بررسی تاثیر مشخصات روسازی بر عملکرد روسازی در مناطق مختلف آب و هوایی

حسن طاهرخانی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
مونا مهدیزاده طالعی، کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mona.mahdizad@gmail.com
دریافت: ۹٤/۰۱/۳۰- پذیرش: ۹٤/۰۳/۳۰

چکیده

تحقیقات صورت گرفته در دهه‌های گذشته نشان می‌دهد که شرایط آب و هوایی اثر مهمی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی دارد. عوامل محیطی بیرونی مانند بارش، دما و سیکل‌های ذوب و یخ بر روی تمام خرابی‌های روسازی تاثیر می‌گذارند. به همین جهت، راهنمای جدید طراحی تحلیلی - تجربی روسازی (اشتو ۲۰۰٤) اثر شرایط آب و هوایی را بر روی عملکرد روسازی به تفضیل بررسی کرده است. این راهنما، از طریق نرم‌افزار طراحی روسازی خود به نام MEPDG، داده‌های آب وهوایی محل پروژه را به عنوان یک داده اساسی ورودی دریافت می‌کند. برای این منظور در این مقاله با اخذ داده‌های آب و هوایی مناطق مختلف آب و هوایی ایران از سازمان هواشناسی کشور و تبدیل آن به فرمت مورد نیاز نرم‌افزار MEPDG، اقدام به اجرای نرم‌افزار و تحلیل حساسیت خرابی‌ها در مناطق مختلف آب و هوایی نسبت به تغییر عوامل طراحی شد. نتایج بدست آمده از بررسی کلیه تحلیل حساسیت‌ها، نشان می‌دهد، روسازی در مناطق آب و هوایی مختلف عملکرد یکسانی ندارد و تاثیرات دما، رطوبت و چرخه ذوب و یخبندان بر هر یک از خرابی‌ها، در مناطق مختلف آب و هوایی، می‌تواند متفاوت باشد. در نهایت با بررسی میزان تاثیر تغییر در عوامل طراحی، مشخص گردید که میزان حساسیت خرابی‌ها نسبت به تغییر ضخامت لایه آسفالتی و ترافیک عبوری، در کلیه مناطق آب و هوایی، بیشتر از سایر عوامل است، همچنین تعیین خاک بستر برای مناطقی که دارای دوره‌های ذوب و یخ طولانی هستند، به دلیل حساسیت خاک‌های ریزدانه به یخبندان و تورم آن‌ها در فصل ذوب یخ‌ها، نیز دارای اهمیت بالایی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: MEPDG، تاثیر آب و هوا، روش تحلیلی- تجربی، تحلیل حساسیت خرابی‌ها

۱- مقدمه

با ظهور نسل جدید کامپیوترها و افزایش توان محاسباتی، گرایش به روش‌های تحلیلی- تجربی و توجه به پارامترهایی که در گذشته به دلیل طولانی بودن محاسبات و نبود ابزارهای لازم برای تحلیل، در طراحی روسازی نادیده گرفته می‌شد، افزایش یافت. از جمله این پارامترهای مهم اثرات آب و هواست. تحقیقات اخیر نشان داده است که شرایط آب و هوایی، بر روی عملکرد روسازی تاثیر بسیار زیادی دارد و ویژگی‌های آن را دستخوش تغییر قرار می‌دهد. فعل و انفعال به وجود آمده میان عوامل محیطی، مواد روسازی و بارگذاری، بسیار پیچیده است. عامل‌هایی مانند بارش، دما، سیکل‌های ذوب و یخ و عمق آب زیرزمینی، بر روی میزان رطوبت و دمای روسازی و خاک بستر تاثیر گذاشته و این به نوبه خود بر ظرفیت باربری لایه‌های روسازی و به عبارت ساده‌تر عملکرد روسازی تاثیرگذار است. با توجه به اینکه نرم‌افزارهای طراحی شده بر اساس روش‌های تحلیلی - تجربی مانند MEPDG برای کلیه ایالت‌های آمریکا و شرایط آب‌وهوایی آن‌ها طراحی شده است، لذا جهت استفاده از این نرم‌افزار در

* - نویسنده مسئول

ایران لـزوم در نظـر گـرفتن شـرایط آب‌وهـوایی ایـران در تحلیل‌ها و ساختن فایـل‌هـای آب‌وهـوایی ایـران احسـاس می‌شود. در کشور ما با توجـه بـه افـزایش هزینـه‌هـای اجـرای روسازی و به روز شدن دستگاه‌های ساخت و اجرای روسـازی آسفالتی، می‌توان از روش‌های جدید طراحی برای بهینه سـازی طراحی‌ها سود برد. امید است با بررسـی تغییـرات و اسـتفاده از پتانسیل‌های بومی بتوان اصـلاحاتی در روش طراحـی موجـود انجام داد تا با صرف هزینه کمتر، بهره‌وری بیشتر روسازی‌هـای طراحی شده در کشور را شاهد بود. لذا، در این پژوهش سعی بر آن است که برای تحلیل روسازی مناطق مختلـف ایـران، بـا شـرایط آب‌وهـوایی متفـاوت از نـرم افـزار MEPDG، استفاده شود.

۱-روش تحقیق

در این پژوهش چهار منطقه آب و هوایی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند تا تاثیر شرایط آب و هوایی مختلف بر روی خرابی‌های روسـازی در طـول عمـر آن‌هـا مشـاهده گردد. بندرعباس به عنوان منطقه‌ای با آب و هـوای خیلـی گرم و نیمه مرطوب، اصفهان با آب و هوای نیمه بیابـانی و خشک، ساری نیز نماینده منطقه آب و هـوایی بـا رطوبـت بالا و در آخر زنجان به عنوان منطقه آب و هوایی سـرد بـا دوره‌های ذوب و یخ طولانی، انتخاب شده و مورد تحلیـل و بررسی قرار گرفتند. در ابتدا مناطق مورد مطالعه معرفـی گشته و تفاوت آن‌ها از لحاظ معیارهای آب و هوایی مانند میزان بارندگی و میانگین دمای هوای ماهانه مقایسه شدند. همچنین تاثیر عوامل آب و هوایی روی خرابی‌ها در ادامـه مطالب بیان گردیده است. سپس طی بررسی‌هـای مکـرر و خروجی‌های مختلف از اجرای نرم افزار تحلیلی- تجربـی MEPDG[1]، با اعمـال تغییـر در ضـخامت لایـه آسـفالتی، درصد فضای خالی و نوع قیر مصرفی و درصد موثر آن در مخلـوط بـتن آسـفالتی، نـوع خـاک بسـتر و همچنـین AADTT[2]، تحلیل حساسیت بر روی این عوامـل مهـم و کلیدی و تاثیر آن‌ها بـر روی خرابـی‌هـا صـورت پذیرفتـه است. در نهایت با اندازه‌گیری درصد تغییرات هـر کـدام از عوامل بر روی هریک از خرابـی‌هـا، میـزان اهمیـت تغییـر عوامل طراحی در هر یک از مناطق آب و هوایی، مشخص گردیدند.

