



ارزیابی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی مخلوط آسفالتی حاوی نانو اکسید کلسیم در برابر خستگی و شیار شدگی

استاد راهنما:

پروفسور غلامعلی شفابخش

استاد مشاور:

دکتر مصطفی صادق نژاد

دانشجو:

ایمان دارایی

فروردین ۱۴۰۰



دانشگاه سمنان

مقدمه

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

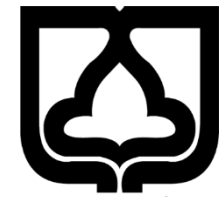
روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها



روسازی‌ها، معمولاً تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرند که در عمر آنها تأثیر دارد.

خرابی‌های گوناگونی در نقاط مختلف یک راه در طول عمر مفید روسازی رخ می‌دهند که عمدتاً شامل شیار افتادگی، ترک‌های ناشی از خستگی، ترک‌های ناشی از رطوبت و حرارت می‌باشند.

به منظور بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در راستای دستیابی به آسفالتی با **سفتی نسبتاً بالا در تابستان** و همچنین **افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه** در کنار بهبود سایر پارامترهای آسفالت استفاده از مواد افزودنی و اصلاح کننده در قیر و مخلوط پیشنهاد شده است. یکی از این اصلاح کننده‌ها، **نانو مواد** هستند که در سال‌های اخیر ورود آن به عرصه روسازی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از پرکاربردترین مواد نانو، **نانواکسید کلسیم** است.

بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق



دانشگاه سمنان

کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

از جمله مهمترین و تاثیرگذارترین خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی می‌توان به خستگی و شیارشدگی اشاره نمود که شدت و میزان آنها وابستگی بسیاری به کیفیت مصالح مورد استفاده، تعداد بارگذاری و شرایط آب و هوایی دارد.



شکل ۲. ترک‌های خستگی



شکل ۱. خرابی شیارشدگی

با توجه به تمامی خرابی‌های فوق لزوم انجام تحقیق جامع در ارتباط با اصلاح رفتار قیر و مخلوط‌های آسفالتی امری ضروری است.



کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

ارزیابی تأثیر استفاده از **نانو اکسید کلسیم** در قیر به منظور استفاده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم است، تا با استفاده از آن بتوان راهکاری مناسب جهت افزایش قابلیت روسازی‌های آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی و خرابی‌هایی نظیر **شیارشدگی و خستگی** ارائه نمود.



با توجه به اینکه در چند سال اخیر به منظور بهبود عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی از مواد افزودنی استفاده شده است، نانومواد یکی از جدیدترین و بروزترین این مواد افزودنی بوده که **نوع، مقدار مصرف، نحوه افزودن** و سایر موارد مرتبط به افزودن آن به قیر و مخلوط‌های آسفالتی در حال بررسی و تحقیق شدن می‌باشد. در نتیجه در این تحقیق مراحل فوق بر روی **نانواکسید کلسیم** صورت می‌پذیرد و تاثیر آن بر روی دو مورد از مهمترین خرابی‌ها یعنی شیارشدگی و خستگی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شیارشدگی در آسفالت



دانشگاه سمنان

کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

تعریف
شیارشدگی

شیار شدگی حاصل تغییر شکل دائمی در یک یا چند لایه از روسازی آسفالتی است که با گذشت زمان افزایش می یابد.

انواع مکانیزم
ایجاد شیارشدگی

- ضعف بستر و سیستم روسازی
 - ضعف آسفالت
 - سائیدگی آسفالت
- این سه مکانیزم بطور مستقل یا همزمان عمل می نمایند.

آزمایش شیارشدگی ویل تراک (wheel track test)



دانشگاه سمنان

کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

- طبق دستورالعمل استاندارد بریتانیا (AASHTO T234).
- برای تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار در **دمای بحرانی** و تحت بارگذاری شبیه به آنچه که در جاده‌ها به سطح روسازی وارد می‌شود.
- با حرکت رفت و برگشت چرخ بارگذاری شده روی نمونه آسفالتی به تعیین پتانسیل شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی می‌پردازد.



شکل ۳. دستگاه شیارشدگی جای چرخ

خستگی در آسفالت



کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

تعریف مقاومت
روسازی در برابر
پدیده خستگی

توانایی روسازی در برابر بارهای خمشی تکراری بدون شکست
تغییرات دمایی و تکرار بار اعمالی از طریق وسایل نقلیه سبب
ایجاد ترک‌های ناشی از بارهای خمشی می‌شود

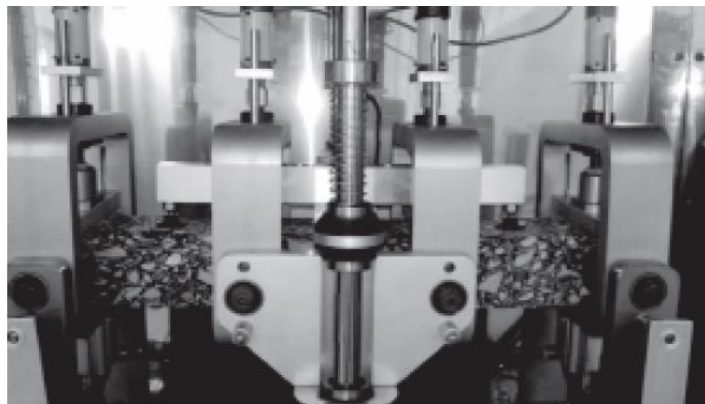
تعریف
عمر خستگی

تعداد تکرارهایی که روسازی بعد از آن شکسته می‌شود
عمر روسازی به عواملی از جمله میزان و جهت تنش‌ها،
شرایط آب‌وهوایی و شرایط ساخت سازه بستگی دارد.

آزمایش خستگی به روش تیر خمشی

(Four point bending beam fatigue test)

- طبق دستورالعمل استاندارد بریتانیا (**AASHTO T321**).
- با استفاده از دستگاه ساخت شرکت IPC9 استرالیا
- در دو حالت تنش و یا کرنش کنترل شده
- در حالت **کرنش کنترل شده** سیستم بازخوردی تعبیه شده در دستگاه، پس از هر تکرار بارگذاری، تنش را به گونه‌ای اصلاح می‌کند که کرنش در حد مشخص شده ثابت باقی بماند.
- شکل موج بارگذاری در حالت کرنش کنترل شده **سینوسی** و **نیمه سینوسی** است.



