

رفتار لوله های کامپوزیتی الیاف شیشه تحت بار ضربه افتان در شرایط دمایی مختلف: بررسی آزمایشگاهی

در این مقاله به بررسی رفتار لوله های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه در برابر بارهای ضربه ناشی از سقوط وزنه در محدوده دمایی ۱۵- تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد پرداخته شده است. بدین منظور لوله های کامپوزیتی با سه نوع رزین اپوکسی، ونیل استر و پلی استر ساخته و در سطوح انرژی ضربه و شرایط دمایی مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. بیشینه نیروی برخورد، زمان برخورد و مقدار انرژی جذب شده لوله برای حالات مختلف طراحی آزمایش با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بیانگر عملکرد بهتر لوله با رزین اپوکسی در جذب انرژی ضربه نسبت به دو نوع دیگر است. همچنین با افزایش دمای محیط، ظرفیت حمل بار لوله کاهش، زمان برخورد ضربه زنده و میزان جذب انرژی ضربه افزایش پیدا می کند.

محمد امین ترابی زاده^۱
استادیار

ستار مالکی^۲
استادیار

واژه های راهنما: لوله کامپوزیتی، ضربه کم سرعت، دمای کارکرد، بررسی آزمایشگاهی، روش رشته پیچی

۱- مقدمه

کاربرد مواد کامپوزیتی در بسیاری از صنایع مهم در دنیا به علت خواص مکانیکی ویژه این مواد در شرایط کاری مختلف گسترش فراوانی پیدا کرده است. استفاده از مواد کامپوزیت به عنوان بدنه و تزیینات داخلی در صنایع خودرو، هوافضا و صنایع نظامی سالهاست مورد توجه طراحان و تولیدکنندگان می باشد. بکارگیری این مواد در خطوط لوله انتقال، ساخت مخازن ذخیره و نیز افزایش مقاومت لوله های فلزی علی الخصوص در محیط های خورنده و سیالات خاص از جمله مهمترین کاربردهای کامپوزیت ها در صنایع پتروشیمی می باشد. علاوه بر آن تقویت و تعمیرات خطوط انتقال فلزی در صنایع پتروشیمی نیز با استفاده از این مواد امکان پذیر می باشد. از مهمترین خواص مواد کامپوزیتی در کاربرد صنایع پتروشیمی و خطوط انتقال سیال، سبکی وزن، مقاومت ایده آل آن ها در

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، گروه صنعت، دانشگاه جامع علمی کاربردی، مشهد، ایران torabizadeh@uast.ac.ir

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران s.maleki@qiet.ac.ir

برابر شرایط خوردگی و شرایط محیطی (دما، رطوبت، محیط اسیدی و...) نسبت به مواد فلزی معمول می باشد. علاوه بر خواص فوق، لوله‌های کامپوزیتی از مزایای دیگری نسبت به نمونه‌های فلزی برخوردارند که زمینه‌ساز استفاده روزافزون از آنها شده است. خواصی مانند عمر خدماتی بالا، تعمیر و نگهداری کم، کاهش تقریبی ۲۰ درصدی وزن و صرفه جویی اقتصادی از جمله سایر خواص ویژه این گروه از مواد می باشد. لذا شناخت دقیق و کافی از رفتار این مواد در شرایط کاری و تولیدی متفاوت بسیار مهم و ضروری است. در این میان استحکام در برابر بار ضربه‌ای یکی از بزرگترین نگرانی‌ها در این خصوص می باشد. بارهای ضربه می تواند بر اثر سقوط اجسام و ابزارها در حین نصب، بهره برداری و تعمیرات بوجود آید و آسیب‌های داخلی قابل توجهی را ایجاد و موجب کاهش مقاومت باقی‌مانده لوله‌های کامپوزیتی گردند. از طرفی ایجاد این ضربات می تواند منجر به کاهش ظرفیت تحمل فشار داخلی سیال داخل لوله، نشت سیال داخل لوله و یا کاهش استحکام مکانیکی لوله تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی وارده گردد. یکی از مشکلات و خلاءهای موجود در صنعت تولید لوله و اتصالات کامپوزیتی در کشور، با عنایت به گسترش استفاده از این نوع لوله و اتصالات در صنایع پتروشیمی و گاز مناطق جنوب کشور، عدم وجود شناخت دقیق و کافی از رفتار لوله و اتصالات کامپوزیتی در شرایط کاری مورد استفاده می باشد. علاوه بر این با توجه تفاوت شکل هندسی لوله و صفحه، تفاوت در پاسخ رفتار مکانیکی تحت بار ضربه آنها نیز مورد انتظار خواهد بود. لذا نمی توان نتایج تحقیقات پیشین روی صفحات کامپوزیتی را به لوله نیز تعمیم داد. در این مقاله به جای مطالعه روی صفحات کامپوزیتی که در بیشتر مطالعات پیشین صورت گرفته، به بررسی رفتار لوله‌های کامپوزیتی در شرایط کاری مختلف تحت بار ضربه پرداخته شده است. موضوع این مقاله مورد نیاز شرکت مهندسی نوین کامپوزیت صدرا (تولید کننده لوله و اتصالات کامپوزیتی) که مجری پروژه‌های مختلفی در صنایع پتروشیمی جنوب کشور است می باشد. لذا با مرور مطالعات پیشین صورت گرفته در این زمینه، راهبرد اصلی تحقیق پیشرو با هدف تامین بخشی از خلاء موجود در این حوزه که توسط بخش صنعتی و تولیدی مرتبط با آن احصاء گردیده، تعیین شده است.

تعدادی از محققان در مطالعات خود به بررسی رفتار صفحات کامپوزیتی در بار ضربه کم سرعت پرداخته اند. در اینجا صرفاً به منظور بررسی و مرور روش آزمایش، پارامترهای موثر در آزمایش ضربه کم سرعت و نیز مکانیزم تخریب کامپوزیت، به تعدادی از آنها پرداخته می شود. Karakuzu و همکاران [۱] در تحقیق خود به بررسی اثر دمای بالا روی رفتار صفحات کامپوزیتی پرداخته اند. آنها دو نوع صفحه با الیاف شیشه و کربن-کولار را مورد ارزیابی قرار دادند. دو نوع آزمایش شبه استاتیکی و ضربه کم سرعت در چهار دمای اتاق تا ۸۰ درجه سانتیگراد مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آنها بیانگر تغییر رفتار یکسان پاسخ خروجی ماده شامل انرژی ضربه و استحکام برشی در الیاف کربن-کولار است در صورتیکه تغییر رفتار در الیاف شیشه متفاوت گزارش شده است. همچنین در این مطالعه مکانیزم شکست صفحات نیز بر اساس مشاهدات چشمی ارزیابی شده است. Farhood و همکاران [۲] در مقاله خود به تاثیر الیاف شیشه در ساخت صفحات هیبرید روی رفتار لوله‌های کامپوزیتی کربنی پرداخته اند. زاویه رشته پیچی کربن ۵۵ درجه و الیاف شیشه ۹۰ درجه با انرژی ضربه ۵۰ و ۱۰۰ ژول بوده است. علاوه بر این با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری، مکانیزم تخریب لوله نیز بررسی شده است. نتایج حاکی از بهبود عملکرد

