

## ارزیابی مشخصه‌های نشر آوایی در جوانه زنی و رشد ترک خستگی به منظور پایش سازه‌ای به هنگام ملخ هواپیما

علی حبیب پور لداری<sup>\*</sup>، جواد شریفی قادری<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید ستاری، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید ستاری، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶)

### چکیده

با پیشرفت‌های صنعتی صورت گرفته و اعمال بارهای دینامیکی با دامنه و فرکانس بالاتر، توجه بیشتر به مسئله خستگی در آلیاژهای فلزی ضروری است. در میان روش‌های غیرمخرب، روش نشر آوایی در سال‌های اخیر به روشی استاندارد و قابل اعتماد مبدل گشته است. با هدف پایش سازه‌ای به هنگام ملخ هواپیما که در قسمت هاب دچار ترک می‌شود، در این مقاله به بررسی و تعیین مشخصه‌های نشر آوایی در رشد ترک خستگی آلومینیوم ۲۰۲۵ پرداخته شده است. تحقیق قابل ارجاعی در فرکانس بارگذاری مدنظر این پژوهش برای این آلیاژ انجام نشده است. آزمایش‌های نشر آوایی در دو بخش آزمایش خستگی خمشی با هدف جوانه‌زنی ترک ناشی از خستگی در نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۲۵ و آزمایش کشش با هدف رشد ترک خستگی انجام شده است. براساس اطلاعات نشر آوایی جمع‌آوری شده نمودارهای مختلفی رسم شد. در انتها به بررسی و مقایسه نمودارهای رسم شده و تحلیل نمودارها پرداخته شده است. با توجه به جنس فلز مورد استفاده و تحلیل نمودارهای رسم شده می‌توان روش نشر آوایی را روشی مناسب و قابل اعتماد برای تشخیص جوانه‌زنی و رشد ترک در آلومینیوم ۲۰۲۵ در ملخ هواپیماهایی که از این آلیاژ ساخته شده، معرفی کرد.

واژگان کلیدی: آزمایش خستگی خمشی، آزمایش کشش، آزمایش نشر آوایی، آلومینیوم ۲۰۲۵، شمارش ضرب آهنگ‌های نشر آوایی

### Evaluation of Acoustic Propagation Characteristics in Fatigue Crack Nucleation and Growth for Structural Monitoring of Aircraft Propeller

#### Abstract

Due to industrial advances and the application of more dynamic loads, it is necessary to pay more attention to the fatigue issue. Among non-destructive methods, the acoustic emission method has become a standard and reliable method in recent years. With the aim of online structural monitoring of the aircraft propeller that undergoes cracks in the hub part, this article investigates and determines the characteristics of acoustic emission in the growth of aluminum 2025 fatigue crack. Referable research on the loading frequency considered in this research has not been conducted for this alloy. In this project, the characteristics of acoustic emission in the fatigue crack growth of aluminum alloy 2025 for online structural monitoring have been investigated and determined. Acoustic emission tests have been performed in two parts: bending fatigue test with the aim of initiation of fatigue cracks in aluminum alloy 2025 specimens and following tensile tests with the aim of growth of fatigue cracks. According to the received acoustic emission information, various diagrams are plotted. Analyzing the results from online acoustic emission monitoring indicated that the acoustic emission method can be considered as a suitable and reliable technique for detecting crack initiation and crack growth in aluminum alloy 2025.

**Keywords:** *Bending fatigue test, Tensile test, Acoustic emission test, Aluminum Alloy 2025, Acoustic emission*

## مقدمه

### شکست‌های خستگی

شکست ناشی از خستگی شایع‌ترین نوع خرابی است زیرا ۷۵ تا ۹۰ درصد از خرابی مواد در قطعات مهندسی به دلیل بارگذاری سیکلی رخ می‌دهد [۱]. این نوع خرابی عمدتاً در سیستم‌هایی اتفاق می‌افتد که نیروی و یا گشتاور به صورت پیوسته اعمال می‌شود اما از نظر اندازه متفاوت هستند [۲ و ۳]. شکست‌هایی که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می‌دهند شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. هیچگونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می‌شکند وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده کرد [۱]. با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ، توربین و غیره که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی هستند، خستگی بیشتر متداول شده است. دلیل عمده خطرناک بودن شکست خستگی این است که به صورت ناگهانی و غیر قابل رویت بودن رخ می‌دهد [۱]. شروع شکست قطعه در اثر خستگی، ایجاد ترک‌های میکروسکوپی و سپس رشد آن‌ها است. رشد ترک تا زمانی ادامه می‌یابد که سطح مقطع فلز به قدری کم شود که تنش روی آن، از استحکام نهایی فلز بیشتر شده تا شکست ترد در نمونه اتفاق بیافتد. به همین دلیل شکست از نوع ناگهانی خواهد بود. معمولاً سطح شکست در مقیاس ماکروسکوپی بر جهت تنش کششی اصلی عمود است. سطح شکست خستگی از یک ناحیه هموار حاصل از عمل سایش با رشد ترک در مقطع و یک ناحیه ناهموار که در هنگام عدم تحمل بار توسط مقطع، در قطعه به صورت نرم شکسته شده است تشکیل می‌شود [۴].

