

بررسی تاثیر فیلت در مقاومت خستگی سایشی در انطباق محور و تویی با استفاده از معیارهای مختلف خستگی چند محوره و پارامتر دوم خستگی سایشی

محمد زهساز* و پویا شهریاری
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۴/۲۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۱۱/۲۰)

چکیده - در مقاله حاضر تاثیر ایجاد فیلت بر روی محور در مقاومت خستگی سایشی آن با استفاده از معیارهای مختلف خستگی چند محوره و پارامترهای خستگی سایشی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. روش المان محدود به منظور به دست آوردن تنش‌ها و کرنش‌ها در محور به کار گرفته شده و نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج موجود در ادبیات فن مقایسه می‌گردد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که مقاومت خستگی سایشی محور و محل شکست آن به نسبت قطر و شعاع فیلت بستگی دارد. معیارهای مختلف خستگی چند محوره تا حدود زیادی در تخمین مقاومت خستگی محور موفق عمل می‌نمایند. با این حال نتایج حاصل از بررسی پارامتر دوم خستگی سایشی تطابق بهتری با نتایج حاصل از تست‌های تجربی داشته و می‌تواند به عنوان معیاری مناسب جهت بررسی مقاومت خستگی سایشی محور مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: خستگی سایشی، محور و تویی، فیلت محور، خستگی چند محوره.

Studying the Effect of Fillet on Fretting Fatigue Strength in the Press-Fitted Axle Assembly using Different Multiaxial Fatigue Criteria and Fretting Fatigue Damage Parameter

M. Zehsaz* and P. Shahriary
Department Mechanical Engineering, Tabriz University

Abstract: *The present paper studies the effect of creating a fillet on fretting fatigue strength of an axle, using different multiaxial fatigue criteria and fretting fatigue damage parameter. Finite element method is applied to obtain stress and strain in the axle and the results obtained from modeling are compared with the experimental test data available in literature. The results show that fretting fatigue strength of the axle and fracture area depends on the ratio of diameter to fillet radius. Multiaxial fatigue criteria is almost capable of estimating the fatigue strength of the axle. However; the results obtained from investigating fretting fatigue damage parameter are almost in accordance with the results of experimental data and consequently fretting fatigue damage parameter can be appropriately used as a criterion for estimating fretting fatigue strength of the axles.*

Keywords: *Fretting fatigue, axle and hub, fillet axle, multiaxial fatigue.*

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: zehsaz@tabrizu.ac.ir

فهرست علائم

$\Delta\varepsilon$	دامنه کرنش	b	توان استحکام خستگی محوری
$\Delta\varepsilon_n$	بازه کرنش عمودی روی صفحه بحرانی	b.	توان استحکام خستگی برشی
$\Delta\varepsilon_{n\max}$	دامنه بیشترین کرنش عمودی روی صفحه بحرانی	c	توان شکل پذیری خستگی محوری
$\Delta\sigma_n$	بازه تنش عمودی روی صفحه بحرانی	c.	توان شکل پذیری خستگی برشی
$\Delta\tau$	بازه تنش برشی	E	مدول الاستیسیته
$\Delta\tau_{\max}$	بازه تنش برشی بیشینه	F_1	پارامتر خستگی سایشی اول
ε	کرنش	F_2	پارامتر خستگی سایشی دوم
ε'_f	ضریب شکل پذیری خستگی	G	مدول برشی
μ	ضریب اصطکاک	N_f	عمر خستگی
ν	ضریب پواسون	p	فشار تماس
σ	تنش	علائم یونانی	
σ'_f	ضریب استحکام خستگی	γ'_f	ثابت شکل پذیری خستگی برشی
$\sigma_{n\max}$	تنش محوری بیشینه روی صفحه بحرانی	δ	سطح دو نسبی بین حرکت دامنه
τ'_f	ضریب استحکام خستگی برشی	$\Delta\gamma$	بازه کرنش برشی
		$\Delta\gamma_{\max}$	مقدار بیشینه تغییرات کرنش برشی

۱- مقدمه

فشار انطباق، شکل و هندسه انطباق و تنش‌های پسماند اشاره کرد.

نیشوکا و همکاران روش‌های مختلف افزایش مقاومت خستگی انطباق چرخ و محور را بررسی نمودند [۴]. در سال‌های اخیر با توجه به نتایج به دست آمده [۵ و ۶] مبنی بر اینکه ترک‌های ناشی از خستگی سایشی در مراحل اولیه عمر بارگذاری ایجاد می‌شوند، روش‌های تحلیلی مبتنی بر مکانیک شکست برای ارزیابی مقاومت خستگی محوره‌های انطباق فشاری ارائه شدند [۷]. این در حالی است که هیلز و همکاران، و همچنین زولوینسکی و همکاران در مطالعات جداگانه‌ای به این نتیجه رسیدند که بیشتر عمر ماده صرف ایجاد ترک‌های ناشی از خستگی سایشی می‌شود [۸ و ۹].

کوبوتا و همکاران به توضیح و بررسی تاثیر تنش‌های پایین‌تر از حد دوام در رفتار شروع ترک ناشی از خستگی سایشی در محوره‌های انطباق فشاری پرداخت و مشاهده کرد که

در محوره‌های انطباق فشاری همانند محوره‌های قطار، با توجه به ماهیت تناوبی تنش‌ها و ایجاد لغزش نسبی بین چرخ و محور، امکان وقوع خستگی سایشی وجود دارد. شکل (۱) نمونه‌ای از شکست محور قطار در نتیجه خستگی سایشی را نشان می‌دهد [۱]. زمانی که خستگی سایشی در محور انطباق فشاری ایجاد شود، مقاومت خستگی محور به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۲]. با توجه به اینکه شکست ناشی از خستگی سایش به‌طور ناگهانی اتفاق می‌افتد و با در نظر داشتن اینکه امکان تشخیص ایجاد ترک و رشد آن در اثر پدیده خستگی سایشی به‌علت مخفی بودن ترک‌ها در زیر سطح تماس دشوار است، لذا انجام مطالعات در این زمینه بسیار ضروری به نظر می‌رسد. برای روشن کردن خصوصیات خستگی سایشی در محوره‌های قطار، هولگر با انجام آزمایش‌های مختلف بر روی محورها عوامل مختلفی که بر روی مقاومت خستگی محوره‌های انطباق فشاری تاثیر دارند، را ارائه نمود [۳]. از جمله این عوامل می‌توان به

سایش بررسی نمودند [۱۴]. پنگ و همکاران نیز محل شروع ترک ناشی از خستگی سایشی را در محورهای قطار به‌روش عددی محاسبه کرده و به مقایسه آن با نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی پرداختند [۱۵]. سونگ به بررسی آسیب ناشی از خستگی سایشی در محور قطار پرداخته و نشان داد در سرعت‌های بالاتر میزان این آسیب بیشتر است [۱۶].

با این حال مسائل مربوط به خستگی سایشی در محورهای پرس شده به‌طور کامل حل نشده است و مطالعه بر روی مکانیزم خستگی سایشی در این محورها برای بهبود مقاوت خستگی ضروری است. یکی از روش‌های بهبود مقاوت خستگی سایشی ایجاد فیلت بر روی محور تحت خمش است که می‌تواند با تغییر در تنش‌های سطح تماس و ایجاد تمرکز تنش بر روی محور ناحیه شکست قطعه را تغییر داده و مقاوت خستگی را تحت تاثیر قرار دهد. لذا در مقاله حاضر به بررسی عددی تاثیر ایجاد فیلت بر روی محور در مقاوت خستگی سایشی آن پرداخته شده و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی موجود در ادبیات فن مقایسه می‌گردند.

۲- معیارهای محاسبه استحکام خستگی سایشی

در این بخش به معرفی برخی از معیارهای به‌کار رفته برای محاسبه استحکام خستگی سایشی پرداخته می‌شود. با توجه به این که انطباق چرخ و توپی در بسیاری از قسمت‌ها تحت بارگذاری چند محوری است می‌توان برای بررسی استحکام خستگی سایشی در این نوع انطباق از معیارهای مربوط به خستگی چند محوره استفاده نمود. معیارهایی که برای خستگی چند محوری ارائه شده‌اند سعی دارند تا بارگذاری چند محوری را با بارگذاری تک محوره معادل‌سازی کنند. این معیارها توانایی تخمین محل و عمر شروع ترک خستگی را دارا هستند. معمولاً معیارهای خستگی چند محوره در چهار گروه شامل: معیارهای مبتنی بر تنش، کرنش، انرژی و مکانیک



شکل ۱- نمونه‌ای از شکست محور قطار در نتیجه خستگی سایشی [۱]

ترک‌های ناشی از خستگی سایشی، در بارهایی کمتر از حد دوام خستگی سایشی نیز ایجاد شدند [۱۰]. در تحقیقی دیگر مادیا و همکاران به بررسی اثرات تنش‌های خمشی نوسانی و قطعات نصب شده روی محور بر عوامل شدت تنش و رشد ترک بر روی محور پرداخت. [۱۱] در نتیجه این تحقیق مشخص گردید که اثرات تنش‌های خمشی نوسانی بیشتر در ناحیه قطعات نصب شده تحت فشار روی محور، بحرانی و خطرناک است. بعدها در سال ۲۰۰۹ میلادی، لانو و همکاران به آنالیز المان محدود و روش مدل‌سازی سطوح تماسی در انطباقات تداخلی برای محاسبه مقاوت خستگی سایشی پرداختند و از الگوریتم‌های مختلف موجود برای سطح تماس جهت انجام محاسبات دقیق‌تر با همگرایی نتایج خوب استفاده کردند [۱۲]. آلفردسون میلادی طی مقاله‌ای به انجام آزمایش‌ها و مدل‌سازی خستگی سایشی در یک پین جازنی شده به‌روش انطباقی^۱ پرداخت و مشاهده نمود که پارامتر دوم خستگی سایشی و معیار خستگی چند محوره فیندلی، خستگی در پین را با وجود کمتر بودن دامنه تنش از حد دوام خستگی پیش‌بینی نمودند [۱۳].