صفحات هیبرید علی‌الخصوص در وضعیتی که لایه الیاف شیشه در جدار بیرونی لوله کار شده، نسبت به نوع معمول آن بوده است. Rossaf و Ghajar [۳] به بررسی اثر شکل ضربه‌زننده و نیز دمای محیط روی رفتار صفحات کامپوزیتی شیشه‌اپوکسی تحت اثر ضربه وزنه افتان پرداخته‌اند. یافته‌های آنها بیانگر کاهش بیشینه نیروی برخورد و افزایش جابجایی بازای افزایش دمای محیط آزمایش بوده و همچنین اینکه با کاهش انحنای سر ضربه‌زننده، زمان برخورد کاهش، بیشینه نیروی برخورد افزایش و میزان آسیب سطحی نیز کاهش یافته‌است. Gemi و همکارانش [۴] به بررسی آزمایشگاهی و آماری داده‌های پاسخ بار ضربه کم سرعت روی لوله‌های کامپوزیتی شیشه-اپوکسی پرداخته‌اند. آنها با انجام آزمایشها در سطوح مختلف انرژی ضربه، دریافتند بار ضربه با جابجایی تخریب در راستای شعاعی کنترل می‌شود. آنها همچنین با بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها پس از ضربه، شکل تخریب جدایش الیاف، گسترش ترک در ماتریس و لایه شدن صفحات مشاهده کردند. Ozbek و همکاران [۵] به مطالعه تجربی و آزمایشگاهی رفتار تخریب عرضی لوله‌های هیبرید کربن-شیشه و غیر هیبرید تحت فشار استاتیکی پرداخته‌اند. آنها دریافتند که با ساخت لوله هیبرید با افزودن الیاف شیشه، خاصیت جذب انرژی و ظرفیت تحمل بار لوله به صورت معناداری افزایش پیدا کرد. همچنین مشاهدات آزمایشگاهی آنها بیانگر افزایش ظرفیت جذب انرژی ضربه بازای افزایش زاویه رشته پیچی لوله بود. نتایج آنها بیانگر افزایش میزان ظرفیت جذب انرژی ضربه لوله با افزایش زاویه پیچش از ۴۵ درجه به ۷۰ می‌باشد. Torabizadeh و Fereidoon [۶] با استفاده از روش تاگوچی به بررسی اثر ضربه روی صفحات ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و رویه کامپوزیتی پرداختند. پارامترهای ضخامت، نوع لایه چینی رویه و شکل هندسی ضربه‌زننده مورد ارزیابی قرار گرفت و بسته به نوع کاربرد، ترکیب بهینه ساخت نمونه‌ها برای دستیابی به بهترین عملکرد صفحه حاصل شد. Gemi [۷] در مطالعه خود اثر نوع لایه چینی بر رفتار ضربه کم سرعت و نیز سطح آسیب لوله کامپوزیتی هیبرید تحت فشار داخلی را مورد بررسی قرار داد. او دریافت که ترک ماتریس، ترک‌های شعاعی و لایه شدن صفحات کامپوزیتی از جمله انواع تخریب قابل مشاهده در این حالت می‌باشد. VijayaRajan و Muruganandhan [۸] با مطالعه رفتار ضربه کم سرعت روی لوله‌های هیبرید کربن-شیشه به صورت آزمایشگاهی مشاهده کردند که با افزایش ضخامت جداره لوله، ظرفیت تحمل بار افزایش یافته و در مقابل قابلیت جذب انرژی ضربه و میزان جابجایی در محل اصابت ضربه کاهش می‌یابد. آنها آزمایشات خود را روی نونه با ضخامت جداره ۴ و ۶ میلیمتر و انرژی ضربه ۲۰، ۲۵ و ۳۰ ژول انجام دادند. Gning و همکارانش [۹] مشاهدات آزمایشگاهی خود را از استحکام ضربه لوله جدار ضخیم تحت فشار داخلی و سطح تخریب و آسیب پس از ضربه گزارش کردند. آنها از دستگاه آزمایش سقوط وزنه تا ۴۵ ژول در مطالعه خود استفاده کردند. نتایج بیانگر تغییرات شکل تخریب از جدایش الیاف در سطوح انرژی پایین تا گسترش ترکهای بین لایه‌ای و تخریب الیاف در سطوح انرژی بالاتر می‌باشد. Hawa و همکاران [۱۰] به بررسی استحکام ضربه لوله در فشار کاری دلخواه و متاثر از دما و رطوبت محیطی پرداخته‌اند. همچنین آنها شکل تخریب لوله را نیز ارزیابی کردند. به منظور ارزیابی اثر دما و رطوبت، لوله‌ها به مدت زمانی معینی در آب با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد نگه‌داری شد و سپس با سطوح مختلف انرژی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج بیانگر کاهش نیروی برخورد و افزایش مقدار انرژی جذب شده تا ۵۰۰ ساعت ماندگاری نسبت به نمونه در شرایط محیطی عادی می‌باشد. با افزایش زمان ماندگاری

تا ۱۵۰۰ ساعت بسته به سطح انرژی ضربه، یا تغییرات ثابت و یا رفتار معکوس گزارش شده است. Caminero و همکاران [۱۱] اثر ضخامت و لایه‌چینی روی میزان مقاومت فشاری پس از ضربه به صفحات کامپوزیتی کربن-اپوکسی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاکی از کاهش سطح تخریب بازای افزایش میزان جذب انرژی بوده‌است. Liu و همکاران [۱۲] نیز به بررسی رفتار صفحات کامپوزیتی به هسته فوم آلومینیومی تحت اثر ضربه با سرعت بالا پرداخته‌اند. آنها صحت نتایج تجربی خود را با استفاده از مدل المان محدود ارزیابی و اثر شکل ضربه‌زننده و نیز زاویه اصابت ضربه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آنها بیانگر افزایش میزان انرژی جذب‌شده در اثر افزایش ضخامت لایه رویی بوده‌است. در این حالت جدایش لایه‌رویی در سطح بالایی نمونه و علی‌الخصوص در اطراف محل برخورد ضربه‌زننده مشاهده گردیده‌است. آنها همچنین با افزایش ضخامت هسته فوم آلومینیومی عدم جدایش لایه‌رویی سطح بالایی صفحه از هسته فومی را گزارش نمودند.

با توجه به مرور مطالعات گذشته در این خصوص، اغلب پژوهش‌های پیشین بر روی صفحات کامپوزیتی صورت گرفته و کمتر به بررسی رفتار انواع لوله‌های کامپوزیتی (با رزین‌های مختلف) در شرایط دمایی متفاوت تحت بار ضربه کم سرعت پرداخته شده است. لذا در این مقاله همانگونه که در بخش قبل هم بدان اشاره گردید، با توجه به اعلام نیاز به شناخت رفتار انواع لوله و اتصالات کامپوزیتی معمول در صنایع کشور توسط شرکت تولیدکننده، با در نظر گرفتن سه عامل کنترلی دمای محیطی کارکرد (۱۵-، ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد)، نوع رزین مورد استفاده در تولید لوله (اپوکسی، ونیل استر و پلی استر) و نیز میزان انرژی ضربه وارده بر لوله (۱۰، ۲۰ و ۳۰ ژول) و استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوجی، به بررسی رفتار آزمایشگاهی لوله‌های کامپوزیتی تحت بار ضربه کم سرعت پرداخته خواهد شد. به منظور حذف خطاهای آزمایشگاهی و قابلیت اطمینان نتایج حاصله، هر حالت آزمایش بر روی سه نمونه تکرار و میانگین آماری نتایج مورد استفاده قرار خواهد گرفت. برخی پارامترهای مهم در پاسخ لوله از قبیل بیشینه نیروی برخورد، زمان برخورد و نیز انرژی جذب شده توسط لوله، با استفاده از خروجی داده‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان معناداری اثر هر یک از عوامل کنترلی روی پارامترهای پاسخ بررسی خواهد شد. علاوه بر این بر اساس مشاهدات چشمی نمونه‌ها پس از آزمایش، سطح آسیب نمونه و نیز مکانیزم تخریب لوله کامپوزیتی مورد بررسی و بحث قرار خواهد گرفت. لذا یکی از مهمترین موارد نوآوری تحقیق پیشرو، بررسی اثر استفاده از سه نوع رزین متداول در ساخت لوله و اتصالات کامپوزیتی در صنایع پتروشیمی و گاز (اپوکسی، ونیل استر و پلی استر) در محدوده دمایی کارکرد ۱۵- تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد تحت بار ضربه کم سرعت است که در مرور مطالعات پیشین در این زمینه، تاکنون توسط سایر محققان کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش ساخت نمونه‌ها

