

# مقایسه پاسخ‌های بحرانی روسازی حاصل از تحلیل غیرخطی با استفاده از نظریه چندلایه‌ای و روش المان محدود

## مقاله علمی - پژوهشی

علیرضا غنی زاده\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران  
ماندانا صالحی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

صفحه ۵۶-۴۳

### چکیده

روش‌های متعددی برای تحلیل روسازی‌ها انعطاف‌پذیر وجود دارد که از جمله پرکاربردترین این روش‌ها می‌توان به نظریه چندلایه‌ای و روش المان محدود اشاره کرد. در این مطالعه دو مقطع روسازی چهار لایه به ازای دو دمای رویه آسفالتی (۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) جهت مقایسه پنج عکس‌العمل بدست آمده از تحلیل غیرخطی با دو روش نظریه چندلایه‌ای و روش المان محدود در فواصل شعاعی مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. برای تحلیل غیرخطی این دو مقطع با استفاده از نظریه چندلایه‌ای از برنامه NonPAS و برای تحلیل غیرخطی این دو مقطع با استفاده از روش المان محدود از برنامه MICHPAVE استفاده شده است. همچنین برای تعیین نقاط تنش و اصلاح تنش‌ها در روش نظریه چندلایه‌ای از ۷ روش مختلف استفاده گردیده است. نتایج تحلیل نشان داد که تنها برای پاسخ تنش قائم روی بستر، نتایج حاصل از دو برنامه اختلاف زیادی دارند و برای سایر پاسخ‌ها اختلاف بین دو برنامه منطقی است. همچنین مشخص شد که پاسخ‌های بدست آمده از برنامه NonPAS برای مقطع ضخیم‌تر انطباق بهتری با نتایج حاصله از برنامه MICHPAVE دارد. از بین ۷ روش در نظر گرفته شده برای تعیین نقاط تنش در روش الاستیک چندلایه‌ای روش ۷ که مبتنی بر زیرلایه کردن لایه غیرخطی و در نظر گرفتن نقاط تنش در عمق میانی زیرلایه‌ها و اصلاح تنش‌های شعاعی بر اساس حداکثر مقاومت کششی مصالح بر طبق پوش گسیختگی مور بود، بهترین انطباق را با برنامه MICHAVE نشان داد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل غیرخطی، نظریه چندلایه‌ای، روش المان محدود، NonPAS، MICHPAVE

### ۱-مقدمه

بستر و مصالح سنگدانه‌ای در لایه‌های اساس و زیراساس، رفتار غیرخطی وابسته به تنش از خود نشان می‌دهند. اکثر مدل‌های تحلیل روسازی انعطاف‌پذیر مورد استفاده در حال حاضر، رفتار مصالح را به صورت الاستیک خطی در نظر می‌گیرند (Kim, 2007). هدف از تحلیل روسازی، تعیین پاسخ‌های روسازی و مطالعه ماهیت تنش‌ها و کرنش‌ها در لایه‌های مختلف روسازی است (Al-Jharyish, 2014). طراحی روسازی از روش‌های تجربی به روش‌های

روسازی‌ها از نظر نحوه توزیع تنش و همچنین مصالح بکار رفته در لایه رویه، به سه گروه اصلی شامل روسازی انعطاف‌پذیر، روسازی صلب و روسازی مرکب تقسیم می‌شوند (دفتر نظام فنی اجرایی، ۱۳۹۰). لایه‌های مختلف سازه روسازی انعطاف‌پذیر دارای مقاومت و خصوصیات تغییرشکل متفاوتی هستند که تحلیل آن را دشوار می‌کند. آسفالت موجود در لایه سطحی یک ماده ویسکوالاستیک با رفتار وابسته به زمان و دما است. از طرف دیگر، مصالح خاک

توسعه یافته است. اولین و شناخته شده ترین برنامه، CHEV است که توسط شرکت تحقیقاتی چورون توسعه داده شد (Warren & Dieckmann, 1963). این برنامه را فقط می توان برای مصالح الاستیک خطی مورد استفاده قرار داد که بعدها توسط انستیتو آسفالت در برنامه DAMA برای در نظر گرفتن مصالح سنگدانه ای غیرخطی اصلاح شد (Hwang & Witzzak, 1979). یکی دیگر از برنامه های مشهور BISAR است که توسط شل توسعه داده شده است که علاوه بر بارهای قائم، بارهای افقی را نیز در نظر می گیرد (De Jong et al., 1973). برنامه دیگری که در ابتدا در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی، توسعه یافت و بعداً برای اجرا در رایانه های شخصی به روزرسانی شد، ELSYM5 است که برای سیستم های ۵ لایه الاستیک تحت بارهای چندگانه کاربرد دارد (Kopperman et al., 1986). فین و همکاران (۱۹۸۶) با استفاده از نظریه لایه ای با خصوصیات مصالح وابسته به تنش، یک برنامه کامپیوتری بنام PDMAP برای پیش بینی ترک های خستگی و شیارشدگی در روسازی های آسفالتی توسعه دادند. هوآنگ اولین نسخه تحلیل و طراحی خطی و غیرخطی روسازی را در سال ۱۹۹۳ منتشر کرد و سپس در سال ۲۰۰۴ آخرین ویرایش این برنامه تحت سیستم عامل ویندوز بنام KENPAVE که ترکیبی از LAYERINP، KENSLABS، KENLAYER، SLABSINP در یک بسته واحد بود، ارائه گردید (Finn et al., 1986). غنی زاده و ضیایی (۲۰۱۵) برنامه NonPAS را برای تحلیل خطی و غیرخطی روسازی های انعطاف پذیر براساس نظریه الاستیک لایه ای توسعه دادند (Ghanizadeh & Ziaie, 2015).

دانکن و همکاران (۱۹۶۸) برای اولین بار از روش المان محدود برای تحلیل روسازی های انعطاف پذیر استفاده نمودند. این روش بعدها در برنامه رایانه ای ILLI-PAVE گنجانیده شد (Raad & Figueroa, 1980). از روش المان محدود غیرخطی در برنامه رایانه ای MICH-PAVE که در دانشگاه ایالتی میشیگان تهیه شد نیز استفاده شد (Harichandran et al., 1989). ANSYS و ABAQUS نیز برنامه های عمومی تحلیل اجزای محدود هستند که با موفقیت در تحقیقات مرتبط با تحلیل و طراحی روسازی بکار گرفته شده اند.

مکانیستیک در حال انتقال است. اثربخشی هر یک از روش های طراحی مکانیکی به دقت و درستی تنش ها و کرنش های پیش بینی شده متکی است. تحلیل المان محدود یکی از رایج ترین ابزار تحلیل مکانیکی روسازی است (Kim, 2007). به طور کلی روش های طراحی روسازی موجود در حال حاضر به دو دسته روش های تجربی و مکانیستیک-تجربی (روش تحلیلی و روش عددی) تقسیم می شوند. روش های تحلیلی روسازی انعطاف پذیر شامل نظریه تک لایه ای بوسینسک، روش ضخامت هم ارز ادمارک، نظریه الاستیک لایه ای و روش های عددی شامل روش المان محدود (FEM)، روش تفاضل محدود (FDM) و روش المان گسسته (DEM) هستند (Al-Jhayyish, 2014; Selvi, 2015). برمیستر در سال ۱۹۴۳ راه حل هایی برای سیستم های دولایه و بعد برای سیستم سه لایه توسعه داد که منجر به پیشرفت قابل توجهی در تحلیل روسازی شد (Burmister, 1943) و به نظریه الاستیک لایه ای معروف گردید. از معایب این نظریه در نظر گرفتن فرضیات محدودکننده و دور از واقعیت است؛ بنابراین، نمی تواند پاسخ های دقیق و واقع گرایانه روسازی را تعیین کند. با استفاده از روش های عددی از جمله المان محدود می توان بر این مشکلات غلبه کرد (Kim, 2007). روش های المان محدود یکی از روش های موجود برای تعیین پاسخ های روسازی راه برحسب بارهای ترافیکی اعمال شده و شرایط محیطی است (ARA Inc, 2004).

