



تحلیل بار ضربه‌ای وارد شونده به صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه با در نظر گرفتن تغییر شکل تایر هواپیما

احسان براتی^{۱*}، اصغر مهدیان^۱ و مهرداد دهقانی^۲

^۱ استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران
^۲ کارشناس ارشد، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران
مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۱/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹

چکیده

هدف از این مقاله، بررسی استحکام صفحات آلومینیومی 6061-T6 ترمیم کننده باند فرودگاه تحت ضربه ناشی از فرود هواپیما، با در نظر گرفتن اثرات دمپینگ تایر هواپیما است. تایر هواپیما، با استفاده از معیار ماده‌ی هایپرالاستیک مونی - ریولین مدل شد. پارامترهای تأثیر گذار بر استحکام صفحات شامل تغییر سرعت عمودی در مقادیر ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه و سرعت افقی در مقادیر ۴۲، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ متر بر ثانیه و شاخص خاک در مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ و عمق خاک در مقادیر ۱۶۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلیمتر، بررسی شد. نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت‌های عمودی و افقی فرود، تنش ایجاد شده در این صفحات افزایش می‌یابد، اما با افزایش مقدار شاخص خاک، تنش کاهش می‌یابد. در عین حال عمق‌های بیش از ۳۰۰ میلیمتر برای مدل‌سازی عمق خاک، تأثیر معناداری در تنش‌های به‌وجود آمده در صفحات ندارد. نتایج حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار با نتایج تست تجربی مقایسه گردید و تطابق خوبی (اختلاف حدود ۱۰ درصد) مشاهده شد؛ همچنین مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از عدم لحاظ نمودن اثر دمپینگ تایر نشان داده است که بدون در نظر گرفتن اثرات دمپینگ، تنش‌ها ۱۵ درصد بزرگتر می‌باشند.

کلمات کلیدی: صفحات ترمیم کننده باند؛ آلیاژ آلومینیوم 6061-T6؛ تایر؛ هایپرالاستیک؛ شاخص خاک.

The Impact Analysis on Airfield Matting Plate with Considering the Aircraft Tyre Deflection

E. Barati^{1*}, A. Mahdian¹, M. Dehghani²

¹ Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran.

² M.Sc., Faculty of Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran.

Abstract

The main aim of this paper is the study of the strength of AM-2 matting plate made of Al6061-T6 under impact loads due to aircraft landing. In this study, the damping effects of the aircraft tire have been modeled by means of Mooney-Rivlin hyperelastic criterion. Effective parameters such as the landing vertical velocity at 1.5, 2, 2.5, and 3 m/s; the landing horizontal velocity at 42, 45, 50, 55, and 60 m/s; the CBR value of subgrade at 5, 10, 15, 20 and 25; and the thickness of subgrade at 160, 200, 300, and 500 mm, have been studied. The results showed that the stresses in matting plate increases with increasing both horizontal and vertical components of landing velocity, but decreases by increasing the CBR value. On the other hand, considering the subgrade thickness greater than 300mm has no significant effect on stresses. The results obtained from modeling in software has been compared with that obtained experimentally and good agreement was found. Also, comparison of the results with those obtained without modeling the damping effects showed that the stresses be 15% greater in conditions without modeling damping of the tire.

Keywords: Matting Plates; Aluminum 6061-T6; Tire; Hyperelastic; CBR.

۱- مقدمه

صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه^۱ انواع مختلفی دارد. از این صفحات برای ترمیم سریع باند آسیب دیده فرودگاه و یا ساخت یک فرودگاه موقتی استفاده می‌شود. اولین بار این صفحات، توسط ارتش آمریکا برای ایجاد یک فرودگاه اضطراری برای هواپیما در دهه ۱۹۴۰ مورد استفاده قرار گرفت. روش‌های مرسوم موجود برای ساخت باند فرودگاه، همانند آسفالت و کفی‌های بتنی و سیمانی، نیازمند در نظر گرفتن منابع و یک دوره زمان طولانی است که این خود عامل بازدارنده‌ای برای توسعه و ساخت فرودگاه در مدت زمان کوتاه است. توانایی ساخت و توسعه سریع باند فرودگاه برای اعزام نیروهای هوایی، از ویژگی مهم صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه است که استفاده از آن‌ها در هر منطقه جغرافیایی از دیگر ویژگی آن است. یکی از انواع این صفحات ترمیم کننده، صفحاتی از جنس آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 هستند. صفحات آلومینیومی ترمیم کننده باند فرودگاه، توسط نیروی دریایی آمریکا در دهه ۱۹۶۰ برای استفاده هواپیماهای باری و جنگی طراحی شد.

پیشینه سیستم‌های صفحات ترمیم کننده و کاربردهای آن، توسط راشین و هوارد تحقیق شده است که طی آن تحقیق مهمی روی طراحی سیستم صفحات ترمیم کننده برای فرودگاه هواپیمایی صورت گرفت که توسط ارتش آمریکا بین سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۷۰ میلادی انجام شده بود [۱]. در سال‌های ۱۹۵۱ و ۱۹۵۵ تحقیقی توسط پیکت برای توصیف رفتار مناطق فرودگاهی که با صفحات ترمیم کننده ایجاد شده بودند، تحت بار وارده از هواپیما برای صفحات ترمیم کننده با غشاء نازک و تحت بستر زیرینی انجام شد که قابلیت تحمل تنش‌های برشی را نداشت [۲]. هار و نوسنر در سال ۱۹۶۹ با انجام تحلیل‌های پیشرفته، راندمان و کارایی محل اتصال صفحات ترمیم کننده را محاسبه کردند [۳]. گارتزل در سال ۲۰۰۷، یک تحقیق در مقیاس کامل روی صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه انجام داد. وی نشان داد که اگر نیاز به پاسخ مفصل در اتصالات باشد، استفاده از مفهوم اجزاء محدود سه بعدی مناسب‌ترین روش است [۴].

گارتزل و همکاران در سال ۲۰۰۹، پنج سیستم صفحات ترمیم کننده منحصر به فرد را در تعداد عبور و مرورهای مختلف هواپیما در مقادیر مختلف شاخص خاک آستر، مورد ارزیابی قرار دادند. آنان تغییر شکل‌های ایجاد شده در صفحات ترمیم کننده و بستر خاک را تحت تعداد عبور و مرور هواپیما به صورت تجربی به دست آوردند. سپس به تفصیل نتایج را ارائه دادند، ولی تخمین‌ها برای یک سیستم کارآمد بسط داده نشد [۵]. گنزالز و راشینگ در سال ۲۰۱۰ با استفاده از داده‌های تست مقیاس کامل و محاسبه مقادیر مدول‌های الاستیسیته برای سیستم‌های صفحات ترمیم کننده، یک مدل مکانیزم تجربی را با استفاده از تئوری الاستیک لایه‌ها بسط دادند. در این تحقیق، تاثیر اتصالات نادیده گرفته شد [۶]. دوپل و همکاران در سال ۲۰۱۴ با بهره‌گیری و توسعه مدل گارتزل که در سال ۲۰۰۷ انجام شده بود، تخمین‌های بهتری را با استفاده از یک مدل سه بعدی به دست آوردند. این مفهوم با استفاده از داده‌های چهار نقطه خمشی برای دیفرانسیل‌گیری مقادیر مدول‌های قسمت درونی صفحات ترمیم کننده و مدول‌های طولی و عرضی اتصالات به کار گرفته شد [۷]. گارسپا و هاوارد در سال ۲۰۱۶، یک تحقیق تجربی در شش نوع صفحات ترمیم کننده از جمله صفحات آلومینیومی 6061-T6 ترمیم کننده باند فرودگاه را روی بستر خاک با شاخص خاک برابر ۶، تحت شبیه‌سازی بارگذاری‌های هواپیما انجام دادند. آنان میزان تغییر شکل‌های صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه را از یک تا ده هزار تعداد عبور و مرور هواپیما روی آن‌ها مشخص کردند [۸]. در تحقیقات ذکر شده فوق، عمدتاً نتایج مبتنی بر تست‌ها میدانی بوده، در معدود تحقیقاتی که تحلیل انجام شده است، فقط اثر نیروی تایر روی صفحات اصلاح باند در نظر گرفته شده است.