لوله‌های کامپوزیتی تولید شده در این تحقیق با استفاده از روش پیچشی الیاف توسط شرکت مهندسی نوین کامپوزیت صدرا ساخته شده است. در این روش، الیاف شیشه و رزین بر روی یک قالب فلزی دوار با ابعاد هندسی مشخص پیچیده می‌شوند. در این فرآیند دسته‌هایی از الیاف شیشه پس از آغشته شدن به رزین به طور منظم و

کنترل شده با آرایشی خاص، به دور یک مندرل دوار پیچیده میشود و پس از پخت قطعه، از مندرل خارج شده و لوله تولیدی آماده استفاده میباشد. لوله‌ها به طول $\frac{2}{3}$ متر، قطر خارجی ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت جداره ۱ میلی‌متر و از جنس الیاف شیشه می‌باشد. نمونه‌ها از لوله‌های تولیدی در ابعاد مورد نیاز بر اساس استاندارد [۱۳] ASTM D2444 برش زده می‌شود. زاویه قرارگیری الیاف شیشه حدود $\pm 57^\circ$ درجه با ۴۰ عدد نخ است. عرض باند الیاف در هر قالب در حین فرآیند تولید ۱۰۰ میلی‌متر با حوضچه رزین ثابت بوده و نمونه‌ها پس از تولید به طور کامل در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت پست کیور شده است. همچنین در این مطالعه، بنا به اعلام شرکت سفارش دهنده پژوهش، از سه رزین اپوکسی مایع از نوع EPIRAN-06-SPL، رزین پلی‌استر ایزوفتالیک MVO-140 و رزین ونیل‌استر VE375 استفاده شده است.^۱ شکل (۱) نمونه‌های تولیدی برش خورده بر اساس ابعاد استاندارد با سه رزین مختلف اپوکسی، ونیل‌استر و پلی‌استر را بر اساس طراحی آزمایش صورت گرفته نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمونه‌های تولیدی با رزین‌های مختلف بر اساس طراحی آزمایش تاگوچی

^۱ کلیه رزین‌ها و الیاف مورد استفاده در این پژوهش از شرکت تامین‌کننده مواد اولیه کامپوزیتی شیمکا خریداری شده است.

۴- روش طراحی آزمایش تاگوچی

با توجه به هزینه بالای تولید نمونه‌ها و به منظور صرفه جویی در زمان و هزینه انجام آزمایشات، در این تحقیق از روش طراحی آزمایش تاگوچی به منظور طراحی حالات آزمایش و نیز تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار MINITAB بهره برده شده است. سه عامل کنترلی با سطوح مختلف در نظر گرفته شده است. این طراحی اولیه از سه عنصر کنترل با سطوح کنترلی متفاوت استفاده می‌کند. علاوه بر این، این طرح قادر به بررسی اثرات متقابل بین عوامل است. در این روش با توجه به تعداد پارامترهای اصلی و نیز سطوح مختلف مساله، حالت‌های مورد نیاز جهت انجام آزمایش طراحی می‌گردد. جدول (۱) پارامترهای اصلی کنترلی و سطح هر کدام را در این تحقیق نشان می‌دهد. با توجه به پارامترهای مندرج در جدول (۱) و استفاده از چند جمله‌ای L_{18} در روش تاگوچی به منظور طراحی آزمایشات، به جای انجام ۵۴ حالت آزمایش منحصر بفرد، با تعداد ۱۸ آزمایش منحصر بفرد می‌توان تاثیر کلیه پارامترها و سطوح آنها را مورد بررسی قرار داد.

۵- آزمایش ضربه وزنه افتان

آزمایش ضربه افتان وفق استاندارد موجود در آزمایشگاه شکست و ضربه دانشگاه بیرجند انجام شد. دمای مورد نیاز جهت آزمایش توسط فریزر صنعتی و آون موجود در آن آزمایشگاه که در کنار تجهیزات تست ضربه استقرار دارد تامین گردید. داده‌های آزمایش ضربه در این دستگاه توسط لودسل ۵۰۰۰ نیوتنی متصل به ضربه زننده کروی آن اندازه گیری و ثبت می‌گردد (شکل ۲). به منظور بررسی قابلیت اطمینان به نتایج آزمایشگاهی، در هر حالت آزمایش سه تکرار انجام می‌گردد و در نهایت میانگین نتایج مورد استفاده قرار خواهد گرفت. شکل (۳) تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده به همراه آون و فریزر ایجاد دماهای بالا و پایین را نشان می‌دهد. به منظور اطمینان از صحت و دقت دماسنج هر یک از تجهیزات دمایی، دماسنج دیجیتال کالیبره شده با دقت ± 1 درجه سانتیگراد نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در کلیه دماهای کارکرد محیطی، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای مورد نظر به جهت هم دمایی و نفوذ در ضخامت نمونه نگهداری شده است. توصیه استاندارد ASTM D2444 بر اساس تمرین استاندارد [۱۴] D618 حداقل ۴۰ ساعت ماندگاری بازای نمونه‌ها با ضخامت کمتر از ۷ میلی‌متر می‌باشد. علاوه بر این استاندارد مذکور، فیکسچر V شکل با زاویه ۹۰ درجه با حداقل طول ۱۵۰ میلی‌متر برای قرارگیری نمونه‌ها توصیه میشود (شکل ۴).

جدول ۱- عوامل کنترلی مفروض و سطح هر یک از آنها در روش تاگوچی

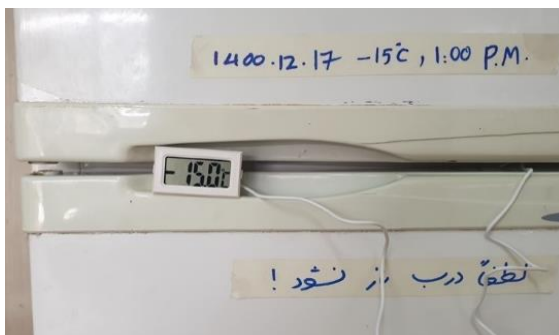
| سطح هر عامل | | | | | | کد عامل | نام عامل کنترلی |
|-------------|----|----|-----------|----------|--------|---------|----------------------|
| ۶ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | | |
| ۱۰۰ | ۷۵ | ۵۰ | ۲۵ | ۰ | -۱۵ | A | دما (درجه سانتیگراد) |
| | | | ۳۰ | ۲۰ | ۱۰ | B | انرژی ضربه (ژول) |
| | | | ونیل استر | پلی استر | اپوکسی | C | نوع رزین |



شکل ۲- ضربه‌زن کروی مورد استفاده در تحقیق حاضر



(ب)



(ج)