ژنگ و همکاران به بررسی رفتار سایشی فولاد محور پرداخته و نوع واماندگی سایشی را در رژیم‌های مختلف

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} = \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} \right)_{\theta_1} - \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} \right)_{\theta_2} \quad (2)$$

$$\Delta\varepsilon_n = \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \right)_{\theta_1} - \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \right)_{\theta_2} \quad (3)$$

در این روابط ε_1 و ε_3 به ترتیب کرنش‌های اصلی کمینه و بیشینه بوده و θ_1 و θ_2 نشان‌دهنده حدود بارگذاری سیکلیک هستند [۱۹].

۲-۲- معیار فاطمی، سوشی^۳

پارامتر شکست برشی مشابه پارامتر کندیل براون، میلر توسط فاطمی و سوشی معرفی شده است [۲۰]. در این پارامتر بیشینه تنش نرمال بر روی صفحه بحرانی به جای کرنش نرمال در معیار کندیل براون، میلر به کار گرفته می‌شود. در نتیجه تأثیرات سخت شونده و تنش متوسط از طریق تنش نرمال در رابطه در نظر گرفته می‌شوند.

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} \left(1 + K \frac{\sigma_{n \max}}{\sigma_y} \right) = \frac{\tau'_f}{G} (\gamma N_f)^b + \gamma'_f (\gamma N_f)^c \quad (4)$$

در این رابطه $\Delta\gamma_{\max}$ بازه تغییرات کرنش برشی بیشینه است که توسط رابطه (۳) محاسبه می‌شود و $\sigma_{n \max}$ مقدار بیشینه تنش عمودی موجود در صفحه بحرانی، K ضریبی تجربی وابسته به ماده و σ_y مقدار تنش تسلیم ماده مورد نظر است. همچنین G مدول برشی، τ'_f ثابت استحکام خستگی برشی، γ'_f ثابت شکل‌پذیری خستگی برشی، b و c به ترتیب توان‌های استحکام خستگی برشی و شکل‌پذیری خستگی برشی هستند.

۲-۳- معیار اسمیت، واتسون تاپر

اسمیت، واتسون و تاپر [۲۱] پارامتر تجربی تخریبی را معرفی کرده‌اند که برپایه حاصل‌ضرب بیشترین تنش عمودی در صفحه بحرانی و دامنه بیشترین کرنش عمودی روی صفحه بحرانی هستند. آنها به کمک این پارامتر، معیار اسمیت، واتسون تاپر را پیشنهاد کرده‌اند. در این مقاله مقدار حاصل‌ضرب بیشترین تنش عمودی و دامنه بیشترین کرنش عمودی روی

شکست تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به گستردگی این معیارها، در این مقاله از معیارهای مبتنی بر کرنش و انرژی استفاده شده است. علاوه بر معیارهای مربوط به خستگی چند محوره می‌توان از معیارهای مخصوص خستگی سایشی به منظور تعیین استحکام خستگی سایشی استفاده نمود. در ادامه به معرفی معیارهای مورد استفاده در این مطالعه پرداخته می‌شود.

۲-۱- معیار کندیل براون، میلر

براون و میلر [۱۷] روشی را ارائه کردند که بر اساس ماهیت فیزیکی رشد ترک استوار بود. سپس آن دو به همراه کندیل [۱۸] معیاری را که به معیار کندیل براون، میلر معروف است ارائه کردند. این معیار بر پایه مقدار بیشینه تغییرات کرنش برشی در ترکیب با تغییرات کرنش محوری در صفحه‌ای است که مقدار بیشینه تغییرات کرنش برشی در آن اتفاق می‌افتد:

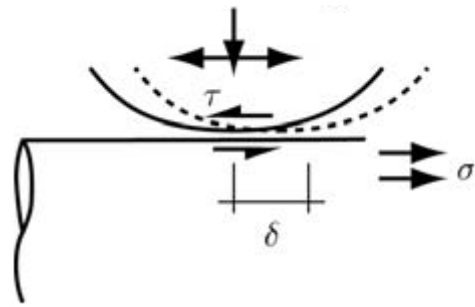
$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + S\Delta\varepsilon_n = \frac{\sigma'_f}{E} (\gamma N_f)^b + \varepsilon'_f (\gamma N_f)^c \quad (1)$$

در این رابطه $\Delta\gamma_{\max}$ بازه تغییرات کرنش برشی بیشینه و S ضریبی است که وابسته به جنس قطعه است که در عمرها نزدیک به حد دوام این ضریب برای مواد نرم 0.3 در نظر گرفته می‌شود. همچنین $\Delta\varepsilon_n$ دامنه بیشترین کرنش عمودی در صفحه‌ای است که $\Delta\gamma_{\max}$ در آن صفحه اتفاق می‌افتد. مقادیر $\Delta\gamma_{\max}$ و $\Delta\varepsilon_n$ توسط روابط (۲) و (۳) به دست می‌آیند. مقدار این پارامترها در تمامی گره‌های موجود در مناطق بحرانی احتمالی محور محاسبه شده و مکان مربوط به مقدار بیشینه قسمت اول معادله به عنوان نقطه بحرانی محور از نظر مقاومت خستگی در نظر گرفته می‌شود. در این معیار طرف دوم معادله نیز همان معادله مانسون-کافین^۲ است که برای تخمین عمر خستگی به کار می‌رود که در معادله مانسون-کافین σ'_f و ε'_f و c و b ثوابت خستگی ماده بوده و E مدول الاستیسیته است.

$$\Delta\tau_{\max} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_r}{2} \right)_{\theta_1} - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_r}{2} \right)_{\theta_r} \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_n = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_r}{2} \right)_{\theta_1} - \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_r}{2} \right)_{\theta_r} \quad (8)$$

در این روابط σ_1 و σ_r به ترتیب تنش‌های اصلی کمینه و بیشینه بوده و θ_1 و θ_r نشان‌دهنده حدود بارگذاری سیکلیک هستند [۱۹].



شکل ۲- عوامل موثر در پارامترهای خستگی سایشی

۲-۵- پارامترهای خستگی سایشی

یکی از معتبرترین روابط پیشنهادی برای محاسبه استحکام خستگی سایشی ماده توسط رویز و همکاران ارائه شد [۲۳] و [۲۴]. آنها برای تعیین استحکام خستگی سایشی ماده، دو پارامتر زیر را معرفی نمودند:

$$F_1 = \tau \cdot \delta = \mu \cdot p \cdot \delta \quad (9)$$

$$F_2 = \sigma \cdot \tau \cdot \delta \quad (10)$$

در این روابط τ بیشترین تنش برشی در محل تماس در حین یک سیکل بارگذاری، δ دامنه حرکت نسبی بین دو سطح و σ تنش عمودی موازی با سطح تماس است. شکل (۲) هر یک از عوامل موثر در پارامترهای خستگی سایشی را نشان می‌دهد. پارامتر اول به نام پارامتر خستگی سایشی اول معروف است که نشان‌دهنده کار انجام شده توسط نیروی اصطکاک در واحد سطح است. آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهند در مواقعی که پارامتر F_1 بیشترین مقدار را داشته باشد، بیشترین میزان عمق سایش مشاهده می‌شود همچنین تست‌های تجربی نشان می‌دهند که در بعضی از سطوح تماس فشار بسیار زیاد است تا حدی که باعث چسبیدن دو قطعه بهم می‌شود و در این نواحی با وجود بالا بودن تنش‌های تماسی خستگی مالشی اتفاق نمی‌افتد. این مشاهدات تجربی توسط پارامتر خستگی F_1 قابل توجیه هستند. در این مناطق به دلیل چسبیدن دو قطعه اندازه حرکت نسبی (δ) صفر است و همین باعث صفر شدن اندازه F_1 می‌شود. پارامتر دوم که به نام پارامتر خستگی سایشی دوم معروف است، برای در نظر گرفتن تنش‌های صفحه‌ای در

صفحه بحرانی در گره‌های مختلف موجود در مجاورت مکان‌های بحرانی محور محاسبه شده و گره مربوط به مقدار بیشینه حاصل ضرب به عنوان محل بحرانی محور انتخاب شده است:

$$\frac{\sigma_{n \max} \Delta \varepsilon_{n \max}}{2} = \varepsilon_f' \sigma_f' (\gamma N_f)^{c+b} + \frac{\sigma_f'^2}{E} (\gamma N_f)^{2b} \quad (5)$$