### نشر آوایی

روش‌های آزمایش غیر مخرب، به ویژه روش نشرآوایی، در پایش وضعیت بسیاری از سازه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. نشرآوایی به عنوان یک پدیده می‌تواند به عنوان امواج الاستیک گذرا ناشی از میکرو جابجایی‌های

داخلی در مواد سازه‌های آزمایش شده تعریف شود [۶]. نشر آوایی طبق تعریف موسسه آزمایش و مواد آمریکا به کلاسی از پدیده‌های دینامیکی اطلاق می‌شود که در آن‌ها امواج الاستیک گذرا به علت آزاد شدن سریع انرژی کرنشی از منابع متمرکز درون جسم و به وجود آمدن تغییر شکل دائم در مواد تحت تنش به وجود می‌آیند [۷]. به لطف حساسیت بالا، این روش می‌تواند فرآیندهایی مانند تشکیل و رشد میکرو ترک، حرکت نابه‌جایی، شکست، لغزش یا جداشدن رسوبات را تشخیص دهد. منابع اصلی نشر آوایی در فلزات فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک و رشد ترک هستند که مکانیزم‌های آزادسازی انرژی در مقیاس ریزساختار کریستالی هستند.

روش نشرآوایی نسبت به سایر روش‌های آزمایش غیر مخرب دارای مزایایی از جمله دینامیک بودن این روش بازرسی و توانایی نمایش رشد ترک‌ها به صورت آنلاین در سازه تحت بارگذاری و حین سرویس‌دهی می‌باشد. سرعت بالای انجام آزمایش، تعیین موقعیت عیوب به صورت دقیق، راندمان بالا، حساسیت کمتر به هندسه قطعه نسبت به سایر روش‌ها و تشخیص عیوب بسیار کوچک و در مقیاس میکرو از دیگر مزایای این روش می‌باشد [۵].

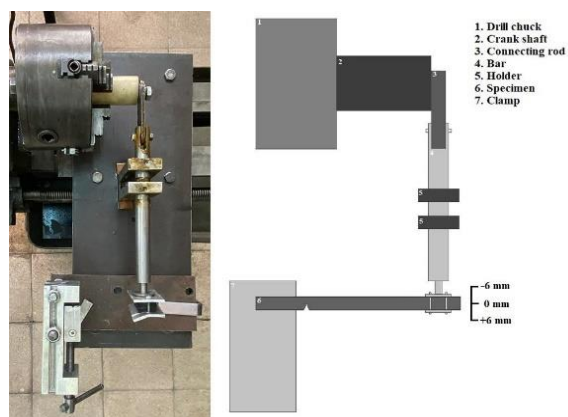
### نمونه‌ها و تجهیزات آزمایشگاهی

#### نمونه‌های آزمایشگاهی آلومینیوم ۲۰۲۵

جهت تعیین جنس ملخ و نمونه‌های استخراج شده از آن، آزمایش تعیین ترکیب شیمیایی بر روی قطعه کوچکی از ملخ انجام شد. براساس نتیجه این آزمایش جنس ملخ هواپیمای بونانزا F33 با توجه آلیاژهای استفاده شده در ملخ و استاندارد آمریکایی آلومینیوم ۲۰۲۵ تعیین گردید. با توجه به محدودیت ابعاد ملخ و ممکن نبودن استخراج نمونه با ابعاد استاندارد در مرجع استاندارد ASTM-E855-08 از ملخ، ابعاد نمونه آزمایش بسیار نزدیک به ابعاد استاندارد انتخاب می‌شود [۸].

براین اساس به ترتیب طول، عرض و ضخامت نمونه برابر با

به نمونه جهت خستگی را از موتور این ماشین دریافت می‌کند. حرکت دورانی ایجاد شده به وسیله موتور از طریق میله لنگ متصل به سه‌نظام دستگاه و میله اتصال به حرکت خطی تبدیل می‌شود. سپس این حرکت خطی به وسیله میله راهنما به یک سمت نمونه منتقل می‌شود. سمت دیگر نمونه به وسیله گیره ثابت شده تا فقط در یک سمت شاهد جابه‌جایی باشیم. شکل ۲ نشان دهنده شماتیک و اجزای دستگاه خستگی خمشی می‌باشد. آزمایش خستگی خمشی در شرایط بارگذاری جابه‌جایی ثابت با میزان ۱۲ میلی‌متر در هر سیکل به صورت خمشی یکسر گیردار انجام می‌شود.