شکل ۴. دستگاه تیر خمشی ۴ نقطه‌ای



مزایای شناخته شده فناوری نانو در روسازی‌های آسفالتی:

جلوگیری از عریان شدگی سنگدانه‌های
مخلوط‌های آسفالتی

کاهش پدیده‌های تغییر شکل و قیرزدگی
رویه‌های آسفالتی

جلوگیری از ایجاد ترک‌های حرارتی و انقباضی

جلوگیری از روآمدن ترک‌های آسفالتی

کاهش پدیده سخت شدن و کهنه شدن قیر

افزایش تاب خستگی مخلوط آسفالتی



Shafabakhsh (2014)

Ruoyu Li (2017)

Moghadas Nejad (2018)

Ameri (2018)

João Crucho (2019)

Gao (2020)

Shafabakhsh (2017-2021)

❖ هدف:

بررسی تاثیر افزودن **Nano-TiO₂** (سه درصد وزنی ۱،۳ و ۵)

❖ شرایط آزمایش:

اختلاط به شیوه تر
نمونه با قطر و ارتفاع ۴۰ و ۱۰۰ میلیمتر
آزمایش خستگی به روش **کشش غیر مستقیم**
در دماها و تنش مختلف

❖ نتایج:

جلوگیری از ایجاد **ترک‌های کششی و قائم** و
همچنین جلوگیری از انتشار و گسترش آنها

جایگزینی **۵٪** از وزن مخلوط‌های آسفالتی
توسط نانو **TiO₂**، بهترین میزان است

بهبود عملکرد **خستگی** مخلوط‌های آسفالتی
حتی در دما و تنش‌های بالا



Shafabakhsh (2014)

Ruoyu Li (2017)

Moghadas Nejad (2018)

Ameri (2018)

João Crucho (2019)

Gao (2020)

Shafabakhsh (2017-2021)

❖ هدف:

بررسی کاربرد **Carbon nanofiber (CNF)**

❖ نتایج:

افزایش عمر خستگی به گونه‌ای که تعداد چرخه های بارگذاری را از ۷۱.۲۳۳ به ۱۴۰.۹۵۶ افزایش داده که حدودا برابر با **۹۸ درصد** افزایش عمر خستگی است.



Shafabakhsh (2014)

Ruoyu Li (2017)

Moghadas Nejad (2018)

Ameri (2018)

João Crucho (2019)

Gao (2020)

Shafabakhsh (2017-2021)

❖ هدف:

بررسی تأثیر **نانو کلسیم کربنات**

❖ شرایط آزمایش:

کاربرد **صفر، ۲ و ۴** درصد نانو کلسیم کربنات

انجام تست‌های: مقاومت

خستگی کششی غیرمستقیم

خزش دینامیکی

❖ نتایج:

کاهش ۴ درصدی پتانسیل شیارشدگی

افزایش عمر خستگی آسفالت مخلوط داغ

کاهش پتانسیل خسارت رطوبت



Shafabakhsh (2014)

Ruoyu Li (2017)

Moghadas Nejad (2018)

Ameri (2018)

João Crucho (2019)

Gao (2020)

Shafabakhsh (2017-2021)

❖ هدف:

بررسی مقاومت شیارشدگی و رفتار خستگی
ببندره‌های آسفالتی اصلاح شده با **Gilsonite**

❖ شرایط آزمایش:

محاسبه پارامتر پارگی Superpave و انجام
تست **multiple stress creep and recovery**

انجام تست‌های:

multiple stress creep and recovery
linear amplitude sweep

❖ نتایج:

بهبود مقاومت شیارشدگی و خستگی
Gilsonite انتخاب مناسبی جهت بهبود بخشی
خواص ببندره‌های آسفالتی در محدوده دمایی
متوسط و بالا هستند



پیشینه پژوهش

Shafabakhsh (2014)

Ruoyu Li (2017)

Moghadas Nejad (2018)

Ameri (2018)

João Crucho (2019)

Gao (2020)

Shafabakhsh (2017-2021)

❖ هدف:

انجام یک کار مروری در حوزه بررسی تاثیر انواع نانوذرات بر روی مخلوطهای آسفالتی

❖ درصد کاربردهای انواع مواد نانو:

نانو سیلیکا: ۰.۵ تا ۸ درصد

نانو رس: ۱ تا ۷ درصد (درصد بهینه ۲ درصد)

Nano-iron: با درصد بهینه ۰.۸ تا ۰.۹ درصد

❖ نتایج:

افزایش استقامت مارشال

افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل های دائمی

افزایش عمر خستگی



Shafabakhsh (2014)

Ruoyu Li (2017)

Moghadas Nejad (2018)

Ameri (2018)

João Crucho (2019)

Gao (2020)

Shafabakhsh (2017-2021)

❖ هدف:

بررسی رفتار رئولوژیکی و عملکرد خستگی بیندر آسفالتی اصلاح شده با lignin در دمای بالا

❖ شرایط آزمایش:

lignin: ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد

انجام تست‌های:

Rotational viscosity (RV)

dynamic shear rheometer (DSR)

multiple stress creep recovery (MSCR)

❖ نتایج:

افزایش مقاومت شیارشدگی ، مؤلفه الاستیک و انرژی فعال آسفالت

کاهش عمر خستگی آسفالت (هرچند که این میزان کاهش هنگامی که مقدار lignin کمتر از ۸ درصد بود بسیار ناچیز بود)



کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

Shafabakhsh (2014)

Ruoyu Li (2017)

Moghadas Nejad (2018)

Ameri (2018)

João Crucho (2019)

Gao (2020)

Shafabakhsh (2017-2021)

❖ هدف:

بررسی تاثیر افزودنی نانو سیلیکا و ترکیب نانو سیلیکا/SBS بر رفتار قیر و مخلوط آسفالتی در برابر انواع خرابی ها

❖ شرایط آزمایش:

انجام تست های:

Multiple Stress Creep and Recover time sweep

Bending Beam Rheometer

Linear amplitude sweep (LAS)

آزمون خمش چهار نقطه ای در سه سطح کرنش

semicircular bending test (SCB)

❖ نتایج:

عملکرد خوب نانوسیلیکا در دماهای بالا، متوسط و پایین

عملکرد بهتر در شیارشدگی به علت خاصیت الاستومریک نانوسیلیکا حتی در دماهای بالا

افزایش عمر خستگی تا ۲.۸ برابر

افزایش ۳۵٪ مقاومت در برابر ترک خوردگی های برودتی



مواد و مصالح مصرفی

➤ مصالح سنگی

نوع: مصالح سنگی **آهکی** به دلیل مقاومت شکست بهتر

دانه بندی: حد وسط دانه بندی پیشنهادی نشریه ۲۳۴ برای لایه توپکا با اندازه اسمی ماکزیمم ۱۹mm

