

## استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم جهت ارایه مدلی برای پیش بینی عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی\*

محمود عامری، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
احمد منصوریان، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران و عضو هیأت علمی، پژوهشکده حمل 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 بهره‌برداری)، به خرابی‌هایی از جمله قیرزدگی، انواع مختلف ترکها، ناهمواری و یا تلفیقی از آنها دچار می‌شوند. به همین دلیل متولیان راهسازی همواره به دنبال راه‌حلهایی بوده‌اند که عمر روسازی راهها را بیشینه و هزینه تعمیر و نگهداری آنها را کمینه کند. از جمله 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 عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی ارایه کرده‌اند که البته این روابط نیز برای شرایط خاص انجام آزمایش (نوع مصالح، دما و ...) معتبرند، 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 عمر خستگی 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 پر شده با قیر و ضریب برجهندگی نمونه‌های آسفالتی می‌توان رفتار خستگی مخلوطهای آسفالتی را مورد بررسی قرار داد.

واژه‌های کلیدی: ترک خستگی، عمر خستگی، مخلوطهای آسفالتی، آزمایش کشش غیر مستقیم

### ۱. مقدمه

تجاوز کند، ترکهایی در زیر لایه آسفالتی ایجاد می‌شود 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 [۱ و ۲]. به طور کلی 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.

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 می‌شود، باعث ایجاد کرنش (تنش) کششی در زیر لایه می‌شود. 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

تحقیقات عملکرد دراز مدت روسازی<sup>۱</sup> نیز بر استفاده از این آزمایش برای تعیین مشخصات مخلوط آسفالتی تأکید شده است [۱۳]. 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 [۶]. تنشهای ایجاد شده در مرکز نمونه، تحت یک بار نواری، می‌توانند از روابط ۱ و ۲ به دست آورده شوند [۵].

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi at} \left[ \sin(2\alpha) - \frac{a}{2R} \right] \quad (1)$$

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

در این روابط،  $p$  مقدار بار اعمال شده،  $a$  عرض نوار بارگذاری،  $t$  ضخامت (ارتفاع) نمونه،  $R$  شعاع نمونه و  $2\alpha$  زاویه مقابل به عرض نوار بارگذاری،  $\sigma_t$  تنش کششی (افقی) در مرکز نمونه  $\sigma_c$  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 [۵]. 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 [۶].

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 ۰/۱ ثانیه بارگذاری و ۰/۹ ثانیه باربرداری (استراحت) بر نمونه اعمال می‌شود.

در سالهای اخیر استفاده از زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۴ ثانیه نیز پیشنهاد شده است [۱۴ و ۱۳]. 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 [۱۵]. با وجود معایبی که بر این روش آزمایش متصور است، اما به دلیل ساده بودن انجام

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 [۳ و ۴]. 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 دوزنقه‌ای، آزمایش تکرار خمش با پی الاستیک، آزمایش تک محوری، آزمایش سه محوری و آزمایش کشش غیر مستقیم اشاره کرد [۶ و ۷ و ۵ و ۱]. 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) به صورت تابعی از خصوصیات فیزیکی (حجمی) و مکانیکی مخلوط آسفالتی ارائه شده است، اما به دلیل تفاوت در مصالح، روشهای انجام آزمایش و شرایط انجام آن، نتایج حاصل از روابط ارائه شده توسط محققین مختلف، با یکدیگر متفاوت است. تنوع روابط ارائه شده نشان می‌دهد که متخصصین روسازی در معرفی بهترین مدل پیش‌بینی ترکهای خستگی اتفاق نظر ندارند [۱۲ و ۱۱ و ۱۰ و ۹ و ۸ و ۷ و ۵ و ۱]. بنابراین پیشنهاد روش مناسب انجام آزمایش خستگی، (با توجه به محدودیتهای و امکانات آزمایشگاهی موجود در کشور) و ایجاد رابطه‌ای بین عمر خستگی و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مخلوط آسفالتی (که به راحتی قابل اندازه‌گیری 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 ارائه شده است.

## ۲. آزمایش کشش غیر مستقیم

آزمایش کشش غیر مستقیم از جمله آزمایش‌هایی است که برای تعیین مقاومت کششی مصالح تثبیت شده استفاده می‌شود [۲]. استفاده از این آزمایش در طرح اختلاط مخلوطهای آسفالتی از دهه ۱۹۶۰ به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته و در برنامه

آزمایش، استفاده از این روش در تعیین مشخصات مخلوط آسفالتی توصیه شده است [۱۳و۱۴].  
 Porter و Kennedy در سال ۱۹۷۵ بیان داشتند که 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 روشهاست. به همین دلیل پیشنهاد شده که برای محاسبه و برآورد عمرخستگی آسفالت، تفاضل تنش کششی و فشاری که در اثر بارگذاری در مرکز نمونه به وجود می‌آید ( $\sigma_c - \sigma_t$ )، جایگزین تنش کششی در روابط مربوط به محاسبه عمرخستگی شود. این مورد در تحقیقات اخیر SHRP نیز مورد تایید قرار گرفته است [۵و۶].

