

پایش وضعیت چدن شکل‌پذیر با آنتروپی انتشار صوت حین بارگذاری

کششی: گزارش پارامتر انرژی

سید مرتضی حسینی	محمد آزادی	احمد قاسمی قلعه بهمن*	سید محمد جعفری
دانشجوی دکتری	دانشیار	دانشیار	استادیار
دانشکده مهندسی مکانیک	دانشکده مهندسی مکانیک	دانشکده مهندسی مکانیک	دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی
دانشگاه سمنان، سمنان	دانشگاه سمنان، سمنان	دانشگاه سمنان، سمنان	دانشگاه شهید بهشتی، تهران
S.M.Hosseini@semnan.ac.ir	m_azadi@semnan.ac.ir	ghasemi@semnan.ac.ir	m_jafari@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۲

چکیده

در این پژوهش، چدن شکل‌پذیر (EN-GJS-700-2) به‌منظور شناسایی شروع ترک و شکست مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون کشش تک محوری یکنواخت بر روی نمونه‌های استخراج شده از وب^۱ میل‌لنگ اتومبیل، تحت شرایط جابه‌جایی کنترل براساس استاندارد ISO-6892 انجام گردید. شناسایی شروع ترک و شکست با روش مبتنی بر آنتروپی اطلاعات انتشار صوت انجام گردید. نتایج این پژوهش نشان داد شناسایی شروع ترک در روش مبتنی بر پارامترهای انتشار صوت، با عدم قطعیت‌هایی همراه است حال آنکه آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون و آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر با دقت خوبی برای شناسایی شروع ترک و شکست قابل استفاده است. یکی دیگر از دستاوردهای این پژوهش، ارائه دو معیار خرابی آزمایشی براساس آنتروپی انتشار صوت است که باعث می‌شود رویکرد ارزیابی براساس آنتروپی انتشار صوت برای اهداف پایش وضعیت بلادرنگ بسیار کاربردی نمایان شود. از میان دو آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون و نسبی کالیک-لیبلر نتایج نشان داد که آنتروپی نسبی کالیک-لیبلر، برای شناسایی شروع ترک مناسب‌تر است.

واژگان کلیدی: آنتروپی انتشار صوت، پایش وضعیت بلادرنگ، چدن شکل‌پذیر، انرژی انتشار صوت، آزمون کشش.

۱. مقدمه

پایش وضعیت^۲ فرایندی است که در طی آن یک پارامتر از شرایط ماشین دیده‌بانی می‌شود؛ به طوری که یک تغییر عمده در این پارامتر حاکی از پیشرفت عیبی در ماشین است. پایش وضعیت یکی از عناصر اصلی در نگهداری پیشگیرانه است. با استفاده از پایش وضعیت می‌توان برای نگهداری، برنامه‌ریزی کرد و یا اقداماتی انجام داد که از اثرات بعدی شکست یک ماشین، پیش از اتفاق افتادن شکست جلوگیری شود. با این تعریف برای شناسایی یک خرابی باید یک انحراف در مقدار مبنا (پارامترهای انتشار صوت) رخ دهد. استفاده از این روش از نظر اقتصادی بسیار با صرفه‌تر از این است که اجازه دهیم شکست رخ دهد [۱-۲]. معمولاً عیوب ماشین‌ها، علل خیلی ساده‌ای دارند. به‌رحال چنانچه این عیوب شناسایی نشوند، آنها با یکدیگر ترکیب شده و به شکل‌های دیگری ظاهر می‌شوند و شناسایی نقطه اصلی عیب را به‌طور پیچیده‌ای مشکل می‌سازند؛ بنابراین یک سامانه شناسایی عیوب کارا، باید به محض اینکه علامتی از نقص در ماشین ظاهر شد به کاربر هشدار دهد تا سریعاً عملیات تصحیح عیب انجام شود. همچنین یک سامانه عملی پایش وضعیت باید برای اجرا، ساده بوده و نیاز به کمترین تعداد حسگر را داشته باشد [۲-۳].

چدن به آلیاژهایی از آهن و کربن که بین ۲/۱ الی ۶/۲ درصد کربن داشته باشند، گفته می‌شود. رنگ مقطع شکست این آلیاژ به‌عنوان شناسه نام‌گذاری انواع مختلف آن به کار می‌رود. بیش از ۹۵ درصد وزنی چدن را آهن تشکیل می‌دهد و عناصر آلیاژی اصلی آن کربن و سیلیسیم هستند. به‌طور معمول بین ۲/۱ تا ۴ درصد کربن و ۱ تا ۳ درصد سیلیسیم دارد و به‌عنوان آلیاژی سه‌گانه شناخته می‌شود. چدن‌ها، به استثنای نوع شکل‌پذیر، ترد هستند و به دلیل نقطه ذوب پایین، سیالیت،

قابلیت ریخته‌گری، ماشین‌کاری، تغییر شکل‌ناپذیری و مقاومت به سایش، به موادی مهندسی با دامنه وسیعی از کاربرد تبدیل شده و در تولید لوله‌ها، ماشین‌ها، قطعات صنعت خودرو مانند میل‌لنگ، سرسیلندر، بلوک سیلندر و جعبه‌دنده به کار می‌روند.

چدن‌های شکل‌پذیر^۳، به دلیل وجود دانه‌های کروی گرافیت^۴ در ساختار آن، خواص مکانیکی استثنایی دارند. این نوع چدن قابلیت ریخته‌گری، ماشین‌کاری و مقاومت به سایش بالا که از خواص چدن‌ها است را دارا است. علاوه بر این، خواص مکانیکی فولادها که مقاومت خستگی و چقرمگی بالا، قابلیت سخت‌کاری و انجام کار گرم است را نیز شامل می‌شود. یکی دیگر از مزیت‌های چدن شکل‌پذیر، قیمت پایین آن است که به دلیل وجود همین مزایای متنوع، از آن به‌صورت گسترده در ساخت قطعات حساس و بحرانی اتومبیل استفاده می‌گردد.

تحلیل خرابی‌های بسیاری بر روی انواع میل‌لنگ از جمله میل‌لنگ‌های سایز کوچک خودروهای سواری [۴-۶] تا میل‌لنگ‌های بزرگ مربوط به موتورهای صنایع دریایی [۷-۹] و نیروگاه دیزلی برای تامین برق اضطراری مراکز داده و ارتباطات زیرساخت انجام گرفته است [۷ و ۱۰] که همگی به این مهم اشاره دارند که عموماً شکست میل‌لنگ از ناحیه بین آن اتفاق می‌افتد [۱۱] و شروع ترک نیز در وب میل‌لنگ اتفاق می‌افتد [۱۲]. به همین دلیل در این پژوهش، شناسایی شروع ترک در نمونه‌های آزمون کشش استخراج شده از وب میل‌لنگ مورد بررسی قرار گرفت.