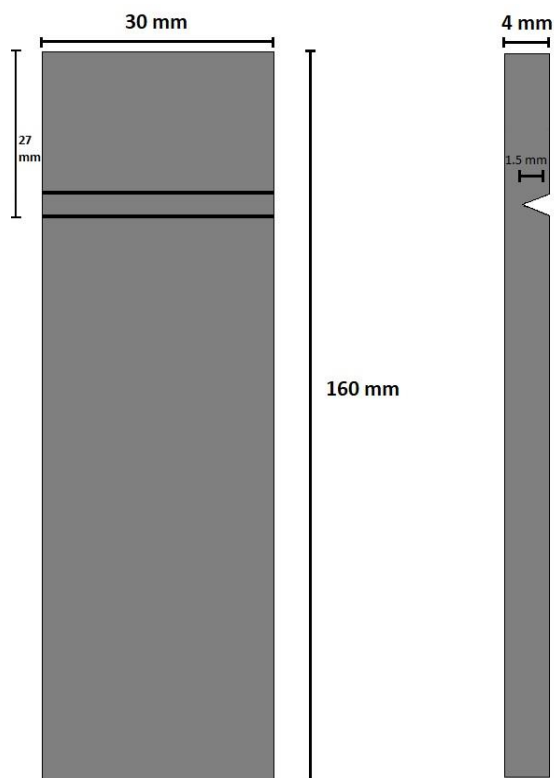
شکل ۲. شماتیک و اجزای دستگاه خستگی خمشی

### دستگاه کشش

در آزمایش کشش با هدف ثبت سیگنال‌های ساطع شده از رشد ترک خستگی در آلومینیوم ۲۰۲۵ نیازمند رشد دادن ترک جوانه‌زده شده در آزمایش خستگی خمشی به وسیله دستگاه کشش هستیم. این دستگاه ساخت شرکت HIWA می‌باشد و دارای دو فک برای اتصال دو سمت نمونه و لودسل جهت اندازه‌گیری نیروی کششی می‌باشد. شکل ۳ نشان دهنده شماتیک دستگاه کشش می‌باشد. نمونه‌های ترک‌دار از دو طرف به دو فک دستگاه بسته می‌شود و پس تعیین سرعت کشش، (سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه در این آزمایش) فک بالایی دستگاه با سرعت تعیین شده شروع به حرکت به سمت بالا کرده و ترک جوانه‌زده شده شروع به رشد می‌کند.

۱۶۰ میلی‌متر، ۳۰ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر انتخاب و نمونه‌هایی با این ابعاد از ملخ استخراج می‌شود.

ضمناً جهت شروع و جوانه‌زنی ترک شیاری با ضخامت ۱.۵ میلی‌متر و ۱۰.۲۵ میلی‌متر عرض به موازات عرض قطعه و در فاصله ۲۷ میلی‌متری در راستای طول قطعه ایجاد می‌شود. این شیار به افزایش سرعت جوانه‌زنی ترک در نمونه کمک می‌کند. شکل ۱ نشان دهنده ابعاد نمونه آلومینیوم ۲۰۲۵ می‌باشد.



شکل ۱. ابعاد نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۲۵

### دستگاه خستگی خمشی

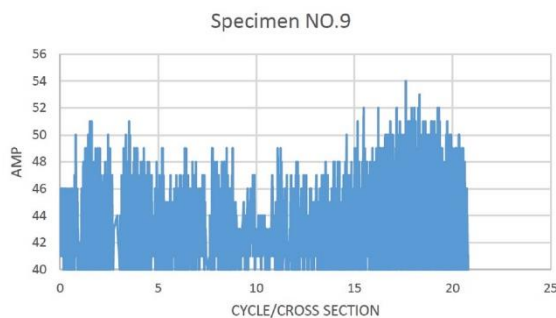
در آزمایش‌های خستگی خمشی با هدف جوانه‌زنی ترک از محل شیار ایجاد شده در نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۲۵ نیازمند دستگاه خستگی خمشی هستیم. دستگاه خستگی طراحی شده برای آزمایش نمونه‌های آلومینیوم ۲۰۲۵ بر روی یک ماشین تراشکاری سوار می‌شود و گشتاور و نیروی اعمال شده

### نتایج آزمایش خستگی خمشی (جوانه زنی ترک) نمودار دامنه سیگنال برحسب سیکل استاندارد

اولین نمودار رسم شده نمودار دامنه برحسب سیکل نرمالیزه شده است. این نمودار در هر سیکل استاندارد شده میزان دامنه سیگنال را بیان می‌کند. این نمودار از این جهت که قابل تشخیص بودن سیگنال‌ها را تعیین می‌کند و همچنین مستقیماً با بزرگی واقعه‌ای که در منبع رخ داده متناسب است، دارای اهمیت زیادی می‌باشد [۹۵ و ۱۰].

