توسعه برنامه‌ای برای تحلیل غیرخطی روسازیهای انعطاف‌پذیر

منصور فخری، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
علیرضا غنی‌زاده (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران و
عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سیرجان، سیرجان، ایران
E-mail: aghanizadeh@mail.uk.ac.ir

دریافت: ۹۰/۶/۲۲ پذیرش:۹۱/۳/۲۳

چکیده

به منظور تحلیل خطی و غیر خطی روسازیهای انعطاف‌پذیر، برنامه‌ای به نام NonPAS[1] توسعه داده شده است. برنامه توسعه داده شده علاوه بر تحلیل ارتجاعی خطی، امکان تحلیل غیر خطی روسازی را با استفاده از پنج مدل $K-\theta$ ،NCHRP ۱-۳۷A ،Universal ،Uzan و همچنین مدل دو خطی فراهم می سازد. استفاده از مدلهای فوق امکان مدلسازی رفتاری دقیق‌تر انواع مصالح سنگدانه‌ای ریزدانه و درشت‌دانه را فراهم می‌سازد. برنامه می‌تواند یک سیستم ارتجاعی ۱۰ لایه را حداکثر تحت اثر شش سطح بارگذاری دایره‌ای تحلیل کند. همچنین این برنامه امکان محاسبه عکس‌العملها را در ۳۰۰ نقطه مختلف از روسازی فراهم می‌کند. به منظور اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از تحلیل خطی و غیرخطی برنامه NonPAS، پاسخهای به دست آمده از این برنامه با پاسخهای به دست آمده از برنامه KENLAYER مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج تحلیل نشان دهنده انطباق بسیار خوب پاسخها در دو حالت تحلیل خطی و غیر خطی است و نشان می‌دهد که از این برنامه می‌توان با قابلیت اطمینان بالا برای مقاصد تحلیل و طراحی روسازی استفاده کرد. مزیت اصلی این برنامه نسبت به سایر برنامه های ارتجاعی چند لایه ای, در نظر گرفتن مدلهای رفتاری متنوع تر است که امکان مدلسازی دقیق تر مصالح دانه ای از جمله اساس, زیر اساس و خاک بستر را فراهم می کند. همچنین مطالعه اخیر نشان می دهد که برنامه ارایه شده پاسخهای نزدیک به سطح روسازی را با دقت بیشتری نسبت به برنامه KENLAYER محاسبه می کند.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی غیر خطی روسازی، نظریه چند لایه‌ای، برنامه NonPAS، پاسخهای سطح روسازی

۱. مقدمه

تا کنون برنامه‌های رایانه ای بسیاری برای تحلیل و طراحی روسازیهای انعطاف‌پذیر توسعه یافته‌است. هر یک از این برنامه‌ها بر اساس نیاز سازندگان خود توسعه یافته‌اند و از همین رو ممکن است نیاز استفاده‌کنندگان دیگر را برطرف نسازند، از همین رو هر یک از کشورها و سازمانهایی که از روش مکانیستیک- تجربی جهت طراحی روسازی استفاده می‌کنند، اقدام به توسعه یک نرم‌افزار بر اساس روش مکانیستیک- تجربی مخصوص به خود کرده‌اند. نخستین گام در طراحی یک روسازی به روش مکانیستیک - تجربی، تحلیل روسازی و محاسبه عکس‌العمل‌های بحرانی روسازی تحت اثر بارگذاریهای مختلف است. با وجود توسعه نرم‌افزارهای تحلیل و طراحی روسازی در سایر کشورها، با توجه به موارد زیر لزوم توسعه یک نرم‌افزار تحلیل و طراحی روسازی در داخل کشور احساس می‌شود [Iranian Tran- portation Research Center, 2008] :

۱- عدم تطابق برخی از نرم‌افزارهای موجود با وضعیت بارگذاری، مصالح مورد استفاده و وضعیت جوی کشور.

۲- پشتیبانی ناکافی از طرف توسعه دهنده نرم‌افزار.

۳- آگاهی ناکافی از فرآیند دقیق تحلیل و طراحی در برخی از نرم‌افزارها.

٤- وجود برخی محدودیتها در برنامه‌های موجود.

۵- عدم امکان توسعه آتی نرم‌افزار و تطابق آن با نیازهای طراحی.

با توجه به دلایل فوق، توسعه برنامه NonPAS با هدف برداشتن نخستین گام در توسعه یک نرم‌افزار تحلیل و طراحی روسازی در داخل کشور مطرح بوده است و با توجه به کد مرجع قابل دسترسی در این برنامه، امکان توسعه آن در آینده فراهم است.

ساده ترین روش بررسی رفتار روسازیهای انعطاف‌پذیر تحت اثر بار دایره‌ای، در نظر گرفتن این روسازیها به صورت یک نیم فضای همگن و سپس تحلیل روسازی با استفاده از نظریه بوسینسک است. برمیستر برای نخستین بار حل تحلیلی سیستمهای الاستیک دو لایه و سه لایه را تحت اثر بارگذاری دایره‌ای ارایه کرد [Burmister, 1943,1945]. دو روش معمول برای تحلیل روسازیهای انعطاف‌پذیر وجود دارد که عبارتند از روش نظریه ارتجاعی چند لایه‌ای و روش اجزای محدود.

در حال حاضر اغلب برنامه‌های تحلیل روسازیهای انعطاف‌پذیر از روش نظریه ارتجاعی چندلایه‌ای برای تحلیل روسازی بهره‌گیری می‌کنند. برای مثال می توان به برنامه‌های BISAR [De Jong and Peutz, 1979]، JULEA [Uzan, 1994] LEAF[Hayhoe, 2002]، KENLAYER [Huang, 2004] و Mnlayer [Khazanovich and Wang, 2007] اشاره کرد. مدلسازی روسازی با استفاده از نظریه چندلایه‌ای ساده‌تر است و حل سیستم توسط رایانه به زمان کمتری، در مقایسه با روش اجزای محدود، نیاز دارد. همچنین برای کاربران غیرحرفه‌ای، کار با برنامه‌های مبتنی بر نظریه ارتجاعی چند لایه‌ای ساده‌تر از برنامه‌های اجزای محدود است [Huang, 2004].

دانکن و همکاران برای نخستین بار از روش اجزای محدود برای تحلیل روسازیهای انعطاف‌پذیر استفاده کردند. [Duncan, 1968]

روش عمومی‌تحلیل سیستمهای چندلایه‌ای با استفاده از روش اجزای محدود، توسط ویلسون و بارکسدیل ارایه شده است [Yang, 1972]. عمومی‌ترین برنامه‌هایی که برای تحلیل روسازی انعطاف‌پذیر از روش اجزای محدود استفاده می‌کنند MICHPAV و ILLIPAV هستند .[Harichandran, Yeh and Baladi, 1990; Raad and Figueroa, 1980] برنامه‌های عمومی تحلیل اجزای محدود مانند ANSYS و ABAQUS نیز با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [Mar- na et. al., 2005 ;Ying et. al., 2004; Kuo and Huang, 2006; Thenoux and Rodríguez-ro, 2008; Kim, Tutumluer and Kwon, 2008,2009); Sadrnejad et. al,. 2011.