۲-بررسی مناطق آب و هوایی مـورد مطالعـه و تاثیر آن‌ها روی عملکرد روسازی

از آنجا که آب و هوا تأثیر بسیار زیادی بر روی رفتـار خرابی‌های مختلف داشته، با بررسی آیتم‌های آب و هوایی می‌توان رفتار خرابی‌های مختلف را در کلیه مناطق توجیـه نمود. فاکتورهای اصلی آب و هـوایی تاثیرگـذار بـر عمـر روسازی، دما و بارش می‌باشند. دمای روسازی به صـورت فصلی، روزانه و حتی ساعتی تغییر می‌کند. با افـزایش دمـا در طول روز دمای روسازی افزایش یافته و با کـاهش دمـا در طول شب کاهش مـی‌یابـد. در ایـن پـژوهش ٤ منطقـه مختلف آب و هوایی از ایران مورد تحلیل و بررسـی قـرار گرفته‌اند. به طور تقریبی می‌توان گفت این منـاطق نماینـده آب و هوای ٤ منطقـه مختلـف در ایـران اعـم از سـاحلی شمالی با رطوبت بالا، ساحلی جنوبی با دمای بسیار بـالا و نیمه مرطـوب، کوهسـتانی بـا دوره‌هـای ذوب و بخبنـدان طولانی و نیمه بیابانی خشک می‌باشـند. بـا مقایسـه دمـا و بـارش منـاطق، مـی‌تـوان شـناخت بیشـتری را دربـاره خرابی‌های محتمل‌تر در هـر منطقـه آب و هـوایی بدسـت آورد. در جـدول ۱ منـاطق مـورد بررسـی و موقعیـت جغرافیایی آن‌ها آورده شده است.

جدول ۱. مناطق آب و هوایی مورد بررسی

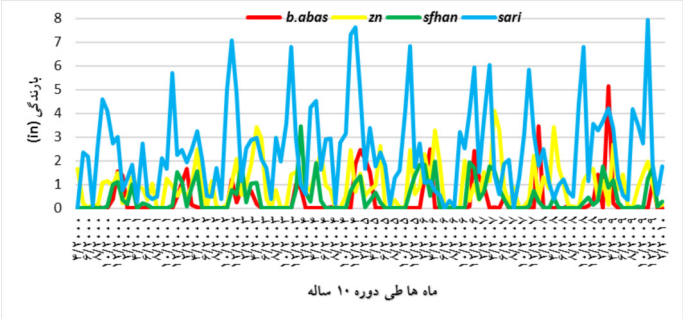
محل مورد مطالعه	نوع منطقه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
بندرعباس	ساحلی جنوبی	۹.۸	۵۶.۳۶	۲۷.۱۲
زنجان	کوهستانی	۱۶۶۲.۵۷	۴۸.۴۸	۳۶.۶۸
اصفهان	نیمه بیابانی	۱۵۵۰	۵۱.۶۶	۳۲.۶۱
ساری	ساحلی شمالی	۲۳	۵۳	۳۶.۵۵

۳-۱- بارندگی

میزان بارندگی یکی از آیتم‌های آب و هوایی است که در نرم‌افزار MEPDG بررسی می‌شود. افزایش بارندگی باعث افزایش رطوبت بر روی روسازی می‌گردد. مقاومت خاک‌های ریزدانه بستگی به میزان رطوبت موجود در آن‌ها دارد. معمولاً با افزایش رطوبت خاک از مقاومت آن به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاسته می‌شود. کاهش مقاومت خاک با افزایش رطوبت تا حدود ۳۰٪ نسبتاً شدید بوده و پس از آن از شدت کاهش مقاومت تا حدودی کم می‌شود (طباطبایی، ۱۳۷۵). با افزایش رطوبت، مدول خاک بستر کاهش یافته و میزان تنش کششی بیشتری در زیر لایه آسفالتی ایجاد می‌شود. میزان بارندگی به صورت میزان بارش ماهانه و همچنین تعداد روزهای بارانی در طول دوره طراحی، که داده‌های آن از خروجی نرم‌افزار به دست آمده، به ترتیب در نمودارهای ۱ و ۲ برای ٤ منطقه آب و هوایی نشان داده شده است.

برای مقایسه بهتر داده‌ها، اطلاعات آماری توسط نرم‌افزار spss محاسبه گشته و در جدول ۲ آورده شده است.

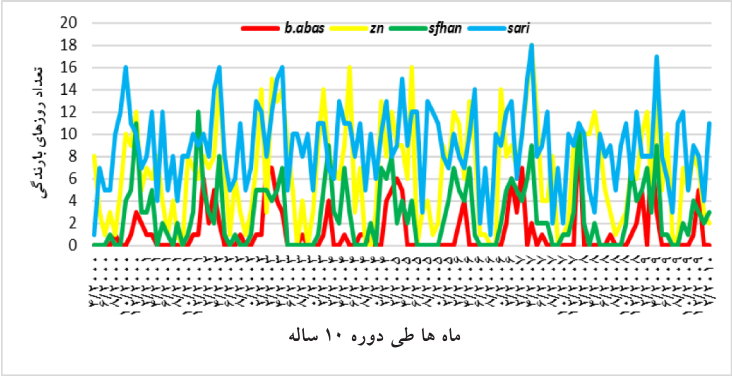
همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است، ساری ماه بدون بارشی را در طول دوره ۱۰ ساله نداشته و میانگین بارندگی چندین برابر سایر مناطق می‌باشد.



نمودار ۱. میزان بارندگی ماهانه

جدول ۲. میزان بارندگی ماهانه در طی دوره ۱۰ ساله

شهر	حداقل بارندگی (mm)	حداکثر بارندگی (mm)	میانگین بارندگی (mm)	انحراف معیار
بندرعباس	۰	۱۳۰.۸۱	۸.۸	۰.۷۸۹۹۴
زنجان	۰	۱۰۴.۳۹	۲۴.۴۷	۰.۹۱۲۹۴
اصفهان	۰	۸۷.۸۸	۱۱.۷	۰.۶۵۷۵۷
ساری	۰.۵	۲۰۱.۴۲	۶۲.۷	۱.۸۷۴۰۵



نمودار ۲. تعداد روزهای بارندگی در هر ماه از سال

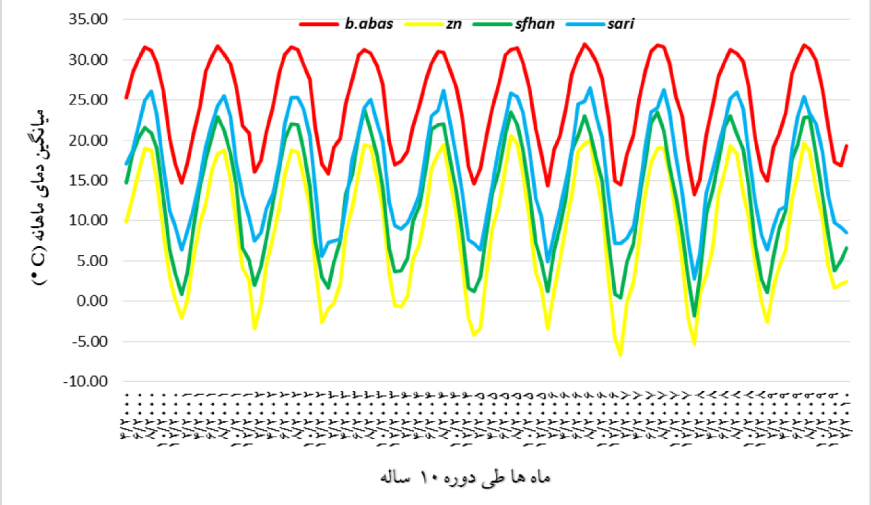
با توجه به نمودار ۲ که تعداد روزهای بارانی در ماه‌های سال را نشان می‌دهد، مشخص می‌شود زنجان نیز ماه‌های پربارش بسیاری دارد، اما نوسان آن در طول ۱۰ سال بررسی، بیشتر از ساری است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با وجود اینکه حداکثر روزهای بارانی در یک ماه از سال در شهر زنجان با منطقه پربارش ساری برابر بوده، اما ماه‌های بدون بارندگی بسیاری را در طول دوره مورد بررسی، تجربه می‌کند که همین امر باعث کاهش میانگین بارندگی در این منطقه می‌گردد.

