

# اثرات مدت زمان بارگذاری بر روی ضرایب بار هم ارز در روسازی های انعطاف پذیر

علی منصور خاکی و علیرضا سرکار

**چکیده:** به دلیل رفتار ویسکوالاستیک مخلوطهای آسفالتی، واکنشهای ایجاد شده در سازه راه و به تبع آن ضرایب بار هم ارز مربوطه، وابسته به مدت زمان اعمال بار بر سطح راه می باشد. از این رو در این تحقیق به بررسی اثرات تغییر سرعت بار عبوری و مدت زمان اعمال بار بر ضرایب بار هم ارز پرداخته شده است. از آنجاییکه با افزایش سرعت بار عبوری ماهیت بارگذاری تغییر می یابد، از این رو در این تحقیق پارامتر سرعت بار عبوری از ۲ جنبه مورد بررسی قرار گرفته است:

۱. تولید بارهای دینامیکی ناشی از سرعت بالای وسیله نقلیه عبوری در یک فاصله زمانی کوتاه.
  ۲. صرف نظر کردن از ماهیت دینامیکی بار و اعمال بار عبوری به صورت استاتیکی بر سطح راه.
- با توجه به کمبود امکانات موجود در ایران، در این مطالعه جهت انجام تحقیقات لازم روش تئوری مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، بخشی از راه مورد مطالعه در آزمایش راه آشتو به عنوان روسازی منتخب مورد بررسی قرار گرفته است و پس از محاسبه واکنشهای بحرانی روسازی با استفاده از نرم افزار KENLAYER، ضرایب بار هم ارز در زمانهایی معادل با سرعت ۲۰ Km/hr تا ۱۲۰ Km/hr تعیین گردیده است. نتایج بدست آمده بر اساس روش تئوری نشان داد که اثرات مدت زمان بارگذاری بر مقدار ضرایب بار هم ارز نه تنها بر اساس معیارهای انتخابی مختلف جهت محاسبه این ضرایب متفاوت است، بلکه این اثرات وابسته به نوع و وزن محور عبوری نیز می باشد.

**واژه های کلیدی:** ضریب بار هم ارز، رفتار ویسکوالاستیک، افت و خیز روسازی، کرنش کششی زیر آسفالت، تنش فشاری بالای بستر.

## ۱. مقدمه

پس از ارائه ضرایب بار هم ارز توسط AASHTO مراکز مطالعاتی و تحقیقاتی دنیا اقداماتی را در زمینه برآورد ضرایب بار هم ارز آغاز کردند و موفق به ارائه ضرایب بار هم ارز مختلفی نیز شدند که این ضرایب به معیار انتخاب شده جهت تعیین آنها وابسته بود. از آن جمله می توان به عوامل مختلفی مانند فاصله بین محورها، نوع خرابی روسازی، ضخامت روسازی و سطح خرابی روسازی اشاره نمود. لذا این عوامل محققان را بر آن داشت تا اقدام به ارائه ضرایبی بکنند که مستقل از متغیرهای وابسته به روسازی و خصوصیات محورها باشد. از آن جمله می توان به ضرایب ارائه شده توسط

Painter, Monismith و Claessen [۱] برای محورهای منفرد و تاندم اشاره نمود. از جمله عوامل تاثیرگذار بر مقدار ضرایب بار هم ارز، سرعت وسیله نقلیه عبوری می باشد. در روسازی های آسفالتی، به علت رفتار ویسکوالاستیک مخلوطهای آسفالتی واکنشهای روسازی تابعی از مدت زمان بارگذاری می باشد. از این رو هر تغییری در سرعت عبور بار اعمالی باعث تغییر در واکنش های بحرانی روسازی و میزان خرابی های سطح راه می شود. مدلی که توسط Yun و Chatti [۲] ارائه شد، نشان داد که تاثیر تغییرات سرعت وسیله نقلیه عبوری بر واکنش های روسازی های آسفالتی مهم می باشد. به گونه ای که افزایش تدریجی سرعت وسیله نقلیه تا ۶۴ Km/hr باعث کاهش ۳۰ تا ۴۰ درصدی کرنش طولی ماکزیمم لایه آسفالتی می شود. همچنین تحقیقات این دو نشان داد که تغییرات سرعت بار عبوری، کرنشهای عرضی را تحت تاثیر بیشتری قرار می دهد. در روسازی های انعطاف پذیر ضرایب بار هم ارز ارائه شده توسط آشتو بر میزان صدمه و خرابی ناشی از عبور محور موردنظر محور استاندارد، استوار می باشد. از طرفی

مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۱۲/۱۶ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۵/۹/۱۵ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر علی منصور خاکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،  
mkhaki@iust.ac.ir

علیرضا سرکار، کارشناس ارشد راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،  
alirezasarkar@yahoo.com

نمونه بارز آن نیز ضرایب بار هم ارزآشتو برای محور تردم می باشد که در آزمایش راه آشتواریابی نشد و ضرایب این نوع محور با استفاده از روشهای تحلیلی استخراج گردید [۱]. از اینرو با توجه به نکات فوق، در این تحقیق برای بررسی وارزیابی اثرات مدت زمان بارگذاری بر روی ضرایب بار هم ارز در روسازیهای انعطاف پذیر از روش تئوری استفاده گردیده است. در این روش کلیه مشخصات روسازی منتخب آشتو، به عنوان ورودی های نرم افزار KENLAYER انتخاب گردید و پارامترهای بحرانی روسازی به عنوان خروجی های برنامه مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق هر سه پارامتر بحرانی روسازی جهت محاسبه ضرایب بار هم ارز مورد تحلیل قرار گرفت و با توجه به قابلیت نرم افزار KENLAYER پارامترهای بحرانی براساس دو نوع تحلیل الاستیک و ویسکوالاستیک محاسبه گردید. همچنین جهت بررسی اثر دینامیکی بار عبوری، یک مدل ریاضی از حرکت چرخ وسیله نقلیه به هنگام عبور از ناهمواریهای سطح جاده ارائه گردیده است و با استفاده از این مدل اثر دینامیکی سرعت بار عبوری بر ضرایب بار هم ارز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲-۱. تحلیل بارهای متحرک به صورت استاتیکی

قبل از پرداختن به روش تحلیل بارهای متحرک، شناخت تفاوت بین بارهای متحرک و بارهای ساکن ضروری به نظر می رسد. خصوصاً اینکه روش تحلیل بارهای متحرک مرتبط با وضعیت المان تنشهای اصلی نیز می باشد. عبور بارهای متحرک موجب تولید تنشهای قائم، افقی و برشی در هر المان روسازی می شود که در طول هر سیکل بارگذاری مقدار این تنشها به طور متوالی و پیوسته تغییر می یابد. مطابق شکل ۱ با حرکت وسیله نقلیه بر سطح راه و جابجایی محل اثر بار در زمانهای متوالی، راستای تنشهای اصلی تغییر می یابد. به عبارت دیگر المان تنشهای اصلی در حال چرخش بوده و راستای بردار  $\sigma_1$  در هر زمان متمایل به فصل مشترک تایلر با سطح جاده می باشد [۳]. شکل ۱ این عمل را نشان می دهد.

