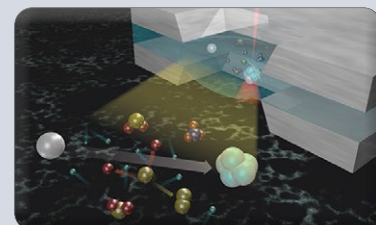


## معرفی روش آنالیز فلوسایتومتری

به اشتراک گذاری تجربیات کارشناسان آزمایشگاهها؛ برنامه زنده  
اینترنتی شبکه آزمایشگاهی



معرفی روش واکنش زنجیره‌ای پلیمرز  
هم‌زمان



معرفی اصول عملکرد میکروسکوپ الکترونی  
عبوری محیطی درجا / بهنگام مجهز به سلول مایع



معرفی آزمون خستگی فرتینگ یا خستگی -  
سایشی مواد با بارگذاری خمشی متناوب



جداسازی و شناسایی اجزاء تشکیل دهنده  
اسانس و اسیدهای چرب تری گلیسریدی  
در گیاه کلپوره به روش کروماتوگرافی گازی -  
طیف‌سنجی جرمی



کاربردهای جدید رزونانس مغناطیس هسته

## نویسندگان

محمد آزادی<sup>۱\*</sup>، محمدصادق اقارب پرست<sup>۲</sup>،  
محمدحسین حاجی اسمعیلی<sup>۳</sup>  
روزبه قنادی آذر<sup>۴</sup>، فرهاد محمدی<sup>۴</sup>

\*m\_azadi@semnan.ac.ir



## معرفی آزمون خستگی فرتینگ یا خستگی - سایشی مواد با بارگذاری خمشی متناوب

## چکیده

پدیده‌های خستگی و سایش در بیشتر قطعات و سازه‌های صنعتی، عامل آسیب‌های ممکن هستند. حال اگر این دو پدیده، به صورت توأم در یک قطعه مکانیکی وجود داشته باشند، خرابی افزایش می‌یابد. لذا در این مقاله، به معرفی آزمون‌های خستگی فرتینگ یا خستگی - سایشی در مواد، با بارگذاری خمشی متناوب پرداخته شده است. در ابتدا به تعاریف و استانداردهای موجود در این زمینه، اشاره شده است و سپس جزئیات دستگاه خستگی فرتینگ، در آزمایشگاه تحقیقاتی رفتار مواد پیشرفته دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان، ارائه شده است. این دستگاه طراحی شده، قابلیت اعمال بارهای خمشی متناوب در محدوده فرکانسی تا ۱۲۰ هرتز، در سطوح تنشی ۵۰۰ مگاپاسکال، مقدار نیروی فرتینگ در سه سطح ۱۰، ۱۵ و ۲۳ نیوتن، در محیط روانکاری را داراست. در انتها نیز، به برخی از داده‌های تجربی با دستگاه فوق، اشاره شده است.

## واژه‌های کلیدی

خستگی - سایشی، خستگی فرتینگ، بارگذاری خمشی، دستگاه آزمون،  
آزمایشگاه تحقیقاتی رفتار مواد پیشرفته.

این مطالعه شامل واژه‌شناسی و الزامات عمومی برای انجام آزمون خستگی فرتینگ و گزارش نتایج است و همچنین انواع کلی آزمون خستگی فرتینگ را معرفی می‌کند. آزمون‌های خستگی فرتینگ به‌منظور بررسی عوامل مکانیکی و محیطی بر رفتار خستگی فلزی مواد فلزی طراحی می‌شوند. تعداد سیکل‌های لازم برای شکل‌گیری ترک خستگی فرتینگ به جنس ماده نمونه آزمون خستگی، جنس پد سایشی مورد استفاده در آزمون و همچنین هندسه محل تماس و نوع بارگذاری و جابجایی اعمال شده، وابسته است. مانند بررسی رفتار سایشی مواد، نتایج آزمون خستگی فرتینگ به سیستم و نه صرفاً به ماده وابسته است [۱].

اولین فعالیت‌های استانداردسازی در بحث فرتینگ به سال ۱۹۸۱ برمی‌گردد؛ زمانی که در استاندارد انجمن آزمایش و مواد آمریکا<sup>۵</sup> کمیته فرسایش و سایش G02 جلسه هم‌اندیشی در رابطه ارزیابی مواد در شرایط فرتینگ و با هدف جمع‌آوری کارهای مختلف در زمینه فرتینگ برای توسعه استاندارد آزمون فرتینگ برگزار کرد [۲]. همچنین در سال ۱۹۸۸، کمیته خستگی E09 یک زیرگروه خستگی فرتینگ ایجاد کرد [۳]. در ادامه یک گردهمایی با عنوان «استانداردسازی روش‌های آزمون خستگی فرتینگ و تجهیزات با محوریت دستیابی به استاندارد آزمون خستگی فرتینگ» در سال ۱۹۹۱ برگزار شد [۴]. استانداردسازی تنها براساس یک مدل آزمون، به دلیل متغیرهای زیاد آزمون فرتینگ که بسیار بیشتر از دیگر آزمون‌های مکانیکی رایج است، به نظر ممکن نیست. تعداد متغیرهای آزمون فرتینگ به حدود ۵۰ عامل می‌رسد که از میان این موارد ضریب اصطکاک، اندازه لغزش و فشار تماسی دسته اصلی متغیرها هستند. در حالی که ضریب اصطکاک از اصلی‌ترین عوامل آزمون است اما به‌طور مستقیم قابل کنترل نیست و به خواص تریبولوژی سیستم وابسته است که در طول آزمون تغییر می‌کند. این موارد در کنار برخی اختلاف نظرات در بخش واژه‌شناسی تعریف فرتینگ و خستگی فرتینگ تا حدی توسعه استانداردسازی آزمون خستگی فرتینگ را متوقف کرد [۵].

استانداردها علاوه بر روش‌های آزمون، شامل واژه‌شناسی و راهنما نیز هستند. هدف از استانداردسازی، بهبود شرایط مبادله و مقایسه نتایج آزمون محققان و آزمایشگاه‌ها است. هدف از انجام آزمون، محدود کردن یک عامل موثر برای مشخص کردن اثر آن در آزمون است. با این حال، ارتباط بین نتایج آزمایش‌های خستگی فرتینگ و استفاده از نتایج آزمون در طراحی برای خستگی فرتینگ به دلیل تعداد زیادی از متغیرها همچنان به‌عنوان یک چالش مطرح است. هدف از انجام آزمون‌های کاربردی خاص، فراهم کردن برخی نتایج اعتبارسنجی و تایید شده برای استفاده در یک ماده جدید یا یک عملیات سطحی جدید برای یک شرایط خاص فرتینگ است که در یک مکان خاص مشاهده شده یا قابلیت ایجاد در یک سیستم مهندسی خاص را دارد. پنجمین گردهمایی خستگی فرتینگ<sup>۶</sup> در سال ۲۰۰۷ برگزار شد و نتیجه بحث حاکی از آن بود که نیاز به گسترش تمرکز استانداردسازی از طریق استانداردسازی واژه‌شناسی و ارائه راهنمایی برای تنظیم یک برنامه آزمون خستگی فرتینگ به جای تلاش برای استاندارد کردن روش‌های آزمون عمومی وجود دارد [۵]. در حال حاضر پنج استاندارد ASTM برای فرتینگ وجود دارد که برخی از جنبه‌های فرتینگ را در بر می‌گیرد ولی فقط یک استاندارد جهانی برای آزمون خستگی فرتینگ شامل ASTM-E2789-10، وجود دارد. اولین استاندارد رایج موجود برای بحث خستگی فرتینگ در سال ۲۰۰۲ توسط مجمع مهندسين مکانیک ژاپن<sup>۷</sup> [۶] ارائه شده‌است.

## ● واژه‌شناسی

### ● ضریب اصطکاک<sup>۸</sup>:

ضریب اصطکاک ( $\mu$ ) عبارت است از «نسبت بدون بعد نیروی مماسی (Q) بین دو جسم به نیروی عمودی (P) که دو جسم را زمانی که نسبت به هم لغزش دارند، به یکدیگر فشار می‌دهد» که به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$\mu = \frac{Q}{P} \quad \text{رابطه (۱)}$$

تعاریف و نمادهای استفاده شده در این مطالعه براساس بخش واژه‌شناسی استاندارد ASTM-E2789-10 [۱] نگارش شده‌است. همچنین اصطلاحات و تعاریف این بخش براساس استاندارد ASTM-G15 [۷] در مورد اصطلاحات مربوط به خوردگی و آزمون خوردگی و استاندارد ASTM-G40 [۸] در مورد اصطلاحات مربوط به سایش و فرسایش آورده شده‌است.

معیار بررسی<sup>۲۱</sup> مناسب برای آسیب‌های ناشی از فرتینگ ایجاد کند [۱].