انتشار صوت^۵ به تولید امواج الاستیک گذرا در طی مدت زمان آزاد شدن انرژی از یک منبع موجود در ماده اشاره دارد. منبع این انتشار موج در فلزات تا حد زیادی به حرکت ناهنجاری‌ها در اثر تغییر شکل‌های پلاستیک و یا به آغاز و

گسترش رشد ترک در سازه تحت تنش وابسته است. منابع دیگر انتشار صوت شامل: ذوب شدن، تغییر فاز ماده، تنش‌های حرارتی در اثر گرم و سرد شدن‌ها، نشستی، خوردگی، اصطکاک و ... است [۱۳]؛ بنابراین امواج انتشار صوت در ماده حرکت می‌کنند و به سطح آن می‌رسند. آزمون غیرمخرب^۶ به روش انتشار صوت شامل دریافت این امواج و تحلیل آنها به منظور برقراری ارتباط بین امواج دریافت شده و تغییرات ایجاد شده بر روی منبع انتشار صوت است. تغییرات امواج انتشار صوت از طریق تغییرات پارامترهای انتشار صوت^۷ مانند انرژی^۸، وقایع آکوستیک^۹، مدت زمان^{۱۰}، دامنه موج^{۱۱} و ... مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در بیشتر پارامترهای انتشار صوت اگر آستانه^{۱۲} انتخاب شده مناسب باشد و نوفه^{۱۳} سیگنال کم باشد، آنها قادر به شناسایی شکست هستند اما برای شناسایی نقطه شروع خرابی یا ترک باید به پارامترهای قابل اطمینان سیگنال انتشار صوت رجوع شود بنابراین با توجه به عدم قطعیت‌ها و دشواری‌هایی که برای شناسایی شروع ترک به وسیله پارامترهای انتشار صوت وجود دارد، نیاز به استفاده از روش‌های تشخیص مناسب‌تر احساس می‌گردد.

با توجه به اینکه هدف در پایش وضعیت بلادرنگ^{۱۴} سازه‌ها و ماشین‌ها، تشخیص به‌موقع و دقیق ترک و انتشار آن به‌صورت بلادرنگ است، استفاده از پارامترهایی که با عدم قطعیت کمتر و دقت بیشتری عملیات شناسایی و تشخیص خرابی را انجام می‌دهند، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در میان آخرین روش‌های تجزیه و تحلیل سیگنال انتشار صوت، اخیراً اثبات شده است که روش ارزیابی آنتروپی اطلاعات^{۱۵} داده‌های انتشار صوت برای ارزیابی شکست امیدوار کننده است.

شروع و انتشار خرابی منجر به اتلاف انرژی و در نتیجه تغییر در آنتروپی می‌شود. انرژی به شکل انرژی هیستریزیس^{۱۶} (پسماند)، انرژی گرمایی و انتشار صوت [۱۹-۱۴] تلف می‌شود. از اولین پژوهش‌های مربوط به آنتروپی، کار پرسی

بریدگمن^{۱۷} [۲۰] است که در آن ترمودینامیک تغییر شکل پلاستیک را بررسی کرد. باساران و یان^{۱۸} [۲۱] در زمینه مکانیک آسیب، آنتروپی را به‌عنوان بی‌نظمی معرفی کردند و از آنتروپی بولتزمن^{۱۹} به‌عنوان کمیت بی‌نظمی در مواد استفاده کردند.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، انتشار صوت، امواج کرنشی هستند که به دلیل تغییرات ریزساختاری ایجاد می‌شوند و اینگونه امواج، نشان‌دهنده تغییرات ریزساختاری بوده و حاوی اطلاعات مربوط به تخریب هستند. بنابراین، با استخراج پارامترها از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده، می‌توان روند تجمعی تخریب را کنترل کرد [۲۲].

چنین تغییراتی بر توزیع احتمال شکل موج و پارامترهای استخراج شده آنها تأثیر می‌گذارد و می‌تواند با آنتروپی اطلاعات کمی شود. مفهوم آنتروپی اطلاعات را کلود شانون^{۲۰} [۲۳] پایه‌گذاری کرد و بعد از پژوهش او، این شاخص کاربردهای زیادی را در علوم و حوزه‌های مختلف آن به‌خصوص مهندسی مانند پردازش تصویر و سیگنال پیدا کرده است [۲۸-۲۴].

کهپرده و خوانساری [۲۲] دریافتند که روش آنتروپی اطلاعات سیگنال انتشار صوت، با استفاده از فرمول شانون می‌تواند پیش‌بینی مطمئن‌تری از خستگی و شکست نسبت به پارامترهای انتشار صوت ارائه کند. روش آنتروپی نسبی کالیک-لیبلر^{۲۱} نیز در چند مطالعه اخیر نتایج امیدوار کننده‌ای را نشان می‌دهد و آنتروپی اندازه‌گیری شده نتیجه تغییرات ریزساختاری مواد است که به دلیل تخریب ناشی از بارگذاری مکانیکی رخ می‌دهد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که حداکثر آنتروپی اطلاعات انتشار صوت ناشی از مواد در طول دوره تخریب مشابه است [۲۲]. بلینی^{۲۲} و همکاران [۲۹] روی میکرومکانیسم‌های آسیب‌رسان در چدن شکل‌پذیر پرلیتی با استفاده از تجزیه و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۲۳} و آزمون انتشار صوت، پژوهشی انجام دادند. آنها در حین آزمون کشش تک محوری یکنواخت به‌صورت درجا^{۲۴} بر



شکل ۱. استخراج نمونه‌های استاندارد از داخل وب میل‌لنگ

موتور

۲-۲. ترکیب شیمیایی و ریزساختار

با توجه به اهمیت عناصر تشکیل دهنده و تأثیر آن بر روی خواص مکانیکی ماده، نمونه استاندارد از داخل وب میل‌لنگ استخراج شد و درصد وزنی عناصر سازنده ماده مورد بررسی، به وسیله آزمون کوانتومتری^{۲۵}، اندازه‌گیری شده است. جدول ۱، درصد عناصر تشکیل دهنده چند شکل‌پذیر، را نمایش می‌دهد. خواص مکانیکی چندین‌های شکل‌پذیر به‌طور مستقیم به ریزساختار آن وابسته است. ریزساختار زمینه چندین شکل‌پذیر ممکن است کاملاً فریتی^{۲۶}، کاملاً پرلیتی^{۲۷} و یا ترکیبی از پرلیت و فریت باشد. برای بررسی ریزساختار، روی نمونه‌ها متالوگرافی انجام گردید. در شکل ۲ ریزساختار چندین شکل‌پذیر EN-GJS-700-2، در حالت (الف) بدون و (ب) با استفاده از محلول اچانت^{۲۸}، به نمایش در آمده است. در شکل ۲-الف، صرفاً گرافیت‌های کروی قابل مشاهده هستند اما در شکل ۲-ب، فازهای پرلیت و فریت نیز قابل مشاهده هستند. ریزساختار به‌دست آمده حاوی فازهای ریزساختار چندین شکل‌پذیر EN-GJS-700-2 (شامل فازهای پرلیت-فریت و گرافیت‌های کروی) است. همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، ریزساختار ماده مورد بررسی شامل

روی نمونه‌های میکروکشتی تحت شرایط کرنش کنترل، میکرومکانیسم‌های آسیب‌رسان متعددی را شناسایی کردند و مشاهده کردند که پارامترهای سنتی انتشار صوت به لحاظ کیفی با شروع ترک بر روی رفتار الاستیک ارتباط دارد و آنتروپی اطلاعات انتشار صوت با توجه به فرمول‌های شانون و کالک-لیبلر به خوبی با آسیب در حال پیشرفت و شکست اولیه ارتباط دارد و در نهایت معیارهای شکست آزمونی ارائه نمودند.

