نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک
ISME

دوره ۳۱، شماره ۵، شماره پیاپی ۱۴۶، آذر و دی ۱۴۰۱، صفحه ۳۱-۲۰
ISSN: 1605-9719

DOI: 10.30506/MMEP.2022.550931.2006
DOR: 20.1001.1.16059719.1401.31.5.3.8

ارزیابی غیرمخرب آسیب کامپوزیت ها با آزمون آکوستیک امیشن

رضا فلک دین
دانشجوی کارشناسی ارشد

روح‌اله حسینی*
استادیار

محمد لطیفی
استادیار،
دانشگاه جامع امام حسین(ع)،
گروه مهندسی مکانیک، تهران

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۰۴
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۳

چکیده: با توجه به نیازهای در حوزه فناوری های مختف مکانیک و هوافضا، کاربردهای کامپوزیت های تقویت شده و مواد جامد ناهمگن به طور گسترده ای توسعه یافته اند. در این تحقیق به ضرورت استفاده از روش های غیر مخرب در شناسایی آسیب های احتمالی اشاره می شود. علاوه بر این روش آکوستیک امیشن شرح و تفاوت آن با سایر روش های ارزیابی غیر مخرب مقایسه شده است. بیان می شود که آکوستیک امیشن یک روش تشخیص دینامیک است و می تواند به صورت آنی ناپیوستگی ها را در یک سازه تحت کشش نشان دهد. ماهیت سیگنال های آکوستیک امیشن به عنوان سیگنال الکتریکی ذکر شده است. در انتها بهترین روش جهت بررسی نقص های تورقی و خرابی الیاف روش آکوستیک امیشن معرفی می گردد. این مقاله قابلیت های متداول و نوظهور ارزیابی غیر مخرب را با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن برای تشخیص آسیب در مواد کامپوزیت بررسی می کند.

واژه های راهنما: آکوستیک امیشن، ارزیابی غیرمخرب، کامپوزیت، تورق، چندلایه

Non-destructive damage evaluation of composites with acoustic emission method

R. Falakdin
MSc Student

R. Hosseini*
Assistant Professor

M. Latifi
Assistant Professor,
Departement of Mechanical Engineering,
Imam Hossein Comprehensive University,
Tehran

Abstract: The applications of reinforced composites and heterogeneous solid materials have been widely developed in different fields of aerospace and mechanical engineering. In this research, the necessity of using non-destructive methods in identifying possible damages in composite materials is pointed out. In addition, the acoustic emission method is described and compared with other non-destructive evaluation methods.
It is stated that acoustic emission is a dynamic diagnosis method which can instantly show discontinuities in a structure under tension. The nature of acoustic emission signals is mentioned as an electrical signal. Finally, it is concluded that the best method to check the delamination and fiber damage in composite laminates is the acoustic emission method.

Keywords: Acoustic emission, Non-destructive evaluation method, Delamination, Laminate composite

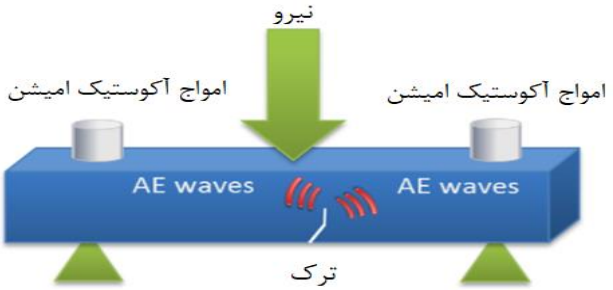
* نویسنده مسئول، r.hosseini.mech@gmail.com

۱- مقدمه

مقاومت قابل ملاحظه ورقه های پلیمر تقویت شده با الیاف پیوسته[1]در برابر خستگی در مقایسه با مواد مهندسی سنتی مانند فولادها و آلیاژهای آلومینیوم عامل مهمی در کاربرد گسترده کامپوزیت ها در سازه های سبک بوده است. عملکرد خستگی برجسته کامپوزیت ها منجر به استفاده از آنها در طیف گستردهای از اجزای سازنده شده است که باید چرخه بارهای شدید را برای مدت طولانی تحمل کنند. این قطعات شامل پروانه های هواپیما، بال ها، پره های چرخان هلیکوپتر، ماشین آلات چرخان، بدنه قایق های تفریحی، پروانه های قایق، قابه ای دوچرخه مسابقه و نظایر آن است. مقاومت در برابر خستگی زیاد نیز عاملی اساسی در استفاده از کامپوزیت ها در کاربردهای جدید مانند پروتزهای پزشکی شامل اندام مصنوعی و مفاصل ران و زانو همچنین اجزای خودرو مثل فنرهای تعلیق میباشد. ورقه های الیاف پیوسته معمولاً تحت بارگذاری سیکلیک[2] درون صفحه بسیار مقاوم هستند، اگرچه آسیب میتواند در زیر بارهای خستگی زیاد درون صفحه و همچنین در زیر بارهای دینامیکی خارج از صفحه و ضخامت متوسط باشد. هنگامی که کامپوزیتها در معرض این شرایط بارگذاری خستگی قرار میگیرند، آسیب به اشکال ترک خوردگی ماتریس، جفت شدن ترک، شروع و رشد تورق (لایه لایه شدن)[3]و شکستگی الیاف ایجاد میشود [۱]. علاوه بر این حالتهای آسیب، اشکال دیگری از آسیب خستگی میتواند به مواد کامپوزیت ساندویچی وارد شود. از جمله آنها میتوان به اتصال پوسته و شکست هسته اشاره کرد. هر دو نوع از کامپوزیت های چندلایه[4] و ساندویچ پنل هنگام قرار گرفتن در محیطی که دامنه وسیع و نوسانات سریع دما را تجربه میکند، در معرض آسیب خستگی ناشی از حرارت نیز هستند [۲, ۳]. آسیب خستگی ناشی از تنش یا سیکل حرارتی میتواند یکپارچگی مکانیکی و ایمنی یک ساختار کامپوزیتی را به خطر بیندازد. بنابراین ضروری است که آسیب ایجاد شده با استفاده از فناوری های ارزیابی غیرمخرب[5]زودهنگام شناسایی شود. هنگام استفاده از کامپوزیتها در کاربردهای ساختاری، ارزیابی غیر مخرب برای آسیب خستگی یک نیاز اساسی است. روند ارزیابی غیر مخرب باید دو هدف اساسی داشته باشد: ۱- توصیف قابل اعتماد و قابل تکرار از انواع، ابعاد و مکان های آسیب خستگی ۲- تعیین دقیق تغییرات در خصوصیات مکانیکی به عنوان مثال سختی ناشی از آسیب خستگی. این موارد به دلیل پیچیدگی آسیب خستگی در کامپوزیت ها، اهداف چالش برانگیزی هستند. تشخیص آسیب در کامپوزیت ها به بهبود روش های ارزیابی غیرمخرب قدیمی و همچنین توسعه انواع فنآوریهای جدید ارزیابی غیر مخرب نیاز دارد. تمرکز اصلی این مقاله بررسی تواناییها و محدودیتهای روش آکوستیک امیشن[6]برای شناسایی و توصیف آسیب خستگی در چندلایه ها و کامپوزیت‌های ساندویچ است. در ادامه شرحی از اصول عملیاتی روش آکوستیک امیشن و عوامل موثر بر آن ارائه خواهد شد.

۲- روش آکوستیک امیشن

وقتی که ماده‌ای جامد تحت تنش باشد، عیوب موجود در آن باعث ایجاد امواج صوتی با بسامد بالا می‌گردند. این امواج در ماده منتشر شده و می‌توان توسط حسگرهای خاصی آن‌ها را دریافت کرد و با تجزیه و تحلیل این امواج امکان شناسایی نوع عیب، مکان و شدت آن فراهم می‌گردد که این امر اساس روش آکوستیک امیشن را تشکیل می‌دهد [۴] .



