

تحلیل و مقایسه عملکرد روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر فرودگاهی ایران با استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود FAARFIELD و ABAQUS

مقاله علمی - پژوهشی

*حسن دیوانداری (نویسنده مسئول)، گروه عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

داراب خیری، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ha.divandari@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵

صفحه ۴۷۸-۴۴۷

چکیده

طراحی روسازی فرودگاه‌ها همواره با چالش‌های بسیاری همراه بوده است. زیرا علاوه بر تأمین مقاومت کافی جهت تحمل بار ناشی از عبور هواپیما، اجرای آن نیز باید تا حد ممکن اقتصادی باشند. از این رو محققین نرم‌افزارهای متعددی برای پاسخ به این نیاز ارائه داده‌اند، آخرین نسخه نرم‌افزار ارائه شده توسط سازمان هوانوردی آمریکا (FAA) در این خصوص، FAARFIELD است. این نرم افزار به دلیل استفاده از مدل المان محدود سه بعدی در طراحی روسازی، رفتار واقعی تری از بارگذاری هواپیما بر باند فرودگاه نسبت به نسخه‌های پیشین خود ارائه می‌دهد. در طراحی روسازی فاکتورهای فنی و اقتصادی مختلفی از قبیل حجم ترافیک، هزینه، نوع خاک، شرایط آب و هوایی، مواد و مصالح، دوام، مقاومت، عمر مفید روسازی، تعمیر و نگهداری و مسائل زیست محیطی را باید در نظر گرفت. در این پژوهش با توجه به مدل سازی المان محدود سه بعدی صورت گرفته با استفاده از نرم‌افزارهای FAARFIELD و ABAQUS، به منظور تعیین تنش بحرانی وارد بر روسازی باند فرودگاه و تعیین نواحی بحرانی برای دو نوع روسازی صلب و انعطاف‌پذیر تحت شرایط بارگذاری مجموعه هواپیماهایی که به فرودگاه بین المللی مهرآباد تردد دارند، مدل سازی‌های مختلفی انجام شده است. در فرآیند تحلیل، بعد از مدل سازی بوسیله نرم افزار FAARFIELD در تحلیل دوم با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و پارامترهای خروجی تحلیل اول از قبیل، ضخامت لایه، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون و فرضیاتی بابت تعریف تکیه‌گاه گیردار و شرایط مرزی و تئوری الاستیک و ویسکو الاستیک به ترتیب برای روسازی صلب و انعطاف‌پذیر، مجدداً مدل سازی انجام شد و نتایج خروجی ABAQUS علاوه بر نتایج نتایج FAARFIELD اطلاعات جامع تری در مورد تنش، کرنش، حداکثر جابجایی روسازی و نقاط بحرانی ارائه نمود. حداکثر تنش و جابجایی در اولین لایه روسازی که در تماس مستقیم با بار فشاری ناشی از لندینگ و چرخ هواپیما می‌باشد، متمرکز است. با افزایش عمق لایه به تدریج از مقادیر تنش فشاری، خستگی و ترسکا، همچنین کرنش حداکثر کاسته می‌شود. همچنین تایید شد که در هیچکدام از سناریوها نقطه بحرانی و تسلیم روی سطح باند مشاهده نمی‌شود. بلکه نقاط دارای تنش و جابجایی حداکثر عمدتاً در نقاط مرزی است که این مطلب می‌تواند به علت بحث تمرکز تنش در نقاط مرزی باشد در حالیکه در طول باند به علت گستردگی و وسعت باند این شرایط مرزی وجود ندارد و در صورت وجود درز در روسازی‌های بتنی وسعت این شرایط مرزی محدودتر می‌شود. بنابراین می‌توان با اطمینان خاطر از بخش عمده‌ای از بحث تمرکز تنش در شرایط مرزی، چشم‌پوشی نمود.

واژه‌های کلیدی: شرایط مرزی، تئوری ویسکو الاستیک خطی، المان محدود سه بعدی، FAARFIELD

۱- مقدمه

گرفت. عصر این نوع هواپیماها در سال ۱۹۷۰ میلادی و با ورود اولین هواپیمای پهن پیکر چهار موتوره جهان، بوئینگ ۷۴۷، آغاز شد. به علت ابعاد و وزن زیاد این نوع هواپیماها، هزینه‌های مربوط به ترمیم و نگهداری ناشی از خرابی آنها

با توسعه حمل و نقل هوایی، توجه کارخانه‌های بزرگ هواپیماسازی به سمت بهره‌وری و در نتیجه سود بیشتر، جلب شد. بدین منظور، ساخت و طراحی هواپیماهای پهن‌پیکر مسافری، تجاری و نظامی مورد توجه این شرکت‌ها قرار

و مسافران است، به دلیل ورود بارهای ترافیکی (که بیشتر استاتیک هستند) از روسازی بتنی استفاده می‌شود. عملیات ترمیم این روسازی، زمانبر و پرهزینه می‌باشد و در سایر عملیات پروازی اختلال ایجاد می‌کند. بر اساس تحقیقات انجام شده، روسازی‌های فرودگاه‌ها عمر مفید بیست سال را دارند. گرچه هیچ سازه روسازی بدون مصالح خوب و نگهداری دوره‌ای و پیشگیرانه صحیح، عمر مطلوب را نخواهد داشت. به منظور انتخاب نوع روسازی و لایه‌های آن، محدودیت بودجه، محدودیت‌های عملکردی، زمان ساخت، هزینه و دوره‌های نگهداری مورد انتظار، محدودیت‌های محیطی، مصالح موجود و البته در دسترس، برنامه‌های توسعه فرودگاه در آینده و پیش‌بینی تغییرات ترافیکی باید مورد ارزیابی قرار گیرد. عمر سازه برای طرح به تعداد کل بارگذاری گفته می‌شود که سازه روسازی تا قبل از مضمحل شدن، تحمل می‌نماید. اضمحلال در روسازی صلب زمانی اتفاق می‌افتد که دال بتنی ترک‌های سازه‌ای زیاد و قابل توجه‌ای ناشی از بار داشته باشد. اضمحلال در روسازی انعطاف‌پذیر زمانی اتفاق می‌افتد که به علت از دست رفتن ظرفیت سازه‌ای، بستر نمی‌تواند تنش‌های ناشی از بارگذاری را تحمل نماید. عمر مفید یا عملکردی به دوره زمانی گفته می‌شود که روسازی قادر باشد تا سطح قابل قبولی از خدمت‌دهی را فراهم آورد. سطح قابل قبول خدمت‌دهی با شاخص‌هایی چون FOD، ناهمواری و مقاومت لغزشی سنجیده می‌شود. بعد از مضمحل شدن سازه‌ای روسازی، ممکن است بخش قابل توجهی از عمر عملکردی آن باقی‌مانده باشد. نگهداری صحیح روسازی می‌تواند عمر عملکردی آن را افزایش دهد. برای حداکثر نمودن عمر روسازی انعطاف‌پذیر، درزگیری دوره‌ای و معمول ترک‌ها، اندود سطحی و وصله‌های کوچک مورد نیاز می‌باشد. برای حداکثر نمودن عمر روسازی‌های صلب، درزگیری ترک‌ها، اصلاح و جایگزین‌ها در درزهای دال و وصله‌های نیمه‌عمیق مورد نیاز می‌باشد. به لحاظ تئوری ممکن است برای هر عمر بهره‌برداری، طراحی روسازی خاصی را انجام داد. برای تعیین عمر مورد نیاز باید فاکتورهای ذیل مورد توجه قرار گیرند:

- تغییرات در ترافیک واقعی در قیاس با ترافیک در نظر گرفته شده در طراحی

- کیفیت مصالح مورد استفاده و کیفیت ساخت اولیه

- انجام نگهداری دوره‌ای و پیشگیرانه روسازی

معمولاً انتخاب عمر طراحی به محدودیت‌های مالی وابسته است که جزء سیاست‌های کارفرمایی محسوب می‌شود. معمولاً

بسیار زیاد است. سازمان هوانوردی آمریکا نرم‌افزارهای مختلفی جهت طراحی روسازی فرودگاه‌ها با تاکید بر بررسی اثر صدمات وارده از سوی هر هواپیما در ترافیک مختلط عبوری از باند فرودگاه‌ها، عرضه کرده است. این سازمان LEDGA را در سال ۱۹۹۹ و LEDFAA را در سال ۲۰۰۴ که قابلیت طراحی روسازی‌ها و روکش‌های انعطاف‌پذیر و صلب را دارا می‌باشند، معرفی نموده است. با ورود نسل جدید هواپیماهای پهن پیکر با نحوه چیدمان و آرایش متنوع چرخ‌ها مانند A380 و B777، سازمان هوانوردی آمریکا جدیدترین نرم‌افزار خود، یعنی FAARFIELD که قابلیت طراحی روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر فرودگاه و همچنین تعیین میزان خسارت وارده از سوی هر هواپیما را دارد، در اختیار کاربران قرار داده است. (شفابخش و اکبری، ۱۳۹۱) روسازی باند فرودگاه از جمله مهمترین تسهیلات زمینی فرودگاه‌ها می‌باشد. رفتار و وضعیت سیستم روسازی به علت تاثیر مستقیم چرخ‌های هواپیما بر آن، بر عملکرد ترافیک روسازی اثر بسزایی دارد. بنابراین ضروری است تا با در نظر گرفتن کلیه شرایط طراحی، یک سیستم روسازی مناسب را انتخاب نمود. از جمله عوارض و مشکلات شایع در روسازی‌های انعطاف‌پذیر، ترک‌خوردگی است که یکی از مشکلات عمده در عملکرد طولانی مدت در روسازی انعطاف‌پذیر محسوب می‌شود. (Divandari et al., 2025) (Gholizadeh et al., 2023) مهمترین عامل تاثیرگذار بر این خرابی، بارهای ترافیکی وارد بر روسازی می‌باشد. (Tahmouresi et al., 2025) عامل خستگی نیز که در اثر تناوب بارگذاری بوجود می‌آید، دیگر عامل ترک‌خوردگی می‌باشد که حتی با وجود تعداد تکرار کم بارگذاری ولی به دلیل زیاد بودن شدت تنش‌ها در طراحی روسازی فرودگاه که تحت بارگذاری تناوبی قرار دارد، یکی از مهمترین مسائل مطرح در این خصوص می‌باشد. (Moghimi et al., 2023) تغییرات دما در تشدید پدیده خستگی و حتی در نقش عامل اصلی بروز این پدیده موثر است. ترک‌خوردگی در اثر این پدیده از جمله اصلی‌ترین عوارض روسازی در ایران و سرتاسر دنیا در نواحی معتدل و سردسیر می‌باشد. (اخوان، خبیری و فتوحی، ۱۳۹۰) یکی از مشکلات روسازی بتنی در سطوح پروازی فرودگاه‌ها، لزوم صرف وقت و هزینه زیاد تعمیر و بروز تداخل در عملیات پروازی است. یکی از راه حل‌ها، به ویژه در محل اپرون فرودگاه، که بیشتر تحت تاثیر بار ایستایی هستند، اجرای روسازی بتنی بلوکی است. در اپرون فرودگاه‌ها، که محل توقف هواپیماها و سوار و پیاده نمودن بار

می‌باشند. به منظور بررسی خسارات وارده بر روسازی باند فرودگاه و تاثیر نحوه آرایش چرخ‌ها بر آن مطالعاتی توسط برخی از محققین صورت گرفته است. نرم‌افزارهای FAARFIELD و LEDFAA، به دلیل داشتن قابلیت تعیین سهم هر هواپیما در میزان ضریب صدمات تجمعی، بیش از سایر نرم‌افزارها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با ورود نسل جدید هواپیماهای پهن پیکر با نحوه آرایش چرخ‌های متنوع مانند B777 و A380، سازمان مذکور جدیدترین نرم‌افزار خود، یعنی FAARFIELD که قابلیت طراحی روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر فرودگاه، همچنین تعیین میزان خسارت وارده از سوی هر هواپیما را دارد، در اختیار کاربران قرار داده است. این نرم‌افزار با توجه به توانایی طراحی بر مبنای روش اجزای محدود سه بعدی، رفتار واقعی‌تری از بارگذاری هواپیماها بر روسازی باند پرواز پیش بینی می‌کند و طراحی با آن اقتصادی تر می‌باشد. در سال ۲۰۱۲ شفافبخش و کاشی در مطالعات خود به بررسی میزان خسارات وارده از هواپیماهای مسافربری بر روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که هرچه آرایش چرخ‌ها گسترده‌تر باشد میزان ضریب خسارات تجمعی برای آن هواپیما کمتر بوده و برعکس هرچه آرایش چرخ‌ها در سطح محدودی متمرکز شود، میزان صدمات وارده افزایش می‌یابد. (شفابخش و اکبری، ۱۳۹۱) شن و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از تحلیل المان محدود سه بعدی و بررسی میدانی اثر بارهای ترافیکی و دمایی، ضخامت روسازی بالای ترک، سختی روکش و عوامل دیگر را بر پاسخ‌های بحرانی روسازی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که ترک و درز موجود باعث افزایش تنش‌های کششی و Von Mises می‌شود. همچنین شرایط چسبندگی، مدول الاستیسیته لایه آسفالتی و اساس بر تنش کششی و Von Mises اثر می‌گذارد. (Shen et al., 2017)

برای روسازی فرودگاه عمر طراحی ۲۰ سال و برای بهسازی عمر ۱۰ سال در نظر گرفته می‌شوند. برای فرودگاه‌های بزرگ و متوسط که احتمال تغییرات در ترکیب ترافیک داده نمی‌شود و امکان پیش‌بینی نسبتاً دقیق ترافیک وجود دارد، می‌توان از عمر روسازی بزرگتر با در نظر گرفتن نتایج آنالیز چرخه عمر استفاده نمود. اما در فرودگاه‌های کوچک که امکان تغییرات ترکیب ترافیک زیاد است، در نظر گرفتن عمر بیش از بیست سال توصیه نمی‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

تاکنون مطالعات زیادی به منظور بررسی صدمات وارد بر روسازی فرودگاه‌ها و تاثیر انواع مختلف هواپیما بر آن صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۹ میلادی سازمان هوانوردی امریکا با استفاده از آزمایش‌های میدانی با مقیاس واقعی و از طریق تسهیلات مربوط به شبیه سازی واقعی حرکت هواپیما، انواع مختلف هواپیماها را از لحاظ نحوه آرایش چرخ‌ها و وزن آنها و اثرات هر یک بر روسازی فرودگاه را شبیه سازی نمود. همچنین در سال ۲۰۰۴ کیم و تاتملر در مطالعات خود ضمن بررسی تغییر شکل‌های ماندگار روسازی فرودگاه، آزمایش‌های بسیاری را بر اساس هواپیمای مسافربری و چند نمونه هواپیمای نظامی انجام دادند.

در سال ۲۰۰۵ ونگ و چی پی بر اساس نتایج تحقیقات میدانی در فرودگاه بین المللی چیانگ کای شک تایوان و تعمیم نتایج در محیط سه بعدی نرم‌افزار اجزاء محدود، نشان دادند که مشخصات چرخ‌های اصلی هواپیما بر میزان صدمات وارد بر روسازی نقش تعیین کننده‌ای داشته و در عمر مفید روسازی و میزان ضخامت دال‌های روسازی موثر است. در سال ۲۰۰۶ میلادی مطالعاتی توسط جوئل بر روی چند نرم‌افزار سازمان هوانوردی امریکا از جمله LEDFAA و FEDFAA انجام گرفت و با بهره‌گیری از سوابق گذشته تحلیل و طراحی فرودگاه در دنیا و ضرورت توسعه و پیشرفت آن برای نسل-های آینده هواپیماهای پهن‌پیکر، نتایج بیان گردید. (اخوان، خبیری و فتوحی، ۱۳۹۰)

سازمان هوانوردی امریکا نرم‌افزارهای مختلفی جهت طراحی روسازی فرودگاه‌ها با تاکید بر بررسی اثر صدمات وارده از سوی هر هواپیما در ترافیک مختلط عبوری از باند فرودگاه‌ها عرضه کرده است. این سازمان LEDGA را در سال ۱۹۹۹ و LEDFAA را در سال ۲۰۰۴ معرفی نموده است که قابلیت طراحی روسازی‌ها و روکش‌های انعطاف‌پذیر و صلب را دارا

جدول ۱. جدول خلاصه پیشینه پژوهش

ردیف	نام نویسندگان	عنوان	سال تحقیق
۱	FAA	شبیه سازی واقعی حرکت هواپیماها	۱۹۹۹
۲	کیم و تاملر	بررسی تغییر شکل های ماندگار روسازی در اثر عبور هواپیماهای مسافربری و نظامی	۲۰۰۴
۳	ونگ و چی پی	اثر چرخ هواپیما بر صدمات وارده بر روسازی	۲۰۰۵
۴	جوئل	تحلیل فرودگاه ها با استفاده از LEDFAA و FEDFAA برای نسل هواپیماهای پهن پیکر	۲۰۰۶
۵	شفابخش و کاشی	میزان خسارت وارده از تردد هواپیماهای مسافربری بر روسازی صلب و انعطاف پذیر	۲۰۱۲
۶	Ying wang Chia-Pei & Shih	اثر چرخ هواپیما در میزان صدمات وارده بر روسازی	۲۰۱۴
۷	Shen at al.	اثر بارهای ترافیکی و دمایی با استفاده از تحلیل المان محدود سه بعدی با بررسی میدانی	۲۰۱۷

۳- روش تحقیق

مقایسه قرار گرفت و در نهایت ۲۱ سناریو با ویژگی های مختلف در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت (جدول های ۲ و ۳). این سناریوها در انواع صلب و انعطاف پذیر با نوع لایه بندی آنها بر اساس شرایط خاص هر پروژه از نوع نوسازی یا بهسازی تعریف شده اند. رفتار روسازی های انعطاف پذیر بصورت ویسکو الاستیک و نوع صلب، بصورت الاستیک در نظر گرفته شده است. مقادیر مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، چگالی و ضخامت لایه ها از تحلیل مرحله قبل بوسیله نرم افزار FAARFIELD بدست آمده است. برای تحلیل مدل ها در نرم افزار ABAQUS، از تحلیل دینامیکی استفاده شده است. بار بصورت گسترده خطی در مسیر چرخ های ارابه فرود اصلی و مرکزی هواپیمای طرح، B747-400 بصورت فشاری به سطح روسازی وارد می شود. هواپیمای B747-400 بخاطر وزن سنگین خود، مجهز به دو ارابه فرود اصلی و مرکزی بوده که هرکدام از آنها دارای محور تاندوم و مجموعاً ۱۶ چرخ در محور عقب می باشد. پارامتر بار ناشی از وزن روسازی نیز در کلیه مدل سازی ها لحاظ شده است.