در زمینه شبیه‌سازی تایر نیز، پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. کورونویچ و همکاران، در سال ۲۰۰۷ ساختار تحلیل اجزاء محدود ایستا را که در طراحی تاثیر استفاده می‌شود، تحلیل و اهداف ممکن از تحلیل اجزاء محدود را در حالت ایستا بررسی کردند. آن‌ها از تایر رادیال با شعاع ۱۴ اینچ برای بررسی نتایج استفاده کردند [۹]. قریشی و

² California Bearing Ratio¹ AM-2 Matting Plate

را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد، ضریب اصطکاک ۰/۵ برای جلوگیری از لغزش رویه تایر در آزمون‌های بارگذاری ایستا برای این تایر خاص کافی است. مقادیر کمتر اصطکاک، منجر به لغزش ترد و کاهش سفتی عمودی تایر می‌شود [۱۴]. مویسسکو و همکاران در سال ۲۰۱۱، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی سه‌بعدی تایر رادیال سنگین باری را انجام دادند. هدف آن‌ها، به‌دست آوردن توزیع تنش در بخش تماس تایر با زمین بود [۱۵]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ نیز با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، بارگذاری عمودی را روی تایر شبیه‌سازی کردند. آن‌ها رابطه بین بار عمودی و تغییرشکل عمودی تایر و نیز توزیع فشار ناحیه تماس را در دو حالت تجربی و استفاده از روش اجزاء محدود به‌دست آوردند [۱۶]. در سال ۲۰۱۴، جئو تحقیقی در رابطه با مدل‌سازی یک تایر هواپیما^۳ به همراه رینگ آن انجام داد. در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود و با به‌کارگیری مدل ماده هایپرلاستیک یئوه^۴ در نرم‌افزار ال - اس - داینا اندرکنش میان تایر و رینگ را مورد ارزیابی قرار داد و با نتایج تجربی مقایسه کرد [۱۷].

در خصوص تحلیل ضربه در صفحات و ورق‌ها نیز، کارهای تحقیقاتی متعددی انجام شده است که به عنوان نمونه به مواردی از آنها اشاره می‌شود. ملک‌زاده و همکاران [۱۸]، اثر بارگذاری ضربه‌ای در فرآیند رشد ترک در فولاد فورج EA4T مورد استفاده در ساخت محور چرخ واگن را بررسی نمودند. آنها نشان دادند که حد معینی از انرژی ضربه‌ای برای ایجاد ناحیه پلاستیک نوک ترک وجود دارد که می‌تواند موجب جوانه‌زنی ترک گردد. بابایی و همکاران [۱۹]، تغییر شکل ورق‌های مستطیلی تحت بار ضربه‌ای را به صورت ریاضی و تجربی مطالعه کردند. آنها یک تابع صریح برای داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد، بر اساس پارامترهای بی‌بعد ارائه نمودند. پانچاری و همکاران [۲۰] پاسخ غیرخطی ضربه کم سرعت ورق کامپوزیتی ویسکوالاستیک را به کمک تئوری لایه ای به دست آوردند. قاجار و همکاران [۲۱] ضربه کم سرعت خارج

همکاران در سال ۲۰۰۷، یک تایر رادیال را با نرم‌افزار آباکوس و زیر بار عمودی ایستا با هدف بررسی اثر طرح رویه، روی نمودار نیرو-جابجایی و شکل جای ردّ تایر، بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده تطابق خوبی با کارهای تجربی داشت. آن‌ها نشان دادند، تحلیل اجزاء محدود تایر بدون در نظر گرفتن اثر طرح رویه نه تنها به زمان اجرا و منابع سخت‌افزاری کمتری نیاز دارد، بلکه تفاوت نتایج مربوط به تغییرشکل‌های پیش‌بینی شده بین دو مدل یاد شده نیز چندان محسوس نیست [۱۰]. در کار دیگری قریشی، تایر رادیال دیگری را در حالت ایستا و با در نظر گرفتن طرح رویه بررسی و اثر زاویه تسمه را روی نتایج ارزیابی کرد. وی دریافت، با کاهش زاویه تسمه، سفتی شعاعی افزایش می‌یابد، در حالی که طرح رویه اثر چندانی روی مقدار سفتی شعاعی نداشته و نمودار نیرو - جابجایی در دو حالت تقریباً یکسان است [۱۱]. ماینز و همکاران، در سال ۲۰۰۷ ضربه قطعات لاستیکی تایر هواپیما را روی ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینوم بررسی کردند. این بررسی تجربی، از یک مجموعه تست‌هایی انجام شدند که شامل قطعات بریده شده از تایر هواپیما روی ورق‌های آلیاژ آلومینوم با ابعاد ۳۰۰*۳۰۰ میلی‌متر و با سرعت عمودی ۱۳۵ متر بر ثانیه و زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه بود. آن‌ها برای به‌دست آوردن ثابت‌های ماده هایپرلاستیک در مدل مونی - ریولین^۱ تست‌های کشش و فشار تک محوره را روی قطعات تایر انجام دادند و با رسم نمودار تنش - کرنش، ضرایب ماده را استخراج کردند [۱۲]. ماینز و همکاران در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۰۷، شبیه سازی عددی یک مدل گسسته برای یک ماده لاستیکی شکل دارای الیاف تقویت کننده، برای شبیه سازی عددی ضربه قطعات تایر هواپیما روی ورق آلیاژ آلومینوم در نرم‌افزار ال - اس - داینا^۲ پیشنهاد کردند. در این نرم‌افزار با استفاده از ضرایب ماده هایپرلاستیک حاصل شده در مدل مونی - ریولین در تحقیق قبل، قطعات تایر مدل شد [۱۳]. گروبر و همکاران در سال ۲۰۰۸، ساخت مدل اجزاء محدود را که قابلیت پیش‌بینی رفتار ایستای تایر داشته باشد، با جزئیات زیادی مورد توجه قرار دادند. آنها به‌ویژه اثر اصطکاک و کجی

³ H41x16.0R20⁴ Yeoh¹ Mooney - Rivlin² LS DYNA

۲- صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه

صفحات آلومینیومی ترمیم کننده باند فرودگاه، در ابعاد استاندارد ۳۸*۶۱۰*۳۵۶۰ میلی‌متر هستند که به صورت چفت و بست به هم متصل می‌شوند و فرودگاهی را در ابعاد بزرگ تشکیل می‌دهند. شکل‌های ۱ و ۲ نماهای مختلفی از این صفحات را نشان داده‌اند.



