

## مقایسه نتایج مدل‌سازی روسازی انعطاف پذیر طراحی شده به دو روش آشتو

### و شل با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS

علی عبدی، دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

محمدرضا بادبانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، بوشهر، ایران

رضا صالح فرد\*، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rsalehfard@yahoo.com

دریافت: ۹۷/۰۳/۲۳ - پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵

صفحه ۳۷۵-۳۸۹

#### چکیده

در این تحقیق طراحی و مدل‌سازی روسازی آسفالتی راه به دو روش AASHTO و SHELL برای شرایط ایران (شرایط محیطی و اقلیمی و نیز ترافیک راههای ایران) بررسی گردید. ورودی های مدل‌سازی شامل مشخصات مکانیکی مصالح روسازی (از قبیل چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب برجهندگی مؤثر بستر، زاویه اصطکاک داخلی و ...)، مشخصات فنی محورهای عبوری از طرح (بارهای وارده بر روسازی) و شرایط جوی و اقلیمی است. همچنین در این پژوهش از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS 6-10 برای مدل‌سازی روسازی آسفالتی استفاده شده است که پس از مقایسه نتایج حاصل از طراحی و مدل‌سازی دو روش، مشخص شد که ضخامت های لایه های روسازی به دست آمده توسط روش AASHTO با توجه به در نظر گرفتن کمتر ضخامت لایه آسفالتی نسبت به روش SHELL از نظر اقتصادی مقرون به صرفه و بهینه است.

واژه‌های کلیدی: طراحی روسازی آسفالتی راه، روسازی های انعطاف پذیر، ABAQUS, SHELL, AASHTO

#### ۱- مقدمه

مکانیک خاک و آزمایش‌های سازگار با مصالح محلی و عملکرد روسازی مانند روش سه‌محوری کانزاس، روش مخروط داکوتای شمالی، روش سه‌محوری تگزاس، روش کارولینای شمالی و روش اولیه انستیتو آسفالت در سال ۱۹۵۴ به کار گرفته شدند. بعد از جنگ جهانی دوم، با افزایش سریع ترافیک بزرگراه‌ها از نظر حجم و وزن محورهای وسایل نقلیه عبوری، روش‌های طراحی قبلی پاسخگو نبودند. با انجام آزمایش صحرائی مریلند (I-MD) در سال ۱۹۵۴ و آزمایش صحرائی واشو بین سالهای ۱۹۵۳ و ۱۹۵۴، زمینه لازم برای انجام آزمایش صحرائی آشو بین سالهای ۱۹۵۸ تا ۱۹۶۰ فراهم گردید [Babazadeh, [Tanzadeh, 2010]

تا حدود نیم قرن پیش، روسازی‌های انعطاف‌پذیر اغلب براساس تجربه و قضاوت مهندسی طرح می‌شدند، بطوریکه تا سال ۱۹۴۲ هیچ مرجعی برای طرح روسازی‌های انعطاف‌پذیر وجود نداشت. نخستین گام اصولی در رابطه با تکنولوژی طرح روسازی‌های انعطاف‌پذیر با معرفی سیستم‌های طبقه بندی خاک (روش‌های کاساگرانده و آشتو) که منجر به تهیه روش‌های طراحی مبتنی بر طبقه بندی خاک‌های بستر مانند نشانه گروه گردید، برداشته شد. در ادامه، روش سی بی آر در سال ۱۹۴۲ براساس نتایج سی بی آر خاک و عملکرد آن و روش ویم براساس آزمایش‌های پایداری و چسبندگی معرفی گردیدند. بین سال‌های ۱۹۴۵ تا ۱۹۶۰ روش‌های مختلف طراحی، مبتنی بر آزمایش‌های

## ۲- پیشینه تحقیق

تحقیقات زیادی برای مقایسه و ارزیابی روش های مختلف طراحی صورت گرفته است. بابازاده در تحقیقی به مقایسه طراحی روسازی آسفالتی به روش آشتو و طراحی به روش مکانیستیک- تجربی با استفاده از برنامه Kenlayer پرداخت. بر اساس نتایج بابازاده، در طرح روسازی تمام آسفالتی به ازای متوسط مدول دینامیکی لایه آسفالتی، اختلاف نتایج دو روش مکانیستیک- تجربی و آشتو ناچیز بوده، افزایش یا کاهش شدید مقادیر این مدول، به واگرایی نتایج دو روش منجر می شود، همچنین، افزایش درصد وسائل نقلیه سنگین عبوری، منجر به همگرایی نتایج حاصل از دو روش طراحی مکانیستیک- تجربی با نرم افزار Kenlayer و روش آشتو ۱۹۹۳ می شود [Babazadeh, 2006]. حسنی و همکاران در سال ۱۳۸۸ در پژوهش خود به بررسی توسعه طراحی روسازی راه به روش آشتو با اعمال پارامتر هزینه پرداختند. در این تحقیق روسازی راه بر طبق روش آشتو ۱۹۹۳ و به گونه ای طراحی شد که مقرون به صرفه تر باشد و در آن گزینه های حمل و نقل مصالح و سایر هزینه های اجرایی نیز در نظر گرفته شده است [Hassani et.al, 2008]. عامری و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی ترک های روسازی آسفالتی تحت بار ترافیک عبوری به وسیله مدلسازی سه بعدی به روش اجزاء محدود پرداختند. بر طبق نتایج اجزاء محدود، در بررسی ترک های روسازی، سه مد شکست ترک ها ممکن است حرکت انتشار را تحت تأثیر قرار بدهند، مد سوم ضریب شدت تنش که در اغلب پژوهش های پیشین کم اهمیت قلمداد می شد، می تواند در تغییر شکل روسازی آسفالتی تحت بار عبوری مهم و تأثیرگذار باشد. همچنین عامل ایجاد ترک و نیز تنش وارده می توانند برای تحلیل مقاومت سطح شکسته و یا عمر مفید باقیمانده روسازی به کار برده شوند که این عوامل باید با یک مقیاس مناسب (مخصوصاً در دماهای زیر صفر یا در شرایط بامای نرمال) مورد استفاده قرار گیرند [Amery et.al, 2011]. مولونگای و همکاران در سال ۲۰۰۶ به بررسی مدلسازی اجزاء محدود از روسازی های انعطاف پذیر بر روی خاک های بستری نرم پرداختند. بر طبق گزارشات این مطالعه، با داشتن مشخصات مصالح روسازی، مدل های اجزاء محدود از روسازی های انعطاف پذیر اجرا شده بر روی زمین