برای کلیه مدل ها در زیر بستر تکیه گاه گیردار با شرایط $U_1=U_2=U_3=0, UR_1=UR_2=UR_3=0$ Encastre تعریف شده و از جهت جابجایی و چرخش سازه در نواحی مرزی به صورت قید $(U_1=U_3=0)$ تعریف شده است. نوع اصطکاک بین لایه ای در مدل های انعطاف پذیر بصورت Frictionless (بدون اصطکاک) و در روسازی صلب بصورت Penalty (با ضریب اصطکاک یک) در نظر گرفته شده است.

این پژوهش بر ارزیابی پاسخ سازه ای روسازی های صلب و انعطاف پذیر فرودگاهی در مدل سه بعدی با استفاده از نرم افزارهای المان محدود FAARFIELD نسخه 2.0.18 و ABAQUS 2018 متمرکز است. تحلیل تنش-کرنش جهت پیش بینی خرابی های روسازی و شرایط مختلف خرابی استفاده می شود. اطلاعات اولیه همچون انواع هواپیما، تعداد پرواز سالیانه آنها و نرخ رشد تخمینی ترافیک هوایی از داده های فرودگاه مهرآباد استخراج شده و به عنوان داده های ورودی به نرم افزار FAARFIELD وارد می شود. نتایج آنالیز فارفیلد به عنوان داده های ورودی در نرم افزار ABAQUS مجدداً مدل سازی شده و با تحلیل تنش-کرنش از نتایج خروجی، پیش بینی خرابی روسازی انجام می شود. چنانچه بار وارده به سازه به آرامی وارد شود و مقدار آن نسبت به زمان ثابت باشد، بار وارده استاتیکی و در صورتیکه بار بصورت ناگهانی و در مدت زمان کوتاه به سازه وارد شود و مقدار آن نسبت به زمان متغیر باشد، بار وارده دینامیکی خواهد بود. در حالت دینامیکی بارگذاری موجب شتاب و اینرسی در کل سیستم سازه خواهد شد. نیروهای دینامیکی با تغییرات زمان، مقادیر مختلفی دارند و برای هر زمان یک پاسخ متفاوت از سازه دریافت می کنند. در صورتی که در نیروهای استاتیکی، نیرو در یک زمان به سازه وارد می شود و تنها یک پاسخ بوجود می آورد. از این رو مسائل دینامیکی بسیار پیچیده تر و زمانبرتر از مسائل استاتیکی هستند. در این پژوهش با استفاده از مدل سازی سه بعدی در نرم افزار المان محدود آباکوس، مقاطع صلب و انعطاف پذیر، شبیه سازی شد و پاسخ های روسازی تحت شرایط مختلف مورد تحلیل و

های سه بعدی جزئیات بیشتری را ارائه می‌کنند و همچنین نمونه شبیه‌سازی شده به واقعیت بسیار نزدیکتر از مدل دو بعدی است، بنابراین نتایج بدست‌آمده از مدل سه بعدی مطمئن‌تر و دقیق‌تر هستند. البته در مدل سه بعدی حجم عملیات و زمان تحلیل، زیاده‌تر می‌باشد.

جدول ۳. سناریوهای روسازی صلب

طراحی سناریوهای مختلف روسازی صلب		
جزئیات طراحی لایه های روسازی	شماره طرح	ردیف
P-501 Pcc Surface P-304 Cement Treated Base	C 1	1
P-501 Pcc Surface P-306 Lean Concrete	C 2	2
P-501 Overlay on flexible P-401/P403 HMA Surface P-209 Crushed Aggregate	C 3	3
P-501 Pcc Surface P-306 Lean Concrete P-209 Crushed Aggregat	C 4	4
P-501 Pcc Surface Variable(Flex)	C 5	5
P-501 Pcc Surface P-401/P403 HMA Stabilized	C 6	6
P-501 Pcc Overlay(unbounded) P-501 Pcc Surface P-209 Crushed Aggregat	C 7	7
P-501 Pcc Surface P-401/P403 HMA Surface P-209 Crushed Aggregat	C 8	8
P-501 Pcc Overlay(unbounded) P-501 Pcc Surface Variable(Rigid) P-209 Crushed Aggregat	C 9	9

۴-۲- تعیین خواص رفتاری اجزای روسازی انعطاف‌پذیر

جهت تعیین بهتر خواص رفتاری مصالح موجود در مخلوط، فرض می‌شود که مخلوط روسازی انعطاف‌پذیر، یک ترکیب دو فازی است. بر این مبنا، دو نوع ماده در مخلوط وجود خواهد داشت:

الف) سنگدانه‌ها که فشارهای وارده را تحمل می‌نمایند و رفتار آنها می‌تواند در تغییر شکل‌های اندک، ارتجاعی فرض گردد.

جدول ۲. سناریوهای روسازی انعطاف‌پذیر

طراحی سناریوهای مختلف روسازی انعطاف‌پذیر		
جزئیات طراحی لایه های روسازی	شماره طرح	ردیف
P-401/P403 HMA Surface P-304 Cement Treated Base P-209 Crushed Aggregate P-154 Uncrushed Aggregate	A 1	1
P-401/P403 HMA Surface P-304 Cemen Treated Base P-154 Uncrushed Aggregate	A 2	2
P-401/P403 HMA Surface P-209 Crushed Aggregate P-154 Uncrushed Aggregate	A 3	3
P-401/P403 HMA Surface P-401/P403 HMA Stabilized P-209 Crushed Aggregate	A 4	4
P-401/P403 HMA Overlay P-401/P403 HMA Surface P-209 Crushed Aggregate	A 5	5
P-401/P403 HMA Overlay P-401/P403 HMA Surface Variable(Rigid) Variable(Flex)	A 6	6
P-401/P403 HMA Overlay P-401/P403 HMA Surface Variable(Flex) P-209 Crushed Aggregate	A 7	7
P-401/P403 HMA Overlay P-401/P403 HMA Surface Variable(Flex)	A 8	8
P-401/P403 HMA Overlay P-501 Pcc Surface Variable(Rigid) P-209 Crushed Aggregate	A 9	9
P-401/P403 HMA Overlay P-401/P403 HMA Surface Variable(Flex) Variable(Flex)	A 10	10
P-401/P403 HMA Overlay P-501 Pcc Surface P-209 Crushed Aggregate	A 11	11
P-401/P403 HMA Overlay P-501 Pcc Surface P-401/P403 HMA Stabilized P-209 Crushed Aggregate	A 12	12

۴- ساخت مدل

۴-۱- ابعاد نمونه

ساخت مدل اجزای محدود، در پنج گام اصلی که عبارتند از: ساختار هندسی، مشخصات و خواص مصالح، بارگذاری، شرایط مرزی و مش‌بندی انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه مدل

واقعی تری را نسبت به حالت الاستیک ارائه می‌کند، بنابراین این گروه از روسازی‌ها بر مبنای تئوری ویسکوالاستیک با ضرایب سری پرونی مورد نیاز برای حالت ویسکوالاستیک، و روسازی های صلب بر مبنای تئوری الاستیک در نرم افزار آباکوس مدل سازی می‌شود. برای خصوصیات الاستیک لایه‌ها پارامترهای مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به همراه چگالی تعریف شده است در حالی که برای خصوصیات ویسکو الاستیک لایه‌ها، لازم است سری پرونی در محیط ABAQUS تعریف شود.

۴-۴-۱- سری پرونی

سری پرونی یک سری نمایی است که رابطه تنش و کرنش را برای یک سیستم ویسکو الاستیک خطی (که بوسیله یک مدل فنر- میراگر نمایش داده می‌شود) بیان می‌کند. سری پرونی توسط روابط زیر تعریف می‌شود.

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i (1 - e^{-(t/t_i)^{p_i}}) \quad (1)$$

$$g(t) = G(t)/G(t=0)$$

در این روابط $g(t)$ نسبت مدول برشی، $G(t)$ مدول برشی در لحظه (t) و پارامترهای t_i و g_i ثابت‌های پرونی هستند (جدول ۴) که وابسته به مشخصات مصالح بوده و پارامتر t هم نمایش دهنده زمان است.

جدول ۴. سری پرونی (طاهرخانی و صفاری، ۱۳۹۸)

مشخصات سری پرونی								نوع لایه
۰/۰۹۷	۰/۰۸۳	۰/۱۱۴	۰/۱۲۷	۰/۱۳۸	۰/۱۱۲	۰/۱۳۲	۰/۰۴۹	G_i
۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۱	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱	T_i

۴-۶- شرایط تماس

انتخاب مشخصات مکانیکی سطح تماس مشترک نقش مهمی در پاسخ روسازی بسته به نوع تماس خواهد داشت. چسبندگی بین لایه روکش و لایه بتنی زیرین، بصورت چسبندگی کامل در نظر گرفته شده است. برای اعمال شرایط تماس مماسی بین لایه‌ها از روش Penalty استفاده شده و ضریب اصطکاک یک برای سطح تماس روکش و بتن در نظر گرفته شد. نوع

(ب) ماستیک که شامل قیر و ریزدانه‌های کمتر از ۲ میلی‌متر است و دارای رفتار ویسکوالاستیک هستند.

با این حال، درصد قابل توجهی از مخلوط ماستیک را ریزدانه های با رفتار ارتجاعی خطی تشکیل می‌دهند. ریزدانه‌ها به عنوان مسلح کننده، رفتار نرم قیر را تا حد زیادی تحت تاثیر قرار می‌دهند. از این رو، به نظر می‌رسد فرض رفتار ویسکوالاستیک در شبیه سازی، به شرایط واقعی نزدیک باشد.

۴-۳- تعیین خواص رفتاری اجزای روسازی صلب

مدل سازی روسازی صلب در محیط نرم افزار ABAQUS شامل مصالحی با مشخصات دال بتنی، اساس تثبیت شده با سیمان، زیراساس سنگدانه‌ای و بستر طبیعی می‌باشد. تحلیل با فرض رفتار الاستیک خطی لایه‌های روسازی و حالت بارگذاری دینامیکی انجام شده است. در روسازی انعطاف پذیر مدل سازی شامل مصالح رویه آسفالتی، زیر اساس، اساس و بستر طبیعی می‌باشد. تحلیل این نوع روسازی با فرض رفتار ویسکوالاستیک خطی و حالت بارگذاری دینامیکی انجام شده است.

۴-۴- معرفی رفتار و خواص مدل

بر اساس تحقیقات انجام شده قبلی، با توجه به اینکه در مدل سازی روسازی انعطاف پذیر، حالت ویسکوالاستیک نتایج

۴-۵- بارگذاری مدل

می‌توان بارهای وارده از طرف هواپیما بر سطح باند را به دو گروه عمده بارهای قائم و افقی تقسیم کرد. در روش‌های متداول برای بارگذاری یک روسازی جهت تحلیل نرم افزاری، از بارگذاری قائم ناشی از وزن هواپیما استفاده می‌گردد. نحوه وارد شدن این بارها عمدتاً بصورت فشاری و در جهت قائم به سمت پایین می‌باشد.

توزیع نیروی بار هواپیما بر روی روسازی باند را مشخص می کند. این ویژگی‌ها به صورت پیش فرض در نرم‌افزار FAARFIELD در نظر گرفته شده است. فشار چرخ بسته به پیکربندی بدنه هواپیما، وزن ناخالص و اندازه لاستیک، متفاوت است. فشار تایر و وزن ناخالص در FAARFIELD به یکدیگر مرتبط هستند. نرم‌افزار FAARFIELD یک سطح تماس ثابت را حفظ می‌کند، بنابراین افزایش وزن ناخالص باعث افزایش متناسب فشار چرخ می‌شود. فشار چرخ تأثیر قابل توجهی بر کرنش‌های لایه سطحی آسفالت نسبت به سطح زیرین دارد. روسازی‌های انعطاف‌پذیر ساخته شده مطابق با کد P-401 عموماً فشار چرخ‌ها را تا $1/75$ مگاپاسکال تحمل می‌کند. فشار چرخ تأثیر ناچیزی بر طراحی روسازی صلب دارد. برای طراحی روسازی از پیش‌بینی حرکت سالانه بر اساس نوع هواپیما از جمله تمام هواپیماهایی که از روی روسازی عبور خواهند کرد، استفاده می‌شود. هواپیماهای فصلی یا سایر هواپیماهای غیرمعمول، تأثیر قابل توجهی بر ساختار روسازی مورد نیاز نخواهند داشت. به طور کلی، روسازی‌های فرودگاه تنها با توجه به هواپیماهای خروجی طراحی می‌شوند. دلیل اصلی در نظر نگرفتن هواپیماهای ورودی در طراحی این است که معمولاً وزن هواپیماهای ورودی بسیار سبک‌تر از وزن هواپیماهای خروجی هستند (به دلیل سوخت مصرف شده).

زمانی که نشست یک هواپیما سنگین با تعداد کم، طراحی سازه روسازی را تحت تأثیر قابل توجه قرار می‌دهد، برای تعیین تأثیر این هواپیما، تحلیل حساسیت انجام می‌شود. از ترکیب ترافیک پیش‌بینی شده هواپیماها، برای محاسبات طراحی روسازی استفاده می‌شود. طراحی روسازی برای ترافیک معادل یک «هواپیما طراحی» به جای ترکیب واقعی هواپیماها، می‌تواند منجر به نتایج اشتباه شود. اگر هواپیما خاصی در ناوگان هوایی در بانک اطلاعات هواپیماهای FAARFIELD وجود نداشته باشد، کاربر می‌تواند هواپیماهای نزدیک را از گروه عمومی جایگزین کند و یا یک هواپیما تعریف شده توسط کاربر بر اساس ویژگی‌های چرخ‌های آن ایجاد شود. در برخی شرایط، وسایل نقلیه غیرهوایی مانند امداد و نجات هواپیما، آتش‌نشانی، برف‌روبی، تجهیزات سوخت رسانی، تجهیزات سوار شدن مسافران یا تجهیزات خدمات زمینی ممکن است بار چرخ‌های سنگین‌تری را نسبت به هواپیما به روسازی اعمال کند. نرم‌افزار FAARFIELD اجازه

اصطکاک بین لایه‌ای در مدل‌های انعطاف‌پذیر بصورت Frictionless (بدون اصطکاک) در نظر گرفته شده است.

مطالعات ژئوتکنیک

بررسی‌های ژئوتکنیک شامل مطالعات صحرایی از جمله عملیات حفاری و نمونه‌گیری، در دو سطح کم عمق (کمتر از ۴ متر) و متوسط (تا عمق ۲۵ متر) به همراه آزمایش‌های صحرایی (CBR صحرایی، آزمایش مخروط نفوذ استاتیکی، آزمایش نفوذ دینامیکی) و آزمایش‌های آزمایشگاهی (تعیین دانه‌بندی و بافت خاک، CBR آزمایشگاهی، تعیین میزان تراکم لایه‌های خاک، درصد رطوبت و وزن مخصوص خاک محل، درصد قیر) جهت شناسایی لایه‌های زیرین خاک و انجام آزمایش بارگذاری صفحه روی آسفالت و روی خاک جهت تعیین پارامترهای مقاومتی، انجام گردید.