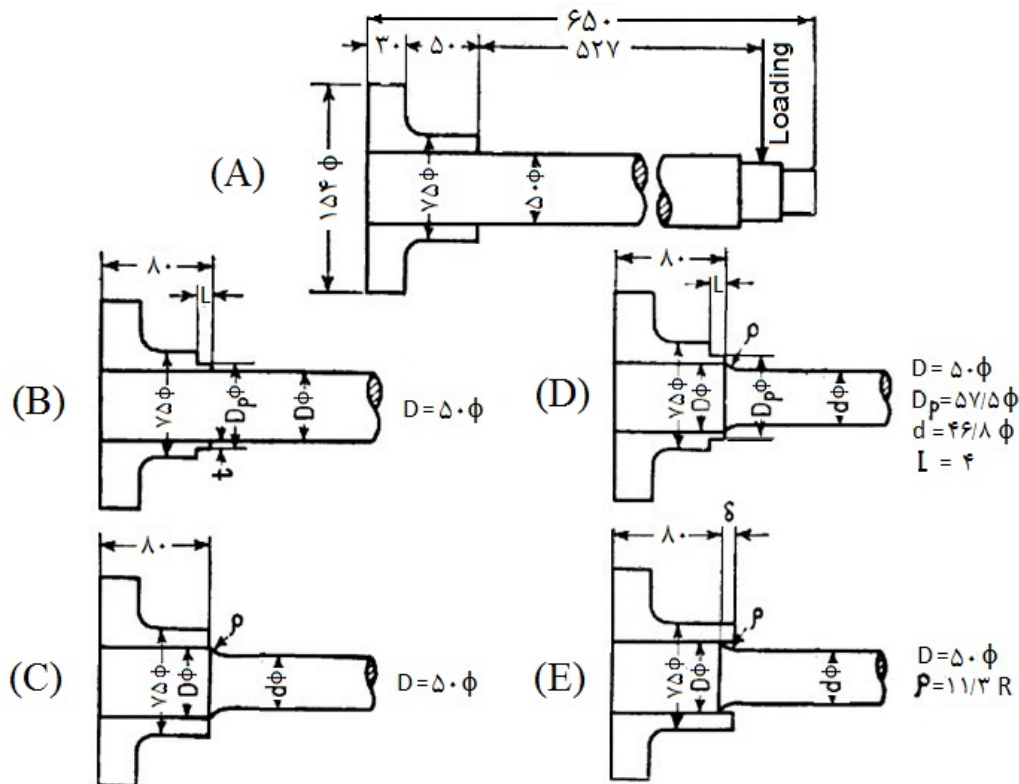
در این رابطه $\sigma_{n \max}$ مقدار بیشینه تنش عمودی موجود در صفحه بحرانی و $\Delta \varepsilon_{n \max}$ دامنه بیشترین کرنش عمودی روی صفحه بحرانی هستند.

۲-۴- معیار گلینکا^۴

گلینکا و همکاران [۲۲] با استفاده از مجموع چگالی انرژی الاستیک و پلاستیک در صفحه بحرانی پارامتر خستگی دیگری را در نظر گرفته و معیار زیر را ارائه کرده‌اند:

$$\frac{\Delta \gamma}{2} \cdot \frac{\Delta \tau}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_n}{2} \cdot \frac{\Delta \sigma_n}{2} = \frac{\sigma_f'^2}{2E} (\gamma N_f)^{2b} + \frac{E \varepsilon_f'}{2} (\gamma N_f)^{b+c} \quad (6)$$

در این رابطه $\Delta \tau$ ، $\Delta \varepsilon_n$ و $\Delta \sigma_n$ به ترتیب بازه کرنش برشی، بازه تنش برشی، بازه کرنش عمودی و بازه تنش عمودی هستند. مقدار هر یک از این پارامترها در گره‌های مجاور نقاط بحرانی محور توسط روابط (۲)، (۳)، (۷) و (۸) از روی تنش‌ها و کرنش‌های اصلی به دست آمده توسط روش المان محدود محاسبه شده‌اند. بیشترین مقدار سمت چپ رابطه (۶) به عنوان گره بحرانی محور در نظر گرفته شده است:



شکل ۳- چهار گروه نمونه ساخته شده توسط نیشیوکا و حالت اولیه انطباق [۴]

باز شدن ترک‌های عمود بر سطح تماس، توسط رویز و همکارانش ارائه شده است. انجام تست‌های تجربی نشان داده‌اند که ترک‌های ناشی از خستگی سایشی در محلی اتفاق می‌افتند که اندازه پارامتر F_2 بیشترین مقدار را داشته باشد و اندازه این پارامتر با عمر خستگی سایشی نسبت معکوس دارد که می‌تواند به‌عنوان کمیت کنترل‌کننده عمر خستگی سایشی به‌کار برده شود [۲۵ و ۲۶].

نسبت به حالت اولیه انطباق داشتند. گروه (A) که همان نمونه ساده از انطباق محور و توپی بدون تغییر در محور و یا توپی است. گروه (B) نمونه‌هایی هستند که برآمدگی بر روی توپی ایجاد شده است. در گروه (C) بر روی محور فیلت ایجاد شده است. در گروه (D) علاوه بر فیلت از برآمدگی بر روی محور استفاده شده است و در گروه (E) علاوه بر وجود فیلت مقداری از توپی بر روی محور معلق شده است. شکل (۳) پنج گروه از نمونه‌ها و حالت اولیه انطباق را نشان می‌دهد. با توجه به هدف مقاله در بررسی اثر فیلت بر روی مقاومت خستگی محور، تنها نمونه‌های گروه (A) و (C) جهت مدلسازی عددی به‌کار گرفته می‌شوند. ابعاد هندسی این نمونه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. جنس محور و توپی از آلیاژ فولاد SF55 است که مشخصات مکانیکی این فولاد در جدول (۲) آمده است.

میزان درصد تداخل شعاعی برای انطباق محور و توپی به

۳- تست‌های آزمایشگاهی توسط نیشیوکا و همکاران

در سال ۱۹۶۷ نیشیوکا و همکارانش با انجام مدل‌سازی چرخ و محور قطار در نمونه‌های کوچک به افزایش حد دوام خستگی محورها با تغییرات در شکل و هندسه انطباق چرخ و توپی پرداختند [۴]. آنها نمونه‌های خود را در پنج گروه تقسیم کردند و در هر گروه با انجام تغییرات مشابه در هندسه محور و توپی سعی در بهبود مقاومت خستگی محور

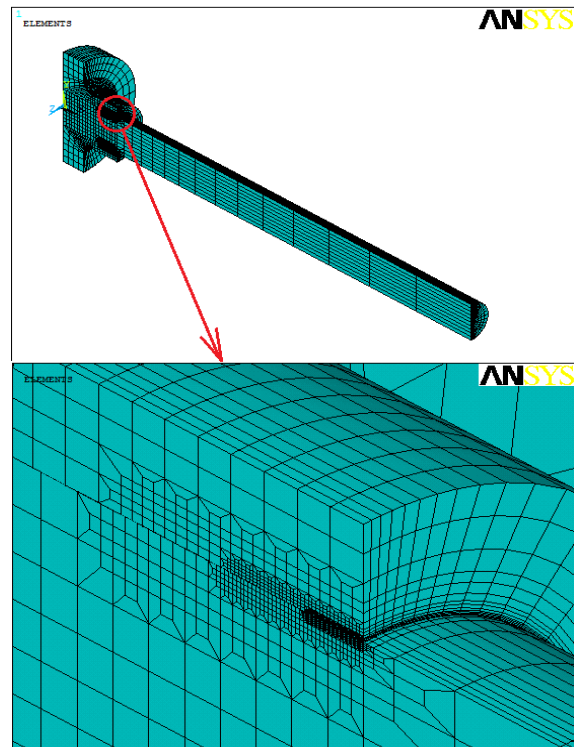
اندازه‌ای خواهد بود که مقدار فشار تداخل ۷۰ مگاپاسکال باشد [۴]. برای محاسبه درصد تداخل لازم از رابطه (۱۱) استفاده می‌شود [۲۷]:

$$\Delta = \frac{pR}{E_o} \left(\frac{r_o^2 + R^2}{r_o^2 - R^2} + \nu_o \right) + \frac{pR}{E_i} \left(\frac{R^2 + r_i^2}{R^2 - r_i^2} - \nu_i \right) \quad (11)$$

در این رابطه p فشار انطباق در محل مورد نظر، R شعاع محل مورد نظر، E_o مدول الاستیسیته توپ، E_i مدول الاستیسیته محور، ν_o ضریب پواسون توپ، ν_i ضریب پواسون محور، r_o شعاع خارجی توپ، r_i شعاع داخلی توپ و یا همان شعاع خارجی محور هستند. با جای‌گذاری ثابت مربوط به جنس ماده و ابعاد قطعات مورد آزمایش، میزان درصد تداخل شعاعی به اندازه ۰/۰۳۱۵ میلی متر محاسبه می‌گردد.