طرح کلی این مقاله به این صورت است که در آن شناسایی شروع ترک و شکست به روش مبتنی بر آنتروپی اطلاعات پارامتر انرژی انتشار صوت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مواد و نمونه‌های آزمون

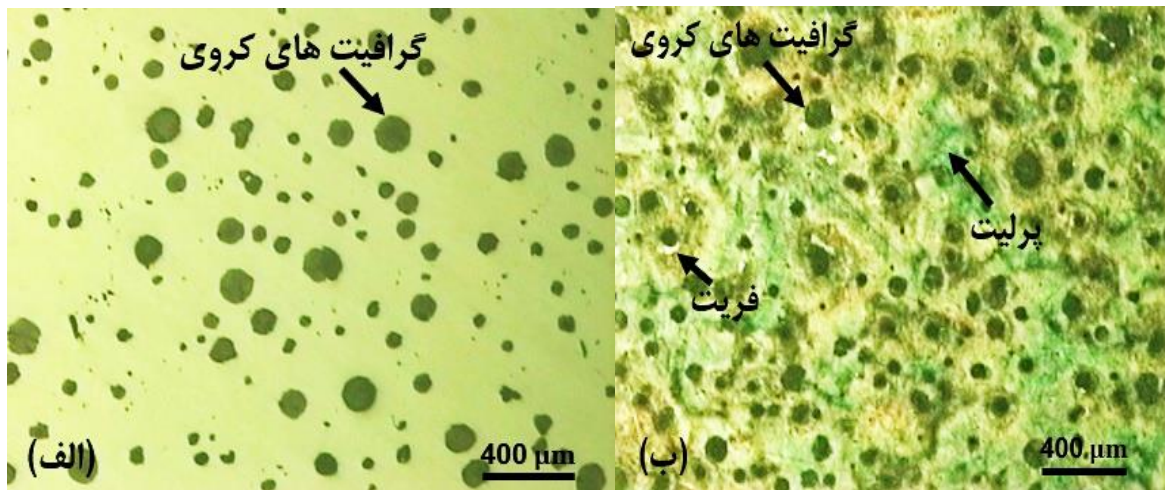
با توجه به اینکه هدف از این پژوهش پایش وضعیت بلادرنگ موتور از طریق به‌دست آوردن نقطه شروع ترک و خرابی در یکی از اجزای مهم آن یعنی میل‌لنگ است، نمونه‌های آزمون کشش از وب میل‌لنگ اتومبیل استخراج شد تا اثر فرایند ساخت نیز در آنها اعمال شود. شکل ۱، چگونگی استخراج نمونه‌های استاندارد از داخل وب میل‌لنگ موتور را نشان می‌دهد. برای اثبات تکرارپذیری آزمون سه مرتبه تکرار شد.

عنصر	کروم	آلومینیوم	تیتانیوم	وانادیوم
درصد	۰/۰۳۰	۰/۰۱۶	۰/۰۳۵	۰/۰۰۳
عنصر	تنگستن	کیالت	نیوبیوم	-
درصد	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	-

گرافیت‌های کروی درون زمینه پرلیتی غالب است. این زمینه، شامل ۹۰-۱۰۰٪ فاز پرلیت و ۱۰٪ فاز فریت است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی چدن شکل‌پذیر EN-GJS-700-2

عنصر	کربن	سیلیسیوم	منگنز	فسفر
درصد	۳/۵۰۰	۲/۱۸۰	۰/۴۵۰	۰/۰۱۴
عنصر	گوگرد	مس	نیکل	قلع
درصد	۰/۰۱۰	۰/۴۸۰	۰/۰۲۰	۰/۰۵۰



شکل ۲. ریزساختار چدن شکل‌پذیر (EN-GJS-700-2)، شامل: (الف) بدون و (ب) با محلول اچانت (با ترکیب نایتال ۲٪)

کشش مواد فلزی در دمای محیط براساس روش استاندارد [۳۰] ISO-6892، پیاده‌سازی و سرعت بارگذاری برای این پژوهش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده است. ابعاد هندسی نمونه‌های استخراج شده براساس پیشنهاد استاندارد [۳۰]، مطابق شکل ۴ ساخته شد.

۲-۳. دستگاه و تجهیزات آزمون

در این پژوهش از دستگاه آزمون کشش یونیورسال ستام^{۳۰} مدل STM-150، با ظرفیت ۱۵ تن که قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری بین ۰/۰۰۱ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه را دارد، استفاده گردید که در شکل ۳ دیده می‌شود. آزمون

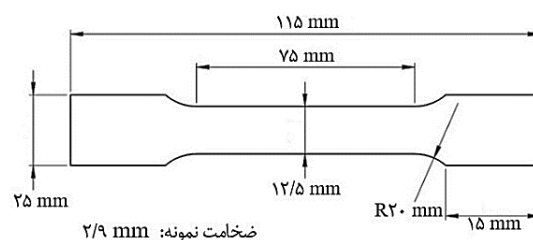


شکل ۳. دستگاه آزمون کشش یونیورسال سنتام مدل STM-150

داده‌برداری دستگاه نیز تا ۴۰ میلیون داده در ثانیه، قابل تنظیم است که توسط کارت تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال پی‌سی‌ای-۳۹۲ انجام می‌گیرد. آستانه دامنه موج انتشار صوت بررسی گردید و مقدار ۱۰ دسی‌بل برای آزمون کشش چدن شکل‌پذیر انتخاب گردید. پارامترهای زمان‌بندی سیستم^{۴۰}، زمان تعریف اوج^{۴۱}، زمان تعریف ضربه^{۴۲} و زمان قفل ضربه^{۴۳}، به ترتیب برابر با ۲۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکروثانیه تنظیم شدند و نرخ داده‌برداری ۱ مگاهرتز در نظر گرفته شد.