همچنین به منظور تکمیل اطلاعات، آزمایش‌های ژئوفیزیکی در دو بخش مطالعات رادار نفوذی زمین به روش دو بعدی و مطالعات ژئوالکترونیک به روش GPR جهت شناسایی لایه‌های زیرین به صورت پروفیل در طول باند، تاکسی‌وی‌ها و محل های نشست آب، انجام گرفت. براساس نتایج آزمایش‌های نفوذ استاندارد انجام شده و آزمایش کاوشگر دینامیکی، تراکم خاک در محدوده مورد مطالعه تا کف عمق حفاری شده خوب ارزیابی می‌شود. (مطالعات اپرون غربی مهرآباد، 1402)

ملاحظات ترافیک هواپیماها

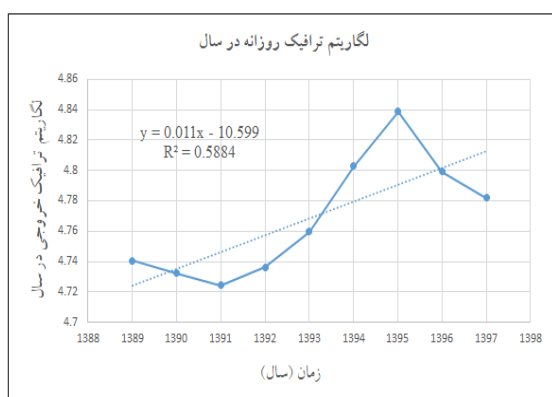
بار در نظر گرفته شده برای روسازی‌ها بر مبنای حداکثر وزن برخاست پیش‌بینی شده هواپیماها که به طور منظم روی روسازی تردد دارند، انتخاب می‌شود. نرم‌افزار FAARFIELD وزن عملیاتی ناخالص و توزیع بار توصیه شده توسط سازنده را برای بسیاری از هواپیماهای غیرنظامی و نظامی ارائه می‌دهد. برای هواپیماهای عمومی، ۹۵ درصد وزن بار در حین نشست هواپیما به چرخ‌های عقبی و ۵ درصد به چرخ‌های دماغه، اعمال می‌شود. استفاده از حداکثر وزن پیش‌بینی شده برای برخاستن، طراحی محافظه‌کارانه‌ای را فراهم می‌کند که امکان تغییر در کاربری عملیاتی و ترافیک را بوجود می‌آورد. نوع چرخ هواپیما، ویژگی‌های آن مانند فشار چرخ و آرایش آنها، نحوه

منطقه دارای رشد نسبتاً پایداری باشد، فرآیند پیش بینی تا حد زیادی بر مبنای داده‌های گذشته انجام می‌شود. تعداد متوسط پرواز خروجی سالیانه جهت طرح روسازی به تفکیک نوع هواپیما امری ضروری است. به همین منظور آمار ترافیک ۱۰ سال اخیر فرودگاه بین‌المللی مهرآباد مورد بررسی قرار گرفت. پس از تعیین ضریب رشد ترافیک، آمار ترافیک سال مبنای طرح به تفکیک نوع هواپیما در این قسمت آورده شده است. یک روش مناسب برای پیش بینی ترافیک، تحلیل آمار سال‌های گذشته و تخمین ضریب رشد سالیانه ترافیک می‌باشد. برای تعیین ضریب رشد متوسط سالانه ترافیک با استفاده از آمارهای موجود، از روش رگرسیون استفاده می‌شود. در روش رگرسیون پس از ترسیم نمودار، لگاریتم تعداد پرواز خروجی (برحسب متوسط سالانه ترافیک) نسبت به زمان (بر حسب سال)، مقدار ضریب رشد ترافیک (r)، با استفاده از بهترین خط برازش به نمودار و براساس روابط ذیل محاسبه می‌شود. در این روابط: Y ترافیک، x زمان برحسب سال، A شیب نمودار و r ضریب رشد سالانه است.

$$\text{Log } y = \text{Log } y_0 + x \text{Log}(1+r) \quad \text{و} \quad Y = y_0(1+r)^x \quad (2)$$

$$\text{Log } y = Ax + B \quad \text{و} \quad A = \text{Log}(1+r) \quad \text{و} \quad r = 10^{A-1}$$

نمودار لگاریتمی تعداد پروازهای سالیانه بر حسب سال در شکل ۱ ترسیم شده است و با استفاده از روابط فوق ضریب رشد سالیانه ترافیک پروازی برابر با ۲/۵ درصد بدست آمد.



شکل ۱. نمودار لگاریتمی تعداد پرواز خروجی فرودگاه مهرآباد

تعیین هواپیمای مبنای طرح

در پیش‌بینی تعداد پروازهای سالیانه، انواع هواپیماها با تعداد پروازهای متفاوت وجود دارند. هواپیمای مبنای طرح باید

می‌دهد تا این نوع وسایل نقلیه در ترکیب ترافیک گنجانده شوند. گروه وسایل نقلیه غیرهوایی شامل چندین نوع متداول محورکامیون (تک، جفت، دو محور تک و دو محور جفت) است. محورهای کامیون گنجانده شده برای اکثر طرح‌های روسازی سبک مناسب هستند.

یک هواپیما به ندرت در امتداد یک بخش روسازی در یک مسیر کاملاً مستقیم یا هر بار در امتداد یک مسیر حرکت می‌کند. این حرکت جانبی به عنوان انحراف هواپیما شناخته می‌شود و با توزیع نرمال مدل‌سازی می‌شود. همانطور که یک هواپیما در امتداد تاکسی‌وی یا باند فرودگاه حرکت می‌کند، ممکن است چندین سفر یا عبور در امتداد روسازی برای یک نقطه خاص اتفاق بیافتد. نسبت تعداد عبورهای مورد نیاز برای اعمال یک پوشش به واحد سطح روسازی با نسبت عبور به پوشش (P/C) بیان می‌شود. تعداد عبورهایی که ممکن است یک هواپیما در یک روسازی مشخص انجام دهد به راحتی قابل مشاهده است، اما تعداد پوشش‌ها به صورت ریاضی در FAARFIELD به دست می‌آید. مطابق با تعریف، یک پوشش زمانی اتفاق می‌افتد که یک واحد سطح روسازی حداکثر پاسخ (تنش برای روسازی صلب، کرنش برای روسازی انعطاف‌پذیر) ناشی از یک هواپیمای معین را تجربه کند. برای روسازی‌های انعطاف‌پذیر، پوشش‌ها معیاری برای تعداد تکرارهای حداکثر کرنش هستند که در بالای بستر رخ می‌دهد. برای روسازی‌های صلب، پوشش‌ها معیاری برای تکرار حداکثر تنشی است که در پایین لایه صلب رخ می‌دهد. پوشش‌های حاصل از عملیات یک نوع هواپیمای خاص تابعی از تعداد عبور هواپیما، تعداد و فاصله چرخ‌ها روی چرخ‌های فرود اصلی هواپیما، عرض ناحیه تماس چرخ و توزیع جانبی مسیر چرخ نسبت به خط مرکزی روسازی است.

مطالعات ترافیک فرودگاه

در پیش‌بینی تقاضای ترافیک آینده فرودگاه، دقت عمل به پارامترهای مختلفی از قبیل میزان دسترسی به داده‌های آماری، دوره زمانی هدف پیش‌بینی، سطح و نوع فعالیت‌های جغرافیایی و عملکردی فرودگاه که در مطالعات طرح راهبردی (استراتژیک) و طرح‌های سیستمی بررسی شده، بستگی دارد. عبور مکرر هواپیماهای با سرعت کم، شدیدترین باری است که روسازی فرودگاه تحمل می‌کند. پیش‌بینی ترافیک برای فرودگاه موجود و فرودگاه جدید متفاوت است. در مواردی که فرودگاه موجود، در سال‌های گذشته فعالیت داشته و روند ترافیک

است که هواپیمای مبنای طرح روسازی، لزوماً سنگین‌ترین هواپیمای پیش‌بینی شده نیست. هواپیمای طرح، هواپیمایی است که بیشترین میزان صدمه را براساس وزن کل پیش‌بینی شده و تعداد پرواز سالیانه بوجود می‌آورد. بر این اساس هواپیمای طرح بر مبنای ترافیک هوایی فرودگاه مهرآباد، هواپیمای B747-400 انتخاب شد.

طوری انتخاب شود که بزرگترین ضخامت روسازی را ارائه کند. برای این انتخاب ابتدا ضخامت روسازی مورد نیاز برای هر نوع از هواپیماهای موجود با تعداد پرواز سالیانه پیش‌بینی شده مربوط به آن محاسبه شده و هر نوع از این هواپیماها که بیشترین ضخامت را موجب می‌شود، بعنوان هواپیمای مبنای طرح روسازی انتخاب می‌شود. نکته قابل توجه در اینجا این

جدول ۵. آمار ترافیک ۱۰ سال اخیر فرودگاه بین‌المللی مهرآباد (مطالعات بهسازی اپرون غربی فرودگاه مهرآباد، ۱۴۰۰)

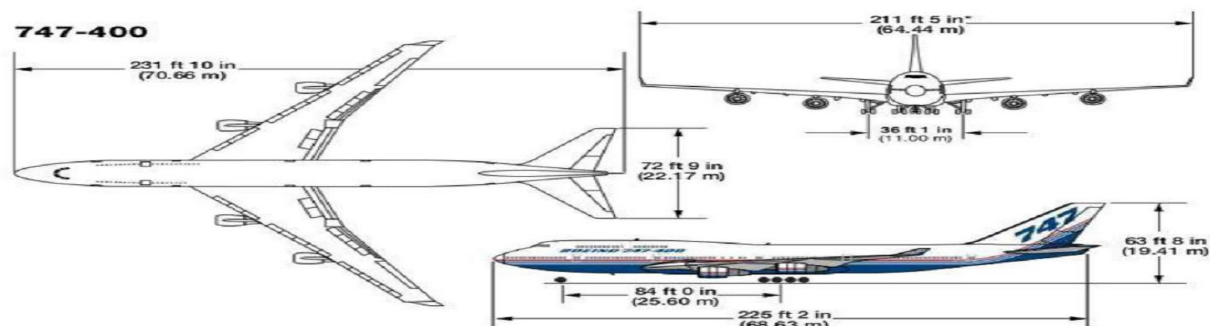
سال	تعداد پرواز خروجی در سال	تعداد پرواز ورودی در سال	جمع کل	متوسط ترافیک خروجی در روز	متوسط ترافیک	جمع کل
۱۳۸۹	۵۴۴۱۷	۵۴۰۷۸	۱۰۸۴۹۵	۱۴۹	۱۴۸	۲۹۷
۱۳۹۰	۵۴۳۴۲	۵۳۹۵۳	۱۰۸۲۹۵	۱۴۹	۱۴۸	۲۹۷
۱۳۹۱	۵۴۴۰۶	۵۴۲۰۸	۱۰۸۶۱۴	۱۴۹	۱۴۹	۲۹۸
۱۳۹۲	۵۴۹۹۲	۵۴۹۸۹	۱۰۹۹۸۱	۱۵۱	۱۵۱	۳۰۱
۱۳۹۳	۵۷۰۴۵	۵۷۰۸۹	۱۱۴۱۳۴	۱۵۶	۱۵۶	۳۱۳
۱۳۹۴	۶۶۹۱۴	۶۶۹۴۹	۱۳۳۸۶۳	۱۸۳	۱۸۳	۳۶۷
۱۳۹۵	۷۱۷۲۸	۷۱۷۱۱	۱۴۳۴۳۹	۱۹۷	۱۹۶	۳۹۳
۱۳۹۶	۶۳۰۰۷	۶۳۰۲۳	۱۲۶۰۳۰	۱۷۳	۱۷۳	۳۴۵
۱۳۹۷	۶۰۳۳۷	۶۰۳۷۰	۱۲۰۷۰۷	۱۶۵	۱۶۵	۳۳۱
۱۳۹۸	۵۷۶۳۳	۵۷۶۰۳	۱۱۵۲۳۶	۱۵۸	۱۵۸	۳۱۶

تعداد پرواز مبنای سال طرح

جدول ۶. مشخصات فنی هواپیمای B747-400

مقادیر	پارامتر
B 747-400	مدل هواپیما
۳۹۷۸۰۱ کیلوگرم	وزن ناخالص زمان تیک‌آف
۱۶۷۹۷۳ میلی متر مربع	پهنای سطح تماس لاستیک
۱۳۷۸،۹۵ کیلو پاسکال	فشار تایر

برای طراحی ضخامت روسازی، تعداد پروازهای خروجی از فرودگاه مورد نیاز می‌باشد. در جدول ۵ تعداد پروازهای سال‌های اخیر نشان داده شده است. با توجه به جدول مذکور و نمودار لگاریتمی شکل ۱، نرخ رشد سالیانه ترافیک پروازی فرودگاه، برابر ۲/۵ درصد اندازه‌گیری و بر این مبنای طراحی انجام گردید. مشخصات هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ در جدول ۶ و شکل ۲، ارائه شده است.



شکل ۲. مشخصات هواپیمای B747-400 (مطالعات بهسازی اپرون غربی فرودگاه مهرآباد، ۱۴۰۰)

رتبه‌بندی فرودگاه بین‌المللی مهرآباد

در طراحی فرودگاه، بزرگترین هواپیمایی که مورد انتظار است در فرودگاه تردد نماید، به عنوان هواپیمای طرح در نظر گرفته می‌شود و رتبه‌بندی بر اساس مشخصات هواپیمای طرح شامل طول بال و طول مورد نیاز برای بلند شدن هواپیما در حداکثر جرم در سطح دریا، فشار استاندارد، هوای مناسب و شیب صفر باند، انجام می‌شود. رتبه‌بندی فرودگاه به جهت اطمینان از مناسب بودن مشخصات فرودگاه برای هواپیمای طرح انجام می‌شود. سازمان بین‌المللی هواپیمایی کشوری (ایکائو) از یک سیستم کدبندی دو قسمتی به عنوان کد مرجع فرودگاه برای طبقه‌بندی استانداردهای طرح هندسی فرودگاه استفاده می‌کند. اعداد این کد از ۱ تا ۴ نشان‌دهنده طبقه‌بندی طول قابل استفاده باند پرواز یا طول ناحیه پروازی و حروف کد از A تا F نشان‌دهنده هواپیماهای استفاده‌کننده از فرودگاه بر اساس طول دهانه بال و دهانه خارجی چرخ‌های اصلی محور عقب می‌باشد. بر این اساس رتبه فرودگاه بین‌المللی مهرآباد، E۴ می‌باشد.

ملاحظات طراحی روسازی فرودگاه

توصیه می‌شود که لایه‌های زهکش برای روسازی‌هایی استفاده شود که به هواپیمایی بیش از ۲۷ تن، سرویس می‌دهند و یا در مناطقی ساخته می‌شوند که رطوبت زیر سطحی زیادی وجود دارد و مناطقی که ضریب نفوذپذیری خاک کمتر از ۶ متر در روز باشد. به هر حال ضرورت اجرای این لایه یا عدم نیاز به آن باید در طی مطالعات مشخص گردد.

نیازهای تراکم در FAARFIELD بر اساس مفهوم شاخص تراکم تعیین می‌گردد. این برنامه پس از آنالیز طراحی ضخامت، نیازهای تراکم را براساس استانداردهای ASTM D698 یا ASTM D1557 ارائه می‌کند. استاندارد ASTM D698 برای هواپیمایی با بار کمتر از ۲۷ تن و ASTM D1557 برای هواپیمایی با بار بیشتر از ۲۷ تن، استفاده می‌شود. در واقع این برنامه برای طرح روسازی و ترافیک مشخص، نیازمندی‌های

تراکم را محاسبه می‌نماید و جداول حداقل تراکم مورد نیاز را برای لایه‌های زیرین روسازی، مشخص می‌نماید.

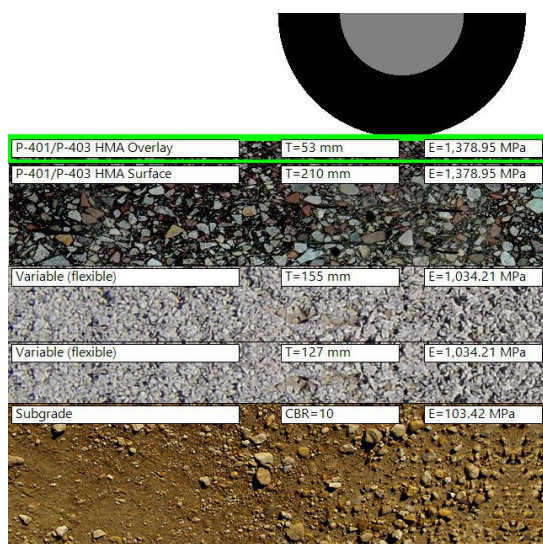
سناریوهای طراحی

سناریوهای طراحی FAARFIELD برای روسازی انعطاف‌پذیر

روسازی آسفالتی با اساس قیری (سناریوی A 10)

برداشت روسازی موجود به عمق ۴۱٫۸ سانتی‌متر، اجرای عملیات بازیافت درجای آسفالت به عمق ۱۲٫۷ سانتی‌متر، اجرای اساس قیری نفوذ پذیر به ضخامت ۱۵٫۵ سانتی‌متر، اجرای دو لایه بیندر هر کدام به ضخامت ۷ سانتی‌متر، یک لایه آسفالت بیندر اصلاح شده به ضخامت ۷ سانتی‌متر به همراه یک لایه توپکا اصلاح شده به ضخامت ۵ سانتی‌متر (ضخامت کل ۵۴٫۵ سانتی‌متر)

با توجه به این که طول عمر عملکردی لایه‌های بازیافتی موجود تقریباً تمام شده است، و نظر به اینکه ترک‌های بلوکی شدید روی این لایه‌ها وجود دارد، می‌توان با برداشت مجدد این لایه‌ها به عمق ۴۱٫۸ سانتی‌متر و بازیافت ۱۲٫۷ سانتی‌متر از لایه‌های زیرین اقدام نمود. در این روش لایه بازیافتی قدیمی برداشته شده و ۱۲٫۷ سانتی‌متر لایه باقی مانده مجدد بازیافت می‌شود. همچنین در این روش از لایه‌های آسفالتی به ضخامت ۲۶ سانتی‌متر استفاده شده است که این ضخامت آسفالت احتمال وقوع ترک‌های انعکاسی ناشی از لایه‌های پایینی را به حداقل می‌رساند. خروجی مدل‌ساز در FAARFIELD، شامل دو لایه آسفالت به مجموع ضخامت ۲۶ سانتی‌متر، یک لایه ۱۵٫۵ سانتی‌متری آسفالت بازیافت شده، یک لایه ۱۲٫۷ سانتی‌متری آسفالت تثبیت شده قدیمی (موجود) و لایه بستر می‌باشد. بر اساس مدل خروجی عمر روسازی ۲۰ سال و ضریب خرابی تجمعی آن عدد ۱ بدست آمده است.