در بکارگیری روش اجزای محدود انتخاب شکل صحیح المانها تأثیر عمده‌ای بر دقت مورد نظر دارد. روش اجزاء محدود در مدلسازی سیستمهایی که دارای ابعاد معین و مشخص هستند توانایی بیشتری دارد، زیرا روش لایه‌ای با فرض بی نهایت بودن

لایه‌ها در جهت شعاعی، ارایه شده است. روش اجزای محدود برای تحلیل غیرخطی روسازی، بر نرم‌افزارهای سیستم لایه‌ای ارجحیت دارد [Huang, 2004]. با این وجود در کاربردهای عملی به علت افزایش زمان تحلیل ممکن است استفاده از روش اجزای محدود ممکن نباشد و به همین علت ممکن است تحلیل با روش نظریه ارتجاعی چندلایه‌ای به تحلیل اجزای محدود ترجیح داده شود.

۲. مدلهای غیرخطی مصالح سنگدانه‌ای

تحت تکرار بار ناشی از ترافیک، اکثر تغییر شکلهای روسازی برگشت‌پذیر بوده و این تغییر شکلها را می‌توان به صورت ارتجاعی در نظر گرفت. علت این موضوع اعمال بار سنگین ناشی از غلتک‌زنی روسازی در مرحله ساخت است که سبب کاهش تغییر شکل‌های دائمی به حداقل مقدار خود در آینده می‌شود. در تحلیل روسازی معمولاً از مدول ارتجاعی(M_R) برای بیان سختی ارتجاعی مصالح استفاده می‌شود. M_R به صورت زیر قابل تعریف است:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \qquad (۱)$$

که در این رابطه σ_d تنش انحرافی ناشی از بارگذاری و ε_r کرنش برگشت‌پذیر است. به منظور تعیین مدول ارتجاعی مصالح سنگدانه‌ای اساس، زیراساس و خاک بستر معمولاً از آزمایش بارگذاری سه‌محوری تکراری استفاده می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی گذشته نشان می‌دهند که مدول ارتجاعی مصالح سنگدانه‌ای درشت دانه و ریزدانه بستگی به حالت تنش دارد [Uzan, 1985; Thompson and Elliott, 1985; T –tumluer, 1995; Taylor and Timm, 2009; Siripun et. al, 2011]. تحقیقات اخیر در خصوص رفتار تنش- کرنش مصالح تثبیت شده با مقدار کم سیمان نیز نشان می‌دهد که مدول ارتجاعی این مصالح نیز تابعی از وضعیت تنش است [Jitsang –am and Nikraz, 2009; Puppala et. al., 2011]. بنابراین به منظور تعیین دقیق پاسخهای روسازی و تحلیل مکانیکی دقیق آن نیاز است تا مدول ارتجاعی مصالح سنگدانه‌ای به صورت تابعی از حالت تنشها محاسبه شود

تلاشهای زیادی در خصوص تعیین مدول ارتجاعی مصالح سنگدانه‌ای با توجه به حالت تنش صورت گرفته است. یکی از قدیمی ترین مدلها در رابطه با تعیین مدول ارتجاعی به صورت تابعی از حالت تنش، مدل $K-\theta$ است که به صورت زیر است:

$$M_R = K_1\theta^{K_2} \qquad (۲)$$

که در این رابطه θ = مستقل اول تنش ($\theta=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$) و K_1، K_2= ثوابت مصالح هستند.

اُزان مشاهده کرد که مدل $K-\theta$ در مواردی که مقدار تنشهای برشی، قابل ملاحظه باشند نمی‌تواند به خوبی مدول ارتجاعی مصالح را برآورد کند و برای تخمین دقیق مدول ارتجاعی مدل سه پارامتری زیر را پیشنهاد کرد[Uzan, 1985]:

$$M_R = K_1\left(\frac{\theta}{P_0}\right)^{K_2}\left(\frac{\sigma_d}{P_0}\right)^{K_3} \qquad (۳)$$

که در این رابطه σ_d = تنش انحرافی ($\sigma_d=\sigma_1-\sigma_3$)، P_0 = فشار واحد(۱KPa) و K_1,K_2,K_3 = ثوابت مصالح هستند.

محدودیت مدل Uzan استفاده از تنش انحرافی است که استفاده از این مدل را تنها به آزمایش فشاری سه‌محوری محدود می‌کند. ویتزاک واُزان، استفاده از مدل عمومی توسعه یافته توسط Uzan را پیشنهاد کردند، با این تفاوت که در مدل آنها تنش انحرافی با تنش هشت‌وجهی جایگزین شده بود [Witczak and Uzan, 1988]. این مدل به مدل Universal معروف است و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M_R = K_1\left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{K_2}\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{K_3} \qquad (٤)$$

در این رابطه τ_{oct} = تنش برشی هشت‌وجهی ($\tau_{oct}=\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2}$)، P_a= فشار اتمسفر (۱۰۰KPa) و K_1,K_2,K_3 = ثوابت مصالح هستند.

در راهنمای جدید طراحی روسازی به روش مکانیستیک – تجربی که توسط NCHRP ارایه شده است، مدلی شبیه به مدل Uzan–Witczak به منظور بیان رفتار ارتجاعی غیرخطی

مصالح ریزدانه و درشت‌دانه پیشنهاد شده است که به صورت زیر است [NCHRP, 2004]:

$$M_R = K_1\left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{K_2}\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}+1\right)^{K_3} \quad (۵)$$

مدول ارتجاعی مصالح ریزدانه با افزایش سطح تنش کاهش می‌یابد که این امر ناشی از رفتار نرم‌شوندگی این گونه مصالح است. برای این مصالح ، مدل رفتاری به صورت تابعی از تنش انحرافی بیان می‌شود. مدل دو خطی ارایه شده توسط تامسون و روبنت در این زمینه بیشترین کاربرد را دارد. این مدل به صورت زیر نوشته می‌شود :[Thompson and Robnett, 1979]

$$\begin{cases} M_R = K_1 + K_3(K_2 - \sigma_d) & \sigma_d \le K_2 \\ M_R = K_1 + K_4(\sigma_d - K_2) & \sigma_d \ge K_2 \end{cases} \quad (٦)$$

در این رابطه K_1, K_2, K_3, K_4 = ثوابت مصالح هستند. از بین مدلهای فوق مدل $K-\theta$ برای مصالح درشت‌دانه و مدل ارایه شده توسط تامسون و روبنت برای مصالح ریزدانه جهت تحلیل ارتجاعی غیرخطی روسازی در برخی از برنامه‌ها پیاده‌سازی شده‌اند. کلیه برنامه‌های مبتنی بر نظریه الاستیک چندلایه‌ای که تاکنون برای تحلیل غیرخطی روسازی توسعه یافته‌اند، تنها امکان در نظر گرفتن مدلهای محدود غیر خطی را دارند که از آن جمله می توان به برنامه KENLAYER یا EVERSTRESS اشاره کرد. برنامه NonPAS امکان تحلیل غیر خطی روسازی را با استفاده از هر یک از ۵ مدل ارایه شده، فراهم می‌سازد.