صاف به منظور افزایش دقت پیش بینی پاسخ آسفالت به بارهای وارده از چرخ وسائل نقلیه عبوری می تواند مورد استفاده قرار گیرد. مدل اجزاء محدودی فوق در اندازه گیری میدان درجا در مقایسه با پاسخ پیش بینی شده، نزدیکی خوبی با مقادیر اندازه گیری شده دارد. با این حال، اختلاف مشاهده شده را می توان با در نظر گرفتن اثر غیر یکنواخت فشار تاپر تماس و اثر سرعت و فرکانس بار چرخ به حداقل رساند [Mulungeye et.al, 2006]. مانیوس و اشنايدر در سال ۲۰۰۲ به تحلیل اجزاء محدودی توزیع تنش بر روی روسازی های آسفالتی و مکانیز شکست آنها پرداختند. به طور کلی بیشینه تنش کششی افقی در زیر لایه رویه و بیشینه تنش فشاری عمودی بر روی سطح روسازی رخ می دهد. تنش کششی افقی بطور کلی بر لایه رویه و لایه اساس تأثیر می گذارد. با این حال، تنش کششی افقی در وسط چرخ ها به طور قابل ملاحظه ای نسبت به مسیر چرخ بیشتر است که این ممکن است دلیلی برای انتشار ترک در لایه ها باشد. تأثیر تنش فشاری عمودی (که به طور عمده دلیلی برای شیارشدگی روسازی است) در لایه رویه و اساس است که مقدار این تنش بطور یکسان، لایه های دانه ای را تحت تأثیر قرار نمی دهد [Mateos et.al, 2002]. علیرضا سرکار در سال ۲۰۱۵ با استفاده از روش اجزاء محدود در حالت سه بعدی، با اعمال بارهای محورهای منفرد، تاندم و تریدم و سرعت های مختلف به بررسی پاسخ های روسازی پرداخت. در این تحقیق از دو لایه آسفالتی به ضخامت های ۱۵/۲ و ۲۵/۴ سانتی متر استفاده شد. پاسخ های بررسی شده کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی، کرنش فشاری در بالای بستر و کرنش کششی و فشاری در سطح رویه است. نتایج این تحقیق نشان داد که (۱) کرنش های حاصل از محورهای تریدم از کرنش های حاصل از محورهای تاندم بیش تر یا در سرعت های مختلف برابر هستند. (۲) تغییر روند کرنش ها با سرعت بارگذاری متأثر از ضخامت روسازی است. در کل تأثیر ترکیب های مختلف محورهای بارگذاری متأثر از سرعت بارگذاری و ضخامت لایه رویه است [Sarkar, 2015]. مراد و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از روش اجزاء محدود و به کارگیری نرم افزار ABAQUS به بررسی اثر اصلاحی ژئوگرید استفاده شده در بستر، بر پاسخ های روسازی پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق

دستگاه کامیون سه محور و ۱۵۰ دستگاه کامیون چهارمحور است، در نظر گرفته شده است. همچنین نرخ رشد سالیانه ترافیک برای خودروهای سواری و وانت ۴٪ و برای سایر وسایل نقلیه ۳٪ و ضریب توزیع جهتی (D<sub>D</sub>)، ۵۰٪ و ضریب توزیع خطی (D<sub>L</sub>)، ۹۰٪ فرض گردیده است. البته این ترافیک برای ورود به طراحی باید به شکل ترافیک تعداد محور هم ارز معادل آن (۸/۲) تن در روش AASHTO و ۸۰KN در روش SHELL) تبدیل شود که محاسبه آن در ادامه آورده شده است. عمر طراحی (n)، براساس آئین نامه ایران (نشریه ۲۳۴) ۲۰ سال و نشانه خدمت دهی اولیه ۴/۲ و نشانه خدمت دهی نهایی ۲/۵ در نظر گرفته شده است. در این تحقیق برای سه ترکیب مختلف از مصالح لایه های روسازی، طراحی و مدلسازی عددی انجام می گردد که این ترکیب ها با توجه به نوع بستر و مصالح قابل دسترسی در محل اجرای روسازی و شرایط محیطی استان بوشهر انتخاب شده اند. مشخصات مصالح لایه های روسازی مورد استفاده در سه ترکیب، در جدول ۱ آورده شده است.

### ۲-۳ طراحی به روش AASHTO

در این روش، طراحی روسازی آسفالتی بر طبق ویرایش سال ۱۹۹۳ انجام می گردد [AASHTO Guide, 1993]. با در نظر گرفتن مقادیر ضریب رشد سالیانه ۴٪ (برای خودروهای سواری و وانت) و ۳٪ (برای سایر وسایل نقلیه) و ۲۰ سال برای عمر طرح، میزان رشد ترافیک (G) برای وسایل نقلیه فوق، به ترتیب ۲۹/۷۸ و ۲۶/۸۷ حاصل می گردد. با محاسبه ترافیک عبوری و وزن محورهای وسایل نقلیه گذرنده از روسازی و تبدیل آن به تعداد محور هم ارز ۸/۲ تن با توجه به نشریه ۲۳۴ که مبتنی بر روش آشتو است، بار محوری هم ارز استاندارد (W<sub>8.2</sub>) برابر با ۱۴۲۵۹۸۶۱ به دست می آید. محاسبه این بار به روش AASHTO به صورت جدول ۲ می باشد.

نشان داد که ژئوگرید باعث کاهش کرنش جانبی در لایه های اساس و بستر، کرنش قائم و برشی در بالای بستر و همچنین تغییر شکل در بالای سطح رویه می شود [Murad Y et.al, 2014].  
[et.al, 2014] گاجوفسکی و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی گسترش ترک های روسازی با توجه به ضخامت های لایه های روسازی پرداختند. در این تحقیق از روش اجزای محدود و برنامه ABAQUS و همچنین روش شبکه عصبی استفاده شد. دو نوع روسازی با مدول های الاستیسیته های متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند که روسازی شماره ۱ دارای لایه های با مدول الاستیسیته بیش تر است. نتایج این تحقیق نشان داد با کاهش ضخامت لایه آسفالتی در روسازی شماره ۲، ترک خوردگی به طور قابل توجهی افزایش می یابد. همچنین ضخامت لایه آسفالتی در روسازی شماره ۱ تاثیر چندانی بر روی ترک خوردگی در لایه بستر ندارد [Gajewski et.al, 2014]. مونیاندی و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش مکانیستیک تجربی و به کارگیری دو نرم افزار KENLAYER و CHEVRON به مقایسه عملکرد روسازی انعطاف پذیر پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که عمر روسازی پیش بینی شده با نرم افزار CHEVRON بیش تر عمر روسازی پیش بینی شده توسط برنامه KENLAYER است [Muniandy et al, 2013].

### ۳- طراحی روسازی به روش AASHTO

#### SHELL

#### ۳-۱- ورودی های طراحی

طراحی روسازی به روش آئین نامه های آشتو و شل برای ترافیک تعداد ۵۰۰۰ وسیله نقلیه در روز که شامل ۳۰۰۰ دستگاه خودروی سواری، ۵۰۰ دستگاه وانت، ۲۵۰ دستگاه مینی بوس، ۲۵۰ دستگاه اتوبوس، ۴۰۰ دستگاه کامیون دومحور سبک، ۳۰۰ دستگاه کامیون دومحور سنگین، ۱۵۰

جدول ۱. مشخصات مصالح لایه های روسازی

ترکیب	لایه	مدول الاستیسیته کیلوگرم بر سانتی متر مربع	وزن مخصوص (kN/m <sup>3</sup> )	ضریب زهکشی (متر)	ضریب قشر لایه (a)	CBR
ترکیب اول	آسفالت	۳۱۵۰۰	۲۲/۸	-	۰/۴۴	-
	اساس	۱۹۶۰	۱۹/۶	۱/۱	۰/۱۳	۸۰
	زیراساس	۱۰۵۰	۱۷/۳	۰/۹	۰/۱۱	۳۰
ترکیب دوم	آسفالت	۲۸۰۰۰	۲۲/۴	-	۰/۴۲	-
	اساس	۲۱۰۰	۱۹/۸۵	۱/۱۵	۰/۱۴	۸۵
	زیراساس	۱۱۰۰	۱۷/۶	۰/۹۵	۰/۱۲	۳۵
ترکیب سوم	آسفالت	۲۴۵۰۰	۲۱/۹۵	-	۰/۴۰	-
	اساس	۲۴۵۰	۱۹/۳	۱/۲	۰/۱۵	۹۰
	زیراساس	۱۴۰۰	۱۸/۲۵	۱	۰/۱۳	۵۰

