

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

پیش بینی ترک های برودتی روسازی بصورت تابعی از آب و هوا و عمرروسازی

نگارنده: سعید حیدری ارچندانی

استاد راهنما:

دکتر حسین قاسم زاده طهرانی

اسفند ۱۴۰۰

صورت جلسه دفاع

تقدیم اثر

سپاسگذار کسانی، هستم که سراغاز تولد من، هستند. از یکی زاده می شوم و از دیگری جاودانه. استادی که سپیدی را بر تخته سیاه زندگیم نگاشت و مادری که تار مویی از او پای من سیاه نماند. تقدیم به مقدس ترین واژه ها در لغت نامه دلم، مادر مهربانم که زندگیم را دیون مهر و عطف آن می دانم.

- پدر، مهربانی مشفق، بردبار و حامی.

- همسر که نشانه لطف الهی در زندگی من است.

- برادر و خواهرم همراهان همیشگی و پشتوانه های زندگیم.

مشکر و قدردانی

پروردگار را سپاسگزارم که بار دیگر به من فرصت آموختن داد. از پدر و مادر عزیز و مهربانم به خاطر زحماتی که در طول زندگی، همواره برای پیروزی و شادکامی من به جان خریدند، تشکر می‌کنم. از همسر عزیزم به خاطر بهکاری ها و دگر می هایش تشکر می‌کنم.

از استاد محترم جناب آقای دکتر حسین قاسم زاده طهرانی که زحمات زیادی برای تحقق این پایان نامه داشتند، تشکر می‌کنم.

خالصانه از تمامی اساتید و معلمان و مدرسانی که در مقاطع مختلف تحصیلی به من علم آموختند و مرا از سرچشمه دانایی سیراب کرده اند تشکر می‌کنم.

تهدنامه

اینجانب سعید حیدری ارچندانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته راه و ترابری دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه پیش بینی ترک های برودتی روسازی بصورت تابعی از آب و هوا و عمر روسازی تحت راهنمایی دکتر حسین قاسم زاده طهرانی متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

ترک‌های برودتی، از جمله پدیده‌های شایعی است که در مناطق سرد و مناطق با اختلاف درجه حرارت بین روز و شب و در فصول مختلف سال رخ می‌دهد. وجود این ترک‌ها باعث نفوذ آب به سازه روسازی شده و منجر به عریان شدگی و خرابی زودرس در آسفالت می‌شود. هدف پژوهش حاضر پیش بینی ترک‌های برودتی روسازی بصورت تابعی از آب و هوا و عمر روسازی می‌باشد. برای انجام پژوهش با بازدید از محورهای مورد نظر در پژوهش (جیرفت- بندرعباس و جیرفت- کرمان و جیرفت بافت، محور هراز و شاهرود - دامغان)، تعداد ترک‌های برودتی که شامل: ترک‌های جزئی، نیمه و کامل و همچنین کامل به همراه ریز اطراف می‌باشند، در هر کیلومتر از مسیرهای رفت و برگشت شمارش و جمع‌آوری شدند. برای تحلیل و مدلسازی پژوهش طبق شاخص‌های ترک خوردگی و عمرهای روسازی جمع‌آوری شدند و با استفاده از نرم-افزار spss انجام شد. ابتدا برای هر یک از مسیرهای مورد نظر معادلات رگرسیونی انجام شد ولی به دلیل آنکه نتایج به دست آمده دقت بالایی نداشت، با توجه به آب و هوا مسیرها به دو خانواده تفکیک شدند که خانواده اول شامل مناطق گرمسیر و خانواده دوم شامل مناطق سردسیر می‌باشند. در نهایت طبق نتایج به دست آمده از مدلسازی رگرسیون برای هر دو خانواده، مشاهده می‌شود مدل درجه دو به دلیل داشتن بیشترین مقدار ضریب همبستگی در خانواده اول ($R^2=0.663$)، خانواده دوم ($R^2=0.507$) و بدلیل این که متغیرهای ترافیک، تغییرات دما و شاخص ترک خوردگی تغییرات زیادی دارند در نتیجه مقدار ضریب همبستگی بالایی نشان نمی‌دهد.

کلمات کلیدی: ترک‌های برودتی، روسازی، آب و هوا، عمرروسازی

فهرست مطالب

فهرست جداول	ک
فهرست اشکال	م
فهرست نمودارها	س
فصل ۱: کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ بیان مسئله پژوهش	۲
۳-۱ اهمیت و ضرورت پژوهش	۳
۴-۱ اهداف پژوهش	۴
۵-۱ فرضیات پژوهش	۴
۶-۱ فرضیه های پژوهش	۴
۷-۱ معرفی ساختار پایان نامه	۴
فصل ۲: مبانی نظری و پیشینه پژوهش	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ تعاریف	۸
۱-۲-۲ تعریف ترک های برودتی	۸
۲-۲-۲ عوامل پیدایش ترک های سطحی	۱۰
۳-۲-۲ انواع تغییر شکل نوک ترک	۱۱
۴-۲-۲ ساز و کار ترک ها در روسازی	۱۲
۵-۲-۲ قوانین گسترش ترک در مصالح	۱۳
۳-۲-۲ پیشینه پژوهش	۱۵
۱-۳-۲ مدل های پیشنهاد شده برای پیش بینی ترک های برودتی	۲۶
۲-۳-۲ مدل های تجربی ترک خوردگی برودتی	۲۷
۳-۳-۲ مدل های مکانیستیک ترک خوردگی برودتی	۲۹
۴-۳-۲ محاسبه ی تنش های برودتی	۳۲
۵-۳-۲ محاسبه ی انتشار ترک	۳۳
۶-۳-۲ مدل ناحیه چسبنده	۳۹
۴-۲ جمع بندی	۴۵
فصل ۳: روش تحقیق	۴۷
۱-۳ مقدمه	۴۸

۴۸	۲-۳ مسیر جیرفت - بافت (رفت).....
۵۰	۳-۳ مسیر جیرفت -بافت (برگشت).....
۵۰	۴-۳ مسیر جیرفت - بندرعباس (رفت).....
۵۲	۵-۳ مسیر جیرفت-بندرعباس (برگشت).....
۵۳	۶-۳ مسیر جیرفت-کرمان (رفت).....
۵۵	۷-۳ مسیر جیرفت-کرمان (برگشت).....
۵۵	۸-۳ مسیر شاهرود- دامغان (رفت).....
۵۶	۹-۳ مسیرشاهرود-دامغان (برگشت).....
۵۷	۱۰-۳ محور هراز (رفت).....
۵۹	۱۱-۳ محور هراز (برگشت).....
۶۰	۱۲-۳ محور جیرفت-بافت.....
۶۱	۱۳-۳ محور جیرفت-بندرعباس.....
۶۲	۱۴-۳ محور جیرفت -کرمان.....
۶۳	۱۵-۳. محور شاهرود-دامغان.....
۶۴	۱۶-۳ محور هراز.....
۶۵	۱۷-۳ خلاصه اطلاعات آب و هوا و ترافیک محورهای مورد پژوهش.....
۶۷	فصل ۴: تجزیه و تحلیل داده ها
۶۸	۱-۴ مقدمه.....
۶۸	۲-۴ تجزیه و تحلیل داده‌های پژوهش.....
۶۸	۱-۲-۴ تحلیل مولفه‌های اصلی.....
۶۹	۲-۲-۴ بررسی نرمال بودن داده‌ها.....
۷۰	۳-۴ تعیین وجود رابطه بین داده‌ها (همبستگی داده‌ها).....
۷۲	۴-۴ مدلسازی با روش‌های رگرسیون.....
۹۰	۵-۴ جمع‌بندی نتایج.....
۹۰	۱-۵-۴ مقایسه‌ی مدل‌ها.....
۹۱	۶-۴ مدل سازی با روش رگرسیون.....
۹۲	۱-۶-۴ رگرسیون خطی برای خانواده (۱).....
۹۳	۲-۶-۴ رگرسیون درجه ۲ برای خانواده (۱).....
۹۳	۳-۶-۴ رگرسیون لوگاریتمی برای خانواده (۱).....
۹۴	۴-۶-۴ رگرسیون غیر خطی برای خانواده (۱).....
۹۵	۵-۶-۴ رگرسیون خطی برای خانواده (۲).....
۹۶	۶-۶-۴ رگرسیون درجه ۲ برای خانواده (۲).....
۹۶	۷-۶-۴ رگرسیون لوگاریتمی برای خانواده (۲).....
۹۷	۸-۶-۴ رگرسیون غیر خطی برای خانواده (۲).....
۹۸	۷-۴ جمع بندی نتایج.....

۹۸	۴-۷-۱ مقایسه مدل‌ها (خانواده ۱)
۹۹	۴-۷-۲ مقایسه مدل‌ها (خانواده ۲)
۱۰۱	 فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۰۲	 ۵-۱ مقدمه
۱۰۲	 ۵-۲ خلاصه پژوهش
۱۰۳	 ۵-۳ نتیجه حاصل از پژوهش
۱۰۳	 ۵-۴ پیشنهادها برای تحقیقات آتی
۱۰۵	 پیوست
۱۳۱	 مراجع

فهرست جداول

جدول ۱-۲. مشخصات قیرهای استفاده شده در ساخت نمونه	۱۹
جدول ۲-۲. مشخصات قیرهای مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها	۲۳
جدول ۳-۲. نتایج آزمایش TSRST	۲۴
جدول ۴-۲. تعریف پارامترهای مورد استفاده در معادلات رگرسیونی	۲۸
جدول ۵-۲. دمای شکست مدل و آزمایش TSRST	۳۴
جدول ۶-۲. مقادیر الاستیک لایه‌های اساس و زیر اساس و بستر	۴۴
جدول ۱-۳: اطلاعات جمع‌آوری شده	۴۹
جدول ۲-۳: اطلاعات جمع‌آوری شده	۵۰
جدول ۳-۳: اطلاعات جمع‌آوری شده	۵۱
جدول ۴-۳: اطلاعات جمع‌آوری شده	۵۲
جدول ۵-۳: اطلاعات جمع‌آوری شده	۵۳
جدول ۶-۳: اطلاعات جمع‌آوری شده	۵۵
جدول ۷-۳: اطلاعات جمع‌آوری شده	۵۶
جدول ۸-۳: اطلاعات جمع‌آوری شده	۵۶
جدول ۹-۳: اطلاعات جمع‌آوری شده	۵۷
جدول ۱۰-۳: اطلاعات جمع‌آوری شده	۵۹
جدول ۱۱-۳. دمای متوسط هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت - بافت	۶۰
جدول ۱۲-۳. حداقل دمای هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت-بافت	۶۰
جدول ۱۳-۳. تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال محور جیرفت-بافت	۶۱
جدول ۱۴-۳. دمای متوسط هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت-بندرعباس	۶۱
جدول ۱۵-۳. حداقل دمای هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت-بندرعباس	۶۱
جدول ۱۶-۳. تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال محور جیرفت-بندرعباس	۶۲
جدول ۱۷-۳. دمای متوسط هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت-کرمان	۶۲
جدول ۱۹-۳. تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال محور جیرفت-کرمان	۶۳
جدول ۲۰-۳. دمای متوسط هوا در سه ماه آخر سال در محور شاهرود-دامغان	۶۳
جدول ۲۱-۳. حداقل دمای هوا در سه ماه آخر سال در محور شاهرود-دامغان	۶۳
جدول ۲۲-۳. تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال محور شاهرود-دامغان	۶۴
جدول ۲۳-۳. دمای متوسط هوا در سه ماه آخر سال در محور هراز	۶۴
جدول ۲۴-۳. حداقل دمای هوا در سه ماه آخر سال در محور هراز	۶۴
جدول ۲۵-۳. تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال محور هراز	۶۵

جدول ۳-۲۶. محور جیرفت-بافت	۶۵
جدول ۳-۲۷. محور جیرفت-بندرعباس	۶۵
جدول ۳-۲۸. محور جیرفت-کرمان	۶۶
جدول ۳-۲۹. محور شاهرود-دامغان	۶۶
جدول ۳-۳۰. محور هراز	۶۶
جدول ۴-۱. اطلاعات توصیفی مربوط به وضعیت پیش بینی ترک‌های برودتی روسازی بصورت تابعی از آب و هوا و عمر روسازی و ترافیک	۶۹
جدول ۴-۲. بررسی نرمال بودن داده‌ها	۷۰
جدول ۴-۳. همبستگی بین متغیرها	۷۱
جدول ۴-۴. رگرسیون خطی بر اساس عمر روسازی	۷۲
جدول ۴-۵. رگرسیون خطی بر اساس حداقل دما	۷۴
جدول ۴-۶. رگرسیون خطی بر اساس تعداد روزهای یخبندان	۷۶
جدول ۴-۷. رگرسیون خطی بر اساس ترافیک	۷۹
جدول ۴-۸. رگرسیون درجه دو بر اساس عمر روسازی و حداقل دما	۸۰
جدول ۴-۹. رگرسیون درجه دو بر اساس عمر روسازی و تعداد روزهای یخبندان	۸۱
جدول ۴-۱۱. رگرسیون درجه سه بر اساس عمر روسازی و حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان	۸۴
جدول ۴-۱۲. رگرسیون درجه سه بر اساس عمر روسازی و حداقل دما و ترافیک	۸۵
جدول ۴-۱۳. رگرسیون درجه چهار بر اساس عمر روسازی حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان و ترافیک	۸۶
جدول ۴-۱۴. رگرسیون لوگاریتمی	۸۸
جدول ۴-۱۵. رگرسیون غیر خطی	۸۹
جدول ۴-۱۶. مقایسه‌ی مدل‌های انجام شده	۹۰
جدول ۴-۱۷. رگرسیون خطی بر اساس عمر روسازی	۹۲
جدول ۴-۱۹. رگرسیون لوگاریتمی بر اساس عمر روسازی	۹۳
جدول ۴-۲۰. رگرسیون غیرخطی بر اساس عمر روسازی و ترافیک	۹۴
جدول ۴-۲۲. رگرسیون لوگاریتمی بر اساس عمر روسازی	۹۶
جدول ۴-۲۳. رگرسیون غیر خطی بر اساس عمر روسازی و ترافیک	۹۶
جدول ۴-۲۴. مقایسه‌ی مدل‌های انجام شده خانواده (۱)	۹۷
جدول ۴-۲۴. مقایسه‌ی مدل‌های انجام شده خانواده (۱)	۹۸
جدول ۴-۲۵. مقایسه‌ی مدل‌های انجام شده خانواده (۲)	۹۹

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲. تغییرات تنش‌های برودتی و مقاومت کششی یک مخلوط آسفالتی بر حسب کاهش دما ۹
- شکل ۲-۲. ترک خوردگی از بالا به پایین در یک نمونه ی آسفالت ۱۱
- شکل ۳-۲. روش‌های اصلی بارگذاری و جابه‌جایی‌های مربوطه‌ی سطوح ترک ۱۲
- شکل ۴-۲. ترک کامل ۱۴
- شکل ۵-۲. ترک نیمه ۱۴
- شکل ۶-۲. ترک جزئی ۱۵
- شکل ۷-۲. (a) تغییرات ضریب انقباض دمایی بر حسب دما در دو جهت افقی و عمودی (b) ۱۸
- شکل ۸-۲. تأثیر پیر شدگی و نوع قیر مورد استفاده در دمای شکست در مخلوط‌های متراکم ۱۹
- شکل ۹-۲. تأثیر پیر شدگی و نوع قیر مورد استفاده در دمای شکست در مخلوط‌های متخلخل ۲۰
- شکل ۱۰-۲. تنش‌های برودتی اندازه‌گیری شده برای مخلوط‌های ۱-AAA اصلاح شده و اصلاح نشده .. ۲۱
- شکل ۱۱-۲. تنش‌های برودتی اندازه‌گیری شده برای مخلوط‌های ۱-AAB اصلاح شده و اصلاح نشده ۲۱
- شکل ۱۲-۲. جدول مشخصات مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها ۲۲
- شکل ۱۳-۲. منحنی دانه بندی برای ساخت نمونه‌ها ۲۳
- شکل ۱۴-۲. تنش و کرنش اندازه‌گیری شده ۲۵
- شکل ۱۵-۲. مدول استهلاک محاسبه شده و مشتق درجه دوم آن نسبت به دما ۲۵
- شکل ۱۶-۲. فاکتور ترک خوردگی ۲۷
- شکل ۱۷-۲. منحنی تغییرات تنش برودتی و مقاومت کششی مخلوط آسفالت نسبت به دما ۳۰
- شکل ۱۸-۲. تأثیر ضریب انقباض دمایی بر تنش برودتی ۳۵
- شکل ۱۹-۲. تأثیر نرخ کاهش دما بر تنش‌ها برودتی ۳۶
- شکل ۲۰-۲. تنش‌های برودتی به دست آمده و درصدی مقاومت کششی (CIS) بر حسب زمان ۳۷
- شکل ۲۱-۲. منحنی تغییرات دما نسبت به زمان برای عمق‌های مختلف لایه آسفالتی ۳۹
- شکل ۲۲-۲. منحنی تنش کششی بر حسب کرنش (مدل ناحیه چسبنده) ۴۰
- شکل ۲۳-۲. مکانیزم شکست در مدل ناحیه چسبنده ۴۱
- شکل ۲۴-۲. باربرداری و بارگذاری در مدل‌های ناحیه چسبنده ۴۱
- شکل ۲۵-۲. نتایج مدل و آزمایش TSRST ۴۳
- شکل ۲۶-۲. نحوه‌ی مش بندی لایه‌های روسازی ۴۴
- شکل ۲۷-۲. دمای شکست در عمق‌های مختلف ۴۵
- شکل ۱-۳. مسیر جیرفت - بافت (کیلومتر ۷۰، خرابی: ترک برودتی کامل) ۴۹
- شکل ۲-۳. مسیر بافت - جیرفت (کیلومتر ۵۰، خرابی: ترک برودتی جزئی، نیمه، کامل، چندگانه) ۵۰
- شکل ۳-۳. مسیر جیرفت - بندرعباس (کیلومتر ۹۰، خرابی: ترک برودتی چندگانه- ترک طولی) ۵۲

- شکل ۳-۴. مسیر بندرعباس - جیرفت ۱۸۰ کیلومتر ۵۳
- شکل ۳-۵. مسیر جیرفت - کرمان (کیلومتر ۱۵۰ خرابی: ترک برودتی چندگانه) ۵۴
- شکل ۳-۶. مسیر محور هراز (کیلومتر ۱۵ خرابی: ترک برودتی نیمه و کامل + ریز اطراف ترک طولی ترک
بلوکی) ۵۸

فهرست نمودارها

نمودار ۴-۷. توزیع داده‌ها.....	۷۳
نمودار ۴-۸. مدل رگرسیون خطی.....	۷۴
نمودار ۴-۹. توزیع داده‌ها بر اساس حداقل دما.....	۷۵
نمودار ۴-۱۰. مدل رگرسیون خطی بر اساس حداقل دما.....	۷۶
نمودار ۴-۱۱. توزیع داده‌ها بر اساس تعداد روزهای یخبندان.....	۷۷
نمودار ۴-۱۲. مدل رگرسیون خطی بر اساس تعداد روزهای یخبندان.....	۷۸
نمودار ۴-۱۳. توزیع داده‌ها بر اساس ترافیک.....	۷۹
نمودار ۴-۱۴. مدل رگرسیون خطی بر اساس ترافیک.....	۸۰
نمودار ۴-۱۵. مدل رگرسیون درجه دو برای عمر روسازی و حداقل دما.....	۸۱
نمودار ۴-۱۶. مدل رگرسیون درجه دو برای عمر روسازی و تعداد روزهای یخبندان.....	۸۲
نمودار ۴-۱۷. مدل رگرسیون درجه دو برای عمر روسازی و ترافیک.....	۸۳
نمودار ۴-۱۸. مدل رگرسیون درجه سه برای روسازی و حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان.....	۸۴
نمودار ۴-۱۹. مدل رگرسیون درجه سه برای عمر روسازی حداقل دما و ترافیک.....	۸۵
نمودار ۴-۲۰. مدل رگرسیون درجه چهار برای عمر روسازی حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان و ترافیک.....	۸۷
نمودار ۴-۲۱. مدل رگرسیون لگاریتمی.....	۸۸
نمودار ۴-۲۲. مدل رگرسیون غیرخطی.....	۸۹
نمودار ۴-۲۳. مقایسه‌ی مدل‌های رگرسیون.....	۹۱
نمودار ۴-۲۴. مدل رگرسیون خطی.....	۹۲
نمودار ۴-۲۵. مدل رگرسیون لگاریتمی.....	۹۴
نمودار ۴-۲۶. مدل رگرسیون خطی.....	۹۵
نمودار ۴-۲۷. مدل رگرسیون لوگاریتمی.....	۹۷
نمودار ۴-۲۸. مقایسه‌ی مدل‌های رگرسیون.....	۹۸
نمودار ۴-۲۹. مقایسه‌ی مدل‌های رگرسیون.....	۹۹
نمودار ۴-۱- نمودار جعبه‌ای شاخص ترک.....	۱۰۶
نمودار ۴-۲- شاخص ترک (بعد از حذف داده‌های ۶ و ۷ و ۸ و ۷۸ و ۷۹).....	۱۰۷
نمودار ۴-۳- نمودار جعبه‌ای عمر روسازی.....	۱۰۸
نمودار ۴-۴- نمودار جعبه‌ای عمر روسازی (بعد از حذف داده‌های ۲۲ و ۳۰).....	۱۰۹
نمودار ۴-۵- نمودار جعبه‌ای حداقل دما.....	۱۱۰
نمودار ۴-۶- نمودار جعبه‌ای تعداد روزهای یخبندان.....	۱۱۱

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

استفاده نکردن از روسازی‌های مناسب، باعث پیدایش شکست‌های برشی، تغییر شکل‌های بیش از اندازه و در نتیجه ناهمواری سطحی در روسازی می‌شود. برای جلوگیری از این مشکلات، لازم است تنش‌های ناشی از بار متمرکز زیر چرخ‌های وسایل نقلیه، با قرار دادن لایه‌هایی از مصالح مرغوب با مقاومت زیاد تا رسیدن به حد تحمل خاک بستر روسازی، کاسته شود. جنس این لایه‌ها باید طوری باشد که اولاً انتقال بار و کاهش تنش و ثانیاً تحمل تنش‌ها در خود لایه را تأمین کند. شدت تنش‌های فشاری قائم که در اثر بارگذاری در یک توده‌ی خاک به وجود می‌آید، در نقاط مختلف متفاوت است. در اثر بارگذاری روسازی، لایه‌ها تغییر شکل داده و در آن‌ها تنش‌های کششی و فشاری به وجود می‌آید. هر گاه شدت تنش‌های ایجاد شده در یک لایه‌ی روسازی، از میزان استقامت مصالح آن لایه بیش‌تر شود، سبب شکست و ترک خوردگی آن لایه می‌شود. بنابراین جنس و ضخامت لایه‌های روسازی که از مصالح قیری و یا سیمانی ساخته می‌شود باید طوری انتخاب شوند که در برابر تنش‌های به وجود آمده در آن‌ها مقاومت کنند. در نتیجه خرابی‌های متعددی در سطح روسازی بوجود می‌آیند که رایج‌ترین نوع آن خرابی ترک‌های برودتی می‌باشد که در این پژوهش به آن می‌پردازیم. [۱]

۱-۲ بیان مسئله پژوهش

ترک‌های برودتی^۱، از جمله پدیده‌های شایعی است که در مناطق سرد و مناطق با اختلاف درجه حرارت بین روز و شب و در فصول مختلف سال رخ می‌دهد. وجود این ترک‌ها باعث نفوذ آب به سازه روسازی شده و منجر به عریان شدگی و خرابی زودرس در آسفالت می‌شود. با این وجود در اثر این پدیده و تشکیل این نوع خرابی از ظرفیت باربری روسازی‌های آسفالتی کاسته شده و به دنبال آن مشکلات عدیده‌ای از جمله: بالا رفتن هزینه‌های اقتصادی در جهت تعمیر و نگهداری روسازی راه و بالا رفتن استهلاک وسایل نقلیه به وجود می‌آید. تجربیاتی که در سال‌های اخیر از عملکرد روسازی راه‌ها به دست آمده نشان داده است که این روسازی‌ها پس از مدتی دچار خرابی‌هایی نظیر ترک خوردگی، شیار افتادگی در مسیر عبور چرخ‌ها، قیر

¹ Cryogenic cracks

زدگی، نشست و برخی خرابی‌های دیگر می‌شود. بروز این خرابی‌ها نه تنها باعث کاهش عمر مفید روسازی (عمر بهره برداری از روسازی) و ایمنی استفاده کنندگان از راه می‌شود بلکه باعث افزایش مخارج نگهداری و بهسازی روسازی و همچنین افزایش مخارجی می‌شود که استفاده کنندگان از راه به علت خرابی روسازی و اثرات ناشی از آن متحمل می‌شوند. از جمله خرابی‌های روسازی، ترک‌های برودتی هستند. بر اساس تعریف آشتو (AASHTO, ۲۰۰۴) یک ترک عبارت است از یک ناپیوستگی در سطح روسازی با حداقل عرض ۱ میلی‌متر و حداقل طول ۲۵ میلی‌متر. ترک‌های برودتی در روسازی‌های آسفالتی از جمله پدیده‌های رایج در مناطق سردسیر (که درجه حرارت هوا بعضاً به ۱۰- درجه سلسیوس یا کمتر می‌رسد) است [۲]. نفوذ آب به درون روسازی و در نتیجه افزایش پتانسیل جریان شدگی^۱، ایجاد پدیده پمپینگ^۲ و تشکیل عدسی‌های یخ^۳ و در نتیجه افزایش پتانسیل ترک خوردگی از جمله پیامدهای این نوع خرابی‌هاست. همچنین ترک‌های عرضی حاصل از تنش‌های حرارتی به عنوان مکان‌های تمرکز تنش برای ایجاد ترک‌های طولی هستند. ترک‌های حرارتی در روسازی‌های آسفالتی به دو گروه ترک‌های دمای پایین و ترک‌های خستگی حرارتی تقسیم بندی می‌شوند. ترک خوردگی که بر اثر دمای پایین ایجاد می‌شود، ترک ناشی از دمای پایین و ترک خوردگی حاصل از سیکل‌های حرارتی^۴ را ترک خستگی حرارتی می‌نامند. لذا پژوهش حاضر به دنبال پیش بینی ترک‌های برودتی روسازی به صورت تابعی از آب و هوا و عمر روسازی می‌باشد [۳].

۱-۳ اهمیت و ضرورت پژوهش

در کشور ما سالانه مبالغ بسیار هنگفتی صرف طراحی، ساخت و نگهداری روسازی‌های آسفالتی می‌شود در نتیجه یافتن راه حلی مناسب برای کاهش هزینه‌های ترمیم و نگهداری روسازی امری حیاتی است. یکی از اصلی‌ترین انواع خرابی‌ها در روسازی‌های آسفالتی، ترک خوردگی است، در نتیجه ایجاد درکی مناسب از چگونگی شروع و گسترش ترک و در نتیجه آن مقاوم سازی روسازی در برابر این نوع از خرابی می‌تواند نقش بسیار مهمی در صرفه جویی مبالغ بسیار زیادی از بودجه کشور داشته باشد. هدف از نوآوری این پژوهش این

¹ The potential for nudity

² Pumping phenomenon

³ Formation of ice lenses

⁴ Thermal cycles

است که در مناطق مختلف کشور آب و هوا مورد بررسی قرار بگیرد و در پایان یک فرمول همزمان با عمر روسازی و آب و هوا داشته باشیم.

۱-۴ اهداف پژوهش

هدف از انجام این تحقیق، تحلیل عوامل مؤثر در ترک خوردگی برودتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. در این تحقیق برای پیش بینی شدت ترک برودتی در جاده ها از روش رگرسیون استفاده شده است و از عواملی مانند عمر روسازی ، ترافیک ، حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان شاخص ترک خوردگی محاسبه شده است.

۱-۵ فرضیات پژوهش

- ۱) شاخص ترک خوردگی شدت و وسعت ترک‌های برودتی را نشان می‌دهد.
- ۲) برای پیش بینی شدت و وسعت ترک های برودتی می توان شاخص خوردگی را محاسبه کرد.

۱-۶ فرضیه های پژوهش

- ۱) شاخص ترک خوردگی تابعی از عمرروسازی و آب و هوا و ترافیک می‌باشد.
- ۲) روش های رگرسیون آماری روش مناسبی برای پیش بینی شاخص ترک خوردگی می باشند.

۱-۷ معرفی ساختار پایان نامه

در فصل اول مقدمه ای درباره ترک های برودتی و تاثیرات آن ها در روسازی های آسفالتی و اهمیت پیش بینی این ترک ها ذکر شد و در ادامه به بیان مسئله و هدفی که این پژوهش قصد دارد معرفی گردید. در ادامه و در فصل دوم، توضیح کلی درباره ترک های برودتی و مدل های پیش بینی خرابی داده می شود و پیشینه پژوهش و برخی از تحقیقاتی که توسط پژوهشگران در این زمینه انجام شده است ذکر خواهد شد. در فصل سوم کلیه اطلاعات مورد نیاز جهت مدل سازی و پیش بینی شاخص ترک خوردگی از قبیل: تعداد ترک های جزئی، نیمه و کامل در هر کیلومتر که از طریق بازدید های میدانی بدست می آیند و همچنین عمر روسازی و تعداد روز های یخبندان در سال و ... جمع آوری و دسته بندی می گردند و در ادامه با توجه

به اطلاعات بدست آمده و روابط ذکر شده شاخص ترک خوردگی محاسبه می شود. در فصل چهارم، پس از بدست آوردن شاخص ترک خوردگی و با توجه به اطلاعات جمع آوری شده مدل سازی انجام می شود و نمودار هایی که هر یک از آن ها نشان دهنده یک حد و مرز برای ترک خوردگی هستند، بدست آمده و ترسیم می شوند. در نهایت نمودار های ترسیم شده مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرند. در انتها و در فصل پنجم، نتیجه گیری نهایی از انجام این پژوهش شرح داده می شود.

فصل ۲: مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۱-۲ مقدمه

در این فصل ابتدا به تعریف ترک‌های برودتی و خلاصه‌ای از ادبیات فنی موجود در زمینه‌ی ترک خوردگی برودتی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و سپس پارامترها و عواملی که در این پدیده تأثیر گذار می‌باشند نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش انتهایی این فصل، پیشینه‌ی مدل سازی ترک‌های برودتی آسفالت ذکر و به طور کامل شرح داده شده است.

۲-۲ تعاریف

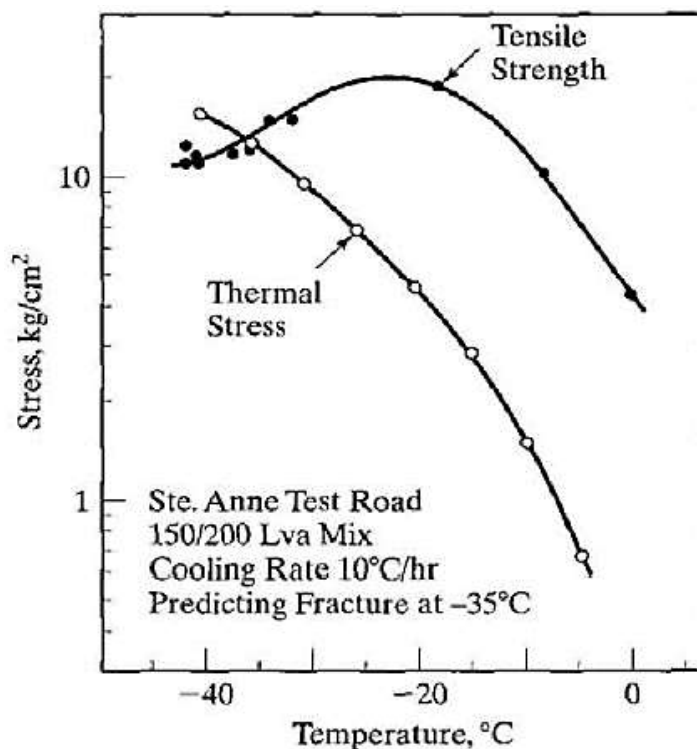
۱-۲-۲ تعریف ترک‌های برودتی^۱

در روش‌های مکانیستیک - تجربی^۲، تخریب روسازی توسط سه نوع خرابی اصلی خستگی، شیار شدگی و ترک برودتی رخ می‌دهد. دو نوع اول وابسته به بار ترافیک می‌باشد ولی مهم‌ترین عامل به وجود آمدن ترک‌های برودتی، دمای محیط است. کاهش دمای محیط موجب انقباض رویه‌ی آسفالتی است ولی به علت اصطکاک موجود بین رویه و لایه زیرین، این انقباض رخ نداده و در مقابل به جای کرنش‌های برودتی، تنش‌های کششی در طول لایه‌ی آسفالتی رخ می‌دهد. از سوی دیگر به موازات تولید و افزایش تنش‌های کششی در اثر کاهش دما آسفالت، مقاومت کششی مخلوط آسفالتی دستخوش تغییر می‌کنند. همان‌طور که در شکل (۱-۲) برای یک نمونه آسفالتی بخصوص دیده می‌شود، با کاهش دما تنش کششی افزایش یافته و به موازات آن مقاومت کششی مخلوط آسفالتی ابتدا افزایش پیدا کرده ولی پس از رسیدن به یک مقدار حداکثر، روند کاهش‌ی بوجود می‌آید. در نقطه تقاطع این دو منحنی، یعنی در دمایی که در آن تنش کششی رخ داده در لایه آسفالتی به حد مقاومت کششی مخلوط می‌رسد، ترک خوردگی برودتی بوجود می‌آید. با توجه به اینکه موقعیت هر دو منحنی، تابع پارامترهای متعددی مانند نوع مخلوط آسفالتی ساخته شده، میزان پیرشدگی در طول مدل بهره‌برداری، نرخ کاهش دما و خستگی ایجاد شده در لایه آسفالتی می‌باشد، پیش‌بینی حداقل دمای قابل تحمل برای طرح بخصوص روسازی پیچیدگی‌های زیادی بوجود می‌آورد. به همین دلیل، با وجود

¹ - Thermal Cracking

² Mechanistic - experimental

تحقیقات زیاد انجام شده در ۵ دهه گذشته، تاکنون نتوانسته‌اند معیارهای طراحی دقیقی، مانند آنچه که برای خرابی‌های ناشی از خستگی و شیار شدگی رویه‌های آسفالتی در روش مکانیستیک- تجربی داده شده است، برای ترک خوردگی برودتی نیز جهت استفاده طراحان ارائه دهند.



شکل ۱-۲. تغییرات تنش‌های برودتی و مقاومت کششی یک مخلوط آسفالتی بر حسب کاهش دما

ترک‌های برودتی به دو دسته‌ی ترک‌های در دماهای پایین و ترک‌های خستگی دمایی تقسیم می‌گردند. ترک‌های ناشی از دمای پایین در مناطقی که دمای هوا پایین می‌باشد، در اثر یک سیکل کاهش دما بوجود می‌آید. ترک‌های خستگی حرارتی می‌توانند در مناطق گرم‌تر که آسفالت با سختی بالا استفاده شده و یا قیر آسفالت به واسطه‌ی پیرشدگی سخت تر شده است، بوجود آیند. ترک‌های ناشی از دمای پایین به مشخصات ترمو-ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی، عوامل محیطی و شرایط هندسی روسازی وابسته هستند.

ترک‌های برودتی معمولاً به صورت عرضی بوده که فواصل آن‌ها در روسازی می‌تواند از یک تا صد متر یا حتی بیشتر از آن تغییر یابند. اگر فاصله‌ی ترک‌های عرضی کمتر از عرض روسازی باشد، امکان ایجاد ترک‌های طولی وجود دارد و در این صورت با ترک‌های عرضی موجود تشکیل بلوک می‌گردد.

ترک خوردگی برودتی به طور کلی به دو مقدار تنش‌های برودتی و مقاومت کششی^۱ مخلوط آسفالتی بستگی دارد (شکل ۱-۲). مقاومت کششی به نوع قیر و سنگ‌دانه‌ی مصرفی در مخلوط آسفالتی وابسته می‌باشند و تنش‌های برودتی نیز به دمای محیط و قدمت روسازی وابسته می‌باشند. روسازی‌های قدیمی به دلیل پیرشدگی، رفتار شکل پذیر خود را از دست داده اند و در برابر ترک خوردگی آسیب‌پذیرتر می‌گردند. هر یک از عوامل ذکر شده، توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته اند که در ادامه شرح داده شده می‌شود.

۲-۲-۲. عوامل پیدایش ترک‌های سطحی^۲

تحقیقات نشان داده اند که ترک‌های متعدد طولی در سطح روسازی وجود دارد که عمق آن‌ها کم‌تر از ضخامت لایه‌ی آسفالتی می‌باشد و می‌تواند موید این واقعیت باشد که ترک‌ها می‌توانند از سطح آغاز شوند [۳]. ترک‌های سطحی به صورت خیلی آشکار، به موازات مسیر چرخ‌ها در روسازی بتن آسفالتی ایجاد می‌گردد و محل آن‌ها معمولاً خارج از مسیر چرخ و به موازات لبه‌ی آن می‌باشد. بازدید از نمونه‌ای مغزه‌ای گرفته شده، نشان داده که بر خلاف ترک‌های خستگی که از کف لایه‌ی آسفالت شروع می‌شود، این ترک‌ها به ندرت به انتهای لایه‌ی آسفالت می‌رسند. در گروه تحقیقاتی راه مینسوتا مشاهده شده است که ترک‌های طولی Mn/Road عمود بر لبه ترک‌های عرضی روسازی و در مسیر چرخ‌ها تشکیل می‌گردد و گسترش پیدا می‌کند تا ترک‌ها ناگهان به هم می‌رسند و به صورت یک سلول کامل ترک بوجود می‌آیند. [۴]. برای بررسی این نوع ترک‌ها، مطالعات جامع و کاملی انجام شده است و محققان نتیجه گرفته‌اند که روش‌های موجود که برای آنالیز روسازی وجود دارد، نمی‌تواند ترک‌های سطحی را توجیه کند [۵] بنابراین فرضیات مختلفی برای تشریح آن مطرح شده می‌باشد. یکی از فرضیاتی که بسیار مورد انتظار است این است که ممکن است پیدایش این ترک‌ها به واسطه بار چرخ وسایل نقلیه‌ی عبوری باشد. ابزار تحلیل موجود برای طرح روسازی و بررسی عملکرد آن بر این اساس استوار است که توزیع تنش‌ها بین چرخ و روسازی، یکنواخت می‌باشد.

