



Effect of Contact Geometry on the Slip Amplitude and Contact Pressure in Fretting Fatigue of a Turbine Blade Root

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Shirzadi S.¹ MSc,
Badri-kouhi E.¹ MSc,
Adibnazari S.*¹ PhD

How to cite this article

Shirzadi S, Badri-kouhi E, Adibnazari S. A Effect of Contact Geometry on the Slip Amplitude and Contact Pressure in Fretting Fatigue of a Turbine Blade Root. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(10):2409-2418.

ABSTRACT

Turbine blades are exposed to mechanical and thermal stresses due to their operation in critical conditions that lead to various damages such as fatigue and wear. These factors reduce the blades life cycle by accelerating the cracking process. In this paper, the effects of three geometric parameters including the contact length, the contact angle, and the surface friction coefficient on relative slip amplitude and contact pressure values in the turbine blade root were investigated using a two-dimensional finite element model. Comparing the results of the analysis with the actual blade damages by use of scanning electron microscopy shows acceptable consistency between predicted damage site and the actual blade damages. The results of the blade analysis indicate that by moving from the top of the contact edge to the bottom, the contact pressure increases gradually and its maximum occurs near the lower edge of the contact. According to the results, the prescribed increments in the coefficient of friction, the contact angle, and the length of contact, respectively decrease the slip amplitude by 26%, 19%, and 10% and also decrease the contact pressures by 35%, 15%, and 5%. In addition, increasing contact angle and coefficient of friction increase the opening region length at the upper edge on both sides of the blade root. While increasing the contact length has no considerable effect on the length of this region.

Keywords Fretting Fatigue, SEM, Fretting Damage Slip Amplitude, Contact Pressure

¹Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: : Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Azadi Street, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 66164612
Fax: +98 (21) 66022731
adib@sharif.ir

Article History

Received: May 29, 2018
Accepted: February 23, 2019
ePublished: October 22, 2019

CITATION LINKS

[1] Fretting fatigue life estimations based on fretting mechanisms [2] Failure analysis of Ti6Al4V gas turbine compressor blades [3] An investigation of fretting fatigue in a circular arc dovetail assembly [4] ASTM E2789-10(2015) standard guide for fretting fatigue testing [Internet] [5] Mechanics of fretting fatigue. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1994 [6] Fretting fatigue in dovetail blade roots: Experiment and analysis [7] 2D & 3D FE analysis of fir-tree joints in aeroengine discs [Dissertation] [8] An investigation of fatigue and fretting in a dovetail joint [9] Designing against fretting fatigue in aeroengines [10] Three-dimensional nonlinear finite element analysis of dovetail joints in aeroengine discs [11] Using a dovetail fixture to study fretting fatigue and fretting palliatives [12] Development of a dovetail fretting fatigue fixture for turbine engine materials [13] The effect of angle on dovetail fretting experiments in Ti-6Al-4V [14] A fracture mechanics life prediction methodology applied to dovetail fretting [15] Fatigue crack growth simulation in a generator fan blade [16] Design study of dovetail geometries of turbine blades using abaqus and isight [17] Effect of three-dimensional loading on macroscopic fretting aspects of an aero-engine blade-disc dovetail interface

تأثیر هندسه تماس بر دامنه لغزش و فشار تماسی در خستگی سایشی ریشه پره توربین

صبا شیرزادی MSC

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

احسان بدری کوهی MSC

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

سعید ادیب نظری PhD*

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

پره‌های توربین به علت کاربرد در شرایط بحرانی در معرض تنش‌های مکانیکی و حرارتی بوده و دچار آسیب‌های مختلفی از قبیل خستگی و سایش می‌شوند که منجر به کاهش عمر پره‌ها از طریق تسریع روند جوانه‌زنی و رشد ترک خواهد شد. در این مقاله با استفاده از مدل المان محدود دویعدی، اثر سه پارامتر هندسی طول ناحیه تماس، زاویه ناحیه تماس و ضریب اصطکاک بر دامنه لغزشی و فشار تماسی در ریشه پره توربین مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج تحلیل با خرابی‌های مشاهده شده روی پره توربین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی، انطباق آسیب‌های پیش‌بینی شده با آسیب‌های به وقوع پیوسته را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل پره نشان می‌دهد که با حرکت از لبه بالایی تماس به سمت لبه پایینی، مقدار فشار تماسی به تدریج افزایش می‌یابد و ماکزیمم فشار تماسی در نزدیکی لبه پایینی تماس اتفاق می‌افتد. براساس نتایج به‌دست آمده، در هر مرحله افزایش ضریب اصطکاک، افزایش زاویه تماس و افزایش طول ناحیه تماس، مقادیر دامنه لغزش به ترتیب در حدود ۲۶٪، ۱۹٪ و ۱۰٪ و فشار تماسی به ترتیب در حدود ۳۵٪، ۱۵٪ و ۵٪ کاهش پیدا می‌کند. همچنین افزایش زاویه ناحیه تماس و ضریب اصطکاک به ترتیب محدوده جدایش در لبه‌های تماس بالایی در دو سمت نمونه را افزایش می‌دهد. این در حالی است که افزایش طول ناحیه تماس تغییر قابل توجهی در محدوده ناحیه جدایش در نزدیکی لبه بالایی تماس نمونه ایجاد نمی‌کند.

کلیدواژه‌ها: خستگی سایشی، میکروسکوپ الکترونی، آسیب‌های فرتینگ، دامنه لغزش، فشار تماسی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۴

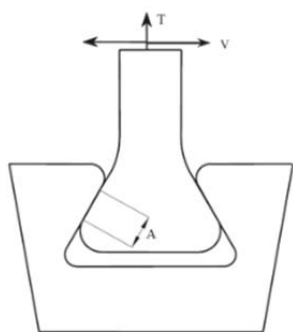
*نویسنده مسئول: adib@sharif.ir

۱- مقدمه

استفاده روزافزون از توربین‌ها در صنایع مختلف توجه محققان را به بهبود عملکرد و افزایش عمر اجزای آنها جلب کرده است. نمونه‌های زیادی از خرابی‌های گزارش‌شده در توربین‌ها نشان می‌دهد که خستگی سایشی یکی از تهدیدهای اصلی در ایجاد آسیب در ریشه پره توربین است و در طراحی اتصالات پره و دیسک باید به آن توجه کرد^[۱-۳]. خستگی سایشی، فرآیند شکل‌گیری ترک در محل آسیب سایشی، رشد پیش‌رونده ترک و در نهایت رسیدن به شکست کامل است، که در موادی که تحت سایش پیوسته و تنش و کرنش تناوبی قرار دارند، رخ می‌دهد^[۴، ۵]. مطالعه اتصالات مکانیکی میان پره‌های توربین و دیسک نشان می‌دهد که در اثر اعمال دو نیروی گریز از مرکز و ارتعاشی (شکل ۱)، یک میدان تنش بحرانی در ناحیه تماس به‌وجود می‌آید^[۶]. این میدان تنش بحرانی بستر شکل‌گیری خستگی سایشی است و شدت آن به عواملی از جمله تنش‌های تماسی، شرایط سطوح تماس (مانند ضریب اصطکاک سطح، زبری سطح، تنش پسماند و غیره) و جزئیات هندسه تماس وابسته است^[۷].

طی دهه‌های گذشته مطالعات گسترده‌ای با موضوع خستگی سایشی در ریشه پره توربین با روش‌های عددی و تجربی انجام شده است. از جمله اولین مطالعات تجربی در این زمینه می‌توان به

کار روئیز و همکاران^[۸، ۹] اشاره کرد. آن‌ها برای ایجاد شرایط سایش و نشان دادن وضعیت تنش‌های موجود در محل تماس، از تجهیزات تستی استفاده کردند که نیروی گریز از مرکز و نیروی وارد بر دیسک را شبیه‌سازی می‌کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که علاوه بر تنش بیشینه، نسبت تنش برشی بر دامنه لغزش در طول ناحیه تماس اثر قابل ملاحظه‌ای بر عمر خستگی اتصالات پره و دیسک دارد. همچنین پاپانیکیوس و همکاران^[۱۰]، مطالعات عددی خود را به بررسی اثر پارامترهای هندسی بحرانی بر میدان تنش ون میسر با در نظر گرفتن اصطکاک در ناحیه تماس، اختصاص دادند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که طول ناحیه تماس، شعاع ناحیه تماس و ضریب اصطکاک به‌طور قابل ملاحظه‌ای توزیع تنش ون میسر در سطح تماس پره و دیسک را تغییر می‌دهد.

