

ارزیابی رفتار شکست تراشه‌های چوب تحت بار کششی با استفاده از روش گسیل صوتی

- ❖ **حوری شریف‌نیا؛** دانش‌آموخته‌دکتری رشته فرآورده‌های چوب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران
- ❖ **سعید کاظمی نجفی*؛** استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران
- ❖ **مهدي احمدی نجف‌آبادی؛** دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

با هدف شناسایی سازوکار شکست در تخته تراشه جهت دار، رفتار شکست تراشه‌های چوب تحت بار کششی با روش گسیل صوتی مورد بررسی قرار گرفت. تراشه‌ها به دو صورت چسب‌خورده و بدون چسب در سه سطح بالا، پایین و میانی یک تخته تراشه جهت‌دار قرار داده شده و پرس شدند. سپس آزمون کشش به همراه آزمون گسیل صوتی روی تراشه‌های تیمار شده و شاهد اعمال شد. با استفاده از داده‌های آزمون کشش، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی نمونه‌ها محاسبه شد. رخدادهای تجمعی، انرژی تجمعی و دامنه سیگنال‌ها نیز از نتایج حاصل از گسیل صوتی به دست آمدند. نتایج نشان داد که انرژی تجمعی، تعداد رخدادهای گسیل صوتی و همچنین حداکثر دامنه سیگنال‌ها با مقدار نیروی وارد شده و افزایش زمان افزایش یافت و بیشترین مقدار انرژی ایجاد شده و رخدادهای نیز در محدوده زمان شکست اتفاق افتاد. شرایط تیمار تراشه‌ها نیز نتایج گسیل صوتی را تحت تأثیر قرار داد و مقدار انرژی آزاد شده و رخدادهای تجمعی در نمونه‌های پرس شده نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر بود. بطور کلی بزرگی شاخص‌های گسیل صوتی با ویژگی‌های مکانیکی مانند مدول الاستیسیته و مقاومت کششی متناسب بوده است که بیانگر امکان شناسایی شکست در تراشه‌های چوب با روش گسیل صوتی است.

واژگان کلیدی: بار کششی، تراشه، چوب، شکست، گسیل صوتی.

مقدمه

در سال اخیر روش گسیل صوتی^۱ به عنوان یکی از روش‌های آزمونی غیرمخرب در ارزیابی مواد مختلف، بسیار مورد توجه قرار گرفته و از آن به عنوان روشی مفید برای ارزیابی تخریب و شناسایی رفتار شکست در مواد، به ویژه مواد مرکب نام برده شده است [۱]. اساس این روش آزادسازی سریع طول موج‌های صوتی و فراصوتی توسط ماده‌ای است که تحت تأثیر تغییر شکل و شکست قرار می‌گیرد. سیگنال‌های گسیل صوتی به بزرگی و طبیعت منبع تولیدکننده موج وابسته‌اند و محدوده آنها شامل رخدادهایی دارای فرکانس پایین مانند زلزله، در محدوده فرکانس قابل شنیدن مانند شکستن چوب و در محدوده فرکانس‌های بالا مانند شکست‌های ریزساختاری در جامدات است. وقتی که ماده‌ای به مقدار تنش بحرانی می‌رسد، به‌طور موضعی می‌شکند (در مقیاس ریزساختاری) و انرژی تنش ذخیره شده ناگهان آزاد شده و سبب ایجاد موج تنشی می‌شود که به صورت دوایر هم‌مرکزی در اطراف محل رخداد شکست انتشار می‌یابد. انرژی آزادشده از این طریق، توسط حسگرهای مناسب شناسایی می‌شود. اطلاعات جمع‌آوری‌شده از طریق حسگرها به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند. هرکدام از این سیگنال‌ها توسط مجموعه‌ای از شاخص‌ها تعریف می‌شود. شکل ۱ تصویری از یک سیستم گسیل صوتی و شاخص‌های اصلی سیگنال حاصل را نشان می‌دهد. با استفاده از شاخص‌های حاصل از آنالیز گسیل صوتی مانند دامنه^۲، زمان استمرار^۳، شمارش ضرباهنگ‌ها^۴، انرژی و فرکانس