۳-۲-میانگین دما

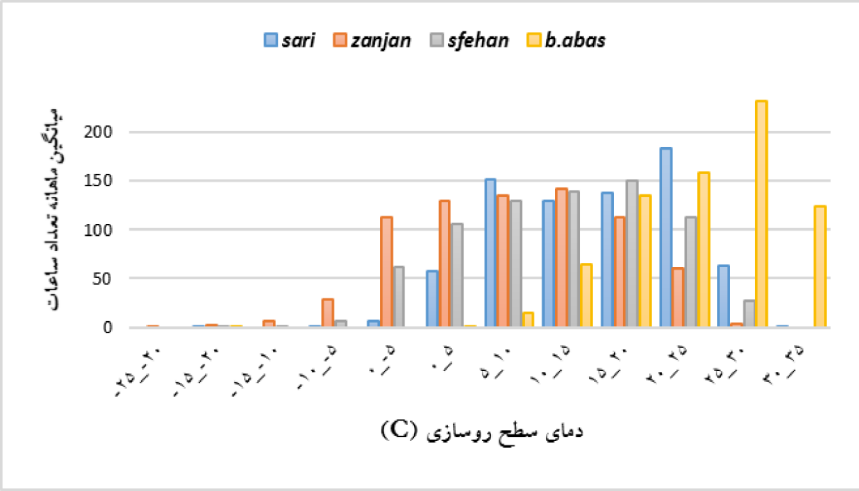
دمای هوا نیز یکی از عوامل آب و هوایی موثر بر روی خرابی‌های روسازی می‌باشد. میانگین دمای ماهانه در طول دوره ۱۰ ساله برای چهار منطقه آب و هوایی مورد مطالعه، در نمودار ۳ آورده شده است. مطابق نمودار، میانگین دما در بندرعباس بیشترین و در زنجان کمترین مقدار را در میان سایر مناطق به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین بندرعباس به عنوان گرم‌ترین و زنجان سردترین منطقه میان مناطق مورد بررسی، شناخته می‌شوند. میانگین دمای بندرعباس در بیشتر ماه‌های سال بین ۲۰ C^o - ۳۵ C^o متغیر است. در حالیکه این میانگین دما در منطقه کوهستانی چون زنجان، در بیشتر ماه‌های سال ۱۰ تا ۵- درجه می‌باشد. همچنین ساری به دلیل قرارگرفتن در طول جغرافیایی بیشتر نسبت به اصفهان دمای بالاتری را تجربه می‌کند که در این نمودار مشهود است.

۳-۲-۱-تاثیر دما بر روی شیارشدگی

دمای بالای هوا، روسازی یک منطقه را به شدت در معرض خرابی شیارشدگی قرار می‌دهد. دمای بالا در شیار شدگی بتن آسفالتی با ضخامت‌های بالاتر از ۱۰ سانتی‌متر مشارکت دارد. زیرا دمای بالاتر از ۳۰ C^o نزدیک به سطح بتن آسفالتی برای پیش‌بینی شیارشدگی بسیار مهم است(Ongel, 2004). برای بررسی تغییرات ساعتی دما در مناطق مختلف، دمای سطحی ساعتی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ در ٤ منطقه آب وهوایی مورد ارزیابی قرار گرفت که در نمودار٤ آورده شده است.



نمودار ۳. میانگین دمای ماهانه



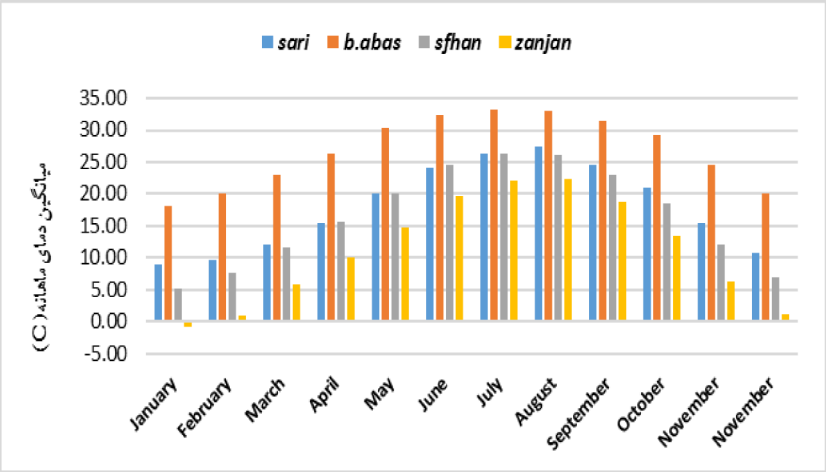
نمودار ٤. درجه حرارت سطح روسازی به تفکیک میانگین ماهانه تعداد ساعات روز طی ۱۰ سال

از نمودار ٤ می‌توان دریافت که بندرعباس تقریبا به طور میانگین ۳۵۰ ساعت از هر ماه، دمای بالای $30\ C^o$ دارد. دمای هوای بیشتر از $30\ C^o$، در حدود ۵۰٪ از زمان سال، روسازی این منطقه را به‌شدت در معرض شیارشدگی قرار می‌دهد. در حالی‌که زنجان به‌طور میانگین دمای هوای بالاتر از $30\ C^o$ را تجربه نمی‌کند. به همین خاطر، احتمال رخ دادن شیار شدگی در این منطقه بسیار کمتر است. همچنین در نمودار ٤ مشاهده می‌شود که ساری و اصفهان توزیع ساعتی دمای تقریبا مشابهی دارند، اگرچه در مقایسه با اصفهان، ساری به سبب طول جغرافیایی بیشتر، دمای هوای بالاتری دارد. به طوری که حدود ۳۵ ساعت به طور میانگین در هر ماه بیشتر از اصفهان، دارای دمای هوای بالای $25\ C^o$ است.

۳-۲-۱- تأثیر دما بر روی ترک پایین به بالا[۳]

ترک پایین به بالا (پوست سوسماری) در لایه آسفالتی روسازی به سبب خستگی ناشی از کرنش کششی تولید شده توسط ترافیک ایجاد می‌شود. ترک خستگی توسط مقاومت خمش روسازی کنترل می‌شود که تابعی از سختی مخلوط آسفالتی و ضخامت آن است. خستگی بتن آسفالتی می‌تواند در هنگام طراحی مخلوط و ضخامت کنترل شود. در دماهای متوسط، مخلوط آسفالتی، کرنش‌های کشش بیشتری را طی تکرار ترافیک، در مقایسه با دماهای پایین تجربه می‌کند. کرنش کششی در لایه‌هایی با ضخامت بیشتر، کمتر از لایه‌های کم ضخامت است. با توجه به این مکانیزم، در روسازی‌های ضخیم برای مثال با ضخامت بیش از ٤ in (۱۰۰ mm) خرابی خستگی بیشتر زمانی اتفاق می‌افتد که لایه آسفالتی در دماهای متوسط و بالا ($15\ C^o$ - $40\ C^o$) قراردارد. این در حالیست که برای روسازی با ضخامت کمتر از ٤ in خرابی خستگی در دماهای پایین‌تر نیز اتفاق می‌افتد(Ongel, 2004).

ترک خستگی پایین به بالا دارای دو مرحله بوده که به دمای روسازی بستگی دارد. مرحله اول آغاز ترک خوردگی در پایین لایه‌ی آسفالتی و در ارتباط با دماهای متوسط تا بالا در پایین بتن آسفالتی است که به خمش بیشتر و کرنش کششی بالاتری در پایین آسفالت منتهی می‌شود. مرحله دوم گسترش ترک‌ها می‌باشد که مرتبط با دماهای پایین در میانه عمق لایه‌ی آسفالتی به سبب انقباض حرارتی و سختی لایه‌ی آسفالتی در دماهای پایین است. در عوامل موثر آب وهوایی بر خستگی، دماهای متوسط تا زیاد در پایین لایه‌ی آسفالتی برای آغاز ترک خوردگی و دماهای پایین در عمق میانه برای انتشار ترک، مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار ۵ نشان دهنده توزیع دما در پایین آسفالت برای ٤ منطقه آب و هوایی مورد مطالعه برای یک دوره ۱۰ ساله است.



