

## بررسی مدل‌های خستگی و تغییر شکل‌های دائمی در طراحی مکانیستیک روسازی

سیدعلی ضیائی<sup>(۱)\*</sup> محمد پوررضا<sup>(۲)</sup>

(۱) مربی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تربت حیدریه

(۲) کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، شرکت مترا

تاریخ ثبت اولیه: ۸۴/۱۲/۲۴، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۸۶/۰۶/۲۰، تاریخ پذیرش: ۸۶/۰۸/۲۵

**چکیده** مدل ترک‌های خستگی و تغییر شکل‌های دائمی از مهمترین معیارها در طراحی مکانیستیک روسازی‌ها می‌باشند. در روش‌های طراحی مکانیستیک روسازی، مدل خستگی بر اساس کرنش کششی زیر لایه آسفالتی بیان می‌شود، اما در طراحی مکانیستیک روکش کرنش کششی گاهی در زیر لایه روکش و گاهی در زیر لایه آسفالتی در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه تعیین عمر خستگی روسازی با در نظر گرفتن کرنش‌های کششی زیر لایه آسفالتی و تعیین عمر تغییر شکل‌های دائمی خاک بستر روسازی با محاسبه کرنش فشاری بالای لایه ساب‌گرید مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. این بررسی با استفاده از برنامه تحلیلی Ken Layer برای روسازی‌های با ضخامت‌های مختلف (نازک، متوسط و ضخیم) که بر روی ۳ نوع خاک بستر متفاوت (ضخیم، متوسط و قوی) قرار گرفته‌اند، انجام شده است. به منظور تعیین میزان بحرانی بودن معیار تغییر شکل‌های دائمی در برابر معیار خستگی به مقایسه این معیارها برای روسازی‌هایی با ضخامت‌های مختلف، پرداخته شده است. در پایان منحنی‌هایی برای طراحی روسازی‌ها با در نظرگیری معیارهای بالا ارائه گردیده است.

**واژه‌های کلیدی** معیار خستگی، معیار تغییر شکل‌های دائمی، طرح مکانیستیک روسازی، کرنش‌های فشاری و کششی

\*عهده دار مکاتبات

نشانی: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تربت حیدریه، گروه عمران

تلفن: ۰۵۱۱-۶۰۸۵۸۷۹ پست الکترونیکی: sali81@mehr.sharif.edu

رابطه (۱) مورد استفاده قرار داد. در این مطالعه استفاده از رابطه زیر پیشنهاد شده است [۳].

$$E_1 = \left[ \frac{h_{1\alpha} (E_{1\alpha})^{1/3} + h_{1ov} (E_{1ov})^{1/3}}{h_{1\alpha} + h_{1ov}} \right]^3 \quad (2)$$

### ۳- معیار تغییر شکل‌های دائمی

رابطه‌ای که برای این معیار پیشنهاد شده است، مطابق رابطه زیر می‌باشد [۴]:

$$N_d = f_4 (\varepsilon_c)^{-f_5} \quad (3)$$

در این رابطه:

$N_d$ : تعداد تکرار مجاز بار برای محدود کردن تغییر شکل‌های دائمی،

$\varepsilon_d$ : کرنش فشاری در بالای ساب‌گرید و

$f_4$  و  $f_5$ : ضرایب ثابتی هستند که از آزمایش‌های جاده‌ای یا عملکردهای میدانی توسط موسسات مختلف، مقادیر متفاوتی برای آنها پیشنهاد شده است که در جدول (۲) آورده شده‌اند. خاطر نشان می‌سازد در محاسبات این مطالعه ضرایب انستیتو آسفالت مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۲ مقادیر ضرایب ثابت  $f_4$  و  $f_5$  [3,4]

نام موسسه	$f_4$	$f_5$
انستیتو آسفالت	$1/365 \times 10^{-9}$	۴/۴۷۷
کمپانی شل (۱۹۷۷)	$6/15 \times 10^{-7}$	۴
دانشگاه ناتینگهام (۱۹۷۷)	$1/135 \times 10^{-6}$	۳/۵۷۱