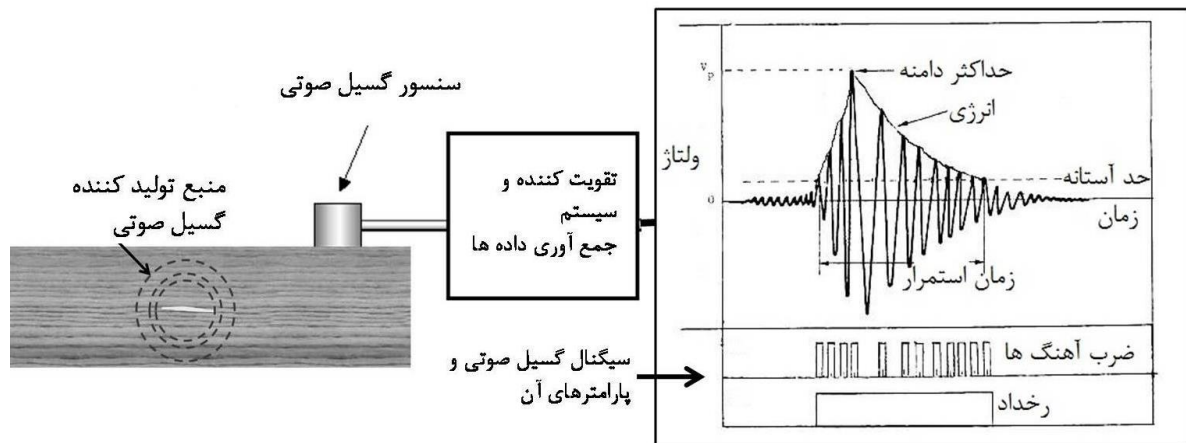
امکان ارزیابی سازوکار تخریب و شکست در مواد

مرکب وجود دارد [۲].

در سال ۱۹۷۰ امکان ارتباط بین سازوکار شکست و اثر آکوستیکی آن مطرح شد [۳]. با معرفی گسیل صوتی برای پایش شکست مواد مرکب در سال ۱۹۷۸ [۴]، مطالعات بسیاری درباره استفاده از روش گسیل صوتی برای ارزیابی تخریب و شناسایی سازوکار شکست در مواد مختلف صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مواد مرکب پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه [۲]، الیاف کربن [۵] و الیاف طبیعی [۶، ۷] اشاره کرد. بررسی چند نوع شکست میکروسکوپی و همچنین سازوکار شکست مواد مرکب پلیمری [۸]، ارزیابی اتصال داخلی در مواد مرکب چوبی [۹]، اثر اندازه ذرات و مقدار رطوبت بر رفتار آکوستیکی تخته خرده‌چوب [۱۰]، مطالعه نرخ گسیل صوتی در طی بارگذاری کششی تخته فیبر و تخته خرده‌چوب [۱۱]، بررسی مقاومت کششی و رفتار شکست انواع مختلف مواد مرکب چوبی (تخته فیبر، تخته لایه، تخته تراشه و تخته خرده‌چوب) [۱۲] از مطالعه‌های صورت گرفته در زمینه مواد مرکب غیرچوبی و چوبی است. براساس این یافته‌ها نشان داده شده است که گسیل صوتی روشی مفید برای شناسایی محدوده گسترده‌ای از شکست‌های ریزساختاری و همچنین ارزیابی تخریب و سازوکار شکست مواد مرکب است. سازوکارهای مهم شکست در مواد مرکب، شکست الیاف، شکست ماده زمینه و تورق^۵ عنوان شده‌اند.

1. Acoustic Emission
2. Amplitude
3. Duration

4. Ring down counts
5. Delamination



شکل ۱. تصویری از سیستم گسیل صوتی و شاخص‌های اصلی سیگنال

دیگر یکی از روش‌های استفاده از داده‌های گسیل صوتی، بررسی ارتباط بین شاخص‌هایی که به صورت غیرمخرب اندازه‌گیری می‌شوند و داده‌های مکانیکی و ارتباط آنها با شکست است که در این مقاله بررسی شده است. بدین صورت که شاخص‌های آکوستیکی مربوط به شکست تراشه‌ها و همچنین اثر پرس و چسب‌زنی روی تراشه‌ها شناسایی شدند تا از این طریق سازوکار مربوط به شکست تراشه‌های مورد استفاده در تخته تراشه جهت‌دار از سایر سازوکارهای شکستی که در تخته رخ می‌دهند تفکیک پذیر شود.

مواد و روش‌ها

مواد

تراشه‌هایی به ابعاد $12/5 \times 2/5$ سانتی‌متر از روکش‌های چوب صنوبر با استفاده از اره نواری تهیه و تا رطوبت حدود ۳ درصد خشک شدند و سپس آزمون گسیل صوتی روی آنها انجام گرفت. علاوه بر تراشه‌های بدون تیمار (تراشه‌های اولیه)، برای بررسی اثر چسب و پرس روی نتایج گسیل صوتی، تراشه‌های پرس شده و تراشه‌های چسب‌زده پرس شده نیز بررسی شدند.