۴- مدل‌سازی المان محدود

برای انجام تحلیل المان محدود، مدل شبکه‌بندی شده سه‌بعدی از محور و توپ در نرم‌افزار انسیس ایجاد شده است. بدین منظور المان‌های Solid185 برای مدل‌سازی محور و توپ به کار گرفته شده‌اند و از آنجایی که در نزدیکی لبه‌های سطح تماس گرادیان تنش بالا است، جهت همگرایی بهتر محاسبات و کسب نتایج بهتر در این نواحی اندازه المان‌ها ریزتر شده است تا جایی که اندازه المان‌ها در نزدیکی سطح تماس در حدود ۰/۱۵ میلی‌متر است. اندازه المان‌ها به گونه‌ای تعیین گردیده است که نتایج به دست آمده مستقل از اندازه شبکه‌بندی باشد. شکل (۴) مدل المان محدود را در یکی از نمونه‌ها نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی سطوح تماس از المان‌های 174 Contact و Target استفاده شده است. این المان‌ها برای برقراری تماس بین دو سطح به کار می‌روند و قابلیت تحلیل لغزش و انتقال حرارت 173 بین دو سطح را دارا هستند [28]. با توجه به غیرخطی بودن معادلات مربوط به سطح تماس و لزوم همگرا شدن محاسبات مربوط به آن، از تماس سطح به سطح



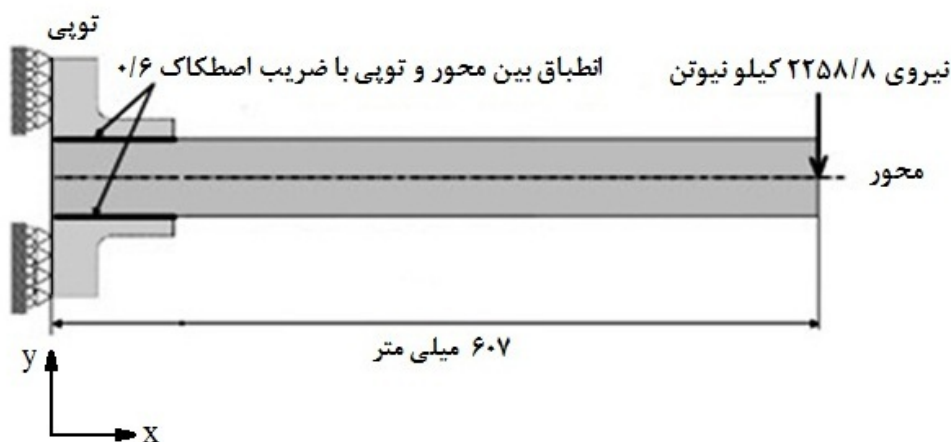
شکل ۴- مدل المان محدود در یکی از نمونه‌ها

جدول ۱- ابعاد هندسی نمونه‌های مورد آزمایش [۴]

ابعاد فیلت و نمونه‌ها				نمونه‌ها	
D/d	D/ρ	d (mm)	ρ (mm)	سری	گروه
			∞	a	A
۱/۰۴۶	۷/۱۴	۴۷/۸	۷	g	C
۱/۰۴۶	۱۰	۴۷/۸	۵	h	
۱/۰۶۸	۴/۴۲	۴۶/۸	۱۱/۳	i	
۱/۰۶۸	۷/۱۴	۴۶/۸	۷	j	
۱/۰۶۸	۱۰	۴۶/۸	۵	k	
۱/۰۶۸	۱۴/۲۹	۴۶/۸	۳/۵	l	
۱/۰۹۲	۴/۴۲	۴۵/۸	۱۱/۳	m	
۱/۰۹۲	۷/۱۴	۴۵/۸	۷	n	
۱/۱۱۶	۴/۴۲	۴۴/۸	۱۱/۳	o	

جدول ۲- مشخصات مکانیکی فولاد SF55 [۴]

S_e (MPa)	S_{ut} (MPa)	S_y (MPa)	ν	E (GPa)
۲۷۵	۵۵۰	۳۴۰	۰/۳	۲۰۰



شکل ۵- شرایط مرزی اعمال شده در مدل المان محدود

واقع در صفحه میانی در راستای بار مقید می‌گردد. بار خمشی سیکلیک به اندازه ۲۲۵۸/۸ کیلو نیوتن که معادل بار خمشی در حد دوام نمونه گروه A است، در تمامی نمونه‌ها اعمال می‌گردد تا بتوان مقایسه‌ای میان مقاومت خستگی آنها انجام داد. شکل (۵) شرایط مرزی اعمال شده و محور مختصات مرجع را در یکی از نمونه‌ها نشان می‌دهد. در نهایت شبیه سازی و اعمال بار خمشی متناوب بر روی نمونه در نرم‌افزار المان محدود در چهار مرحله صورت می‌پذیرد. مرحله اول اعمال تداخل میان محور و تویی است. به طوری که شعاع محور به اندازه درصد تداخل محاسبه شده بزرگتر از شعاع تویی مدل شده و در داخل تویی قرار می‌گیرد. سپس با تعریف المان‌های تماس میان محور و تویی و تعریف تداخل اولیه در مشخصات سطح تماس و حل مساله فشار اولیه ایجاد می‌شود. شکل (۶) فشار اولیه در اثر تداخل را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه قطر تویی در تمامی قسمت‌ها یکسان نیست فشار تماس در ابتدای سطح تماس از مقدار مطلوب بیشتر بوده و به تدریج در انتهای سطح تماس به مقدار ۷۰ مگاپاسکال می‌رسد. در مرحله دوم حل مساله بار خمشی مثبت به محور اعمال می‌گردد. در مرحله سوم بار خمشی از روی محور بر داشته شده و در مرحله چهارم بار خمشی در جهت عکس بر روی محور اعمال می‌شود.

با الگوریتم لاگرانژ تکمیلی برای شبیه‌سازی سطوح تماس استفاده شده است [۱۲]. جهت مدل‌سازی بهتر تماس بین سطوح، انتخاب ضریب اصطکاک مناسب بسیار ضروری است. در این راستا در سال ۱۹۷۱ میلادی مایلاستون و یانچکو به بررسی ضریب اصطکاک بین صفحات فولادی در پدیده سایس پرداختند [۲۹]. نتایج حاصل از مطالعات نشان داد که در سایس بین صفحات خشک فولادی، ضریب اصطکاک بعد از حدود ۱۰ سیکل به مقداری بیشتر و یا مساوی با ۰/۶ افزایش می‌یابد و بعد از حدود ۱۰۵ سیکل این ضریب به مقدار ثابت ۰/۶ می‌رسد. با این حال در سال ۱۹۹۲ میلادی دابرومیسرسکی به مطالعه و بررسی عوامل مختلف بر روی سایس پرداخت [۳۰]. یکی از نتایج به دست آمده توسط او حاکی از آن بود که خستگی سایسی با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک حالت پایدار به صورت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌گردد. لذا بر اساس توضیحات ارائه شده، از ضریب اصطکاک ۰/۶ بین سطوح تماسی استفاده شده است.

با توجه به تقارن هندسه شکل و بارگذاری خمشی نسبت به آن، از شرط مرزی تقارن در صفحه تقارن استفاده شده است. از سوی دیگر برای صفحه انتهایی تویی قید جابه‌جایی در راستای محوری در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از حرکت صلب مدل در راستای بار خمشی، یکی از گره‌های

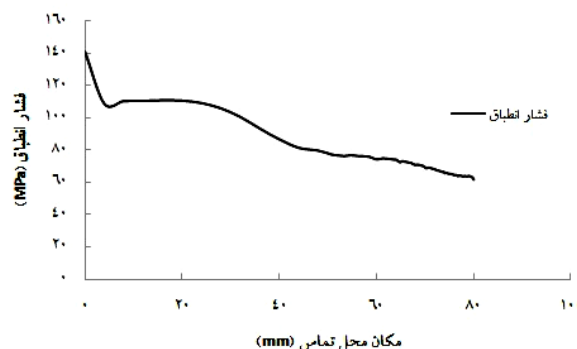
۵- بررسی نتایج

نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نیشیوکا و همکارانش در مورد نمونه‌های گروه A و C به طور خلاصه در جدول (۳) ارائه شده است [۴]. با توجه به این نتایج می‌توان مشاهده نمود که تمامی تغییرات اعمال شده باعث بهبود مقاومت خستگی انطباق محور و تویی شده است.

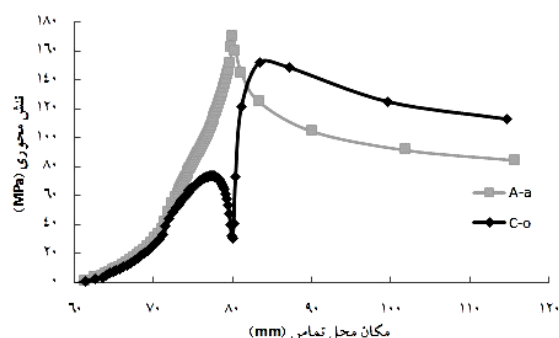
زمانی که در انتهای محل تماس از فیلت استفاده شده است، بیشترین مقاومت خستگی در نسبت مشخصی از قطر بزرگ به قطر کوچک و شعاع فیلت به قطر به دست می‌آید. این اتفاق به دلیل تغییر محل شکست خستگی از سطح تماس به محل فیلت با تغییر نسبت قطرها است.

