

## ارائه مدل پیش‌بینی طول پالس پاسخ‌های کششی در تار پایین لایه آسفالتی

منصور فخری<sup>۱\*</sup>، مریم دولتعلی زاده<sup>۲</sup> و علیرضا غنی زاده<sup>۳</sup>

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>خرابی خستگی از جمله خرابی‌های بسیار مهم در روسازی‌های انعطاف‌پذیر است. ترک‌های خستگی تحت تأثیر بسیاری از عوامل مانند ساختار روسازی، بارگذاری و شرایط محیطی قرار دارند و شکل و طول پالس‌های پاسخ کششی در تار پایین لایه آسفالت به شدت بر عمر خستگی لایه‌های آسفالتی تأثیر می‌گذارند. در این مطالعه دو ساختار مختلف روسازی شامل روسازی نازک و ضخیم توسط برنامه 3D-Move تحلیل شدند. در تحلیل انجام شده لایه آسفالت به صورت ویسکوالاستیک و سایر لایه‌ها به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شدند. سپس توابع نیم‌سینوسی و زنگوله‌ای شکل به پالس‌های پاسخ کششی حاصل از تحلیل دینامیکی برآزش داده شدند. نتایج نشان داد که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شکل و طول پالس پاسخ‌های کششی عبارتند از سرعت حرکت وسیله نقلیه، ضخامت لایه آسفالت، درجه حرارت روسازی و شعاع سطح تماس می‌باشند. در این مطالعه دو مدل عمومی به منظور پیش‌بینی زمان اعمال پالس تنش و کرنش کششی در تار پایین لایه آسفالت در دو جهت طولی و عرضی بر اساس شکل موج نیم‌سینوسی و زنگوله شکل پیشنهاد شده است.</p>	<p><b>واژگان کلیدی:</b> پاسخ‌های طولی و عرضی، خستگی مخلوط‌های آسفالتی، فرکانس و شکل پالس، ویسکوالاستیک، 3D-Move.</p>

ترک‌های خستگی هستند. همچنین این عوامل بر پاسخ روسازی و در نهایت شکل و طول پالس<sup>۲</sup> پاسخ روسازی مؤثر می‌باشند.

پالس پاسخ روسازی از سه جنبه‌ی شکل، مقدار و طول پالس قابل بررسی است. عواملی مانند سرعت، دما، بار، آفست (فاصله‌ی نقطه‌ی پاسخ نسبت به مرکز بارگذاری)، عمق از سطح روسازی، نسبت مدول ارتجاعی لایه‌ها و شعاع سطح تماس بر شکل پالس پاسخ روسازی مؤثر هستند.

محققان شکل‌های مختلفی را برای پالس‌های پاسخ روسازی پیشنهاد نموده‌اند که دسته‌ای از این مطالعات به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است [۱-۶].

## ۱- مقدمه

خرابی خستگی<sup>۱</sup> و شیارشدگی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر، از مهم‌ترین انواع خرابی‌ها محسوب می‌شوند. معمولاً خرابی خستگی در اثر تکرار بارگذاری در روسازی‌ها ایجاد می‌گردد. ساختار روسازی، شرایط محیطی و شرایط بارگذاری از عوامل مؤثر بر ایجاد

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: fakhri@kntu.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. کاندیدای دکتری عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

جدول ۱- تابع‌های مختلف برازش شده برای محاسبه پالس پاسخ روسازی

منبع	نوع پاسخ روسازی	شکل پالس پیشنهادی
بارکسدیل (۱۹۷۱)	تنش قائم فشاری	مثلثی و سینوسی
مک لین (۱۹۷۴)	تنش قائم فشاری	مربعی
القادی و همکاران (۲۰۰۴)	تنش قائم فشاری	نیم‌سینوسی و زنگوله‌شکل
مالیک و همکاران (۲۰۰۶)	کرنش طولی لایه HMA	نیم‌سینوسی
گارسیا و تامپسون (۲۰۰۸)	کرنش کششی طولی زیر لایه HMA	نیم‌سینوسی
ژو و همکاران (۲۰۱۰)	کرنش کششی عرضی زیر لایه HMA	نیم‌سینوسی و سینوسی
	تنش قائم فشاری	مربعی و نیم‌سینوسی

که در آن  $t$  زمان بارگذاری برحسب ثانیه،  $d$  عمق روسازی برحسب متر و  $v$  سرعت وسیله نقلیه برحسب کیلومتر بر ساعت است.

زمان بارگذاری محاسبه شده توسط برآون،  $0.48$  برابر زمان بارگذاری تعریف شده توسط بارکسدیل است [۳].

مک لین زمان بارگذاری برای پالس تنش فشاری قائم را براساس پالس مربعی و به‌عنوان تابعی از سرعت و عمق روسازی تعیین کرد [۲]. نتایج در مقایسه با نتایج بارکسدیل نشان داد که زمان بارگذاری برای پالس مربعی از پالس مثلثی یا سینوسی شکل کمتر است.

یولیتز از رابطه (۲) جهت محاسبه‌ی طول مؤثر پالس تنش فشاری قائم در برنامه مکانیستیک - تجربی طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر اداره‌ی حمل و نقل کالفرنیا (CalME) استفاده نمود [۱۲].

$$L_{eff} = (200 + 2z) \quad (2)$$

که در آن  $L_{eff}$  طول مؤثر برحسب میلی‌متر و  $z$  عمق واقعی برحسب میلی‌متر است.

و در نهایت زمان بارگذاری از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$t = \frac{L_{eff}}{v} \quad (3)$$

که در آن  $t$  زمان بارگذاری و  $L_{eff}$  طول مؤثر برحسب میلی‌متر و  $v$  سرعت وسیله نقلیه است [۱۲].

گارسیا و تامپسون در سه سرعت ۳، ۱۰ و ۱۶ کیلومتر بر ساعت، فرمول فوق را برای محاسبه طول پالس کرنش

همچنین در سال‌های اخیر طول پالس پاسخ کششی روسازی با بهره‌گیری از آزمایشات تمام مقیاس، توسط محققین اندازه‌گیری شده است [۷-۱۰]. در اکثر مطالعات صورت گرفته، دیده شده است که پالس پاسخ روسازی در جهت طولی، دارای نواحی کششی و فشاری و در جهت عرضی، تنها دارای ناحیه‌ی کششی است. اما در برخی از مطالعات کرنش عرضی فشاری در دمای بالا مشاهده گردیده است [۹].

محققین در راستای تخمین مقادیر و طول پالس پاسخ‌های روسازی معادلاتی را پیشنهاد کردند که این معادلات براساس شکل پالس‌های پیشنهادی و یا شکل پالس واقعی اندازه‌گیری شده از مطالعات میدانی و یا آزمایشگاهی می‌باشد.

بارکسدیل [۱]، جهت تعیین طول پالس تنش فشاری قائم، نمودارهایی را برحسب عمق روسازی و سرعت وسیله‌ی نقلیه براساس شکل پالس سینوسی و مثلثی تا سرعت ۷۲ کیلومتر بر ساعت ارائه داد. همچنین، نتیجه گرفت که شکل پالس تنش فشاری قائم در نزدیکی سطح، سینوسی و در عمق‌های بیشتر مثلثی است.

برآون نیز رابطه‌ای را برای محاسبه‌ی میانگین زمان بارگذاری پالس تنش‌ها در سه جهت برحسب عمق روسازی و سرعت وسیله‌ی نقلیه ارائه داد [۱۱]:

$$\log(t) = 0.5d - 0.2 - 0.941 \log(v) \quad (1)$$

شکل مربع به نیم‌سینوسی تغییر می‌کند. در نهایت مدل‌های ساده‌ای را برحسب عمق روسازی و شکل پالس بارگذاری و براساس سرعت و نسبت مدول لایه‌ها ارائه دادند.

هرناندز با استفاده از آزمایشات میدانی نتیجه گرفت که شدت بار اثر کمی روی طول پالس کرنش کششی طولی تار پایین لایه آسفالتی دارد و این تغییرات در سه دمای مختلف آزمایش نیز مشابه یکدیگر بودند [۹]. برخلاف طول پالس کرنش کششی طولی، طول پالس کرنش کششی عرضی تحت تأثیر مقدار بار است. رابطه مشخصی بین طول پالس کرنش عرضی و مقدار بار وجود ندارد. وی در بعضی موارد این رابطه را خطی و در بعضی غیرخطی به دست آورد. البته مشاهده کرد که اثر مقدار بار در دمای بالا مشخص‌تر است. همچنین در هر مقدار بار، دما و ضخامت، با کاهش دما افزایش طول پالس کرنش طولی مشاهده گردید و در تمام موارد، پایین‌ترین دما، بالاترین طول پالس را نشان داد. همچنین این تحقیق نشان داد که آفست تأثیر مهمی روی طول پالس کرنش طولی ندارد و در تمام مقاطع و تمام دماها این موضوع برقرار است.