فیلتر: پودر سنگ آهک

استاندارد دانه بندی:

AASHTO-T27

جدول ۱. دانه بندی مصالح سنگی مطابق پیشنهاد نشریه ۲۳۴

اندازه الک	درصد رد شده	میانگین مشخصات جدول ۲۰-۱ نشریه ۱۰۱
۱۹ میلی متر	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵ میلی متر	۹۳/۳	۱۰۰-۹۰
۴/۷۵ میلی متر	۴۶/۸	۷۴-۴۴
۲/۳۶ میلی متر	۳۴/۵	۵۸-۲۸
۰/۳ میلی متر	۱۰/۵	۲۱-۵
۰/۰۷۵ میلی متر	۴/۳	۱۰-۲

مواد و مصالح مصرفی

➤ مصالح سنگی

مانده روی الک ۸ ← استاندارد AASHTO-T85
عبوری از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰ ← استاندارد AASHTO-T84

جدول ۲. وزن مخصوص حقیقی و ظاهری و درصد جذب آب مصالح سنگی

درصد جذب آب	وزن مخصوص (Kg/m ³)		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۲/۲۰	۲/۵۳۴	۲/۶۷۲	مانده روی الک ۸
۲/۹۰	۲/۵۰۲	۲/۶۹۷	رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی ۲۰۰
-	۲/۶۶۸		رد شده از الک ۲۰۰

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی

استاندارد آزمایش		مقدار مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
ASTM	AASHTO	رویه	آستر		
ASTM	T96	۳۰	۴۰	۲/۶	حداکثر سایش به روش لوس آنجلس (درصد)
-	T96	۲۵	۳۰	۸	حداکثر ضریب تورق با روش BS812 (درصد)
D5821	-	۹۰	۸۰	۹۳	حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴
D5821	-	۲/۵	۲/۵	۱/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
-	T85	۲/۵	۲/۸	۲/۳	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)

کلیات

ادبیات فنی و پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها



مواد و مصالح مصرفی

➤ قیر

قیر مصرفی: قیر ۶۰-۷۰ از پالایشگاه تهران

دلیل انتخاب: استفاده زیاد در اکثر نقاط کشور و سهولت دسترسی به آن

جدول ۴. مشخصات قیر مورد استفاده در این پژوهش

درجه خلوص	افت وزنی	درجه اشتعال	شکل پذیری	نقطه ترمی	درجه نفوذ	چگالی در ۲۵°C
%	%	°C	cm	°C	mm +/۱	
۹۹/۶	+۱/۲	۳۰۸	۱۰۲	۵۰	۶۸	۱/۰۱۳

➤ کروزن

دلایل انتخاب کروزن:

- پایه نفتی کروزن و در نتیجه تاثیرات منفی کمتری در ساختار شیمیایی قیر
- ارزان و در دسترس بودن

جدول ۵. مشخصات کروزن

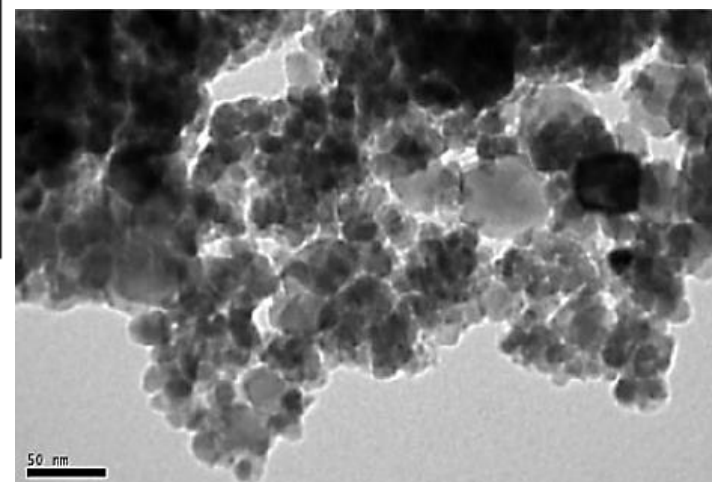
ساختار	درجه اشتعال (°C)	نقطه تبخیر (°C)	چگالی (gr/cm ³)	حلالیت
C ₆	۸۵	۱۵۵	۰/۷۵	در آب و مشتقات نفتی

مواد و مصالح مصرفی

➤ نانو اکسید کلسیم (CaO)

جدول ۶. مشخصات نانو اکسید سیلیس

CaO	فرمول شیمیایی
۲/۴	وزن مخصوص حجمی (g/cc)
۲۰-۳۰	اندازه ذرات (Nm)
سفید	رنگ
کروی	ریخت شناسی ^۱
۱۶۰	سطح مخصوص ویژه (m ² /g)
۹۸	درجه خلوص (%)
<۰/۲	جذب آب (%)



شکل ۵. تصویر SEM نانو اکسید کلسیم

تهیه قیر اصلاح شده با نانو اکسیدسیلیس و تعیین درصد قیر بهینه

۱) ترکیب نانو اکسیدسیلیس در چهار درصد مختلف صفر، ۰.۵، ۱ و ۱.۵ با حلال کروزن به روش تر به مدت ۳۰ دقیقه با ۲۵۰۰ دور بر دقیقه

۲) گرم کردن قیر تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد

۳) افزودن آهسته ترکیب نانوذرات-حلال خشک شده در طول نیم ساعت با فواصل زمانی یکسان، در میکسر با ۴۰۰۰ دور بر دقیقه و اختلاط تا حصول مخلوطی همگن از قیر و نانو ذرات

۴) تعیین درصد قیر بهینه با استفاده از روش مارشال طبق استاندارد ASTM D1559



شکل ۶. میکسر برش بالا



شکل ۷. دستگاه آزمایش مارشال

تهیه مخلوط آسفالتی با قیر پایه و اصلاح شده



دانشگاه سمنان

کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

1

گرم کردن مصالح سنگی و قیر در داخل کوره به ترتیب با دمای ۱۲۱ تا ۱۳۸ و ۱۷۷ تا ۱۹۱ درجه سانت گراد و به مدت ۱۶ ساعت

2

افزودن قیر (به میزان درصد بهینه) به مصالح سنگی

3

اختلاط قیر و مصالح سنگی

4

ریختن مخلوط در قالب استوانه‌ای به قطر ۱۰ cm و ارتفاع ۶.۲ cm

5

قرار گیری قالب استوانه‌ای در دستگاه تراکم ژیراتوری جهت عمل کوبش در دمای ۱۴۳-۱۴۶ درجه سانتی گراد

دال ها و تیرچه‌های آسفالتی جهت انجام آزمایشات

ابعاد دال‌ها: ابعاد مقطع قابل قبول برای ساخت نمونه‌های آسفالتی برای ساخت نمونه‌ها بصورت ۳۰۰ در ۳۰۰ میلیمتر بوده که معمول‌ترین حالت آن می‌باشد. همچنین ضخامت قابل قبول نیز برای نمونه‌ها در آزمایشگاه بصورت ۷۵-۵۰ میلیمتر می‌باشد.