۳. برنامه NonPAS

برنامه NonPAS به منظور تحلیل الاستیک خطی و غیرخطی روسازی‌های انعطاف‌پذیر تحت اثر چندین سطح بارگذاری دایره‌ای شکل در محیط Visual Basic.Net توسعه داده شده است. این برنامه از نظریه الاستیک چند لایه‌ای به منظور تحلیل روسازی و محاسبه عکس‌العملهای روسازی تحت اثر بارگذاری دایره‌ای استفاده می‌کند. پس از محاسبه عکس‌العملها تحت اثر هر یک از سطوح بارگذاری، مقادیر نهایی عکس‌العملها با توجه به مختصات سطوح بارگذاری و همچنین مختصات نقطه مورد نظر در سیستم روسازی، تحت بارگذاری چند گانه محاسبه می‌شود [Huang, 2004].

در طراحی برنامه NonPAS سعی شده است که تا حد امکان محیطی کاربرپسند جهت تحلیل روسازی فراهم شود. همچنین در توسعه این برنامه سعی شده است تا از یک روند ماژولار در طراحی نرم‌افزار بهره‌گیری شود تا امکان توسعه آتی برنامه و تبدیل آن به یک نرم‌افزار طراحی مکانیستیک- تجربی روسازی وجود داشته باشد.

ورودیهای برنامه شامل موارد زیر هستند:

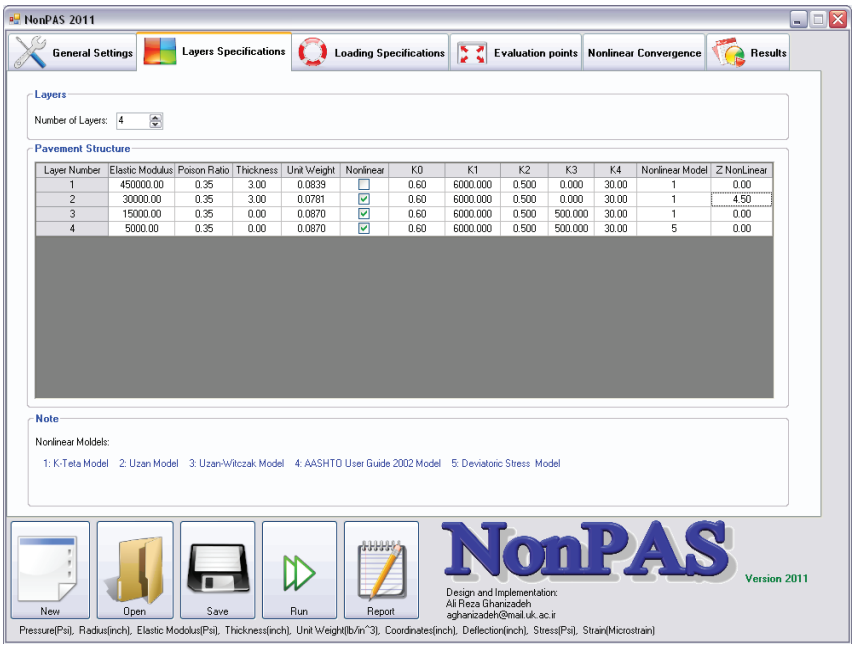
۱- مشخصات پروژه. مشخصات پروژه شامل عنوان پروژه، انتخاب سیستم آحاد، حداکثر تعداد تکرارها برای تحلیل غیرخطی، حداکثر خطای قابل قبول جهت همگرایی در تحلیل غیر خطی.

۲- مشخصات سازه‌ای. مشخصات سازه‌ای شامل تعداد لایه‌ها، مدول ارتجاعی لایه‌ها، ضریب پواسون لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، وزن مخصوص لایه‌ها، نوع لایه(خطی یا غیر خطی)، نوع رفتار غیرخطی لایه، ثوابت غیرخطی لایه عمق مورد نظر به عنوان نقطه تنش جهت محاسبه مدول ارتجاعی.

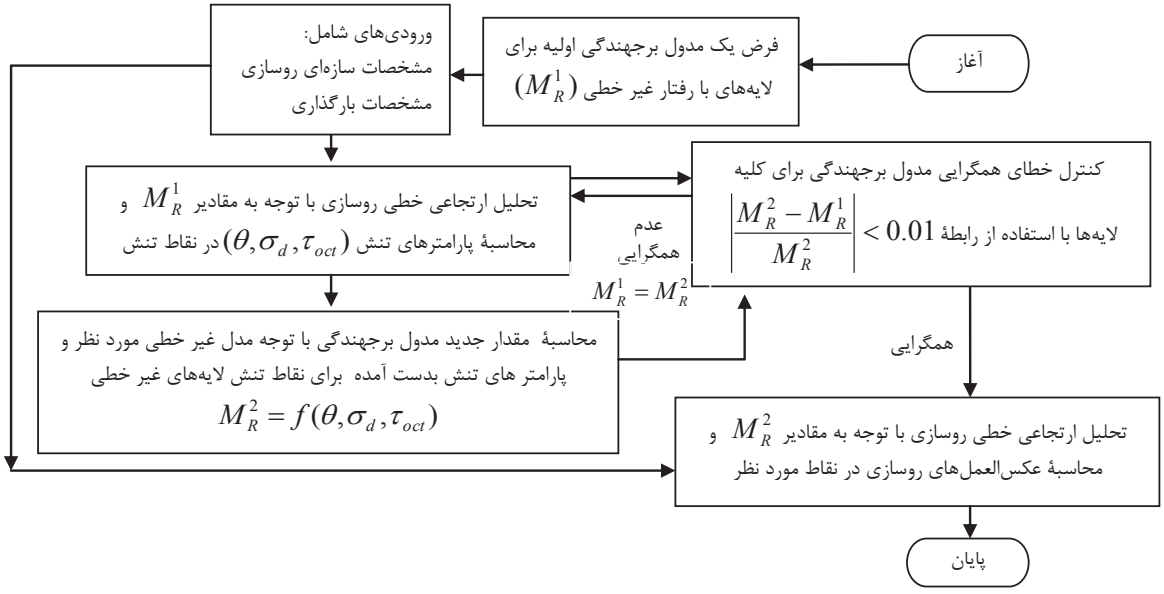
۳- مشخصات بارگذاری. مشخصات بارگذاری شامل نوع محور (ساده، دوگانه، سه‌گانه و اختیاری)، نوع چرخ (منفرد یا زوج)، فاصله محورها، فاصله چرخ‌ها، فشار چرخ و شعاع چرخ است. افزون بر این در صورت نیاز به تحلیل غیرخطی، باید اطلاعات بارگذاری شامل مختصات نقطه تنش و همچنین شیب توزیع تنش نیز تعریف شود.

٤- مشخصات نقاط برآورد عکس‌العملها. مشخصات نقاط برآورد عکس‌العمل‌ها شامل تعداد نقاط مورد نظر برای برآورد عکس‌العمل‌ها، تعداد عمقهای برآورد عکس‌العملها، مختصات و عمق نقاط پاسخ است. عکس‌العملها در هر یک از نقاط و در کلیه عمقها محاسبه می‌شوند.

نتایج تحلیل روسازی شامل تنشها، کرنشها و افت و خیزها در سه جهت اصلی، تنشهای برشی، تنشها و کرنشهای اصلی، حداکثر تنش برشی، تنش برشی و کرنش برشی هشت‌وجهی و حداکثر



شکل۱. رابط کاربر برنامه NonPAS



شکل۲. الگوریتم بکار رفته به منظور تحلیل غیر خطی روسازی

تنش افقی هستند. این نتایج را می‌توان در یک فایل متنی ذخیره کرد. رابط کاربر برنامه در شکل (۱) نشان داده شده است.

