

# بررسی عددی رشد ترک بر پایه ضرایب شدت تنش در اثر بارگذاری چرخ هوایما در روسازی آسفالتی فرودگاه

محمدجواد اخوان بهابادی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی خبیری، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

علیرضا فتوحی فیروزآبادی، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۹۴/۰۴/۲۰ - پذیرش: ۹۵/۰۹/۱۷

## چکیده

تسهیلات زمینی بخش جدا ناپذیر فرودگاه‌ها بوده که از جمله مهمترین آنها روسازی باند فرودگاه می‌باشند. یکی از مشکلات و خرابی‌های اجتناب ناپذیر روسازی ترک خوردگی است. ترک خوردگی در روسازی‌ها انعطاف پذیر از جمله عوارضی است که در اکثر محوطه های پروازی دیده می‌شود. بنابراین، این مسئله اهمیت دارد که با اتخاذ تدابیری سرعت گسترش آن را کاهش داد. در این پژوهش برای دستیابی به این هدف و جهت انطباق نتایج با واقعیت، از اطلاعات میدانی فرودگاه کرمان استفاده گردید و از مقادیر واقعی ضخامت لایه‌ها و چکالی آنها و سایر مشخصات لایه‌ها که با استفاده از نتایج آزمایش‌های به دست آمده استفاده شد. با استفاده از نرم افزار المان محدود روسازی باند فرودگاه و یک شکل ترک مدلسازی شد و از خروجی آن جهت تحلیل روسازی در حالت‌های مختلف استفاده گردید. ابتدا با جابه‌جایی بار هوایمایی طرح نسبت به موقعیت ترک محدوده محلی که بارگذاری بیشترین تنش را به ترک وارد می‌کند به دست آورده و سپس تحلیل‌های مختلف در این فاصله انجام گرفت و تأثیر تغییر ضخامت آسفالت، تغییر طول ترک و همچنین تغییرات دما بر رفتار ترک بررسی شد. نتایج تغییر طول ترک نشان داد با ۲ برابر شدن طول آن، میزان ضریب شدت تنش  $K_I$  حدود ۱۷ درصد افزایش پیدا می‌کند و با افزایش ضخامت آسفالت مقدار ضریب شدت تنش کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر با افزایش ضخامت لایه آسفالتی سرعت رشد ترک کاهش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که به ازای هر درجه افزایش دما، میزان تنش متمرکز ۳ درصد کاهش می‌یابد که نشان دهنده اهمیت پارامتر دما می‌باشد. بنابراین می‌توان ساعات پروازی هوایما را به نحوی تنظیم نمود که در دماهای نزدیک به صفر درجه و کمتر از آن، تعداد پروازها محدود گردند.

واژه‌های کلیدی: بررسی عددی، ترک خوردگی، روسازی آسفالتی فرودگاه، ضریب شدت تنش، گسترش ترک

## ۱- مقدمه

سیستم روسازی مناسب را انتخاب کرد. از جمله عوارض و مشکلات شایع در روسازی‌های انعطاف پذیر، ترک خوردگی است که یکی از مشکلات عمده در عملکرد طولانی مدت آسفالت است. مهمترین عامل تاثیرگذار بر این خرابی، بارهای ترافیکی وارد بر روسازی می‌باشد.

روسازی باند فرودگاه از جمله مهمترین تسهیلات زمینی فرودگاه‌ها می‌باشد. رفتار و وضعیت سیستم روسازی به علت تأثیر مستقیم چرخ‌های هوایما بر آن، بر عملکرد ترافیک روسازی اثر بسزایی دارد. بنابراین ضروری است تا با در نظر گرفتن کلیه شرایط طراحی یک

تا کنون مطالعات زیادی به منظور بررسی صدمات وارد بر روسازی فرودگاهها و تأثیر انواع مختلف هواپیماها بر آن صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۹ میلادی سازمان هوانوردی آمریکا 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 شبیه سازی نموده است (perlango and Bosurgi,2005). همچنین در سال ۲۰۰۴ میلادی، کیم<sup>۲</sup> و تاتملر<sup>۳</sup> در مطالعات بررسی تغییر شکل های ماندگار روسازی فرودگاه، آزمایش های بسیاری را بر اساس هواپیماهای مسافبری و چند نمونه هواپیمای نظامی انجام دادند (Tutumluer and kim,2004).

در سال ۲۰۰۵ میلادی ونگ<sup>۴</sup> و چی پی<sup>۵</sup> بر اساس نتایج تحقیقات میدانی در فرودگاه بین المللی چیانگ کای شک<sup>۶</sup> تایوان و تعمیم نتایج در محیط سه بعدی نرم افزار اجزاء محدود، نشان دادند که مشخصات چرخ های اصلی هواپیما بر میزان صدمات وارد بر روسازی نقش تعیین کننده ای داشته و در عمر مفید روسازی و میزان ضخامت دال های بتنی روسازی مؤثر است. (Chai and Wang,2005).

در سال ۲۰۰۶ میلادی مطالعاتی توسط جویل<sup>۷</sup> بر روی چند نرم افزار سازمان هوانوردی آمریکا، از جمله: LEDFAA و FEDFAA<sup>۸</sup> انجام گرفت و با بهره گیری از سوابق گذشته تحلیل و طراحی فرودگاه در دنیا و ضرورت توسعه و پیشرفت آن برای نسل های آینده هواپیماهای پهن پیکر گوناگون نتایج بیان گردید (Jeol,2006,Shafabakh and kash,2012).

در سال های اخیر محققان بسیاری از تئوری مکانیک شکست در تعیین رفتار بتن آسفالتی در مقابل ترک خوردگی خستگی استفاده کرده اند: در سال ۱۹۹۷ ارکینز<sup>۹</sup> و جاکوب<sup>۱۰</sup> با استفاده از قانون پاریس به تعیین خواص خستگی مخلوط آسفالتی پرداختند.

عامل خستگی نیز که در اثر تناوب بارگذاری به وجود می آید، دیگر عامل ترک خوردگی می باشد که حتی با وجود تعداد تکرار کم بارگذاری ولی به دلیل زیاد بودن شدت تنش ها در طراحی روسازی فرودگاه که تحت بارگذاری تناوبی قرار دارد است یکی از مهمترین مسائل مطرح می باشد. تغییرات دما در تشدید پدیده خستگی و حتی در نقش عامل اصلی این پدیده موثر است. ترک خوردگی در اثر این پدیده از جمله ای اصلی ترین عوارض روسازی در ایران و جهان خصوصاً در نواحی معتدل و سردسیر است.

رشد ترک می تواند تا جایی ادامه داشته باشد که به گسیختگی بیانجامد که وقوع این شکست ناشی از خستگی می تواند از یک ترک کوچک آغاز شده باشد. پروسه رشد ترک از طول اولیه تا طول نهایی تحت عنوان رشد ترک خستگی<sup>۱</sup> (FCP) مطرح می شود. در این مقاله به بررسی عددی این موضوع پرداخته خواهد شد. تحقیقات انجام گرفته پیرامون بررسی رفتار خستگی روسازی آسفالت زیاد و متنوع است. روش های مختلفی برای تجزیه و تحلیل خستگی ها وجود دارد که در حال حاضر برخی از آنها در حال استفاده و برخی نیز نتایج دقیقی را در پیش بینی عملکرد خستگی روسازی ارائه نمی دهند که نتیجه ای آن پا برجا بودن نگرانی عمده مهندسی در پیش بینی ترک خوردگی خستگی است. تعدادی از پارامترهای مؤثر در این پروسه از مکانیک شکست به دست می آیند و تعداد دیگر که توسط روش های آزمایشگاهی به دست می آیند مربوط به جنس ماده می باشند (Tutumluer and kim,2004, Chai and Wang,2005). در این مقاله به بررسی عددی رشد ترک خستگی در باند فرودگاه در اثر بارگذاری چرخ هواپیما، به کمک نرم افزار المان محدود پرداخته می شود. روش اجزای محدود یکی از روش های حل عددی برای مسایل مختلف خطی و غیرخطی می باشد. این روش نسبت به سایر روش های حل عددی مزیت های زیادی دارد.

می‌کنند. آنها در این مقاله به آنالیز در سطح پروژه پرداختند که در آن مدل‌ها به محاسبه پارامترها که هم نشان دهنده قدرت روسازی‌ها به عنوان یک واحد و هم نشان دهنده لایه‌های تشکیل دهنده آن است، اختصاص دارد. این مقاله بر روی ترک خوردگی بر اساس خستگی تمرکز دارد و آنالیز را به صورت الاستیک خطی انجام داده است. آنها سه مدل آماده کردند (۱) آسفالت بدون ترک خوردگی (۲) ترک خوردگی بر روی سطح روسازی (ترک بالا به پایین) (۳) ترک خوردگی زیر لایه آسفالتی (ترک پایین به بالا) و سپس تغییرات هر دو مقدار نیروهای کششی و توزیع آنها را در مقایسه با لایه معمول بدون ترک بررسی کردند (Evdoris et al, 2006, Ayatollahi, 2012).