{ ۲۶ سانتی متر ضخامت دو لایه آسفالت

{ ۱۵,۵ سانتی متر اساس قیری نفوذ پذیر

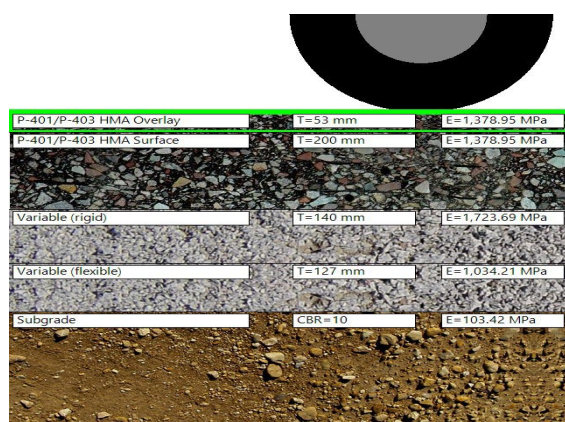
{ ۱۲,۷ سانتی متر آسفالت بازیافتی

شکل ۳. جزئیات طراحی سناریوی A 10

به عنوان یک لایه زهکش عمل کند و کلیه آب‌های نفوذی به بدنه روسازی را به بیرون از روسازی هدایت کند. لذا استفاده از لایه‌های آب‌بند در این گزینه پیشنهاد نمی‌شود. طبق این گزارش با توجه به این که اساس سیمانی نفوذ پذیر مستعد ترک‌های انقباضی می‌باشد، بایستی تمهیدات مناسب برای جلوگیری از وقوع ترک‌های انعکاسی دیده شود. بنابراین برای این سناریو ۲۵ سانتی متر لایه آسفالتی در نظر گرفته شده است. خروجی FAARFIELD، شامل دو لایه آسفالت به مجموع ضخامت ۲۵ سانتی متر، یک لایه ۱۴ سانتی متری اساس سیمانی تثبیت شده، یک لایه ۱۲,۷ سانتی متری آسفالت بازیافت شده قدیمی (موجود) و لایه بستر می‌باشد. بر اساس مدل خروجی عمر روسازی ۲۰ سال و ضریب خرابی تجمعی آن عدد ۱ بدست آمده است.

روسازی آسفالتی با اساس قیری (سناریوی A 6)

برداشت روسازی موجود به عمق ۳۹,۳ سانتی متر، اجرای یک لایه اساس سیمانی نفوذ پذیر به ضخامت ۱۴ سانتی متر، اجرای سه لایه بیندر شامل دو لایه ۷ سانتی متری و یک لایه ۶ سانتی متری به همراه یک لایه توپکا اصلاح شده به ضخامت ۵ سانتی متر. در این سناریو، برداشت لایه‌های آسفالتی و تثبیتی به عمق ۳۹,۳ سانتی متر پیشنهاد شده است. با این عمل، کلیه لایه‌های تخریب شده اعم از لایه‌های آسفالتی و بازیافت سرد تا عمق ۳۹ سانتی متر برداشته خواهد شد و تنها ۱۲,۷ سانتی متر از لایه بازیافتی باقی خواهد ماند. این ۱۲,۷ سانتی متر عمدتاً خرد شده و ترک‌های زیادی که دارای انرژی برشی بالا باشند در آن وجود ندارد. لذا می‌توان از برداشت این لایه صرف نظر کرد. در این گزینه از یک لایه اساس بتنی نفوذ پذیر به عنوان لایه زیرین استفاده شده است. این لایه بتنی می‌تواند

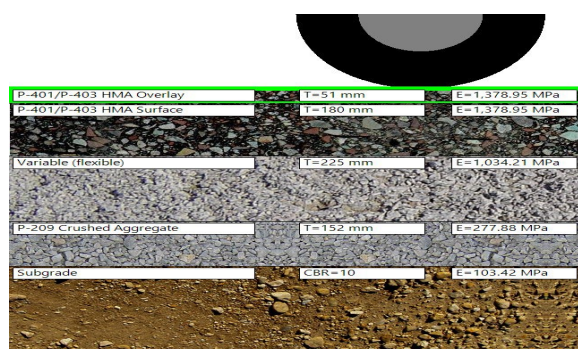


{ ۲۵ سانتی متر ضخامت آسفالت

{ ۱۴ سانتی متر ضخامت اساس سیمانی نفوذ پذیر

شکل ۴. جزئیات طراحی سناریوی A 6

مجموعاً ۶۰٫۸ سانتی‌متر کامل برداشت شد و مجدد لایه‌های زیر اساس و اساس تثبیت شده اجراء گردید.
خروجی مدلسازی انجام شده در نرم‌افزار FAARFIELD، شامل دو لایه آسفالت به مجموع ضخامت ۲۳٫۱ سانتی‌متر، یک لایه ۲۲٫۵ سانتی‌متری اساس آسفالتی بازیافت شده، یک لایه ۱۵٫۲ سانتی‌متری زیر اساس و لایه بستر می‌باشد. بر اساس مدل خروجی عمر روسازی ۲۰٫۷ سال و ضریب خرابی تجمعی آن ۰٫۹۶ بدست آمده است.



{ ۲۳٫۱ سانتی‌متر ضخامت آسفالت

{ ۲۲٫۵ سانتی‌متر اساس آسفالتی

شکل ۵. جزئیات طراحی سناریوی A 7

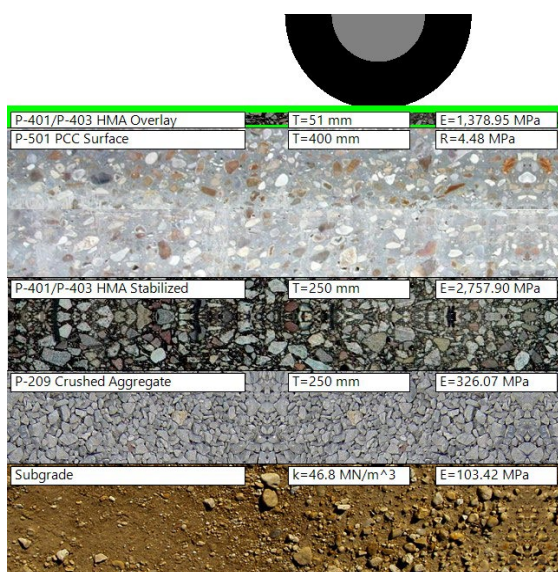
با این وجود با توجه به این که تعداد درزها در این نوع روسازی زیاد می‌باشد، این درزها می‌تواند به عنوان نقطه ضعف و نفوذ آب نیز باشد.
با توجه به این که نیاز به یک لایه مناسب در زیر لایه بتنی می‌باشد، برای جلوگیری از نشست‌های احتمالی و پانچ‌شدگی و نیز جلوگیری از پدیده پامپینگ، پیشنهاد می‌شود لایه اساس قیری به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر در زیر لایه بتنی اجرا شود.
خروجی مدلسازی انجام شده در نرم‌افزار FAARFIELD، شامل لایه توپکا به ضخامت ۵ سانتی‌متر، دال بتنی به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر، اساس آسفالتی به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر، یک لایه ۲۵ سانتی‌متری زیر اساس و لایه بستر می‌باشد. بر اساس مدل خروجی عمر روسازی ۲۶ سال و ضریب خرابی تجمعی آن ۰٫۹۶ بدست آمده است.

روسازی آسفالتی با اساس قیری (سناریوی A 7)

برداشت روسازی موجود به عمق ۶۰٫۸ سانتی‌متر، اجرای اساس قیری نفوذپذیر به ضخامت ۲۲٫۵ سانتی‌متر، اجرای دو لایه بیندر هر کدام به ضخامت ۶ سانتی‌متر، یک لایه آسفالت بیندر اصلاح شده به ضخامت ۶ سانتی‌متر به همراه یک لایه توپکا اصلاح شده به ضخامت ۵ سانتی‌متر (ضخامت کل ۶۰٫۸ سانتی‌متر). با توجه به این که طول عمر عملکردی لایه‌های بازیافتی موجود تقریباً تمام شده است، و چون ترک‌های بلوکی شدیدی روی این لایه‌ها وجود دارد بنابراین این لایه‌ها به عمق

روسازی آسفالتی بر روی دال بتنی (سناریوی A 12)

این سناریو شامل برداشت روسازی موجود به عمق ۹۵٫۱ سانتی‌متر، اجرای روسازی بتنی غیر مسلح درزدار به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر و اجرای اساس قیری نفوذپذیر به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر، به همراه یک لایه توپکا اصلاح شده به ضخامت ۵ سانتی‌متر است.
در این گزینه با توجه به این که روسازی بتنی به عنوان یک لایه صلب در برابر بارهای وارده و ترک‌های انعکاسی مقاومت می‌کند، دارای مزایا و معایبی به شرح ذیل است.
- استفاده از لایه بتنی صلب بر روی لایه‌های اساس قیری که باعث می‌شود تنش کمتری به این لایه‌ها وارد شود.
- روسازی بتنی به عنوان یک لایه نفوذناپذیر می‌تواند از ورود آب به داخل بدنه روسازی جلوگیری کند.



{ ۵ سانتی متر رویه آسفالتی
 { ۴۰ سانتی متر دال بتنی
 { ۲۵ سانتی متر اساس آسفالتی

شکل ۶. جزئیات طراحی سناریوی A12

آب نفوذی از درزهای دال بتنی می‌تواند توسط لایه آسفالتی زیر آن به بیرون بدنه روسازی هدایت شود. برای جلوگیری از نشست‌های احتمالی و پانچ شدگی و نیز جلوگیری از پدیده پامپینگ، پیشنهاد می‌گردد لایه آسفالتی ۲۰ سانتی متری در زیر دال بتنی اجرا شود.

خروجی مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار FAARFIELD شامل دال بتنی به ضخامت ۴۲٫۲ سانتی متر، یک لایه آسفالتی به ضخامت ۲۰ سانتی متر، یک لایه ۳۰٫۵ سانتی متری زیر اساس و لایه بستر می‌باشد. بر اساس مدل خروجی عمر روسازی ۲۰٫۶ سال و ضریب خرابی تجمعی آن ۰٫۸۹ بدست آمده است.

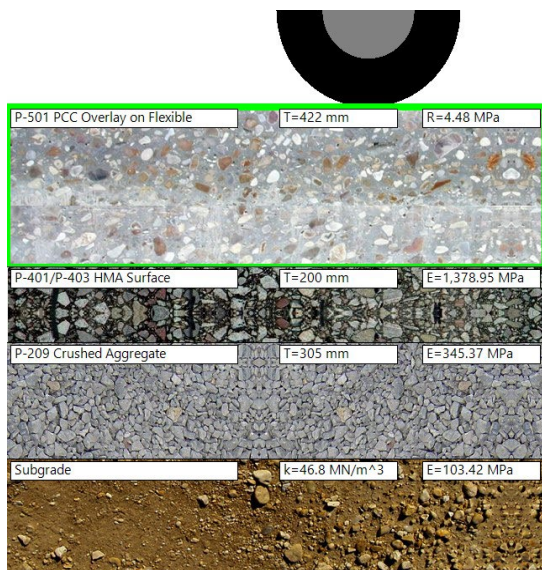
سناریوهای طراحی FAARFIELD برای روسازی صلب

روسازی بتنی بر روی لایه آسفالتی (سناریوی C3)

برداشت روسازی موجود به عمق ۹۲٫۷ سانتی متر، اجرای لایه زیر اساس به ضخامت ۳۰٫۵ سانتی متر، یک لایه آسفالتی به ضخامت ۲۰ سانتی متر و اجرای دال بتنی به ضخامت ۴۲٫۲ سانتی متر.

در این سناریو با توجه به این که روسازی بتنی به عنوان یک لایه صلب در برابر بارهای وارده و ترک‌های انعکاسی مقاومت می‌کند دارای مزایای ذیل می‌باشد.

– استفاده از لایه بتنی صلب بر روی لایه‌های آسفالتی، باعث می‌شود تنش کمتری به این لایه وارد شود.
 – روسازی بتنی به عنوان یک لایه نفوذناپذیر می‌تواند از ورود آب به داخل بدنه روسازی جلوگیری کند.



{ ۴۲٫۲ سانتی متر دال بتنی
 { ۲۰ سانتی متر لایه آسفالتی

شکل ۷. جزئیات طراحی سناریوی C3

روسازی بتنی روی اساس سیمانی (سناریوی C9)

این سناریو شامل برداشت روسازی موجود به عمق ۱۲۲,۵ سانتی‌متر، اجرای لایه زیر اساس به ضخامت ۲۸ سانتی‌متر، یک لایه اساس سیمانی به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و اجرای دو لایه دال بتنی، دال زیرین به ضخامت ۳۴ سانتی‌متر و دال نهایی به ضخامت ۳۰,۵ سانتی‌متر، می‌باشد.

با توجه به لایه‌های مختلف با ضخامت‌های متفاوت موجود در سطح باند و همچنین مشکلات سازه‌ای بوجود آمده به مرور زمان، مانند خرابی‌های گسترده در سطح باند، عدم وجود زهکش سازه‌ای و غیره، یکی از گزینه‌های مطرح در بهسازی باند می‌تواند گزینه ساخت و نوسازی باشد.

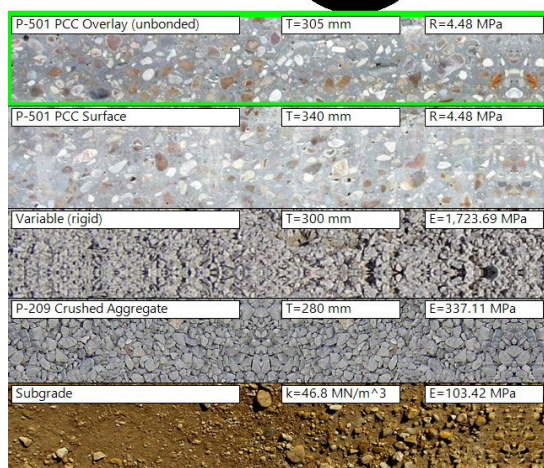
بزرگترین مشکل این گزینه نیاز به زمان اجرای زیاد و تعطیلی باند فرودگاه در مدت ساخت می‌باشد. به همین دلیل سناریوهای روسازی بتنی با توجه به سرعت بالای اجراء و محدودیت کمتر به شرایط دمایی، همچنین هزینه اجرای نسبتاً

پایین‌تر در مقایسه با روسازی آسفالتی، می‌تواند به عنوان یک گزینه اصلی طرح نوسازی مطرح گردد.

خروجی مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار FAARFIELD شامل دال بتنی به ضخامت ۶۴,۵ سانتی‌متر، یک لایه اساس سیمانی به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر، یک لایه ۲۸ سانتی‌متری زیر اساس و لایه بستر می‌باشد. بر اساس مدل خروجی عمر روسازی ۲۸,۸ سال و ضریب خرابی تجمعی آن ۱,۱۱ بدست آمده است.

روسازی بتنی بر روی لایه بتن مگر (سناریوی C4)

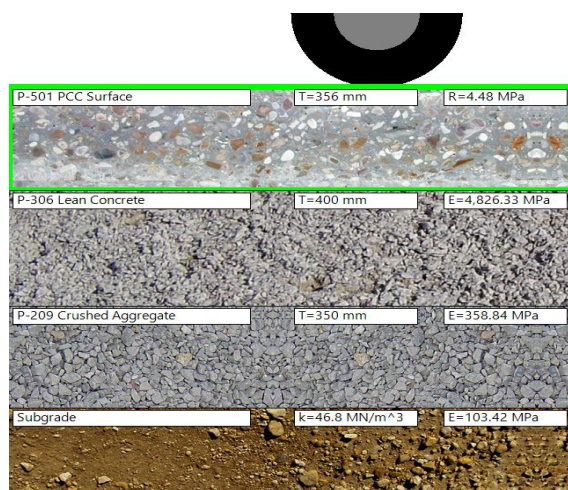
برداشت روسازی موجود به عمق ۱۱۰,۶ سانتی‌متر، اجرای لایه زیر اساس به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر، یک لایه بتن مگر به ضخامت ۴۰ و اجرای دال بتنی به ضخامت ۳۵,۶ سانتی‌متر.



{ ۶۴,۵ سانتی‌متر دال بتنی

{ ۳۰ سانتی‌متر اساس سیمانی

شکل ۸. جزئیات طراحی سناریوی C9



{ ۳۵/۶ سانتی متر دال بتنی

{ ۴۰ سانتی متر بتن مگر

شکل ۹. جزئیات طراحی سناریوی C 4

دمایی همچنین هزینه اجرای نسبتاً پایین تر در مقایسه با روسازی آسفالتی می‌تواند به عنوان یک گزینه اصلی طرح نوسازی مطرح گردد. خروجی مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار FAARFIELD، شامل دال بتنی به ضخامت ۳۵,۶ سانتی‌متر، یک لایه بتن مگر به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر، یک لایه ۳۵ سانتی‌متری زیر اساس و لایه بستر می‌باشد. بر اساس مدل خروجی عمر روسازی ۲۰ سال و ضریب خرابی تجمعی آن ۰,۹۶ بدست آمده است.