### ● خستگی فرتینگ<sup>۲۲</sup>:

به «فرآیند ایجاد ترک در ناحیه آسیب فرتینگ، رشد پیوسته ترک و امکان شکست کامل در ماده‌ای که دارای شرایط فرتینگ و همچنین تنش یا کرنش متغیر باشد» گفته می‌شود. خستگی فرتینگ باعث کاهش شدید عمر خستگی با تنش یکسان در نمونه‌های آزمون استاندارد به علت کاهش زمان شکل‌گیری ترک و تسریع فرآیند رشد ترک در اثر وجود هم‌زمان شرایط فرتینگ به‌همراه تنش یا کرنش متناوب، می‌شود [۱].

### ● عامل آسیب خستگی فرتینگ<sup>۲۳</sup>:

کاهش استحکام خستگی در اثر فرتینگ، به‌عنوان تفاوت بین حد دوام خستگی و حد دوام خستگی فرتینگ تقسیم بر حد دوام خستگی تعریف می‌شود. این عامل همچنین براساس استحکام خستگی فرتینگ نیز می‌تواند تعریف شود، به‌صورت یک سطح تنش لازم (بیشینه تنش یا دامنه تنش برای نسبت تنش مشخص) برای شکست در تعداد سیکل مشخص و یا سطح تنشی که درصد مشخصی از آزمون‌ها حداقل تعداد سیکل مشخصی را طی می‌کنند [۱].

### ● حد خستگی فرتینگ<sup>۲۴</sup>:

به «مقدار محدود کننده عمر خستگی، زمانی که عمر خستگی در اثر بارگذاری فرتینگ بسیار زیاد می‌شود» گفته می‌شود. این عامل کاملاً به شرایط فرتینگ وابسته است [۱].

### ● عامل کاهش خستگی فرتینگ<sup>۲۵</sup>:

کاهش استحکام خستگی در اثر فرتینگ، به‌عنوان نسبت حد دوام خستگی فرتینگ به حد دوام خستگی تعریف می‌شود [۱].

### ● آستانه آسیب خستگی فرتینگ<sup>۲۶</sup>:

به «ترکیبی از شرایط بارگذاری خستگی فرتینگ و تعداد سیکل‌های فرتینگ که باعث کاهش عمر خستگی نشود» گفته می‌شود. شرایط بارگذاری خستگی فرتینگ شامل ترکیبی از نیروی عمودی، دامنه جابجایی، دامنه نیروی مماسی و نیروی خستگی است. مفهوم آستانه آسیب خستگی فرتینگ با رشد ترک اولیه که در آن بیشینه تنش و محدوده تنش از حد آستانه رشد ترک بیشتر است، رابطه دارد. به‌طور عمده، تا زمانی که از آستانه آسیب خستگی فرتینگ عبور شود، حذف شرایط فرتینگ در ضمن حفظ بارگذاری خستگی (در صورتی که ممکن باشد)، تاثیر چشمگیری روی عمر خستگی باقی‌مانده ندارد [۱].

در شرایط لغزش نسبی، مقدار نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی کمتر است. از آنجایی که مقدار ضریب اصطکاک در طی سطح تماس متغیر است، ضریب اصطکاک برابر با میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده در طی مسیر در نظر گرفته می‌شود. همچنین، ضریب اصطکاک محلی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\mu(x, y) = \frac{q(x, y)}{p(x, y)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن:

$q(x, y)$  توزیع برش مماسی در سطح تماس و  $p(x, y)$  توزیع فشار عمودی در سطح تماس است [۸].

### ● فرتینگ<sup>۲۷</sup>:

به «حرکت نوسانی غالباً مماسی با دامنه کوچک، بین دو سطح جامد در تماس» گفته می‌شود. عبارت فرتینگ صرفاً نشان دهنده ماهیت حرکت بدون اشاره به سایش، خوردگی، خستگی و یا دیگر آسیب‌های ممکن است [۷].

### ● خوردگی فرتینگ<sup>۲۸</sup>:

به «خرابی<sup>۱۱</sup> ایجاد شده در سطح مشترک دو جسم در حال تماس در نتیجه خوردگی و حرکت نوسانی جزئی بین دو سطح» گفته می‌شود [۷].

### ● سایش فرتینگ<sup>۲۹</sup>:

به «سایشی که در اثر حرکت فرتینگ ایجاد شود» گفته می‌شود [۸].

### ● دامنه جابجایی<sup>۳۰</sup>:

به «جابجایی نسبی قله به قله تقسیم بر دو یا جابجایی چرخه کل تقسیم بر چهار» گفته می‌شود. دامنه جابجایی بیشتر براساس یک مکان مرجع خارج از جسم اندازه‌گیری می‌شود [۱].

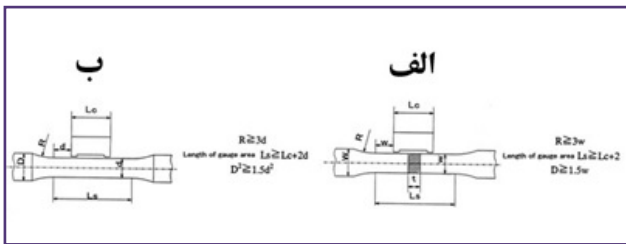
### ● آسیب فرتینگ<sup>۳۱</sup>:

به «حفره‌ها<sup>۱۵</sup>، خراش‌ها<sup>۱۶</sup>، شکستگی<sup>۱۷</sup> و انتقال ماده<sup>۱۸</sup> روی سطح بر اثر فرتینگ» گفته می‌شود. ترک‌ها ممکن است مربوط به آسیب فرتینگ باشند، اگرچه در بسیاری از موارد ممکن است وجود نداشته باشند و یا به قدری کوچک باشند که عمر خستگی به شکل قابل توجهی کاهش نیابد. از این رو، برای تعیین این که آیا عمر خستگی کاهش می‌یابد، نمی‌توان به‌طور آشکار از ظاهر تغییر یافته و یا مقدار زبری سطح آسیب فرتینگ استفاده کرد. در برخی موارد، جهت زبری که به آن بافت سطح<sup>۱۹</sup> نیز گفته می‌شود، به کمک روش پروفیلومتری<sup>۲۰</sup> اندازه‌گیری می‌شود. این بافت ممکن است به جهت فرتینگ وابسته باشد و در برخی موارد مشخصات بافت می‌تواند یک



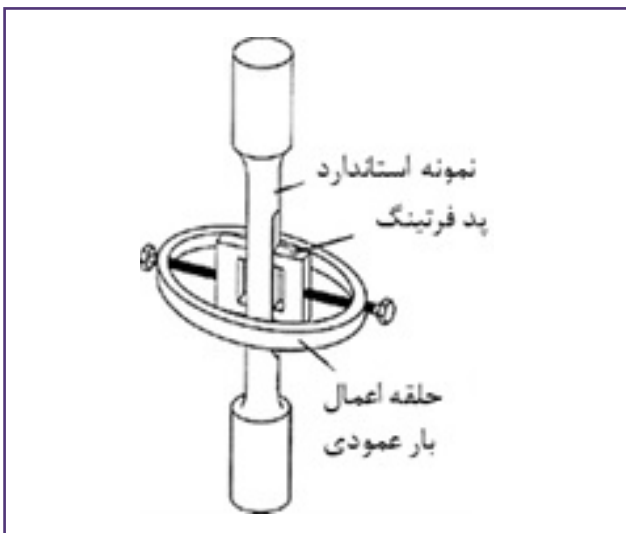
### ● نیروی عمودی و فشار عمودی<sup>۲۷</sup>:

شکل (۲) مقادیر پیشنهادی نمونه آزمون آورده شده است.



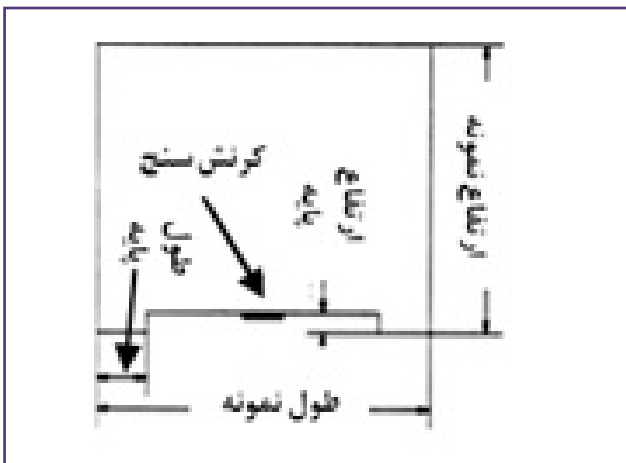
شکل (۲): ابعاد پیشنهادی برای (الف): نمونه استاندارد با سطح مقطع دایروی و (ب): نمونه استاندارد تخت [۶].