نمودار ۵. میانگین دما در پایین لایه آسفالتی برای ٤ منطقه آب و هوایی مورد مطالعه برای دوره ۱۰ ساله

همانطور که مشاهده می‌گردد، بندرعباس دمای بسیار بالایی دارد، به طوری‌که ۹۰٪ از سال دمای بالای ۲۰ درجه را تجربه می‌کند. درحالی‌که زنجان درست در نقطه مقابل آب و هوایی بندرعباس بوده و ۸۰ درصد از سال دمایی کمتر از ۲۰ درجه دارد.

درصد دمای بین ۱۵ تا ٤۰ درجه سانتی‌گراد که محدوده دماهای متوسط و بالا می‌باشند، محاسبه و در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که مشخص است زنجان کمترین و بندرعباس بیشترین نسبت از زمان را در این بازه دارد که باعث می‌شود بندرعباس بیشتر در معرض آغاز خرابی خستگی قرارگیرد.

جدول ۳. فراوانی وقوع درجه حرارت ٤۰°C- ۱۵°C در پایین لایه بتن آسفالتی برای ٤ منطقه آب و هوایی در طی دوره ۱۰ ساله

درصد دمای بین ۱۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد			
ساری	بندرعباس	اصفهان	زنجان
۶۶.۶۶	۱۰۰	۵۸.۳۳	۳۳.۳۳

همانطور که اشاره شد، برای انتشار ترک‌ها، دمای پایین به ویژه دماهای کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد بحرانی به نظر می‌رسد (Ongel, 2004). جدول ٤، درصد دمای کمتر از C^o ۱۰ را در عمق میانه لایه‌ی آسفالتی نشان می‌دهد.

جدول ٤. فراوانی وقوع درجه حرارت کمتر از C^o ۱۰ در میانه عمق لایه بتن آسفالتی برای ٤ منطقه آب و هوایی در طی دوره ۱۰ ساله

درصد دمای کمتر از C^o ۱۰			
ساری	بندرعباس	اصفهان	زنجان
۱۶.۶۶	۰	۲۵	۴۱.۶۶

همان‌طورکه در جدول ٤ آمده، بندرعباس دمای کمتر از C^o ۱۰را تجربه نکرده، که نشان دهنده انتشار سریع ترک‌ها در کلیه مناطق به جز بندرعباس می‌باشد. زنجان با **۴۱.۶۶**، بیشترین درصد را میان مناطق دیگر به خود اختصاص داده که این امر باعث می‌گردد، انتشار ترک‌ها در زنجان بیشتر از سایر مناطق آب و هوایی باشد زیرا بیشتر زمان از سال دارای دمای کمتر از C^o ۱۰ است.

٤- تحلیل حساسیت خرابی‌ها

پس از شناخت مناطق آب و هوایی مورد بررسی و خرابی‌های احتمالی در آن مناطق، در این بخش به تحلیل حساسیت خرابی‌ها نسبت به عوامل مهم در طراحی یک روسازی پرداخته شده است. با توجه به تفاوت مناطق آب و هوایی، با تحلیل حساسیت عوامل مختلف، می‌توان آن‌ها را بسته به اهمیتشان در هر یک از مناطق آب و هوایی

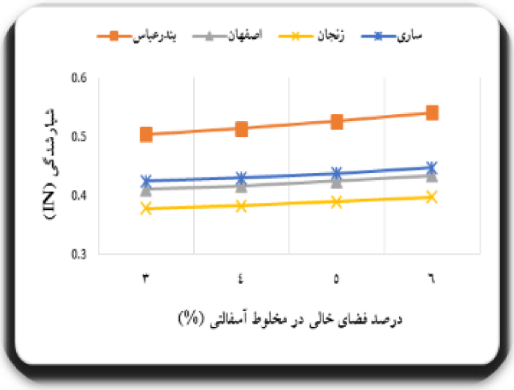
دسته‌بندی نمود که اکثر عوامل مورد بررسی، مربوط به لایه بتن آسفالتی می‌باشد. زیرا تعیین این عوامل تاثیر بسزایی در کاهش خرابی‌ها و افزایش عمر روسازی دارد. از جمله آن می‌توان به ضخامت، درصد فضای خالی، نوع قیر و درصد موثر آن در مخلوط بتن آسفالتی، اشاره نمود. از دیگر عوامل مهم و تاثیرگذار مورد بررسی در این پژوهش، نوع خاک بستر و همچنین AADTT است.

٤-١- تحلیل حساسیت نسبت به درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی

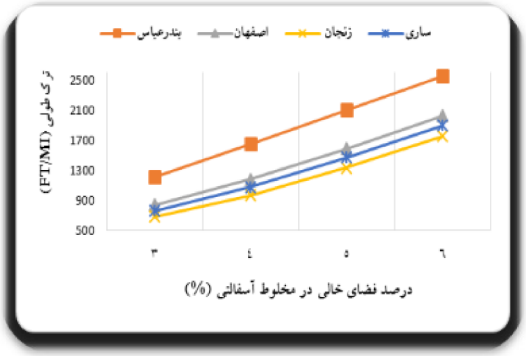
یکی از عواملی که با تغییر آن در مخلوط آسفالتی باعث تغییر در پاسخ خرابی‌های روسازی می‌شود، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی است. تاثیر تغییرات درصد فضای خالی در مخلوط بتن آسفالتی بر روی خرابی‌های مختلف در نمودارهای ٦ تا ٨ به تصویر کشیده شده است. در اینجا درصدهای ٣، ٤، ٥ و ٦ مورد بررسی قرار گرفتند.

شیارشدگی با افزایش درصد فضای خالی زیاد می‌شود. نمودار ٦ نیز این قضیه را در کلیه مناطق آب و هوایی نشان می‌دهد، همچنین بندرعباس نسبت فاصله محسوس خود را با دیگر مناطق همچنان حفظ کرده که علت آن نیز دمای بالای هوا در بیشتر زمان از سال می‌باشد.

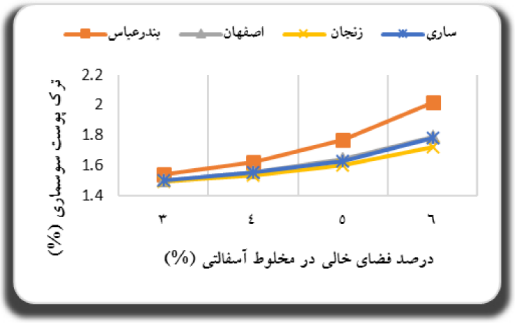
آنچه از نمودار ٧ می‌توان دریافت، این است که ترک طولی در کلیه مناطق به شدت متاثر از درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی می‌باشند و تقریبا شیب تغییرات در همه آن‌ها تند و یکسان است. به طوری‌که با افزایش درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی از ٣٪ به ٦٪، حدودا ١٣٠٠ ft/mil به مقدار ترک طولی در هر شهر افزوده شده است که مقدار قابل توجهی می‌باشد. زیرا افزایش درصد فضای خالی باعث کاهش مقاومت لایه روسازی و افزایش کرنش کششی در سطح آسفالت می‌گردد. همچنین از نمودار مشخص است مقدار ترک طولی در بندرعباس بیشتر و بحرانی‌تر از سایر مناطق آب و هوایی بوده، که علت آن باز هم دمای بالای هوا در این منطقه می‌باشد.