۲-۴. آنتروپی انتشار صوت

آزمون غیرمخرب به روش انتشار صوت شامل دریافت امواج انتشار صوت و تحلیل آنها به منظور برقراری ارتباط بین امواج دریافت شده و تغییرات ایجاد شده بر روی منبع انتشار صوت است. تغییرات امواج انتشار صوت همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، از طریق تغییرات پارامترهای انتشار صوت مانند انرژی، وقایع آکوستیک، مدت زمان، دامنه موج



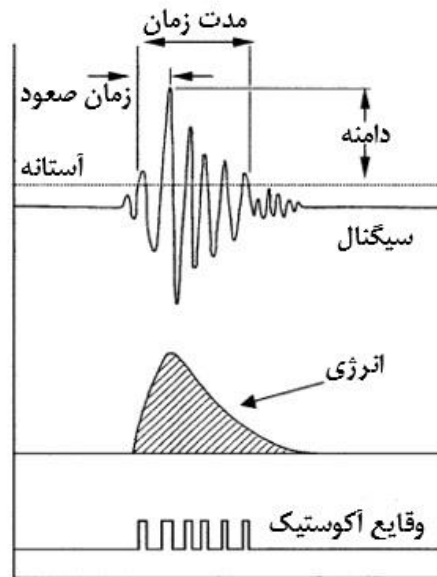
شکل ۴. ابعاد نمونه‌های تخت ساخته شده برای آزمون کشش

چدن شکل‌پذیر

در این پژوهش، با قراردادن حسگر انتشار صوت روی نمونه آزمون جین اعمال نیرو، سیگنال انتشار صوت برداشت گردید. برای برداشت سیگنال انتشار صوت از حسگر مینیاتوری پیکو^{۳۱} با دامنه فرکانسی عملیاتی^{۳۲} ۲۰۰ تا ۷۵۰ کیلوهرتز و پیش‌تقویت‌کننده^{۳۳} با ورودی نوع تک^{۳۴} و تقویت^{۳۵} ۴۰ دسی‌بل^{۳۶} استفاده گردید. نرم‌افزار ثبت و پردازش سیگنال‌های انتشار صوت، ویندوز انتشار صوت^{۳۷} و همه تجهیزات معرفی شده ساخت شرکت پک^{۳۸} است. دامنه پاسخ فرکانسی این دستگاه از ۳ کیلوهرتز تا ۳ مگاهرتز است. نرخ

بنابراین، می‌توان پارامتر انرژی (مطابق شکل ۵) را به‌عنوان اندازه‌گیری شدت منبع انتشار صوت در نظر گرفت.

و ... مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامتر انرژی انتشار صوت، مساحت زیر نمودار سیگنال تا حد آستانه تعریف می‌شود. این پارامتر به دامنه و زمان استمرار سیگنال بستگی دارد.



شکل ۵. پارامترهای سیگنال انتشار صوت [۳۱]

طبق تعریف معادله ۱ از $\{P_i\}$ در هر لحظه از آزمون شرایط $\{P_i=1\}$ را در کل مشاهدات یک آزمون برآورده می‌کند. با دریافت سیگنال جدید توسط حسگر در طول تخریب، احتمالات به‌روز می‌شوند و توزیع احتمال با استفاده از معادله ۱ در هر لحظه تخمین زده می‌شود. لازم به ذکر است که تعریف فوق از احتمال نوعی "احتمال تجربی" است. رویکرد ما از نوع تجربی است که در آن ما احتمال را در هر لحظه از زمان دریافت حسگر از یک رویداد صوتی جدید به‌روز می‌کنیم و این فرآیند تا N مرتبه تکرار می‌گردد [۲۲].

۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمون کشش

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در ابتدای منحنی نیرو-جابجایی نقطه‌ای وجود دارد که در آن منحنی از حالت خطی خارج می‌شود و این نقطه احتمالی شروع خرابی یا ترک است. برای بررسی تکرارپذیری نتایج آزمون

مرحله اصلی در تخمین آنتروپی اطلاعات، تعریف توزیع احتمال متغیر تصادفی است. ما متغیر تصادفی خود را انرژی انتشار صوت در زمان (e_i) ، تعریف می‌کنیم که i نشان‌دهنده زمان دریافت سیگنال است و P_i بردار توزیع جرم احتمال سیستم را نشان می‌دهد که در معادله ۱ آمده است. آنتروپی اطلاعات شانون و کالیک-لیبلر به ترتیب در معادلات ۲ و ۳ تعریف شده‌اند [۲۲].

$$P_i = \left\{ \frac{e_1}{\sum e_i}; \frac{e_2}{\sum e_i}; \dots; \frac{e_i}{\sum e_i} \right\}; \quad (1)$$

$$\sum e_i = \sum_{k=1}^i e_k \quad (2)$$

$$SE = - \sum_{i=1}^N P_i \log_2(P_i) \quad (3)$$

$$SEr = SE(P_i|P_{i-1})$$

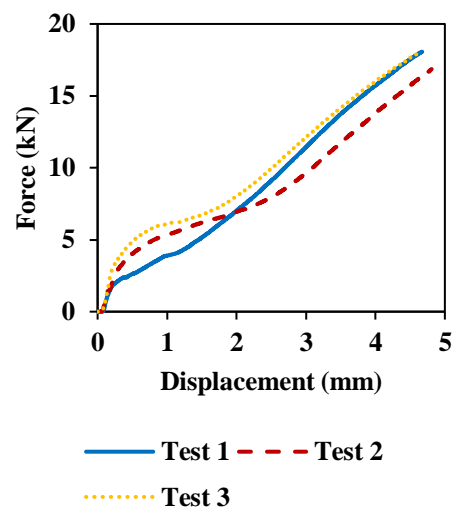
$$= - \sum_{i=1}^N P_i \log_2 \left(\frac{P_i}{P_{i-1}} \right).$$

۳-۲. آنتروپی انتشار صوت

پارامترهای انتشار صوت به عوامل زیادی از جمله شرایط مرزی آزمون، هندسه نمونه‌ها و همچنین عملیات حرارتی و ریزساختار مواد نمونه بستگی دارد. علاوه بر این، موقعیت حسگرها و نزدیکی به محل خرابی یا ترک نیز می‌تواند بر مقادیر پارامترهای انتشارات صوت تأثیر بگذارد. با توجه به اینکه ما در پایش وضعیت سازه‌ها و ماشین‌ها به دنبال تشخیص به موقع و دقیق ترک و انتشار آن به صورت بلادرنگ هستیم، استفاده از پارامترهایی که با عدم قطعیت کمتر و دقت بیشتری عملیات شناسایی و تشخیص خرابی را انجام می‌دهند، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در میان آخرین روش‌های تجزیه و تحلیل سیگنال انتشار صوت، اخیراً اثبات شده است که روش ارزیابی آنتروپی اطلاعات داده‌های انتشار صوت برای ارزیابی شکست امیدوارکننده است. روش آنتروپی اطلاعات شانون و کالک-لیبلر می‌تواند پیش‌بینی قابل اطمینان‌تری نسبت به پارامترهای انتشار صوت ارائه دهد.