### ۴- مشخصات روسازی

اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق براساس مشخصات روسازی‌های با سه ضخامت مختلف؛ روسازی نازک، متوسط و ضخیم بر روی سه نوع بستر مختلف؛ ضعیف، متوسط و قوی (البته به علت حجم بالای محاسبات تنها بستر ضعیف در این مطالعه بررسی شده است) قرار گرفته است [5]. مدول الاستیک لایه آسفالت متغیر می‌باشد که مقادیر مربوطه در جداول (۳)، (۴) و (۵) آورده شده است.

### ۱- مقدمه

به طور معمول در طراحی مکانیستیک روسازی‌ها دو معیار مهم ترک‌های خستگی (Fatigue cracking) و تغییر شکل‌های دائمی (Permanent deformation) در نظر گرفته می‌شوند [1]. برای استفاده از این معیارها محاسبه کرنش‌های کششی و فشاری در پایین لایه آسفالتی و بالای لایه ساب‌گرید مورد نیاز است [2].

### ۲- معیار ترک‌های خستگی

رابطه کلی این معیار به شکل زیر می‌باشد [3]:

$$N_f = f_1 (\varepsilon_t)^{-f_2} (E_1)^{-f_3} \quad (1)$$

$N_f$ : تعداد مجاز تکرار بار برای جلوگیری از ترک خستگی،

$\varepsilon_t$ : کرنش کششی زیر لایه آسفالتی،

$E_1$ : مدول الاستیک لایه آسفالتی و

$f_1$ ،  $f_2$  و  $f_3$ : ضرایب ثابتی هستند که موسسه‌های تحقیقاتی و اداره‌های راه براساس تجارب خود، متفاوت گزارش نموده‌اند. مقادیر به دست آمده توسط انستیتو آسفالت و کمپانی شل در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱ مقادیر ضرایب ثابت  $f_1$ ،  $f_2$  و  $f_3$  [3]

نام موسسه	$f_1$	$f_2$	$f_3$
انستیتو آسفالت	۰/۰۷۹۶	۳/۲۹۱	۰/۸۵۴
کمپانی شل (۱۹۸۲)	۰/۰۶۸۵	۵/۶۷۱	۲/۳۶۳

در طراحی مکانیستیک روسازی، مدل خستگی بیان شده براساس کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی بیان می‌شود. اما در طراحی مکانیستیک روکش کرنش کششی گاهی در زیر لایه روکش و گاهی در زیر لایه آسفالتی در نظر گرفته می‌شود. چنانچه کرنش کششی در زیر لایه روکش در نظر گرفته شود، مقدار  $E_1$  همان مدول الاستیک لایه روکش است، و در صورتی که کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی در نظر گرفته شود، باید یک مدول الاستیک معادل را به عنوان مقدار  $E_1$  در

می‌باشد. شعاع چرخ‌ها و مشخصات دقیق بارگذاری در شکل (۱) آورده شده است.

### ۵- بارگذاری

بار مورد استفاده در محاسبات تحلیلی این مطالعه مطابق استاندارد آشتو یعنی محور تک ۸/۲ تنی (۸۰ KN)

جدول ۳ مشخصات لایه‌ها

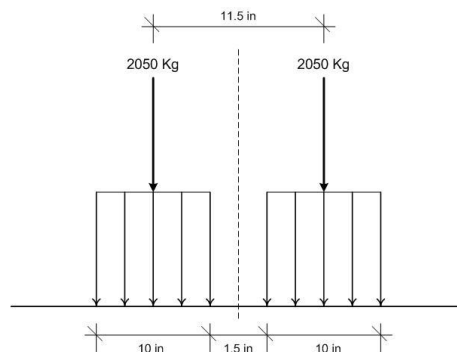
ضریب پواسون	مدول الاستیک ( $\text{kg/cm}^2$ )	مشخصات	
		لایه	
۰/۲۵	۵۵۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰	روکش	
۰/۳۵	۴۲۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰	آسفالت	
۰/۳۰	۱۷۵۰	اساس	
۰/۳۵	۱۰۵۰	زیراساس	
۰/۵۰	۳۵۰	ضعیف	بستر
۰/۴۰	۵۲۵	متوسط	
۰/۳۵	۹۸۰	قوی	