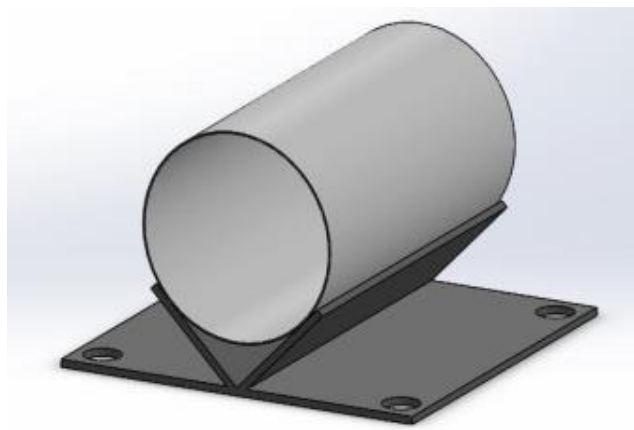


(الف)

شکل ۳- (الف) تصویر کلی تجهیز مورد استفاده در آزمایش ضربه (ب) تصویر آون صنعتی مورد استفاده با قابلیت تنظیم دما (ج) تصویر فریزر صنعتی به همراه دماسنج دیجیتال مورد استفاده



(ب)



(الف)

شکل ۴- (الف) تصویر شماتیک پایه نگهدارنده نمونه (ب) تصویر نمونه واقعی در پایه دستگاه آزمایش ضربه

جدول ۲- اطلاعات تنظیم دستگاه آزمایش ضربه بر اساس سرعت لحظه برخورد ضربه زنده

| انرژی جنبشی مورد نیاز (ژول) | سرعت لحظه برخورد (متر بر ثانیه) | ارتفاع رهاسازی ضربه زنده مورد نیاز (سانتی متر) |
|-----------------------------|---------------------------------|--|
| ۱۰ | ۲/۰۳ | ۲۵ |
| ۲۰ | ۲/۹۶ | ۴۵ |
| ۳۰ | ۳/۷۵ | ۶۵ |

به منظور انجام آزمایشات و تنظیمات دستگاه ضربه، توسط ترازوی دیجیتال موجود، وزن ضربه زنده به همراه کلیه متعلقات آن اندازه گیری شد و عدد $۴/۷۵۰$ کیلوگرم ثبت گردید. لذا با توجه به نیاز انرژی ضربه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ژول در طراحی آزمایشات صورت گرفته، ارتفاع رهاسازی تعیین می گردد. با توجه به وجود اصطکاک در ریل های طرفین دستگاه علی‌رغم روغنکاری کافی، درست در محل برخورد ضربه زنده به نمونه، از یک سرعت سنج دیجیتال با سنسور نوری استفاده شده است تا با اندازه گیری سرعت لحظه برخورد از میزان انرژی جنبشی مورد نیاز اطمینان حاصل شود. بدین ترتیب ارتفاع رهاسازی ضربه زنده محاسبه می گردد تا اثر کاهش اصطکاک ریل ها جبران گردد. اطلاعات دستگاه در این خصوص در جدول (۲) نشان داده شده است. داده های نیروی برخورد توسط مدار سنسور نیرو، تقویت کننده ولتاژ و اسیلوسکوپ اندازه گیری و نهایتاً به صورت نیرو-زمان ثبت می شود. با استفاد از روابط حاکم، سایر اطلاعات خروجی از مقادیر نمودار تغییرات نیرو بر حسب زمان قابل محاسبه و استخراج خواهد بود.

۶- نتایج آزمایشات تجربی

با توجه به توضیحات بخش‌های قبلی، آزمایشها بر اساس طراحی تاگوچی در دماها و انرژی ضربه متفاوت انجام می شود. شکل (۵) نتایج آزمایشات ضربه روی لوله کامپوزیتی در دمای ۱۵- درجه سانتیگراد را نشان می دهد. در این دما روی سه نوع نمونه کامپوزیتی با رزین های مختلف و انرژی ضربه متفاوت آزمایش تکرار شده است.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۵- نمونه‌ها پس از آزمایش ضربه در دمای ۱۵- درجه سانتیگراد با رزین (الف) اپوکسی (ب) ونیل استر (ج) پلی استر و انرژی ضربه به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ژول



(ج)

(ب)

(الف)

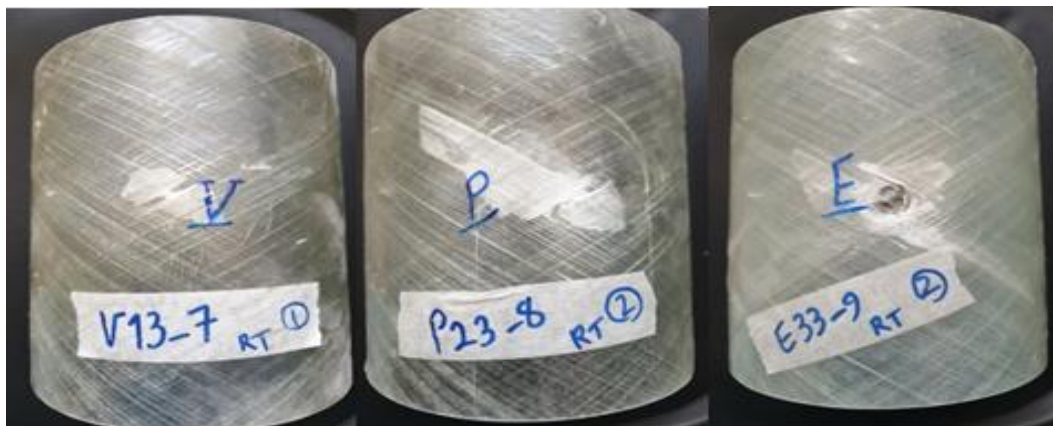
شکل ۶- نمونه‌ها پس از آزمایش ضربه در دمای صفر درجه سانتیگراد با رزین (الف) اپوکسی (ب) ونیل استر (ج) پلی استر و انرژی ضربه به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ژول

همانگونه که در تصاویر مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی ضربه همانطور که مورد انتظار هم بود، میزان سطح تخریب لوله افزایش پیدا کرده است. همچنین اینکه در حالت (ب) و (ج) نفوذ ضربه زنده در لوله به طور کامل صورت گرفته در صورتیکه در حالت (الف) صرفاً اندکی تخریب از نوع ترک ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس مشاهده می‌شود. در صورتیکه تخریب الیاف در نزدیکی محل نفوذ ضربه زنده در حالت (ب) و (ج) به وضوح قابل مشاهده است. تفسیر بیشتر داده‌های آزمایشگاهی و نیز ارائه نمودارهای نیرو-زمان در بخش‌های آتی گزارش قابل مشاهده خواهد بود.

شکل (۶) نتایج آزمایشات ضربه روی لوله کامپوزیتی در دمای صفر درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. در این دما روی سه نوع نمونه کامپوزیتی با رزین‌های مختلف و انرژی ضربه متفاوت آزمایش تکرار شده است.

در این شکل با توجه به افزایش دمای آزمایش ضربه به نسبت شکل (۵)، آنچه واضح است کاهش سطح تخریب هر نمونه نسبت به دمای ۱۵- درجه سانتیگراد است. لازم به ذکر است در این حالت آزمایش در وضعیت (ب) و (ج) نفوذ کامل ضربه زنده به داخل لوله قابل مشاهده است. اما سطح تخریب نمونه در اطراف محل نفوذ کمتر از دمای ۱۵- درجه سانتیگراد است. این رویداد مبین آنست که خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی مورد آزمایش در این تحقیق با کاهش دمای محیط شکننده و تردتر شده است. به عبارت دیگر همزمان با افزایش استحکام کششی و مدول الاستیسیته مواد در دمای پایین، چقرمگی ماده (کرنش شکست) ماده نیز کاهش پیدا می‌کند و لذا استحکام در برابر ضربه کاهش می‌یابد. این مشاهده آزمایشگاهی در سایر مقالات محققان نیز گزارش شده است. [۶].

