌ها را خواستارم. از آقایان **دکتر فریدون مقدس‌نژاد** و **دکتر امین میرزا بروجردیان** که با داوری و مطالعه‌ی این نگارش در بهبود محتوای آن به بنده کمک نمودند، سپاسگزارم. همچنین از سایر اساتید محترم گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس، آقایان **دکتر ابوالفضل حسنی، دکتر محمود صفارزاده، دکتر سید احسان سیدابریشمی** و **دکتر امیررضا ممدوحی** تشکر کرده و از آقایان **مهندس حمزه حق شناس، مهندس جواد بختیاری** و **مهندس پیمان برقبانی** که در انجام این پایان‌نامه مرا یاری نمودند، سپاسگزارم.

محمدرضا قربانی‌نیک
شهریور۱۳۹۲

چکیده

عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی، یکی از مشکلات عمده روسازی راه است که به علت جدا شدن قیر از سنگدانه و در نتیجه بروز خرابی‌هایی نظیر ترک‌خوردگی و شیارافتادگی پدیدار می‌گردد. این مشکل در انواع مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد و در مخلوط‌های آسفالتی گرم(WMA) به علت دمای اختلاط پایین آن‌ها، شدت می‌یابد. استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی معدنی نظیر آهک و نانو نظیر زایکوسویل راه‌حل مناسبی برای این مشکل است. همچنین مقدار ریزدانه مخلوط آسفالتی و مقدار افزودنی مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی گرم که جهت کاهش کندروانی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد نیز می‌توانند عواملی مؤثر در عریان‌شدگی باشند.

در این تحقیق با توجه به شرایط محلی شهر تهران از مصالح شرق تهران و قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ تولید پالایشگاه تهران به علت کاربرد بیشتر آن در این شهر استفاده شد. سه درصد ریزدانه (عبوری از الک شماره ۴) شامل ۵۵، ۷۰ و ۸۵ درصد و سه درصد ساسوبیت شامل ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ درصد و همچنین دو نوع افزودنی ضد عریان‌شدگی شامل آهک هیدراته در سه سطح ۰، ۱/۵ و ۳ درصد و زایکوسویل در سه سطح ۰، ۰/۱ و ۰/۲ درصد به صورت جداگانه مورد استفاده قرار گرفتند. سپس با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) مرتبه دوم، تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای ساخت مقرر گردید و پس از ساخت نمونه‌ها به منظور ارزیابی پتانسیل عریان‌شدگی آن‌ها، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (AASHTO T283) بر روی نمونه‌های در حالت خشک و نمونه‌های در حالت اشباع تحت سه شرایط اشباع با اعمال ذوب و یخبندان، اشباع با اعمال یخبندان و اشباع با اعمال ذوب انجام شد. برای هر کدام از این چهار پاسخ بر اساس اندرکنش میان متغیرها، مدل‌های پیش‌بینی ساخته شد. نتایج نشان داد آهک هیدراته مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک را بیشتر از زایکوسویل افزایش می‌دهد، اما در نمونه‌های حالت اشباع در هر سه شرایط ذکر شده، نتیجه متفاوت است و تأثیر زایکوسیویل از آهک هیدراته بیشتر است. همچنین با افزایش میزان ریزدانه پتانسیل عریان‌شدگی مخلوط در کل بیشتر می‌شود و این حساسیت در نمونه‌های اشباع تحت شرایط ذوب نمود بیشتری دارد. حساسیت رطوبتی مخلوط نیز با افزایش میزان ساسوبیت تا ۱/۵ ٪ کاهش یافته و پس از آن افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: عریان‌شدگی، مخلوط آسفالتی گرم، درصد ریزدانه، ساسوبیت، آهک هیدراته، زایکوسویل، روش پاسخ سطح

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل ۱- کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بیان مسأله ۳