راهنمای طراحی روسازی مکانیستیک تجربی (MEPDG)، جدیدترین روش طراحی روسازی است که با استفاده از داده های حاصل از برنامه تحقیقاتی استراتژیک بزرگراه (SHRP) و مطالعه عملکرد بلندمدت روسازی (LTPP) توسعه داده شده است (AASHTO, 2008). دو تفاوت بنیادی بین روش طراحی روسازی که قبلاً مورد استفاده قرار می گرفته (AASHTO, 1993) و MEPDG در این است که MEPDG شاخص های عملکردی متعددی را پیش بینی می کند و یک ارتباط مستقیم بین مصالح، طراحی سازه ای، ساخت و ساز، آب و هوا، ترافیک و سیستم مدیریت روسازی ایجاد می کند. این تغییر از یک روش مبتنی بر تجربه به یک مکانیستیک است (Rahman, 2017).

تاکنون برنامه های رایانه ای مختلفی برای تحلیل و طراحی روسازی های انعطاف پذیر براساس نظریه لایه ای برمیستر

(۲)

$$M_R = K_1 \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{K_2}$$

در این رابطه  $K_1$  و  $K_2$  ضرایب ثابت مدل،  $\theta$  تنش حجمی (مجموع سه تنش اصلی) و  $P_a$  فشار اتمسفر (۱۰۱/۳۵۲ کیلوپاسکال) است.

- مدل Bilinear که تابع تنش انحرافی ( $\sigma_d$ ) است، به طور گسترده برای بیان رفتار غیرخطی مصالح ریزدانه استفاده می شود که رابطه آن به شرح زیر است (Thompson & Robnett, 1979):

(۳)

$$M_R = K_1 + K_3 (K_2 - \sigma_d) \quad \sigma_d < K_2$$

$$M_R = K_1 + K_4 (\sigma_d - K_2) \quad \sigma_d > K_2$$

در این رابطه  $K_1$ ،  $K_2$ ،  $K_3$  و  $K_4$  ضرایب ثابت مدل و  $\sigma_d$  تنش انحرافی ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ) است.

- مدل پیشنهادی Uzan (۱۹۸۵)، به شرح زیر است (Uzan, 1985):

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

در این رابطه  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  ضرایب ثابت مدل و  $P_a$  فشار اتمسفر (۱۰۱/۳۵۲ کیلوپاسکال) است.

- مدل Universal، توسط Uzan و Witzcak (۱۹۸۸) برای بستر و مصالح تثبیت نشده پیشنهاد شد که شامل تنش برشی هشت وجهی ( $\tau_{oct}$ ) و تنش حجمی ( $\theta$ )، برای ارزیابی تأثیر ترکیبی از تنش ها است (Witzcak & Uzan, 1988):

$$M_R = K_1 P_a \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{K_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{K_3} \quad (۴)$$

در این رابطه  $\tau_{oct}$  تنش برشی هشت وجهی و  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  ضرایب ثابت مدل است.

- مدل MEPDG، یک مدل تمام لگاریتمی (Log-Log) است که توسط نسخه جدید AASHTO 2002 (راهنمای طراحی روسازی مکانیستیک-تجربی (MEPDG)) برای مصالح تثبیت نشده پیشنهاد شده است (NCHRP, 2004):

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

مدل سازی روسازی با استفاده از نظریه الاستیک لایه ای ساده تر و تحلیل سیستم روسازی توسط رایانه نیازمند زمان کمتری، در مقایسه با روش اجزای محدود است. همچنین کار با برنامه های مبتنی بر نظریه الاستیک چندلایه ای برای کاربران غیر حرفه ای، ساده تر از برنامه های المان محدود است. در بکارگیری روش المان محدود انتخاب شکل صحیح المان ها تأثیر عمده ای بر نتایج تحلیل دارد. در واقع در مدل سازی سیستم هایی که دارای ابعاد مشخص هستند، توانایی روش المان محدود بیشتر است (Huang, 2004). در این پژوهش تلاش شده که نتایج تحلیل غیرخطی سیستم روسازی با استفاده از دو روش نظریه الاستیک چندلایه ای توسط برنامه NonPAS و المان محدود توسط برنامه MICH-PAVE مقایسه شود. برای این منظور از روش های مختلفی برای در نظر گرفتن نقاط تنش و روش اصلاح تنش ها در تحلیل غیرخطی با روش نظریه الاستیک چندلایه ای استفاده شده است؛ بنابراین؛ هدف رسیدن به این نتیجه است که از بین روش های در نظر گرفته شده نتایج کدام یک به همدیگر و کدام یک به نتایج روش المان محدود نزدیک تر است.

## ۲- مدل های غیر خطی مصالح

مدول ارتجاعی بر مبنای کرنش برگشت پذیر تحت اثر تکرار بارگذاری، مدول برجهنگی نامیده می شود؛ بنابراین مدول برجهنگی ( $M_R$ ) از طریق تقسیم تنش انحرافی ( $\sigma_d$ ) به کرنش برگشت پذیر ( $\epsilon_r$ ) مطابق رابطه (۱) تعیین می شود (Huang, 2004). با تعیین پارامتر مدول برجهنگی بستر رسی تثبیت شده امکان تحلیل و طراحی روسازی به روش مکانیستیک تجربی فراهم می شود.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (۱)$$

از جمله مدل های غیرخطی که برای تخمین مدول برجهنگی پیشنهاد شده، می توان به مدل  $K-\theta$ ، مدل Bilinear، مدل Uzan، مدل Universal، مدل MEPDG، NCHRP 1-28 و Semi-Log اشاره کرد. - مدل  $K-\theta$  که تابع تنش حجمی ( $\theta$ ) است، به طور گسترده برای بیان رفتار غیرخطی مصالح دانه ای استفاده می شود که رابطه نرمالایز شده آن به شرح زیر است (Hicks & Monismith, 1971):

مدل غیرخطی شامل مدل Universal, Uzan, K-θ, Semi-Log و NCHRP 1-28, Bilinear, MEPDG وجود دارد. همچنین در این برنامه امکان تحلیل غیرخطی براساس تنش‌های اصلی وجود دارد. که این موارد از جمله مزیت‌های این برنامه نسبت به برنامه‌های مشابه نظیر KENLAYER برای تحلیل غیرخطی روسازی است. در برنامه KENLAYER تنها دو مدل غیرخطی K-θ و Bilinear و دو مکانیزم خرابی ترک خستگی لایه آسفالت و شیارشدگی تعریف شده‌اند و تحلیل براساس تنش‌های اصلی انجام نمی‌شود.