همچنین پیکربندی آزمون ارائه شده با این استاندارد در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳): پیکربندی آزمون خستگی فرتینگ [۶].

شکل (۴) نیز نشان دهنده پد سایشی استاندارد است. در این استاندارد ارتفاع پایه در محدوده ۰/۲ تا ۱ میلی متر است. همچنین نسبت ارتفاع نمونه به طول نمونه باید از ۰/۷۵ بیشتر یا برابر این مقدار باشد.



شکل (۴): ابعاد پیشنهادی پد سایشی [۶].

نیروی عمودی به «نیروی عمود بر سطح» و فشار عمودی به «حاصل نیروی عمودی تقسیم بر سطح تماس» گفته می شود. مقدار نیروی عمود بر سطح در طی آزمون ممکن است ثابت نباشد و تغییر کند. برای فشار عمودی، مقدار میانگین آن در نظر گرفته می شود. توزیع واقعی فشار در سطح تماس به هندسه و زبری سطح وابسته است. از روش های تحلیلی و محاسباتی برای محاسبه این فشار استفاده می شود. لازم به ذکر است، سایش باعث تغییر شکل دو سطح در حال تماس می شود و اندازه تماس های ناسازگار (به عنوان مثال، سطوح صاف روی استوانه ای، استوانه ای رو یکدیگر و یا کره روی سطح استوانه ای) را افزایش می دهد [۱].

### ● لغزش و لغزش نسبی<sup>۲۸</sup>:

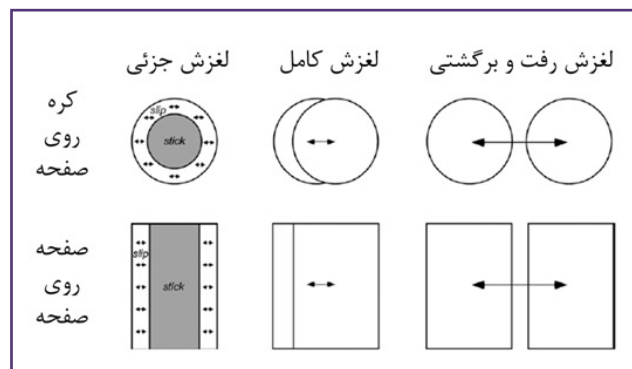
لغزش به «جابجایی محلی دو سطح در حال تماس» و لغزش نسبی به «مقدار جابجایی مماسی بین نقطه ای از سطح تماس در جسم اول و نقطه ای در سطح تماس جسم دوم» گفته می شود [۱].

### ● لغزش کامل و جزئی<sup>۲۹</sup>:

لغزش کامل و لغزش نسبی شرایطی است که در آن تمامی نقاط در حال تماس در طی یک سیکل دارای لغزش نسبی، به شکل نشان داده شده در شکل (۱) باشند [۱].

### ● لغزش رفت و برگشتی<sup>۳۰</sup>:

این شرایط زمانی رخ می دهد که مطابق شکل (۱) دو سطح در حال تماس در طی سیکل ها هیچ نقطه همپوشانی نداشته باشند [۱].

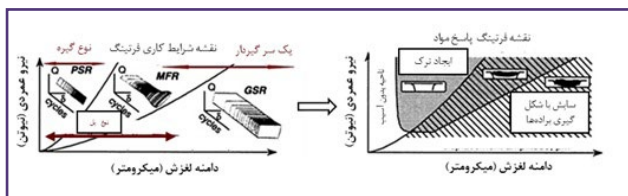


شکل (۱): نمایش تعاریف انواع لغزش [۱].

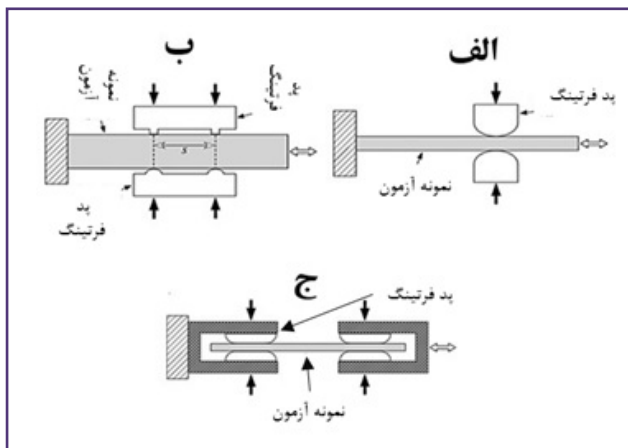
### ● راهنمای آزمون خستگی فرتینگ

#### ● روش استاندارد JSME برای آزمون خستگی فرتینگ:

اولین استاندارد عمومی برای خستگی فرتینگ توسط جامعه مهندسی مکانیک ژاپن در سال ۲۰۰۲ تدوین شد. در



شکل (۵): رابطه نیروی عمودی و دامنه لغزش با نوع لغزش [۱].



شکل (۶): (الف): نوع پل شکل، (ب): یک سر گیردار و (ج): دو سر گیردار [۱].

فرتینگ در یکی از این دسته‌ها قرار می‌گیرند. مطالعات به‌طور عمده، در مورد بارگذاری ساده‌تر تک محوره متمرکز شده‌است، اگرچه با توجه به برخی از شرایط کارکردی و وجود خمش در قطعات، مزایا و معایب بارگذاری خمشی نمونه خستگی نیز مورد بحث قرار گرفته است [۱]. ویژگی‌های منحصر به فرد هر پیکربندی آزمون خستگی فرتینگ به‌طور جداگانه مطالعه شده‌است و در مورد ویژگی‌هایی که در هر سه مشترک است بحث شده‌است.

### • آزمون خستگی فرتینگ پل شکل<sup>۳۳</sup>

آزمون خستگی فرتینگ پل شکل به‌طور عمومی شامل پد سایشی پل شکل می‌شود که مانند شکل (۶-الف) روی ناحیه گیج<sup>۳۵</sup> نمونه آزمون خستگی نگه داشته می‌شوند. این روش آزمون توسط چند آزمایشگاه و محقق مورد استفاده قرار گرفته است [۹ تا ۱۲]. همچنین استاندارد JSME نیز براساس این استاندارد است. از آن‌جا که در این نوع آزمون، گیره و پد سایشی به قاب متصل نیستند، بار عمودی به راحتی قابل تغییر است. یک مساله اساسی در این روش، جرم گیره و پیکربندی دستگاه آزمون است. داشتن جرم کم باعث کاهش نیروی اینرسی در فرکانس‌های بالا می‌شود [۵].

### • آزمون خستگی فرتینگ یک سر گیردار<sup>۳۶</sup>

همان‌طور که در شکل (۶-ب) نشان داده شده‌است، برخلاف آزمون خستگی فرتینگ پل شکل، در آزمون خستگی فرتینگ یک سر گیردار تنها یک ناحیه از هر سمت نمونه خستگی دارای تماس فرتینگ است. گاهی برای جلوگیری از آسیب فرتینگ در

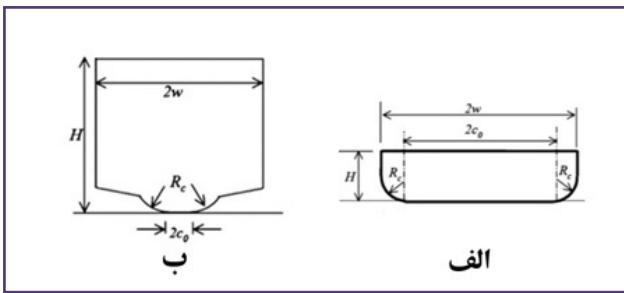
برای اندازه‌گیری مقدار کرنش به زیر ناحیه صاف و در میان دو پایه پد سایشی، یک کرنش‌سنج متصل می‌شود که می‌تواند مربوط به محاسبه نیروی مماسی باشد. رابطه بین کرنش در این مکان و نیروی مماسی با استفاده از یک نمونه مجزا کالیبره می‌شود؛ بنابراین، تمام مقدار نیرو از طریق پد منتقل می‌شود. مزیت این پیکربندی برای نمونه خستگی فرتینگ این است که این آزمایش را می‌توان روی سیستم‌های آزمون هیدرولیک تک محوره معمولی انجام داد و به تجهیزات یا دستگاه‌های اضافی دیگری نیازی نیست. همچنین در این استاندارد مواردی شامل راهنمایی در مورد چگونگی آماده‌سازی نمونه، اعمال نیروی عمودی، روش انجام آزمایش و مواردی را که باید در گزارش آزمایش گنجانده شود، را ارائه می‌دهد. در این آزمون استاندارد، جایجایی نسبی لغزش به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود، اما با توجه به مقادیر طول پایه پد و طول پد که در شکل (۴) نشان داده شده‌است و دامنه کرنش اندازه‌گیری شده، استاندارد توصیه می‌کند که لغزش نسبی موضعی با کمک روش المان محدود تعیین شود.