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 [۱۴و۱۷و۱۵]. متغیرهایی که در این تحقیق به آنها پرداخته شده 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.

#### ۴. 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) برجهنگی و عمرخستگی نمونه‌های آسفالتی استفاده شد.

#### ۴-۱-۱ آزمایش مدول برجهنگی

طبق تعریف، ضریب برجهنگی 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].

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_f} \quad (3)$$

در این رابطه،  $\sigma_d$  تنش انحرافی (تنش محوری در آزمایش تک محوری یا تفاضل تنش محوری از فشار محدود کننده در آزمایش سه محوری) و  $\epsilon_f$  کرنش برگشت‌پذیر است. در استاندارد ASTM D4123 [۱۷] تعیین ضریب برجهنگی

جدول ۱. متغیرهای مورد بررسی در تحقیق

| متغیر                 | سطوح متغیر                                                               |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| نوع قیر               | ۲ (قیر ۶۰-۷۰ پالایشگاه تهران و ۸۵-۱۰۰ پالایشگاه اصفهان)                  |
| دانه‌بندی             | ۲ (دانه‌بندی شماره ۳ و ۴ جدول ۹-۱ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راههای ایران) |
| درصد قیر              | ۳ (۴، ۵ و ۶ درصد وزنی مخلوط آسفالتی)                                     |
| درصد فضای خالی آسفالت | ۲ (۴ و ۶ درصد)                                                           |
| تنش                   | ۳ (۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال)                                            |

#### ۴-۲ 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.

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<sup>۲</sup> استفاده شده است. ضریب پواسون نمونه‌های آسفالتی نیز با استفاده از رابطه ۴ محاسبه و مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳].

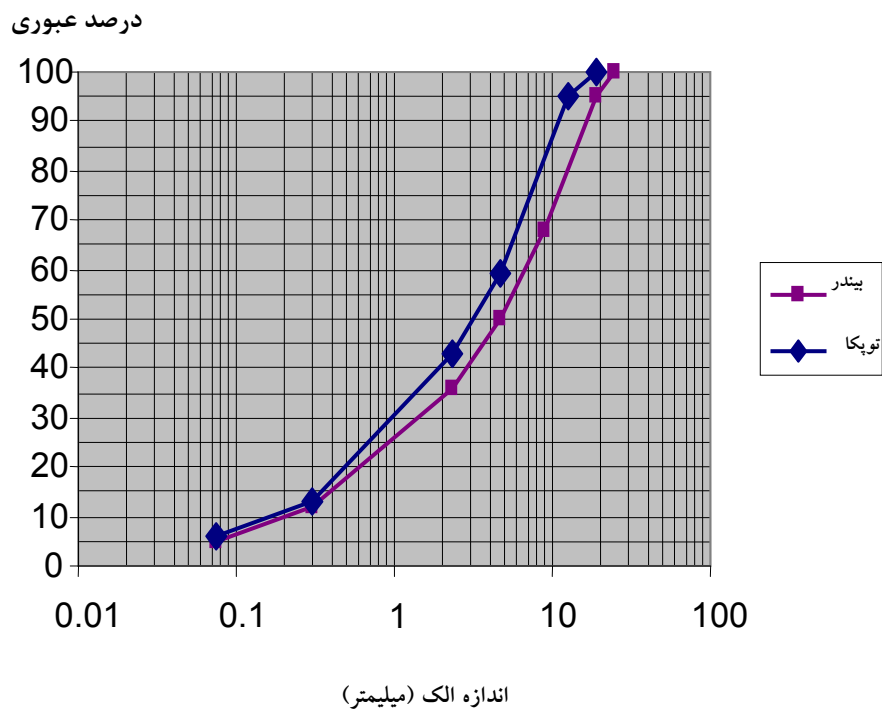
$$v = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(3.1849 - 0.04233t)}} \quad (4)$$

در این رابطه،  $v$  ضریب پواسون،  $e$  عدد نپر و  $t$  دما برحسب درجه فارنهایت است. برای انجام آزمایش تعیین ضریب برجهندگی، ابتدا نمونه‌های آسفالتی به مدت ۲۴ 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.