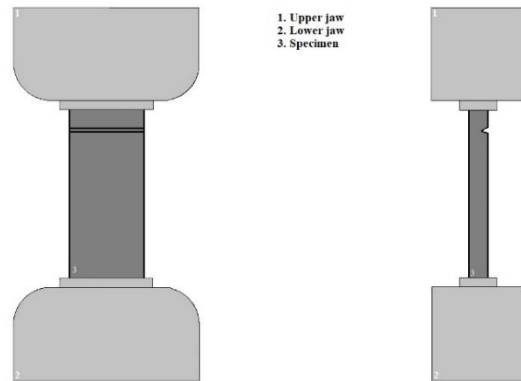
پس از بررسی نمودار دامنه برحسب سیکل برای همه نمونه‌ها مشخص شد، در هر نمونه در چرخه‌ای متفاوت دامنه سیگنال شروع به افزایش شدید می‌کند سپس این میزان به حداکثر خود می‌رسد و دوباره شروع به کاهش می‌کند. دامنه سیگنال شروع تغییرات در حدود ۸۰٪ تا ۹۶٪ حداکثر دامنه سیگنال در نمونه‌ها است.

این افزایش دامنه سیگنال در نمودارها نشان دهنده وقوع اتفاقی درون نمونه مورد آزمایش است. به عنوان مثال در نمودار دامنه سیگنال برحسب سیکل نرمالیزه شده نمونه شماره ۹ که در شکل ۴ آورده شده است. دامنه سیگنال در سیکل استاندارد شده ۱۵ پس از افزایش به میزان ۵۲ دسی‌بل می‌رسد، سپس این میزان دوباره افزایش می‌یابد تا در سیکل ۱۸ به حداکثر مقدار خود که ۵۴ دسی‌بل است می‌رسد و پس از آن شروع به کاهش می‌کند.



شکل ۴. نمودار دامنه برحسب سیکل استاندارد برای نمونه شماره ۹

جدول ۱ نشان دهنده دامنه سیگنال شروع تغییرات و همچنین حداکثر دامنه سیگنال در ۹ نمونه آزمایش می‌باشد.



شکل ۳. شماتیک مکانیزم کشش

### سیستم نشر آوایی

این سیستم شامل سنسور نشر آوایی، پیش تقویت‌کننده و نرم افزار نشر آوایی می‌باشد. سنسور نشر آوایی مورد استفاده در این آزمایش از جنس Lead-Zirconate با قطر ۵ میلی‌متر و ارتفاع ۴ میلی‌متر از نوع پهنای باند می‌باشد و از طریق کابل به پیش تقویت‌کننده متصل می‌شود. پیش تقویت‌کننده دارای یک ورودی می‌باشد که می‌تواند سیگنال دریافت شده از سنسور نشر آوایی را با ضرایب ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دسی‌بل تقویت می‌کند که در این آزمایش از ضریب ۴۰ دسی‌بل استفاده شده است و از قسمت خروجی به وسیله کابل و جهت پردازش به رایانه ارسال می‌کند. نرم افزار نصب شده بر روی رایانه AEwin for PCI-2 نام دارد که امکان تنظیم پارامترهای آزمایش نشر آوایی، تفسیر، نمایش و تحلیل شکل موج، تنظیم و نمایش چند نمودار در صفحه، مقایسه چند نمودار و... را برای ما فراهم می‌کند.

میزان حد آستانه براساس نویزهای محیط اطراف در آزمایش خستگی خمشی ۴۵ دسی‌بل و در آزمایش کشش ۲۰ دسی‌بل، میزان فرکانس بین ۲۰ کیلوهرتز تا ۱ مگا هرتز و سرعت نمونه برداری ۲ مگاهرتز بر ثانیه در نرم افزار نشر آوایی مشخص گردید.

### بررسی نتایج

بررسی زیرسیستم‌های گوناگونی که در ادامه بیان شده است، لازمه مدل‌سازی سیستم‌ها در سوخت‌رسانی هوایی می‌باشند.

جدول ۱. دامنه سیگنال شروع تغییرات و حداکثر دامنه  
سیگنال برای هریک از ۹ نمونه

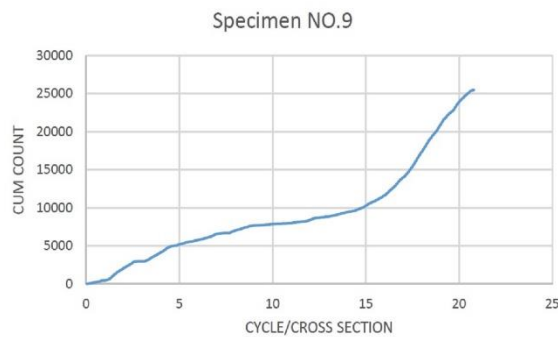
شماره نمونه	دامنه سیگنال شروع تغییرات (dB)	حداکثر دامنه سیگنال (dB)
۱	۵۲	۶۵
۲	۴۰	۵۰
۳	۳۳	۴۰
۴	۶۳	۷۵
۵	۶۸	۷۶
۶	۶۵	۶۹
۷	۶۲	۶۵
۸	۵۳	۵۵
۹	۵۲	۵۴

نتایج بدست آمده نمودار شمارش ضرب آهنگ تجمعی  
برحسب سیکل استاندارد بررسی می‌شود.