جدول ۴ انواع کلی روسازی‌ها

ضخامت (سانتیمتر)				لایه	
زیراساس	اساس	آسفالتی	روکش	نوع	
۲۵	۲۰	۱۰	۵	نازک	
۳۵	۲۵	۱۲	۷	متوسط	
۴۰	۲۵	۱۵	۱۰	ضخیم	

جدول ۵ مشخصات انواع خاک بستر

ضعیف	متوسط	قوی	انواع بستر
۳-۷	۸-۱۲	>۱۲	C.B.R.



شکل ۱ مشخصات بارگذاری در نظر گرفته شده

جدول ۶ کرنش‌های بالای لایه ساب‌گرید و تعداد تکرار مجاز بار براساس معیار خستگی با در نظر گرفتن کرنش زیر لایه روکش

مدول الاستیک لایه آسفالتی (Kg/cm <sup>2</sup> )				نوع خاک بستر	نوع روسازی
۴۲۰۰۰	۳۲۰۰۰	۲۲۰۰۰	۱۲۰۰۰		
۳۶۳۱۳۰ ۰/۵۹۸۲×۱۰ <sup>-۳</sup>	۳۶۶۶۱۰ ۰/۶۴۰۱×۱۰ <sup>-۳</sup>	۴۱۶۳۲۰ -۰/۶۷۸۷×۱۰ <sup>-۳</sup>	۷۱۸۹۴۰ -۰/۶۷۲۸×۱۰ <sup>-۳</sup>	ضعیف	نازک
۳۹۴۶۷۰ ۰/۵۸۳۲×۱۰ <sup>-۳</sup>	۳۹۲۷۲۰ ۰/۶۲۶۸×۱۰ <sup>-۳</sup>	۴۳۵۳۵۰ ۰/۶۶۹۵×۱۰ <sup>-۳</sup>	۷۰۸۹۶۰ ۰/۶۷۵۷×۱۰ <sup>-۳</sup>	متوسط	
۰/۱۴۰۹×۱۰ <sup>-۳</sup> ۰/۵۶۲۲-۱۰ <sup>-۳</sup>	۴۳۳۹۴۰ ۰/۶۰۸۱×۱۰ <sup>-۳</sup>	۴۶۴۹۰۰ ۰/۶۵۶۳×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶۹۸۵۸۰ ۰/۶۷۸۷×۱۰ <sup>-۳</sup>	قوی	
۵۴۶۳۷۰ ۰/۵۲۸۴×۱۰ <sup>-۳</sup>	۵۰۹۱۳۰ ۰/۵۷۹۳×۱۰ <sup>-۳</sup>	۵۰۸۰۸۰ ۰/۶۳۸۸×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶۷۱۵۲۰ ۰/۶۸۶۹×۱۰ <sup>-۳</sup>	ضعیف	متوسط
۵۸۵۸۰۰ ۰/۵۱۷۳×۱۰ <sup>-۳</sup>	۵۳۹۸۳۰ ۰/۵۶۹۱×۱۰ <sup>-۳</sup>	۵۲۹۶۹۰ ۰/۶۳۰۸×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶۷۵۴۵۰ ۰/۶۸۵۷×۱۰ <sup>-۳</sup>	متوسط	
۶۳۳۸۲۰ ۰/۵۰۵۱×۱۰ <sup>-۳</sup>	۵۷۴۳۵۰ ۰/۵۵۸۵×۱۰ <sup>-۳</sup>	۵۴۹۲۲۰ ۰/۶۲۳۹×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶۶۳۵۹۰ ۰/۶۸۹۴×۱۰ <sup>-۳</sup>	قوی	
۸۳۶۴۷۰ ۰/۴۶۴۲×۱۰ <sup>-۳</sup>	۷۱۷۲۵۰ ۰/۵۲۲۰×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶۲۸۶۲۰ ۰/۵۹۸۸×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶۴۳۱۰۰ ۰/۶۹۶۰×۱۰ <sup>-۳</sup>	ضعیف	ضخیم
۰۹۰۱۳۹۰ ۰/۴۵۳۸×۱۰ <sup>-۳</sup>	۷۶۴۸۹۰ ۵۱۱۹×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶۶۰۲۳۰ ۰/۵۹۰۰×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶۵۶۲۴۰ ۰/۶۹۱۷×۱۰ <sup>-۳</sup>	متوسط	
۹۸۳۴۳۰ ۰/۴۴۱۹×۱۰ <sup>-۳</sup>	۸۲۱۷۶۰ ۰/۵۰۰۹×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶۹۳۴۷۰ ۵۸۱۲×۱۰ <sup>-۳</sup>	۶۶۰۳۶۰ ۰/۶۹۰۴×۱۰ <sup>-۳</sup>	قوی	