تحلیل غیرخطی روسازی در برنامه NonPAS با استفاده از الگوریتم نشان داده شده در شکل (۲) انجام می‌شود.

در ادامه به مقایسه عکس‌العملهای به دست آمده از برنامه NonPAS با عکس‌العملهای به دست آمده از برنامه KENLAYER می‌پردازیم.

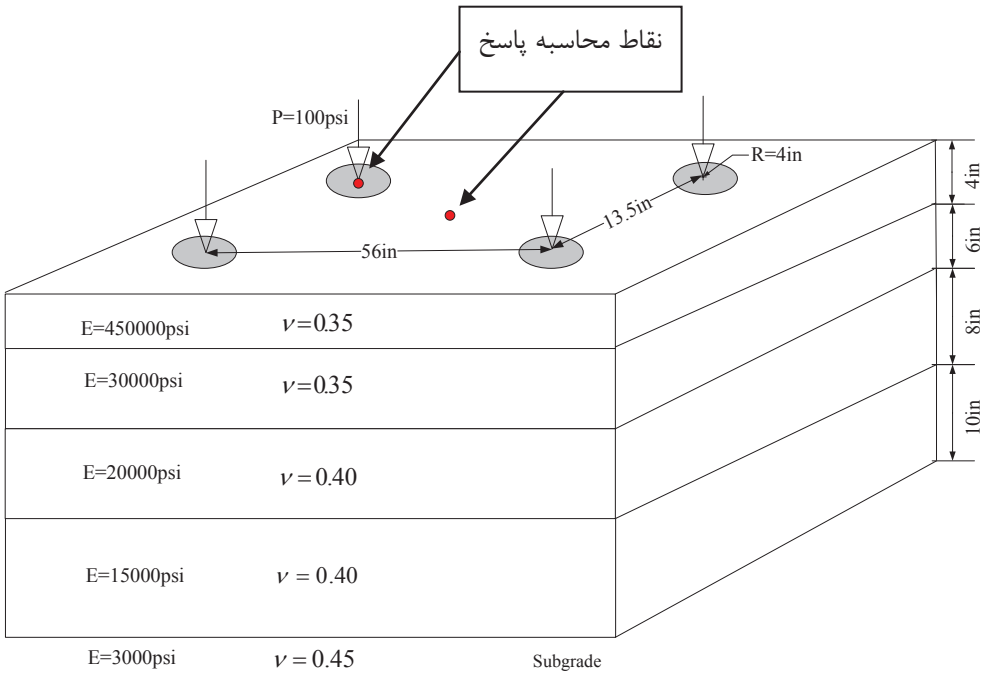
برای این منظور، نخست یک روسازی پنج لایه تحت اثر محور دوگانه با چرخ زوج با استفاده از برنامه NonPAS و KENLAYER تحلیل و نتایج به دست آمده از هر یک از این دو نرم افزار با یکدیگر مقایسه شده است و سپس به منظور اعتبار سنجی نتایج تحلیل غیر خطی، یک روسازی سه لایه با فرض رفتار غیر خطی اساس و خاک بستر تحلیل و نتایج آن با برنامه KENLAYER مقایسه شده است.

٤. اعتبار سنجی نتایج تحلیل خطی با استفاده از برنامه KENLAYER

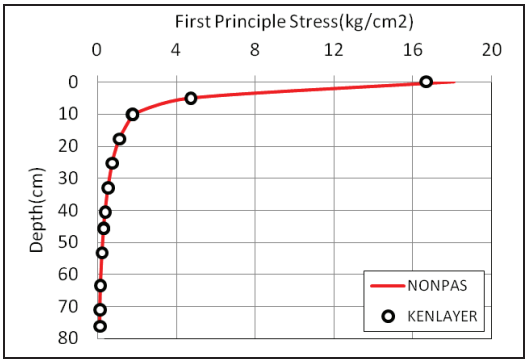
به منظور اعتبارسنجی عکس‌العملهای به دست آمده از تحلیل خطی برنامهNonPAS ، یک سیستم روسازی پنج لایه، مطابق شکل (۳)، در نظر گرفته شد. بارگذاری به صورت یک محور دوگانه با چرخ زوج انجام شده است. فاصله بین دو محور مطابق شکل برابر با ١٤٢/٢٥ سانتیمتر (٥٦ اینچ) و فاصله بین دو چرخ زوج در هر محور برابر با ٣٤/٢٩ سانتیمتر (١٣/٥ اینچ) در نظر گرفته شده است. بار هر چرخ با فشار یکنواخت ١٠٠ پوند بر اینچ مربع(٦/٩ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) در سطحی دایره‌ای به شعاع ١٠/١٦ سانتیمتر (٤ اینچ) به سطح روسازی اعمال شده است. سیستم فوق یک بار با استفاده از برنامهNonPAS و بار دیگر با استفاده از برنامه KENLAYER تحلیل شد و عکس‌العملها در مرکز چرخ و مرکز تقارن بارگذاری(حد واسط چهار چرخ) و در عمق‌های مختلف محاسبه شد.

نتایج حاصل از این تحلیل در شکلهای (٤) الی (١٥) نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود عکس‌العملهای به دست آمده از برنامه KENLAYER وNonPAS تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. در مورد پاسخهای به دست آمده در سطح روسازی(عمق برابر با صفر) و همچنین افت وخیز قائم، تطابق چندانی بین نتایج حاصل از این دو برنامه دیده نمی‌شود. برنامه KENLAYER مقدار تنش قائم در زیر مرکز چرخ را برابر با ٥/٥١ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع(٧٩/٩٠ پوند بر اینچ مربع) و برنامه NonPAS مقدار این تنش را برابر با ٦/٩٠ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (١٠٠/٠٧ پوند بر اینچ مربع) به دست می‌دهد. مقدار واقعی این تنش برابر با ٦/٩ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع(١٠٠ پوند بر اینچ مربع) است. به این ترتیب برنامه KENLAYER مقدار تنش قائم را حدود ٢٠ درصد کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند، در حالیکه برنامه NonPAS مقدار این پاسخ را تقریباً بدون خطا برآورد می کند.