کاربرد دال‌ها: جهت انجام آزمایش شیار شدگی ویل ترک

ابعاد تیرچه‌ها: ۵۰ در ۵۰ در ۳۹۰ میلیمتر

تهیه تیرچه‌ها جهت انجام آزمایش خستگی به روش تیر خمشی



دانشگاه سمنان

کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

انجام آزمایشات استاندارد قیر

آزمایشات استاندارد قیر جهت بررسی خواص فیزیکی قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانو اکسید کلسیم و قیر پایه شامل:

۱. درجه نفوذ
(ASTM D5)



شکل ۸. دستگاه آزمایش درجه نفوذ

۲. نقطه نرمی
(ASTM D36)



شکل ۹. دستگاه آزمایش نقطه نرمی

۳. کشش پذیری
(ASTM D113)



شکل ۱۰. دستگاه آزمایش کشش پذیری

۴. ویسکوزیته سینماتیکی
(ASTM D7042)



شکل ۱۱. دستگاه آزمایش تعیین ویسکوزیته قیر

انجام آزمایش شیارشدگی



دانشگاه سمنان

کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

۰۱. آزمایش با حرکت رفت و برگشت چرخ بارگذاری شده

۰۲. دمای انجام آزمایش ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد

۰۳. ابعاد مقاطع مورد استفاده ۳۰ در ۳۰ سانتیمتر با ضخامت ۵ سانتیمتر

۰۴. بار وارد شده معادل ۷۰۰ نیوتون

۰۵. انجام سه تکرار از هر مخلوط



شکل ۱۲. دال‌های مختلف ساخته شده تحت آزمایش ویل‌ترک

انجام آزمایش خستگی



دانشگاه سمنان

کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

۰۱ انجام آزمایش با استفاده از دستگاه ساخت شرکت IPC9 استرالیا

۰۲ انجام آزمایش در دو سطح کرنش معین ۶۰۰ و ۱۰۰۰ میکرواسترین

۰۳ دماهای آزمایش ۱۵ و ۲۰ درجه سانتی گراد

۰۴ شکل موج بار نیمه سینوسی

۰۵ انجام سه تکرار از هر مخلوط

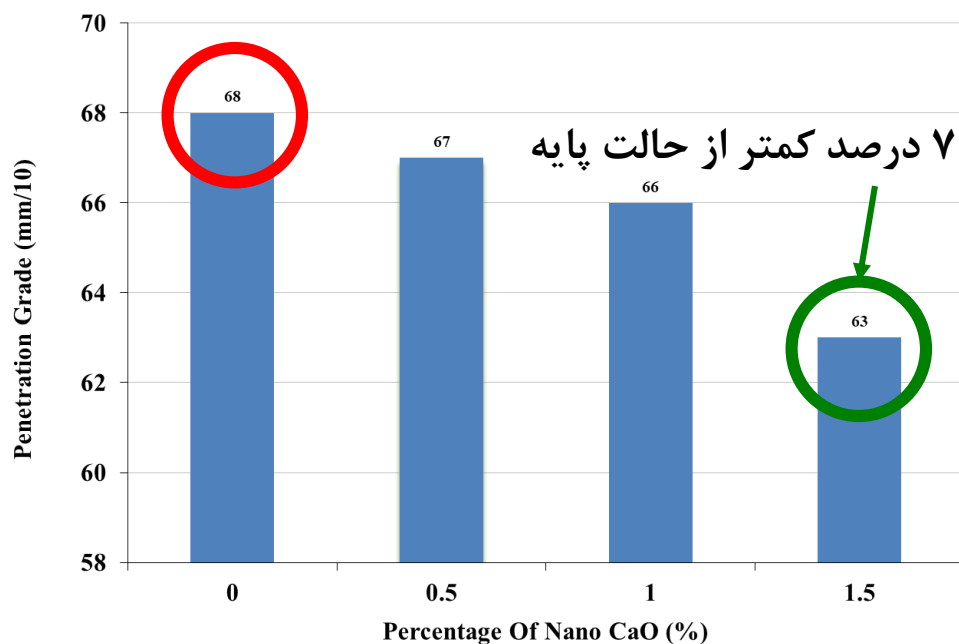
نتایج آزمایشات استاندارد قیر

۱. درجه نفوذ (ASTM D5)

تاثیر افزودن نانو CaO:

- سفت تر شدن قیر به دلیل تشکیل پیوندهای قوی تر بین آسفالتین و ذرات نانو
- عدم جداسدگی ذرات قیر

↑ درصد نانو Cao ← ↓ درجه نفوذ



کمترین میزان درجه نفوذ مربوط به افزودن ۱.۵ درصد نانو CaO است



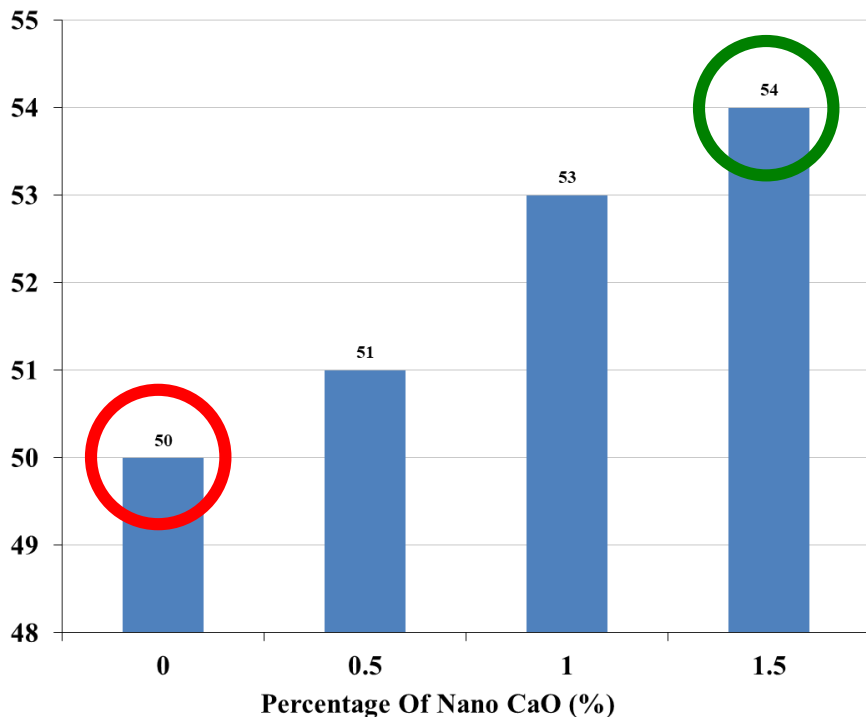
نتایج آزمایشات استاندارد قیر

۲. نقطه نرمی (ASTM D36)