۱-۳- نوآوری تحقیق ۳

۱-۴- فرضیهها ۴

۱-۵- اهداف تحقیق ۴

۱-۶- ساختار پایان‌نامه ۵

فصل ۲- مروری بر پیشینه تحقیق ۶

۲-۱- عریان شدگی ۷

۲-۲- تعریف عریان‌شدگی ۷

۲-۳- مکانیزمهای مربوط به عریان‌شدگی ۸

۲-۳-۱- مکانیزمهای میکروسکوپی ۹

۲-۳-۱-۱- تئوری مکانیکی ۹

۲-۳-۱-۲- تئوری واکنش شیمیایی ۹

۲-۳-۱-۳- تئوری جهت‌گیری مولکولی ۹

۲-۳-۱-۴- تئوری انرژی سطحی ۱۰

۲-۳-۱-۵- تئوری ضعف ماده ۱۱

۲-۳-۲- مکانیزم‌های ماکروسکوپی ۱۴

۲-۴- عوامل مؤثر بر کنترل عریان‌شدگی ۱۴

۲-۵- طبقه‌بندی مطالعات انجام شده بر روی حساسیت رطوبتی ۱۶

۲-۵-۱- مطالعات میدانی ۱۶

۲-۵-۲- مطالعات آزمایشگاهی ۱۷

۲-۵-۲-۱- آزمایشات بر روی مخلوطهای آسفالتی متراکم نشده ۱۹

۲-۵-۲-۲- آزمایشات مخرب مکانیکی بر روی مخلوطهای آسفالتی متراکم شده ۲۰

۲-۵-۲-۳- آزمایشات غیرمخرب مکانیکی ۲۰

۲-۵-۲-۴- ارزیابی عریان‌شدگی با استفاده از تئوری انرژی ۲۰

۲-۵-۲-۵- آزمایشات غیرمخرب غیرمکانیکی بر روی مخلوطهای آسفالتی متراکم ۲۱

۲-۵-۳- مطالعات عددی و تحلیلی ۲۱

۲-۶- بررسی کاربرد افزودنیهای ضدعریان‌شدگی ۲۱

۲-۷- تأثیر آهک هیدراته بر عریان‌شدگی ۲۲
۲-۷-۱- روشهای افزودن آهک هیدراته ۲۴
۲-۸- افزودنیهای ضدعریان‌شدگی نانو ۲۴
۲-۸-۱- عملکرد افزودنی نانو در آزمایشهای عریانشدگی ۲۶
۲-۸-۲- آزمایش مسیر چرخ هامبورگ ۳۰
۲-۸-۳- آزمایش آب جوشان ۳۱
۲-۸-۴- آزمایش غوطه‌وری استاتیکی ۳۲
۲-۸-۵- اثر افزودنیهای نانو بر درجه عملکرد قیر(PG) ۳۲
۲-۹- مخلوطهای آسفالتی گرم (WMA) و انواع افزودنی‌ها و روشهای تولید آن ۳۴
۲-۹-۱- نگاه کلی به تولید آسفالت گرم ۳۵
۲-۹-۲- تکنیک‌های کفسازی ۳۸
۲-۹-۲-۱- کف قیر ۳۸
۲-۹-۲-۲- آسفامین-زئولایت ۳۹
۲-۹-۲-۳- آسفالت با انرژی کم ۴۰
۲-۹-۲-۴- روش شرکت آستک ۴۰
۲-۹-۳- افزودنیهای شیمیایی ۴۱
۲-۹-۳-۱- ادورا ۴۱
۲-۹-۳-۲- رِویکس و اُووترم ۴۱
۲-۹-۴- افزودنیهای ارگانیک ۴۲
۲-۹-۴-۱- ساسوبیت ۴۲
۲-۹-۴-۲- آسفالتن B ۴۵
۲-۱۰- خصوصیات عملکردی مخلوطهای آسفالتی گرم (WMA) ۴۵

فصل ۳- روش تحقیق و شرح آزمایشها ۴۹

۳-۱- مقدمه ۵۰
۳-۲- خصوصیات افزودنیهای مورد استفاده ۵۱
۳-۲-۱- آهک هیدراته ۵۱
۳-۲-۱-۱- الزامات فیزیکی و شیمیایی ۵۲
۳-۲-۱-۲- آزمایش هیدرومتری ۵۳
۳-۲-۲- زایکوسویل ۵۴
۳-۲-۳- ساسوبیت ۵۴
۳-۳- آزمایشهای مربوط به مصالح سنگی ۵۵
۳-۳-۱- مشخصات مصالح سنگی ۵۵
۳-۳-۲- دانه‌بندی ۵۶