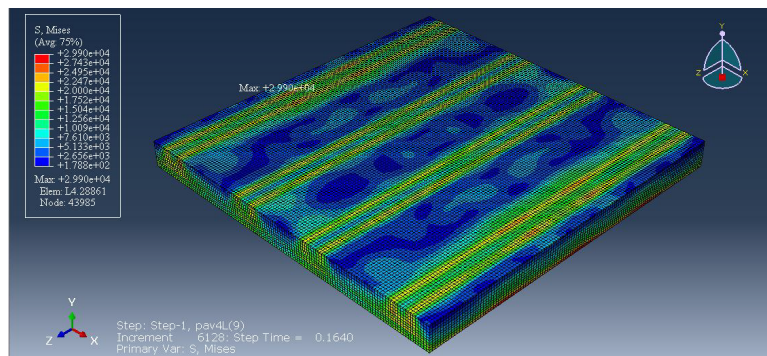
با توجه به لایه‌های مختلف با ضخامت‌های متفاوت موجود در سطح باند و همچنین مشکلات سازه‌ای بوجود آمده به مرور زمان، مانند خرابی‌های گسترده در سطح باند، عدم وجود زهکش سازه‌ای و غیره یکی از گزینه‌های مطرح در بهسازی باند می‌تواند گزینه ساخت و نوسازی باشد. بزرگترین مشکل طرح نوسازی نیاز به زمان اجرای زیاد و تعطیلی باند فرودگاه در مدت ساخت می‌باشد. به همین خاطر سناریوهای روسازی بتنی با توجه به سرعت بالای اجراء و محدود نبودن به شرایط

سناریوهای طراحی ABAQUS برای روسازی انعطاف‌پذیر

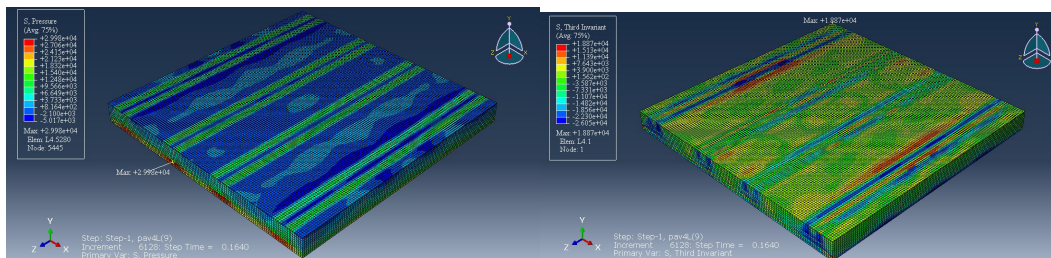
مدل‌سازی در محیط ABAQUS برای سناریوی روسازی انعطاف‌پذیر A 12

آمده، ضمن اینکه نتایج مدل نرم‌افزار FAARFIELD تایید می‌شود، خروجی مدل گویای آن است که تنش در بالاترین لایه سطح آسفالت به طور پیش‌بینی شده در جایی که بار اعمال می‌شود، حداکثر است. همچنین یک منطقه تنش حداکثر در سطح تماس لایه‌های اساس و زیر اساس ایجاد می‌کند.

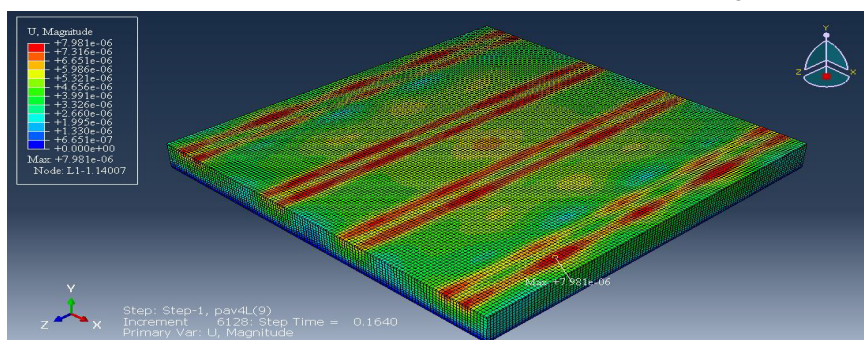
بر اساس خروجی آنالیز انجام شده در نرم‌افزار FAARFIELD داده‌های شکل شماره ۶ به عنوان ساختار لایه‌بندی و شرایط ویسکو الاستیک روسازی انعطاف‌پذیر بر اساس سری پرونی طبق جدول شماره ۲ به عنوان داده ورودی نرم‌افزار ABAQUS داده شد و پس از اجرای نرم‌افزار، مدل خروجی در زیر ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست



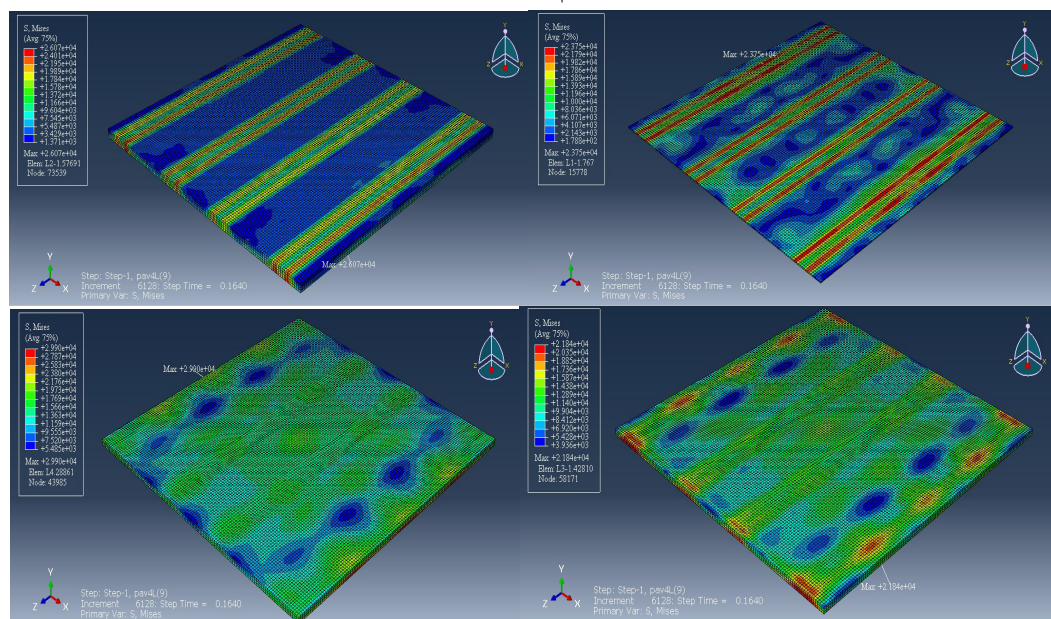
شکل ۱۰. کانتورهای تنش Von-Mises برای سناریوی طراحی A 12



شکل ۱۱. کانتورهای تنش فشاری و تنش خستگی برای سناریوی طراحی A 12



شکل ۱۲. کانتورهای ماکزیمم جابجایی برای سناریوی طراحی A 12



شکل ۱۳. تغییرات توزیع تنش در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی A 12

مختلف در جدول ۷ نشان داده شده است.

تنش و تغییر مکان به تدریج با عمق لایه آسفالت کاهش می‌یابد. حداکثر و حداقل تنش و تغییر مکان در لایه‌های

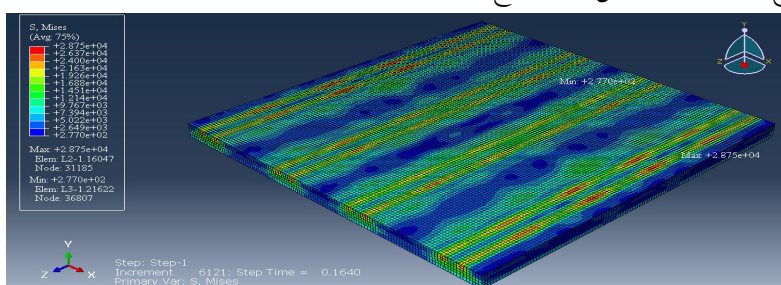
جدول ۷. حداکثر و حداقل تنش و جابجایی در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی A 12

لایه	حداکثر تنش	حداقل تنش	لایه	حداکثر جابجایی	حداقل جابجایی
۱	2.375E4	1.788E2	۱	7.981E-6	2.062E-6
۲	2.607E4	1.371E3	۲	7.788E-6	1.688E-6
۳	2.184E4	3.936E3	۳	4.593E-6	1.010E-6
۴	2.990E4	5.485E3	۴	3.187E-6	0

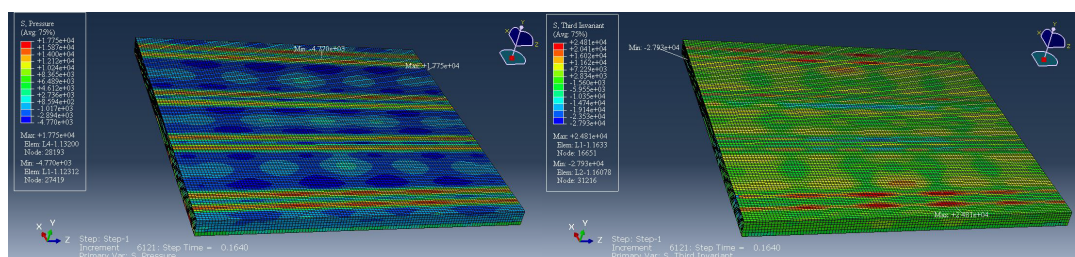
مدل‌سازی در محیط ABAQUS برای سناریوی روسازی انعطاف‌پذیر A 7

نرم‌افزار FAARFIELD تایید می‌شود، این نتایج گویای آن است که تنش در بالاترین لایه سطح آسفالت به طور پیش‌بینی شده در جایی که بار اعمال می‌شود، حداکثر است. همچنین یک منطقه تنش حداکثر در سطح تماس لایه‌های اساس و زیر اساس ایجاد می‌کند.

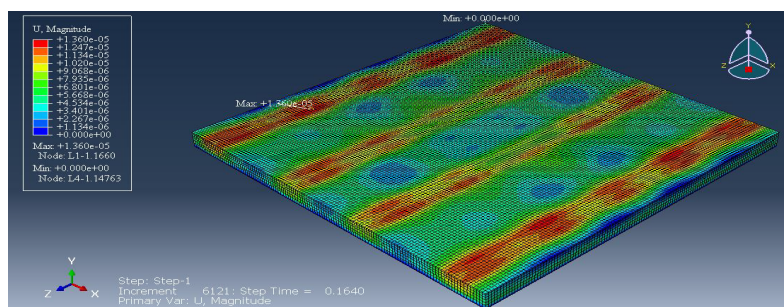
بر اساس خروجی آنالیز انجام شده در نرم‌افزار FAARFIELD داده‌های شکل شماره ۵ به عنوان ساختار لایه‌بندی و شرایط ویسکو الاستیک روسازی انعطاف‌پذیر بر اساس سری پرونی طبق جدول شماره ۲ به عنوان داده ورودی نرم‌افزار ABAQUS داده شد و پس از اجرای نرم‌افزار، مدل خروجی در زیر ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، ضمن اینکه نتایج مدل



شکل ۱۴. کانتورهای تنش Von-Mises برای سناریوی طراحی A 7

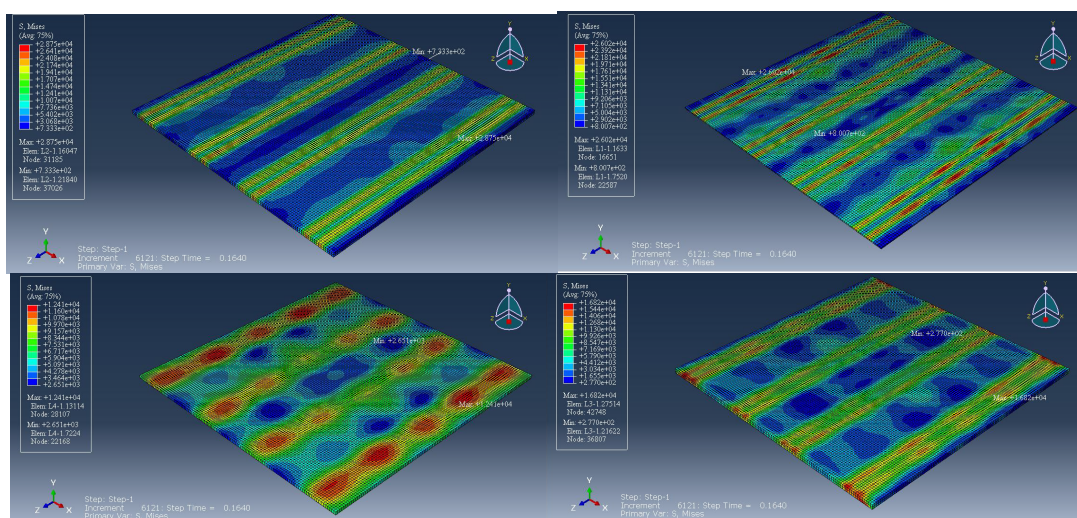


شکل ۱۵. کانتورهای تنش فشاری و تنش خستگی برای سناریوی طراحی A 7



شکل ۱۶. کانتورهای ماکزیمم جابجایی برای سناریوی طراحی A 7

تنش و تغییر مکان به تدریج با عمق لایه آسفالت کاهش می‌یابد. حداکثر و حداقل تنش و تغییر مکان در لایه‌های مختلف در جدول ۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۷. تغییرات توزیع تنش در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی A 7

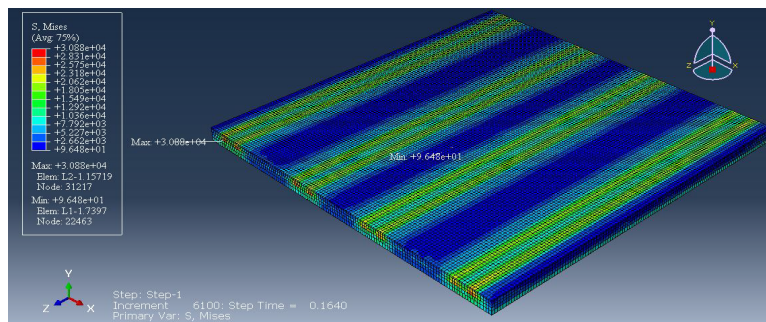
جدول ۸. حداکثر و حداقل تنش و جابجایی در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی A 7

لایه	حداکثر تنش	حداقل تنش	لایه	حداکثر جابجایی	حداقل جابجایی
۱	2.602E4	2.007E2	۱	1.360E-5	1.126E-7
۲	2.87E4	7.333E2	۲	1.326E-5	4.873E-7
۳	1.682E4	2.77E2	۳	1.238E-5	1.563E-6
4	1.241E4	2.651E3	4	9.094E-5	0

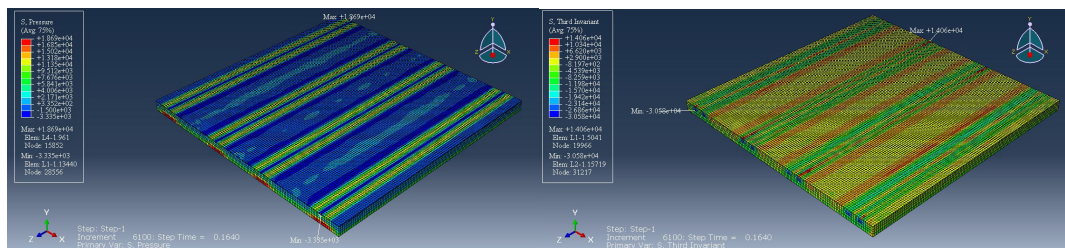
مدل سازی در محیط ABAQUS برای سناریوی روسازی انعطاف‌پذیر A 10

شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، ضمن اینکه نتایج مدل نرم‌افزار FAARFIELD تایید می‌شود، اینطور مشاهده می‌شود که تنش در بالاترین لایه سطح آسفالت به طور پیش‌بینی شده در جایی که بار اعمال می‌شود، حداکثر است، همچنین یک منطقه تنش حداکثر در سطح تماس لایه‌های اساس و زیر اساس ایجاد می‌کند.