برای بررسی و تحلیل تغییرات در نمودارهای تجمعی از تغییر  
شیب در قسمت‌های مختلف نمودار استفاده می‌شود. پس از  
بررسی شیب در قسمت‌های مختلف نمودار شمارش ضرب  
آهنگ‌های تجمعی برحسب سیکل استاندارد مشخص شد،  
پیش از سیکل استاندارد ۱۰ در تمامی نمونه‌ها افزایش شیب  
مشاهده می‌شود که علت این افزایش شیب، ناپایداری شرایط  
در ابتدای آزمایش است. پس از شروع همزمان سیستم نشر  
آوایی و دستگاه آزمایش خستگی خمشی، سنسورهای نشر  
آوایی نویز صوتی حاصل از لرزش مکانیکی دستگاه پس از  
استارت را دریافت می‌کنند و به صورت سیگنال نشر آوایی  
نمایش می‌دهند که باعث افزایش شیب در نمودار شمارش  
ضرب آهنگ می‌شود. پس از آن شیب تقریباً به طور یکنواخت  
ادامه می‌یابد تا در همان سیکل استاندارد که دامنه  
سیگنال‌ها شروع به افزایش می‌کردند شیب نمودار ضرب  
آهنگ‌های تجمعی برحسب سیکل استاندارد نیز شروع به  
افزایش شدید می‌کند. نمودار شمارش ضرب آهنگ تجمعی  
برحسب سیکل استاندارد برای نمونه شماره ۹ در شکل ۵  
آورده شده است.

### نمودار شمارش ضرب آهنگ‌های تجمعی برحسب سیکل استاندارد

شمارش ضرب آهنگ تعداد پالس‌هایی است که از مقدار  
آستانه تعیین شده عبور می‌کند [۹ و ۱۰]. نمودار ضرب  
آهنگ تجمعی برحسب سیکل نرمالیزه شده، در هر سیکل  
استاندارد مجموع تعداد شمارش آن سیکل را با سیکل‌های  
قبلی نمایش می‌دهد. تعداد شمارش ضرب آهنگ‌ها بیانگر  
حوادث درونی ماده می‌باشد [۱۱]. بنابراین در جایی که  
شمارش ضرب آهنگ‌ها به بیشترین مقدار می‌رسند، آهنگ  
اتفاقات درونی ماده نیز در بیشترین حد خود قرار دارد. پس  
از بررسی نمودار دامنه برحسب سیکل استاندارد و مشخص  
شدن سیکل شروع تغییرات در هر نمونه، جهت اطمینان از



شکل ۵. نمودار شمارش ضرب آهنگ‌های تجمعی برحسب  
سیکل استاندارد برای نمونه شماره ۹  
برای مثال در نمونه شماره ۹ که در بخش نمودار دامنه  
سیگنال برحسب سیکل استاندارد نیز مورد بررسی قرار گرفت،

جدول ۲ نشان دهنده حداکثر شمارش ضرب آهنگ و همچنین سیکل شروع تغییرات برای هر نمونه می باشد. جدول ۲. حداکثر شمارش ضرب آهنگ و سیکل شروع تغییرات برای هر یک از ۹ نمونه

شماره نمونه	سیکل شروع تغییرات	حداکثر شمارش ضرب آهنگ
۱	۶۴	۵۲۳
۲	۱۵	۱۱۱
۳	۳۹	۱۳
۴	۸	۴۳۶
۵	۱۰۲	۳۹۶
۶	۱۱	۷۰
۷	۶	۴۸
۸	۱۱	۶۷
۹	۱۵	۳۹

### نتایج آزمایش کشش (رشد ترک)

#### نمودار تنش- کرنش آلومینیوم ۲۰۲۵

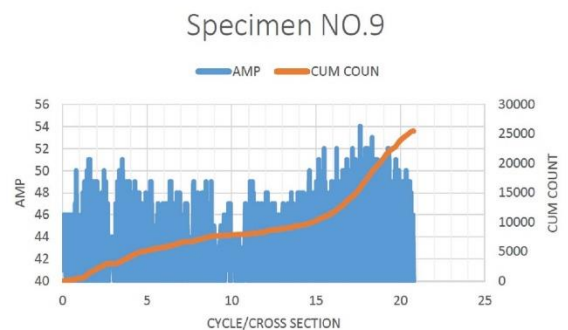
منحنی تنش-کرنش از بارگذاری اجسام با سرعت ثابت و اندازه گیری میزان تغییر شکل در آزمون کشش بدست می آید. در این آزمایش نمونه سالم و بدون ترک بر روی دستگاه کشش نصب می شود و با سرعت ۱ میلی متر بر ثانیه کشیده می شود. با استفاده از نتایج این آزمایش، منحنی تنش-کرنش رسم می شود و میزان تنش تسلیم و تنش نهایی در آلومینیوم ۲۰۲۵ بدست می آید.