تاثیر افزودن نانو CaO: ←

↑ درصد نانو Cao ← نقطه نرمی ↑

تبادل دمایی قیر تغییر کرده و از آنجاییکه حساسیت حرارتی نانو CaO نسبت به تغییرات دمایی پایین تر است، این ذرات با تبادل گرمایی، دمای لازم برای نرم شدن قیر را افزایش می دهند.



افزایش نقطه نرمی به این علت است که نانو CaO با جذب گرمای قیر، مانع شکستن پیوندهای لایه های قیر شده و از این رو نقطه نرمی قیر تغییر کمتری نسبت به تغییرات گرمایی از خود نشان داده است.

شکل ۱۴. نتایج آزمایشگاهی مربوط به آزمایش نقطه نرمی

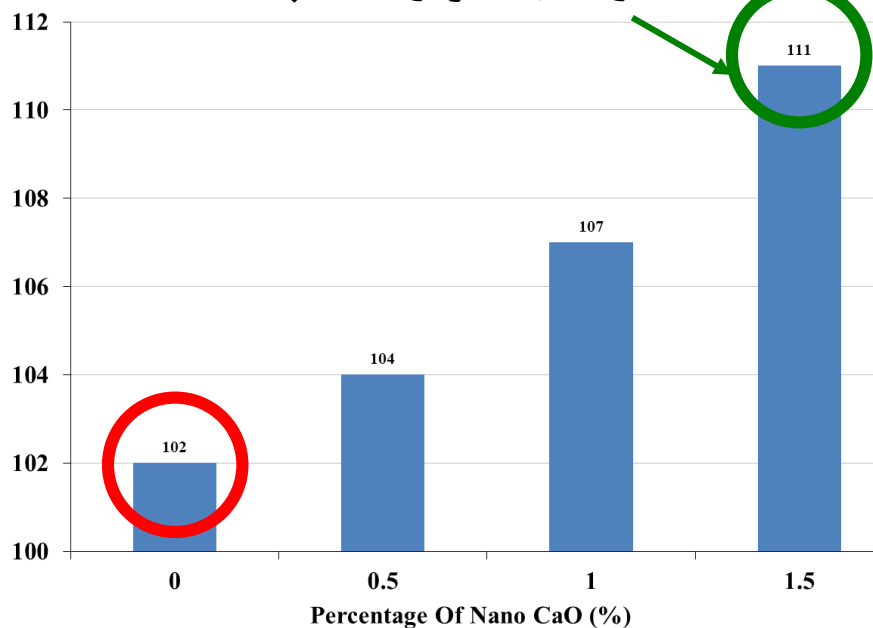
نتایج آزمایشات استاندارد قیر

۳. کشش پذیری (ASTM D113)

تاثیر افزودن نانو CaO: ←

افزایش خاصیت کشسانی در نمونه‌های قیری به علت قرارگیری ذرات نانو CaO در بین ذرات قیر و ایجاد پیوندهای قوی‌تری بین آنها که مانع از گسیختگی قیر اصلاح شده می‌گردد.

↑ درصد نانو Cao ← خاصیت کشسانی در نمونه‌های قیری ↑
۸.۸ درصد بیشتر از حالت پایه



قیر حاوی ۱.۵٪ نانو CaO بیشترین مقدار نیروی کششی را بدون اینکه گسیخته گردد تحمل می‌نماید.

افزایش تاب کششی بخصوص در ایام گرم سال می‌تواند کمک شایانی به تحمل تنش‌های کششی ناشی از حرارت در مخلوط‌های آسفالتی نماید.

نتایج آزمایشات استاندارد قیر

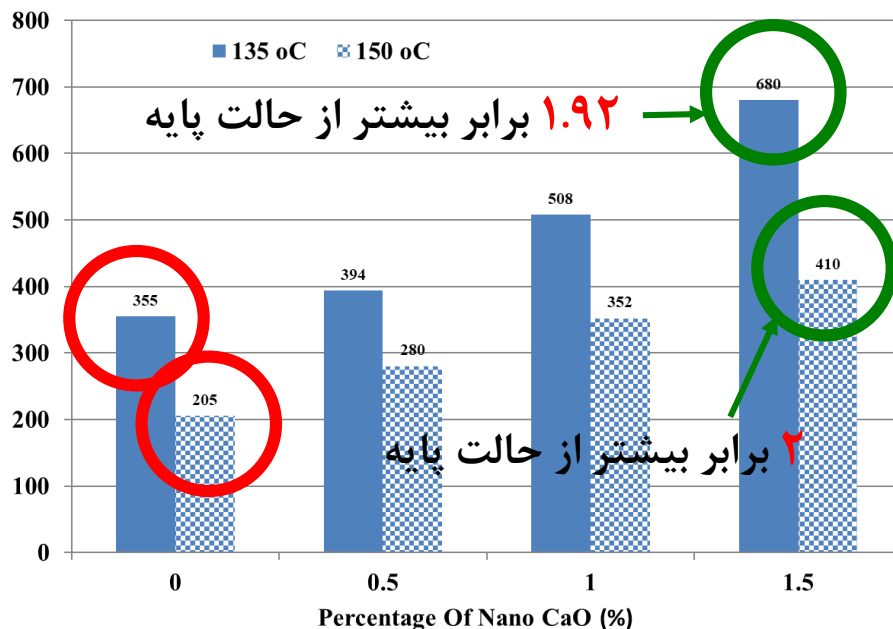
۴. ویسکوزیته سینماتیکی (ASTM D7042)

ذرات نانو CaO با تقویت پیوندهای موجود بین آسفالتین و مالتین، قوام و غلظت قیر را افزایش می‌دهند و نقش مهمی در راستای اتصال بهتر سنگدانه‌ها و قیر بر عهده دارند.

تاثیر افزودن نانو CaO: ←

مقدار ویسکوزیته در هر دو دما 135°C و 150°C

↑ درصد نانو Cao ← ↑



نکته حائز اهمیت تاثیر بسزای نانو CaO بر ویسکوزیته قیر در دمای بالاتر می‌باشد.