شکل ۱- صفحات آلومینیومی ترمیم کننده باند در حال متصل شدن به هم [۲۲]



شکل ۲- نمایی از مقطع صفحات AM-2 ترمیم کننده باند فرودگاه [۲۲]

از این صفحات به عنوان روشی سریع برای ترمیم باند آسیب دیده فرودگاه و یا ایجاد یک فرودگاه موقتی استفاده می‌شود. در جدول ۱ خصوصیات مکانیکی آلومینیوم 6061-T6 آورده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

چگالی (ton/mm ³)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)
۲/۷*۱۰ ^{-۳}	۰/۳	۷۲۰۰۰	۲۴۱

از مرکز ورق ساندویچی مستطیلی با رویه های کامپوزیتی تحت پیش بار دوبعدی را به روش الاستیسیته غیرخطی تحلیل کردند.

یکی از صفحاتی که برای ترمیم باند فرودگاه و یا احداث بسیار سریع باند مورد استفاده قرار می‌گیرد، صفحات ترمیم باند ای - ام - ۲ است. هدف از این تحقیق، بررسی استحکام این صفحات تحت ضربه ناشی از فرود هواپیما است. در این پژوهش، تایر هواپیما و اثرات دمپینگ آن مدلسازی شده و این اثرات بر مقدار تنش‌ها و استحکام صفحات ترمیم باند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه سرعت افقی و عمودی فرود می‌تواند اندکی از حالت استاندارد آن فاصله داشته باشد، سرعت‌های مختلف عمودی و افقی فرود، مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ همچنین مقادیر مختلف شاخص خاک بستر بر مقادیر تنش‌ها و استحکام صفحات بررسی خواهد شد.

تفاوت اصلی کار حاضر با تحقیقات انجام شده قبلی، مدل نمودن اثرات دمپینگ تایر هواپیما و بررسی اثرات آن بر استحکام صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه است. عمده کارهای تحقیقاتی انجام شده قبلی روی صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه، مدلسازی اثر نیرویی تایر هواپیما روی صفحات است. این اثر نیرویی نیز، عمدتاً به صورت نیروی استاتیکی ناشی از سکون هواپیما روی صفحات است. به عبارت دیگر، هنگام بررسی استحکام صفحات ترمیم، اثرات دمپینگ تایر هواپیما تاکنون مدل نشده است. در تحقیقاتی که در آن اثر دمپینگ تایر در نظر گرفته شده نیز، صفحات ترمیم باند مدنظر نبوده است، بلکه دستیابی به یک طراحی بهینه برای تایر مورد نظر بوده است. به عبارت دیگر، نوآوری این تحقیق، وجود همزمان صفحات ترمیم باند فرودگاه و اثرات دمپینگ تایر است. همچنین در نظر گرفتن نیروی ناشی از ضربه (و نه نیروی ناشی از سکون) هواپیما روی صفحات ترمیم کننده باند، از نوآوری دیگر این تحقیق است که در تحقیقات گذشته در نظر گرفته نشده است.

در انتهای این پژوهش، به منظور مقایسه اثر دمپینگ تایر هواپیما بر استحکام صفحات باند، با مدل‌سازی اثر نیرویی فرود هواپیما (بدون در نظر گرفتن و مدلسازی تایر هواپیما)، هر دو روش، مدلسازی و تحلیل و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۳- مدلسازی در نرم افزار المان محدود

۳-۱- مدل تایر هواپیما

یک تایر ارابه فرود اصلی هواپیمای مورد نظر، دارای شماره مشخصه ۲۰-۲۰۰۰*۵۶ اینچ است. فشار داخلی ۶۵۰ کیلوپاسگال و وزن وارده به آن از طرف هواپیما به هر تایر، برابر ۱۳/۶ تن است. در جدول ۲ ابعاد تایر با توجه به شماره مشخصه تایر، مشخص شده است.

جدول ۲- ابعاد تایر ارابه فرود هواپیما

قطر حلقه (mm)	عرض (mm)	قطر اصلی (mm)
۵۰۸	۵۰۸	۱۴۲۲
		ابعاد

لاستیک تایر، به دلیل خاصیت تغییرشکل زیاد، یک ماده هایپرالاستیک به شمار می آید. به همین دلیل برای توصیف رفتار این گونه مواد، نمی توان از روابط الاستیک استفاده کرد. انتخاب یک تابع انرژی کرنشی W مناسب، هسته و اساس فرآیند مدلسازی یک ماده لاستیکی هایپرالاستیک است. همچنین تعیین دقیق ثابت های ماده برای انتخاب تابع، اهمیت ویژه ای دارد. مدل های مختلفی برای بیان رفتار هایپرالاستیک تایر ارائه شده است که از میان آنها، مدل مونی - ریولین یک مدل مناسب با خطای نسبتاً کم است [۲۳]. در این مدل پتانسیل انرژی کرنشی با رابطه (۱) در نظر گرفته شده است:

$$U = \sum_{i,j=0}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (1)$$

در آن U تابع انرژی کرنشی بر واحد حجم، J_{el} ضریب حجم الاستیک، I_1 و I_2 ناورداهای اول و دوم تانسور کرنشی انحرافی، N تعداد ترم های تابع انرژی کرنشی و C_{ij} و نیز D_i ثابت های ماده است. ثابت های ماده در مدل های ارائه شده برای رفتار هایپرالاستیک با استفاده از برازش تابع انرژی کرنشی در داده های تنش - کرنش تجربی به دست آمده بر مبنای یک روش بهینه حداقل مربعات غیرخطی تعیین می شوند. تست های تجربی کشش، فشار و برش خالص، اصلی ترین تست هایی هستند که می بایست

برای به دست آوردن ثابت های ماده هایپرالاستیک انجام داد [۲۴].

ضرایب مورد نیاز ماده در مدل مونی - ریولین برای مدلسازی رفتار لاستیک، از تحقیق ماینز و همکاران [۱۲] به دست آمد که در سال ۲۰۰۷ برای تایر هواپیما با استفاده از تست استخراج کردند. آنان تست های کشش و فشار تک محوره را در قطعات لاستیکی تایر هواپیما انجام دادند و با رسم نمودار تنش-کرنش و برازش منحنی حاصل شده، ضرایب ماده را استخراج کردند. این ضرایب برابر $C_{10} = 0.5$ و $C_{01} = 4/2$ نیوتن بر میلیمتر مربع است.

ساختمان تایر دارای اجزاء مختلفی است. لاستیک، لایه ها و ریسمان های تقویت کننده، رویه، تسمه یا کمربند، منجید^۲ و طوقه، اجزای اصلی ساختمان یک تایر هستند. شکل ۳ ساختمان تایر را نشان می دهد.



شکل ۳- اجزای تشکیل دهنده تایر هواپیما [۱۴]

جنس رویه تایر از لاستیک است و رفتار هایپرالاستیک دارد. ضرایب C_{10} و C_{01} ذکر شده در مدل ماده هایپرالاستیک مونی - ریولین به کار برده شد که چگالی آن برابر 1100 Kg/m^3 و ضریب پواسون آن برابر 0.495 است. تسمه های تایر که در زیر رویه تایر قرار دارند، دارای یک سری ریسمان تقویت کننده می باشند. خواص مکانیکی و زاویه قرارگیری ریسمان های تقویت کننده در تسمه ها، منجید و طوقه تایر، در جدول ۳ قابل مشاهده است.