نمودار ٦. تاثیر درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی بر روی شیارشدگی



نمودار ٧. تأثیر درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی بر روی ترک طولی



نمودار ٨. تأثیر درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی بر روی ترک پوست سوسماری

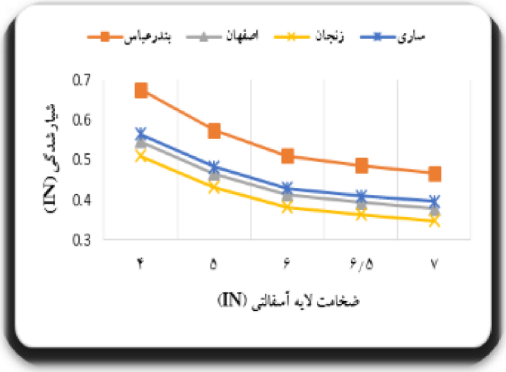
شیب زیاد رو به بالای مشاهده شده در نمودار ٨ نشان دهنده تاثیر به‌سزای درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، بر روی ترک پوست سوسماری می‌باشد. البته این افزایش ترک در شهر بندرعباس بسیار بیشتر از سایر مناطق و با شیب تندتری همراه گشته، که این مسئله خود از نتایج دمای بالای هوای بندرعباس در بیشتر اوقات سال می‌باشد که در بالا به آن اشاره شد.

٤-١-تحلیل حساسیت نسبت به ضخامت لایه بتن آسفالتی

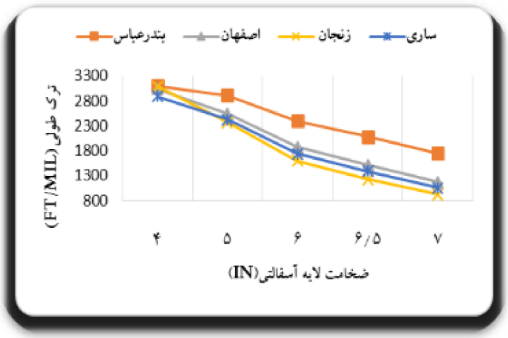
یکی دیگر از عوامل بسیار مهم و تاثیرگذار، ضخامت لایه آسفالتی است که باعث تغییر در پاسخ خرابی‌های روسازی می‌گردد. از آنجا که ضخامت لایه آسفالتی یکی از مهمترین فاکتورها در طراحی و برآورد هزینه می‌باشد، انتخاب درست حداقل ضخامت در هر منطقه کمک شایانی به طراحان روسازی خواهد نمود. در این پژوهش طبق محدودیت اعمال شده برای حداقل ضخامت لایه آسفالتی در نشریه ۲۳٤، تحلیل حساسیت در این قسمت از ٤ اینچ آغاز گردید و ضخامت‌های ٤، ٥، ٦، ٦/٥ و ٧ اینچ مورد بررسی قرار گرفتند. تحلیل حساسیت تغییرات ضخامت لایه بتن آسفالتی بر روی خرابی‌ها در چهار منطقه آب و هوایی مورد مطالعه، در نمودارهای ۹ تا ۱۱ قابل مشاهده است.

با توجه به نمودار ۹ مشخص است که کاهش عمق شیارشدگی با تغییر ضخامت لایه آسفالتی از ٤ اینچ به ٥ اینچ با شیب تندتری، نسبت به تغییر ضخامت‌های دیگر در کلیه مناطق همراه است. این رفتار خرابی شیارشدگی نشان از اهمیت حداقل ضخامت در طراحی روسازی است. به جرات می‌توان گفت که ضخامت ٤ اینچ بسیار ناکارآمدتر از ضخامت‌های دیگر بوده و با افزایش تنها ۱ اینچ از حداقل ضخامت لایه آسفالتی می‌توان این خرابی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد و وضعیت روسازی را بهبود بخشید. این درحالیست که پس از ٥ اینچ، افزایش ضخامت چنین تاثیری را بر روی کاهش شیارشدگی به دنبال نخواهد داشت.

نمودار ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه آسفالتی در کلیه مناطق مورد مطالعه، مقدار ترک طولی به شدت کاهش می‌یابد. در این میان زنجان با بیشترین شیب در حال تغییر است که نشان دهنده تاثیرپذیری بیشتر ترک طولی در زنجان نسبت به تغییر ضخامت لایه آسفالتی، از سایر مناطق مورد مطالعه می‌باشد. همان‌طور که در بالا اشاره شد برای روسازی با ضخامت‌های کمتر از in ٤، خرابی خستگی در دماهای پایین‌تر نیز اتفاق می‌افتد که توجیهی برای این رفتار در زنجان محسوب می‌شود.



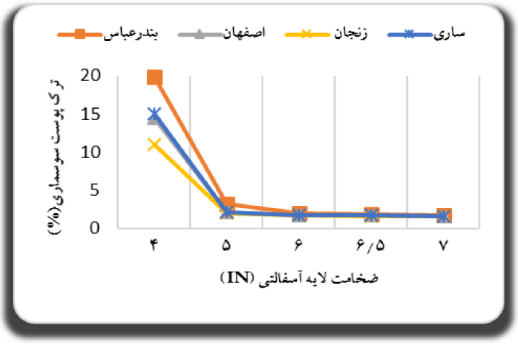
نمودار ۹. تاثیر ضخامت لایه آسفالتی بر روی شیارشدگی



نمودار ۱۰. تاثیر ضخامت لایه آسفالتی بر روی ترک طولی

ترک خستگی توسط مقاومت خمش روسازی کنترل می‌شود که تابعی از سختی مخلوط آسفالتی و ضخامت آن است. با توجه به نمودار ۱۱، وضعیت بد خرابی ترک پوست سوسماری در ضخامت روسازی ٤ اینچ مشاهده می‌شود. به طوری‌که بعد از تغییر ضخامت لایه آسفالتی به ٥ اینچ و بالاتر، ثابت می‌گردد. تأثیر نابسامان ٤ اینچ در بندرعباس بسیار شدیدتر از سایر مناطق بوده و میزان ترک خستگی پایین به بالای آن در ضخامت ٤ اینچ، حدودا ۲ برابر زنجان است. این رفتار در بندرعباس نیز با توضیحات ارائه شده در بالا قابل توجیه می‌باشد. همانطور که اشاره شد کرنش کششی در لایه‌هایی با ضخامت بیشتر، کمتر از لایه‌های کم ضخامت‌تر است. با توجه به این مکانیزم، در روسازی‌های ضخیم برای مثال با ضخامت بیش از in ٤ (۱۰۰ mm) خرابی خستگی بیشتر زمانی اتفاق می‌افتد که

لایه آسفالتی در دماهای ۱۵ تا ٤٠ درجه سانتی‌گراد قراردارد که بندرعباس به‌طور میانگین ۱۰۰٪ از سال را در این محدوده دمایی طی می‌کند.

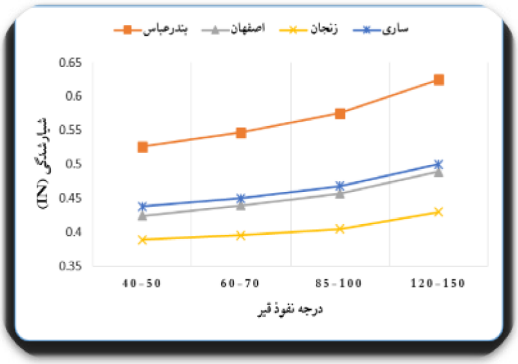


نمودار ۱۱. تاثیر ضخامت لایه آسفالتی بر روی ترک پوست سوسماری

٤-۳- تحلیل حساسیت نسبت به درجه نفوذ قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی