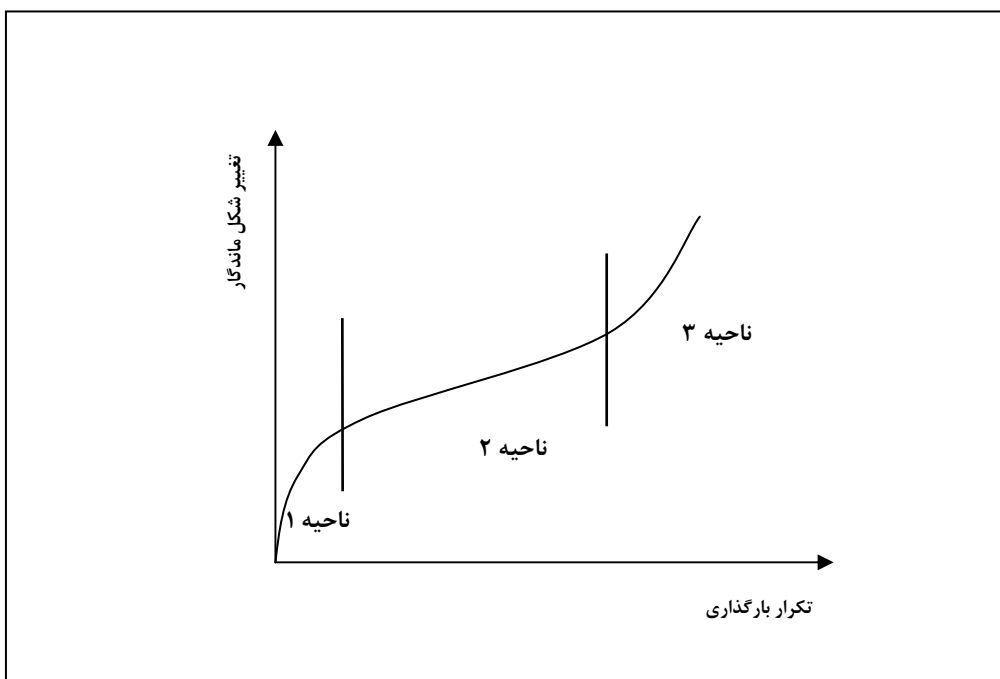
جدول ۲. مشخصات قیرهای مورد استفاده

| استاندارد  | منبع قیر         |                 | مشخصه                                                                   |
|------------|------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|
|            | پالایشگاه اصفهان | پالایشگاه تهران |                                                                         |
| ASTM D70   | ۱/۰۱۰            | ۱/۰۱۵           | وزن مخصوص                                                               |
| ASTM D5    | ۹۳               | ۶۷              | درجه نفوذ (۰/۱ میلیمتر)                                                 |
| ASTM D36   | ۴۷               | ۴۹/۵            | نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)                                              |
| ASTM D113  | ۱۰۰ <            | ۱۰۰ <           | انگمی (سانتیمتر)                                                        |
| ASTM D92   | ۲۸۴              | ۲۸۱             | درجه اشتعال (سانتیگراد)                                                 |
| ASTM D6    | ۰/۴              | ۰/۳             | درصد افت وزنی قیر (در اثر حرارت)                                        |
| ASTM D1754 | ۶۸               | ۷۱              | نسبت درجه نفوذ جدید به درجه نفوذ اولیه پس از انجام آزمایش لعاب نازک قیر |
| ASTM D2170 | ۲۶۳              | ۳۲۵             | کندروانی سینماتیک در ۱۳۵ درجه سانتیگراد (ساتی استوکس)                   |
|            | -۰/۴             | -۰/۶۲           | PI                                                                      |

استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم جهت ارایه مدلی برای پیش‌بینی...



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی برای تهیه نمونه‌های آسفالتی (دانه‌بندی شماره ۳ و ۴)



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

## 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<sup>۳</sup> 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 می‌شود. در این تحلیل آماری فرض صفر<sup>۴</sup> عبارت است از برابری میانگین‌ها (یعنی عدم تأثیر متغیر مورد نظر) و فرض مقابل<sup>۵</sup> عبارت است از برابر نبودن میانگین‌ها (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)  $\alpha$  در نظر گرفته شود، در صورتی که احتمال متناظر با تابع F از مقدار  $\alpha$  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٪ در نظر 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 از رابطه ۶ استفاده شد. همان طور که در این روابط مشاهده می‌شود، علاوه بر متغیرهای اصلی، اثر متقابل<sup>۶</sup> آنها نیز در نظر گرفته شده است.