### • روش استاندارد ASTM برای آزمون خستگی فرتینگ:

زیرگروه E08.05.05 استاندارد ASTM از سال ۲۰۰۷ در حال تهیه یک راهنمای استاندارد برای آزمایش خستگی فرتینگ است. هدف این راهنما، افزایش آگاهی در مورد اطلاعات و رویکردهای موضوع مورد مطالعه است. این راهنما قصد انتخاب و ترجیح بین انواع دستگاه‌های آزمون و یا انواع نمونه‌های دیگر را ندارد، اما برای راهنمایی در طراحی، کالیبراسیون و استفاده از دستگاه‌های آزمون خستگی فرتینگ و چگونگی ارائه گزارش‌ها توصیه می‌شود.

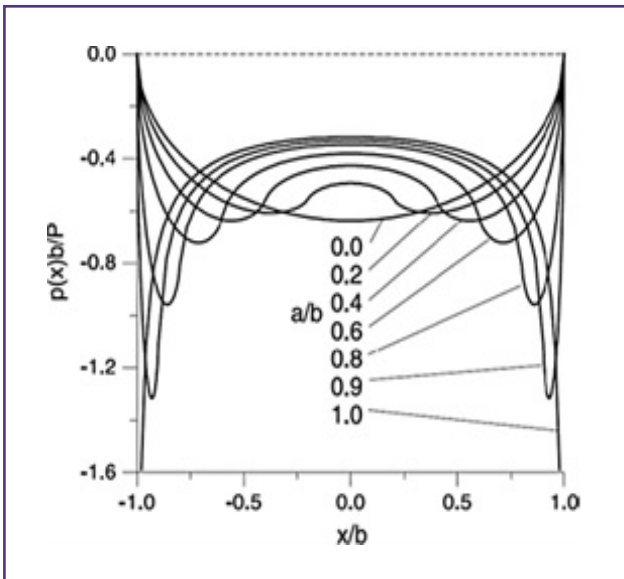
از مراحل اولیه طراحی آزمون خستگی فرتینگ، تعیین نوع لغزش است. دو عامل رایج قابل کنترل در آزمون خستگی فرتینگ دامنه، لغزش و نیروی عمودی است. نیروی عمودی روی توزیع فشار تاثیر می‌گذارد که علاوه بر آن از مواردی مانند مشخصات تماس و هندسه نیز تاثیر می‌پذیرد. در شکل (۵) نقشه شرایط کارکردی فرتینگ<sup>۳۱</sup> و همچنین در ادامه رابطه آن با نقشه پاسخ ماده در شرایط فرتینگ<sup>۳۲</sup> آورده شده‌است [۱]. تخریب ناشی از خستگی فرتینگ به‌طور معمول در نواحی فرتینگ هاشور خورده در شکل (۵) رایج‌تر است. مرز ناحیه «ترک خوردن»<sup>۳۳</sup> نمایشگر، آستانه آسیب خستگی فرتینگ است. تا زمانی که دامنه لغزش اندک باشد، افزایش نیروی عمودی باعث ورود به ناحیه آستانه آسیب خستگی فرتینگ نمی‌شود [۵].

آزمون خستگی فرتینگ از لحاظ نوع اعمال بار به سه دسته تقسیم می‌شود. شکل (۶) نشان دهنده انواع بارگذاری آزمون خستگی فرتینگ است. بیشتر آزمون‌های خستگی



شکل (۸): انواع هندسه پد سایشی [۵].

توزیع فشار نرمال شده برحسب نسبت ذکر شده در شکل (۹) آمده است [۵]. به ترتیب، نسبت صفر یا نسبت ۱ معادل حالت تماس استوانه‌ای هرتز<sup>۳۹</sup> و یا حالت تخت<sup>۴۰</sup> است [۲۰].



شکل (۹): توزیع فشار هندسه‌های متفاوت پد سایشی [۵].

به‌طور کلی، استفاده از بارگذاری تک محوره به دلیل کنترل راحت‌تر شرایط سطح تماس و مدل‌سازی ساده‌تر ترجیح داده می‌شود. با این حال ممکن است در بارگذاری خمشی نیاز به انجام عملیات سطحی برای ایجاد تنش پسماند فشاری در نمونه باشد [۲۱ و ۲۲]. در هنگام اجرای آزمون عوامل متفاوتی نظیر میانگین و دامنه نیروها وارد بر نمونه خستگی، نیروی عمودی وارد بر پد سایشی، دامنه جابجایی، نیروی مماسی متغیر، فرکانس بارگذاری و شرایط محیطی باید کنترل شود. همچنین در آزمون خستگی فرتینگ، سطوح دارای تماس باید تراز و هم‌سطح باشند.

### ● دستگاه آزمون خستگی فرتینگ (FFT)

برای اجرای آزمون خستگی در دانشگاه سمنان، از دستگاه آزمون خستگی خمش دورانی دو نقطه استفاده می‌شود. نوع

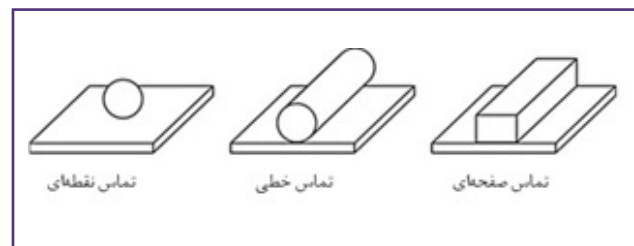
یک سمت نمونه از مواد غیرمخرب مانند تفلون استفاده می‌شود و آسیب فرتینگ تنها به یک سمت نمونه محدود می‌شود [۵]. دو نوع پیکربندی رایج برای اعمال بار هم فاز مماسی در این نوع آزمون وجود دارد. نوع اول شامل بازوهای متصل شده در راستای محور نمونه به‌منظور اعمال بار می‌شود [۱۳ و ۱۴]. در روش دیگر، از یک شاسی فرتینگ مخصوص که به قاب دستگاه متصل شده و پدهای سایشی را به شکل متقارن روی نمونه آزمون فشار می‌دهد، استفاده می‌شود [۱۵ تا ۱۸].<sup>۳۷</sup>

### ● آزمون خستگی فرتینگ گیردار

همان‌طور که در شکل (۶-ج) نشان داده شده‌است، در آزمون خستگی فرتینگ گیردار، پدیده خستگی فرتینگ در ناحیه گیردار رخ می‌دهد. پدهای سایشی در این نوع آزمون غالباً صاف با لبه‌های خمیده<sup>۳۸</sup> هستند [۱۹]. از آن جایی که شرایط لغزش کامل در داخل گیره ممکن نیست، در این آزمون نوع سایش به لغزش نسبی محدود می‌شود. در این نوع آزمون نیروی مماسی در سطح تماس، همان نیروی محوری اعمال شده به سیستم است [۵].

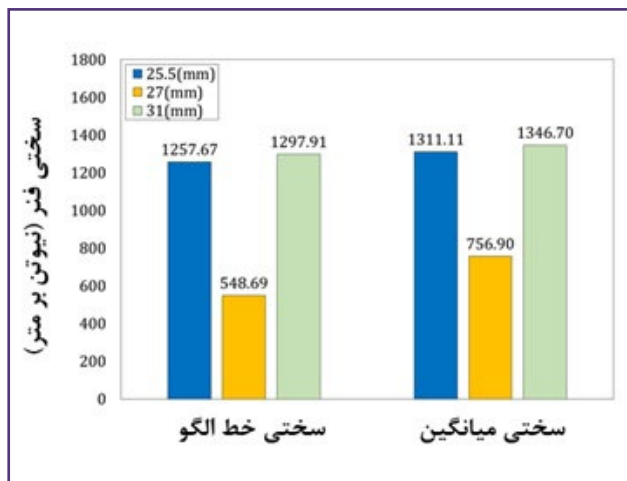
### ● موارد مشترک در تمامی انواع آزمون خستگی

یکی از موارد اصلی در هنگام اجرای آزمون خستگی فرتینگ، کنترل مقدار نیروی عمودی و ثابت نگه داشتن آن است. از این رو، اعمال نیروی عمودی باید به‌طور فعال کنترل شود یا از انطباق کافی برخوردار باشد به طوری که نیروی عمودی با وجود تغییرات سطح ناشی از انتقال مواد یا سایش، تقریباً ثابت بماند. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده‌است، خستگی فرتینگ از لحاظ نوع تماس فرتینگ به سه دسته تماس نقطه‌ای، تماس خطی و تماس صفحه‌ای تقسیم‌بندی می‌شود. بهتر است نوع تماس در ارائه گزارش مشخص شده باشد [۵]. این راهنما بر اهمیت کنترل و گزارش لبه شعاع تماس در ناحیه تماس تأکید کرده است.



شکل (۷): انواع تماس فرتینگ شامل نقطه، خط و سطح [۱].