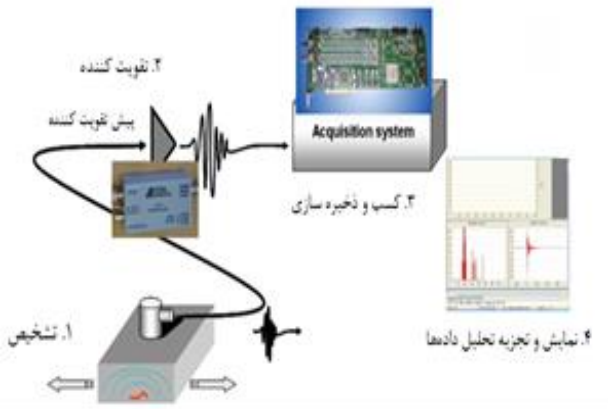
شکل ۱ ایجاد امواج الاستیک بر اثر تنش در ماده [۵]

آکوستیک امیشن یک روش غیرفعال[7]است. در این روش ارزیابی غیرمخرب از طریق دریافت امواج الاستیک تولید شده در ماده و تحلیل آن‌ها به منظور برقراری ارتباط بین امواج دریافت شده و تغییرات ایجاد شده بر روی منبع انجام میگیرد. با توجه به انتشار امواج از منبع تا سطح ماده، می‌توان آن‌ها را توسط سنسورهایی ثبت کرد و از این طریق اطلاعاتی در مورد وجود و محل منبع انتشار امواج به دست آورد. این امواج می‌توانند فرکانس‌هایی تا چند مگاهرتز داشته باشند. برای شنیدن صدای مواد و شکست سازه‌ها از سنسورهای فراصوت در محدوده ۲۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز استفاده می‌شود. فرکانس‌های متداول در

[1] FPR
[2] Cyclic
[3] Delamination
[4] Laminates
[5] (Non destructive evaluation) NDE
[6] Acoustic emission
[7] Passive

این روش در محدوده ۱۵۰ الی ۳۰۰ کیلوهرتز هستند. انتشار امواج تا سطح قطعه یعنی جایی که سنسورها نصب شده‌اند، ادامه می‌یابد و به وسیله سنسورها ثبت شده و به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌گردد. سیستم آکوستیک امیشن این سیگنال‌ها را پردازش می‌کند و آن‌ها را به بسته‌های اطلاعاتی تبدیل می‌کند. در نهایت اطلاعات آماری نظیر مشخصات و موقعیت منابع محاسبه شده و به‌صورت نمودارهای گرافیکی و عددی نمایش داده می‌شوند تا مورد تفسیر قرارگیرند.

کاربردهای روش آکوستیک امیشن تنها به ارزیابی غیر مخرب قطعات، تجهیزات و سیستم های مختلف محدود نمی‌شود؛ به‌علاوه می‌توان از آن برای تخمین عمر قطعات و تجهیزات بهره گرفت. هم‌چنین از این روش می‌توان برای آشکارسازی و مکان‌یابی تخلیه های جزئی ولتاژ در مبدل‌های بزرگ، تحقیق و بررسی خصوصیات و مشخصات مواد، زمین‌شناسی و تحقیق در مورد میکرو ارتعاش‌ها استفاده کرد.



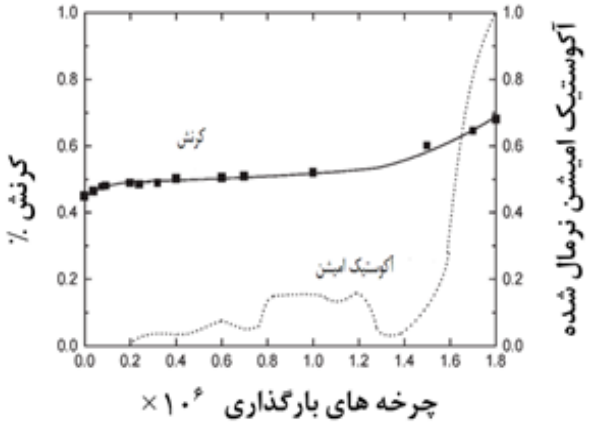
شکل ۲ مراحل آزمون آکوستیک امیشن [۶]

۳- آکوستیک امیشن درکامپوزیت ها

از آکوستیک امیشن میتوان به عنوان یک روش ارزیابی غیرمخرب موثر برای نظارت مستمر بر توسعه آسیب خستگی در کامپوزیت ها استفاده کرد. آسیب خستگی ناشی از تنش یا سیکل حرارتی میتواند یکپارچگی مکانیکی و ایمنی یک ساختار کامپوزیتی را به خطر بیندازد. بنابراین ضروری است که آسیب با استفاده از فناوری‌های ارزیابی غیرمخرب زود هنگام شناسایی شود. تشخیص آسیب در کامپوزیت ها به بهبود روش های ارزیابی غیرمخرب قدیمی و همچنین توسعه انواع فنآوری های جدید ارزیابی غیر مخرب نیاز دارد. آکوستیک امیشن اساساً شامل تشخیص امواج تنش با شدت کم است که در اثر وقوع خرابی ایجاد می‌شوند. براینمونه میتوان به تورق و شکستگی الیاف اشاره کرد. امواج تنش از انرژی کرنشی که در طی یک خرابی آزاد میشود تشکیل میشوند و به سطوحی منتقل میشوند که توسط حسگرهای صوتی شناسایی میگردند. جذابیت روش آکوستیک امیشن، توانایی نظارت بر شروع و آسیب انباشته در زمان واقعی است که با اکثر سایر روش های ارزیابی غیر مخرب امکان پذیر نیست. از دیگر مزایای آکوستیک امیشن، توانایی تشخیص بین برخی از انواع آسیب و در صورت استفاده از تعدادی سنسور، تعیین محل وقایع خرابی است. از آکوستیک امیشن اغلب برای نظارت بر شکل‌گیری و رشد آسیب خستگی در کامپوزیت ها استفاده می شود [۷, ۸]. به طور کلی مشخص شده است که بازرسی از کامپوزیتها با استفاده از آکوستیک امیشن میتواند بینش ارزشمندی در مورد مکانیزم های خرابی ایجاد کند که در مراحل مختلف در طول عمر خستگی رخ می‌دهند و در نهایت منجر به خرابی میگردند. این به این دلیل است که مکانیزم های مختلف شکست خستگی سیگنال های مختلف آکوستیک امیشن را ایجاد می کنند. به عنوان مثال، چنگ و همکاران [۷] دریافتند که ترکهای ماتریس عرضی ناشی از بارگذاری خستگی کامپوزیت های کربن/ اپوکسی را می‌توان با تشخیص انتشارهای صوتی با دامنه بالا که دارای یک فرکانس مشخص است، شناسایی کرد. کلودیا و همکاران [۹] دریافتند که با استفاده از خصوصیات روش آکوستیک امیشن، شکست و رشد ترک بین لایه ای در سیگنال هایی با دامنه بالا با استفاده از این آزمون قابل تشخیص است. ونچون و همکاران [۱۰] دریافتند که رفتار و آسیب خمشی و تکامل آسیب مبتنی بر کرنش سه بعدی در کامپوزیت تقویت شده، با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن قابل تشخیص است. بیونگ‌ووک جانگ و همکاران [۱۱] اطلاعات مفیدی در مورد وقایع و مکانهای ضربه کم سرعت، با سیستم بازرسی آکوستیک امیشن و روش مثلث‌بندی در فواصل مختلف سنسور و مکان ضربه در صفحه سفت‌شده با کامپوزیت بدست آوردند. میچال سوفرو همکاران [۱۲] در یافتند که شکست الیاف، تورق، گسیختگی و ترک‌خوردگی ماتریس با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن قابل تشخیص است و شکست ترک ماتریس با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن در سیگنال باند فرکانس بین ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز در لوله های کامپوزیت الیاف کربن[1]قابل ارزیابی می‌باشد. میلاد سعیدی‌فر و همکاران [۱۳] دریافتند که تشخیص آسیب، شناسایی آسیب و مکانیابی آسیب در