جدول ۲. محاسبه وزن محورهای وسایل نقلیه عبوری از طرح

وزن کل (تن)	محور عقب		محور وسط		محور جلو		تعداد محور	نوع وسیله نقلیه
	وزن (تن)	نوع	وزن (تن)	نوع	وزن (تن)	نوع		
۲	۱	ساده	-	-	۱	ساده	۲	سواری
۳	۲	ساده	-	-	۱	ساده	۲	وانت
۶	۳	ساده	-	-	۳	ساده	۲	مینی بوس
۹	۶	ساده	-	-	۳	ساده	۲	اتوبوس
۱۵	۹	ساده	-	-	۶	ساده	۲	کامیون دو محور سبک
۱۹	۱۳	ساده	-	-	۶	ساده	۲	کامیون دو محور سنگین
۲۶	۲۰	مرکب	-	-	۶	ساده	۳	کامیون سه محور
۳۶	۱۰ + ۱۰	ساده	۱۰	ساده	۶	ساده	۴	تریلی چهار محور
۳۲	۱۶	مرکب	۱۰	ساده				
۴۰	۱۸	مرکب	۱۶	مرکب	۶	ساده	۵	تریلی پنج محور
۴۰	۲۴	مرکب	۱۰	ساده	۶	ساده	۵	تریلی پنج محور

(شامل بار محوری هم ارز استاندارد ۸۰KN ، متوسط دمای وزنی سالیانه، مقدار CBR بستر و لایه های اساس و زیراساس، تعیین ضریب ارتجاعی بستر و انتخاب نوع مخلوط آسفالتی)، طراحی با استفاده از دیاگرام های تعیین کننده ضخامت انجام می‌گیرد [Tabatabae, 2014].

### ۳-۳-۱- انتخاب نوع مخلوط آسفالتی و تعیین ضخامت لایه‌ها

چون دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بیانگر آب و هوای نسبتاً گرم است، لذا مخلوط آسفالتی در اینگونه آب و هوا بهتر است از نوع مخلوط حاوی قیر سفت‌تر و با سختی بالاتر و دارای خصوصیات خستگی بهتر باشد. بنابراین مخلوط‌های آسفالتی از انواعی انتخاب می‌گردد که کدهای S<sub>1</sub>-F<sub>1</sub>-50، S<sub>2</sub>-F<sub>1</sub>-100 و S<sub>1</sub>-F<sub>1</sub>-100 را تأمین کند. حال با توجه به داده‌های طراحی فوق، از دیاگرام‌های HN-49، HN-51 و HN-53 برای تعیین ضخامت لایه‌های آسفالتی، اساس و زیراساس استفاده می‌شود [Huang, Y.H, 2004]. با استفاده از روش شل، برای سه ترکیب روسازی، ضخامت‌های درج شده در جدول ۴ نشان داده شده است.

تأثیرات محیطی شامل تورم و یخ زدگی بستر می‌باشد که بصورت کاهش نشانه خدمت‌دهی در طراحی روسازی لحاظ می‌گردد [Kavussi, 2004]. با داشتن مقادیر ورودی میزان کاهش قابلیت سرویس‌دهی روسازی ناشی از تورم و یخبندان محاسبه می‌شود. که میزان کاهش قابلیت سرویس‌دهی روسازی ناشی از تورم و یخبندان به ترتیب مقادیر ۰/۵ و ۰/۳ و در نهایت میزان کاهش قابلیت سرویس‌دهی کل بدست می‌آید. بستر انتخاب شده از نوع تثبیت نشده است که مدول ارتجاعی مؤثر آن با توجه به متوسط خرابی‌های نسبی (U<sub>f</sub>)، ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مربع است.

### ۳-۲-۱- تعیین ضخامت لایه‌های روسازی

با استفاده از پارامترهای به دست آمده و معادلات موجود ضخامت لایه‌ها به روش اشتو برای برای سه ترکیب روسازی، به دست آمد. جدول ۳ نشان دهنده‌ی ضخامت لایه‌های محاسبه شده است.

### ۳-۳- طراحی روسازی به روش SHELL

در این روش پس از مشخص شدن پارامترهای مورد نیاز

جدول ۳. ضخامت لایه های روسازی حاصل از طراحی

ترکیب	نوع لایه	مدول الاستیسیته کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع	عدد ضخامت روسازی (SN)	ضخامت لایه (سانتی‌متر)
ترکیب اول	آسفالت	۳۱۵۰۰	۵/۷۵	۱۵
	اساس	۱۹۶۰	۳/۲۵	۲۵
	زیراساس	۱۰۵۰	۴/۱۵	۳۵
ترکیب دوم	آسفالت	۲۸۰۰۰	۵/۸	۱۶
	اساس	۲۱۰۰	۳/۱۵	۲۴
	زیراساس	۱۱۰۰	۴	۳۵
ترکیب سوم	آسفالت	۲۴۵۰۰	۵/۷	۱۹
	اساس	۲۴۵۰	۳	۲۱
	زیراساس	۱۴۰۰	۳/۶	۳۰

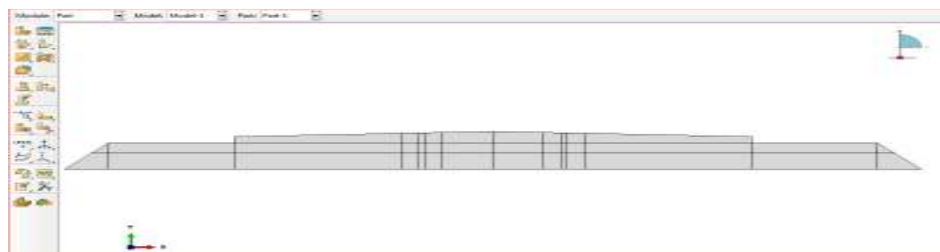
جدول ۴. ضخامت لایه‌های روسازی در روش شل

ضخامت لایه (cm)	مدول الاستیسیته (kg/cm <sup>2</sup> )	لایه	چارت	نوع مخلوط آسفالتی	ترکیب
۲۱	۳۱۵۰۰	آسفالت	HN-49	S <sub>1</sub> -F <sub>1</sub> -50	ترکیب اول
۲۳	۱۹۶۰	اساس			
۲۷	۱۰۵۰	زیراساس			
۲۵	۲۸۰۰۰	آسفالت	HN-51	S <sub>2</sub> -F <sub>1</sub> -50	ترکیب دوم
۱۹	۲۱۰۰	اساس			
۳۱	۱۱۰۰	زیراساس			
۲۶	۲۴۵۰۰	آسفالت	HN-53	S <sub>1</sub> -F <sub>1</sub> -100	ترکیب سوم
۲۱	۲۴۵۰	اساس			
۲۹	۱۴۰۰	زیراساس			

#### ۴- مدل‌سازی روسازی آسفالتی

در این پژوهش جهت مدل‌سازی روسازی راه از نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. عرض مسیر برابر ۱۱ متر است که شامل ۷/۳ متر لایه آسفالتی (دو بانده ۳/۶۵ متری) و دو شانه‌ی خاکی (هر کدام به عرض ۱/۸۵ متر) انتخاب و شیب عرضی لایه رویه برابر ۲٪ در نظر گرفته شده است. همچنین شیب خاکریز در دو طرف روسازی با نسبت ۲ به ۱ (عرض به ارتفاع) لحاظ می‌گردد. بار محوری و سائل نقلیه عبوری از روسازی به عنوان منبع ایجاد نیرو در نظر گرفته می‌شود و اثر این محورها بر روی روسازی بررسی می‌شود. در شکل ۱ مدل روسازی ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. وزن محورها و سائل نقلیه گذرنده از طرح روسازی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند، ۱۰، ۲۰، ۳۰،

۴۰، ۶۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ کیلونیوتن می‌باشد. در این مدل‌سازی، فرض شده که لغزش در بین لایه‌های روسازی، صفر است و این لایه‌ها با یکدیگر اصطکاک کامل دارند. مدل‌سازی روسازی برای هر سه ترکیب روسازی‌های طراحی شده توسط روش آشتو و شل انجام شده و اثر همه محوره‌ای و سائل نقلیه عبوری از روسازی (که در طراحی روسازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند) بر این روسازی‌ها بررسی می‌شود و خروجی‌های مدل‌سازی که شامل تغییر مکان‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های فشاری و کششی می‌باشد، تعیین می‌گردد. در جدول ۵، مشخصات مصالح لایه‌های روسازی جهت مدل‌سازی روسازی آسفالتی آورده شده است.