$$\log M_R = C + \alpha_1 * \text{Aggregate} + \alpha_2 * \text{\%Void} + \alpha_3 * \text{Asphalt} + \alpha_4 * \text{Pb} + \alpha_5 * \text{Aggregate} * \text{\%Void} + \alpha_6 * \text{Aggregate} * \text{Asphalt} + \alpha_7 * \text{Aggregate} * \text{Pb} + \alpha_8 * \text{\%Void} * \text{Asphalt} + \alpha_9 * \text{\%Void} * \text{Pb} + \alpha_{10} * \text{Pb} * \text{Asphalt} \quad (5)$$

$$\log N_f = C + \alpha_1 * \text{Aggregate} + \alpha_2 * \text{Stress} + \alpha_3 * \text{\%Void} + \alpha_4 * \text{Asphalt} + \alpha_5 * \text{Pb} + \alpha_6 * \text{Aggregate} * \text{Stress} + \alpha_7 * \text{Aggregate} * \text{\%Void} + \alpha_8 * \text{Aggregate} * \text{Asphalt} + \alpha_9 * \text{Aggregate} * \text{Pb} + \alpha_{10} * \text{Stress} * \text{\%Void} + \alpha_{11} * \text{Stress} * \text{Asphalt} + \alpha_{12} * \text{Stress} * \text{Pb} + \alpha_{13} * \text{\%Void} * \text{Asphalt} + \alpha_{14} * \text{\%Void} * \text{Pb} + \alpha_{15} * \text{Pb} * \text{Asphalt} \quad (6)$$

در این روابط،  $M_R$  ضریب برجهندگی،  $N_f$  عمر خستگی، C مقدار ثابت،  $\alpha_i$  ضرایب مدل، Aggregate نوع دانه‌بندی، Stress سطح تنش، %Void درصد فضای خالی، Asphalt نوع قیر و Pb درصد قیر است. جدول ۳، نمونه‌ای از تحلیل واریانس مربوط به نتایج آزمایش عمرخستگی را نشان می‌دهد. جدول ۴ نیز عوامل تأثیر گذار بر هریک از متغیرهای پاسخ را که پس از تحلیل واریانس به دست آمده‌اند نشان می‌دهد.

## ۶. 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، ارائه شده‌اند.

### ۶-۱ 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 ۴) تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عمر خستگی ندارند. دلیل چنین استنباطی تشابه بسیار نزدیک منحنی دانه‌بندیهای شماره ۳ و ۴ 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 ۶ درصد به ۴ درصد، افزایش قابل ملاحظه‌ای در عمر خستگی به دست آمده است (۶۶ درصد). تحقیقات Bazin نیز که در سال ۱۹۶۷ 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 [۶].

بر اساس تحلیل آماری انجام شده، نمونه‌های آسفالتی حاوی قیر ۷۰-۶۰ (درجه نفوذ) دارای عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه‌های آسفالتی حاوی قیر ۱۰۰-۸۵ هستند. این نتیجه

## ۷. مدل‌سازی

### ۷-۱ 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 برجهنگی نیز نشان می‌دهد که متغیرهایی که بر عمرخستگی تأثیر دارند، ضریب برجهنگی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند (بجز اثر متقابل درصد قیر و درصد فضای خالی آسفالت). بنابراین چنین استنباط می‌شود که برای وارد کردن اثر متغیرهای درصد فضای خالی، نوع قیر، درصد قیر و اثر متقابل درصد قیر با نوع قیر، می‌توان از ضریب برجهنگی 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 پر شده 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<sup>۷</sup> رابطه ۷ مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی عمرخستگی به دست آمد.

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

در این مدل  $\text{Stress}$  تنش،  $\text{Mr}$  ضریب برجهنگی،  $\text{VFA}$  درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر و  $R^2$  ضریب همبستگی است. لازم به یادآوری است که بر اساس تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین، ضریب همبستگی حدود ۰/۸۰ برای روابط رگرسیونی، مثبت ارزیابی می‌شود که از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعات SHRP اشاره کرد [۶].

جدول ۵، 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 ۰/۰۵ به دست آمده است. به عبارت دیگر، تحت تأثیر بودن عمرخستگی توسط متغیرهای موجود در مدل، اثبات شده است.

منطبق بر تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران دیگر است [۵ و ۶]. 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 ۱۹۶۲، Saunier در سال ۱۹۶۸، Eppa در سال ۱۹۶۹، Said در سال ۱۹۸۸، Brennan در سال ۱۹۹۰ و Moutier در سال ۱۹۹۱ نیز نشان می‌دهد که برای مخلوطهای آسفالتی درصد قیر بهینه‌ای وجود دارد که در آن، نمونه آسفالتی دارای بیشترین عمرخستگی است.