دو هندسه برای پد سایشی در شکل (۸) آورده شده‌است. توزیع فشار تماسی و تنش فرتینگ حاصل به هندسه پد سایشی وابسته است. مقادیر مربوط به این هندسه با توجه به شرایط کارکردی مد نظر طراحی می‌شود. توزیع فشار تماسی به نسبت طول سطح صاف در تماس معادل  $2a$  (یا  $2c_0$  در شکل (۸)) به تمام طول تماس معادل  $2b$  وابسته است.



شکل (۱۱): مقایسه سختی میانگین و سختی واقعی فنرها [۲۶].

جدول (۲): مشخصات رینگ پیستون [۳۰]

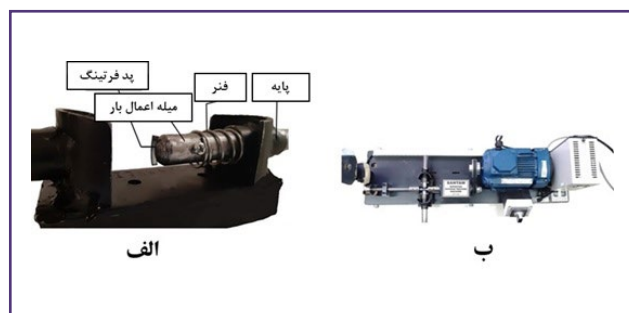
نوع فنر	مقدار نیروی هر فنر (نیوتن)	میزان جابجایی فنر (میلی‌متر)
۲۵/۵ میلی‌متری	۱۴/۶۸	۱۱/۲۰
۲۷/۰ میلی‌متری	۹/۸۳	۱۳/۰۰
۳۱/۰ میلی‌متری	۲۲/۸۹	۱۷/۰۰

همچنین به منظور بررسی تاثیر روانکاری بر رفتار خستگی فرتینگ، آزمون خستگی فرتینگ در شرایط ذکر شده با اعمال روانکار قابل تکرار است. برای بحث مطالعه تاثیر روانکاری در پدیده سایش قطعات، معمولاً به دو صورت غوطه‌وری در روغن [۲۷] و یا آغشته‌سازی با روغن [۲۸] عمل می‌شود. با توجه به اینکه فرایند روانکاری در قطعات لاینر، رینگ و پیستون موتور، برای حالت طراحی ایده‌آل، از نوع هیدرودینامیک است [۲۹]، به‌طور معمول برای اجرای آزمون خستگی فرتینگ از حالت آغشته‌سازی با روغن استفاده می‌شود.

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، از عوامل موثر بر رفتار خستگی فرتینگ، جنس پد سایشی است که با توجه به شرایط مدنظر و مدل مورد نظر انتخاب می‌شود [۱]. به‌عنوان مثال، به منظور بررسی اثر خستگی فرتینگ در پیستون موتور، برای نزدیک شدن شرایط آزمون به شرایط کاری پیستون در موتور، پدهای سایشی از رینگ پیستون استفاده در موتور، برش داده شده‌است. این پدهای سایشی از جنس چدن کروی بوده که داخل شیار میل‌ه اعمال نیرو قرار می‌گیرد. ویژگی‌های رینگ پیستون در جدول (۲) آورده شده‌است. همچنین، ریزساختار رینگ پیستون مورد استفاده به‌عنوان پد سایشی نیز، طبق مرجع [۳۰]، در شکل (۱۲) آورده شده‌است. برای بررسی رفتار خستگی آلومینیوم در مطالعات به‌طور معمول از پدهای سایشی با جنس فولاد [۳۱ تا ۳۵]، آلومینیوم [۳۶ و ۳۷] و یا تیتانیوم [۳۸] استفاده می‌شود.

بارگذاری در این دستگاه کاملاً معکوس شونده است و فرکانس بارگذاری در محدوده صفر تا ۱۲۰ هرتز قابل تنظیم است. تمامی آزمون‌های خستگی خمشی مطابق با استاندارد ISO-1143 [۲۳]، اجرا می‌شود.

به‌منظور اجرای آزمون خستگی فرتینگ، دستگاهی با نام FFT طراحی، توسعه و ساخته شده‌است که امکان اعمال نیروی سایشی به نمونه را محقق می‌کند [۲۴]. مازول اعمال بار خستگی فرتینگ، چگونگی اتصال مازول به دستگاه آزمون خستگی به ترتیب در شکل (۱۰-الف) و (۱۰-ب) آورده شده‌است.



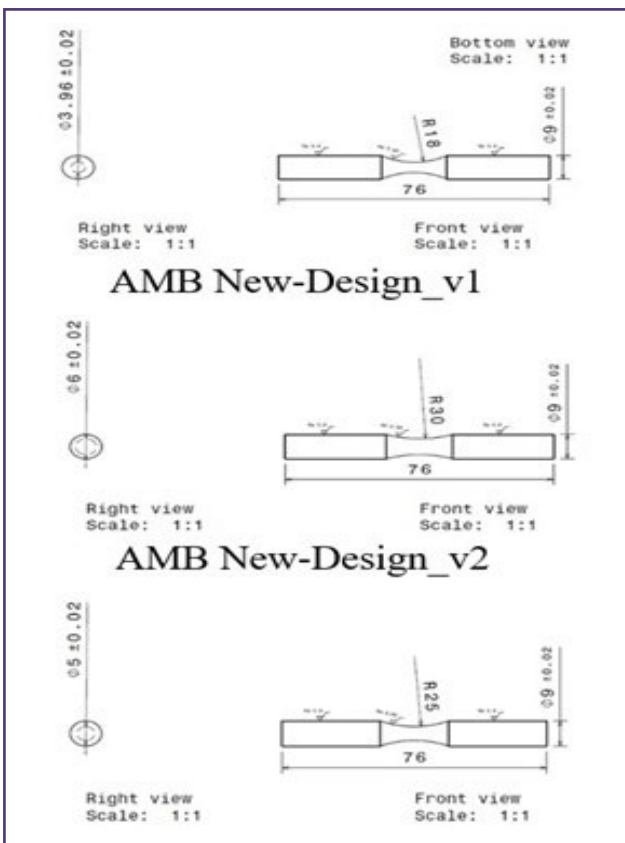
شکل (۱۰): (الف): مازول اعمال بار خستگی فرتینگ، (ب): چگونگی قرارگیری مازول فرتینگ روی دستگاه آزمون خستگی [۲۴].

لازم به ذکر است، کلیات هندسه مازول فرتینگ، نوع اعمال بار تماسی و بارگذاری خستگی فرتینگ، با مطالعه [۲۵] مطابقت دارد. به‌منظور تدارک آزمون خستگی فرتینگ، دستگاهی براساس الگوبرداری از استاندارد ASTM-E2789-10 و مراجع دیگر [۲۴ و ۲۵] طراحی و ساخته شده‌است. در این مازول، پدهای سایشی به میل‌ه اعمال نیرو متصل شده و به کمک فنر، نیروی ثابتی به نمونه آزمون وارد می‌کند. همچنین، مقدار نیروی اعمالی به نمونه در این دستگاه، با استفاده از فنرهای مختلف با سختی متفاوت قابل تغییر است. در حال حاضر، ۳ نیروی متفاوت حدودی (۱۰، ۱۵ و ۲۳ نیوتن) برای انجام آزمون خستگی فرتینگ در دسترس است. این مازول سایشی با تغییر طول فنر، نیروی متفاوت اعمال می‌کند؛ برای محاسبه نیروی سایشی مطابق رابطه (۳)، ابتدا باید سختی فنرها محاسبه شود. برای محاسبه سختی فنرها، جابه‌جایی فنر با بارگذاری‌های متفاوت محاسبه شده‌است و سختی متناسب با هر یک از بارگذاری‌ها به‌دست آمده‌است. برای محاسبه سختی میانگین صحیح هر فنر، خط روند سختی فنر به ازای نیروهای مختلف رسم و سختی صحیح، به‌دست آورده شده‌است. در شکل (۱۱) مقادیر سختی حاصل و در جدول (۱) مقدار نیروی وارد شده از طرف هر فنر آورده شده‌است [۲۶].

$$F = K \Delta l$$

رابطه (۳)

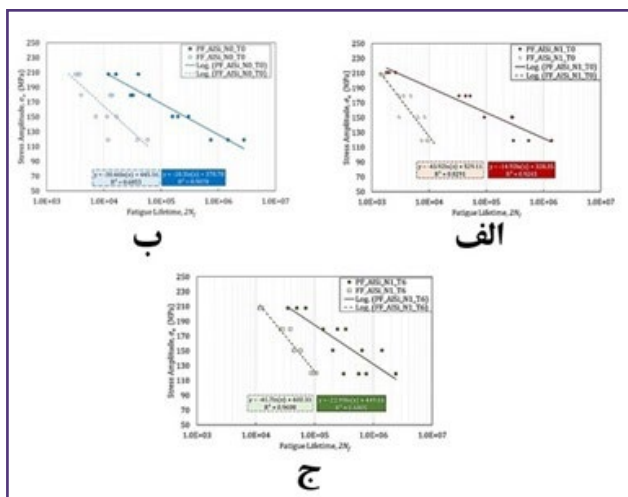




شکل (۱۳): نقشه‌های نمونه آزمون خستگی و خستگی فرتینگ طراحی شده براساس استاندارد [۳۹].

