Archive of SID

استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم جهت ارایه مدلی برای پیش‌بینی عمرخستگی نمونه‌های آسفالتی*

محمود عامری، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
احمدمنصوریان، دانشجوی‌دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران و عضو هیأت علمی، پژوهشکده‌حمل و نقل، تهران، ایران
E-mail: ameri@iust.ac.ir

چکیده

به طور کلی روسازیها پس از گذشت چند سال از بهره‌برداری (کمتر از عمر بهره برداری)، به خرابی‌هایی از جمله قیرزدگی، انواع مختلف ترکها، ناهمواری و یا تلفیقی از آنها دچار می‌شوند. به همین دلیل متولیان راهسازی همواره به دنبال راه حلهایی بوده‌اند که عمر روسازی راهها را بیشینه و هزینه تعمیر و نگهداری آنهارا کمینه کند. ازجمله خرابیهایی که معمولاً در روسازی راهها مشاهده می‌شوند, ترکهای خستگی هستند. برای تهیه مخلوط آسفالتی مقاوم در برابر بروز ترکهای خستگی زودرس, آزمایشهایی پیشنهاد شده‌اند که معمولاً انجام آنها نیاز به تجهیزات ویژه و صرف زمان طولانی دارد. به همین دلیل پژوهشگران روابط متنوعی را برای پیش‌بینی عمرخستگی مخلوطهای آسفالتی ارایه کرده‌اند که البته این روابط نیز برای شرایط خاص انجام آزمایش (نوع مصالح, دما و ...)معتبر ند، اما باید برای شرایط دیگر اعتبار سنجی و صحت کاربرد آنها مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش سعی شده است با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود در کشور و استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم رابطه‌ای برای پیش‌بینی عمرخستگی مخلوطهای آسفالتی رایج که در رویه آسفالتی راههای کشور مورد استفاده قرار می‌گیرند ارایه شود. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهند که با استفاده از درصد فضای خالی مصالح سنگی پرشده با قیر و ضریب برجهندگی نمونه‌های آسفالتی می‌توان رفتار خستگی مخلوطهای آسفالتی را مورد بررسی قرار داد.

واژه‌های کلیدی: ترک‌خستگی، عمرخستگی، مخلوطهای آسفالتی، آزمایش کشش غیر مستقیم

۱. مقدمه

اگر نقطه‌ای مشخص از روسازی آسفالتی در نظر گرفته شود، هنگامی که چرخ وسیله نقلیه در این نقطه قرار می‌گیرد، تغییر شکلی که در لایه بتن آسفالتی ایجاد می شود، باعث ایجاد کرنش(تنش) کششی در زیر لایه می شود. با عبور وسیله نقلیه از این نقطه، لایه بتن آسفالتی تمایل بازگشت به موقعیت قبلی را دارد. با تکرار این عمل در صورتی که تنش یا کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی از تنش یا کرنش کششی قابل تحمل لایه آسفالتی تجاوز کند، ترکهایی در زیر لایه آسفالتی ایجاد می شود که به مرور زمان، این ترکها به سمت بالای لایه آسفالتی حرکت و در سطح لایه ظاهر می‌شوند. از به هم پیوستن این ترکها، ترکهای موسوم به ترکهای خستگی به وجود می‌آیند[۲و۱]. به طورکلی ترکهای خستگی به دو گروه تقسیم بندی می‌شوند که عبارتند از ترک خستگی ناشی از تکرار بارگذاری به علت عبور وسایل نقلیه و ترک خستگی حرارتی ناشی از تغییرات دما.

* تاریخ دریافت: ۸۵/۰۹/۲۲ – تاریخ پذیرش: ۸۵/۱۱/۲۷

www.SID.ir

Archive of SID

ترک خستگی معمولاً از پایین لایه آسفالتی (یعنی جایی که مقدار تنش یا کرنش کششی زیر بار چرخ بیشینه است) شروع و به سمت بالای لایه منتشر می‌شود، با این وجود در اثر ترکیبی از تنشهای حرارتی و تنشهای حاصل از بارگذاری این ترکها می‌توانند از سطح لایه نیز شروع و به سمت پایین لایه منتشر شوند. اصطلاحاً این نوع ترکها، ترکهای خستگی از بالا به پایین نامیده می‌شوند [٤و٣]. برای انجام آزمایش خستگی مخلوطهای آسفالتی روشهای مختلفی وجود دارد که از جمله این روشها می‌توان به آزمایشهای تیر خمشی با بارگذاری چهار نقطه‌ای، تیر خمشی با بارگذاری سه نقطه‌ای، آزمایش خمشی طره‌ای با تیرچه‌های ذوزنقه‌ای، آزمایش تکرار خمش با پی الاستیک، آزمایش تک محوری، آزمایش سه محوری و آزمایش کشش غیر مستقیم اشاره کرد [٧و٦ و ٥ و١]. به دلیل آن که هزینه انجام آزمایشهای خستگی بسیار زیاد بوده و به تعداد زیادی نمونه برای انجام این گونه آزمایشها نیاز است، نمودارها و روابطی برای پیش‌بینی عمر خستگی (تعداد دفعات تکرار بار تا وقوع ترک) به‌صورت تابعی از خصوصیات فیزیکی(حجمی) و مکانیکی مخلوط آسفالتی ارایه شده است، اما به دلیل تفاوت در مصالح، روشهای انجام آزمایش و شرایط انجام آن، نتایج حاصل از روابط ارایه شده توسط محققین مختلف، با یکدیگر متفاوت است. تنوع روابط ارایه شده نشان می‌دهد که متخصصین روسازی در معرفی بهترین مدل پیش‌بینی ترکهای خستگی اتفاق نظر ندارند[١٢و١١و١٠و٩و ٨و ٧و ٥و١]. بنابراین پیشنهاد روش مناسب انجام آزمایش خستگی، (با توجه به محدودیتها و امکانات آزمایشگاهی موجود در کشور) و ایجاد رابطه‌ای بین عمر خستگی و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مخلوط آسفالتی (که به راحتی قابل اندازگیری باشند) ضروری به نظر می‌رسد. به همین دلیل در این مقاله با انجام آزمایش کشش غیر مستقیم بر روی نمونه‌های آسفالتی، رابطه‌ای برای تعیین عمرخستگی مخلوطهای آسفالتی متداول در ایران تهیه و ارایه شده است.

٢. آزمایش کشش غیر مستقیم

آزمایش کشش غیر مستقیم از جمله آزمایش هایی است که برای تعیین مقاومت کششی مصالح تثبیت شده استفاده می‌شود[٢]. استفاده از این آزمایش در طرح اختلاط مخلوطهای آسفالتی از دهه ١٩٦٠ به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته و در برنامه تحقیقات عملکرد دراز مدت روسازی[1] نیز بر استفاده از این آزمایش برای تعیین مشخصات مخلوط آسفالتی تأکید شده است[١٣]. در این آزمایش، نمونه استوانه‌ای شکل آسفالتی تحت بار فشاری وارد بر سطح جانبی آن قرار می‌گیرد. این نحوه بارگذاری باعث ایجاد تنش کششی نسبتاً یکنواختی در امتداد قطر بارگذاری نمونه آسفالتی و شکسته شدن آن در امتداد این قطر می‌شود[٦]. تنشهای ایجاد شده در مرکز نمونه، تحت یک بار نواری، می‌توانند از روابط ١ و ٢ به دست آورده شوند [٥].