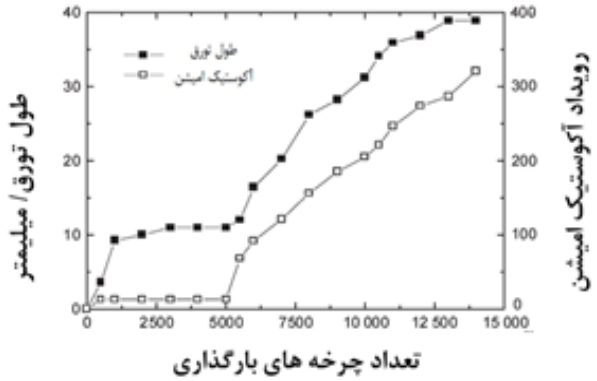
[1] CFRP

کامپوزیتهای چندلایه با استفاده از خصوصیات روش آکوستیک امیشن قابل تشخیص است. همچنین تورق و شکست الیاف با داشتن میزان آکوستیک امیشن بسیار بالاتر از ترک های ماتریس قابل تشخیص است. در بعضی موارد میتوان بین ترک‌خوردگی ماتریس، تورق و خرابی الیاف محلی تفاوت قائل شد. با این حال، شناسایی مکانیزم های مختلف آسیب خستگی ممکن است دشوار باشد، زیرا سیگنال‌های آکوستیک امیشن اغلب توسط سیگنال هایی به وسیله اصطکاک و سایش سطح ترک با هر بارگذاری تولید می‌شوند. با تجزیه و تحلیل دقیق از طیف آکوستیک امیشن و تکنیک های خوب فیلتر صدا، میتوان بین انواع خاصی از آسیب خستگی تفاوت قائل شد.



شکل ۳ تأثیر تعداد چرخه‌های بار کشش- کشش بر افزایش کرنش و میزان آکوستیک امیشن یک کامپوزیت بور/ اپوکسی در کنترل بار. نمودار از ویلیامز و همکاران[۱۴]

قابلیت اطمینان روش آکوستیک امیشن برای نظارت دقیق بر پیشرفت خستگی در مطالعات بیشماری اثبات شده است. به عنوان مثال، شکل ۳ [۱۴] رابطه بین میزان آکوستیک امیشن و افزایش کرنش را برای یک کامپوزیت بور/ اپوکسی در طول آزمایش خستگی تحت بار-کنترل[1]شده نشان میدهد. همانطور که در شکل دیده میشود کرنش به تدریج تا حدود ۱/۵ میلیون سیکل افزایش مییابد و سپس با نزدیک شدن کامپوزیت به خرابی نهایی، سرعت آن با بارگذاری بیشتر، سریعتر افزایش می‌یابد. این روند با نتایج آکوستیک امیشن منعکس شده است که در ابتدا کم است، اما به دلیل افزایش بروز ترک خوردگی تورق (لایه لایه شدن) و شکستگی الیاف به سرعت به سمت خرابی پیش می‌رود. مثال دیگری از کاربردهای این روش در مواد کامپوزیت در شکل (۴) [۸] آورده شده است که تعداد رویدادهای آکوستیک امیشن را در هنگام بارگذاری سیکلیک کامپوزیت کربن/ اپوکسی ثبت کرده است. چنانچه در شکل دیده می شود تغییر طول ترک تورق در چندلایه ای[2]است که مستقیماً توسط میکروسکوپ نوری اندازه گیری شده است. همچنین مشاهده می‌شود که بین نتایج آکوستیک امیشن و مشاهده مستقیم نوری از رشد آسیب تورق تحت بارگذاری خستگی رابطه مستقیم وجود دارد. هر تغییر در میزان پیشرفت آسیب همراه با تغییر مربوطه در میزان انباشت رویداد آکوستیک امیشن است. آسیب خستگی به کامپوزیت ها نیز با استفاده از روش آکوستیک امیشن حرارتی قابل تشخیص است. این روش اصلاح آکوستیک امیشن معمولی است و شامل گرم کردن کامپوزیت قبل از پخته شدن در کوره یا استفاده از هیتر دستی در دمای متوسط ۱۰۰–۱۵۰ درجه سانتیگراد و به دنبال آن خنک کردن در دمای اتاق است. در طی یک سیکل حرارتی گرمایش و خنک‌سازی، سطحهای مخالف ترکهای خستگی به دلیل انبساط حرارتی و توزیع مجدد کرنشهای باقیمانده در کامپوزیت، با هم ساییده میشوند. اصطکاک ناشی از سایش سطحهای ترک، امواج آکوستیک امیشن ایجاد میکند که توسط حسگرها تشخیص داده میشود. این روش پتانسیل شناسایی سطوح کم آسیب خستگی را دارد که با استفاده از آکوستیک امیشن معمولی به راحتی قابل شناسایی نیست. ساتو و همکاران [۱۵, ۱۶] ریز ترک های ناشی از بارگذاری خستگی را در کامپوزیتهای با استفاده از روش آکوستیک امیشن شناسایی کرد. با این حال، این روش به ندرت برای تشخیص آسیب خستگی استفاده میشود، زیرا اغلب گرم کردن و خنک‌سازیکامپوزیت عملی نیست.



شکل ۴ مقایسه طول تورق اندازه گیری شده توسط میکروسکوپ نوری و تعداد رویداد آکوستیک امیشن در هنگام بارگذاری خستگی یک کامپوزیت کربن/ اپوکسی. جدول از کوهن و همکاران[۸]

در مواد کامپوزیتی اگر به علت بارگذاری تغییراتی مانند لایه لایه شدن (تورق)، جدا شدن رزین، شکسته شدن الیاف تقویت

[1] Load-controlled
[2] Laminate

کننده و غیره ایجاد شود، سیگنال های آکوستیک امیشن تولید میشود. علاوه بر موارد فوق عیوبی مانند خوردگی و نشتی هم سیگنال‌های فراصوتی منتشر میکنند. مثلا ایجاد خوردگی در کف مخازن نفت، سیگنال های انفجاری تولید می کند که از میان مایع نفت تا دیواره مخزن منتشر میشود و با نصب سنسورها بر روی دیواره میتوان این سیگنال ها راشناسایی نمود. سیگنال‌های ایجاد شده بر اثر نشتی میتواند هم به صورت انفجاری و هم به صورت پیوسته باشد. اساساً انفجارها درفشار بالا رخ میدهند و زمانی که فشار کم است و یا جریان موجود آرام است، سیگنال های پیوسته با دامنه پایین و فاصله انتشار کوچک ایجاد میشود. توانایی آزمون آکوستیک امیشن در شناسایی این عیوب باعث شده تا استفاده از این روش در بازرسی تجهیزاتی مانند مخازن تحت فشار کامپوزیتی، تانک های نگهداری و سیستم های لوله کشی کامل گسترش یابد.

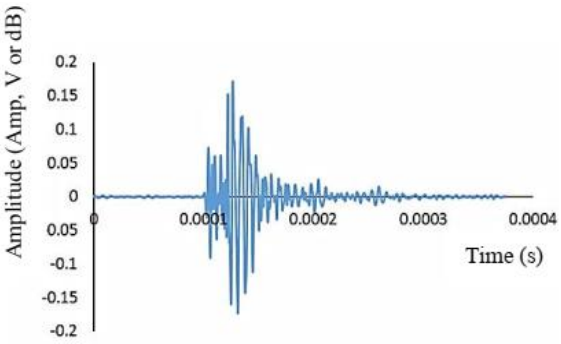
۴- تشخیص آسیب در یک نمونه کامپوزیتی با روش آکوستیک امیشن

آقای حمزه لو و همکاران [۱۷] به بررسی مکانیزم های تخریب در خمش پانلهای ساندویچی کامپوزیت پایه پلیمری توسط روش آکوستیک امیشن پرداختند. ایشان با تحلیل داده های آکوستیکی، به بررسی و تشخیص مکانیزم های خرابی در پانل های ساندویچی کامپوزیت پلی استر/ شیشه با هسته فوم پلی اورتان در آزمون خمش سه نقطه با اعمال تضعیف اولیه حاصل از ضربه های با انرژی مختلف پرداختند.