بررسی‌های عددی نشان می‌دهند که ایجاد فیلت باعث کاهش تنش‌های محوری بر روی سطح تماس نمونه شده ولی در نواحی بیرونی سطح تماس به علت ایجاد تمرکز تنش، تنش محوری را افزایش می‌دهد. در نتیجه این تغییر در توزیع تنش محوری، مقاومت خستگی سایشی بر روی سطح تماس افزایش یافته و مقاومت خستگی در ناحیه بیرونی سطح تماس کاهش می‌یابد. تا جایی که باعث تغییر محل شکست محور از ناحیه زیر سطح تماس به ناحیه فیلت در نسبت قطرهای بالاتر می‌شود. یعنی با افزایش نسبت قطر، تمرکز تنش در ناحیه فیلت بیشتر شده و محل شکست محور از ناحیه سطح تماس بر روی فیلت منتقل می‌شود. شکل (۷) تغییرات مربوط به توزیع تنش‌های محوری را در نتیجه ایجاد فیلت نشان می‌دهد. در این شکل مکان محل تماس از ابتدای محور سنجیده می‌شود به طوری که مکان ۸۰ میلی‌متر نشان دهنده لبه سطح تماس است.

جداول (۴) و (۵) نتایج به دست آمده از تحلیل عددی توسط معیارهای خستگی چند محوره را نشان می‌دهند. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که پارامترهای گلینکا و کی‌بی‌ام تقریباً می‌توانند جابه‌جایی محل شکست با تغییر نسبت قطر را پیش‌بینی نمایند و در این زمینه تطابق بهتری نسبت به معیارهای اسمیت، واتسون تاپر و فاطمی - سوشی با نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی دارند. این در حالی است که روند کاهش مقدار



شکل ۶- فشار اولیه در اثر ایجاد تداخل



شکل ۷- تغییرات توزیع تنش‌های محوری در نتیجه ایجاد فیلت

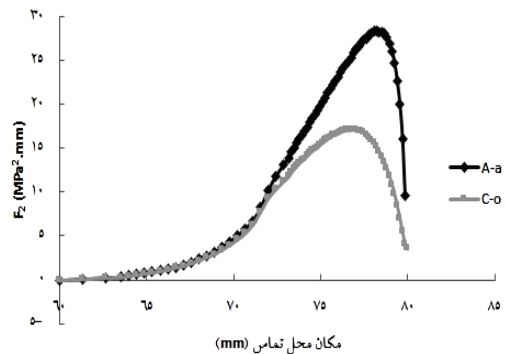
جدول ۳- نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط نیشیوکا و همکاران [۴]

نمونه گروه	مقاومت مقایسه با گروه	مکان شکست خستگی
سری	A سری a	خستگی
A	a	ناحیه انطباق
C	g	ناحیه انطباق
	h	ناحیه انطباق
	i	ناحیه انطباق
	j	فیلت، ناحیه انطباق
	k	فیلت، ناحیه انطباق
	l	فیلت
	m	ناحیه انطباق
	n	فیلت، ناحیه انطباق
	o	فیلت، ناحیه انطباق
	u	ناحیه انطباق

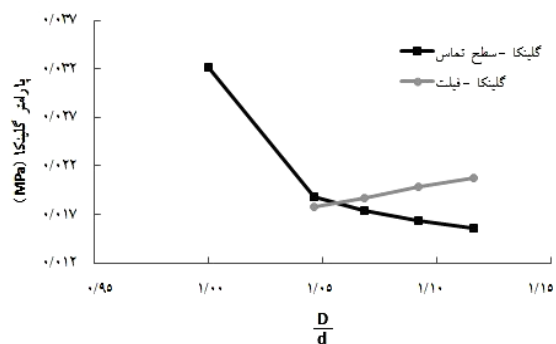
با استفاده از پارامتر دوم خستگی سایشی نیز می‌توان محل شکست و همچنین احتمال وقوع پدیده خستگی سایشی را در نمونه‌های مختلف نسبت به یکدیگر سنجید. جدول (۶) مقدار بیشینه پارامتر دوم خستگی سایشی و محل آن را بر روی سطح تماس نشان می‌دهد. همان گونه که از جدول مشخص است مقدار پارامتر دوم خستگی سایشی در نزدیکی لبه سطح تماس به مقدار بیشینه می‌رسد که نشان دهنده بحرانی بودن این نقاط از نظر مقاومت خستگی سایشی است که با محل شکست نمونه‌های تحت آزمایش نیز همخوانی مناسبی دارد. تغییرات پارامتر دوم خستگی سایشی بر روی سطح تماس در نتیجه ایجاد فیلت نیز در شکل (۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای انجام مقایسه در این نمودارها از نمونه‌های A-a و C-o استفاده شده است.

۱-۵- بررسی تاثیر نسبت قطر بر روی مقاومت خستگی محور
 برای بررسی علت جابجایی محل شکست با افزایش نسبت قطر، از نمونه‌های گروه C با شعاع فیلت ثابت و نسبت قطرهای مختلف استفاده شده است. مقدار بیشینه هر یک از پارامترهای گلینکا و کندیل براون، میلر در نسبت قطرهای مختلف با شعاع فیلت ثابت، هم بر روی سطح تماس و هم بر روی فیلت در شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه گردیده‌اند.

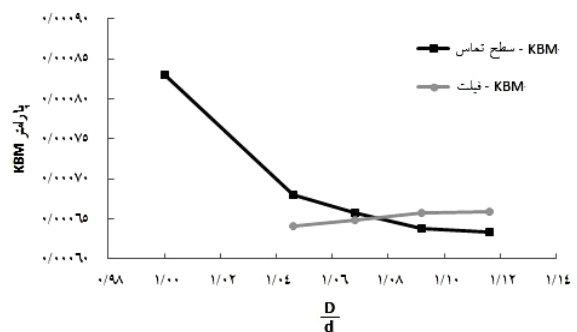
همانطور که از این نمودارها بر می‌آید با افزایش نسبت قطر مقدار این پارامترها بر روی سطح تماس کاهش یافته و بر روی فیلت افزایش می‌یابد. تا جایی که در نسبت قطری معین مقدار این پارامترها در قسمت فیلت از مقدار آنها در سطح تماس بیشتر شده و شکست را در محل فیلت پیش بینی می‌نمایند. این نسبت قطر همان نسبتی است که محور دارای بیشترین میزان مقاومت خستگی است. با توجه به این نمودارها می‌توان بیان نمود که با توجه به پیش‌بینی معیار گلینکا در نسبت قطر ۱/۰۵ و با توجه به پیش‌بینی معیار کندیل براون، میلر در نسبت قطر ۱/۰۸ محور بیشترین مقاومت خستگی را دارا است و جابجایی محل شکست نیز در این نسبت قطر اتفاق می‌افتد که



شکل ۸- تغییرات پارامتر دوم خستگی سایشی در اثر ایجاد فیلت بر روی محور



شکل ۹- مقدار بیشینه پارامتر گلینکا روی سطح تماس و فیلت با تغییر نسبت قطر



شکل ۱۰- مقدار بیشینه پارامتر KBM روی سطح تماس و فیلت با تغییر نسبت قطر

پارامترهای مختلف خستگی چند محوره در نمونه‌های مختلف، همخوانی نسبتاً خوبی با بهبود حد دوام خستگی این نمونه‌ها دارند.

جدول ۴- بیشترین مقدار معیارهای فاطمی، سوشی و KBM در نمونه‌های مختلف و محل آن

نمونه		فاطمی، سوشی				KBM	
گروه	سری	موقعیت حداکثر مقدار	موقعیت حداکثر مقدار	مقدار از انتهای تماس (mm)	مقدار از انتهای تماس (mm)	موقعیت حداکثر مقدار	موقعیت حداکثر مقدار
A	a	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۴	۰	ناحیه انطباق	۰/۰۰۰۸۳
C	g	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۵/۴۸	۳/۵۶	ناحیه انطباق	۰/۰۰۰۶۷۹
	h	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۵/۴۸	-	فیلت	۰/۰۰۰۶۸۶
	i	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۵/۷۸	۴	ناحیه انطباق	۰/۰۰۰۶۶۴
	j	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۵/۷۸	۴/۳	ناحیه انطباق	۰/۰۰۰۶۵۷
	k	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۵/۷۸	-	فیلت	۰/۰۰۰۶۷۹
	l	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۵/۷۸	-	فیلت	۰/۰۰۰۶۹۷
	m	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۶/۰۷	۴/۵۹	ناحیه انطباق	۰/۰۰۰۶۴۵
	n	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۶/۲۲	-	فیلت	۰/۰۰۰۶۵۸
	o	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۶/۳۷	۵/۳۳	ناحیه انطباق	۰/۰۰۰۶۳۳