خرابیهای ایجاد شده در سطح راه نیز وابسته به واکنشهای روسازی می باشد. لذا با توجه به مدل ارائه شده توسط Chatti و Yun [۲] هر تغییری در سرعت عبور وسایل نقلیه باعث می شود که بارگذاری اولیه جهت طرح روسازی کاملاً عوض شود و این امر باعث می شود تحت شرایطی بارگذاری روسازی دست بالا بوده و یک روسازی ضحیم داشته باشیم و در شرایطی دیگر با یک روسازی ضعیف مواجه باشیم که دچار خرابیهای زودرس می شود.

از این رو مقاله حاضر میزان تاثیر سرعت بار عبوری بر ضرایب بار هم ارز را مورد بررسی قرار داده است و به طرح این موضوع پرداخته است که توجه به رفتار ویسکوالاستیک آسفالت و در نظر گرفتن سرعت عبور بار و مدت زمان بارگذاری چه تاثیری بر میزان واکنشهای بحرانی روسازی و به تبع آن ضرایب بار هم ارز دارد.

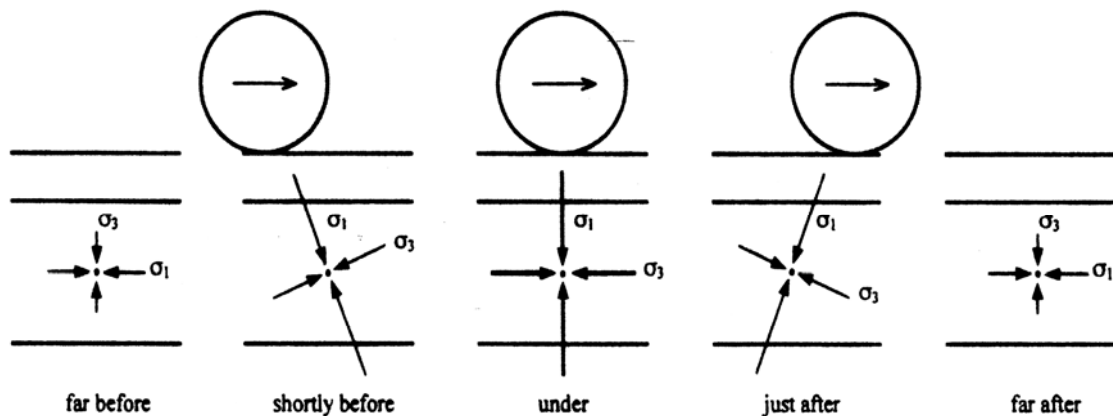
## ۲. روش تحقیق

ضرایب بار هم ارز مورد استفاده در طراحی راه، وابسته به خرابیهای روسازی می باشد و این خرابیها نیز وابسته به واکنشهای ایجاد شده در بدنه راه می باشد.

از این رو در این تحقیق به بررسی اثرات تغییر سرعت بار عبوری و مدت زمان اعمال بار بر ضرایب بار هم ارز پرداخته شده است. طول مدت بارگذاری در هر مقطع راه وابسته به سرعت وسیله نقلیه عبوری از آن مقطع می باشد و با افزایش سرعت عبور بارهای متحرک، ماهیت بارگذاری از حالت استاتیکی به دینامیکی تغییر می نماید. از این رو جهت بررسی اثرات سرعت بارگذاری بر ضرایب بار هم ارز، اثرات دینامیکی و استاتیکی ناشی از سرعت عبور بار مورد بررسی قرار می گیرد.

جهت انجام مطالعات، از میان روشهای تعیین ضرایب بار هم ارز، استفاده از روشهای تجربی به دلیل نیاز به صرف وقت طولانی و همچنین هزینههای فراوان، جهت تهیه تجهیزات پیشرفته، در کشور ما امکان پذیر نیست.

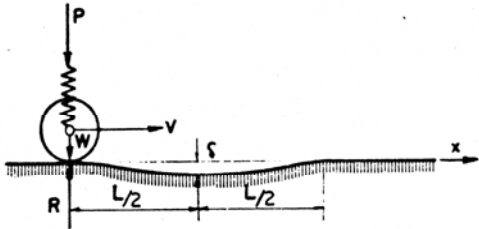
از طرف دیگر، از زمانی که روشهای تحلیل واندازه گیری واکنشهای روسازی در زیر بارهای عبوری پیشرفت نموده است، اطلاعات آزمایش راه آشتو منسوخ و غیرمتداول گشته است.



شکل ۱. چرخش المان تنشهای اصلی در بدنه روسازی به هنگام عبور چرخ [۳]

می‌گردد که قسمت گود مسیر، با برداشتهایی که از سطح راه صورت گرفته است، دارای تابعی به شکل رابطه ۳ می‌باشد:

$$y = \Delta \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{L} x \right) \quad (3)$$



شکل ۳. ارائه مدلی از چرخ وسیله نقلیه به هنگام عبور از ناهمواری مسیر

در این جا به دلیل درگیری مساله با پارامترهای مختلفی نظیر خاصیت ارتجاعی سطح جاده و تایر وسیله نقلیه و سایر پارامترهایی که باعث پیچیدگی حل می‌شود، فرض می‌شود که زمین و طوقه چرخ، هر دو کاملاً صلب می‌باشند و تغییر شکل نمی‌دهند. تا جایی که مسیر عبور چرخ کاملاً افقی است، فشار وارد بر سطح راه (R) ثابت است و مقدار آن برابر  $P + W$  می‌باشد. وقتی که چرخ در گودی راه وارد می‌شود، علاوه بر حرکت افقی، یک حرکت قائم دیگر نیز به آن اضافه می‌گردد که شتاب نظیر آن برابر مقدار زیر می‌باشد:

$$y'' = d^2 y / dt^2 \quad (4)$$

با استفاده از اصل دالامبر در مکانیک فشار وارد بر سطح راه هنگام عبور چرخ از گودی مسیر به صورت تابعی از طول گودال می‌باشد که به شکل رابطه (۵) بیان می‌گردد [۵]:

$$R = P + W - \frac{W}{g} y'' \quad (5)$$

$$R = p + w \left( 1 - \frac{2\pi^2 v^2 \Delta}{gL^2} \cos \left( \pi + \frac{2\pi x}{L} \right) \right) \quad (6)$$