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi at}\left[\sin(2\alpha) - \frac{a}{2R}\right] \qquad (١)$$

$$\sigma_c = \frac{-6p}{\pi at}\left[\sin(2\alpha) - \frac{a}{2R}\right] \qquad (٢)$$

در این روابط، p مقدار بار اعمال شده، a عرض نوار بارگذاری، t ضخامت(ارتفاع) نمونه، R شعاع نمونه و2α زاویه مقابل به عرض نوار بارگذاری، σ_t تنش کششی(افقی)در مرکز نمونه σ_c تنش فشاری (قائم) در مرکز نمونه است. همان طور که در روابط فوق مشاهده می‌شود، در مرکز نمونه مقدار تنش فشاری قائم سه برابر تنش کششی افقی است[٥]. اگر چه وضعیت تنش در نمونه پیچیده است، اما فرض رفتار کشسان خطی، تنش و کرنش بحرانی ایجاد شده در نمونه، به راحتی قابل محاسبه‌اند[٦].

چنان که بارگذاری در آزمایش کشش غیر مستقیم به صورت تکراری (بارگذاری – باربرداری) انجام شود، این امکان فراهم می‌شود تا بتوان عمرخستگی نمونه‌های آسفالتی را نیز تعیین کرد. در این آزمایش معمولاً از روش بارگذاری کنترل تنش استفاده می‌شود و بار به صورت یک منحنی شبه سینوسی, در مدت زمان ٠/١ ثانیه بارگذاری و ٠/٩ ثانیه باربرداری(استراحت) بر نمونه اعمال می‌شود.

در سالهای اخیر استفاده از زمان بارگذاری ٠/١ ثانیه و زمان استراحت ٠/٤ ثانیه نیز پیشنهاد شده است[١٤و١٣]. تجمع تغییر شکلهای ماندگار مهم‌ترین اشکال در تعیین عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم یاد شده است. این مطلب بخصوص در درجه حرارتهای زیاد از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا در این حالت رفتار غیر خطی و ویسکوالاستیک آسفالت حاکم می‌شود[١٥]. با وجود معایبی که بر این روش آزمایش متصور است، اما به دلیل ساده بودن انجام

www.SID.ir

Archive of SID

آزمایش، استفاده از این روش درتعیین مشخصات مخلوط آسفالتی توصیه شده است[۱۴و۱۳].

Porter و Kennedy درسال۱۹۷۵ بیان داشتندکه به علت وضعیت تنش دو محوره در آزمایش کشش غیر مستقیم، عمرخستگی نمونه‌های آسفالتی که با استفاده از این روش به دست می‌آیند، کمتر از عمر خستگی حاصل از سایر روشها ست. به همین دلیل پیشنهاد شده که برای محاسبه و برآورد عمرخستگی آسفالت، تفاضل تنش کششی وفشاری که در اثر بارگذاری در مرکز نمونه به وجود می‌آید (σ_c-σ_t)، جایگزین تنش کششی در روابط مربوط به محاسبه عمرخستگی شود. این مورد در تحقیقات اخیرSHRP نیز مورد تایید قرار گرفته است[۶و۵].

۳. مشخصات مصالح

از جمله عواملی که بر عمر خستگی آسفالت تأثیر گذارند، متغیرهای مربوط به مخلوط آسفالتی شامل نوع و درصد قیر، درصد فضای خالی (درصد تراکم)، دانه‌بندی و مشخصات سنگدانه (نوع کانی و ...) هستند[۱۴و۷و۶و۵]. متغیرهایی که در این تحقیق به آنها پرداخته شده است عبارتند از: نوع قیر، دانه‌بندی، درصد قیر، درصد فضای خالی و سطح تنش. جدول ۱، سطوح متغیرهای مختلف که در این پژوهش به آنها پرداخته شده است را نشان می‌دهد.

جدول۱. متغیرهای مورد بررسی در تحقیق

متغیر	سطوح متغیر
نوع قیر	۲ (قیر ۷۰-۶۰ پالایشگاه تهران و ۱۰۰-۸۵ پالایشگاه اصفهان)
دانه‌بندی	۲ (دانه‌بندی شماره ۳ و ٤ جدول ۹-۱ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راههای ایران)
درصد قیر	۳ (٤، ۵ و ٦ درصد وزنی مخلوط آسفالتی)
درصد فضای خالی آسفالت	۲ (٤ و ٦ درصد)
تنش	۳ (۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال)

قیرهای مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: قیر ۷۰ ـ ۶۰ پالایشگاه تهران و قیر ۱۰۰ ـ ۸۵ پالایشگاه اصفهان. جدول ۲ مشخصات هر یک از قیرهای یاد شده را نشان می‌دهد.

در این پژوهش، برای ساخت نمونه های آسفالتی از دانه‌بندی پیوسته که در طرح مخلوطهای آسفالتی در ایران متداول است (دانه‌بندی‌های شماره ۳ و ٤) بر اساس جدول ۹-۱ آیین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران استفاده شده‌است[۱۶] (شکل ۱).

به منظور ارزیابی کیفیت مصالح سنگی، ابتدا مصالح سنگی به دو بخش درشت دانه (مانده روی الک نمره ۸) و ریز دانه (عبوری از الک نمره ۸ و مانده روی الک نمره ۲۰۰) تقسیم شدند. سپس آزمایشهای لازم از جمله وزن مخصوص(حقیقی)، درصد جذب آب، درصد سایش لوس آنجلس و درصد ضریب تورق و ارزش ماسه‌ای بر روی آنها انجام شد. یاد آوری می‌شود که فیلر مورد استفاده در تهیهٔ مخلوطهای آسفالتی، از نوع سیمان پرتلند با وزن مخصوص ظاهری برابر ۳/۰۵ بوده است.

٤. انجام آزمایش‌ها

پس از تهیه مخلوطهای آسفالتی با دانه‌بندی، نوع قیر، درصد قیر و درصد فضای خالی مشخص (سه نمونه برای هر مورد) و متراکم کردن آنها به روش ژیراتوری (طبق ضوابط مندرج در ASTM D3387)، از آزمایش کشش غیر مستقیم برای تعیین ضریب (مدول) برجهندگی و عمرخستگی نمونه‌های آسفالتی استفاده شد.

٤-۱ آزمایش مدول برجهندگی

طبق تعریف، ضریب برجهندگی عبارت است از نسبت تنش انحرافی (تنش محوری در آزمایش تک محوری یا تفاضل تنش محوری از فشار محدود کننده در آزمایش سه محوری) به کرنش برگشت‌پذیر که با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود[۱].

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \qquad (۳)$$

در این رابطه، σ_d تنش انحرافی (تنش محوری در آزمایش تک محوری یا تفاضل تنش محوری از فشار محدود کننده در آزمایش سه محوری) و ε_r کرنش برگشت‌پذیر است.

در استاندارد ASTM D4123 [۱۷] تعیین ضریب برجهندگی

www.SID.ir

Archive of SID

مخلوطهای آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم تشریح شده است.

از کمیت ضریب برجهندگی در ارزیابی کیفیت نسبی مصالح استفاده می‌شود. در ضمن این پارامتر یکی از ورودی‌های مهم و تأثیر گذار در تحلیل، طراحی و ارزیابی روسازی‌های آسفالتی است[۱۷].