۳-۳-۳- وزن مخصوص مصالح ۵۹
۳-۳-۴- مرغوبیت مصالح سنگی ۵۹
۳-۳-۵- مشخصات فیلر ۶۰
۳-۴- آزمایشهای مربوط به قیر ۶۲
۳-۴-۱- تعیین مشخصات قیر مصرفی ۶۲
۳-۵- آزمایشهای مخلوط آسفالتی قبل از ساخت نمونه‌ها ۶۳
۳-۵-۱- تعیین دمای اختلاط و تراکم ۶۴
۳-۵-۲- محاسبه حداکثر وزن مخصوص تئوریک ۶۴
۳-۵-۳- تعیین درصد بهینه قیر با استفاده از روش مارشال ۶۵
۳-۶- مراحل ساخت نمونه‌ها ۶۹
۳-۷- آزمایشهای مخلوط آسفالتی پس از ساخت نمونه‌ها ۷۲
۳-۷-۱- محاسبه وزن مخصوص واقعی نمونه‌ها ۷۲
۳-۷-۲- تعیین درصد فضای خالی مخلوط کوبیده شده ۷۳
۳-۷-۳- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (AASHTO T283) ۷۳
۳-۸- معرفی نرم‌افزار مورد استفاده ۷۷
۳-۸-۱- روش پاسخ سطح ۷۸

فصل ۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی ۸۱

۴-۱- مقدمه ۸۲
۴-۲- طراحی آزمایش ۸۲
۴-۲-۱- محاسبه تعداد نمونه-های لازم ۸۳
۴-۲-۲- نمونه‌های ساخته شده جهت اعتبارسنجی ۸۶
۴-۳- نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها ۸۶
۴-۳-۱- نتایج نمونه‌های دارای آهک هیدراته ۸۸
۴-۳-۱-۱- نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک ۸۸
۴-۳-۱-۲- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان و ذوب ۹۰
۴-۳-۱-۳- نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان ۹۳
۴-۳-۱-۴- نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت ذوب ۹۶
۴-۳-۲- نتایج نمونه‌های دارای زایکوسویل(افزودنی نانو) ۹۹
۴-۳-۲-۱- نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک ۹۹
۴-۳-۲-۲- نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان و ذوب ۱۰۱
۴-۳-۲-۳- نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان ۱۰۴
۴-۳-۲-۴- نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت ذوب ۱۰۷
۴-۴- تحلیل نتایج، ساخت مدل و بررسی اندرکنش متغیرها ۱۱۰

۴-۴-۱- نمونه‌های دارای آهک ۱۱۰
۴-۴-۱-۱- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک(ITS_{dry}) ۱۱۰
۴-۴-۱-۲- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان و ذوب($ITS_{frz-thw}$) ۱۱۱
۴-۴-۱-۳- نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان و ذوب($TSR_{frz-thw}$) ۱۱۳
۴-۴-۱-۴- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان(ITS_{frz}) ۱۱۵
۴-۴-۱-۵- نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان(TSR_{frz}) ۱۱۶
۴-۴-۱-۶- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت ذوب(ITS_{thw}) ۱۱۷
۴-۴-۱-۷- نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت ذوب(TSR_{thw}) ۱۱۸
۴-۴-۲- نمونه‌های دارای زایکوسویل(افزودنی نانو) ۱۱۹
۴-۴-۲-۱- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک(ITS_{dry}) ۱۱۹
۴-۴-۲-۲- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان و ذوب($ITS_{frz-thw}$) ۱۲۱
۴-۴-۲-۳- نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان و ذوب($TSR_{frz-thw}$) ۱۲۳
۴-۴-۲-۴- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان(ITS_{frz}) ۱۲۴
۴-۴-۲-۵- نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت یخبندان(TSR_{frz}) ۱۲۴
۴-۴-۲-۶- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت ذوب(ITS_{thw}) ۱۲۵
۴-۴-۲-۷- نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اشباع تحت ذوب(TSR_{thw}) ۱۲۶
۴-۴-۳- بحث درباره مدلها و اندرکنش متغیرها ۱۲۷
۴-۴-۳-۱- نمونه‌های آهکی ۱۲۷
۴-۴-۳-۲- نمونه‌های زایکوسویل ۱۲۸
۴-۴-۳-۳- مقایسه دانه‌بندی بهینه با منحنی فولر ۱۲۹
۴-۵- اعتبارسنجی مدلهای ساخته شده ۱۳۰
۴-۶- مقایسه میزان تأثیر آهک و زایکوسویل ۱۳۶
۴-۷- آنالیز حساسیت مدلهای ساخته شده ۱۴۲
فصل ۵- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ۱۴۳
فهرست مراجع .....