در سال ۱۹۹۰ ال-بالبایسی<sup>۱۲</sup> و همکاران مکانیزم ترمیم آسفالت را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که به منظور بررسی دقیق انرژی مرتبط با ترک خستگی و یا بطور کلی انتشار ترک، باید به لحاظ نظری یک رویکرد تحلیلی را مد نظر قرارداد. علم مکانیک شکست چنین رویکردی را ارایه می‌دهد. البته، بتن آسفالتی از مواد الاستیک خطی نیست و در نتیجه مکانیک شکست خطی الاستیک برای آن نمی‌تواند معتبر باشد. اینکه فرض کنیم رفتار در نوک ترک با یک منطقه نسبتاً بزرگ پلاستیکی قبل از ترک خطی نیست، مشکلی ندارد. تحت شرایط تنش صفحه‌ای در حالی که نوک ترک ناحیه پلاستیکی کوچک است، تجزیه و تحلیل الاستیک خطی مناسب است. ال-بالبایسی روش انتگرال J را برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده کرده است. مزیت عمده روش انتگرال J این است که برای بالا بودن دقت کار، منطقه پلاستیکی نباید زیاد کوچک باشد. این روش با استفاده از نمونه‌های کوچکتر به تعیین نرخ انرژی آزاد شده می‌پردازد، اگر چه مواد آسفالت به دلیل اندازه بزرگ می‌توانند با رفتار الاستیک در محل شکستگی فرض شوند، اما اندازه بزرگ مواد متشکله آسفالت به عنوان یک محدودیت برای توسعه منطقه پلاستیکی به شمار می‌رود، بنابراین، می‌توان رفتار الاستیک فرض کرد. (Al-Babissi and Littell, 1990, Ayatollahi, 2012, Babissi and Littell, 1990).

آنها ابتدا توجیه تئوریک استفاده از قانون پاریس برای توصیف ترک خوردگی خستگی را ارایه کردند، و برای حمایت از این توجیه از داده‌های تجربی استفاده کردند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که رشد ترک بخش عمده‌ای از فرایند خستگی را پوشش می‌دهد (Erkens et al., 1997). بنابراین، قانون رشد ترک پاریس یک تقریب از طول عمر خستگی را ارایه می‌دهد. علاوه بر این، نشان داده شده است که عوامل موجود در قانون رشد ترک را می‌توان با استفاده از تست‌های ساده تعیین نمود و ویژگی خستگی که با استفاده از این روش پیش‌بینی شده بود، به خوبی با داده‌های واقعی خستگی مطابقت دارد (Paris and Erdog, 1963, Ayatollahi, 2012).

آنها نشان دادند که تعریفی که قانون پاریس (۱۹۶۴) برای ترک‌های بزرگ ارایه داد به طور قابل ملاحظه‌ای از تعریفی که در مهندسی جاده استفاده می‌شد متفاوت بود. یک نتیجه این است که بر اساس قانون پاریس رشد ترک می‌تواند بخش وسیعی از فرسودگی را برخلاف آنچه تصور می‌شود را شامل شود. این نتیجه توسط تحلیل‌های او درباره رشد ترک تایید می‌شود که به وسیله آن ابزارهایی برای پیش‌بینی بهتر عمر خستگی فراهم می‌شود.

هم توصیف پاریس درباره اهمیت رشد ترک خوردگی در زمان خستگی و هم نتایج آزمایشات جاکوب (۱۹۹۵) هر دو نشان دهنده این است که رشد ترک خوردگی بخش وسیعی از فرایند خستگی را شامل می‌شود. بنابراین، امکان استفاده از قانون پاریس به عنوان نشانه‌ای دال بر مقاومت خستگی مخلوط آسفالت وجود دارد (Garg, 2008).

در سال ۲۰۰۶ ایدوری<sup>۱۱</sup> و همکارانش در مقاله‌ای با استفاده از روش المان محدود برای اولین بار به ارایه مسائل اساسی در رابطه با خستگی لایه‌های قیری پرداختند. پس از آن به ارایه مدلهایی برای مقابله با شروع ترک و انتشار آن می‌پردازند و به بحث در مورد المان محدود که می‌تواند چشم‌انداز بهتری در اثر ترک خوردگی و آنالیز مربوط به آنها را فراهم کند، توجه

آنها برای شرایط هندسی و بارگذاری و همچنین عدم نیاز به امکانات آزمایشگاهی را اشاره کرد که با رعایت نکات مطرح در مسائل اجزاء محدود به خصوص در محدوده‌ی مسائل مربوط به مکانیک شکست، می‌توان به نتایج بسیار قابل قبولی رسید.

به طور کلی، بتن آسفالتی ماده‌ای با رفتار ویسکوالاستو-پلاستیک می‌باشد. بنابراین در واقعیت نمی‌توان این ماده را یک ماده با رفتار الاستیک خطی در نظر گرفت. با این وجود مواد موجود در لایه‌های روسازی به خاطر اینکه اندازه آنها در مقایسه با اندازه ناحیه پلاستیک گسترش یافته بزرگ می‌باشد، معمولاً فرض می‌شوند که در شکست رفتار الاستیک داشته باشند. (Al-Babissi and Littell, 1990).

در سال‌های اخیر محققان بسیاری (مانند، اوزن و ایرکنس - ۱۹۹۷، زلی - ۲۰۰۱، ایدوریس - ۲۰۰۶) نیز برای استفاده از تئوری مکانیک شکست، فرض داشتن رفتار الاستیک خطی را برای بتن آسفالتی و نیز مواد لایه‌های زیرین روسازی صادق دانسته‌اند (Ayatollahi, 2012, Willis, et al., 2006). بنابراین با استناد به موارد ذکر شده، در این تحقیق رفتار الاستیک خطی را برای آسفالت در نظر گرفته می‌شود.

هدف این است که با بررسی ضرایب شدت تنش حدود محل قرارگیری ترک بحرانی نسبت به بارگذاری پیدا شده و با استفاده از آن به اثرات پارامترهایی مثل تغییر ضخامت آسفالت و دما در رفتار ترک پرداخته شود.

#### ۴- معرفی محدوده مورد مطالعه و روش تحقیق

فرودگاه بین‌المللی کرمان در شهر و استان کرمان واقع شده است و یکی از فرودگاه‌های مهم مرکز ایران به حساب می‌آید. این فرودگاه دارای ۲ ترمینال داخلی و خارجی بوده که در سال ۱۳۹۳، که ۷۳۰ هزار مسافر داخلی و خارجی از امکانات این فرودگاه استفاده کرده‌اند و هر هفته بالغ بر ۱۱۶ پرواز داخلی و بین‌المللی از این فرودگاه

۲۰۱۲ شفافبخش و کاشی در مطالعات خود به بررسی میزان خسارات وارده از سوی هواپیماهای مسافربری بر روسازی‌های صلب و انعطاف پذیر 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 (Shafabakh and kashi, 2012).

#### ۳- محاسبه ضرایب شدت تنش

مبانی مکانیک شکست بیان می‌کند که در یک جسم ترکدار نظیر لایه آسفالتی، هنگامی که مقدار ضریب شدت تنش در نوک ترک به مقادیر بحرانی و مشخصه ماده که از خواص ماده ترکدار محسوب می‌شود، برسد، رشد ترک اتفاق می‌افتد. ضرایب شدت تنش به نوع و مقدار بارگذاری و مشخصات هندسی ترک وابسته هستند. حوزه تنش در کل سازه ترکدار در صورت وجود این ضرایب در یک هندسه و بارگذاری مشخص، تعیین خواهد شد. پس در رویه‌های آسفالتی که در معرض بارهای کششی (مود I خالص)، بارهای برشی (مود II خالص) و یا بارهای ترکیبی کششی- برشی (مود I و II) قرار دارند، برای بررسی شرایط شکست و عوامل مؤثر در رشد ترک، لازم است تا این ضرایب به طریق مناسب برای حالت‌های مختلف بارگذاری و ترکهای مختلفی که در یک سیستم روسازی ممکن است به وجود بیایند، محاسبه شوند. (Al-Qadi, 2006, Ayatollahi, 2012).