### ● داده‌های تجربی نمونه

در ادامه، برخی نتایج حاصل از آزمون خستگی فرتینگ انجام شده در آزمایشگاه رفتار مواد پیشرفته دانشگاه سمنان آمده است. در شکل (۱۴)، رفتار خستگی خمشی و خستگی فرتینگ آلیاژ آلومینیوم-سیلیکونی پیستون و همچنین نانوکامپوزیت آلیاژ پیستون و نانوکامپوزیت عملیات حرارتی شده، مقایسه شده است [۴۰].



شکل (۱۴): مقایسه رفتار خستگی خمشی و خستگی فرتینگ. (الف): بدون نانو و عملیات حرارتی، (ب): با نانو و بدون عملیات حرارتی و (ج): با نانو و عملیات حرارتی [۴۰].

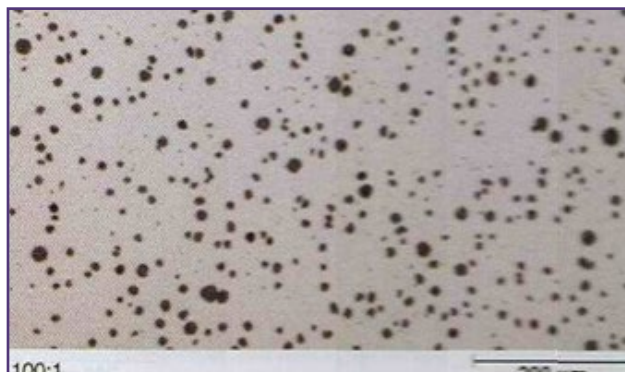
جدول (۲): مشخصات رینگ پیستون [۳۰]

چدن کرووی مارتنزیتی	جنس رینگ پیستون
۱۱/۲۰	ترکیب شیمیایی
کربن: ۳/۵ تا ۴/۱۰، سیلیسیم: ۲/۴۰ تا ۲/۸۰، منگنز: ۰/۲۰ تا ۰/۸۰	(درصد وزنی)
۱۷/۰۰	منیزیم: ۰/۰۲ تا ۰/۰۷، نیکل: حداکثر ۰/۷۰، مولیبدن: حداکثر ۰/۳۰
۳۵ تا ۴۵	سختی (راکول)
۱۸۵۰۰۰ تا ۱۴۵۰۰۰	مدول الاستیک (مگاپاسکال)
۱۳۰۰	استحکام خمشی (مگاپاسکال)

نمونه‌ها با توجه به شروطی که در استاندارد آزمون خستگی ISO1143 ذکر شد، طراحی شده است. شرایطی که در این استاندارد آورده شده است به شرح ذیل است [۳۹]:

الف) طول کمان نمونه نباید کمتر از پنج برابر کمترین قطر نمونه باشد ( $d \leq r_5$ );

ب) نسبت کوچکترین قطر به قطر بزرگ حداقل باید  $1/732$  باشد ( $D/d=1/732$ ).



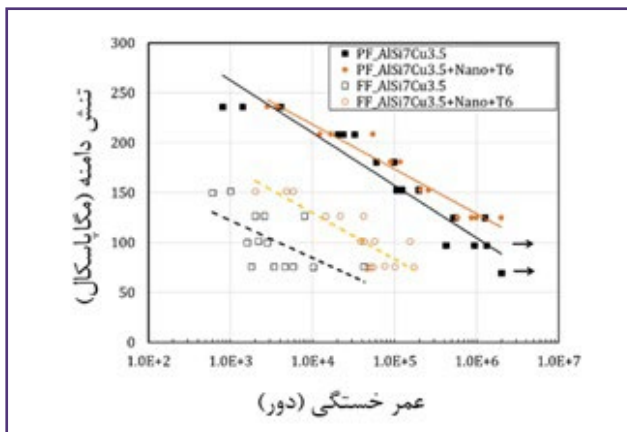
شکل (۱۲): ریزساختار رینگ پیستون [۳۰].

با توجه به شرط‌های ذکر شده در استاندارد، طراحی نمونه استاندارد براساس قطر بزرگ ۹ میلی‌متر (اندازه فک بزرگ دستگاه آزمون) صورت گرفته است و نتایج آن در جدول (۳) آمده است. در شکل (۱۳) نقشه‌های استاندارد طراحی شده آورده شده است که با توجه به جدول (۳)، تنها در نمونه V2، تمامی شروط استاندارد، رعایت شده است [۳۹].

جدول (۳): نمونه‌های آزمون خستگی [۳۹].

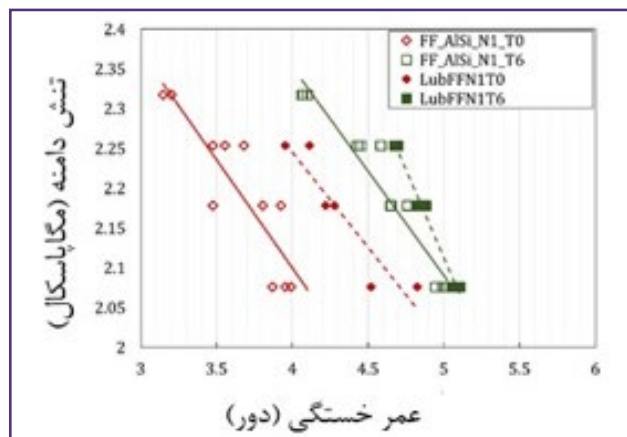
سری	نام نمونه	کمترین قطر (میلی‌متر)	شعاع انحنا (میلی‌متر)	$d \leq 5r$	$D/d=1/732$
پایه	استاندارد سنتام	۳،۹۶	۱۸	رعایت نشده	رعایت شده: ۲/۳
اولیه	V1	۶	۳۰	رعایت شده	رعایت نشده: ۱/۵
ثانویه	V2	۵	۲۵	رعایت شده	رعایت شده: ۱/۸

شکل (۱۸) نشان دهنده منحنی تنش-عمر خستگی فرتینگ آلیاژ سرسیلندر و نانوکامپوزیت عملیات حرارتی شده این آلیاژ و مقایسه آن در برابر عمر خستگی خمشی آلیاژ ذکر شده است [۴۳].



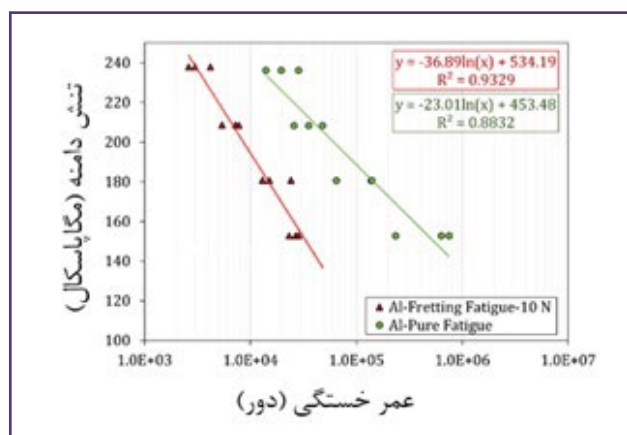
شکل (۱۸): مقایسه رفتار خستگی فرتینگ آلیاژ پایه سرسیلندر و نانوکامپوزیت عملیات حرارتی شده آلیاژ سرسیلندر [۴۳].

همچنین در شکل (۱۵) تاثیر روانکاری بر رفتار خستگی فرتینگ نانوکامپوزیت‌های پیستون با و بدون عملیات حرارتی آمده است [۴۱].



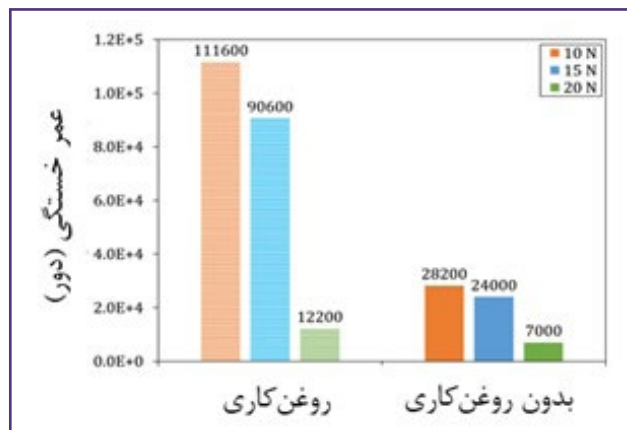
شکل (۱۵): اثر روانکاری نانوکامپوزیت پایه آلومینیومی بدون عملیات حرارتی و با عملیات حرارتی [۴۱].