شکل (۷) نتایج آزمایشات ضربه روی لوله کامپوزیتی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. در این دما روی سه نوع نمونه کامپوزیتی با رزین‌های مختلف و انرژی ضربه متفاوت آزمایش تکرار شده است.

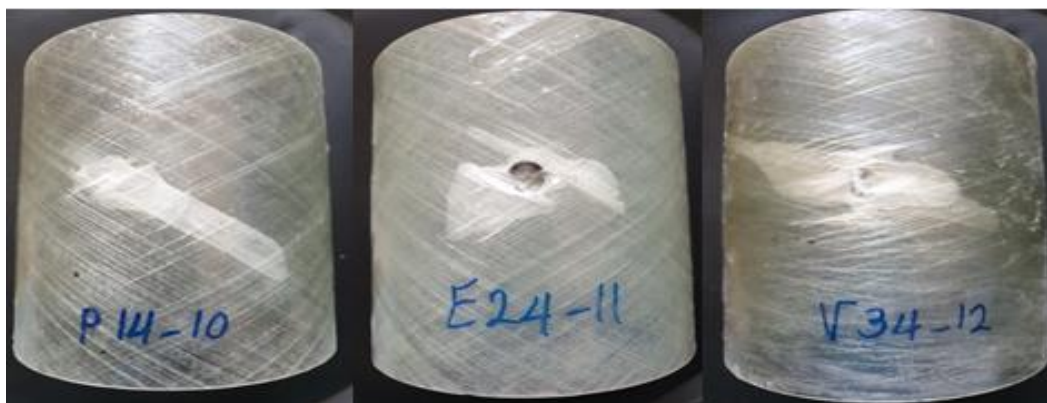


(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۷- نمونه‌ها پس از آزمایش ضربه در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد با رزین (الف) ونیل استر (ب) پلی استر (ج) اپوکسی و انرژی ضربه به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ژول



(ج)

(ب)

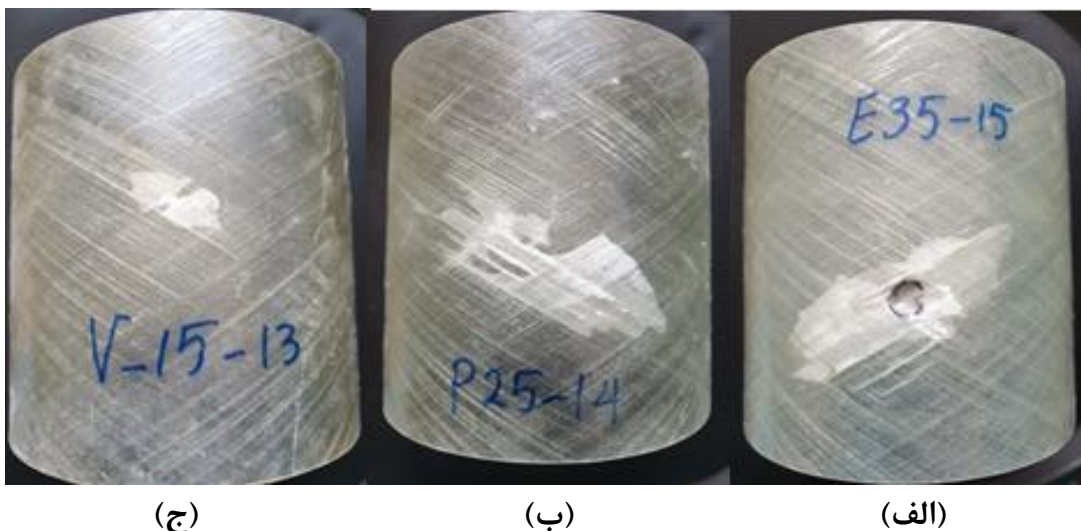
(الف)

شکل ۸- نمونه‌ها پس از آزمایش ضربه در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد با رزین (الف) پلی استر (ب) اپوکسی (ج) ونیل استر و انرژی ضربه به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ژول

در این حالت آزمایش، فقط در انرژی ضربه ۳۰ ژول و رزن اپوکسی (ج) نفوذ کامل ضربه زنده در لوله مشاهده می‌شود و در دو حالت دیگر، صرفاً تخریب جزئی از نوع جدایش الیاف از ماتریس و نیز ایجاد شکست و ترک در ماتریس اتفاق افتاده است. مجدداً پدیده کاهش سطح تخریب به نسبت دو دمای قبلی صفر و ۱۵- درجه سانتیگراد ملاحظه می‌شود. لازم به ذکر است همانگونه که قابل مشاهده است، تخریب لوله در راستای تقریبی ۵۷ درجه نسبت به محور لوله که همان زاویه رشته پیچی در تولید لوله است رخ می‌دهد.

شکل (۸) نتایج آزمایشات ضربه روی لوله کامپوزیتی در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. در این دما روی سه نوع نمونه کامپوزیتی با رزین‌های مختلف و انرژی ضربه متفاوت آزمایش تکرار شده است. آنچه در این حالت از آزمایش قابل توجه است، افزایش سطح تخریب در مقایسه با دمای اتاق در نمونه‌های مورد آزمایش می‌باشد. همچنین در این حالت نیز نفوذ ضربه زنده در دو نمونه (ب) و (ج) مشاهده می‌شود که بیانگر تغییر خواص مکانیکی مواد در دماهای بالاتر از دمای اتاق می‌باشد. بحث و تفسیر بیشتر این رویداد با استفاده از داده‌ها و روشهای آماری در ادامه گزارش ارائه خواهد شد.

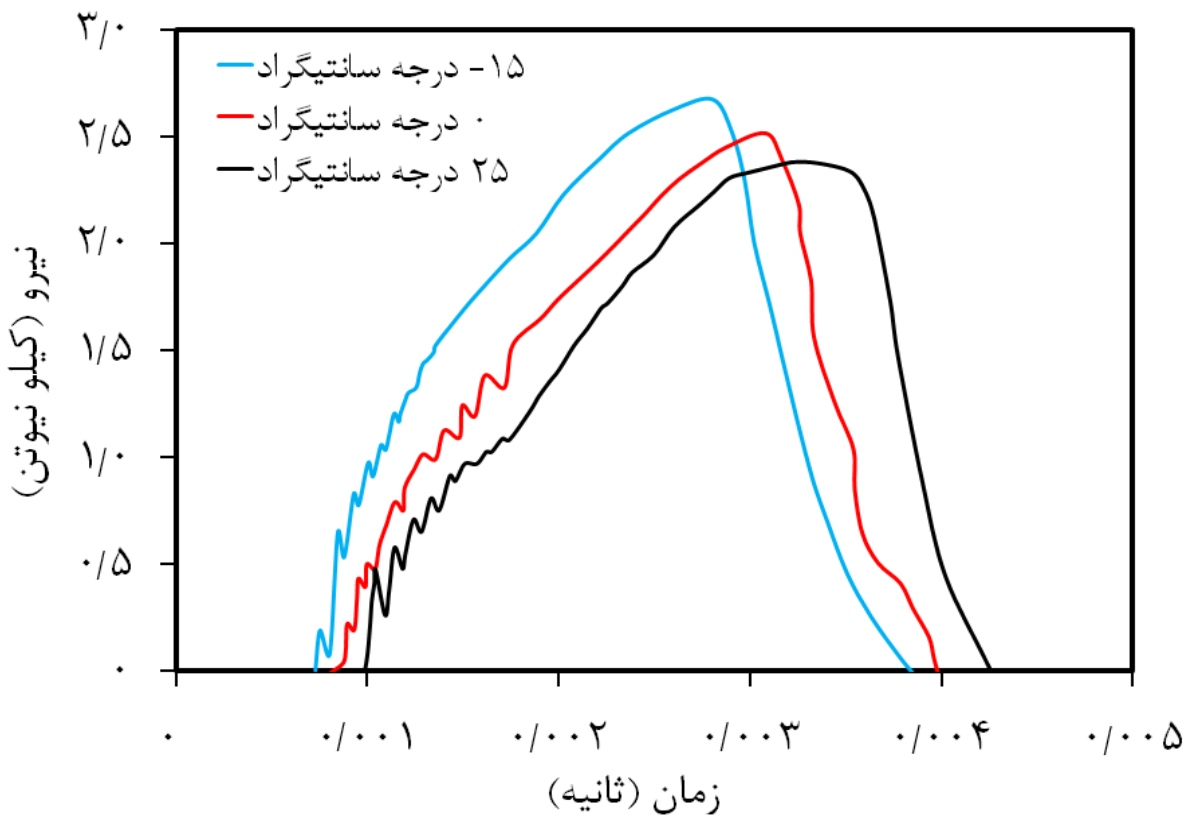
شکل (۹) نتایج آزمایشات ضربه روی لوله کامپوزیتی در دمای ۷۵ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. در این دما روی سه نوع نمونه کامپوزیتی با رزین‌های مختلف و انرژی ضربه متفاوت آزمایش تکرار شده است. در نهایت شکل (۱۰) نتایج آزمایشات ضربه روی لوله کامپوزیتی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. در این دما روی سه نوع نمونه کامپوزیتی با رزین‌های مختلف و انرژی ضربه متفاوت آزمایش تکرار شده است. همانگونه که در تصاویر هم مشاهده می‌شود و قبلاً هم بیان شد، با افزایش دما از دمای اتاق، خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی تغییر می‌کند، به نحوی که سطح تخریب همزمان با زمان برخورد افزایش یافته و در طرف مقابل بیشینه نیروی برخورد کاهش می‌یابد. در این حالت آزمایش نیز نفوذ کامل ضربه زنده در دو وضعیت (ب) و (ج) مشاهده می‌شود که مربوط به نمونه با رزین اپوکسی و ونیل استر است.