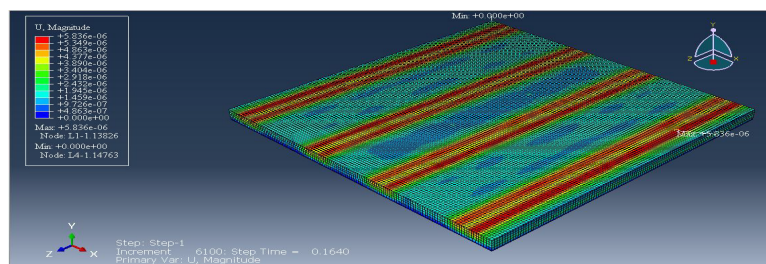
بر اساس خروجی آنالیز انجام شده در نرم‌افزار FAARFIELD داده‌های شکل شماره ۳ به عنوان ساختار لایه‌بندی و شرایط ویسکو الاستیک روسازی انعطاف‌پذیر بر اساس سری پرونی طبق جدول شماره ۲ به عنوان داده ورودی نرم‌افزار ABAQUS داده شد و پس از اجرای نرم‌افزار، مدل خروجی در زیر ارائه



شکل ۱۸. کانتورهای تنش Von-Mises برای سناریوی طراحی A 10

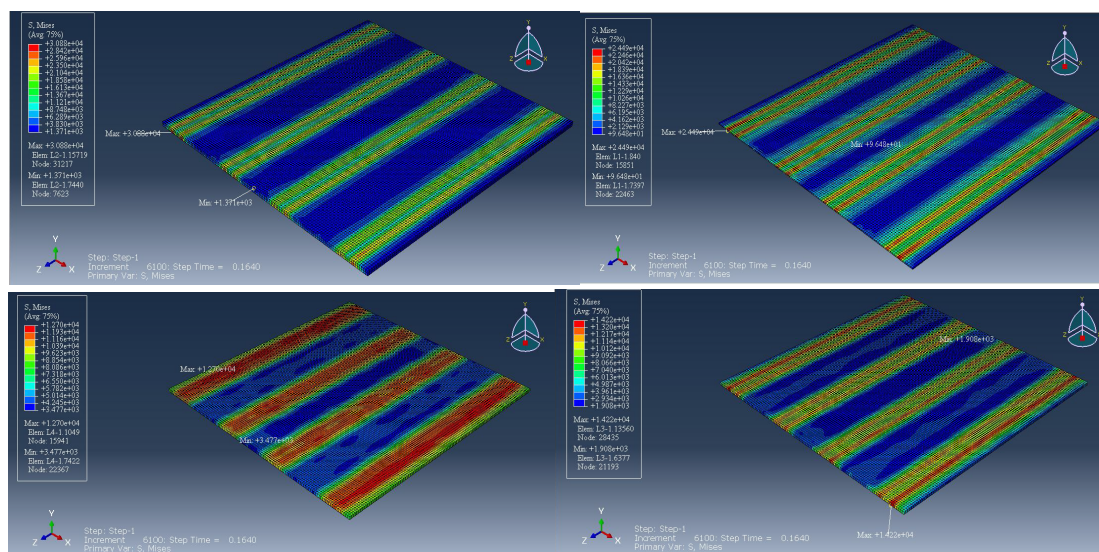


شکل ۱۹. کانتورهای تنش فشاری و تنش خستگی برای سناریوی طراحی A 10



شکل ۲۰. کانتورهای ماکزیمم جابجایی برای سناریوی طراحی A 10

تنش و تغییر مکان به تدریج با عمق لایه آسفالتی، کاهش می‌یابد. حداکثر و حداقل تنش و تغییر مکان در لایه‌های مختلف در جدول ۹ نشان داده شده است.



شکل ۲۱. تغییرات توزیع تنش در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی A 10

جدول ۹. حداکثر و حداقل تنش و جابجایی در لایه های مختلف روسازی سناریوی A 10

لایه	تنش حداکثر	تنش حداقل	لایه	جابجایی حداکثر	جابجایی حداقل
۱	2.449E4	9.648E3	۱	5.836E-6	1.119E-6
۲	3.088E4	1.371E3	۲	5.557E-6	1.066E-6
۳	1.422E4	1.908E3	۳	4.430E-6	6.969E-7
۴	1.270E4	3.477E3	۴	2.62E-6	0

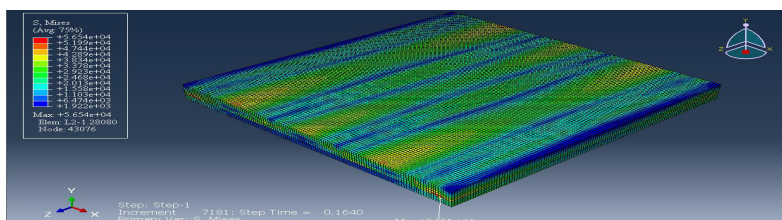
سناریوهای ABAQUS برای روسازی صلب

مدل سازی در محیط ABAQUS برای سناریوی روسازی

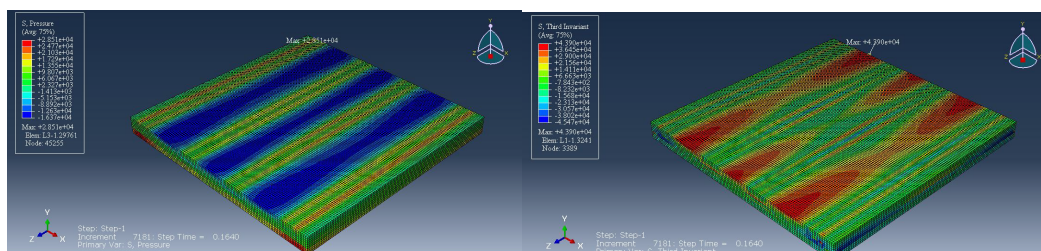
صلب C 3

بر اساس خروجی آنالیز انجام شده در نرم افزار FAARFIELD اطلاعات شکل شماره ۷ به عنوان ساختار لایه بندی و شرایط تئوری الاستیک برای روسازی صلب به عنوان داده ورودی

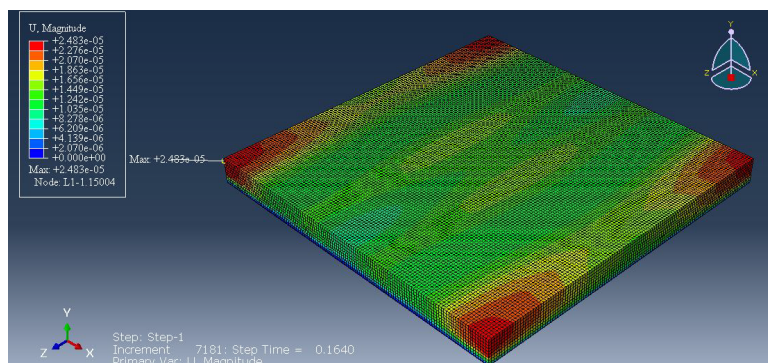
نرم افزار ABAQUS وارد شد و پس از اجرایی نرم افزار، مدل خروجی در زیر ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، ضمن اینکه نتایج مدل نرم افزار FAARFIELD تایید می شود، مشخص می شود که تنش در بالاترین لایه دال بتنی به طور پیش بینی شده در محلی که بار اعمال می شود، حداکثر است.



شکل ۲۲. کانتورهای تنش Von-Mises برای سناریوی طراحی C 3

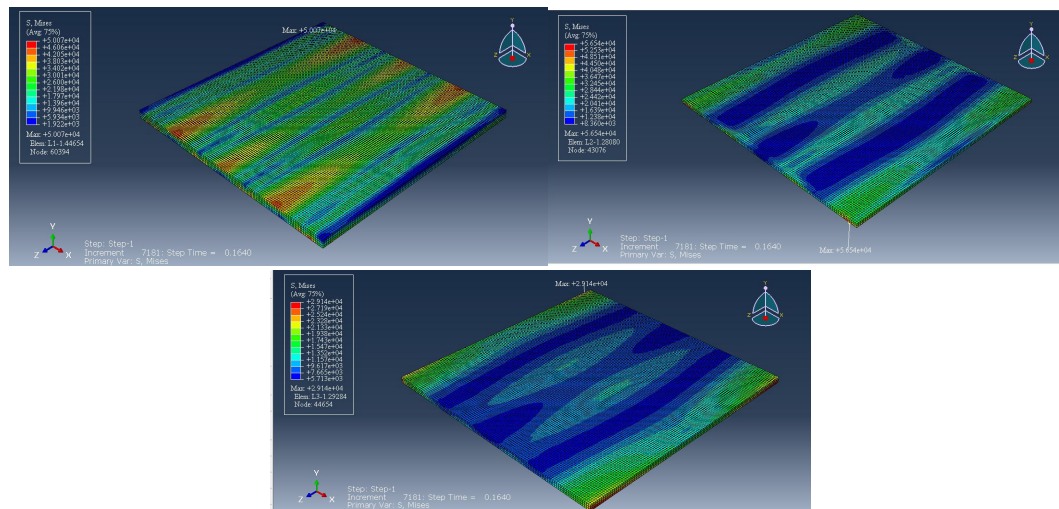


شکل ۲۳. کانتورهای تنش فشاری و تنش خستگی برای سناریوی طراحی C 3



شکل ۲۴. کانتورهای ماکزیمم جابجایی برای سناریوی طراحی C 3

تنش و تغییر مکان به تدریج با عمق روسازی بتنی کاهش می‌یابد. حداکثر و حداقل تنش و تغییر مکان در لایه‌های مختلف در جدول ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۵. تغییرات توزیع تنش در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی C 3

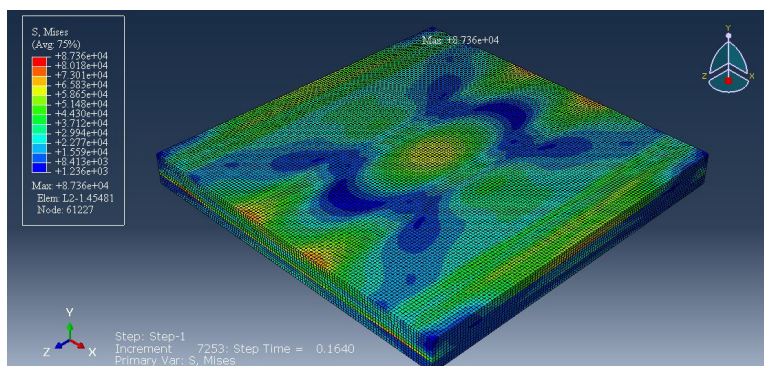
جدول ۱۰. حداقل و حداکثر تنش و جابجایی در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی C 3

لایه	تنش حداکثر	تنش حداقل	لایه	جابجایی حداکثر	جابجایی حداقل
۱	5.007E4	1.922E3	۱	2.483E-5	9.237E-6
۲	5.654E4	8.360E3	۲	2.461E-5	8.557E-6
۳	2.914E4	5.713E3	۳	2.388E-5	0

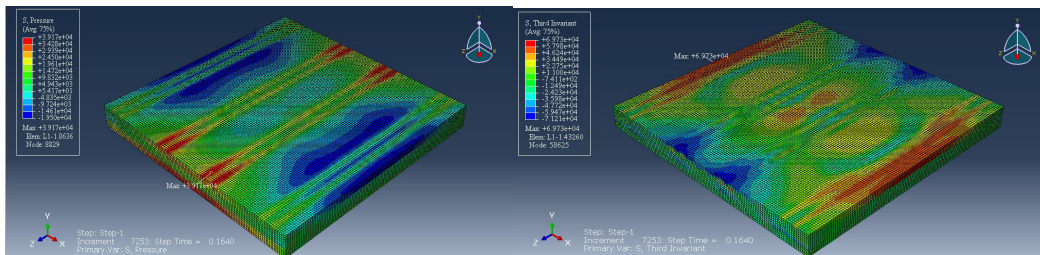
مدل‌سازی در محیط ABAQUS برای سناریوی روسازی صلب C 4

خروجی در زیر ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، نتایج مدل نرم‌افزار FAARFIELD تایید می‌شود. ضمناً نتایج گویای آن است که تنش در بالاترین لایه دال بتنی به طور پیش‌بینی شده در نقطه‌ای که بار اعمال می‌شود، حداکثر است.

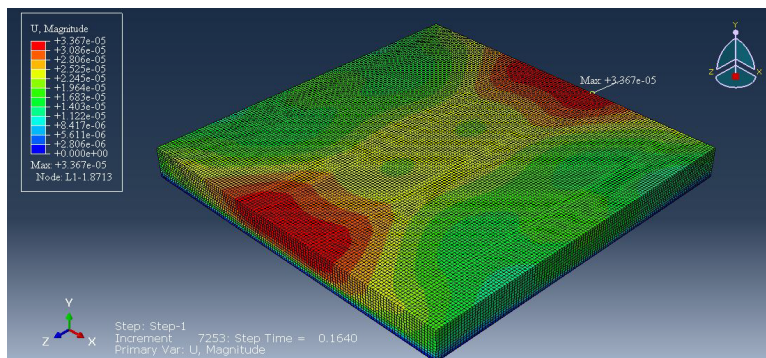
بر اساس خروجی آنالیز انجام شده در نرم‌افزار FAARFIELD اطلاعات شکل شماره ۹ به عنوان ساختار لایه‌بندی و شرایط تئوری الاستیک برای روسازی صلب به عنوان داده ورودی نرم‌افزار ABAQUS وارد شد و پس از اجرای نرم‌افزار، مدل



شکل ۲۶. کانتورهای تنش Von-Mises برای سناریوی طراحی C 4

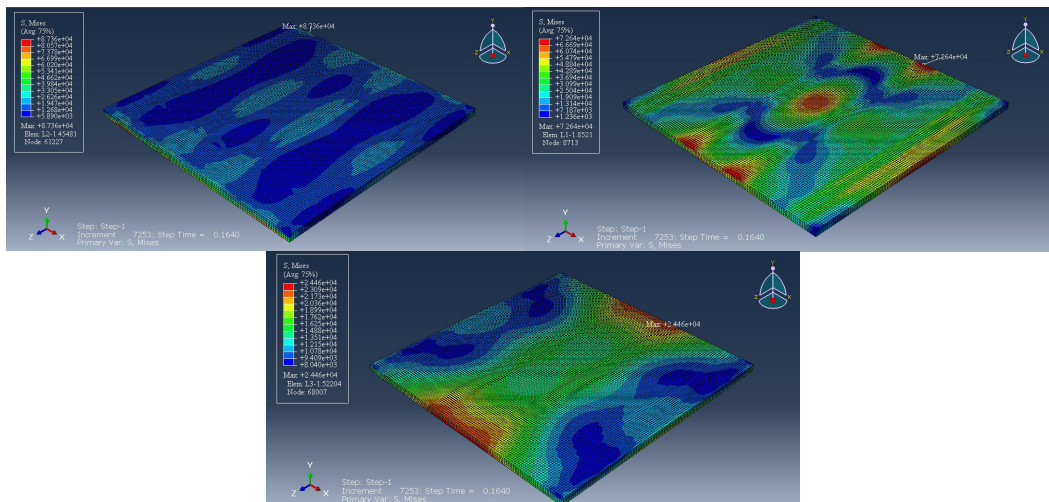


شکل ۲۷. کانتورهای تنش فشاری و تنش خستگی برای سناریوی طراحی C4



شکل ۲۸. کانتورهای ماکزیمم جابجایی برای سناریوی طراحی C4

تنش و تغییر مکان به تدریج با عمق روسازی بتنی کاهش می‌یابد. حداکثر و حداقل تنش و تغییر مکان در لایه‌های مختلف در جدول ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۲۹. تغییرات توزیع تنش در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی C4

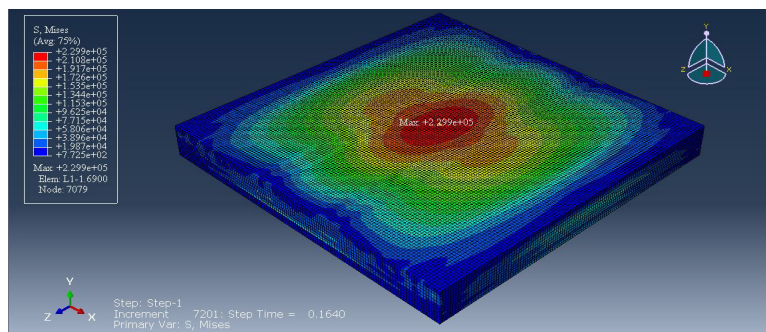
جدول ۱۱. حداکثر و حداقل تنش و جابجایی در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی C4

لایه	تنش حداکثر	تنش حداقل	لایه	جابجایی حداکثر	جابجایی حداقل
۱	7.264E4	1.236E3	۱	3.367E-5	1.236E-5
۲	8.736E4	5.890E3	۲	3.336E-5	1.051E-5
۳	2.446E4	8.040E3	۳	3.061E-5	0

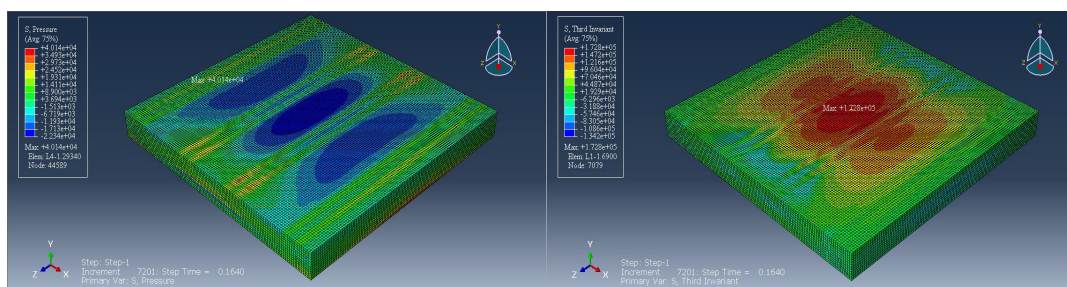
مدل سازی در محیط ABAQUS برای سناریوی روسازی صلب C 9

خروجی در زیر ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، ضمن اینکه نتایج مدل نرم افزار FAARFIELD تایید می شود، مشخص می شود که تنش در بالاترین لایه دال بتنی به طور پیش بینی شده در جایی که بار اعمال می شود، حداکثر است.