در این تحقیق برای تعیین ضریب برجهندگی نمونه‌های آسفالتی از دستگاه UTM[۲] استفاده شده‌است. ضریب پواسون نمونه‌های آسفالتی نیز با استفاده از رابطه ٤ محاسبه و مورد استفاده قرار گرفته‌است[۱۳].

$$\nu = 0.15 + \frac{0.35}{1+e^{(3.1849-0.04233t)}} \qquad (٤)$$

در این رابطه، ν ضریب پواسون، e عدد نپر و t دما برحسب درجه فارنهایت است. برای انجام آزمایش تعیین ضریب برجهندگی، ابتدا نمونه‌های آسفالتی به مدت ٢٤ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند و سپس با اعمال بار، به شکل شبه سینوسی با فرکانس ۱ هرتز و دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه، ضریب برجهندگی اندازه‌گیری شد.

٤-۲ آزمایش خستگی

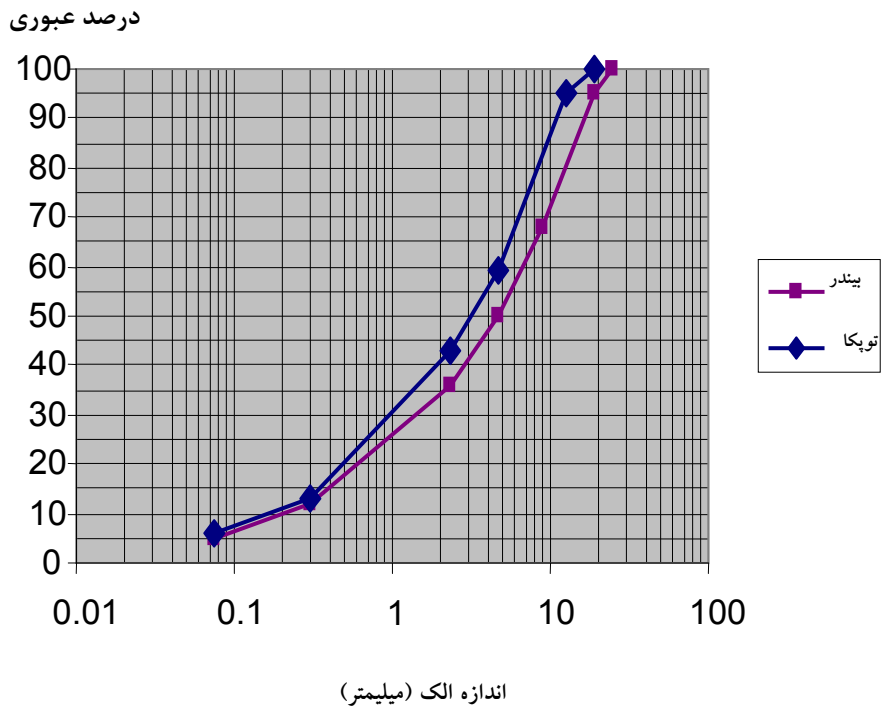
پس از تعیین ضریب برجهندگی نمونه‌های آسفالتی، آزمایش خستگی طبق ضوابط مندرج در مرجع شماره[۵] بر روی نمونه‌های آسفالتی انجام شد. به این ترتیب عمرخستگی نمونه‌ها به صورت تعداد دفعات بارگذاری تا گسیختگی یا به وجود آمدن تغییر شکل ماندگار قائم برابر ۱۲/۷ میلیمتر، تعریف شد. بارگذاری نیز به صورت شبه سینوسی با فرکانس ۱ هرتز و دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه در سطوح مختلف تنش انجام شد. لازم به یاد آوری است که در حین انجام آزمایش مشاهده شد که تغییراتی که در تغییر شکل ماندگار برحسب تعداد دفعات بارگذاری به وجود می‌آیند، دارای روند کلی نشان داده شده در شکل ۲ هستند، به طوری که در ناحیه ۱، نرخ تغییر شکل ماندگار با افزایش تعداد دفعات بارگذاری کاهش می‌یابد، در ناحیه ۲ نرخ تغییر شکل ماندگار، ثابت، و در ناحیه ۳، نرخ تغییر شکل ماندگار با افزایش تعداد دفعات بارگذاری، افزایش می‌یابد. پس از وارد شدن نمونه در ناحیه ۳ ترکهایی در سطح آن مشاهده شد که با افزایش تعداد دفعات بارگذاری، سرعت رشد ترکها نیز افزایش یافته و نهایتاً به شکست کامل نمونه انجامید.

جدول ۲. مشخصات قیرهای مورد استفاده

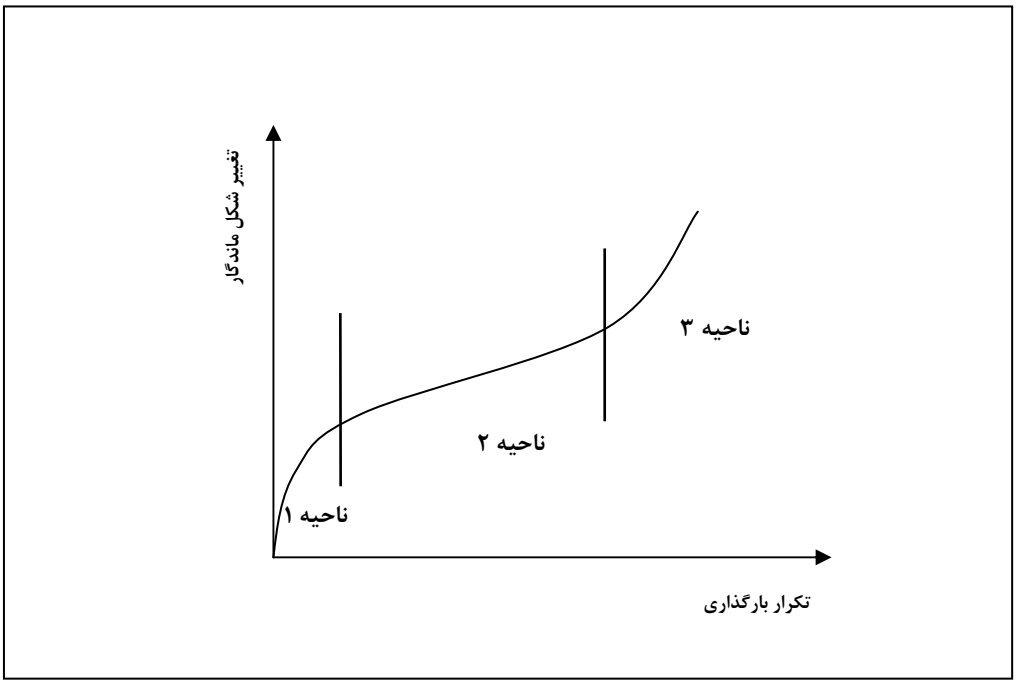
مشخصه	منبع قیر		استاندارد
	پالایشگاه تهران	پالایشگاه اصفهان	
وزن مخصوص	۱/۰۱۵	۱/۰۱۰	ASTM D70
درجه نفوذ۰/۱ میلیمتر)	٦٧	۹۳	ASTM D5
نقطه نرمی(درجه سانتیگراد)	٤٩/٥	٤٧	ASTM D36
انگمی(سانتیمتر)	۱۰۰ <	۱۰۰<	ASTM D113
درجه اشتعال (سانتیگراد)	۲۸۱	۲۸٤	ASTM D92
درصد افت وزنی قیر(در اثر حرارت)	۰/۳	۰/٤	ASTM D6
نسبت درجه نفوذ جدید به درجه نفوذ اولیه پس از انجام آزمایش لعاب نازک قیر	۷۱	٦٨	ASTM D1754
کندروانی سینماتیک در ۱۳۵ درجه سانتیگراد (سانتی استوکس)	۳۲٥	۲٦۳	ASTM D2170
PI	-۰/٦۲	-۰/٤	