این برنامه شامل چندین سربرگ (تنظیمات پروژه، مشخصات سازه‌ای، بارگذاری، مشخصات نقاط برآورد عکس‌العمل‌ها، تنظیمات مکانیزم‌های خرابی) برای وارد کردن ورودی‌های مورد نیاز جهت تحلیل روسازی و دو سربرگ برای نتایج عکس‌العمل‌های روسازی و نتایج تعداد تکرارها جهت همگرایی در تحلیل غیرخطی است. نتایج تحلیل روسازی شامل تنش‌ها، کرنش‌ها و افت و خیزها در سه جهت اصلی، تنش‌های برشی و تنش‌ها و کرنش‌های اصلی، حداکثر تنش برشی، تنش برشی و کرنش برشی هشتم‌وجهی و حداکثر تنش افقی هستند که می‌توان آن‌ها را در یک فایل متنی ذخیره کرد.



شکل ۱. رابط گرافیکی کاربر برنامه NonPAS.

برای تعیین مدول لایه‌های غیرخطی، استفاده از تنش‌ها در یک یا چندین نقطه در هر لایه غیرخطی از دیدگاه نظری صحیح نیست. از آنجایی که تنش‌ها با فاصله شعاعی از بار تغییر می‌کنند، مدول نیز با فاصله گرفتن از محل بارگذاری تغییر کرده و در طول لایه ثابت نیست؛ بنابراین، این مشکل با نرم‌افزارهای المان محدود نظیر برنامه دانشگاه میشیگان (MICHPAVE) رفع می‌شود و نتایج تحلیل را با دقت بیشتری ارائه می‌دهد (Huang, 2004).

مدل NCHRP 1-28، یک مدل تمام لگاریتمی (Log-Log) است که توسط NCHRP 1-28 برای نمونه‌های تثبیت‌شده پیشنهاد شده است (NCHRP, 1997):

$$M_R = K_1 P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{K_2} \left( \frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{K_3} \quad (6)$$

در این رابطه  $\sigma_3$  تنش اصلی حداقل (تنش محدودکننده) است.

مدل Semi-Log، یک مدل نیمه لگاریتمی است که توسط آندری و همکاران پیشنهاد شده است (Andrei et al., 2004):

$$M_R = K_1 P_a K_2 \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right) K_3 \left( \frac{\sigma_d}{P_a} \right) \quad (7)$$

در این تحقیق از مدل K-θ برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح سنگدانه‌ای و از مدل Bilinear برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح ریزدانه استفاده شده است.

### ۳- معرفی برنامه NonPAS و MICH-PAVE

#### ۳-۱- برنامه NonPAS

این برنامه قادر به تحلیل الاستیک خطی و غیرخطی روسازی‌های انعطاف‌پذیر و تعیین عکس‌العمل‌های روسازی تحت اثر بارگذاری دایره‌ای است که برای این منظور از نظریه الاستیک چندلایه‌ای استفاده می‌کند (Ghanizadeh & Ziaie, 2015). این برنامه همچنین قادر به طراحی مکانیستیک-تجربی با لحاظ نمودن پنج مکانیزم خرابی شامل ترک‌های خستگی (لایه آسفالت و مصالح تثبیت‌شده)، شیارشدگی بستر و خردشدگی (خردشدگی اولیه و خردشدگی پیشرفته) است.

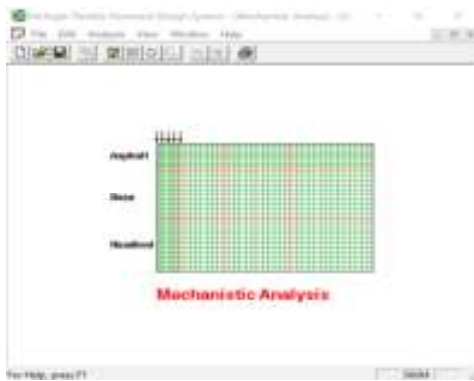
در این برنامه سه روش برای در نظر گرفتن نقاط تنش و اصلاح مقادیر تنش در تحلیل غیرخطی وجود دارد که مبنای روش اول در نظر گرفتن نقاط تنش در وسط لایه (یا زیرلایه‌ها) و صفر کردن تنش‌های کششی (منفی)، روش دوم در نظر گرفتن نقاط تنش در یک‌سوم یا یک‌چهارم بخش فوقانی لایه و تغییر ندادن تنش‌های کششی بدلیل کوچک بودن مقادیر تنش‌های افقی و روش سوم در نظر گرفتن نقاط تنش در وسط لایه (یا زیرلایه‌ها) و اصلاح تنش‌های کششی با استفاده از پوش گسیختگی مور است. در این برنامه امکان تحلیل غیرخطی روسازی انعطاف‌پذیر با استفاده از هفت

### ۲-۳- برنامه MICHPAVE

این برنامه روسازی را به تعدادی اجزای محدود با حلقه‌های متمرکز تقسیم و از معیار گسیختگی موهر-کولمب جهت تصحیح تنش‌های شعاعی استفاده می‌کند.

در این برنامه از مرز انعطاف‌پذیر در یک عمق محدود زیر سطح بستر استفاده می‌شود. خاک بستر زیر مرز انعطاف‌پذیر به عنوان نیم فضای همگن محسوب می‌شود و ماتریس سختی آن با ماتریس سختی بالای مرز انعطاف‌پذیر برای تعیین ماتریس سختی کل برهم‌نهی می‌شود. استفاده از مرز انعطاف‌پذیر تعداد المان‌های مورد نیاز (به‌خصوص المان‌های دراز پایین) را کاهش می‌دهد که حذف این المان‌های دراز و همچنین کمتر بودن معادلات همزمان، منجر به ایجاد نتایج دقیق‌تری می‌گردد.

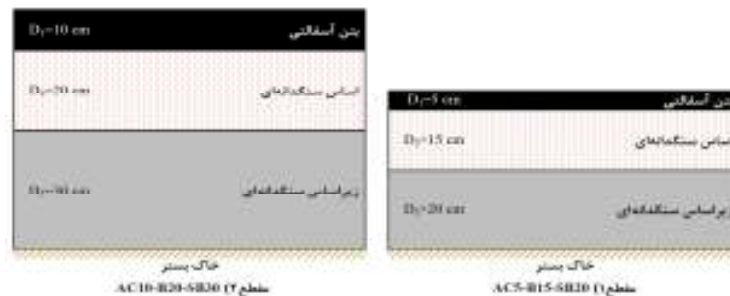
بنابراین، به حافظه و زمان کمتری جهت تحلیل نیاز خواهد بود (Huang, 2004). از جمله محدودیت‌های این برنامه می‌توان به توانایی تحلیل آن فقط برای بارگذاری تک‌چرخ اشاره کرد. همچنین در این برنامه تنها دو مدل غیرخطی  $K-\theta$  و Bilinear پیاده‌سازی شده‌اند.



شکل ۲. رابط گرافیکی کاربر برنامه MICH-PAVE.