ابتدای گودی مسیر که  $x = -L/2$  می‌باشد مقدار  $\cos(\pi + \frac{2\pi x}{L}) = -1$  خواهد بود که در این حالت حداقل فشار وارد بر جاده را خواهیم داشت که مقدار آن مطابق رابطه (۷) برابر  $R_{min}$  می‌باشد:

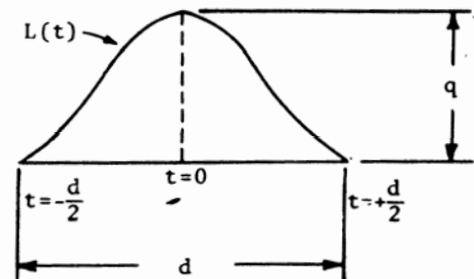
$$R_{min} = p + w \left( 1 - \frac{2\pi^2 v^2 \Delta}{gL^2} \right) \quad (7)$$

ملاحظه می‌شود، موقعی که جمله دوم داخل پرانتز بزرگتر از واحد است، نیروی نظیر فشار وارد بر سطح راه کمتر از مقدار  $p$  است. بنابراین چنین استنباط می‌شود که اگر اثر نیروی  $p$  نباشد، مسیر چرخ از شکل گودی مسیر تبعیت نمی‌نماید. در بخش میانی گودی

به دلیل پیچیدگی‌های این نوع تحلیل و زمان زیادی که کامپیوتر جهت تحلیل داده‌های ورودی صرف می‌کند، از یک روش ساده در برنامه KENLAYER استفاده شده است. در این روش فرض بر این است که رابطه شدت بار با زمان، مطابق شکل ۲ به صورت یک تابع نیم سینوسی می‌باشد [۴]. منحنی تابع بارگذاری در لحظه  $t = 0$  دارای ماکزیمم مقدار خود می‌باشد. به عبارت دیگر درست در این لحظه، راستای بار عبوری دقیقاً از مرکز فصل مشترک تایر با سطح جاده عبور می‌کند و راستای بردار  $\sigma_1$  همواره متمایل به این سطح می‌باشد. زمانی که بار شروع به حرکت می‌کند، شدت بارورده تغییر می‌نماید که تابع تغییرات شدت بار نسبت به زمان، به صورت رابطه (۱) بیان می‌گردد [۴]:

$$L(t) = q \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d} \right) \quad (1)$$

در این رابطه  $d$  طول مدت بارگذاری می‌باشد. در وضعیتی که



شکل ۲. منحنی بار متحرک به صورت تابعی از زمان [۴]

بار در فاصله قابل ملاحظه‌ای از نقطه موردنظر قرار گیرد یا  $t = \pm \frac{d}{2}$  باشد، شدت بار در بالای نقطه موردنظر صفر می‌باشد. به عبارت دیگر  $L(t) = 0$  است و زمانی که بار مستقیماً بالای نقطه موردنظر قرار گیرد یا به عبارت دیگر  $t = 0$  باشد، شدت بار  $q$  خواهد بود. مدت بارگذاری بستگی به سرعت وسیله نقلیه  $s$  و شعاع سطح تماس تایر  $a$  دارد. یک فرض منطقی وجود دارد که می‌گوید: در فاصله  $6a$  از نقطه موردنظر، شدت بار برابر صفر می‌باشد که در این صورت پارامتر  $d$  از رابطه ۲ تعیین می‌گردد [۴]:

$$d = \frac{12a}{s} \quad (2)$$

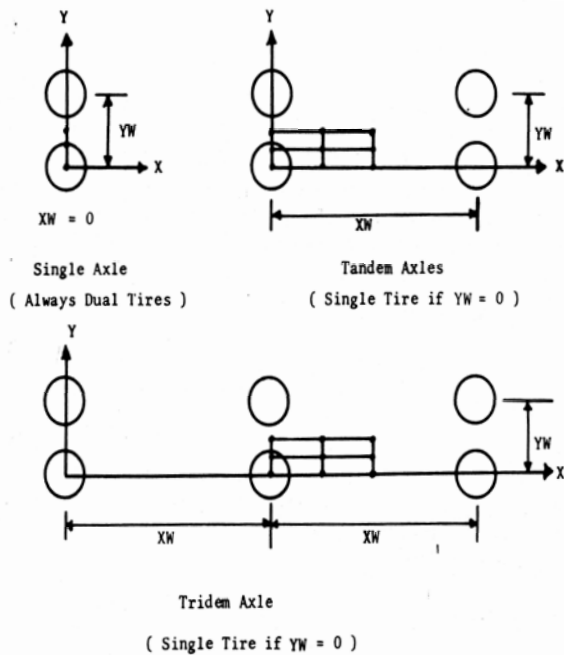
## ۲-۲. ارائه یک مدل ریاضی از تولید بارهای دینامیکی، ناشی از سرعت زیاد وسیله نقلیه عبوری

در ارائه این مدل چرخ وسیله نقلیه‌ای با وزن  $W$  در نظر گرفته شده است و فرض گردیده است که بار  $P$  از طریق فنری به آن منتقل می‌گردد. این چرخ با سرعت ثابتی برابر  $V$  در یک مسیر افقی در حرکت است و در هنگام حرکت، از قسمت گود راه عبور می‌نماید. در این حالت برای محاسبه تغییرات فشار بین چرخ و راه فرض

از این رو برای این که بتوان نتایج حاصل از این مطالعه را با ضرایب محور آشتو نیز مقایسه کرد، از بخشی از راه مورد مطالعه در آزمایش راه آشتو استفاده شده است.

کلیه مشخصات روسازی مورد مطالعه و همچنین کلیه داده‌های ورودی نرم افزار در دمای مبنای ۲۱ درجه سانتیگراد تعیین گردیده است که منطبق بر مشخصات آزمایش راه آشتو می‌باشد. کلیه داده‌های مورد استفاده به شرح جدول ۱ می‌باشد. محور استاندارد مورد نظر در این تحقیق یک محور ساده ۴ چرخ می‌باشد که ۱۸۰۰۰ پوند (۸/۲ تن) وزن دارد.