شکل ۵ دستگاه آزمون ضربه به همراه کلمپ کردن قطعه در موقعیت خود

شکل ۶ یکی از نمونه ساندویچ پانل‌ها هنگام بارگذاری خمشی

در شکل (۷) نمونه سیگنال آکوستیکی دریافت شده توسط سنسور آکوستیک از نمونه در لحظه ۳۴/۰۵ ثانیه از شروع آزمون خمش نمایش داده شده است. همانطور که در شکل (۷) مشاهده میگردد دامنه سیگنال دستگاه داده برداری میتواند برحسب جریان ، ولتاژ



شکل ۷ نمونه سیگنال آکوستیک دریافت شده حین آزمون خمش از ساندویچ پانل

نتایج حاصل نشان داد که مکانیزم های شکست ترد شامل شکست ماتریس و شکست فوم در هر رویداد مختلف آکوستیک، مجموع انرژی های بالاتر با پراکندگی کمتر در بازه فرکانسی پایینتر نسبت به مکانیزم های شکست نرم مانند شکست الیاف شیشه آزاد میکنند. اما رویدادهای آکوستیک در مکانیزم شکست نرم الیاف شیشه با مجموع انرژی های کمتر و به صورت پراکنده در بازه فرکانسی بالاتر اتفاق افتاده است. تطبیق تصاویر چشمی با داده های آکوستیکی و همچنین نمودار نیرو جابجایی، علاوه بر صحه گذاری در تعیین مکانیزم های تخریب در این پانل های ساندویچی، منجر به تعیین بازه فرکانسی جدید شکست فوم متخلخل(۱۹۰الی۲۲۰کیلوهرتز) نیزگردید.

در تحقیق عملیاتی آقای ژین ژانگ[1] و همکاران به بررسی آسیب با سیستم آکوستیک امیشن در نقص یابی ریل قطار پرداختند. سیستم مورد استفاده در این تحقیقات در شکل زیر آورده شده است[۱۸].

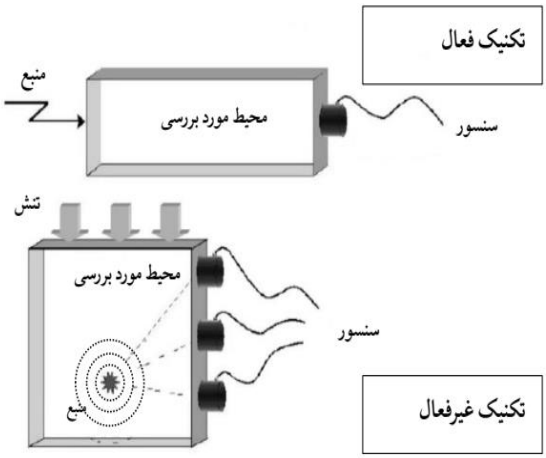
شکل ۸ محیط آزمایش و سیستم تست [۱۸]

[1] Xin Zhang

در شکل (۸)، ۱) مولد سیگنال، ۲) مولد امواج، ۳) تقویت کننده ولتاژ بالا، ۴) سیستم دریافت سیگنال آکوستیک امیشن، ۵) لپتاپ، ۶) جعبه برق، ۷) سنسور گیرنده و ۸) سنسور فرستنده می باشند. [۱۸]

۵- تفاوت آکوستیک امیشن باسایر روشهای ارزیابی غیرمخرب

آزمون آکوستیک امیشن در سه مبحث اصلی با سایر روش های غیر مخرب تفاوت دارد. اول: سیگنال دریافتی از درون خود ماده نشات میگیرد نه ازیک منبع خارجی. دوم: آنکه آکوستیک امیشن معمولا حرکت عیوب در ماده را تشخیص می دهد در حالیکه سایر روش ها غیرمخرب موجودیت و ابعاد هندسی عیب را مشخص میکنند. سوم: تفاوت اصلی که روش آکوستیک امیشن با سایر روش‌های غیرمخرب دارد، غیر فعال بودن[1]این روش است در حالیکه سایر روش های غیر مخرب در اکثر موارد فعال[2] هستند به عنوان مثال روش اولتراسونیک[3]یا رادیوگرافی[4]یا سایر روشها برای بدست آوردن اطلاعات راجع به قطعه مورد نظر نیاز به اعمال انرژی خارجی یا تغییری بر روی ماده مورد نظر هستند، ولی در روش آکوستیک امیشن انرژی آزاد شده در داخل ماده مرجعی برای کار بازرسی می‌باشد.



شکل ۹ تفاوت روشهای آکوستیک امیشن فعال و غیرفعال[۱۹]

جدول ۱ قابلیت ها و محدودیت های برخی از روشهای غیرمخرب [۲۰]

نوع تست	مزایا	معایب
تست بصری	مناسب برای بازرسی سطح و نظارت بر مراحل ساخت یک محصول	۱.فقط به عیوب سطح محدود می شود.۲.به شدت به تجربه بازرس بستگی دارد.

نوع تست	مزایا	معایب
تست مایع نافذ	مناسب برای بازرسی سطحی محصولات تولید انبوه.	۱. محدود به عیوب سطحی است.۲. متغیرهای بسیار زیادی بر آزمون تأثیر می گذارند.۳.فرآیند نیاز به تمیزکاری دارد.
بازرسی ذرات مغناطیسی	توانایی تشخیص عیوب روی سطح یا نزدیک به آن در مواد فرومغناطیسی.	۱. محدود به عیب در مجاورت سطح.۲. فقط برای آزمایش مواد فرومغناطیسی قابل استفاده است.۳. آزمایش اشکال پیچیده ممکن است امکان پذیر نباشد.۴. حذف هر گونه پوشش مورد نیاز است.
بازرسی رادیوگرافی	قابلیت تشخیص عیوب سطحی و زیرسطحی را دارد.	۱.خطرات ایمنی و مسائل مربوط به دفع زباله.۲. زمان بر۳. گران۴. بستگی به جهت عیوب دارد.
تست اولتراسونیک	قابلیت تشخیص عیوب سطحی و زیرسطحی را دارد.	۱. عیوب کوچکتر از ساختار دانه نمی توانند شناسایی شوند۲. تفسیر نادرست سیگنال ها ممکن است رخ دهد.
تست جریان گردابی	توانایی تشخیص عیوب روی سطح یا نزدیک به آن در موادی که با یا بدون پوشش رسانای الکتریکی هستند (مانند رنگ).	۱. محدود به آزمایش مواد رسانای الکتریکی۲. ارزیابی عیوب زیرسطحی در مواد فرومغناطیسی با این تکنیک محدود می‌شود.۳. نظریه جریان های گردابی، به طور کلی، پیچیده است.
آکوستیک امیشن	قادر به تشخیص عیوب سطحی و زیرسطحی با اطلاعات مربوط به انتشار عیب است.	۱. ساختار تحت آزمایش امواج تنش را کاهش می دهد.۲. صداهای بیرونی می توانند باعث تعبیر نادرست شوند.

۶- مزیت های آکوستیک امیشن

آکوستیک امیشن یک روش تشخیص دینامیک است و میتواند به صورت آنی ناپیوستگی ها را در یک سازه تحت کشش نشان دهد.

در مورد تجهیزاتی نظیر مخازن بزرگ و در مواردی که دلیلی برای بازرسی داخلی وجود ندارد، می‌توان در حین سرویس و بدون باز کردن تجهیزات از این روش برای شناسایی و موقعیت‌یابی عیوبی مانند نشتی و خوردگی استفاده کرد. در این

[1] Passive
[2] Active
[3] Ultrasonic
[4] Radiography

روش قابلیت بازرسی از راه دور قطعات و سیستم ها وجود دارد و می‌توان داده‌ها را به صورت کنترل از راه دور انتقال داد. به همین دلیل کاربرد این روش در خطوط لوله های نفتی وصنایعی که نزدیک شدن به آنها خطرناک است، بسیار مفید است.