ریستریو ولز تغییرات طول پالس کرنش را در تار پایین لایه آسفالت، تحت شرایط متفاوت دمایی و سرعت‌های مختلف، در پروژه way-30 بررسی کرد [۱۰]. وی نتیجه گرفت که بزرگ‌ترین طول پالس کرنش کششی طولی در پایین‌ترین سرعت و دما اتفاق می‌افتد و همان‌طور که سرعت افزایش می‌یابد، اثر آفست روی طول پالس کرنش طولی کاهش می‌یابد. وی اثر دما روی پالس کرنش طولی را در سرعت ۸ کیلومتر بر ساعت به صورت توانی و در دو سرعت ۴۰ و ۸۸/۵ کیلومتر بر ساعت به صورت خطی بیان کرد. همچنین او در سه دمای آزمایش و در تمامی سرعت‌ها، رابطه‌ی میان طول پالس کرنش کششی طولی با عمق را همانند مطالعه‌ی رابینز و تیم به صورت لگاریتم طبیعی پیشنهاد نمود.

همان‌طور که در توضیحات پیشین مشاهده می‌گردد، مطالعات صورت گرفته توسط محققین بر روی شکل

کششی طولی استفاده کردند [۵]. آن‌ها مشاهده کردند که طول‌های حاصل از این رابطه، تخمین خوبی از طول‌های اندازه‌گیری شده می‌دهد. آن‌ها از آزمایشات نتیجه گرفتند که بیشترین عوامل مؤثر بر طول پالس کرنش کششی طولی و عرضی در تار پایین لایه آسفالتی، سرعت بارگذاری و ضخامت روسازی هستند. نتایج نشان داد که طول پالس کرنش کششی با کاهش سرعت و افزایش عمق از سطح، افزایش می‌یابد [۵].

مولنهار و همکاران با آزمایش تمام مقیاس بر روی مقاطع مختلف روسازی ساخته شده طبق طرح روسازی آلمان، کرنش لایه اساس آسفالتی را بررسی کردند [۷]. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش ضخامت آسفالت طول ناحیه کشش در پالس کرنش طولی افزایش می‌یابد و ارزیابی همچنین نشان داد که طول پالس کرنش طولی کششی در اثر افزایش سرعت وسیله نقلیه، کاهش می‌یابد و طول این مناطق به صورت تابعی توانی از سرعت می‌باشد. در بسیاری از تحقیقات، رابطه‌ی میان طول پالس پاسخ روسازی و سرعت وسیله نقلیه به صورت  $y = Ax^{-B}$  بیان شده است [۳، ۴، ۸ و ۱۰].

رابینز و تیم با استفاده از مقاطع ساخته شده در مرکز ملی تکنولوژی آسفالت<sup>۳</sup>، مقطع روسازی ماندگار را مورد ارزیابی قرار دادند [۸]. آن‌ها اثر سرعت، دما و عمق روسازی را به‌طور جداگانه بر روی طول پالس کرنش کششی طولی بررسی نمودند و در نهایت رابطه‌ای ترکیبی از تأثیر هر سه عامل ارائه دادند:

$$t_1 = j \ln(h) + v^k + T^l + m \quad (4)$$

که در آن  $t_1$  طول پالس کرنش برحسب ثانیه،  $v$  سرعت وسیله نقلیه برحسب مایل بر ساعت،  $T$  دما در عمق وسط لایه آسفالت،  $h$  ضخامت لایه آسفالتی برحسب اینچ و  $j$ ،  $k$  و  $l$  ضرایب معادله هستند.

ژو و همکاران نتیجه گرفتند که نسبت مدول لایه آسفالت به لایه اساس از عوامل مؤثر بر زمان بارگذاری است [۶]؛ همچنین به این نتیجه دست یافتند که با افزایش عمق از سطح روسازی شکل پالس تنش فشاری نرمالیزه شده از

تنش و کرنش کششی در دو جهت طولی<sup>۴</sup> و عرضی<sup>۵</sup> در تار پایین لایه آسفالتی، مورد ارزیابی قرار گرفته است و ضریب رگرسیون حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی و زنگوله‌شکل، به پاسخ‌های حاصل از نرم‌افزار 3D-Move تعیین گردیده است. رابطه‌ی میان هر یک از عوامل مؤثر با طول پالس پاسخ کششی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی به‌دست آمد. سپس روابطی جهت محاسبه طول پالس پاسخ کششی، براساس مهم‌ترین عوامل مؤثر، پیشنهاد گردید.

همچنین باتوجه به تابع زنگوله‌شکل متناسب با پالس‌های پاسخ، روابطی جهت تعیین تابع زنگوله‌شکل باتوجه به مهم‌ترین عوامل مؤثر نیز پیشنهاد گردید.

## ۲- روش مطالعه

### ۲-۱- مشخصات مقاطع روسازی

دو ساختار روسازی ضخیم و نازک جهت تحلیل توسط نرم‌افزار 3D-Move در نظر گرفته شدند. مقاطع از چهار لایه، شامل رویه آسفالتی، اساس، زیراساس و خاک بستر تشکیل شدند. لایه آسفالتی به‌صورت ویسکوالاستیک و سایر لایه‌ها به‌صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شدند. برای هر ساختار روسازی یک حالت استاندارد (مطابق جدول ۲) در نظر گرفته شد و سپس تحلیل حساسیت به‌منظور ارزیابی تأثیر هر یک از عوامل بر شکل و طول پالس پاسخ کششی در تار پایین لایه آسفالتی انجام گرفت. منحنی مدول دینامیک آسفالت نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

در مطالعه فوق در مجموع ۱۴۴ مقطع روسازی با مشخصات متفاوت مورد تحلیل قرار گرفتند. در این راستا طول پالس پاسخ کششی برای پالس واقعی و براساس برازش تابع نیم‌سینوسی<sup>۶</sup> مطابق معادله (۵) تعیین شد. همچنین تابع زنگوله‌شکل بر پالس‌های پاسخ برازش داده

پالس، به سه صورت مطالعات میدانی، آزمایشگاهی و اغلب تحلیل‌های الاستیک می‌باشد که البته در زمینه خرابی خستگی مطالعات کمی صورت گرفته است و از طرفی دامنه‌ی تحلیل‌های حساسیت در این مطالعات، محدود بوده است و لازم به ذکر است مطالعات انجام گرفته در زمینه خرابی خستگی شامل پاسخ تنش نمی‌شود و همچنین معادلات ارائه شده تنها مربوط به کرنش طولی در تار پایین لایه آسفالتی است.

در این مطالعه، باتوجه به اهمیت شکل و طول پالس پاسخ روسازی در مطالعات آزمایشگاهی و جهت بررسی دقیق‌تر و جامع‌تر بر این موضوع، ۱۴۴ مقطع روسازی توسط برنامه 3D-Move تحلیل و پالس تنش و کرنش کششی در تار پایین لایه آسفالتی در دو جهت طولی و عرضی تعیین گردید. مطالعات گذشته نشان می‌دهند که پاسخ‌های کششی در تار پایین لایه آسفالت عامل اصلی خرابی خستگی در نظر گرفته می‌شود [۱۳-۱۵]. برنامه 3D-Move جهت تحلیل روسازی از روش لایه‌ی محدود تحت بار متحرک استفاده می‌کند [۱۶ و ۱۷]. اعتبارسنجی برنامه 3D-Move با استفاده از نتایج برنامه‌های مبتنی بر نظریه الاستیک چندلایه‌ای و تحت شرایط بارگذاری استاتیکی ساده و آزمایشات تمام مقیاس، صورت گرفته است [۱۸]. در این مطالعه نیز مشاهده گردید که شکل‌های پالس به‌دست آمده از تحلیل توسط نرم‌افزار 3D-Move تطبیق خوبی با شکل‌های پالس به‌دست آمده از مطالعات میدانی دارد.

عموماً در آزمایش‌های خستگی مخلوط‌های آسفالتی، دو شکل پالس سینوسی و نیم‌سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز جهت تعیین عمر خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. درحالی‌که در واقعیت وسایل نقلیه با سرعت‌های متفاوتی از راه‌ها عبور می‌کنند و همین موضوع شکل و طول پالس متفاوتی را ایجاد می‌کند. بر این اساس هدف این مقاله تعیین طول پالس براساس عوامل مؤثر بر آن است به طوری که تطبیق بیشتری با واقعیت داشته باشد. در مطالعه فوق تأثیر عوامل مختلف بر شکل و طول پالس

لازم به ذکر است که جهت برازش توابع مورد نظر بر پالس‌های پاسخ کششی روسازی، ابتدا، مقادیر منفی از پالس‌های پاسخ روسازی حذف گردید، سپس مقادیر پاسخ‌ها بر مقدار حداکثر کرنش کششی تقسیم شد و در نهایت توابع بیان شده توسط رگرسیون وزن‌دار بر پالس‌های پاسخ نرمالیزه شده، برازش داده شدند.