در درصد بهینه نانو CaO (۱.۵٪) میزان افزایش ویسکوزیته بیشتر می‌باشد.



نتایج آزمایشات مخلوط آسفالتی

۱. آزمایش مارشال

پس از بررسی نتایج آزمایشات قیر که نشان از تاثیر بالای نانو اکسید کلسیم بر عملکرد قیر داشته و پیش از ورود به بخش آزمایشات مخلوط آسفالتی لازم است تا میزان **درصد قیر بهینه** به منظور ساخت نمونه‌های لازم جهت انجام آزمایشات **شیارشدگی** و **خستگی** تعیین شود. با توجه به نتایج آزمایش مارشال، مقادیر قیر بهینه برای نمونه‌های کنترل و اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانو اکسید کلسیم در جدول ۶ ارائه گردیده است.

جدول ۷. مقادیر قیر بهینه برای نمونه‌های مختلف

ماده افزودنی	درصد افزودنی	درصد قیر بهینه
نمونه کنترل	۰	۵.۰
نمونه اصلاح شده با CaO	۰.۵	۵/۵
	۱.۰	۶.۰
	۱.۵	۶.۰

نتایج آزمایشات مخلوط آسفالتی



دانشگاه سمنان

۲. آزمایش ویل ترک

تاثیر افزودن نانو CaO:

کاربرد ۱.۵٪ نانو CaO و کاهش ۳۱٪ و ۴۰٪ عمق شیار در دو دمای ۴۰°C و ۵۰°C نشان از تاثیر مثبت نانو CaO و همچنین حساسیت بالای قیر نسبت به دما است.

↑ درصد نانو Cao ← عمق شیار ↓

کلیات

ادبیات فنی و پیشینه پژوهش

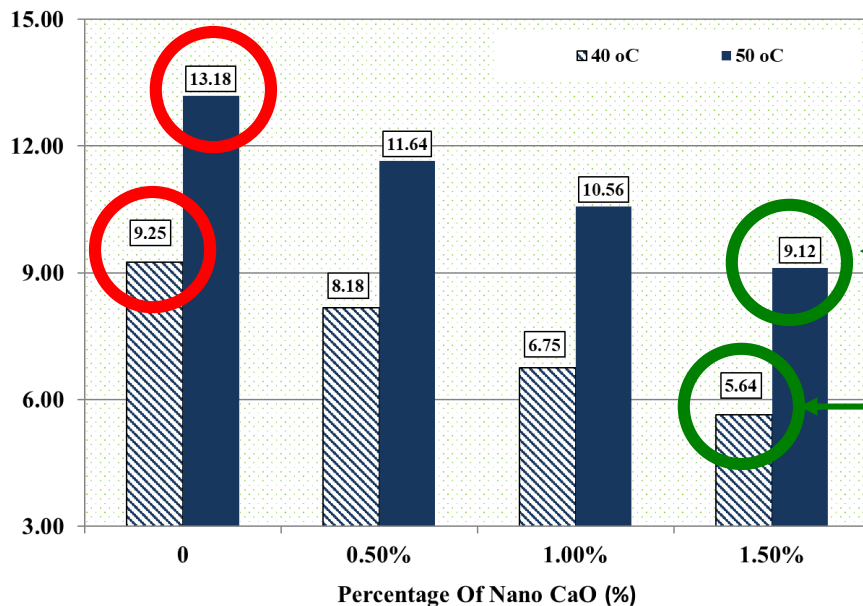
روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها



عمق شیار ۳۱٪ کمتر نسبت به حالت پایه

عمق شیار ۴۰٪ کمتر نسبت به حالت پایه

شکل ۱۷. عمق شیار نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده و پایه در دماهای آزمایش

نتایج آزمایشات مخلوط آسفالتی

۳. آزمایش تیر خمشی تحت بار چهار نقطه‌ای

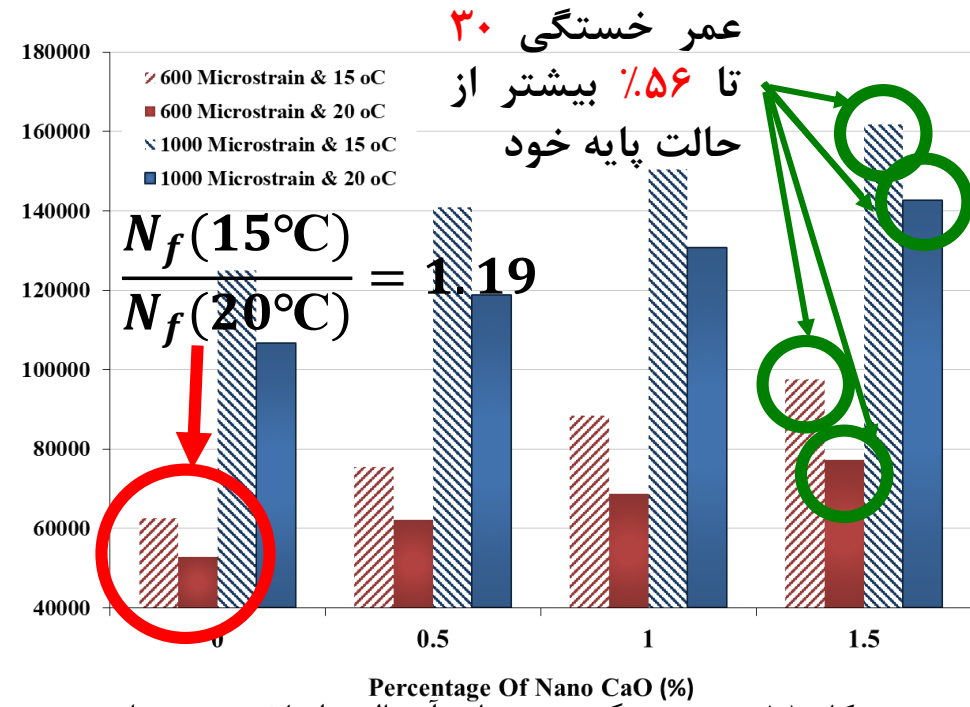
تاثیر افزودن نانو CaO: ← استفاده از ۱.۵٪ نانو CaO در هر دو دما تعداد سیکل قابل تحمل را افزایش داده و احتمال وقوع ترک‌ها و آغاز پدیده خستگی را نسبت به حالت پایه کاهش داده است.