نسبت هزینه به کارایی در این روش پایین است. به نحوی که در جاهایی که انجام تست با روشهای معمول هزینه های سرسام آوری دارد نظیر پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، صنایع هوافضا و ... استفاده از این روش سبب صرفه‌جویی اقتصادی چشمگیری خواهد شد. سرعت انجام تست بسیار زیاد است. مثل سازه یک مخزن ۱۲۰۰۰ تنی که برای تست آن با روش اولتراسونیک بیش از دو هفته وقت نیاز است، اما با کمک آزمون آکوستیک امیشن ظرف مدت ۲۴ ساعت به کمک ۶۴ سنسور قابل انجام است.

این روش یکی از حساسترین روش های تست غیر مخرب است و قادر به شناسایی عیوب بسیار ریز است و می‌تواند عیوب مختلفی با ابعاد یک میکرومتر را شناسایی کند.

این روش قادر است یک سازه کامل را در شرایط عملیاتی آن ارزیابی کند و بازرسی درست در زمان رشد یک عیب و بلادرنگ[1] انجام می‌شود. به همین دلیل می‌توان از این روش برای مانیتورینگ پیوسته تجهیزات در زمان سرویس‌دهی استفاده کرد. این روش نسبت به هندسه قطعات مورد تست حساسیت کمی دارد. قادر به تست مشخصات و خصوصیات مواد است. بازرسی با سرعت بالایی انجام شده و نتایج ذخیره می‌شود. می‌توان این نتایج را در بازرسی های بعدی ارزیابی نمود. با استفاده از روابط مثلثاتی و پردازش اطلاعات دریافتی از سنسورها میتوان مکان عیب را با دقت مشخص بدست آورد. بدین ترتیب میتوان از سعی و خطاهای مکرر یا جابجایی قطعات برای تشخیص مکان عیب که در روش های دیگر اجتناب‌ناپذیر است، مانع شد.

آزمون آکوستیک امیشن می‌تواند در تمامی مراحل بازرسی که شامل تست قبل از سرویس‌دهی و حین سرویس‌دهی است، انجام شود. به طور مثال مخازن و سیستم‌های تحت فشار را میتوان بدون تعطیل کردن و در طول سرویس‌دهی مورد ارزیابی مجدد یا بازبینی های دورهای قرار داد.

در مقایسه با بیشتر روش های غیرمخرب در آزمون آکوستیک امیشن ناپیوستگی خودش راه انداز انرژی است و قطعه خودش سیگنال ایجاد می‌کند [۱۷ ، ۲۱].

۷- محدودیت های آکوستیک امیشن

در کنار مزایای استفاده از روش آکوستیک امیشن این روش محدودیتهایی هم دارد که در ادامه به آن ها اشاره میشود. عیوبی که نه رشد می‌کنند و نه حرکت می‌کنند، آکوستیک امیشن تولید نمی‌کنند و بنابراین نمی‌توان آنها را شناسایی نمود. آکوستیک امیشن یک اتفاق منحصر به فرد است و در بارگذاری مشابه تکرارپذیر نمی‌باشد. سازه تحت تست امواج منتشر شده را تضعیف می‌کند. از این جهت برای اطمینان از نتایج بازرسی باید سنسورها در فواصل مناسبی نصب شوند. سیگنال‌های شناسایی شده انرژی پایینی دارند که برای شناسایی آنها به تجهیزات الکترونیکی پیچیده و نسبتاً گران‌قیمتی نیاز است. آکوستیک امیشن می‌تواند در معرض نویزهای خارجی قرار بگیرد، به طوری که نویز پس‌زمینه گاهی اوقات به سختی از سیگنالها تفکیک می‌شود. آزمون آکوستیک امیشن در مورد نویزهایی که از آستانه شناسایی فراتر می‌روند، حساس است و آنها را نیز مانند سیگنال‌های مفید اکوستیک پردازش می‌کند. در این صورت آستانه شناسایی باید افزایش یابد که آن هم به فاصله کمتر بین سنسورها و در نتیجه استفاده از سنسورها و کانالهای بیشتر منتهی می‌شود. این در حالی است که در بالاتر از یک سطح نویز معین تست کارامدی خوبی ندارد. در این روش ملاک و معیاری برای ارزیابی به شکل داده‌های متداول و موجود، در دسترس نیست و دسته‌بندی و سنجش نتایج آکوستیک امیشن به شدت به دانش و تجربه عرضه‌کننده خدمات بستگی دارد [۱۷, ۲۱].

۸- سایرکاربردهای آکوستیک امیشن

از جمله قابلیت های ویژه آکوستیک امیشن میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) تحلیل رفتار و خواص مواد مختلف مانند فلزات، سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها و سازه‌های بتنی برای تشخیص رشد ترک، خستگی، خزش، تسلیم، شکست الیاف و تورق (لایه لایه شدن).

کاربردهای آزمون آکوستیک امیشن در حین فرآیند شامل موارد زیر است:

- پردازش امواج در ماده شامل شناسایی عیوب مختلفی مانند تخلخل و ناخالصی، تشخیص عیوب جوشکاری و لحیم‌کاری نظیر ترک و عدم نفوذ.
- مانیتورینگ سازه شامل: کنترل و بازرسی پیوسته شامل سازه‌های فلزی، معادن و غیره
- تست های دورهای شامل: مخازن تحت فشار، خطوط لوله، پل ها و کابل ها، تشخیص نشتی.
- کاربردهای ویژه در صنایع شیمیایی و پتروشیمی شامل: آزمایش تانکرهای ذخیره سازی، آزمایش مخازن و رآکتورها، سکوهای اسکله، شیرهای هیدرولیک.
- کاربرد در صنایع برق شامل: مخازن رآکتورهای اتمی، ژنراتورهای بخار، تراسفورماتورها، تجهیزات رادیویی.
- کاربردهای صنایع هوافضا شامل: تست ترک‌های خستگی، تست سازه‌های کامپوزیتی.

[1] Real Time

- کاربردهای صنایع الکترونیک شامل: تستکنداکتورها، تست ترک‌های زیرلایهای تجهیزات الکترونیک.

آکوستیک امیشن یک رویداد طبیعی است که درمحدوده گستردهای از مواد، سازه ها و فرآیندها صورت میپذیرد. بزرگترین اندازه امواج آکوستیک امیشن زلزله میباشد در حالی که کوچکترین اندازه مشاهده شده این آزمون حرکت تعداد کمی از نابجاییها در درون یک جسم فلزی تحت تنش میباشد. از نظر کاربرد آزمون آکوستیک امیشن بطور کلی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود. در دسته اول آزمون آکوستیک امیشن به عنوان یک روش کارآمد در زمینه تست غیرمخرب شناخته می‌شود و در دسته دوم آکوستیک امیشن به عنوان یک آزمون مفید جهت پیش‌بینی عدم کارآیی در بحث نگهداری مطرح میشود. کاربردهای دسته اول عبارت است از: بررسی خصوصیات مکانیکی مواد، آزمایشهای اطمینان قبل از سرویس‌دهی، نمایش لحظه به لحظه فرایند.

کاربردهای دسته دوم عبارتند از: تست‌های ارزیابی مجدد کارایی سازه ها، تشخیص نشتی بازرسی دوره‌ای مخازن تحت فشار [۲۲, ۲۳].

احمدی و همکاران جدایش لایه آلومنیوم 2024-T3 را تحت بارگذاری مود یک و مود دو شکست مورد مطالعه قرار دادند. [۳۲]. همچنین اکافر و همکاران از آکوستیک امیشن به عنوان روش پاییش همزمان جهت شناسایی رشد ترک در ورق آلومینیوم 2024-T6 ترمیم شده بهره بردند.[۳۳].