تحقیقات اخیر روی تنش‌های نزدیک به سطح بارگذاری، نشان می‌دهد که چرخ‌های کامیون‌ها می‌توانند نیروهای مماسی قابل ملاحظه‌ای در سطح رو سازی ایجاد کنند [۴]. بررسی بزرگی این نیروها نشان می‌دهد

¹ Tensile strength

² Surface cracks

که این نیروها عامل مهمی در پیدایش تنش‌های برشی، کشش سطحی است و گسستگی‌های موضعی را نزدیک سطح روسازی ایجاد می‌کنند که منجر به رشد ترک‌های بالا به پایین می‌گردد (TDC) [۳].



شکل ۲-۲. ترک خوردگی از بالا به پایین در یک نمونه‌ی آسفالت [۵]

یکی دیگر از عوامل مهم مربوط به TDC پدیده‌ی جدا شدگی^۱ می‌باشد. [۳].
از مطالب ذکر شده می‌توان عوامل مؤثر بر پیدایش را به چهار دسته طبقه‌بندی کرد؛ اندرکنش سه TDC بعدی چرخ و روسازی، نیروی اصطکاک، تغییرات درجه‌ی حرارت و جداشدگی.

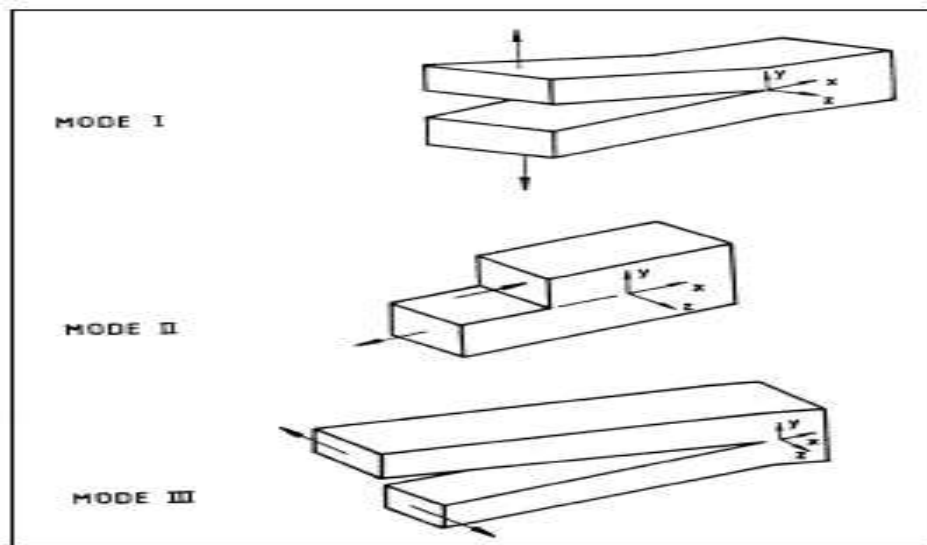
۳-۲-۲ انواع تغییر شکل نوک ترک

اختلاف بین یک قطعه ترک دار با قطعه‌ی دیگر، در میزان پارامتر میدان تنش K می‌باشد، که ضریب شدت تنش نامیده شده است. اصولاً K به عنوان ضریب درجه بندی به کار می‌رود که میزان شدت تنش راس ترک را تعریف می‌کنند [۶].

K_I ، K_{III} و K_{II} ضرایب تنش^۲ است که مربوط به سه نوع پایه‌ی تغییر مکان سطح ترک می‌باشد. این سه نوع، در شکل ۲ نشان داده شده است. (I) نوع کششی یا باز شدن، که در آن سطوح ترک به طور مستقیم از هم جدا می‌شوند و به شکل قراردادی با I نشان داده می‌گردد، نوع (II) روش سر خوردن یا برش در صفحه که

2 Segregation
1- Stress intensity factors

در آن سطوح ترک روی یکدیگر در راستای عمود بر لبه‌ی جلویی ترک، سر می‌خورند و (III) روش پارگی یا برش خلاف صفحه‌ای که در آن سطوح ترک نسبت به یک دی گربه شکل موازی با لبه‌ی جلویی ترک حرکت می‌کنند، است. برهم گذاری این سه روش برای توصیف بیش‌تر حالات عمومی و کلی تغییر سطح ترک، کافی می‌باشد. [۷].



شکل ۲-۳. روش‌های اصلی بارگذاری و جابه‌جایی‌های مربوطه‌ی سطوح ترک [۷]

۲-۲-۴ ساز و کار ترک‌ها در روسازی

با توجه به تحقیقاتی که تاکنون بر روی روسازی‌های مختلف با دیدگاه مکانیک شکست انجام شده می‌باشد، سه سازوکار مختلف برای انواع ترک‌هایی که در روسازی‌ها به وجود می‌آید، تصور شده‌اند.

- حالت اول: در این حالت، ترک در اثر تغییرات درجه‌ی حرارت، انبساط و انقباض مصالح، ایجاد و سپس در اثر خمش ناشی از بارگذاری و عبور ترافیک، در لایه گسترش می‌یابند.

- حالت دوم: در این حالت، ترک در اثر تنش‌های نیروهای برشی حاصل از بارگذاری و عبور ترافیک ایجاد و سپس در لایه گسترش می‌یابند.

- حالت سوم: در این حالت، ترک در اثر تنش‌های سطحی افقی بین چرخ و سطح روسازی حاصل از بارگذاری و عبور ترافیک، ایجاد و سپس در لایه گسترش می‌یابند. با توجه به مطالب بالا چنین استنباط

می‌شود که ترک در هریک از حالات بالا تحت تأثیر طیف خاصی از تنش‌ها و یا کرنش‌ها که در اثر عوامل خارجی در روسازی به وجود می‌آیند، ایجاد و گسترش یافته و در بین این حالات، ترک‌های ناشی از حالات I و II در روسازی بیش تر ملاحظه می‌شود. [۸].

۲-۲-۵ قوانین گسترش ترک در مصالح

در سال ۱۹۶۳ میلادی، آقایان پاریس و اردوگان پس از انجام آزمایشات متعدد، روی مصالح به این نتیجه دست یافتند که سرعت گسترش ترک در سازه را می‌توان برحسب ضریب شدت تنش و خصوصیات فنی مصالح با رابطه‌ی (۱) توصیف شود. [۹].

$$\frac{dc}{dN} = AK^n \quad (۱-۲)$$

در رابطه‌ی (۱-۲) نسبت افزایش طول ترک در هر سیکل بارگذاری K ضریب شدت تنش و A و K ثابت‌های مربوط به مصالح می‌باشند که از طریق آزمایش تعیین می‌گردد که این پارامترها در مورد آسفالت به درصد قیر، درصد فضای خالی مخلوط، درصد فیلر، نوع قیر، درجه‌ی حرارت آزمایش و ... وابسته می‌باشد. عموماً برای به دست آوردن مقادیر عددی A و n گسترش ترک در یک تیر آسفالتی تحت بارگذاری و باربرداری، بررسی می‌گردد؛ اما روابط ساده‌ای نیز برای پرهیز از آزمایشات وقت گیر و پر هزینه توسط محققین ارائه شده می‌باشد. [۷]

$$n = \frac{2}{m} \quad (۲-۲)$$

$$n = 1.558 - 0.401 \log A$$

در این روابط که توسط Lytton پیشنهاد شده، m برابر با شیب منحنی لگاریتم مدول الاستیسیته، در مقابل گاریتم زمان بارگذاری است. با انتگرال گیری از رابطه‌ی (۱)، تعداد دفعات بارگذاری که باعث افزایش طول ترک از C₀ به C₁ می‌شود، به دست می‌آیند.

$$N = \int_{C_o}^{C_i} \frac{dc}{A(K_{(c)})^n} \quad (3-2)$$

همان طور که ملاحظه می‌شود، محاسبه‌ی انتگرال بالا بستگی به بدست آوردن تابع فاکتور تشدید تنش برحسب طول ترک دارند. روش‌های گوناگونی برای محاسبه‌ی K وجود دارد که از میان آن‌ها، نتایج به دست آمده از روش اجزاء محدود، دقیق تر از سایر روش‌ها می باشد. به همین خاطر در این پژوهش از این روش برای محاسبه‌ی K استفاده شده است.



شکل ۲-۴. ترک کامل



شکل ۲-۵. ترک نیمه



شکل ۲-۶. ترک جزئی

۲-۳ پیشینه پژوهش

در این بخش به مطالعاتی که در زمینه‌ی عوامل مؤثر و پارامترهای مهم برای تعیین تنش‌های برودتی انجام شده، پرداخته می‌شود.

در سال ۱۹۶۴ هوکس^۱ و همکاران رابطه‌هایی برای به دست آوردن دو پارامتر ظرفیت گرمایی ویژه^۲ و رسانندگی دمایی^۳ ارائه داده‌اند. ظرفیت گرمایی ویژه برابر مقدار گرمایی می‌باشد که واحد جرم ماده برای افزایش دمای یک درجه‌ی سانتی‌گراد به آن نیاز دارد. واحد ظرفیت گرمایی ویژه در سیستم استاندارد بین‌المللی واحدها (SI) برابر $J/Kg^{\circ}C$ است. ظرفیت گرمایی ویژه را می‌توان با استفاده از رابطه (۲-۱) تعیین کرد:

$$S = \frac{H}{m(t_1 - t_2)} \quad (2-3)$$

که در آن، S ظرفیت گرمایی ویژه، H واحد گرمای اضافه شده، m جرم مصالح و $t_1 - t_2$ تغییر دما بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد. [۱۰].

رسانندگی دمایی، خاصیتی از اجسام است که بیانگر توانایی آن‌ها در انتقال گرما است. یکای رسانندگی دمایی در سیستم SI برابر وات بر کلوین متری باشد. رسانندگی دمایی به وسیله‌ی رابطه‌ی (۲-۴) بیان می‌شود:

1- Hooks
2- Specific Heat Capacity
3- Thermal Conductivity

$$R = \frac{Hd}{(t_1 - t_2)aT} \quad (۴-۲)$$

در رابطه‌ی (۴-۲)، H نشان دهنده مقدار گرمای عبوری از سطح a در مدت زمان T ثانیه می‌باشد، R ضریب رسانندگی دمایی که تنها به جنس ماده وابسته می‌باشد، $t_1 - t_2$ تغییر دما بر حسب درجه سانتی‌گراد، a سطح مقطع، T مدت زمان سپری‌شده و d ضخامت می‌باشند [۱۰].

در ادامه‌ی مطالعات بر روی پارامترهای مؤثر برای تعیین تنش‌های برودتی، لیتفید^۱ [۱۱] در سال ۱۹۶۷ بر روی ضریب انقباض دمایی^۲ و ضریب انبساط دمایی^۳ بررسی انجام دادند. ضرایب انقباض و انبساط دمایی از مشخصات دمایی مخلوط آسفالتی بشمار می‌روند که یکی از مهم‌ترین پارامترها مورد نیاز برای محاسبه تنش‌های برودتی می‌باشد. لیتفید نخستین بار این ضریب را مورد بررسی قرار دادند. او با آزمایش بر روی نمونه‌های آسفالتی بین دماهای ۰ تا ۱۳۰ درجه فارنهایت (۱۷- تا ۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) به این نتیجه رسیدند که استفاده از قیرهای مختلف باعث ایجاد اختلاف در مقدار ضریب انقباض و انبساط دمایی مخلوط آسفالتی می‌گردد. جونز^۴ [۱۲] در سال ۱۹۶۸ یک رابطه‌ی حجمی برای پیش بینی ضریب انقباض دمایی به صورت رابطه‌ی (۲-۳) تعریف کرد.

$$B_{mix} = \frac{VMA \times B_{ac} + V_{agg} \times B_{agg}}{3 \times V_{total}} \quad (۵-۲)$$

که در آن:

B_{mix} : ضریب انقباض دمایی مخلوط

B_{ac} : ضریب انقباض دمایی قیر

B_{agg} : ضریب انقباض دمایی سنگدانه

V_{agg} : درصد حجمی سنگ‌دانه‌ها در خلوط

V_{total} : حجم کلی مخلوط

4- Littlefield

5- Coefficient of Thermal Contraction (CTC)

6- Coefficient of Thermal Expansion (CTE)

1- Jones

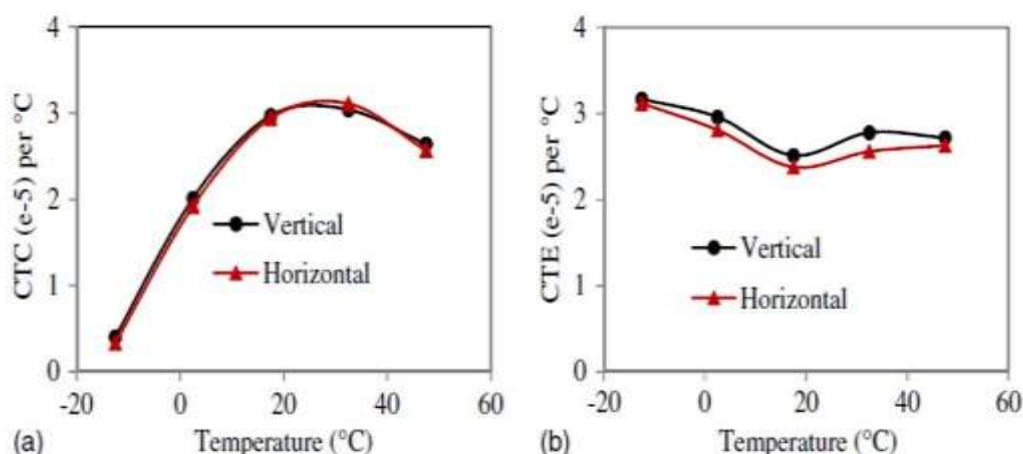
راشد الاسلام^۱ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴، ضریب انبساط و انقباض دمایی را بر اساس کرنش‌های اندازه‌گیری شده‌ی میدانی و تغییرات دما تعیین کردند. در تعیین این ضرایب از چسبندگی میان اساس و لایه‌ی آسفالتی چشم پوشی شده است. آن‌ها با استفاده از آزمایش‌های میدانی ضرایب انبساط برای پاییز و زمستان را به ترتیب برابر $2/42 \times 10^{-5}$ و $2/77 \times 10^{-5}$ بر درجه سانتی‌گراد و ضریب انقباض را برای پاییز و زمستان به ترتیب برابر $2/69 \times 10^{-5}$ و $2/47 \times 10^{-5}$ بر درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. آن‌ها همچنین ضرایب انقباض و انبساط را با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به ترتیب برابر $2/64 \times 10^{-5}$ و $2/28 \times 10^{-5}$ بر درجه سانتی‌گراد به دست آوردند. علاوه بر این، ضریب ظرفیت گرمایی ویژه با استفاده از نتایج آزمایشگاهی برابر 1464 J/(kg K) و ضریب رسانندگی دمایی با استفاده از مدل اجزاء محدود برابر $2/11 \text{ W/(m K)}$ توسط آن‌ها گزارش شده است.

در ادامه راشد الاسلام و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۵، ضرایب انقباض و انبساط حرارتی را در شرایط متفاوت بررسی کردند. ابتدا با تعیین این ضرایب در یک محدوده‌ی بین دمای ۲۰- تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد، تغییرات آن در جهت افقی و عمودی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتیجه‌ی آن نشان داد که اختلاف ضرایب انقباض و انبساط دمایی در دو جهت افقی و قائم حداکثر ۴/۷٪ است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. (شکل ۲-۲). علاوه بر این، آن‌ها یک مدلی ارائه کردند که ضرایب انبساط و انقباض را در دماهای مختلف تعیین می‌کند که رابطه‌ی آن به شرح زیر است:

$$CTC = (-0.0016T^2 + 0.0946T + 1.7457)10^{-5} \text{er}^C \quad (6-2)$$

$$CTC = (-0.0004T^2 + 0.0234T + 2.781)10^{-5} \text{er}^C \quad (7-2)$$

¹ - Rashadul Islam



شکل ۲-۷. (a) تغییرات ضریب انقباض دمایی بر حسب دما در دو جهت افقی و عمودی (b) [۱۴]

همان‌طور که در شکل (۲-۴) نشان داده شده است ضرایب انقباض و انبساط دمایی بر حسب دما متغیر می‌باشد و این تغییر به صورت غیر خطی است. در بخش دیگر این تحقیق تأثیر درصد هوا و نوع دانه بندی مخلوط آسفالتی در ضرایب انقباض و انبساط حرارتی مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که درصد هوا و دانه بندی تأثیر چندانی روی ضرایب انقباض و انبساط حرارتی ندارد.

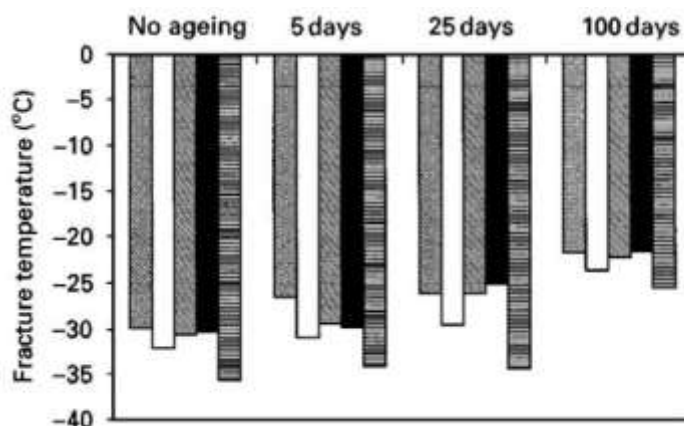
جهت بررسی نوع قیر مصرفی و اثر پیر شدگی قیر بر روی ترک خوردگی برودتی، ایساکسون^۱ و زنگ^۲ [۱۵] در سال ۱۹۹۸ با استفاده از آزمایش نمونه‌ی مهار شده تحت تنش‌های برودتی^۳، تحقیق کردند. در این مطالعه از ۵ نوع قیر که از چهار منطقه به دست آمده است، استفاده شده است. هر دو آزمایش بر روی نمونه‌های پیر نشده و پیر شده تا ۱۰۰ روز در دمای ۸۵ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شده است. مشخصات قیرهای مورد استفاده در جدول (۱-۲) ذکر شده است. همچنین برای بررسی تأثیر درصد هوا در مخلوط‌های آسفالتی از دو نوع مخلوط متراکم و متخلخل استفاده شده است.

1- Isacsson
2- Zeng
3- Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST)

جدول ۲-۱. مشخصات قیرهای استفاده شده در ساخت نمونه [۱۵]

Parameter	Bitumen				
	B85	B180 (Venezuela)	B180 (Saudi Arabia)	B180 (Mexico)	B180 (Russia)
Pen. (25°C, 100g.dm)	۸۶	۱۸۱	۱۶۰	۱۶۴	۱۸۷
Softening point (°C)	۴۶	۳۸	۴۰	۴۰	۴۲
Dynamic viscosity at 60 °C (Nsm ⁻²)	۱۸۵	۶۶	۵۹	۷۳	۳۲
Kinematic viscosity at 135 °C (mm ² s ⁻¹)	۳۵۶	۲۰۸	۲۲۲	۲۶۰	۱۵۹

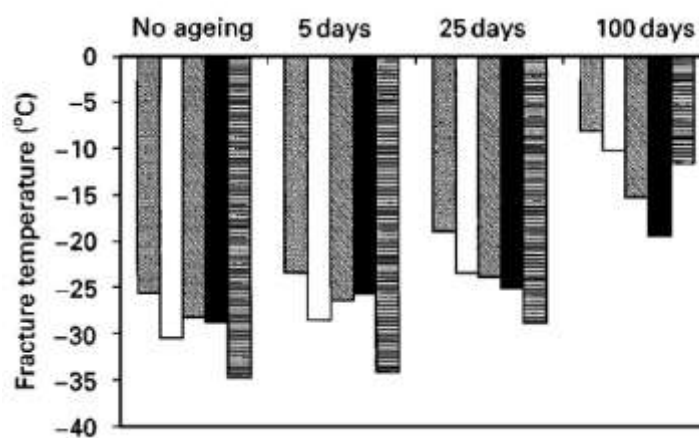
نتایج این آزمایش نشان می‌دهند که علاوه بر نوع قیر مصرفی، پیرشدگی مخلوط آسفالتی نیز در ترک خوردگی برودتی مؤثر می‌باشند. در نمونه‌های پیر نشده بیشترین تفاوت در دمای شکست بین نمونه‌ی با قیر روسیه و نمونه‌ی با قیر ونزوئلا حدود ۶ درجه سانتی‌گراد است. پیر شدگی قیر باعث سخت شدن قیر می‌شود و در نتیجه باعث می‌شود دمای شکست مخلوط آسفالتی افزایش کند. بعد از ۱۰۰ روز پیر شدگی در دمای ۸۵ درجه‌ی سانتی‌گراد تغییرات دمای شکست نمونه‌ها بین ۸ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نمونه‌ی ساخته شده با قیر B۸۵ در تمام حالت‌ها دارای دمای شکست بالاتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با سایر قیرها است و این به معنای تأثیر قیر انتخاب شده در مخلوط آسفالتی می‌باشد که هرچه قیر دارای درجه نفوذ بیشتر و یا به عبارت دیگر قیر نرمتری باشد، ترک خوردگی برودتی در دمای پایین‌تری رخ می‌دهند (شکل ۲-۵ و ۲-۶).



شکل ۲-۸. تأثیر پیر شدگی و نوع قیر مورد استفاده در دمای شکست در مخلوط‌های متراکم.

در هر حالت پیر شدگی مخلوط‌ها به ترتیب از چپ با قیرهای: B-۸۵ ونزوئلا، B-۱۸۰ ونزوئلا، عربستان، مکزیک، روسیه [۱۵].

همچنین در این مطالعه دو نوع نمونه‌ی متخلخل و نمونه‌ی متراکم که دارای درصد هوای متفاوت هستند مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه دمای شکست هر دو مخلوط متخلخل پیر نشده و متراکم پیر نشده تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند ولی نمونه‌هایی که با درصد هوای بیشتر (متخلخل) ساخته شده‌اند زودتر دچار پیر شدگی می‌شوند و در نتیجه دمای شکست آن‌ها بیشتر افزایش می‌یابد.



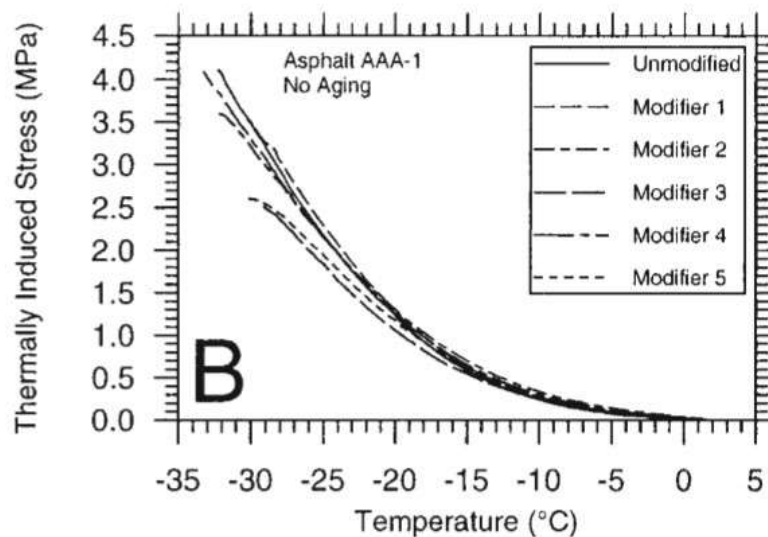
شکل ۲-۹. تأثیر پیر شدگی و نوع قیر مورد استفاده در دمای شکست در مخلوط‌های متخلخل.

در هر حالت پیر شدگی مخلوط‌ها به ترتیب از چپ با قیرهای: B-۸۵ ونزوئلا، B-۱۸۰ ونزوئلا، عربستان، مکزیک، روسیه [۱۵].

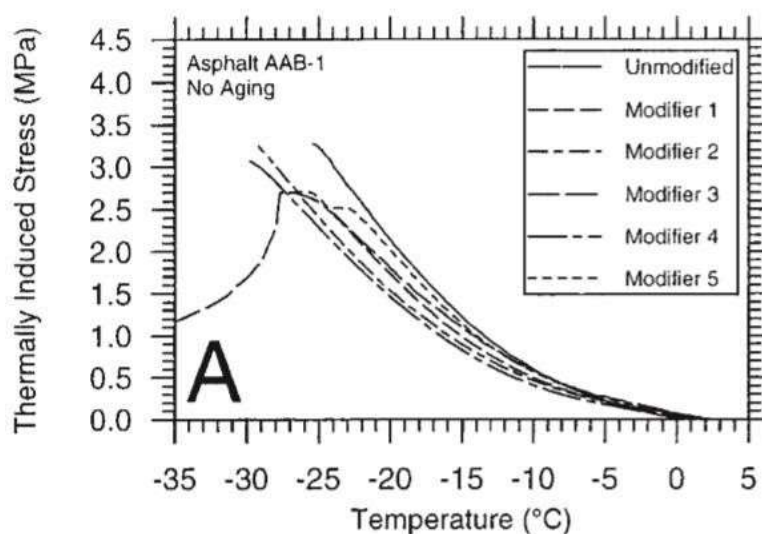
در سال ۱۹۹۸ فورتیر^۱ و همکاران [۱۶] با استفاده از آزمایش نمونه‌ی مهارشده‌ی تحت تنش برودتی (TSRST)، ترک خوردگی دمایی را بر روی نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده بررسی کردند. در این مطالعه از دو نوع نمونه‌ی AAA-۱ و AAB-۱ که جزئیات این نمونه‌های در جدول (۲-۲) توضیح داده شده است، استفاده کردند. قیر مورد استفاده در مخلوط AAA-۱ نسبت به قیر مورد استفاده در مخلوط AAB-۱ نرم‌تر است. درجه نفوذ قیر مورد استفاده در مخلوط‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط AAA-۱ و AAB به ترتیب برابر ۱۶ و ۹/۸ میلی متر می‌باشند. دما و تنش شکست برای مخلوط AAA-۱ به ترتیب

1- Fortier

برابر $25/4$ - درجه سانتی‌گراد و $4/11$ Mpa و برای مخلوط AAB-1 به ترتیب برابر $25/4$ درجه سانتی‌گراد و $3/28$ Mpa به دست آمده است. در این مطالعه از ۵ اصلاح کننده برای مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است که در جدول (۲-۲) ذکر شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اصلاح کننده‌ها بر روی نمونه‌های آسفالتی AAA-1 تأثیر چندانی در دمای شکست مخلوط‌های آسفالتی ندارد ولی دو اصلاح کننده ۳ و ۵ باعث کاهش تنش شکست می‌شود. بر روی نمونه‌های آسفالتی AAB-1، اصلاح کننده‌های نوع ۲ و ۴ باعث کاهش دمای شکست مخلوط آسفالتی شده است و اصلاح کننده‌های نوع ۳ و ۵ باعث کاهش تنش شکست می‌شوند (شکل ۲-۷ و ۲-۸).



شکل ۲-۱۰. تنش‌های برودتی اندازه‌گیری شده برای مخلوط‌های AAA-1 اصلاح شده و اصلاح نشده [۱۶]



شکل ۲-۱۱. تنش‌های برودتی اندازه‌گیری شده برای مخلوط‌های AAB-1 اصلاح شده و اصلاح نشده. [۱۶]

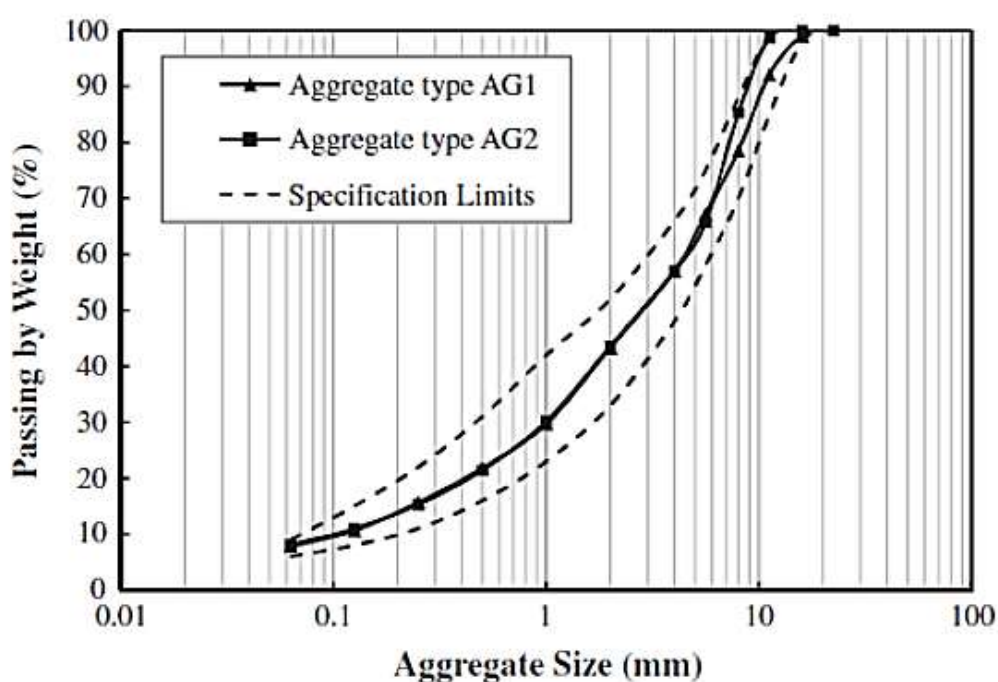
Experiment Design Variables	Levels			
Asphalt type and grade (SHRP MRL)	1) AAB-1 (Wyoming Sour), 150/200 2) AAA-1 (Lloydminster), AC-10			
Modifier type	1) SBR Latex Polymer a) Polymer UP 7289 for AAB-1 b) Polymer UP 70 for AAA-1 2) Elvaloy®AM (ethylene acrylate copolymer) 3) ÉCOFLEX (10% of rubber powder) 4) Polymer (elastomer) a) #S37410 for AAB-1 b) #S37409 for AAA-1 5) FORTA® AR Synthetic Fibers (blend of polypropylene and Kevlar® fibers)			
Aggregate (SHRP MRL)	RB, crushed Watsonville granite (California), Granite Rock Company			
Asphalt content based on Marshall mix design procedure	1) 5.1% for AAB-1 2) 5.2% for AAA-1			
Air void content (target)	4%			
Air void content (statistics)	AAB-1		AAA-1	
	Bulk ¹	SSD ²	Bulk ¹	SSD ²
a) number of AC specimens	56	56	48	48
b) average	5.59%	5.04%	4.85%	4.38%
c) standard deviation	0.93%	0.85%	0.75%	0.64%
d) minimum	3.63%	3.19%	3.51%	3.13%
e) maximum	7.86%	7.20%	6.43%	5.70%
AC specimen dimensions	cylinder, 25.6 cm in length, diameter of 5.7 cm			
Aging	1) short-term oven aging (STOA): 4 hours at 135 °C 2) long-term oven aging (LTOA): 0, 5, 25 and 50 days at 85 °C			
Conditioning	specimen at 2 °C over 30 minutes before testing			
Cooling rate	10 °C/hr			
Replicate	2 tests			
Total number of tests	2 asphalt cements x 6 (1 unmodified mix and 5 modified mixes) x 4 levels of aging x 2 replicates = 96 tests			

شکل ۲-۱۲. جدول مشخصات مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها [۱۶]

در ادامه مطالعات انجام شده در زمینه‌ی افزودنی‌های مخلوط آسفالتی، داس^۱ و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۲، با استفاده از نتایج آزمایشگاه TSRST تأثیر دو نوع از افزودنی‌های FT-paraffin and Asphaltan- (B) را در ترک خوردگی برودتی مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق از دو نوع افزودنی با مشخصاتی که در جدول (۲-۲) ذکر شده استفاده شده است. همچنین از دو نوع دانه بندی که در شکل (۲-۷) مشخص می‌باشد، استفاده شده است.

جدول ۲-۲. مشخصات قیرهای مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها [۱۷]

Bitumen	Penetration (dmm)	Softening point (°C)	<i>Brookfield viscosity (mPas)</i> <i>At 135°C At 165°C</i>		Forced ductility at 10°C (Nm)	Penetration index
Unmodified 70/100	۸۱	۴۶	۳۴۵	۱۰۱	۱/۳۸	-۱/۱
+40%wax AB	۵۲	۸۵	۲۶۳	۸۲	۳/۵۴	۵/۱
+40% wax FT	۴۵	۸۹	۲۷۰	۸۰	۴/۰۳	۵/۲



شکل ۲-۱۳. منحنی دانه بندی برای ساخت نمونه‌ها [۱۷]

در این مطالعه، با انجام دو آزمایش BBR و DSR در دماهای پایین، دریافتند که قیرهای دارای افزودنی نسبت به قیرهای اصلاح شده رفتار سفت تر و سخت تر از خود نشان دادند که این به معنی افزایش تنش در روسازی و افزایش احتمال ترک خوردگی در روسازی است. [۱۷].

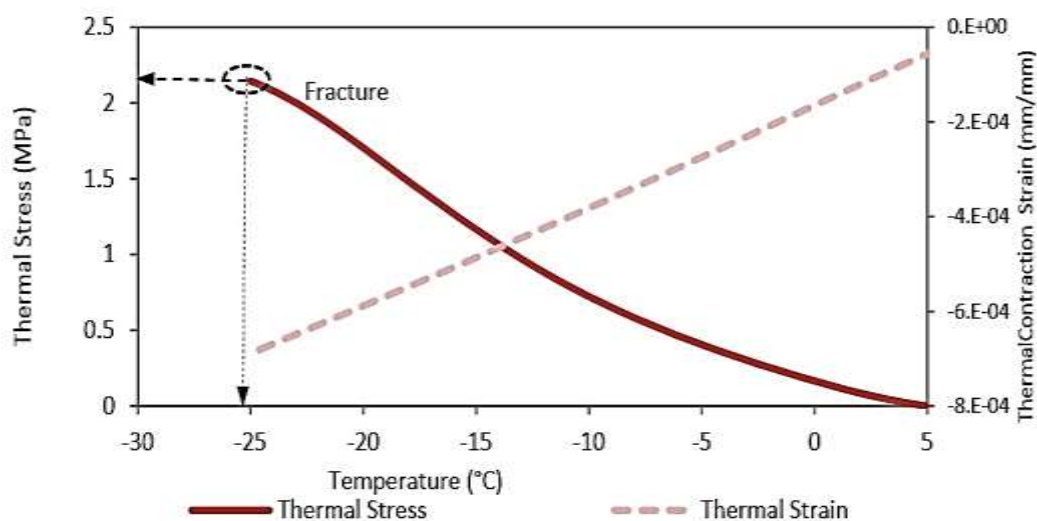
همچنین نتایج آزمایش TSRST نشان می‌دهد حداکثر تغییرات ایجاد شده در دمای شکست ۱,۶ درجه سانتی‌گراد است که نشان از تأثیرات کم دو نوع افزودنی (FT-paraffin and Asphaltan-B) در ترک‌های برودتی دارد. اگرچه افزودنی‌ها باعث افزایش مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند ولی همان طور که گفته شده به دلیل سختی بیشتر این مخلوط‌ها تنش‌های برودتی با نرخ بالاتری افزایش می‌یابند و همین

دلیل باعث می‌شود که دمای شکست مخلوط‌های بدون افزودنی و دارای افزودنی تغییر چندانی نداشته باشند (جدول ۲-۴). همچنین نتایج نشان می‌دهد که دانه بندی مخلوط آسفالت در ترک خوردگی برودتی مؤثر نمی‌باشد [۱۷].

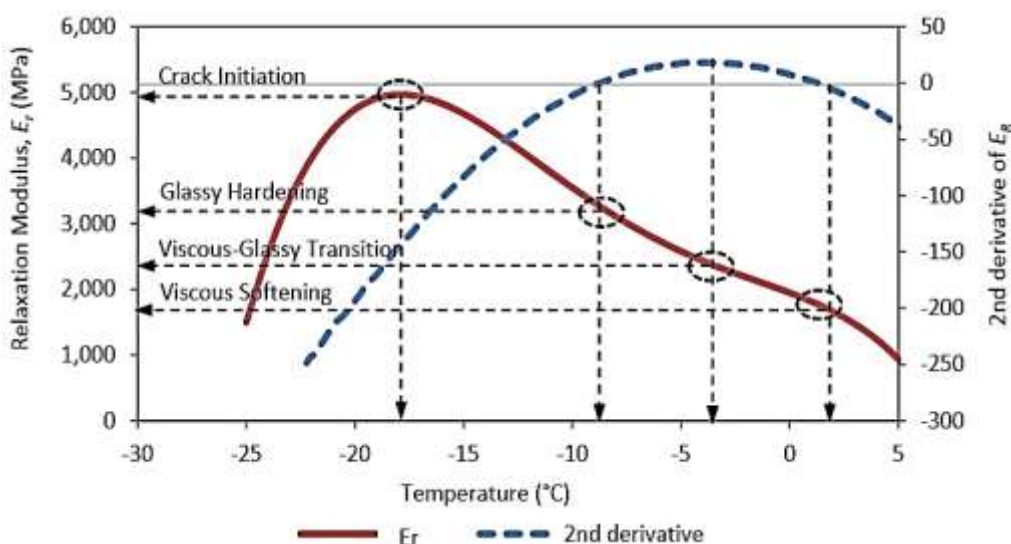
جدول ۲-۳. نتایج آزمایش TSRST [۱۷]

Mixture ID	Fracture temperature (°C)	Fracture strength (MPa)
AG1-O	-۲۵/۷	۲/۵۷
AG1-AB	-۲۴/۲	۲/۶۱
AG1-FT	-۲۴/۳	۲/۸۰
AG2-0	-۲۵/۵	۲/۸۸
AG2-AB	-۲۵/۳	۲/۶۴
AG2-FT	-۲۳/۹	۲/۹۱

یکی از آزمایش‌هایی که به تازگی برای ارزیابی ترک‌های برودتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، آزمایش تنش و کرنش برودتی تک محوره^۱ است که همانند آزمایش TSRST است با این تفاوت که علاوه بر نمونه‌ی مقید، یک نمونه‌ی نا مقید نیز در اتاقک آزمایش قرار داده می‌شود. در سال ۲۰۱۳، علوی و همکاران [۱۸] توانستند با استفاده از آزمایش UTSST مدول استهلاک را نسبت به دما به دست آورند. با توجه به امکان اندازه گیری مستقیم و همزمان تنش و کرنش ناشی از کاهش دما و با استفاده از معادلات معروف به اصل بر همنه‌ی بولتزمن، مدول استهلاک در تمام دماها به دست می‌آید. پس از رسم نمودار مدول استهلاک نسبت به دما، به معرفی خواص ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی در ۵ ناحیه منحنی پرداخته شده است. در شکل (۲-۸)، نمونه از تنش و کرنش‌های به دست آمده در آزمایش UTSST مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۱۴. تنش و کرنش اندازه گیری شده [۱۸]



شکل ۲-۱۵. مدول استهلاک محاسبه شده و مشتق درجه دوم آن نسبت به دما [۱۸]

شکل (۲-۱۲) نمودار مدول استهلاک و مشتق درجه دوم آن نسبت به دما رسم شده است و به پنج ناحیه تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از:

- ناحیه نرم شوندگی ویسکوز: از این نقطه، مدول استهلاک مخلوط آسفالتی، با کاهش دما، به صورت تقریباً خطی، به شدت افزایش پیدا می‌کند. این حالت در نقطه‌ای که مشتق دوم مدول استهلاک صفر می‌شود (در قسمت دمای بالاتر) تعریف می‌شود.