### ۶-۲ ضریب برجهنگی

بر اساس تحلیل آماری نتایج حاصل از آزمایش تعیین ضریب برجهنگی می‌توان چنین بیان کرد که درصد فضای خالی، نوع قیر و درصد قیر بر ضریب برجهنگی 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 برجهنگی نمونه‌های آسفالتی دارند. با کاهش درصد فضای خالی در نمونه‌های آسفالتی، ضریب برجهنگی افزایش می‌یابد، به طوری که با کاهش درصد فضای خالی، از ۶ به ۴ درصد، ضریب برجهنگی به مقدار ۲۲ درصد افزایش پیدا می‌کند.

نمونه‌های آسفالتی حاوی قیر ۷۰-۶۰ (قیر سفت‌تر) ضریب برجهنگی بیشتری نسبت به نمونه‌های آسفالتی حاوی قیر ۱۰۰-۸۵ (قیر نرم‌تر) ند. به عبارت دیگر هرچه سختی قیر بیشتر باشد، ضریب برجهنگی آسفالت افزایش می‌یابد.

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 دوزنقه‌ای 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 برجهنگی (برای تعیین عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از رابطه ۷)، به راحتی امکان پذیر است. 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 شله 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 کرده‌اند، 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 ارائه و نتیجه‌گیری شد که با استفاده از درصد فضای خالی مصالح سنگی پرشده با قیر، به همراه ضریب برجهنگی 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.

یادآوری می‌شود که در جدول مربوط به تحلیل واریانس، در صورتی که احتمال متناظر با تابع  $F$  از مقدار  $\alpha$  (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 می‌شود این دو مقدار در حد مناسبی به یکدیگر نزدیک‌اند (مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده تا حدود زیادی نزدیک به خط تعادل ۴۵ 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 ۴ مشاهده می‌شود نتایج آزمایش خستگی با نتایج حاصل از مدل پیشنهادی در حد قابل قبولی به یکدیگر نزدیک‌اند (نتایج آزمایش خستگی و نتایج حاصل از مدل پیشنهادی نزدیک به خط ۴۵ 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 ۶، 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 (صفر بودن 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 ارائه شده توسط شرکت نفتی شل در حالت کنترل تنش و مدل پیشنهادی موسسه آسفالت [۱۱ و ۹]، در شکل‌های ۵ الی ۸ نشان داده شده است.



استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم جهت ارایه مدلی برای پیش‌بینی...

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 ۴. عوامل تأثیر گذار بر متغیرهای پاسخ

| اثر قابل ملاحظه بر متغیر پاسخ |           | عامل                       |
|-------------------------------|-----------|----------------------------|
| مدول برجهنگی                  | عمر خستگی |                            |
| ندارد                         | ندارد     | دانه بندی (شماره ۳ یا ۴)   |
| دارد                          | دارد      | درصد فضای خالی             |
| دارد                          | دارد      | نوع قیر                    |
| دارد                          | دارد      | درصد قیر                   |
| ندارد                         | ندارد     | دانه بندی * درصد فضای خالی |
| ندارد                         | ندارد     | دانه بندی * نوع قیر        |
| ندارد                         | ندارد     | دانه بندی * درصد قیر       |
| ندارد                         | ندارد     | درصد فضای خالی * نوع قیر   |
| ندارد                         | دارد      | درصد فضای خالی * درصد قیر  |
| دارد                          | دارد      | نوع قیر * درصد قیر         |
| -                             | دارد      | سطح تنش                    |
| -                             | ندارد     | سطح تنش * دانه بندی        |
| -                             | ندارد     | سطح تنش * درصد فضای خالی   |
| -                             | ندارد     | سطح تنش * نوع قیر          |
| -                             | ندارد     | سطح تنش * درصد قیر         |