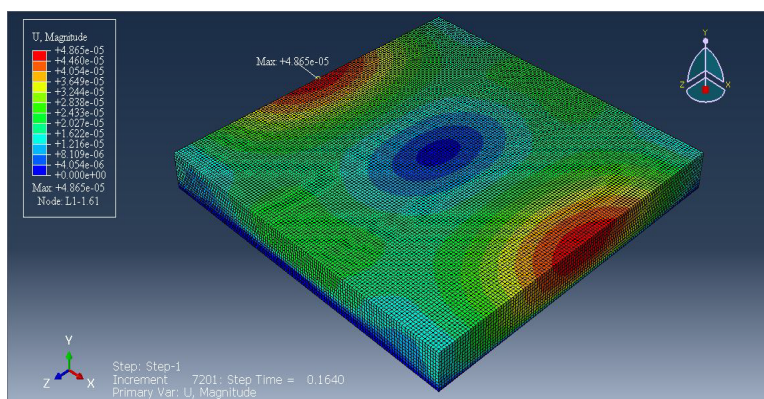
بر اساس خروجی آنالیز انجام شده در نرم افزار FAARFIELD دیتاهای شکل شماره ۸ به عنوان ساختار لایه بندی و شرایط تئوری الاستیک برای روسازی صلب به عنوان داده ورودی نرم افزار ABAQUS وارد شد و پس از اجرای نرم افزار، مدل



شکل ۳۰. کانتورهای تنش Von-Mises برای سناریوی طراحی C 9

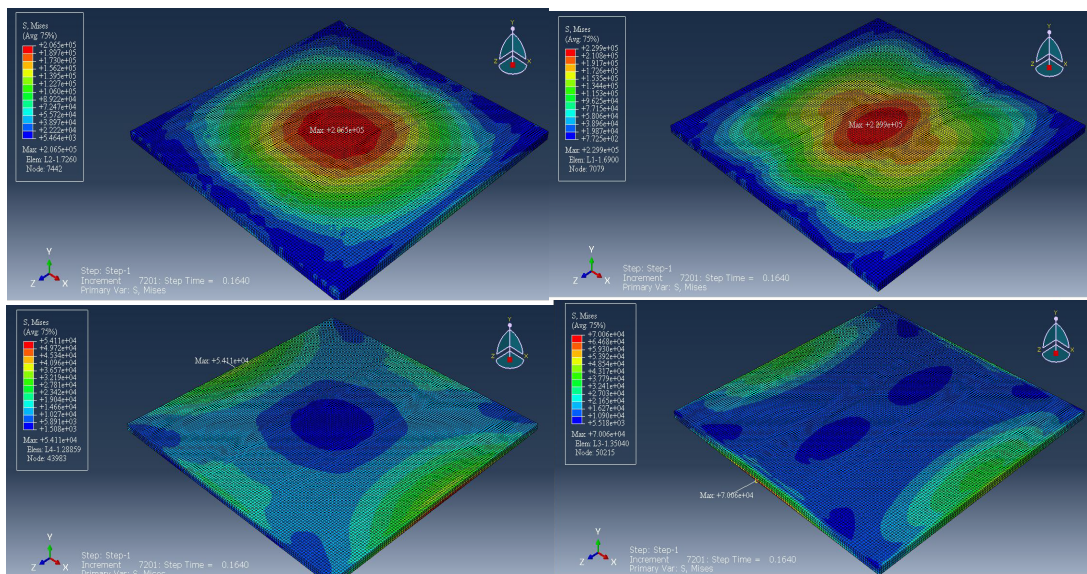


شکل ۳۱. کانتورهای تنش فشاری و تنش خستگی برای سناریوی طراحی C 9



شکل ۳۲. کانتورهای ماکزیمم جابجایی برای سناریوی طراحی C 9

تنش و تغییر مکان به تدریج با عمق روسازی بتنی کاهش می یابد. حداکثر و حداقل تنش و تغییر مکان در لایه های مختلف در جدول ۱۲ نشان داده شده است. مقایسه روند تغییرات تنش و جابجایی با افزایش عمق لایه در سناریوهای مختلف در جدول ۱۳ انجام شده است.



شکل ۳۳. تغییرات توزیع تنش در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی C 9

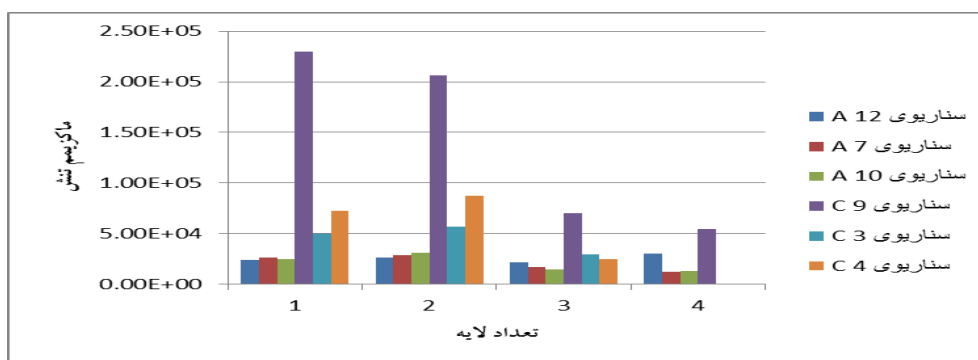
جدول ۱۲. حداکثر و حداقل تنش و جابجایی در لایه‌های مختلف روسازی سناریوی C 9

لایه	تنش حداکثر	تنش حداقل	لایه	جابجایی حداکثر	جابجایی حداقل
۱	2.299E5	7.725E2	۱	4.865E-5	1.050E-6
۲	2.065E5	5.464E3	۲	4.746E-5	1.047E-6
۳	7.006E4	5.518E3	۳	4.583E-5	1.074E-6
۴	5.411E4	1.508E3	۴	4.087E-5	۰

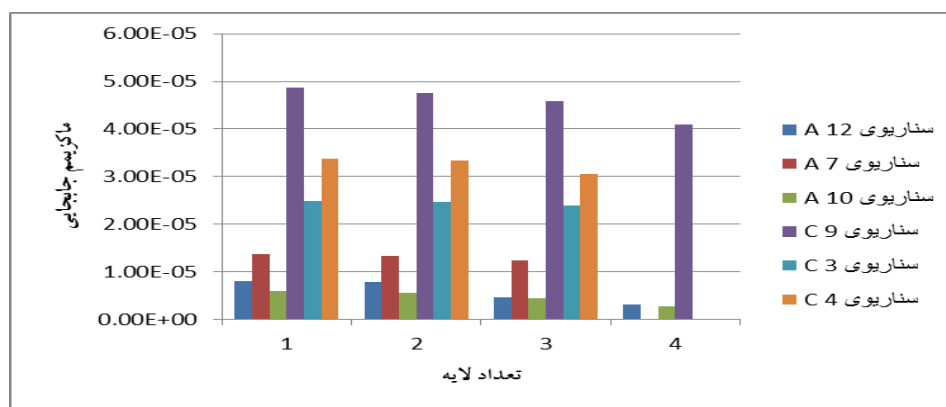
جدول ۱۳. مقایسه روند کاهش تنش و جابجایی با افزایش عمق لایه در سناریوهای مختلف

سناریوی	لایه	تنش حداکثر	تنش حداقل	جابجایی حداکثر	جابجایی حداقل
سناریوی A 12	1	2.38E+04	1.79E+02	7.98E-06	2.06E-06
	2	2.61E+04	1.37E+03	7.79E-06	1.69E-06
	3	2.18E+04	3.94E+03	4.59E-06	1.01E-06
	4	2.99E+04	5.49E+03	3.19E-06	0
سناریوی A 7	لایه	تنش حداکثر	تنش حداقل	جابجایی حداکثر	جابجایی حداقل
	1	2.60E+04	2.01E+02	1.36E-05	1.13E-07
	2	2.87E+04	7.33E+02	1.33E-05	4.87E-07
	3	1.68E+04	2.77E+02	1.24E-05	1.63E-06
4	1.24E+04	2.61E+03	9.09E-05	0	
سناریوی A 10	لایه	تنش حداکثر	تنش حداقل	جابجایی حداکثر	جابجایی حداقل
	1	2.45E+04	9.65E+03	5.84E-06	1.12E-06
	2	3.09E+04	1.37E+03	5.56E-06	1.07E-06
	3	1.42E+04	1.91E+03	4.43E-06	6.97E-07
4	1.27E+04	3.48E+03	2.62E-06	0	
سناریوی C 3	لایه	تنش حداکثر	تنش حداقل	جابجایی حداکثر	جابجایی حداقل
	1	5.01E+04	1.92E+03	2.48E-05	9.24E-06
	2	5.65E+04	8.36E+03	2.46E-05	8.56E-06
3	2.91E+04	5.71E+03	2.39E-05	0.00E+00	

سناریوی C 4	لایه	تنش حداکثر	تنش حداقل	جابجایی حداکثر	جابجایی حداقل
سناریوی C 4	1	7.26E+04	1.24E+03	3.37E-05	1.24E-05
	2	8.74E+04	5.89E+03	3.34E-05	1.05E-05
	3	2.45E+04	8.04E+03	3.06E-05	0.00E+00
سناریوی C 9	لایه	تنش حداکثر	تنش حداقل	جابجایی حداکثر	جابجایی حداقل
سناریوی C 9	1	2.30E+05	7.72E+02	4.87E-05	1.05E-06
	2	2.07E+05	5.46E+03	4.75E-05	1.05E-06
	3	7.01E+04	5.52E+03	4.58E-05	1.07E-06
	4	5.41E+04	1.51E+03	4.09E-05	0



شکل ۳۴. نمودار تغییرات تنش با افزایش عمق لایه در سناریوهای مختلف



شکل ۳۵. نمودار تغییرات جابجایی با افزایش عمق لایه در سناریوهای مختلف

مقایسه فنی و اقتصادی روسازی صلب و انعطاف پذیر

مصرف کننده از قبیل تاخیر در ترافیک هنگام بازسازی، استهلاک وسیله نقلیه و ... را نیز به عنوان هزینه‌های موثر در طراحی در نظر می‌گیرند. بررسی‌های صورت گرفته بر روی عملیات اجرایی دو نوع روسازی نشان می‌دهد که هزینه عملیات اجرایی روسازی صلب در قیاس با روسازی انعطاف پذیر دارای هزینه کمتری می‌باشد. در جدول ۱۴ فواصل حمل مصالح جهت عملیات اجرایی بهسازی سازه روسازی فرودگاه مهرآباد به تفکیک ردیف‌های حمل ذکر شده است.

یکی از عوامل موثر در ارزیابی پروژه‌های مهندسی، پارامترهای اقتصادی است. امروزه بسیاری از طراحان و سازمان‌های تدوین کننده آئین‌نامه‌ها در جهت صرفه‌جویی در انرژی و هزینه‌های سرویس‌دهی و در پی آن بهبود عمر مفید روسازی، روش‌های موجود را مورد بازنگری قرار داده‌اند. همچنین بسیاری از سازمان‌ها علاوه بر هزینه‌های اولیه که شامل هزینه اجراء، مقاومت در برابر ترک‌های انعکاسی، اثرات آب‌های سطحی، دشواری عملیات اجرایی و مدت زمان اجراء است، هزینه‌های

جدول ۱۴. فواصل حمل مصالح

فاصله (کیلومتر)	نوع حمل
۱۵	حمل به دپو مصالح حاصل از تخریب
۱۰	حمل آب
۵۰	حمل اساس کوهی
۵۰	حمل مصالح سنگی (کوهی) آسفالت
۴۰	حمل آسفالت از محل تولید آسفالت تا محل اجرا
۴۵۰	حمل قیر خالص با تانکر
۱۵۰	حمل قیر محلول و امولسیون
۲۰	حمل بتن
۳۰۰	حمل سیمان

برآورد هزینه اجرای سناریوهای مختلف روسازی صلب و انعطاف پذیر

اقتصادی تر از انواع دیگر باشد یا عملکرد مناسبی داشته باشد، ولی مهندس طراح باید دلایل مستدل و منطقی خود را در ارتباط با جمیع پارامترهای موثر در انتخاب نوع روسازی ارائه نماید. با پژوهش در عملیات اجرایی پروژه‌های روسازی باند فرودگاه‌ها و مقالات ارائه شده در این خصوص در مجموع بیست و یک سناریوی مختلف از نوع روسازی صلب و انعطاف پذیر برای پروژه بهسازی باند ۲۹ چپ فرودگاه مهرآباد ارائه شده است.

برآورد هزینه سناریوهای مختلف روسازی پیشنهاد شده بر اساس قیمت ردیف‌های فهرست بهای پایه رشته راه، راه آهن و باند فرودگاه سال ۱۴۰۳ به همراه ضریب بالاسری ۱/۴۱ و ضریب تجهیز ۱/۰۴ برای هر مترمربع روسازی به تفکیک نوع انعطاف پذیر و صلب بر اساس جداول ۱۵ و ۱۶ ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است چنانچه طراحی و اجرای روسازی به درستی انجام شود، هر یک از انواع روسازی صلب، انعطاف پذیر و مرکب گزینه مناسبی برای انواع هوایمی مسافبری خواهند بود. هرچند ممکن است بعضی از طرح‌ها

جدول ۱۵. الویت بندی سناریوهای روسازی انعطاف پذیر

الویت بندی سناریوهای روسازی انعطاف پذیر بر مبنای هزینه ساخت		
ردیف	شماره طرح	هزینه هر متر مربع روسازی
۱	A 1	12,035,856
۲	A 2	12,868,010
۳	A 3	13,660,711
۴	A 4	16,052,334
۵	A 5	16,973,822
۶	A 6	17,035,469
۷	A 7	18,438,657
۸	A 8	20,480,772
۹	A 9	21,184,312
۱۰	A 10	21,579,234
۱۱	A 11	22,541,182
۱۲	A 12	24,071,512

جدول ۱۶. الویت‌بندی سناریوهای روسازی صلب

الویت‌بندی سناریوهای روسازی صلب بر مبنای هزینه ساخت		
ردیف	شماره طرح	هزینه هر متر مربع روسازی
۱	C 1	19,557,890
۲	C 2	21,490,842
۳	C 3	22,045,643
۴	C 4	24,190,125
۵	C 5	24,877,722
۶	C 6	25,933,286
۷	C 7	26,355,519
۸	C 8	29,227,193
۹	C 9	32,219,203

جابجایی، سهولت و محدودیت‌های عملیاتی، زمانبندی ساخت، در دسترس بودن مصالح، تعداد دفعات نگهداری، محدودیت‌های زیست‌محیطی می‌باشد، بنابراین با لحاظ جمیع این عوامل، گزینه بهینه بهسازی یا نوسازی از میان سناریوهای A 7، C 8، C 3، C 4، A 10، A 6 که دارای شالوده کاملی هستند، مد نظر بوده و سایر موارد به نوعی زیر مجموعه آنها محسوب می‌شوند. البته آنالیز قیمت برای کل مجموعه پیشنهادی انجام شده ولی لزوماً بحث قیمت ساخت و اجرای آن سناریوی خاص، نمی‌تواند اولویت انتخاب تلقی گردد. به لحاظ اثرات آب‌های سطحی، بهترین عملکرد مربوط به سناریوی A 6 و A 10 که دارای تنها یک لایه زهکش هستند، می‌باشد. سناریوی A 7 نیز با توجه به این که گزینه بازسازی است، دارای لایه اساس و زیر اساس مرغوب بوده و نیز خاک بستر آن نیز شرایط مناسبی برای جذب آب‌های نفوذی خواهد داشت. به لحاظ مدت زمان اجراء و دشواری عملیات اجرایی، سناریوهای A 6 و A 10 به علت وجود لایه‌های اساس بتنی نفوذپذیر، اساس قیری و بازیافت سرد، دشواری بیشتری دارند. یکی از سناریوهای منتخب یعنی سناریوی شماره A 10 به عنوان گزینه نهایی عملیات اجرایی مهرآباد انتخاب و بخش بهسازی آن (بدون اجرای لایه زیر اساس جدید) عملیاتی گردید. این موضوع تطابق نتایج تحقیقات انجام شده با مدل اجرایی را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که پروژه مهرآباد از نوع بهسازی بوده و به طبع، در این بخش به دلیل محدودیت‌های زمانی و بودجه‌ای، همچنین شرایط خاص حاکم بر اجرای پروژه، حق انتخاب محدودتری وجود داشته است. در صورتیکه در بحث نوسازی، گزینه‌های دیگر سناریوهای منتخب، ممکن است به عنوان اولویت اول، کاندید گردند. مضافاً اینکه انتخاب گزینه نهایی می‌بایست براساس دوره عملکرد و بهره‌برداری بلند مدت پروژه و تحلیل چرخه عمر بصورت کاملاً دقیق و کارشناسی انجام گردد.