جدول ۵- بیشترین مقدار معیارهای SWT و گلینکا در نمونه‌های مختلف و محل آن

نمونه		گلینکا				SWT	
گروه	سری	موقعیت حداکثر مقدار	موقعیت حداکثر مقدار	مقدار از انتهای تماس (mm)	مقدار از انتهای تماس (mm)	موقعیت حداکثر مقدار	موقعیت حداکثر مقدار
A	a	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۰	۰	ناحیه انطباق	۰/۰۵۵۳۱۳
C	g	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۲/۵۲	-	فیلت	۰/۰۲۹۱۵۰
	h	فیلت	فیلت	-	-	فیلت	۰/۰۳۳۲۸۲
	i	ناحیه انطباق	ناحیه انطباق	۳/۵۶	-	فیلت	۰/۰۲۸۱۳۹
	j	فیلت	فیلت	-	-	فیلت	۰/۰۳۱۱۲۵
	k	فیلت	فیلت	-	-	فیلت	۰/۰۳۵۰۷۷
	l	فیلت	فیلت	-	-	فیلت	۰/۰۳۹۱۶۲
	m	فیلت	فیلت	-	-	فیلت	۰/۰۳۱۲۰۱
	n	فیلت	فیلت	-	-	فیلت	۰/۰۳۴۰۹۵
	o	فیلت	فیلت	-	-	فیلت	۰/۰۳۲۷۳۹

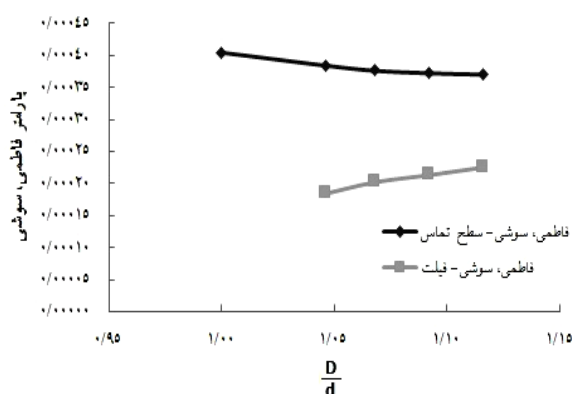
می‌دهد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تغییرات مقادیر ماکزیمم این پارامترها را با افزایش نسبت قطر در نمونه‌های مختلف نشان می‌دهند. روند صعودی این پارامترها بر روی فیلت با افزایش نسبت قطر حاکی از بحرانی‌تر شدن محل فیلت است که با نتایج قبلی نیز هم‌خوانی دارد. همچنین روند نزولی این

این نتیجه با نتایج موجود در ادبیات فن تطابق قابل قبولی دارد [۳۱].

با اینکه پارامترهای اسمیت، واتسون تاپر و فاطمی - سوشی انتقال محل شکست را پیش‌بینی نمی‌کنند ولی بررسی مقدار آنها بر روی سطح تماس و محل فیلت روند قابل قبولی را ارائه

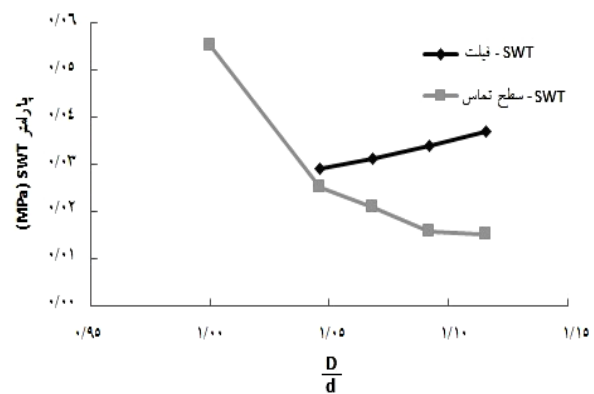
جدول ۶- محل بیشینه پارامتر دوم خستگی سایشی و محل آن بر روی سطح تماس

نمونه	نتایج آزمایش	پارامتر دوم خستگی سایشی	
		موقعیت محل حداکثر مقدار از لبه انتهایی	حداکثر مقدار
گروه	محل شکست نمونه‌ها بر روی سطح از انتهایی تماس [۴]	تماس (mm)	(MPa ^۲ .mm)
A	a	۱/۷۷۸	۲۸/۴۳
C	g	۲/۵۱۹	۲۱/۹۴
	h	۲/۵۱۹	۲۱/۹۴
	i	۲/۵۱۹	۲۰/۵۴
	j	۲/۶۶۷	۱۹/۷۴
	k	۲/۸۱۵	۱۹/۲
	l	۳/۱۱۱	۱۸/۶۸
	m	۲/۸۱۵	۱۸/۷۳
	n	۳/۱۱۱	۱۷/۵۶
	o	۳/۵۵۶	۱۷/۱



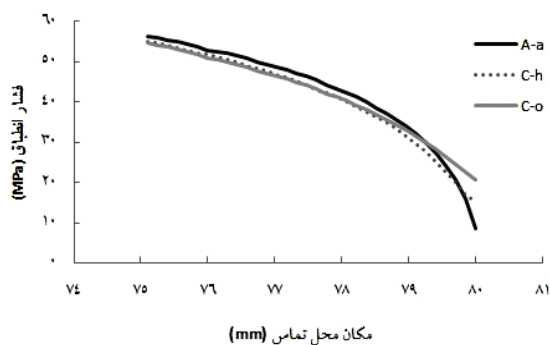
شکل ۱۲- مقدار بیشینه پارامتر فاطمی-سوشی بر روی سطح تماس و فیلت با تغییر نسبت قطر

همان‌گونه که از رابطه مربوط به این پارامتر مشخص است (رابطه ۱۰)، مقدار این پارامتر به مقدار ضریب اصطکاک، دامنه لغزش، فشار سطح و تنش محوری بستگی دارد، لذا برای درک بهتر دلیل کاهش پارامتر دوم خستگی سایشی نیاز به بررسی تاثیر نسبت قطر بر هر یک از عوامل فوق است. از آنجایی که مقدار ضریب اصطکاک برای تمامی نمونه‌ها مقدار مشخص ۰/۶ فرض شده است، لذا ضریب اصطکاک

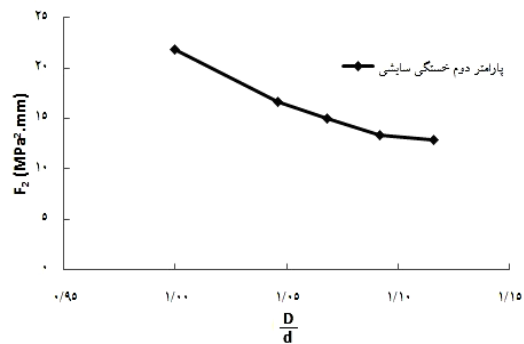


شکل ۱۱- مقدار بیشینه پارامتر SWT روی سطح تماس و فیلت با تغییر نسبت قطر

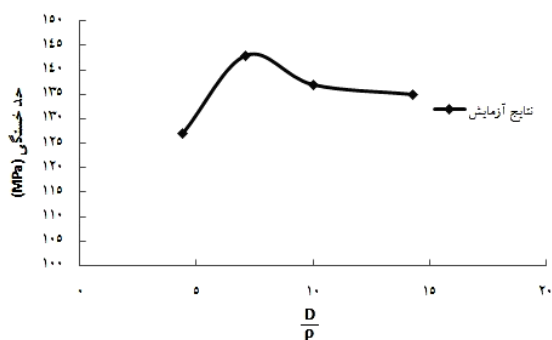
پارامترها بر روی سطح تماس با افزایش نسبت قطر، نشان دهنده افزایش مقاومت خستگی بر روی سطح است. علاوه بر این پارامتر دوم خستگی سایشی نیز که تنها برای خستگی سایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد، کاهش احتمال وقوع خستگی سایشی را با افزایش نسبت قطر نشان می‌دهد بدین معنی که با افزایش نسبت قطر مقدار پارامتر دوم خستگی سایشی بر روی سطح تماس کاهش می‌یابد (شکل ۱۳).



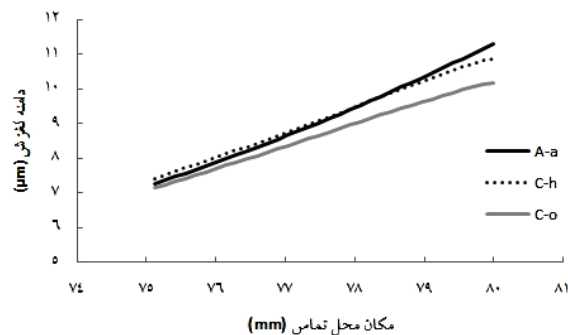
شکل ۱۵- مقدار فشار انطباق بعد از بارگذاری در نزدیکی لبه سطح تماس



شکل ۱۳- مقدار ماکزیمم پارامتر دوم خستگی سایشی بر روی سطح تماس تغییر نسبت قطر



شکل ۱۶- تاثیر شعاع فیلت در مقاومت خستگی محاسبه شده توسط نیشیوکا [۴]



شکل ۱۴- مقدار دامنه لغزش در نزدیکی لبه سطح تماس

نمودارها در فاصله حدود یک میلی متری از لبه سطح تماس است که می توان با توجه به آن بیان داشت که در نمونه A-a که فشار انطباق در لبه سطح تماس کمتر از دو نمونه دیگر است مقدار دامنه لغزش آن در نواحی لبه سطح از بقیه نمونه ها بیشتر است. همین روند میان دو نمونه C-h و C-o نیز قابل بیان است. با این حال مقدار این تفاوت به حدی نیست که بتواند به عنوان عامل اصلی کاهش پارامتر دوم خستگی سایشی تلقی گردد. بنابراین از تغییر تنش های محوری بر روی سطح تماس می توان به عنوان اصلی ترین عامل کاهش پارامتر دوم خستگی سایشی و دیگر پارامترهای خستگی چندمحوره نام برد (شکل (۷)).