شکل (۱۶) شامل مقایسه رفتار خستگی خمشی و خستگی فرتینگ آلیاژ آلومینیوم کوئچ شده است [۴۲].



شکل (۱۶): مقایسه رفتار خستگی خمشی و خستگی فرتینگ آلیاژ پیستون کوئچ شده [۴۲].

همچنین تاثیر روانکاری و تغییر نیرو فرتینگ بر عمر خستگی فرتینگ این آلیاژ در شکل (۱۷) آمده است.



شکل (۱۷): اثر اعمال روانکار و تغییر نیروی فرتینگ بر عمر خستگی فرتینگ آلیاژ پیستون کوئچ شده [۴۲].

با کمک تجهیزات آزمون و ماژول طراحی شده خستگی فرتینگ FFT آزمون خستگی خمشی و خستگی فرتینگ در دمای محیط قابل اجراست. فرکانس بارگذاری آزمون در محدوده صفر تا ۱۲۰ هرتز قابل تنظیم است. آزمون خستگی در سطوح تنشی صفر تا ۵۰۰ مگاپاسکال انجام شده است و با توجه به شرایط ماده و آزمون قابل تنظیم است. علاوه بر این موارد، مقدار نیروی فرتینگ در سه سطح ۱۰، ۱۵ و ۲۳ نیوتن قابل تنظیم است. آزمون خستگی فرتینگ در محیط روانکاری به شکل غوطه‌وری به کمک روانکارهای متفاوت از جمله روغن آدینول اکونومیک ۲۰۰ از نوع SAE-0W20 قابل اجراست. همچنین در آزمون خستگی فرتینگ پدهای سایشی نیز با توجه به شرایط مورد آزمایش انتخاب می‌شود. از جمله پدهای سایشی مورد استفاده می‌توان به پدهای سایشی از جنس رینگ پیستون چدنی اشاره کرد.

### نتیجه گیری

## پی نوشت

۱. دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان
۲. کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان
۳. کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان
۴. دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان
5. American Society for Testing and Materials (ASTM)
6. Fifth International Symposium on Fretting Fatigue (ISFF5)
7. The Japan Society of Mechanical Engineers (JSME)
8. Coefficient of Friction (COF)
9. Fretting
10. Fretting Corrosion
11. Deterioration
12. Fretting Wear
13. Displacement Amplitude
14. Fretting Damage
15. Pits
16. Scarring
17. Disruptions
18. Material Transfer
19. Surface Texture
20. Profilometry
21. Screening Metric
22. Fretting Fatigue
23. Fretting Fatigue Knockdown Factor
24. Fretting Fatigue Limit
25. Fretting Fatigue Reduction Factor
26. Fretting Fatigue Damage Threshold
27. Normal Force and Normal Pressure
28. Slip and Relative Slip
29. Gross Slip and Partial Slip
30. Reciprocating Sliding
31. Running Condition Fretting Map
32. Material Response Fretting Map
33. Cracking
34. Bridge-type Fretting Fatigue Test
35. Gauge
36. Single Clamp Fretting Fatigue Test
37. Grip-type fretting fatigue test
38. Blending Edge
39. Cylindrical Hertz Contact
40. Flat Punch
41. ADDINOL ECONOMIC 020

## مراجع

- [1] American Society for Testing and Materials: ASTM D2789, Standard Test Method for Hydrocarbon Types in Low Olefinic Gasoline by Mass Spectrometry, ASTM International, (2016)
- [2] S. Brown, Materials Evaluation under Fretting Conditions, ASTM International, (1982)
- [3] M. Attia, Fretting fatigue testing: Current practice and future prospects for standardization, In: M. Attia, R. Waterhouse, Standardization of fretting fatigue test methods and equipment, ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials, (1992) 263-275
- [4] M. Attia, R. Waterhouse, Standardization of fretting fatigue test methods and equipment, ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials, (1992)
- [5] R.W Neu, Progress in standardization of fretting fatigue terminology and testing, Tribology International, 44 (2011) 1371-1377
- [6] The Japan Society of Mechanical Engineers: JSME S015, Standard Method of Fretting Fatigue Testing, The Japan Society of Mechanical Engineers (2002)
- [7] ASTM G15-08, Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing, ASTM International, (2008)
- [8] ASTM G40-17, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, ASTM International, (2017)
- [9] A. Fenner, J. Field, A Study of the onset of fatigue damage due to fretting, Transactions of the N.E. Coast Institution of Engineers & Shipbuilders, 76 (1960) 183-228
- [10] D. Rayaprolu, R. Cook, A critical review of fretting fatigue investigations at the royal aerospace establishment. In: M. Attia, R. Waterhouse, Standardization of fretting fatigue test methods and equipment, ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials, (1992) 129-152
- [11] T. Lindley, K. Nix, Fretting fatigue in the power generation industry: Experiments, analysis, and integrity assessment, In: M. Attia, R. Waterhouse, Standardization of fretting fatigue test methods and equipment, ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials, (1992) 153-169
- [12] J. Pape, R.W Neu, Influence of contact configuration in fretting fatigue testing, Wear, (1999) 225-229
- [13] Y. Mutoh, T. Satoh, K. Tanaka, Fretting fatigue at elevated temperatures in two steam turbine steels, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 12 (1989) 409-421
- [14] D. Anton, R. Guillemette, J. Reynolds, M. Lutian, Fretting fatigue damage analysis in Ti-6Al-4V, In: J. Gregory, H. Rack, D. Eylon, Surface Performance of Titanium, TMS (1997) 187-198
- [15] D. Hoepfner, G. Goss, A new apparatus for studying fretting fatigue, The Review of Scientific Instruments, 42

(1971) 817-821

[16] D. Hills, D. Nowell, The development of a fretting fatigue experiment with well-defined characteristics, In: M. Attia, R. Waterhouse, Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment, ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials, (1992) 69-84

[17] B. Wittkowsky, P. Birch, J. Dominguez, S. Suresh, An apparatus for quantitative fretting fatigue testing, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 22 (1999) 307-320

[18] H. Murthy, P. Rajeev, M. Okane, T. Farris, Development of test methods for high temperature fretting of turbine materials subjected to engine-type loading, In: S. Kinyon, D. Hoepfner, Y. Mutoh, Fretting fatigue: Advances in basic understanding and applications, ASTM STP 1425, American Society for Testing and Materials, (2003) 273-288

[19] A. Hutson, N. Ashbaugh, T. Nicholas, An investigation of fretting fatigue crack nucleation life of Ti-6Al-4V under Flat-on-flat Contact, In: S. Kinyon, D. Hoepfner, Y. Mutoh, Fretting fatigue: Advances in basic understanding and applications, ASTM STP 1425, American Society for Testing and Materials, (2003) 307-322

[20] D. Hills, D. Nowell, Mechanics of Fretting Fatigue, Kluwer Academic Publishers, (1994)

[21] K. Nishioka, K. Hirakawa, Fundamental investigation of fretting fatigue (Part 2), Bulletin of JSME, 12 (1969) 180-187

[22] K. Sato, Determination and control of contact pressure distribution in fretting fatigue, In: M. Attia, R. Waterhouse, Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment, ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials, (1992) 85-100

[23] ISO 1143, Metallic Materials: Rotating Bar Bending Fatigue Testing, ISO International Standard, (2010)

[24] M. Azadi, M. Zolfaghari, M. Hajiesmaeili, S. Rezanezhad, Fretting Fatigue Test Machine with Functionality in Lubricant and High Temperature, Patent Number: 98399, International Category: G01N/34, (2019)

[25] A. Sarhan, E. Zalnezhad, M. Hamdi, The influence of higher surface hardness on fretting fatigue life of hard-anodized aerospace Al7075-T6 alloy, Materials Science and Engineering A, 560 (2013) 377-387

[۲۶] محمدحسین حاجی اسمعیلی، مطالعه تجربی رفتار خستگی فرتینگ در آلیاژ آلومینیم - سیلیسیم پیستون موتور، پروژه کارشناسی، دانشگاه سمنان، (۱۳۹۷).