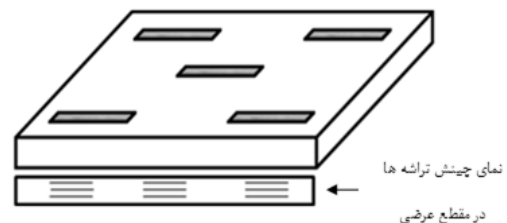
باتوجه به تحقیقات انجام‌گرفته، شناسایی منبع ایجادکننده موج تنشی یکی از هدف‌های اصلی تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از روش گسیل صوتی است. شاخص‌های سیگنال‌های آکوستیکی بیانگر منبع انتشار سیگنال است، به طوری که بین سازوکار تخریب و بزرگی شاخص‌های مختلف گسیل صوتی ارتباط مستقیمی وجود دارد. در نتیجه هر سیگنال را می‌توان شاخص آکوستیکی نوعی از تخریب دانست [۱۳]. از طرف دیگر سیگنال‌های گسیل صوتی تحت تأثیر عوامل مختلف قرار دارند و برای بررسی آنها به تحلیل‌های پیچیده‌ای نیاز است [۱۴]. مقاله حاضر بخشی از تحقیقی است که به منظور شناسایی بهتر منبع شکست در تخته تراشه جهت‌دار و جداسازی سازوکارهای مختلف شکست با استفاده از روش گسیل صوتی صورت گرفته است. به این منظور آزمون کششی تراشه‌های مورد استفاده در ساخت تخته تراشه جهت‌دار، براساس آزمون شناخته شده کشش تک‌فیبر^۱ طراحی شده است. از طرف

1. Single fiber

روش‌ها

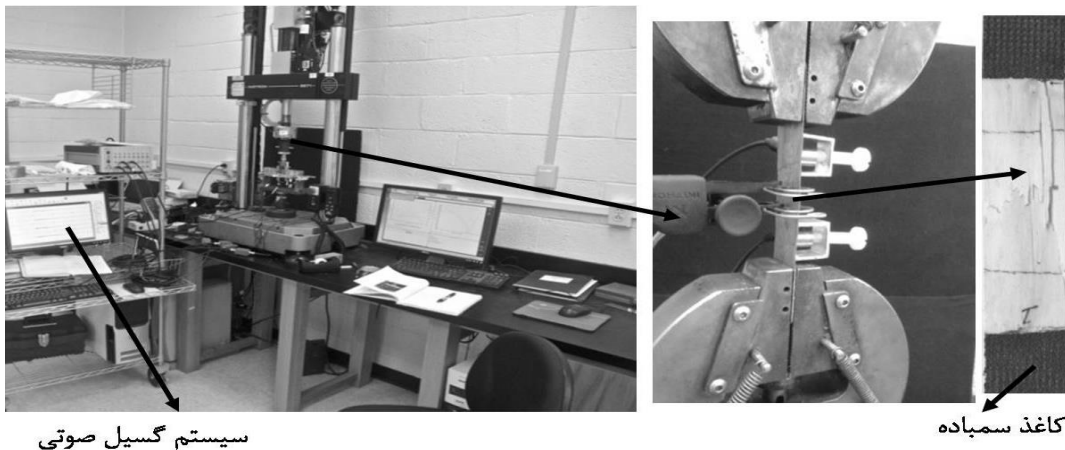
آزمون گسیل صوتی به‌طور همزمان با آزمون کششی در آزمایشگاه میکرومکانیک دانشکده عمران دانشگاه مین^۱ آمریکا انجام گرفت. از دستگاه آزمون مکانیکی INSTRONE برای اجرای آزمون کششی استفاده شد و نمونه‌ها با سرعت ۰/۲۵۴ میلی‌متر بر دقیقه تحت بار کششی قرار گرفتند. با استفاده از داده‌های این آزمون، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی نمونه‌ها محاسبه شد. همراه با اجرای آزمون کشش از سیستم گسیل صوتی طراحی شده توسط شرکت Digitalwave آمریکا و نرم‌افزار Wave explorer برای ضبط رخدادهای آکوستیکی استفاده شد. دو حسگر از نوع B1025 برای جمع‌آوری داده‌های آکوستیکی به‌کار برده شدند. حسگرها با استفاده از گریس و با کمک گیره‌ای که برای نصب آنها روی نمونه‌ها، طراحی و ساخته شده بود روی نمونه‌ها نصب شدند. بعد از کالیبره کردن سیستم گسیل صوتی با استفاده از روش شکستن نوک مداد^۲، سیگنال‌های آکوستیکی همزمان با آزمون مکانیکی با سرعت نمونه‌برداری ۱ مگاهرتز گردآوری شدند. همه تراشه‌ها با این روش تحت آزمون قرار گرفتند. رخدادها و انرژی گسیل صوتی با استفاده از نرم‌افزار Wave explorer به‌دست آمدند و جمع‌تجمعی رخدادها و انرژی محاسبه شد. هر رخداد تغییر ایجادشده در ماده است که سبب ایجاد موج تنشی می‌شود. انرژی گسیل صوتی، مساحت زیر سیگنال گسیل صوتی و بدون بعد است.