### ۴- مقاطع روسازی

در این تحقیق دو مقطع روسازی چهار لایه شامل آسفالت، اساس، زیراساس و بستر به ازای دو دما آسفالت (۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) با استفاده از برنامه NonPAS و MICH-PAVE به منظور مقایسه پنج عکس‌العمل شامل تنش و کرنش شعاعی تار پایین لایه آسفالت، تنش و کرنش قائم روی بستر و نشست سطح روسازی در فواصل شعاعی ۰، ۷/۵، ۱۴/۷۵، ۲۱، ۲۷ و ۳۷/۵ سانتیمتر تحلیل شدند. در این تحلیل‌ها سیستم روسازی توسط بار محور منفرد با چرخ منفرد با فشاری معادل با ۶۹۰ کیلوپاسکال و شعاع تماسی ۱۵ سانتیمتر بارگذاری شد. مشخصات مصالح لایه‌های مختلف در جدول (۱) داده شده است. دو مقطع مورد بررسی در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳. مقاطع روسازی جهت تحلیل

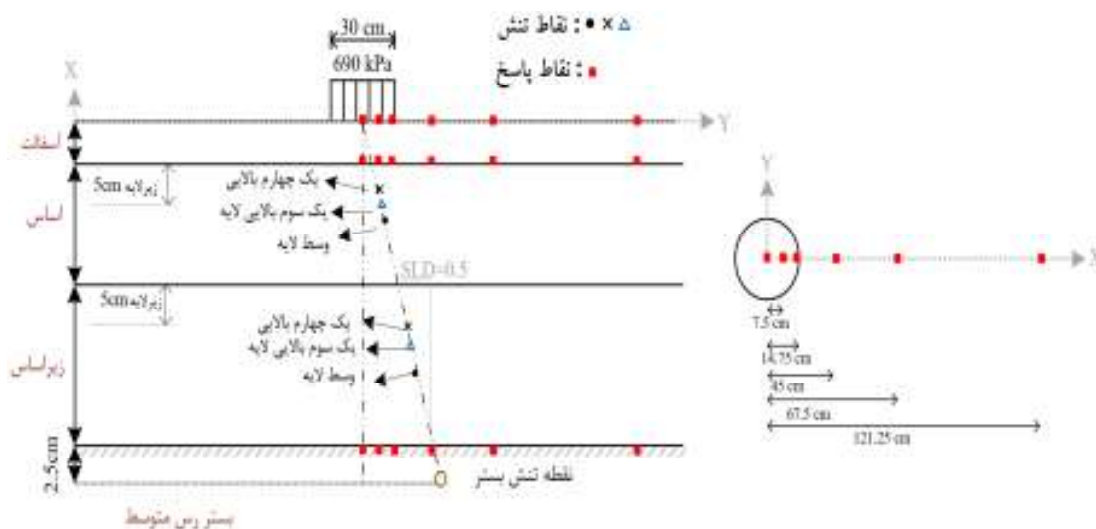
۱. زیرلایه کردن و در نظر گرفتن نقطه تنش در عمق میانی زیرلایه‌ها (اصلاح تنش از طریق صفر کردن تنش‌های کششی)
۲. نقطه تنش در یک چهارم عمق فوقانی لایه (اصلاح تنش از طریق تغییر ندادن تنش‌های کششی)

در تحلیل‌های انجام شده برای در نظر گرفتن نقاط تنش و روش اصلاح تنش‌ها در تحلیل غیرخطی، با استفاده از برنامه NonPAS هفت روش در نظر گرفته شد که عبارتند از:

۳. نقطه تنش در یک سوم عمق فوقانی لایه (اصلاح تنش مانند روش ۲)
۴. نقطه تنش در عمق میانی لایه (اصلاح تنش از طریق دایره مور)
۵. زیرلایه کردن و در نظر گرفتن نقطه تنش در عمق یک چهارم فوقانی زیرلایه‌ها (اصلاح تنش مانند روش ۲)
۶. زیرلایه کردن و در نظر گرفتن نقطه تنش در عمق یک سوم فوقانی زیرلایه‌ها (اصلاح تنش مانند روش ۲)
۷. زیرلایه کردن و در نظر گرفتن نقطه تنش در عمق میانی زیرلایه‌ها (اصلاح تنش از طریق دایره مور)
- در این تحقیق توزیع تنش از مرکز بار و با شیب (SLD) برابر با ۰/۵ برای تعیین موقعیت نقاط تنش در لایه‌های غیرخطی در نظر گرفته شد. شیب توزیع تنش، موقعیت نقاط تنش و نقاط پاسخ برای تحلیل غیرخطی مقاطع در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح لایه‌های مختلف مقاطع روسازی

لایه‌ها	ضخامت (cm)	رفتار مصالح	چگالی ( $\text{KN/m}^3$ )	ضریب پواسون ( $\nu$ )	$K_0$	$\phi$ (°)			
آسفالت	۵	خطی Mr (kPa) دما (°C)	۲۲/۸	-	-	-			
	۱۰						۰/۳۵	۳۱۰۰۰۰۰	۲۵
	۴۰						۰/۴	۱۰۰۰۰۰۰	۴۰
اساس	۱۵	غیر خطی: مدل K- $\theta$ ( $M_R = K_1(\theta)^{K_2}$ ) $K_1$ (kPa)	۲۱/۲	۰/۳۵	۰/۵۵	۳۰			
	۲۰						۱۲۲۱۴/۲	۰/۵۶۱	
زیراساس	۲۰	غیر خطی: مدل K- $\theta$ ( $M_R = K_1(\theta)^{K_2}$ ) $K_1$ (kPa)	۱۹/۶	۰/۴	۰/۶	۲۸			
	۳۰						۹۵۷۱/۶۸	۰/۵۰۷	
بستر	-	غیر خطی: مدل bilinear $K_1$ (kPa) $K_2$ (kPa) $K_3$ $K_4$	۱۸/۸	۰/۴۵	۰/۸	۱۹			
			۱۷۸						
			۴۲/۷۸						
			۱۱۱۰						
			۵۲۹۹۲						

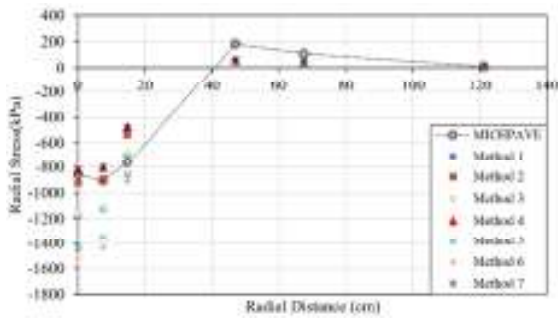


شکل ۴. موقعیت نقاط تنش و نقاط پاسخ برای تحلیل غیرخطی مقاطع روسازی

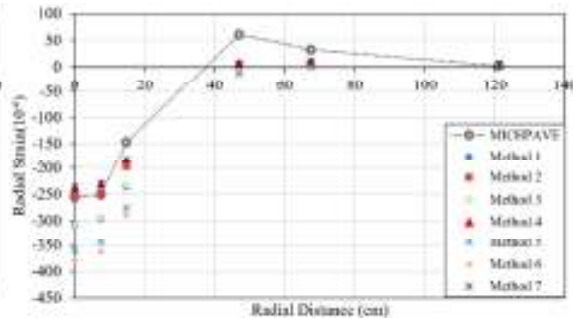
## ۵- نتایج تحلیل‌ها

از مقاطع ذکر شده به صورت نمودار ترسیم شده است تا امکان مقایسه و نتیجه‌گیری بین حالات مختلف وجود داشته باشد. این نمودارها در شکل‌های ۵ تا ۸ ارایه شده است.