عنوان

فهرست اشکال

صفحه

شکل ۲-۱ مکانیزم اندرکنش بار سطحی مصالح سنگی و قیر در ایجاد چسبندگی ۱۰
شکل ۲-۲ سطح مصالح تر شده در شرائط خشک و مرطوب ۱۲
شکل ۲-۳ جابجایی یک لایه قیر از سطح مصالح ۱۲
شکل ۲-۴ تأثیر افزودنی نانو در چسبندگی بین قیر و سنگدانه ۲۶
شکل ۲-۵ ایجاد سطح آبگریز بر روی سنگدانه با استفاده از زایکوسویل ۲۶
شکل ۲-۶ اثر افزودنی و نوع سنگدانه‌ها بر مقاومت کششی ۲۷
شکل ۲-۷ تاثیر افزودنی و نوع سنگدانه‌ها بر نسبت مقاومت کششی ۲۷
شکل ۲-۸ عمر خستگی مخلوط‌های مختلف با سنگدانه‌های گرانیتی ۲۸
شکل ۲- ۹عمر خستگی مخلوط‌های مختلف با سنگدانه‌های آهکی ۲۸
شکل ۲-۱۰ نتایج آزمایش AASHTO T 283 بر روی سنگدانه گرانیت ایلینویز ۳۰
شکل ۲-۱۱ تاثیر زایکوسویل بر نتایج آزمایش مسیر چرخ هامبورگ ۳۰
شکل ۲-۱۲ نتایج آزمایش آب جوشان ۳۱
شکل ۲-۱۳ آب باقیمانده از آزمایش آب جوشان ۳۱
شکل ۲-۱۴ نتایج آزمایش غوطه‌وری استاتیکی مخلوط‌های دارای افزودنی‌های مختلف ۳۲
شکل ۲-۱۵ مقایسه دمای تولید آسفالت ۳۶
شکل ۲-۱۶ تأثیر ویسکوزیته قیر نرم و سخت در ویسکوزیته نهایی ۳۹
شکل ۲-۱۷ راست: واحد ساختمانی اولیه زئولیت چپ: ساختار شیمیایی زئولیت ۳۹
شکل ۲-۱۸ مراحل ساخت مخلوط آسفالتی به روش LEA ۴۰
شکل ۲-۱۹ نمونه‌ای ازدانه‌های ساسوبیت ۴۳
شکل ۲-۲۰ نحوه تغییرات ویسکوزیته مخلوط آسفالتی حاوی ساسوبیت ۴۴
شکل ۲-۲۱ دستگاه تزریق افزودنی کمپانی Hi-Tech Asphalt Solutions ۴۴
شکل ۳-۱ منحنی دانه‌بندی فیلر آهکی مورد استفاده در تحقیق ۵۳
شکل ۳-۲ مقایسه منحنی‌های سه دانه‌بندی منتخب ۵۸
شکل ۳-۳ نمونه‌های ساخته شده با هر کدام از دانه‌بندیهای مورد استفاده ۵۸
شکل ۳-۴ منحنی دانه بندی فیلر مورد استفاده حاصل از آزمایش هیدرومتری ۶۲
شکل ۳-۵ نمودار دما-ویسکوزیته قیر مورد استفاده در تحقیق ۶۴
شکل ۳-۶ نمودارهای طرح اختلاط مارشال برای دانه‌بندی درشتدانه ۶۷
شکل ۳-۷ نمودارهای طرح اختلاط مارشال برای دانه‌بندی میاندانه ۶۸