پس از آزمایش و با رسم منحنی تنش-کرنش میزان تنش نهایی برابر با ۳۸۱.۶۷ MPa و میزان تنش تسلیم ۲۷۵ MPa بدست آمد. در مراجع میزان تنش نهایی برای آلومینیوم T۳-

در سیکل استاندارد ۱۵ که شروع تغییرات است دارای شمارش ضرب آهنگ تجمعی ۱۰۲۵۹ است و در سیکل استاندارد ۲۰ که پایان این تغییرات است دارای ضرب آهنگ تجمعی ۲۳۸۹۳ می باشد. شیب قسمت تغییرات در نمودار برابر با ۲۸۷۰ است که نسبت به شروع آزمایش تا پیش از تغییرات که شیب برابر ۷۰۳ است ۴ برابر شده است. در تمامی نمونه ها این افزایش شیب شدید بطور محسوس قابل مشاهده است.

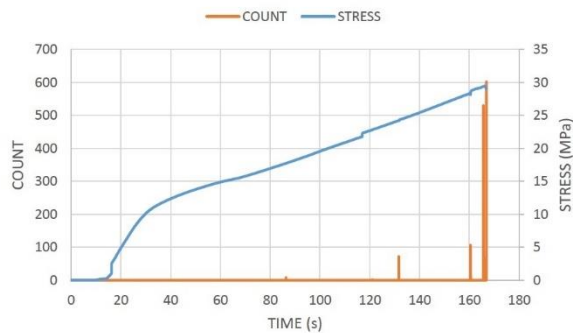
همانطور که ذکر شد در جایی که شمارش ضرب آهنگ ها به بیشترین مقدار خود می رسند، آهنگ اتفاقات درونی ماده نیز در بیشترین حد خود قرار دارد، در تمامی نمونه ها نیز بیشترین مقدار شمارش ضرب آهنگ در همین محدوده تغییرات قرار دارد. با توجه به مطالب ذکر شد، بررسی نمودارها و شیب قسمت های مختلف نمودار می توان به این نتیجه رسید که شروع جوانه زنی ترک زمانی رخ می دهد که شیب نمودار به صورت شدیدی افزایش می یابد. این افزایش شیب در بین نمونه های آزمایش شده از ۴ برابر تا ۱۶ برابر شیب پیش از شروع ترک متغیر می باشد.

برای درک بهتر همزمانی افزایش دامنه سیگنال و افزایش شیب نمودار شمارش ضرب آهنگ های تجمعی، نمودار دامنه و شمارش ضرب آهنگ های تجمعی برحسب سیکل استاندارد رسم شد. شکل ۶ نمودار دامنه سیگنال و ضرب آهنگ های تجمعی برحسب سیکل استاندارد برای نمونه شماره ۹ را نشان می دهد.



شکل ۶. نمودار دامنه و شمارش ضرب آهنگ های تجمعی برحسب سیکل استاندارد برای نمونه شماره ۹

پس از بررسی نمودارهای شمارش ضرب آهنگ‌ها و تنش برحسب زمان مشخص شد، با افزایش تنش که خود از تقسیم نیروی کششی بر سطح مقطع نمونه حاصل می‌شود، شمارش ضرب آهنگ‌ها نیز افزایش می‌یابد. همانطور که در پاراگراف قبل ذکر شد، این افزایش شمار ضرب آهنگ‌ها مربوط به رشد ترک در نمونه آلومینیومی می‌باشد. با توجه به شکل ۸ که نمودار شمارش ضرب آهنگ‌ها و تنش برحسب زمان را برای نمونه شماره ۱ نشان می‌دهد، شمارش ضرب آهنگ‌ها به صورت پیوسته افزایش نمی‌یابد و افزایش ضرب آهنگ‌ها پس از افزایش شیب نمودار تنش اتفاق می‌افتد.

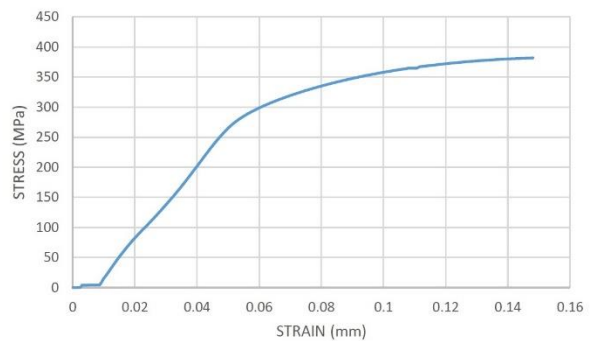


شکل ۸. نمودار شمارش ضرب آهنگ‌ها و تنش برحسب زمان

در تمامی نمونه‌ها شمارش ضرب آهنگ در انتهای زمان آزمایش به شدت افزایش می‌یابد که این افزایش فعالیت نشر آوایی نشان دهنده بیشترین میزان رشد ترک در طول آزمایش یا افزایش نرخ رشد ترک با افزایش نیرو می‌باشد.