حال در این بخش از پژوهش ما مشاهدات تجربی آنتروپی اطلاعات تخمینی از سیگنال‌های انتشار صوت را برای نمونه‌های از جنس چدن شکل‌پذیر در طول آزمون کشش گزارش می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، منحنی آنتروپی اطلاعات شانون مربوط به انرژی انتشار صوت آزمون‌های کشش روند مشابهی را نشان می‌دهند. شیب منحنی‌های آنتروپی شانون به تدریج همراه با افزایش آسیب در تمام آزمون‌ها کاهش می‌یابد و در هنگام خرابی در آزمون‌های کشش مقادیر مشابه آنتروپی به دست می‌آید. از طرفی همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، منحنی آنتروپی اطلاعات نسبی کالک-لیبلر مربوط به آزمون‌های کشش نیز روند مشابهی را نشان می‌دهند. نکته مهم این است که در شکل ۸ زانویی نرمی در محل شروع ترک در منحنی‌های آزمون‌های کشش مشاهده گردید.

کشش، آزمون سه مرتبه تکرار شد که نتایج آزمون‌های شماره ۲ و ۳ با توجه به اینکه شکست در نمونه‌ها تقریباً مشابه بود هم از نظر محل شکست و هم از نظر فاصله تا حسگر انتشار صوت، مبنای تجزیه و تحلیل نتایج قرار گرفت. در جدول ۲ نیز نتایج آزمون کشش گزارش شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است میزان استحکام کششی به دست آمده حدود ۳۰ درصد پایین‌تر از مقدار پیش‌بینی شده برای این نوع مواد است (۷۰۰ MPa) که با توجه به اینکه این نمونه‌های آزمون از مواد میل‌لنگ ساخته شده اتومبیل استخراج شده است، اثر فرایند ساخت در این نتایج نمایان شده است.



شکل ۶. نمودار نیرو-جابجایی آزمون کشش چدن شکل‌پذیر EN-GJS-700-2

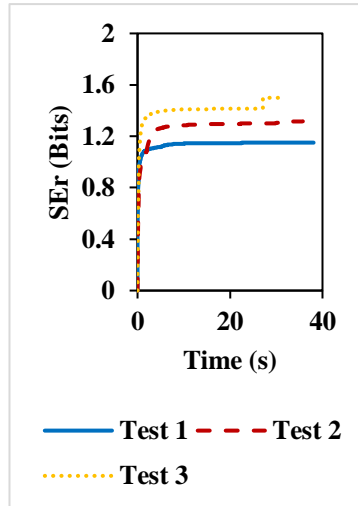
جدول ۲. نتایج خواص مکانیکی آزمون کشش چدن شکل‌پذیر

خواص مکانیکی	استحکام کششی نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)
آزمون ۱	۴۸۵/۹۲	۹/۳۵
آزمون ۲	۴۵۹/۲۷	۹/۶۳
آزمون ۳	۴۵۵/۳۰	۹/۳۳
میانگین	۴۶۶/۶۳	۹/۴۴

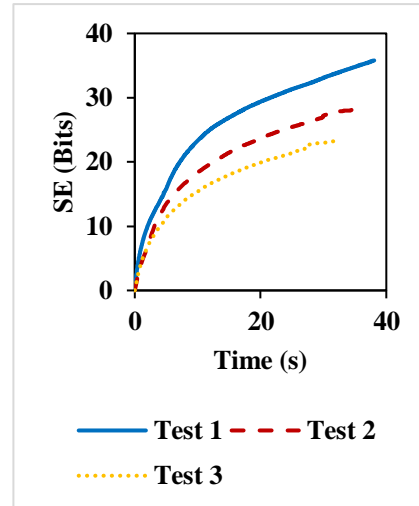
آنتروپی نسبی نیز در هنگام خرابی، مقادیر تقریباً یکسانی برای همه آزمون‌های کشش دارد.

با توجه به اینکه محل شکست نمونه‌های شماره ۲ و ۳ نزدیک یکدیگر بود و هر دو نیز تقریباً فاصله مشابهی با حسگر انتشار صوت داشتند، شباهت و نزدیکی منحنی‌های

دو نمونه قابل توجیه است. از طرفی با توجه به اینکه محل شکست نمونه شماره ۱ در محل دورتری نسبت به محل شکست دو نمونه بعدی و نیز در فاصله دورتری نسبت به حسگر انتشار صوت قرار داشت، تا حدی فاصله منحنی نمونه شماره ۱ نسبت به دو منحنی دیگر قابل توجیه است.



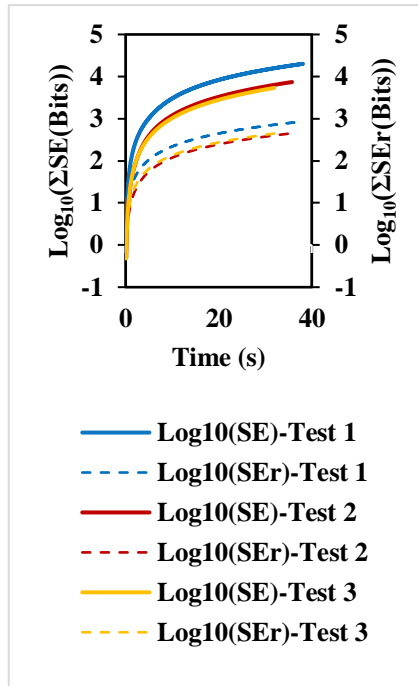
شکل ۸. آنتروپی اطلاعات نسبی کالبدی-لیبلر



شکل ۷. آنتروپی اطلاعات شانون

در طول دوره تخریب مشابه یکدیگر است و از آن می‌توان برای پایش وضعیت بلادرنگ سازه‌ها استفاده نمود.

همان‌طور که در منحنی‌های شکل ۹ دیده می‌شود، نتایج تجربی و مقایسه آنتروپی اطلاعات لگاریتمی شانون و نسبی نشان می‌دهد که حداکثر آنتروپی انتشار صوت ناشی از مواد

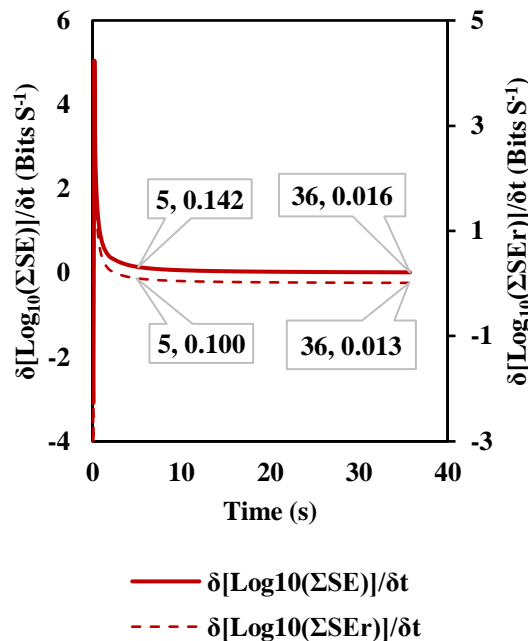


شکل ۹. مقایسه آنتروپی اطلاعات لگاریتمی شانون و نسبی کالباک-لیبلر

کاهش می‌یابد در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، به‌عنوان مثال در نقطه شروع ترک منحنی شکل ۱۰ است مقدار شیب آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون به $0/142$ می‌رسد که با توجه به جدول ۳ با 97% کاهش در مقدار شیب نسبت به مقدار ماکزیمم منحنی، همراه است. همچنین همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود در نقطه شکست نیز به مقدار $0/016$ می‌رسد که با توجه به جدول ۳ این نقطه از منحنی نیز با $97/4\%$ کاهش در مقدار شیب نسبت به مقدار ماکزیمم منحنی، همراه است.