نحوه قرارگیری چرخها و فاصله آنها مطابق مشخصات مربوط به محور ساده چهار چرخ می‌باشد و مساحت سطح تماس هر چرخ با روسازی نیز مانند دیگر محورها معادل مساحت دایره‌ای به شعاع ۰/۱۱۵ متر (۴/۵۲ اینچ) می‌باشد که بار این محور به طور یکسان بین چرخها توزیع می‌گردد.



شکل ۴. نمای فوقانی قرارگیری چرخها [۴]

مطابق شکل ۴ در این محور  $XW=0$  in و  $YW=13/56$  in و  $R=4/52$  in می‌باشد. برای سایر محورهای نیز  $XW=48$  in و  $YW=13/56$  in و  $R=4/52$  in می‌باشد.

در این تحقیق مقادیر تنشها و کرنش‌های بحرانی ایجاد شده در روسازی بر اساس داده‌های جدول ۱ وبا استفاده از نرم افزار KENLAYER محاسبه گردیده است.

در این بخش مقدار حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالت، حداکثر تنش فشاری قائم بالای خاک بستر و حداکثر افت و خیز روسازی، پارامترهای بحرانی مورد استفاده در این مطالعه می‌باشد.

مسیر که  $X=0$  می‌باشد مقدار  $\cos(\pi + \frac{2\pi x}{L})$  برابر ۱- خواهد بود که در این حالت حداکثر فشار وارد بر سطح راه را خواهیم داشت که مقدار آن مطابق رابطه (۸) برابر  $R_{max}$  می‌باشد.

$$R_{max} = p + w \left( 1 + \frac{2\pi^2 v^2 \Delta}{gL^2} \right) \quad (8)$$

در این حالت ضریب ضربه برابر مقدار زیر می‌باشد:

$$D = \frac{R_{max}}{R} \quad (9)$$

$$D = p + w \left( 1 + \frac{2\pi^2 v^2 \Delta}{gL^2} \right) / p + w \quad (10)$$

برای این که بررسی کنیم آیا وسیله نقلیه در هنگام خروج از گودال از سطح راه جدا می‌شود یا خیر و اگر جدا می‌شود این حالت در چه سرعتی رخ می‌دهد مقدار  $R_{min}$  را برابر صفر قرار می‌دهیم:

$$R_{min} = p + w \left( 1 - \frac{2\pi^2 v^2 \Delta}{gL^2} \right) = 0 \quad (11a)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$v = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g(p+w)}{2w\Delta}} \quad (11)$$

یعنی در سرعتی برابر مقدار محاسبه شده از رابطه ۱۱ وسیله نقلیه در هنگام خروج از گودال از سطح روسازی جدا خواهد شد. در این حالت طبیعتاً چرخ وسیله نقلیه در هنگام تماس مجدد با سطح روسازی تولید بار دینامیکی می‌کند که این بار دینامیکی باعث خرابی و ناهمواری مجدد روسازی می‌گردد.

خرابی و ناهمواری مجدد روسازی منجر به تولید بارهای دینامیکی سنگین‌تر می‌گردد که در این حالت بار محور مورد نظر بیش از مقدار اولیه خود می‌باشد و این سیکل خرابی و به تبع آن تولید بارهای سنگین‌تر و اعمال آن بر سطح جاده همچنان ادامه می‌یابد.

### ۳. محاسبه ضرایب بار هم ارز بر اساس پارامترهای

#### بحرانی روسازی

اولین قدم جهت محاسبه ضرایب بار هم ارز، انتخاب یک ساختار روسازی می‌باشد، تا بر اساس مشخصات آن به بررسی نتایج پرداخته شود.

به طور قابل توجهی مقدار تنشها و کرنشها و همچنین ضرایب بار هم ارز آشتو تحت تاثیر نوع ساختار روسازی می‌باشد [۱].

جدول ۱. مشخصات روسازی راه آزمایش آشتو

| لایه   | AC     | Base  | Sub-base | Sub-grade |
|--|--------|-------|----------|-----------|
| ضخامت<br>[in]  | ۶      | ۶     | ۸        | ∞         |
| CBR  | -      | -     | -        | ۳         |
| مدول ارتجاعی<br>E [Psi]  | ۴۵۰۰۰۰ | ۳۰۰۰۰ | ۱۵۰۰۰    | ۴۲۶۷      |
| ضریب پواسون  | ۰.۳۵   | ۰.۳۵  | ۰.۳۵     | ۰.۴۵      |
| ضریب لایه<br>a   | ۰.۴۴   | ۰.۱۴  | ۰.۱۱     | -         |
| ضریب زهکشی<br>m  | -      | ۱     | ۱        | -         |
| وزن مخصوص<br>[lb/in <sup>3</sup> ]   | ۰.۰۸۴  | -     | -        | -         |
| $SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 = 0.44 \times 6 + 0.14 \times 9 \times 1 + 0.11 \times 8 \times 1 = 4.8 \approx 5$ |        |       |          |           |

هر کدام از پارامترهای بحرانی روسازی بیانگر نوعی از خرابی در سطح راه می‌باشد و به عنوان جانشینی برای انواع خرابی روسازی به کار می‌رود، که در ادامه به تشریح آن پرداخته شده است:

#### ۱. تغییر شکل سطح روسازی (افت و خیز روسازی)

Pavement Surface deflection

تغییر شکل سطح روسازی از عوامل موثر در بروز خرابی روسازی می‌باشد. بررسی و اندازه‌گیری میزان خرابی انواع روسازی نشان داده است که تغییر شکل و ناهمواری سطح روسازی در بروز انواع خرابی از قبیل ترک خوردگی، اعوجاج و شیارشدگی سهمیم می‌باشد.

#### ۲. کرنش فصل مشترک

Interfacial strain

ترک پوست سوسماری که به علت تناوب سیکل بارگذاری و خستگی روسازی راه می‌باشد، ناشی از کرنش کششی ایجاد شده در زیر لایه آسفالت (روسازی) می‌باشد.

#### ۳. کرنش قائم در بالای سابگرید

Vertical strain on top of subgrade

کرنش عمودی ایجاد شده در بالای سابگرید می‌تواند باعث بروز شیار شدگی سازه روسازی و خرابی سطح روسازی گردد.

#### ۴. کرنش قائم در لایه آسفالت

Vertical strain in Asphalt Concrete layer

کرنش عمودی در لایه آسفالت، در فاصله حدود ۵۰ تا ۷۵ میلیمتری از سطح روسازی، فقط با شیارشدگی در لایه آسفالتی مرتبط می‌باشد که شیار شدگی ناپایدار نامیده می‌شود.