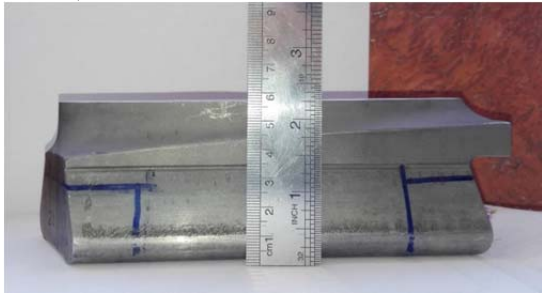


شکل ۱) نمایی از هندسه و نیروهای وارده بر ریشه پره توربین^[۶]

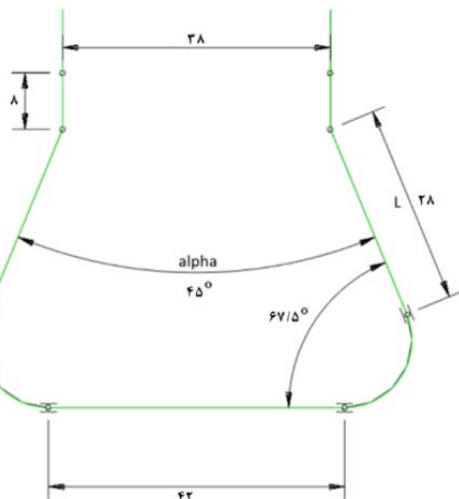
مطالعات نشان داده است که پارامترهای مختلفی بر رفتار خستگی سایشی پره توربین اثر دارد. این پارامترها شامل نوع بارگذاری، سطح تماس، هندسه پره، جنس پره و شرایط دمایی می‌باشد. کونر و نیکولاس^[۱۱] به روش تجربی اثر عملیات سطحی را بر افزایش عمر خستگی اتصالات دم‌چلچله‌ای مطالعه کردند و نشان دادند که پوشش‌دهی سطح با کاهش مدول الاستیسیته و ضریب اصطکاک، فشار تماسی را نیز کاهش داده و باعث افزایش عمر خستگی سایشی می‌شود. عملیات LPB سطح نیز با ایجاد تنش پسماند فشاری مانع از رشد ترک شده و عمر را افزایش می‌دهد. گلدن^[۱۲] به روش تجربی اثر دما و جنس‌های مختلف مواد بر رفتار خستگی سایشی در اتصال پره به دیسک را بررسی کرد.

گلدن و نیکولاس^[۱۳] به‌منظور بررسی اثر زاویه تماس بر عمر خستگی سایشی اتصال دم‌چلچله‌ای به روش تجربی، تست‌های خود را روی سه زاویه تماس ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه انجام دادند. نتایج تست آن‌ها نشان داد که در هزار سیکل اول با نسبت تنشی $R = 0/1$ ، لغزش کامل مشاهده می‌شود، این روند تا جایی ادامه می‌یابد که ضریب اصطکاک متوسط به تدریج افزایش یافته و نمونه وارد رژیم چسبندگی می‌شود. این در حالی است که در تست‌هایی با نسبت تنشی بالاتر ($R = 0/5$)، در ابتدا لغزش کامل مشاهده نمی‌شود. گلدن و کالکاتر^[۱۴] نیز به روش تجربی و عددی، اثر زاویه ناحیه تماس و نسبت تنشی (R) را بر عمر پره‌های توربین بررسی کردند. آن‌ها تست‌های خود را در دامنه بارگذاری ثابت انجام دادند و با استفاده از این تست‌ها داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی و پیش‌بینی عمر را استخراج کردند.

پورسعیدی و صلواتیان^[۱۵] با بررسی عددی و تجربی پره یک توربین نیروگاهی، به تحلیل علت شکست و تأثیر وجود ترک بر تنش‌های پره پرداخته‌اند. آن‌ها برای این کار، ضمن مدل‌سازی پره در محیط المان محدود، پره آسیب‌دیده را تحت آزمایش تجربی قرار داده و با



شکل ۲) ریشه پره توربین



شکل ۳) مشخصات هندسی پره فولادی (ابعاد به میلی‌متر می‌باشند)

در تعیین سطوح تماس، سطح دیسک به عنوان سطح اصلی و سطح پره به عنوان سطح فرعی معرفی شده و بین سطوح تماس ضریب اصطکاک تعریف می‌شود. در اعمال شرایط مرزی، فرض بر آن است که از حرکت سطوح دیسک، به‌طور کامل جلوگیری شود. همچنین بارهای گریز از مرکز و بار آیرودینامیکی نیز با توجه به داده‌های موجود در جدول ۱ به پره وارد می‌شود. شکل ۴ مدل اتصال پره به دیسک به همراه شرایط مرزی اعمال شده را در محیط نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد.

برای تولید شبکه مش از المان‌های کرنش صفحه‌ای استفاده شده است. از آنجا که ناحیه تماس در تحلیل خستگی سایشی از اهمیت زیادی برخوردار است، شبکه مش مورد استفاده دارای تراکم زیاد المان‌ها در ناحیه تماس می‌باشد و به‌منظور کاهش حجم مدل در سایر قسمت‌ها، شبکه مش درشت‌تری مورد استفاده قرار گرفته است. تفاوت ابعاد شبکه‌های مش سبب شده که در بخشی از مدل، مش حالت بی‌ساختار پیدا کند. اما در ناحیه تماس، هم روی پره و هم روی دیسک، مش ساختاریافته اعمال شده است (شکل ۵).



شکل ۴) نمایش مدل پره و دیسک و شرایط مرزی اعمال شده بر آن در محیط نرم‌افزار آباکوس

تصویربرداری الکترونی از سطح خرابی به بررسی علل به‌وجود آمدن و رشد ترک در ریشه پره پرداخته‌اند.

هان و کوفر^[۱۶] به‌منظور بهینه‌سازی فشار تماسی حول اتصال دم چلچله‌ای برای رسیدن به سطح تنش مورد نیاز از روش‌های بهینه‌سازی برای طراحی هندسه اتصال پره و دیسک استفاده کردند. آن‌ها در این کار با توجه به وجود بارگذاری محوری (گریز از مرکز)، برای دستیابی به نتایج بهتر از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده کردند. آناندول و پرکاش^[۱۷] اثر بارگذاری سه‌بعدی بر پارامترهای ماکروسکوپی سایش مانند لغزش و تنش در ناحیه تماس پره و دیسک را با استفاده از یک مدل المان محدود سه‌بعدی بررسی کردند. اثر بارگذاری با ایجاد یک زاویه انحراف ۲۰ درجه و اعمال نیرو و تکانه بر پره در نظر گرفته شده است. آن‌ها نشان دادند در صورتی که پره دارای زاویه پیچ هندسی باشد، بهتر است بارگذاری سه‌بعدی در نظر گرفته شود.

برخلاف پژوهش‌های گذشته، که بیشتر بر تحلیل میدان تنش در ناحیه تماس تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش دامنه لغزش در ناحیه تماس به عنوان پارامتر اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. اهمیت این موضوع از آن جهت است که در صورت مشخص بودن مقادیر دامنه لغزش و نیروی تماسی عمودی، رژیم لغزشی و نوع آسیب ایجاد شده قابل تشخیص است. در نتیجه می‌توان نوع آسیب ایجاد شده در پره‌ها را پیش‌بینی و با آن مقابله کرد. آنچه در این مقاله به آن پرداخته می‌شود، استفاده از یک مدل المان محدود دوبعدی از اتصال پره و دیسک و بررسی اثر پارامترهای هندسی بر رفتار خستگی سایشی در محل تماس می‌باشد. مدل‌سازی برای یک پره مشخص که تصاویری از سطوح آسیب‌دیده آن تحت میکروسکوپ الکترونی در دسترس بوده است، در نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده و تأثیر پارامترهای هندسه تماس مانند طول ناحیه تماس، زاویه ناحیه تماس و ضریب اصطکاک بر رژیم لغزش مورد بررسی قرار می‌گیرد. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان در راستای یافتن رژیم خستگی نمونه و مشخص کردن پارامترهای بهینه طراحی پره استفاده کرد.