¹ Tread² Carcass

تغییر شکل دائمی نباید در خاک به وجود بیاید. با توجه به اینکه رفتار صفحات ترمیم‌کننده باند الاستیک خطی است، چنانچه خاک تحت تغییر شکل دائمی قرار بگیرد، جدایش بین خاک و صفحات رخ می‌دهد و باعث افزایش زیاد تنش‌ها در صفحات می‌شود؛ بنابراین در این تحقیق، رفتار خاک الاستیک خطی فرض می‌شود و اجازه تغییر شکل پلاستیک داده نمی‌شود.

۳-۳- قیود و شرایط مرزی

برای ایجاد تماس مطلوب بین تایر و صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه، از روش تماس سینماتیک استفاده شد؛ همچنین در قسمت خواص تماس، برای تعریف ضریب اصطکاک بین تایر و صفحات ترمیم‌کننده، از روش پنالتی استفاده شد. ضریب اصطکاک بین لاستیک تایر هواپیما و صفحات آلومینیومی ترمیم‌کننده باند فرودگاه برابر ۰/۷۷۸ است [۱۲].

دیواره‌ها و همچنین انتهای بستر رویی و زیرین خاک در تمام راستاها اعم از راستای محور x، y و z و کلیه راستاهای چرخش مقید شده‌اند. شکل ۴ مدل کامل شده تایر، صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه و بستر خاک را به همراه مش‌بندی آن‌ها نشان می‌دهد.

صفحات ترمیم‌کننده به صورت سه‌بعدی و با المان پوسته مدل گردید. برای رویه تایر و خاک نیز، از المان جامد^۱ استفاده شد. لایه‌های تقویت‌کننده تایر نیز، با المان پوسته مدل شد. مجموع المان‌های استفاده شده در مدل‌سازی، برابر ۵۴۱۴۸ المان بود که ۲۰۰۴۰ المان آن مربوط به صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه و ۱۲۰۴۴ المان مربوط به مدل‌سازی تایر بود. مابقی المان‌ها در بستر رویی خاک با تعداد ۱۵۷۹۲ و در بستر زیرین با تعداد ۶۲۷۲ به کار رفت.

۴- صحت‌سنجی مدل ایجاد شده

در مدل‌سازی انجام شده، ابتدا شرایط در نظر گرفته شده در مقاله گارسیا و هاوارد مدل شد [۸]. آن‌ها تست‌هایی برای شش نوع صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه انجام دادند که

جدول ۳- خواص مکانیکی و زاویه قرارگیری در

مدل‌سازی قسمت‌های مختلف تایر

زاویه قرارگیری (درجه)	چگالی Kg/m ³	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته GPa	تسمه
۳۰	۳۹۴۰	۰/۳	۴۰	تسمه
۹۰	۱۳۹۰	۰/۲۸	۵	منجید
۰	۷۸۶۰	۰/۲۸	۲۰۰	طوقه

۳-۲- مدل‌سازی بستر خاک

میزان سفتی خاک‌ها با شاخص خاک تعیین می‌شود. هرچه خاک نرم‌تر باشد، مقدار شاخص خاک کمتر و هرچه سخت‌تر باشد، این مقدار بیشتر است. محدوده شاخص خاک مورد نظر در این تحقیق، مقادیر بین ۵ تا ۲۵ است. این محدوده در اصطلاح باند، خاک نرم، متوسط و سفت را شامل می‌شود. به این صورت که تاثیر مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ روی استحکام صفحات ترمیم‌کننده، مورد ارزیابی قرار گرفته شد.

همچنین تاثیر عمق خاک رویی مدل‌سازی شده روی استحکام صفحات ترمیم‌کننده برای عمق‌های ۱۶، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. جدول ۴ مشخصات خاک مدل شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، چنانچه میزان شاخص خاک در عدد ۱۱ ضرب شود، مقدار مدول الاستیسیته خاک بر حسب مگاپاسکال به دست می‌آید.

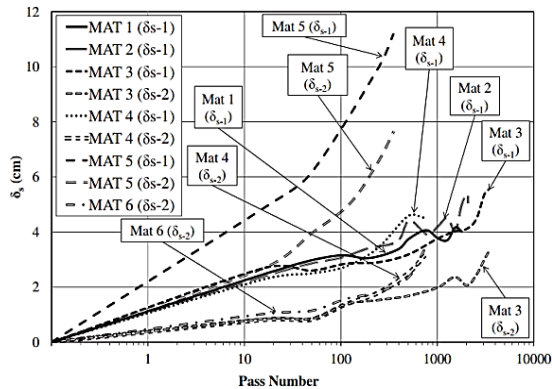
جدول ۴- مشخصات خاک مورد نظر

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	شاخص خاک (CBR)	عمق خاک (mm)	خاک رویی
۰/۳	۱۶۵	۱۵	۱۶۰	خاک رویی
۰/۳	۳۳۰	۳۰	۴۴۰	خاک زیرین

رفتار خاک در حین نیروی ضربه‌ای ناشی از فرود هواپیما و حرکت هواپیما روی صفحات ترمیم‌کننده باند و نیز سکون هواپیما می‌بایست در محدوده الاستیک باشد و هیچ گونه

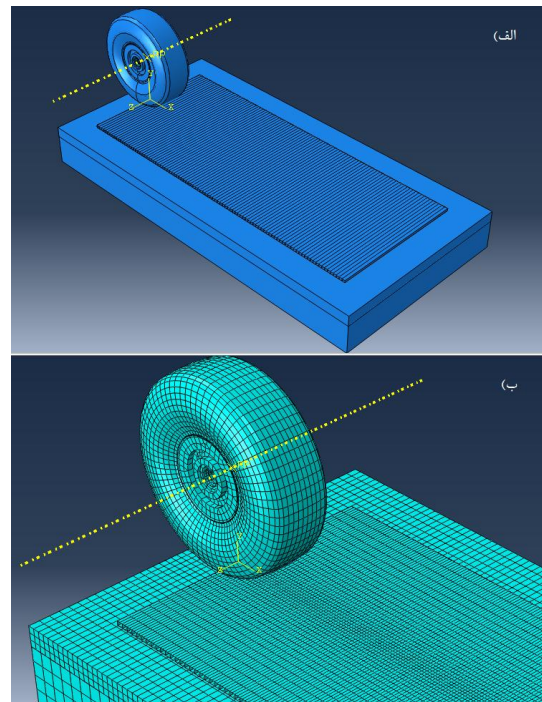
^۱ Solid

بستر خاک طی تعداد عبورهای مختلف تایر، برای شش نوع صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه، به صورت شکل ۵ مشخص شده است. در شکل ۵، صفحات آلومینیومی مورد نظر در این تحقیق، با عنوان MAT1 نمایش داده شده است.