پس از محاسبه پارامترهای بحرانی روسازی برای محورهای مختلف و همچنین محور مبنا، محاسبه ضرایب بار هم ارز به روش تئوری وبا استفاده از رابطه ۱۲ امکان پذیر می‌باشد. [۱].

$$AF_{r,i} = \left( \frac{R_{r,i}}{R_r} \right)^n \quad (12)$$

در این رابطه :

$AF_{r,i}$ : ضریب بار هم ارز بر اساس واکنش نوع  $r$  ام روسازی برای محور نوع  $i$  می‌باشد.

$R_{r,i}$ : مقدار واکنش نوع  $r$  ام روسازی در زیر بار محور  $i$  ام می‌باشد. ( $i$  بیانگر نوع محور و مقدار بار و  $r$  بیانگر نوع واکنش روسازی است).

$R_r$ : مقدار واکنش  $r$  ام روسازی در زیر بار محور استاندارد می‌باشد.  $n$ : نمای رابطه بستگی به مشخصات مصالح روسازی دارد. مطالعات آزمایشگاهی و میدانی نشان داده است که محدوده آن به طور متداول ۴ تا ۵ می‌باشد [۶]. این نماد آزمایش راه آشتو برابر ۳/۸ فرض شده است که معمولاً ۴ در نظر گرفته می‌شود [۱]. در این تحقیق نیز این ضریب برابر ۳/۸ در نظر گرفته شده است.

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد، عدد ضخامت روسازی برای ضرایب بار هم ارز ۴/۸ می‌باشد که تقریباً برابر  $SN = 5$  در نظر گرفته شده است.

مطابق رابطه ۱۲ واکنش‌های روسازی به شکل و فرم انواع خرابی روسازی مرتبط گردیده است و از آنها برای بسط و مقایسه ضرایب بار هم ارز روسازی‌های آسفالتی استفاده شده است. به عبارت بهتر

واکنشهای موردنظر در روسازی خطی می باشد. لذا با توجه به پیچیدگی بحث، استفاده از روش اول پیشنهاد می شود و محور موردنظر و محور مبنای طرح را با سرعت یکسان در نظر می گیریم.

#### ۵. بررسی ضرایب بار هم ارز حاصل از واکنشهای بحرانی

##### روسازی درسرعتهای مختلف

با توجه به نتایج ارائه شده در بخش قبل و با در نظر گرفتن سرعت یکسان برای محور مورد نظر و محور مبنای طرح، ضریب بار دینامیکی حذف شده و نقشی در محاسبه ضرایب بار هم ارز تئوری در این تحقیق نخواهد داشت.

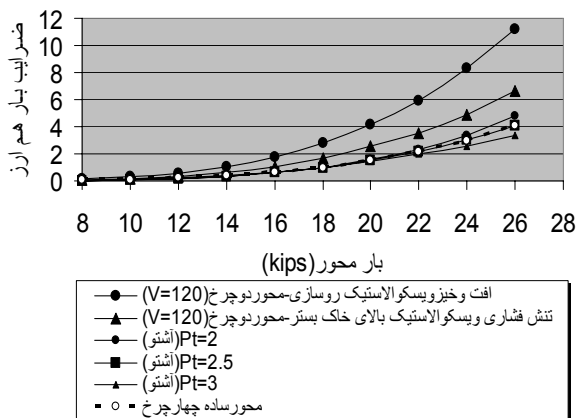
از این رو با صرفنظر کردن از اثرات دینامیکی بار و با توجه به رفتار ویسکوالاستیک آسفالت، به نقش مدت زمان عبور یک بار استاتیکی در سرعتهای مختلف بر روی ضرایب بار هم ارز پرداخته شده است.

##### ۵-۱. ضرایب بار هم ارز محور منفرد

۱. مقایسه ضرایب بار هم ارز محور ساده دوچرخ مطابق نمودارهای ۱ و ۲ نشان می دهد که ضرایب بار هم ارز این محور براساس معیار کرنش کششی زیر لایه آسفالت به مقدار قابل توجهی بیش از سایر معیارها می باشد.

به عبارت دیگر معیار حاکم بر ضرایب بار هم ارز به هنگام عبور محور ساده دو چرخ در سرعتهای مختلف معیار کرنش کششی زیر لایه آسفالت می باشد.

به این ترتیب می توان انتظار داشت که به هنگام عبور این نوع محور و با هر سرعتی ترک پوست سوسماری بیش از سایر خرابیها مشهود باشد.



##### نمودار ۱. مقایسه ضرایب بار هم ارز محور ساده دو چرخ و چهار چرخ

بر اساس تحلیل ویسکو-الاستیک با ضرایب بار هم ارز آشتو

۲. از مشاهده نمودارهای ۲ و ۳ مربوط به محور منفرد دوچرخ چنین استنباط می شود که ضرایب بار هم ارز محاسبه شده در این بخش به مقدار زیادی بیشتر از ضرایب بار هم ارز آشتو می باشد. همانطور که در

در محاسبه ضرایب بار هم ارز هم اکنون روشهای تحلیلی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند و از زمانی که روشهای مورد استفاده برای اندازه گیری و محاسبه واکنشهای روسازی در زیر بار ترافیک پیشرفت کرده است، اطلاعات آزمایش راه آشتو منسوخ و غیر متداول گشته است [۱].

##### ۴. اثر ضریب بار دینامیکی بر مقدار ضرایب بار هم ارز

مطابق رابطه ۱۰ مشخص شد که ضریب ضربه به سرعت حرکت محورها بستگی دارد. به عبارت بهتر محورهایی که دارای سیستم میراگر یکسانی می باشند، صرفنظر از وزن و نوع محور (منفرد، تاندم و یا تردم) در سرعتهای یکسان دارای ضریب ضربه یکسانی می باشند. بنابراین مطابق رابطه ۱۲ ضریب ضربه با توجه به نسبی بودن ضرایب بار هم ارز از صورت و مخرج رابطه حذف خواهد شد و به این ترتیب بحث آثار دینامیکی سرعت وسیله نقلیه بر روی ضرایب بار هم ارز منتفی خواهد بود.

به عبارت دیگر کلیه اندازه گیری ها برای محور موردنظر و محور مبنای طرح می بایست در سرعت یکسان انجام گیرد. از طرف دیگر اگر محور مبنای طرح و محور موردنظر دارای سرعت یکسانی نباشند، دارای ضرایب ضربه متفاوتی خواهند بود، به عبارت دیگر در این حالت نه محور موردنظر وزن اولیه را خواهد داشت و نه محور مبنای طرح، محور ۱۸ کیلو پوندی خواهد بود.