شکل ۱. مدل‌سازی روسازی طراحی شده به روش آشتو با نرم‌افزار آباکوس

جدول ۵. مشخصات مصالح لایه‌های روسازی جهت مدل‌سازی

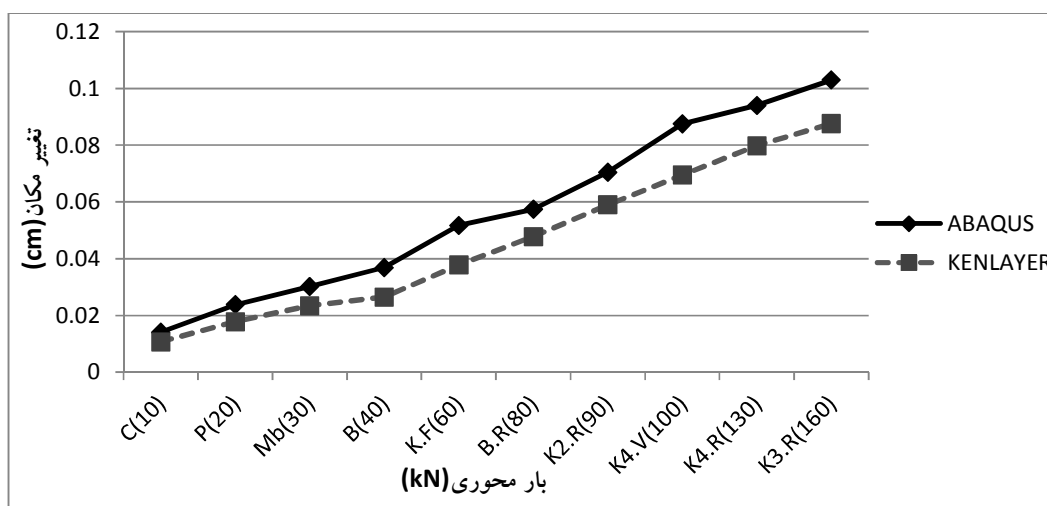
ترکیب	لایه	مدول الاستیسیته (kg/cm <sup>2</sup> )	وزن مخصوص (kN/m <sup>3</sup> )	Friction Coeff.	φ
ترکیب اول	آسفالت	۳۱۵۰۰	۲۲/۸	-	-
	اساس	۱۹۶۰	۱۹/۶	۰/۵۰۸۲۹	۴۲
	زیراساس	۱۰۵۰	۱۷/۳	۰/۴۱۶۵۸	۳۴
ترکیب دوم	آسفالت	۲۸۰۰۰	۲۲/۴	-	-
	اساس	۲۱۰۰	۱۹/۸۵	۰/۵۲۰۵۸	۴۴
	زیراساس	۱۱۰۰	۱۷/۶	۰/۴۲۹۷۱	۳۶
ترکیب سوم	آسفالت	۲۴۵۰۰	۲۱/۹۵	-	-
	اساس	۲۴۵۰	۱۹/۳	۰/۴۸۴۳۶	۴۰
	زیراساس	۱۴۰۰	۱۸/۲۵	۰/۴۵۹۷	۳۸

همچنین چسبندگی، ضریب پواسون و زاویه اتساع خاک در همه مدل‌سازی‌ها (البته فقط در لایه‌های اساس و زیراساس) ثابت و بترتیب ۵ کیلوپاسکال، ۰/۵ و صفر درجه در نظر گرفته شده است.

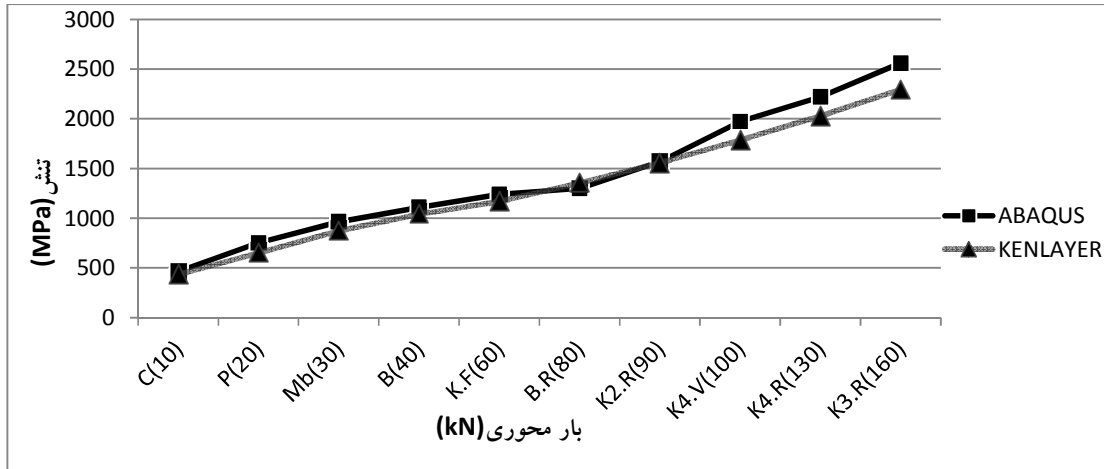
نیز از مدل مشابه دو بعدی در نرم افزار آباکوس و Kenlayer استفاده شده و خروجی نیروها با یکدیگر مقایسه شده است. در این مقایسه، از مصالح و ضخامت‌های اولین ترکیب روسازی که با روش آشتو طراحی شد (شامل ضخامت‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی‌متر برای لایه‌های آسفالت، اساس و زیراساس است)، استفاده می‌شود که نتایج مقایسه خروجی‌های دو نرم‌افزار در شکل‌های ۲ تا ۴ آمده است.

#### ۴-۱- صحت سنجی مدل‌سازی روسازی آسفالتی

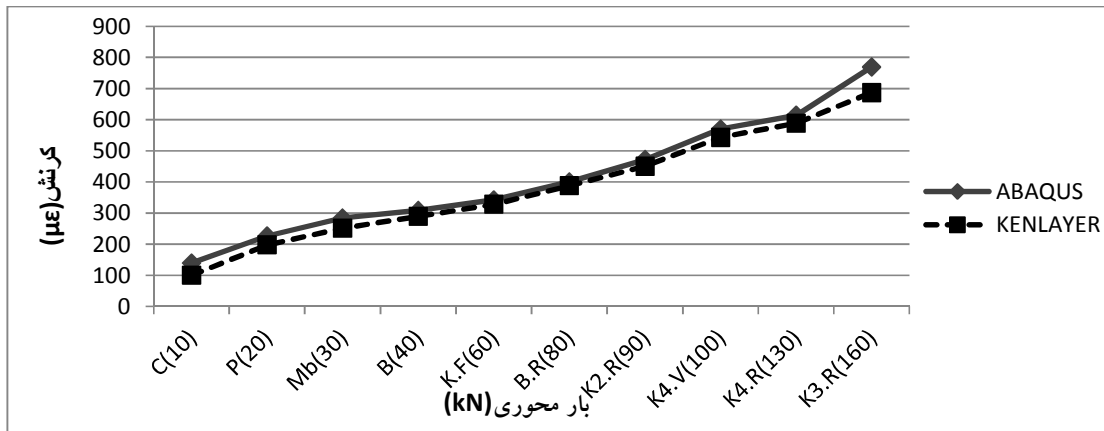
همانگونه که در طراحی روسازی از نرم افزار Kenlayer جهت صحت سنجی نتایج طراحی استفاده گردید، در اینجا