تاثیر افزودن نانو CaO: ←

↑ درصد نانو Cao ← عمر خستگی ↑

عمر خستگی در ۱۵°C
∨
عمر خستگی در ۲۰°C
↓
تاثیر زیاد دما بر عمر خستگی

عمر خستگی در کرنش ۶۰۰
∧
عمر خستگی در کرنش ۱۰۰۰
↓
تاثیر زیاد دما بر عمر خستگی



شکل ۱۸. عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده و پایه

نتایج آزمایشات مخلوط آسفالتی

۳. آزمایش تیر خمشی تحت بار چهار نقطه‌ای

معادله خطی پیش‌بینی عمر خستگی با استفاده از نرم‌افزار متلب از طریق تجزیه و تحلیل رگرسیون:

$$N_f = c + a \times P_{(CaO)} + b \times S \quad (1)$$

دمای 15°C

$$\hookrightarrow N_f(P_{(CaO)}, S) = (-3.216e + 04) + ((2.375e + 04) \times P_{(CaO)}) + (158.9 \times S) \quad (2)$$

دمای 20°C

$$\hookrightarrow N_f(P_{(CaO)}, S) = (-3.904e + 04) + ((2.001e + 04) \times P_{(CaO)}) + (148.8 \times S) \quad (3)$$

$$R_{(1)}^1 = 0.9986 \cong 1.00 \quad \checkmark$$

$$R_{(2)}^1 = 0.995 \cong 1.00 \quad \checkmark$$

N_f میزان عمر خستگی پیش‌بینی شده
 $P_{(CaO)}$ میزان ماده نانو بر حسب درصد
 S میزان کرنش کنترل شده در طی آزمون
خمش چهار نقطه‌ای بر حسب میکرواسترین
 a ، b و c ضرایب ثابت



دانشگاه سمنان

کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

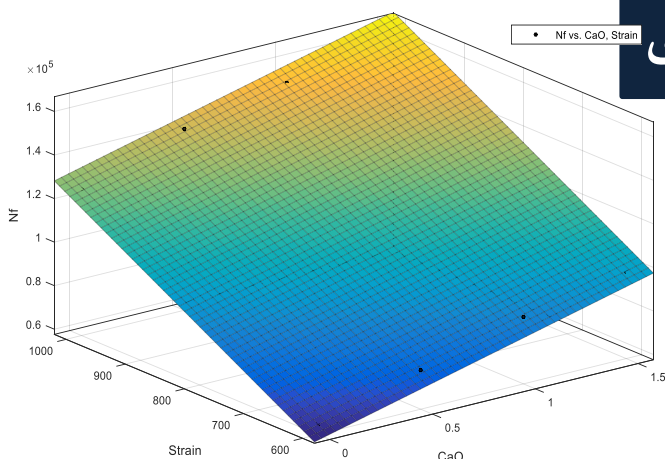
دست آوردها

نتایج آزمایشات مخلوط آسفالتی

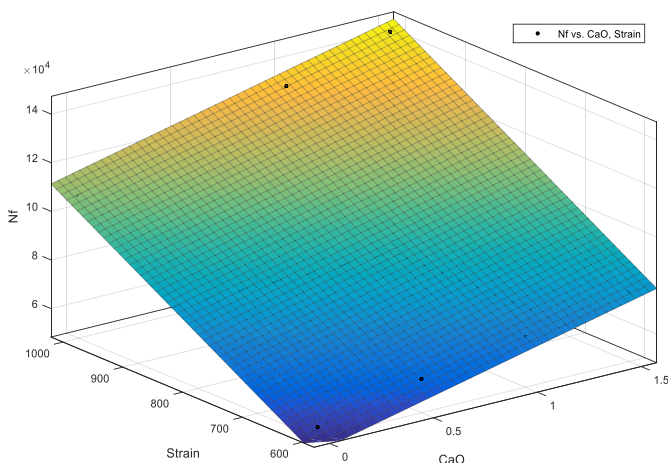
۳. آزمایش تیر خمشی تحت بار چهار نقطه‌ای

تفسیر سه بعدی معادلات پیش‌بینی عمر خستگی:

افزایش میزان نانو اکسید کلسیم به کار برده شده سبب افزایش عمر خستگی می‌گردد اما میزان این بهبود با افزایش میزان کرنش از ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرواسترین تقریباً ثابت است. با این حال با افزایش کرنش از ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرواسترین میزان عمر خستگی افزایش قابل توجهی (در حدود ۵۰ درصد) خواهد داشت.



شکل ۱۹. تصویر سه بعدی مدل پیشنهادی برای عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در مقابل درصد نانو اکسید کلسیم و کرنش (15°C)



شکل ۲۰. تصویر سه بعدی مدل پیشنهادی برای عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در مقابل درصد نانو اکسید کلسیم و کرنش (20°C)



نتیجه گیری

1

افزودن ۱.۵٪ نانو اکسید کلسیم به قیر به عنوان درصد نانوی بهینه، بهترین و بهینه‌ترین نتایج را در آزمایشات فیزیکی قیر مانند درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش پذیری و ویسکوزیته سینماتیکی داشته است.

2

استفاده از ۱.۵٪ نانو اکسید کلسیم در قیر، مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر شیار افتادگی حدود ۳۱ تا ۴۰٪ بهبود می‌بخشد که با توجه به مهم بودن خرابی شیارشدگی در عملکرد روسازی آسفالتی می‌تواند مقدار قابل توجهی باشد، هرچند این تاثیر با افزایش دما کاهش یافته است که نشان از حساسیت بالای قیر به حرارت می‌باشد.





نتیجه گیری



دانشگاه سمنان

3

استفاده از ۱.۵٪ نانو اکسید کلسیم در قیر، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خستگی را حدود ۳۰ تا ۵۶٪ بهبود می بخشد که با توجه به مهم بودن خرابی خستگی در عملکرد روسازی آسفالتی میتواند مقدار قابل توجهی باشد.

کلیات

ادبیات فنی و پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

4

استفاده از ۱.۵٪ نانو اکسید کلسیم هرچند شاید اندکی هزینه ساخت اولیه مخلوط را افزایش دهد، با این حال با توجه به بهبود قابل توجه در رفتار قیر و مخلوط آسفالتی که منجر به کاهش دو مورد از مهمترین خرابی های مخلوط آسفالتی یعنی شیارشدگی و خستگی خواهد شد، این هزینه اولیه بیشتر جبران خواهد شد.



کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

۱

در این پژوهش تأثیر نانو اکسید کلسیم بر قیر بررسی شد، اما با توجه به این که نانو ذرات طیف بسیار گسترده‌ای را شامل می‌شوند، می‌توان از انواع دیگر نانو ذرات در پژوهش‌های آتی استفاده کرد و تأثیر آن‌ها را نیز بر قیر مورد بررسی قرار داد.