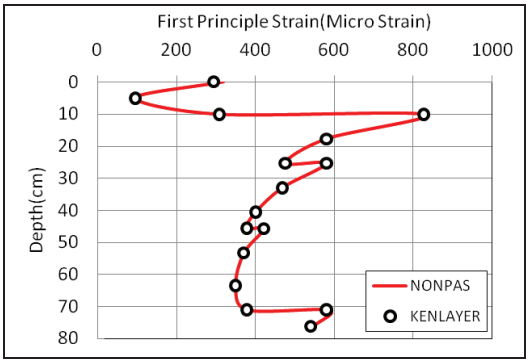
همچنین برنامه KENLAYER مقدار تنش قائم در حد واسط دو چرخ را برابر با ٠/٣٢٨٤ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (٤/٧٩٥ پوند بر اینچ مربع) و برنامه NonPAS مقدار این تنش را برابر با ٠/٠١٠٧-کیلوگرم بر سانتیمتر مربع(٠/١٥٧- پوند بر اینچ مربع)



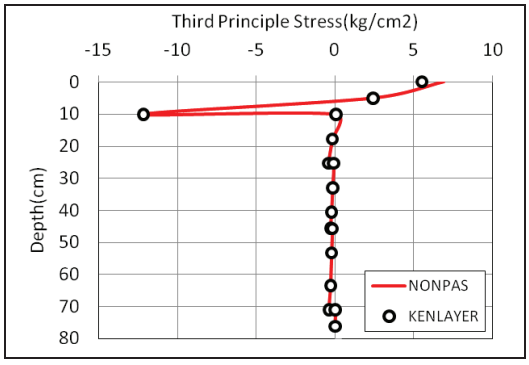
شکل٣. مقطع روسازی به منظور اعتبار سنجی عکس‌العمل‌ها در تحلیل خطی روسازی.
(١ in=٢٥.٤ mm; ١ ksi=٦.٨٩ MPa)



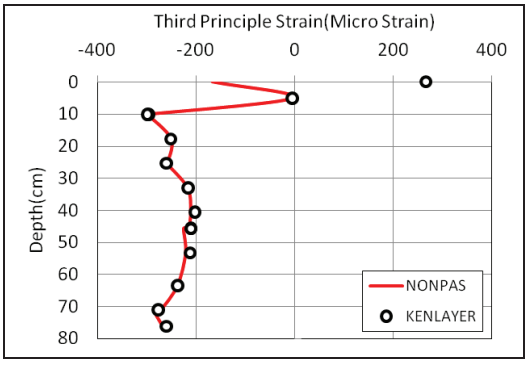
شکل٤. تنش اصلی بزرگ در مرکز چرخ



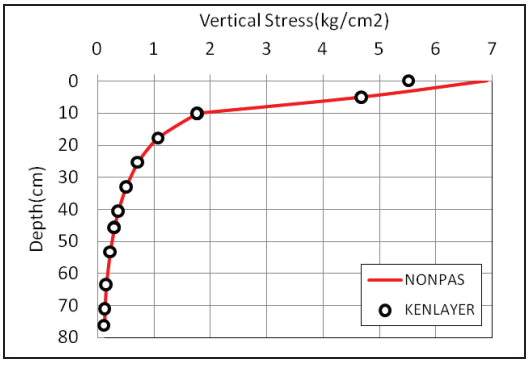
شکل٥.کرنش اصلی بزرگ در مرکز چرخ



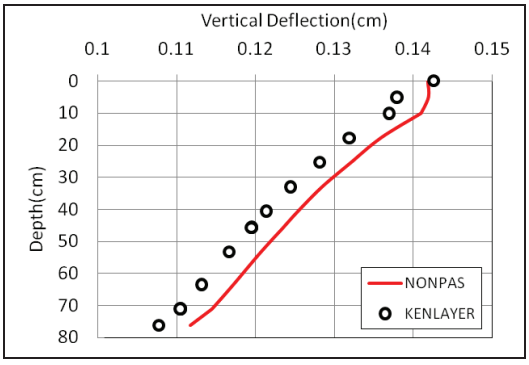
شکل٦. تنش اصلی کوچک در مرکز چرخ



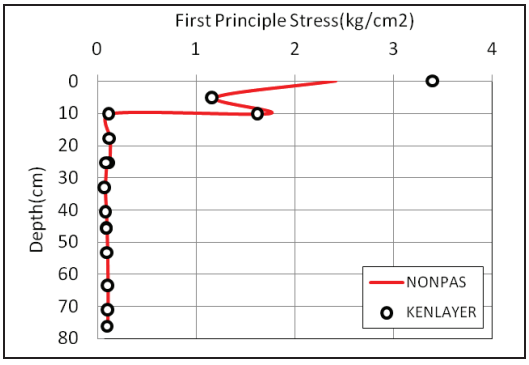
شکل٧. کرنش اصلی کوچک در مرکز چرخ



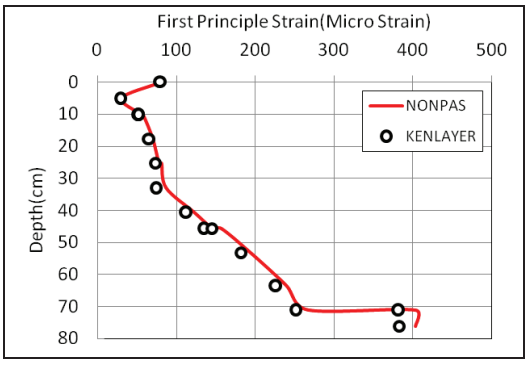
شکل٨. تنش قائم در مرکز چرخ



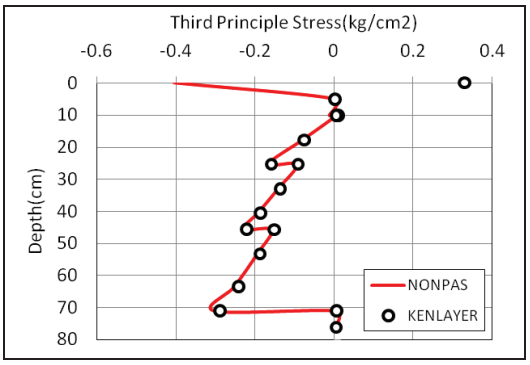
شکل٩. افت و خیز قائم در مرکز چرخ



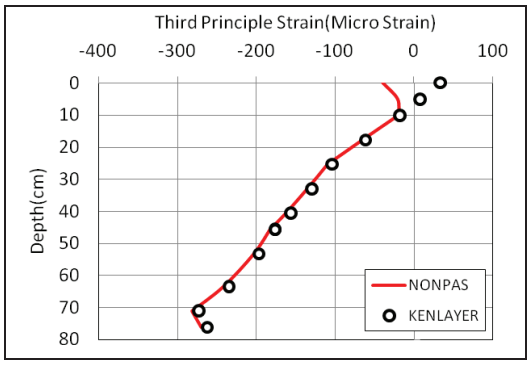
شکل١٠. تنش اصلی بزرگ در مرکز تقارن بارگذاری



شکل١١.کرنش اصلی بزرگ در مرکز تقارن بارگذاری



شکل۱۲. تنش اصلی کوچک در مرکز تقارن بارگذاری

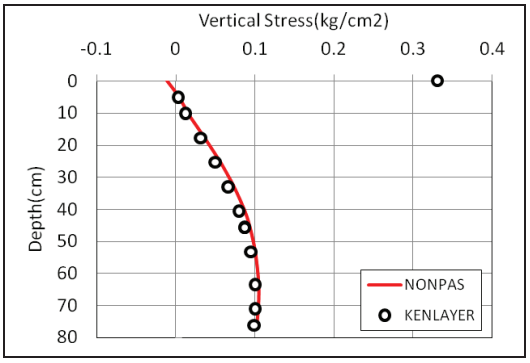


شکل۱۳.کرنش اصلی کوچک در مرکز تقارن بارگذاری

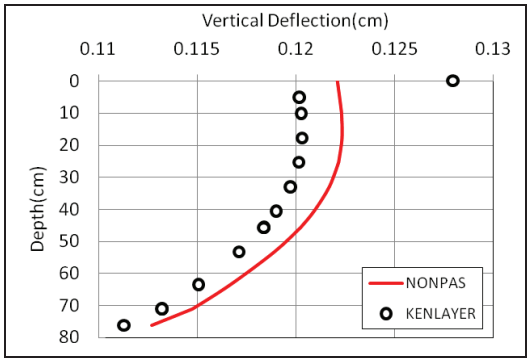
به دست می‌دهد، در صورتی که مقدار واقعی این تنش برابر با صفر است. همان گونه که دیده می‌شود، دقت NonPAS نسبت به برنامه KENLAYER در برآورد پاسخها در سطح روسازی بیشتر است.