بالای لایه خاک بستر بیان می‌شود [۸] و [۹]. در این مطالعه برای انواع مختلف روسازی‌ها (نازک، متوسط و ضخیم) که بر روی بسترهای متوسط، قوی و ضعیف قرار گرفته‌اند، کرنش‌های افقی در زیر لایه آسفالتی و کرنش‌های فشاری قائم در بالای لایه خاک بستر توسط برنامه Kenlayer و با مشخصات بارگذاری یاد شده محاسبه شده‌اند. مقادیر این کرنش‌ها و تعداد تکرار مجاز بار در جدول‌های (۶) و (۷) آورده شده‌اند.

ضرایب  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$  مورد استفاده در این قسمت، ضرایب پیشنهادی توسط انستیتو آسفالت بوده است. مثبت بودن کرنش‌ها در جدول نشان دهنده فشاری بودن آنها است و علامت منفی به معنای کششی

برای تحلیل روسازی‌های انعطاف‌پذیر، نرم‌افزارهای متعددی مانند MFPDS و Vesys, Elsym5, Kenlayer وجود دارد [۶] و [۷]. تحلیل‌های انجام شده در این مطالعه (محاسبه کرنش‌ها) با استفاده از نرم‌افزار Kenlayer و با فرض رفتار الاستیک لایه‌های روسازی انجام شده است.

#### ۶- کرنش‌های فشاری و تعداد تکرار مجاز بار

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد در طراحی مکانیستیک روسازی، مدل خستگی طبق رابطه (۱) بر اساس کرنش کششی افقی در زیر لایه آسفالتی و مدل تغییر شکل‌های دائمی خاک بستر طبق رابطه (۳) بر اساس کرنش فشاری

متوسط، معیار تغییر شکل‌های دائمی حاکم است. برای خاک بستر قوی، با وجود نزدیکی دو معیار، ترک‌های خستگی و تغییر شکل‌های دائمی، همچنان تغییر شکل معیار تعیین کننده است. این روند برای روسازی‌های متوسط و ضخیم نیز وجود دارد.

یکی دیگر از نتایج قابل توجه، تغییرات مربوط به معیار ترک‌های خستگی، به ویژه در روسازی‌های متوسط و ضخیم می‌باشد که با افزایش مدول الاستیسیته لایه آسفالتی تا حدود  $22000 \text{ Kg/cm}^2$  باعث کاهش توان باربری روسازی در این خصوص می‌شود؛ با افزایش مدول الاستیسیته مجدداً روسازی دارای مقاومت بیشتری در برابر ترک‌های خستگی می‌گردد.

بودن کرنش می‌باشد.