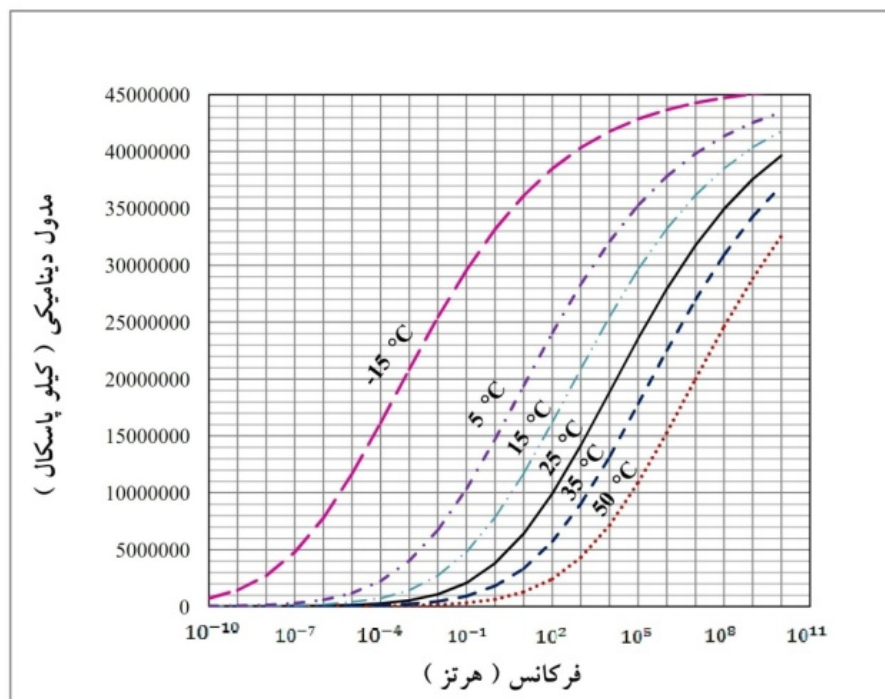
شد و مقدار پارامتر  $a$  که تعیین‌کننده تابع زنگوله‌شکل<sup>۷</sup> به صورت معادله (۶) است، محاسبه گردید.

$$y = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi x}{t}\right) \quad (۵)$$

$$y = e^{(x^2/a)} \quad (۶)$$

جدول ۲- مشخصات ساختارهای روسازی مدل شده در نرم‌افزار 3D-Move

وزن واحد ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	ضریب پوآسون	ضخامت (cm)		لایه روسازی
		مدول ارتجاعی (kPa)	روسازی نازک / روسازی ضخیم	
۲۳۲۵	۰/۳۵	-	۱۰ / ۳۵	رویه آسفالتی
۲۱۵۹	۰/۳۵	۲۰۶۸۵۰	۱۰ / ۳۰	اساس
۲۰۷۶	۰/۴۰	۱۳۷۹۰۰	۱۵ / ۴۰	زیراساس
۱۹۹۳	۰/۴۵	۴۹۹۶۱	- / -	بستر



شکل ۱- منحنی مدول دینامیکی آسفالت در مقابل فرکانس بارگذاری برای قیر (۶۰-۷۰)

## ۲-۲- تحلیل حساسیت

طول پالس‌های حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی انجام شد.

به منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف بر طول پالس پاسخ کششی، تحلیل حساسیت بر روی طول پالس‌های واقعی و

جدول ۳ - تحلیل حساسیت طول پالس واقعی کرنش کششی روسازی ضخیم

عامل	تغییر		کرنش طولی		کرنش عرضی	
	از	به	(میلی ثانیه)	نرخ تغییر	(میلی ثانیه)	نرخ تغییر
حالت استاندارد			۱۳۰	۱	۳۷۰	۱
سرعت (کیلومتر بر ساعت)	۵۰	۱۰	۴۸۹	۳/۷۶۲	۱۸۳۶	۴/۹۶۲
دمای روسازی (درجه سانتی‌گراد)	۲۵	۵۰	۵۰	۰/۳۸۵	۲۶۷	۰/۷۲۲
ضخامت آسفالت (سانتی‌متر)	۳۵	۱۰	۲۸	۰/۲۱۵	۱۸۱	۰/۴۸۹
شعاع سطح تماس (سانتی‌متر)	۱۲	۳۰	۱۰۹	۰/۸۳۸	۷۰۶	۱/۹۰۸
ضخامت لایه اساس (سانتی‌متر)	۳۰	۱۰	۱۵۷	۱/۲۰۸	۳۸۸	۱/۰۴۹
ضخامت لایه زیراساس (سانتی‌متر)	۴۰	۱۵	۱۵۰	۱/۱۵۴	۳۷۰	۱
نوع قیر	۶۰-۷۰	۴۰-۵۰	۱۳۰	۱	۳۷۰	۱
مدول ارتجاعی لایه اساس (کیلو پاسکال)	۲۰۶۸۵۰	۴۸۲۶۵۰	۱۲۶	۰/۹۶۹	۳۷۷	۱/۰۱۹
مدول ارتجاعی لایه بستر (کیلو پاسکال)	۴۹۹۶۱	۱۳۷۹۰۰	۹۶	۰/۷۳۸	۳۶۲	۰/۹۷۸
فشار چرخ (کیلو پاسکال)	۵۸۶	۸۲۷	۱۳۲	۱/۰۱۵	۳۷۵	۱/۰۱۴

جدول ۴ - تحلیل حساسیت طول پالس واقعی کرنش کششی روسازی نازک

عامل	تغییر		کرنش طولی		کرنش عرضی	
	از	به	(میلی ثانیه)	نرخ تغییر	(میلی ثانیه)	نرخ تغییر
حالت استاندارد			۳۳	۱	۲۰۵	۱
سرعت (کیلومتر بر ساعت)	۵۰	۱۰	۱۴۴	۴/۳۶۴	۱۱۴۹	۵/۶۰۵
دمای سطح روسازی (درجه سانتی‌گراد)	۲۵	۵۰	۲۱	۰/۶۳۶	۱۰۱	۰/۴۹۳
ضخامت آسفالت (سانتی‌متر)	۱۰	۳۵	۱۶۶	۵/۰۳۰	۳۸۲	۱/۸۶۳
شعاع سطح تماس (سانتی‌متر)	۱۲	۳۰	۵۱	۱/۵۴۵	۲۷۴	۱/۳۳۷
ضخامت لایه اساس (سانتی‌متر)	۱۰	۳۰	۲۸	۰/۸۴۸	۱۸۰	۰/۸۷۸
ضخامت لایه زیراساس (سانتی‌متر)	۱۵	۴۰	۳۰	۰/۹۰۹	۱۷۹	۰/۸۷۳
نوع قیر	۶۰-۷۰	۴۰-۵۰	۳۳	۱	۲۰۵	۱
مدول ارتجاعی لایه اساس (کیلو پاسکال)	۲۰۶۸۵۰	۴۸۲۶۵۰	۳۲	۰/۹۷۰	۲۰۳	۰/۹۹۰
مدول ارتجاعی لایه بستر (کیلو پاسکال)	۴۹۹۶۱	۱۳۷۹۰۰	۳۰	۰/۹۰۹	۱۹۳	۰/۹۴۱
فشار چرخ (کیلو پاسکال)	۵۸۶	۸۲۷	۳۳	۱	۲۱۰	۱/۰۲۴