عدم دقت برنامه KENLAYER در برآورد پاسخهای نزدیک به سطح روسازی قبلاً نیز توسط برخی از پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است[Chen et. al. 1995]. از جمله ساز و کارهای خرابی روسازیهای آسفالتی ترکهای بالا به پایین است که بستگی به شدت کرنش افقی در سطح لایه آسفالتی دارد[NCHRP, 2004]. این مورد اهمیت برآورد دقیق پاسخها در سطح لایه آسفالتی را در روشهای طراحی مکانیستیک- تجربی روسازی‌های آسفالتی مشخص می‌کند.

به منظور اعتبار سنجی افت و خیزهای به دست‌آمده از NonPAS و برنامه KENLAYER، کاسه نشست سطح روسازی با استفاده از برنامه KENLAYER و برنامه‌های NonPAS و WinJULEAمحاسبه شد. الگوریتم تحلیل بکار رفته در برنامه WinJULEA که از دقیق ترین نرم‌افزارهای تحلیل سیستم‌های چند لایه‌ای است، در راهنمای طراحی مکانیستیک- تجربی AASHTO ۲۰۰۲ جهت تحلیل روسازیهای با مصالح الاستیک خطی مورد استفاده قرار گرفته است[NCHRP, 2004]. کاسه نشست در امتداد دو چرخ زوج و همچنین دو چرخ مربوط به محورهای دوگانه در شکلهای(۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود، برنامه WinJULEA مقدار افت و خیز قائم را کمتر از دو روش دیگر و برنامه KENLAYER مقدار افت و خیز را بیشتر از دو روش دیگر برآورد می‌کند. همچنین دیده می‌شود که افت و خیزهای به دست آمده از برنامه NonPAS همگرایی بهتری را با نتایج حاصل از برنامه Wi - JULEA نشان می‌دهند. نتایج حاصل از NonPAS در نزدیکی محل اعمال بار به نتایج برنامه KENLAYER نزدیکترند و با دور شدن از محل اعمال بار، نتایج حاصل از NonPAS به نتایج حاصل از برنامه WinJULEA نزدیک تر می‌شوند. اختلاف افت و خیز قائم به دست آمده از برنامه NonPAS و برنامه



شکل۱۴. تنش قائم در مرکز تقارن بارگذاری



شکل۱۵. افت و خیز قائم در مرکز تقارن بارگذاری

WinJULEA در بیشترین حالت از حدود سه درصد تجاوز نمی‌کند. کلیه برنامه‌های تحلیل روسازی که با استفاده از نظریه الاستیک چند لایه‌ای روسازی را تحلیل می‌کنند، پاسخهای تقریباً مشابهی به دست می‌دهند [Iranian Transportation R – search Institute, 2009]. علت اختلاف جزئی بین نتایج این برنامه‌ها ناشی از دقت متفاوت در محاسبه انتگرال زیر است که به دلیل وجود تابع بسل و همچنین حد بالای نامحدود امکان محاسبه آن به صورت تحلیلی وجود ندارد.

$$R = \frac{qa}{H}\int_0^{\infty}\frac{R^*}{m}J_1\left(\frac{m.a}{H}\right)dm \qquad (۷)$$

در این رابطه R^* پاسخ تحت اثر بار $-mJ_0\left(\frac{mr}{H}\right)$، m ثابت انتگرال‌گیری، q تنش یکنواخت وارد بر سطح دایره‌ای، a شعاع بارگذاری و H فاصله سطح روسازی تا فصل مشترک پایین‌ترین لایه است.

در برنامه NonPAS محاسبه این انتگرال با استفاده از محاسبه صفر توابع بسل در ٤٦ نقطه و سپس محاسبه انتگرال (۷) بین این مقادیر با استفاده از روش گوس چهار نقطه‌ای انجام شده است که سبب افزایش دقت نسبت به برنامه KENLAYER شده است.

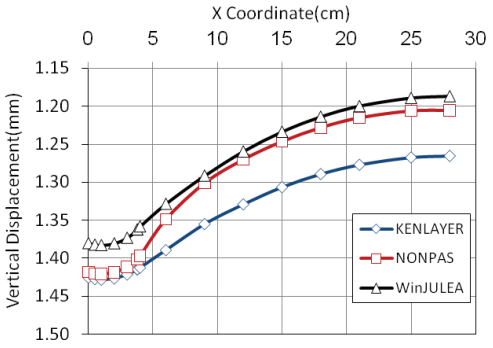
۵. اعتبار سنجی نتایج تحلیل غیرخطی با استفاده از برنامه KENLAYER

به منظور اعتبارسنجی برنامه NonPAS در تحلیل غیر خطی روسازی یک سیستم روسازی سه لایه شامل لایه‌های بتن آسفالتی، اساس سنگدانه‌ای و خاک بستر، مطابق شکل (۱۸)، در نظر گرفته شد. بارگذاری به صورت چرخ منفرد به شعاع ۱۵ سانتیمتر(٦ اینچ) و فشار چرخ ۵/۵۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع(۸۰ پوند بر اینچ مربع) انجام شده است. به منظور تحلیل غیرخطی روسازی، مصالح لایه اساس با استفاده از مدل و مصالح خاک بستر با استفاده از مدل دو خطی برای مصالح ریزدانه مدلسازی شده‌اند. مشخصات در نظر گرفته شده برای هر یک از لایه‌ها در شکل (۱۸) نشان داده شده است. تحلیل غیرخطی روسازی به سه روش انجام شده است. در روش اول لایه اساس به ٦ لایه با ضخامت ۵ سانتیمتر(۲اینچ) تقسیم شده و نقطه تنش در وسط هر یک از این لایه‌ها در نظر گرفته شده است. در روش دوم و سوم نقطه تنش برای لایه اساس به ترتیب در عمق ۱۰ سانتیمتری(٤ اینچی) و ۷/۵ سانتیمتری(۳ اینچی) این لایه در نظر گرفته شده است. تفکیک لایه اساس به چندین لایه و در نظر گرفتن نقطه تنش برای هر یک از این لایه‌ها سبب افزایش دقت در تحلیل برآورد پاسخهای روسازی می‌شود.

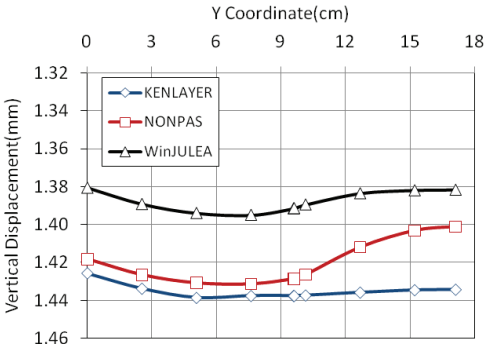
شیب توزیع بار جهت محاسبه موقعیت نقاط تنش برابر با SLD=۰/۰ و SLD=۰/۵ در نظر گرفته شده است.