شکل ۳-۸ نمودارهای طرح اختلاط مارشال برای دانه‌بندی ریزدانه ۶۹
شکل ۳-۹ قالب استفاده شده برای ساخت نمونه ۷۰
شکل ۳-۱۰ ابعاد نمونه‌های لازم برای آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم ۷۰
شکل ۳-۱۱ مخلوط کردن قیر با ساسوبیت ۷۱
شکل ۳-۱۲ نحوه کرگیری از دال‌های آسفالتی ۷۲
شکل ۳-۱۳ تصویر مدلهای آماری و نمودارها در نرم‌افزار Minitab 16 ۷۷
شکل ۴-۱ شماتیکی از حالات انتخاب شده در طراحی نسبت به کل حالات نمونه‌های آهکی ۸۳
شکل ۴-۲ شماتیکی از حالات انتخاب شده در طراحی نسبت به کل حالات نمونه‌های زایکوسویل ۸۵
شکل ۴-۳ مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک هیدراته در حالت خشک ۸۹
شکل ۴-۴ مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک هیدراته در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب ۹۱
شکل ۴-۵ نسبت مقاومت کششی نمونه‌های آهک هیدراته در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب ۹۲
شکل ۴-۶ مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک هیدراته در حالت اشباع تحت یخبندان ۹۴
شکل ۴-۷ نسبت مقاومت کششی نمونه‌های آهک هیدراته در حالت اشباع تحت یخبندان ۹۵
شکل ۴-۸ مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک هیدراته در حالت اشباع تحت ذوب ۹۷
شکل ۴-۹ نسبت مقاومت کششی نمونه‌های آهک هیدراته در حالت اشباع تحت ذوب ۹۸
شکل ۴-۱۰ مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت خشک ۱۰۰
شکل ۴-۱۱ مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب ۱۰۲
شکل ۴-۱۲ نسبت مقاومت کششی نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب ۱۰۳
شکل ۴-۱۳ مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان ۱۰۵
شکل ۴-۱۴ نسبت مقاومت کششی نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان ۱۰۶
شکل ۴-۱۵ مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت ذوب ۱۰۸
شکل ۴-۱۶ نسبت مقاومت کششی نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت ذوب ۱۰۹
شکل ۴-۱۷ منحنی‌های Main effect، Contour و Surface ITS_{dry} نمونه‌های آهک ۱۱۱
شکل ۴-۱۸ منحنی‌های Main effect، Contour و Surface $ITS_{frz-thw}$ نمونه‌های آهک ۱۱۳
شکل ۴-۱۹ منحنی‌های Main effect، Contour و Surface $TSR_{frz-thw}$ نمونه‌های آهک ۱۱۴
شکل ۴-۲۰ منحنی‌های Main effect، Contour و Surface ITS_{frz} نمونه‌های آهک ۱۱۵
شکل ۴-۲۱ منحنی‌های Main effect، Contour و Surface TSR_{frz} نمونه‌های آهک ۱۱۶
شکل ۴-۲۲ منحنی‌های Main effect، Contour و Surface ITS_{thw} نمونه‌های آهک ۱۱۷
شکل ۴-۲۳ منحنی‌های Main effect، Contour و Surface TSR_{thw} نمونه‌های آهک ۱۱۸
شکل ۴-۲۴ منحنی‌های Main effect، Contour و Surface ITS_{dry} نمونه‌های زایکوسویل ۱۲۰
شکل ۴-۲۵ منحنی‌های Main effect، Contour و Surface $ITS_{frz-thw}$ نمونه‌های زایکوسویل ۱۲۲
شکل ۴-۲۶ منحنی‌های Main effect، Contour و Surface $TSR_{frz-thw}$ نمونه‌های زایکوسویل ۱۲۳
شکل ۴-۲۷ منحنی Main effect ITS_{frz} نمونه‌های زایکوسویل ۱۲۴
شکل ۴-۲۸ منحنی Main effect TSR_{frz} نمونه‌های زایکوسویل ۱۲۵

شکل ۴-۲۹ منحنی Main effect ITS_{thw} نمونه‌های زایکوسویل ۱۲۶
شکل ۴-۳۰ منحنی Main effect TSR_{thw} نمونه‌های زایکوسویل ۱۲۷
شکل ۴-۳۱ مقایسه منحنی بهینه با منحنی فولر ۱۳۰
شکل ۴-۳۲ منحنی‌های تعیین میزان دقت مدل‌های مربوط به مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک ۱۳۲
شکل ۴-۳۳ منحنی‌های تعیین میزان دقت مدل‌های مربوط به نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک..... ۱۳۳
شکل ۴-۳۴ منحنی‌های تعیین میزان دقت مدل‌های مربوط به مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل..... ۱۳۴
شکل ۴-۳۵ منحنی‌های تعیین میزان دقت مدل‌های مربوط به نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل ۱۳۵
شکل ۴-۳۶ مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک ۱۳۹
شکل ۴-۳۷ مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت اشباع تحت ذوب و یخبندان..... ۱۳۹
شکل ۴-۳۸ مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت اشباع تحت یخبندان..... ۱۳۹
شکل ۴-۳۹ مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت اشباع تحت ذوب..... ۱۴۰
شکل ۴-۴۰ نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت اشباع تحت ذوب و یخبندان ۱۴۰
شکل ۴-۴۱ نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت اشباع تحت یخبندان..... ۱۴۰
شکل ۴-۴۲ نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت اشباع تحت یخبندان..... ۱۴۱