جدول ۵ - تحلیل حساسیت طول پالس کرنش کششی پالس نیم‌سینوسی روسازی ضخیم

عامل	تغییر		کرنش طولی		کرنش عرضی	
	از	به	(میلی ثانیه) نرخ تغییر	(میلی ثانیه) نرخ تغییر	نرخ تغییر	نرخ تغییر
حالت استاندارد			۷۵	۱	۱۶۳	۱
سرعت (کیلومتر بر ساعت)	۵۰	۱۰	۳۳۸	۴/۵۲۰	۷۷۱	۴/۷۳۳
دمای سطح روسازی (درجه سانتی‌گراد)	۲۵	۵۰	۵۲	۰/۶۹۹	۱۲۰	۰/۷۳۴
ضخامت آسفالت (سانتی‌متر)	۳۵	۱۰	۳۲	۰/۴۲۶	۷۱	۰/۴۳۸
شعاع سطح تماس (سانتی‌متر)	۱۲	۳۰	۹۸	۱/۳۱۱	۲۲۴	۱/۳۷۴
ضخامت لایه اساس (سانتی‌متر)	۳۰	۱۰	۸۰	۱/۰۶۷	۱۷۱	۱/۰۴۸
ضخامت لایه زیراساس (سانتی‌متر)	۴۰	۱۵	۷۹	۱/۰۵۱	۱۶۸	۱/۰۳۱
نوع قیر	۶۰-۷۰	۴۰-۵۰	۷۵	۱	۱۶۳	۱
مدول ارتجاعی لایه اساس (کیلو پاسکال)	۲۰۶۸۵۰	۴۸۲۶۵۰	۶۹	۰/۹۲۳	۱۵۰	۰/۹۲۰
مدول ارتجاعی لایه بستر (کیلو پاسکال)	۴۹۹۶۱	۱۳۷۹۰۰	۶۸	۰/۹۱۰	۱۵۶	۰/۹۶۰
فشار چرخ (کیلو پاسکال)	۵۸۶	۸۲۷	۷۵	۱	۱۶۳	۱

جدول ۶ - تحلیل حساسیت طول پالس کرنش کششی پالس نیم‌سینوسی روسازی نازک

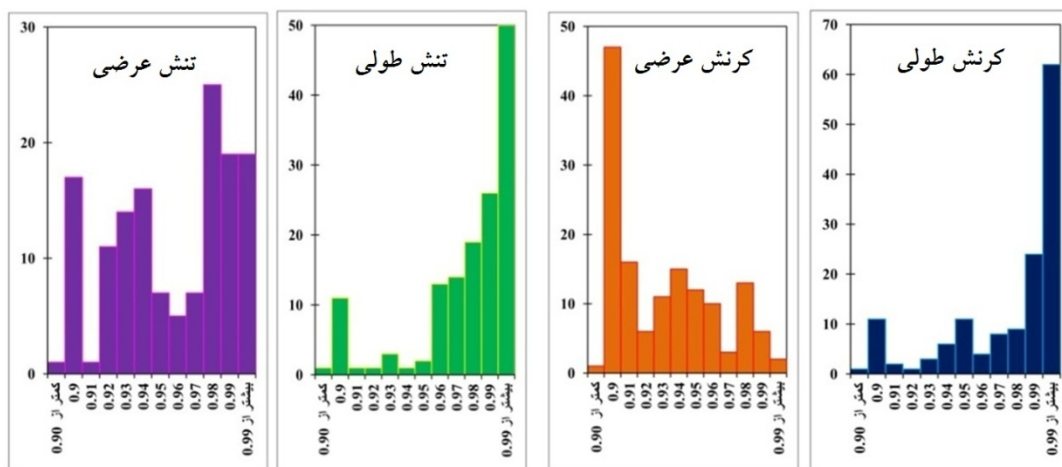
عامل	تغییر		کرنش طولی		کرنش عرضی	
	از	به	(میلی ثانیه) نرخ تغییر	(میلی ثانیه) نرخ تغییر	نرخ تغییر	نرخ تغییر
حالت استاندارد			۳۴	۱	۷۹	۱
سرعت (کیلومتر بر ساعت)	۵۰	۱۰	۱۶۷	۴/۸۴۴	۳۶۵	۴/۶۰۷
دمای سطح روسازی (درجه سانتی‌گراد)	۲۵	۵۰	۲۸	۰/۸۱۳	۵۷	۰/۷۱۵
ضخامت آسفالت (سانتی‌متر)	۱۰	۳۵	۹۷	۲/۸۳۰	۲۲۲	۲/۸۰۳
شعاع سطح تماس (سانتی‌متر)	۱۲	۳۰	۷۱	۲/۰۷۶	۱۳۸	۱/۷۳۷
ضخامت لایه اساس (سانتی‌متر)	۱۰	۳۰	۳۲	۰/۹۴۰	۷۳	۰/۹۱۶
ضخامت لایه زیراساس (سانتی‌متر)	۱۵	۴۰	۳۳	۰/۹۶۲	۷۵	۰/۹۴۸
نوع قیر	۶۰-۷۰	۴۰-۵۰	۳۴	۱	۷۹	۱
مدول ارتجاعی لایه اساس (کیلو پاسکال)	۲۰۶۸۵۰	۴۸۲۶۵۰	۳۸	۱/۱۱۹	۷۶	۰/۹۵۶
مدول ارتجاعی لایه بستر (کیلو پاسکال)	۴۹۹۶۱	۱۳۷۹۰۰	۳۳	۰/۹۵۰	۷۴	۰/۹۳۱
فشار چرخ (کیلو پاسکال)	۵۸۶	۸۲۷	۳۴	۱	۷۹	۱

۳-۲- برازش توابع نیم‌سینوسی و زنگوله‌شکل به پالس

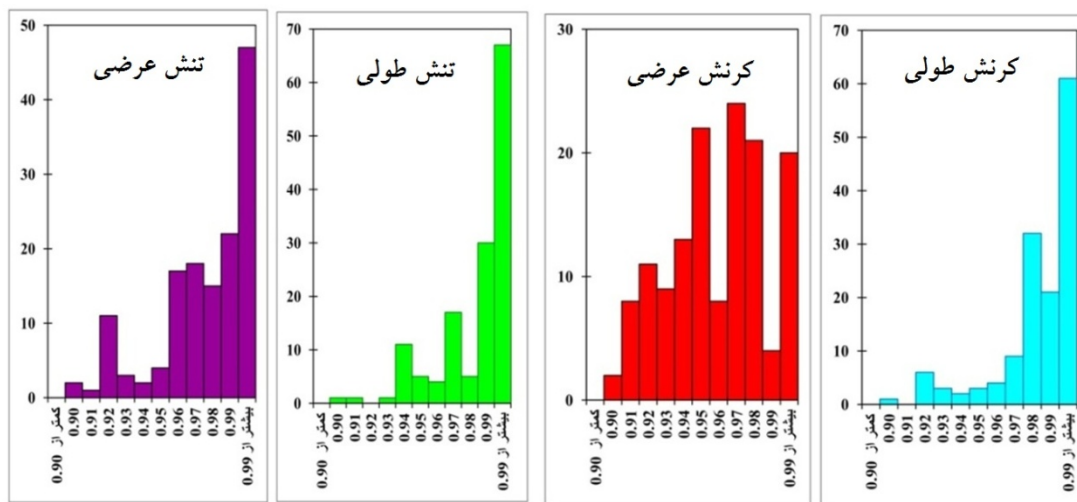
پاسخ حاصل از تحلیل

نمودار فراوانی ضرایب رگرسیون برای پاسخ‌های مختلف برای مجموع ۱۴۲ روسازی ضخیم و نازک در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

نتایج تحلیل نشان داد که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر طول پالس‌های پاسخ کششی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی شامل سرعت وسیله نقلیه، ضخامت لایه آسفالتی، دمای روسازی و شعاع سطح تماس هستند و این عوامل در اکثر موارد جزو مهم‌ترین عوامل مؤثر بر طول پالس‌های پاسخ کششی واقعی نیز هستند. همچنین نتایج نشان داد که این عوامل جزو مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقدار پارامتر  $a$  نیز هستند.



شکل ۲- هیستوگرام فراوانی ضرایب رگرسیون حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی به پالس کششی پاسخ‌های روسازی



شکل ۳- هیستوگرام فراوانی ضرایب رگرسیون حاصل از برازش تابع زنگوله‌شکل به پالس کششی پاسخ‌های روسازی

برازش پیدا کرده است و در نتیجه ضریب رگرسیون بالاتری را نشان می‌دهد. شکل‌های پالس در جهت عرضی و شکل‌های پالس جهت طولی در روسازی‌های ضخیم و همچنین شکل‌های پالس طولی در دمای پایین در

مقایسه میان ضرایب رگرسیون حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی و زنگوله‌شکل نشان داد که در مواردی که شکل پالس دارای کشیدگی و انحنا در کناره‌ها است، تابع زنگوله‌شکل نسبت به تابع نیم‌سینوسی بر آن‌ها بهتر

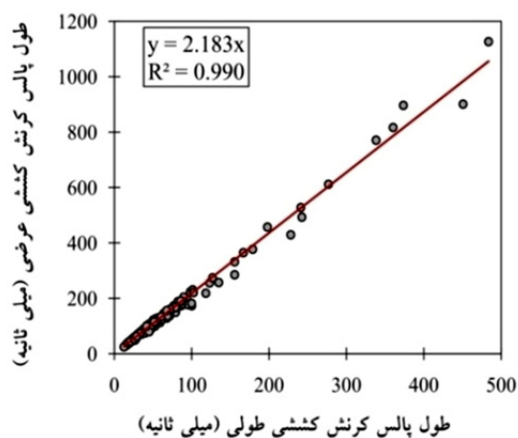


کرنش و تنش در دو جهت طولی و عرضی، با کاهش سرعت و کاهش ضخامت آسفالت افزایش می‌یابد. در روسازی ضخیم برای پالس‌های کرنش و تنش کششی با افزایش دما و افزایش شعاع سطح تماس، ضریب رگرسیون افزایش می‌یابد. درحالی‌که در روسازی نازک، ضریب رگرسیون کرنش و تنش عرضی با افزایش دما، افزایش می‌یابد و در تابع نیم‌سینوسی، کرنش و تنش طولی روسازی نازک در دمای متوسط بیشترین مقدار ضریب رگرسیون را دارا می‌باشند و در برازش تابع زنگوله‌شکل، ضریب رگرسیون کرنش و تنش طولی در روسازی نازک با افزایش دما، کاهش می‌یابد.