۹- سیگنال های اکوستیک امیشن

سیگنال آکوستیک امیشن، سیگنالی الکتریکی است که با دریافت موج توسط سنسور تولید شده است. این امواج که توسط سنسورها ثبت شده و به صورت سیگنال‌های الکتریکی وارد سیستم آکوستیک امیشن میشوند، به دوگروه تقسیم میشوند. هر کدام از این انواع، منابع خاص خود را دارد. دسته اول مربوط به رویداد آکوستیک امیشن است که برای انجام آزمون واجب بوده وحاوی اطلاعات مفیدی از رویداد درون قطعه است و دسته دوم شامل تمامی امواج ناخواستهای که نه تنها حاوی اطلاعات مفید نیستند، بلکه وجود آنها انجام صحیح آزمون را تحت تأثیر قرار می‌دهد و این امواج را اصطلاحا نویز می‌نامند. همانطور که در شکل ۱۰ [۲۵] نشان داده شده است سیگنال‌های دریافت شده به دو نوع انفجاری و پیوسته تقسیم می‌شوند [۲۴].

سیگنال انفجاری[1] این نوع از موج زمانی بوجود میآید که یک سیگنال مستقل که در نتیجه یک اتفاق آکوستیک امیشن مستقل تولید شده است، مشاهده گردد. این نوع سیگنال به تنهایی یا همراه با سیگنال های انفجاری دیگر و یا در زمینه‌ای از سیگنال های پیوسته مشاهده می شود. انفجار، پالس یا بسته موج کوتاهی است که گاهی اوقات ممکن است درزمینه‌ای ازسیگنالهای پیوسته و یا نویزها باشد، ولی نقاط شروع و پایان به وضوح از نویزها مشخص میشوند. هنگامی که یک انفجار به وسیله سیستم آکوستیک امیشن شناسایی می‌شود، اصطلاحاً می‌گویند که یک ضربه وارد شده است. از منابع این نوع موج می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: پارگی جوش سرد در فرآیندهای اصطکاکی، برخورد برجستگی های سطوح در تماس باهم در اصطکاک، شکستن براده در حین ماشینکاری، فرآیند شکست ابزار در ماشینکاری.

سیگنال پیوسته[2] چنانچه نرخ وقوع زیاد باشد، سیگنال‌های انفجاری مستقل با یکدیگر ترکیب شده و به‌صورت پیوسته درمی‌آیند، سیگنال‌های پیوسته شامل دامنه ها و فرکانسهای گوناگونی هستند که پایان نمی‌یابند. باید توجه داشت که امواج انفجاری و پیوسته مفاهیم نسبی هستند و ممکن است یک سیگنال پیوسته نسبت به یک حد آستانه انتخابی انفجاری تلقی شود.

۱۰- پارامترهای شناسایی امواج آکوستیک امیشن

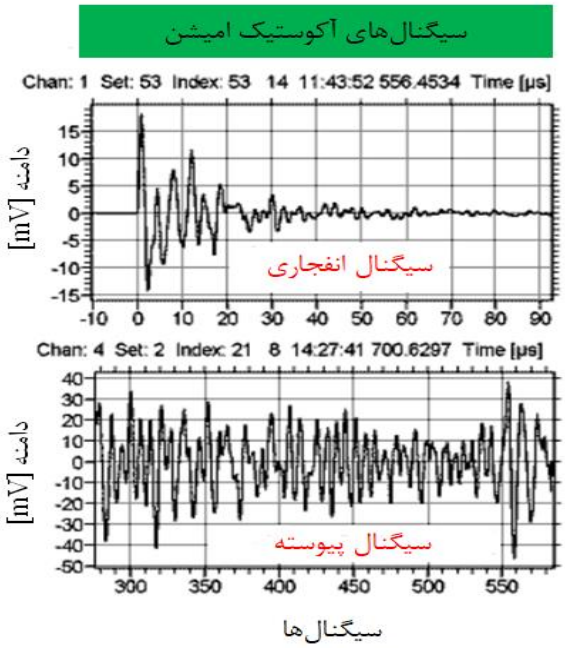
یک موج صوتی نه تنها میتواند از رشد ترکها و یا منابع مختلف ایجاد شود بلکه این موجها از منابع غیر دلخواه مانند منابع نویز نیز ممکن است ایجاد گردند. به همین جهت شناخت پارامترهای یک سیگنال از اهمیت خاصی برخوردار است. پنج پارامتر مهم تحلیل سیگنال‌های آکوستیک امیشن در شکل (۶) [۲۵] نشان داده شده است. این پارامترها عبارتند از: شمارش ضرب آهنگها (شمارش پالس ها)، دامنه، زمان استمرار، زمان رشد و انرژی وقایع. در بیشتر آزمون‌ها از تعدادی از این پارامترها استفاده می‌شود. پارامترهای دیگری نظیر انرژی واقعی، فرکانس متوسط و طیف لحظه ای برای بعضی کاربردها استفاده می‌گردد. همزمان با این پارامترها ویژگی هر ضربه به کامپیوتر منتقل می‌شود که معمولاً شامل متغیر مهمی مانند زمان استمرار سیگنال، مقدار لحظه ای نیروی اعمالی، شمارش سیکل های بارگذاری (درصورت انجام تست خستگی) و سطح لحظه ای نویزها میباشد. طول مشخصات هر ضربه معمول ۲۰ تا ۴۰ بایت می باشد [۲۲].

۱۰-۱- حداکثر دامنه (A)[3]

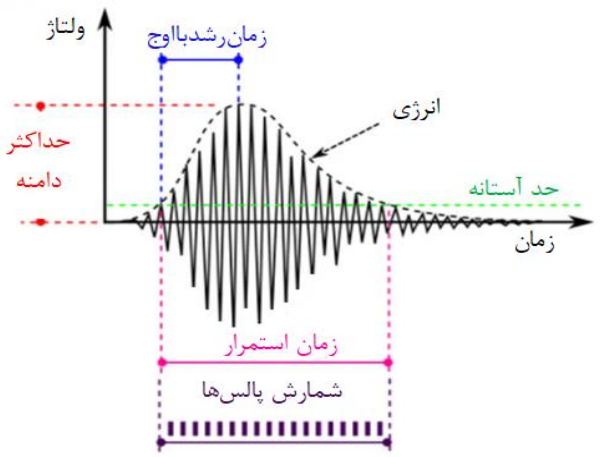
حداکثر دامنه معادل با بیشترین ولتاژی است که یک موج آکوستیک به آن می‌رسد. این پارامتر قابل تشخیص بودن سیگنال‌ها را تعیین می‌کند و مستقیماً با بزرگی واقعی که در

[1] Burst Signal
[2] Continuous signal
[3] Amplitude

منبع رخ داده، متناسب است. مقدار دامنه ممکن است از چند ولت تا چند میکروولت تغییر کند. دامنه از مناسبترین پارامترها برای مطالعات آماری توابع توزیع است که معمولاً با واحد دسی بل[1]بیان میشود، به نحوی که که در آن ۱ میکروولت در مبدل برابر با صفردسی بل، ۱۰میکروولت برابر با ۲۰ دسی بل، ۱۰۰میکروولت برابر با ۴۰ دسی بل و ... بیان میشود.



شکل ۱۰ انواع سیگنال آکوستیک امیشن[۲۴]



شکل ۱۱ یک نمونه سیگنال آکوستیک امیشن وشناسایی پارامترها[۲۰]

۱۰-۲- شمارش پالس ها (شمارش ضرب آهنگ‌ها)(N)[2]

تعداد ضرب آهنگ ها معادل با تعداد پالس‌هایی هستند که از آستانه معین عبور می‌کنند. این پارامتر از ساده ترین پارامترها برای بررسی سیگنال‌های آکوستیک امیشن میباشد، اما به شدت به خواص آکوستیکی ماده و حسگر بستگی دارد. در بیشتر موارد سیگنال با تعداد پالس‌های شمرده شده کمتر از ۳ و زمان استمرار کمتر از ۳ میکرو ثانیه به عنوان سیگنال‌های ناخواسته در نظر گرفته شده و در تحلیلها حذف می‌گردند [۲۶].