شکل ۵- تغییر شکل به دست آمده در بستر خاک در تعداد عبورهای مختلف تایر روی صفحات ترمیم کننده در تحقیق گارسیا و هاوارد [۸]

همانطور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، با افزایش تعداد گذر وسیله مذکور روی صفحات ترمیم کننده، تغییر شکل ایجاد شده در بستر خاک افزایش یافته است که این افزایش ناشی از به وجود آمدن تغییر شکل پلاستیک در خاک در مراحل قبلی عبور تایر است. حال در این تحقیق، شرایط تست در تحقیق گارسیا و هاوارد با مقدار شاخص خاک برابر ۶، بارگذاری تایر برابر ۱۵۶/۸ کیلونیوتن و شبیه سازی عبور تایر روی صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه انجام شد. سپس مقدار تغییر شکل به وجود آمده در بستر خاک که در شکل ۶ نمایش داده شده است، با مقدار تغییر شکل ایجاد شده در تحقیق گارسیا و هاوارد برای اولین عبور تایر در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه مقایسه شد. این مقدار در شبیه سازی انجام شده، تقریباً برابر ۹،۳۸ میلیمتر است. در تحقیق گارسیا و هاوارد، این مقدار در اولین گذر تایر روی صفحات آلومینیومی مورد نظر تقریباً برابر ۱ سانتیمتر، معادل ۱۰ میلیمتر است. مقدار به دست آمده از شبیه سازی با مقدار



شکل ۴- الف) مدل کامل شده تایر، صفحات ترمیم کننده و بستر خاک و ب) مش بندی مدل

دارای جنس و هندسه متفاوتی بودند و روی بستر خاک با شاخص خاک برابر ۶ قرار داشتند را تحت شبیه سازی بارگذاری هواپیمای F15E با یک وسیله متحرک انجام دادند. هدف آن‌ها، به دست آوردن تفاوت میزان تغییر شکل در بستر خاک در تعداد عبورهای مختلف تایر هواپیما روی صفحات ترمیم کننده‌ای بود که دارای خواص متفاوتی بودند. آنها درون وسیله مورد نظر، وزنه‌هایی قرار دادند تا وزن هواپیما معادل ۱۵۶/۸ کیلو نیوتن شبیه سازی شود. یکی از انواع صفحات ترمیم کننده در تحقیق آن‌ها، صفحات آلومینیومی ای - ام - ۲ بود. آن‌ها طی هر بار عبور وسیله روی صفحات ترمیم کننده، با استفاده از یک شاخص اندازه گیر، تغییر شکل خمشی به وجود آمده در صفحات ترمیم کننده را اندازه گیری کرده، سپس با قرار دادن مقادیر اندازه گیری شده، در رابطه‌ای که در تحقیق راشینگ و هاوارد که در سال ۲۰۱۵ ارائه شده بود [۱]، مقدار تغییر شکل بستر خاک را به دست آوردند. در تحقیق گارسیا و هاوارد، تغییر شکل‌های ایجاد شده برای

² MAT-1

¹ Deflection

تجربی مقایسه گردید. میزان تغییر شکل در تست تجربی، مساوی ۰/۱۵ میلی‌متر و در نتایج عددی حاصل از حل المان محدود، مساوی ۰/۱۳۵ میلی‌متر به دست آمد. با توجه به تطابق خوب نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی حاصل از تست، مشخص می‌شود که مدل‌سازی صورت گرفته با دقت خوبی با واقعیت هم‌خوانی دارد.



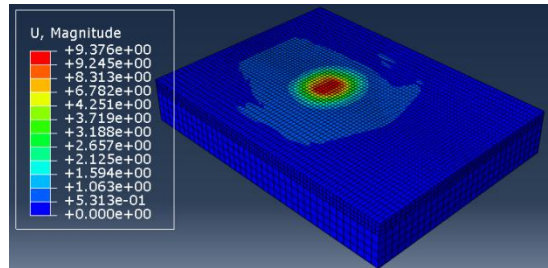
شکل ۷- تست صفحات AM-2 با کامیون و اندازه‌گیری میزان تغییر شکل ایجاد شده

۵- نتایج حاصل از حل عددی و تحلیل آن

۱-۵- اثر سرعت عمودی فرود بر استحکام صفحات ترمیم باند

سرعت فرود هواپیما تحت شرایطی همچون بیش باری، وزش شدید باد و یا نقص فنی، دچار تغییر می‌شود؛ لذا در این بخش و بخش بعدی به بررسی اثر تغییرات سرعت فرود در دو حالت تغییرات سرعت عمودی و تغییرات سرعت افقی بر استحکام صفحات ترمیم‌کننده پرداخته شده است. صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه به ابعاد ۳۸*۲۰۰*۴۵۰۰ میلی‌متر، عمق کل خاک ۶۰۰ میلی‌متر (عمق سطح رویی برابر ۱۶۰ و عمق خاک زیرین ۴۴۰ میلی‌متر)، شاخص خاک رویی برابر ۱۵ و شاخص خاک زیرین برابر ۳۰ مدل شدند.

به‌دست آمده در تحقیق گارسیا و هاوارد، تطابق قابل قبولی داشتند. لازم به ذکر است که در شکل ۶، برای نمایش بهتر تغییر شکل ایجاد شده در بستر خاک، نمایش گرافیکی تایر و صفحات ترمیم‌کننده حذف شده است.



شکل ۶- مقدار تغییر شکل در بستر خاک در مدل‌سازی انجام شده مشابه تحقیق گارسیا و هاوارد

در کارهای تحقیقاتی صورت گرفته به منظور تست استحکام صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه، قبل از تست توسط هواپیما، یک تست استاتیکی با شبیه‌سازی فشار وارده از طرف تایر هواپیما با فشار وارده از طرف تایر کامیون انجام می‌شود. این کار به دلیل خطرناک بودن تست با هواپیما است. در این تحقیق به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از حل عددی توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس، تست با کامیون انجام و نتایج تغییر شکل خمشی ایجاد شده در تست تجربی، با نتایج حاصل از حل نرم‌افزاری آباکوس با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل ۷ نمونه‌ای از تست صورت گرفته نشان داده شده است.

در این تست میزان شاخص خاک مساوی ۱۵ انتخاب شد و با کوبش خاک و آزمایش خاک‌شناسی این مقدار در محل آزمایشگاه تهیه گردید. وزن کامیون و وزنه‌های قرار گرفته در قسمت بار کامیون به اندازه‌ای است که فشار ۴/۳۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع را به صفحه ترمیم‌کننده باند فرودگاه وارد می‌آورد. در چنین شرایطی، کامیون روی صفحه قرار گرفت و همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، میزان تغییر شکل عرضی صفحه با استفاده از یک خط‌کش تراز و انتخاب فیله مناسب اندازه‌گیری گردید. سطح مقطع تایر کامیون با صفحه حدود ۴۰۰ سانتیمتر مربع است.

همین شرایط با استفاده از نرم‌افزار آباکوس نیز، مدل‌سازی شد و نتایج تغییر شکل‌ها با نتایج حاصل از تست

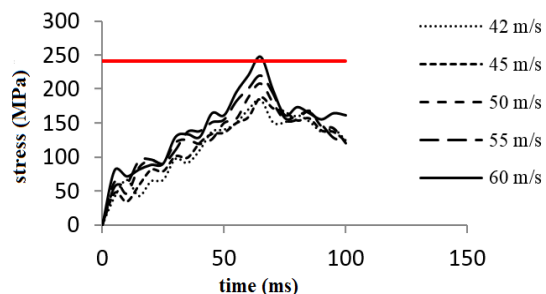
حدود ۷۵ میلی ثانیه از لحظه فرود هواپیما رخ می‌دهد، در حالی که برای سرعت عمودی ۳ متر بر ثانیه، ماکزیمم تنش در زمان ۴۸ میلی ثانیه بعد از فرود رخ می‌دهد.