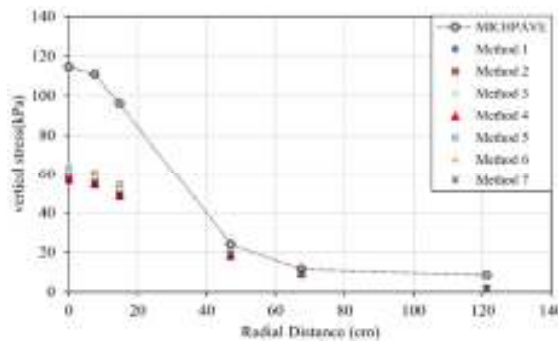
در این تحقیق هدف مقایسه بین نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی با استفاده از دو روش المان محدود و نظریه الاستیک چندلایه‌ای در مقاطع روسازی با ظرفیت باربری مختلف است. برای این منظور نتایج حاصل از تحلیل هریک



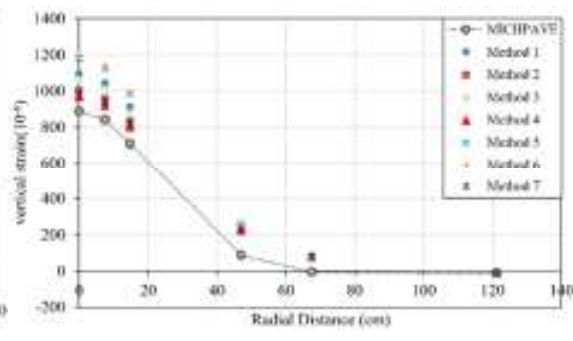
ب) تنش شعاعی تار پایین لایه آسفالت



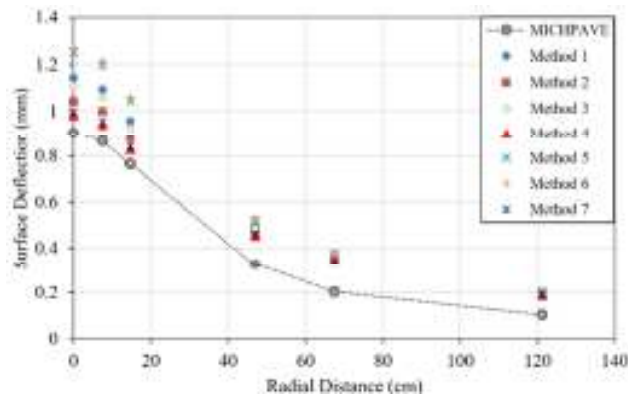
الف) کرنش شعاعی تار پایین لایه آسفالت



د) تنش قائم روی بستر



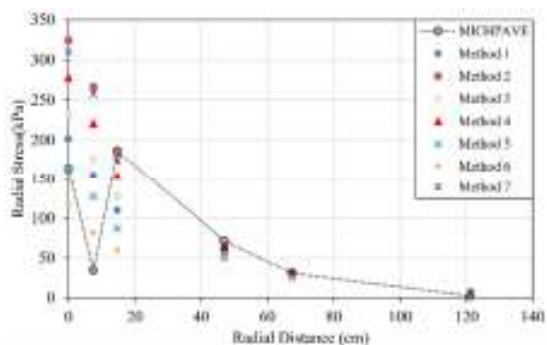
ج) کرنش قائم روی بستر



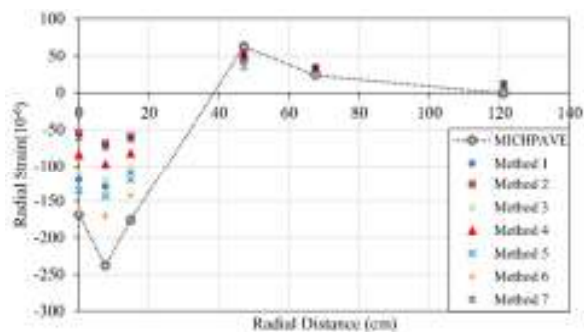
ه) نشست سطح روسازی

شکل ۵. مقایسه نتایج تحلیل مقطع AC5-B15-SB20 با استفاده از برنامه NonPAS و MICHPAVE

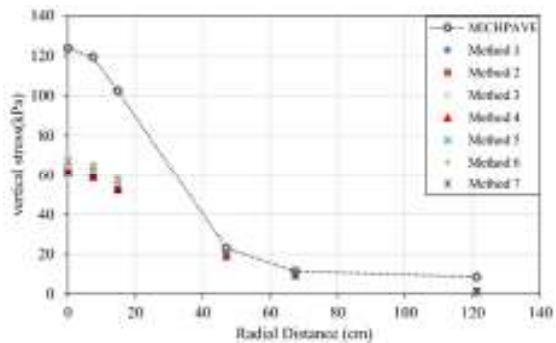
برای دمای آسفالت ۲۵ درجه سانتی‌گراد



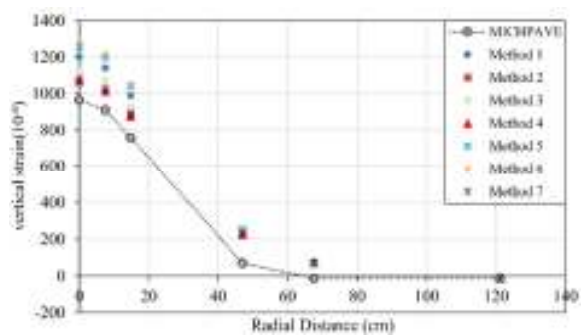
(ب) تنش شعاعی تار پایین لایه آسفالت



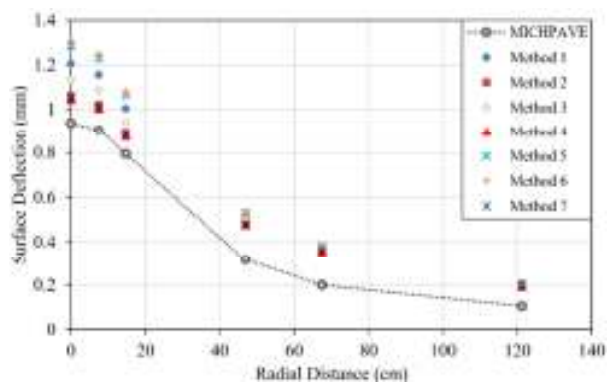
الف کرنش شعاعی تار پایین لایه آسفالت



(د) تنش قائم روی بستر



(ج) کرنش قائم روی بستر

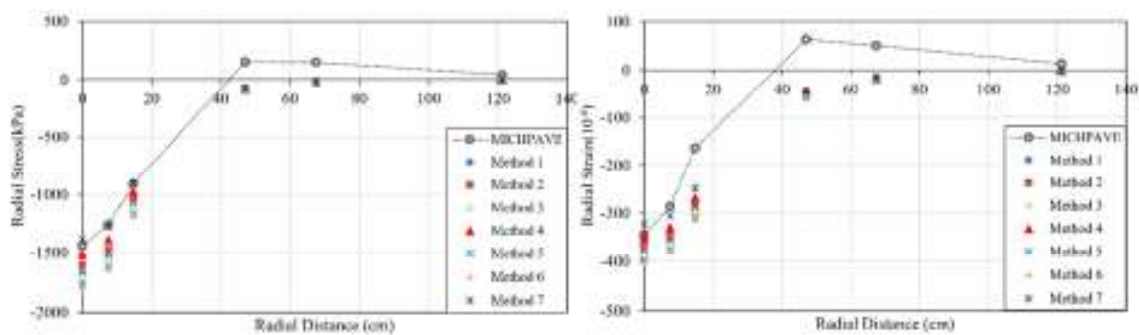


(ه) نشست سطح روسازی

شکل ۶. مقایسه نتایج تحلیل مقطع AC5-B15-SB20 با استفاده از برنامه NonPAS و MICHPAVE