۱۰-۳- انرژی وقایع (E)

انرژی وقایع به عنوان پارامتر نشان‌دهنده بزرگی سیگنال آکوستیک امیشن میباشد که مقدار آن برابر با سطح زیر منحنی سیگنال تقویت شده (MARS) میباشد. این پارامتر از جهات زیادی به شمارش پالسها و حتی دامنه برتری دارد، زیرا هم به دامنه و هم به زمان پالس بستگی دارد و در عین حال وابستگی کمتری به فرکانس کاری و آستانه تعیین شده دارد.

۱۰-۴- زمان استمرار (D)[3]

زمان استمرار معادل با زمان طی شده از اولین پالس آکوستیک امیشن گذرنده از آستانه تا آخرین آنها می‌باشد. این پارامتر با مقیاس میکروثانیه اندازه گیری میشود و به بزرگی واقعه صوتی و خواص صوتی و انعکاسی ماده وابسته است. این پارامتر برای شناسایی فرایندهایی نظیر لایه لایه شدن (تورق) کامپوزیت‌ها و نیز در فیلتر کردن نویزها بسیار مفید است.

۱۰-۵- زمان رشد با اوج (R)[4]

زمان طی شده از پالس گذرنده از آستانه تحریک تا حداکثر پیک (اوج) سیگنال است و به خواص انتشار موج در ماده بستگی دارد. از این پارامتر برای انواع مختلف اصلاح سیگنال ورود نویزها استفاده میشود.

۱۱- اثر کایزر و فلیسیتی

رابطه بین رویداد آکوستیک امیشن و سابقه بار قبلی توسط کایزر[5] و فلیسیتی بیان شده است. این آثار هم در کامپوزیت و هم در فلزات به شکل های مختلف رخ می‌دهد. این اثر که خصوصیت برگشت‌ناپذیری امواج آکوستیک امیشن را در بر می‌گیرد، چنین بیان می‌شود که امواج آکوستیک امیشن هنگامی پدید میآیند که سازه برای اولین بار تحت بارگذاری قرار گیرد.

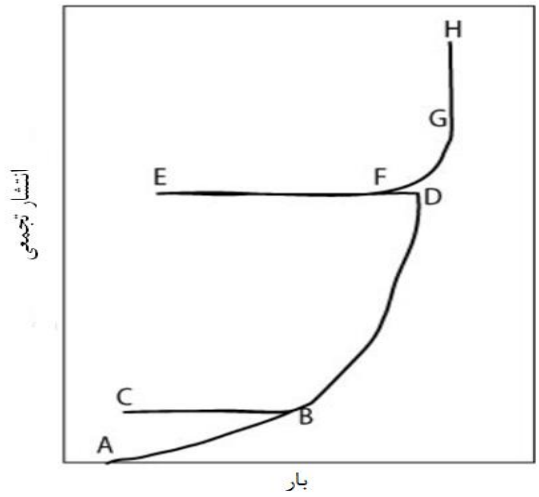
[1] dB
[2] Counts
[3] Duration
[4] Rise Time
[5] Kaiser

بعد از برداشتن بار و بارگذاری مجدد تا رسیدن به حداکثر بار قبلی هیچ موج آکوستیک امیشنی در جسم تولید نخواهد شد. به این ترتیب هر سیگنال آکوستیک امیشن تنها یکبار ایجاد میشود. بدین ترتیب با توجه به اثر کایزر یک ماده تحت بار تنها زمانی که سطح بار از حداکثر مقدار قبلی آن فراتر رود، امواج آکوستیکی منتشر میکند. در طول بارگذاری مجدد و قبل از رسیدن به حداکثر بار قبلی، مواد به صورت الاستیکی رفتار می‌کنند و اگر اثرکایزر برای این مواد ثابت باشد، قبل از رسیدن سطح‌تنش به میزان حداکثر قبلی هیچ سیگنالی ثبت نخواهد شد ویا مقدار اندکی ثبت می‌شود [۲۷]. درتمام بارگذاری های مجدد نیز تنها زمانی که سطح نیرو از حداکثر میزان قبلی آن تجاوز کند، سیگنال‌های‌آکوستیک امیشن منتشر می‌شوند. در بارگذاریهای بعدی هر انتشاری قبل از رسیدن بار به حداکثر مقدار قبلی، ناشی از ایجاد عیوب در سازه می‌باشد. ظهور امواج پایین‌تر از بار حداکثر بار قبلی اثر فلیسیتی نامیده می‌شود. نسبت بارگذاری جدیدی که به ظهور امواج منجر میشود، (P_e) به حداکثر بارگذاری قبلی (P_m) نسبت فلیسیتی (Fr) نامیده میشود [۲۸]. اثر فلیسیتی[1] و نسبت آن طبق رابطه زیر محاسبه میگردد:

$$Fr = \frac{P_e}{P_m} \qquad (1)$$

چنانچه این نسبت یک یا بزرگتر از یک باشد، نشانگر عدم ایجاد عیب در سازه میباشد و چنانچه این عدد از یک کمتر باشد نشانگر ایجاد عیب و خرابی درهنگام بارگذاری مجدد میباشد. اثر فلیسیتی قطعیت بیشتری در پلاستیک های تقویت شده توسط الیاف[2] نسبت به فلزات دارد. درجه اثرکایزر- فلیسیتی برای فلزات تا حدی متفاوت و متغیر است و ممکن است این اثر پس از گذشت چند ساعت یا چند روز برای آلیاژهایی که به صورت محسوسی در دمای اتاق بازیابی می‌شوند، محو گردد. برآیند صحبتهای بالا بر این نکته تأکید دارد که برای جلوگیری از نابود شدن اطلاعات مفید در آزمون آکوستیک امیشن، این کار باید کاملاً با برنامه‌ریزی انجام شود.

آقای دهمنه و همکاران [۲۹] از اثر فلیسیتی و نسبت آن[3] به عنوان معیار شکست در تحلیل مخازن تحت فشار پوشیده شده با کامپوزیت[4] با استفاده از آزمون آکوستیک امیشن استفاده کردند. در حقیقت اثر کایزر را میتوان به صورت نسبت فلسیتی برابر با ۱ در نظر گرفت. کاهش نسبت فلسیتی هنگامی که مواد به نقطه شکست نزدیک میشوند، برای پلاستیک های تقویت شده اندازه گیری شده است. نسبت FR کمتر از ۰/۹۵سبب رد مخازن معمولی و تحت فشار از جنس FRP درتست آکوستیک امیشن می گردد. مطابق با استاندارد ASME در هنگام تست مخازن تحت فشار در برخی موارد بهتر است که از اطلاعات مربوط به بارگذاری اول چشم پوشی کرد و به بارگذاری های بعدی توجه کرد. دلیل این امر این است که بسیاری از سیگنال‌های بارگذاری اول ناشی از تسلیم نقطه ای در سازه بوده که از نظر سازهای چندان قابل اهمیت نیستند. در حالی که عیوب خطرناک و پراهمیت در بارگذاری دوم که FR<1 می‌باشد، شروع به انتشار موج میکنند. در شکل (۸)[۱۹] انتشار موج ناشی از بارگذاری اولیه از نقطه A تا B دیده میشود، اما در مدت باربرداری از B تا C انتشاری دیده نمیشود. پس ازبارگذاری مجدد نیز تا زمان رسیدن به نقطه B انتشاری دیده نمی شود (خط افقی دیده می شود).