[27] A. Kontou, R. Talor, H. Spikes, Effects of dispersant and ZDDP additives on fretting wear, Tribology Letters, 69 (2021) 6

[28] T. Chakherlou, M. Mirzajanzadeh, J. Vogwell, Effect of hole lubrication on the fretting fatigue life of double shear lap joints: An experimental and numerical study, Engineering Failure Analysis, 16 (2009) 2388-2399

[29] Pistons and engine testing, MAHLE GmbH, Springer Vieweg, (2016)

[30] Technical Report, Piston Ring, Irankhodro Powertrain Company, (2008)

[31] J. Peng, B. Wang, X. Jin, Z. Xu, J. Liu, Z. Cai, Z. Luo, M. Zhu, Effect of contact pressure on torsional fretting fatigue damage evolution of a 7075 aluminum alloy, Tribology International, 137 (2019) 1-10

[32] J. Peng, X. Jin, Z. Xu, J. Zhang, Z. Cai, Z. Luo, M. Zhu, Study on the damage evolution of torsional fretting fatigue in a 7075 aluminum alloy, Wear, 402-403 (2018) 160-168

[33] J. Peng, J. Liu, Z. Cai, M. Shen, C. Song, M. Zhu, Study on bending fretting fatigue damages of 7075 aluminum alloy, Tribology International, 59 (2013) 38-46

[34] Z. Cai, M. Zhu, X. Lin, Friction and wear of 7075 aluminum alloy induced by torsional fretting, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20 (2010) 371-376

[35] J. Muthu, Fatigue life of 7075-T6 aluminum alloy under fretting condition, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 74 (2014) 200-208

[36] S. Sangral, K. Achyuth, M. Patel, M. Jayaprakash, Effect of fretting on fatigue behavior of Al alloys considering environmental effect, Material Today Proceeding, 15 (2019) 119-125

[37] K. Kim, M. Yoon, Fretting fatigue simulation for aluminum alloy using cohesive zone law approach, International Journal of Mechanical Sciences, 85 (2014) 30-37

[38] R. Ferre, S. Fouvry, B. Berthel, R. Amargier, J. Ruiz-Sabariago, Prediction of the fretting fatigue crack nucleation endurance of a Ti-6V-4Al/Ti-6V-4Al interface: Influence of plasticity and tensile/shear fatigue properties, Procedia Engineering, 66 (2013) 803-812

[۳۹] فرهاد محمدی، بررسی تجربی و عددی اثر هندسه نمونه آزمون بر رفتار خستگی خمشی نانوکامپوزیت پایه فلزی، پروژه کارشناسی، دانشگاه سمنان، (۱۴۰۰).

[۴۰] محمدصادق اقاربپرست، مطالعه اثر استحکامبخشی ذرات نانو و عملیات حرارتی بر خواص خستگی و خستگی - فرتینگ در آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، (۱۳۹۹).

[۴۱] محمدصادق اقاربپرست، هانیه ارو، محمد آزادی، محبوبه آزادی، مطالعه اثرات روانکاری و عملیات حرارتی بر رفتار خستگی فرتینگ در نانوکامپوزیت پایه آلومینیوم، پذیرفته شده در مجله مهندسی مکانیک مدرس، (۱۴۰۰).

[۴۲] محمدصادق اقاربپرست، محمدحسین حاجی اسمعیلی، محمد آزادی، مقایسه خواص خستگی خمشی و خستگی سایشی آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیم تحت شرایط کاری سامانه رینگ- پیستون موتور، پذیرفته شده در مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، (۱۴۰۰).

[۴۳] روزبه قنادی آذر، مطالعه رفتار خستگی - سایشی آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر با و بدون ذرات نانو، پروژه کارشناسی، دانشگاه سمنان (۱۴۰۰).



## Author

Mohammad Azadi<sup>1\*</sup>  
Mohammad Sadegh Aghareb Parast<sup>2</sup>  
Mohammad Hossein Haji Esmaili<sup>3</sup>  
Roozbeh Ghanadi Azar<sup>4</sup>  
Farhad Mohammadi<sup>4</sup>

\*m\_azadi@semnan.ac.ir

1. PhD, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
2. MSc, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
3. BSc, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
4. BSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran



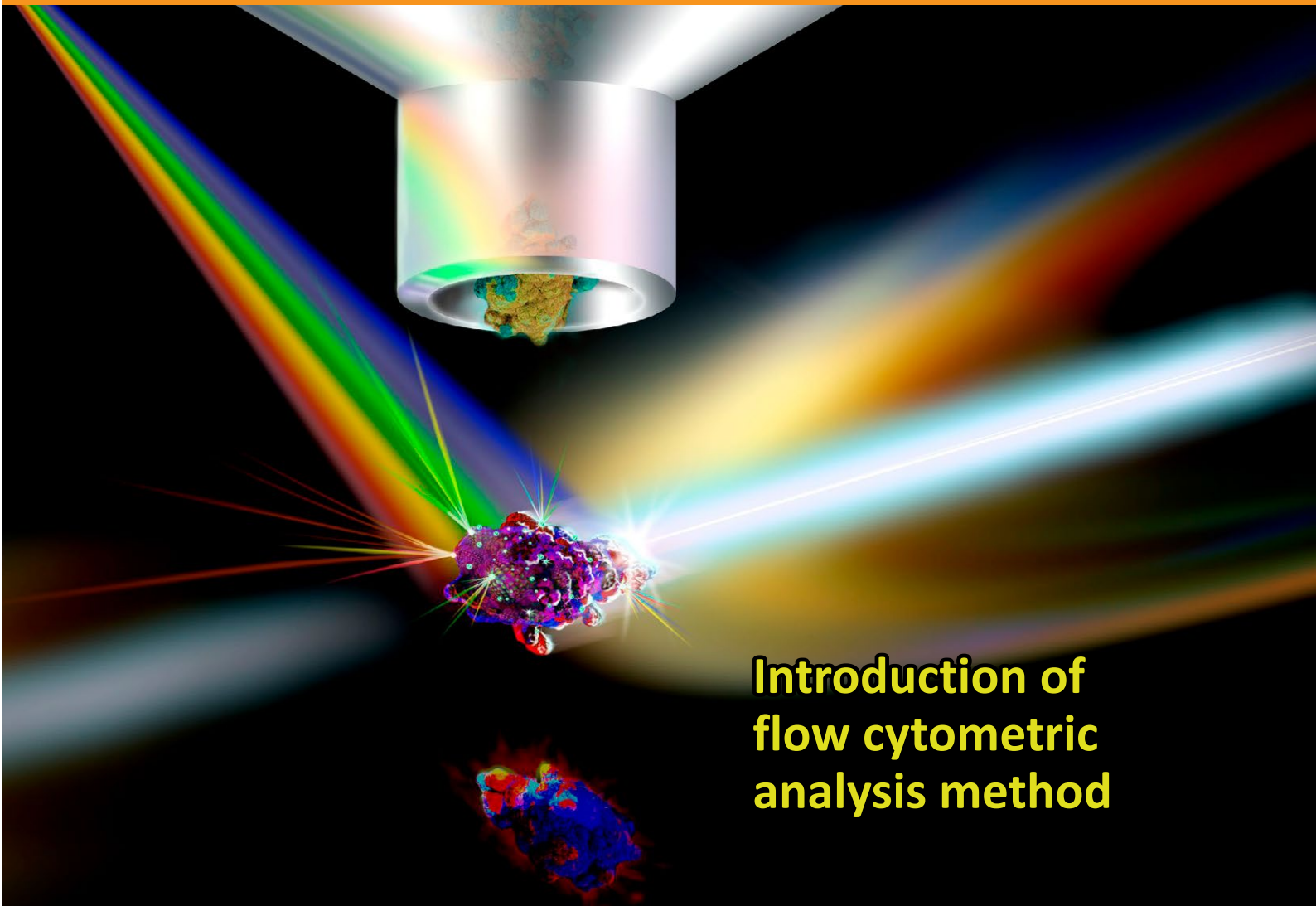
## Introduction to fretting fatigue or fatigue-wear testing of materials under bending cyclic loading

## Abstract

Fatigue and wear phenomena are the factor of major failures in industrial components and structures. If these phenomena occur with together in a mechanical part, the damage will increase. In this article, fretting fatigue or wear-fatigue testing has been introduced under bending cyclic loading. At the first stage, definitions and standards were reviewed in this field and then, details of the fretting fatigue testing device were presented in the Research laboratory of Advanced Materials Behavior, the Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University. This designed device has the capability of applying the fretting force at three levels of 10, 15 and 23 N, within the lubricant environment. Finally, some experimental data were represented by the mentioned device.

## Keywords

Wear-fatigue; Fretting fatigue; Bending loading; Testing device; Research laboratory of Advanced Materials Behavior



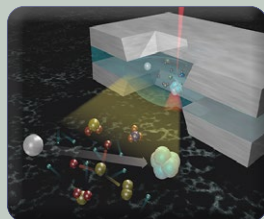
## Introduction of flow cytometric analysis method



Introduction of Real-time  
PCR method



Separation and identification of  
essential oil and triglyceride fatty  
acids in Teucricium polium plant  
by gas chromatography mass  
spectrometry method.



An introduction to In-situ  
Environmental Transmission  
Electron Microscopy equipped  
with a liquid cell



Introduction to fretting fatigue  
or fatigue-wear testing of  
materials under bending cyclic  
loading



New Applications of Nuclear  
Magnetic Resonance