عنوان

فهرست جداول

صفحه

جدول ۲-۱ عوامل مؤثر بر حساسیت رطوبتی مربوط به شرایط ساخت و شرایط محیطی روسازی ۱۵
جدول ۲-۲ عوامل مؤثر بر حساسیت رطوبتی مربوط به ویژگی‌های مخلوط آسفالتی و اجزای تشکیل دهنده آن ۱۵
جدول ۲-۳ انواع آزمایشات مربوط به مخلوط‌های آسفالتی متراکم نشده ۱۸
جدول ۲-۴ انواع آزمایشات مربوط به مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده ۱۹
جدول ۲-۵ نتایج آزمایش AASHTO T 283 بر روی سنگدانه گرانیت جورجیا ۲۸
جدول ۲-۶ نتایج آزمایش‌های تعیین درجه عملکردی قیر ۳۲
جدول ۲-۷ مقایسه دمای تولید آسفالت‌های مختلف ۳۴
جدول ۲-۸ میزان کاهش دمای ایجاد شده توسط افزودنی‌های WMA ۳۸
جدول ۳-۱ خصوصیات شیمیایی مورد نیاز فیلر آهکی مورد استفاده در آسفالت ۵۲
جدول ۳-۲ نتایج آزمایش‌های شیمیایی و نتایج ترکیبات موجود در فیلر آهکی مورد استفاده ۵۳
جدول ۳-۳ نتایج الزامات فیزیکی فیلرهای آهکی مورد استفاده ۵۳
جدول ۳-۴ ویژگی‌های فیزیکی زایکوسویل ۵۴
جدول ۳-۵ تهیه انواع مصالح مصرفی با توجه به سایز آن از کارخانه ۵۵
جدول ۳-۶ دانه‌بندی شماره D6 استاندارد ASTM D 3515 ..... ۵۶
جدول ۳-۷ درصدهای عبوری دانه‌بندی درشت‌دانه مورد استفاده در تحقیق ۵۷
جدول ۳-۸ درصدهای عبوری دانه‌بندی میان‌دانه مورد استفاده در تحقیق ۵۷
جدول ۳-۹ درصدهای عبوری دانه‌بندی ریزدانه مورد استفاده در تحقیق ۵۸
جدول ۳-۱۰ وزن مخصوص های مصالح سنگی مورد آزمایش ۵۹
جدول ۳-۱۱ مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده ۶۰
جدول ۳-۱۲ مشخصات دانه بندی، وزن مخصوص و حدود اتربرگ فیلر مورد استفاده در تحقیق ۶۱
جدول ۳-۱۳ دانه‌بندی فیلر مورد استفاده در تحقیق ۶۱
جدول ۳-۱۴ نتایج آزمایشات قیر خالص ۷۰-۶۰ پالایشگاه تهران ۶۳
جدول ۳-۱۵ درصدهای انتخابی قیر در طرح اختلاط ۶۶
جدول ۴-۱ مقادیر به کار برده شده از هر متغیر در تحقیق ۸۳
جدول ۴-۲ ترکیب نمونه‌های لازم برای آزمایش خروجی از نرم‌افزار نمونه‌های دارای آهک ۸۴
جدول ۴-۳ ترکیب نمونه‌های لازم برای آزمایش خروجی از نرم‌افزار نمونه‌های دارای زایکوسویل ۸۵
جدول ۴-۴ مشخصات نمونه‌های ساخته شده برای اعتبارسنجی ۸۶
جدول ۴-۵ اختصاص کرهای خارج شده از دال به هر حالت آزمایش ۸۷
جدول ۴-۶ نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های دارای آهک هیدراته در حالت خشک ۸۸