۲- شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش از مشخصات یک پره توربین کاربردی، جهت بررسی اثر پارامترهای هندسی بر دامنه لغزش استفاده شده است، جدول ۱ و شکل‌های ۲ و ۳ مشخصات هندسی و بارگذاری وارد بر پره را در حالت‌های مختلف بررسی، نشان می‌دهند. پره و دیسک با المان‌های دوبعدی تغییر شکل پذیر و با شرایط کرنش صفحه‌ای در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل شده‌اند. در این مطالعه پره و دیسک از جنس فولاد ضدزنگ در نظر گرفته شده‌اند، که دارای مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۳ می‌باشند.

جدول ۱) ابعاد هندسی پره فولادی در حالت‌های مختلف

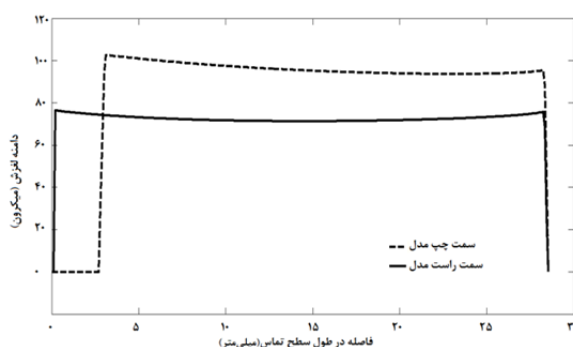
Aero Load	CF Load	μ	L (mm)	alpha	Case
۲۳۰۰ N	۸۰۰ KN	۰/۳	۲۸/۳۳	۳۵	۱
۲۳۰۰ N	۸۰۰ KN	۰/۳	۲۸/۳۳	۴۵	۲
۲۳۰۰ N	۸۰۰ KN	۰/۳	۲۴	۴۵	۳
۲۳۰۰ N	۸۰۰ KN	۰/۳	۳۲	۴۵	۴
۲۳۰۰ N	۸۰۰ KN	۰/۳	۳۶	۴۵	۵
۲۳۰۰ N	۸۰۰ KN	۰/۳	۲۸/۳۳	۴۵	۶
۲۳۰۰ N	۸۰۰ KN	۰/۳	۲۸/۳۳	۴۵	۷
۲۳۰۰ N	۸۰۰ KN	۱	۲۸/۳۳	۴۵	۸
۲۳۰۰ N	۸۰۰ KN	۰/۳	۲۸/۳۳	۵۵	۹
۲۳۰۰ N	۸۰۰ KN	۰/۳	۲۸/۳۳	۶۵	۱۰

این حالت نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است، ماکزیمم تنش مجموعه در لبه ناحیه تماس و روی دیسک رخ می‌دهد. این در حالی است که ماکزیمم تنش ون میسر روی پره، در محلی پایین‌تر از لبه تماس به وقوع می‌پیوندد. از طرف دیگر همان طور که در شکل نمایان است، بار خمشی وارده به پره باعث عدم تقارن در توزیع تنش شده است. در واقع اعمال نیروی آیرودینامیکی، سبب افزایش تنش در انتهای سمت چپ ناحیه اتصال و ابتدای سمت راست ناحیه اتصال می‌شود. می‌توان گفت که این نقاط در نقش تکیه‌گاه پره عمل می‌کنند.



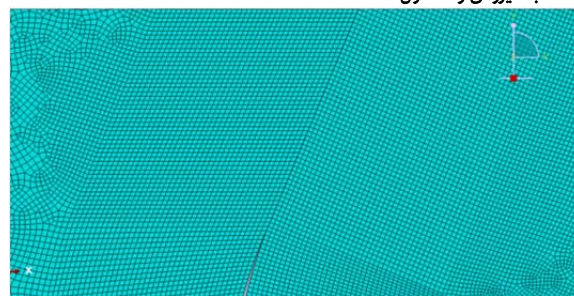
شکل ۷) توزیع تنش ون میسر در اثر اعمال بار محوری و خمشی به‌طور هم‌زمان در حالت اول (برحسب مگاپاسکال)

دامنه لغزشی در فصل مشترک ناحیه اتصال سمت چپ و راست در حالت اول در نمودار ۲ نشان داده شده است. همان طور که ذکر شد مقادیر بیشتر دامنه لغزش نسبی در یک سمت نمونه، نسبت به سمت دیگر آن، ناشی از عدم تقارن بارگذاری به علت وجود بار خمشی می‌باشد. همچنین در نزدیکی لبه بالایی تماس در سمت چپ نمونه، یک ناحیه با دامنه لغزش نسبی حدوداً صفر وجود دارد، که این ناحیه ناشی از اعمال بار خمشی و جدا شدن سطح لبه بالایی از سطح دیسک در سمت چپ نمونه است. در سایر نواحی نمونه لغزش کلی اتفاق می‌افتد و حضور ناحیه چسبندگی مشاهده نمی‌شود. همان طور که در نمودار مشاهده می‌شود، مقادیر ماکزیمم دامنه لغزش در هر دو سمت در نزدیکی لبه تماس بالایی اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی مقادیر دامنه لغزش نسبی در سمت چپ نمونه بیشتر از سمت راست آن می‌باشد.



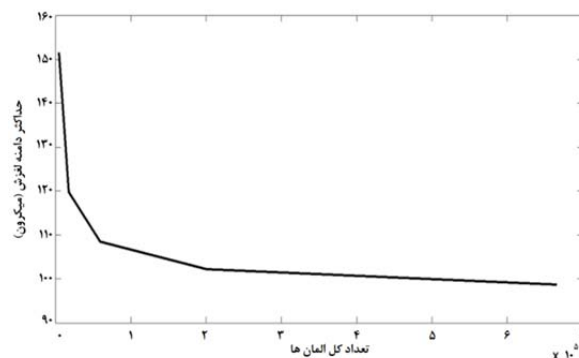
نمودار ۲) الگوی توزیع دامنه لغزشی در دو طرف نمونه در حالت اول

در نمودار ۳ الگوی توزیع فشار تماسی در دو سمت ناحیه اتصال در محدوده فصل مشترک برای حالت عمومی نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ماکزیمم فشار تماسی در هر دو سمت نمونه در نزدیکی لبه پایینی تماس رخ می‌دهد و مقدار آن در سمت چپ نمونه بیشتر از سمت راست نمونه است. همچنین عدم وجود فشار تماسی در نزدیکی لبه تماس بالایی در سمت چپ نمونه، ناشی از اعمال بار خمشی بوده و وجود ناحیه‌ای با مقادیر لغزش صفر در این محدوده را توجیه می‌کند.

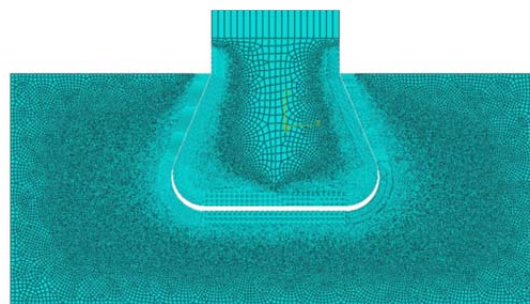


شکل ۵) شبکه‌بندی ساختار یافته در ناحیه تماس دیسک و پره

برای انتخاب ابعاد شبکه، استقلال نتایج از شبکه‌بندی مدل بررسی شده است. از آنجا که پارامتر مورد بحث در این پروژه دامنه لغزش می‌باشد، افزایش تدریجی تعداد سلول‌ها در شبکه مش تا جایی ادامه یافته که مقدار ماکزیمم لغزش نسبی همگرا شود (نمودار ۱) و افزایش تعداد سلول‌های شبکه، باعث تغییر در مقدار این پارامتر نشود. در نهایت استفاده از شبکه‌ای با ابعاد ۱۰۰ میکرومتر در ناحیه تماس، سبب استقلال نتایج از شبکه خواهد شد که تعداد کل المان‌های مورد استفاده در این شبکه را به بیش از ۲۰۰ هزار المان می‌رساند، از آنجا که حساسیت تحلیل مربوط به سطوح تماس است، در فاصله‌ای دورتر از این ناحیه از المان‌های مش بزرگتری استفاده شده است (حدود ۱۰ برابر بزرگتر). نمایی از شبکه مش ایجاد شده در شکل ۶ نشان داده شده است.