به بیان روشن تر مقادیر بدست آمده بیانگر بار اسمی محورها نخواهد بود. از این رو در این حالت باید ضرایب بار هم ارز دینامیکی را تعریف نمود و در تعریف محور مبنای طرح علاوه بر ذکر نوع و وزن محور، میزان سرعت آن نیز مطرح گردد تا مشخص گردد با توجه به سرعت عبور، محور موردنظر چه باری را بر سطح راه وارد می نماید.

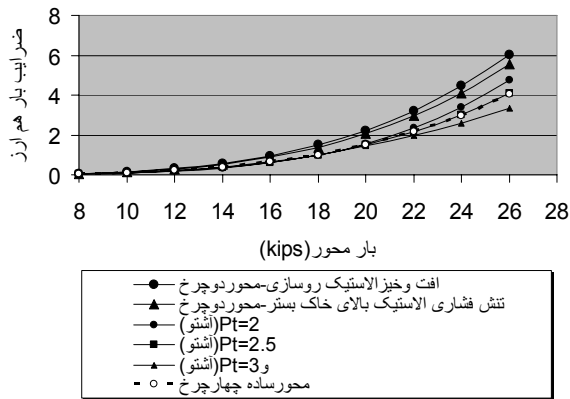
به عنوان مثال، اگر محور مبنای طرح، محور ساده چهار چرخ ۱۸ کیلو پوندی با سرعت طرح ۹۰ Km/hr باشد، می بایست کلیه محورها با سرعتهای مختلف و با آثار دینامیکی خود با این محور سنجیده شود. به بیان روشن تر برای هر محور، دو نوع ضریب بار هم ارز وجود خواهد داشت: ضریب بار هم ارز با اعمال ضریب ضربه بر محور موردنظر و دیگری ضریب بار هم ارز بدون اعمال ضریب ضربه. در صورتی که بحث ضریب ضربه را وارد ضرایب بار هم ارز نماییم، مطابق رابطه ۱۲، اگر بار محور موردنظر  $a$  برابر شود، ضریب بار هم ارز  $a^n$  برابر خواهد شد. به عنوان مثال اگر  $n=3/8$  فرض شود و ضریب بار دینامیکی (ضریب ضربه) برابر  $1/1$  باشد، ضریب بار هم ارز  $1/44$  برابر خواهد شد.

به عبارت دیگر ۱۰ درصد افزایش بار استاتیکی حدود ۴۵ درصد افزایش ضریب بار هم ارز را به دنبال خواهد داشت.

باید به این نکته توجه داشته باشید که با  $a$  برابر شدن بار، واکنشهای موردنظر در رابطه ۱۲ نیز  $a$  برابر می شود. خروجی های نرم افزار KENLAYER این مساله را اثبات کرده است که رابطه بار و

زودرس روسازی منتهی شود. در بندهای بعدی خواهیم دید که این مساله برای سایر محورها و براساس معیارهای انتخابی مختلف متفاوت می باشد.

۴. مقایسه بین ضرایب بار هم ارز آشتو (Pt های مختلف و  $SN=5$ ) و ضرایب محور ساده دو چرخ بدست آمده در این تحقیق بر اساس نمودارهای ۱ و ۲ نشان می دهد که در هر دو نوع تحلیل و بر اساس هر سه معیار، ضرایب محور دو چرخ بدست آمده بیشتر از ضرایب محور هم ارز آشتو می باشد.



نمودار ۴. مقایسه ضرایب بار هم ارز محور ساده دو چرخ و چهار چرخ بر اساس تحلیل الاستیک با ضرایب بار هم ارز آشتو

ولی ضرایب بار هم ارز بدست آمده بر اساس حداکثر تنش فشاری قائم بالای خاک بستر بر اساس رفتار الاستیک و ویسکو - الاستیک نزدیکی بیشتری با ضرایب محور آشتو با  $Pt=2$  و  $SN=5$  دارد.

۵. مشاهده نمودارهای ۱ و ۴ و همچنین مقایسه ضرایب محور هم ارز برای محور ساده دو چرخ و چهار چرخ، اختلاف زیادی را بابت دیگر نشان می دهند که ناشی از تعداد چرخها می باشد.

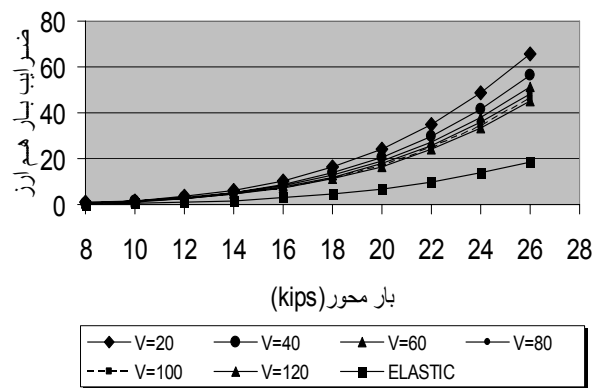
این مقایسه بیانگر نقش تعداد تایرها در ضرایب محور هم ارز می باشد.

۶. ضرایب بار هم ارز محور ساده چهار چرخ محاسبه شده بر مبنای معیارهای مختلف و بر اساس تحلیل الاستیک و ویسکو - الاستیک هیچ تفاوتی را نشان نمی دهد و مطابق نمودار ۱ و ۴ با ضرایب محور آشتو (محور منفرد با  $SN=5$  و  $Pt=2/5$ ) منطبق می باشد. به عبارت دیگر اهمیت پارامترهای مختلف بر این ضرایب یکسان می باشد و این بدان علت است که محور ساده چهار چرخ به عنوان محور مبنا انتخاب شده است. به عنوان مثال، اگر فرضاً محور تاندم و تریدم به عنوان محور مبنا انتخاب می شد، اثر پارامترهای مختلف بر ضرایب حاصل از آنها یکسان می بود.

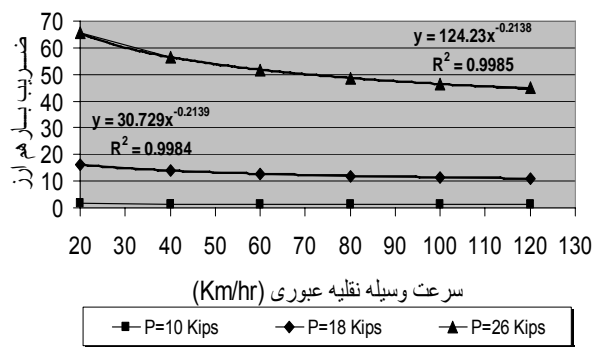
۷. با توجه به نمودارهای ۱ و ۲ چنین استنباط می شود که اثر تغییر مدت زمان بارگذاری بر ضرایب بار هم ارز محور ساده دو چرخ محسوس تر می باشد، به گونه ای که با کاهش سرعت و افزایش زمان بارگذاری مقادیر ضرایب بار هم ارز بر اساس هر معیار افزایش

بند قبل اشاره شد معیار حاکم بر ضرایب بار هم ارز در محور ساده دو چرخ کرنش کششی زیر لایه آسفالت می باشد، به عبارت بهتر خرابی ناشی از این واکنش که همان ترک پوست سوسماری است، بیش از سایر خرابیها مشهود می باشد و این در حالی است که ضرایب بار هم ارز آشتو اساساً بر پایه ناهمواریهای روسازی استوار می باشد [۶].