۲-۵- بررسی تاثیر شعاع فیلت بر روی مقاومت خستگی محور تغییر در شعاع فیلت بر روی محور همانند تغییر در نسبت قطر

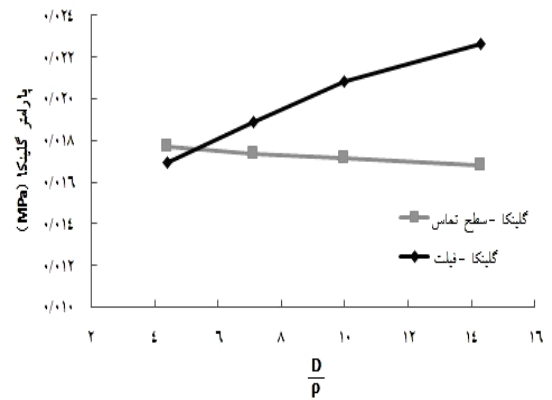
نمی تواند عامل کاهش پارامتر تلقی گردد. برای بررسی تاثیر دامنه لغزش و فشار تماسی، مقدار این عوامل بر روی سطح تماس و در نزدیکی لبه سطح تماس در سه نمونه با نسبت قطرهای مختلف به ترتیب در شکل های (۱۴) و (۱۵) ارائه گردیده است.

همان طور که از شکل های (۱۴) و (۱۵) مشخص است، در نواحی لبه سطح تماس مقدار دامنه لغزش و فشار تماسی تغییر چندانی نمی کنند. زیرا فشار انطباقی بیشتر به فشار اولیه انطباق مرتبط است که مقدار فشار اولیه انطباق برای تمامی نمونه ها برابر ۷۰ مگاپاسکال بوده است. از طرفی مقدار دامنه لغزش نیز به فشار انطباق و بار خمشی وارده مرتبط است، که مقدار این بار و فشار در نمونه های اولیه با هم برابر بوده است. بنابراین مقدار تغییرات دامنه لغزش نیز با نسبت قطر چندان چشم گیر نیست. میزان تفاوت

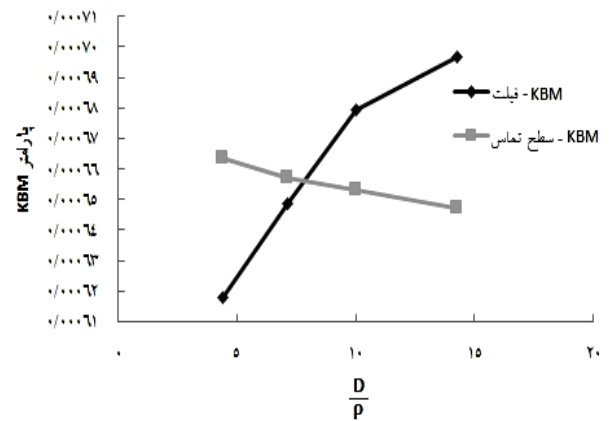
باعث جابه‌جایی محل شکست محور می‌گردد. برای بررسی علت جابه‌جایی محل شکست با افزایش نسبت قطر، از نمونه‌های گروه C با نسبت قطرهای ثابت و شعاع فیلت مختلف استفاده شده است. شکل (۱۶) نتایج حاصل از تست‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که تغییر حد دوام با تغییر شعاع فیلت روند یکنواختی را به علت تغییر محل شکست طی نمی‌کند. بیشترین میزان مقاومت خستگی حاصل از تست‌ها در نسبت قطر بر شعاع ۷/۱۴ است.

پارامترهای گلینکا و کندیل براون، میلر به‌کار رفته برای پیش‌بینی مقاومت خستگی تاحدودی می‌توانند جابه‌جایی محل شکست با تغییر شعاع فیلت را پیش‌بینی نمایند. برای بررسی علت این جابه‌جایی، مقدار بیشینه هریک از پارامترهای گلینکا و کندیل براون، میلر در نسبت قطرهای ثابت با شعاع فیلت‌های مختلف، هم بر روی سطح تماس و هم بر روی فیلت در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) ارائه گردیده‌اند. با کاهش شعاع فیلت و افزایش می‌یابد و مقدار پارامترهای مختلف بر روی فیلت افزایش پیدا می‌کند، این در حالی است که کاهش شعاع فیلت مقادیر پارامترهای مختلف را بر روی سطح تماس کاهش می‌دهد و در نسبت مشخصی از قطر بر شعاع فیلت مقدار این پارامترها بر روی سطح تماس و بر روی فیلت با هم برابر می‌شوند که این نسبت همان نسبتی است که محور دارای بیشترین میزان مقاومت خستگی است. همان‌گونه که از شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مشخص است طبق پیش‌بینی معیار گلینکا در نسبت قطر بر شعاع ۵/۵ و طبق پیش‌بینی معیار کندیل براون، میلر در نسبت قطر بر شعاع ۹، محور دارای بیشترین مقاومت خستگی خواهد بود.

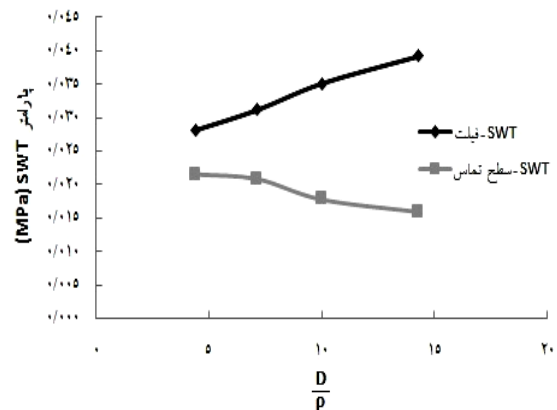
با وجود اینکه پارامترهای اسمیت، واتسون تاپر و فاطمی-سوشی جابه‌جایی محل شکست را پیش‌بینی نمی‌کنند با این حال دارای روند معقولی برای مقاومت خستگی محور بر روی سطح تماس و شعاع فیلت در نسبت قطر بر شعاع‌های مختلف هستند. شکل‌های (۱۹) و (۲۰) که مقدار ماکزیمم پارامترهای



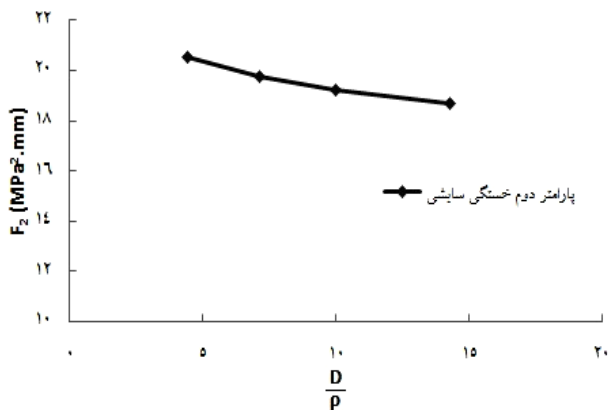
شکل ۱۷- تغییرات مقدار بیشینه پارامتر گلینکا بر روی سطح تماس و فیلت با تغییر شعاع فیلت



شکل ۱۸- تغییرات مقدار بیشینه پارامتر KBM بر روی سطح تماس و فیلت با تغییر شعاع فیلت

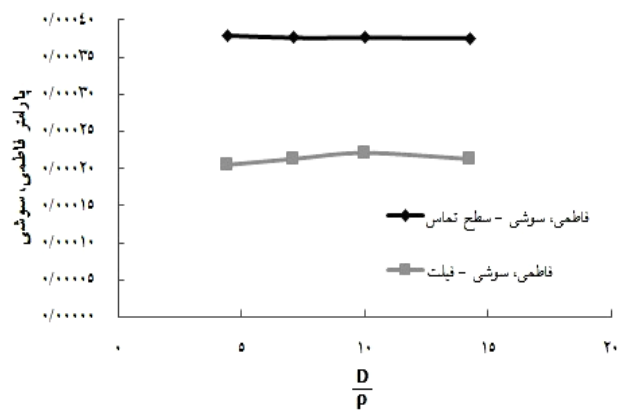


شکل ۱۹- مقدار ماکزیمم پارامتر SWT بر روی سطح تماس و فیلت با تغییر شعاع فیلت



شکل ۲۱- مقدار ماکزیمم پارامتر دوم خستگی سایشی بر روی سطح تماس با تغییر شعاع فیلت

آزمایش دارند اما پارامترهای اسمیت، واتسون تاپر و فاطمی-سوشی به جز در موارد خاص از پیش بینی محل شکست عاجزند. همچنین می توان عنوان نمود که ایجاد فیلت بر روی محور مقاومت خستگی را بر روی سطح انطباق افزایش می دهد. یعنی ایجاد فیلت احتمال وقوع خستگی سایشی را بر روی سطح کاهش می دهد که این امر با بررسی مقدار پارامترهای مختلف بر روی سطح تماس قابل مشاهده است. باید یاد آور شد که محل شکست این نوع محورها به نسبت قطر محل نشست توپی و قطر محور و همچنین شعاع فیلت بستگی دارد. با افزایش نسبت قطرهای احتمال شکست بر روی فیلت بیشتر شده و با کاهش نسبت قطرهای احتمال وقوع خستگی سایشی افزایش می یابد. لذا لازم است در محورهایی که این نسبت قطر کمتر است، برای افزایش مقاومت خستگی سایشی محور از عملیات حرارتی بر روی سطح تماس استفاده گردد تا احتمال وقوع پدیده مخرب خستگی سایشی کاهش یابد. در نهایت لازم به ذکر است که با توجه به مقدار پارامترهای مختلف بر روی سطح تماس و محل بیشینه مقدار آنها، تمامی ناحیه سطح تماس در خطر آسیب خستگی سایشی نیست و احتمال وقوع این پدیده در لبه های سطح تماس بسیار بیشتر از نواحی دیگر است زیرا لغزش بین دو سطح در این نواحی رخ می دهد.