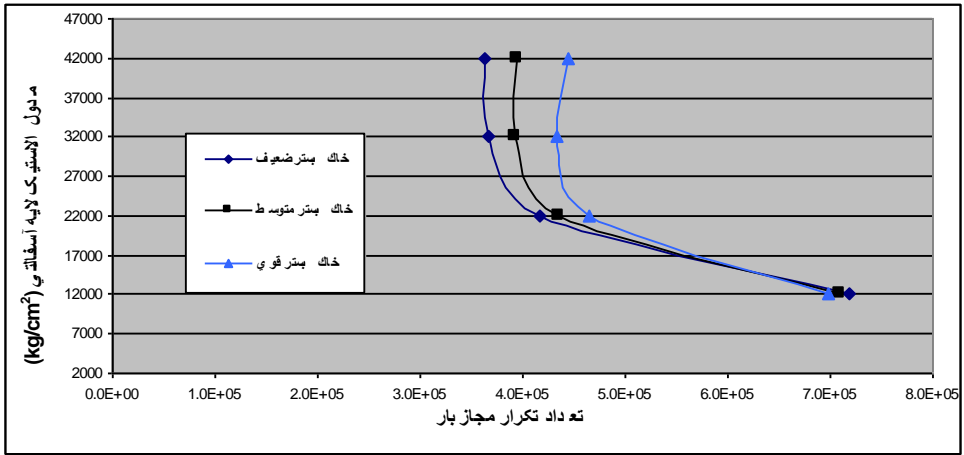
#### ۷- تعداد تکرار مجاز بار با استفاده از معیار ترک‌های انعکاسی

در این قسمت برای انواع مختلف روسازی‌های یاد شده و با استفاده از نتایج به دست آمده از جداول (۶) و (۷) یک دسته منحنی ارائه شده است. با داشتن مدول الاستیسیته آسفالت، نوع روسازی، نوع بستر و نوع مدل طراحی مکانیستیک می‌توان تعداد تکرار مجاز بار را انتخاب نمود. این منحنی‌ها در شکل‌های (۲) تا (۷) آورده شده‌اند.

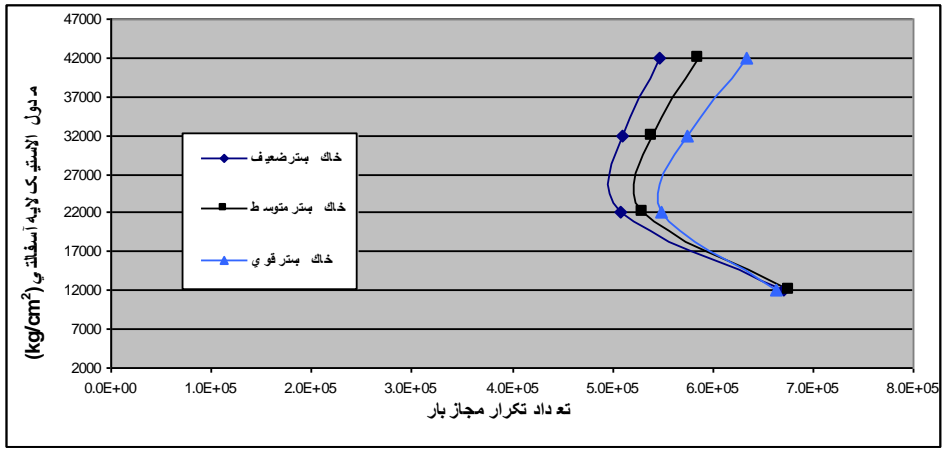
همان طور که از مقایسه نمودارها نتیجه می‌شود در روسازی‌های نازک برای خاک بستر ضعیف و