ضرایب رگرسیون روسازی نازک، برای هر دو شکل تابع مذکور، برای کرنش و تنش عرضی، با افزایش شعاع سطح تماس افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش شعاع سطح تماس برای کرنش و تنش طولی، ضریب رگرسیون افزایش می‌یابد.

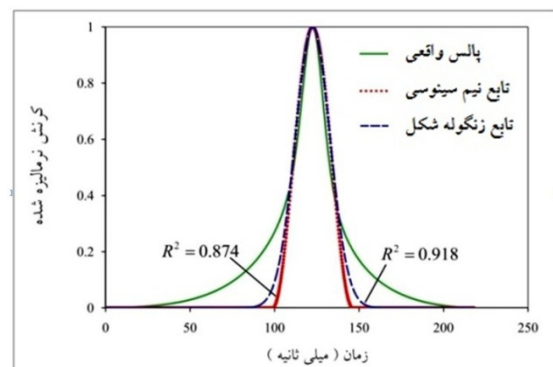
#### ۴-۲- تعیین رابطه میان طول پالس‌های پاسخ کششی با یکدیگر

رابطه میان طول پالس‌های پاسخ کششی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی در شکل‌های ۶ تا ۹ و روابط میان مقادیر  $a$  در پاسخ‌های مختلف روسازی در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نشان داده شده است.

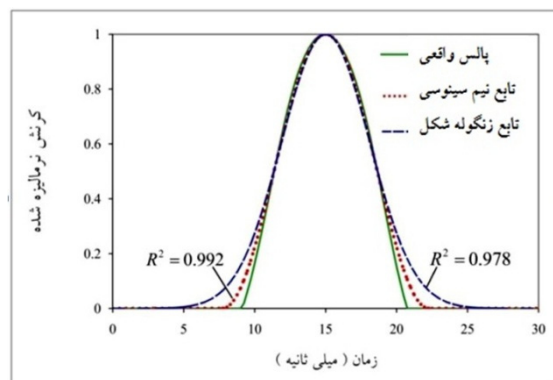


شکل ۶- ارتباط میان طول پالس کرنش کششی عرضی و کرنش کششی طولی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی

روسازی‌های نازک عموماً دارای چنین شکلی می‌باشند. به عبارت دیگر تابع نیم‌سینوسی در مواردی که شکل پالس دارای کشیدگی و انحنا در طرفین نباشد برازش بهتری را نشان می‌دهد که این موارد اغلب در پالس‌های طولی در روسازی‌های نازک و به‌خصوص دمای متوسط و بالا بیشتر مشاهده می‌شود. نمونه ای از هر دو حالت فوق در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

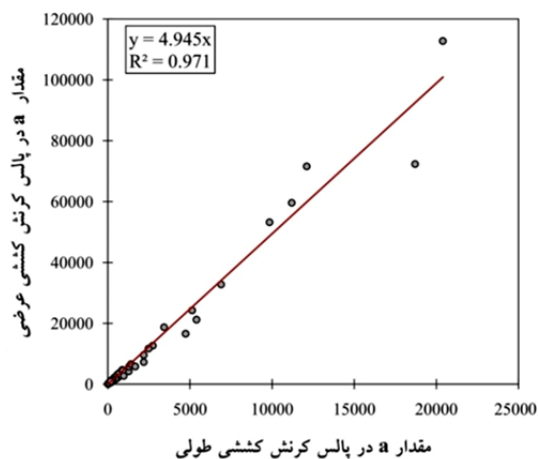


شکل ۴- مقایسه میان شکل‌های پالس حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی و زنگوله‌شکل بر پالس کرنش کششی طولی روسازی ضخیم در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت

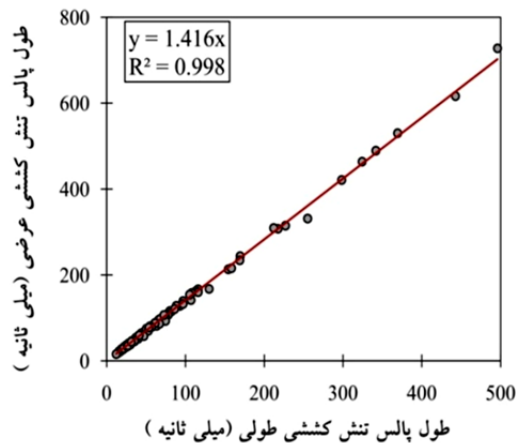


شکل ۵- مقایسه میان شکل‌های پالس حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی و زنگوله‌شکل بر پالس کرنش کششی طولی روسازی نازک در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت

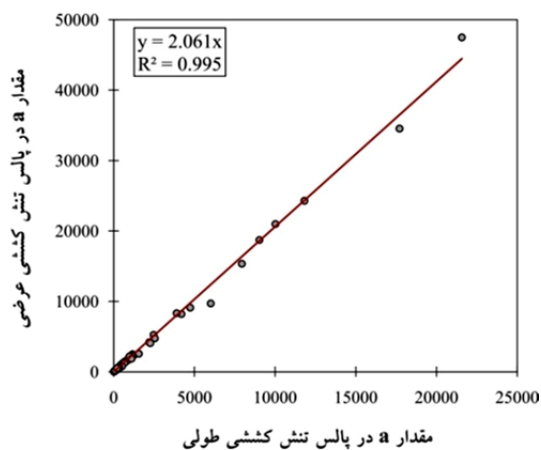
نتایج بررسی تأثیر عواملی مانند سرعت، دمای روسازی، ضخامت آسفالت و شعاع سطح تماس نشان داد که مقادیر ضریب رگرسیون برای تابع‌های نیم‌سینوسی و زنگوله‌شکل، در روسازی ضخیم و نازک، برای پالس‌های



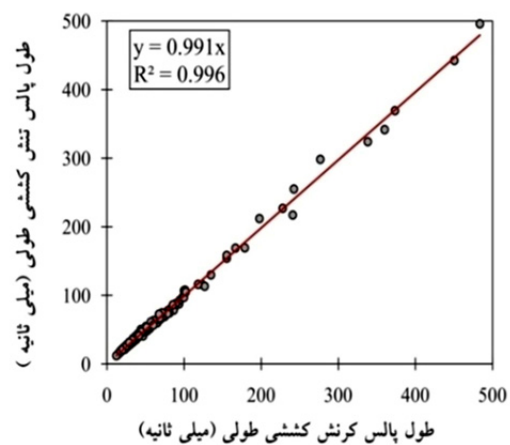
شکل ۱۰- ارتباط میان مقادیر  $a$  در پالس کرنش کششی عرضی و کرنش کششی طولی حاصل از برازش تابع زنگوله‌شکل



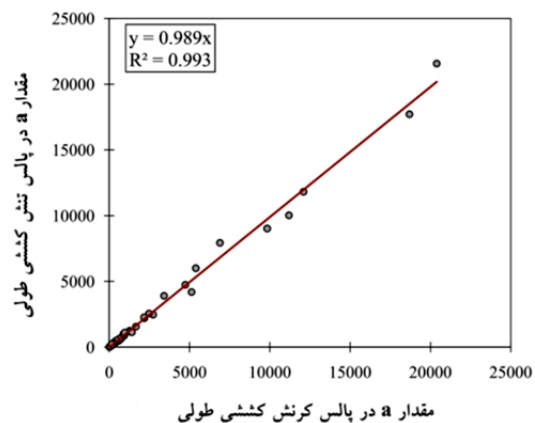
شکل ۷- ارتباط میان طول پالس تنش کششی عرضی و تنش کششی طولی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی



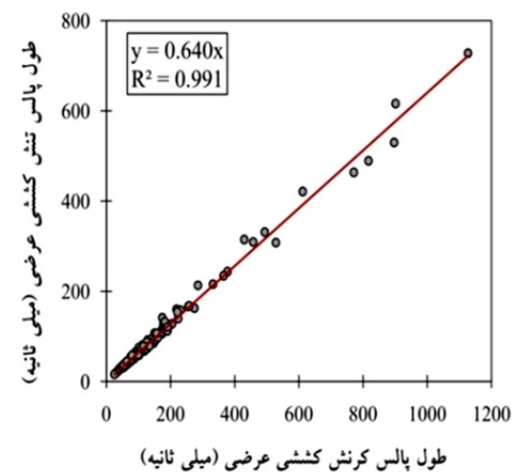
شکل ۱۱- ارتباط میان مقادیر  $a$  در پالس تنش کششی عرضی و تنش کششی طولی حاصل از برازش تابع زنگوله‌شکل



شکل ۸- ارتباط میان طول پالس تنش کششی طولی و کرنش کششی طولی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی



شکل ۱۲- ارتباط میان مقادیر  $a$  در پالس تنش کششی طولی و کرنش کششی طولی حاصل از برازش تابع زنگوله‌شکل



شکل ۹- ارتباط میان طول پالس تنش کششی عرضی و کرنش کششی عرضی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی

## ۲-۶- ارائه مدل های پیش بینی

در این پژوهش، با توجه به عوامل مؤثر بر طول پالس پاسخ کششی در تار پایین لایه‌ی آسفالتی، رابطه‌ی ترکیبی برای هر یک از پاسخ‌ها و در هر ساختار روسازی به دست آمد. این معادله با توجه به ۱۰۸ مقطع روسازی که شامل ۵۵ مقطع در روسازی ضخیم و ۵۳ مقطع در روسازی نازک است، به دست آمد. معادله فوق برای روسازی‌های ضخیم و نازک به صورت جداگانه و یکبار به صورت ترکیبی از دو ساختار روسازی، از تحلیل رگرسیون بر روی داده‌ها به دست آمد؛ و در تمامی موارد ضرایب رگرسیون بالاتر از ۰/۹۹ می‌باشد. اغلب مقاطع استفاده شده در تعیین این رابطه، به گونه‌ای بودند که این رابطه از طریق ایجاد رگرسیون، برای دماهای ۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت‌های ۱۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت، شعاع‌های سطح تماس ۱۲ و ۲۰ سانتی‌متر و ضخامت‌های آسفالت ۱۰ و ۳۵ سانتی‌متر انجام شد. البته لازم به ذکر است که شعاع‌های سطح تماس ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت‌های آسفالت ۵، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر نیز در میان داده‌ها وجود داشتند. رابطه‌ی ارائه شده برای پیش‌بینی طول پالس به صورت زیر می‌باشد:

$$t = c(h+r)(T+50)^{-m} V^{-n} \quad (7)$$

که در این رابطه:

$V$ : سرعت وسیله نقلیه بر حسب کیلومتر بر ساعت

$T$ : دمای روسازی بر حسب سانتی‌گراد

$r$ : شعاع سطح تماس بر حسب سانتی‌متر

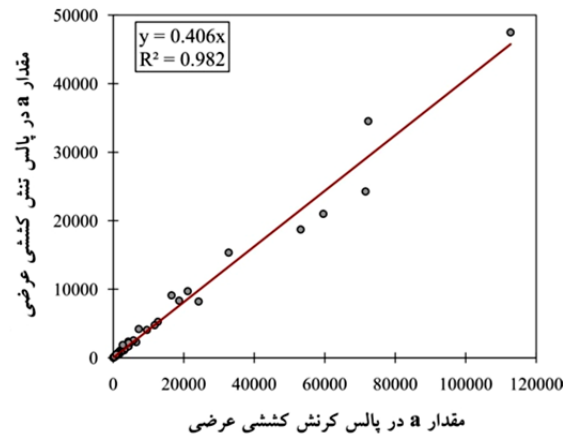
$h$ : ضخامت لایه آسفالتی بر حسب سانتی‌متر

$t$ : طول پالس پاسخ کششی در تار پایین لایه آسفالتی

بر حسب میلی ثانیه

$c$ ،  $m$  و  $n$  ضرایب معادله هستند.

ضرایب معادله (۷) برای پالس نیم‌سینوسی همراه با ضرایب رگرسیون برای ۵۵ مقطع روسازی ضخیم و برای ۵۳ مقطع روسازی نازک در جدول و برای مجموع ۱۰۸ مقطع روسازی ضخیم و نازک در جدول آورده شده است.



شکل ۱۳- ارتباط میان مقادیر  $a$  در پالس تنش کششی عرضی و کرنش کششی عرضی حاصل از برازش تابع زنگوله‌شکل

## ۲-۵- روابط میان عوامل مؤثر و طول پالس پاسخ کششی بر اساس برازش تابع نیم‌سینوسی

نتایج نشان داد که رابطه‌ی میان طول پالس پاسخ کششی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی با عوامل مؤثر به صورت زیر است:

- این رابطه با سرعت وسیله نقلیه به صورت یک رابطه‌ی توانی قابل تعریف است.
- رابطه خطی میان طول پالس پاسخ کششی و ضخامت لایه‌ی آسفالت به دست آمد.
- رابطه میان شعاع سطح تماس و طول پالس به صورت تابع درجه دوم قابل بیان است.
- رابطه میان دما و طول پالس، در روسازی نازک به صورت خطی و در روسازی ضخیم تابعی درجه دوم است.

همچنین برازش تابع زنگوله‌شکل به پالس‌های پاسخ کششی نشان داد که:

- رابطه‌ی میان مقدار  $a$  با سرعت وسیله نقلیه به صورت یک رابطه توانی قابل تعریف است.
- ارتباط میان دمای روسازی، ضخامت لایه آسفالت و شعاع سطح تماس با مقدار  $a$  به صورت تابع درجه دوم می‌باشد.

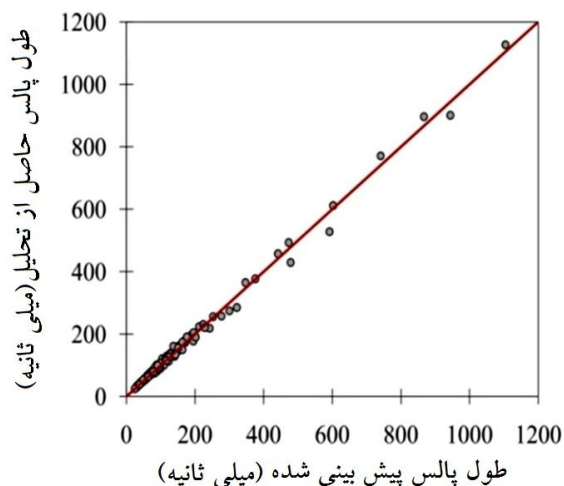
جدول ۷ - ضرایب معادله (۷) برای روسازی نازک و ضخیم به تفکیک

ضریب رگرسیون	ضرایب			پاسخ روسازی	ساختار روسازی
	n	m	c		
۰/۹۹۷	۰/۹۴۰	۰/۹۲۱	۳۲۰۴/۴۱۱	کرنش طولی	ضخیم
۰/۹۹۴	۰/۹۸۷	۰/۷۷۳	۴۲۸۴/۵۱۹	کرنش عرضی	
۰/۹۹۸	۰/۹۴۵	۱/۰۶۱	۵۷۱۳/۳۶۶	تنش طولی	
۰/۹۹۸	۰/۹۵۴	۱/۰۵۲	۸۰۴۷/۲۸۳	تنش عرضی	
۰/۹۹۷	۰/۹۷۶	۰/۵۸۲	۸۹۷/۶۹۱	کرنش طولی	نازک
۰/۹۹۸	۰/۹۵۲	۰/۸۱۱	۴۷۷۶/۸۷۱	کرنش عرضی	
۰/۹۹۶	۰/۹۷۷	۰/۷۲۴	۱۷۰۶/۱۸۵	تنش طولی	
۰/۹۹۷	۰/۹۶۲	۰/۹۱۴	۵۰۴۳/۰۲۲	تنش عرضی	