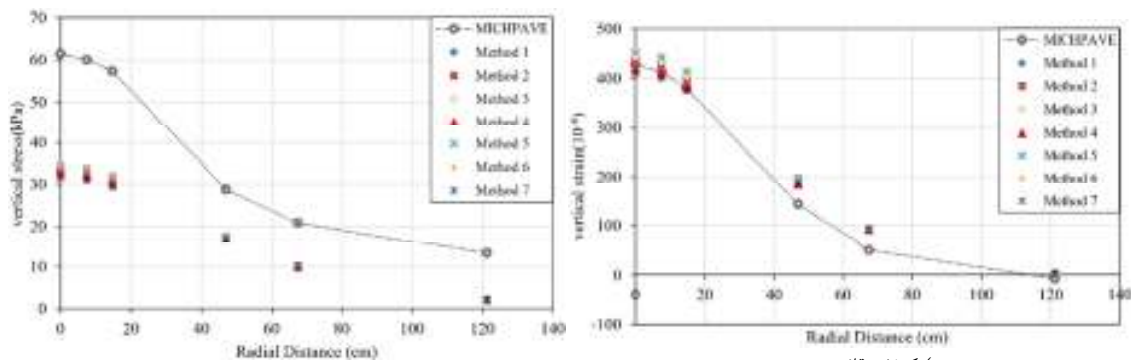
برای دمای آسفالت ۴۰ درجه سانتی‌گراد





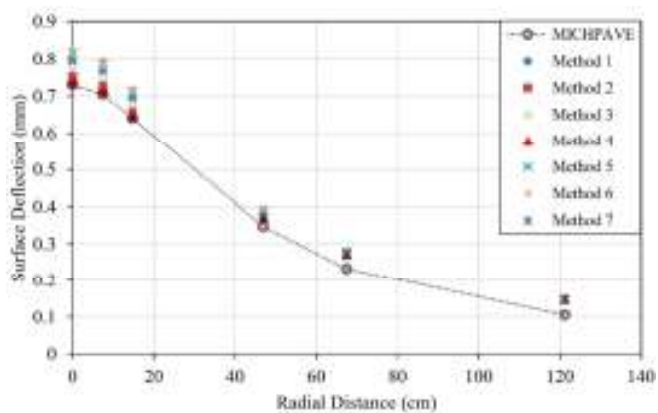
ب) تنش شعاعی تار پایین لایه آسفالت

الف) کرنش شعاعی تار پایین لایه آسفالت



د) تنش قائم روی بستر

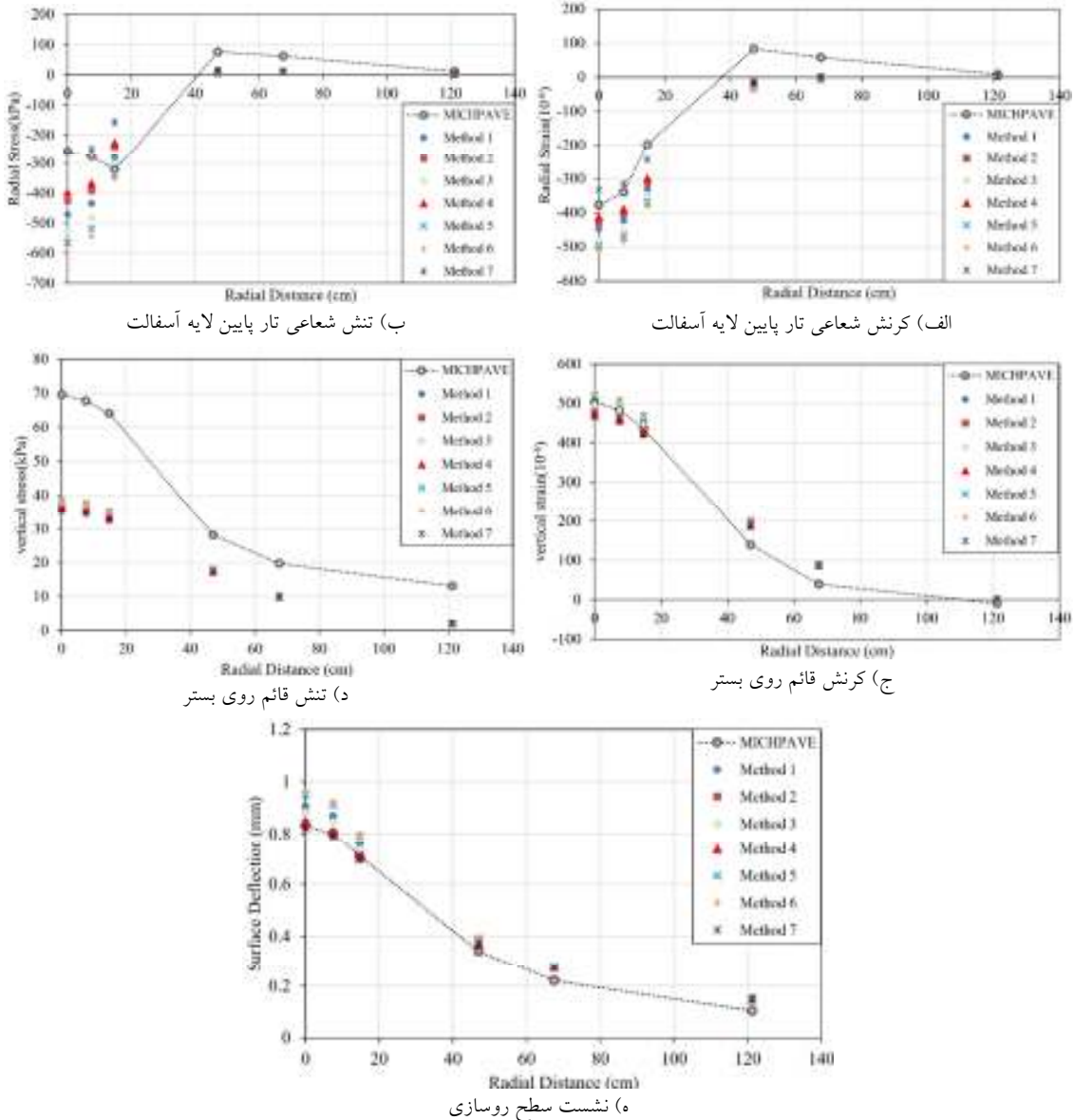
ج) کرنش قائم روی بستر



ه) نشست سطح روسازی

شکل ۷. مقایسه نتایج تحلیل مقطع AC10-B20-SB30 با استفاده از برنامه NonPAS و MICHPAVE