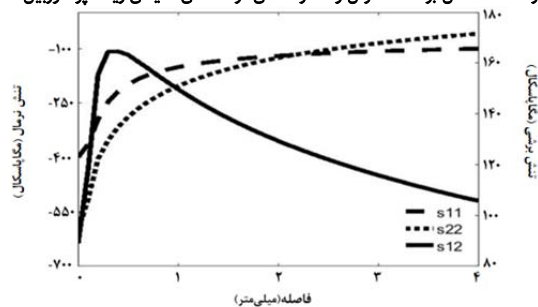
نمودار ۱) همگرایی ماکزیمم دامنه لغزش با افزایش تعداد المان‌ها



شکل ۶) نمایی از شبکه‌بندی دیسک و پره

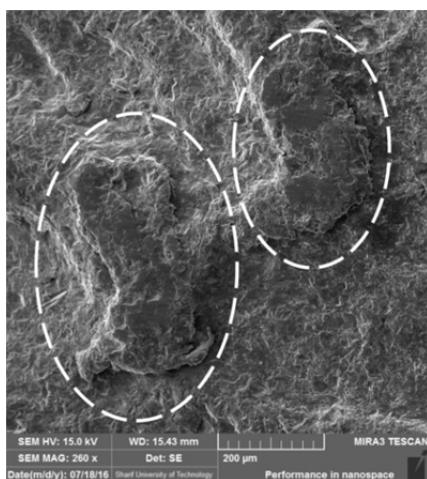
۳- تحلیل نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از مدل‌سازی پره و دیسک، تجزیه و تحلیل شده و اثر پارامترهای طول ناحیه تماس، شعاع ناحیه تماس (پارامتر α) و ضریب اصطکاک بر دامنه لغزش و فشار تماسی بررسی شده است. بهتر است پیش از آن که اثر پارامترهای هندسی بر دامنه لغزش بررسی شود، ابتدا یک تحلیل تنش اولیه روی پره و دیسک در حالت اول (جدول ۱)، انجام شود. شکل ۷ توزیع تنش ون میسر حاصل از بارگذاری را در ناحیه تماس برای



نمودار ۴) تغییرات تنش‌های نرمال و تنش برشی در عمق ریشه پره در راستای عمود به فصل مشترک تماس در حالت اول

تنش برشی زیرسطحی می‌تواند سبب ایجاد ترک‌های زیر سطحی و جدا شدن لایه‌هایی از ماده شود. این نوع از خرابی، در شکل ۹ که حاصل از بزرگنمایی آسیب‌های مشاهده شده در شکل ۸ می‌باشد، نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، آسیب‌های ایجاد شده غالباً به شکل پوسته پوسته شدن (Delamination) هستند، که در واقع ترک‌ها در زیر سطح تشکیل شده و پس از رشد، نهایتاً به سطح آزاد رسیده و منجر به کنده شدن و تشکیل ذرات روی سطح پره می‌شود. پس از بررسی نتایج مربوط به حالت اول، در ادامه تأثیر پارامترهای هندسی بر تغییر الگوی لغزش نسبی و فشار تماسی مطالعه خواهد شد.

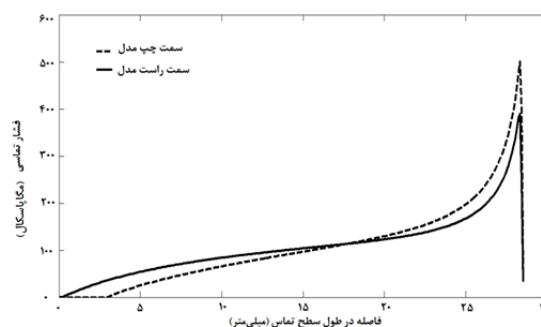


شکل ۹) پوسته پوسته شدن سطح در اثر رشد ترک‌های زیر سطحی

۳-۱- بررسی اثر زاویه ناحیه تماس

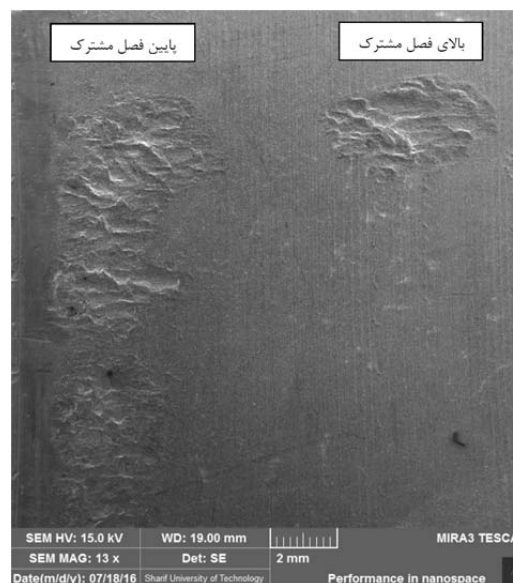
یکی از پارامترهای هندسی در طراحی پره، زاویه ناحیه تماس می‌باشد (پارامتر α در شکل ۳). با در نظر گرفتن ۴ زاویه ۳۵، ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه در ناحیه تماس، اثر تغییر این پارامتر بر ماکزیمم دامنه لغزش بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه ناحیه تماس، مقدار ماکزیمم دامنه لغزش کاهش می‌یابد (نمودار ۵).

نمودار ۶ دامنه لغزش نسبی در فصل مشترک پره و دیسک را برای زوایای مختلف ناحیه تماس در سمت چپ نمونه نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، با افزایش زاویه، طول ناحیه جدایش در ابتدای لبه تماس بالایی افزایش می‌یابد و مقدار ماکزیمم دامنه لغزش در فاصله بیشتری از لبه تماس رخ می‌دهد. با افزایش زاویه ناحیه تماس از ۳۵ به ۶۵ درجه، اندازه ناحیه جدایش در ابتدای لبه تماس ۵ برابر می‌شود. همچنین با افزایش زاویه، مقادیر لغزش



نمودار ۵) الگوی توزیع فشار تماسی در دو طرف نمونه در حالت اول

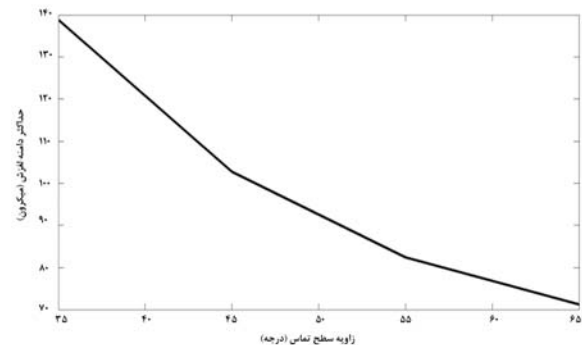
همان طور که در الگوی توزیع فشار تماسی نیز مشخص است، بیشترین مقدار فشار تماسی در لبه پایینی تماس رخ می‌دهد. با توجه به این موضوع و یکسان بودن لغزش در تمام ناحیه تماس، انتظار می‌رود که بیشترین آسیب تماسی نیز در همین ناحیه ایجاد شود. شکل ۸ تصویر SEM به دست آمده از سطح آسیب‌دیده پره به کار رفته در تحلیل را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، خرابی‌های سطح در لبه پایینی فصل مشترک ناحیه تماس بیشتر از لبه بالایی آن است. لازم به ذکر است که در ابتدای پره، به دلیل وجود میدان سه‌بعدی تنش و اثرات ناشی از لبه تماس، بخشی از خرابی‌ها در سطح بالایی نیز مشاهده می‌شود اما با نزدیک شدن به عمق پره که شرایط کرنش صفحه‌ای و دوبعدی بودن میدان تنش حاکم می‌شود، خرابی اصلی در پایین پره قابل مشاهده است.