جدول ۷ تعداد تکرار مجاز بار با در نظر گرفتن معیار ترک‌های انعکاسی

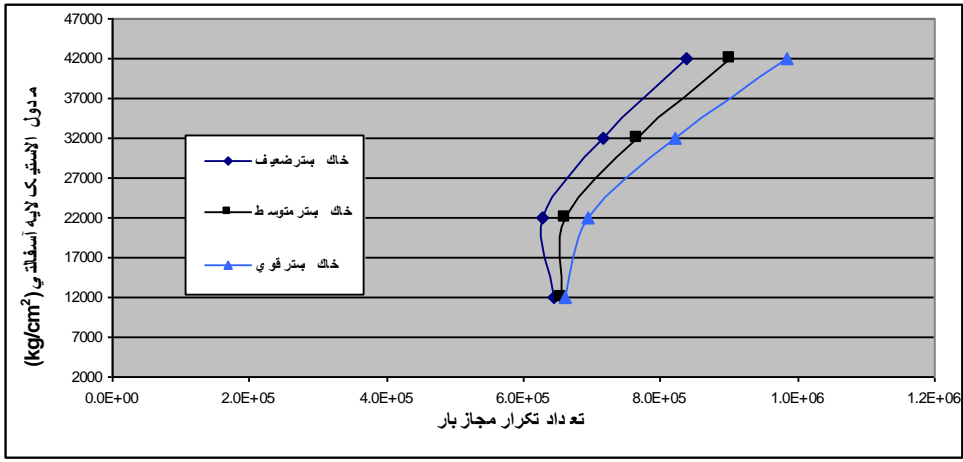
مدول الاستیک لایه آسفالتی ( $\text{Kg/cm}^2$ )				نوع خاک بستر	نوع روسازی
۴۲۰۰۰	۳۲۰۰۰	۲۲۰۰۰	۱۲۰۰۰		
۱۶۵۵/۳ $\cdot 10^{-2}$	۱۳۳۱ $\cdot 10^{-2}$	۱۰۲۷/۶ $\cdot 10^{-2}$	۷۳۱/۲۹ $\cdot 10^{-2}$	ضعیف	نازک
۴۴۱۸/۸ $\cdot 10^{-2}$	۳۵۴۵/۳ $\cdot 10^{-2}$	۲۷۳۱/۳ $\cdot 10^{-2}$	۱۹۴۳/۷ $\cdot 10^{-2}$	متوسط	
۲۷۱۱۰ $\cdot 10^{-1}$	۲۱۶۸۲ $\cdot 10^{-2}$	۱۶۶۴۸ $\cdot 10^{-2}$	۱۱۸۳۲ $\cdot 10^{-2}$	قوی	
۱۱۵۸۶ $\cdot 10^{-2}$	۹۳۹۸/۳ $\cdot 10^{-2}$	۷۳۱۷/۶ $\cdot 10^{-2}$	۵۲۳۷/۵ $\cdot 10^{-2}$	ضعیف	متوسط
۱۶۸۰۴ $\cdot 10^{-2}$	۱۳۶۹۸ $\cdot 10^{-2}$	۱۰۶۹۰ $\cdot 10^{-2}$	۷۶۰۹/۱ $\cdot 10^{-2}$	متوسط	
۸۱۳۴۶ $\cdot 10^{-3}$	۷۲۰۸۸ $\cdot 10^{-3}$	۵۶۳۶۲ $\cdot 10^{-3}$	۴۰۳۴۱ $\cdot 10^{-3}$	قوی	
۳۵۱۳۷ $\cdot 10^{-3}$	۲۷۲۷۷ $\cdot 10^{-3}$	۲۰۱۱۴ $\cdot 10^{-3}$	۱۳۳۹۵ $\cdot 10^{-3}$	ضعیف	ضخیم
۵۰۴۱۷ $\cdot 10^{-3}$	۳۹۴۷۲ $\cdot 10^{-3}$	۲۹۲۹۴ $\cdot 10^{-3}$	۱۹۴۹۸ $\cdot 10^{-3}$	متوسط	
۲۶۴۳۸۰ $\cdot 10^{-3}$	۲۰۷۳۵۰ $\cdot 10^{-3}$	۱۵۴۲۱۰ $\cdot 10^{-3}$	۱۰۳۱۷۰ $\cdot 10^{-3}$	قوی	