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی برای تهیه نمونه‌های آسفالتی(دانه‌بندی شماره۳و٤)



شکل ۲. روند کلی تغییر شکل ماندگار بر حسب تعداد بارگذاری در آزمایشهای خستگی

www.SID.ir

Archive of SID

۵. تحلیل آماری نتایج آزمایشها

از مهم‌ترین پارامترهایی که معمولاً در تحلیلهای آماری مورد بررسی قرار می‌گیرند، برابری میانگین‌ها هستند که برای این منظور از فرایندی به نام تحلیل واریانس[۳] استفاده می‌شود[۱۸]. با انجام این تحلیل تأثیر داشتن یا بی اثر بودن متغیرهای مورد نظر (در این تحقیق: دانه‌بندی، نوع قیر درصد قیر، درصد فضای خالی و سطح تنش) بر متغیر وابسته (در این تحقیق: مدول برجهندگی و عمرخستگی)، مشخص می شود. در این تحلیل آماری فرض صفر[۴] عبارت است از برابری میانگین‌ها (یعنی عدم تأثیر متغیر مورد نظر) و فرض مقابل[۵] عبارت است از برابر نبودن میانگین ها (یعنی مؤثر بودن متغیر مورد نظر).

بر اساس علم آمار برای بررسی برابری میانگین‌ها (بیش از ۲ جامعه(متغیر)) از تابع توزیع F استفاده می‌شود. اگر مقدار خطای نوع اول، (رد فرض صفر در حالی که این فرض درست باشد) α درنظر گرفته شود، درصورتی که احتمال متناظر با تابع F از مقدارα کوچک‌تر باشد، فرض صفر رد می‌شود. به عبارت دیگر عامل مورد نظر بر متغیر پاسخ، اثرگذار خواهد بود[۱۸]. بنابراین در تحلیل آماری نتایج آزمایشها علاوه بر متغیرهای اصلی، اثر متقابل دو به دوی آنها نیز با سطح اطمینان ۹۵٪ درنظر گرفته شد. در این پژوهش تحلیل‌های مذکور با استفاده از دو نرم‌افزار SPSS 11.5 و S-Plus 2000 انجام شده است. در تحلیل واریانس نتایج آزمایشهای ضریب برجهندگی از رابطه ۵ و برای آزمایش عمرخستگی ازرابطه ٦ استفاده شد.

همان طور که در این روابط مشاهده می‌شود، علاوه بر متغیرهای اصلی، اثر متقابل[٦] آنها نیز درنظر گرفته شده است.

$$\log M_R = C + \alpha_1 * \text{Aggregate} + \alpha_2 * \%\text{Void} + \alpha_3 * \text{Asphalt} + \alpha_4 * \text{Pb} + \alpha_{5*} \text{Aggregate} * \%\text{Void} + \alpha_6 * \text{Aggregate} * \text{Asphalt} + \alpha_7 * \text{Aggregate} * \text{Pb} + \alpha_8 * \%\text{Void} * \text{Asphalt} + \alpha_9 * \%\text{Void} * \text{Pb} + \alpha_{10} * \text{Pb} * \text{Asphalt} \quad (۵)$$

$$\log Nf = C + \alpha_1 * \text{Aggregate} + \alpha_2 * \text{Stress} + \alpha_3 * \%\text{Void} + \alpha_4 * \text{Asphalt} + \alpha_5 * \text{Pb} + \alpha_6 * \text{Aggregate} * \text{Stress} + \alpha_{7*} \text{Aggregate} * \%\text{Void} + \alpha_8 * \text{Aggregate} * \text{Asphalt} + \alpha_9 * \text{Aggregate} * \text{Pb} + \alpha_{10} * \text{Stress} * \%\text{Void} + \alpha_{11} * \text{Stress} * \text{Asphalt} + \alpha_{12} * \text{Stress} * \text{Pb} + \alpha_{13} * \%\text{Void} * \text{Asphalt} + \alpha_{14} * \%\text{Void} * \text{Pb} + \alpha_{15} * \text{Pb} * \text{Asphalt} \quad (٦)$$

در این روابط، M_R ضریب برجهندگی، N_f عمر خستگی، C مقدار ثابت، α_i ضرایب مدل، Aggregate نوع دانه‌بندی، Stress سطح تنش، %Void درصد فضای خالی، Asphalt نوع قیر وPb درصد قیر است. جدول۳، نمونه‌ای از تحلیل واریانس مربوط به نتایج آزمایش عمرخستگی را نشان می‌دهد. جدول ٤ نیز عوامل تأثیر گذار بر هریک از متغیرهای پاسخ را که پس از تحلیل واریانس به دست آمده‌اند نشان می‌دهد.

٦. نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری

در این بخش نتایج تحلیل‌های آماری انجام شده بر روی داده‌های حاصل از تعیین عمرخستگی و همچنین تعیین ضریب برجهندگی، ارایه شده‌اند.

٦-۱ عمرخستگی

بر اساس تحلیل آماری نتایج حاصل از آزمایش خستگی، نتیجه‌گیری شد که درصد فضای خالی، نوع قیر، درصد قیر و مقدار تنش، بر عمرخستگی نمونه‌های آسفالتی مؤثرند و فقط دانه‌بندی مخلوط آسفالتی (دانه‌بندی‌های شماره ۳ و ٤) تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عمر خستگی ندارند. دلیل چنین استنباطی تشابه بسیار نزدیک منحنی دانه‌بندیهای شماره ۳ و ٤ و همچنین وجه مشترک پیوسته بودن این دانه‌بندیهاست.. تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهند که با کاهش درصد فضای خالی نمونه‌های آسفالتی، عمرخستگی افزایش می‌یابد، به طوری که با کاهش درصد فضای خالی از ٦ درصد به ٤ درصد، افزایش قابل ملاحظه‌ای در عمر خستگی به دست آمده‌است (٦٦ درصد). تحقیقات Bazin نیزکه در سال ۱۹٦۷ انجام شده نشان داده‌است که با کاهش درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، عمرخستگی آسفالت افزایش می‌یابد[۷]. بر اساس مطالعات SHRP، با کاهش درصد فضای خالی در مخلوطهای آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته، عمرخستگی افزایش می‌یابد. این موضوع، مستقل از نحوه بارگذاری (کنترل تنش یا کنترل کرنش) و روش انجام آزمایش (تیر خمشی، کشش غیر مستقیم،...) است[٦].

بر اساس تحلیل آماری انجام شده، نمونه‌های آسفالتی حاوی قیر۷۰-٦۰ (درجه نفوذ) دارای عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه‌های آسفالتی حاوی قیر ۱۰۰-۸۵ هستند. این نتیجه

www.SID.ir

Archive of SID

منطبق بر تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران دیگر است[٦و٥]. این محققین اظهار داشته‌اند در آزمایشهای خستگی که به صورت کنترل تنش انجام شده، نمونه‌های آسفالتی با ویسکوزیته بیشتر دارای عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه‌های آسفالتی تهیه شده با قیرهای با ویسکوزیته کمتر هستند. از دیگر نتایج حاصل از تحلیل انجام شده در این پژوهش این است که نمونه‌های آسفالتی که دارای درصد قیر نزدیک به قیر بهینه به دست آمده از آزمایش مارشال اند، دارای عمر خستگی بیشتری هستند. تحقیقات انجام شده توسط Pell در سال ١٩٦٢، Saunier در سال ١٩٦٨، Eppa در سال ١٩٦٩، Said در سال ١٩٨٨، Brennan در سال ١٩٩٠و Moutier در سال ١٩٩١ نیز نشان می‌دهد که برای مخلوطهای آسفالتی درصد قیر بهینه‌ای وجود دارد که در آن، نمونه آسفالتی دارای بیشترین عمرخستگی است.