بدین منظور تراشه‌هایی به‌طور تصادفی از بین تراشه‌هایی که برای ساخت تخته (به ضخامت ۱ سانتی‌متر و دانسیته ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) وزن شده بودند، انتخاب و بقیه تراشه‌ها به چسب فنل فرمالدئید (۱۰ درصد نسبت وزنی)، آغشته شدند. از بین این تراشه‌ها نیز چند تراشه به‌طور تصادفی انتخاب شدند. تراشه‌های آغشته به چسب و بدون چسب در هنگام چینش یک درون قالب به ابعاد ۳۵×۳۵ سانتی‌متر، در سه سطح بالا، پایین و میانی یک تراشه قرار داده شدند (شکل ۲). شایان ذکر است یک مذکور از تراشه‌های چسب‌زده تشکیل شده بود تا بتوان تراشه‌های مورد نظر را بعد از پرس به‌آسانی از درون تخته بیرون کشید. یک تشکیل‌شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳۰ بار به مدت ۱۰ دقیقه پرس شدند. بعد از پرس از هر سطح ۵ تراشه به‌طور تصادفی انتخاب شد (درکل برای هر تیمار ۱۵ نمونه). برای جلوگیری از چسبیدن تراشه‌های آغشته به چسب به یکدیگر یا تراشه‌های اطراف، هرکدام از تراشه‌های چسب‌زده شده قبل از قرار گرفتن داخل یک کیک و پرس شدن، جداگانه درون ورقه آلومینیومی پیچیده شدند.



شکل ۲. نحوه قرارگیری تراشه‌ها در سطوح مختلف کیک تخته تراشه

1. Maine
2. Pencil lead break



شکل ۳. سیستم آزمون کششی و گسیل صوتی و آزمون کششی تراشه‌ها

نرخ آزادسازی انرژی برحسب زمان در همه نمونه‌ها روند یکسانی داشته است. انرژی گسیل صوتی متناسب با میزان تخریب است [۱۵] و همان‌طور که از شکل‌ها برمی‌آید، با افزایش مقدار بار، مقدار انرژی گسیل صوتی افزایش می‌یابد. به این دلیل که انرژی شکست ناشی از تشکیل ترک‌های ریز، به نسبت کم است [۱۶]، در شروع بارگذاری، انرژی شکست کمتری مورد انتظار است که شکل‌ها نیز گویای این مطلب است؛ ولی به تدریج با افزایش بار، مقدار انرژی آزادشده بیشتر می‌شود که نشان‌دهنده گسترش ترک‌های ریز و تشکیل ترک‌های بزرگ‌تر است. همان‌طور که در شکل ۴ الف نشان داده شده، انرژی تجمعی گسیل صوتی به شکل پله‌ای افزایش می‌یابد که هرکدام از پرش‌های ناگهانی ممکن است مربوط به آزادسازی ناگهانی انرژی شکست و در نتیجه ایجاد ترک‌های بزرگ‌تر باشد.

تغییرات مقدار رخدادهای تجمعی در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. نرخ رخدادهای با گذشت زمان و ادامه بارگذاری افزایش یافته که نشان می‌دهد مقدار تغییرات ایجادشده در تراشه‌ها با افزایش بار و زمان، بیشتر شده است.

برای استخراج دامنه سیگنال‌ها یا حداکثر ولتاژ اندازه‌گیری شده در هر سیگنال، از کد نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب^۱ استفاده شد. تجهیزات اجرای این آزمون در شکل ۳ نشان داده شده است. شایان ذکر است که به منظور جلوگیری از لیز خوردن نمونه‌ها در هنگام آزمون کشش، دو سطح بالا و پایین آنها با استفاده از کاغذ سمباده پوشانده شد (شکل ۳).

آزمون آماری

برای بررسی اثر چسب و موقعیت مکانی تراشه‌ها روی خواص مکانیکی و گسیل صوتی از طرح آماری کاملاً تصادفی در قالب آزمون فاکتوریل استفاده شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد و با کمک نرم‌افزار SPSS انجام گرفت.