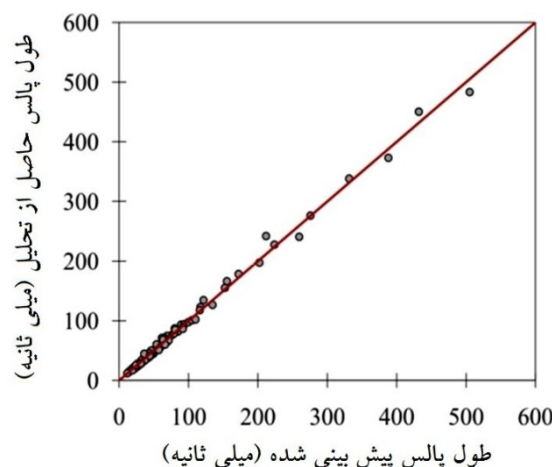
جدول ۸ - ضرایب معادله (۷) برای مجموع روسازی‌های نازک و ضخیم

ضریب رگرسیون	ضرایب			پاسخ روسازی
	n	m	c	
۰/۹۹۵	۰/۹۴۷	۰/۸۵۲	۲۴۷۱/۲۳۹	کرنش طولی
۰/۹۹۵	۰/۹۸۰	۰/۷۸۰	۴۳۷۱/۶۹۱	کرنش عرضی
۰/۹۹۲	۰/۹۵۲	۰/۹۸۹	۴۴۱۳/۶۷۰	تنش طولی
۰/۹۹۶	۰/۹۵۵	۱/۰۲۴	۷۳۲۳/۹۰۲	تنش عرضی

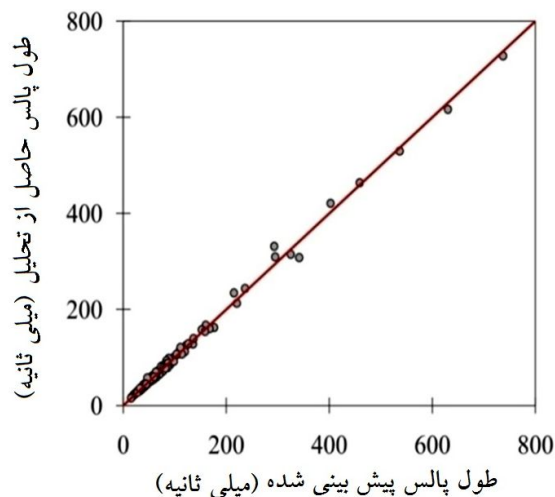
نمودار مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی طول پالس پاسخ کششی تار پایین لایه آسفالتی براساس برازش تابع نیم‌سینوسی در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نشان داده شده است.



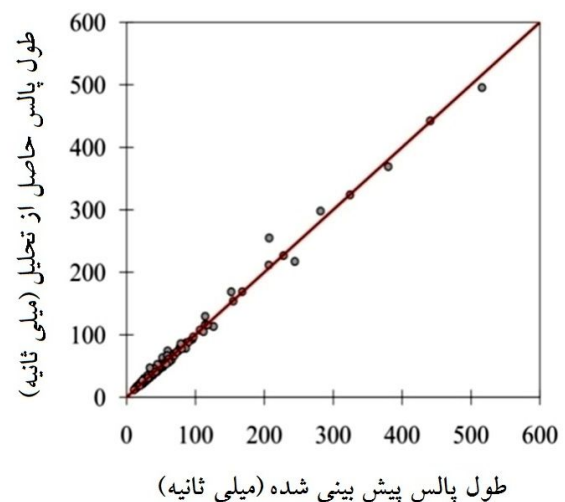
شکل ۱۵ - مقایسه میان طول پالس کرنش کششی طولی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی و پیش‌بینی شده



شکل ۱۴ - مقایسه میان طول پالس کرنش کششی طولی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی و پیش‌بینی شده



شکل ۱۷- مقایسه میان طول پالس کرنش کششی طولی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی و پیش‌بینی شده



شکل ۱۶- مقایسه میان طول پالس کرنش کششی طولی حاصل از برازش تابع نیم‌سینوسی و پیش‌بینی شده

$T$ : شعاع سطح تماس برحسب سانتی‌متر

$h$ : ضخامت لایه آسفالتی برحسب سانتی‌متر

$a$ : مقدار  $a$  در تابع زنگوله‌شکل

$d, k, i$  و  $j$  ضرایب معادله هستند.

ضرایب معادله ارائه شده برای پالس زنگوله‌شکل همراه با

ضرایب رگرسیون برای ۱۰۸ مقطع روسازی در جدول ۹

آورده شده است.

براساس عوامل مؤثر، رابطه‌ی پیشنهادی جهت محاسبه مقدار  $a$  در تابع زنگوله‌شکل، باتوجه به مجموع ۱۰۸ مقطع روسازی ضخیم و نازک به صورت معادله (۸) ارائه گردید.

$$a = d(h + r)^k (T + 100)^{-i} V^{-j} \quad (8)$$

$V$ : سرعت وسیله نقلیه برحسب کیلومتر بر ساعت

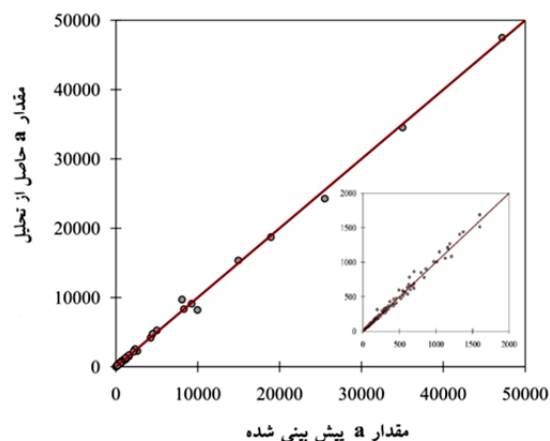
$T$ : دمای روسازی برحسب سانتی‌گراد

جدول ۹- ضرایب معادله (۸) برای مجموع روسازی‌های نازک و ضخیم

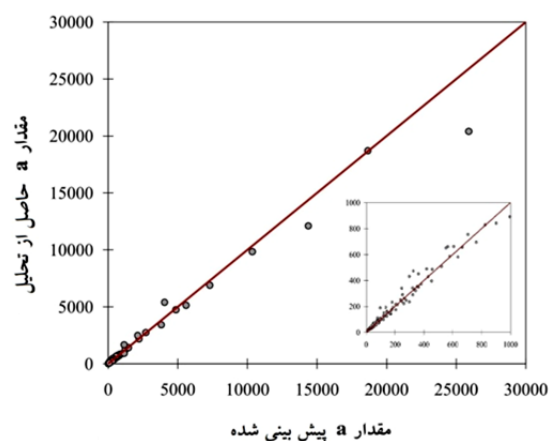
ضریب	ضرایب				پاسخ روسازی
	$j$	$i$	$k$	$d$	
رگرسیون					
۰/۹۶۳	۱/۹۳۸	۳/۳۷۶	۲/۰۹۰	۳۴۴۷۰۰۰۰۰۰	کرنش طولی
۰/۹۹۲	۲/۰۳۲	۳/۳۷۲	۱/۹۵۷	۲۷۳۳۰۰۰۰۰	کرنش عرضی
۰/۹۸۹	۱/۹۱۱	۳/۶۹۸	۱/۸۹۷	۲۹۰۳۰۰۰۰۰۰	تنش طولی
۰/۹۹۸	۱/۹۱۹	۳/۵۲۵	۱/۸۹۵	۲۶۲۷۰۰۰۰۰۰	تنش عرضی

شده است. ضرایب رگرسیون در تمامی موارد بیشتر از ۰/۹۶ می‌باشد.

نمودار مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر  $a$  به دست آمده از برازش تابع زنگوله‌شکل به پالس‌های پاسخ کششی در تار پایین لایه آسفالتی در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ نشان داده



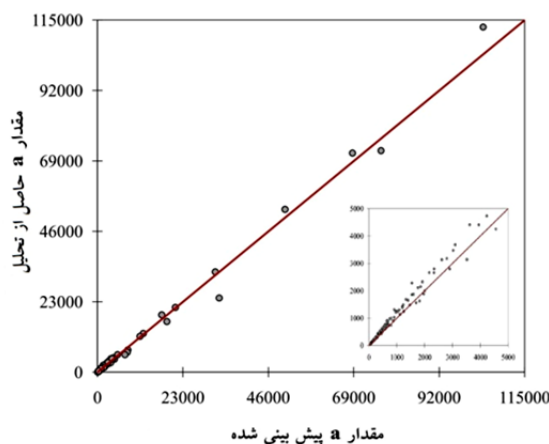
شکل ۲۱- مقایسه میان مقادیر  $a$  حاصل از برازش تابع زنگوله‌شکل و پیش‌بینی‌شده برای پالس تنش کششی عرضی



شکل ۱۸- مقایسه میان مقادیر  $a$  حاصل از برازش تابع زنگوله‌شکل و پیش‌بینی‌شده برای پالس کرنش کششی طولی

البته لازم به ذکر است که در استفاده از معادله (۸) برای پالس کرنش و هم تنش طولی در روسازی نازک در دمای بالا (۵۰ درجه سانتی‌گراد) باید دقت نمود. در این مورد معادله‌ی فوق به‌طور میانگین ۳۰ درصد خطا در پیش‌بینی مقدار  $a$  دارا می‌باشد.