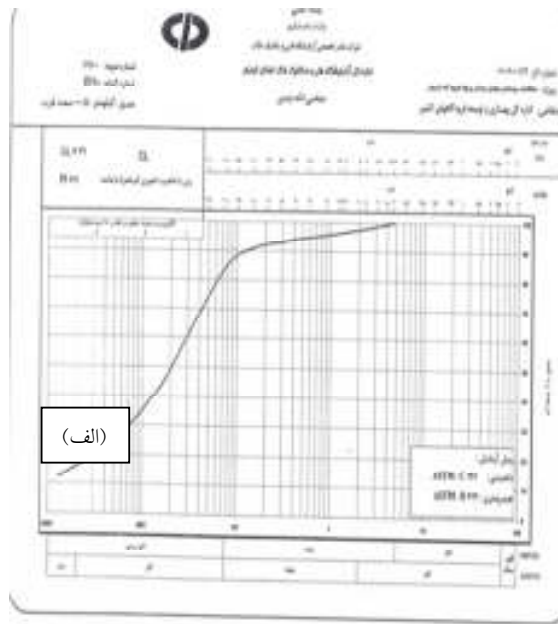
روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی برای محاسبه ضرایب شدت تنش وجود دارد. ولی به دلیل محدود بودن روش‌های تحلیلی به هندسه و بارگذاری ساده و همچنین نیازمند بودن به امکانات آزمایشگاهی و صرف وقت و هزینه‌ی زیاد در روشهای آزمایشگاهی در سال‌های اخیر تکنیک‌های اجزای محدود برای به دست آوردن پارامترهای شکست به طور قابل توجهی بکار گرفته شده‌اند که از جمله مزایای آن می‌توان به محدوده‌ی وسیع

شکل ۱. وقوع ترکهای خستگی بر روی باند پرواز R120/45 فرودگاه کرمان

بین‌المللی انجام می‌شود. بخشی از باند پرواز فرودگاه به ویژه در ابتداء آن خرابی ترک خوردگی در حدزیادی ملاحظه می‌شود که شکل (۱) قسمتی از آن را به نمایش می‌گذارد (TSYAT,2014).



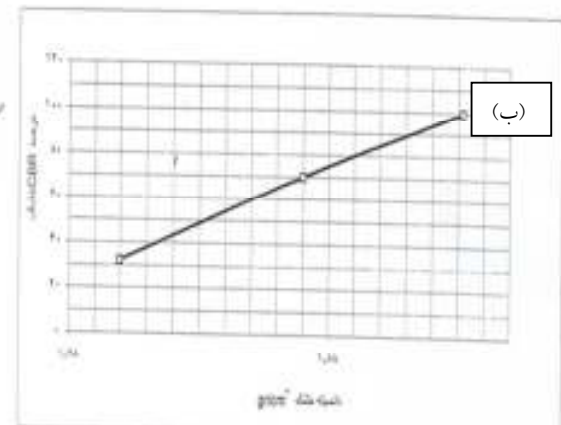
۴-۱- مشخصات خاک بستر محل مطالعه  
جنس خاک محل از رس با خاصیت خمیری کم است. میانگین چگالی خاک بستر طبق گزارش‌های آزمایشگاه مکانیک خاک حدود ۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. در شکل (۲) نمونه‌هایی از آزمایش‌های انجام گرفته از خاک بستر نشان داده شده است. اطلاعاتی که از این صفحات آزمایش‌ها به دست آمده است در مدلسازی رفتار روسازی استفاده می‌شود (TSYAT,2014).



وزارت راه و ترابری  
شرکت مازنصصی آزمایشگاه فنی و ملاحظه خاک  
اداره کل آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان کرمان

نتایج آزمایش نشانه باریکی کالیفرنیا (CBR خاک)  
ASTM D1557

شماره کار	۰۱۰۰۰۰۱۱۳	مطالعات بسیاری عوامل پروازی فرودگاه کرمان
شماره نمونه	۱۱۱۱۰۰	مطالعات اداره کل فرودگاه‌های استان کرمان
نوع آلود	بستر - گشده ۱۰	محل نمونه برداری: کیلو متر ۰۰-۵۰ سمت غرب
تعداد هر یک	تعداد در هر متر	تعمیرات خاک
۱۲۴	۲۲	۱,۸۰
۱۰۵	۲۰	۱,۸۷
۹۸	۱۹	۱,۹۴
۵۰	ASTM D557	معیار آردتراکم (۹)



شکل ۲. نمونه نتایج آزمایش بر روی خاک بستر الف) آزمایش دانه بندی، ب) آزمایش CBR

همچنین وزن بیشتر آن در مقابل اکثر هواپیماهای مورد استفاده در این فرودگاه، هواپیمای A320 به‌عنوان هواپیمای طرح در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در آیین

۴-۲- بارگذاری روسازی فرودگاه

تنوع هواپیماهای استفاده شده در فرودگاه کرمان زیاد است، با توجه به تعداد تکرار پروازهای هواپیمای A320 و

طراحی روسازی باند فرودگاه بین ۵ تا ۱۰ درصد بارهواپیما را به چرخ‌های جلویی و مابقی را به چرخ‌های عقب می‌دهند، سهم چرخ‌های جلو ۵۰۰۰ کیلوگرم و سهم چرخ‌های عقب ۷۰۰۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود. (Airbus,2014).

نامه طراحی باند فرودگاه ۹۵ درصد وزن هواپیما را برای چرخ‌های عقب و مابقی را برای چرخ‌های جلو در نظر می‌گیرند، وزن اختصاصی به هر چرخ مطابق جدول (۲) در نرم افزار آباکوس اعمال شده است. وزن هواپیمای A320 حدود ۷۵۰۰۰ کیلوگرم می‌باشد. از آنجایی که در

جدول ۱. مقایسه فرودگاه بین المللی کرمان با سایر فرودگاه‌های کشور و رشد پرواز آن (TSYAT,2014).

ردیف	فرودگاه	دو ماهه اول سال ۱۳۹۴			دو ماهه اول سال ۱۳۹۳			درصد رشد				
		نشست و برخاست (فروند)	اعزام و پذیرش مسافر (نفر)	ارسال و پذیرش بار و پست (کیلوگرم)	نشست و برخاست (فروند)	اعزام و پذیرش مسافر (نفر)	ارسال و پذیرش بار و پست (کیلوگرم)	درصد رشد	درصد رشد			
۱	مهرآباد	۱۸.۶۳۲	۲.۲۲۷.۱۵۲	۱۶.۵۰۹.۹۵۰	۱۹.۵۵۵	۲.۴۱۱.۸۱۲	۲۰.۲۱۷.۷۲۵	۵	۷			
۲	امام خمینی	۸.۷۷۶	۱.۲۲۱.۷۹۴	۲۲.۹۰۶.۲۲۰	۷.۶۶۸	۱.۰۴۳.۴۰۳	۱۹.۹۰۸.۴۷۰	۱۴	۱۷			
۳	کرمان	۸۰۰	۱۲۸.۱۱۲	۱.۰۸۸.۷۱۸	۷۷۵	۱۳۸.۸۳۷	۱.۲۳۹.۱۱۳	۳	-۸			
	پنج فرودگاه اختصاصی	۶.۷۸۳	۷۶۰.۶۴۸	۷.۶۸۱	۶.۴۴۹	۷۴۰.۵۰۳	۷.۳۲۷.۴۳۶	۵	۳			
درصد سهم هر ماه در پروازها												
فرودگاه/ماه	فروردین مهر	اردیبهشت آبان	خرداد آذر	تیر دی	مرداد بهمن	شهریور اسفند	مجموع		سهم (%)			
							۱.۱۳۵	۱.۲۷۶		۱۵۱.۰۲	۳.۷۱	
کرمان	۱.۱۳۵	۱.۲۷۶	۱.۳۱۳	۱.۰۴۶	۱.۲۲۸	۱.۳۵۲	۱.۲۲۸	۱.۱۴۶	۹۵۸			
تعداد متوسط پرواز های ده ساله												
کرمان	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	مجموع	متوسط ده ساله
	۳.۰۴۸	۳.۱۵۳	۳.۳۲۷	۳.۳۱۲	۳.۳۲۶	۳.۵۲۸	۴.۳۱۷	۴.۳۳۳	۳.۸۰۴	۳.۷۰۶	۳۵۴۸۴	۳۵۴۸

جدول ۲. وزن اختصاص یافته به هر چرخ (Airbus,2014).

نوع محور	تعداد چرخ	وزن کل وارده (Kg)	بار وارد بر هر چرخ (Kg)
محور جلو	۲	۵۰۰۰	۲۵۰۰
محور عقب	۴	۷۰۰۰۰	۱۷۵۰۰

بخش و بخش قبل، سطوح بارگذاری و فاصله آنها از هم به صورت شکل (۳) می‌باشد.