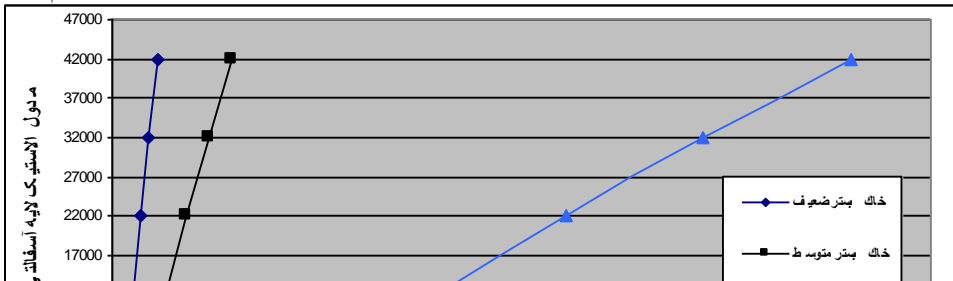
شکل ۲ تعداد تکرار مجاز بار بر اساس معیار ترک‌های خستگی برای روسازی‌های نازک



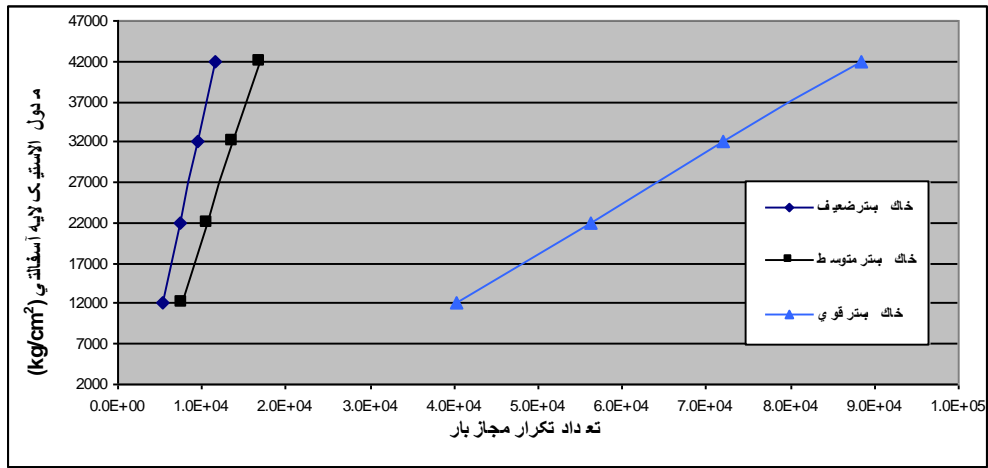
شکل ۳ تعداد تکرار مجاز بار بر اساس معیار ترک‌های خستگی برای روسازی‌های متوسط



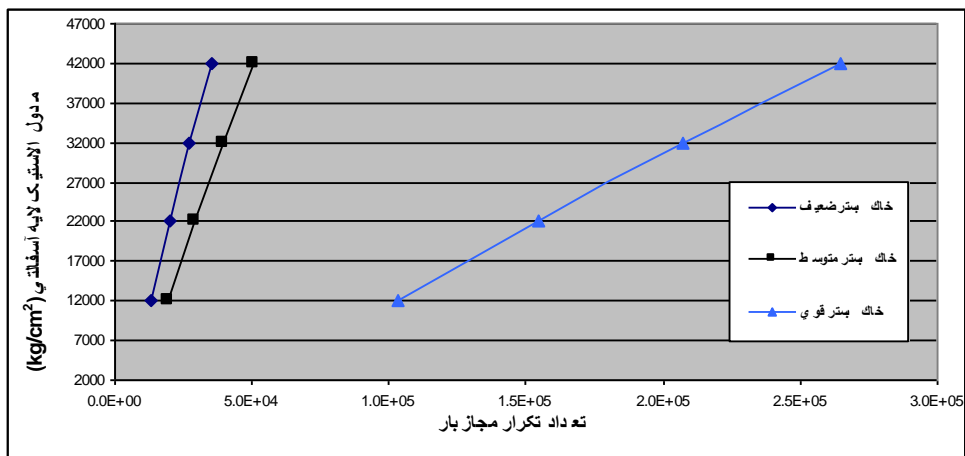
شکل ۴ تعداد تکرار مجاز بار بر اساس معیار ترک‌های خستگی برای روسازی‌های ضخیم