برای دمای آسفالت ۲۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۸. مقایسه نتایج تحلیل مقطع AC10-B20-SB30 با برنامه NonPAS و MICHPAVE برای دمای آسفالت ۴۰ درجه سانتی گراد

## ۲-۵- مقایسه روش‌های تحلیل غیرخطی در نظریه الاستیک چندلایه‌ای

همان‌طور که در شکل‌های ۵ تا ۸ ملاحظه می‌شود، در نقاط زیر بار (۰، ۷/۵ و ۱۴/۷۵) نتایج ۷ روش مختلف تحلیل غیرخطی بر اساس روش نظریه الاستیک چندلایه‌ای (در برنامه NonPAS) دارای اختلاف بیشتری می‌باشند. در مقابل، با دور شدن از محل اعمال بار تقریباً نتایج حاصل از این هفت روش برهم منطبق می‌شوند. میزان اختلاف برای

پاسخ تنش قائم روی بستر در هر دو مقطع بسیار ناچیز است. همچنین برای هر پنج پاسخ مورد بررسی با افزایش ظرفیت باربری روسازی (ضخیم شدن روسازی) از میزان اختلاف‌ها کاسته می‌شود؛ به طوری که برای پاسخ‌های کرنش فشاری روی بستر و نشست سطح روسازی میزان اختلاف نتایج حاصل از روش‌های مختلف ناچیز است. برای مقطع اول حاصل از روش‌های ۲، ۴ و ۷، روش‌های ۱ و ۳ و روش‌های ۵ و ۶ برای تمامی پاسخ‌ها به هم نزدیک بود. به‌طورکلی، در

آسفالت ۲۵ درجه سانتی‌گراد، درصد اختلاف روش ۷ نظریه چندلایه‌ای با روش المان محدود در زیر بار (فاصله شعاعی صفر) برای پاسخ کرنش شعاعی برابر با ۷ درصد، تنش شعاعی برابر با ۴ درصد، کرنش قائم ۱۱ درصد، تنش قائم ۵۱ درصد و نشست سطح روسازی ۱۰ درصد بدست آمد. برای مقطع اول، به ازای دما آسفالت ۴۰ درجه سانتی‌گراد، درصد اختلاف دو برنامه در زیر بار (فاصله شعاعی صفر) برای پاسخ کرنش شعاعی برابر با ۶۳ درصد، تنش شعاعی برابر با ۹۰ درصد، کرنش قائم ۱۲ درصد، تنش قائم ۵۱ درصد و نشست سطح روسازی ۱۲ درصد، بدست آمد. باید توجه داشت که در این مقطع بخصوص و در دمای بالا پاسخ‌های تنش و کرنش شعاعی حاصل از روش تحلیل غیرخطی ۶ کمترین اختلاف را داشتند. برای مقطع دوم، به ازای دما آسفالت ۲۵ درجه سانتی‌گراد، درصد اختلاف دو برنامه در زیر بار (فاصله شعاعی صفر) برای پاسخ کرنش شعاعی برابر با ۶ درصد، تنش شعاعی برابر با ۴ درصد، کرنش قائم ۴ درصد، تنش قائم ۴۹ درصد و نشست سطح روسازی صفر درصد، بدست آمد. برای مقطع دوم، به ازای دما آسفالت ۴۰ درجه سانتی‌گراد، درصد اختلاف دو برنامه در زیر بار (فاصله شعاعی صفر) برای پاسخ کرنش شعاعی برابر با ۱۲ درصد، تنش شعاعی برابر با ۴ درصد، کرنش قائم ۸ درصد، تنش قائم ۵۰ درصد و نشست سطح روسازی ۱ درصد، بدست آمد. می‌توان دید که پاسخ‌های بدست آمده از برنامه NonPAS برای مقطع ضخیم‌تر (مقطع دوم) انطباق بهتری با نتایج حاصله از برنامه MICHPAVE دارند. از طرفی تأثیر ضخیم شدن روسازی بر روی انطباق نتایج حاصل از دو برنامه برای دو پاسخ نشست سطح روسازی و کرنش قائم روی بستر بیشتر بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با ضخیم شدن ساختار روسازی نتایج روش چندلایه‌ای به نتایج روش المان محدود نزدیک می‌شوند.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق دو مقطع روسازی (هر یک با دو دمای آسفالت مختلف) با فرض رفتار ارتجاعی غیرخطی با استفاده هفت روش مختلف تحلیل غیرخطی با استفاده از نظریه چندلایه‌ای تحلیل شدند و نتایج حاصل با نتایج روش المان محدود مقایسه شد.

اکثر موارد اختلاف نتایج حاصل از روش‌های ۲، ۴ و ۷ کم بود و بیشترین اختلاف نتایج بین روش ۶ و ۷ مشاهده شد.

### ۵-۳- مقایسه نتایج دو برنامه NonPAS و MICH-PAVE

ملاحظه شد نتایج حاصل از دو برنامه NonPAS و MICH-PAVE در فواصل شعاعی مختلف در اکثر پاسخ‌ها از نظر انطباق با یکدیگر شرایط یکسانی دارند. البته برای پاسخ تنش قائم روی بستر با دور شدن از محل بارگذاری انطباق دو برنامه با یکدیگر، افزایش می‌یابد. برای مقطع اول، به ازای دما آسفالت ۲۵ درجه سانتی‌گراد، برای تمامی پاسخ‌ها و در تمامی فواصل شعاعی (به جز تنش شعاعی در فاصله شعاعی ۱۴/۷۵ سانتیمتر) روش‌های ۲، ۴ و ۷ و به ازای دما آسفالت ۴۰ درجه سانتی‌گراد، برای پاسخ‌های شعاعی در تمامی فواصل شعاعی (به جز تنش شعاعی در فاصله شعاعی ۱۴/۷۵ سانتیمتر) روش‌های ۵ و ۶ و برای سایر پاسخ‌ها روش‌های ۲، ۴ و ۷ بهترین انطباق را با برنامه MICHPAVE داشتند. برای مقطع دوم، به ازای دما آسفالت ۲۵ درجه سانتی‌گراد، برای تمامی پاسخ‌ها و در تمامی فواصل شعاعی روش‌های ۲، ۴ و ۷ (خصوصاً روش ۷) بهترین انطباق را با برنامه MICHPAVE داشتند. به ازای دما آسفالت ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای پاسخ‌های شعاعی در تمامی فواصل شعاعی (به جز تنش شعاعی در فاصله شعاعی ۱۴/۷۵ سانتیمتر و کرنش قائم) روش‌های ۲، ۴ و ۷ (خصوصاً روش ۷) بهترین انطباق را با برنامه MICHPAVE داشتند. به‌طورکلی می‌توان دید که در اکثر موارد نتایج بدست‌آمده از روش‌های ۲، ۴ و ۷ برنامه NonPAS کمترین اختلاف و نتایج حاصل از روش‌های ۵ و ۶ بیشترین اختلاف را با نتایج برنامه MICHPAVE دارند.

با بررسی نتایج بدست‌آمده از دو برنامه برای پنج پاسخ در نظر گرفته‌شده در این تحقیق مشخص شد که تنها برای پاسخ تنش قائم روی بستر، در هر دو مقطع و در هریک از دماهای آسفالت، اختلاف نتایج حاصل از دو برنامه بسیار زیاد است و برای سایر پاسخ‌ها این اختلاف در حد منطقی است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از روش الاستیک لایه‌ای برای پاسخ تنش قائم روی بستر از دقت کافی برخوردار نیست. برای مقطع اول، به ازای دما

Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1874(1), pp.29-37.