بیشترین میزان رشد شمارش ضرب آهنگ‌ها برای نمونه شماره ۱ از زمان ۱۶۰ ثانیه تا ۱۶۷ ثانیه رخ داده است جایی که بیشترین میزان رشد ترک مشاهده می‌شود. شکل ۹a نشان دهنده وضعیت ترک پیش از آزمایش کشش می‌باشد، زمانی که در آزمایش خستگی خمشی بلافاصله پس از مشاهده جوانه‌زنی ترک آزمایش متوقف شده است. شکل ۹b مربوط به پس از افزایش شمارش ضرب آهنگ‌ها در ثانیه ۱۶۰ می‌باشد جایی که شمارش ضرب آهنگ تا ۱۰۶ افزایش می‌یابد و میزان شمارش ضرب آهنگ تجمعی به ۱۸۹ می‌رسد. شکل ۹c نیز مربوط به زمان ۱۶۷ ثانیه جایی که با افزایش شدید

۲۰۲۵ برابر با ۴۰۰ MPa ذکر شده است [۱۲]. شکل ۷ نشان دهنده منحنی تنش- کرنش آلومینیوم ۲۰۲۵ می‌باشد. اختلاف میان تنش اندازه‌گیری شده و تنش مراجع به علت عمر نمونه استفاده شده در آزمایش است زیرا با افزایش عمر آلومینیوم‌هایی که دارای ترکیبات مس هستند، این آلومینیوم‌ها تردتر می‌شوند.



شکل ۷. نمودار منحنی تنش-کرنش آلومینیوم ۲۰۲۵

### نمودار شمارش ضرب آهنگ‌ها و تنش برحسب زمان

پس از انجام آزمایش کشش بر روی ۵ نمونه از نمونه‌های ترک- دار شده در آزمایش خستگی خمشی نوبت به رسم نمودارهای شمارش ضرب آهنگ‌ها و تنش برحسب زمان می‌رسد. این نمودار نشان دهنده میزان شمارش ضرب آهنگ و تنش در هر لحظه از زمان آزمایش می‌باشد. با توجه به اینکه تمامی منابع تولید سیگنال‌های اضافی و نویز مسدود شده، سیگنال‌های دریافتی مربوط به فعالیت‌های نشر آوایی داخل نمونه مورد آزمایش می‌باشد. در حالت کلی این فعالیت‌های نشر آوایی ممکن است در نتیجه تغییر شکل پلاستیک در نمونه یا رشد ترک خستگی ایجاد شده در نمونه باشد. با توجه به اینکه نمونه مورد آزمایش، نمونه آلومینیوم ۲۰۲۵ با عمر بالا و جنس شکننده و ترد می‌باشد و نشانه‌ای از تغییر شکل در نمونه مشاهده نمی‌شود، سیگنال‌های دریافت شده توسط سنسور نمی‌تواند سیگنال تغییر شکل پلاستیک باشد و این سیگنال‌ها ناشی از رشد ترک خستگی می‌باشند.

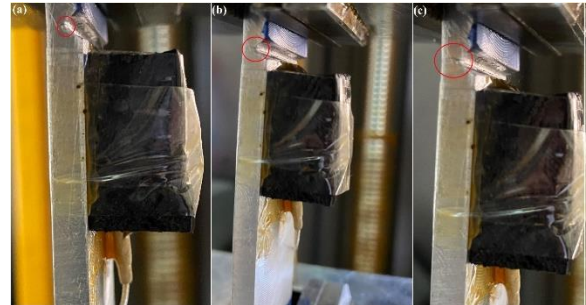


و افزایش شدید شیب نمودار ضرب آهنگ‌های تجمعی در یک سیکل استاندارد اتفاق می‌افتد که این زمان را می‌توان به شروع جوانه‌زنی ترک نسبت داد. شیب نمودار ضرب آهنگ-های تجمعی برحسب سیکل استاندارد در زمان شروع جوانه-زنی ترک بیش از چهار برابر این شیب از زمان شروع آزمایش افزایش می‌یابد.

بخش دوم آزمایش‌ها، آزمایش کشش با هدف رشد ترک ایجاد شده در مرحله قبل و ثبت سیگنال‌های نشر آوایی ناشی از رشد ترک خستگی در آلومینیوم ۲۰۲۵ انجام شد. جهت تعیین وضعیت نمونه‌ها و رسم نمودار تنش-کرنش ابتدا آزمایش کشش بر روی نمونه سالم و بدون شیار آلومینیوم ۲۰۲۵ انجام شد. پس از رسم نمودار تنش-کرنش میزان تنش تسلیم برابر  $275\text{MPa}$  و میزان تنش نهایی برابر  $381.67\text{MPa}$  بدست آمد.