- انتقال ویسکوز به شکنندگی: در این نقطه خواص شکنندگی مخلوط آسفالتی به خواص ویسکوز آن غالب می‌شود. این مرحله را می‌توان با شناسایی نقطه‌ای که مشتق دوم مدول استهلاک در آن به نقطه‌ی ماکزیمم می‌رسد پیدا کرد.

- سخت شدگی: در این مرحله خواص مخلوط آسفالتی شکننده‌ی کامل است. این ناحیه را می‌توان با پیدا کردن نقطه‌ای که در آن مشتق دوم مدول استهلاک صفر می‌شود (در قسمت دمای پایین‌تر) پیدا کرد.

- شروع ترک: در این مرحله ترک‌های ریز به واسطه‌ی تنش حرارتی اعمال شده به نمونه و رفتار کاملاً شکننده‌ی آن رخ می‌دهند. این مرحله زمانی اتفاق می‌افتد که مدول استهلاک به حداکثر مقدار خود می‌رسد. بعد از این مرحله مدول استهلاک یک افت ناگهانی دارد که علت آن عدم یکنواختی نمونه به واسطه‌ی بروز ریز ترک‌ها است. قابل توجه است که بعد از بروز ریز ترک‌ها معادلات بولتزمان صادق نیستند چرا که این معادلات فقط برای نمونه‌های آسیب ندیده صادق هستند.

۲-۳-۱ مدل‌های پیشنهاد شده برای پیش‌بینی ترک‌های برودتی

به طور کلی مدل‌های ترک خوردگی برودتی به دو دسته مدل‌های تجربی و مدل‌های مکانیستیک تقسیم می‌شوند. مدل‌های تجربی، بر پایه‌ی تحلیل‌های رگرسیونی از اطلاعات میدانی است. اگرچه این مدل‌ها نمی‌توانند به طور کامل پدیده‌ی ترک خوردگی را شرح دهند اما برای تشخیص پارامترهای مؤثر در ترک خوردگی برودتی مفید هستند. در مقابل، مدل‌های مکانیستیک بر اصول مکانیزم شکست و فرایند ترک خوردگی مصالح تکیه دارد. اکثر مدل‌های ترک خوردگی مکانیستیک موجود، با تعیین تنش برودتی و تنش مقاوم مخلوط آسفالتی، ترک خوردگی را پیش‌بینی می‌کنند. در این مدل‌ها، مخلوط‌های آسفالتی به عنوان یک سیستم همگن در نظر گرفته می‌شوند. در این بخش مروری بر مدل‌های ساخته شده برای ارزیابی ترک‌های برودتی داریم.

۲-۳-۲ مدل‌های تجربی ترک خوردگی برودتی

در زمینه‌ی مدل‌های تجربی، فانگ^۱ و فرام^۲ [۱۹] در سال ۱۹۷۲ تعدادی معادلات رگرسیونی برای پیش بینی فاکتور ترک خوردگی^۳ بر اساس تست انجام شده بر روی ۳۳ مقطع روسازی در ایالت انتاریو آمریکا ارائه کردند. فاکتور ترک که توسط دیپارتمان حمل و نقل انتاریو مورد استفاده قرار گرفته است، شدت ترک خوردگی را بر اساس تعداد ترک‌های عرضی در هر ۱۵۰ متر از روسازی دو خطه به صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌کنند. (شکل ۲-۱۰).

$$I = Nm + Nf + 0.5 \times Nh \quad (۲-۸)$$

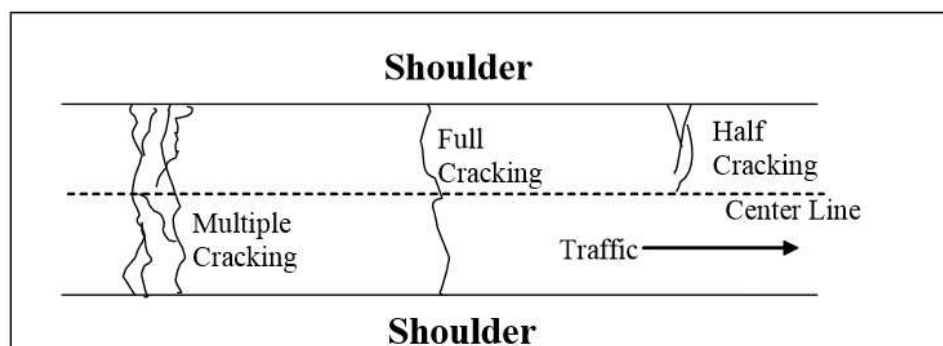
که در آن:

I: فاکتور ترک

Nm: تعداد ترک‌های متعدد موجود در طول ۱۵۰ متر از روسازی

Nf: تعداد ترک‌های کامل موجود در طول ۱۵۰ متر از روسازی

Nh: تعداد ترک‌های ناقص موجود در طول ۱۵۰ متر از روسازی



شکل ۲-۱۶. فاکتور ترک خوردگی [۱۹]

برای تعیین معادلات رگرسیونی جهت تعیین فاکتور ترک خوردگی، از ۱۱ پارامتر که در جدول زیر ذکر شده استفاده شده است. سه معادله متفاوت برای تعیین بهتر فاکتور ترک خوردگی در مناطق مختلف انتاریو ارائه شده است که به شرح زیر می‌باشند.

۱- Fromm
۲- Phang
۳- Cracking index

مدل کلی جهت پیش بینی تمام مقاطع روسازی در انتاریو:

$$I = 52.22x_1 + 0.0007093x_2 + 0.4529x_3 - 1.348x_4 + 0.4687x_5 - 0.07903x_6 - 0.4887x_7 - 0.1258x_8 - 0.1961x_9 \quad (9-2)$$

مدل شمالی برای مناطقی که قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی دارای درجه نفوذ برابر یا بالاتر از ۱۱ میلی‌متر را باشد:

$$I = 30.30x_1 + 0.00602x_2 + 0.5253x_3 - 1.280x_4 + 0.5190x_5 - 0.02563x_6 - 0.0844x_7 - 1.496x_8 - 0.225x_9 + 3.1043x_{10} + 0.097x_{11} \quad (10-2)$$

مدل جنوبی برای مناطقی که قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی دارای درجه نفوذ کمتر از ۱۱ میلی‌متر باشد:

$$I = 64.74x_1 + 0.008279x_2 + 0.3935x_3 - 1.491x_4 + 0.3246x_5 - 0.0001481x_6 - 0.6069x_7 - 0.8071x_8 - 0.6567x_9 \quad (11-2)$$

جدول ۲-۴. تعریف پارامترهای مورد استفاده در معادلات رگرسیونی [۱۹]

X1	نسبت ویسکوزیته = ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد / ویسکوزیته در ۱۵۶ درجه سانتی‌گراد
X2	شاخص یخ زدگی (درجه روز)
X3	دمای بحرانی (درجه فارنهایت)
X4	درصد هوا در مخلوط (درصد حجمی)
X5	نرخ جریان شدگی
X6	نفوذ قیر در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دسی میلی متر)
X7	مقدار قیر (درصد وزنی)
X8	درصد عبوری سنگ دانه‌های اساس از الک ۰.۷۵ میلی‌متر
X9	درصد عبوری سنگ دانه‌های لایه آسفالتی از الک ۰.۷۵ میلی متر
X10	میزان رس در مصالح اساس
X11	درصد عبوری سنگدانه‌های زیراساس از الک ۴/۷۵ میلی متر

پارامتر دمای بحرانی که در جدول (۲-۴) ذکر شده است، برابر است با دمایی که نرخ تغییرات تنش‌های برودتی نسبت به دما ثابت می‌شود؛ به عبارت دیگر تنش‌های برودتی قبل از دمای بحرانی با نرخ‌های متفاوت

نسبت به دما افزایش میابد و برعکس، بعد از دمای بحرانی تغییرات تنش‌های برودتی نسبت به دما ثابت می‌شوند. جهت اندازه گیری دمای بحرانی ابتدا ضریب انقباض برودتی مخلوط تعیین می‌شود و سپس با استفاده از نتایج آزمایش خزش، پارامترهای رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی مشخص می‌شوند. در نهایت با رسم منحنی تنش‌های برودتی بر حسب دما، می‌توان دمای بحرانی را به دست آورد.

در سال ۱۹۸۷، هاس^۱ مطالعه تجربی مشابه فانگ و فرام انجام داده است [۲۰]. در این مطالعه، اطلاعات از روسازی‌های ۲۶ فرودگاه در کانادا جمع آوری شده است. پس از اجرای برخی تست‌های آزمایشگاهی بر روی کدهای بتن آسفالتی و ارزیابی موقعیت‌های روسازی موجود و انجام یک سری تحلیل‌های استاتیکی مدل تجربی رابطه‌ی (۲-۱۲) پیشنهاد گردید:

$$\begin{aligned} \text{TRANCRC} = & 218 + 1.28 \times \text{ACTHICK} \\ & + 2.52 \times \text{MINTEMP} + 30 \\ & \times \text{PVN} - 60 \times \text{COEFFX} \end{aligned} \quad (2-12)$$

در رابطه‌ی بالا:

TRANCRAK: فاصله ترک‌های عرضی (متر)

ACTHICK: ضخامت بتن آسفالتی (سانتی متر)

MINTEMP: کمترین حرارت ثبت شده در محل (درجه سانتی‌گراد)

PVN: مقدار شیب منحنی درجه نفوذ بر حسب ویسکوزیته

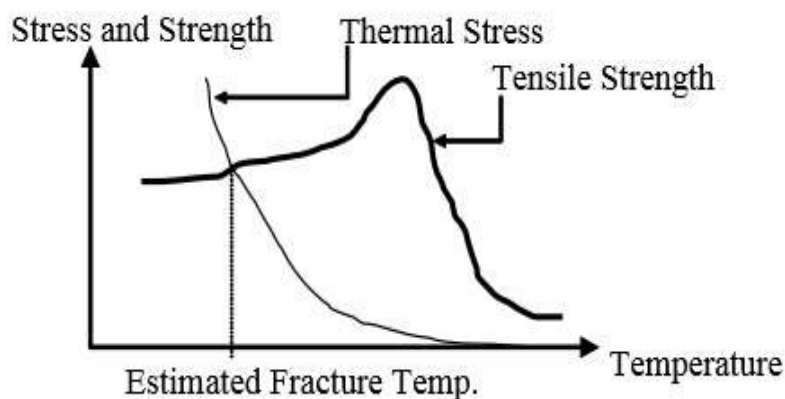
COEFFX: ضریب انقباض دمایی

۲-۳-۳ مدل‌های مکانیستیک ترک خوردگی برودتی

در مقابل مدل سازی بر اساس داده‌های تجربی، مدل سازی ترک‌های دمایی بر اساس اصول مکانیستیک بسیار پیچیده تر بوده و معمولاً نیاز به حل سیستم‌هایی از معادلات خطی یا غیر خطی دارند. همان‌طور که پیشتر گفته شد، اکثر مدل‌های ترک خوردگی مکانیستیک موجود، با تعیین تنش برودتی و تنش مقاوم مخلوط آسفالتی، ترک خوردگی را پیش بینی می‌کنند.

^۱ - Haas

نخستین بار، هیلز و برین^۱ [۲۱] در سال ۱۹۶۶ برای تعیین تنش‌های برودتی مدلی ارائه کردند. با استفاده از این مدل توانستند دمای ترک خوردگی مخلوط آسفالتی را به وسیله‌ی دو مقدار تنش‌های مقاوم و تنش‌های برودتی به دست آوردند. این مدل در تعیین انتشار ترک در عمق روسازی ناتوان بود و فقط برای تعیین دمای شکست مخلوط آسفالتی کاربرد داشت. اصلی که بر این رویکرد حاکم است در شکل (۱۱-۲) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۱۱-۲)، با کاهش دما تنش‌های برودتی افزایش می‌یابند و زمانی که به مقدار مقاومت کششی آسفالت می‌رسند، مخلوط آسفالتی ترک می‌خورد. در زمانی که مصالح به طور کامل مهار شده باشد با کاهش دما، تنش کششی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷-۲. منحنی تغییرات تنش برودتی و مقاومت کششی مخلوط آسفالت نسبت به دما [۲۱]

جزء مهم این مدل، تعیین تنش ناشی از کاهش دما است. هیلز و برین آسفالت را به عنوان یک ماده یالاستیک همگن در نظر گرفته و تنش را با استفاده قانون هوک در یکی از جهت‌های اصلی به صورت رابطه‌ی (۱۲-۲) برای تیر (یک بعدی) بیان کرده است.

$$\sigma = E \epsilon$$

(۱۲-۲)

E: سختی

ϵ : کرنش

σ : تنش

^۱ - Hills and Brien

کرنش کلی در یک ماده الاستیک برابر مجموع کرنش مکانیکی و کرنش دمایی است. زمانی که نمونه به طور کامل مقید باشد کرنش کلی نمونه برابر صفر است و در نتیجه کرنش مکانیکی و دمایی برابر قرینه یکدیگر می‌باشد. از این رو تنش با استفاده از رابطه‌ی (۲-۱۳) قابل محاسبه است. در نهایت، هیلز و برین با فرض اینکه مدول الاستیک آسفالت تابعی از دما و زمان بارگذاری است، رابطه‌ی تنش را به صورت رابطه‌ی (۲-۱۴) به دست آوردند.

در نهایت هیلز و برین با در نظر گرفتن سختی مخلوط آسفالتی به عنوان تابعی از دما (T) و زمان بارگذاری (t) و سپس جایگذاری سختی $S(T,t)$ به جای مدول الاستیک (E) در روابط مجموع کرنش‌های مکانیکی و حرارتی، روابط زیر را ارائه نمودند:

$$\sigma_x = -E\alpha\Delta T \quad (۲-۱۳)$$

$$\sigma_x = \int_{T_i}^{T_f} E(T,t) \alpha dT \quad (۲-۱۴)$$

در این روابط T_i دمای ابتدا و T_f دمای پایانی است
برای این منظور محدوده دمایی T_i (دمای ابتدا) تا T_f (دمای پایانی) به فواصل کوچکتر تقسیم می‌شود و هر یک از آنها ΔT نامیده می‌شود.

در رابطه فوق، α ضریب انقباض حرارتی و $S(\Delta T, t)$ ضریب سختی مخلوط آسفالتی است که با انجام آزمایش سختی در دمای میانه فواصل دمایی (متوسط دمای فاصله دمایی) و با زمان بارگذاری متناظر با زمان لازم برای تغییر دما در مخلوط آسفالتی به اندازه ΔT انجام می‌شود.

در سال ۱۹۷۷ فین^۱ و همکاران [۲۲]، مدل به دست آمده توسط هیلز و برین را در برنامه‌ی کامپیوتری COLD پیاده کردند. دو هدف اصلی این برنامه شامل راهنمایی در فرایند انتخاب قیر، تشخیص احتمال ترک خوردگی برودتی مخلوط‌های آسفالتی است. در این مدل مقاومت کششی مخلوط آسفالتی با استفاده از

1-Finn

آزمایش کشش غیر مستقیم تعیین شده است و با انجام این آزمایش در دماهای مختلف، مقاومت کششی نسبت به دما به دست می‌آید. با توجه به فرض الاستیک بودن آسفالت در این تحقیق و استفاده از رابطه (۲-۱۴) و تغییرات دمایی در نظر گرفته شده، تنش‌های برودتی قابل محاسبه است و چنانچه تنش‌های برودتی محاسبه شده از مقدار مقاومت کششی مخلوط آسفالتی بیشتر شود ترک خوردگی رخ می‌دهد. همانند مدل هیلز و برین که گفته شد، مدل COLD نیز قابلیت پیش بینی مقدار ترک‌های برودتی در طول روسازی را ندارد.

هیلتونن^۱ و رکو^۲ [۲۳] در سال ۱۹۹۴، مدلی برای ترک خوردگی برودتی^۳ ارائه کردند. این مدل شامل دو بخش محاسبه‌ی تنش‌های برودتی، محاسبه‌ی انتشار ترک در عمق لایه آسفالتی است که در ادامه هر کدام از موارد توضیح داده شده‌اند.

۲-۳-۴ محاسبه‌ی تنش‌های برودتی

در مدل هیلتونن برای محاسبه‌ی تنش‌های برودتی در لایه آسفالتی پارامترهایی از جمله پروفیل دمایی روسازی، مشخصات دو ماده (قیر و مصالح سنگی)، ضریب انقباض دمایی مخلوط آسفالتی و مدول استهلاک مورد نیاز است. در این مدل ضریب انقباض دمایی بر اساس رابطه‌ی (۲-۳) که توسط جونز ارائه شد، تعیین می‌شوند. مدول استهلاک نیز با استفاده از نتایج آزمایش مدول دینامیکی برای بیان رفتار مصالح به صورت ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی، قابل محاسبه می‌باشد. در نهایت با استفاده از رابطه‌ی (۲-۱۵) تنش برودتی به دست می‌آیند. رابطه‌ی زیر به صورت تاریخچه‌ی زمانی، تنش‌های برودتی را برای زمان‌های مختلف تعیین می‌کند، به گونه‌ای برای هر زمان تمام کرنش‌ها و مدول استهلاک‌های زمان‌های قبل در دسترس می‌باشد و با جمع حاصل ضرب مدول استهلاک در کرنش‌های به صورت رابطه‌ی (۲-۱۶) می‌توان تنش‌های برودتی را به دست آورد. در رابطه‌ی زیر، E مدول استهلاک می‌باشد.

در این مدل لایه‌ی آسفالتی به صورت تیرهای روی هم در نظر گرفته می‌شود که در هر تیر تنش‌های برودتی در ضخامت تیر یکنواخت فرض می‌شود و بدین شکل روند تغییر تنش‌های برودتی در عمق لایه‌ی آسفالتی مشخص می‌شود. در رابطه‌ی زیر کرنش برابر حاصل ضرب تغییرات دما در ضریب انقباض دمایی می‌باشد.

$$\sigma_t = \int_0^t E(t-t') \frac{d\varepsilon}{dt'} dt' \quad (2-15)$$

۲-۳-۵ محاسبه‌ی انتشار ترک

برای تعیین انتشار ترک یا عمق ترک خوردگی روابط (۲-۱۶) تا (۲-۱۸) ارائه شده است. در رابطه‌ی (۲-۱۶) ضریب شدت تنش بر اساس تنش ناحیه‌ای و عمق ترک فعلی محاسبه می‌شود. رابطه‌ی زیر زمانی کاربرد دارد که ترک خوردگی در سطح لایه‌ی آسفالت شروع شده باشد. با استفاده از این رابطه و تغییر تنش‌ها، می‌توان تغییرات ضریب شدت تنش را به دست آورد که در ادامه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$KI = \sigma(0.45 + 1.99C^{0.56}) \quad (2-16)$$

که در آن:

KI : ضریب شدت تنش

σ : تنش ناحیه‌ای

C_0 : عمق ترک فعلی

عمق ترک را تحت بارگذاری سیکلی می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۲-۱۷) به دست آورد. در این رابطه a عمق ترک، N تعداد سیکل بارگذاری، ΔK تغییرات ضریب شدت تنش، A, n پارامترهای رگرسیونی هستند. چنانچه بارگذاری تنها یک سیکل باشد، dN از رابطه (۲-۱۷) حذف شده و این رابطه به شکل رابطه (۲-۱۸) ساده می‌شود. جهت تعیین پارامترهای رگرسیونی n و A ، لیتون^۱ [۲۴] و ملنار^۲ [۲۵] به ترتیب روابط تجربی (۲-۱۹) و (۲-۲۰) را ارائه کرده است. در روابط زیر m برابر شیب منحنی نرمی خزشی در منحنی با واحد لگاریتمی می‌باشد.

۱- Lytton

۲- Molenaar

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n \quad (17-2)$$

$$\Delta a = A(\Delta K)n \quad (18-2)$$

$$n = 0.8(1 + \frac{1}{m}) \quad (19-2)$$

$$A = 4.389 - 2.52 \log(k * n * \sigma m) \quad (20-2)$$

در روابط بالا:

m: شیب منحنی نرمی خزشی منحنی در مقیاس لگاریتمی)

k: ضریب کالیبراسیون^۱ (۱۰۰۰۰)

σm : تنش مقاوم مخلوط آسفالتی

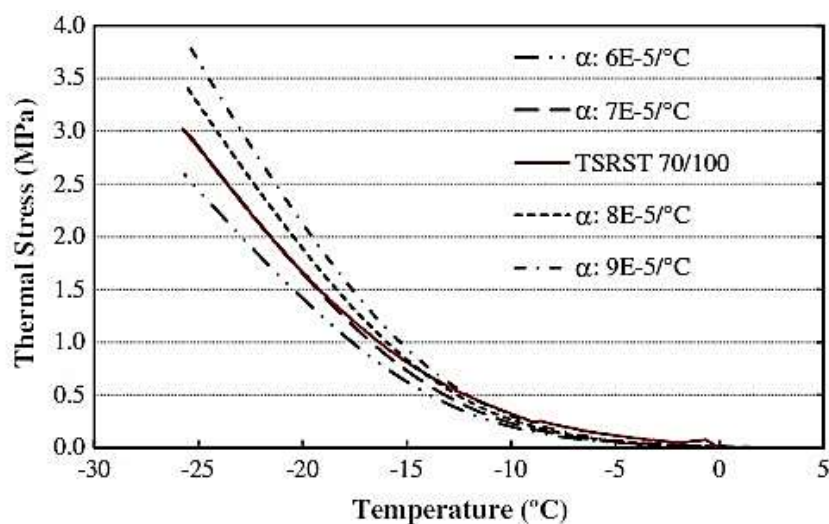
داس و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۳، مدلی ارائه کردند که بر خلاف مدل‌های قبلی، در این مدل ضریب انقباض حرارتی به صورت غیرخطی نسبت به دما استفاده شده است. این مدل تنها برای تعیین دمای شکست مخلوط آسفالتی کاربرد دارد و در بررسی عمق ترک خوردگی ناتوان است. نتایج مدل توسط آزمایش TSRST مورد ارزیابی قرار گرفت و از سه نوع قیر با درجه‌های نفوذهای ۳۵/۵۰، ۷۰/۱۰۰ و ۱۶۰/۲۲۰ در مدل و آزمایش استفاده شده است که نتایج آن در جدول (۶-۲) نشان داده شده است. نتایج این مدل نشان می‌دهد که انتخاب ضریب انقباض به صورت غیر خطی، دمای شکست را نسبت به حالت خطی دقیق تر محاسبه می‌کنند.

جدول ۲-۵. دمای شکست مدل و آزمایش TSRST [۱۷]

نوع مخلوط آسفالتی	دمای شکست		
	نتایج آزمایش TSRST	مدل (ضریب انقباض غیر خطی)	مدل (ضریب انقباض خطی)
Mix 35/50	-۲۲	-۲۲/۸	-۱۸/۹
Mix 70/100	-۲۶/۵	-۲۳/۶	-۲۰/۶
Mix 160/220	-۳۲	-۲۷/۷	-۲۳/۸

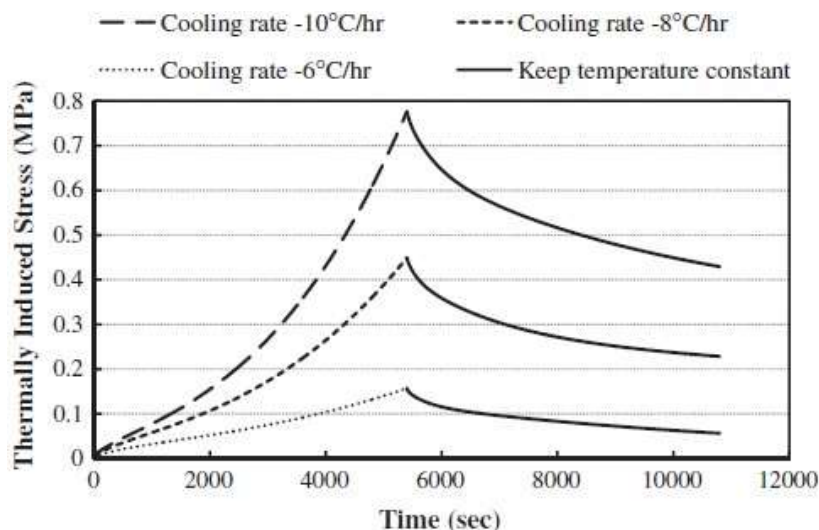
¹ Calibration coefficient

در این مطالعه تأثیر ضریب انقباض دمایی، نرخ سرد شدن مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که هرچه ضریب انقباض دمایی بیشتر شود، تنش‌هایی که در مخلوط آسفالتی ایجاد می‌شود افزایش می‌یابد. (شکل ۲-۱۲).



شکل ۲-۱۸. تأثیر ضریب انقباض دمایی بر تنش برودتی [۱۷]

همچنین بررسی میزان تأثیر نرخ کاهش دما در مخلوط‌های آسفالتی در شکل (۲-۱۳) آورده شده است که با افزایش نرخ کاهش دما، تنش‌های برودتی با نرخ بیشتری افزایش می‌یابند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با افزایش ضریب انقباض دمایی و افزایش نرخ کاهش دما، مخلوط آسفالتی سریع‌تر به تنش کششی مقاوم رسیده و ترک خوردگی در دمای بالاتری رخ می‌دهند.



شکل ۲-۱۹- تأثیر نرخ کاهش دما بر تنش‌ها برودتی [۱۷]

در سال ۲۰۱۴، علوی [۲۶] مدلی با نام 'TCAP' برای پیش بینی ترک خوردگی برودتی ارائه کرد. در این مدل، تغییرات ساعتی دما در عمق‌های مختلف روسازی در نظر گرفته شده است. برای این منظور مدلی ارائه شده است که با استفاده از اطلاعات آب و هوایی منطقه، ضخامت روسازی و پارامتر نفوذ دمایی لایه‌های روسازی می‌توان پروفیل تغییرات دما را نسبت به زمان به دست آورد.

پیرشدگی لایه‌ی آسفالت در پارامترهایی مانند مدول، مقاومت کششی و ضریب انقباض تأثیر گذار می‌باشد و در مدل TCAP نیز تغییرات پیرشدگی لایه‌ی آسفالت نسبت به زمان توسط مدل محاسبه شده و در نتیجه تغییرات پارامترهای ذکر شده نسبت به زمان در مدل لحاظ گردیده است.

تنش‌های برودتی در این مدل به صورت یک بعدی و با استفاده از مدول استهلاک و ضریب انقباض دمایی به صورت متغیر نسبت به زمان محاسبه می‌شود. مدول استهلاک را می‌توان با استفاده از آزمایش مدول دینامیکی نسبت به زمان به دست آورد. ضریب انقباض دمایی با استفاده از آزمایش تنش و کرنش تک محوره^۲ نسبت به دما به دست آمده است.

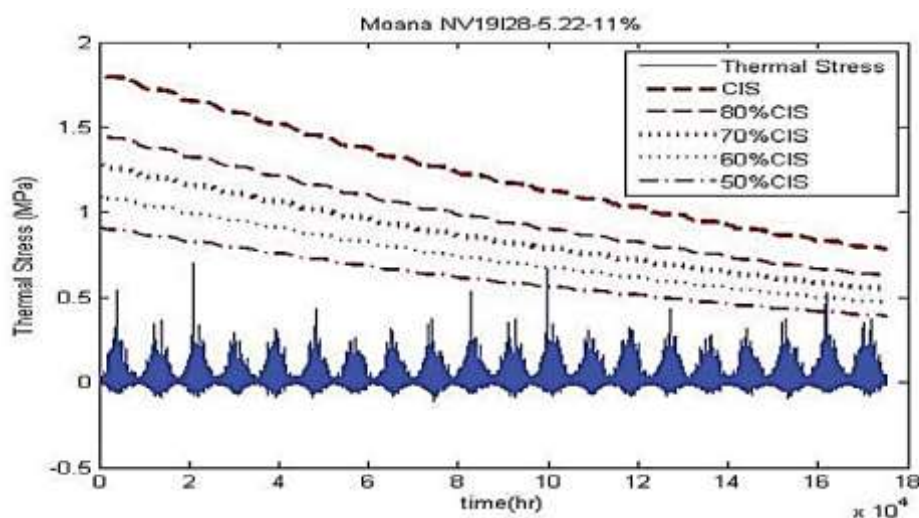
۱- Thermal Cracking Analysis Package

۱- Uniaxial Thermal Stress and Strain Test (UTSST)

مقاومت کششی نیز با استفاده از آزمایش UTSST به دست آمده است و در مدل TCAP، به دلیل تغییرات میزان پیرشدگی لایه‌ی آسفالتی، مقاومت کششی نیز به صورت متغیر نسبت به زمان در نظر گرفته شده است. در این مدل ترک خوردگی برودتی زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های برودتی محاسبه شده از مقدار مقاومت کششی لایه آسفالتی بیشتر شود.

اگرچه برای بررسی ترک خوردگی برودتی نیاز به در نظر گرفتن خرابی در لایه‌ی آسفالتی است ولی در این مطالعه با مقایسه‌ی مقدار تنش‌های برودتی با درصدی از مقاومت کششی لایه‌ی آسفالتی نتوانستند مقدار ترک خوردگی خستگی را پیش بینی کنند. برای بررسی ترک‌های خستگی برودتی فرض بر این است که در سیکل‌های کاهش و افزایش دما تنش‌های برودتی همانند قبل محاسبه می‌شوند ولی به دلیل خرابی‌هایی که در لایه‌ی آسفالتی رخ می‌دهد، مقاومت کششی به صورت درصدی از مقاومت لایه آسفالتی در نظر گرفته می‌شود و در نهایت تعداد دفعاتی که تنش‌های برودتی از مقاومت کششی آسفالت بیشتر می‌شود برابر تعداد ترک خوردگی خستگی می‌باشند (شکل ۲-۲۰).

همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، هرچه درصد هوای موجود در لایه‌های آسفالتی بیشتر باشد، اگرچه تنش‌های برودتی کاهش می‌یابند ولی به دلیل پیرشدگی و کاهش مقاومت کششی لایه آسفالتی، تعداد ترک‌های برودتی افزایش می‌یابند.



شکل ۲-۲۰. تنش‌های برودتی به دست آمده و درصدی مقاومت کششی (CIS) بر حسب زمان [۲۶]

در سال ۲۰۱۵، سوئد^۱ و همکاران [۲۷] جهت ارزیابی تغییرات دما در عمق‌های مختلف لایه‌ی آسفالتی مدلی ارائه کردند. در این مدل تغییرات دما به صورت تابعی از زمان و عمق در نظر گرفته شده است مدل مورد نظر به صورت رابطه‌ی (۲-۲۱) تعریف شده است. پارامتر a با استفاده از رابطه‌ی (۲-۲۲) قابل محاسبه می‌باشد.

در این رابطه λ ضریب رسانندگی دمایی ρ چگالی و c_w ظرفیت گرمایی ویژه است.

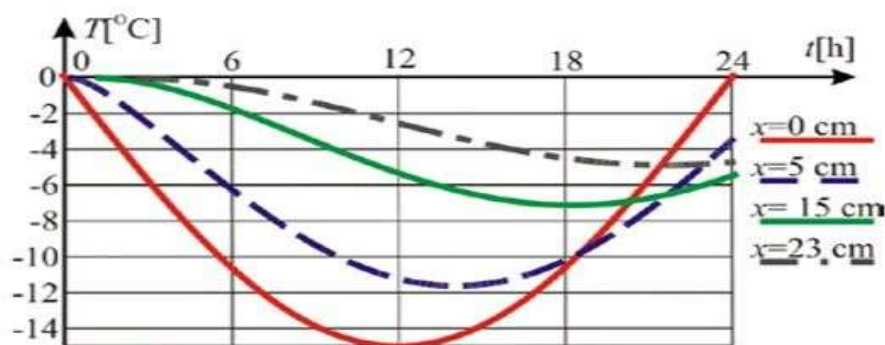
(۲۱-۲)

$$T(x,t) = \frac{T_0}{\sqrt{4\pi a}} x \int_{\tau=0}^{\infty} \frac{\sin(\omega \tau)}{(t-\tau)^{3/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a(t-\tau)}\right) d\tau$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_w} \quad (۲۲-۲)$$

در روابط بالا حداقل دمایی که سطح روسازی تجربه می‌کند، توسط پارامتر T_0 نشان داده می‌شود. نتیجه‌ی این مطالعه در شکل (۲-۱۵) نشان می‌دهند که دما در سطح روسازی که در تماس با محیط است به سرعت تغییر پیدا می‌کنند. درحالی‌که این تغییر دما برای لایه‌های پایین تر با یک تأخیر زمانی همراه است. همچنین میزان تغییرات دما نیز با افزایش عمق کاهش می‌ابد و میزان حداقل دمایی که لایه‌های زیرین نسبت به لایه‌های بالایی تجربه می‌کنند کمتر است. با استفاده از توزیع دما و به دست آوردن تنش‌ها در لایه آسفالتی به این نتیجه رسیدند که به دلیل تنش‌های زیاد ناشی از کاهش دما در سطح روسازی بیشترین احتمال برای وقوع ترک، سطح روسازی است.

^۱ - Szwed



شکل ۲-۲۱. منحنی تغییرات دما نسبت به زمان برای عمق‌های مختلف لایه آسفالتی [۲۷]

۲-۳-۶ مدل ناحیه چسبنده^۱

مدل ناحیه چسبنده نخستین بار توسط داگدالا^۲ [۲۸] و بارنبلات^۳ [۲۹] معرفی شده است. این مدل برای مطالعه شکست در مصالح متفاوت مثل فلز، پلیمرها، سرامیک‌ها و مصالح زمین استفاده شده است. سپس جنگ^۴ (۱۹۹۱)، پاولینو^۵ (۲۰۰۴) و سانگ^۶ (۲۰۰۶) مدل ناحیه چسبنده را در مدل سازی برای مخلوط آسفالتی استفاده گردیده است. ۲۳-۲۵.

تعدادی از مطالعات اخیر نشان می‌دهند که شکست در مخلوط‌های آسفالتی یک پدیده‌ی غیرخطی است و به عنوان رفتار شبه شکننده مشخص می‌شود. مدل شکست ناحیه‌ی چسبنده برای بیان رفتار شکست شبه شکننده برای مخلوط‌های آسفالتی، دقیق و مفید است. مدل ناحیه چسبنده دارای مزیت‌هایی از جمله: در نظر گرفتن مشخصات مصالح به صورت غیرخطی در اطراف ناحیه ترک، عدم نیاز به تعیین مسیر شکست و تعیین طول ناحیه چسبنده در بارگذاری‌های مختلف است.

به طور کلی مدل ناحیه چسبنده برای شروع و انتشار ترک خوردگی مناسب است زیرا در تعیین رفتار مصالح در نوک ترک و نواحی شکست، دقیق و کاربردی می‌باشند. در مدل‌های ناحیه چسبنده، پس از اینکه تنش‌ها به مقدار مجاز (مقاومت کششی مصالح) می‌رسند دیگر ظرفیت تحمل تنش را نداشته و به نوعی شکست

۱- Cohesive Zone Model (CZM)

۲- Dugdale

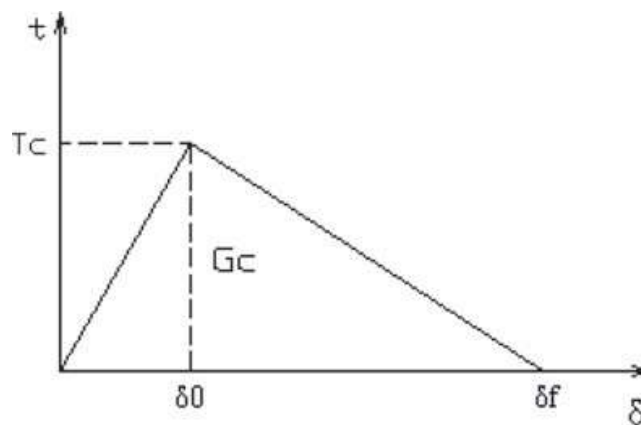
۳- Barendlatt

۴- Jenq

۵- Paulino

۶- Song

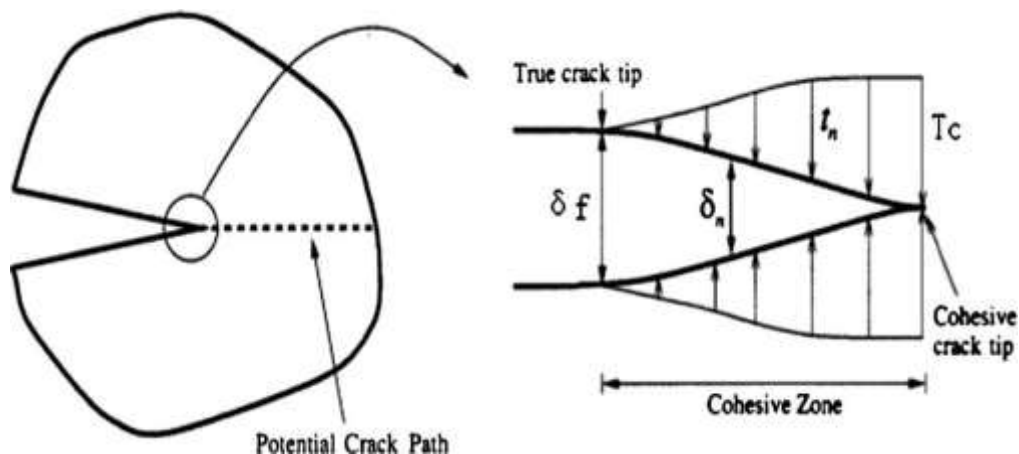
اولیه (ترک خوردگی اولیه) در مصالح رخ می‌دهند. پس از آن تنش‌ها تا شکست نهایی کاهش می‌یابند. زمانی که تنش‌ها به مقاومت کششی (T_c) ماده مورد نظر می‌رسند، ترک خوردگی در اجزا ناحیه چسبنده آغاز می‌شود و شکست نهایی زمانی رخ می‌دهند که مقدار بازشدگی ترک از حد مجاز (δ_f) بیشتر شود (شکل ۲-۱۶). شکل زیر، سطح زیر منحنی برابر انرژی شکست می‌باشد؛ و می‌توان بجای معیار بازشدگی ترک، از معیار انرژی شکست برای بیان انتشار ترک خوردگی استفاده کرد.