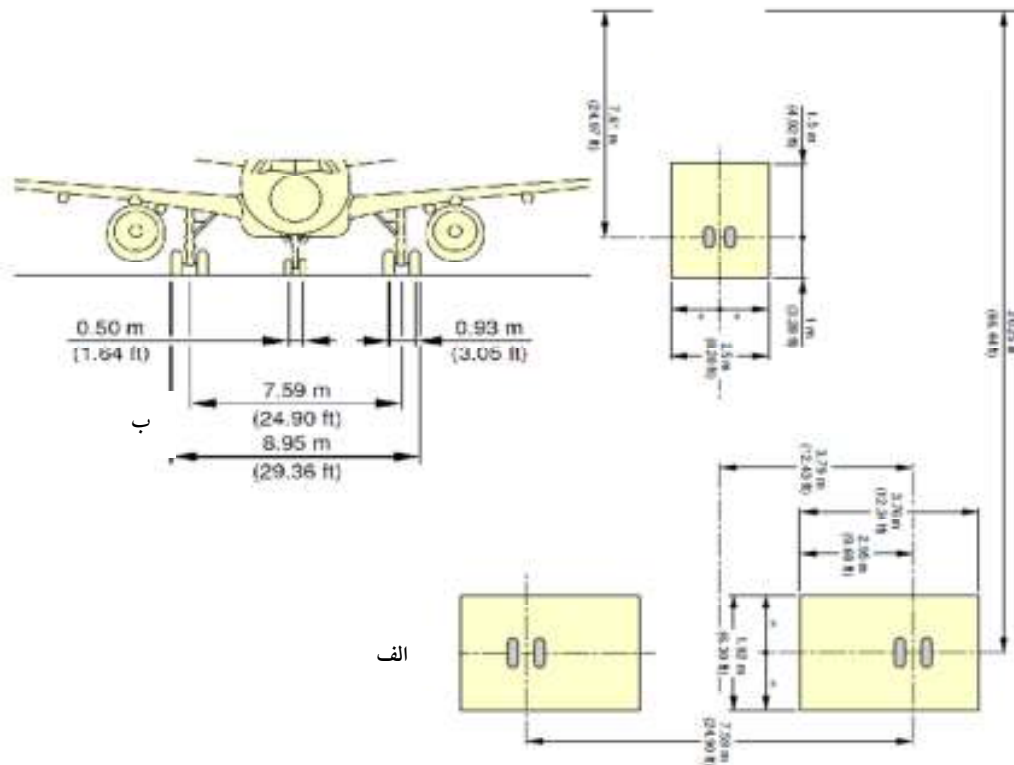
در بارگذاری روسازی‌ها، سطح بارگذاری برای نیروهای ناشی از عبور وسایل نقلیه، همان سطح تماس لاستیک با لایه رویه است.

۴-۳- معرفی مدل شکل ترک در رویه آسفالتی نرم افزار آباکس اکسپلیسیت<sup>۱۳</sup> محصولی با اهداف ویژه است که برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی گذرا مانند برخورد و ضربه انفجار، آزمایش ضربه، مچالگی، همچنین

بنابراین با مشخص بودن نوع هواپیما فاصله و آرایش قرارگیری چرخ‌ها و عرض تاثیر مشخص می‌شود و با در نظر گرفتن سطح تماس مستطیل، سطوح تماس تاثیر با جاده مشخص خواهد شد. با توجه به توضیحات این

صورت اتوماتیک محاسبه می‌کند. در بسته نرم‌افزاری Abaqus، می‌توان از Abaqus Viwer که زیرمجموعه‌ای از Abaqus Cae است یا خود نرم افزار Abaqus Cae استفاده کرد. پاسخ‌ها را می‌توان به صورت symbol control، تصویر متحرک و یا نمودار تغییرات پارامتر مورد نظر در طول تحلیل مشاهده نمود.

مسائل شبه استاتیکی یا مسائل غیر خطی‌ای که در آن‌ها شرایط تماس تغییر می‌کند مانند شکل دهی مناسب است. این محصول دستگاه معادلات حاکم را بر پایه‌ی قانون انتگرال گیری اکسپلیسیت به همراه استفاده از ماتریس جرم قطری المان تحلیل می‌کند. در این روش تعیین اندازه نمو در مسائل غیر خطی توسط کاربر ممکن نبوده و نرم افزار بر اساس شرایط پایداری، میزان نمو در هر مرحله را به

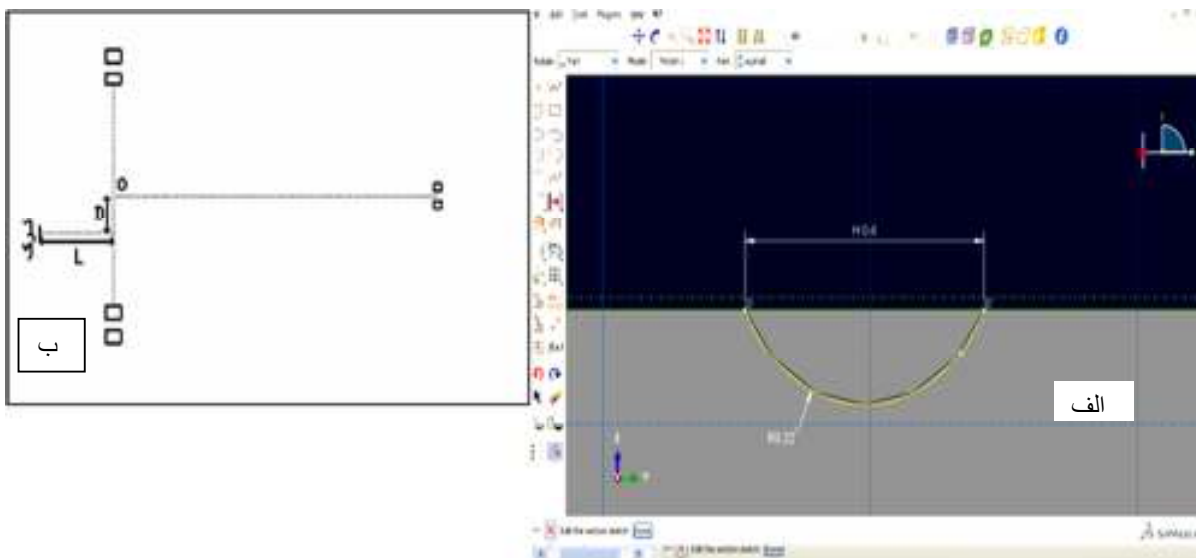


شکل ۳. الف. نحوه قرارگیری و فاصله چرخ‌های هواپیمای طرح Airbus,2014) A320 ب: نحوه قرارگیری و فاصله چرخ‌های هواپیمای طرح Airbus,2014) A320

(نزدیکترین چرخ به ترک)، کافی باشد. در تحقیقات متعددی با انجام تحلیل‌های اجزای محدود این نتیجه حاصل شده که تأثیر چرخ‌های دور از ترک نیز به اندازه‌ای است که نمی‌توان از آنها چشم پوشی کرد. این تأثیر به محل قرارگیری چرخ‌ها نیز وابسته است و نشان داده شده است که نتایج دو حالت (در نظر گرفتن تمام چرخ‌ها و در نظر گرفتن یک چرخ) از یکدیگر فاصله زیادی دارند که این موضوع ضرورت مدل‌سازی سه بعدی و در نظر گرفتن اثر تمامی چرخ‌ها را نشان می‌دهد (Ayatollahi,2012).

با توجه به مشاهدات انجام شده از محل، نیم‌رخ در نظر گرفته شده برای ترک مطابق شکل (۴) می‌باشد. مقطع ترک نیم بیضی می‌باشد. نحوه مدل کردن ترک در مدل سه بعدی، شبیه به فرآیند دو بعدی است. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، طول ترک ۴۰ سانتی متر می‌باشد. از آنجایی که هدف از انجام تحلیل‌های اجزای محدود در این مطالعه محاسبه تغییرات ضرایب شدت تنش ترک نسبت به موقعیت‌های مختلف چرخ‌های هواپیما می‌باشد، شاید به نظر برسد که در نظر گرفتن اثر فقط یکی از چرخ‌ها که ترک را در وضعیت بحرانی‌تری قرار می‌دهد

تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن این دستگاه مختصات، بهتر می‌توان نتایج را تفسیر کرد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، طول  $L$  بیانگر موقعیت طولی مرکز ثقل چرخ‌های عقب از وسط جبهه ترک و طول  $D$  بیانگر موقعیت عرضی مرکز ثقل چرخ‌های عقب از وسط جبهه ترک می‌باشد.