جدول ۵. آنالیز واریانس برای مدل مذکور

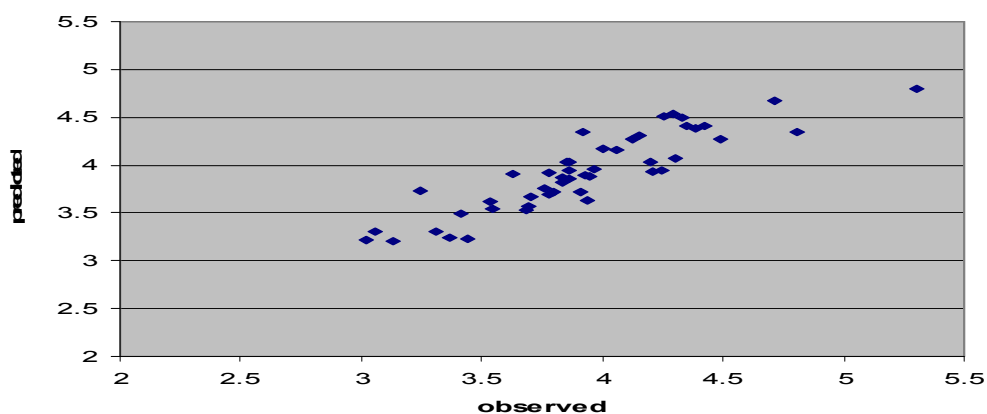
| Model |            | Sum of Squares | df | Mean Square | F      | Sig.              |
|-------|------------|----------------|----|-------------|--------|-------------------|
| 1     | Regression | 7.763          | 3  | 2.588       | 58.524 | .000 <sup>a</sup> |
|       | Residual   | 1.945          | 44 | .044        |        |                   |
|       | Total      | 9.708          | 47 |             |        |                   |