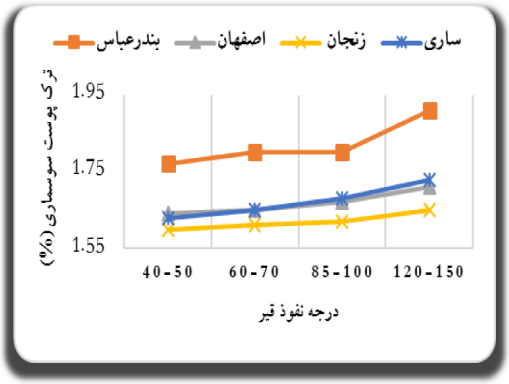
درجه نفوذ مهم‌ترین شاخص برای تعیین سختی قیر می‌باشد. درجه نفوذ کمتر قیر، نشانه قیر سخت‌تر و درجه نفوذ بیشتر نشانه قیر نرم‌تر است. هرقدر آب و هوای منطقه‌ای گرم‌تر و یا ترافیک راه بیشتر و سنگین‌تر باشد، باید از قیر با درجه نفوذ کمتر استفاده شود (طباطبایی، ۱۳۷۵). از آن‌جا که انتخاب قیر با درجه نفوذ مناسب موثر بر عمر روسازی وعملکرد روسازی می‌باشد، در این پژوهش به تحلیل حساسیت خرابی‌ها نسبت به درجه نفوذ قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی نیز پرداخته شده است. درجه نفوذهای ۵۰-٤٠، ۷۰-٦٠، ۱۰۰-۸۵ و ۱۵۰-۱۲۰، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نمودارهای ۱۲ تا ۱٤ نشان دهنده حساسیت خرابی‌ها نسبت به تغییر درجه نفوذ قیر مصرفی در مخلوط لایه بتن آسفالتی می‌باشند.

با توجه به نمودارهای ۱۲ تا ۱٤ مشخص می‌گردد که کلیه خرابی‌ها در بندرعباس با شیب تندتری تغییر می‌کند و حساسیت بیشتری نسبت به سایر مناطق در تغییر درجه نفوذ قیر مصرفی در لایه بتن آسفالتی دارد. در مناطق آب و هوایی گرم مانند بندرعباس، قیر با درجه نفوذ کمتر مناسب‌تر است. لذا برای منطقه آب و هوایی بندرعباس که اکثر اوقات دمای بالایی دارد، قیر با درجه نفوذ کمتر یعنی ۵۰-٤٠ توصیه می‌گردد. همچنین زنجان در کلیه خرابی‌ها رفتار ثابتی را دنبال می‌کند. به طوری‌که تغییر درجه نفوذ قیر مخلوط آسفالتی تاثیر چندانی بر روی خرابی‌ها ندارد. با این تفاوت که تنها قیر ۱۵۰-۱۲۰ افزایش شیب کلیه خرابی‌ها را برای این منطقه به دنبال داشته است. اما با توجه به این‌که هرچه دمای منطقه سردتر باشد قیر با درجه نفوذ بالاتر، مناسب‌تراست، لذا بهترین و مناسب‌ترین قیر در این منطقه قیر ۱۰۰-۸۵ می‌باشد.



نمودار ۱۲. تاثیر درجه نفوذ قیر بر روی شیارشدگی

نمودار ۱۳. تاثیر درجه نفوذ قیر بر روی ترک طولی

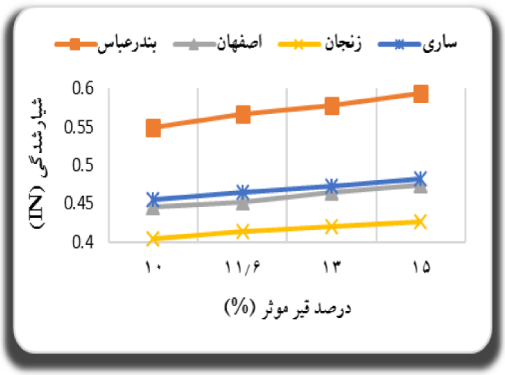


نمودار۱٤. تاثیر درجه نفوذ قیر بر روی ترک پوست سوسماری

٤-٤- تحلیل حساسیت نسبت به درصد قیر موثر در مخلوط بن آسفالتی

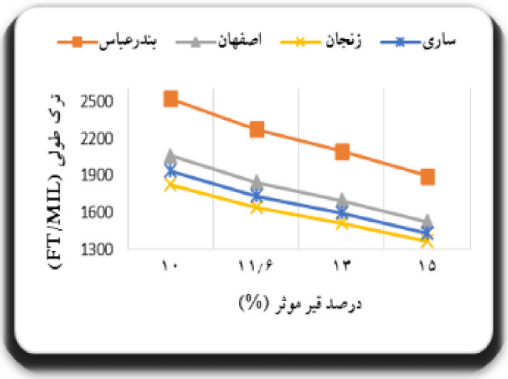
یکی دیگر از عوامل مهم در طراحی روسازی، درصد قیر موثر در مخلوط بتن آسفالتی می‌باشد که در اینجا به تحلیل حساسیت خرابی‌ها نسبت به این عامل، در مناطق آب و هوایی مختلف پرداخته شده است. درصد قیرهای درنظر گرفته شده در این قسمت ۱۰، ۱۱/٦، ۱۳و ۱۵ می‌باشد. حساسیت خرابی‌ها نسبت به قیر موثر در مخلوط آسفالتی به تفکیک ٤ منطقه آب و هوایی مختلف، بررسی و در نمودارهای ۱۵ تا ۱۷ برای درک بهتر رسم شده‌اند.

همان‌طور که نمودار ۱۵ نشان می‌دهد، میزان بیش از حد قیر در مخلوط لایه آسفالتی باعث کاهش مقاومت آن و رخ دادن شیارشدگی می‌گردد. اختلاف میان مقادیر شیارشدگی در بندرعباس و سایر مناطق بسیار زیاد بوده و با شیب تندتری در حال افزایش می‌باشد. چنین رفتاری نشان‌دهنده حساسیت بالای منطقه آب و هوایی بندرعباس نسبت به افزایش مقدار قیر در مخلوط لایه آسفالتی است.

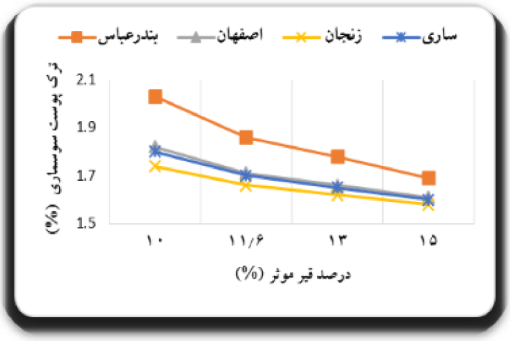


نمودار ۱۵. تاثیر درصد قیر موثر بر روی شیارشدگی

نمودارهای ١٦ و ١٧ نشان می‌دهند که ترک‌های طولی و پوست سوسماری با افزایش درصد قیر موثر در مخلوط بتن آسفالتی کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش قیر در مخلوط آسفالتی، از سختی آسفالت کاسته شده و باعث کاهش عمر خستگی می‌گردد.



نمودار ١٦. تاثیر درصد قیر موثر بر روی ترک طولی



نمودار ١٧. تاثیر درصد قیر موثر بر روی ترک پوست

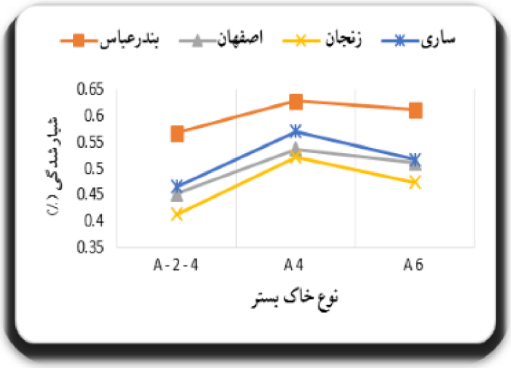
٤-٥- تحلیل حساسیت نسبت به نوع خاک بستر

نوع خاک بستر، یکی دیگر از عوامل مهم در طراحی روسازی می‌باشد. نوع خاک بستر متاثر از آب و هوای منطقه و به خصوص یخبندان است به طوری‌که در فصل ذوب یخ‌ها و افزایش رطوبت، مقاومت آن‌ها کاهش می‌یابد. در اینجا خاک‌های A-2-4، A-4 و A-6 مورد بررسی قرار گرفتند که مشخصات آن‌ها در جدول ۵ آمده است.