شکل ۴. (الف) شکل نیم بیضی ترک در مدل (ب) مختصات انتخابی برای فاصله گذاری و موقعیت ترک

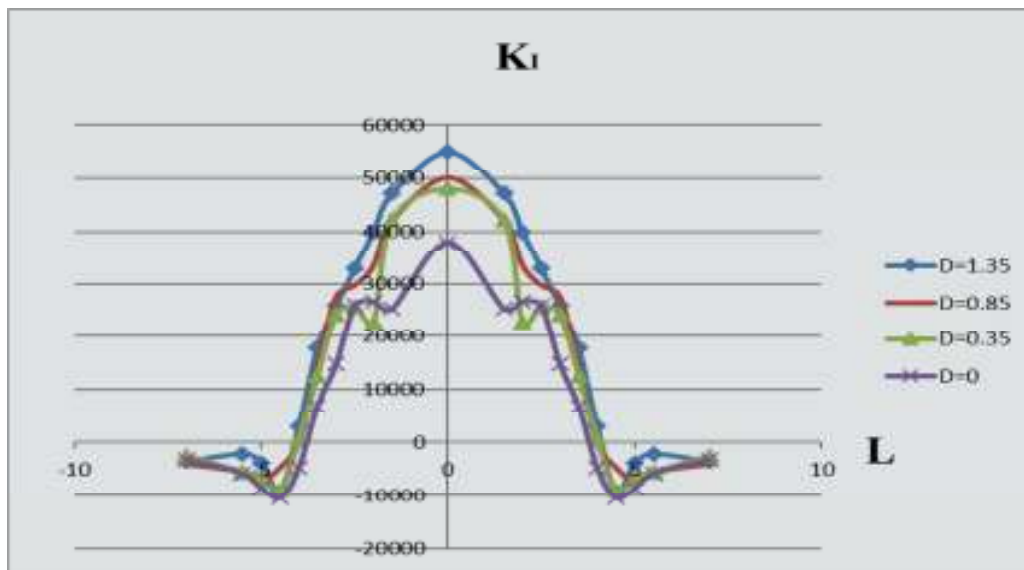
## ۵- تحلیل نتایج

پس از اعمال بار ناشی از چرخ‌ها در مکان‌های از پیش تعیین شده نسبت به ترک، مدل ساخته شده برای تحلیل، توسط نرم افزار آباکوس حل شده و ضرایب شدت تنش مربوط به هر بارگذاری مستقیماً از خروجی نرم افزار به دست می‌آیند. از آنجایی که این ضرایب روی صفحات موازی با جبهه ترک مقادیر متفاوتی دارد و با توجه به اینکه هدف مقایسه کیفی و نسبی مقادیر ضرایب شدت تنش می‌باشد، اعداد مربوط به یک کانترول مد نظر قرار می‌گیرد و با هم مقایسه می‌شود.

### ۱-۵- تغییرات ضریب شدت تنش مود $I (K_I)$

با توجه به مدل در نظر گرفته شده، برای هر تحلیل فقط موقعیت بار ناشی از چرخ‌ها تغییر کرده و نتایج حاصل از نرم افزار استخراج شده است. برای این مدل سازی در مجموع حدود ۴۰ اجرای کامپیوتری انجام شده است. نتایج به دست آمده در حالات مختلف بارگذاری (موقعیتهای مختلف بار نسبت به ترک) برای ضریب شدت تنش مود  $I$  در شکل (۵) ارائه شده است.





شکل ۵. نمودار تغییرات ضریب شدت تنش مود I در موقعیت‌های مختلف بارگذاری

فشاری تا فاصله‌ای مشخص که لاستیک به ترک نزدیک می‌شود غلبه می‌کند و روند صعودی ضریب شدت تنش مود I افزایش می‌یابد.

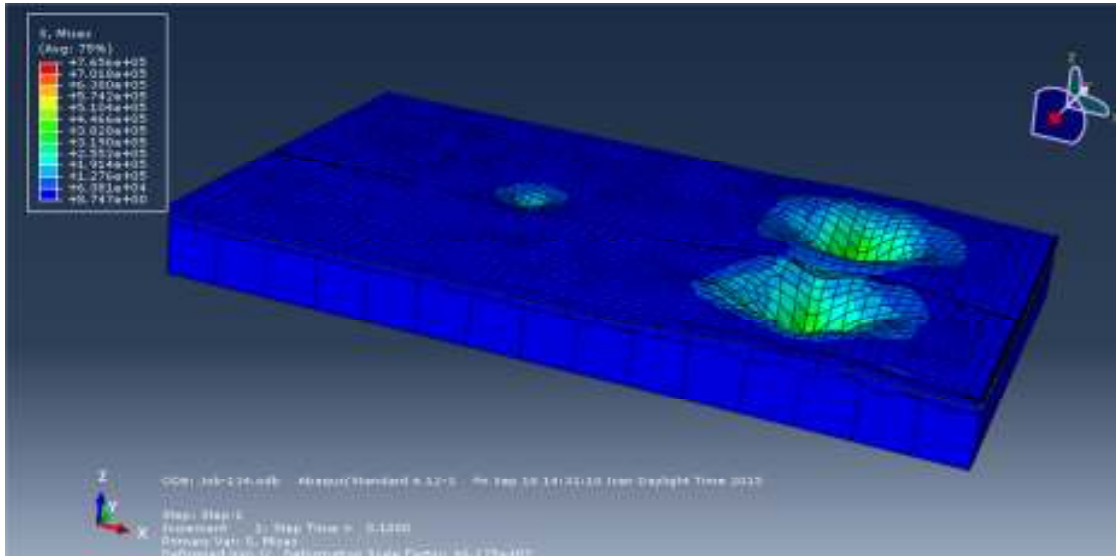
اما اثر بارهای فشاری با نزدیکتر شدن لاستیک به ترک، بزرگتر شده و از تأثیر بارهای خمشی می‌کاهد. با نزدیکتر شدن لاستیک به ترک، بارهای فشاری بر تنشهای کششی غلبه می‌نماید و مقدار ضریب شدت تنش مود I منفی می‌گردد (Ayatollahi, 2012). پس از عبورکردن چرخ‌های جلو از ترک، همچنان روند افزایشی ضریب شدت تنش مود I تا قرار گرفتن تمامی چرخ‌ها در موقعیت متقارن نسبت به ترک ( $L = 0$ ) ادامه دارد و بیشترین مقدار ضریب شدت تنش مود I در این حالت می‌باشد.

#### ۲-۵- نتایج ضریب شدت تنش مود II ( $K_{II}$ )

نتایج به دست آمده در حالات مختلف بارگذاری (موقعیت‌های مختلف بار ناشی از چرخ نسبت به ترک) برای ضریب شدت تنش مود II ( $K_{II}$ ) در جدول (۳) ارایه شده است. مقدار  $K_{II}$  متناسب با میزان لغزش و جوجه ترک نسبت به یکدیگر می‌باشد. این لغزش در راستای عمود بر جبهه ترک است.

در شکل (۵) محور افقی مقادیر L و محور عمودی مقادیر  $K_I$  را نشان می‌دهد. قسمت منفی نمودار در جهت طولی، با استفاده از قرینه سازی رسم شده است. همانطور که در شکل (۶) پیداست، با وجود اینکه چرخ‌های هواپیما نسبت به هم قرینه نیستند اما با توجه به فاصله دور چرخ‌های جلو از چرخ‌های عقب تنش‌های به وجود آمده از چرخ‌های جلو تداخلی با تنش‌های چرخ‌های عقب ندارند، بنابراین در فاصله نزدیک به ترک تنها چرخ‌های عقب در ضریب شدت تنش نقش دارند، به همین دلیل می‌توان در نمودار قرینه سازی انجام داد.