شکل ۵ تعداد تکرار مجاز بار بر اساس معیار تغییر شکل‌های دائمی برای روسازی‌های نازک



شکل ۶ تعداد تکرار مجاز بار بر اساس معیار تغییر شکل‌های دائمی برای روسازی‌های متوسط



شکل ۷ تعداد تکرار مجاز بار بر اساس معیار تغییر شکل‌های دائمی برای روسازی‌های ضخیم

در طراحی مکانیستیک روسازی‌ها دو معیار مهم ترک‌های خستگی و تغییر شکل‌های دائمی وجود دارد.

۸- نتیجه گیری

حالی که این تغییرات در معیار تغییرشکل‌های دائمی کمتر می‌باشد، یعنی معیار حاکم برای طراحی روسازی معیار تغییرشکل‌های دائمی می‌باشد. همچنین با افزایش مدول الاستیسیته خاک بستر نسبت به لایه آسفالتی، تعداد تکرار مجاز بار بیشتر می‌باشد.

برای طراحی مکانیستیک روسازی‌ها می‌توان از نمودارهای (۲) تا (۷) استفاده نمود که در هر مورد با داشتن نوع روسازی، مدول الاستیسیته لایه آسفالتی و نوع خاک بستر، می‌توان تعداد تکرار مجاز بار را بر اساس یکی از دو معیار یاد شده به دست آورد که ۳ نمودار ابتدایی مربوط به معیار ترک‌های خستگی و ۳ نمودار بعدی (شکل‌های ۵، ۶ و ۷) مربوط به معیار تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد.

در این تحقیق برای انواع مختلف روسازی‌ها (نازک، متوسط و ضخیم) که بر روی بسترهای مختلف (ضعیف، متوسط و قوی) قرار دارند، تعداد تکرار مجاز بار بر اساس دو معیار یاد شده محاسبه گردیده‌اند که نتایج به دست آمده در جدول‌های (۶) و (۷) آورده شده است. کرنش‌های کششی و فشاری مورد استفاده در این دو معیار با استفاده از برنامه تحلیلی KenLayer به دست آمده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در معیار ترک‌های خستگی، با افزایش مدول الاستیک لایه آسفالتی ابتدا تعداد تکرار مجاز بار کاهش و سپس افزایش می‌یابد در

## ۹- منابع

1. J. Uzan, "Evaluation of fatigue cracking", Transportation Research Record 1570, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp.89-95., (1997).
2. R. I. Lytton, J. Uzan, E. G. Fernando, R. Roque, D. Hiltunen, and S. M. Stoffels, "Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binder and paving mixes", SHRP A-357, TRB, National Research Council, Washington D.C., (1993).
3. H. H. Yang uang, "Pavement Analysis and Design", (1993).
4. M. A. Gaznon, H. Behbahani and S. A. Tabatabaie, "Control of engineering properties of asphalt concrete based on permanent deformation constraint of subgrade at tropical zones in IRAN", International Journal of Engineering, Vol. 14, No. 3, August (2001).
5. P. Ullidtz, "Pavement Analysis", New York: Elsevier Science, (1987).
6. Abaqus, "Finite Element Computer Program, Theory Manual", Version 5.8-1, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, USA, (1998).
7. A. A. Eltahan, R. L. Lytton, "Mechanistic-Empirical approach for modeling reflection cracking", Transportation Research Record 1730, TRB, National Research Council, Washington D.C., 2001, pp.132-138.
8. A. E. Ahmed R. L. Lytton, "A mechanistic-empirical approach for modeling reflection cracking", Transportation Research Board, 80th Annual Meeting, January (2001).

9. P.C. Paris, F. A. Erdogan, "Critical analysis of crack propagation laws", Transportation ASME, Journal of Basic Engineering, Series D, No.3, (1963).