شکل ۲-۲۲. منحنی تنش کششی بر حسب کرنش (مدل ناحیه چسبنده)

CZM وضعیت شکست مصالح^۱ را بیان می‌کنند. این مدل رابطه‌ای بین نیرو و جابجایی را نیز نشان می‌دهند. در شکل (۲-۱۷) روند تغییرات تنش و جابجایی نوک ترک در مدل ناحیه چسبنده نشان داده می‌شود. این شکل، یک المان از ناحیه چسبنده را در نوک ترک نشان می‌دهند که ترک خوردگی در مرحله انتشار می‌باشد. همان‌طور که مشخص می‌باشد، زمانی که تنش‌ها به مقدار مقاومت کششی مصالح می‌رسند ترک خوردگی شروع می‌شود و با افزایش میزان بازشدگی ترک، میزان تنش‌ها کاهش می‌یابد تا زمانی که بازشدگی ترک به مقدار حداکثر رسیده و تنش‌ها برابر صفر می‌شوند و ترک خوردگی کامل رخ دهد (شکل ۲-۱۷). در شکل زیر، T_c مقاومت مصالح، δ_f حداکثر جابجایی بین دو صفحه‌ی شکست است.

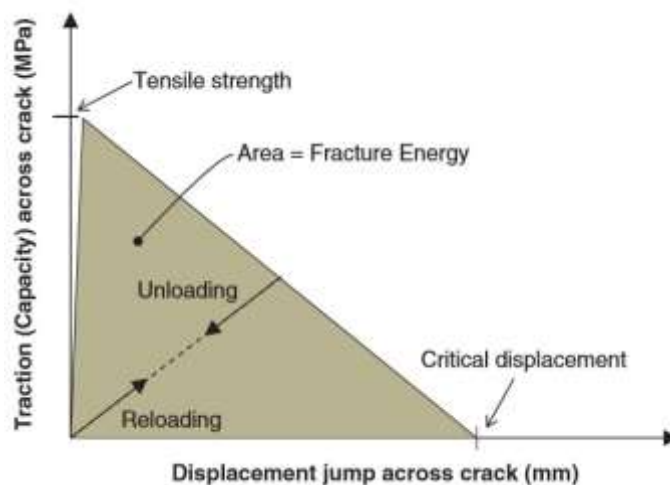
¹Material failure condition



شکل ۲-۲۳. مکانیزم شکست در مدل ناحیه چسبنده

زمانی که استفاده از CZM گسترش یافت، چندین نوع از این مدل مانند نوع دو خطی، نوع نمایی، نوع چند جمله‌ای توسعه داده شد. نرم افزار آباکوس دو نوع دو خطی و نمایی را برای مدل ناحیه چسبنده در نرم افزار ارائه کرده است که این دو نوع برای مصالح شکننده و شبه شکننده مناسب است. زمانی که از CZM برای مصالح آسفالت استفاده می‌کنیم تفاوتی بین این دو نوع وجود ندارد. در مدل سازی‌هایی که با استفاده از مدل ناحیه چسبنده برای ارزیابی ترک خوردگی برودتی انجام شده است از نوع دوخطی این مدل استفاده شده است.

روند بارگذاری و باربرداری در شکل (۲-۲۰) برای مدل ناحیه چسبنده دوخطی نشان داده است. در این مدل فرض می‌شود که خرابی ایجاد شده در مصالح پس از باربرداری باقی می‌ماند و زمانی که بارگذاری مجدد آغاز می‌شود، خرابی موجود ادامه می‌یابد.



شکل ۲-۲۴. باربرداری و بارگذاری در مدل‌های ناحیه چسبنده

دیو [۱۳۰] و همکاران در سال ۲۰۱۳، مدلی دو بعدی با نام 'IlliTc' ارائه کردند. وی از دو بخش مهم برای مدل استفاده کرد که شامل (۱) استفاده از یک مدل شکست ناحیه چسبنده برای شبیه سازی دقیق شروع ترک و انتشار آن به دلیل بارگذاری‌های دمایی (۲) استفاده از یک مدل مصالح ویسکوالاستیک برای رفتار مصالح که وابسته به دما و زمان است. این مدل نسبت به مدل TCMModel که رفتار انتشار ترک را به صورت یک بعدی محاسبه می‌کنند، ترجیح داده می‌شود زیرا در این مدل به دلیل در نظر گرفتن مدل ناحیه چسبنده، تنش‌های برودتی در ناحیه نوک ترک متغیر است) شکل ۱۶-۲ و با باز شدن ترک، تنش‌ها به دلیل تمرکز تنش در نوک ترک افزایش می‌یابند.

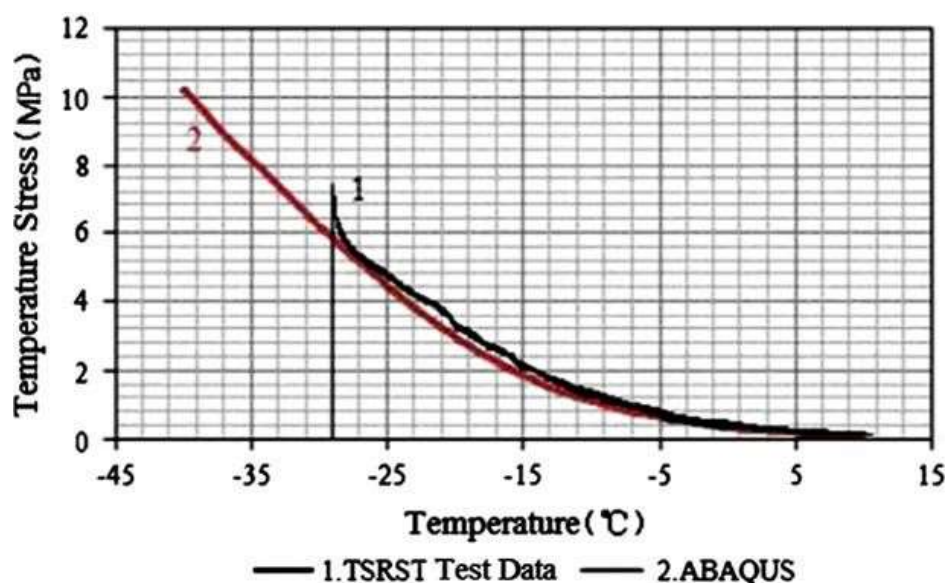
در این مدل برای بررسی نحوه‌ی انتشار ترک خوردگی دو پارامتر تنش مقاوم و انرژی شکست به ترتیب با استفاده از آزمایش‌های IDT و DCT به دست آمده است. تنش‌های برودتی به وجود آمده همانند TCMModel محاسبه می‌شوند. تنش مقاوم برابر $4/22$ مگا پاسکال و انرژی شکست نیز برابر 840 ژول بر متر مربع در نظر گرفته شده است. نتایجی که برای یک نمونه در این مدل سازی به دست آورده شده است نشان می‌دهند که شروع ترک خوردگی در دمای $23/3$ -درجه سانتی‌گراد محیط رخ داده و ترک خوردگی کامل در عمق در دمای $29/6$ -درجه سانتی‌گراد محیط ایجاد شده است. این مدل به دلیل ثابت بودن پارامترهای مصالح از جمله مقاومت کششی و انرژی شکست نسبت به دما، برای تعیین تأثیر پیرشدگی مخلوط آسفالتی کاربردی ندارند. همچنین در این مدل ضریب انقباض دمایی ثابت فرض شده است. در حالی که ضریب انقباض دمایی نسبت به دما یک رابطه‌ی دو خطی می‌باشند و بهتر است برای تعیین تنش‌های برودتی، ضریب انقباض دمایی نسبت به دما متغیر باشند.

چانگ و همکارش [۳۱] مدلی برای پیش بینی شروع ترک خوردگی و انتشار ترک در عمق روسازی با استفاده از نرم افزار آباکوس ارائه کردند. در این مطالعه، با استفاده از شبیه سازی آزمایش نمونه‌ی مهارشده تحت تنش‌های برودتی در نرم افزار آباکوس^۲ و قرار دادن اجزاء چسبنده در وسط نمونه مدلی برای ارزیابی رفتار ناحیه چسبنده ارائه شد. در این مدل ضریب انقباض حرارتی برابر $5-10 \times 2$ و ابعاد نمونه برابر

^۱- Dave

^۲ Abacus

۲۰۰mm × ۳۰mm × ۳۰mm در نظر گرفته شده است و دمای اولیه و نرخ کاهش دما نیز به ترتیب برابر ۱۰ و ۵- درجه بر ساعت انتخاب شده است. زمان تحلیل برابر ۳۶۰۰۰ ثانیه قرار داده شده و دمای نمونه تا دمای ۴۰- درجه کاهش میابد. همچنین ضریب پواسون برابر ۰/۳ و رفتار آسفالت به صورت ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده است. تنش‌های به دست آمده از آزمایش و مدل در شکل (۲-۱۹) مشخص است. با ارزیابی تنش‌های به دست آمده از مدل و آزمایش به این نتیجه رسیدند که مدل ناحیه چسبنده برای بررسی ترک‌های برودتی مناسب است.



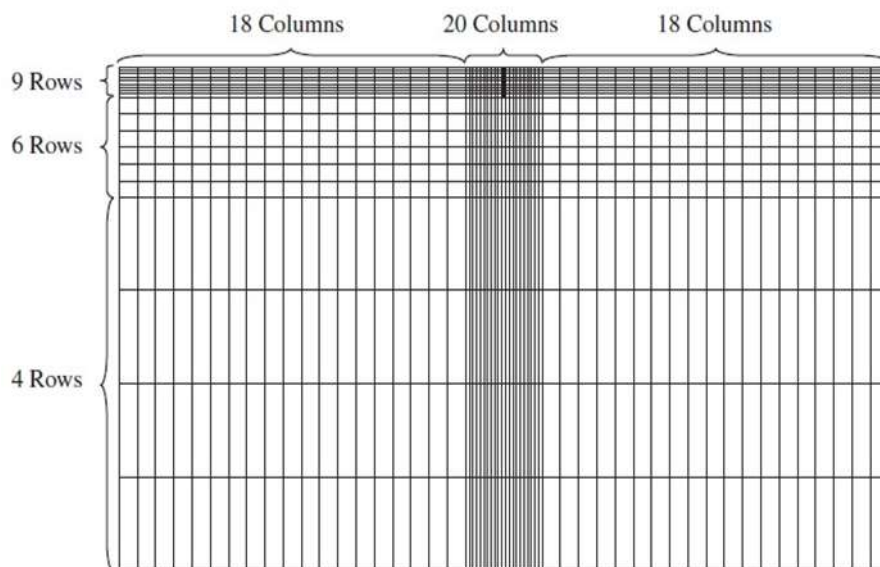
شکل ۲-۲۵. نتایج مدل و آزمایش TSRST [۳۲]

هدف اصلی این مطالعه بررسی شروع ترک خوردگی و انتشار ترک در روسازی آسفالتی بود و به همین منظور از نرم افزار آباکوس برای مدل کردن یک مقطع کامل روسازی (۱۸ سانتی متر لایه‌ی رویه و ۴۰ سانتی متر اساس و ۲۰ سانتی متر زیر اساس و ۲۲۲ سانتی متر سنگ بستر) به صورت دو بعدی استفاده شده است. در این مدل، ضریب انقباض دمایی به صورت متغیر نسبت به دما و دما نیز به صورت تابعی از زمان و عمق در نظر گرفته شده است. به همین منظور ابتدا دمای سطح روسازی کاهش میابد و سپس دمای عمق روسازی کاهش پیدا می‌کنند. در این مدل دما به صورت تابعی از ضخامت روسازی به نرم افزار وارد شده است جهت اینکه ابتدا دمای سطح روسازی کاهش یابند و سپس به لایه‌های زیرین نفوذ کنند. رفتار

لایه‌ی آسفالت نیز به صورت ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات سایر لایه‌ها طبق جدول (۷-۲) در نظر گرفته شده است.

جدول ۲-۶. مقادیر الاستیک لایه‌های اساس و زیر اساس و بستر [۳۲]

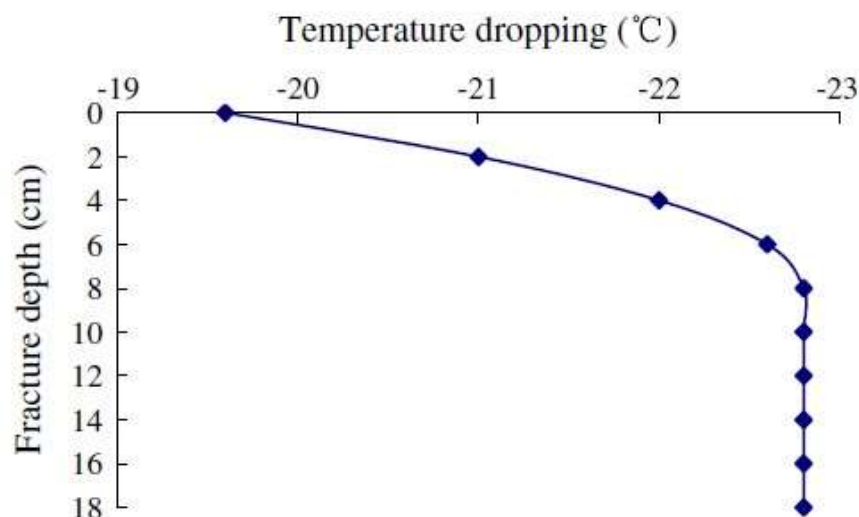
Layer	Thickness (cm)	Modulus E(MPa)	Poisson's ratio	Temperature contraction coefficient $\alpha(1/^{\circ}\text{C})$
Semi-rigid base	۴۰	۴۰۰۰	۰/۱۵	7×10^{-6}
Subbase	-	۶۰	۰/۳۵	1×10^{-5}
Subgrade	-	-	-	2×10^{-5}



شکل ۲-۲۶. نحوه‌ی مش بندی لایه‌های روسازی [۳۲]

همان طور که در شکل (۲۰-۲) مشخص است اجزاء چسبنده در وسط لایه‌ی آسفالت قرار دارد و نوع مش بندی به گونه‌ای است که در اطراف ناحیه چسبنده، مش‌ها ریز باشند و در قسمت‌هایی که لازم نیست، ابعاد مش‌ها بزرگ‌تر شده است تا حجم محاسبات کاهش یابد. در این مدل، هر کدام از لایه‌ها همگن و تماس بین لایه‌های مختلف به صورت کاملاً پیوسته در نظر گرفته شده است. طول ۵ متر و عمق ۳ متر، ابعاد روسازی دو بعدی که وارد نرم افزار شده است را تشکیل می‌دهند. نتایج این مدل در شکل (۲۲-۲) نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص می‌باشد، ابتدا شکست در سطح روسازی رخ داده و پس از مدتی با

کاهش دمای سطح روسازی این ترک در عمق گسترش پیدا می‌کند و باعث ترک خوردگی کامل لایه آسفالتی می‌شوند. روند ترک خوردگی تا عمق ۸ سانتیمتری به صورت شکل پذیر است و بعد از آن ترک خوردگی به صورت شکننده بروز می‌کنند.



شکل ۲-۲۷. دمای شکست در عمق‌های مختلف [۳۲]

همچنین در این مطالعه حساسیت سنجی بر روی برخی مشخصات دمایی مخلوط آسفالتی انجام شد که نشان می‌دهد، مشخصاتی مانند مدول استهلاک، نسبت پوآسون، دمای اولیه، مدت زمان افت دما (نرخ کاهش دما) بر روی شکست در دماهای پایین تأثیرگذار است. لایه‌های آسفالتی با مدول استهلاک و نسبت پوآسون کمتر مقاومت بهتری در برابر ترک‌های برودتی از خود نشان می‌دهند.

۲-۴ جمع بندی

در این فصل تعریف ترک‌های برودتی و مشخصات این نوع از خرابی آسفالت بیان شده است. همچنین آزمایش‌ها و مدل سازی‌هایی که در این زمینه انجام شده است نیز در این فصل ذکر شده‌اند. جمع بندی مطالب این فصل به طور مختصر به شرح زیر می‌باشد: * در زمینه‌ی مطالعات آزمایشگاهی جهت ارزیابی ترک خوردگی برودتی، ابتدا آزمایش TSRST ابداع شده است که شامل یک نمونه مهار شده در اتاقک آزمایش می‌باشد. از این آزمایش برای اندازه گیری تنش‌های برودتی، مقاومت کششی و دمای شکست مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. اخیراً با اضافه کردن یک نمونه‌ی نامقید به اتاقک آزمایش TSRST،

آزمایش دیگری تحت عنوان آزمایش UTSSST ابداع شده است که نسبت به آزمایش قبلی کامل تر است و علاوه بر خروجی‌های آزمایش قبلی، کرنش نیز در حین انجام آزمایش قابل اندازه‌گیری است.

* مدل سازی‌ها به طور کلی به دو دسته‌ی مدل‌های تجربی و مکانیستیک تقسیم می‌شوند. در زمینه‌ی مدل‌های تجربی دو مدل برای تعیین فاصله‌ی ترک خوردگی و شدت ترک خوردگی ارائه شده است.

* در زمینه مدل‌های مکانیستیک، ابتدا مدل‌هایی بر پایه‌ی رفتار الاستیک مخلوط‌های آسفالتی برای تعیین شکست تک‌المان ایجاد شده است و در ادامه با در نظر گرفتن لایه‌های روسازی به صورت زیر لایه و فرض رفتار ویسکو الاستیک، ترک خوردگی و نحوه‌ی انتشار آن در روسازی آسفالتی مدل شده است. اخیراً از مدل‌های ناحیه چسبند برای بیان شکست در مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود.

* اجزاء ناحیه چسبند در مدل سازی‌های اجزاء محدود برای بیان رفتارهای شکننده و شبه شکننده استفاده می‌شوند. این مدل برای بررسی نحوه‌ی انتشار ترک خوردگی در عمق لایه‌ی آسفالتی مناسب است و با استفاده از این مدل می‌توان تأثیر شکست المان‌های سطحی لایه‌ی آسفالتی و تأثیر میزان بازشدگی ترک را در انتشار ترک در نظر گرفت.

* چانگ و همکاران با استفاده از مدل سازی اجزای محدود و بکار بردن اجزاء چسبند دریافتند که مخلوط‌های آسفالتی با مدول استهلاک و نسبت پواسون کمتر مقاومت بهتری در برابر ترک‌های برودتی از خود نشان می‌دهند.

* بر اساس مطالعات انجام شده، نوع قیر مصرفی و پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی در ترک خوردگی برودتی مؤثر می‌باشد. هرچه قیر مصرفی دارای درجه نفوذ بیشتر باشد نسبت به ترک خوردگی برودتی مقاوم‌تر است. همچنین پیرشدگی مخلوط آسفالتی باعث افزایش احتمال ترک خوردگی برودتی در مخلوط می‌شود.

* بر اساس مطالعات، نوع دانه بندی مخلوط آسفالتی تأثیری در ترک خوردگی برودتی ندارد.

فصل ۳: روش تحقیق

۳-۱ مقدمه

با بازدید از محورهای مورد نظر در پژوهش (جیرفت- بافت و جیرفت-بندرعباس و جیرفت- کرمان)(شاهرود- دامغان) و محور هراز، تعداد ترک‌های برودتی که شامل: ترک‌های جزئی، نیمه و کامل و همچنین ترک‌های چندگانه می‌باشند، در هر کیلومتر از مسیرهای رفت و برگشت شمارش و جمع‌آوری شدند. لازم به ذکر است که ترک‌های جزئی در محاسبات و مدل‌سازی در نظر گرفته نمی‌شوند. تصاویری نیز از محورهای فوق تهیه گردید که در این تصاویر ترک‌های برودتی و خرابی‌های دیگر از جمله: ترک‌های طولی، بلوکی، پوست سوسماری و... قابل مشاهده هستند. همان‌طور که قبلاً گفته شد، با مراجعه به اداره کل راه و شهرسازی و اداره راه استان‌های مربوطه، ترافیک و عمر روسازی (تاریخ آخرین ترمیم و روکش روسازی راه) محورهای مذکور در کیلومترهای انجام شده اخذ گردید. اطلاعات مربوط به آب و هوا نیز با مراجعه به سازمان هواشناسی و با استفاده از وب سایت مربوط به ایستگاه سینوپتیک تهیه شد. در نهایت مجموعه اطلاعات به دست آمده از هر محور، به طور جداگانه در جداولی ارائه می‌شوند.

۳-۲ مسیر جیرفت - بافت (رفت)

این محور از پلیس راه شهرستان جیرفت شروع و به ابتدای شهرستان بافت ختم می‌شود که طول این مسیر در جهت رفت ۱۷۰ کیلومتر و در جهت برگشت ۳۰ کیلومتر می‌باشد اطلاعات بدست آمده از این محور طبق جداول زیر می‌باشد.

روابط مربوط به محاسبه شاخص ترک خوردگی در فصل دوم ذکر شد و رابطه‌ای که از آن برای محاسبه این شاخص در مناطق سردسیر استفاده می‌شود، بیان گردید. از آنجایی که محورهای مورد نظر نیز جزء مناطق سردسیر می‌باشند، بنابراین، شاخص ترک‌خوردگی با توجه به تعداد ترک‌های برودتی، با استفاده از رابطه $(CI = M + F + \frac{H}{2})$ محاسبه می‌شود و همان‌طور که قبلاً گفته شد، از ترک‌های برودتی جزئی در محاسبه شاخص ترک خوردگی صرف‌نظر شده است. شاخص ترک‌خوردگی محاسبه شده در هر کیلومتر از محورهای مورد نظر در دو مسیر رفت و برگشت در جداول ذیل تنظیم و ارائه شده است.

جدول ۳-۱: اطلاعات جمع‌آوری شده

شخص ترک خوردگی CI	عمر روسازی	کیلومتر	تعداد ترک‌های چندگانه	تعداد ترک‌های نیمه	تعداد ترک‌های کامل
۰	۲	km۰	—	—	—
۲	۳	۱۰	۱	۲	—
۶/۵	۳	۲۰	۴	۵	—
۶	۳	۳۰	۳	۶	—
۶	۵	۴۰	۳	۶	—
۱۵/۵	۶	۵۰	۴	۷	۸
۲۲/۵	۵	۶۰	۴	۹	۱۴
۳۰/۵	۵	۷۰	۶	۱۳	۱۸
۱۰	۵	۸۰	۲	۴	۶
۹	۵	۹۰	۳	۶	۳
۷	۲	۱۰۰	۲	۴	۳
۸/۵	۳	۱۱۰	۴	۵	۲
۸	۳	۱۲۰	۲	۴	۴
۰	۱	۱۳۰	—	—	—
۰	۱	۱۴۰	—	—	—
۱۰	۳	۱۵۰	۳	۶	۴
۹	۳	۱۶۰	۲	۴	۵
۹/۵	۳	۱۷۰	۴	۵	۳



شکل ۳-۱. مسیر جیرفت - بافت (کیلومتر ۷۰، خرابی: ترک برودتی کامل)

۳-۳ مسیر جیرفت - بافت (برگشت)

جدول ۲-۳: اطلاعات جمع آوری شده

شاخص ترک خوردگی CI	عمر روسازی	کیلومتر	تعداد ترک‌های چندگانه	تعداد ترک‌های نیمه	تعداد ترک‌های کامل
۶	۲	km۰	۲	۴	۲
۰	۱	۱۶۰	—	—	—
۰	۱	۱۷۰	—	—	—



شکل ۲-۳. مسیر بافت - جیرفت (کیلومتر ۵۰ خرابی: ترک برودنی جزئی، نیمه، کامل، چندگانه)

۳-۴ مسیر جیرفت - بندرعباس (رفت)

این محور از انتهای شهرستان جیرفت شروع و به ابتدای شهر بندرعباس ختم می‌شود که طول این مسیر در

جهت رفت ۲۴۰ کیلومتر و در جهت برگشت ۲۴۰ کیلومتر می‌باشد اطلاعات بدست آمده از این محور طبق

جداول زیر می‌باشد.

جدول ۳-۳. اطلاعات جمع آوری شده

شخص ترک خوردگی CI	عمر روسازی	کیلومتر	تعداد ترک‌های چندگانه	تعداد ترک‌های نیمه	تعداد ترک‌های کامل
۶/۵	۱۰	km۰	۲	۵	۲
۱۰	۷	۱۰	۳	۴	۵
۴/۵	۵	۲۰	۲	۳	۱
۲	۵	۳۰	۱	۲	—
۷/۵	۶	۴۰	۳	۵	۲
۸/۵	۶	۵۰	۳	۵	۳
۳/۵	۷	۶۰	۲	۳	—
۰	۷	۷۰	—	—	—
۴	۱۰	۸۰	۲	۴	—
۷/۵	۸	۹۰	۳	۵	۲
۰	۵	۱۰۰	—	—	—
۰	۵	۱۱۰	—	—	—
۰	۶	۱۲۰	—	—	—
۰	۶	۱۳۰	—	—	—
۳/۵	۶	۱۴۰	۲	۳	—
۰	۶	۱۵۰	—	—	—
۰	۴	۱۶۰	—	—	—
۲/۵	۴	۱۷۰	۱	۳	—
۲/۵	۴	۱۸۰	۱	۳	—
۲/۵	۳	۱۹۰	۱	۳	—
۰	۳	۲۰۰	—	—	—
۲	۵	۲۱۰	۱	۲	—
۰/۵	۵	۲۲۰	—	۱	—
۱	۴	۲۳۰	—	۲	—
۰/۵	۴	۲۴۰	—	۱	—



شکل ۳-۳. مسیر جیرفت - بندرعباس (کیلومتر ۹۰ خرابی: ترک برودتی چندگانه - ترک طولی)

۳-۵ مسیر جیرفت - بندرعباس (برگشت)

جدول ۳-۴. اطلاعات جمع آوری شده

شخص ترک خوردگی CI	عمر روسازی	کیلومتر	تعداد ترک‌های چندگانه	تعداد ترک‌های نیمه	تعداد ترک‌های کامل
۱	۴	km۰	—	۲	—
۰/۵	۴	۱۰	—	۱	—
۰/۵	۵	۲۰	—	۱	—
۱	۵	۳۰	—	۲	—
۰/۵	۳	۴۰	—	۱	—
۱	۴	۵۰	—	۲	—
۲/۵	۴	۶۰	۱	۳	—
۲/۵	۳	۷۰	۱	۳	—
۰	۳	۸۰	—	—	—
۰	۴	۹۰	—	—	—
۲	۴	۱۰۰	۱	۲	—
۰/۵	۴	۱۱۰	—	۱	—
۰	۴	۱۲۰	—	—	—
۰	۵	۱۳۰	—	—	—
۰	۵	۱۴۰	—	—	—
۵	۷	۱۵۰	۲	۴	۱
۲	۷	۱۶۰	۱	۲	—
۰	۷	۱۷۰	—	—	—

۲	۶	۱۸۰	۱	۲	—
۴	۵	۱۹۰	۱	۲	۲
۴/۵	۵	۲۰۰	۲	۳	۱
۰/۵	۶	۲۱۰	—	۱	—
۲	۶	۲۲۰	۱	۲	—
۶/۵	۸	۲۳۰	۲	۳	۳
۵/۵	۹	۲۴۰	۲	۳	۲



شکل ۳-۴. مسیر بندرعباس - جیرفت کیلومتر ۱۸۰

۳-۶ مسیر جیرفت-کرمان (رفت)

این محور از پلیس راه شهرستان جیرفت شروع و به ابتدای شهر کرمان ختم می‌شود که طول این مسیر در جهت رفت ۲۲۰ کیلومتر و در جهت برگشت ۲۱۰ کیلومتر می‌باشد اطلاعات بدست آمده از این محور طبق جداول زیر می‌باشد.

جدول ۳-۵. اطلاعات جمع آوری شده

شاخص ترک خوردگی CI	عمر روسازی	کیلومتر	تعداد ترک‌های چندگانه	تعداد ترک‌های نیمه	تعداد ترک‌های کامل
۰	۲	km۰	—	—	—
۲	۳	۱۰	۱	۲	—
۶	۳	۲۰	۳	۶	—
۶/۵	۳	۳۰	۴	۵	—

۶/۵	۴	۴۰	۳	۷	—
۱۱/۵	۷	۵۰	۳	۷	۵
۲۱/۵	۹	۶۰	۵	۹	۱۲
۲۶/۵	۹	۷۰	۵	۱۱	۱۶
۶	۵	۸۰	۱	۲	۴
۱۳/۵	۵	۹۰	۴	۹	۵
۰	۲	۱۰۰	—	—	—
۰	۳	۱۱۰	—	—	—
۰	۳	۱۲۰	—	—	—
۰	۱	۱۳۰	—	—	—
۰	۱	۱۴۰	—	—	—
۷/۵	۳	۱۵۰	۳	۵	۲
۹	۳	۱۶۰	۳	۶	۳
۷	۳	۱۷۰	۲	۴	۳
۸	۳	۱۸۰	۲	۴	۴
۳	۳	۱۹۰	۱	۲	۱
۷	۴	۲۰۰	۲	۴	۳
۸/۵	۴	۲۱۰	۳	۵	۳
۶/۵	۴	۲۲۰	۱	۳	۴



شکل ۳-۵. مسیر جیرفت - کرمان (کیلومتر ۱۵۰ خرابی: ترک برودتی چندگانه)

۳-۷ مسیر جیرفت-کرمان (برگشت)

جدول ۳-۶. اطلاعات جمع آوری شده

شاخص ترک خوردگی CI	عمر روسازی	کیلومتر	تعداد ترک‌های چندگانه	تعداد ترک‌های نیمه	تعداد ترک‌های کامل
۵	۳	km۰	۱	۲	۳
۶	۳	۱۰	۱	۲	۴
۷	۳	۲۰	۲	۴	۳
۴/۵	۳	۳۰	۱	۳	۲
۶/۵	۳	۴۰	۱	۳	۴
۷	۳	۵۰	۲	۴	۳
۹	۴	۶۰	۳	۶	۳
۸/۵	۴	۷۰	۳	۵	۳
۳	۳	۸۰	۱	۲	۱
۲	۲	۹۰	۱	۱	—
۰	۱	۱۰۰	—	—	—
۰	۱	۱۱۰	—	—	—
۰	۱	۱۲۰	—	—	—
۷	۳	۱۳۰	۲	۴	۳
۸/۵	۳	۱۴۰	۲	۳	۵
۶	۲	۱۸۰	۳	۶	—
۲/۵	۲	۲۱۰	۱	۳	—

۳-۸ مسیر شاهرود- دامغان (رفت)

این محور از ابتدای شهرستان شاهرود شروع و به ابتدای شهرستان دامغان ختم می‌شود که طول این مسیر در جهت رفت ۶۵ کیلومتر و در جهت برگشت ۶۵ کیلومتر می‌باشد اطلاعات بدست آمده از این محور طبق جداول زیر می‌باشد.

جدول ۳-۷. اطلاعات جمع آوری شده

تعداد ترک‌های کامل	تعداد ترک‌های نیمه	تعداد ترک‌های چندگانه	کیلومتر	عمر روسازی	شاخص ترک خوردگی CI
۲	۵	۳	km۰	۳	۷/۵
۲	۵	۴	۵	۳	۸/۵
۳	۵	۴	۱۰	۳	۹/۵
۲	۶	۳	۱۵	۳	۸
۲	۷	۳	۲۰	۳	۸/۵
۲	۲	۲	۲۵	۲	۵
۳	۳	۲	۳۰	۲	۶/۵
۲	۲	۲	۳۵	۲	۵
۲	۳	۲	۴۰	۲	۵/۵
۲	۴	۲	۴۵	۲	۶
۲	۶	۲	۵۰	۳	۷
۱	۵	۲	۵۵	۳	۵/۵
۲	۳	۲	۶۰	۳	۵/۵
۲	۳	۱	۶۵	۳	۵/۵

۳-۹ مسیرشاهرود-دامغان (برگشت)

جدول ۳-۸. اطلاعات جمع آوری شده

تعداد ترک‌های کامل	تعداد ترک‌های نیمه	تعداد ترک‌های چندگانه	کیلومتر	عمر روسازی	شاخص ترک خوردگی CI
۳	۶	۲	km۰	۴	۸
۳	۶	۲	۵	۴	۸
۳	۶	۲	۱۰	۴	۸
۲	۷	۲	۱۵	۵	۷/۵
۲	۸	۲	۲۰	۵	۸

۵/۵	۴	۲۵	۲	۳	۲
۸	۴	۳۰	۳	۴	۳
۵/۵	۳	۳۵	۲	۳	۲
۷	۳	۴۰	۳	۴	۲
۷/۵	۳	۴۵	۳	۵	۲
۱۰/۵	۲	۵۰	۴	۷	۳
۶/۵	۲	۵۵	۲	۳	۳
۷	۳	۶۰	۳	۴	۲
۶/۵	۳	۶۵	۲	۳	۳

۳-۱۰ محور هراز (رفت)

این محور از انتهای شهر رودهن شروع و به ابتدای امام زاده هاشم ختم می‌شود که طول این مسیر در جهت رفت ۲۴ کیلومتر و در جهت برگشت ۲۴ کیلومتر می‌باشد اطلاعات بدست آمده از این محور طبق جداول زیر می‌باشد.

جدول ۳-۹. اطلاعات جمع آوری شده

تعداد ترک‌های کامل	تعداد ترک‌های نیمه	تعداد ترک‌های چندگانه	کیلومتر	عمر روسازی	شاخص ترک خوردگی CI
—	۴	۳	۱ km	۶	۵
۱	۴	۳	۲	۶	۶
۱	۳	۲	۳	۶	۴/۵
۱	۶	۳	۴	۶	۷
۳	۷	۳	۵	۶	۹/۵
۲	۸	۴	۶	۶	۱۰
۲	۵	۴	۷	۶	۸/۵
۱	۷	۳	۸	۳	۷/۵
۲	۴	۲	۹	۳	۶

۷	۳	۱۰	۳	۴	۲
۳	۳	۱۱	—	۴	۱
۵/۵	۳	۱۲	۲	۵	۱
۳	۲	۱۳	۲	۲	—
۳/۵	۲	۱۴	۲	۳	—
۲	۲	۱۵	—	۴	—
۲/۵	۲	۱۶	—	۳	۱
۲	۲	۱۷	۱	۲	—
۴	۱	۱۸	۱	۲	۲
۳	۱	۱۹	—	۴	۱
۴	۱	۲۰	۱	۴	۱
۲/۵	۱	۲۱	—	۳	۱
۴/۵	۱	۲۲	۱	۵	۱
۳/۵	۱	۲۳	۱	۳	۱
۴	۱	۲۴	۲	۲	۱



شکل ۳-۶. مسیر محور هراز (کیلومتر ۱۵ خرابی: ترک برودتی نیمه و کامل + ریز اطراف ترک طولی ترک بلوکی)

۳-۱۱ محور هراز (برگشت)

جدول ۳-۱۰. اطلاعات جمع آوری شده

شخص ترک خوردگی CI	عمر روسازی	کیلومتر	تعداد ترک‌های چندگانه	تعداد ترک‌های نیمه	تعداد ترک‌های کامل
۸	۳	۱ km	۳	۶	۲
۷/۵	۳	۲	۳	۷	۱
۷/۵	۳	۳	۳	۵	۲
۶	۳	۴	۲	۴	۲
۷	۳	۵	۳	۶	۱
۴/۵	۳	۶	۲	۵	—
۵/۵	۳	۷	۲	۵	۱
۶	۳	۸	۳	۶	—
۴	۲	۹	۲	۴	—
۳/۵	۲	۱۰	۲	۳	—
۲/۵	۲	۱۱	۱	۳	—
۱/۵	۲	۱۲	—	۳	-
۲	۲	۱۳	—	۴	—
۳	۲	۱۴	۲	۲	—
۱/۵	۲	۱۵	—	۳	—
۱/۵	۲	۱۶	—	۳	—
۲	۲	۱۷	۱	۲	—
۱	۲	۱۸	—	۲	—
۲	۱	۱۹	۱	۲	—
۲/۵	۱	۲۰	۱	۳	—
۱	۱	۲۱	—	۲	—
۱/۵	۱	۲۲	—	۳	—
۱	۱	۲۳	—	۲	—
۱	۱	۲۴	—	۲	—

داده‌های آب و هوا

اطلاعات مورد نیاز آب و هوا شامل: دمای هوای متوسط، حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال و میانگین آن‌ها در فصل زمستان می‌باشد. اطلاعات فوق از دایره آمار و اطلاعات آب و هوا در اداره راه استان و سازمان هواشناسی کشور و مراجعه به وب سایت ایستگاه سینوپتیک و بررسی ایستگاه هواشناسی به دست آمده که اطلاعات جمع آوری شده برای محور مورد نظر طبق عمر روسازی در جداول زیر ارائه شده است.