۲-۵- اثر سرعت افقی فرود بر استحکام صفحات ترمیم باند

سرعت‌های افقی در لحظه فرود در مقادیر ۴۲، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. سرعت عمودی برای تمامی حالت‌ها، ثابت و برابر ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. شکل ۹ تنش فون میزز ایجاد شده در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه را نسبت به زمان در لحظه فرود هواپیما در سرعت‌های افقی فرود ۴۲، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد.

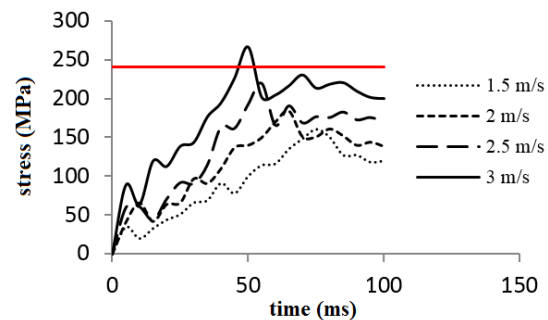
طبق شکل ۹ در سرعت‌های عمودی ۴۲، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ متر بر ثانیه، بیشینه تنش ایجاد شده در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه به ترتیب تقریباً برابر ۱۸۴، ۱۸۸، ۲۰۸، ۲۲۰ و ۲۴۷ مگاپاسگال است که در زمان ۶۵ میلی ثانیه رخ داده است؛ بنابراین مشاهده می‌شود که همانند اثر افزایش سرعت عمودی فرود، با افزایش سرعت افقی هواپیما در لحظه فرود، تنش در صفحات ترمیم کننده نیز افزایش می‌یابد. در اینجا نیز در حالتی که سرعت افقی فرود ۶۰ متر بر ثانیه باشد، ماکزیمم تنش ایجاد شده در صفحات بالاتر از استحکام تسلیم شده و شکست رخ می‌دهد.

در اینجا برخلاف بررسی سرعت عمودی فرود، ملاحظه می‌شود که سرعت افقی فرود، تأثیری در زمان رخداد ماکزیمم تنش ایجاد شده در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه ندارد.



شکل ۹- نمودار تغییرات تنش در صفحات ترمیم کننده بر حسب زمان در سرعت‌های افقی فرود مختلف

برای ارزیابی اثر تغییرات سرعت عمودی فرود در استحکام صفحات ترمیم کننده، سرعت عمودی در لحظه فرود تیر هواپیما، با مقادیر ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه و مقدار سرعت افقی ۴۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که مقدار سرعت استاندارد فرود برای هواپیمای موردنظر، ۱/۵ و ۴۲ متر بر ثانیه - به ترتیب برای سرعت‌های عمودی و افقی - است. در شکل ۸ تنش فون میزز ایجاد شده در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه نسبت به زمان در لحظه فرود هواپیما در سرعت‌های عمودی فرود ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه نشان داده شده است. طبق شکل ۸ در سرعت‌های عمودی ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه، بیشینه تنش ایجاد شده در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه به ترتیب برابر، ۱۶۰/۳، ۱۸۴/۰، ۲۱۹/۹ و ۲۶۶/۸ مگاپاسگال بوده که در زمان‌های ۷۵، ۶۵، ۵۵ و ۵۰ میلی ثانیه رخ داده است.

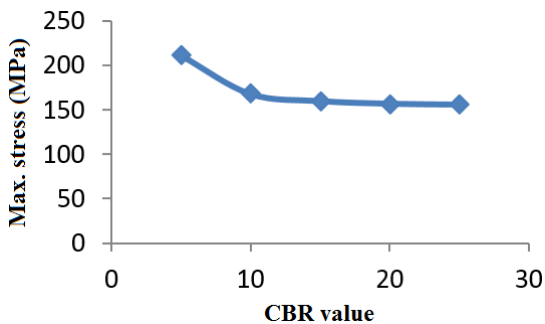


شکل ۸- نمودار تغییرات تنش در صفحات ترمیم کننده بر حسب زمان در سرعت‌های عمودی فرود مختلف

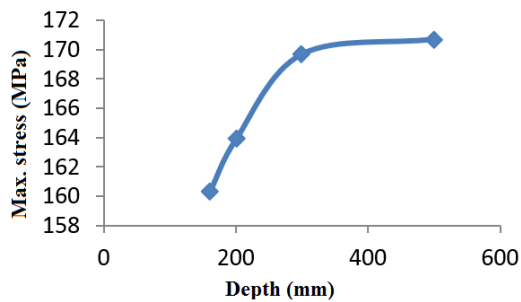
با توجه به استحکام تسلیم آلومینیوم 6061-T6 که مقدار آن ۲۴۱ مگاپاسگال است (خط قرمز رنگ بر روی نمودار شکل ۸) ملاحظه می‌شود که در سرعت عمودی ۳ متر بر ثانیه، مقدار تنش به وجود آمده در صفحات ترمیم کننده از مقدار استحکام تسلیم آن فراتر رفته و در سازه شکست اتفاق می‌افتد؛ بنابراین می‌بایست از وقوع چنین سرعتی اجتناب شود.

نکته دیگری که از نمودار شکل ۸ استخراج می‌شود، این که هر چه سرعت عمودی فرود بیشتر می‌شود، زمانی که در آن ماکزیمم تنش رخ می‌دهد، کاهش می‌یابد. به طوری که در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه ماکزیمم تنش بعد از گذشت

عمق خاک رویی برابر ۱۶۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر است که نتایج آن‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص شده است، بیشینه تنش در صفحات ترمیم‌کننده، با افزایش عمق خاک رویی افزایش می‌یابد. در عمق‌های ۱۶۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متری، مقادیر بیشینه تنش در صفحات به ترتیب برابر ۱۶۰/۳، ۱۶۳/۹، ۱۶۹/۷ و ۱۷۰/۷ مگاپاسکال به‌دست آمده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مدل کردن بستر خاک رویی با عمق بیش از ۳۰۰ میلی‌متر، تاثیر چندانی در استحکام صفحات ترمیم‌کننده ندارد.



شکل ۱۰- تغییرات بیشینه تنش در صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه بر حسب تغییرات شاخص خاک



شکل ۱۱- تغییرات بیشینه تنش در صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه بر حسب تغییرات عمق خاک رویی

۶- استحکام صفحات ترمیم‌کننده در مدل نیروی ضربه‌ای

برای مقایسه نتایج حالت مدل‌سازی تایر هواپیما در حالت ضربه‌ای ناشی از فرود هواپیما با حالت بدون مدل‌سازی تایر هواپیما و استفاده از صرفاً یک نیروی ضربه‌ای در تنش ایجاد شده در صفحات ترمیم‌کننده، یک مدل با استفاده از نیروی

۳-۵- استحکام صفحات ترمیم‌کننده در مقادیر مختلف شاخص خاک

در این بخش، عمق کل خاک ۶۰۰ میلی‌متر (عمق سطح رویی برابر ۱۶۰ و عمق خاک زیرین ۴۴۰ میلی‌متر) مدل شدند. برای بررسی تاثیر شاخص خاک بر استحکام صفحات ترمیم‌کننده، در سرعت‌های ثابت افقی و عمودی به‌ترتیب برابر، ۴۲ و ۱/۵ متر بر ثانیه در لحظه فرود، مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ برای شاخص خاک در قسمت رویی خاک در نظر گرفته شد. مقدار شاخص خاک در قسمت زیرین خاک برابر، ۳۰ در نظر گرفته شده است. شکل ۱۰ تغییرات بیشینه تنش ایجاد شده در صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه را بر حسب مقادیر مختلف شاخص خاک بیان می‌کند.