شکل ۹- نمونه‌ها پس از آزمایش ضربه در دمای ۷۵ درجه سانتیگراد با رزین (الف) ونیل استر (ب) پلی استر (ج) اپوکسی و انرژی ضربه به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ژول

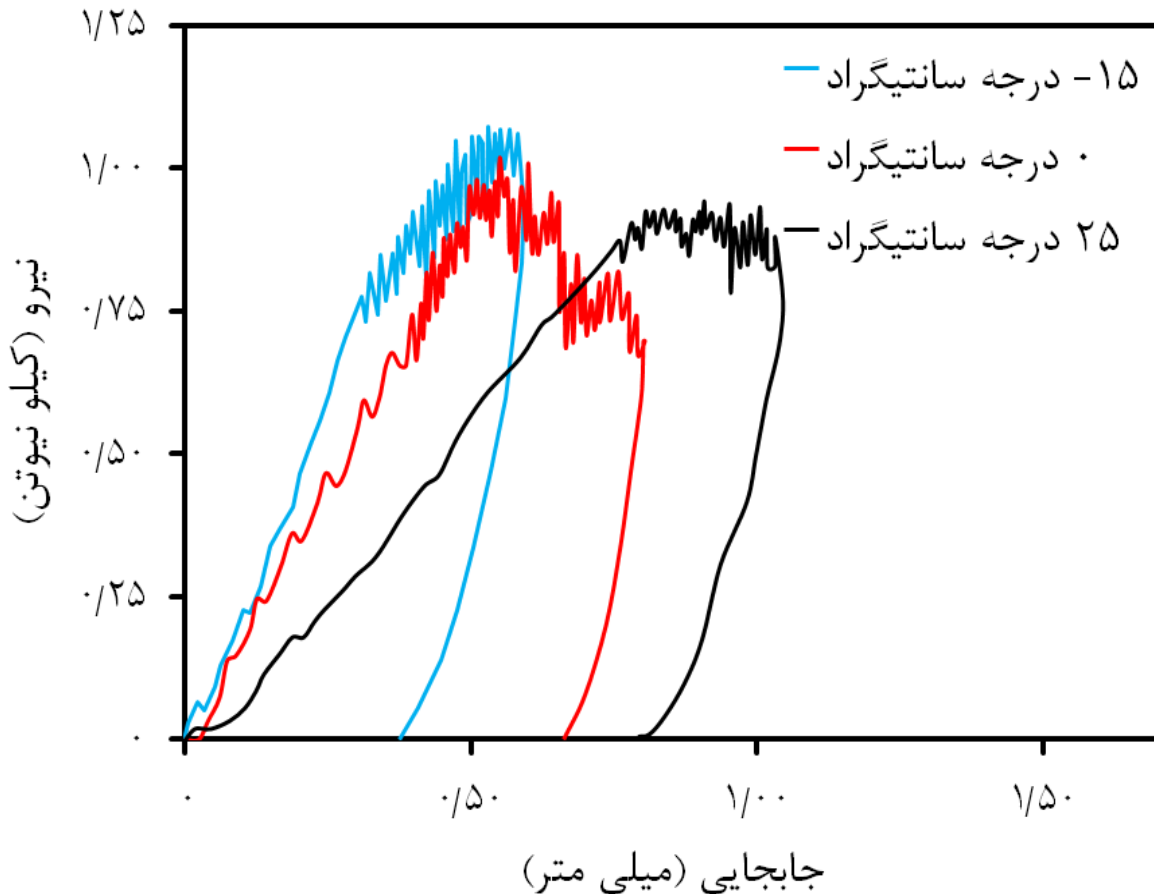


شکل ۱۰- نمونه‌ها پس از آزمایش ضربه در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد با رزین (الف) پلی استر (ب) اپوکسی (ج) ونیل استر و انرژی ضربه به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ژول



نمودار ۱- تغییرات نیرو-زمان برای حالت لوله پلی استر با انرژی ضربه ۳۰ ژول در دماهای مختلف

نمودار (۱) تغییرات نیرو-زمان برای حالت لوله پلی استر با انرژی ضربه ۳۰ ژول در دماهای مختلف و نمودار (۲) تغییرات نیرو-جابجایی برای حالت لوله اپوکسی با انرژی ضربه ۱۰ ژول در دماهای مختلف را نشان می‌دهد.



نمودار ۲- تغییرات نیرو-جابجایی برای حالت لوله اپوکسی با انرژی ضربه ۱۰ ژول در دماهای مختلف

کلیه نتایج آزمایشگاهی حاصل از نمودار نیرو-زمان خروجی از دستگاه تست ضربه شامل بیشینه نیروی برخورد، زمان برخورد و نیز انرژی جذب شده توسط نمونه برای کلیه حالات آزمایش طراحی شده در جدول (۳) آورده شده است. لازم به ذکر است میانگین مقادیر بدست آمده از سه تکرار در هر حالت آزمایش در این جدول ارائه شده است.

در روش‌های تحلیل آماری، نسبت سیگنال به نویز معیاری برای مقایسه سطح سیگنال مورد نظر نسبت به سطح نویز پس‌زمینه است. این نسبت، به عنوان نسبت قدرت سیگنال به نویز تعریف می‌شود که اغلب بر حسب دسی بل بیان می‌شود. بزرگتر-بهتر، کوچکتر-بهتر و اسمی-بهتر سه نوع مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل نسبت‌های سیگنال به نویز هستند. جدول (۴) متوسط اثرات عوامل کنترلی روی پارامترهای پاسخ این مطالعه را نشان می‌دهد. این جدول مقدار نسبی اثرات را بر اساس آمار دلتا مقایسه می‌کند که به رتبه‌هایی گفته می‌شود که تفاوت بین کمترین و بالاترین میانگین‌ها برای عامل انتخاب شده است.