٦-٢ ضریب برجهندگی

بر اساس تحلیل آماری نتایج حاصل از آزمایش تعیین ضریب برجهندگی می‌توان چنین بیان کرد که درصد فضای خالی، نوع قیر و درصد قیر بر ضریب برجهندگی نمونه‌های آسفالتی تأثیر گذارند. به عبارت دیگر بین متغیرهای مورد بررسی، تنها دانه‌بندی مخلوط آسفالتی است که تأثیر چندانی بر عمرخستگی ندارد (دانه‌بندی‌ها تقریباً مشابه هستند). همچنین تحلیل آماری نشان می‌دهد متغیرهایی از مخلوط آسفالتی که بر عمرخستگی تأثیر گذارند، اثر مشابهی بر ضریب برجهندگی نمونه‌های آسفالتی دارند. با کاهش درصد فضای خالی در نمونه‌های آسفالتی، ضریب برجهندگی افزایش می‌یابد، به طوری که با کاهش درصد فضای خالی، از ٦ به ٤ درصد، ضریب برجهندگی به مقدار ٢٢ درصد افزایش پیدا می کند.

نمونه‌های آسفالتی حاوی قیر ٧٠-٦٠ (قیر سفت‌تر) ضریب برجهندگی بیشتری نسبت به نمونه‌های آسفالتی حاوی قیر ١٠٠-٨٥ (قیر نرم‌تر) ند. به عبارت دیگر هرچه سختی قیر بیشتر باشد، ضریب برجهندگی آسفالت افزایش می‌یابد.

٧. مدل‌سازی

٧-١ تعیین مدل

بر اساس تحلیل آماری انجام شده بر روی نتایج مطالعات آزمایشگاهی، عمرخستگی نمونه‌های آسفالتی، تابع سطح تنش، درصد فضای خالی ، نوع قیر، درصد قیر و اثر متقابل درصد قیر با درصد فضای خالی و نوع قیر است. تحلیل آماری نتایج حاصل از انجام آزمایش ضریب برجهندگی نیز نشان می‌دهدکه متغیرهایی که بر عمرخستگی تأثیر دارند، ضریب برجهندگی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند (بجز اثر متقابل درصد قیر و درصد فضای خالی آسفالت). بنابراین چنین استنباط می‌شودکه برای وارد کردن اثر متغیرهای درصد فضای خالی ، نوع قیر، درصد قیر و اثر متقابل درصد قیر با نوع قیر، می‌توان از ضریب برجهندگی و برای دخالت دادن اثر متقابل درصد قیر و فضای خالی از پارامترهای Pb*Va، Vb/Va، VMA یا VFA استفاده کرد (Pb درصد وزنی قیر، Va درصد فضای خالی، Vb درصد حجمی قیر، VMA درصد فضای خالی مصالح سنگی و VFA درصد فضای خالی مصالح سنگی پرشده با قیر است).

در این ارتباط مدلهای مختلفی بررسی شدند و نهایتاً براساس پارامترهای آماری (ضریب همبستگی (R^2)، آزمون t-student، ضریب همبستگی پیرسن[٧] رابطه ٧ مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی عمرخستگی به دست آمد.

$$\text{Log}\,N_f = 3.527 - 3.959\text{Log(Stress)} + 2.417\text{Log(Mr)} + 0.022\text{VFA} \qquad R^2=0.800 \quad (٧)$$

در این مدل Stress تنش، Mr ضریب برجهندگی ، VFA درصد فضای خالی مصالح سنگی پرشده با قیر و R^2 ضریب همبستگی است. لازم به یادآوری است که بر اساس تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین، ضریب همبستگی حدود ٠/٨٠ برای روابط رگرسیونی، مثبت ارزیابی می‌شود که از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعات SHRP اشاره کرد[٦].

جدول ٥، تحلیل واریانس برای مدل یاد شده را نشان می‌دهد. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود مقدار احتمال متناظر با تابع توزیع F کمتر از ٠/٠٥ به دست آمده است. به عبارت دیگر، تحت تأثیر بودن عمرخستگی توسط متغیرهای موجود در مدل، اثبات شده‌است.

www.SID.ir

Archive of SID

یادآوری می شود که در جدول مربوط به تحلیل واریانس، درصورتی که احتمال متناظر با تابع F از مقدارα (در این پژوهش برابر ۰/۰۵)کوچک تر باشد، به مفهوم آن است که عوامل مورد نظر بر متغیر پاسخ، تأثیر گذارند[۱۸].

شکل ۳ مقادیر پیش‌بینی شده برای عمر خستگی در برابر مقادیر مشاهده شده را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می شود این دو مقدار در حد مناسبی به یکدیگر نزدیک‌اند (مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده تا حدود زیادی نزدیک به خط تعادل ٤٥ درجه قرار دارند).

۷-۲ اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

در این پژوهش برای اعتبار سنجی مدل پیشنهادی، از نتایج آزمایش خستگی بر روی تعدادی از نمونه‌های آسفالتی با خصوصیات حجمی متفاوت استفاده شد. همان طور که در شکل ٤ مشاهده می‌شود نتایج آزمایش خستگی با نتایج حاصل از مدل پیشنهادی در حد قابل قبولی به یکدیگر نزدیک اند (نتایج آزمایش خستگی و نتایج حاصل از مدل پیشنهادی نزدیک به خط ٤٥ درجه قرار گرفته‌اند). برای اطمینان از نزدیکی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، در سطح اطمینان ۹۵٪ از آزمون t-student روی مقادیر باقیمانده (تفاضل مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده) استفاده شد. جدول ٦، نتیجه آزمون t را روی مقادیر باقیمانده نشان می‌دهد. براساس این جدول مقدار P-value (sig) بزرگ‌تر از ۰/۰۵ به دست می‌آید. بنابراین فرض صفر(صفربودن میانگین باقیمانده‌ها) قابل قبول است. به عبارت دیگر میانگین مقادیر باقیمانده در سطح اطمینان ۹۵٪ برابر صفر بوده و مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی عمرخستگی در ۹۵ درصد موارد منطبق با واقعیت است.

۷-۳ مقایسه مدل پیشنهادی با تعدادی از مدلهای موجود

نتایج حاصل از مقایسه مدل پیشنهادی(رابطه ۷) با مدل ارایه شده توسط شرکت نفتی شل در حالت کنترل تنش و مدل پیشنهادی موسسه آسفالت [۱۱و۹و۱]، در شکلهای ۵ الی ۸ نشان داده شده است.