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

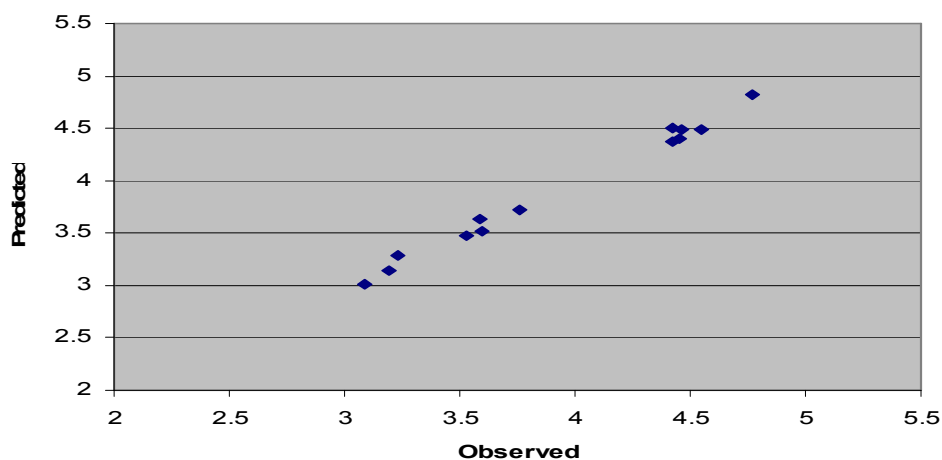
b. Dependent Variable: LOGNF

جدول ۶. نتیجه آزمون t بر روی مقادیر باقیمانده

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

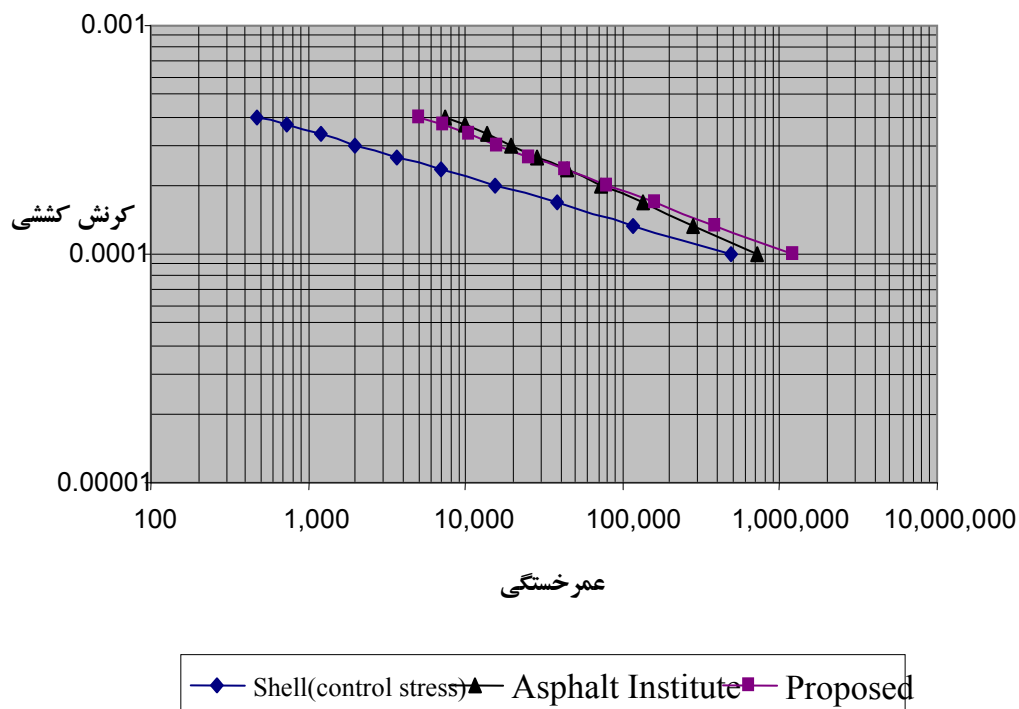


شکل ۳. تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شده



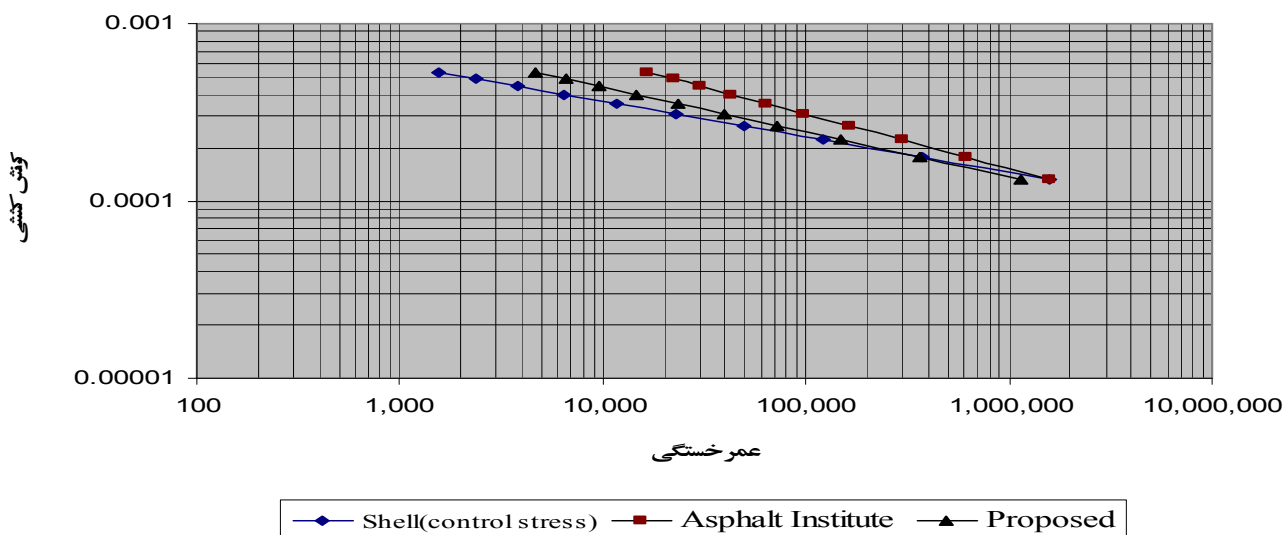
استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم جهت ارایه مدلی برای پیش‌بینی...

شکل ۴. نتایج آزمایش خستگی و نتایج حاصل از مدل پیشنهادی برای چند نمونه آسفالتی



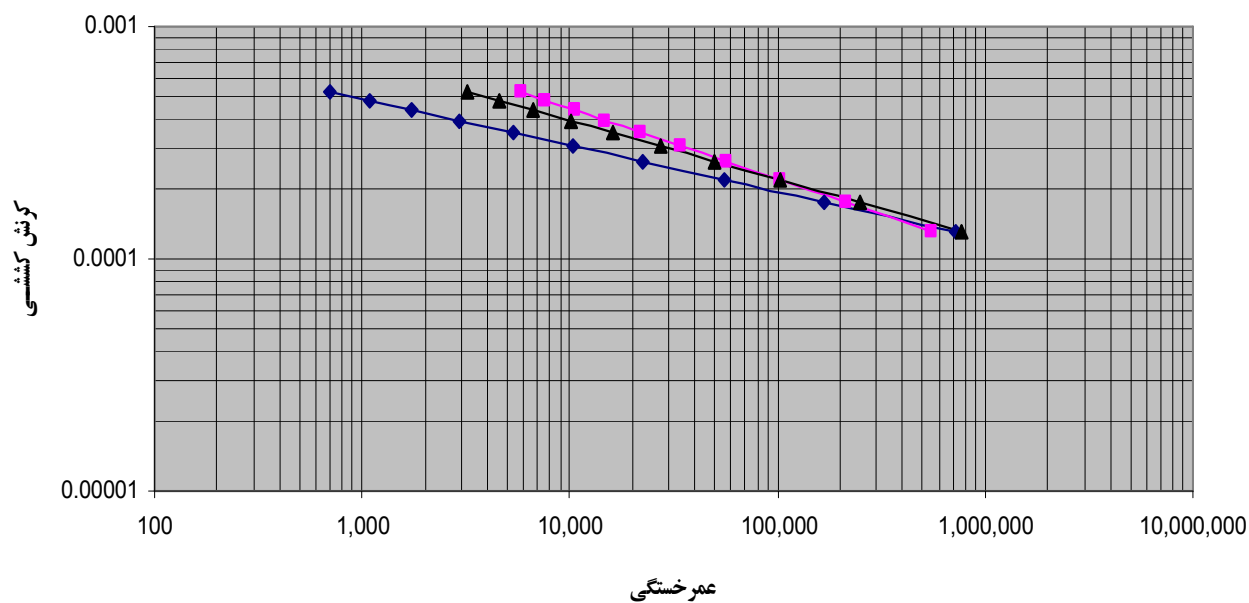
شکل ۵. مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با مدل‌های شرکت شل و انستیتو آسفالت به ازای