-ARA Inc., (2004), "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", Champaign

-Burmister, D. M., (1943), "The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways. Paper Presented at the Annual Meeting", Highway Res. Board, Natl. Res. Council., Washington, DC.

-De Jong, D. L., Peatz, M. G. F., & Korswagen, A. R., (1973), "Computer Program Bisar: Layered Systems Under Normal and Tangential Loads", External Report AMSR, Konin Klijke Shell-Laboratorium, Amsterdam.

-Finn, F., Saraf, C. L., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W., & Abdullah, A., (1986), "Development of Pavement Structural Subsystems (NCHRP Report 291), Transportation Research Board.

-Ghanizadeh, A. R., & Ziaie, A., (2015), "NonPAS: A Program for Nonlinear Analysis of Flexible Pavements", International Journal of Integrated Engineering, 7(1), pp.21-28.

-Harichandran, R. S., Baladi, G. Y., & Yeh, M. S., (1989), "Development of a Computer Program for Design of Pavement Systems Consisting of Layers of Bound and Unbound Materials (FHWA-MI-RD-89-02), Final Report, Federal Highway Administration

-Hicks, R. G., & Monismith, C. L., (1971), "Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials", Highway Research Record, 345, pp.15-31.

-Huang, Y. H., (2004), "Pavement Analysis and Design (Second Edition)", In Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice-Hall, Incorporated.

-Hwang, D., & Witczak, M. W., (1979), "Program DAMA (Chevron), User's Manual", Department of Civil Engineering, University of Maryland.

-Kim, M., (2007), "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Flexible Pavements Considering Nonlinear Pavement Foundation Behavior (Ph.D. Thesis). Urbana",

۱. برای تمامی مقاطع، نتایج حاصل از هفت روش تحلیل غیرخطی انطباق مناسبی با پاسخ تنش قائم حاصل از برنامه MICHPAVE نداشتند.

۲. با دور شدن از محل بارگذاری و همچنین ضخیم شدن روسازی، برای تمامی پاسخ‌ها اختلاف بین نتایج حاصل از این هفت روش کاهش یافت. تأثیر افزایش ضخامت روسازی بر روی کاهش اختلاف پاسخ‌ها برای پاسخ‌های کرنش فشاری روی بستر و نشست سطح روسازی بیشتر بود.

۳. برای هر دو مقطع، نتایج حاصل از روش‌های ۲، ۴ و ۷، برای تمامی پاسخ‌ها تقریباً نزدیک به یکدیگر بودند و بیشترین انطباق را با برنامه MICHPAVE داشتند. البته باید ذکر کرد که برای مقطع اول به ازای دما آسفالت ۴۰ درجه سانتی‌گراد، برای پاسخ‌های تنش و کرنش شعاعی، روش ۶ بیشترین انطباق را با روش المان محدود داشت.

۴. استفاده از مدول مشابه در کل لایه غیرخطی نمی‌تواند پاسخ‌های مشابه برنامه MICHPAVE داشته باشد. پس می‌توان بهترین روش غیرخطی الاستیک لایه‌ای را از نظر انطباق با روش المان محدود روش ۷ (زیرلایه کردن و در نظر گرفتن نقطه تنش در عمق میانی زیرلایه‌ها و اصلاح تنش از طریق دایره مور) دانست.

## ۷- مراجع

-دفتر نظام فنی اجرایی. (۱۳۹۰)، "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴)"، تهران: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور.

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

-Al-Jhayyish, A. K., (2014), "Incorporating Chemical Stabilization of the Subgrade in Pavement Design and Construction Practices (Master of Science thesis)", the Russ College of Engineering and Technology of Ohio University.

-Andrei, D., Witczak, M. W., Schwartz, C. W., & Uzan, J., (2004), "Harmonized Resilient Modulus Test Method for Unbound Pavement Materials", Transportation

- Rahman, M. M., (2017), "Characterization of Subgrade Resilient Modulus for MEPDG and The Effects on Pavement Rutting (Ph.D. Thesis)", South Carolina: University of South Carolina.
- Selvi, P., (2015), "Fatigue and Rutting Strain Analysis on Lime Stabilized Subgrades to Develop a Pavement Design Chart", *Transportation Geotechnics*, 2, pp.86–98.
- Thompson, M. R., & Robnett, Q. L., (1979), "Resilient Properties of Subgrade Soils. *Transportation Engineering Journal*", 105(1), pp.71–89.
- Uzan, J., (1985), "Characterization of Granular Materials", *Transportation Research Record*, 1022(1), pp.52–59.
- Warren, H., & Dieckmann, W. L., (1963), "Numerical Computation of Stresses and Strains in a Multiple-Layer Asphalt Pavement System", International Report, Chevron Research Corporation, Richmond, CA.
- Witczak, M. W., & Uzan, J., (1988), "The Universal Airport Pavement Design System", Report I of IV: Granular Material Characterization. USA: University of Maryland, College Park.
- Champaign: University of Illinois.
- Kopperman, S., Tiller, G., & Tseng, M., (1986), "ELSYM5, Interactive Microcomputer Version", User's Manual (Report No: FHWA-TS-87). Federal Highway Administration
- NCHRP, (1997), "Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design", (Web Document 14 for Project 1-28), Washington, D.C: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board.
- NCHRP, (2004), "Guide for Mechanistic–Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures (Final Report for Project 1-37A)", Washington, D.C: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board.
- Raad, L., & Figueroa, J. L., (1980), "Load Response of Transportation Support Systems", *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 106(1), pp.111–128.

# Comparison of Critical Responses of Pavements Obtained from Nonlinear Analysis Using Multilayered Theory and Finite Element Method

*Ali Reza Ghanizadeh, Associate Professor, Department of Civil Engineering,  
Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.*

*Mandana Salehi, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Sirjan University  
of Technology, Sirjan, Iran.*

*E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir*

Received: August 2021-Accepted: November 2021

## ABSTRACT

There are several methods for analyzing flexible pavements, where the most widely used of which are the multilayered theory and finite element method (FEM). In this study, two sections of four-layered pavement with assuming two temperatures for surface layer (25 and 40 °C) were analysed and five responses at radial distances obtained from nonlinear analysis using two methods of multilayered theory and finite element method were compared. NonPAS program is employed for nonlinear analysis of these two sections based on the multilayered theory and MICHPAVE program is used for nonlinear analysis of these two sections based on the finite element method. Also, 7 different methods have been used to determine stress points and correct stresses in the multilayered theory method. The results of the analysis showed that only for the vertical stress response on the subgrade, the results of the two programs are very different and for other responses, the difference between the two programs is reasonable. It was also found that the responses obtained from the NonPAS program for a thicker section were in better agreement with the results obtained from the MICHPAVE program. Among the 7 methods considered for determining the stress points in the multilayered method, method 7, which is based on sublayering the nonlinear layer and considering the stress points in the central depth of the sublayers and modifying the radial stresses based on the maximum tensile strength of the materials according to Mohre's failure criterion showed best conformity with the results of MICHPAVE program.

**Keywords:** Nonlinear Analysis, Multilayer Theory, Finite Element Method, NonPAS, MICHPAVE