تجزیه و تحلیل تاگوشی از مقادیر انرژی جذب شده لوله در مقابل فاکتورهای کنترلی فرض شده نشان می‌دهد که ضریب دلتا برای انرژی برخورد ضربه زنده، نوع رزین لوله و دمای کارکرد محیطی به ترتیب ۱۴/۷، ۴/۹۵ و ۳/۱۸ است.

جدول ۳- نتایج آزمایشگاهی حاصل از انجام آزمون ضربه در حالت‌های مختلف

| شماره آزمایش | انرژی ضربه (J) | دما (°C) | نوع رزین | کد نمونه | زمان برخورد (ms) | بیشینه نیروی برخورد (kN) | میزان انرژی جذب شده (J) * |
|--------------|----------------|----------|-----------|----------|------------------|--------------------------|---------------------------|
| ۱ | ۱۰ | -۱۵ | اپوکسی | ۱-۱۱E | ۳/۷۶ | ۱/۱۲ | ۴/۹۸ [۳/۰۵] |
| ۲ | ۲۰ | -۱۵ | ونیل استر | ۲۱-۲۷ | ۳/۵۹ | ۱/۶۲ | ۱۰/۰۱ [۴/۳۵] |
| ۳ | ۳۰ | -۱۵ | پلی استر | ۳۱-۳P | ۳/۷۲ | ۲/۶۷ | ۱۵/۲۰ [۵/۰۳] |
| ۴ | ۱۰ | ۰ | اپوکسی | ۱۲-۴E | ۳/۹۸ | ۰/۹۷ | ۶/۱۱ [۳/۷۸] |
| ۵ | ۲۰ | ۰ | ونیل استر | ۲۲-۵V | ۳/۸۰ | ۱/۵۴ | ۱۰/۲۵ [۳/۵۱] |
| ۶ | ۳۰ | ۰ | پلی استر | ۳۲-۶P | ۳/۹۴ | ۲/۶۰ | ۱۵/۲۱ [۵/۲۹] |
| ۷ | ۱۰ | ۲۵ | ونیل استر | ۱۳-۷V | ۴/۴۳ | ۰/۸۹ | ۴/۵۰ [۲/۸۸] |
| ۸ | ۲۰ | ۲۵ | پلی استر | ۲۳-۸P | ۴/۲۳ | ۱/۴۸ | ۱۰/۳۶ [۷/۰۹] |
| ۹ | ۳۰ | ۲۵ | اپوکسی | ۳۳-۹E | ۴/۳۸ | ۲/۵۴ | ۳۰ [۴/۶۱] |
| ۱۰ | ۱۰ | ۵۰ | پلی استر | ۱۴-۱۰P | ۴/۸۷ | ۰/۸۰ | ۳/۴۴ [۶/۱۱] |
| ۱۱ | ۲۰ | ۵۰ | اپوکسی | ۲۴-۱۱E | ۴/۶۵ | ۱/۳۷ | ۲۰ [۵/۰۵] |
| ۱۲ | ۳۰ | ۵۰ | ونیل استر | ۳۴-۱۲V | ۴/۸۱ | ۲/۰۱ | ۳۰ [۷/۵۸] |
| ۱۳ | ۱۰ | ۷۵ | ونیل استر | ۱۵-۱۳V | ۵/۰۹ | ۰/۹۷ | ۵/۱۸ [۲/۳۵] |
| ۱۴ | ۲۰ | ۷۵ | پلی استر | ۲۵-۱۴P | ۴/۸۶ | ۱/۲۰ | ۱۴/۷۸ [۴/۴۰] |
| ۱۵ | ۳۰ | ۷۵ | اپوکسی | ۳۵-۱۵E | ۵/۰۳ | ۱/۸۷ | ۳۰ [۸/۰۹] |
| ۱۶ | ۱۰ | ۱۰۰ | پلی استر | ۱۶-۱۶P | ۵/۳۱ | ۰/۶۰ | ۳/۵۰ [۳/۳۳] |
| ۱۷ | ۲۰ | ۱۰۰ | اپوکسی | ۲۶-۱۷E | ۵/۰۷ | ۱/۱۸ | ۲۰ [۳/۷۱] |
| ۱۸ | ۳۰ | ۱۰۰ | ونیل استر | ۳۶-۱۸V | ۵/۲۵ | ۱/۷۱ | ۳۰ [۹/۰۵] |

* اعداد داخل کروشه بیانگر مقدار انحراف از معیار نتایج بر حسب درصد می باشد.

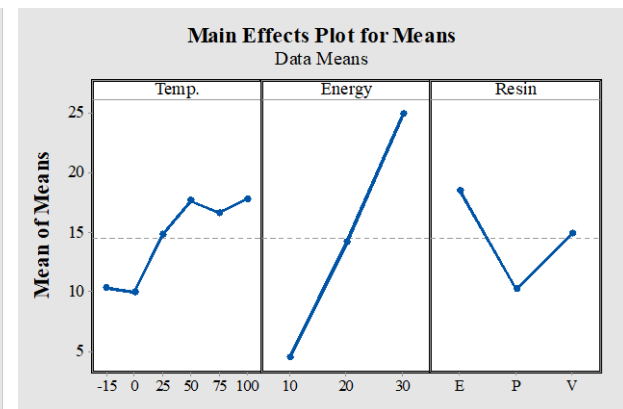
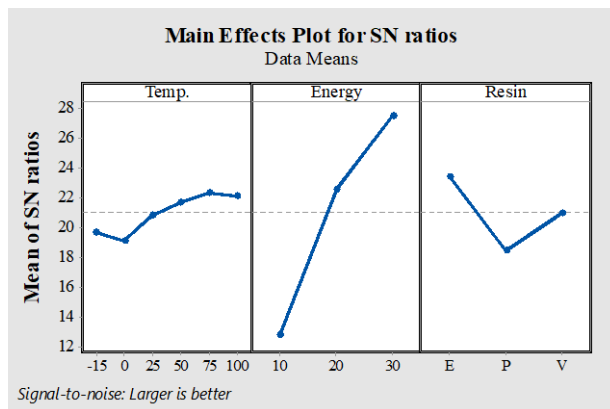
جدول ۴- متوسط اثرات عوامل کنترلی با سطوح مختلف روی پارامترهای پاسخ

| عوامل پاسخ | انرژی جذب شده | | | زمان برخورد | | | بیشینه نیروی برخورد | | | |
|--------------------|---------------|-------|-------|-------------|--------|--------|---------------------|-------|-------|-------|
| | A | B | C | A | B | C | A | B | C | |
| سطح هر عامل کنترلی | ۱ | ۱۹/۶۹ | ۱۲/۸۳ | ۲۳/۴۴ | -۱۱/۳۴ | -۱۳/۱۱ | -۱۲/۹۴ | -۴/۶۵ | ۱/۱۵ | -۳/۰۸ |
| | ۲ | ۱۹/۱۷ | ۲۲/۵۹ | ۱۸/۵۰ | -۱۱/۸۳ | -۱۲/۷۱ | -۱۲/۹۷ | -۳/۹۲ | -۲/۸۶ | -۲/۵۷ |
| | ۳ | ۲۰/۸۷ | ۲۷/۵۴ | ۲۱/۰۲ | -۱۲/۷۰ | -۱۳/۰۴ | -۱۲/۹۴ | -۳/۴۹ | -۶/۸۴ | -۲/۸۹ |
| | ۴ | ۲۱/۷۰ | | | -۱۳/۵۲ | | | -۲/۲۸ | | |
| | ۵ | ۲۲/۳۵ | | | -۱۳/۹۷ | | | -۲/۲۵ | | |
| | ۶ | ۲۲/۱۵ | | | -۱۴/۳۴ | | | -۰/۵۷ | | |
| دلتا | ۳/۱۸ | ۱۴/۷ | ۴/۹۵ | ۳ | ۰/۴ | ۰/۰۳ | ۳/۹۹ | ۸/۰۰ | ۰/۵۰ | |
| رتبه | ۳ | ۱ | ۲ | ۱ | ۲ | ۳ | ۲ | ۱ | ۳ | |