شکل‌های (۱۹) و (۲۰) تغییرات مدول ارتجاعی محاسبه شده را نسبت به عمق در دو حالت SLD=۰/۰ و SLD=۰/۵ نمایش می‌دهند.

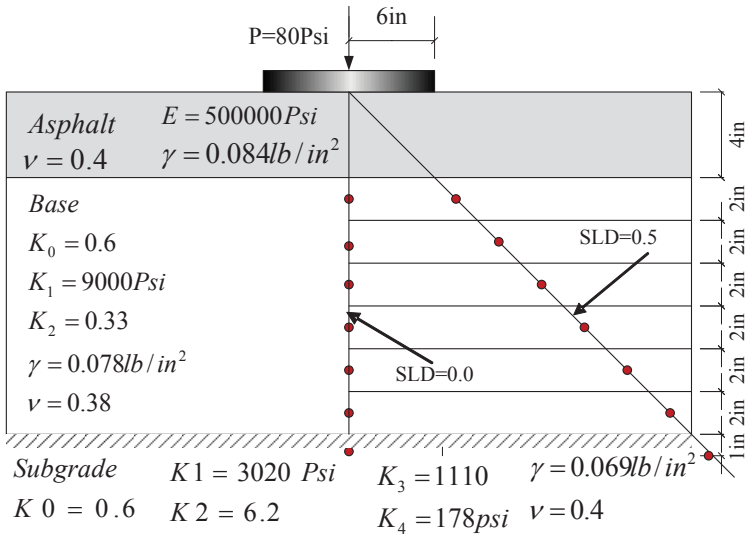
همان گونه که دیده می‌شود مدول ارتجاعی به دست آمده در عمقهای مختلف با استفاده از برنامه‌های KENLAYER و



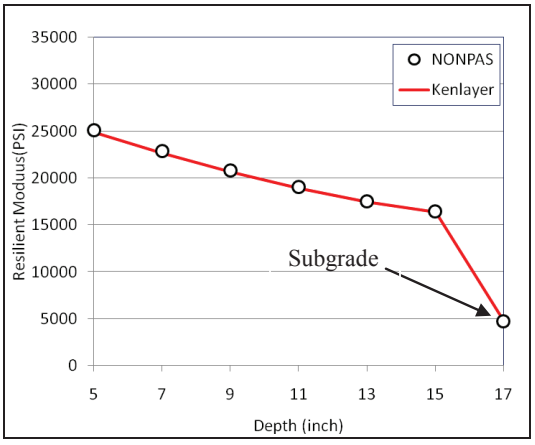
شکل۱٦. افت و خیز قائم سطح روسازی در امتداد دو چرخ مجاور محورها



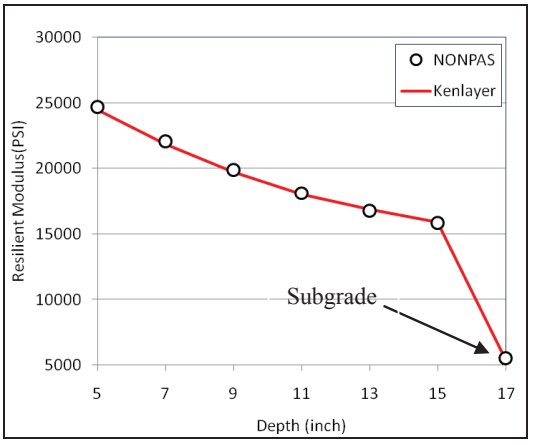
شکل۱۷. افت و خیز قائم سطح روسازی در امتداد چرخ‌های زوج



شکل۱۸. مقطع روسازی و موقعیت نقاط تنش در لایه اساس برای اعتبارسنجی نتایج تحلیل غیرخطی روسازی



شکل۱۹.تغییرات مدول ارتجاعی نسبت به عمق در حالت SLD=۰/۰



شکل۲۰.تغییرات مدول ارتجاعی نسبت به عمق در حالت SLD=۰/۵

NonPAS انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. با توجه به اینکه پس از همگرائی مدول ارتجاعی در نقاط تنش، تحلیل نهایی انجام می‌شود، انتظار می‌رود نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی نیز همانند تحلیل خطی انطباق خوبی با نتایج برنامه KENLAYER داشته باشند. به منظور مقایسه نتایج، پاسخهای بحرانی محاسبه شده توسط NonPAS وKENLAYER شامل کرنش کششی افقی تار پایین آسفالت و کرنش فشاری قائم سطح خاک بستر در محور بارگذاری با یکدیگر مقایسه شده‌اند. تحلیل با استفاده از هر یک از سه روش انجام شده است. نتایج تحلیل در جدولهای (۱) و (۲) داده شده است.

همان گونه که دیده می‌شود انطباق بسیار خوبی بین پاسخهای به دست آمده از برنامه NonPAS وKENLAYER وجود دارد و در تمامی حالات، اختلاف جوابها کمتر از ۱ درصد است.

٦. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نخستین گام در طراحی یک روسازی به روش مکانیستیک – تجربی، تحلیل روسازی و محاسبه عکس‌العملهای بحرانی روسازی تحت اثر بارگذاریهای مختلف است. همین نکته، لزوم توسعه یک نرم‌افزار تحلیل روسازی را که در آینده بتواند به عنوان بستری برای طراحی مکانیستیک – تجربی روسازی در کشور بکار رود به اثبات می‌رساند. برنامه NonPAS بر اساس نظریه ارتجاعی چند لایه‌ای و به منظور تحلیل خطی و غیرخطی

جدول۱. مقایسه پاسخهای بحرانی به دست آمده با استفاده از هر یک از روشها در حالت SLD=۰/۰

برنامه	روش اول		روش دوم		روش سوم	
	ε_t	ε_c	ε_t	ε_c	ε_t	ε_c
NonPAS	۳۳۳/۵	۹۸۷/۷	۳۳۱/۸	۹٤۷/٤	۳۲٤/٤	۹۲۹/۵
KENLAYER	۳۳٤/۷	۹۹۲/٦	۳۳۰/۰	۹۵٤/۲	۳۲۵/۷	۹۳٦/۷

ε_t: کرنش کششی افقی تار پایین آسفالت (μ Strain)

ε_c: کرنش فشاری قائم سطح خاک بستر (μ Strain)

جدول۲. مقایسه پاسخهای بحرانی به دست آمده با استفاده از هر یک از روشها در حالت SLD=۰/۵

برنامه	روش اول		روش دوم		روش سوم	
	ε_t	ε_c	ε_t	ε_c	ε_t	ε_c
NonPAS	۳۳٤/٤	۹۲٤/٤	۳۳٤/۷	۸۹٦/۹	۳۲٤/۸	۸۷٦/۷
KENLAYER	۳۳۵/٤	۹۲٦/۹	۳۳٦.۲	۹۰۱/٦	۳۲٦/٤	۸۸۲/۱