۱۲-۳ محور جیرفت-بافت

جدول ۱۱-۳. دمای متوسط هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت - بافت

سال	دی	بهمن	اسفند	میانگین
۹۹	۳	۳	۹/۵	۵/۱۶
۹۸	-۱/۴	۲/۹۵	۷/۵	۳/۰۱
۹۷	-۵	-۱/۱	۷-۴	۰/۴۳
۹۶	-۳/۲	۱	۱/۱	-۰/۳۶
۹۵	-۲/۵	۲/۴۵	۴/۴۵	۱/۴۶

جدول ۱۲-۳. حداقل دمای هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت-بافت

سال	دی	بهمن	اسفند	میانگین
۹۹	-۸/۹	-۷/۱	-۳/۱	-۳/۳۶
۹۸	-۹/۳	-۳/۳	-۳/۷	-۵/۴۳
۹۷	-۱۱/۸	-۹/۲	-۳/۵	-۸/۱۶
۹۶	-۱۰/۲	-۶/۰۵	-۵/۷	-۷/۳۱
۹۵	-۱۰/۱	-۶/۱	-۳/۳	-۶/۵

جدول ۳-۱۳. تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال محور جیرفت-بافت

سال	دی	بهمن	اسفند	مجموع
۹۹	۱۲	۱۴	۱۰	۳۶
۹۸	۱۳	۱۴	۱۷	۴۴
۹۷	۱۴	۱۶	۹	۳۹
۹۶	۱۵	۱۵	۱۰	۴۰
۹۵	۱۴	۱۵	۱۱	۴۰

۳-۱۳ محور جیرفت-بندرعباس

جدول ۳-۱۴. دمای متوسط هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت-بندرعباس

سال	دی	بهمن	اسفند	میانگین
۹۹	۱۲	۱۳/۲	۱۴	۱۳/۰۶
۹۸	۱۱/۶	۱۴/۳	۱۲/۴	۱۲/۷۶
۹۷	۱۴/۵	۹/۵	۱۵	۱۳
۹۶	۱۳	۱۵/۶	۱۳/۳	۱۳/۹۶
۹۵	۱۴/۵	۱۳/۲	۱۴/۵	۱۴/۰۶

جدول ۳-۱۵. حداقل دمای هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت-بندرعباس

سال	دی	بهمن	اسفند	میانگین
۹۹	-۳	-۴	۲	-۱/۶۶
۹۸	-۴/۲	-۴/۵	۱	-۲/۵۶
۹۷	-۴	-۳/۳	۳	-۱/۴۳
۹۶	-۳/۵	-۳	۲	-۱/۵
۹۵	-۳	-۳/۵	۲	-۲/۲۵

جدول ۳-۱۶. تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال محور جیرفت-بندرعباس

سال	دی	بهمن	اسفند	مجموع
۹۹	۳	۴	۰	۷
۹۸	۴	۴	۰	۸
۹۷	۴	۳	۰	۷
۹۶	۳	۳	۰	۶
۹۵	۳	۳	۰	۶

۳-۱۴ محور جیرفت - کرمان

جدول ۳-۱۷. دمای متوسط هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت-کرمان

سال	دی	بهمن	اسفند	میانگین
۹۹	۵/۱	۴/۵	۹/۶	۶/۴
۹۸	۴	۵/۹	۹	۶/۳
۹۷	۲	۳/۷۵	۸/۵	۴/۷۵
۹۶	۳/۵	۴/۸	۷/۳۵	۵/۲۱
۹۵	۲/۲۵	۴/۷	۸/۲۵	۵/۰۶

جدول ۳-۱۸. حداقل دمای هوا در سه ماه آخر سال در محور جیرفت-کرمان

سال	دی	بهمن	اسفند	میانگین
۹۹	- $\frac{1}{4}$	-۴/۴	-۳/۴	-۳/۹۶
۹۸	-۳	-۳/۵	-۲/۵	-۳
۹۷	-۵	-۷/۵	-۴/۳	-۵/۶
۹۶	-۴	-۴/۹	-۳/۸	-۴/۲۳
۹۵	-۴/۲	-۵/۵	- $\frac{3}{4}$	-۴/۶۶

جدول ۳-۱۹. تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال محور جیرفت-کرمان

سال	دی	بهمن	اسفند	مجموع
۹۹	۸	۱۰	۶	۲۴
۹۸	۹	۱۰	۱۳	۳۲
۹۷	۱۰	۱۳	۱۱	۳۴
۹۶	۱۲	۱۱	۱۵	۳۸
۹۵	۱۲	۱۵	۱۳	۴۰

۳-۱۵. محور شاهرود-دامغان

جدول ۳-۲۰. دمای متوسط هوا در سه ماه آخر سال در محور شاهرود-دامغان

سال	دی	بهمن	اسفند	میانگین
۹۹	۳/۲	۴/۶	۸/۲	۵/۳۳
۹۸	۴	۴/۵	۷/۹	۵/۴۶
۹۷	-۲/۱	۳/۴	۷/۵	۲/۹۳
۹۶	-۲	۳/۷	۸/۵	۳/۴
۹۵	-۳/۴	۴/۴	۷/۸	۲/۹۳

جدول ۳-۲۱. حداقل دمای هوا در سه ماه آخر سال در محور شاهرود-دامغان

سال	دی	بهمن	اسفند	میانگین
۹۹	-۱۱/۹	-۹/۸	-۶/۵	-۹/۴
۹۸	-۱۰/۹	-۹/۵	-۳/۸	-۸/۰۶
۹۷	-۹/۳	-۸/۹	-۳/۵	-۷/۲۳
۹۶	-۱۰/۵	-۹/۵	-۴/۳	-۸/۱
۹۵	-۱۱/۴	-۹/۹	-۵/۲	-۸/۸۳

جدول ۳-۲۲. تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال محور شاهرود-دامغان

سال	دی	بهمن	اسفند	مجموع
۹۹	۲۲	۲۶	۱۴	۶۲
۹۸	۲۴	۲۶	۱۵	۶۵
۹۷	۲۵	۲۷	۱۵	۶۷
۹۶	۲۸	۲۸	۱۶	۷۲
۹۵	۲۷	۲۸	۱۸	۷۳

۳-۱۶ محور هراز

جدول ۳-۲۳. دمای متوسط هوا در سه ماه آخر سال در محور هراز

سال	دی	بهمن	اسفند	میانگین
۹۴	۴/۲	۳/۶	۸/۴۵	۵/۴۱
۹۳	۳	۴/۸۵	۸	۵/۲۸
۹۲	۰/۲	۲/۴۵	۷/۷۵	۳/۴۶
۹۱	۲/۲۵	۳/۶	۶/۲۵	۴/۰۳
۹۰	۱	۴/۳۵	۸/۲	۴/۵۱
۸۹	۲/۴	۲/۱۵	۶/۶	۳/۷۱

جدول ۳-۲۴. حداقل دمای هوا در سه ماه آخر سال در محور هراز

سال	دی	بهمن	اسفند	میانگین
۹۴	-۷/۳	-۷/۴	-۲/۴	-۵/۷
۹۳	-۷	-۵	-۲/۶	-۴/۸۶
۹۲	-۹/۷	-۷/۹	-۳/۲	-۶/۹۳
۹۱	-۸	-۵/۵	-۴/۲	-۵/۹

جدول ۳-۲۵. تعداد روزهای یخبندان در سه ماه آخر سال محور هراز

سال	دی	بهمن	اسفند	مجموع
۹۴	۲۱	۲۵	۲۵	۷۱
۹۳	۲۳	۲۶	۲۶	۷۵
۹۲	۲۳	۲۷	۲۶	۷۶
۹۱	۲۵	۲۷	۲۸	۸۰
۹۰	۲۵	۲۹	۲۷	۸۱
۸۹	۲۶	۳۰	۲۹	۸۵

۳-۱۷ خلاصه اطلاعات آب و هوا و ترافیک محورهای مورد پژوهش

طبق مراجعه به سامانه تردد شماری وسایل نقلیه اداره راه و ترابری تعداد وسایل نقلیه عبوری در هر محور مورد مطالعه در سال مشخص و AADT هر محور محاسبه شد و حداقل دما و میانگین دما و تعداد روزهای یخبندان از هر محور به صورت خلاصه در جداول زیر می‌باشد.

جدول ۳-۲۶. محور جیرفت-بافت

حداقل دما	میانگین دما	تعداد روزهای یخبندان	ترافیک
-۸/۱۶	-۰/۳۶	۴۴	۳۶۸۵ (رفت) ۳۸۴۴ (برگشت)

جدول ۳-۲۷. محور جیرفت-بندرعباس

حداقل دما	میانگین دما	تعداد روزهای یخبندان	ترافیک
-۲/۵۶	۱۲/۷۶	۸	۸۹۱۵ (رفت) ۱۰۱۱۶ (برگشت)

جدول ۳-۲۸. محور جیرفت-کرمان

ترافیک	تعداد روزهای یخبندان	میانگین دما	حداقل دما
۴۹۱۶ (رفت) ۵۱۸۲ (برگشت)	۴۰	۴/۷۵	-۳

جدول ۳-۲۹. محور شاهرود-دامغان

ترافیک	تعداد روزهای یخبندان	میانگین دما	حداقل دما
۷۳۵۸ (رفت) ۸۲۸۶ (برگشت)	۷۳	۲/۹۳	-۹/۴

جدول ۳-۳۰. محور هراز

ترافیک	تعداد روزهای یخبندان	میانگین دما	حداقل دما
۱۵۶۰۱ (رفت) ۱۴۸۰۹ (برگشت)	۸۵	۳/۴۶	-۶/۹۳

فصل ۴: تجزیه و تحلیل داده‌ها

۴-۱ مقدمه

این فصل شامل یافته‌ها و دستاوردهای حاصل از انجام پژوهش "پیش بینی ترک‌های برودتی روسازی بصورت تابعی از آب و هوا و عمر روسازی و ترافیک" است که معمولاً به صورت نمودار، جدول، تصاویر و مواردی از این قبیل درج می‌گردد. هر کدام از یافته‌ها همراه با روند کلی تغییرات به طور خلاصه توضیح داده می‌شود. یافته‌ها و دستاوردهای حاصل از اجرای پروژه به صورت مبسوط مورد بررسی، بحث و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. تحلیل متن یا مفاد تحقیق شامل تحلیل داده‌های پژوهش، ذکر علت‌ها و معلول‌ها و کاربردهای احتمالی در ابعاد نظری و عملی می‌باشد. در این قسمت کلیه نتایج بدست آمده، توضیح داده می‌شود.

۴-۲ تجزیه و تحلیل داده‌های پژوهش

در اینجا بایستی سعی شود فقط مطالبی را به شکل جدول و نمودار ارائه نمود که به فهم بیشتر آن کمک نماید و در راستا و متناسب با اهداف پایان نامه باشد.

۴-۲-۱ تحلیل مولفه‌های اصلی

تحلیل و مدلسازی طبق شاخص‌های ترک خوردگی محاسبه شده و عمرهای روسازی جمع‌آوری شده در هر کیلومتر از محورهای مورد نظر و با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام می‌شود. در ادامه داده‌های مربوط به شاخص ترک خوردگی و عمر روسازی برای نرم افزار تعریف می‌گردد و نمودارهایی از جمله: نمودار خطی، رگرسیون درجه ۳، ۲ و ۴ و لگاریتمی و غیرخطی بر اساس این داده‌ها ترسیم می‌گردد، که با استفاده از این نمودارها و خروجی‌های نرم‌افزار می‌توان مدل را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و شاخص ترک خوردگی را تا حدودی پیش‌بینی کرده و به طور تقریبی حد و مرزی که باید از آن به بعد گزینه تعمیرات و ترمیم در نظر گرفته شود، مشخص کرد.

جدول ۴-۱. اطلاعات توصیفی مربوط به وضعیت پیش بینی ترک‌های برودتی روسازی بصورت تابعی از آب و هوا و عمر

روسازی و ترافیک

میانگین	حداکثر	حداقل	تعداد داده‌ها	معیارهای پژوهش
۴/۹۰	۳۱	۰	۱۸۷	شاخص ترک
۳/۶۰	۱۰	۱	۱۸۷	عمرروسازی
-۵/۳۴	-۱	-۹	۱۸۷	حداقل دما
۴۲/۱۶	۸۵	۳	۱۸۷	تعداد روزهای یخبندان
۱۵۷ ۹۱۰۷	۱۵۶۰۱	۳۶۸۵	۱۸۷	ترافیک

۴-۲-۲ بررسی نرمال بودن داده‌ها

برای استفاده از مدل رگرسیون باید شرط نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در ابتدا داده‌ها نرمال فرض می‌شوند (H_0) سپس با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (KS) نرمال بودن آن‌ها کنترل می‌گردد. مقدار P-Value در سطح معنی‌داری ۰,۰۵ مبنای پذیرش یا عدم پذیرش نرمال بودن داده‌ها است. به بیان دیگر قبول یا رد فرض اولیه H_0 مقایسه با مقدار ۰,۰۵ می‌باشد. اگر مقدار P-Value کوچکتر از ۰,۰۵ باشد، فرض اولیه (H_0) نرمال بودن داده‌ها رد خواهد شد و اگر مقدار P-Value بزرگتر از ۰,۰۵ باشد، فرض اولیه رد نمی‌شود. در ادامه داده‌های هر معیار با استفاده از آزمون مذکور مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در جدول زیر نشان داده شده است. طبق جدول مذکور مقدار P-Value برای داده‌های هر متغیر بزرگتر از ۰,۰۵ نمی‌باشد و بنابراین داده‌ها نرمال نمی‌باشند. در انتها با رسم نمودار جعبه‌ای برای هر دو متغیر می‌توان از نرمال بودن داده‌ها و محدوده داده‌های مهم و اگر داده‌ای خارج از محدوده وجود دارد، به طور کامل آگاه شد که در این صورت داده فوق حذف شده و سپس مدلسازی رگرسیون انجام می‌شود.

جدول ۴-۲. بررسی نرمال بودن داده‌ها

آماره متغیر	تعداد داده‌ها	مقدار کولموگروف – اسمیرنوف (KS)	P-Value(KS)
شاخص ترک	۱۸۷	۱/۸۷۵	۰/۰۰۲
عمروسازی	۱۸۷	۲/۹۷۷	۰/۰۰۰
حداقل دما	۱۸۷	۳/۷۵۳	۰/۰۰۰
تعداد روزهای یخبندان	۱۸۷	۳/۷۴۲	۰/۰۰۰
ترافیک	۱۸۷	۲/۳۷۹	۰/۰۰۰

با توجه به جدول بالا نتایج نشان می‌دهد که داده‌ها نرمال نمی‌باشند به این دلیل که P-Value(KS) کوچکتر از ۰,۰۵ می‌باشد. در ادامه محدوده داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و اگر داده‌ای خارج از محدوده وجود داشته باشد می‌توان با رسم نمودارهای جعبه‌ای برای هر خانواده آن را مشخص کرد. در ادامه نمودار جعبه‌ای برای هر یک از متغیرها رسم می‌شود. در ادامه محدوده داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و اگر داده‌ای خارج از محدوده وجود داشته باشد می‌توان با رسم نمودارهای جعبه‌ای (در پیوست) برای هر متغیر آن را مشخص کرد.

۴-۳ تعیین وجود رابطه بین داده‌ها (همبستگی داده‌ها)

برای تعیین میزان رابطه، نوع و جهت رابطه بین متغیرهای پژوهش، می‌توان از ضریب اسپیرمن استفاده کرد. این ضریب با استفاده از نرم‌افزار Spss محاسبه گردید و مقدار P-Value نیز محاسبه شد، که در سطح معنی‌داری ۰,۰۵ مبنای پذیرش یا عدم پذیرش همبستگی بین داده‌ها می‌باشد. به عبارتی دیگر قبول یا رد فرض اولیه H_0 مقایسه با مقدار ۰,۰۵ است. فرض صفر در نرم‌افزار Spss عدم همبستگی می‌باشد. اگر P-Value کوچکتر از ۰,۰۵ باشد، فرض (H_0 عدم همبستگی) رد می‌شود. اگر P-Value بزرگتر از ۰,۰۵ باشد، فرض اولیه رد نمی‌شود.

در واقع در پژوهش حاضر، به منظور بررسی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بین شاخص‌های متغیرهای پژوهش، از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده می‌گردد. در صورتی که تعداد داده‌ها کم و فرض نرمال بودن آن‌ها معقول نباشد، از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده می‌شود. ضریب همبستگی‌ای که بر اساس رتبه‌ی داده‌ها محاسبه می‌شود، توسط اسپیرمن محاسبه شده‌است. حال با توجه به جدول زیر به بررسی همبستگی بین متغیرهای پژوهش می‌پردازیم.

جدول ۴-۳. همبستگی بین متغیرها

همبستگی بین شاخص‌ها		شاخص ترک	حداقل دما	عمروسازی	تعداد روزهای یخبندان	ترافیک
شاخص ترک	ضریب همبستگی اسپیرمن	۱/۰۰۰	۰/۲۴۵	۰/۴۶۷	۰/۲۸۰	-۰/۲۵۲
	Sig		۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
عمروسازی	ضریب همبستگی اسپیرمن	۰/۲۴۵	۱/۰۰۰	۰/۳۷۱	۰/۴۷۶	-۰/۰۱۶
	Sig	۰/۰۰۱	.	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷
حداقل دما	ضریب همبستگی اسپیرمن	۰/۴۶۷	۰/۳۷۱	۱/۰۰۰	-۰/۷۱۵	۰/۱۵۳
	Sig	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	.	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷
تعداد روزهای یخبندان	ضریب همبستگی اسپیرمن	۰/۲۸۰	۰/۴۷۶	۰/۷۱۵	۱/۰۰۰	۰/۴۲۹
	Sig	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	.	۰/۰۰۰
ترافیک	ضریب همبستگی اسپیرمن	۰/۲۵۲	-۰/۰۱۶	۰/۱۵۳	۰/۴۲۹	۱/۰۰۰
	Sig	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	.

با توجه به نتایج به دست آمده، در بعضی از متغیرها ضریب اسپیرمن عددی مثبت و نزدیک به ۱ است، که این مقادیر نشان می‌دهد، رابطه‌ای مستقیم بین دو به دو متغیرها می‌باشد. در بعضی از متغیرها ضریب اسپیرمن عددی منفی و نزدیک به ۱ است، که این مقادیر نشان می‌دهد، رابطه‌ای مستقیم بین دو به دو متغیرها می‌باشد. از طرفی مقدار P-Value نیز در هر دو مدل کوچکتر از ۰,۰۵ به دست آمد که فرض صفر (عدم همبستگی داده‌ها) را رد کرده و وجود همبستگی بین دو متغیر را نشان می‌دهد.

۴-۴ مدل سازی با روش های رگرسیون

پس از بررسی نرمال بودن داده ها و بررسی وجود رابطه بین آن ها (ضریب اسپیرمن)، می توان مدل سازی را با روش رگرسیون انجام داد. در مدل سازی رگرسیون توابع زیادی از جمله: خطی، درجه ۱، درجه ۲، درجه ۳، نمایی، لگاریتمی و غیر خطی برای متغیرها به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن ها معرفی و ارائه می شوند.

- رگرسیون خطی

فرم کلی معادله خطی به صورت رابطه زیر می باشد، و در جدول ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است. نمودار زیر نیز شاخص ترک خوردگی بر حسب عمر روسازی را نشان می دهد. نقاط روی نمودار مقادیر ارزیابی شده توسط بازدید میدانی و خط ترسیم شده مدل خطی رگرسیون می باشد.

$$CI = aN + b \quad (۴-۱)$$

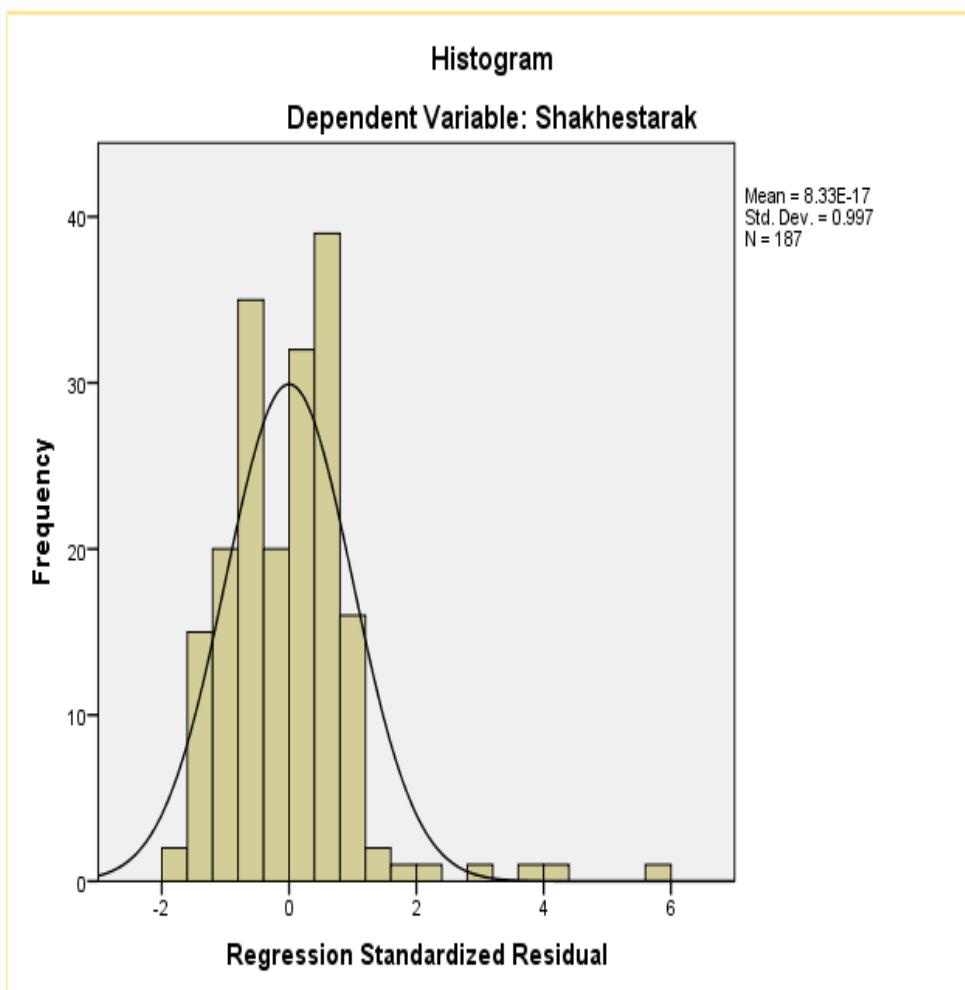
- رگرسیون خطی بر اساس عمر روسازی

در این رابطه، CI شاخص ترک خوردگی N عمر روسازی بر حسب سال و a, b ضرایب ثابت مدل می باشند. با توجه به نتایج مندرج در جدول این مدل به صورت فرمول زیر به دست می آید.

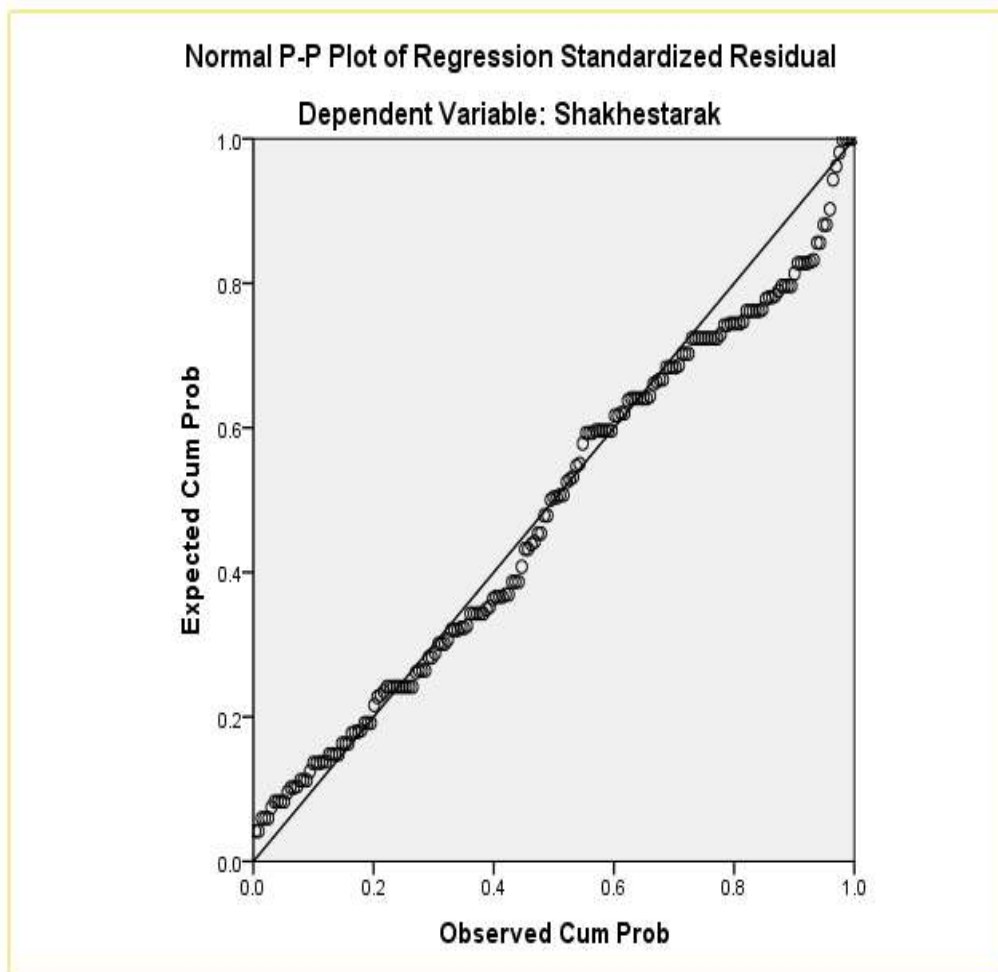
جدول ۴-۴. رگرسیون خطی بر اساس عمر روسازی

a	b	R ²
2.26	0.732	0.097

$$CI = 2.26N + 0.732$$



نمودار ۴-۷. توزیع داده‌ها



نمودار ۴-۸. مدل رگرسیون خطی

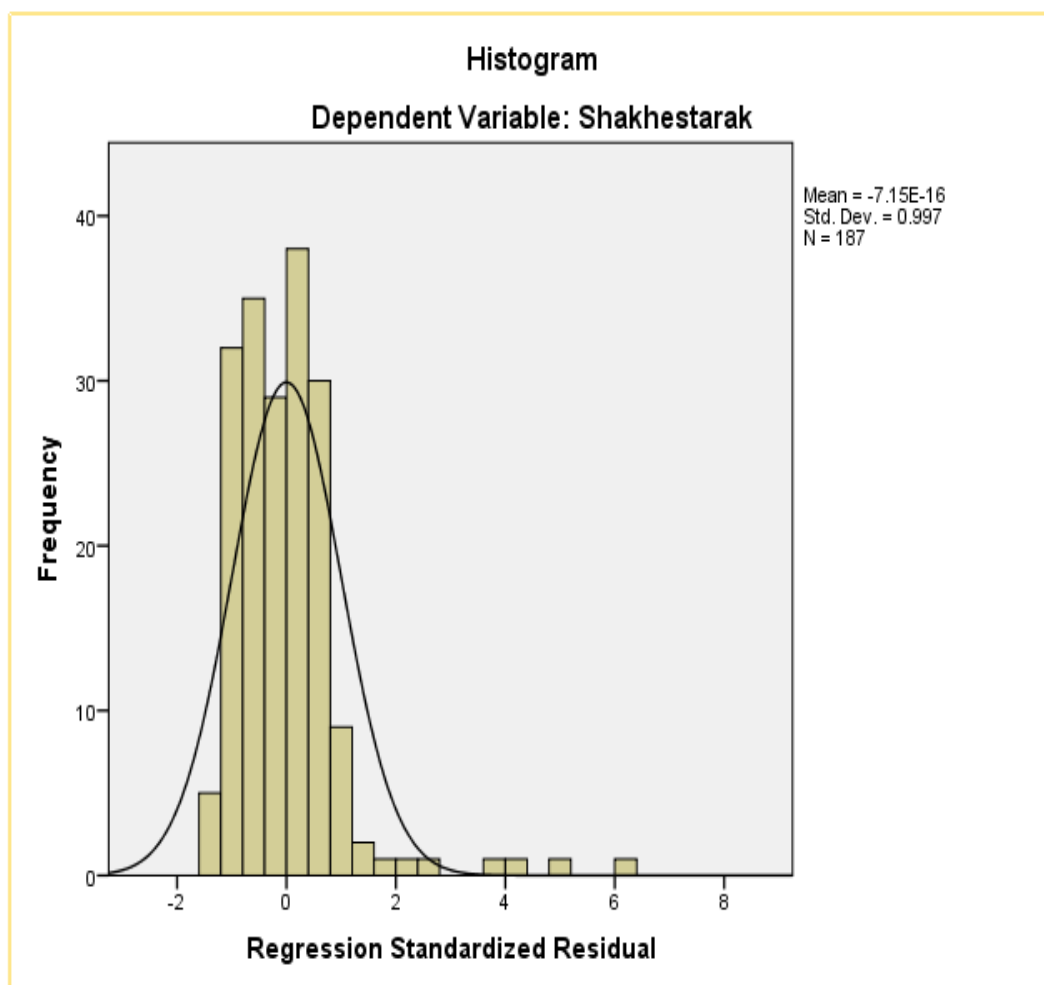
- رگرسیون خطی بر اساس حداقل دما

در این رابطه، CI شاخص ترک خوردگی T_m حداقل دما بر حسب سانتی گراد و a, b ضرایب ثابت مدل می باشند. با توجه به نتایج مندرج در جدول این مدل به صورت فرمول زیر به دست می آید.

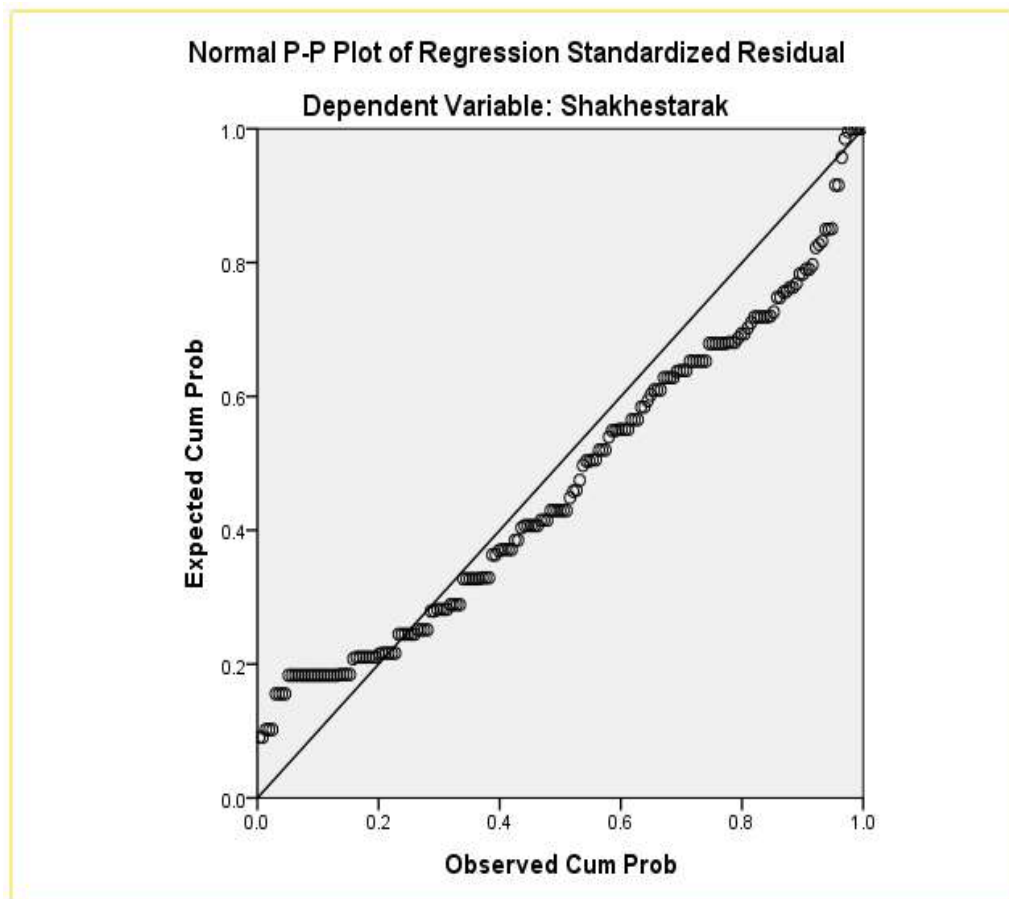
جدول ۴-۵. رگرسیون خطی بر اساس حداقل دما

a	b	R^2
3.09	-0.339	0.048

$$CI = 3.09T_m + (-0.339)$$



نمودار ۴-۹. توزیع داده‌ها بر اساس حداقل دما



نمودار ۴-۱۰. مدل رگرسیون خطی بر اساس حداقل دما

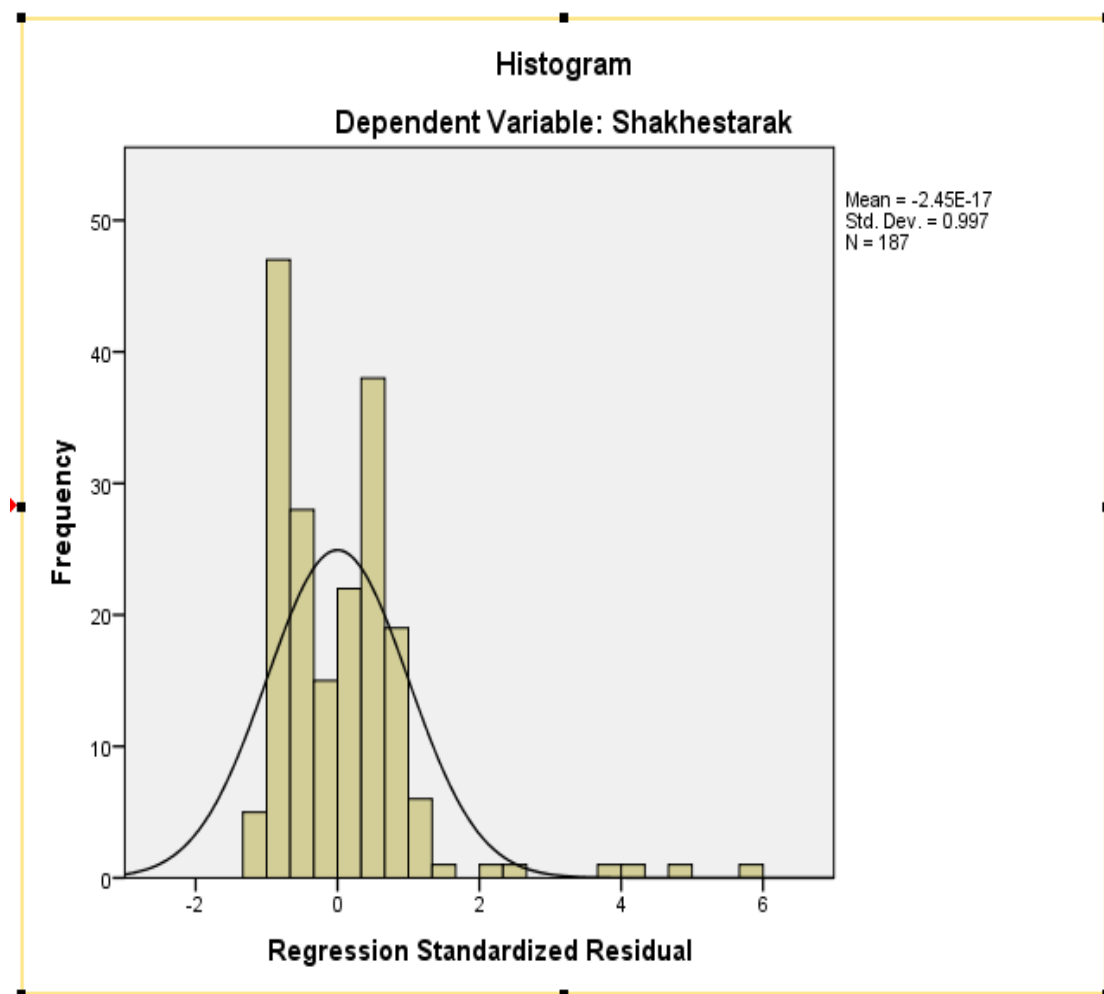
- رگرسیون خطی بر اساس تعداد روزهای یخبندان

در این رابطه، CI شاخص ترک خوردگی D تعداد روزهای یخبندان و a,b ضرایب ثابت مدل می‌باشند. با توجه به نتایج مندرج در جدول این مدل به صورت فرمول زیر به دست می‌آید.