این در حالی است که برای به دست آوردن برخی از پارامترهای موجود در مدلهای پیشنهادی شرکت نفتی شل و موسسه آسفالت، انجام آزمایشهای دقیق، تجهیزات ویژه و صرف زمان زیاد مورد نیازند. به عنوان مثال برای استفاده از مدل شرکت نفتی شل، اطلاع از ضریب سختی مخلوط آسفالتی که با آزمایش تیرچه ذوزنقه‌ای به دست آمده باشد، ضروری است و در مدل موسسه آسفالت نیز مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی که از آزمایش تیرچه خمشی به دست آمده باشد، مورد نیاز است، در صورتی که انجام آزمایش تعیین ضریب برجهندگی(برای تعیین عمرخستگی مخلوطهای آسفالتی با استفاده از رابطه ۷)، به راحتی امکان پذیراست. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که عموماً نتایج حاصل از مدل پیشنهادی در محدوده نتایج حاصل از دو مدل شل و موسسه آسفالت قرار می‌گیرند. استفاده از مدل شلبه جای مدل پیشنهادی، منجر به تخمین عمرخستگی محافظه‌کارانه و استفاده از مدل موسسه آسفالت، منجر به برآورد عمرخستگی بیشتر خواهد شد.

۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در چند دهه اخیر پژوهشگران مختلف، روابط گوناگونی را برای پیش‌بینی عمرخستگی مخلوطهای آسفالتی پیشنهاد کرده اند،اما به دلیل تفاوت در مصالح، روشهای انجام آزمایش و شرایط انجام آن، نتایج حاصل از این روابط، با یکدیگر متفاوت بوده‌اند. این درحالی است که برای به دست آوردن برخی از پارامترهای موجود در روابط پیشنهادی توسط پژوهشگران، انجام آزمایشهای دقیق و تجهیزات ویژه مورد نیازند.

در این تحقیق با انجام آزمایش کشش غیر مستقیم بر روی نمونه‌های آسفالتی متداول در ایران و پس از تحلیل‌های آماری و مقایسه آن با یافته‌های سایر پژوهشگران، مدلی برای محاسبه عمرخستگی نمونه‌های آسفالتی ارایه و نتیجه‌گیری شد که با استفاده از درصد فضای خالی مصالح سنگی پرشده با قیر، به همراه ضریب برجهندگی نمونه‌های آسفالتی، می‌توان رفتار خستگی مخلوطهای آسفالتی را مورد بررسی قرار داد. از ویژگی‌های مدل پیشنهادی، دربرداشتن متغیرهای عملکردی، آسان بودن اندازه‌گیری و در عین حال وجود استاندارد مشخص برای هر یک از متغیرهای موجود در مدل است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. تحلیل واریانس نتایج آزمایش خستگی

Analysis of Variance Table Response: LogNf Multiple R-Squared: 0.9288				
	Df	Sum of Sq	Mean Sq	F Value	Pr(F)
Aggregate	1	0.100452	0.100452	3.92157	0.0579445
stress	2	3.723138	1.861569	72.67434	0.0000000
٪Void	1	2.184574	2.184574	85.28422	0.0000000
Asphalt	1	1.544467	1.544467	60.29491	0.0000000
Pb	1	0.331800	0.331800	12.95325	0.0012650
Aggregate:stress	2	0.043441	0.021721	0.84795	0.4393807
Aggregate:%Void	1	0.029219	0.029219	1.14067	0.2949666
Aggregate:Asphalt	1	0.001756	0.001756	0.06855	0.7954536
Aggregate:Pb	1	0.039467	0.039467	1.54077	0.2251797
stress:%Void	2	0.129061	0.064530	2.51922	0.0992769
stress:Asphalt	2	0.172622	0.086311	3.36951	0.0493880
stress:Pb	2	0.025405	0.012702	0.49589	0.6144652
٪Void:Asphalt	1	0.003253	0.003253	0.12701	0.7243201
٪Void:Pb	1	0.281434	0.281434	10.98699	0.0026216
Asphalt:Pb	1	0.406665	0.406665	15.87591	0.0004611

جدول ٤. عوامل تأثیر گذار بر متغیرهای پاسخ

عامل	اثر قابل ملاحظه بر متغیر پاسخ	
	عمر خستگی	مدول برجهندگی
دانه بندی(شماره ۳ یا ٤)	ندارد	ندارد
درصد فضای خالی	دارد	دارد
نوع قیر	دارد	دارد
درصد قیر	دارد	دارد
دانه‌بندی* درصد فضای خالی	ندارد	ندارد
دانه‌بندی*نوع قیر	ندارد	ندارد
دانه‌بندی*درصد قیر	ندارد	ندارد
درصد فضای خالی *نوع قیر	ندارد	ندارد
درصد فضای خالی *درصد قیر	دارد	ندارد
نوع قیر *درصد قیر	دارد	دارد
سطح تنش	دارد	-
سطح تنش*دانه‌بندی	ندارد	-
سطح تنش* درصد فضای خالی	ندارد	-
سطح تنش* نوع قیر	ندارد	-
سطح تنش* درصد قیر	ندارد	-

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵. آنالیز واریانس برای مدل مذکور

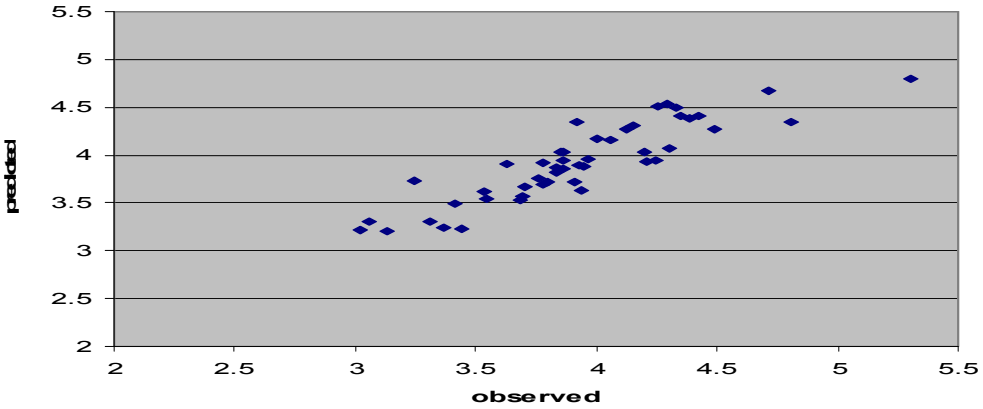
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	7.763	3	2.588	58.524	.000[a]
	Residual	1.945	44	.044		
	Total	9.708	47			

a. Predictors: (Constant), VFA, LOGSTRES, LOGMR

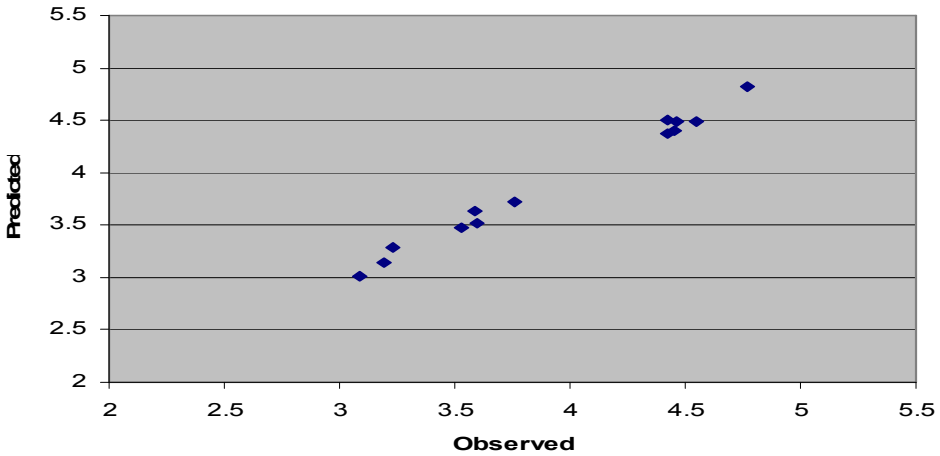
b. Dependent Variable: LOGNF

جدول ٦. نتیجه آزمون t بر روی مقادیر باقیمانده

	Test Value = 0					
					97.5% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
SUBTRACT	-.849	13	.411	-1057.9286	-4214.1881	2098.3309