روسازیهای انعطاف‌پذیر توسعه داده شده است که می‌تواند رفتار غیرخطی مصالح سنگدانه‌ای شامل مصالح ریزدانه و درشت‌دانه را با استفاده از ۵ مدل ارتجاعی غیرخطی مدلسازی کند. پیاده سازی پنج مدل غیر خطی امکان تحلیل دقیق تر روسازی را با استفاده از مدلهای جدیدتر همانند مدل NCHRP ۱-۳۷A نسبت به سایر برنامه های موجود فراهم می کند. همان گونه که نشان داده شد، پاسخهای حاصل از برنامه NonPAS تطابق بسیار خوبی با نتایج حاصل از برنامه KENLAYER نشان می‌دهند. تنها در مورد افت و خیزهای قائم تطابق کامل بین نتایج NonPAS و KE - LAYER دیده نمی‌شود، با این وجود در این حالت نیز مقدار خطا از پنج درصد تجاوز نمی‌کند. همچنین برنامه NonPAS بر خلاف برنامه KENLAYER تنشها و کرنشها را در سطح روسازی با دقت بیشتری محاسبه می‌کند. بنابراین می‌توان دید که نرم‌افزارNonPAS می‌تواند به عنوان یک برنامه قابل اعتماد جهت تحلیل خطی و غیرخطی روسازیهای انعطاف‌پذیر استفاده شود. افزون بر این می‌توان از الگوریتم تحلیلی آن برای توسعه یک نرم‌افزار طراحی مکانیستیک- تجربی روسازی بهره گرفت.

۷. پی نوشتها

1. NONlinear Pavement Analysis Software
2. Bilinear Model

۸. مراجع

- Burmister, D. M. (1943) "The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways", Proceedings, Highway Research Board, Vol. 23, pp. 126-144.

- Burmister, D. M. (1945) "The general theory of stresses and displacements in layered soil systems". Journal of Applied Physics, Vol. 16, No. 2, pp. 84-94.

- Chen, D. H., Musharraf, Z., Laguros, J. and Soltani, Alan (1995) "Assessment of computer programs for analysis of flexible pavement structure" Transportation Research Board, Transportation Research Record, No. 1482, pp. 123-133.

- De Jong, D. L., Peutz, M. G. F. and Korswagen, A. R. (1979) "Computer program BISAR, layered systems under normal and tangential surface loads", Koninklijke-Shell Laboratorium, Amsterdam, Netherlands.

- Duncan, J. M., Monismith, C. L. and Wilson, E. L. (1968) "Finite element analyses of pavements." Transportation Research Record, 228, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.18–33.

- Harichandran, R., Yeh, M. and Baladi, G. (1990) "MICH-PAVE a non-linear finite element program for the analysis of flexible pavements", Transportation Research Record. 1286, Transportation Research

pirical design of new and rehabilitated pavement structures."Final Rep., TRB, National Research Council, Washington, D.C., <http://www.trb.org/mepdg/home.htm>.

- Puppala, A. J., Hoyos, L. R. and Potturi, A. K. (2011) "Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates", ASCE, Journal of Materials In Civil Engineering, Vol. 23, No. 7, pp.990-998.

- Raad, L. and Figueroa, J. (1980) "Load response of transportation support systems" ASCE, Transportation Engineering Journal, Vol. 106, No. 1, pp. 111-128

- Rowshanzamir, M. A. (1995) "Resilient cross-anisotropic behavior of granular base materials under repetitive loading." Ph. D. Dissertation, School of Civil Engineering, Univ. of New South Wales, Kensington, Australia.

- Sadrnejad, S. A., Ghanizadeh, A. R. and Fakhri, M. (2011) "Evaluation of three constitutive models to characterize granular base for pavement analysis using finite element method", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5, No. 7, pp. 778-786.

- Siripun, K., Nikraz, H. and Jitsangiam, P. (2011) "Mechanical behavior of unbound granular road base materials under repeated cyclic loads." International Journal of Pavement Research Technology, Vol. 4, No. 1, pp. 56-66.

- Taylor, A. J. and Timm, D. H. (2009) "Mechanistic characterization of resilient moduli for unbound pavement layer materials" NCAT Report 09-06, National Center for Asphalt Technology Auburn University, Alabama.

- Thenoux, G. and Rodríguez-roa, F. (2008) "Three-dimensional finite element model for flexible pavement analyses based on field modulus measurements." The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 33, No. 1, pp. 65-76.

- Thompson, M. R. and Elliott, R. P. (1985) "ILLIPAVE based response algorithms for design of conventional flexible pavements." Transportation Re-Board, Washington, D.C., pp. 123-131.

- Hayhoe, G. F. (2002) "LEAF-a new layered elastic computational program for FAA pavement design and evaluation procedures." Presented at FAA Technology Transfer Conference, U.S. Department of Transportation, Atlantic City, N.J.

- Huang, Y.H. (2004) "Pavement analysis and design", 2nd Edition, USA: Prentice Hall.

- Jitsangiam, P. and Nikraz, H. R. (2009) "Mechanical behavior of hydrated cement treated crushed rock base as a road base material in Western Australia", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 39-47

- Khazanovich, L. and Wang, Q. (2007) "MnLayer: High-performance layered elastic analysis program", Journal of Transportation Research Board, 2037, pp.63-75.

- Kim, M., Tutumluer, M. and Kwon, J. (2008) "Flexible pavement response to multiple wheel loading using nonlinear three-dimensional finite element analysis.", Proceeding of 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, pp.4377-4384.

- Kim, M., Tutumluer, M. and Kwon, J. (2009) "Nonlinear pavement foundation modeling for three-dimensional finite-element analysis of flexible pavements", ASCE, International Journal of Geomechanics, Vol. 9, No. 5, pp. 195-208.

- Kuo, C. M. and Huang, C. W. (2006) "Three-dimensional pavement analysis with nonlinear subgrade" , ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, No. 4, pp.537-544.

- Mariana R., Kruntcheva, Andrew, Collop, C. and Thom, Nicholas H. (2005) "Effect of bond condition on flexible pavement performance", ASCE, Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 11, pp. 880—888.

- National Cooperative Highway Research Program 1-37A. (2004) "Guide for mechanistic-em-

search Record. 1043, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 50–57.

- Thompson, M. R. and Robnett, Q. L. (1979) "Resilient properties of subgrade soils." Transportation Engineering Journal, ASCE, Vol. 105, No. 1, pp. 71-89.

- Uzan, J. (1985) "Characterization of granular materials." Transportation Research Record 228, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 52–59.

- Uzan, J. (1994) "Advanced backcalculation techniques", Proc., 2nd Int. Symp. on NDT of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM Special Technical Publications, No. 1198, Philadelphia, pp. 3–37.

- Witczak, M. W. and Uzan, J. (1988) "The universal airport pavement design system, Report I of IV: Granular Material Characterization", University of Maryland, College of Engineering, College Park, MD.

- Ying, H. L., Hsin-Ta, W. and Shao-Tang, Y. (2004) "Parameter studies and verifications on three dimensional finite element analysis of rigid pavements", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 31, pp. 782–796.

- پژوهشکده حمل و نقل (۱۳۸۷) "بررسی نرم‌افزارهای تحلیل و طراحی روسازی راه و ارایه گزینه مناسب برای کشور"، چاپ اول.