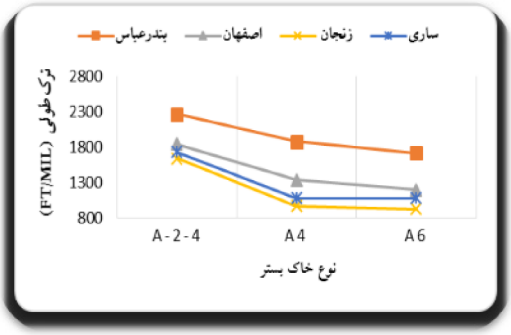
جدول ۵. درصد رد شده از الک ۲۰۰ # خاک بسترهای مورد بررسی

نوع خاک بستر	رد شده از الک ۲۰۰ #
A-2-4	۲۲.۴
A 4	۶۰.۶۶
A 6	۶۳.۲

تاثیر تغییرات نوع خاک بستر بر روی خرابی‌ها در چهار منطقه آب و هوایی مورد مطالعه در نمودارهای ۱۸ تا ۲۰ رسم شده‌اند.



نمودار ۱۸. تاثیر تغییر نوع خاک بستر بر روی شیارشدگی

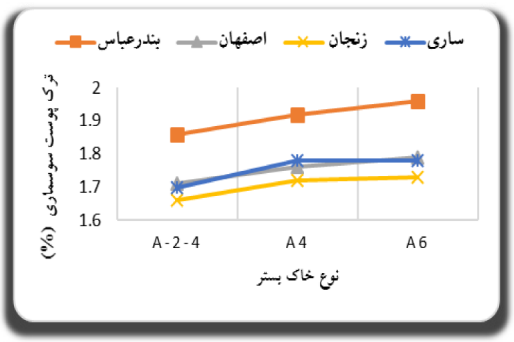


نمودار ۱۹. تاثیر تغییر نوع خاک بستر بر روی ترک طولی

با توجه به نمودار ۱۸ مشخص گردید که خاک A4 بیشتر از سایر خاک‌ها، روسازی مناطق را در معرض شیارشدگی قرار می‌دهد، و شدت تغییر شیارشدگی در مناطق مرطوب مانند زنجان و ساری بیشتر است. مصالح دانه‌ای در برابر یخبندان غیرحساس هستند. این نوع خاک-ها معمولا قسمت اعظم مقاومت خود را در موقع ذوب یخ‌ها نیز حفظ می‌کنند. از طرف دیگر لای‌ها خطرناک‌ترین مصالح از نظر تورم در اثر یخبندان هستند. با اینکه مقامت خاک‌های لای‌دار مانند A4 بیشتر از خاک‌های رسی چون A6 است، اما خاک‌های رسی در موقع آب شدن یخ‌ها به میزان قابل توجهی مقاومت خود را از دست می‌دهند و کاهش مقاومت آن‌ها بسیار بیشتر از خاک‌های لای‌دار می-باشد.

با توجه به نمودار ۱۹ مشخص گردید، خاک A-2-4 که یک خاک دانه‌ای و درشت دانه است، باعث افزایش ترک طولی در روسازی آسفالتی می‌گردد. با توجه به توزیع تنش در زیر آسفالت می‌توان این رفتار را توجیه نمود. زیرا با حرکت چرخ بر روی لایه آسفالتی تنش کششی روی لایه آسفالتی رخ می‌دهد و هر چه لایه آسفالتی روی خاک نرم‌تری ساخته شود می‌تواند تنش را به لایه زیرین انتقال داده و از رخ دادن ترک طولی جلوگیری کند.

نمودار ۲۰ نشان می‌دهد که هرچه خاک بستر ریزتر باشد، ترک پوت سوسماری بیشتر می‌گردد. به طور کلی ترک پوست سوسماری در روسازی‌هایی که بر روی خاک‌های کم‌مقاومت ساخته می‌شوند بیشتر رخ می‌دهد. علت بوجود آمدن ترک‌های پوست سوسماری تغییرشکل بیش ازحد لایه‌های روسازی در اثر بارگذاری، و یا خستگی بیش از حد لایه رویه در اثر بارهای وارد به آن است. روسازی‌هایی که بر روی خاک‌های با مقاومت کم و با قابلیت تغییر شکل زیاد ساخته می‌شوند، معمولا به این صورت ترک می‌خورند. این رفتار نیز با توزیع تنش در زیر لایه آسفالتی حین عبور ترافیک قابل توجیه است. با توجه به این‌که ترک پوست سوسماری از زیر لایه آسفالتی آغاز شده و به سمت بالا و سطح روسازی انتشار می‌یابد، لذا یک خاک بستر با مقاومت پایین، می‌تواند آغاز ترک‌خوردگی را در تکرار عبور چرخ ممکن سازد.

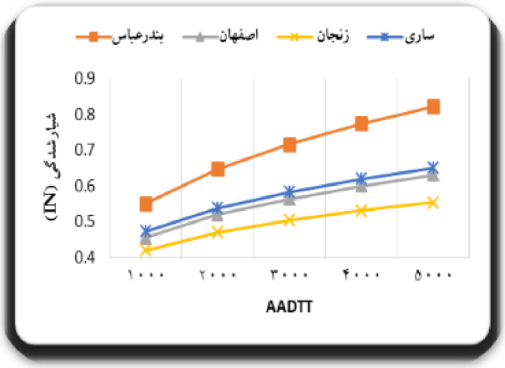


نمودار ۲۰. تاثیر تغییر نوع خاک بستر بر روی ترک پوست سوسماری

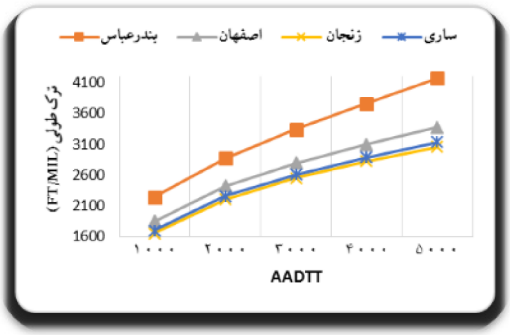
٤-٦- تحلیل حساسیت نسبت به حجم ترافیک

ترافیک یکی از عوامل بسیار مهم در طراحی روسازی می‌باشد. به‌طوری‌که طراحان در ابتدای هر طراحی، با برداشت و پیش‌بینی حجم ترافیک مسیر موردنظر، به طراحی روسازی می‌پردازند. حال در این قسمت به تحلیل

حساسیت خرابی‌های روسازی نسبت به ترافیک عبوری پرداخته شده است. در طراحی روسازی با نرم‌افزار MEPDG، AADTT به عنوان ورودی ترافیکی وارد می‌شود. به همین خاطر در اینجا متوسط سالیانه حجم ترافیک روزانه وسایل نقلیه سنگین ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند. در نمودارهای ۲۲ تا ۲۴ خرابی‌ها نسبت به این عامل تحلیل حساسیت شدند.



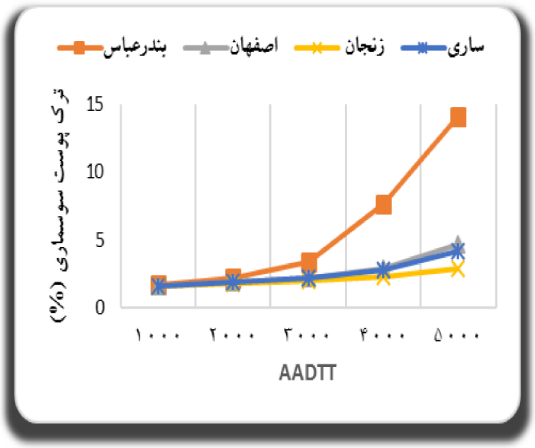
نمودار ۲۱. تاثیر AADTT بر روی شیارشدگی



نمودار ۲۲. تاثیر AADTT بر روی ترک طولی

با توجه به نمودارهای ۲۱ و ۲۲، مشخص است که افزایش ترک طولی و شیارشدگی در کلیه مناطق با شیب تند در حال افزایش می‌باشد. هرچند این افزایش برای شرایط آب و هوایی بندرعباس با شیب تندتری پیش‌روی می‌کند و رفتاری بسیار متاثر از ترافیک عبوری دارد.