با توجه به نمودار شکل (۵)، حداکثر مثبت ضریب شدت تنش مود I (عامل باز شدگی ترک) زمانی است که مرکز چرخ‌ها در جهت طولی به ترک نزدیک می‌شوند و همچنین با نزدیکتر شدن چرخ‌ها به ترک در جهت عرضی، این ضریب کاهش می‌یابد. نتایج نشان داده شده سایر تحقیقات بیان می‌کند که فشار چرخ باعث می‌شود تا تنش خمشی کششی در نقاط بالایی در فاصله‌های دور از آن به وجود بیاید و این در حالی است که در اثر بار فشاری لاستیک نقاط زیرین و نزدیک به لاستیک در حال فشار هستند. بنابراین اثر تنشهای خمشی کششی بر بارهای



شکل ۶. تنش به دست آمده در سطوح روسازی فرودگاه با استفاده از آباکوس

جدول ۳. مقادیر محاسبه شده از نرم افزار برای ضریب شدت تنش مود II در موقعیت‌های مختلف بارگذاری

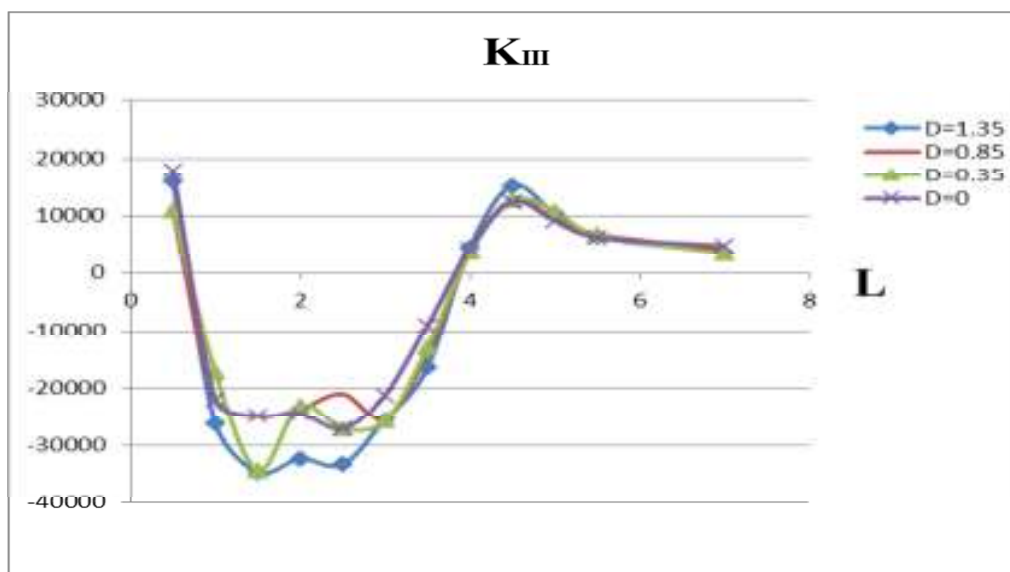
$K_{II}$ (MPa $\sqrt{m}$ )				
(متر)L	(متر)D=۱.۳۵	(متر)D=۰.۸۵	(متر)D=۰.۳۵	(متر)D=0
۰.۵	۲۷۳۲	۳۲۹۲	۶۷۱۷	۸۷۲۱
۱	۳۷۱۶۴	۱۳۵۲۴	۱۶۹۹۹	۱۵۳۳۷
۱.۵	۱۱۷۸۰	۱۳۸۵۹	۱۷۷۳۳	۷۴۴۷
۲	۱۹۸۹۷	۱۲۶۷۲	۱۲۲۰۳	۱۶۷۹۱
۲.۵	۱۱۳۵۶	۱۱۳۸۶	۱۲۴۶۸	۱۵۱۲۹
۳	۹۳۳۷	۱۳۸۴۲	۱۵۰۲۴	۴۰۲۰
۳.۵	۵۵۵۲	۳۷۷۳	۶۱۱۱	۳۶۴۰
۴	- ۲۶۹۶	- ۱۰۷۵	۴۰	- ۱۴۸۹
۴.۵	- ۷۲۹۰	- ۳۳۷۲	- ۴۶۳۹	- ۵۱۵۷
۵	- ۱۷۳۳	- ۳۴۷۳	- ۳۷۶۱	- ۳۳۲۰
۵.۵	- ۹۸	- ۲۰۶۵	- ۲۹۹۲	- ۱۷۷۱
۷	- ۲۱۰۵	- ۲۳۷۶	- ۹۰۳	- ۲۰۹۴

البته باید توجه داشت که برخلاف مود I، در مود II مقدار منفی ضریب شدت تنش نیز تأثیر مثبتی در گسترش ترک دارد. از آنجایی که تنشها در یک جسم ترکدار بر حسب ضرایب شدت تنش محاسبه می‌شوند و ضرایب شدت تنش بیانگر میزان شدت تنش در یک قطعه ترکدار است با تقسیم  $K_{II}$  بر  $K_I$  نسبت بار برشی به کششی (R) محاسبه می‌شود که مقادیر آن در جدول (۴) آمده است.

همانطور که از جدول (۳) دریافت می‌شود هر چه فاصله طولی چرخ‌ها از ترک بیشتر می‌شود مقدار ضریب شدت تنش مود II نیز کاهش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود که با کاهش فاصله عرضی مرکز چرخ‌های عقب از ترک، میزان این ضریب شدت تنش نیز مانند ضریب شدت تنش مود I کاهش می‌یابد. دلیل این اتفاق این است که با کاهش فاصله، به دلیل دور بودن فاصله چرخ‌های هواپیما از یکدیگر، برآیند تنش‌ها در محل ترک کاهش می‌یابد.

جدول ۴. نسبت بار برشی به کششی (R)

$R = \frac{K_{II}}{K_I}$				
L(متر)	D=0(متر)	D=0.35(متر)	D=0.85(متر)	D=1.35(متر)
۰.۵	۰.۸۴۴۹۷۶	۰.۰۳۱۴۶۱	۰.۴۶۱۳۲۳	۰.۵۰۷۴۳
۱	۰.۵۷۸۲۹۶	۰.۷۲۴۶۲۶	۰.۴۸۶۰۲	۰.۹۴۶۱۱۸
۱.۵	۰.۲۹۴۴۰۶	۰.۴۲۰۶۴۲	۰.۳۲۹۷۳۳	۰.۲۵۰۲۸۷
۲	۰.۶۳۰۳۴	۰.۵۳۵۶۸۹	۰.۳۲۹۷۳۳	۰.۴۹۸۰۸۵
۲.۵	۰.۵۸۵۷۳۷	۰.۴۸۳۷۸۱	۰.۳۸۳۰۴۵	۰.۳۴۵۵۴۵
۳	۰.۳۷۲۵۲۴	۰.۶۲۱۳۱۴	۰.۵۰۵۴۵	۰.۳۶۱۴۴۵
۳.۵	۰.۵۲۸۶۸۶	۰.۴۸۳۴۲۷	۰.۲۶۰۸۳۷	۰.۳۱۱۱۴۱
۴	۰.۳۰۹۵۶۳	۰.۰۶۳۴۹۲	۰.۵۴۵۴۵	۰.۸۹۰۶۵
۴.۵	۰.۴۹۰۱۱۶	۰.۵۱۳۵۰۵	۰.۷۳۱۱۳۶	۰.۷۹۶۴۶
۵	۰.۳۸۶۱۳۶	۰.۵۷۶۸۴	۰.۴۹۰۳۲۹	۰.۴۵۰۳۶۴
۵.۵	۰.۳۰۰۷۸۱	۰.۵۴۶۷۸۴	۰.۳۸۰۵۷۵	۰.۰۴۷۰۹۳
۷	۰.۶۶۰۹۸۵	۰.۳۵۵۵۸۷	۰.۵۹۲۳۷۱	۰.۶۱۳۵۲۴



شکل ۷. نمودار تغییرات ضریب شدت تنش مود III در موقعیت‌های مختلف بارگذاری

به ترک) برای ضریب شدت تنش مود III در شکل (۷) ارائه شده است.

در این مود هم با کاهش فاصله عرضی ترک از مرکز چرخهای عقب ضریب شدت تنش کاهش می‌یابد و در فواصل دور L به دلیل از بین رفتن اثرات بار، به صفر نزدیک می‌شود. مروری بر نتایج به دست آمده در مورد مودهای یک و دو و سه شکست نشان می‌دهد که در حالت کلی، حالت تغییر فرم ترک، ترکیبی از هر سه مود شکست

از اعداد به دست آمده مشخص می‌گردد که مقدار ضریب شدت تنش مود I در اکثر موقعیت‌ها بسیار بیشتر از ضریب شدت تنش مود II می‌باشد، لذا بیشترین تأثیر را مود I بر روی گسترش ترک دارد.

### ۳-۵- نتایج ضریب شدت تنش مود III ( $K_{III}$ )

نتایج به دست آمده از تحلیل‌های اجزای محدود در حالات مختلف بارگذاری (موقعیت‌های مختلف بار نسبت

۳۰ و ۳۳ و ۴۰ سانتی متری را بر پایه مشاهدات برای بتن آسفالتی در نظر گرفته و ضرایب شدت تنش برای ترک در فاصله بحرانی اشاره شده در بخش قبل به دست آورده می‌شود.

جهت بررسی تأثیر درجه حرارت، در سه حالت دمای کم (صفر درجه سانتی گراد)، دمای متوسط (۲۰ درجه سانتی گراد) و دمای زیاد (۴۰ درجه سانتی گراد)، با در نظر گرفتن این که در دماهای مختلف، مدول الاستیسیته آسفالت مقادیر مختلفی دارد، به تحلیل نمونه پرداخته می‌شود (Taha, et al, 2013). مقادیر مدول الاستیسیته مربوط به هر درجه حرارت به ترتیب ۱۲۵، ۳۷۵ و ۱۶۵ مگاپاسکالدر نظر گرفته شد، نتایج تحلیل به دست آمده از نرم افزار در جدول (۶) بیان شده است.