شکل ۲. نمودار مقایسه تغییر مکان لایه آسفالتی در نرم افزار آباکوس و Kenlayer



شکل ۳. نمودار مقایسه تنش کششی در زیر لایه آسفالتی در نرم افزار آباکوس و Kenlayer



شکل ۴. نمودار مقایسه کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی در نرم افزار آباکوس و Kenlayer

درون پراتنز، مقدار بار آن (بر حسب کیلونیوتن) است. در جدول ۶ مقادیر اختلاف پاسخ‌های روسازی در مدل‌سازی با نرم‌افزارهای آباکوس و Kenlayer آورده شده است که کمترین مقادیر اختلاف تغییر مکان و تنش کششی مربوط به محور خودرو سواری و بیشترین (بدترین حالت) آن مربوط به محور عقب کامیون سه محور است. همچنین کمترین مقدار اختلاف کرنش کششی مربوط به محور عقب کامیون چهار محور و بیشترین آن مربوط به محور وانت می باشد.

که در این نمودارها، محور افقی، بار وارده از وسایل نقلیه عبوری از روسازی است که در آن، C، بار وارده از خودروی سواری، P، وانت، Mb، مینی بوس، B، محور جلو اتوبوس (منفرد تک چرخ)، K.F، محور جلو کامیون دو محوره (تک چرخ)، B.R، محور عقب اتوبوس (منفرد جفت چرخ)، K2.R، محور عقب کامیون دو محوره (محور منفرد جفت چرخ)، K4.V، محور وسط کامیون چهار محوره (محور منفرد جفت چرخ)، K4.R، محور عقب کامیون چهار محوره (محور مرکب دارای ۸ چرخ)، K3.R، محور عقب کامیون سه محوره (محور مرکب دارای ۸ چرخ) و عبارت



جدول ۶. مقادیر اختلاف پاسخ‌های روسازی در مدل‌سازی با نرم‌افزارهای آباکوس و Kenlayer

پاسخ روسازی	کمیته تغییرات (%)	بیشینه تغییرات (%)	میانگین تغییرات (%)
تغییر مکان لایه آسفالتی	۱۴	۲۱	۱۶
تنش کششی زیر لایه آسفالتی	۳	۹	۵
کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی	۴	۱۲	۹

دلیل اختلاف در مقادیر تغییر مکان دو نرم‌افزار مربوط به نحوه مدل‌سازی و توانایی نرم‌افزار آباکوس در مدل‌سازی با استفاده از روش اجزاء محدود است که این بواسطه مش بندی بسیار دقیق در این نرم‌افزار است. با توجه به نمودار شکل‌های ۲ تا ۴ به وضوح دیده می‌شود که نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس بخوبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی روسازی در نرم‌افزار Kenlayer سازگاری دارد.

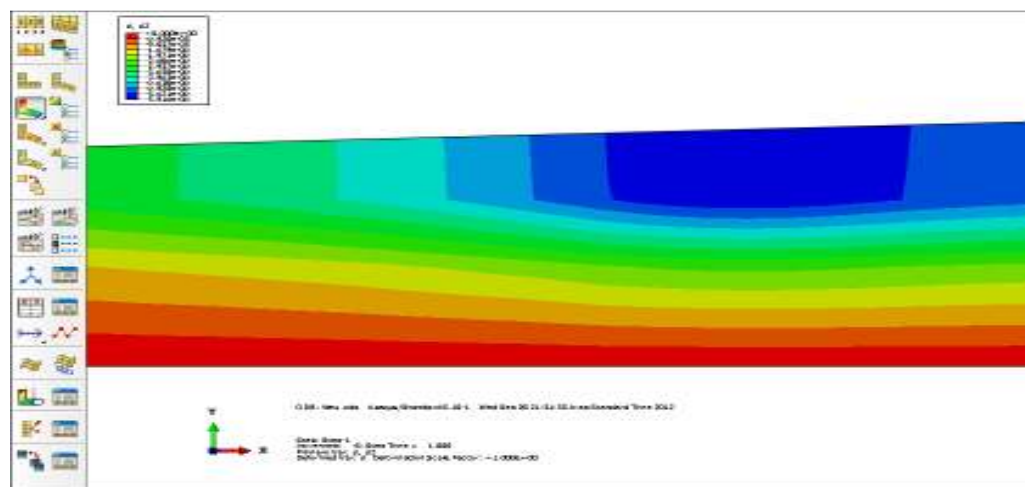
ی آسفالتی طراحی شده به روش آشتو و شل مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی بیشینه تنش کششی افقی در زیر لایه رویه و بیشینه تنش فشاری عمودی بر روی سطح روسازی رخ می‌دهد. همچنین حداکثر تغییر مکان، در زیر لایه رویه و حداکثر تنش و کرنش فشاری بر روی بستر می‌باشد. در ادامه مقادیر تغییر مکان، تنش‌ها و کرنش‌های کششی و فشاری برای روسازی‌های آسفالتی طراحی شده در دو روش آشتو و شل آورده شده است.

## ۵- بررسی نتایج

پس از انجام مدل‌سازی روسازی آسفالتی در نرم‌افزار آباکوس، خروجی‌های این مدل‌سازی تحت اثر بارهای وارده تعیین و با یکدیگر مقایسه می‌گردد که این خروجی‌ها شامل تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر مکان‌ها می‌باشد. در این قسمت خروجی‌های حاصل از مدل‌سازی ترکیب‌های روساز

## ۵-۱- مقادیر تغییر مکان لایه آسفالتی

شکل ۵ نشان دهنده حداکثر تغییر مکان لایه آسفالتی تحت اثر بار محوری گذرنده از روسازی است. شکل ۶ تغییر مکان لایه آسفالتی را در سه ترکیب روسازی‌های طراحی شده به روش آشتو و شل تحت اثر بار عبوری نشان می‌دهد.



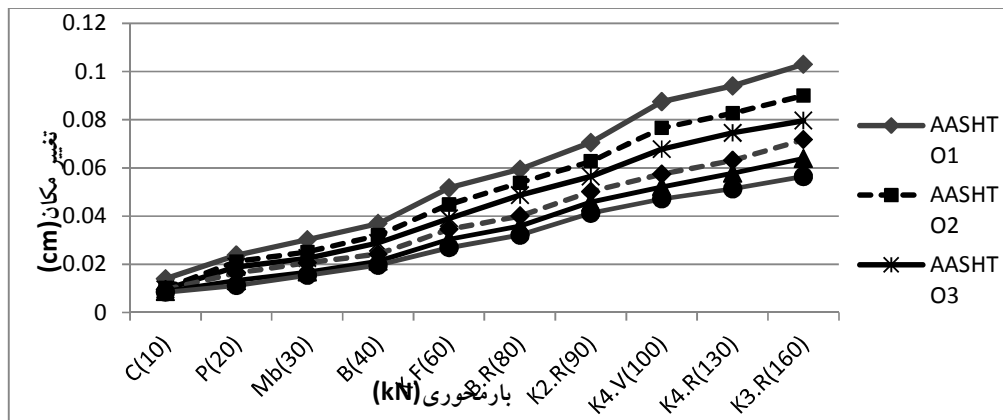
شکل ۵. حداکثر تغییر مکان لایه آسفالتی در روسازی طراحی شده به روش آشتو با نرم‌افزار آباکوس