برای کل این سناریوها در محیط نرم افزار FARRFIELD مدلسازی انجام شد. البته بعضی از سناریوها ساختار و قالب کلی پیشنهادی نرم‌افزار را ندارند و موارد کاربرد آنها مربوط می‌شود به پروژه‌های بهسازی که در آنها لایه‌های زیرین روسازی که قابل بازیافت هستند، بخشی بازیافت و بخشی احیاء می‌گردد. لایه‌های احیاء شده می‌توانند نقش زیر اساس و اساس را در سناریوهای مختلف داشته باشند. بنابراین سناریویی که تعریف می‌شود بخشی از شالوده کلی طرح پیشنهادی نرم‌افزار می‌باشد. شایان ذکر است که بهترین سناریوها در بحث اجراء و خصوصاً در بحث نوسازی روسازی فرودگاه‌ها، سناریوهایی هستند که بطور کامل این پیکربندی کلی را داشته باشند. طبیعی است که در بحث آنالیز قیمت، سناریوهایی که قالب کامل نرم‌افزار را حفظ کرده‌اند به دلیل تنوع لایه‌بندی، قیمت نسبتاً بالاتری نسبت به سناریوهای محدود روسازی نتیجه خواهند داد. از طرفی چون اولویت انتخاب یک سناریو علاوه بر بحث اقتصادی عوامل مختلف دیگری چون تمرکز و توزیع تنش و کرنش در سطح روسازی، سناریوهای روسازی بتنی C 4 و C 8 با توجه به نیاز به فینیشر بتن و تجهیزات خاص دارای دشواری عملیات اجرایی هستند. سناریوهای A 7، C 8، C 3 و C 4 که دارای بازسازی بوده و با توجه به زمان مورد نیاز برای تخریب روسازی موجود بسیار زمان‌بر خواهند بود. از نظر مقاومت در برابر ترک‌های انعکاسی سناریوهای C 4 و C 8 که روسازی بتنی بوده و دارای گزینه بازسازی هستند، بهترین عملکرد را در بین سناریوها دارند. از مجموعه سناریوهای تعریف شده چند گزینه به عنوان اولویت انتخاب روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر معرفی شد که شرایط استاندارد نرم‌افزار FAARFIELD را داشته و در عین حال خروجی مدل ABAQUS آنها نیز نتایج رضایتبخشی را نشان داده است. از باب صحت‌سنجی این نتایج با عملیات اجرایی بهسازی فرودگاه مهرآباد، گویای این واقعیت است که

۵- نتیجه گیری

انتخاب یک طرح روسازی بهینه مستلزم ارزیابی عوامل متعددی از جمله محدودیت‌های هزینه و منابع مالی (بودجه)، محدودیت‌های عملیاتی، زمانبندی ساخت، در دسترس بودن مصالح، هزینه و دفعات نگهداری پیش‌بینی شده، محدودیت‌های زیست‌محیطی، طرح‌های توسعه آتی فرودگاه و تغییرات پیش‌بینی شده در ترافیک است.

با توجه به سرعت کم و توقف‌های کوتاه مدت هواپیماها در ابتدا و انتهای باند پرواز و تبعاتی که به لحاظ مقدار تنش حداکثر و زمان بارگذاری برای روسازی‌های انعطاف‌پذیر این مناطق به دنبال خواهد داشت، می‌توان از روسازی صلب (بتنی) در این نواحی استفاده کرد. در این راستا پیشنهاد می‌گردد به جای روسازی تمام آسفالتی در کل طول باند، ۳۰۰ متر ابتدایی و انتهایی باند را روسازی بتنی و مابقی طول باند را روسازی آسفالتی اجراء کرد.

در روسازی‌های صلب، بارگذاری‌های مکرر ممکن است باعث اختلاط بستر نرم با مصالح دانه‌ای اساس یا زیراساس شود. این موضوع باعث ایجاد فضای خالی بزرگی در زیر روسازی و جمع شدن آب می‌شود. بطوری که شرایط پمپ شدن را بوجود می‌آورد. تثبیت بستر و یا زیراساس تاثیر بسزایی در جلوگیری از بوجود آمدن شرایط نامطلوب فوق دارد. (نشریه ۳۵۲) برای رفع این مشکل در پروژه‌های نوسازی، استفاده از لایه اساس سیمانی یا لایه بتن مگر و در پروژه‌های بهسازی اجرای اساس قیری با بازیافت درجای لایه‌های روسازی قابل استفاده، پیشنهاد می‌گردد.

در میان هواپیماهای مختلفی که در فرودگاه‌های جهان تردد می‌کنند B777، A380 بیشترین تنش کششی را بر روسازی باند فرودگاه تحمیل می‌کنند. البته B747-400 نیز که به عنوان هواپیمای طرح فرودگاه مهرآباد می‌باشد، در رتبه سنگین‌ترین هواپیماهای شرکت بوئینگ بوده که به لحاظ تحمل این وزن به هنگام لندینگ به دو ارايه فرود اصلی و مرکزی مجهز شده است. خروجی مدل‌سازی‌هایی که بر اساس پارامترهای این هواپیما برای فرودگاه مهرآباد انجام شد، گویای این موضوع است که فشار چرخ‌ها، نحوه آرایش چرخ‌ها، خصوصاً فاصله بین زوج چرخ‌ها و سطح تماس چرخ‌ها با روسازی نقش مهمی در تعیین میزان تنش کششی بحرانی بر روسازی ایفا می‌کنند که در این میان فاصله بین زوج چرخ‌ها بیشترین تاثیر و فشار چرخ‌ها و سطح تماس چرخ‌ها بر روسازی در مراتب بعدی قرار دارند.

نتایج بدست آمده از مدل‌های ساخته شده گویای آن است که: حداکثر تنش در اولین لایه روسازی که در تماس مستقیم با بار فشاری ناشی از لندینگ و چرخ هواپیما می‌باشد، متمرکز است. با افزایش عمق لایه به تدریج از مقادیر تنش حداکثر کاسته می‌شود.

مقداری تمرکز تنش، مابین لایه‌های اساس و زیر اساس در روسازی‌های انعطاف‌پذیر مشاهده می‌شود.

جابجایی حداکثر نیز همانند تنش با عمق لایه روند کاهشی را نشان داده است. البته لازم به ذکر است که مقدار جابجایی که در لایه اول اتفاق افتاده، بسیار ناچیز است.

مقادیر تنش فشاری، خستگی و ترسکا، همچنین کرنش نیز از همین الگوی روند کاهشی با افزایش عمق لایه تبعیت می‌کنند. در هیچکدام از سناریوها، نقطه بحرانی و تسلیم روی سطح باند مشاهده نمی‌شود. نقاط دارای تنش حداکثر همچنین جابجایی حداکثر عمدتاً در نقاط مرزی است که این مطلب می‌تواند به علت بحث تمرکز تنش در نقاط مرزی باشد. در حالیکه در طول باند به علت گستردگی و وسعت باند این شرایط مرزی وجود ندارد و در صورت وجود درز در روسازی‌های بتنی، وسعت این شرایط مرزی محدودتر می‌شود. بنابراین می‌توان با اطمینان خاطر از بخش عمده‌ای از بحث تمرکز تنش در شرایط مرزی چشم‌پوشی کرد.

در روسازی‌های آسفالتی با توجه به این که سطح باند پرواز بسیار بزرگ می‌باشد، تنش‌های حرارتی زیادی در سطح آن ایجاد خواهد شد. این تنش‌های حرارتی در طولانی مدت، منجر به وقوع ترک‌های عرضی و ترک‌های بلوکی خواهد شد که نتیجه گرادیان حرارتی و اختلاف دمای شب و روز می‌باشد. بنابراین برای اجتناب از این موضوع پیشنهاد می‌گردد تا از پلیمرهای اصلاح کننده برای اصلاح روسازی استفاده شود. آسفالت‌های اصلاح شده در برابر ترک‌های حرارتی و نیز ترک‌های ناشی از خستگی حرارتی مقاومتر از آسفالت‌های متداول می‌باشند. برای این کار می‌توان از پلیمرهای SBS یا گرانولهای پلیمری با پایه SBS که به صورت خشک در میکسر آسفالت ریخته می‌شود، استفاده کرد. لذا در تمام گزینه‌ها، روکش آسفالت رویه به صورت پلیمری در نظر گرفته شده است. در نهایت آسفالت اصلاح شده‌ای با توان مقاومت در برابر تغییرات دمایی شبانه روز خصوصاً در روسازی‌های آسفالتی فرودگاه‌های مناطق سردسیر کشور، پیشنهاد می‌گردد.

زنگوله‌ای تردد هواپیماها در سطح باند به سمت محور مرکزی باند متمایل باشد. حداقل شرایط بحرانی در سطح روسازی اتفاق خواهد افتاد.

همانطور که مدل‌های خروجی نرم‌افزار ABAQUS نشان می‌دهد، عمده تنش حداکثر و جابجایی در شرایط مرزی اتفاق افتاده است. این مطلب گویای آن است که هر چقدر الگوی

۶-مراجع

-طاهرخانی، حسن و صفاری، حامد (۱۳۹۸). بررسی تاثیر هواپیماهای سنگین بر روی ترک‌های انعکاسی روسازی مرکب فرودگاه‌ها با استفاده از روش المان محدود تعمیم‌یافته. فصلنامه علمی پژوهشی حمل و نقل، سال شانزدهم.

- غافری، مرضیه و حجازی، سید جعفر (۱۳۹۴). تحلیل و بررسی آخرین نسخه نرم‌افزار سازمان هوانوردی امریکا در طراحی روسازی بتنی باند فرودگاه. اولین کنفرانس ملی فناوری‌های نوین بتن، رشت، گیلان.

- فخری، منصور و غنی‌زاده، علیرضا (۱۳۹۱). توسعه برنامه‌ای برای تحلیل غیرخطی روسازی‌های انعطاف‌پذیر. فصلنامه علمی پژوهشی حمل و نقل، سال سوم.

- میرزا خانلری، امید، طاهری، نیما و ملکی‌ها، مهدی (۱۳۹۰). طراحی روسازی باند فرودگاه با استفاده از نرم‌افزار FAARFIELD. دومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در عمران، معماری و مدیریت شهری.

-Divandari, H., Sarkar, A., Kargar Aldaghi, O., and Hosseinian, SM., (2025). Evaluation of Performance Characteristics of Microsurfacing Treatment Modified With Gilsonite as a Substitute for Natural Aggregate Filler. *International Journal of Pavement Engineering*, 26 (1), 2477766

doi.org/10.1080/10298436.2025.2477766

-Golizadeh, M., Divandari, H., and Sobhi, S., (2023). Investigation of using Coal Waste in asphalt mixtures and its effects on moisture damage with the approach of bitumen chemistry and asphalt mixture mechanical test. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(12) (2023) 965-968.

doi.org/10.22060/ceej.2022.21476.7735

- Haydon, M., Wardle, L., and Chai, G., (2016). Airfield Pavement Design for a Major Airport Using FAARFIELD and APSDS. Proc. of the Eighth Intl. Conf. on Maintenance and Rehabilitation of Pavements. Published by Research Publishing, Singapore.

- Kaya, O., (2020). Comparative Design and Economic Analysis for Airfield Pavements. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*.

- Moghimi, S., Shafabakhsh, G.A., and Divandari, H. (2023). Evaluation of rutting, fatigue, and moisture resistance of low-energy Asphalt mixtures modified by crumb rubber. *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2023, doi.org/10.1155/2023/6668963

-اخوان بهابادی، محمدجواد، خیبری، محمدمهدی و فتوحی فیروزآبادی، علیرضا (۱۳۹۱). بررسی عددی رشد ترک بر پایه ضرایب شدت تنش در اثر بارگذاری چرخ هواپیما در روسازی آسفالتی فرودگاه. پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۳، شماره ۳، شماره پیاپی ۴۸، پاییز، ۳۰-۱۴.

- باباگلی، رضوان، عباسپور مرزبالی، کریم، محمدی، زهرا و عاملی، علیرضا (۱۳۹۸). مقایسه فنی و اقتصادی روسازی بتن غلتکی با روسازی آسفالتی و اولویت بندی پارامترهای موثر با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی. فصلنامه مهندسی حمل و نقل، شماره ۵۸، ۳۰۶-۲۹۱.

- خانی، علی و گلی، احمد (۱۳۹۰). مدل سازی رفتار آسفالت در شرایط الاستیک و ویسکوالاستیک تحت تحلیل دینامیکی. دومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در عمران، معماری و مدیریت شهری.

- شرکت فرودگاه‌ها و ناوبری هوایی ایران، (۱۴۰۲). گزارش مطالعات بهسازی اپرون غربی فرودگاه بین‌المللی مهرآباد. مطالعات مرحله اول روسازی، مهندسین مشاور گسترش محمدیان.

- شرکت فرودگاه‌ها و ناوبری هوایی ایران (۱۴۰۰). گزارش مطالعات روسازی باند ۲۹ چپ فرودگاه بین‌المللی مهرآباد. پروژه بهسازی سطوح پروازی و اجرای سیستم زهکشی باند ۲۹ چپ فرودگاه بین‌المللی مهرآباد.

- شفاعبخش، غلامعلی، اکبری، عباس و کاشی، احسان (۱۳۹۱). تحلیل عددی اثر مجموعه چرخ‌های انواع هواپیماها در تعیین نواحی بحرانی روسازی صلب باند فرودگاه. مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال دهم، شماره ۲۹.

- شفاعبخش، غلامعلی و اکبری، عباس (۱۳۹۰). مطالعه اثر خرابی هواپیماهای پهن‌پیکر بر روسازی باند فرودگاه. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

Aggregate Replacing Coarse Aggregates and Modified With Nano-AL₂O₃. *International Journal of Pavement Engineering*, 26 (1), 2532690
doi.org/10.1080/10298436.2025.2532690

-Shafabakhsh, G., and Kashi, E., (2012). A Numerical Study Effect of Aircraft's Main Gear Configuration on Airport Runway Damages. *Technics Technologies Education Management TTEM Journal*, Vol. 7, No. 2, 811-819.

-U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, (2021). Airport Pavement Design and Evaluation. *Advisory Circular*, AC NO 150/5320-6G.

-Wang, H., and Al-Qudi, I., (2010). Evaluation of Surface – Related Pavement Damage Due to Tire Braking.

-Pei, C., and Wang, S.Y., (2005). The Development and Application of Finite Element Model in the Chiang-Kai-Shek International Airport. *Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Pavements*, Colorado, USA.

-Shen, S., Zhang, W., Wang, H. and Huang, H., (2017). Numerical Evaluation of Surfaceinitiated Cracking in Flexible Pavement Overlays with Field Observations. *Road Materials and Pavement Design*, Taylor & Francis, No. 1, 221-234.

-Shimu, T.H., Rahman, M.M., Naim Hossain, Md., Nilu, N.J., and Ahmad, K.S., (2015). Finite Element Analysis of Airfield Flexible Pavement. *First International Conference on Advances in Civil Infrastructure and Construction Materials*, Daka, Bangladesh.

-Tahmouresi, G., Amouzadeh Omrani, M., Divandari, H., and Seyedkazemi, A., (2025). Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Containing Lightweight Expanded Clay

Analysis and Comparison of the Performance of Rigid and Flexible Airfield Pavements in Iran Using FAARFIELD and ABAQUS Finite Element Software

Hassan Divandari, Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Darab Kheiri, Department of Civil Engineering, Nos.C., Islamic Azad University, Nowshahr, Iran.

E-mail: ha.divandari@iaau.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: January 2026

ABSTRACT

Designing airport pavements has always been challenging because, in addition to providing sufficient strength to withstand the load from aircraft traffic, it must be as economical as possible. Therefore, researchers have developed various software to meet this need. The latest version of the software provided by the Federal Aviation Administration (FAA) for this purpose is FAARFIELD. This software, due to its use of a three-dimensional finite element model in pavement design, offers a more realistic representation of aircraft loading on the runway compared to its previous versions. In pavement design, various technical and economic factors such as traffic volume, cost, soil type, weather conditions, materials, durability, strength, pavement lifespan, maintenance, and environmental issues must be considered. In this research, considering the three-dimensional finite element modeling conducted using FAARFIELD and ABAQUS software, various models have been created to determine the critical stress on the airport runway pavement and identify critical areas for two types of rigid and flexible pavements under the loading conditions of aircraft operating at Mehrabad International Airport. In the analysis process, after modeling with FAARFIELD software, a second analysis was conducted using ABAQUS software and the output parameters of the first analysis, such as layer thickness, modulus of elasticity, and Poisson's ratio. Assumptions for defining fixed supports and boundary conditions, as well as elastic and viscoelastic theories for rigid and flexible pavements respectively, were made. The ABAQUS output results, in addition to confirming the FAARFIELD results, provided more comprehensive information on stress, strain, maximum displacement of the pavement, and critical points. The maximum stress and displacement are concentrated in the first layer of the pavement, which is in direct contact with the compressive load resulting from the landing and wheel of the aircraft. As the depth of the layer increases, the values of compressive stress, fatigue, and Tresca strain gradually decrease. It was also confirmed that in none of the scenarios does a critical or yielding point appear on the surface of the runway. Instead, the points with maximum stress and displacement are mainly at the boundary points, which can be due to the stress concentration at these boundary points. Due to the length of the runway, these boundary conditions do not exist, and in the presence of joints in concrete pavements, the extent of these boundary conditions is reduced. Therefore, the major part of the stress concentration issue at boundary conditions can be safely overlooked.

Keywords: Boundary Conditions, Viscoelastic Theory, Three-Dimensional Finite Element, FAARFIELD