جدول ۴-۷ نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های دارای آهک هیدراته در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب ۹۰
جدول ۴-۸ نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های دارای آهک هیدراته در حالت اشباع تحت یخبندان ۹۳
جدول ۴-۹ نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های دارای آهک هیدراته در حالت اشباع تحت ذوب ۹۶
جدول ۴-۱۰ نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های دارای زایکوسویل در حالت خشک..... ۹۹
جدول ۴-۱۱ نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های دارای زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب.....۱۰۱
جدول ۴-۱۲ نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های دارای زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان ۱۰۴
جدول ۴-۱۳ نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های دارای زایکوسویل در حالت اشباع تحت ذوب.....۱۰۷
جدول ۴-۱۴ پارامترهای آماری مدل مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک در حالت خشک ۱۱۰
جدول ۴-۱۵ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر ITS_{dry}.....۱۱۱
جدول ۴-۱۶ پارامترهای آماری مدل مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب ۱۱۲
جدول ۴-۱۷ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر $ITS_{frz\text{-}thw}$.....۱۱۲
جدول ۴-۱۸ پارامترهای آماری مدل نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب.....۱۱۳
جدول ۴-۱۹ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر $TSR_{frz\text{-}thw}$.....۱۱۴
جدول ۴-۲۰ پارامترهای آماری مدل مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک در حالت اشباع تحت یخبندان.....۱۱۵
جدول ۴-۲۱ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر ITS_{frz}.....۱۱۵
جدول ۴-۲۲ پارامترهای آماری مدل نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک در حالت اشباع تحت یخبندان ۱۱۶
جدول ۴-۲۳ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر TSR_{frz}.....۱۱۶
جدول ۴-۲۴ پارامترهای آماری مدل مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک در حالت اشباع تحت ذوب.....۱۱۷
جدول ۴-۲۵ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر ITS_{thw}.....۱۱۷
جدول ۴-۲۶ پارامترهای آماری مدل نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آهک در حالت اشباع تحت ذوب ...۱۱۸
جدول ۴-۲۷ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر TSR_{thw}.....۱۱۸
جدول ۴-۲۸ پارامترهای آماری مدل مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب.....۱۱۹
جدول ۴-۲۹ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر ITS_{dry}.....۱۱۹
جدول ۴-۳۰ پارامترهای آماری مدل مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب.....۱۲۱
جدول ۴-۳۱ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر $ITS_{frz\text{-}thw}$.....۱۲۱
جدول ۴-۳۲ پارامترهای آماری مدل نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان و ذوب.....۱۲۳
جدول ۴-۳۳ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر $TSR_{frz\text{-}thw}$.....۱۲۳

جدول ۴-۳۴ پارامترهای آماری مدل مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان ۱۲۴
جدول ۴-۳۵ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر ITS_{frz} ۱۲۴
جدول ۴-۳۶ پارامترهای آماری مدل نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت یخبندان ۱۲۵
جدول ۴-۳۷ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر TSR_{frz} ۱۲۵
جدول ۴-۳۸ پارامترهای آماری مدل مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت ذوب ۱۲۵
جدول ۴-۳۹ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر ITS_{thw} ۱۲۶
جدول ۴-۴۰ پارامترهای آماری مدل نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های زایکوسویل در حالت اشباع تحت ذوب ۱۲۶
جدول ۴-۴۱ مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به حداکثر TSR_{thw} ۱۲۶
جدول ۴-۴۲ نتایج به دست آمده از نمونه‌های اعتبارسنجی ۱۳۰
جدول ۴-۴۳ مقادیر پاسخ محاسبه شده با استفاده از مدل‌های نمونه‌های دارای آهک ۱۳۱
جدول ۴-۴۴ مقادیر پاسخ محاسبه شده با استفاده از مدل‌های نمونه‌های دارای زایکوسویل ۱۳۱
جدول ۴-۴۵ درصد خطای مدل‌های ساخته شده مربوط به نمونه‌های دارای آهک ۱۳۶
جدول ۴-۴۶ درصد خطای مدل‌های ساخته شده مربوط به نمونه‌های دارای زایکوسویل ۱۳۶

فصل ۱- کلیات

۱-۱- مقدمه

از آنجا که اکثر روسازی‌های آسفالتی در معرض عوامل جوی و به خصوص رطوبت و بارهای ناشی از ترافیک قرار می‌گیرند به مرور زمان دچار استهلاک شده و بروز خرابی در آنها اجتناب ناپذیر می‌شود، انسجام مخلوط‌های آسفالتی در اثر چسبندگی مصالح سنگی و قیر معنی پیدا می‌کند و لذا مهمترین عملکرد قیر در راهسازی چسبندگی است که به عنوان ماده چسبنده بین مصالح سنگی و یا بین قشر آسفالت و جسم راه عمل می‌کند.

در مواردی که نکات فنی در مورد استفاده از قیر، مصالح سنگی یا مخلوط آسفالتی رعایت نشود، نه تنها چسبند گی قیر و مصالح سنگی از بین می رود بلکه ایمنی و خدمت دهی راه به مخاطره افتاده و سرمایه هنگفت هزینه شده، به جای سود و بهره برداری به سمت اضمحلال و اتلاف شدن پیش می‌رود، اما با شناسایی و مرمت بموقع این خرابی‌ها می‌توان از اضمحلال جاده جلوگیری کرده، عمر جاده را افزایش و موجب سرویس‌دهی بهتر راه شد مخصوصاً در شرایط فعلی کشور که این مشکل در برخی از پروژه‌های در سطح ملی بروز نموده و نیازمند ارائه راه حل مناسب می‌باشد.