شکل ۲۰- مقدار ماکزیمم پارامتر فاطمی-سوشی بر روی سطح تماس و فیلت با تغییر شعاع فیلت

اسمیت، واتسون تاپر و فاطمی-سوشی را بر روی سطح تماس نشان می دهند، مبین این مسئله هستند. همچنین پارامتر دوم خستگی سایشی نیز افزایش مقاومت خستگی سایشی را با کاهش شعاع فیلت در نسبت قطر معین نشان می دهد که در این حالت نیز افزایش مقاومت خستگی به علت کاهش تنش های محوری بر روی سطح تماس است (شکل ۲۱)).

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج حاصل از بررسی ها نشان می دهند که بیشترین مقدار مقاومت خستگی در محورهایی که دارای فیلت هستند در نسبت معینی از قطرهای و مقدار معینی از نسبت قطر بر شعاع فیلت اتفاق می افتد. برای بررسی دلیل این پدیده از پارامترهای مختلف خستگی چند محوره و پارامتر دوم خستگی سایشی استفاده شده است. می توان بیان نمود که همه معیارهای مورد استفاده در این تحلیل، روند بهبود مقاومت خستگی با تغییر در هندسه تماس را به طور قابل قبولی ارائه می دهند، که نشان دهنده توانایی این پارامترها در تعیین مقاومت خستگی نمونه های مختلف نسبت به یکدیگر است. با این حال برخی از این پارامترها در تعیین محل شکست دقیق عمل نمی کنند. به عنوان مثال پارامترهای گلینکا و کندیل براون، میلر در پیش بینی محل شکست محور انطباق فشاری تطابق بهتری با نتایج حاصل از

1. Shrink fitted pin
2. Manson-Coffin

3. Fatemi-Socie
4. Glinka

مراجع

1. Hirakawa, K., Toyama, K., and Kubota, M., "The Analysis and Prevention of Failure in Railway Axles", *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, No. 2, pp.135-144, 1998.
2. Waterhouse, R. B., *Fretting Corrosion*, Pergamon Press, Oxford, 1972.
3. Horger, O., "Influence of Fretting Corrosion on the Fatigue Strength of Fitted Members" In Symposium on Fretting Corrosion. ASTM International, 1952
4. Nishioka, K., and Komatsu, H., "Researches on Increasing the Fatigue Strength of Press-Fit Shaft", *Bulletin of JSME*, Vol. 15, No. 87, pp.1019-1028, 1972.
5. Nishioka, K., and Hirakawa, K., "Fundamental Investigations of Fretting Fatigue (Part 3. Some Phenomena and Mechanics of Surface Cracks)", *Bulletin of JSME*, Vol. 12, No. 51, pp. 397-407, 1969.
6. Endo, K., *Practical Observations of Initiation and Propagation of Fretting Fatigue Cracks*, *Fretting Fatigue*, Applied Science Publishers, London, pp. 127-141, 1981.
7. Makino, T., Yamamoto, M., and Hirakawa, K., "Fracture Mechanics Approach to the Fretting Fatigue Strength of Axle Assemblies", In: D. W. Hoepfner, V. Chandrasekaran and C. B. Elliott, (Eds.), *Fretting Fatigue: Current Technology and Practices*, ASTM STP 1367, American Society for Testing and Materials, pp. 509-521, 2000.
8. Hills, D. A., Nowell, D., and O'Connor, J. J., "On the Mechanics of Fretting Fatigue", *Wear*, Vol. 125, No. 1, pp. 129-146, 1988.
9. Szolwinski, P. M., and Farris, T. N., "Mechanics of Fretting Fatigue Crack Formation", *Wear*, Vol. 198, No. 1, pp. 93-107, 1996.
10. Kubota, M., Niho, S., Sakae, C., and Kondo, Y., "Effect of Understress on Fretting Fatigue Crack Initiation of Press-Fitted Axle", *International Journal of JSME*, Vol. 46, No. 3, pp. 297-302, 2003.
11. Madia, M., Beretta, S., and Zerbst, U., "An Investigation on the Influence of Rotary Bending and Press Fitting on Stress Intensity Factors and Fatigue Crack Growth in Railway Axles", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No. 8, pp. 1906-1920, 2008.
12. Lanoue, F., Vadean, A., and Sanschagrín, B., "Finite Element Analysis and Contact Modelling Considerations of Interference Fits for Fretting Fatigue Strength Calculations", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 17, No. 10, pp. 1587-1602, 2009.
13. Alfredsson, B., "Fretting Fatigue of a Shrink-Fit Pin Subjected to Rotating Bending: Experiments and Simulations", *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, No. 10, pp. 1559-1570, 2009.
14. Zheng, J. F., Luo, J., Mo, J. L., Peng, J. F., Jin, X. S., and Zhu, M. H., "Fretting Wear Behaviors of a Railway Axle Steel", *Tribology International*, Vol. 43, No. 5, pp. 906-911, 2010.
15. Peng, J. F., Liu, J. H., Cai, Z. B., Shen, M. X., Song, C., and Zhu, M. H., "Study on Bending Fretting Fatigue Damages of 7075 Aluminum Alloy", *Tribology International*, Vol. 59, pp. 38-46, 2013.
16. Song, C., Shen, M. X., Lin, X. F., Liu, D. W., and Zhu, M. H., "An Investigation on Rotatory Bending Fretting Fatigue Damage of Railway Axles", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 37, No. 1, pp. 72-84, 2014.
17. Brown, M. W., and Miller, K. J. "A Theory for Fatigue Failure under Multiaxial Stress-Strain Conditions", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 187, No. 1, pp. 745-755, 1973.
18. Kandil, F. A., Brown, M. W., and Miller, K. J., *Biaxial Low Cycle Fatigue Fracture of 316 Stainless Steel at Elevated Temperatures*, The Metal Society, London 280, 1982.
19. Farahani, A. V., "A New Energy Critical Plane Parameter for Fatigue Life Assessment of Various Metallic Materials Subjected to In-Phase and Out-Of-Phase Multiaxial Fatigue Loading Conditions", *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, No. 4, pp. 295-305, 2000.
20. Fatemi, A., and Socie, D. F., "A Critical Plane to Multiaxial Fatigue Damage Including Out-Of-phase Loading", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 11, No. 3, pp. 149-165, 1988.
21. Smith, K. N., Watson, P., and Topper, T. H., "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals", *Journal of Materials*, Vol. 5, pp. 767-778, 1970.
22. Glinka, G., Plumtree, A., and Shen, G., "A Multiaxial Fatigue Strain Energy Parameter Related to the Critical Plane", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-46, 1995.

23. Ruiz, C., Buddington, P. H. B., and Chen, K. C., "An Investigation of Fatigue and Fretting in a Dovetail Joint", *Experimental Mechanics*, Vol. 24, No. 3, pp. 208-217, 1984.
24. Ruiz, C., and Chen, K. C., *Life Assessment of Dovetail Joints between Blades and Discs in Aero-Engines*, Mechanical Engineering Publications, 1986.
25. Nowell, D., and Hills, D. A., "Crack Initiation Criteria in Fretting Fatigue", *Wear*, Vol. 136, No. 2, pp. 329-343, 1990.
26. Neu, R. W., Pape, J. A., and Swalla, D. R., *Methodologies for Linking Nucleation and Propagation Approaches for Predicting Life under Fretting Fatigue*, ASTM Special Technical Publication 1367, 2000.
27. Shigley, J. E., and Mischke, C. R., *Mechanical Engineering Design* 5th ed., Blacklick, Ohio, U.S.A, McGraw-Hill College, 1989.
28. ANSYS User's Manual for Revision 13, Copyright 2010 SAS IP, Inc. All rights reserved.
29. Milestone, W. D., and Janeczko, J. T., "Friction between Steel Surfaces During Fretting", *Wear*, Vol. 18, No. 1, pp. 29-40, 1971.
30. Dobromirski, J. M., "Variables in fretting fatigue: are there 50 of them?", In: M. H. Attia, R. B. Waterhouse (Eds.), Standardization of fretting fatigue test methods and equipment, ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials, pp. 60-66, Philadelphia, 1992.
31. Makino, T., Kato, T., and Hirakawa, K., "Review of the Fatigue Damage Tolerance of High-Speed Railway Axles in Japan", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, No. 5, pp. 810-825, 2011.