نتایج و بحث

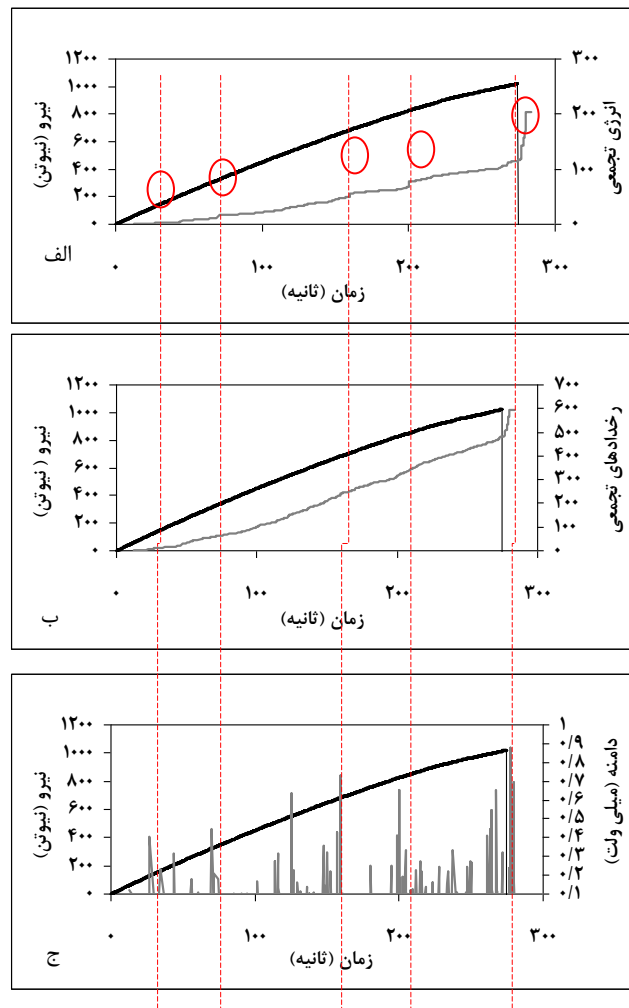
نتایج مربوط به گسیل صوتی نمونه‌ها در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. شکل‌های ۴، ۵ و ۶ الف، روند تغییرات انرژی در نمونه‌های آزمون را نشان می‌دهد.

1. MatLab

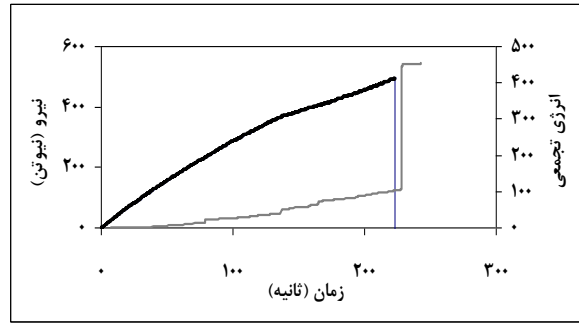
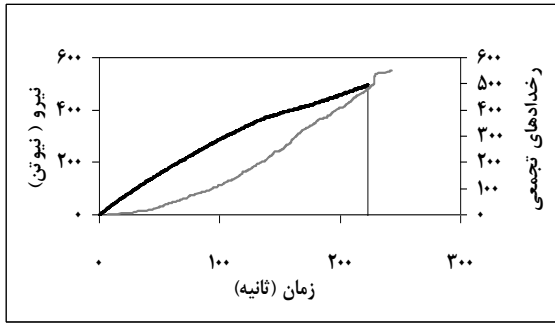
یعنی از نظر زمانی، همزمان با افزایش انرژی آزاد می‌شوند و همچنین تعداد رخدادها، سیگنال‌ها به حداکثر دامنه خود می‌رسند (خط چین‌های رسم شده در شکل ۴). همچنین شدت شاخص‌های گسیل صوتی در محدوده زمان شکست بیشتر است. به عنوان مثال در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که ۶۲ درصد از مقدار کل انرژی تجمعی در ۱۵۰ ثانیه آخر زمان بارگذاری آزاد می‌شود و ۵۰ درصد رخدادها نیز در این بازه زمانی رخ می‌دهد.

شکل‌های ۴، ۵ و ۶ بیانگر مقدار حداکثر دامنه سیگنال‌های گسیل شده بر حسب زمان است. در برهه‌هایی از زمان، دامنه به حداکثر خود می‌رسد و بیشترین مقدار آن در زمان رخداد شکست و حداکثر بار است و در تراشه‌ها مقدار آن در زمان شکست بین ۰/۷ تا ۰/۹ میلی‌ولت است.

با مقایسه انرژی تجمعی، رخدادهای تجمعی و حداکثر دامنه شکل‌های ۴ تا ۶ مشاهده می‌شود که حداکثر دامنه رخدادها با پرش‌های ناگهانی در انرژی تجمعی و همچنین روند افزایش رخدادها همسوست،