۲

با توجه به این که آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش محدود به چند نوع خاص از آزمایش‌ها بودند، می‌توان در مطالعات آتی، سایر انواع آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی مرتبط با قیر را انجام داد.

۳

انجام مطالعات میدانی و مقایسه نتایج آن با نتایج این تحقیق



دانشگاه سمنان

کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

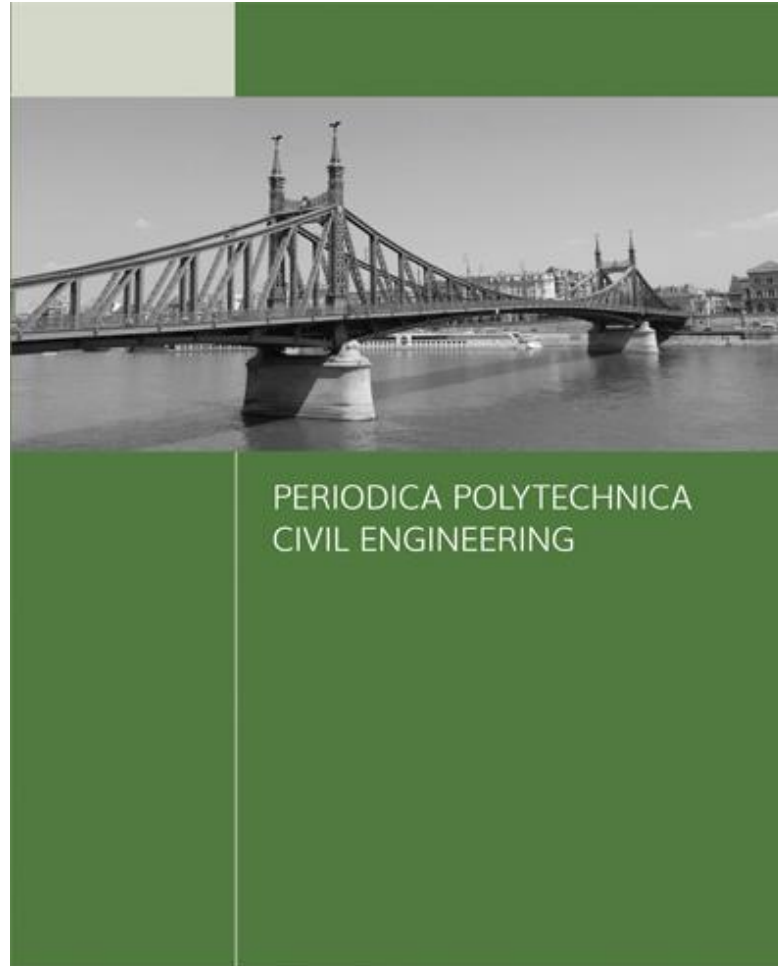
نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

Experimental Investigation the Effect of Nano CaO Modified Binder on the Rutting and Fatigue Performance of HMA Mixtures





کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

- [1] G. Shafabakhsh, M. Sadeghnejad, and R. Ebrahimnia, “Fracture resistance of asphalt mixtures under mixed-mode I/II loading at low-temperature: Without and with nano SiO₂,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 266, p. 120954, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120954.
- [2] J. Gao, H. Wang, C. Liu, D. Ge, Z. You, and M. Yu, “High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 230, p. 117063, 2020.
- [3] G. Shafabakhsh, M. Akbari, and H. Bahrami, “Evaluating the Fatigue Resistance of the Innovative Modified-Reinforced Composite Asphalt Mixture,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2020, pp. 1–10, Dec. 2020, doi: 10.1155/2020/8845647.
- [4] G. A. Shafabakhsh, M. Sadeghnejad, B. Ahoor, and E. Taheri, “Laboratory experiment on the effect of nano SiO₂ and TiO₂ on short and long-term aging behavior of bitumen,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 237, p. 117640, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117640.
- [5] J. Crucho, L. Picado-Santos, J. Neves, and S. Capitão, A review of nanomaterials’ effect on mechanical performance and aging of asphalt mixtures, vol. 9, no. 18. 2019.
- [6] G. Shafabakhsh, M. Motamedi, M. Firouznia, and M. Isazadeh, “Experimental investigation of the effect of asphalt binder modified with nanosilica on the rutting, fatigue and performance grade,” *Pet. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 13, pp. 1495–1500, 2019, doi: 10.1080/10916466.2018.1476534.
- [7] G. Shafabakhsh, M. Rajabi, and A. sahaf, “The fatigue behavior of SBS/nanosilica composite modified asphalt binder and mixture,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 229, p. 116796, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116796.



کلیات

ادبیات فنی و
پیشینه پژوهش

روش تحقیق

نتایج و بحث

نتیجه گیری

پیشنهادات

دست آوردها

- [8] M. Ameri, D. Mirzaiyan, and A. Amini, "Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 30, no. 11, p. 4018292, 2018.
- [9] M. Fakhri, E. Haghghat Kharrazi, M. R. M. Aliha, and F. Berto, "The effect of loading rate on fracture energy of asphalt mixture at intermediate temperatures and under different loading modes," *Frat. ed Integrita Strutt.*, 2018, doi: 10.3221/IGF-ESIS.43.09.
- [10] F. Moghadas Nejad, E. Geraee, and A. R. Azarhoosh, "The effect of nano calcium carbonate on the dynamic behaviour of asphalt concrete mixture," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018.
- [11] M. Sadeghnejad and G. Shafabakhsh, "Use of Nano SiO₂ and Nano TiO₂ to improve the mechanical behaviour of stone mastic asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 965–974, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.163.
- [12] R. Li, F. Xiao, S. Amirkhanian, Z. You, and J. Huang, "Developments of nano materials and technologies on asphalt materials – A review," *Construction and Building Materials*, vol. 143, pp. 633–648, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.158.
- [13] Z. Kordi and G. Shafabakhsh, "Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with Nano Fe₂O₃," *Constr. Build. Mater.*, vol. 134, pp. 530–539, 2017.
- [14] L. Sun, *Structural Behavior of Asphalt Pavements: Intergrated Analysis and Design of Conventional and Heavy Duty Asphalt Pavement*. Butterworth-Heinemann, 2016.
- [15] G. Shafabakhsh, S. M. Mirabdolazimi, and M. Sadeghnejad, "Evaluation the effect of nano-TiO₂ on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 54, pp. 566–571, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.064.

با شکر از نگاه کرمتان