عریان‌شدگی نه تنها خود به عنوان یک خرابی مستقل محسوب می‌شود بلکه می‌تواند مقدمه و رویکردی برای ایجاد خرابی‌های زود هنگام دیگر از جمله ترک‌خوردگی، شیارشدگی مسیر چرخ‌ها، بیرون پریدگی، ایجاد چاله‌ها و ترک‌های پوست سوسماری باشد.

امروزه مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) به دلیل قابلیت منحصر به فرد آن در کاهش دما در زمان تولید و اجرا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این نوع آسفالت با استفاده از مکانیزم‌های خاص، ویسکوزیته قیر در زمان تولید و اجرا کاهش یافته و امکان پوشش سنگدانه‌ها با قیر در هنگام مخلوط کردن و همچنین متراکم نمودن آسفالت در محل اجرا را در دمای پایین‌تر نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ (HMA) فراهم می‌کند.

نکته قابل تأمل راجع به مخلوط‌های آسفالتی گرم حساسیت رطوبتی آن‌هاست، به این دلیل که فرآیند خشک شدن مصالح سنگی به دلیل دمای پایین اختلاط به طور کامل انجام نمی‌شود و سنگدانه‌ها حاوی درصد رطوبت بیشتری نسبت به HMA هستند. از سوی دیگر در مخلوط‌های آسفالتی گرم به دلیل کاهش ویسکوزیته قیر، سنگدانه‌ها با ضخامت کمتری پوشش داده می‌شوند و در نتیجه مستعد عریان‌شدگی می‌باشند. بنابراین بررسی پتانسل عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم و همچنین

پارامترهای مؤثر بر آن و اندرکنش این پارامترها می‌تواند به کارایی هر چه بیشتر این مخلوط‌ها و کاهش هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری آن‌ها کمک کند.

۱-۲- بیان مسأله

یکی از علل بروز خرابی‌های زودهنگام در مخلوط‌های آسفالتی، پدیده عریان‌شدگی است که ناشی از چسبندگی ناکافی و کمبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اجرا شده در برابر حضور آب می‌باشد. این خرابی عمدتاً در اثر جاری شدن آب‌های سطحی، نفوذ آب‌های اضافی آبیاری فضاهای مجاور از طریق جزایر میانی و کناری بزرگراه‌ها و به خصوص آب‌های مربوط به برف و باران و یخبندان و ذوب‌شدگی زمستانی به مجود می‌آید. با توجه به این که سالانه هزینه زیادی جهت ساخت روسازی‌های آسفالتی صرف می‌گردد، لذا یافتن راه‌حلی مناسب برای این تخریب زودرس، ضروری به نظر می‌رسد.

همچنین علی‌رغم مزایای مذکور برای مخلوط‌های آسفالتی گرم، بررسی مشکل عریان‌شدگی این مخلوط‌ها به دلیل دمای اختلاط پایین آن ها و فرآیندی که موجب کاهش این دما می‌شود ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر این به دلیل دمای پایین (در حدود ۱۰۰ تا ۱۴۰ درجه سانتیگراد)، این احتمال وجود دارد که سنگدانه‌های استفاده شده در این مخلوط‌ها کامل خشک نشوند و در نتیجه وجود رطوبت می‌تواند منجر به عریان‌شدگی شود.

با توجه به این مشکلات در این تحقیق به بررسی پارامترهای مؤثر بر عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم پرداخته شده و سعی گردیده تا پتانسیل عریان‌شدگی مخلوط‌های استفاده شده در تحقیق در شرایط دمایی مختلف بررسی شود. ضمناً اگر چه آهک به عنوان یک ماده پایدار ضدعریان‌شدگی شناخته شده است، اما روش محاسباتی مناسب برای ارزیابی میزان تأثیر این ماده یا مواد ضدعریان‌شدگی دیگر وجود ندارد.

۱-۳- نوآوری تحقیق

نوآوری این تحقیق را می‌توان در دو مورد زیر دسته‌بندی نمود:

۱_ تا کنون برای ارزیابی پارامترهای مؤثر بر عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم از روش یک فاکتور در یک زمان استفاده شده بود به این صورت در فرآیند طراحی آزمایش بررسی میزان تأثیر چندین پارامتر به صورت همزمان انجام نمی‌گرفت. در این تحقیق استفاده از روش عددی مناسب به نام روش