جدول ۴-۶. رگرسیون خطی بر اساس تعداد روزهای یخبندان

a	b	R ²
4.37	0.013	0.009

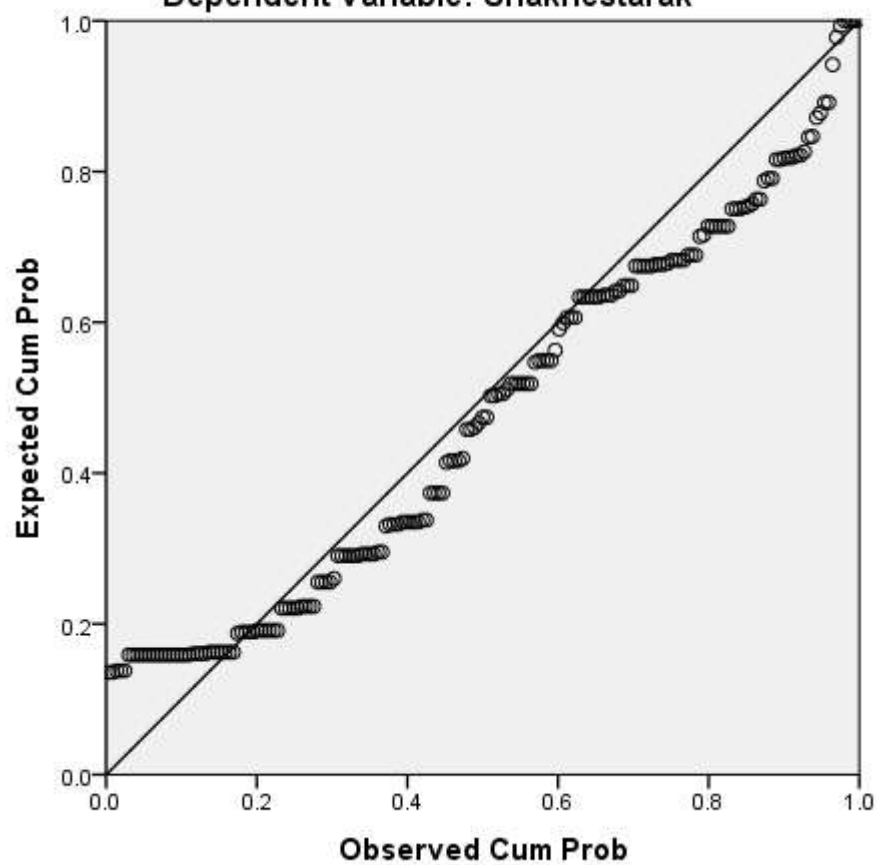
$$CI = 4.37D + 0.013$$



نمودار ۴-۱۱. توزیع داده‌ها بر اساس تعداد روزهای یخبندان

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual

Dependent Variable: Shakhestarak



نمودار ۴-۱۲. مدل رگرسیون خطی بر اساس تعداد روزهای یخبندان

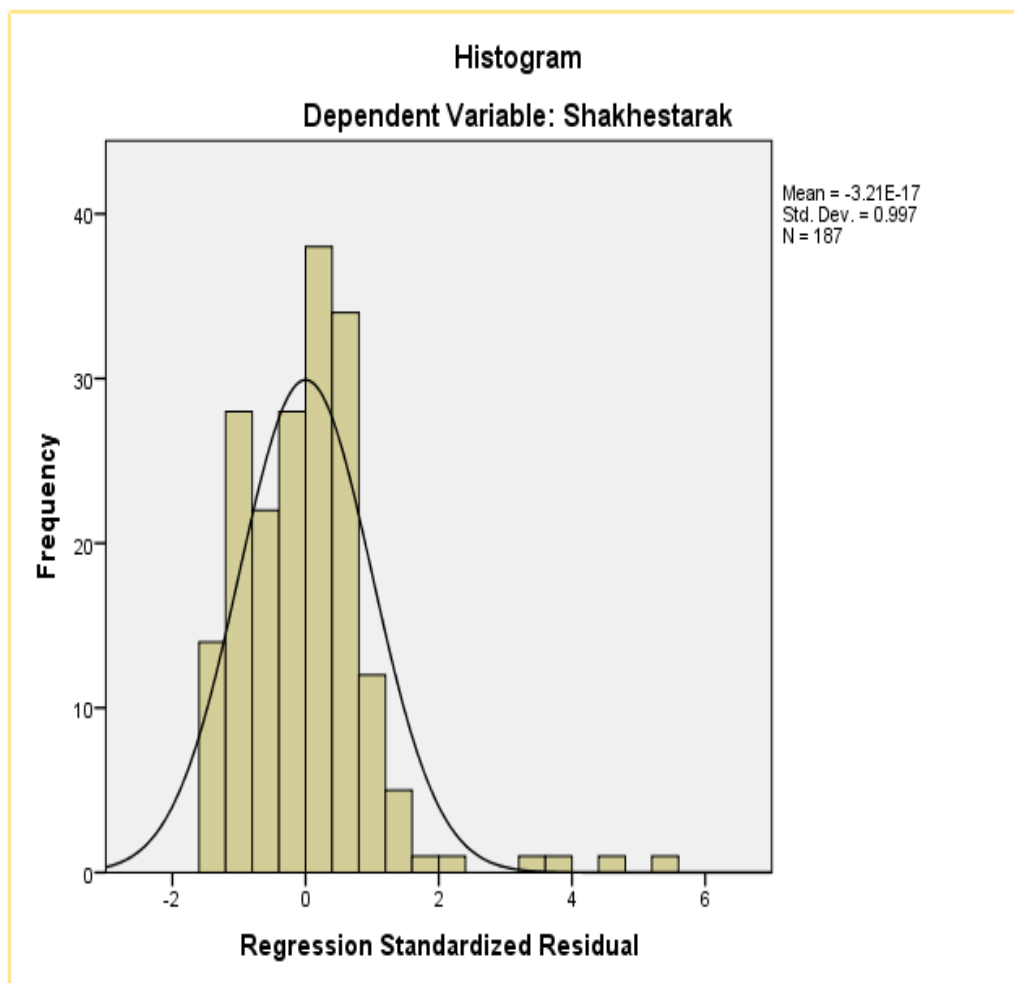
- رگرسیون خطی بر اساس ترافیک

در این رابطه، CI شاخص ترک خوردگی Tr ترافیک و a,b ضرایب ثابت مدل می‌باشند. با توجه به نتایج مندرج در جدول این مدل به صورت فرمول زیر به دست می‌آید.

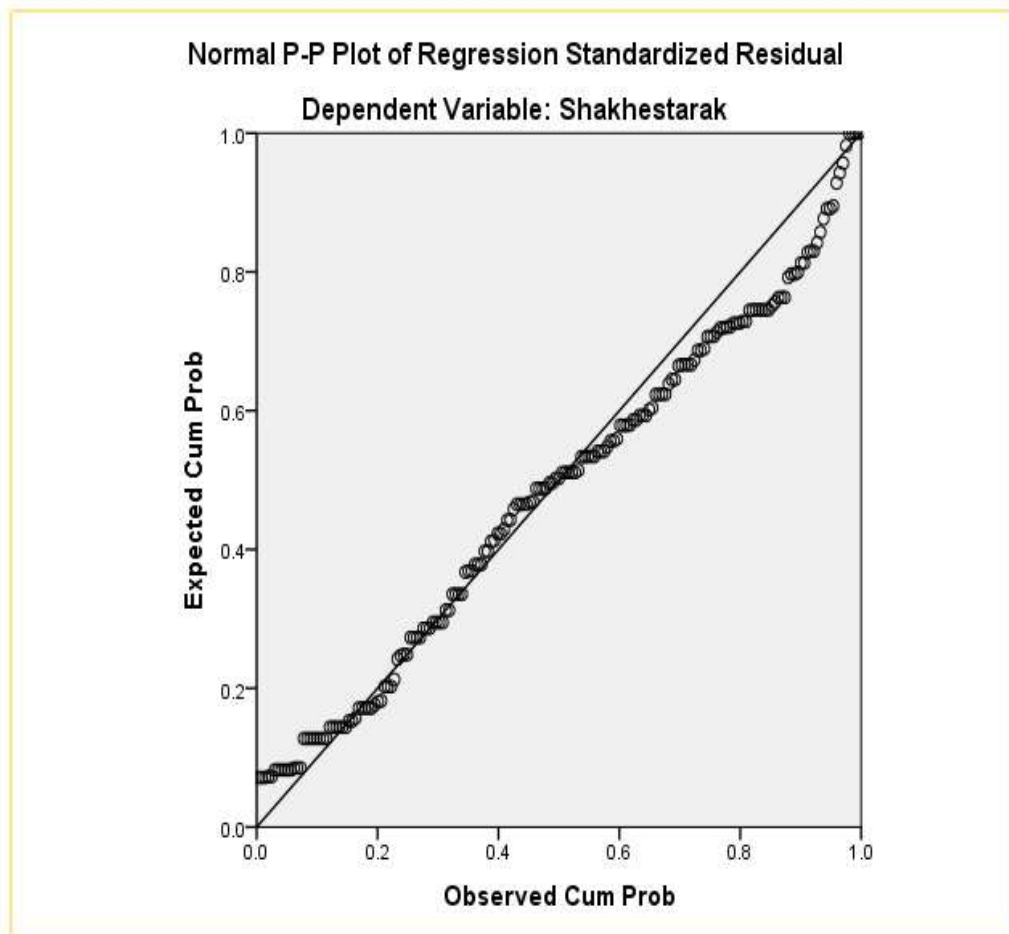
جدول ۴-۷. رگرسیون خطی بر اساس ترافیک

a	b	R ²
7.38	0.00	0.063

$$CI = 7.38Tr + 0.000$$



نمودار ۴-۱۳. توزیع داده‌ها بر اساس ترافیک



نمودار ۴-۱۴. مدل رگرسیون خطی بر اساس ترافیک

– رگرسیون درجه دو بر اساس عمر روسازی و حداقل دما

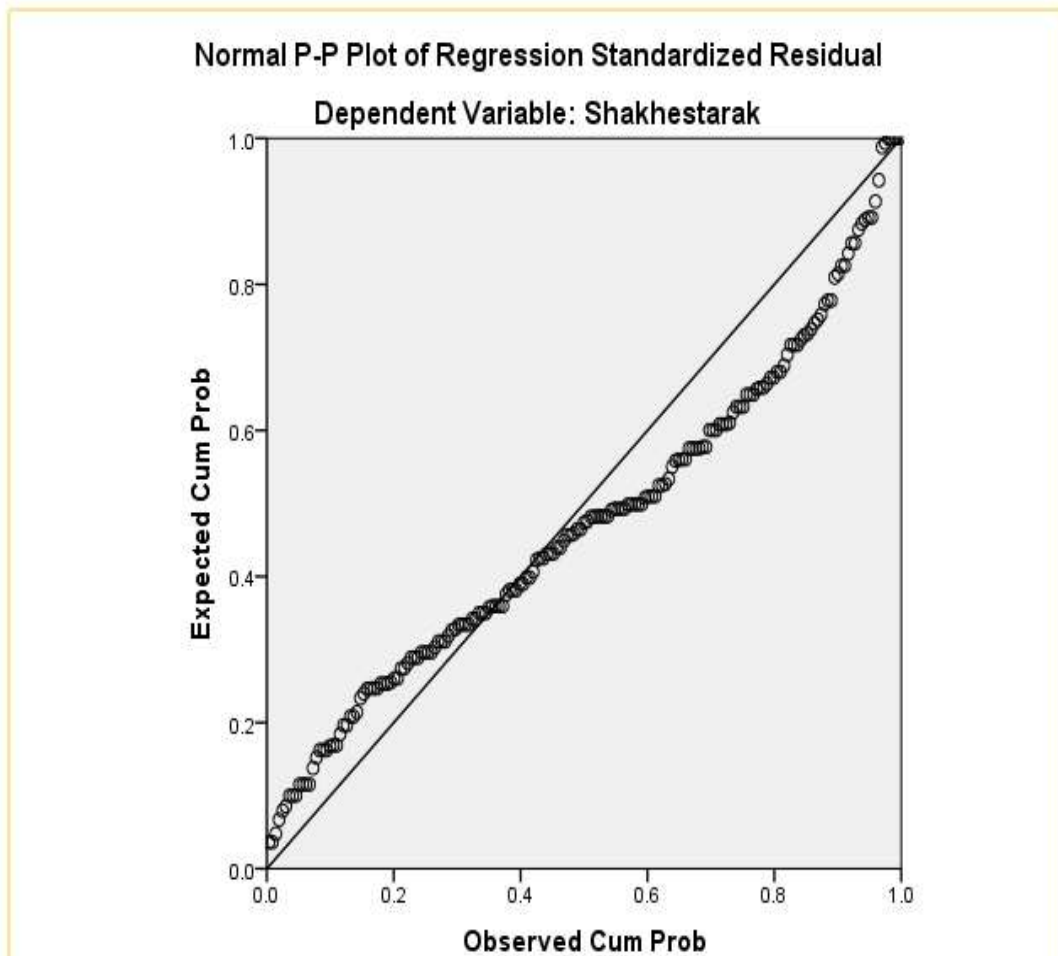
فرم کلی معادله درجه دو به صورت رابطه زیر می‌باشد، و در جدول ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است. نمودار شاخص ترک خوردگی بر حسب عمر روسازی را برای این تابع نشان می‌دهد. نقاط روی نمودار مقادیر ارزیابی شده توسط بازدید میدانی و خط ترسیم شده مدل درجه دو رگرسیون می‌باشد.

$$CI = a N^2 + b T_m + c \quad (۲-۴)$$

جدول ۴-۸: رگرسیون درجه دو بر اساس عمر روسازی و حداقل دما

a	b	c	R ²
-2.86	1.16	-0.667	0.250

$$CI = (-2.86)N^2 + 1.16T_m + (-0.667)$$



نمودار ۴-۱۵. مدل رگرسیون درجه دو برای عمر روسازی و حداقل دما

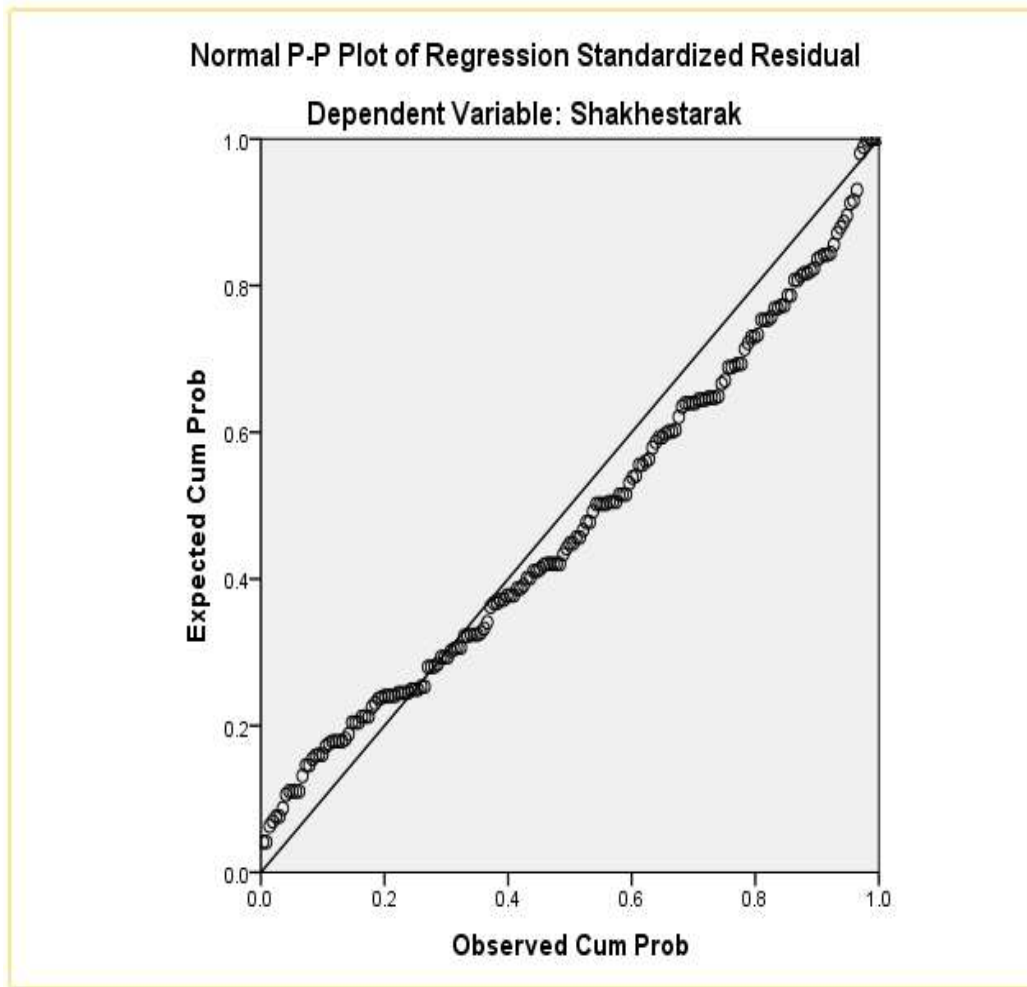
- رگرسیون درجه دو بر اساس عمر روسازی و تعداد روزهای یخبندان

فرم کلی معادله درجه دو به صورت رابطه زیر می‌باشد، و در جدول ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است.

جدول ۴-۹. رگرسیون درجه دو بر اساس عمر روسازی و تعداد روزهای یخبندان

a	b	c	R ²
-0.540	1.05	-0.039	0.169

$$CI = (-0.540)N^2 + 1.05D + (-0.039)$$



نمودار ۴-۱۶. مدل رگرسیون درجه دو برای عمر روسازی و تعداد روزهای یخبندان

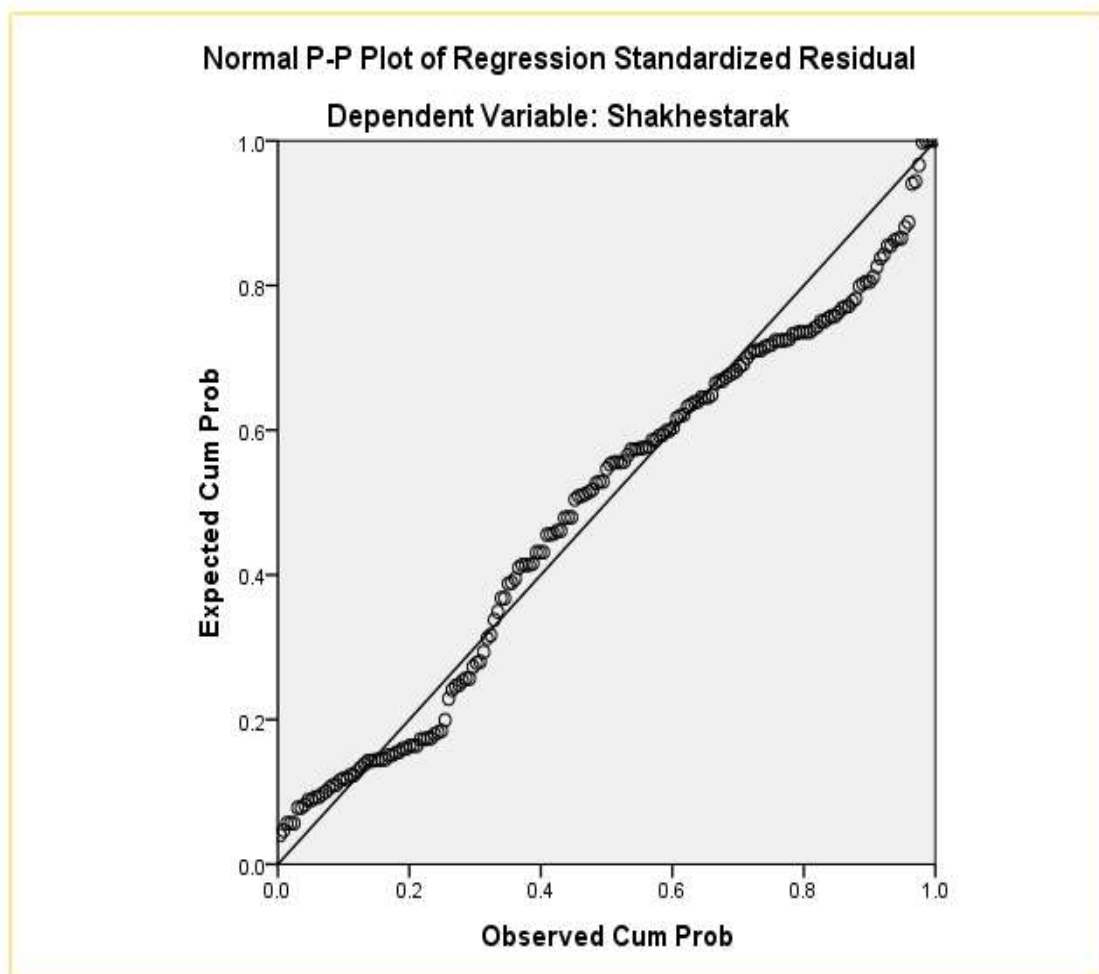
- رگرسیون درجه دو بر اساس عمر روسازی و ترافیک

فرم کلی معادله درجه دو به صورت رابطه زیر می‌باشد، و در جدول ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است.

جدول ۴-۱۰: رگرسیون درجه دو بر اساس عمر روسازی و ترافیک

a	b	c	R ²
4.66	0.686	0.000	0.147

$$CI = 4.66N^2 + 0.686Tr + 0.000$$



نمودار ۴-۱۷. مدل رگرسیون درجه دو برای عمر روسازی و ترافیک

طبق نمودارهای رسم شده برای معادله درجه دو مشاهده می‌شود، که نمودارها دارای شیب مثبت هستند. از طرفی، طبق نتیجه آزمون همبستگی پیرسون، شاخص ترک خوردگی و عمر روسازی دارای مقداری مثبت بوده و با افزایش عمر روسازی شاخص ترک خوردگی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، شیب مثبت در نمودارها منطقی بوده و به عنوان نقطه قوت این مدل محسوب می‌شود.

– رگرسیون درجه سه عمر روسازی و حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان

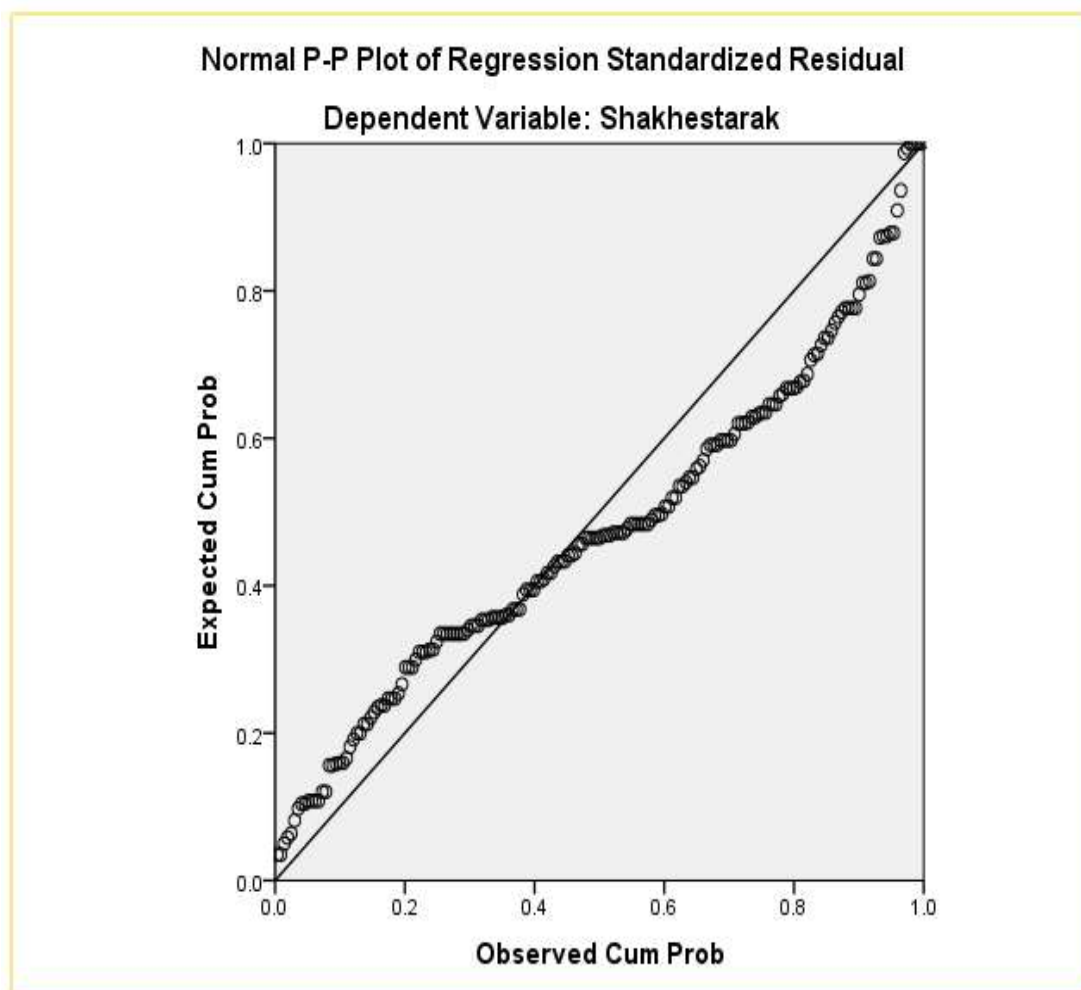
فرم کلی معادله درجه سه به صورت رابطه زیر می‌باشد، و در جدول زیر ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است.

$$CI = aN^3 + bTm^2 + cD + d \quad (4-4)$$

جدول ۴-۱۱. رگرسیون درجه سه بر اساس عمر روسازی و حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان

a	b	c	d	R ²
-2.92	1.11	-0.927	-0.027	0.261

$$CI = (-292)N^3 + (1.11)Tm^2 + (-0.927)D + (-0.027)$$



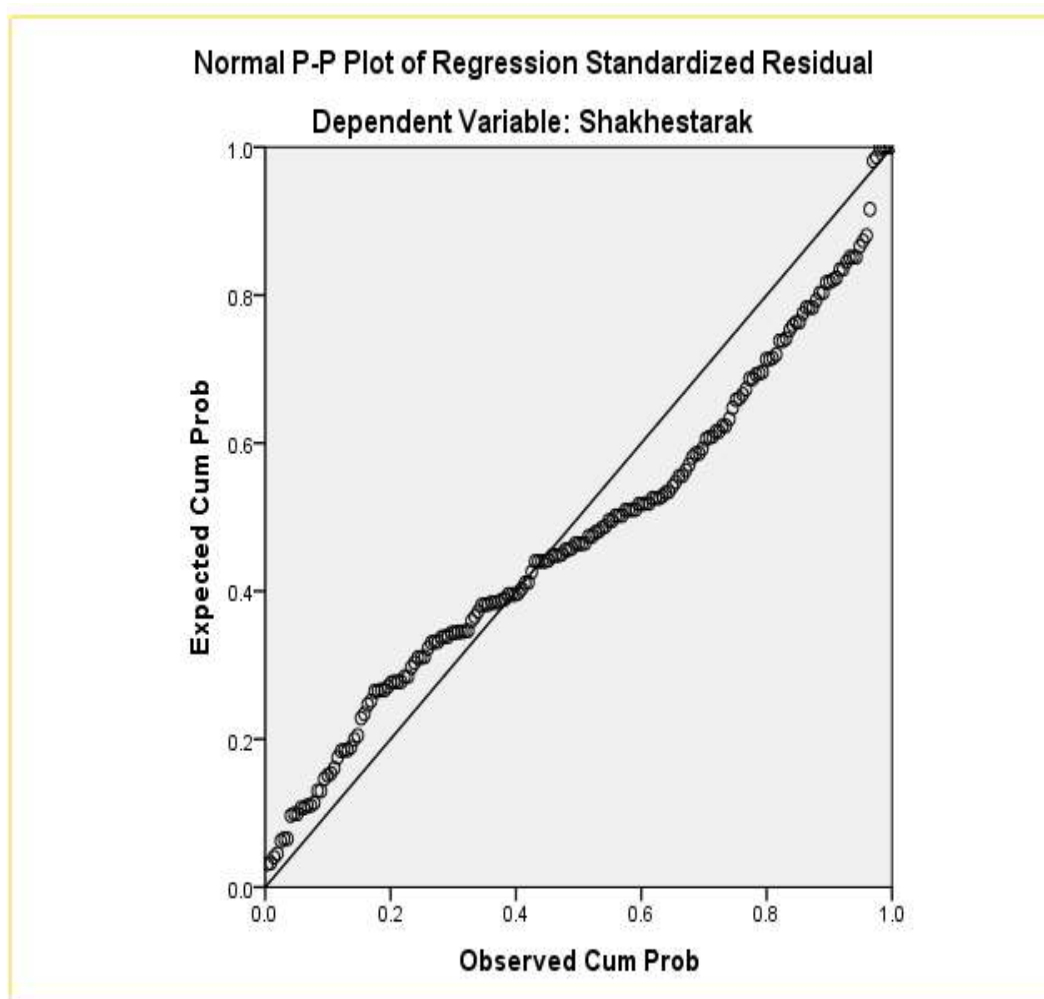
نمودار ۴-۱۸. مدل رگرسیون درجه سه برای روسازی و حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان

- رگرسیون درجه سه عمر روسازی و حداقل دما و ترافیک
در جدول زیر ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است.

جدول ۴-۱۲. رگرسیون درجه سه بر اساس عمر روسازی و حداقل دما و ترافیک

a	b	c	d	R ²
-0.345	1.14	-0.727	0.000	0.326

$$CI = (-0.345)N^3 + (1.14)Tm^2 + (-0.727)Tr + (0.000)$$



نمودار ۴-۱۹. مدل رگرسیون درجه سه برای عمر روسازی حداقل دما و ترافیک

- رگرسیون درجه چهار عمر روسازی و حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان و ترافیک

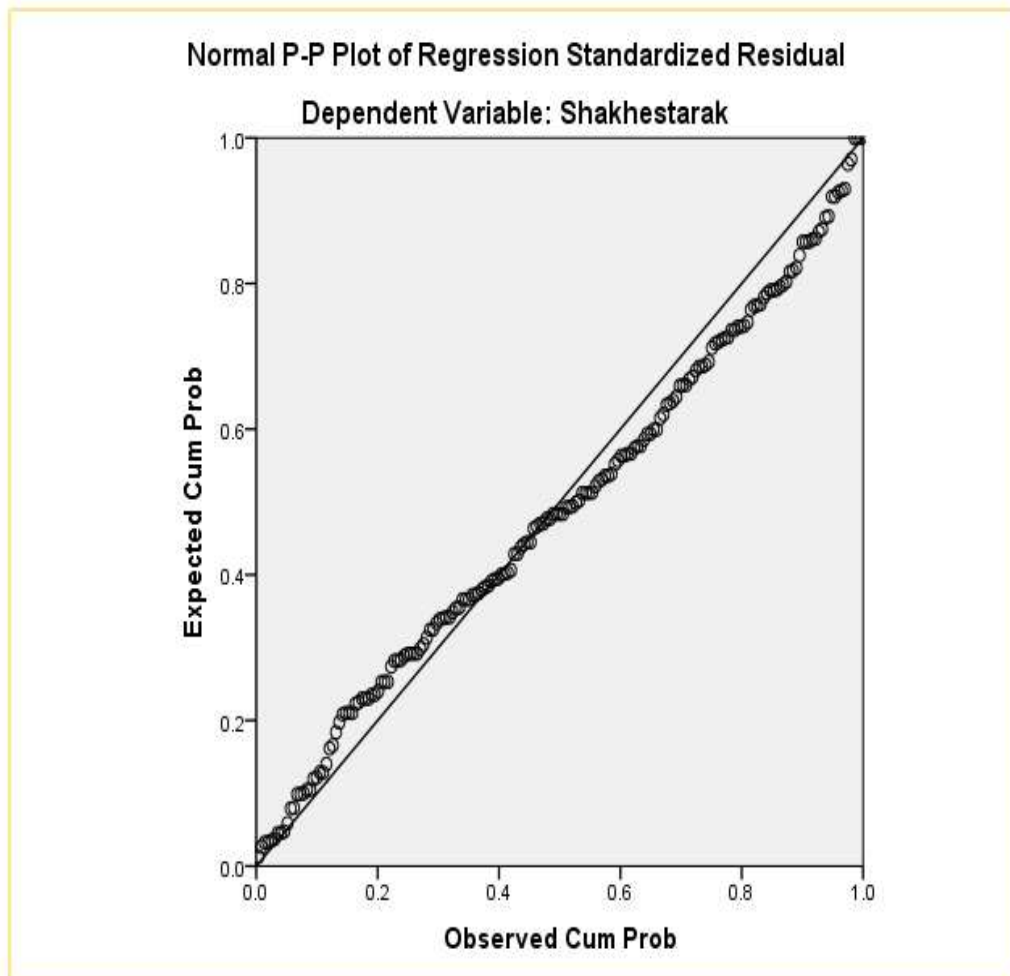
فرم کلی معادله درجه چهار به صورت رابطه زیر می‌باشد، و در جدول زیر ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است. نمودار نیز شاخص ترک خوردگی بر حسب عمر روسازی را برای این تابع نشان می‌دهد. نقاط روی نمودار مقادیر ارزیابی شده توسط بازدید میدانی و خط ترسیم شده در نمودار مدل درجه چهار رگرسیون می‌باشد.

$$CI = aN^4 + bTm^3 + cD^2 + dTr + e \quad (5-4)$$

جدول ۴-۱۳. رگرسیون درجه چهار بر اساس عمر روسازی حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان و ترافیک

a	b	c	d	e	R ²
12.15	1.72	2.41	0.35	-0.002	0.537

$$CI = 12.15N^4 + 1.72Tm^3 + 2.41D^2 + 0.35Tr + (-0.002)$$



نمودار ۴-۲۰. مدل رگرسیون درجه چهار برای عمر روسازی حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان و ترافیک

طبق نمودار رسم شده برای معادله درجه ۴ مشاهده می‌شود، که نمودار در انتها دارای شیب مثبت است. از طرفی، طبق نتیجه آزمون همبستگی اسپیرمن، شاخص ترک‌خوردگی و عمر روسازی دارای مقداری مثبت بوده و با افزایش عمر روسازی شاخص ترک‌خوردگی نیز افزایش می‌یابد.

- رگرسیون لوگاریتمی

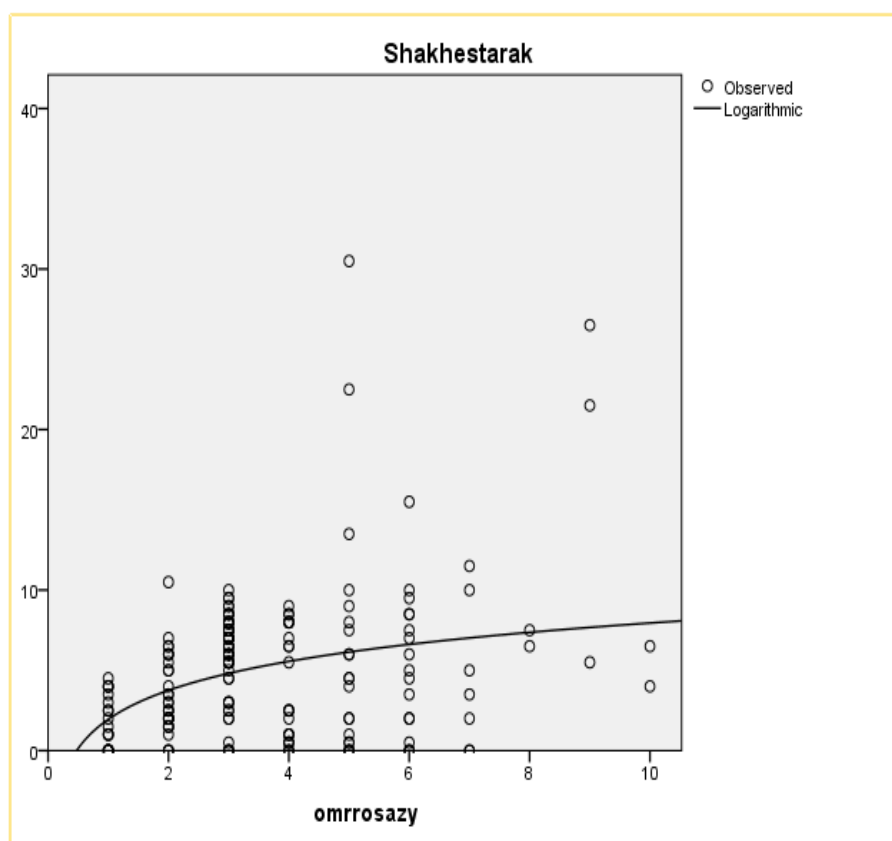
در جدول زیر ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است. نمودار زیر نیز شاخص ترک‌خوردگی بر حسب عمر روسازی را برای این تابع نشان می‌دهد. نقاط روی نمودار مقادیر ارزیابی شده توسط بازدید میدانی و خط ترسیم شده مدل لگاریتمی رگرسیون می‌باشد. با توجه به نتایج مندرج در جدول این مدل به صورت فرمول زیر به دست می‌آید.

$$CI = \ln aN + b \quad (۴-۶)$$

جدول ۴-۱۴. رگرسیون لگاریتمی

a	b	R ²
1.94	2.60	0.110

$$CI = \ln 1.94N + 2.60$$



نمودار ۴-۲۱. مدل رگرسیون لگاریتمی

- رگرسیون غیر خطی

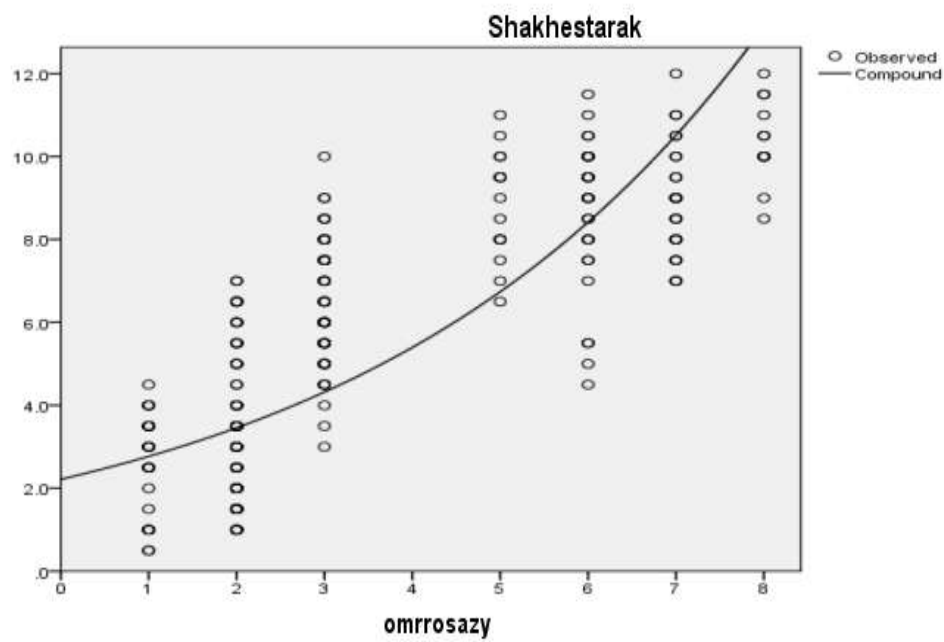
فرم کلی معادله غیر خطی به صورت رابطه زیر می‌باشد، و در جدول زیر ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است. نمودار زیر نیز شاخص ترک خوردگی بر حسب عمر روسازی را برای این تابع نشان می‌دهد. نقاط روی نمودار مقادیر ارزیابی شده توسط بازدید میدانی و خط ترسیم شده مدل غیرخطی رگرسیون می‌باشد.

$$CI = a \cdot N^b \quad (۴-۶)$$

جدول ۴-۱۵. رگرسیون غیر خطی

a	b	R ²
2.597	0.525	0.104

$$CI = 2.597.N^{0.525}$$



نمودار ۴-۲۲. مدل رگرسیون غیر خطی

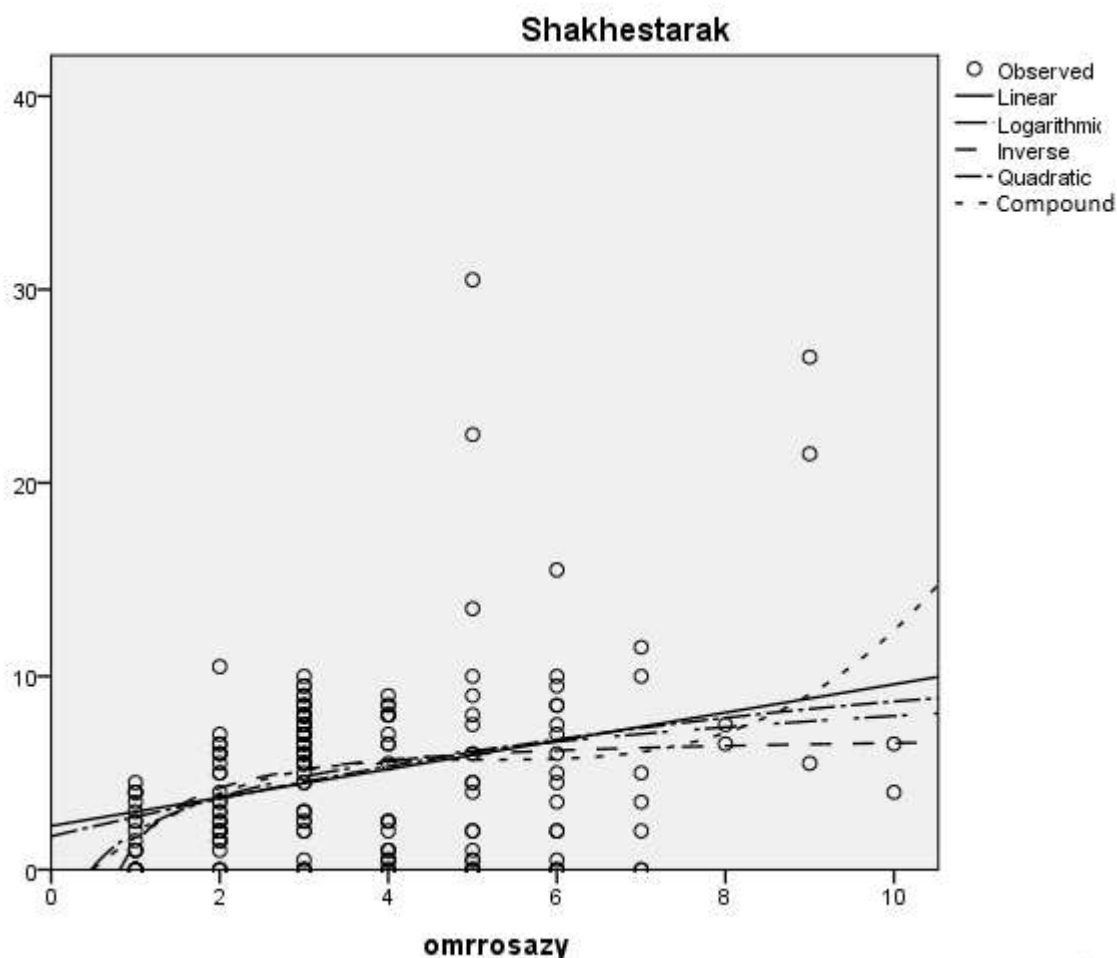
۴-۵ جمع بندی نتایج

۴-۵-۱ مقایسه‌ی مدل‌ها

جدول ۴-۱۶. مقایسه‌ی مدل‌های انجام شده

متغیر	مدل	معادله	R^2	معادلات محاسبه شده
عمرروسازی	خطی	$CI = at + b$	0.097	$CI = 2.26N + 0.732$
حداقل دما			0.048	$CI = 3.09Tm + (-0.339)$
تعداد روزهای یخبندان			0.009	$CI = 4.37D + 0.013$
ترافیک			0.063	$CI = 7.38Tr + 0.00$
عمرروسازی و حداقل دما	درجه دو	$CI = at^2 + bt + c$	0.250	$CI = (-2.86)N^2 + 1.16Tm + (-0.667)$
عمر روسازی و تعداد روزهای یخبندان			0.169	$CI = (-0.540)N^2 + 1.05D + (-0.039)$
عمر روسازی و ترافیک			0.147	$CI = 4.66N^2 + 0.686Tr + 0.000$
عمر روسازی و حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان	درجه سه	$CI = at^3 + bt^2 + ct + d$	0.261	$CI = (-2.92)N^3 + (1.11)Tm^2 + (-0.927)D + (-0.027)$
عمر روسازی و حداقل دما و ترافیک			0.326	$CI = (-345)N^3 + (1.14)Tm^2 + (-0.727)Tr + (0.000)$
عمر روسازی حداقل دما و تعداد روزهای یخبندان و ترافیک	درجه چهار	$CI = at^4 + bt^3 + ct^2 + dt + e$	0.537	$CI = 12.15N^4 + 1.72Tm^3 + 2.41D^2 + 0.35Tr + (-0.002)$
ترک خوردگی بر حسب عمر روسازی	لگاریتمی	$CI = \ln at + b$	0.110	$CI = \ln 1.94N + 2.60$
ترک خوردگی بر حسب عمر روسازی	غیر خطی	$CI = a \cdot N^b$	0.104	$CI = 2.597 \cdot N^{0.525}$

طبق نتایج به دست آمده از مدلسازی رگرسیون برای متغیرهای مورد نظر، مشاهده می‌شود که مدل درجه چهار به دلیل داشتن بیشترین مقدار رگرسیون ($R^2=0.537$) دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد.