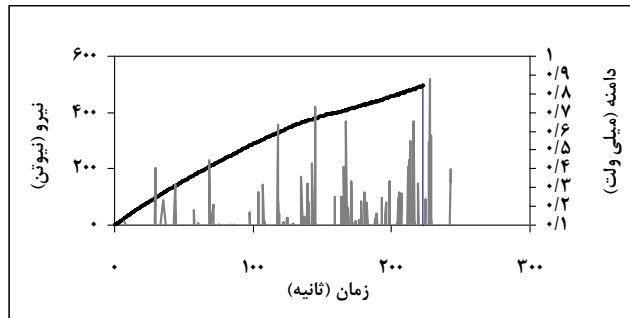


شکل ۴. انرژی تجمعی (الف)، رخدادهای تجمعی (ب) و دامنه حداکثر (ج) سیگنال‌های حاصل از رخدادهای گسیل صوتی نمونه‌های چسب‌زده و پرس شده



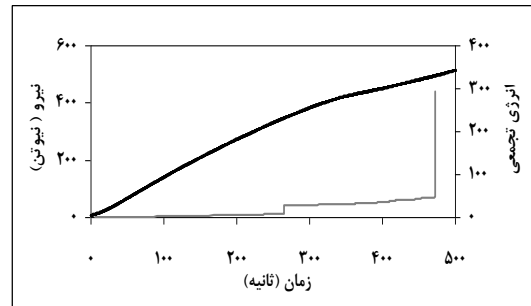
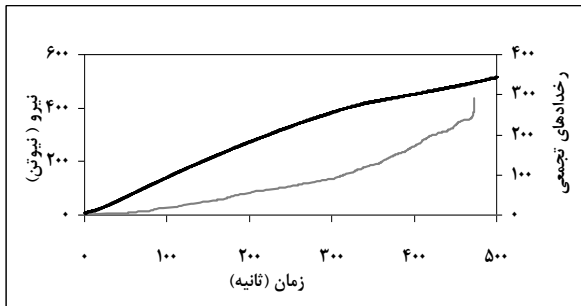
الف

ب



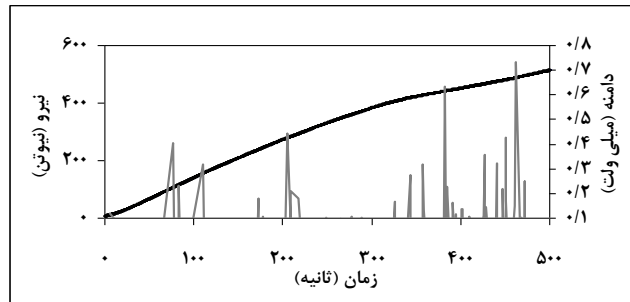
ج

شکل ۵. انرژی تجمعی (الف)، رخدادهای تجمعی (ب) و دامنه حداکثر (ج) سیگنال‌های حاصل از رخدادهای گسیل صوتی حاصل از نمونه‌های پرس شده



الف

ب



ج

شکل ۶. انرژی تجمعی (الف)، رخدادهای تجمعی (ب) و دامنه حداکثر (ج) سیگنال‌های حاصل از رخدادهای گسیل صوتی نمونه‌های شاهد

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس متغیرها بر ویژگی‌های مکانیکی و گسیل صوتی

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات MS				
		انرژی تجمعی	طول مدت وقوع رخدادها (ثانیه)	تعداد رخدادها	مدول الاستیسیته (نیوتن بر متر مربع)	مقاومت کششی (نیوتن بر متر مربع)
رزین	۱	۲۷۵۰۸۶/۲۹**	۸۵۰/۹۸ ^{NS}	۲۰۹۳۱/۸۵**	۰/۲۵*	۸۹۱۸/۱۴*
موقعیت تراشه‌ها	۲	۱۵۲۹/۵۶ ^{NS}	۱۷۸۸۵/۰۳ ^{NS}	۴۷۵۵/۹۴ ^{NS}	۰/۰۰۱ ^{NS}	۱۱۶۹۱۰/۳۰ ^{NS}
رزین × موقعیت تراشه‌ها	۲	۱۱۶۰۶/۷۰ ^{NS}	۲۱۲۶۸/۲۸ ^{NS}	۹۲۳۸/۵۳ ^{NS}	۰/۰۵**	۴۶۱۵/۸۵ ^{NS}

**، معنی دار در سطح اعتماد آماری بیش از ۹۹ درصد؛ *، معنی دار در سطح اعتماد آماری بیش از ۹۵ درصد؛ ^{NS}، معنی دار نیست.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تفاوت معنی داری بین داده‌های گسیل صوتی و ویژگی‌های مکانیکی تراشه‌هایی که در سطوح مختلف تخته قرار داده شده بودند وجود ندارد و همچنین اثر متقابل مقدار رزین و موقعیت قرارگیری تراشه‌ها نیز جز در مورد مدول الاستیسیته، بر ویژگی‌ها معنی دار نیست؛ اما اثر مستقل افزودن رزین بر مدول الاستیسیته و مقاومت کششی نهایی^۱ در سطح اعتماد ۹۹ درصد و بر تعداد رخدادها و انرژی تجمعی در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی دار است (جدول ۱).