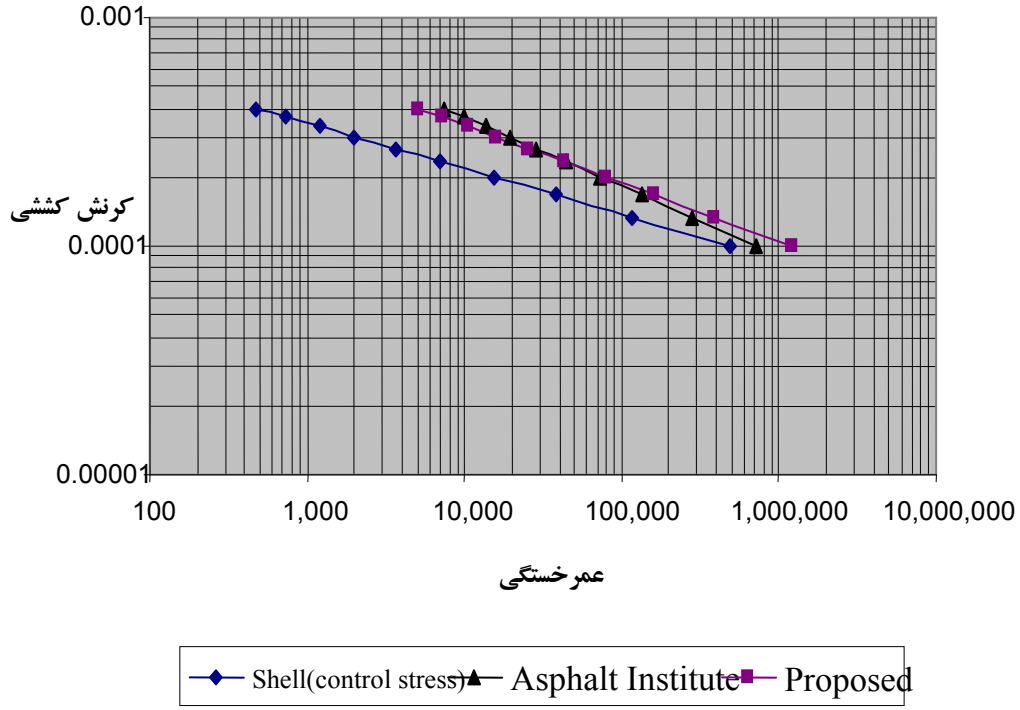
شکل ۳. تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شده



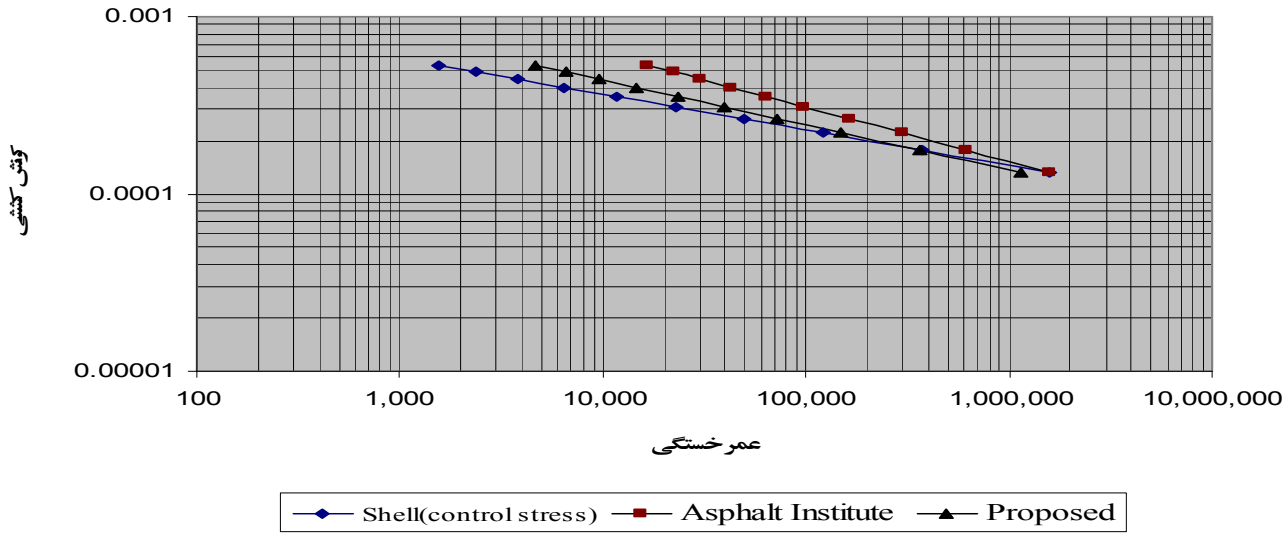
www.SID.ir

Archive of SID

شکل ٤. نتایج آزمایش خستگی و نتایج حاصل از مدل پیشنهادی برای چند نمونه آسفالتی



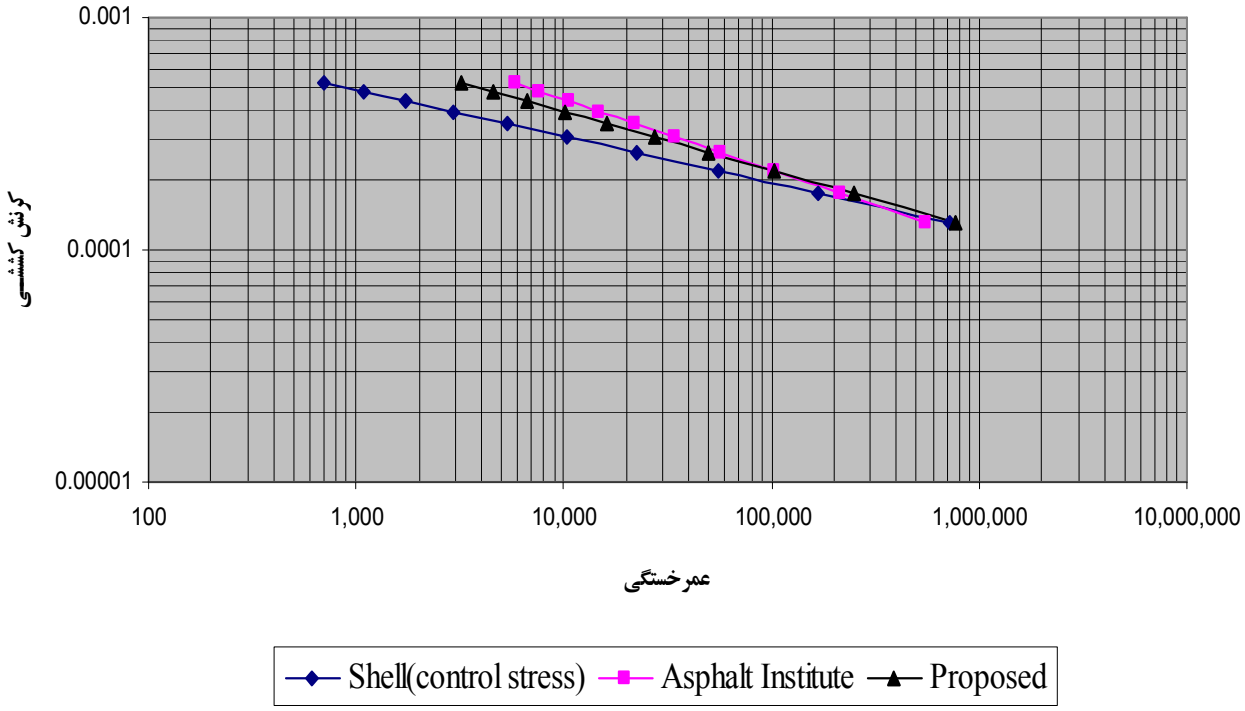
شکل ٥. مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با مدلهای شرکت شل و انستیتوآسفالت به ازای
V_b=۱۱/۲ ،Va=٦ ،Mr=۳٤٥۰ MPa