۳-۳. معیار خرابی آنتروپی انتشار صوت

با توجه به منحنی‌های شکل ۹ می‌توان گفت که شیب‌های آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون $(\delta(\log_{10}\Sigma SE)/\delta t)$ و آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالباک-لیبلر $(\delta(\log_{10}\Sigma SEr)/\delta t)$ را می‌توان به‌عنوان شاخص شناسایی و تشخیص شروع و انتشار ترک و درنهایت شکست در نظر گرفت. نتایج نشان داد که کاهش شیب آنتروپی با افزایش خرابی همراه است و مقدار کاهش یافته با خرابی اولیه ارتباط دارد. مقادیر شیب در هنگام شروع خرابی بسیار



شکل ۱۰. مقایسه شیب آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون با شیب آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر

جدول ۳. مقایسه مقادیر و کاهش شیب آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون با شیب آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر در شروع ترک و شکست

نسبی کالیک-لیبلر	آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون	تغییرات شیب آنتروپی
۳/۸۲۷	۴/۸۰۵	ماکزیمم
۰/۱۰۰	۰/۱۴۲	شروع ترک
۹۹/۷	۹۷	درصد کاهش شیب
۰/۰۱۳	۰/۰۱۶	شکست
۹۹/۷	۹۷/۴	درصد کاهش شیب

آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون یا آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر را به دست آورد و از آن در نرم افزار پایش وضعیت بلادرنگ سازه برای شناسایی شروع خرابی و شکست بهره برد.

دو معیار شناسایی شکست اولیه براساس دو پارامتر تغییرات شیب آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون $(\delta(\log_{10}\Sigma SSE)/\delta t)$ و آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر $(\log_{10}\Sigma SSEr)$ ، پیشنهاد شد. معیار اول به نوع

با توجه به منحنی شکل ۱۰ و جدول ۳ این کاهش شدید در شیب منحنی برای آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر $(\delta(\log_{10}\Sigma SSEr)/\delta t)$ ، نیز صادق است. بنابراین از این دو پارامتر شیب می توان برای شناسایی شروع و انتشار ترک و خرابی در پایش وضعیت بلادرنگ سازه ها استفاده نمود. براساس نتایج به دست آمده در این پژوهش فقط کافیست که با دریافت سیگنال انتشار صوت مواد حین یک آزمون استاندارد مانند ISO-6892، میزان درصد کاهش شیب

آزمون و ماده وابسته بود و معیار دوم به هر دو عامل نوع آزمون و نیز مواد وابستگی نداشت که به ترتیب این معیارهای خرابی آزمایشی در معادلات ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند:

$$\frac{\delta(\log_{10} \sum SE)}{\delta t} \quad (۴)$$

$$\geq 1.60 \times 10^{-2} [\log_{10}(\text{bits s}^{-1})]$$

$$\log_{10} \sum SEr \quad (۵)$$

$$\geq 2.65 \times 10^0 [\log_{10}(\text{bits})]$$

بنابراین به نظر می‌رسد که می‌توان از این معیارها در آزمون‌های استاندارد برای شناسایی شروع ترک و شکست استفاده نمود. بعد از شروع ترک در نقطه زمانی ۵ ثانیه و افزایش کرنش با تحمل نیروی بسیار کمتر از شروع آزمون و تشکیل منطقه پلاستیک نوک ترک، برای ادامه رشد ترک و در نهایت شکست به نیروی بیشتری نیاز است که این افزایش نرخ تغییرات نیرو در منحنی شکل ۶ قابل مشاهده است. مطابق معیار انرژی در تحلیل شکست، گسترش ترک (شکست) هنگامی اتفاق می‌افتد که انرژی لازم برای رشد ترک و غلبه بر مقاومت ماده فراهم شده باشد. مقاومت ماده ممکن است شامل انرژی سطحی، کار پلاستیک و یا سایر تلفات انرژی در هنگام رشد ترک باشد. در شکل ۶ کار پلاستیک به وضوح قابل مشاهده است. بنابراین هم نمودار نیرو-جابجایی و هم پارامترهای انتشار صوت توانایی تشخیص پدیده شروع ترک را دارند.

در اجزای ماشین و یا سازه‌ها معمولاً ترک‌های ریزی در هنگام ساخت به وجود می‌آید که عملاً اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین با توجه به اینکه نمونه‌های آزمون کشش در این پژوهش از درون میل‌لنگ موتور اتومبیل استخراج شده است و استحکام نهایی اندازه‌گیری شده این مواد در آزمون کشش، طبق نتایج جدول ۲، حدود ۳۰ درصد پایین‌تر از استحکام پیش‌بینی شده برای مواد خام چدن شکل‌پذیر (EN-GJS (700-2) است، بنابراین احتمال اینکه این ترک در حین فرایند ساخت ایجاد شده باشد، زیاد است.

با توجه به اینکه ما در پایش وضعیت سازه‌ها و ماشین‌ها به دنبال تشخیص به‌موقع و دقیق ترک و انتشار آن به‌صورت بلادرنگ هستیم، استفاده از پارامترهایی که با عدم قطعیت کمتر و دقت بیشتری عملیات شناسایی و تشخیص خرابی را انجام می‌دهند، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این پژوهش فرض بر این است که خرابی شامل شکست یا ترک نوعی اختلال است که خود را در تشدید پارامترهای سیگنال‌های انتشار صوت نشان می‌دهد و می‌تواند با استفاده از آنتروپی اطلاعات کمی شود. براین اساس، ما از آنتروپی اطلاعات به‌عنوان یک پارامتر توزیعی استفاده می‌کنیم که به توزیع احتمال اندازه‌گیری‌ها بستگی دارد. همان‌طور که دیده شد، آنتروپی اندازه‌گیری شده نتیجه تغییرات ریزساختاری مواد بود که به دلیل تخریب ناشی از بارگذاری مکانیکی رخ می‌دهد و حداکثر آنتروپی انتشار صوت ناشی از مواد، در طول دوره تخریب مشابه بود. تکامل آنتروپی انتشار صوت روند مداومی را در طی دوره تخریب نشان می‌دهد.