همان‌طور که در شکل مذکور ملاحظه می‌شود، برای مقادیر شاخص خاک برابر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ بیشترین تنش ایجاد شده در صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه به ترتیب برابر ۲۱۲، ۱۶۸، ۱۶۰، ۱۵۷ و ۱۵۶ مگاپاسکال است. هرچه بستر زیر صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه نرم‌تر و دارای مقدار شاخص خاک کمتری باشد، میزان تغییر شکل خمشی در صفحات ترمیم‌کننده بیشتر می‌شود؛ در نتیجه مقدار تنش در این صفحات افزایش یافته است. همچنین در شکل فوق ملاحظه می‌شود که وقتی مقدار شاخص خاک زیاد می‌شود، کاهش تنش بیشینه در صفحات ناچیز بوده و مقدار تنش مستقل از مقدار شاخص خاک است.

۴-۵- استحکام صفحات ترمیم‌کننده در مقادیر مختلف عمق خاک

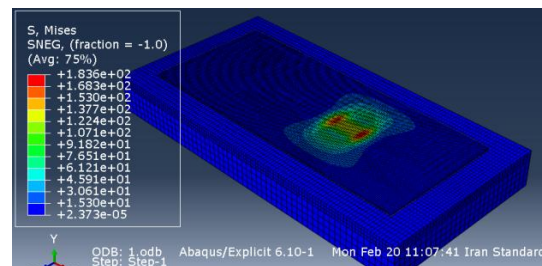
در این بخش مقادیر مختلفی از عمق برای بستر رویی خاک در نظر گرفته شده است. در خاک زیرین به دلیل تاثیر کم روی تغییر شکل خمشی صفحات ترمیم‌کننده باند فرودگاه و در نتیجه استحکام آن‌ها و همچنین سفتی زیاد خاک زیرین (با مقدار شاخص خاک برابر ۳۰) نسبت به خاک رویی، از بررسی آن اجتناب شده است. عمق خاک زیرین در تمامی حالات زیر برابر، ۴۴۰ میلی‌متر و شاخص خاک بستر رویی برابر ۱۵ است. سرعت اعمال شده برای تایر در لحظه فرود، در هواپیما، در راستای افقی برابر، ۴۲ و در راستای عمودی برابر، ۱/۵ متر بر ثانیه است. مقادیر در نظر گرفته شده برای

به وجود آمده بر اساس معیار فون میزز، در صفحات ترمیم کننده به ترتیب تقریباً برابر ۱۶۰، ۱۸۴، ۲۲۰ و ۲۶۷ مگاپاسگال است؛ بنابراین با افزایش سرعت عمودی فرود، تنش ایجاد شده در صفحات ترمیم کننده نیز افزایش می‌یابد و با توجه به مقدار استحکام تسلیم در آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 که برابر ۲۴۱ مگاپاسگال عنوان شده است، در سرعت عمودی ۳ متر بر ثانیه در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه شکست رخ می‌دهد.

در دومین حالت، سرعت‌های افقی فرود هواپیما با مقادیر ۴۲، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ متر بر ثانیه در سرعت عمودی ثابت با مقدار ۲ متر بر ثانیه برای تمامی سرعت‌های افقی، در نظر گرفته شد. در این سرعت‌ها، مقدار تنش به وجود آمده بر اساس معیار فون میزز، در صفحات ترمیم کننده به ترتیب تقریباً برابر ۱۸۴، ۱۸۸، ۲۰۸، ۲۲۰ و ۲۴۷ مگاپاسگال است؛ بنابراین با افزایش سرعت افقی فرود، تنش ایجاد شده در صفحات ترمیم کننده نیز افزایش می‌یابد و در سرعت افقی ۶۰ متر بر ثانیه شکست رخ می‌دهد.

در قسمت دیگری از کار انجام شده، به ارزیابی تاثیر مقادیر مختلف شاخص خاک پرداخته شد. برای این کار، بستر رویی خاک در مقادیر شاخص خاک برابر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ با عمق ۱۶۰ میلی‌متر مدل شد. در تمامی حالات، بستر زیرین خاک با عمق ۴۴۰ میلی‌متر و شاخص خاک برابر ۳۰ و همچنین سرعت افقی و عمودی هواپیما به ترتیب برابر ۴۲ و ۱/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شدند. بیشینه تنش فون میزز ایجاد شده در صفحات ترمیم کننده هنگام فرود هواپیما که روی بستر خاک با مقدار شاخص خاک برابر ۵ قرار دارد، برابر ۲۱۲ مگاپاسگال شده است. با افزایش شاخص خاک به مقدار ۱۰، بیشینه تنش، با کاهش ۲۰/۷ درصدی به مقدار ۱۶۸ مگاپاسگال رسید. با افزایش سفتی خاک از شاخص برابر ۱۰ به ۱۵، بیشینه تنش فون میزز در صفحات ترمیم کننده برابر ۱۶۰ مگاپاسگال شد که این مقدار تنش کمتر از ۵ درصد با کاهش روبرو شده است. در مقادیر شاخص برابر ۲۰ و ۲۵، بیشینه تنش فون میزز در صفحات ترمیم کننده باند فرود، به ترتیب به ۱۵۷ و ۱۵۶ مگاپاسگال شد. در این دو مقدار کاهش قابل توجهی در تنش به وجود نیامد؛ همچنین در این دو حالت، مقدار تنش نسبت به حالت شاخص برابر ۱۵، با کاهش تقریباً ۲ درصدی همراه بود؛ بنابراین مشاهده

ضربه‌ای ایجاد شده است. به عبارت دیگر، فقط تغییرات نیرو و اثر آن روی تنش‌های ایجاد شده در صفحات ترمیم باند مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار بیشینه تنش در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه، تحت نیروی ضربه‌ای برابر مقدار ۱۸۳/۶ مگاپاسگال شده است. این مقدار در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. این نیرو در مقایسه با شرایط یکسان با فرود تایلر هواپیما با سرعت عمودی ۱/۵ متر بر ثانیه مدل شده است که در این سرعت، بیشینه تنش برابر ۱۶۰/۳ مگاپاسگال شد. با مقایسه نتایج تنش، مشخص می‌شود که مدل کردن تایلر هم به دلیل خاصیت هایپرلاستیک تایلر و هم به دلیل متمرکز نبودن سطح تماس بین تایلر و صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه در یک ناحیه (به علت وجود سرعت افقی)، باعث کاهش حدود ۱۵ درصدی تنش ایجاد شده در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه می‌شود.



شکل ۱۲- بیشینه تنش در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه در نیروی ضربه‌ای

۷- نتیجه‌گیری

بررسی استحکام صفحات آلومینیومی ترمیم کننده باند فرودگاه، تحت سرعت‌های فرود متفاوت، در دو حالت انجام شد. در هر دو حالت، بستر زیرین صفحات ترمیم کننده با عمق ۶۰۰ میلی‌متر مدل شد که دو قسمت برای آن در نظر گرفته شد. در قسمت رویی با عمق ۱۶۰ میلی‌متر مقدار شاخص خاک برابر، ۱۵ و در قسمت زیرین بستر خاک با عمق ۴۴۰ میلی‌متر، مقدار شاخص خاک برابر، ۳۰ در نظر گرفته شد.