AASHTO1، AASHTO2، AASHTO3، SHELL1، SHELL2 و SHELL3، ترکیب‌های اول تا

در این نمودار، تغییر مکان روسازی‌های طراحی شده توسط آئین‌نامه‌های آشتو و شل بررسی شده که در آن مقصود از

وسائل نقلیه از روسازی به میزان ۱۷٪ کاهش می یابد و چنانچه مقادیر تغییر مکان ترکیب اول و ترکیب سوم روسازی مورد مقایسه قرار گیرد، مقدار این تغییرات، ۳۰٪ خواهد بود، در حالیکه مقادیر این تغییرات در روش شل بترتیب ۱۴٪ و ۲۶٪ خواهد بود که نشان می دهد طراحی روسازی به روش آئین نامه آشتو کاهش بیشتری در میزان تغییر مکان عمودی روسازی دارد. همچنین روش آشتو نسبت به روش شل حساسیت بیشتری به تغییر در مدول الاستیسیته ترکیب های روسازی دارد که در جدول ۷ نشان داده شده است. تغییر مکان عمودی روسازی از عوامل مؤثر در بروز انواع خرابی روسازی از قبیل ترک خوردگی، اعوجاج و شیار شدگی است و نتایج تحلیل های فوق نشان می دهد که آئین نامه آشتو جهت طراحی روسازی روش بهینه ای را نسبت به روش کمپانی شل ارائه می دهد.

سوم روسازی های طراحی شده توسط آئین نامه های آشتو و شل هستند. همچنین محور قائم این نمودارها، مربوط به تغییر مکان (برحسب سانتی متر) و محور افقی، مربوط به بار وارده از وسائل نقلیه عبوری (بر حسب کیلونیوتن) می باشد. تغییر روش آئین نامه طراحی روسازی از آنجا که منجر به در نظر گرفتن ضخامت های متفاوتی می گردد، مقادیر متفاوتی از پاسخ های روسازی نیز بدست می آید. همچنین تغییر مشخصات مصالح (در طراحی به روش هر کدام از دو آئین نامه فوق) نیز همین موضوع را تصدیق می کند. با مشاهده نمودارهای تغییر مکان در روش آشتو و روش شل، اختلافی در مقادیر تغییر مکان زیر لایه آسفالتی دیده می شود (که ناشی از همان تغییر ضخامت لایه ها در طراحی دو روش است). در روش آشتو چنانچه مقادیر تغییر مکان ترکیب اول و ترکیب دوم روسازی مورد مقایسه قرار گیرد، مشاهده می شود که مقادیر تغییر مکان حاصل از عبور محورهای



شکل ۶. مقایسه مقادیر تغییر مکان لایه آسفالتی در سه ترکیب روسازی آسفالتی طراحی روش آشتو و کمپانی شل

جدول ۷. حساسیت تغییر مکان ترکیب های روسازی به مدول الاستیسیته لایه ها

ترکیب اول و دوم آشتو	ترکیب اول و سوم آشتو	ترکیب اول و دوم شل	ترکیب اول و سوم شل	
۱۳	۲۶	۱۰	۲۳	کمینه تغییرات (%)
۲۰	۳۳	۱۹	۲۹	بیشینه تغییرات (%)
۱۷	۳۰	۱۴	۲۶	میانگین تغییرات (%)

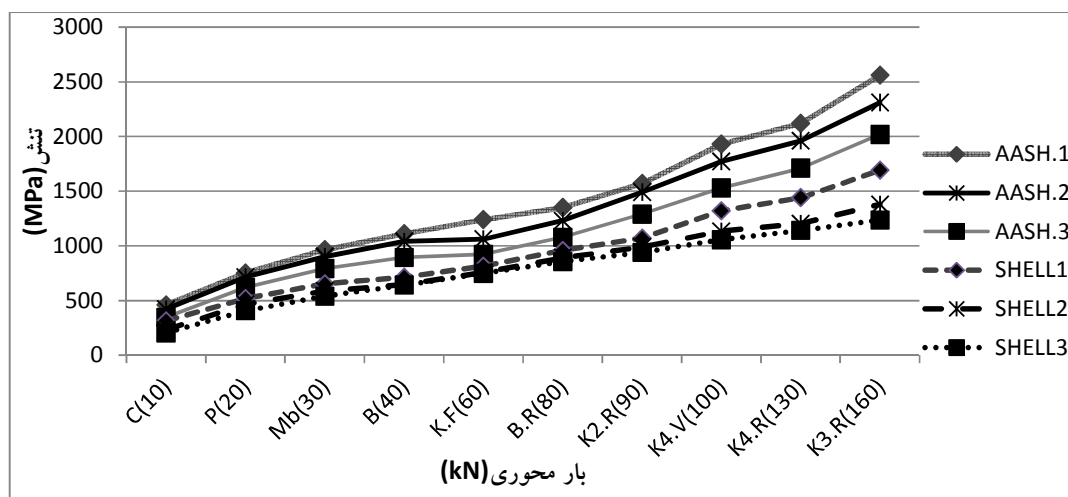
روسازی های طراحی شده به روش آشتو و شل تحت اثر بار نشان داده شده است. از بررسی نمودار شکل ۷ این مطلب

۲-۵- مقادیر تنش کششی افقی زیر لایه آسفالتی  
شکل ۷ تنش کششی زیر لایه آسفالتی در سه ترکیب

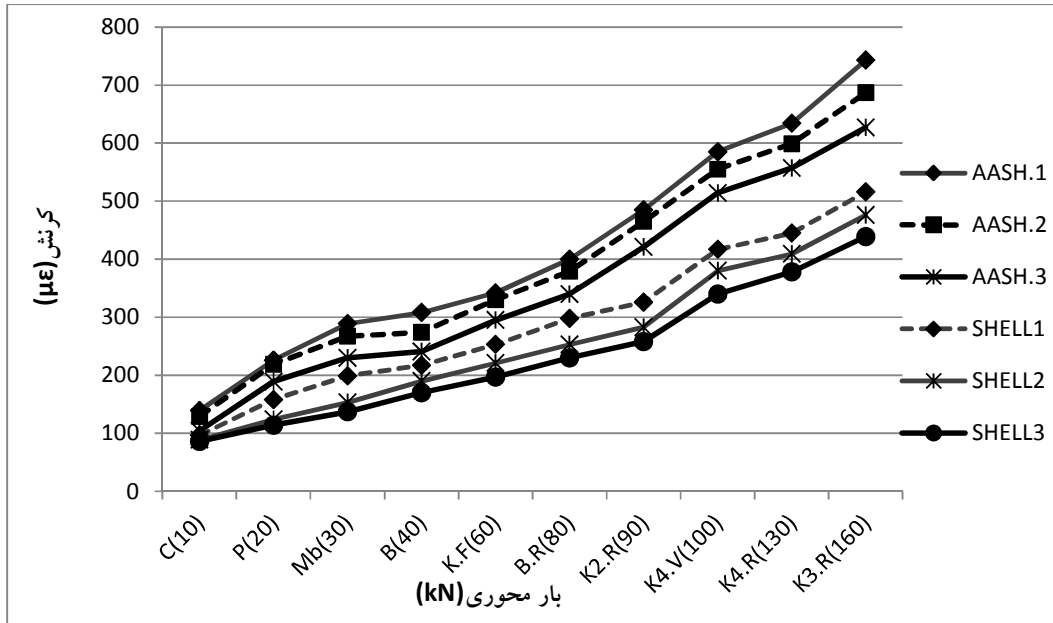
### ۳-۵- مقادیر کرنش کششی افقی زیر لایه آسفالتی