نمودار ۴-۲۳. مقایسه‌ی مدل‌های رگرسیون

در این پژوهش به دلیل اینکه مقدار R^2 بالایی انتظار می‌رود جاده‌های مورد نظر را به دو خانواده تقسیم و با استفاده از روش مدل خانواده و از آنجایی که شرط اصلی استفاده از مدل خانواده این است که محورهای مورد نظر از نظر شرایط آب و هوایی یکسان بوده و در یک خانواده قرار بگیرند. بنابراین استان کرمان به عنوان خانواده (۱) و محور هراز به عنوان خانواده (۲) تقسیم می‌شوند. سپس نمودار خطی، درجه ۲، لگاریتمی و غیرخطی برای هر خانواده ترسیم می‌شود.

۴-۶ مدل سازی با روش رگرسیون

فرم کلی معادله خطی به صورت رابطه زیر می‌باشد، و در جدول ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است. نمودار زیر نیز شاخص ترک خوردگی بر حسب عمر روسازی را نشان می‌دهد. نقاط روی نمودار مقادیر ارزیابی شده توسط بازدید میدانی و خط ترسیم شده مدل خطی رگرسیون می‌باشد.

$$CI = aN + b$$

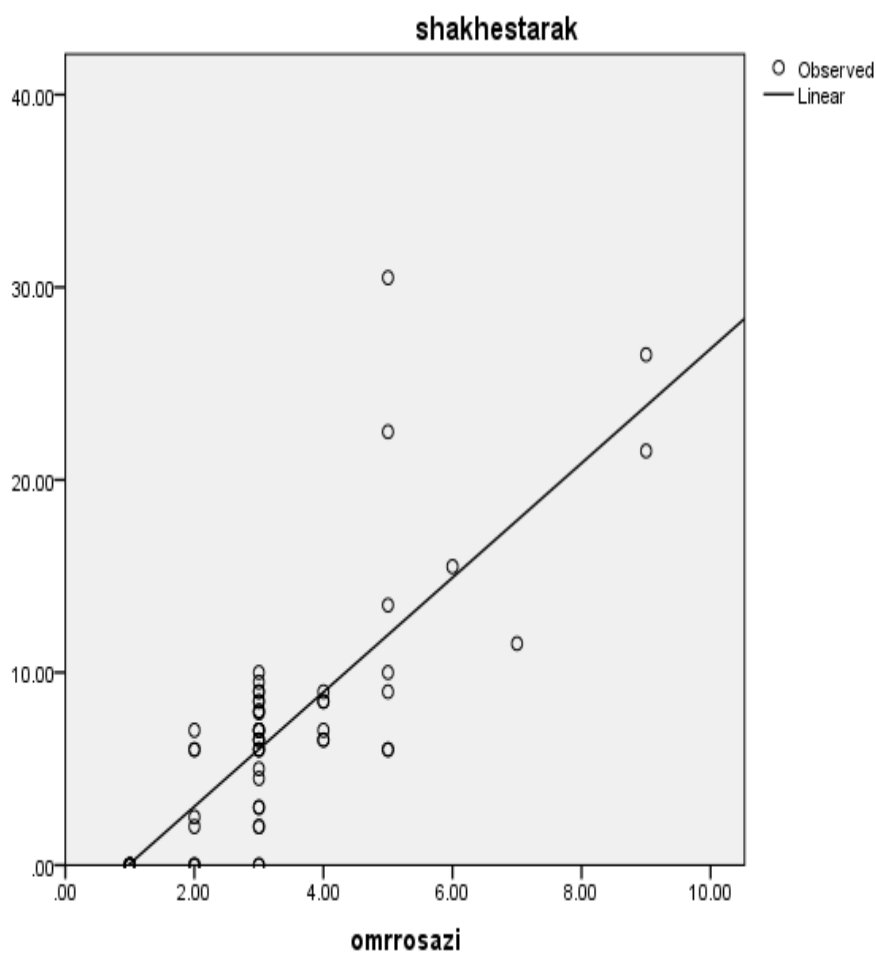
۴-۶-۱ رگرسیون خطی برای خانواده (۱)

در این رابطه، CI شاخص ترک خوردگی و N عمر روسازی برحسب سال و b، ضرایب ثابت مدل می‌باشند. با توجه به نتایج مندرج در جداول این مدل به صورت فرمول زیر به دست می‌آید.

جدول ۴-۱۷. رگرسیون خطی بر اساس عمر روسازی

a	b	R ²
-2.89	2.97	0.635

$$CI = -2.89 N + 2.97$$



نمودار ۴-۲۴. مدل رگرسیون خطی

۴-۶-۲ رگرسیون درجه ۲ برای خانواده (۱)

فرم کلی معادله خطی به صورت رابطه زیر می‌باشد و در جدول ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است.

جدول ۴-۱۸. رگرسیون درجه دو بر اساس عمر روسازی و ترافیک

a	b	c	R ²
4.66	2.964	-0.02	0.663

$$CI = 4.66 N^2 + 2.964Tr + (-0.02)$$

۴-۶-۳ رگرسیون لوگاریتمی برای خانواده (۱)

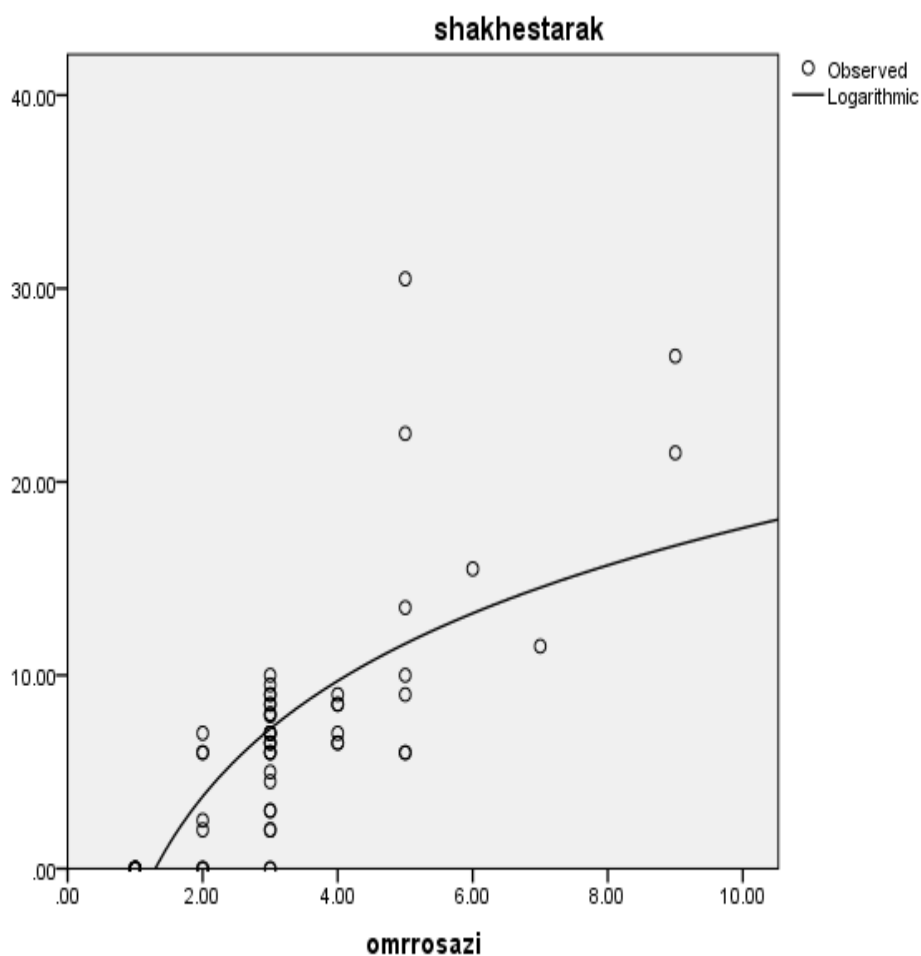
در جدول زیر ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است. نمودار زیر نیز شاخص ترک خوردگی بر حسب عمر روسازی را برای این تابع نشان می‌دهد. نقاط روی نمودار مقادیر ارزیابی شده توسط بازدید میدانی و خط ترسیم شده مدل لگاریتمی رگرسیون می‌باشد. با توجه به نتایج مندرج در جدول این مدل به صورت فرمول زیر به دست می‌آید.

$$CI = \ln aN + b$$

جدول ۴-۱۹. رگرسیون لوگاریتمی بر اساس عمر روسازی

a	b	R ²
-2.255	8.629	0.555

$$CI = \ln - 2.255N + 8.629$$



نمودار ۴-۲۵. مدل رگرسیون لگاریتمی

۴-۶-۴ رگرسیون غیر خطی برای خانواده (۱)

فرم کلی معادله غیر خطی به صورت رابطه زیر می‌باشد، و در جدول زیر ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است.

$$CI = a(N^b) + c \text{ Tr} \quad (۷-۴)$$

جدول ۴-۲۰. رگرسیون غیرخطی بر اساس عمر روسازی و ترافیک

a	b	c	R ²
5.058	0.787	-0.001	0.660

$$CI = 5.058(N^{0.787}) + (-0.001 \text{ Tr})$$

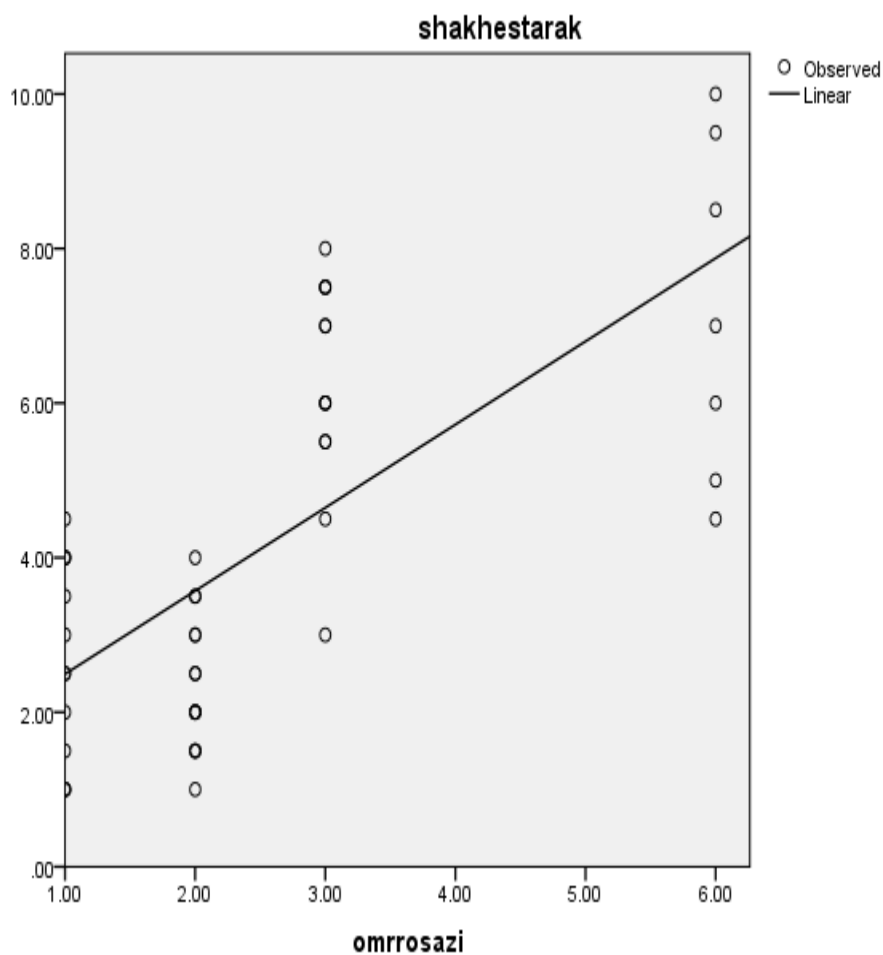
۴-۶-۵ رگرسیون خطی برای خانواده (۲)

در این رابطه، CI شاخص ترک خوردگی و N عمر روسازی برحسب سال و b، a ضرایب ثابت مدل می‌باشند. با توجه به نتایج مندرج در جداول این مدل به صورت فرمول زیر به دست می‌آید.

جدول ۴-۲۱: رگرسیون خطی بر اساس عمر روسازی

a	b	R ²
1.417	1.076	0.501

$$CI = 1.417 N + 1.076$$



نمودار ۴-۲۶. مدل رگرسیون خطی

۴-۶-۶ رگرسیون درجه ۲ برای خانواده (۲)

فرم کلی معادله خطی به صورت رابطه زیر می‌باشد، و در جدول ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است.

جدول ۴-۲۲. رگرسیون لوگاریتمی بر اساس عمر روسازی

a	b	c	R ²
-6.172	1.037	0.001	0.507

$$CI = -6.172 N^2 + 1.037Tr + 0.001$$

۴-۶-۷ رگرسیون لوگاریتمی برای خانواده (۲)

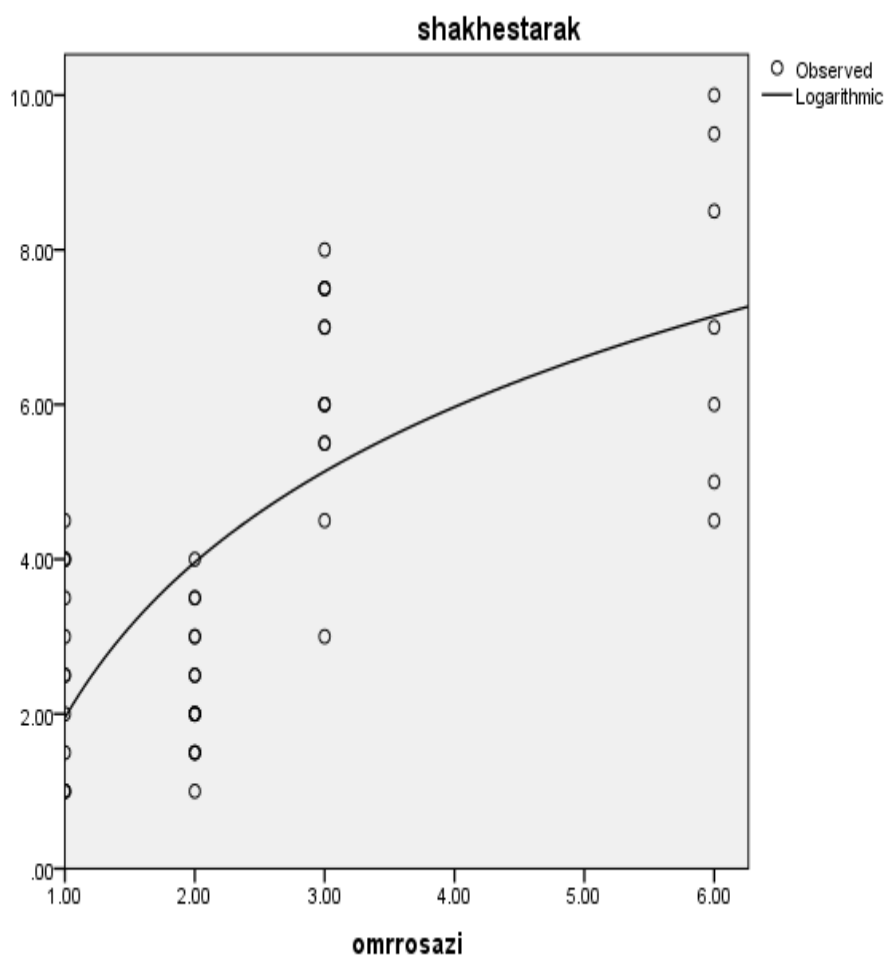
در جدول زیر ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است. نمودار زیر نیز شاخص ترک خوردگی بر حسب عمر روسازی را برای این تابع نشان می‌دهد. نقاط روی نمودار مقادیر ارزیابی شده توسط بازدید میدانی و خط ترسیم شده مدل لگاریتمی رگرسیون می‌باشد. با توجه به نتایج مندرج در جدول این مدل به صورت فرمول زیر به دست می‌آید.

$$CI = \ln aN + b$$

جدول ۴-۲۳. رگرسیون غیر خطی بر اساس عمر روسازی و ترافیک

a	b	R ²
1.951	2.897	0.492

$$CI = \ln 1.951N + 2.897$$



نمودار ۴-۲۷. مدل رگرسیون لوگاریتمی

۴-۶-۸ رگرسیون غیر خطی برای خانواده (۲)

فرم کلی معادله غیر خطی به صورت رابطه زیر می‌باشد، و در جدول زیر ضرایب و معیارهای ارزیابی برای این معادله ارائه شده است.

$$CI = a(N^b) + c \text{ Tr}$$

جدول ۴-۲۴. مقایسه‌ی مدل‌های انجام شده خانواده (۱)

a	b	c	R ²
-17.352	-0.177	0.001	0.506

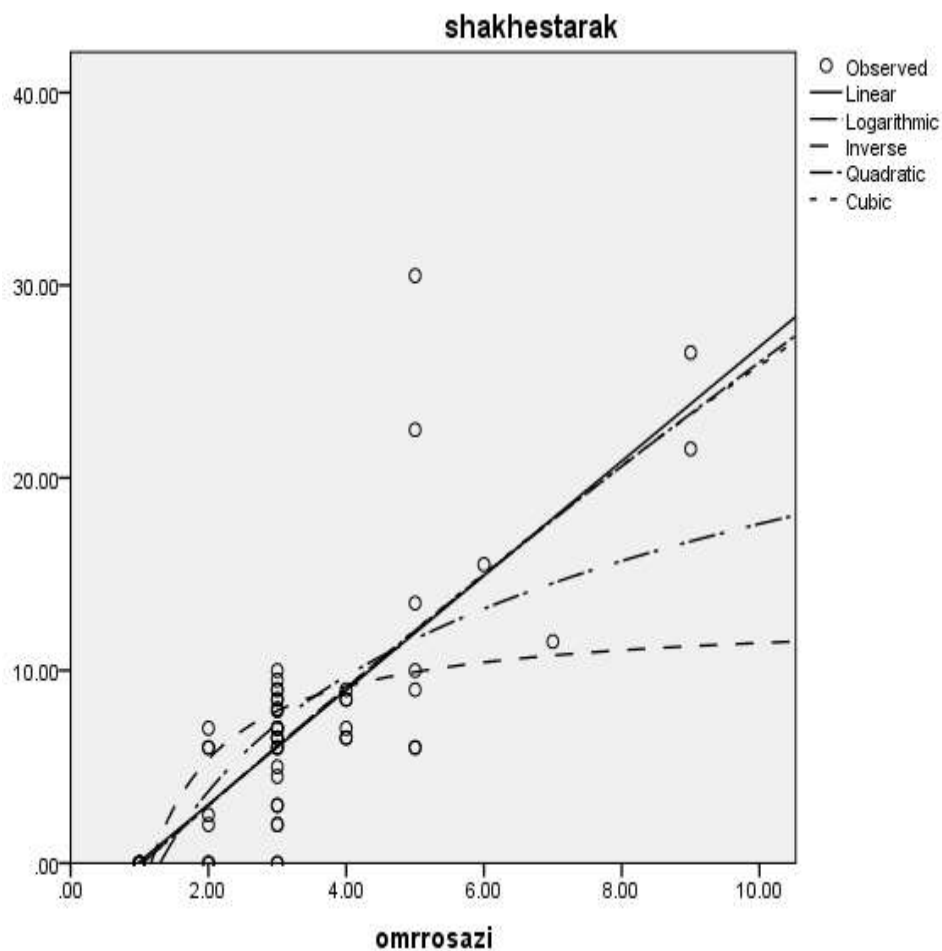
$$CI = -17.352(N^{-0.177}) + (0.001 \text{ Tr})$$

۷-۴ جمع بندی نتایج

۱-۷-۴ مقایسه مدل ها (خانواده ۱)

جدول ۴-۲۴. مقایسه‌ی مدل‌های انجام شده خانواده (۱)

ردیف	مدل	معادله	R^2
1	خطی	$CI = -2.89 N + 2.97$	0.635
2	درجه ۲	$CI = 4.66 N^2 + 2.964 Tr + (-0.02)$	0.663
3	لگاریتمی	$CI = \ln -2.255N + 8.629$	0.555
4	غیر خطی	$CI = 5.058(N^{0.787}) + (-0.001 Tr)$	0.660



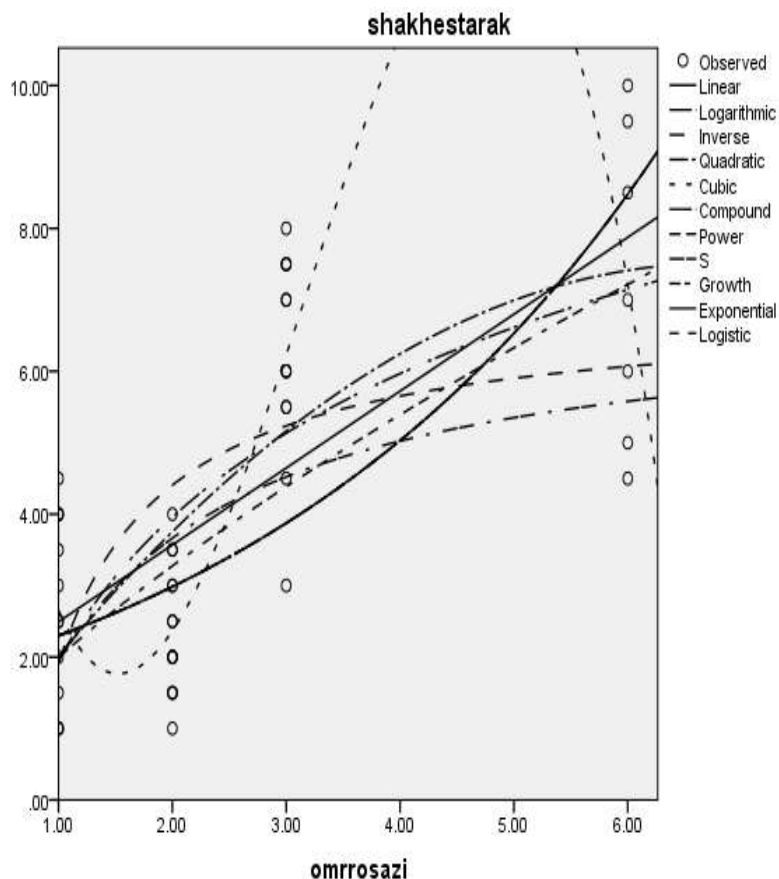
نمودار ۴-۲۸. مقایسه‌ی مدل‌های رگرسیون

طبق نتایج به دست آمده از مدلسازی رگرسیون برای متغیرهای خانواده (۱)، مشاهده می‌شود که مدل درجه دو به دلیل داشتن بیشترین مقدار ضریب همبستگی ($R^2=0.663$) دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

۴-۷-۲ مقایسه مدل‌ها (خانواده ۲)

جدول ۴-۲۵. مقایسه‌ی مدل‌های انجام شده خانواده (۲)

ردیف	مدل	معادله	R^2
1	خطی	$CI = 1.417 N + 1.076$	0.501
2	درجه دو	$CI = -6.172 N^2 + 1.037 Tr + 0.001$	0.507
3	لگاریتمی	$CI = \ln 1.951 N + 2.897$	0.492
4	غیرخطی	$CI = -17.352(N^{-0.177}) + 0.001 Tr$	0.506



نمودار ۴-۲۹. مقایسه‌ی مدل‌های رگرسیون

طبق نتایج به دست آمده از مدلسازی رگرسیون برای متغیرهای خانواده (۲)، مشاهده می‌شود که مدل درجه دو به دلیل داشتن بیشترین مقدار ضریب همبستگی ($R^2=0.507$) دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

در اینجا به جمع‌بندی کلی و نتیجه‌گیری پژوهش در دو حوزه علمی و کاربردی به همراه دلایل کافی برای هر کدام از یافته‌ها و تغییرات به وجود آمده، اقدام می‌شود. در نهایت جهت ایجاد زمینه انجام مطالعات آتی، این قسمت با ارائه پیشنهادهای علمی و عملی و راهکارها و پیشنهادات برای تحقیقات آتی در این حوزه، به پایان می‌رسد. در این پژوهش به پیش‌بینی شاخص ترک خوردگی ترک‌های برودتی آسفالت پرداخته شد، و عواملی نظیر: حداقل دما، تعداد روزهای یخبندان، ترافیک، که در وقوع این ترک‌ها موثر هستند، شرح داده شد.

۵-۲ خلاصه پژوهش

برای پیش‌بینی شاخص ترک خوردگی با بازدید از محورهای مورد نظر در پژوهش (جیرفت- بندرعباس و جیرفت- کرمان و جیرفت - بافت و شاهرود - دامغان و مسیر هراز)، تعداد ترک‌های برودتی که شامل: ترک‌های جزئی، نیمه و کامل و همچنین کامل به همراه ریز اطراف می‌باشند، در هر کیلومتر از مسیرهای رفت و برگشت شمارش و جمع‌آوری شدند. لازم به ذکر است که ترک‌های جزئی در محاسبات و مدلسازی در نظر گرفته نمی‌شوند. تصاویری نیز از محورهای فوق تهیه گردید، که در این تصاویر ترک‌های برودتی و خرابی‌های دیگر از جمله: ترک‌های طولی، بلوکی، پوست سوسماری و... قابل مشاهده هستند. تحلیل و مدلسازی طبق شاخص‌های ترک خوردگی محاسبه شده و عمرهای روسازی جمع‌آوری شده در هر کیلومتر از محورهای مورد نظر و با استفاده از نرم‌افزار spss انجام می‌شود. در ادامه داده‌های مربوط به شاخص ترک خوردگی و عمر روسازی برای نرم افزار تعریف می‌گردد و نمودارهایی از جمله: نمودار خطی، رگرسیون درجه ۳، ۲ و ۴ و لگاریتمی و غیرخطی بر اساس این داده‌ها ترسیم گردید.

از این رو با توجه به بررسی‌های انجام شده، مهمترین محدودیت‌های پژوهش، عدم دسترسی به تعداد بیشتری از داده‌ها و کمبود هزینه و زمان بابت بررسی کامل تمامی عوامل اثرگذار بر شاخص‌های ترک خوردگی و احتمال وجود خطا در محاسبات آماری به دست آمده می‌باشند.

۵-۳ نتیجه حاصل از پژوهش

در این پژوهش نتایج زیر به طور خلاصه به دست آمد.

- محورهای مورد بررسی از لحاظ شرایط آب و هوایی به عنوان عامل ایجاد کننده ترک در این پژوهش بوده است.

- طبق آزمون همبستگی اسپیرمن و رابطه داشتن آن برای هر دو متغیر، می توان گفت که همه متغیرها که در این پژوهش، عمر روسازی، شاخص ترک خوردگی، حداقل دما، تعداد روزهای یخبندان و ترافیک می باشند، با یکدیگر رابطه داشته و مهم تر از همه با افزایش عمر روسازی، شاخص ترک خوردگی نیز افزایش می یابد.

- طبق بررسی ها و خروجی های نرم افزار مورد استفاده در پژوهش، نتایج به دست آمده از مدلسازی رگرسیون برای هر دو خانواده، مشاهده می شود که مدل درجه دو به دلیل داشتن بیشترین مقدار ضریب همبستگی در خانواده اول ($R^2=0.663$) و در خانواده دوم مقدار رگرسیون ($R^2=0.507$) می باشند.

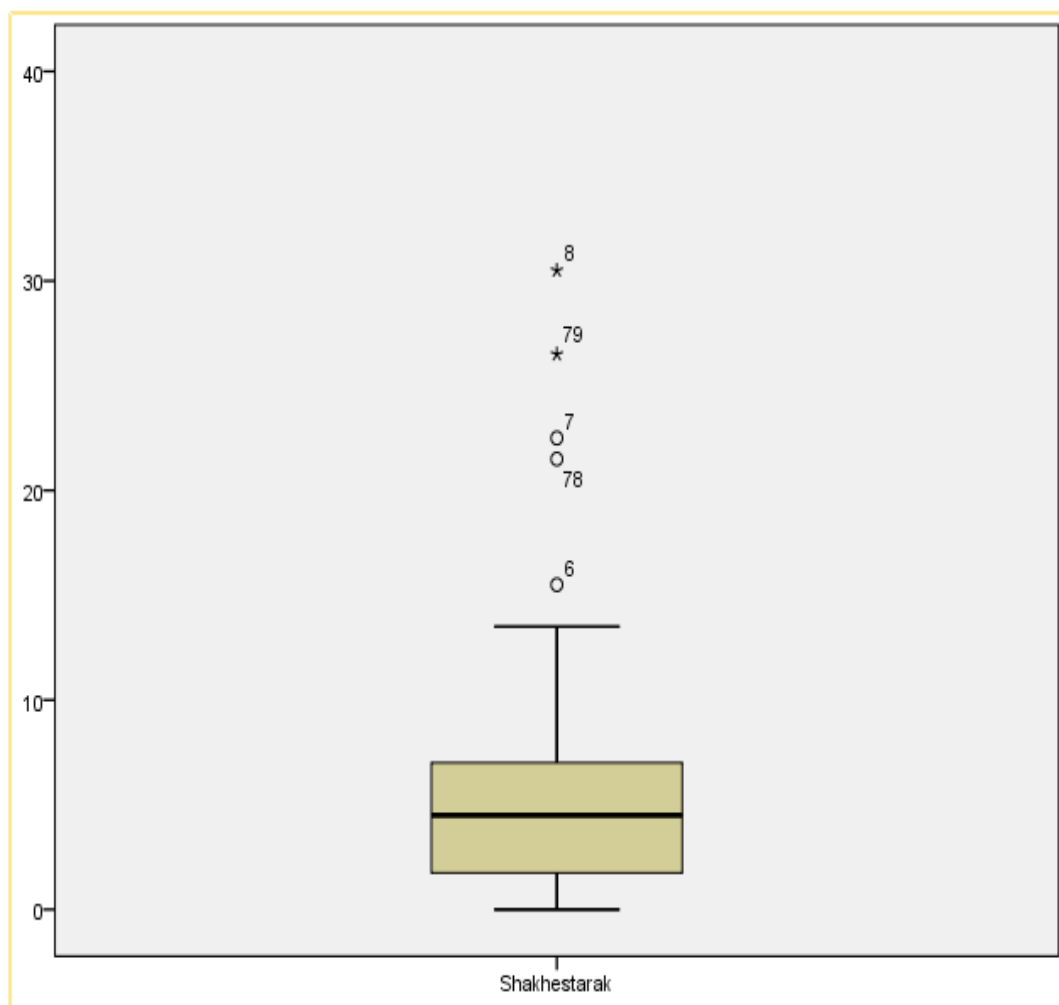
۵-۴ پیشنهادها برای تحقیقات آتی

- همچنین پیشنهاد می شود پژوهشگران از سایر نرم افزارهای معادلات ساختاری در پژوهش خود بهره ببرند.

- پیشنهاد می شود ترکیبی از این عوامل با دیگر عوامل تاثیر گذار در زمینه شاخص های ترک خوردگی در پژوهش های دیگر بررسی گردد.

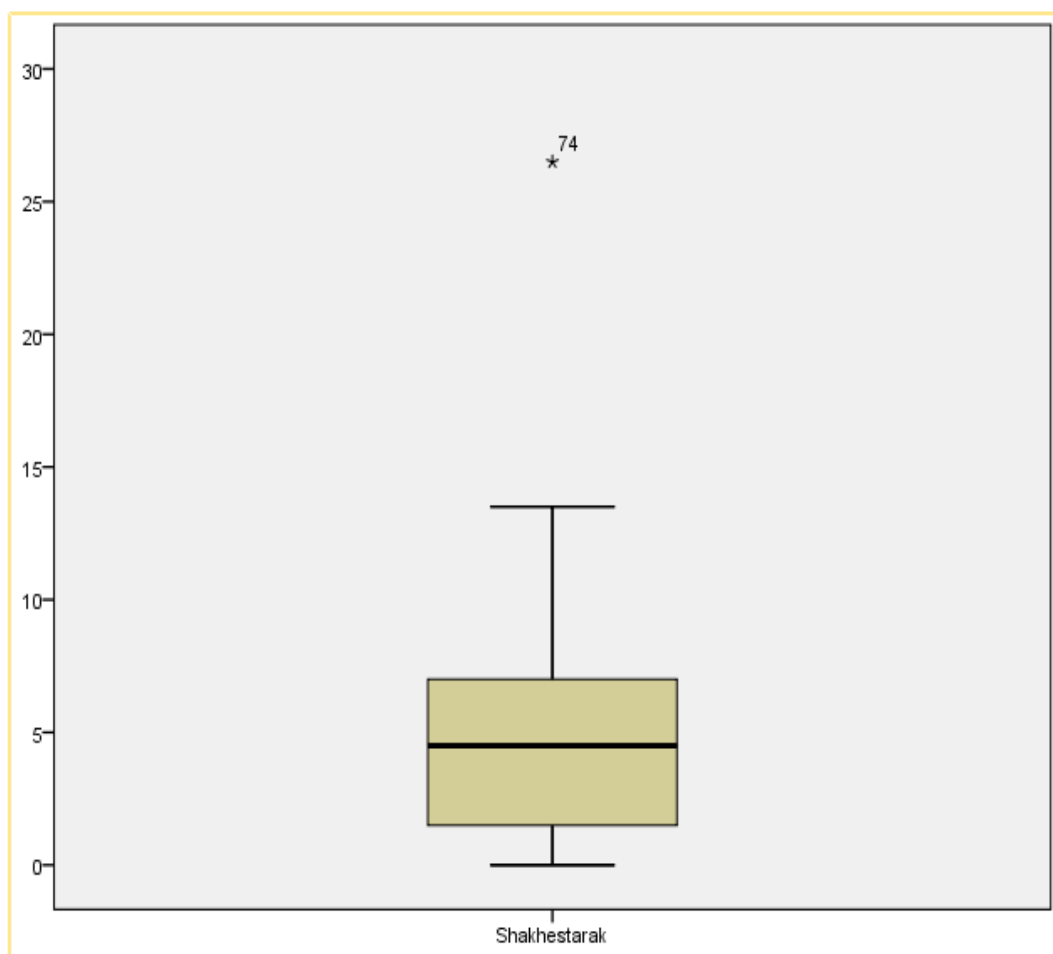
- پیشنهاد می شود نحوه ی افزایش شاخص ترک در مسیرهای دیگر با شرایط آب و هوایی متفاوت تر بررسی شود.