به بیان دیگر ضرایب محور آشتو بر اساس نشانه خدمت حال حاضر روسازی (PSI) می باشد و اگرچه نشانه خدمت روسازی تابعی از شدت خرابیهای مختلف است ولی عمدتاً تاثیر میزان ناهمواریهای راه بر روی نشانه خدمت روسازی بیشتر از سایر خرابیها می باشد و ترک خوردگی و شیارشدگی فقط حدود ۵ درصد در مقدار نشانه خدمت حاضر روسازی، شرکت دارد [۱].

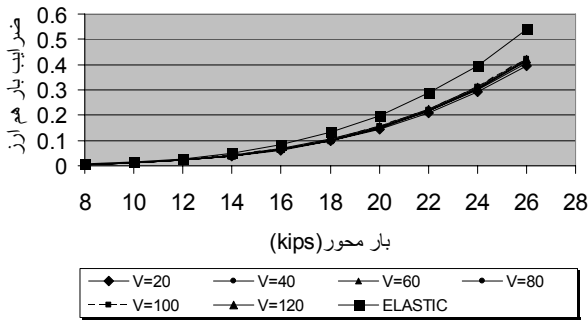


نمودار ۲. ضرایب بار هم ارز محور ساده دو چرخ بر اساس حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالت در تحلیل ویسکو - الاستیک و الاستیک

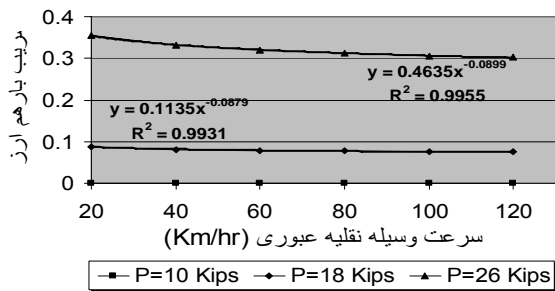


نمودار ۳. تغییر ضرایب بار هم ارز محور ساده دو چرخ بر اساس حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالت در تحلیل ویسکو - الاستیک در سرعت های مختلف

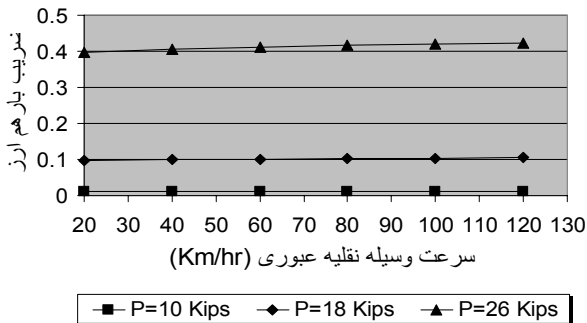
۳. با توجه به نمودار ۱ و ۲ چنین استنباط می شود که ضرایب بار هم ارز محور ساده دو چرخ که از تحلیل ویسکو - الاستیک در سرعت های مختلف حاصل می شوند به مقدار قابل توجهی بیشتر از تحلیل الاستیک آسفالت می باشند به عبارت دیگر، عدم توجه به رفتار ویسکو الاستیک آسفالت در محور ساده دو چرخ منجر به ضریب بار هم ارز کوچکتری می شود که این مساله می تواند به خرابی



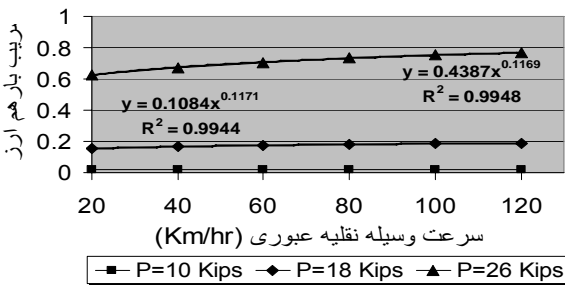
نمودار ۷. ضرایب بار هم ارز محور تاندم بر اساس حداکثر تنش فشاری بالای خاک بستر در تحلیل ویسکو - الاستیک و الاستیک



نمودار ۸. تغییر ضرایب بار هم ارز محور تاندم بر اساس حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالت در تحلیل ویسکو - الاستیک در سرعت‌های مختلف



نمودار ۹. تغییر ضرایب بار هم ارز محور تاندم بر اساس حداکثر افت و خیز روسازی در تحلیل ویسکو - الاستیک در سرعت‌های مختلف

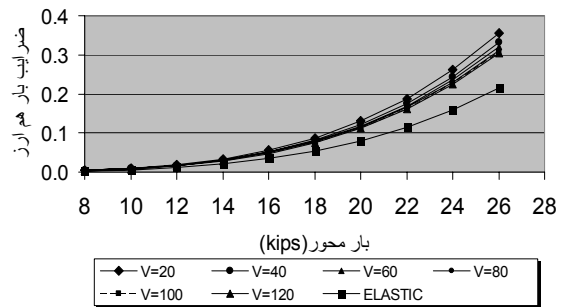


نمودار ۱۰. تغییر ضرایب بار هم ارز محور تاندم بر اساس حداکثر تنش فشاری بالای خاک بستر در تحلیل ویسکو - الاستیک در سرعت‌های مختلف

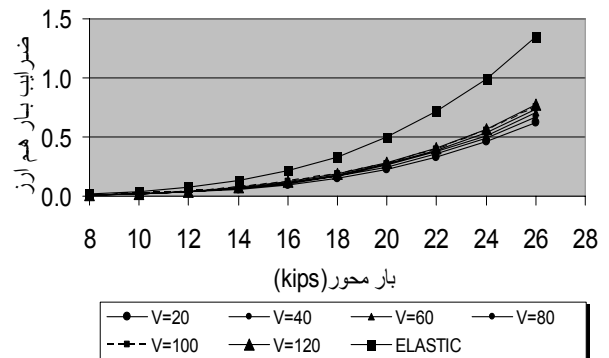
می‌یابد و این افزایش برای ضرایب بار هم ارز بر اساس معیار کرنش کششی زیر لایه آسفالت بیشتر می‌باشد.  
۸. با توجه به شیب منحنی‌های نمودار ۳، ضرایب بار هم ارز محورهای سنگین تر در اثر تغییر سرعت، اختلاف بیشتری را نشان می‌دهند.