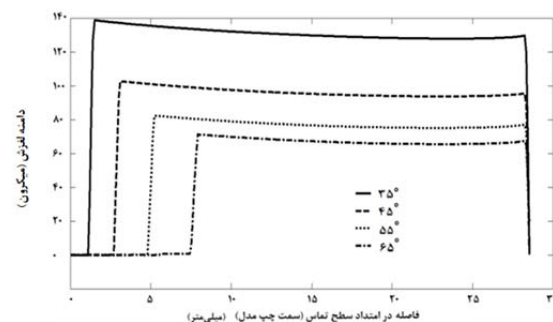
شکل ۸) خرابی‌های سطح پره در لبه بالایی و پایینی ناحیه تماس

یکی از موضوعات حائز اهمیت در تحلیل تنش‌های تماسی دو جسم، بررسی روند تغییر تنش‌های نرمال و برشی در عمق قطعه و عمود بر فصل مشترک تماس می‌باشد. به منظور بررسی این تنش‌ها، مسیری از گره‌های عمود بر سطح تماس با شروع از نقطه تمرکز تنش تماسی (لبه پایینی تماس در سمت چپ نمونه) تعریف شده و نمودار تغییرات تنش‌های نرمال در راستای X و Y و تغییرات تنش برشی در نمودار ۴ نشان داده شده‌اند. مطابق انتظار، حداکثر تنش‌های نرمال در سطح تماس و حداکثر تنش برشی در فاصله کمی پایین‌تر از سطح تماس رخ می‌دهد.

نسبی در فصل مشترک پره و دیسک کاهش پیدا می‌کند، در این مورد نیز افزایش زاویه از ۳۵ به ۶۵ درجه، مقادیر لغزش نسبی را حدود ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. همان طور که در نمودار مشاهده می‌شود، در هیچ یک از شرایط در سطح تماس پره و دیسک، ناحیه چسبندگی وجود ندارد.



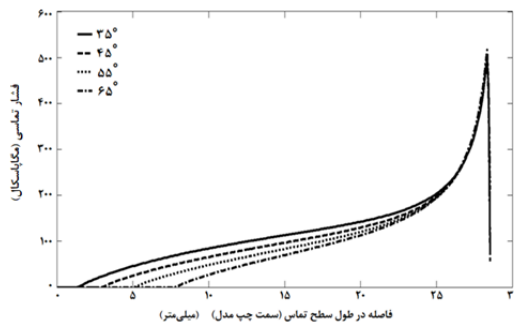
نمودار ۵) تغییر حداکثر دامنه لغزش برحسب تغییر زاویه ناحیه تماس



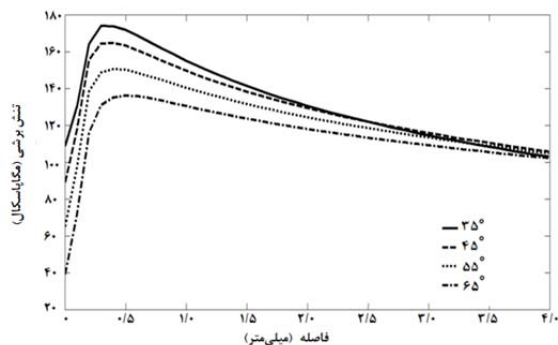
نمودار ۶) الگوی توزیع دامنه لغزشی در سمت چپ نمونه برای زوایای مختلف ناحیه تماس

نمودار ۷ نیز الگوی توزیع فشار تماسی در فصل مشترک پره و دیسک را برای زوایای مختلف ناحیه تماس در سمت چپ نمونه نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش زاویه، ناحیه دارای فشار تماسی صفر در نزدیکی لبه تماس بالایی، افزایش پیدا کرده و سطح تنش‌های تماسی در طول فصل مشترک پره و دیسک نیز به مقدار کمی کاهش می‌یابد. این روند کاهش در سطح تنش تماسی، با نزدیک شدن به لبه پایینی تماس، کندتر می‌شود. به طوری که در لبه تماس پایینی در همه زوایا، مقدار ماکزیمم تنش تماسی، حدوداً مشابه است. در سمت راست نمونه نیز روند مشابهی در همه زوایا مشاهده می‌شود. نکته دیگری که در این نمودار مشخص می‌شود آن است که با تغییر زاویه، سطح تنش‌های تماسی روی پره، تغییر قابل توجهی نمی‌کند. افزایش زاویه ناحیه تماس از ۳۵ به ۶۵ درجه، مقدار فشار تماسی را در لبه بالایی ۵ درصد و در لبه پایینی ۵۰ درصد کاهش می‌دهد.

در نمودار ۸، تغییر تنش برشی در عمق قطعه و عمود بر فصل مشترک تماس برای زوایای مختلف مشاهده می‌شود. همان طور که مشخص است، در همه زوایا، ماکزیمم تنش برشی با فاصله از سطح تماس و در عمق نمونه رخ داده و محل وقوع آن در همه زوایا تقریباً یکسان است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه، سطح تنش برشی در عمق نمونه کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه احتمال ایجاد ترک‌های زیر سطحی و جدا شدن لایه‌های سطحی ماده کمتر می‌شود. افزایش زاویه از ۳۵ به ۶۵ درجه، ماکزیمم تنش برشی در عمق نمونه را حدود ۲۲ درصد کاهش داده است.



نمودار ۷) الگوی توزیع فشار تماسی در سمت چپ نمونه برای زوایای مختلف ناحیه تماس



نمودار ۸) تغییرات تنش برشی در عمق ریشه پره در راستای عمود به فصل مشترک تماس برای زوایای مختلف ناحیه تماس

با توجه به نتایج، در محل تمرکز تنش یعنی در لبه پایینی تماس، مشاهده می‌شود که تغییر زاویه، تغییر زیادی در مقدار فشار تماسی ایجاد نمی‌کند و این پارامتر در هر ۴ زاویه با خطای قابل قبولی تقریباً ثابت است. این در حالی است که با تغییر زاویه، مقدار لغزش نسبی در هر مرحله به طور میانگین حدود ۱۹ درصد کاهش می‌یابد. با مراجعه به نقشه فرتینگ^[۴] می‌توان نتیجه گرفت که با ثابت ماندن تنش نرمال در سطح تماس و کاهش دامنه لغزش در اثر افزایش زاویه تماس، احتمال وقوع خستگی سایشی نسبت به وقوع فرسودگی سایشی در پره افزایش می‌یابد. همچنین در نزدیکی لبه‌های تماس بالایی در دو طرف نمونه با توجه به اینکه مقدار فشار تماسی بسیار کم بوده و ماکزیمم دامنه لغزش در این نقطه رخ می‌دهد، احتمال وقوع فرسودگی سایشی بیشتر از خستگی سایشی است. البته حکم کلی در رابطه با این موضوع که پره دچار چه شرایطی می‌شود، وابسته به نقشه شرایط وقوع فرتینگ برای ماده مورد نظر است.

۳-۲- بررسی اثر طول ناحیه تماس

پارامتر هندسی دیگری که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، طول ناحیه تماس می‌باشد. برای بررسی اثر طول ناحیه تماس بر دامنه لغزش ۴ طول تماسی مختلف ۲۴، ۲۸، ۳۲ و ۳۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نمودار ۹ نمودار تغییر ماکزیمم دامنه لغزش برحسب طول ناحیه تماس را به ازای بارگذاری ثابت نشان می‌دهد. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش طول ناحیه تماس، ماکزیمم دامنه لغزش کاهش پیدا می‌کند.

نمودار ۱۰ دامنه لغزش نسبی در فصل مشترک پره و دیسک را برای طول‌های مختلف ناحیه تماس در سمت چپ نمونه نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص می‌شود که با افزایش طول ناحیه تماس برخلاف تغییر زاویه، محدوده جدایش در ابتدای لبه تماس بالایی تغییر زیادی نمی‌کند. حداکثر اختلاف طول ناحیه جدایش به ازای

مشاهده می‌شود به طوری که ماکزیمم فشار ناحیه تماس بین حالت اولیه و نهایی حدود ۲۰ درصد کاهش پیدا می‌کند، این کاهش در نزدیکی لبه تماس بالایی حدود ۱۰ درصد است.