شکل ۱۲ انتشار آکوستیک امیشن نشان دهنده اثرکایزر در (BCB) ، اثر فلسیتی در (DEF) و انتشار در حین ثابت نگه داشتن نیرو (GH) [۱۹]

که این پدیده همان اثرکایزر می‌باشد. نیرو و انتشار امواج تا نقطه D افزایش پیدا میکنند. سپس در نقطه D یک سیکل باربرداری دیگر رخ میدهد. این بار به دلیل سطح تنشهای بالاتر عیوب اساسی و خطرناک در سیکل بارگذاری مجدد، در نقطه F در باری کمتر از ماکزیمم قبل شروع به انتشار امواج میکنند که این رفتار به عنوان اثر فلسیتی شناخته میشود. شکل (۸) [۱۹] همچنین انتشار پیوسته امواج در زمان ثابت نگه داشتن نیرو (GH) را به تصویرمیکشد. اثر فلسیتی و نیز انتشار پیوسته امواج در مدت نگهداری بارادای یک توضیح مشترک میباشند. هر دوی این پدیدها ناشی از طبیعت ناپایدار عیوب خطرناک سازهای می باشند.

[1] Felicity(FE)
[2] FRP
[3] FR
[4] Composite overwrapped pressure vessel (COPV)

۱۲- نتیجه گیری

آکوستیک امیشن یک روش ارزیابی غیرمخرب برای تشخیص آسیب در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف است و قابلیتها و محدودیتهای این روش در این مقاله بیان شده است. بهترین روش جهت بررسی نقص های تورقی و خرابی الیاف روش آکوستیک امیشن است. از مزایای روش آکوستیک امیشن میتوان به موارد زیر اشاره نمود: ۱- پیدا کردن یک ناپیوستگی در سازه تحت کشش به صورت آنی ۲- پیدا نمودن عیوبی مانند نشتی و خوردگی بدون باز کردن تجهیزات ۳- قابلیت بازرسی از راه دور قطعات و سیستم ها ۴- پایین بودن نسبت هزینه به کارایی ۵- سرعت انجام تست بالا ۶- حساسیت بالا ۷- مانیتوریگ پیوسته این حوزه از فناوری ارزیابی غیرمخرب است که به تحقیق و توسعه بسیار بیشتری نیاز دارد و روش‌های نوظهوری با پتانسیل وجود دارد، مانند توموگرافی کامپیوتری با اشعه ایکس و رادیوگرافی اشعه ایکس برگشتی کامپتون.

۱۳- مراجع

[1] Talreja, R., "Fatigue damage mechanisms", *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*", pp. 25-40, (2016).

[2] Herakovich, C.T. and Hyer, M.W., "Damage-induced property changes in composites subjected to cyclic thermal loading", *Engineering Fracture Mechanic*, pp. 779-791, (1986).

[3] Forsyth, D., Kasap, S.O., Wacker, I., and Yannacopoulos, S., "Thermal fatigue of composites: Ultrasonic and SEM evaluations", *Journal of Engineering Material and Technology*, Vol. 116, pp. 113-120, (1994).

[4] Burke, S., Cousland, S.M., and Scala. C., "Nondestructive characterization of advanced composite materials", *in Materials Forum*, (1994).

[5] http://www.idinspections.com/acoustic-emission-phenomenon./

[6] Liu, P.F., Chua, J.K., Liuab, Y.L., and Zheng, J.Y., "A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission", *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 228-235, (2012).

[7] Chang, F., Gordon, D., and Gardner, A., "A study of fatigue damage in composites by nondestructive testing techniques", in Fatigue of filamentary composite materials, *ASTM International*, (1977).

[8] Cohen, J., and Awerbuch, J., "Monitoring delamination progression in composites through acoustic emission during fatigue loading", in Japan-U. S. *Conference on Composite Materials*, 4 th, Washington, DC, (1989).

[9] Barile, C., Casavola, C., pappalettera, G., Paramsamy Kannan, V., "Application of different acoustic emission descriptors in damage assessment of fiber reinforced plastics: A comprehensive review", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 235, pp. 107083, (2020).

[10] Jiang, W., Zhang, Q., Zhang, Y., Guo, Z., and Tu, S.T., "Flexural behavior and damage evolution of pultruded fibre-reinforced composite by acoustic emission test and a new progressive damage model", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 188, pp. 105955, (2020).

[11] Jang, B., and Kim, C., "Acoustic emission source localization in composite stiffened plate using triangulation method with signal magnitudes and arrival times", *Advanced Composite Materials*, Vol. 30(2), pp. 149-163, (2021).

[12] Šofer, M., Cienciala, J., Fusek , M., Pavlíček, P., and Moravec, R., "Damage analysis of composite CFRP tubes using acoustic emission monitoring and pattern recognition approach", *Materials*, Vol. 14, (2021).

[13] Saeedifar, M., Zarouchas, D., "Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 195, pp. 108039, (2020).

[14] Williams, R., Reifsnider, K., "Investigation of acoustic emission during fatigue loading of composite specimens", *Journal of Composite Materials*, Vol. 8(4), pp. 340-355, (1974).

[15] Sato, N., Kurauchi, T., and Kamigaito, O., "Thermo-acoustic emission from a damaged composite", *SAMPE Journal*, Vol. 23(5), pp. 48-5, (1987).

[16] Sato, N., Kurauchi, T., and Kamigaito, O., "Detection of damage in composite materials by thermo-acoustic emission measurement", *Journal of Composite Materials*, Vol. 22(5), pp .447-458, (1988).

[17] Hamzeloo, S.R., Refahi O., A., Zakizadeh, A.M., "Tehran: Analyzing degradation mechanisms in bending of polymer-based composite sandwich panels by acoustic emission method", *Journal of Science and Technology of Composites*, (2020). (in persian فارسی)

[18] Ohtsu, M., "Acoustic Emission Testing", Vol. 6, No. 5, (1973).

[19] Xin, Zh., and et al., ", Applied Acoustics, Vol. 160, (2020).

[20] Gupta, M., Ahmad Khan, M., Butola, R., and Singari, R.M., "Department of Mechani", Advances in

applications of Non-destructive Testing (NDT): A review", *Advances in Materials and Processing Technologies*, pp. 1-22, (2021).

[21] https://worldofndt.com/introduction-to-acoustic-emission-testing./+

[22] https://proeng.ir./

[23] Prosser, W.H., "The propagation characteristics of the plate modes of acoustic emission waves in thin aluminum plates and thin graphite/epoxy composite plates and tubes", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 92(6), pp. 3441-3442, (1992).

[24] Andreykiv, O., Skalsky, V., Serhiyenko, O., and Rudavskyy, D., "Acoustic emission estimation of crack formation in aluminium alloys", Vol. 77(5), pp. 759-767, (2010).

[25] Ammar, I.B., Karra, C., El Mahi, A., El Guerjouma, R., and Haddar, M., "Mechanical behavior and acoustic emission technique for detecting damage in sandwich structures", *Applied Acoustics*, Vol. 86, pp. 106-117, (2014).

[26] www.ndt.net.

[27] Roger, T.K., "Handbook of non destructive testing, Chapter 10 (Acoustic Emission Testing) American Society for Nondestructive Testing", *Columbus*, (1993).

[28] Miller, R., and McIntyre, P.J.C., "*OH: American Society for Nondestructive Testing*", NDT handbook acoustic emission testing, (1987).

[29] Withiam, J., Fishman, K., and Gaus, M., "Evaluation of Metal-tensioned Systems in Geotechnical Applications", *Phase I.*, (2001).

[30] Dahmene, F., Yaacoubi, S., El Mountassiret, M., Langloisal., C., and Bardoux, O., "Towards efficient acoustic emission testing of COPV, without Felicity ratio criterion, during hydrogen-filling", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41(2), pp. 1359-1368, (2016).

[31] https://worldofndt.com/introduction-to-acoustic-emission-testing./

[32] Ahmadi Najafabadi, M., Sedighi, M., Salehi, M., Hossini Toudeshky, H., "Investigation and monitoring of delamination in FMLs under mode I and II loading with FEM and AE", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15 (9), pp. 78-86, (2015).

[33] Okafor, A.C., Singh, N., Singh, N., Oguejiofor, B. N., "Acoustic emission detection and prediction of fatigue crack propagation in composite patch repairs using neural network", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, doi: 10.1177/ 0892705715573649, (2015).