شکل ۸ مقادیر کرنش کششی افقی زیر لایه آسفالتی برای روسازی های طراحی شده در روش آشتو و شل را نشان می دهد. ترک های پوست سوسماری که به علت تناوب سیکل بارگذاری و خستگی روسازی راه می باشد، ناشی از کرنش کششی ایجاد شده در زیر لایه آسفالتی است. چنانچه مقادیر کرنش کششی در ترکیب های اول و دوم روسازی طراحی شده به روش آئین نامه آشتو مورد مقایسه قرار گیرد، میزان تغییرات سطح کرنش کششی، ۷٪ کاهش خواهد داشت و اگر مقادیر کرنش در ترکیب های اول و سوم روسازی مورد مقایسه قرار گیرد، این مقادیر، ۲۰٪ کاهش خواهد داشت، در صورتیکه در روش شل، مقدار این تغییرات برای ترکیب اول و دوم، ۱۵٪ و برای ترکیب اول و سوم، ۲۶٪ خواهد بود که این مطلب نشان می دهد که وابستگی کرنش کششی افقی زیر لایه آسفالتی به مدول الاستیسیته در روش آشتو کمتر از روش شل است.

استنباط می شود که در محورهای منفرد، تغییر در مقادیر مدول الاستیسیته، تأثیری روی مقادیر تنش کششی در ترکیب های مختلف روسازی های طراحی شده توسط روش آشتو و شل ندارد، ولی این تغییر در محوهای مرکب تأثیرگذار است، بطوری که اگر مقادیر تنش در ترکیب های اول و سوم روسازی مورد مقایسه قرار گیرد، میزان تغییرات سطح تنش کششی، ۸٪ کاهش و اگر مقادیر تنش در ترکیب های اول و سوم روسازی مورد مقایسه قرار گیرد، این مقادیر، ۲۲٪ کاهش خواهد داشت، در صورتی که در روش شل، مقدار این تغییرات برای ترکیب اول و دوم، ۱۵٪ و برای ترکیب اول و سوم، ۲۴٪ خواهد بود. مطابق شکل ۷ حداکثر این اختلاف مربوط به محورهای عقب کامیون چهار محور ((K4.R(130)) و سه محور ((K3.R(160)) است، که نشان می دهد در محورهای مرکب وابستگی تنش کششی زیر لایه آسفالتی به مدول الاستیسیته در روش آشتو کمتر از روش شل می باشد.



شکل ۷. مقایسه مقادیر تنش کششی لایه آسفالتی در سه ترکیب روسازی آسفالتی طراحی بروش آشتو و کمپانی شل



شکل ۸. مقایسه مقادیر کرنش کششی لایه آسفالتی در سه ترکیب روسازی آسفالتی طراحی به روش آشتو و کمپانی شل

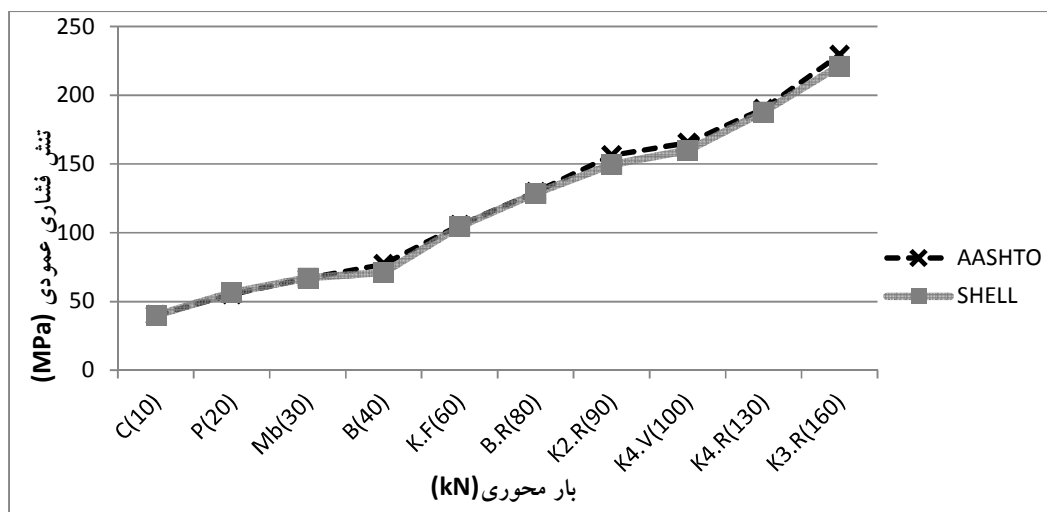
جدول ۸. حساسیت کرنش کششی ترکیب های روسازی به مدول الاستیسیته لایه ها

ترکیب اول و دوم شل	ترکیب اول و سوم آشتو	ترکیب اول و دوم شل	ترکیب اول و دوم آشتو	کمیته تغییرات (%)
۴	۱۵	۹	۱۸	۱۵
۱۲	۲۸	۲۵	۳۴	۲۸
۷	۲۰	۱۵	۲۶	۲۰

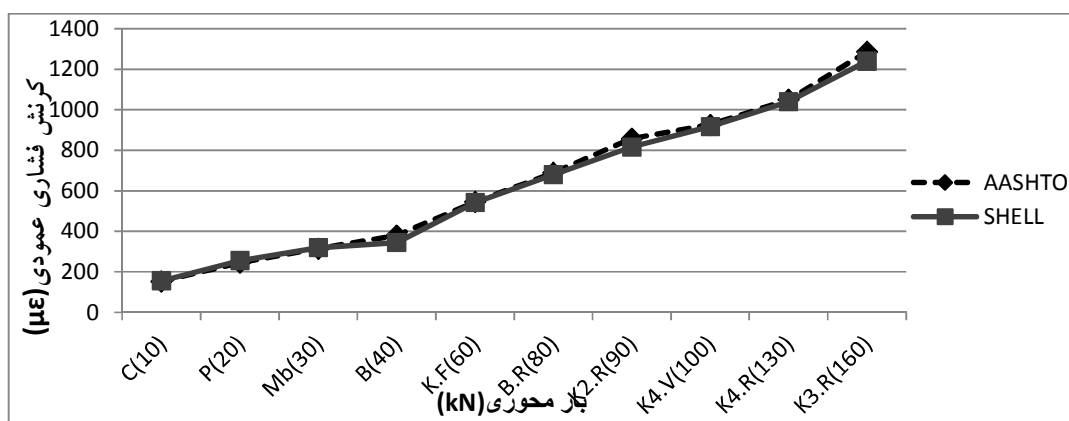
#### ۵-۴- مقادیر تنش و کرنش عمودی فشاری روی بستر

مقادیر تنش و کرنش عمودی فشاری روی بستر روسازی برای روش های آئین نامه آشتو و کمپانی شل در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده اند. در این نمودارها، مقادیر تنش و کرنش عمودی فشاری بر روی ترکیب اول روسازی طراحی شده توسط آئین نامه آشتو نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها به وضوح دیده می شود که تنش ها و کرنش های فشاری حاصل از بارهای محوری عبوری در دو روش با یکدیگر برابرند، بطوریکه اختلاف مقادیر تنش و کرنش فشاری عمودی در دو روش آشتو و شل در نمودار شکل های ۹ و ۱۰ کمتر از ۲٪ است که بحرانی ترین حالت آن در محورهای عقب کامیون دو محور (K2.R(90)) و سه

محور (K3.R(160)) اتفاق می افتد. این نزدیکی زیاد نتایج دو روش به یکدیگر در ترکیب های دیگر نیز وجود دارد. کرنش عمودی ایجاد شده در بالای بستر می تواند باعث بروز شیار شدگی و خرابی سطح روسازی گردد. هدف از ایجاد روسازی راه، کاهش تنش های وارده از بارهای محوری عبوری و تبدیل آن به مقادیر قابل تحمل برای خاک بستر می باشد که با این اصل، برابری مقادیر تنش و کرنش فشاری در روسازی های طراحی شده توسط دو روش قابل قبول بوده و در واقع دلیلی بر صحت نحوه مدلسازی و خروجی های آن می باشد.