روش و الگوریتم انتخاب پارامتر یا ویژگی برای روش‌های تشخیص آسیب و استخراج اطلاعات مربوط به آسیب از خروجی حسگر بسیار مهم است. عوامل عملیاتی و محیطی همراه با خصوصیات مواد و مقیاس اندازه، همه عوامل تعیین‌کننده‌ای هستند که بر خروجی حسگر تأثیر می‌گذارند. با استفاده از روش پایش وضعیت بلادرنگ حساسی مانند انتشار صوت، تأثیر چنین عواملی بارزتر می‌شود. ویژگی‌هایی که تخریب توزیع احتمال اندازه‌گیری‌ها را کمی می‌کنند می‌توانند اطلاعات ارزشمندی راجع به آسیب ارائه دهند. آنتروپی انتشار صوت کسری از کل آنتروپی تولید شده در جریان تخریب یک ماده جامد تحت اعمال نیرو یا بار است. این بخش از کل آنتروپی با استفاده از حسگرهای انتشار صوت در مواد قابل اندازه‌گیری است.

منحنی آنتروپی اطلاعات شانون و آنتروپی اطلاعات نسبی کالک-لیبلر در آزمون‌های کشش مربوط به این پژوهش روند مشابهی را نشان می‌دهد. شیب منحنی‌های آنتروپی

شانون به تدریج همراه با افزایش آسیب در تمام آزمون‌ها کاهش می‌یابد و در هنگام خرابی به مقادیر مشابه می‌رسیم. زانوی نرمی در محل شروع ترک منحنی‌های آنتروپی اطلاعات نسبی کالیک-لیبلر مشاهده گردید و آنتروپی نسبی نیز در هنگام خرابی، مقادیر تقریباً یکسانی برای همه آزمون‌های کشش به همراه داشت. نتایج تجربی این پژوهش نشان داد که حداکثر آنتروپی انتشار صوت ناشی از مواد در طول دوره تخریب مشابه یکدیگر است و از آن می‌توان برای پایش وضعیت بلادرنگ سازه‌ها استفاده نمود.

شیب‌های آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون $(\delta(\log_{10}\Sigma SE)/\delta t)$ و آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر $(\delta(\log_{10}\Sigma SEr)/\delta t)$ را می‌توان به‌عنوان شاخص شناسایی و تشخیص شروع و انتشار ترک و درنهایت شکست در نظر گرفت. نتایج نشان داد که کاهش شیب آنتروپی تجمعی نیز با افزایش خرابی همراه است و مقدار کاهش یافته با خرابی اولیه ارتباط دارد و مقادیر شیب در هنگام شروع خرابی بسیار کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان با دریافت سیگنال انتشار صوت مواد حین یک آزمون استاندارد مانند ISO-6892، میزان درصد کاهش شیب آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون یا آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر را به‌دست آورد و از آن در نرم‌افزار پایش وضعیت بلادرنگ سازه برای شناسایی شروع خرابی و شکست بهره برد.

تفاوت بین مقادیر دو پارامتر تغییرات شیب آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون $(\delta(\log_{10}\Sigma SE)/\delta t)$ و آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر $(\delta(\log_{10}\Sigma SEr)/\delta t)$ برای پژوهش حاضر با نتایج بلینی و همکاران [۲۹] نشان داد که این دو کمیت به هندسه و سرعت بارگذاری وابسته هستند. از طرفی با توجه به نتایج پژوهش حاضر، دو معیار آزمایشی مطرح شد که می‌تواند برای پایش وضعیت از آن استفاده کرد. به‌طور کلی می‌توان گفت که خرابی تا حدی که شکست رخ می‌دهد افزایش می‌یابد زیرا تغییرات شیب آنتروپی

تجمعی لگاریتمی شانون $(\delta(\log_{10}\Sigma SE)/\delta t)$ کاهش می‌یابد، درحالی‌که خرابی با افزایش آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر $(\delta(\log_{10}\Sigma SEr)/\delta t)$ افزایش می‌یابد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چدن شکل‌پذیر (EN-GJS-700-2) تحت آزمون کشش قرار گرفت و سیگنال انتشار صوت برداشت گردید و سیگنال به روش مبتنی بر پارامترهای انتشار صوت و آنتروپی اطلاعات جهت شناسایی ترک، مورد آنالیز قرار گرفت. که درنهایت نتایج زیر به‌دست آمد:

- در روش آنتروپی اطلاعات، مشاهده شد که حداکثر آنتروپی انتشار صوت ناشی از مواد در طول دوره تخریب مشابه یکدیگر و تکرارپذیر است و از آن می‌توان برای پایش وضعیت بلادرنگ سازه‌ها استفاده نمود.
- کاهش شیب‌های آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون $(\delta(\log_{10}\Sigma SE)/\delta t)$ و آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر $(\delta(\log_{10}\Sigma SEr)/\delta t)$ با افزایش خرابی همراه است و مقدار کاهش یافته با خرابی اولیه ارتباط دارد و مقادیر شیب در هنگام شروع خرابی کاهش زیاد و معناداری دارد.
- شیب منحنی‌های آنتروپی شانون به تدریج همراه با افزایش آسیب در تمام آزمون‌ها کاهش می‌یابد درحالی‌که در آنتروپی اطلاعات نسبی کالیک-لیبلر زانویی نرمی در شروع ترک مشاهده گردید. بنابراین به‌نظر می‌رسد که آنتروپی اطلاعات نسبی به نسبت آنتروپی اطلاعات شانون، برای شناسایی شروع ترک مناسب‌تر باشد.
- دو کمیت شیب آنتروپی تجمعی لگاریتمی شانون $(\delta(\log_{10}\Sigma SE)/\delta t)$ و آنتروپی تجمعی لگاریتمی نسبی کالیک-لیبلر $(\delta(\log_{10}\Sigma SEr)/\delta t)$ به هندسه و سرعت بارگذاری وابسته هستند.

• دو معیار خرابی برای پایش وضعیت این چدن شکل پذیر
ارایه شد که معیار اول به نوع آزمون و ماده وابسته است
و معیار دوم مستقل از این موارد است.

۵. قدردانی

نویسندگان از حمایت شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور

ایران خودرو (ایپکو) برای استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی
انتشار صوت این شرکت و همچنین از حمایت مالی وزارت
علوم، تحقیقات و فناوری و پارک فناوری اطلاعات و
ارتباطات از این پروژه در قالب کد اعتباری ۰۰۰۰۰۸۷-۰۲-۰۰
۹۹-۱۶ قدردانی می‌نمایند.