$$V_b=11/2, V_a=6, Mr=3450 \text{ MPa}$$



شکل ۶. مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با مدل‌های شرکت شل و انستیتو آسفالت به ازای

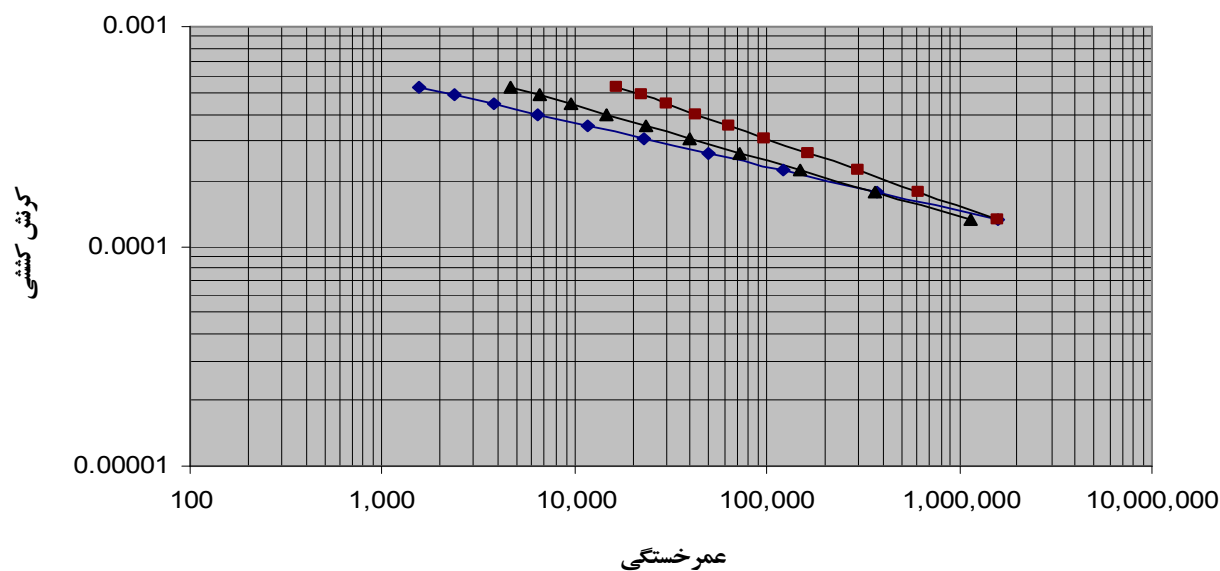
$$V_b=13/5, V_a=4, Mr=3122 \text{ MPa}$$



—◆— Shell(control stress) —■— Asphalt Institute —▲— Proposed

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

$$V_b=13/3, V_a=6, Mr=2224 \text{ MPa}$$



—◆— Shell(control stress) —■— Asphalt Institute —▲— Proposed

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

$$V_b=15, V_a=4, Mr=2500 \text{ MPa}$$

## ۹. مراجع

- 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 models 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 ۲۳۴، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.
17. ASTM (2002) "Annual Book of ASTM Standards, Road and Paving Materials", designation D4123.
۱۸. هاشمی پرست، سید مقتدی (۱۳۶۸) "آمار و احتمال در مهندسی و علوم"، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ دوم.
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" 2<sup>nd</sup>. 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

پانویس ها

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