با توجه به معنی دار نبودن موقعیت مکانی تراشه‌ها، از ویژگی‌های مکانیکی و گسیل صوتی کل نمونه‌های پرس شده و چسب زده پرس شده، جداگانه میانگین گیری شد و با تراشه‌های بدون تیمار مقایسه شدند. از آنالیز واریانس یکطرفه برای تعیین اختلاف معنی دار و از آزمون توکی برای گروه بندی میانگین‌ها استفاده شد که نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است. براساس نتایج به دست آمده، مقاومت کششی نهایی و مدول الاستیسیته تراشه‌هایی که به چسب آغشته شده و پرس شدند بیشتر از سایر نمونه‌هاست. اثر افزایشی افزودن چسب بر مدول الاستیسیته در تحقیق دیگری که درباره تراشه‌های چوب انجام گرفت نیز گزارش شده است [۱۷].

با مراجعه به جدول ۲ همچنین مشاهده می‌شود که تعداد رخدادهای تجمعی گسیل صوتی و مقدار انرژی آزاد شده تجمعی در حین این رخدادها، در تراشه‌های چسب زده و پرس شده که مدول الاستیسیته بیشتری دارند، کمتر از دو نمونه دیگر است. نتایج یک پژوهش انجام گرفته روی بتن‌های تقویت شده با صفحه‌های فلزی دارای مدول الاستیسیته‌های متفاوت نشان داد که در نمونه‌های دارای سفتی کمتر، تعداد رخدادهای گسیل صوتی بیشتر است که این وضعیت به تغییر شکل بیشتر و در نتیجه، تخریب بیشتر نمونه‌ها نسبت داده شد [۱۸]. نتایج آزمون کششی مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشه نیز نشان داده است که در نمونه‌های دارای درصد الیاف بیشتر که مدول الاستیسیته بیشتری دارند، تعداد رخدادهای گسیل صوتی کاهش پیدا می‌کند [۱۹].

مقدار انرژی آزاد شده در نمونه‌های پرس شده بیش از نمونه‌های دیگر است که با توجه به مدول الاستیسیته، مقاومت کششی نهایی و همچنین مدت زمان کمتر آزادسازی انرژی و وقوع رخدادها، مشخص می‌شود که مقدار تغییر شکل و تخریب ایجاد شده در این نمونه‌ها بیشتر است و همان‌طور که در منابع دیگر گزارش شده [۲۰]، در واقع تغییر شکل بزرگ‌تر، انرژی بیشتری را آزاد کرده است. همچنین تعداد رخدادهای ایجاد شده نیز که نشان دهنده میزان شکست و تخریب است، در تراشه‌های پرس شده بیشتر است.

1. Ultimate Tensile Strength, UTS

جدول ۲. ویژگی‌های مکانیکی و گسیل صوتی نمونه‌های آزمونی و گروه‌بندی توکی*

مقاومت کششی نهایی (نیوتن بر متر مربع)	مدول الاستیسیته (نیوتن بر متر مربع)	تعداد رخدادها	طول مدت وقوع رخدادهای (ثانیه)	انرژی تجمعی	
۶۲۷/۳ ^{AB}	۰/۷۸ ^A	۳۰۷ ^{AB}	۴۹۳/۸ ^B	۴۴۰/۷ ^B	تراشه‌های تیمار نشده
۴۴۸/۳ ^A	۰/۷۸ ^A	۳۷۱ ^B	۱۹۱/۳ ^A	۸۶۶/۸ ^B	تراشه‌های پرس شده بدون چسب
۶۷۴/۸ ^B	۰/۹۳ ^B	۲۶۴ ^A	۲۲۱/۴ ^A	۲۵۶ ^A	تراشه‌های چسب‌زده پرس شده

*گروه‌بندی توکی از کوچک‌ترین میانگین به بزرگ‌ترین است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که نحوه آماده‌سازی تراشه‌ها (پرس کردن یا افزودن چسب) بر شاخص‌های گسیل صوتی مؤثر است، اما موقعیت مکانی تراشه‌ها در ضخامت تخته، تأثیر زیادی بر این شاخص‌ها ندارد. بزرگی پارامتر انرژی، تعداد رخدادهای گسیل صوتی و همچنین حداکثر دامنه سیگنال‌ها با مقدار نیروی وارد شده و زمان مرتبط است. با نزدیک شدن به زمان پایان شکست تعداد رخدادهای، مقدار انرژی و همچنین دامنه سیگنال‌ها

افزایش می‌یابد و در هنگام شکست مقدار آن به حدود ۰/۹ میلی‌ولت می‌رسد. بزرگی شاخص‌های گسیل صوتی با ویژگی‌های مکانیکی مانند مدول الاستیسیته متناسب است، به طوری که در تراشه‌های با مدول الاستیسیته کمتر، تغییر شکل بیشتر و متناسب با آن شاخص‌های گسیل صوتی (انرژی، تعداد رخدادهای و مقدار دامنه) بیشتر به دست آمده است. با توجه به بیشتر شدن شاخص‌های گسیل صوتی در محدوده زمان شکست، پیش‌بینی شکست سازه‌های بزرگ‌تر امکان‌پذیر است.