۵-۲. ضرایب بار هم ارز محور تاندم

۱. در مورد محور تاندم، مطابق نمودارهای ۵، ۶ و ۷ چنین می‌توان گفت که معیار حاکم بر ضرایب بار هم ارز به هنگام عبور محور تاندم، معیار حداکثر افت و خیز روسازی می‌باشد و معیار حداکثر تنش فشاری قائم بالای خاک بستر و حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالت در اولویت بعدی قرار دارند.  
۲. در مورد محور تاندم، تفاوت‌هایی بین ضرایب بار هم ارز در سرعت‌های مختلف مشاهده می‌شود به گونه ای که کاهش سرعت و افزایش زمان بارگذاری باعث افزایش ضرایب بار هم ارز این محور بر اساس معیار کرنشی کششی زیر لایه آسفالت و کاهش ضرایب بار هم ارز بر اساس حداکثر افت و خیز روسازی و تنش فشاری قائم بالای خاک بستر می‌شود.



نمودار ۵. ضرایب بار هم ارز محور تاندم بر اساس حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالت در تحلیل ویسکو-الاستیک و الاستیک



نمودار ۶. ضرایب بار هم ارز محور تاندم بر اساس حداکثر افت و خیز روسازی در تحلیل ویسکو - الاستیک و الاستیک



### ۶. نتیجه گیری

به طور کلی تغییر سرعت وسیله نقلیه عبوری و یا به عبارت دیگر تغییر زمان بارگذاری باعث تغییر ضرایب بار هم ارز می‌شود و میزان این تغییرات تابع نوع محور، معیار محاسبه ضرایب بار هم ارز و وزن محور می‌باشد. نتایج نشان داد که افزایش سرعت عبور محور منفرد دو چرخ باعث کاهش ضرایب بار هم ارز این نوع محور بر اساس هر سه معیار محاسبه شده می‌شود و این در حالی است که تغییرات سرعت بر روی ضرایب محور منفرد چهار چرخ تاثیری ندارد. در مورد ضرایب بار هم ارز محور تاندم و تریدم نیز روند تغییر این ضرایب در اثر افزایش سرعت عبور محور بستگی به معیار انتخابی جهت محاسبه ضرایب بار هم ارز دارد. مطابق جدول ۲ افزایش سرعت باعث کاهش ضرایب بار هم ارز محور تاندم و تریدم بر اساس حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالت و افزایش ضرایب بار هم ارز بر اساس سایر معیارهای انتخابی می‌شود. همچنین این نتایج نشان داد که هرچه وزن محور عبوری بیشتر باشد، تغییرات ضرایب بار هم ارز در اثر تغییرات سرعت عبور محور مورد نظر بیشتر خواهد بود.

به طور کلی میزان تغییر ضرایب بار هم ارز با کاهش سرعت عبور وسیله نقلیه مطابق جدول ۲ محاسبه گردید. با توجه به نتایج ارائه شده چنین استنباط می‌گردد که به علت تفاوت زیاد سرعت عبور وسایل نقلیه در داخل و خارج شهرها ضرایب بار هم ارز مورد استفاده در طراحی راههای شهری و برون شهری متفاوت می‌باشند. این تفاوت حتی در یک شبکه بزرگراهی در خطوط مختلف فرق دارد. به گونه‌ای که اکثر وسایل نقلیه با سرعت بالا از خط منتهی الیه سمت چپ و وسایل نقلیه با سرعت پایین و به ویژه وسایل نقلیه سنگین از خطوط منتهی الیه سمت راست عبور می‌نمایند. لذا با توجه به اینکه اثرات زمان و سرعت بارگذاری بر ضرایب بار هم ارز محورهای سنگین بیشتر می‌باشد، در نظر گرفتن پارامتر زمان و سرعت در طراحی ضخامت روسازی راههای شهری و برون شهری و همچنین در خطوط مختلف راهها منطقی به نظر می‌رسد. به طور کلی چنین می‌توان بیان کرد که ضرایب بار هم ارز مورد استفاده برای بارهای ساکن در محل توقفگاهها و ضرایب بار هم ارز وسایل نقلیه عبوری با سرعتهای کم در کندروها و همچنین ضرایب بار هم ارز وسایل نقلیه عبوری با سرعتهای بالا در خطوط سرعت بر حسب نوع محور متفاوت می‌باشد.

جدول ۲. میزان تغییرات ضرایب بار هم ارز با کاهش سرعت از ۱۲۰ Km/hr به ۲۰ Km/hr

| نوع محور                         | محور منفرد دو چرخ | محور منفرد چهار چرخ | محور تاندم | محور تریدم |
|----------------------------------|-------------------|---------------------|------------|------------|
| حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالت | +۵۶٪              | ۰                   | +۱۷٪       | +۳۵٪       |
| حداکثر افت و خیز روسازی          | +۳۷٪              | ۰                   | -۱۸٪       | -۲۸٪       |
| حداکثر تنش فشاری بالای خاک بستر  | +۵٪               | ۰                   | -۶،۵٪      | -۱۱٪       |

### مراجع

[4] Huang, Y.H., *Pavement Analysis and Design*, Secend Edition, Upper Saddle River, NJ :pearson/ prentice Hall, 2004.

[۵] سینایی، علی، کاشانی حصار محمد حسین، «دینامیک ذرات»، انتشارات نما، چاپ هشتم، ۱۳۸۴.

[6] Yoder, E.J., Witczak, M.W., *Principles of Pavement Design*, Secend Edition, Wiley-Interscience Publication, 1975.

[1] Hajek, J.J., "General Axle Load Equivalency Factors", Transportation Research Record, No. 1482, 1995.

[2] Chatti, K., Kim, H.B., Yun, K.K., Mahoney, J.P., Monismith, C.L. "Field Investigation into Effects of Vehicle Speed and Tire Pressure on Asphalt Concrete Pavement Strain", Transportation Research Record, No. 1539, 1996.

[3] Nilsson, R.N., Oost, I., Hopman, P.C., "Viscoelastic Analysis of Full-Scale Pavements: Validation of VEROAD", Transportation Research Record, No. 1539, 1996.