شکل ٦. مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با مدلهای شرکت شل و انستیتوآسفالت به ازای
V_b=۱۳/٥ ،Va=٤ ،Mr=۳۱۲۲ MPa

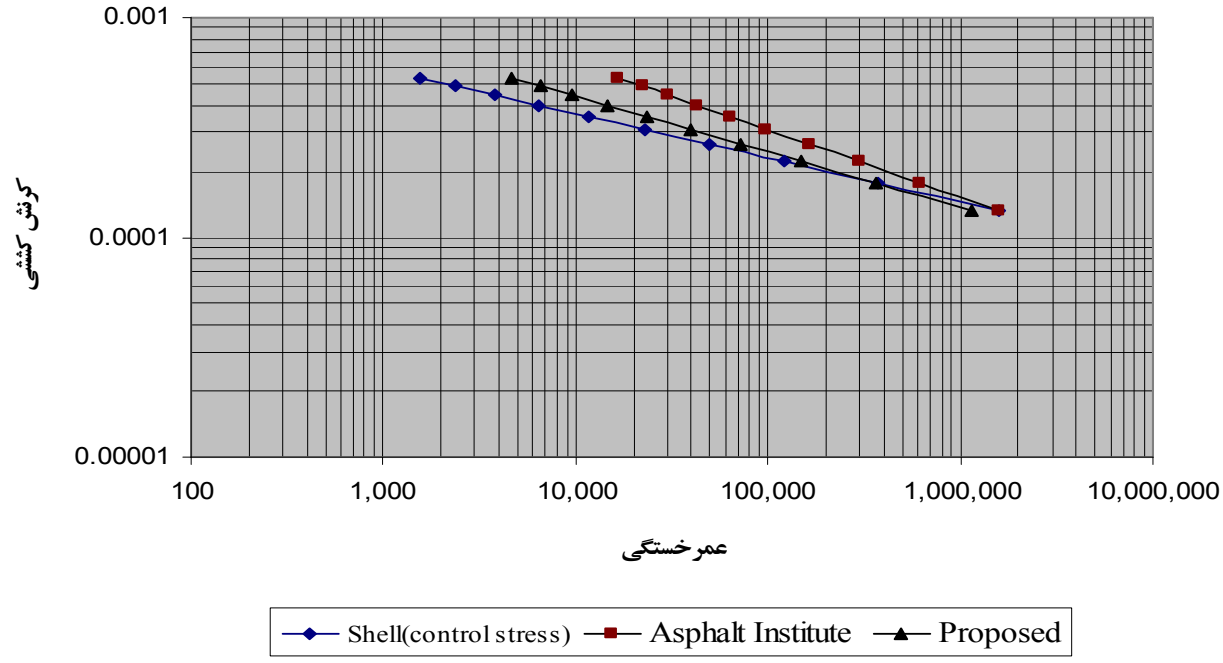
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷. مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با مدلهای شرکت شل و انستیتوآسفالت به ازای

Vb=۱۳/۳ ,Va=٦ ,Mr=۲۲۲٤ MPa



شکل ۸. مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با مدلهای شرکت شل و انستیتواسفالت به ازای

Vb=۱۵ ,Va=٤ ,Mr=۲۵۰۰ MPa

www.SID.ir

Archive of SID

۹. مراجع

1. Huang, Y.H. (1993) "Pavement analysis and design", London: Prentice-Hall Inc.

2. Yoder, E.J., Witczak, M.W. (1975) "Principles of pavement design" 2nd. Edition, London: John Willey and Sons.

3. Hsu, T.W. and Tseng, K.H. (1996) "Effect of rest periods of fatigue response of asphalt concrete mixtures", Journal of Transportation Engineering, July/August.

4. Baladi, G. Y., Schorsch، M. and Svasdisant, T. (2003) "Determining the causes of top - down cracks in bituminous pavements", U. S. Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University, August.

5. Tangella, S. C. S. R. , Craus, J., Deacon, J.A. and Monismith, C. L. (1990) "Summary report on fatigue response of asphalt mixtures", SHRP-A-003-A.

6. Strategic Highway Research Program (1994) "Fatigue response of asphalt-aggregate mixes"، Washington: Strategic Highway Research Program، SHRP-A-404.

7. RILEM (1998) "Bituminous binders and mixes", RILEM Report 17, Edited by L. Francken, Paris: RILEM

8. Sun، L., Hudson، W.R. and Zhang, Z.(2003) "Empirical - mechanical method based on stochastic modeling of fatigue damage to predict flexible pavement cracking for transportation infrastructure management" Journal of Transportation Engineering.

9. Pereira, P. A. A. (1997) "Comparison between laboratorial and field bituminous mixture" Pa is, Rilem.

10. Medani, T. O. and Molenaar, A. A. A.(2000) "Estimation of fatigue characteristics of asphalt mixes using simple tests", Heron, TNO Building and Construction Research and the Netherland, School of Advanced Studies in Construction, Vol. 45, No 3.

11. Pellinen, T. K., Christensen، D., Rowe, W. G. M. and Sharrock، M. (2004) "Fatigue transfer functions, how do they compare", Transportation Research Record, 1896.

12. Westrack fatigue performance prediction using miner's law, B.W.Tsai, J.T.Harvey, C.L.Monismith, Transportation Research Record 1809.

13. Witczak, M. W., Kaloush, K. T.Pellinen, K. and El-Basyouny, M. (2002) "Simple performance test for superpave mix design", NCHRP 465.

14. Khattab, M.J.,Baladi, G. Y. (2001) "Fatigue and permanent deformation moderls for polymer-modified asphalt mixtures", Transportation Research Record, 1767.

15. Hartman, A.M. Gillchrist، M. D. and Walsh، G. (2001) "Effect of mixture compaction on indirect tensile stiffness and fatigue", Journal of Transportation Engineering September/October 2001.

۱۶.سازمان مدیریت و برنامه ریزی(۱۳۸۱) "آیین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران"، نشریه شماره ۲۳٤، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

17. ASTM (2002) "Annual Book of ASTM Standards, Road and Paving Materials", designation D4123.

۱۸. هاشمی پرست، سید مقتدی(۱۳٦۸) "آمار و احتمال در مهندسی و علوم"، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، چاپ دوم.

www.SID.ir

Archive of SID

پانویس‌ها

1. Long-term pavement performance
2. Universal Testing Machine
3. Analysis of variance
4. Null hypothesis
5. Alternative hypothesis
6. Interaction
7. Pearson correlation

www.SID.ir