از اعداد به دست آمده این نتیجه به دست می‌آید که در دماهای پایین ضریب شدت تنش بیشترین مقدار خود را دارد و با افزایش دما تا حد زیادی از مقدار آن کاسته می‌شود. اما با افزایش بیش از حد دما شیب کاهش ضریب شدت تنش کاهش می‌یابد.

جهت سنجش اثر طول، ترک‌هایی با طول‌های متفاوت در نمونه در حالت بحرانی در نظر گرفته شد، و با محاسبه میزان تنش در اطراف ترک تأثیر طول ترک در رشد آن سنجیده شد که نتایج جدول (۷) گویای این مسئله است.

می‌باشد و برای حالت‌های مختلف بارگذاری نسبت به ترک، مشارکت همزمان هر سه ضریب شدت تنش، می‌تواند باعث شکست شود. با توجه به اینکه مود I بیشترین تأثیر را در گسترش ترک دارد بیشترین سهم را باید به این مود داد. البته باید توجه داشت که فقط مقادیر مثبت این مود مورد بررسی قرار بگیرند. با توجه به اعداد به دست آمده به ترتیب اهمیت این مودها، به هر کدام از آنها یک ضریب نسبت داده می‌شود تا بتوان از طریق فرمول ریاضی به این نتیجه رسید که حدوداً کدام فاصله بحرانی تر است. با توجه به آنچه بیان شد و با توجه به نتایج نرم افزار محل ترک بحرانی برای بررسی‌های بعدی  $L=1.5$  و  $D=2$  در نظر گرفته می‌شود. به ترتیب برای  $K_I$ ،  $K_{II}$  و  $K_{III}$  مقادیر عبارتند از ۶۰۸۴۸ و ۱۳۲۱۰ و ۳۷۱۷۱- بر حسب  $(MPa\sqrt{m})$  همانطور که مشاهده مقدار  $K_I$  به دست آمده برای این حالت از تمامی مقادیر به دست آمده برای  $K_I$  بیشتر است.

#### ۵-۴- بررسی تأثیر تغییر ضخامت، دما و طول ترک آسفالت در رفتار گسترش ترک

پس از انتخاب ترک مورد نظر این مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرد که افزایش یا کاهش ضخامت آسفالت به چه مقدار در ضریب شدت تنش و در نتیجه رشد ترک تأثیر دارد. جهت انجام این بررسی ضخامت‌های ۱۷ و ۲۰ و ۲۲ و

جدول ۵. نتایج تغییر ضخامت در ضریب شدت تنش

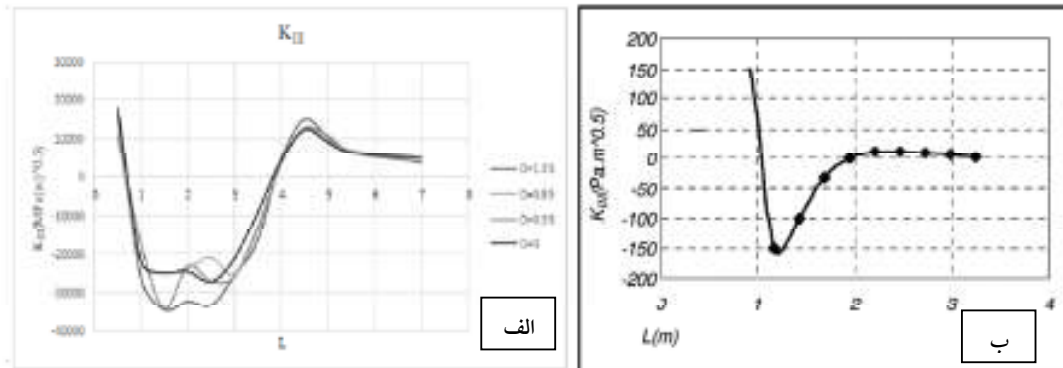
ضریب شدت تنش $(MPa\sqrt{m})$			ضریب شدت تنش $(MPa\sqrt{m})$
KIII	KIII	KIII	
۲۷۶۸۹-	۸۱۸۷	۶۸۳۷۵	۱۷
۳۷۱۷۲-	۱۳۲۱۰	۶۰۸۴۷	۲۰
۴۰۸۷۳-	۱۲۹۵۹	۵۲۰۶۴	۲۲
۴۴۳۰۸-	۱۰۸۴۴	۳۹۰۶۲	۳۰
۱۷۷۷۶۰-	۱۰۸۱۸	۳۴۸۲۹	۳۳
۳۴۶۶۱-	۵۵۶۸	۲۶۰۹۰	۴۰

جدول ۶. مقادیر ضرایب شدت تنش در دماهای مختلف

ضریب شدت تنش ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )			دما
K <sub>III</sub>	K <sub>III</sub>	K <sub>III</sub>	
۳۷۱۷۲-	۱۳۲۱۰	۶۰۸۴۷	دمای کم
۲۰۰۴	۴۵۲۱-	۲۰۴۲۸	دمای متوسط
۱۲۰۴۰	۸۸۲۹-	۶۰۷۸	دمای بالا

جدول ۷. نتایج ضرایب شدت تنش در طول‌های متفاوت ترک خستگی

ضریب شدت تنش ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )			طول ترک (سانتیمتر)
K <sub>III</sub>	K <sub>II</sub>	K <sub>I</sub>	
۳۷۱۷۲-	۱۳۲۱۰	۶۰۸۴۷	۴۰
۳۶۶۷۱-	۱۳۰۰۱	۶۲۹۹۷	۵۰
۳۶۰۷۳-	۱۲۷۲۹	۶۴۸۹۶	۶۰
۳۵۷۳۰-	۱۲۳۸۲	۶۷۷۳۰	۷۰
۳۵۳۲۷-	۱۱۹۷۶	۷۰۵۲۱	۸۰
۳۵۰۴۱	۱۱۳۸۲	۷۲۴۷۲	۹۰



شکل ۸. الف) تغییرات ضریب شدت تنش مود III (نگارنده) و ب) مقایسه با نتایج مطالعات سایر محققان (Ayatolahi,2012)

تنش در اطراف نوک ترک سه عدد ۱۰، ۲۰ و ۲۵ سانتی متر را برای ضخامت روسازی انتخاب کردند. در تحقیق آیت الهی (۱۳۹۱) بیان شده است که خواص شکست خوب برای راه های آسفالتی به خصوص برای مناطق سردسیر یک نیاز ضروری است و در دماهای پایین ضریب شدت تنش بیشتر است و در تحقیق فخری (۱۳۸۷)، تأثیر دما در میزان ضریب شدت تنش بررسی شده است و این نتیجه تأیید شد (Ayatolahi,2012,Fakri and Farokhi,2010).

همانگونه که مشاهده می‌شود، روند کلی نمودارهای به دست آمده در تحقیق آیت الهی (۱۳۹۱) با نمودارهای به دست آمده از نرم افزار که در شکل (۷) آمده است تفاوت‌های بسیار کمی دارد که دلیل این تفاوت‌ها ذکر شد (Ayatolahi,2012). اما در ترتیب نقاط ماکزیمم و مینیمم یک روند را طی می‌کنند. در این مقاله این نتیجه به دست آمد که با افزایش ضخامت مقدار ضریب شدت تنش و در نتیجه رشد ترک کاهش می‌یابد. در تحقیق فخری (۱۳۸۹) نیز همین نتیجه ارایه شد (Fakri and Farokhi,2010). آنها برای تعیین اثر ضخامت لایه ی بتن آسفالتی روی مقادیر

## ۶- نتیجه گیری

این تحقیق به دنبال تدابیری بود که با اتخاذ آنها سرعت گسترش ترک را کاهش داد. برای دستیابی به این هدف و جهت انطباق نتایج با واقعیت، از اطلاعات میدانی فرودگاه کرمان در این پژوهش استفاده گردید و با استفاده نرم افزار المان محدود روسازی باند فرودگاه و یک شکل ترک مدلسازی شد. با جابه جایی بار هواپیمای طرح نسبت به موقعیت ترک محدوده محلی که بارگذاری بیشترین تنش را به ترک وارد می‌کند به دست آورده و سپس تحلیل‌های مختلف در این فاصله انجام گرفت و تأثیر تغییر ضخامت آسفالت، تغییر طول ترک و همچنین تغییرات دما بر رفتار ترک بررسی شد، نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد:

- نتایج تغییر طول ترک در مدل نشان داد که در ترک‌های با طول بیشتر، میزان ضریب شدت تنش افزایش پیدا کرد، به عبارت دیگر سرعت رشد ترک با افزایش طول ترک افزایش می‌یابد. هر چه طول ترک بیشتر شود، افزایش سرعت رشد ترک سیر صعودی به خود می‌گیرد. با استفاده از نتایج به دست آمده با ۲ برابر شدن طول ترک ( $K_I$  افزایش طول ترک از ۴۰ سانتی متر به ۸۰ سانتی متر) میزان  $K_I$  حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.