References

- [1]. Iwamoto, M., Ni, Q.-Q., Fujiwara, T., and Kurashiki, K. (1999). Intralaminar fracture mechanism in unidirectional CFRP composites: Part I: Intralaminar toughness and AE characteristics, *Engineering Fracture Mechanics*, 64(6): 721-745.
- [2]. Ramirez-Jimenez, C., Papadakis, N., Reynolds, N., Gan, T., Purnell, P., and Pharaoh, M. (2004). Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event, *Composites Science and Technology*, 64(12): 1819-1827.
- [3]. Mehan, R. L., and Mullin, J. V. (1971). Analysis of composite failure mechanisms using acoustic emissions, *Journal of Composite Materials*, 5(2): 266-269.
- [4]. Williams, J. H., and Lee, S. S. (1978). Acoustic emission monitoring of fiber composite materials and structures. *Journal of Composite Materials*, 12(4): 348-370.
- [5]. Kim, S.T., and Lee, Y.T. (1997). Characteristics of damage and fracture process of carbon fiber reinforced plastic under loading-unloading test by using AE method, *Materials Science and Engineering: A*, 234: 322-326.
- [6]. Czigany, T. (2004). An acoustic emission study of flax fiber-reinforced polypropylene composites, *Journal of Composite Materials*, 38(9): 769-778.
- [7]. Dogossy, G., and Czigány, T. (2006). Failure mode characterization in maize hull filled polyethylene composites by acoustic emission, *Polymer Testing*, 25(3): 353-357.
- [8]. Bussiba, A., Kupiec, M., Ifergane, S., Piat, R., and Böhlke, T. (2008). Damage evolution and fracture events sequence in various composites by acoustic emission technique, *Composites Science and Technology*, 68(5): 1144-1155.
- [9]. Beall, F. (1985). Relationship of acoustic emission to internal bond strength of wood-based composite panel materials, *Journal of Acoustic Emission*, 4(1): 19-29.
- [10]. Lin, H., Fujimoto, Y., Murase, Y., and Mataka, Y. (2002). Behavior of acoustic emission generation during tensile tests perpendicular to the plane of particleboard II: effects of particle sizes and moisture content of boards, *Journal of Wood Science*, 48(5): 374-379.
- [11]. Brunner, A. J., Howald, M. T., and Niemz, P. (2006). Acoustic emission rate behavior of laminated wood specimens under tensile loading, *Journal of Acoustic Emission*, 24:104-110.
- [12]. Niemz, P., Brunner, A. J., and Walter, O. (2009). Investigation of the mechanism of failure behaviour of wood based materials using acoustic emission analysis and image processing, *Wood Resources*, 54(2): 49-62.
- [13]. Calabrese, L., Campanella, G., and Proverbio, E. (2013). Identification of corrosion mechanisms by univariate and multivariate statistical analysis during long term acoustic emission monitoring on a pre-stressed concrete beam, *Corrosion Science*, 73: 161-171.
- [14]. Mizutani, Y., Nagashima, K., Takemoto, M., and Ono, K. (2000). Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon-fiber composites using acoustic emission analysis, *NDT & E International*, 33(2): 101-110.
- [15]. Curtis, G. (1975). Acoustic emission energy relates to bond strength. *Non-Destructive Testing*, 8(5): 249-257.

- [16]. Ghiassi, B., Verstryngge, E., Lourenço, P. B., and Oliveira, D. V. (2014). Characterization of debonding in FRP-strengthened masonry using the acoustic emission technique, *Engineering Structures*, 66: 24-34.
- [17]. Yadama, V., and Wolcott, M. P. (2006). Elastic properties of hot-pressed aspen strands, *Wood and Fiber Science*, 38(4): 742-750.
- [18]. Henkel, D., and Wood, J. (1991). Monitoring concrete reinforced with bonded surface plates by the acoustic emission method, *NDT& E International*, 24(5): 259-264.
- [19]. Laksimi, A., Benmedakhene, S., and Bounouas, L. (1999). Monitoring acoustic emission during tensile loading of thermoplastic composites materials, In: *Proceeding of 12th International Conference on Composite Materials*. July 5-9 Paris, France, paper 740
- [20]. Pollock, A. A. (1973). Acoustic emission - 2: Acoustic emission amplitudes, *Non-Destructive Testing*, 6(5): 264-269.