پوست



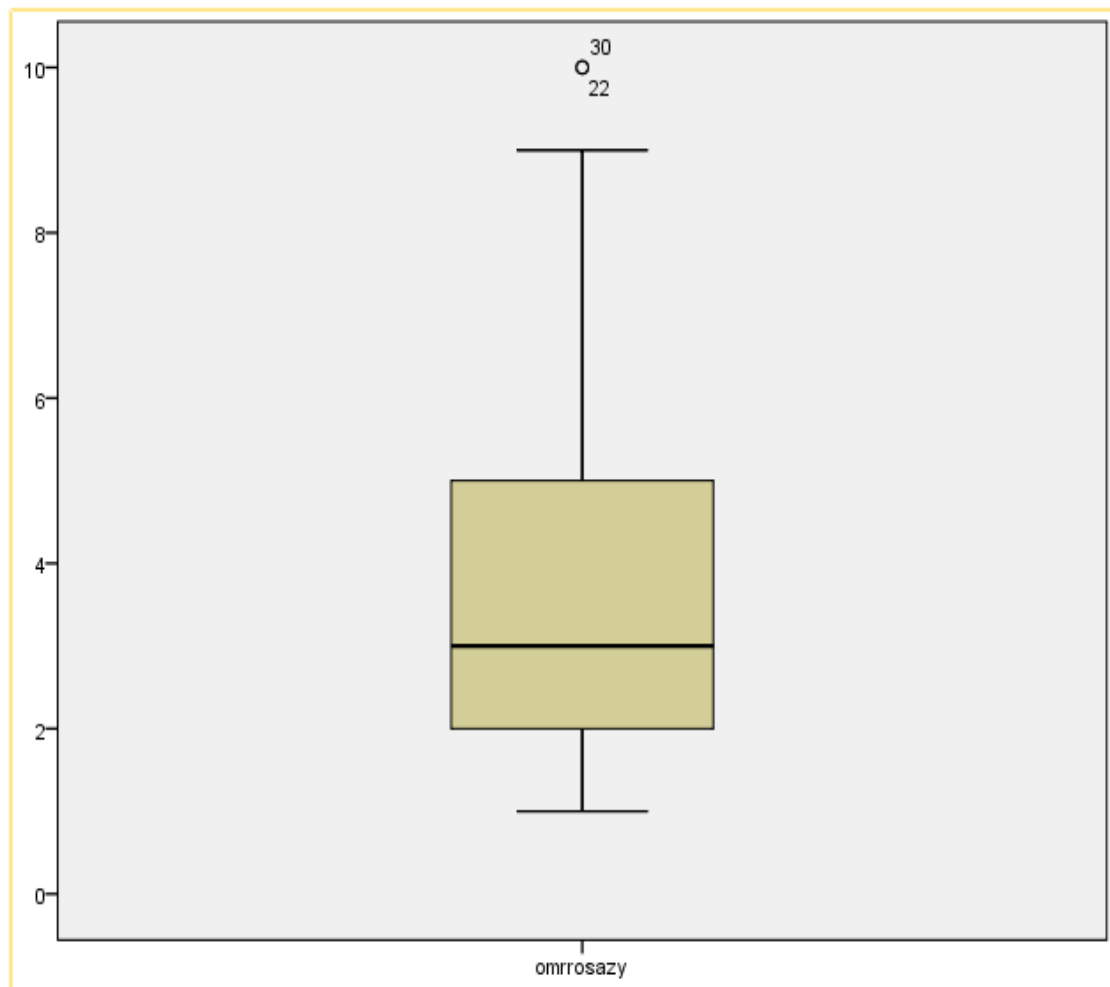
نمودار ۴-۱- نمودار جعبه‌ای شاخص ترک

با توجه به این نمودار داده شماره ۶ و ۷ و ۸ و ۷۸ و ۷۹ خارج از محدوده می‌باشد.



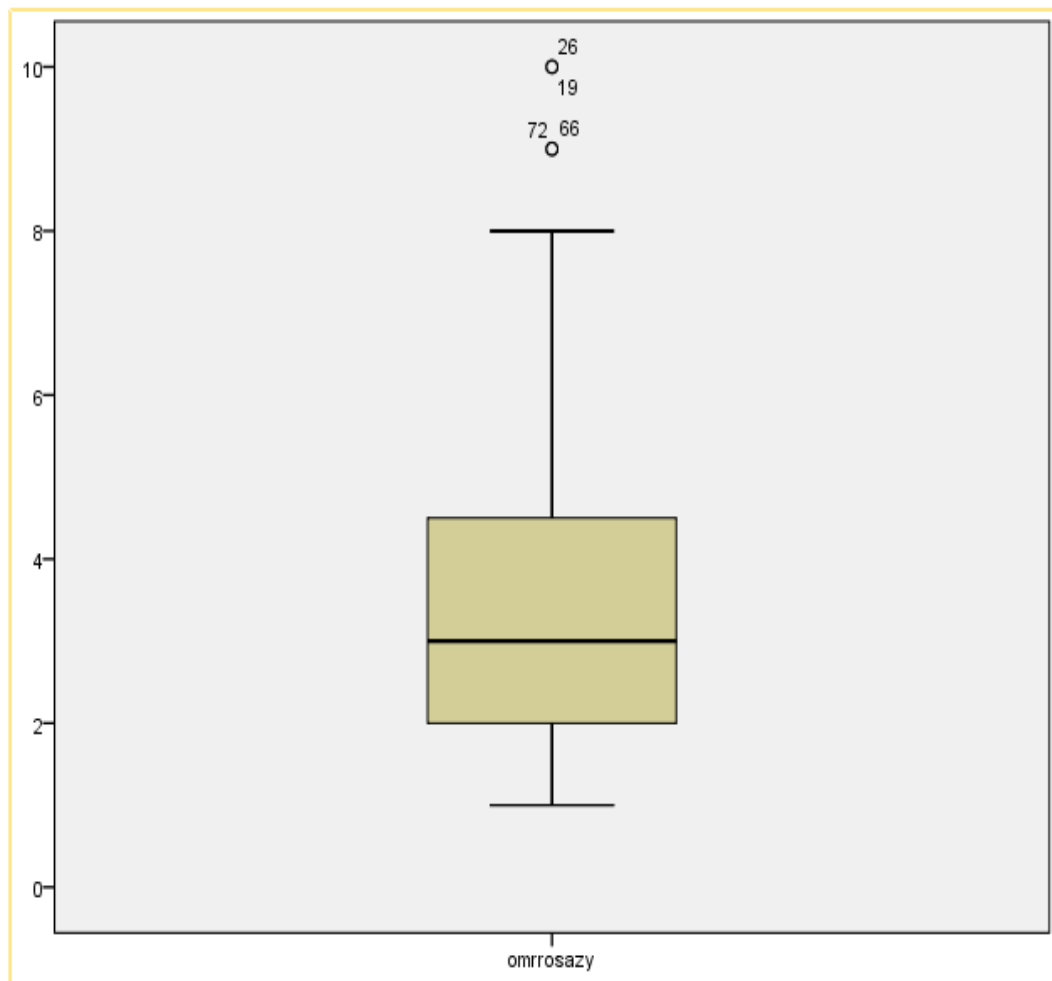
نمودار ۴-۲- شاخص ترک (بعد از حذف داده‌های ۶ و ۷ و ۸ و ۷۸ و ۷۹)

در ادامه داده ۶ و ۷ و ۸ و ۷۸ و ۷۹ حذف گردید و پس از حذف این داده مشاهده شد، که داده ۷۴ نیز خارج از محدوده است.



نمودار ۳-۴- نمودار جعبه‌ای عمر روسازی

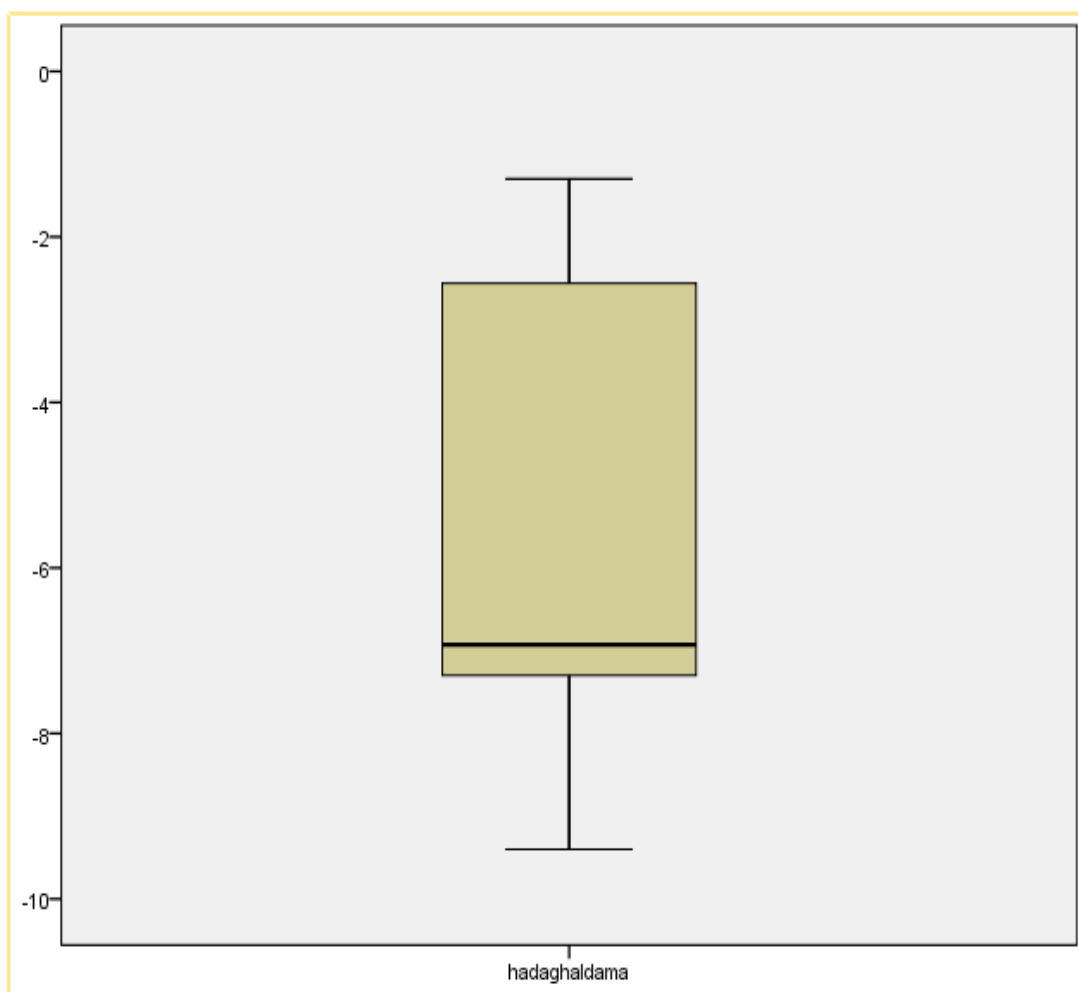
با توجه به این نمودار داده شماره ۲۲ و ۳۰ خارج از محدوده می‌باشد.



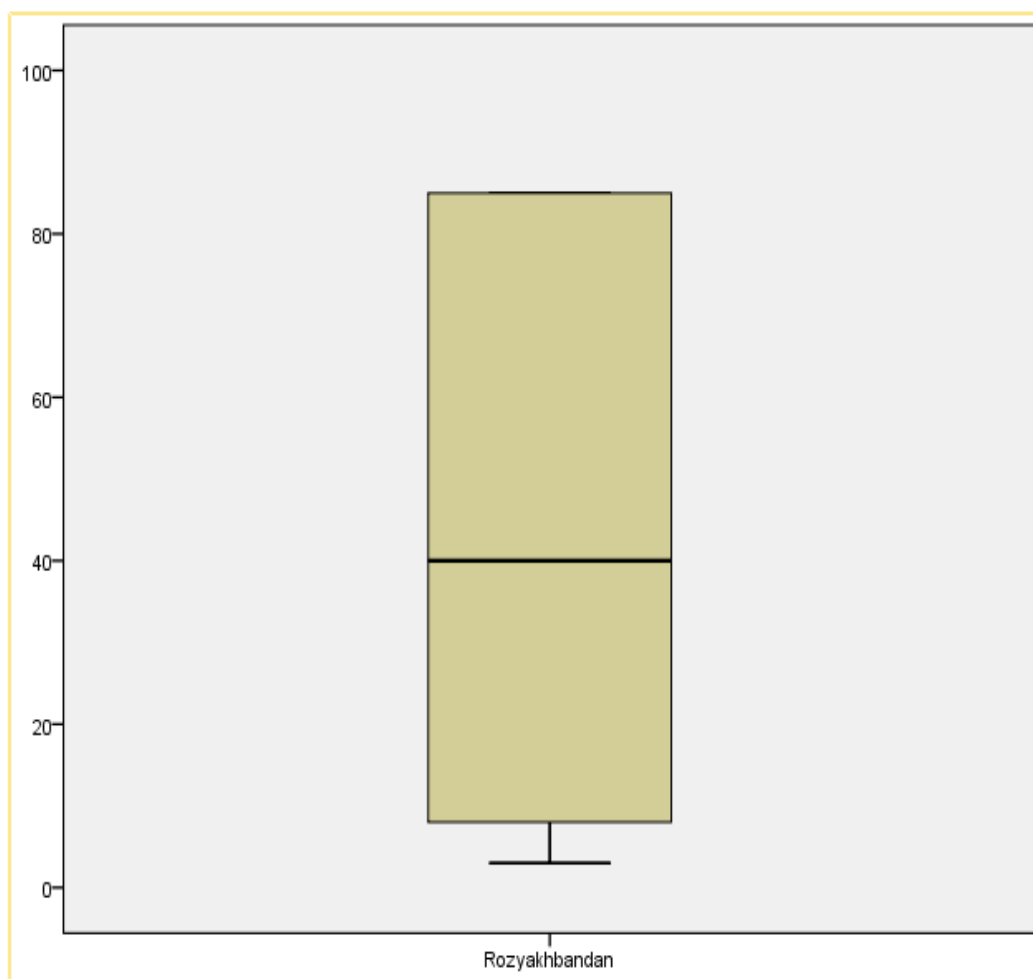
نمودار ۴-۴- نمودار جعبه‌ای عمر روسازی (بعد از حذف داده‌های ۲۲ و ۳۰)

در ادامه داده ۲۲ و ۳۰ حذف گردید و پس از حذف این داده مشاهده شد، که داده ۱۹ و ۲۶ و ۶۶ و ۷۲ نیز خارج از محدوده است.

اما، به دلیل اینکه با حذف داده‌ها خارج از محدوده تغییر چشم‌گیری در مدل‌سازی رخ نداده و نمی‌توان نرمال بودن را کنترل کرد، بنابراین این داده‌ها را نگه داشته می‌شوند و از مدل‌سازی حذف نمی‌شوند. حال متغیرها مورد بررسی قرار می‌گیرند و محدوده داده‌های مهم برای این متغیرها مشخص می‌شود.



نمودار ۴-۵- نمودار جعبه‌ای حداقل دما



نمودار ۴-۶- نمودار جعبه‌ای تعداد روزهای یخبندان

همانطور که مشخص است، به دلیل اینکه با حذف داده‌های خارج از محدوده تغییر چشم‌گیری در مدل‌سازی رخ نمی‌دهد و نمی‌توان نرمال بودن را کنترل کرد، بنابراین این داده‌ها نیز نگه داشته شده و از مدل‌سازی حذف نمی‌شود.

Descriptive Statistics							
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Skewness	
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error
Shakhestarak	187	0	31	4.90	4.485	2.178	.178
omrosazy	187	1	10	3.60	1.910	.940	.178
hadaghaldama	187	-9	-1	-5.34	2.911	.093	.178
Rozyakhbandan	187	3	85	42.16	34.277	.117	.178
terafik	187	3685	15601	9107.57	4110.367	.381	.178
Valid N (listwise)	187						

- آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (KS)

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test						
		Shakhestarak	omrosazy	hadaghaldama	Rozyakhbandan	terafik
N		187	187	187	187	187
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	4.90	3.60	-5.34	42.16	9107.57
	Std. Deviation	4.485	1.910	2.911	34.277	4110.367
Most Extreme Differences	Absolute	.137	.218	.274	.274	.174
	Positive	.110	.218	.274	.274	.156
	Negative	-.137	-.098	-.263	-.222	-.174
Kolmogorov-Smirnov Z		1.875	2.977	3.753	3.742	2.379
Asymp. Sig. (2-tailed)		.002	.000	.000	.000	.000
a. Test distribution is Normal.						
b. Calculated from data.						

- آزمون همبستگی اسپیرمن

Correlations						
		Shakhestarak	omrosazy	hadaghaldama	Rozyakhbandan	terafik
Spearman's rho	Shakhestarak	Correlation Coefficient	1.000	.245**	-.467**	.280**
		Sig. (2-tailed)		.001	.000	.000
		N	187	187	187	187
	omrosazy	Correlation Coefficient	.245**	1.000	.371**	-.016
		Sig. (2-tailed)	.001		.000	.007
		N	187	187	187	187
	hadaghaldama	Correlation Coefficient	-.467**	.371**	1.000	-.715**
		Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000
		N	187	187	187	187
	Rozyakhbandan	Correlation Coefficient	.280**	-.476**	-.715**	1.000
		Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	
		N	187	187	187	187
	terafik	Correlation Coefficient	-.252**	-.016	.429**	1.000
		Sig. (2-tailed)	.000	.007	.000	
		N	187	187	187	187
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).						
*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).						

- آزمون رگرسیون خطی

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	omrrosazy ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.312 ^a	.097	.092	4.273

a. Predictors: (Constant), omrrosazy

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	363.844	1	363.844	19.930	.000 ^b
	Residual	3377.314	185	18.256		
	Total	3741.158	186			

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. Predictors: (Constant), omrrosazy

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	2.264	.669		3.386	.001
	omrrosazy	.732	.164	.312	4.464	.000

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	3.00	9.59	4.90	1.399	187
Residual	-7.389	24.575	.000	4.261	187
Std. Predicted Value	-1.363	3.348	.000	1.000	187
Std. Residual	-1.729	5.752	.000	.997	187

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	hadaghaldam a ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.220 ^a	.048	.043	4.387

a. Predictors: (Constant), hadaghaldama

b. Dependent Variable: Shakhestarak

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	181.154	1	181.154	9.414	.002 ^b
	Residual	3560.004	185	19.243		
	Total	3741.158	186			

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. Predictors: (Constant), hadaghaldama

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	3.093	.672		4.606	.000
	hadaghaldama	-.339	.111	-.220	-3.068	.002

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	3.53	6.28	4.90	.987	187
Residual	-5.860	26.539	.000	4.375	187
Std. Predicted Value	-1.388	1.395	.000	1.000	187
Std. Residual	-1.336	6.050	.000	.997	187

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Rozyakhbandan ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.096 ^a	.009	.004	4.476

a. Predictors: (Constant), Rozyakhbandan

b. Dependent Variable: Shakhestarak

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	34.794	1	34.794	1.737	.189 ^b
	Residual	3706.364	185	20.034		
	Total	3741.158	186			

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. Predictors: (Constant), Rozyakhbandan

Coefficients ^a					
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1 (Constant)	4.371	.520		8.412	.000
Rozyakhbandan	.013	.010	.096	1.318	.189

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Residuals Statistics ^a					
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	4.41	5.44	4.90	.433	187
Residual	-4.926	26.028	.000	4.464	187
Std. Predicted Value	-1.142	1.250	.000	1.000	187
Std. Residual	-1.101	5.815	.000	.997	187

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Variables Entered/Removed ^a			
Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	terafik ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary ^b				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.250 ^a	.063	.057	4.354

a. Predictors: (Constant), trafik

b. Dependent Variable: Shakhestarak

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	233.877	1	233.877	12.336	.001 ^b
	Residual	3507.281	185	18.958		
	Total	3741.158	186			

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. Predictors: (Constant), trafik

Coefficients^a

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1					
(Constant)	7.388	.776		9.523	.000
terafik	.000	.000	-.250	-3.512	.001

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	3.13	6.38	4.90	1.121	187
Residual	-6.383	24.117	.000	4.342	187
Std. Predicted Value	-1.580	1.319	.000	1.000	187
Std. Residual	-1.466	5.539	.000	.997	187

a. Dependent Variable: Shakhestarak

- آزمون رگرسیون درجه دو

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	hadaghaldama a, omrrosazy ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.500 ^a	.250	.242	3.905

a. Predictors: (Constant), hadaghaldama, omrrosazy

b. Dependent Variable: Shakhestarak

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	935.843	2	467.922	30.691	.000 ^b
	Residual	2805.315	184	15.246		
	Total	3741.158	186			

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. Predictors: (Constant), hadaghaldama, omrrosazy

Coefficients^a

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1 (Constant)	-2.860	1.036		-2.761	.006
omrosazy	1.167	.166	.497	7.036	.000
hadaghaldama	-.667	.109	-.433	-6.125	.000

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	.01	10.51	4.90	2.243	187
Residual	-7.012	25.821	.000	3.884	187
Std. Predicted Value	-2.180	2.500	.000	1.000	187
Std. Residual	-1.796	6.613	.000	.995	187

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Rozyakhbandan, omrrosazy ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.411 ^a	.169	.160	4.112

a. Predictors: (Constant), Rozyakhbandan, omrrosazy

b. Dependent Variable: Shakhestarak

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	630.687	2	315.344	18.654	.000 ^b
	Residual	3110.471	184	16.905		
	Total	3741.158	186			

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. Predictors: (Constant), Rozyakhbandan, omrrosazy

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-.540	.955		-.565	.573
	omrrosazy	1.052	.177	.448	5.937	.000
	Rozyakhbandan	.039	.010	.300	3.973	.000

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	.83	10.29	4.90	1.841	187
Residual	-7.135	25.469	.000	4.089	187
Std. Predicted Value	-2.215	2.925	.000	1.000	187
Std. Residual	-1.735	6.194	.000	.995	187

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	terafik, omrrosazy ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.384 ^a	.147	.138	4.164

a. Predictors: (Constant), terafik, omrrosazy

b. Dependent Variable: Shakhestarak

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	550.553	2	275.277	15.875	.000 ^b
	Residual	3190.605	184	17.340		
	Total	3741.158	186			

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. Predictors: (Constant), terafik, omrrosazy

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	4.660	.979		4.762	.000
	omrrosazy	.686	.160	.292	4.273	.000
	terafik	.000	.000	-.224	-3.281	.001

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	1.53	9.63	4.90	1.720	187
Residual	-7.279	23.313	.000	4.142	187
Std. Predicted Value	-1.962	2.747	.000	1.000	187
Std. Residual	-1.748	5.598	.000	.995	187

a. Dependent Variable: Shakhestarak

- رگرسیون درجه سه

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.511 ^a	.261	.249	3.888

a. Predictors: (Constant), Rozyakhbandan, omrrosazy, hadaghaldama

b. Dependent Variable: Shakhestarak

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	975.425	3	325.142	21.514	.000 ^b
	Residual	2765.733	183	15.113		
	Total	3741.158	186			

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. Predictors: (Constant), Rozyakhbandan, omrrosazy, hadaghaldama

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-2.929	1.032		-2.837	.005
	omrrosazy	1.116	.168	.475	6.643	.000
	hadaghaldama	-.927	.194	-.602	-4.776	.000
	Rozyakhbandan	-.027	.017	-.207	-1.618	.107

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-2.929	1.032		-2.837	.005
	omrrosazy	1.116	.168	.475	6.643	.000
	hadaghaldama	-.927	.194	-.602	-4.776	.000
	Rozyakhbandan	-.027	.017	-.207	-1.618	.107

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	.34	10.39	4.90	2.290	187
Residual	-7.041	25.692	.000	3.856	187
Std. Predicted Value	-1.991	2.395	.000	1.000	187
Std. Residual	-1.811	6.609	.000	.992	187

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	terafik, omrrosazy, hadaghaldam a ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.571 ^a	.326	.315	3.712

a. Predictors: (Constant), terafik, omrrosazy, hadaghaldama

b. Dependent Variable: Shakhestarak

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1219.574	3	406.525	29.503	.000 ^b
	Residual	2521.584	183	13.779		
	Total	3741.158	186			

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. Predictors: (Constant), terafik, omrrosazy, hadaghaldama

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-.345	1.130		-.306	.760
	omrrosazy	1.148	.158	.489	7.281	.000
	hadaghaldama	-.727	.104	-.472	-6.968	.000
	terafik	.000	.000	-.279	-4.538	.000

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	.97	10.35	4.90	2.561	187
Residual	-6.909	24.365	.000	3.682	187
Std. Predicted Value	-1.537	2.128	.000	1.000	187
Std. Residual	-1.861	6.564	.000	.992	187

a. Dependent Variable: Shakhestarak

رگرسیون درجه چهار

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	terafik, omrrosazy, hadaghaldama, Rozyakhbandan ^b		Enter

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.733 ^a	.537	.527	3.086

a. Predictors: (Constant), terafik, omrrosazy, hadaghaldama, Rozyakhbandan

b. Dependent Variable: Shakhestarak

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2008.008	4	502.002	52.716	.000 ^b
	Residual	1733.150	182	9.523		
	Total	3741.158	186			

a. Dependent Variable: Shakhestarak

b. Predictors: (Constant), terafik, omrrosazy, hadaghaldama, Rozyakhbandan

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	12.155	1.664		7.303	.000
	omrrosazy	1.726	.146	.735	11.848	.000
	hadaghaldama	2.417	.356	1.569	6.786	.000
	Rozyakhbandan	.355	.039	2.715	9.099	.000
	terafik	-.002	.000	-1.564	-10.413	.000

a. Dependent Variable: Shakhestarak

Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	-2.00	15.95	4.90	3.286	187
Residual	-6.855	19.351	.000	3.053	187
Std. Predicted Value	-2.102	3.363	.000	1.000	187
Std. Residual	-2.221	6.271	.000	.989	187

a. Dependent Variable: Shakhestarak

- رگرسیون لگاریتمی

Model Summary and Parameter Estimates

Dependent Variable: Shakhestarak

Equation	Model Summary					Parameter Estimates	
	R Square	F	df1	df2	Sig.	Constant	b1
Logarithmic	.110	22.772	1	185	.000	1.946	2.607

The independent variable is omrrosazy.

- رگرسیون غیر خطی

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
a	2.597	0.487	1.637	3.557
b	0.525	0.124	0.281	0.770

Correlations of Parameter Estimates

	a	b
a	1.000	-.946
b	-.946	1.000

ANOVA^a

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	4885.531	2	2442.765
Residual	3351.379	185	18.116
Uncorrected Total	8236.910	187	
Corrected Total	3741.158	186	

Dependent variable: shakhestarak

a. R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = .104.

-رگسیون خانواده (۱)

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	omrrosazi ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.797 ^a	.635	.629	3.84929	.635	102.564	1	59	.000

a. Predictors: (Constant), omrrosazi

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1519.704	1	1519.704	102.564	.000 ^b
	Residual	874.207	59	14.817		
	Total	2393.911	60			

a. Dependent Variable: shakhestarak

b. Predictors: (Constant), omrrosazi

Coefficients^a

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	-2.899	1.064		-2.725	.008	-5.027	-.770
omrrosazi	2.970	.293	.797	10.127	.000	2.384	3.557

a. Dependent Variable: shakhestarak

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	trafic, omrrosazi ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.814 ^a	.663	.651	3.72983	.663	57.040	2	58	.000

a. Predictors: (Constant), trafic, omrrosazi

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1587.038	2	793.519	57.040	.000 ^b
	Residual	806.873	58	13.912		
	Total	2393.911	60			

a. Dependent Variable: shakhestarak

b. Predictors: (Constant), trafic, omrrosazi

Coefficients^a

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	4.660	3.587		1.299	.199	-2.520	11.840
omrrosazi	2.964	.284	.795	10.429	.000	2.395	3.533
trafic	-.002	.001	-.168	-2.200	.032	-.003	.000

a. Dependent Variable: shakhestarak

Model Summary and Parameter Estimates

Dependent Variable: shakhestarak

Equation	Model Summary					Parameter Estimates	
	R Square	F	df1	df2	Sig.	Constant	b1
Logarithmic	.555	73.527	1	59	.000	-2.255	8.629

The independent variable is omrrosazi.

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
a	5.058	2.102	.851	9.265
b	.787	.169	.448	1.125
c	-.001	.001	-.002	.000

Correlations of Parameter Estimates

	a	b	c
a	1.000	-.976	-.962
b	-.976	1.000	.895
c	-.962	.895	1.000

ANOVA^a

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	4273.218	3	1424.406
Residual	814.942	58	14.051
Uncorrected Total	5088.160	61	
Corrected Total	2393.911	60	

Dependent variable: shakhestarak

a. $R^2 = 1 - (\text{Residual Sum of Squares}) / (\text{Corrected Sum of Squares}) = .660$.

رگرسیون خانواده (۲) –

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	omrrosazi ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.708 ^a	.501	.490	1.74711	.501	46.180	1	46	.000

a. Predictors: (Constant), omrrosazi

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	140.960	1	140.960	46.180	.000 ^b
	Residual	140.410	46	3.052		
	Total	281.370	47			

a. Dependent Variable: shakhestarak

b. Predictors: (Constant), omrrosazi

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1.417	.481		2.949	.005	.450	2.385
	omrrosazi	1.076	.158	.708	6.796	.000	.758	1.395

a. Dependent Variable: shakhestarak

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	traffic, omrrosazi ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: shakhestarak

b. All requested variables entered.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.712 ^a	.507	.485	1.75546	.507	23.153	2	45	.000

a. Predictors: (Constant), traffic, omrrosazi

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	142.696	2	71.348	23.153	.000 ^b
	Residual	138.674	45	3.082		
	Total	281.370	47			

a. Dependent Variable: shakhestarak

b. Predictors: (Constant), trafic, omrrosazi

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	-6.172	10.123		-.610	.545	-26.561	14.216
	omrrosazi	1.037	.168	.682	6.185	.000	.699	1.374
	trafic	.001	.001	.083	.751	.457	-.001	.002

a. Dependent Variable: shakhestarak

Model Summary and Parameter Estimates

Dependent Variable: shakhestarak

Equation	Model Summary					Parameter Estimates	
	R Square	F	df1	df2	Sig.	Constant	b1
Logarithmic	.492	44.636	1	46	.000	1.951	2.897

The independent variable is omrrosazi.

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
a	-17.352	8.830	-35.136	.432
b	-.177	.112	-.403	.050
c	.001	.001	9.591E-005	.002

Correlations of Parameter Estimates

	a	b	c
a	1.000	-.955	-.999
b	-.955	1.000	.966
c	-.999	.966	1.000

ANOVA^a

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	988.287	3	329.429
Residual	138.963	45	3.088
Uncorrected Total	1127.250	48	
Corrected Total	281.370	47	

Dependent variable: shakhestarak

a. R squared = $1 - (\text{Residual Sum of Squares}) / (\text{Corrected Sum of Squares}) = .506$.

مراجع

۱. طباطبائی، امیر محمد، روسازی راه»، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۷
2. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2005. "Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder." Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, M 320-05, 25th Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
۳. طباطبائی، فرهاد و طباطبائی، خلیل، ۱۳۹۸، بررسی ترک های آسفالت، اولین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران، تهران.
4. Schorsh , M. and Chang.C.M. and Baladi.G.Y.,” Effect of Segregation on the Initiation and Propagation of Top-Down Cracks”, proc.82 th Transportation Research Board Annual Meeting Washington D.C.,January 2003.
5. Holeyvinsky,J.M., Soon,S.C. and Stolarsky,H.,” Investigation of Factor Related to Surface Initiated Cracks In Flexible Pavement”, Department of Civil Engineering, University of Minnesuta,USA, 2000.
۶. اکرامی، علی اکبر؛ «تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی"، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، چاپ اول، ۱۳۸۲.
۷. فرهی، غلامحسین؛ "مکانیک شکست"، انتشارات دانشگاه برعلی سینا، چاپ اول، ۱۳۶۷.
۸. عامری، محمود؛ "مکانیزم ترک و گسترش آن در روسازی، طرح مخلوط و ضخامت روکش برای جلوگیری از انعکاس ترک"، مجموعه‌ی مقالات چهارمین کنفرانس بین‌المللی عمران، جلد سوم، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۶۷.
9. Paris, P. and Erdogan, F., “ A critical analysis of crack propagation laws”, Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, December 1963, pp. 528-534.
10. Hooks, C.C. And Goetz, W.H., 1964. Laboratory Thermal Expansion Measuring Techniques Applied to Bituminous Concrete. Purdue Univ. Lafayette in School of Civil Engineering.
11. Littlefield, G., 1967, February. Thermal Expansion and Contraction Characteristics- Utah Asphalt Concretes. In Assoc Asphalt Paving Technol Proc.
12. Jones, G.M., Darter, M.I. and Littlefield, G., 1968. Thermal expansion-contraction of asphaltic concrete.
13. Islam, M.R. and Tarefder, R.A., 2014. Determining Thermal Properties of Asphalt Concrete Using Field Data and Laboratory Testing. Construction and Building Materials, 67, pp. 297-306.
14. Islam, M.R. and Tarefder, R.A., 2015. Coefficients of Thermal Contraction and Expansion of Asphalt Concrete in the Laboratory. Journal of Materials in Civil Engineering, 27(11), pp. 04015020.

15. Isacsson, U. and Zeng, H., 1998. Cracking of Asphalt at Low Temperature as Related to Bitumen Rheology. *Journal of Materials Science*, 33(8), pp.2165-2170.
16. Fortier, R. and Vinson, T., 1998. Low-Temperature Cracking and Aging Performance of Modified Asphalt Concrete Specimens. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1630, pp. 77-86.
17. Das, P.K., Tasdemir, Y. and Birgisson, B., 2012. Low Temperature Cracking Performance of WMA with the Use of the Superpave Indirect Tensile Test. *Construction and Building Materials*, 30, pp. 643-649.
18. Alavi, M.Z., Hajj, E.Y., Morian, N.E. and Sebaaly, P.E., 2013. Low temperature characterization of asphalt mixtures by measuring visco-elastic properties under thermal loading. In *ISCORD 2013: Planning for Sustainable Cold Regions* (pp. 404-415).
19. Fromm, H.J. and Phang, W.A., 1972. A Study of Transverse Cracking of Bituminous Pavements with Discussion. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* (Vol. 41).
20. Haas, R., Meyer, F., Assaf, G. and Lee, H., 1987. A Comprehensive Study of Cold Climate Airport Pavement Cracking (with Discussion). In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* (Vol. 56).
21. Hills, J.F. and Brien, D., 1966, February. The fracture of bitumens and asphalt mixes by temperature induced stresses. In *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* (Vol. 35, pp. 292-309).
22. Finn, F., Saraf, C.L., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W. and Abdullah, A., 1977. User's manual for the computer program COLD. *Transportation Research Board*, Washington, DC.
23. Hiltunen, D.R. and Roque, R., 1994. A Mechanics-Based Prediction Model for Thermal Cracking of Asphaltic Concrete Pavements (with Discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 63.
24. Lytton, R.L., Shanmugham, U. and Garrett, B.D., 1983. Design of Asphalt Pavements for Thermal Fatigue Cracking (No. FHWA-TX-83-06+ 284-4 Intrm Rpt.).
25. Molenaar, A.A.A. 1983. Structural Performance and Design of Flexible Road Constructions and Asphalt Concrete Overlays, Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, Netherlands
26. Alavi, S.M.Z., 2014. Comprehensive Methodologies for Analysis of Thermal Cracking in Asphalt Concrete Pavements. University of Nevada, Reno.
27. Szwed, A. and Kamińska, I., 2015. Mitigation of Low-Temperature Cracking in Asphalt Pavement by Selection of Material Stiffness. *Procedia Engineering*, 111, pp.748-755.
28. Dugdale, D.S., 1960. Yielding of Steel Sheets Containing Slits. *Journal of The Mechanics and Physics of Solids*, 8(2), pp.100-104.
29. Barenblatt, G.I., 1962. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture. *Advances in Applied Mechanics*, 7, pp.55-129.
30. Dave, E.V., Buttlar, W.G., Leon, S.E., Behnia, B. and Paulino, G.H., 2013. IlliTC—low-temperature cracking model for asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup2), pp.57-78.
31. Chang, L. and Kaijian, N., 2013. Simulation of Asphalt Concrete Cracking Using Cohesive Zone Model. *Construction and Building Materials*, 38, pp.1097-1106.

Abstract

Cryogenic cracks are one of the common phenomena that occur in cold regions and regions with temperature differences between day and night and in different seasons of the year. The presence of these cracks causes water to penetrate into the pavement structure and leads to stripping and premature damage to the asphalt. The aim of this study is to predict the cryogenic cracks of pavement as a function of climate and pavement life. To conduct the research by visiting the axes considered in the research (Jiroft-Bandar Abbas and Jiroft-Kerman and Jiroft Baft, Haraz and Shahrud-Damghan axis), the number of refrigeration cracks, which includes: partial, semi-complete and complete cracks, as well as complete cracks Were counted and collected per kilometer of round trip routes. For analysis and modeling, the research was collected according to cracking indices and pavement life and was performed using SPSS software. First, regression equations were performed for each of the routes, but because the results were not very accurate, according to the climate, the routes were divided into two families, the first family includes tropical regions and the second family includes cold regions. Finally, according to the results obtained from regression modeling for both families, it is observed that the second degree model due to having the highest correlation coefficient in the first family ($R^2 = 0.663$) and the second family ($R^2 = 0.507$) and because the traffic variables , Temperature changes and cracking index have many changes so the value of the correlation coefficient does not show high.

Keywords: Refrigeration cracks, pavement, climate, pavement life



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Road and Transport Engineering

Prediction of pavement refrigeration cracks as a function of climate and pavement life

By: Saeed Heydari Archandani

Supervisor:

Dr. Hosein Ghasemzadeh Tehrani

March 2022