۳-۳- بررسی اثر ضریب اصطکاک

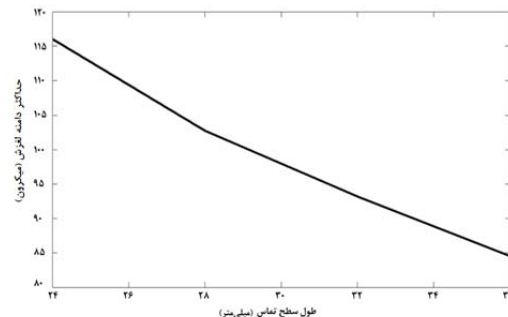
با وجود این که ضریب اصطکاک به‌طور مستقیم یک پارامتر هندسی نیست، ولی می‌توان آن را به‌عنوان نمادی از زبری سطح در نظر گرفت. وقتی پره در سیکل بارگذاری قرار می‌گیرد، به تدریج بر اثر سایش، زبری سطح بین پره و دیسک تغییر کرده و به عبارت دیگر ضریب اصطکاک عوض می‌شود. در بررسی اثر ضریب اصطکاک، ۴ ضریب اصطکاک صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۱ در محل تماس پره و دیسک در نظر گرفته شده است. نمودار ۱۲ تغییر ماکزیمم دامنه لغزش بر اثر تغییر ضریب اصطکاک در محل تماس پره و دیسک را نشان می‌دهد، همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب اصطکاک، مقدار ماکزیمم دامنه لغزش کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، وقتی پره در یک سیکل بارگذاری قرار می‌گیرد، در صورتی که با افزایش تعداد دفعات بارگذاری، ضریب اصطکاک در فصل مشترک پره و دیسک بیشتر شود، ماکزیمم دامنه لغزش در سطح تماس کاهش پیدا می‌کند.

در نمودار ۱۳ دامنه لغزش نسبی در فصل مشترک پره و دیسک برای ضرایب اصطکاک مختلف در سمت چپ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش ضریب اصطکاک، سطح لغزش نسبی در فصل مشترک پره و دیسک در سمت چپ نمونه کاهش پیدا می‌کند که این کاهش بین ضریب اصطکاک صفر تا یک حدود ۶۲ درصد می‌باشد. افزایش ضریب اصطکاک همچنین محدوده ناحیه جدایش در نزدیکی لبه تماس بالایی را بیشتر می‌کند. نکته قابل توجه آن است که در شرایطی که ضریب اصطکاک صفر باشد، در نزدیکی لبه تماس بالایی، محدوده جدایش دیده نمی‌شود، اما با افزایش ضریب اصطکاک، این محدوده ایجاد شده و به تدریج نسبت به ضریب اصطکاک ۰/۳، حدود ۳/۵ برابر بزرگتر می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش ضریب اصطکاک، ماکزیمم دامنه لغزش در فاصله بیشتری از لبه بالایی تماس اتفاق می‌افتد.

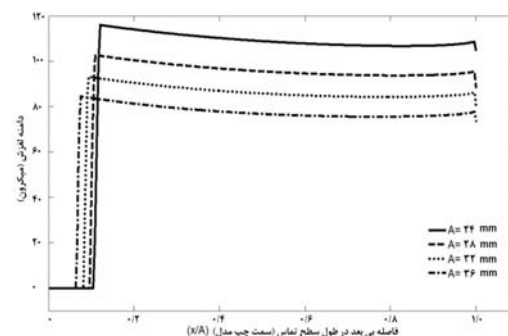
الگوی توزیع فشار تماسی در فصل مشترک پره و دیسک در سمت چپ برای ضرایب اصطکاک مختلف نیز در نمودار ۱۴ نشان داده شده است. نتایج تحلیل فشار تماسی نشان می‌دهد، که با افزایش ضریب اصطکاک سطح فشار تماسی در محل اتصال پره و دیسک در حدود ۷۵ درصد کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر با قرار گرفتن پره و دیسک در سیکل بارگذاری، در صورتی که ضریب اصطکاک افزایش یابد، به تدریج سطح فشار تماسی در طول ناحیه تماس کاهش یافته و ناحیه جدایش در نزدیکی لبه تماس بالایی بزرگتر می‌شود. برخلاف شرایطی که در تغییر زاویه تماس به وجود می‌آید، در شرایطی که ضریب اصطکاک تغییر می‌کند، مقادیر ماکزیمم فشار تماسی که عموماً در لبه پایینی تماس اتفاق می‌افتد، به مقدار محسوسی عوض می‌شود این تغییر بین ضریب اصطکاک صفر تا یک در حدود ۶۰ درصد می‌باشد.

در نزدیکی لبه‌های بالایی تماس که ماکزیمم دامنه لغزش رخ می‌دهد و مقدار تنش تماسی در آن نزدیک صفر است، با توجه به نقشه وقوع فرتینگ^[۱]، انتظار می‌رود که نمونه دچار فرسودگی سایشی شود. این در حالی است که در لبه‌های تماس پایینی، با توجه به این که ماکزیمم فشار تماسی ایجاد می‌شود، اگر بر اثر تغییر هر یک از این پارامترها، مقدار دامنه لغزش به میزان زیادی کاهش پیدا کند، انتظار می‌رود بعد از گذشت سیکل‌های بارگذاری، پدیده خستگی سایشی غالب‌تر باشد.

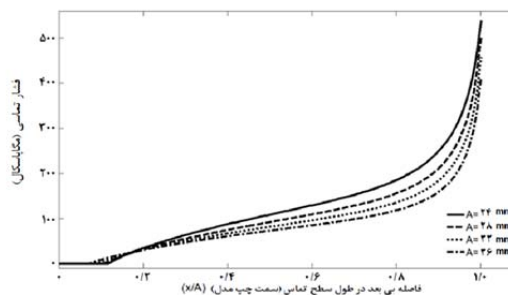
مقادیر مختلف طول ناحیه تماس کمتر از ۵۰ درصد است. به‌طور کلی با افزایش طول ناحیه تماس، سطح لغزش نسبی کاهش پیدا می‌کند و این کاهش بین حالت اولیه و نهایی حدود ۳۰ درصد است. همچنین متناظر با شرایطی که در بخش قبل ارائه شد، سطح لغزش‌های نسبی در سمت چپ نمونه در همه طول‌های تماسی، بیشتر از سمت راست نمونه است.



نمودار ۹) تغییر حداکثر دامنه لغزش بر حسب تغییر طول ناحیه تماس



نمودار ۱۰) الگوی توزیع دامنه لغزشی در سمت چپ نمونه برای طول‌های مختلف ناحیه تماس



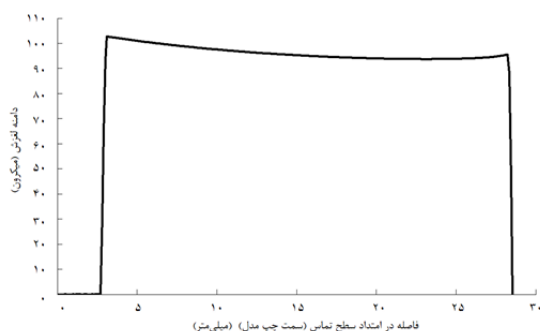
نمودار ۱۱) الگوی توزیع فشار تماسی در سمت چپ نمونه برای طول‌های مختلف ناحیه تماس

نمودار ۱۱ نیز الگوی توزیع فشار تماسی در فصل مشترک پره و دیسک را برای زوایای مختلف ناحیه تماس در سمت چپ نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، نتایج مشخص می‌کند که با افزایش طول ناحیه تماس، سطح فشار تماسی در دو سمت نمونه کاهش پیدا می‌کند ولی محدوده دارای فشار تماسی صفر، با تغییر طول ناحیه تماس، ثابت باقی می‌ماند. نکته قابل توجه آن است که کاهش دامنه لغزش در اثر افزایش طول ناحیه تماس، حدود ۲۰ درصد کمتر از حالت مشابه آن برای افزایش زاویه تماس است. همچنین برخلاف شرایط تغییر زاویه که مقادیر ماکزیمم فشار تماسی تقریباً ثابت باقی می‌ماند، در تغییر طول ناحیه تماس، کاهش مقدار ماکزیمم فشار تماسی با افزایش طول ناحیه تماس،