همان‌طور که از نمودار ۲۳ مشخص است، شیب افزایش ترک پوست سوسماری در شهر بندرعباس بسیار تند بوده و دلیل آن این است که این نوع خستگی یک ترک در بتن آسفالتی می‌باشد که به سبب تکرار تنش تولید شده توسط ترافیک ایجاد می‌شود. در دماهای متوسط و معتدل‌تر، مخلوط آسفالتی، کرنش‌های کشش بیشتری را در مقایسه با دماهای پایین تجربه می‌کند. در عوامل موثر آب وهوایی بر خستگی، دماهای متوسط تا زیاد در پایین لایه‌ی آسفالتی برای آغاز ترک خوردگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که با توجه به جدول ۲ بندرعباس ۱۰۰٪ از سال را در به طور میانگین در دماهای بین ۱۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس سپری می‌کند و این رفتار خرابی ترک خستگی پوست سوسماری را در ترافیک‌های بالا توجیه می‌کند.



نمودار ۲۳. تاثیر AADTT بر روی ترک پوست سوسماری

۴-۷-نتایج تحلیل حساسیت‌ها

با توجه به تحلیل حساسیت‌های انجام شده، میزان حساسیت خرابی‌ها نسبت به عوامل مختلف به تفکیک مناطق آب و هوایی در جدول ۶ آورده شد. حساسیت عوامل مختلف با بررسی درصد تغییر مقدار خرابی نسبت به تغییر یک عامل طراحی، بدست آمده و به پنج بخش خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد دسته‌بندی شدند. بدین وسیله طراحان روسازی می‌توانند بسته به منطقه آب و هوایی روسازی مورد نظر، نسبت به نحوه اعمال تغییرات در آیتم‌های مورد نیاز طراحی تصمیم گیری کنند. اگر یک آیتم در کاهش خرابی در آن منطقه آب و هوایی تاثیر چندانی ندارد، در جهت کاهش هزینه‌ها، تغییری در آن آیتم مورد نظر صورت نگیرد.

جدول ٦. میزان حساسیت خرابی‌ها نسبت به عوامل مختلف

عوامل مورد بررسی	خرابی ها	میزان حساسیت			
		بندرعباس	اصفهان	ساری	زنجان
دانه بندی مخلوط آسفالتی	شیارشدگی	کم[1]	خیلی کم[2]	خیلی کم	خیلی کم
	ترک طولی	کم	کم	کم	متوسط[3]
	ترک پوست سوسماری	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم
درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی	شیارشدگی	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم
	ترک طولی	زیاد[4]	زیاد	زیاد	زیاد
	ترک پوست سوسماری	زیاد	کم	کم	کم
ضخامت مخلوط آسفالتی	شیارشدگی	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
	ترک طولی	خیلی زیاد[5]	زیاد	زیاد	زیاد
	ترک پوست سوسماری	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد
درجه نفوذ قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی	شیارشدگی	کم	کم	کم	کم
	ترک طولی	کم	کم	کم	کم
	ترک پوست سوسماری	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم
درصد قیر موثر مصرفی در مخلوط آسفالتی	شیارشدگی	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم
	ترک طولی	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
	ترک پوست سوسماری	کم	کم	کم	کم
نوع خاک بستر	شیارشدگی	کم	کم	کم	متوسط
	ترک طولی	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد
	ترک پوست سوسماری	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم
AADTT	شیارشدگی	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط
	ترک طولی	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
	ترک پوست سوسماری	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	متوسط

۱- درصد تغییر بین ۱۰-۰ ۲- درصد تغییر بین ۲۵-۱۱ ۳- درصد تغییر بین ٤٠-۲٦ ٤- درصد تغییر بین ۷۰-٤۱ ۵- درصد تغییر بین ۱۰۰-۷۱

با توجه به جدول ٦ مشخص گردید که افزایش ضخامت لایه آسفالتی بیشترین تاثیر را در کاهش خرابی‌ها دارا می‌باشد. جدول ۷ ترتیب اهمیت عوامل مورد بررسی برای هر منطقه را نشان می‌دهد.

جدول ۷. ترتیب اهمیت عوامل مورد بررسی در هر منطقه

ترتیب اهمیت عوامل مورد بررسی	**بندرعباس** و ساری و اصفهان	زنجان
۱	ضخامت لایه آسفالتی	ضخامت لایه آسفالتی
۲	AADTT	AADTT
۳	درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی	خاک بستر
٤	خاک بستر	درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی
۵	درصد قیر موثر مصرفی در مخلوط آسفالتی	درصد قیر موثر مصرفی در مخلوط آسفالتی
٦	درجه نفوذ قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی	درجه نفوذ قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی

۵- نتیجه‌گیری

طی بررسی تحلیل حساسیت‌ها، مشخص گردید که تغییر ضخامت لایه آسفالتی و همچنین تغییر ترافیک وسایل نقلیه عبوری سنگین از مهم‌ترین عوامل طراحی تاثیرگذار بر روی خرابی‌ها به خصوص شیارشدگی و خستگی روسازی‌های آسفالتی می‌باشند. اما شدت تاثیرگذاری ترافیک عبوری در منطقه آب و هوایی گرم مانند بندرعباس، بسیار بیشتر از سایر مناطق است. اما نوع خاک بستر در منطقه آب و هوایی مانند زنجان که دارای آب و هوای سرد و دوره‌های ذوب و یخ طولانی می‌باشد، سومین عامل تاثیرگذار در این منطقه بوده، که نشان از اهمیت نوع خاک بستر و حساسیت خاک‌های ریزدانه در برابر یخبندان است.

٦- پی‌نوشت‌ها

1 Mechanistic Empirical Pavement Design Guide
2 Average Annual Daily Truck Traffic
3 Bottom-up cracking

۷-مراجع

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, (1986) American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA,

- Carvalho, Regis L. (2006) " Mechanistic – Empirical Design Of Flexible Pavements: A Sensitivity Study", Master of Science, University of Maryland, College Park

- Ongel, J. Harvey, (2004) "Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM)" , Draft report prepared for the California Department of Transportation, August 2004.

- Rafi Tarefder. Ph.D , (2013) "Development of a Flexible Pavement Database for Local Calibration of MEPDG", Project Number: NM08Msc-02, The University of New Mexico.

- Ryu, Oh, J., D. E. G. Fernando, and R.L. Lytton. (2006) "Estimation of Expected Moisture Contents for Pavements by Soil and Water Characteristics, In Transportation Research Record" Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., No. 1969, pp. 135-149.

- Selezneva, O. I., Y. J. Jiang, G. Larson, and T. Puzin. (2009) LTPP Computed Parameter: Frost Penetration, Publication FHWA-HRT-09-059. FHWA, U.S. Department of Transportation.

- Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide (NCHRP 1-37 A), (2004) American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

- Mechanistic- Empirical Pavement Design Guide Software- Version 0.907 (2006) Arizona State University, Arizona, USA.

- طباطبایی، الف. م.، (۱۳۷۵) روسازی راه، مرکز نشر دانشگاهی، دانشگاه تهران، تهران.

- نسیمی‌فر، م.، (۱۳۸۷) "مدل‌سازی تاثیر عوامل آب و هوایی بر عملکرد روسازی در مناطق مختلف ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.