شکل ۹. تنش عمودی فشاری روی بستر در روسازی آسفالتی طراحی شده به روش آشتو و شل



شکل ۱۰. کرنش عمودی فشاری روی بستر در روسازی آسفالتی طراحی شده به روش آشتو و شل

## ۶- نتیجه گیری

که این کاهش ضخامت در لایه‌های غیر آسفالتی شامل لایه‌های اساس و زیراساس جبران می‌شود) و نیز با در نظر گرفتن قیمت بالای آسفالت در مقایسه با مصالح غیر آسفالتی، می‌توان گفت استفاده از روش آشتو برای طراحی روسازی آسفالتی راه نسبت به روش شل مقرون به صرفه است، کما اینکه به وسیله مدلسازی روسازی‌های طراحی شده با هر دو روش و مقایسه اثر محورهای عبوری از آنها، مشخص گردید که افزایش ضخامت لایه آسفالتی اثر چندانی بر کاهش پارامترهای تاثیرگذار بر خرابی‌های روسازی ندارد و در برخی موارد (تغییر مکان عمودی زیر لایه آسفالتی)، روش آشتو نسبت به روش شل عملکرد بهتری را ارائه

۱- پس از انجام طراحی روسازی آسفالتی با روش‌های آشتو و شل (برای ترکیب‌های متفاوتی از مصالح لایه‌های تشکیل دهنده) و تعیین ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده روسازی (آسفالت، اساس و زیراساس)، مشخص شد که روسازی‌های طراحی شده به وسیله روش آشتو نسبت به روش شل دارای ضخامت‌های کمتری در لایه آسفالتی (در حدود ۴۰٪ کمتر از روش شل) می‌باشد، ولی در لایه‌های اساس و زیراساس دارای ضخامت‌های بیشتری نسبت به روش شل (۱۲٪ برای لایه اساس و ۱۵٪ برای لایه زیراساس بیشتر از روش شل) می‌باشد. با توجه به این که در طراحی آشتو ضخامت آسفالتی کم تر از ضخامت در طراحی شل است

مشخص شد که وابستگی کرنش کششی زیر لایه آسفالتی به مدول الاستیسیته در روش آشتو کمتر از روش شل (در حدود ۴۰٪ کمتر از روش شل) می باشد.

۵- پس از انجام مدلسازی روسازی و تحلیل نتایج، مشخص گردید که تنش ها و کرنش های عمودی فشاری وارد بر بستر روسازی در هر دو روش بسیار نزدیک (در حدود ۲٪ اختلاف بین نتایج دو روش) و در حد تحمل خاک بستر روسازی در نظر گرفته شده می باشد که این خود دلیلی بر تصدیق روش های طراحی روسازی آشتو و شل می باشد.

#### ۷- پی نوشت ها

1. CBR Method
2. Hveem Method
3. The Kansas Trixie Method
4. North Dakota Cone Method
5. Texas Triaxial Method
6. North Carolina Method
7. Asphalt Institute Method
8. Mulungye
9. Mateos
10. Snyder

دانشگاهی.

- کاووسی، الف.، خدایی، ع. (۱۳۸۴) "روش های پیشرفته طراحی روسازی راه"، دانشگاه بین المللی امام خمینی، چاپ دوم.

-AASHTO Guide for design of Pavement Structure, (1993), "American Association of State Highway and Transportation Officials", Washington, D.C., USA.

-Amery, M., Mansoorian A. (2011), "Cracked Asphalt Pavement under Traffic Loading-A3D Finite Element Analysis", Tehran Transportation Research Institute.

می دهد.

۲- از بررسی تغییر جنس مصالح روسازی آسفالتی که منجر به طراحی روسازی هایی با ضخامت های متفاوت می شود، مشخص گردید که وابستگی تغییر مکان لایه آسفالتی به مدول الاستیسیته در روش آشتو بیشتر از روش شل (در حدود ۱۷٪ بیشتر از روش شل) می باشد.

۳- از بررسی تغییر جنس مصالح روسازی آسفالتی که منجر به طراحی روسازی هایی با ضخامت های متفاوت می شود، مشخص گردید که در محورهای منفرد، تغییر مدول الاستیسیته تأثیری در مقادیر تنش کششی ایجاد نمی کند ولی در محورهای مرکب وابستگی تنش کششی زیر لایه آسفالتی به مدول الاستیسیته در روش آشتو کمتر از روش شل (در حدود ۳۰٪ کمتر از روش شل) می باشد.

۴- از بررسی تغییر جنس مصالح روسازی آسفالتی که منجر به طراحی روسازی هایی با ضخامت های متفاوت می شود،

#### ۸- مراجع

-بابازاده، ع.، (۱۳۸۶)، "تحلیلی بر طراحی روسازی آسفالتی بر پایه خواص مکانیکی مواد و مقایسه آن با روش های رایج طراحی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

-تن زاده، ج.، (۱۳۹۰)، "طراحی ساختار روسازی راه"، انتشارات صناعی شهیرزادی، چاپ اول.

-حسنی، الف.، اسمعیلی، الف.، (۱۳۸۸)، "توسعه طراحی روسازی راه به روش آشتو با اعمال پارامتر هزینه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

-"دفتر امور فنی و تدوین معیارها"، (۱۳۹۰)، "آئین نامه طراحی روسازی راه های ایران"، نشریه شماره ۲۳۴، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، تجدید نظر اول.

-طباطبایی، الف.م.، (۱۳۹۳)، "روسازی راه"، مرکز نشر

Blanchard town Road North , Ireland.

-Muniandy, R., Aburkaba, E., Thamer, N. (2013), "Comparison of Flexible Pavement Performance Using Kenlayer and Chev PC Software Program" *Australian journal of basic and applied sciences* 01/2013; 7(9): pp.112-119.

-Murad Y, Abu-Farsakh, Jie, Gu., George, Z., Voyiadjis and Qiming Chen. (2014), "Mechanistic-empirical analysis of the results of finite element analysis on flexible pavement with geogrid base reinforcement" *International Journal of Pavement Engineering*, Volume 15, Issue 9.

-Sarkar, A., (2015), "Numerical comparison of flexible pavement dynamic response under different axles" *International Journal of Pavement Engineering*, Taylor & Francis, UK.

-Gajewski, J. and Sadowski, T. (2014), "Sensitivity analysis of crack propagation in pavement bituminous layered structures using a hybrid system integrating Artificial Neural Networks and Finite Element Method" *Computational Materials Science* Volume 82, 1 February 2014, pp. 114–117.

-Huang, Y.H., (2004), "Pavement Analysis and Design", Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey, USA.

-Mateos A., Snyder M. B. (2002), "Validation of Flexible Pavement Structure Res-ponse Model with Data from the Minnesota Road Research Project", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, NO.1806, 2002, pp.19-29.

-Mulungye R M., Owende P M O., Mellon K. (2006), "Finite element modeling of flexible pavements on soft soil subgrades", *Institute of Technology Blanchard town*,