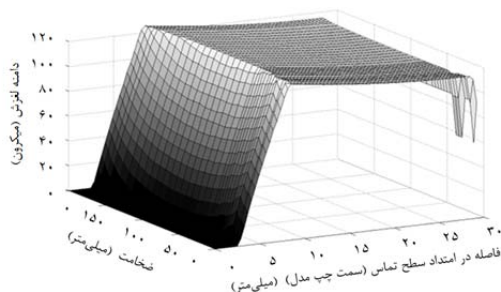
۴- اثر میدان سه‌بعدی

به‌منظور بررسی تفاوت حل سه‌بعدی و دوبعدی مسئله تماس پره با دیسک، در این بخش نتایج مربوط به تحلیل ریشه پره سه‌بعدی ارائه شده است. در هر قسمت، نتایج مدل دوبعدی مشابه نیز نشان داده می‌شود تا مقایسه اثر سه‌بعدی شدن میدان تنش، راحت‌تر صورت بگیرد.

نمودار ۱۵ و نمودار ۱۶ به‌ترتیب توزیع دامنه لغزش در سمت چپ نمونه را برای مدل دوبعدی و سه‌بعدی مشابه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این دو تصویر دیده می‌شود، مقادیر کلی دامنه لغزش در مدل دوبعدی و سه‌بعدی تقریباً مشابه هستند و حدود ۱۲ درصد مقدار ماکزیمم آن‌ها تفاوت وجود دارد. البته سطح دامنه لغزش در میدان سه‌بعدی اندکی بیشتر از میدان دوبعدی است. در مدل سه‌بعدی با حرکت در جهت ضخامت، ناحیه جدایش به مقدار اندکی شروع به افزایش کرده و سپس با عبور از خط میانی ضخامت، این ناحیه کاهش می‌یابد.



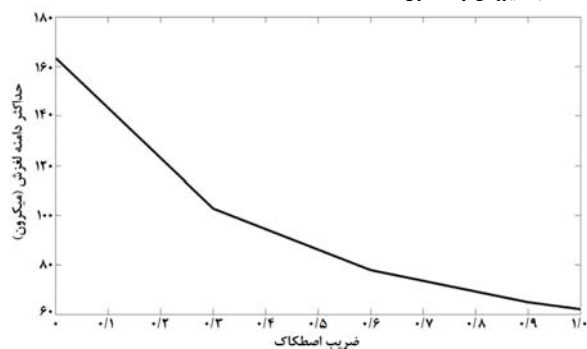
نمودار ۱۵) الگوی توزیع دامنه لغزشی در سمت چپ نمونه برای مدل دوبعدی



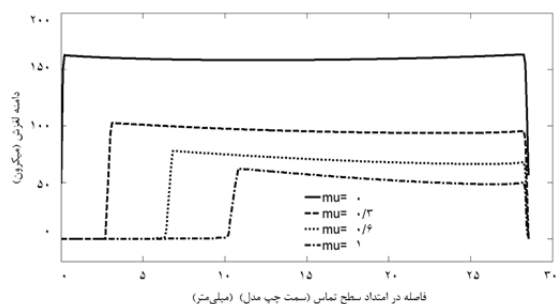
نمودار ۱۶) الگوی توزیع دامنه لغزشی در سمت چپ نمونه برای مدل سه‌بعدی

نمودار ۱۷ و نمودار ۱۸ نیز به‌ترتیب، توزیع فشار تماسی در سمت چپ نمونه را برای مدل دوبعدی و سه‌بعدی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، سطح مقادیر فشار تماسی همانند لغزش نسبی در مدل سه‌بعدی و دوبعدی تفاوت زیادی ندارد و تفاوت مقدار ماکزیمم فشار تماسی در دو مدل سه‌بعدی و دوبعدی حدود ۱۰ درصد است. با حرکت به سمت عمق قطعه در مدل سه‌بعدی، مقادیر فشار تماسی ابتدا اندکی افزایش یافته سپس به یک منحنی ثابت همگرا می‌شود.

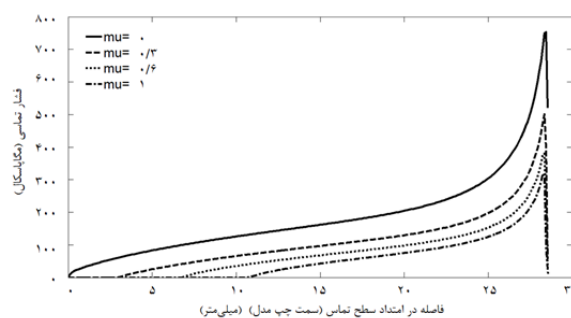
به‌طور کلی در صورتی که در پره زاویه پیچش وجود نداشته باشد، تحلیل دوبعدی نتایج مشابهی را به‌دست می‌دهد و برای صرفه‌جویی در وقت و هزینه محاسباتی می‌توان از تحلیل دوبعدی استفاده کرد^[17]، با این تفاوت که در مدل دوبعدی اثر لبه‌های آزاد دیده نمی‌شود.



نمودار ۱۲) تغییر حداکثر دامنه لغزش برحسب تغییر ضریب اصطکاک



نمودار ۱۳) الگوی توزیع دامنه لغزشی در سمت چپ نمونه برای ضرایب اصطکاک مختلف



نمودار ۱۴) الگوی توزیع فشار تماسی در سمت چپ نمونه برای ضرایب اصطکاک مختلف

به‌طور کلی وجود ناحیه جدایش در سطح تماس، پدیده مناسبی نیست. چراکه وجود این پدیده می‌تواند موجب عدم برقراری فرض تماس در تحلیل‌هایی که مبتنی بر این فرض هستند، شود. همان‌طور که ذکر شد، افزایش هر سه پارامتر زاویه ناحیه تماس، طول ناحیه تماس و ضریب اصطکاک باعث کاهش دامنه لغزش در ناحیه تماس می‌شود، اما از آنجا که با تغییر طول ناحیه تماس، محدوده جدایش تغییری نمی‌کند، به‌نظر می‌رسد در شرایطی که نیاز به کاهش دامنه لغزش است، بهتر است از تغییر طول ناحیه تماس استفاده شود. نکته دیگری که در تحلیل نتایج باید توجه کرد، آن است که تشخیص مود خرابی پره می‌تواند در جلوگیری از آسیب آن کمک کند. در نتیجه در صورت دسترسی به نقشه شرایط وقوع فرتینگ برای ماده مورد نظر و در دست داشتن مقادیر دامنه لغزش و فشار تماسی می‌توان تا حدودی مود خرابی پره و دیسک را پیش‌بینی کرده و برای جلوگیری از وقوع آن، اقدامات لازم را انجام داد.

ناحیه تماس و مقادیر لغزش نسبی، با توجه به نقشه فرتینگ، احتمال وقوع خستگی سایشی و ایجاد ترک در سطح نمونه بیشتر می‌شود. افزایش طول ناحیه تماس نیز باعث کاهش مقادیر دامنه لغزش در حدود ۲۷ درصد می‌شود. البته این افزایش طول در محل وقوع ماکزیمم دامنه لغزش تغییری ایجاد نکرده و طول ناحیه جدایش پره و دیسک را عوض نمی‌کند. به‌علاوه افزایش این پارامتر، مقادیر فشار تماسی را با نرخ ثابتی در طول ناحیه تماس در حدود ۱۸ درصد کاهش می‌دهد. در نهایت افزایش ضریب اصطکاک نیز مقادیر دامنه لغزش را در حدود ۶۲ درصد و فشار تماسی را در حدود ۷۳ درصد در طول ناحیه تماس کاهش می‌دهد. افزایش زیاد ضریب اصطکاک، باعث کاهش بیش از حد مقادیر لغزش نسبی در طول ناحیه تماس شده و در نواحی‌ای که فشار تماسی زیاد است، احتمال وقوع خستگی سایشی را افزایش می‌دهد.