همچنین فرمول فوق برای پالس کرنش عرضی در دمای متوسط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در روسازی ضخیم و هم نازک به طور میانگین، دارای تقریباً ۲۵ درصد خطا در تخمین مقادیر می‌باشد.



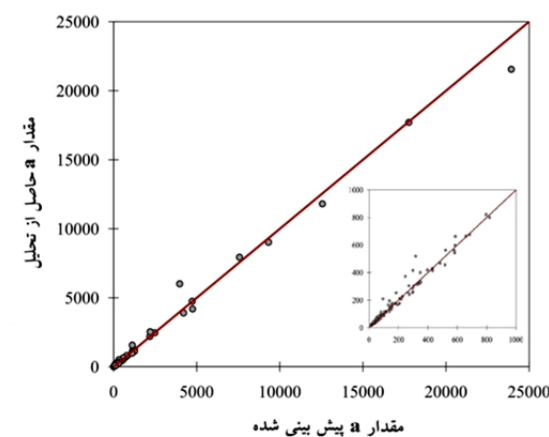
شکل ۱۹- مقایسه میان مقادیر  $a$  حاصل از برازش تابع زنگوله‌شکل و پیش‌بینی‌شده برای پالس کرنش کششی عرضی

### ۳- نتیجه‌گیری

با توجه به تحقیق انجام شده، نتایج زیر قابل بیان می‌باشد:

- سرعت وسیله نقلیه، دمای روسازی و ضخامت لایه‌ی آسفالت از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شکل و طول پالس پاسخ کششی در تار پایین لایه‌ی آسفالتی هستند.

- سرعت وسیله نقلیه، دمای روسازی، ضخامت لایه‌ی آسفالت و شعاع تماس از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شکل و طول پالس حاصل از برازش توابع نیم‌سینوسی و زنگوله‌شکل بر پالس پاسخ روسازی می‌باشد.



شکل ۲۰- مقایسه میان مقادیر  $a$  حاصل از برازش تابع زنگوله‌شکل و پیش‌بینی‌شده برای پالس تنش کششی طولی

طول پالس به صورت تابع درجه دوم و رابطه میان دما و طول پالس در روسازی نازک به صورت خطی و در روسازی ضخیم به صورت تابع درجه دوم قابل بیان است.

- رابطه‌ی میان مقدار  $a$  در تابع زنگوله‌شکل با سرعت وسیله نقلیه به صورت یک رابطه توانی قابل تعریف است و ارتباط میان دمای روسازی، ضخامت لایه آسفالت و شعاع سطح تماس با مقدار  $a$  به صورت تابع درجه دوم می‌باشد.

- روابط ترکیبی باتوجه به مهم‌ترین عوامل مؤثر شامل سرعت وسیله نقلیه، دمای روسازی، ضخامت لایه‌ی آسفالت و شعاع سطح تماس جهت محاسبه طول پالس پاسخ کششی در تار پایین لایه آسفالتی حاصل از برآزش تابع نیم‌سینوسی و همچنین، جهت محاسبه‌ی مقدار پارامتر  $a$  در تابع زنگوله‌شکل برآزش داده شده بر پالس‌های پاسخ با ضرایب رگرسیون بالا ارائه گردید.

#### ۴- پی نوشت‌ها

1. Fatigue
2. Pulse Duration
3. National Center for Asphalt Technology (NCAT)
4. Longitudinal Direction
5. Transverse Direction
6. Haversine
7. Bell Shape

- به‌طور کلی توابع نیم‌سینوسی و زنگوله‌شکل بر پالس‌های پاسخ طولی بهتر از جهت عرضی برآزش پیدا کردند.

- طول‌های پالس پاسخ کششی حاصل از برآزش تابع نیم‌سینوسی نشان دادند که طول پالس کرنش عرضی تقریباً دو برابر طول پالس کرنش طولی است. و طول پالس تنش عرضی  $1/4$  برابر طول پالس تنش طولی است. همچنین نتایج نشان داد که طول‌های پالس تنش و کرنش طولی تقریباً با یکدیگر برابر هستند. درحالی‌که طول پالس تنش عرضی  $0/6$  برابر طول پالس کرنش عرضی است.

- مقادیر پارامتر  $a$  حاصل از برآزش تابع زنگوله‌شکل نشان داد که، مقدار مذکور در کرنش‌های عرضی تقریباً ۵ برابر این مقدار در کرنش‌های طولی است و مقدار آن در تنش‌های عرضی، تقریباً ۲ برابر آن در تنش‌های طولی است. همچنین مقدار این پارامتر در کرنش‌های طولی تقریباً برابر تنش‌های طولی است و مقدار این پارامتر برای تنش‌های عرضی تقریباً  $0/4$  برابر مقدار  $a$  در کرنش‌های عرضی می‌باشد.

- برآزش تابع نیم‌سینوسی نشان داد که میان طول‌های پالس پاسخ کششی و عوامل مؤثر معادلاتی برقرار است. این رابطه برای سرعت وسیله نقلیه به صورت یک رابطه توانی قابل تعریف است و رابطه میان طول پالس و ضخامت لایه‌ی آسفالت به صورت خطی به دست آمد. رابطه میان شعاع سطح تماس و

#### ۵- مراجع

- [1] Barksdale, R.D. (1971). "Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing". In highway research record 345, HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.32-44.
- [2] McLean, D.B. (1974). "Permanent deformation characteristics of asphalt concrete". Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- [3] Al-Qadi, I.L., Loulizi, A., Elseifi, M., Lahouar, S. (2004). "The Virginia SMART ROAD: the impact of pavement instrumentation on understanding pavement performance (with discussion)". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol. 73, pp. 427-466.

- [4] Mallick, R.B., O'Brien, S., Humphrey, D. (2006). "Analysis of pavement response data and use of nondestructive testing for improving pavement design and adoption of Mechanistic-Empirical Pavement Design Procedure using the Gilford Route 15 instrumented pavement test section". First Annual Report, 04-1A.
- [5] Garcia, G., Thompson, M.R. (2008). "Strain and pulse duration considerations for extended-life hot-mix asphalt pavement design". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2087, No. 1, pp. 3-11.
- [6] Zhou, F., Fernando, E., Scullion, T. (2010). "Development, calibration, and validation of performance prediction models for the M-E flexible pavement design". Report 0-5798-2, Texas Transportation Institute.
- [7] Mollenhauer, K., Wistuba, M., Rabe, R. (2009). "Loading frequency and fatigue: In situ conditions & impact on test results". 2th Workshop on Four Point Bending, Pais (ed.).
- [8] Robbins, M.M., Timm, D.H. (2009). "Investigation into strain pulse durations on full-scale instrumented pavement". Proceedings of the TRB 88th Annual Meeting Compendium, Papers DVD 18p. Washington DC.
- [9] Hernandez, J.A. (2010). "Evaluation of the response of perpetual pavement at accelerated pavement loading facility: Finite element analysis and experimental investigation". Master of Science Thesis, Ohio University.
- [10] Restrepo-Velez, A.M. (2011). "Long-term performance of asphalt concrete perpetual pavement way-30 project". Master of Science Thesis, Ohio University.
- [11] Brown, S.F. (1973). "Determination of Young's modulus for bituminous materials in pavement design". In Highway Research Record 431, HRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 38-49.
- [12] Ullidtz, p. (2005). "Frequency/Loading Time". NCHRP 1-40A (01), Committee Notes.
- [13] NCHRP, (2004). "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures". Appendix II-1: Calibration of Fatigue Cracking Models for Flexible Pavements.
- [14] Huang, Y.H. (2004). "Pavement analysis and design". Second edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458.
- [15] SHRP-A-404, (1994). "Fatigue response of asphalt-aggregate mixes". Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC.
- [16] Siddharthan, R.V., Yao, J., Sebaaly, P.E. (1998). "Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution". Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, No. 6, pp. 557-566.
- [17] Zafir, Z., Siddharthan, R., Sebaaly, P.E. (1994). "Dynamic pavement-strain histories from moving traffic load". Journal of transportation engineering, Vol. 120, No. 5, pp. 821-842.
- [18] Siddharthan, R.V., Yao, J., Sebaaly, P.E. (1996). "Field verification of a moving load model for pavement response". Transportation Research Record No. 1540, TRB, pp. 125-131.