۶. مأخذ

- [1] Mobley, R. Keith, "An introduction to predictive maintenance", Elsevier, 2002.
- [۲] جعفری، م.، بهزاد، م.، مهدیقلی، ح.، "کاربرد انتشار صوت در میان روش‌های مختلف پایش وضعیت و عیب‌یابی موتورهای احتراق داخلی"،
چهارمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات ایران، تهران: دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۸۸.
- [3] Chandroth, G. O., A. J. C. Sharkey, and N. E. Sharkey, "Cylinder pressures and vibration in internal combustion engine condition monitoring", In *Proceedings of Comadem*, 1999, Vol. 99, pp.294-297.
- [4] Fonte, M., Bin Li, L. Reis, and M. Freitas, "Crankshaft failure analysis of a motor vehicle", *Engineering failure analysis*, 2013, Vol.35, pp.147-152.
- [5] Fonte, M., V. Infante, L. Reis, and M. Freitas, "Failure mode analysis of a diesel motor crankshaft", *Engineering Failure Analysis*, 2017, Vol.82, pp.681-686.
- [6] Witek, Lucjan, Michał Sikora, Feliks Stachowicz, and Tomasz Trzepieciniski, "Stress and failure analysis of the crankshaft of diesel engine," *Engineering Failure Analysis*, 2017, Vol.82, pp.703-712.
- [7] Villanueva, JA Becerra, F. Jiménez Espadafor, F. Cruz-Peragon, and M. Torres García, "A methodology for cracks identification in large crankshafts", *Mechanical systems and signal processing*, 2011, Vol.25, no.8, pp.3168-3185.
- [8] Koehler, Henry, Knut Partes, Thomas Seefeld, and Frank Vollertsen, "Influence of laser reconditioning on fatigue properties of crankshafts", *Physics Procedia*, 2011, Vol.12, pp.512-518.
- [9] Fonte, M., P. Duarte, V. Anes, M. Freitas, and L. Reis, "On the assessment of fatigue life of marine diesel engine crankshafts", *Engineering Failure Analysis*, 2015, Vol.56, pp.51-57.
- [10] Espadafor, F. Jiménez, J. Becerra Villanueva, and M. Torres García, "Analysis of a diesel generator crankshaft failure", *Engineering Failure Analysis*, 2009, Vol.16, no.7, pp.2333-2341.
- [11] Asi, Osman, "Failure analysis of a crankshaft made from ductile cast iron", *Engineering Failure Analysis*, 2006, Vol.13, no.8, pp.1260-1267.
- [12] Fonte, M., V. Anes, P. Duarte, L. Reis, and M. Freitas, "Crankshaft failure analysis of a boxer diesel motor", *Engineering Failure Analysis*, 2015, Vol.56, pp.109-115.
- [13] Grosse, Christian U., and Masayasu Ohtsu, eds., "Acoustic emission testing", Springer Science & Business Media, 2008.
- [14] Kahirdeh, Ali, and M. M. Khonsari, "Energy dissipation in the course of the fatigue degradation: Mathematical derivation and experimental quantification," *International Journal of Solids and Structures*, 2015, Vol.77, pp.74-85.
- [15] Kahirdeh, Ali, and M. M. Khonsari, "Criticality of degradation in composite materials subjected to cyclic loading", *Composites Part B: Engineering*, 2014, Vol.61, pp.375-382.

- [16] Farhidzadeh, Alireza, Anastasios C. Mpalaskas, Theodore E. Matikas, Hamidreza Farhidzadeh, and Dimitrios G. Aggelis, "Fracture mode identification in cementitious materials using supervised pattern recognition of acoustic emission features", *Construction and building materials*, 2014, Vol.67, pp.129-138.
- [17] Rato, Jorge Daniel dos Santos, "Aplicação de fibras óticas para avaliar as alterações de temperatura em compósitos laminados", PhD diss., 2015.
- [18] Bravo, Alencar, Lotfi Toubal, Demagna Koffi, and Fouad Erchiqui, "Development of novel green and biocomposite materials: Tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission", *Materials & Design (1980-2015)*, 2015, Vol.66, pp.16-28.
- [19] Kordatos, E. Z., D. G. Aggelis, and T. E. Matikas, "Monitoring mechanical damage in structural materials using complimentary NDE techniques based on thermography and acoustic emission", *Composites Part B: Engineering*, 2012, Vol.43, no.6, pp.2676-2686.
- [20] Bridgman, P. W., "The thermodynamics of plastic deformation and generalized entropy", *Reviews of Modern physics*, 1950, Vol.22, no.1, p.56.
- [21] Basaran, C., and C-Y. Yan, "A thermodynamic framework for damage mechanics of solder joints", 1998 pp.379-384.
- [22] Kahirdeh, Ali, and Michael M. Khonsari, "Acoustic entropy of the materials in the course of degradation", *Entropy*, 2016, Vol.18, no.8, pp.280.
- [23] Shannon, Claude Elwood, "A mathematical theory of communication", *The Bell system technical journal*, 1948, Vol.27, no.3, pp.379-423.
- [24] Coifman, Ronald R., and M. Victor Wickerhauser, "Entropy-based algorithms for best basis selection", *IEEE Transactions on information theory*, 1992, Vol.38, no.2, pp.713-718.
- [25] Kapur, Jagat Narain, Prasanna K. Sahoo, and Andrew KC Wong, "A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram", *Computer vision, graphics, and image processing*, 1985, Vol.29, no.3, pp.273-285.
- [26] Sabuncu, Mert Rory, "Entropy-based image registration", Princeton University, 2006.
- [27] Elforjani, M., and D. Mba, "Accelerated natural fault diagnosis in slow speed bearings with acoustic emission", *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, Vol.77, no.1, pp.112-127.
- [28] Guan, Xuefei, Adom Giffin, Ratneshwar Jha, and Yongming Liu, "Maximum relative entropy-based probabilistic inference in fatigue crack damage prognostics", *Probabilistic engineering mechanics*, 2012, Vol.29, pp.157-166.
- [29] D'Angela, Danilo, Marianna Ercolino, Costanzo Bellini, Vittorio Di Cocco, and Francesco Iacoviello, "Characterisation of the damaging micromechanisms in a pearlitic ductile cast iron and damage assessment by acoustic emission testing", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2020, Vol.43, no.5, pp.1038-1050.
- [30] Standard No. BS EN ISO 6892-1 (2016), *Metallic materials - Tensile testing, Part 1: Method of test at room temperature*.
- [31] Price, E. D., A. W. Lees, and M. I. Friswell, "Detection of severe sliding and pitting fatigue wear regimes through the use of broadband acoustic emission", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2005, Vol.219, no.2, pp.85-98.

1. Web
2. Condition Monitoring
3. Ductile Cast Iron (dci)
4. Nodular Spherical Graphite
5. Acoustic Emission (ae)
6. Non-Destructive Testing (ndt)
7. Acoustic Emission Features
8. Energy
9. Counts
10. Duration
11. Wave Amplitude
12. Threshold
13. Noise
14. Real Time
15. Information Entropy
16. Hysteresis Energy
17. Bridgman, p. W.,
18. Basaran, c., and yan, c. Y.,
19. Boltzmann's Entropy
20. Shannon
21. Kullback-leibler
22. Bellini and et al.
23. Scanning Electron Microscope (SEM)
24. In Situ
25. Quantometric Test
26. Ferrite
27. Pearlite
28. Etchant
29. Nital
30. Santam Universal Tensile Testing Machine
31. Pico
32. Operating Frequency Range
33. Preamplifier
34. Single
35. Gain
36. Decibel (db)
37. Ae-win
38. Physical Acoustic Corporation (PAC)
39. Pci-2
40. System Timing Parameters
41. Peak Definition Time (PDT)
42. Hit Definition Time (HDT)
43. Hit Lockout Time (HLT)