بررسی پارامترها و نمودار شمارش ضرب آهنگ‌ها و تنش برحسب زمان در آزمایش کشش نشان دهنده افزایش شمارش ضرب آهنگ‌ها با افزایش میزان نیرو می‌باشد. به طوری که بیشترین میزان رشد ترک در اواخر زمان هر آزمایش رخ می‌دهد، زیرا که بیشترین میزان شمارش ضرب آهنگ‌ها که نشان دهنده اتفاقات درونی یک ماده می‌باشد در اواخر زمان آزمایش مشاهده شده است. افزایش شمارش ضرب آهنگ‌ها در مرحله افزایش بارگذاری نشان دهنده رشد ترک می‌باشد.

ضرب آهنگ‌ها ابتدا در زمان ۱۶۵ ثانیه به میزان ۵۳۰ و سپس در زمان ۱۶۶ ثانیه به میزان ۶۰۲ می‌باشیم. میزان شمارش ضرب آهنگ تجمعی پس از زمان ۱۶۶ ثانیه به ۱۷۶۷ می‌رسد.



شکل ۹. تصاویر روند رشد ترک (a) مرحله ۱ (b) مرحله ۲ (c) مرحله ۳

همانطور که روند رشد ترک و نمودار ضرب آهنگ‌ها نشان می‌دهد با گذشت زمان و افزایش میزان تنش، نیرو و شمارش ضرب آهنگ‌ها، میزان فعالیت‌های درونی ماده و رشد ترک نیز افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که بیشترین میزان رشد ترک در انتهای آزمایش هر نمونه می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

آزمایش خستگی خمشی و آزمایش کشش بر روی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۵ انجام شد و مشخصه‌های نشر آوایی در هر یک از آزمایش‌ها ثبت و مورد بررسی قرار گرفت. یکی از اهداف این مقاله بررسی امکان سنجی روش نشر آوایی در تشخیص جوانه‌زنی و رشد ترک خستگی در ملخ هواپیمای بوئانزا F33 بود که تحلیل حاصل از این روش از بررسی نمونه‌های آزمایشگاهی از آلیاژ ملخ با جنس آلومینیوم ۲۰۲۵ صورت گرفت.

بخش اول آزمایش‌ها، آزمایش خستگی خمشی با هدف جوانه-زنی ترک و ثبت سیگنال‌های نشر آوایی ناشی از جوانه‌زنی ترک بر روی نمونه آلومینیوم ۲۰۲۵ انجام شد. پس از بررسی و تحلیل نمودارهای دامنه برحسب سیکل استاندارد و شمارش ضرب آهنگ‌های تجمعی بر حسب سیکل استاندارد مشخص شد، شروع افزایش شدید دامنه سیگنال تا سیگنال حداکثری



identification of SiC coated needled C/SiC composite by

acoustic emission”, *Ceramics International*, pp. 15129-15138, February 2021, DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.02.071

[10] W. H. Prosser, “The propagation characteristics of the plate modes of acoustic emission waves in thin aluminum plates and graphite/epoxy composite plate and tubes,” Ph.D. dissertation, John Hopkins University, Maryland, 1991.

[11] Y. Blanchette, J. I. Dickson and M.N. Bassim, “Acoustic emission behavior crack growth of 7075-T651 Al alloy,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol.24, pp. 647-656, 1986. DOI: 10.1016/0013-7944(86)90240-7

[12] “AZoM.Aluminum 2025 alloy (UNSA92025),” 2013.

[Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleD=8718>. [Accessed: 10-May-2013].

## منابع و مراجع

[1] K. K. Chawla, M. A. Meyers, *Mechanical behavior of materials*. Cambridge university press, 2<sup>nd</sup> edition, 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511810947

[2] Z. Zhang, “Quantitative characterization on fatigue fracture features of A6005 aluminum alloy welded joints”, *Engineering Failure Analysis*, 16 August 2021. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105687

[3] S. B. Lindström, “Continuous-time, high-cycle fatigue model for nonproportional stress with validation for 7075-T6 aluminum alloy”, *Int. J. Fatigue* 140, 2020, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105839

[4] M. C. Kushan, S. F. Diltemiz and I. Sackesen, “Failure analysis of an aircraft propeller,” *Engineering Failure Analysis*, pp. 1693–1700, Jan 2007. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.069

[5] Y. Mizutani, *Practical acoustic emission testing*. Springer, 2<sup>nd</sup> edition, 2006. DOI: 10.1007/9784431550723

[6] D. Evseev, B. Medvedev, P. Medvedev, G. Strautmanis and S. Samoshkin, “Acoustic emission approach to determining survivability in fatigue tests”, *ICTE in Transportation and Logistic*, pp. 282-287, 2018.

DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.136

[7] *Nondestructive evaluation and test*. ASTM hand book, 9<sup>th</sup> edition, 1994. DOI: 10.1520/STP624-EB

[8] *Bending test methods for bend testing of metallic flat materials for spring application involving*. ASTM, 2013. DOI: 10.1520/E0855-08R13

[9] G. Hou, De-G. Shang, Lin-X. Zuo, L. Qu, Y.-E. Guo, Mi. Xia, S.-D. Wu and X. Yin, “Fatigue damage