در حالت اول، سرعت‌های عمودی فرود هواپیما با مقادیر ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه در سرعت افقی فرود ثابت با مقدار ۴۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در سرعت‌های عمودی فرود ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه، مقدار تنش

- [7] Doyle JD, Howard IL, Gartrell CA, Anderton GL, Newman JK, Berney ES (2014) Full-scale instrumented testing and three-dimensional modeling of airfield matting systems. *Int J Geomech* 14(2): 78-89.
- [8] Garcia L, Howard L (2016) Full-scale instrumented testing of multiple airfield matting systems on soft soil to characterize permanent deformation. *Def Tech Inf Cen No. AD1012038*.
- [9] Korunovic N, Trajanovic M, Stojkovic M (2007) FEA of Tyres Subjected to Static Loading. *J Serb Soc Comp Mech* 1(1): 87-98.
- [۱۰] قریشی ح، ابطحی م (۱۳۸۶) بررسی نظری و تجربی تحلیل جاپای یک تایر رادیال ۱۴R۱۸۵/۶۵ با طرح رویه به کمک روش اجزای محدود. *مجله علوم و تکنولوژی پلیمر* ۵۸۹-۵۹۸: (۶): ۲۰.
- [11] Ghoreishy MH (2006) Finite Element Analysis of the Steel-belted Radial Tyre with Tread Pattern under Contact Load. *Iran Polym J* 18(2): 667-674.
- [12] Mines RA, McKown S, Birch RS (2007) Impact of aircraft rubber tyre fragments on aluminium alloy plates: I—Experimental. *Int J impact Eng* 34(4): 627-646.
- [13] Mines RA, McKown S, Birch RS (2007) Impact of aircraft rubber tyre fragments on aluminium alloy plates II—Numerical simulation using LS-DYNA. *Int J impact Eng* 34(4): 647-667.
- [14] Gruber P, Sharp RS, Crocombe AD (2008) Friction and Camber Influences on the Static Stiffness Properties of a Racing Tyre. *P I Mech Eng* 27(3): 1965-1976.
- [15] Moisescu R, Fratila G (2011) Finite Element Model of Radial Truck Tyre for Analysis of Tyre - Road Contact Stress. *Sci Bull Series D* 20: 85-94.
- [16] Wang W, Yan S, Zhao S (2013) Experimental Verification and Finite Element Modeling of Radial Truck Tire under Static Loading. *J Reinf Plast Compos* 24: 490-498.
- [17] Guo H (2014) An investigation into the finite element modelling of an aircraft tyre and wheel assembly. *CURVE is the Inst Repo Coventry Uni* 12: 28-35.
- [۱۸] ملک‌زاده الف، فرهنگ‌دوست خ، حدیدی مود س (۱۳۹۲) بررسی اثر بارگذاری ضربه‌ای در فرآیند رشد ترک در فولاد فورج EA4T. *مجله مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۳۹-۳۳: (۲): ۳.
- [۱۹] بابایی ه، جمالی ع، میرزابابای مستوفی ت، اشرف طالش ح (۱۳۹۵) مطالعه تجربی و مدل‌سازی ریاضی تغییر شکل ورق‌های مستطیلی تحت بار ضربه‌ای. *مجله مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۱۵۲-۱۴۳: (۱): ۶.

شد که حالت بهینه بستر خاک در صفحات ترمیم کننده مقادیر شاخص خاک برابر ۱۵ است.

در بخش بعدی از تحقیق انجام شده، برای ارزیابی تاثیر عمق بستر خاک بر استحکام صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه، مقادیر ۱۶۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلیمتر برای عمق رویی خاک بررسی شد. عمق خاک زیرین نیز، در تمامی حالات برابر ۴۴۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. در حالت کلی با افزایش سطح رویی خاک (که دارای شاخص کمتر و در نتیجه سفتی کمتر نسبت به خاک زیرین است)، مقدار بیشینه تنش افزایش یافت. گرچه این افزایش، روند ملایم و آهسته‌ای داشت. به طوری که با افزایش عمق بستر رویی از ۱۶۰ به ۲۰۰ میلیمتر، مقدار تنش بیشینه در صفحات ترمیم کننده هنگام فرود هواپیما، تنها ۲ درصد افزایش داشت. با افزایش ۱۰۰ میلیمتری عمق از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلیمتر، مقدار تنش، ۳ درصد افزایش پیدا کرد. در عمق‌های ۳۰۰ و ۵۰۰ میلیمتری بستر رویی خاک، با افزایش کمتر از ۰/۶ درصدی، تفاوت چشم‌گیری مشاهده نشد.

در نهایت مشخص شد که در صورت مدل نکردن تایر و اعمال صرفاً یک بار ضربه‌ای، تنش‌های به وجود آمده در صفحات ترمیم کننده باند فرودگاه با افزایش ۱۵ درصدی روبرو خواهند شد که دور از واقعیت است.

۸- مراجع

- [1] Rushing TW, Howard IL (2015) Prediction of soil deformation beneath temporary airfield matting systems based on full-scale testing. *J Terramech* 58(1): 1-9.
- [2] Pickett G (1951) Analytical studies of landing mats for forward airfields. Final rep Corps Eng, U.S. Army Waterways Exp Station, MS Thesis.
- [3] Harr ME, Rosner JC (1969) A theoretical study of landing mat behavior. Contract Rep. S-69-7, U.S. Army Waterways Exp Station, MS Thesis.
- [4] Gartrell CA (2007) Full-scale instrumented testing and analysis of matting systems for airfield parking ramps and taxiways. Tech Rep ERDC/GSL TR-07-33, U.S. Army ERDC.
- [5] Gartrell CA, Newman JK, Anderton GL (2009) Performance measurements of pavement matting systems by full-scale testing over differing soil strengths. *J Mater Civ Eng* 21(10): 12-19.
- [6] Gonzales CR, Rushing TW (2010) Development of a new design methodology for structural airfield mats. *Int J Pavement Res Tech* 3(3): 102-109.

- [22] Timothy W, Rushing A, Howard L, Brian Jordon J, Allison G (2016) Laboratory Characterization of Fatigue Performance of AM2 Aluminum Airfield Matting. American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill, New York.
- [23] Markmann G, Verron E (2006) Comparison of Hyperelastic models for rubber-like materials. Rubber Chem Tech 79(5):835-858.
- [24] Hosseini A, Sahari B (2010) A review of constitutive models for rubber-like materials. American J Eng Appl Sci 27:886-892.
- [۲۰] پاچناری م.ح، مظفری ع، شرعیات م (۱۳۹۵) تحلیل اجزای محدود پاسخ غیرخطی ضربه کم سرعت ورق کامپوزیتی ویسکوالاستیک به کمک تئوری لایه ای. مجله مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱۰۸-۹۷: ۶(۳).
- [۲۱] قاجار ر، شرعیات م، حسینی ح (۱۳۹۴) تحلیل عددی الاستیسیته غیرخطی ضربه کم سرعت خارج از مرکز ورق ساندویچی مستطیلی با رویه های کامپوزیتی تحت پیش بار دویعدی. مجله مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۹۹-۸۷: ۵(۱).