در بخش پایانی این پژوهش، با ارائه نتایج مدل سه‌بعدی مسئله تماس پره با دیسک، نشان داده شد که روند توزیع تنش تماسی و لغزش بین دیسک و پره، در مدل سه‌بعدی و دوبعدی مشابه است. اما مقادیر ماکزیمم ممکن است تا ۱۲ درصد متفاوت باشد. همچنین لبه‌های آزاد پره در حالت سه‌بعدی، تنش‌های کمتری را نسبت به عمق قطعه تحمل می‌کنند.

تشکر و قدردانی: گروه نویسندگان بر عهده خود می‌داند که از شرکت مپنا بابت همکاری در پیشرفت پژوهش تشکر و قدردانی کنند.

تأییدیه اخلاقی: نتایج مقاله حاصل پژوهش نویسندگان بوده و تاکنون در نشریه یا مجموعه مقالات کنفرانسی دیگری چاپ نشده است.

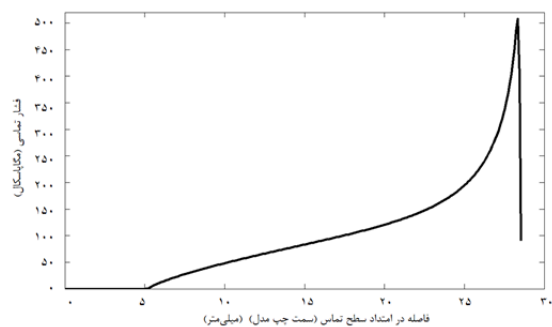
تعارض منافع: در این مقاله تعارض منافی با هیچ شخصیت حقوقی و حقیقی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

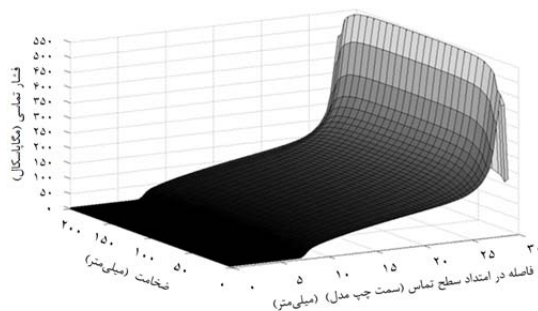
منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

- 1- Hattori T, Kien VT, Yamashita M. Fretting fatigue life estimations based on fretting mechanisms. Tribology International. 2011;44(11):1389-1393.
- 2- Kermanpur A, Sepehri Amin H, Ziaei-Rad S, Nourbakhshnia N, Mosaddeghfar M. Failure analysis of Ti6Al4V gas turbine compressor blades. Engineering Failure Analysis. 2008;15(8):1052-1064.
- 3- Shi L, Wei DS, Wang YR, Tian AM, Li D. An investigation of fretting fatigue in a circular arc dovetail assembly. International Journal of Fatigue. 2016;82(Pt 2):226-237.
- 4- ASTM International. ASTM E2789-10(2015) standard guide for fretting fatigue testing [Internet]. West Conshohocken: ASTM International; 2015 [Unknown cited]. Available from: <https://www.astm.org/Standards/E2789.htm>.
- 5- Hills DA, Nowell D. Mechanics of fretting fatigue. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1994. pp. 9-122.
- 6- Rajasekaran R, Nowell D. Fretting fatigue in dovetail blade roots: Experiment and analysis. Tribology International. 2006;39(10):1277-1285.
- 7- Kanth PS. 2D & 3D FE analysis of fir-tree joints in aeroengine discs [Dissertation]. Toronto: University of Toronto; 1998.
- 8- Ruiz C, Boddington PHB, Chen KC. An investigation of fatigue and fretting in a dovetail joint. Experimental Mechanics. 1984;24(3):208-217.



نمودار ۱۷) الگوی توزیع فشار تماسی در سمت چپ نمونه برای مدل دوبعدی



نمودار ۱۸) الگوی توزیع فشار تماسی در سمت چپ نمونه برای مدل سه‌بعدی

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پره‌های توربین به دلیل شکل ویژه اتصال به دیسک و شرایط بارگذاری یکی از آسیب‌پذیرترین اجزای موتورهای توربینی هستند و هزینه‌های بالایی برای تست و اصلاح طراحی آن‌ها صرف می‌شود. با پیشرفت ابزارهای تحلیلی این امکان وجود دارد که با مدل‌سازی دقیق و تحلیل کامل نواحی خاص، هزینه‌های مربوط به تست را تا حد امکان کاهش داد. در این مقاله به بررسی اثر تغییر پارامترهای هندسی شامل طول ناحیه تماس، زاویه ناحیه تماس و ضریب اصطکاک بر دامنه لغزش و فشار تماسی در ریشه پره توربین به روش المان محدود پرداخته شده است.

نتایج حاصل از تحلیل پره نشان داد که با حرکت از لبه بالایی تماس به سمت لبه پایینی، مقدار فشار تماسی به تدریج افزایش می‌یابد و ماکزیمم فشار تماسی در نزدیکی لبه پایینی تماس اتفاق می‌افتد. به این ترتیب در نزدیکی لبه تماس بالایی با توجه به این که مقدار فشار تماسی بسیار نزدیک به صفر بوده و ماکزیمم دامنه لغزش در این محل اتفاق می‌افتد، احتمال رخ دادن فرسودگی سایشی بیشتر از خستگی سایشی است. از طرف دیگر با حرکت از لبه بالایی تماس به سمت لبه پایینی با توجه به این نکته که مقدار لغزش نسبی تقریباً ثابت باقی مانده و فشار تماسی افزایش می‌یابد، احتمال وقوع خستگی سایشی و ایجاد ترک در این ناحیه بیشتر است. این پیش‌بینی با نتایج حاصل از مطالعه SEM سطح تماس نیز به‌طور کامل مطابقت دارد.

افزایش زاویه ناحیه تماس، باعث کاهش مقادیر فشار تماسی می‌شود. البته نرخ کاهش مقدار فشار تماسی، با حرکت به سمت لبه پایینی تماس کندتر می‌شود به‌طوری که بین زاویه ۳۵ تا ۵۸ درجه، کاهش فشار تماسی در نزدیکی لبه بالایی حدود ۶۷ درصد و در نزدیکی لبه پایینی حدود ۴ درصد می‌باشد. در نتیجه در لبه پایینی تماس، در زوایای مختلف، تقریباً ماکزیمم فشار تماسی ثابت است. از طرفی با توجه به این که فشار تماسی ماکزیمم در همه زوایای ناحیه تماس تقریباً یکسان است، با کاهش زاویه

Engineering Materials & Structures. 2005;28(12):1169-1175.

14- Golden PJ, Calcaterra JR. A fracture mechanics life prediction methodology applied to dovetail fretting. Tribology International. 2006;39(10):1172-1180.

15- Poursaeidi E, Salavatian M. Fatigue crack growth simulation in a generator fan blade. Engineering Failure Analysis. 2009;16(3):888-898.

16- Hahn Y, Cofer JI. Design study of dovetail geometries of turbine blades using abaqus and isight. ASME Proceedings Structures and Dynamics Parts A and B. 2012;7:11-20.

17- Anandavel K, Prakash RV. Effect of three-dimensional loading on macroscopic fretting aspects of an aero-engine blade-disc dovetail interface. Tribology International. 2011;44(11):1544-1555.

9- Ruiz C, Nowell D. Designing against fretting fatigue in aeroengines. European Structural Integrity Society. 2000;26:73-95.

10- Papanikos P, Meguid SA, Stjepanovic Z. Three-dimensional nonlinear finite element analysis of dovetail joints in aeroengine discs. Finite Elements in Analysis and Design. 1998;29(3-4):173-186.

11- Conner BP, Nicholas T. Using a dovetail fixture to study fretting fatigue and fretting palliatives. Journal of Engineering Materials and Technology. 2003;128(2):133-141.

12- Golden PJ. Development of a dovetail fretting fatigue fixture for turbine engine materials. International Journal of Fatigue. 2009;31(4):620-628.

13- Golden PJ, Nicholas T. The effect of angle on dovetail fretting experiments in Ti-6Al-4V. Fatigue & Fracture of