- با افزایش ضخامت آسفالت مقدار ضریب شدت تنش کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر با افزایش ضخامت لایه آسفالتی سرعت رشد ترک کاهش پیدا می‌کند. اما این مقدار کاهش  $K_I$  در ضخامت‌های مختلف متفاوت است و همانطور که از نتایج به دست آمده پیدا است به ازای هر سانتی‌متر افزایش ضخامت آسفالت حدود ۳ تا ۸ درصد از ضریب شدت تنش کاسته می‌شود. چون معمولاً در طراحی روسازی فرودگاه پس اعمال شرایط طراحی، برای انتخاب ضخامت لایه‌ها، امکان انتخاب از یک بازه وجود دارد، می‌توان ضخامت آسفالت را مقدار حداکثر در نظر گرفت و جهت صرفه‌جویی اقتصادی ضخامت لایه‌های دیگر را مقدار حداقل انتخاب کرد.

- نتایج حاصل شده از تغییرات دما نشان دهنده این است که بارگذاری در دماهای بسیار پایین، که رفتار

آسفالت شکننده‌تر و ترد است، بیشترین آسیب را به روسازی می‌رساند و سرعت رشد ترک خستگی در آن افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به ازای هر درجه افزایش دما، میزان تنش حدود ۳ تا ۴ درصد کاهش پیدا می‌کند که نشان دهنده اهمیت این پارامتر می‌باشد. جهت جلوگیری از این امر، می‌توان تا حد امکان ساعات پروازی هواپیما را به نحوی تنظیم نمود که در دماهای نزدیک به صفر درجه و کمتر از آن به ویژه در شب‌های سرد زمستان، که حداقل دما را در شهری مانند کرمان دارا می‌باشد پروازها محدود گردند.

با ملاحظه نتایج خروجی نرم افزار، می‌توان پیشنهادات ادامه را جهت جلوگیری از گسترش ترک در فرودگاه ارائه داد:

استفاده از مخلوط آسفالتی با مقاومت کافی در برابر شروع و گسترش ترک در وسط باند، ترمیم به موقع و پر کردن ترک‌ها جهت جلوگیری از رشد سریع آن و در حد امکان عدم برقراری پروازها در ساعاتی که درجه حرارت نزدیک و یا کمتر از صفر درجه است.

جهت جامع‌تر و دقیق‌تر شدن تحقیقات بعدی و درک بهتر رفتار رشد و گسترش ترک خوردگی پیشنهاد می‌شود، با روش  $XFEM^{14}$  در مدلسازی و بررسی رشد ترک استفاده شود، همچنین در صورت امکان در بازه‌های زمانی مختلف از روسازی و محل‌های از پیش تعیین شده آن بازدید و برداشت شود و تغییرات شکل گرفته با نتایج نرم افزار مقایسه شود.

## ۷- سپاسگزاری

استفاده از منابع علمی و دریافت راهنمایی حضوری از جناب آقای دکتر آیت الهی کمک شایانی به پیشبرد این تحقیق نمود که لازم است از ایشان و از سایر محققانی که مطالب علمی آنها در متن استفاده شده سپاسگزاری شود.

## ۸- پی‌نوشت‌ها

- 1- Fatigue Crack Progression
- 2- Kim

- characteristics – A discussion.” Proc., Eight International Conferences on Asphalt Pavements, Seattle, Washington, 1123-1140.
- Evdorides, H.T. and Snaith, M.S. and Anyala, M., (2006), “An analytical study of road pavement fatigue”, Transport 159 Issue TR2, pp. 93– 100.
  - Erol Tutumluer & In Tai Kim, (2004). "Permanent Deformation Behavior of Airport Pavement Base and Subbase Courses" University of Illinois, Urbana-Champaign November 9.
  - Fakhri, M. and Farokhi, M.,(2013), "The top-down method of crack propagation (TDC) in asphalt pavements using fracture mechanics hypothesis" Journal of Civil Tarbiat Modares 64, Fall 2010, Issue 3, [In Persian].
  - Paris, P. and Erdogan, F., (1963), “A critical analysis of crack propagation laws”, Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, December 1963, pp. 528-534.
  - Rodney N. Joel, (2006), "FAA Rigid Pavement and Tools Design Philosophy" Northwest Region Airports Conference, April 10.
  - Ten Statistical Yearbook of Air Transport (TSYAT), 2004-2014, (2014), Civil Aviation Authority, Office of the Information and Communication Technology Survey 2014 [In Persian].
  - Taha, M., Yusoff, N. and Hainin, M. (2013), “Study of the Effect of Temperature Changes on the Elastic Modulus of Flexible Pavement Layers”, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Maxwell Scientific Organization, pp.1661-1667.
  - Shafabakhsh, G., 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, pp. 811-819.
  - Willis, M., Johnson, D. and Sukumaran, B. (2006), “Three-Dimensional Finite Element Analyses of Flexible Airport Pavements for the Next Generation of Aircrafts”, Minnesota Department of Transportation, USA.
  - 3- Tutumluer
  - 4- Wang
  - 5- Chia-pei
  - 6- Chiang Kai Shek
  - 7- Joel
  - 8- Airport Pavement Design and Evaluation and Airport Technology FEDFAA Software
  - 9- Erkens
  - 10- Jacobs
  - 11- Evdorides
  - 12- Al-Balbissi
  - 13- Abaqus Explicit
  - 14- Extended Finite Element Method

## ۹- مراجع

- Airbus Manual. (2014), “Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning”, A320/A320NEO, Revision No. 28, May 2014.
- Al-Balbissi, A., and Little, D. N. (1990), “Effect of fracture healing on laboratory-to-field shift factor” Transportation Research Record 1286, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.173-183.
- Ayatollah, M. (2012), "The crack growths under combined loads stretch in asphalt shear (low-temperature)." Printing. Transportation Research Institute, spring 2012 [In Persian].
- Al-Qadi, I.L. (2006), "Pavement Interlayer System Mechanisms: Separation, Reinforcement, and Reflective Cracking Control" Chinese Society of Pavement Engineering.
- Balbissi, A., and Little, D. N. (1990), “Effect of fracture healing on laboratory-to-field shift factor.” Transportation Research Record 1286, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.173-183.
- Chia-pei & Shih-ying Wang. (2005), "The Development and Application of Finite Element Model in the Chiang Kai-Shek International Airport". Preceding the 8th Int’l Conference on Concrete Pavements, August 10-12, 2005. Colorado, USA.
- Erkens, S. M. J. G., Groenendijk, J., Moraal, J., Molenaar, A. A. A., and Jacobs, M. M. J. (1997), “Using Paris’ Law to determine fatigue

## Numerical Analysis of Stress Intensity Factors in Airport Asphalt Pavement by Aircraft Wheel Loading

*M. J. Akhavan Bahabadi, M.Sc. Grad., Civil Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.*

*M. M. Khabiri, Assistant Prof., Civil Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.*

*A. Fotuhi Firozabadi, Assistant Prof., Mechanic Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.*

*E-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir*

Received: July 2016-Accepted: Nov. 2016

### ABSTRACT

Ground facilities are an integral part of the airport, which the most important of them is runway pavements. One of the difficulties and the inevitable failure of the pavement are cracking. Cracking in flexible pavements is a distress seen in the most flight zones. Therefore, it is important to take action to reduce the speed of its spread. In this study, field data of Kerman airport (Iran) were used to achieve the mentioned goal and to adapt the results to the reality. Also, the real values of the thickness and density of the layers and other layer properties obtained from the experiments were used. By using finite element software for runway pavement, a crack was modeled and then its output was used to analyze the pavement in different modes. At first, by loads displacement to the position of the cracking, the place where loading causes the highest stress to the cracking was determined. Next, the different analysis in the targeted area was conducted to investigate the effect of the asphalt thickness changes, crack length changes and the temperature changes in the cracking behavior. The results of change in the crack length showed the stress intensity factor  $K_I$  increase to 17% with increasing the crack length two times. The amount of stress intensity factor decreases with increasing the asphalt thickness. In other words, the crack growth rates decrease with increasing the asphalt thickness. The results showed that for each degree increase in temperature, the stress reduces by 3%, which reflects the importance of temperature parameter. It is recommended at the temperatures close to zero degrees or below zero, the number of flights to be limited.

**Keywords:** Numerical Analysis, Pavement Cracking, Airfield Flexible Pavement, Stress Intensity Factor, Crack Propagation