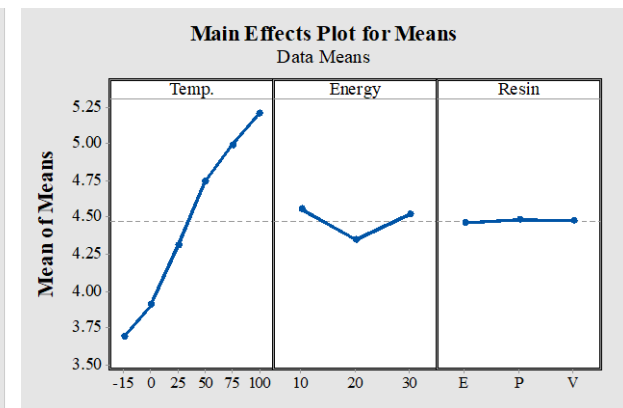
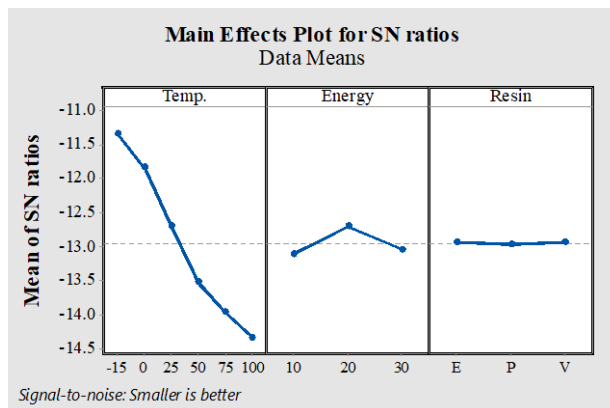
این نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل برای انرژی جذب شده لوله در مقابل فاکتورهای کنترلی فرض شده، انرژی برخورد ضربه زننده است، به دنبال آن نوع رزین لوله و دمای کارکرد محیطی عوامل بعدی موثر در بررسی صورت گرفته، می‌باشد. در خصوص زمان برخورد ضربه زننده به لوله، ضریب دلتا دمای کارکرد محیطی، انرژی برخورد ضربه زننده و نوع رزین لوله به ترتیب ۳، ۰/۴ و ۰/۰۳ است. این بدان معنی است که اصلی‌ترین عامل برای این فاکتور کنترلی، دمای کارکرد محیطی و به دنبال آن انرژی برخورد ضربه زننده و نوع رزین لوله است. در نهایت برای بیشینه نیروی برخورد ضریب دلتا انرژی برخورد ضربه زننده، دمای کارکرد محیطی و نوع رزین لوله به ترتیب ۸، ۳/۹۹ و ۰/۵۰ بوده که به این معنی است که مهم‌ترین عامل انرژی برخورد ضربه زننده و پس از آن دمای کارکرد محیطی و نوع رزین لوله قرار دارد.

در تحقیق پیش‌رو، برای پاسخ انرژی جذب شده لوله، گزینه بزرگتر-بهرتر و برای زمان برخورد و نیروی برخورد از گزینه کوچکتر-بهرتر استفاده شده است. لازم به ذکر است، در هر صورت، برای یافتن عملکرد بهتر ماده در هر حالت، بیشینه مقدار سیگنال به نویز می‌بایستی مورد توجه قرار گیرد.

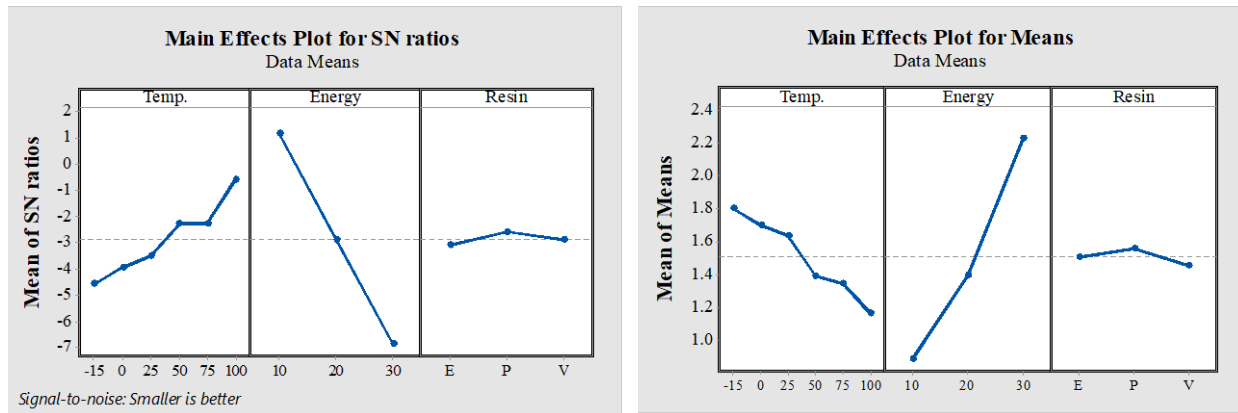
تغییرات سیگنال به نویز و مقادیر میانگین هر فاکتور کنترلی برای سه عامل پاسخ در نظر گرفته شده در نمودارهای (۳) تا (۵) نشان داده شده است.



نمودار ۳- اثرات نسبت سیگنال به نویز و مقدار میانگین برای انرژی جذب شده و سه عامل کنترلی

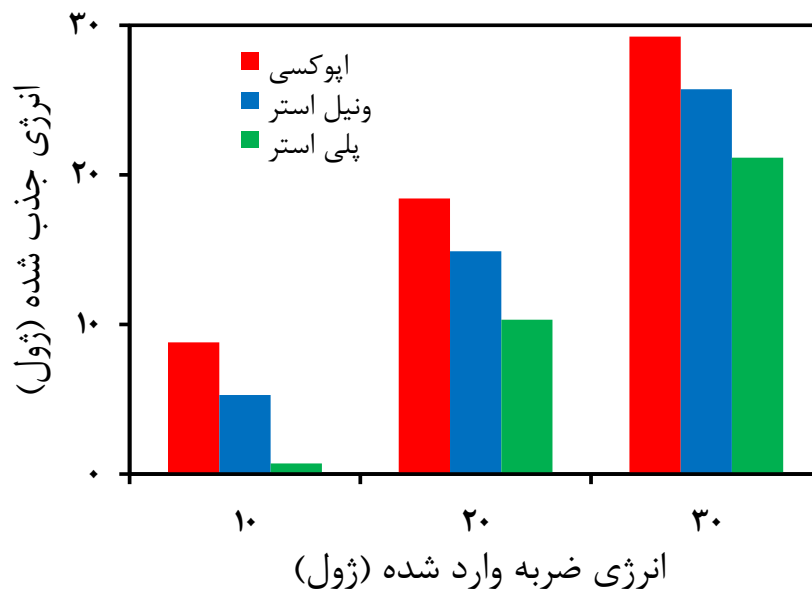


نمودار ۴- اثرات نسبت سیگنال به نویز و مقدار میانگین برای زمان برخورد ضربه زننده و سه عامل کنترلی

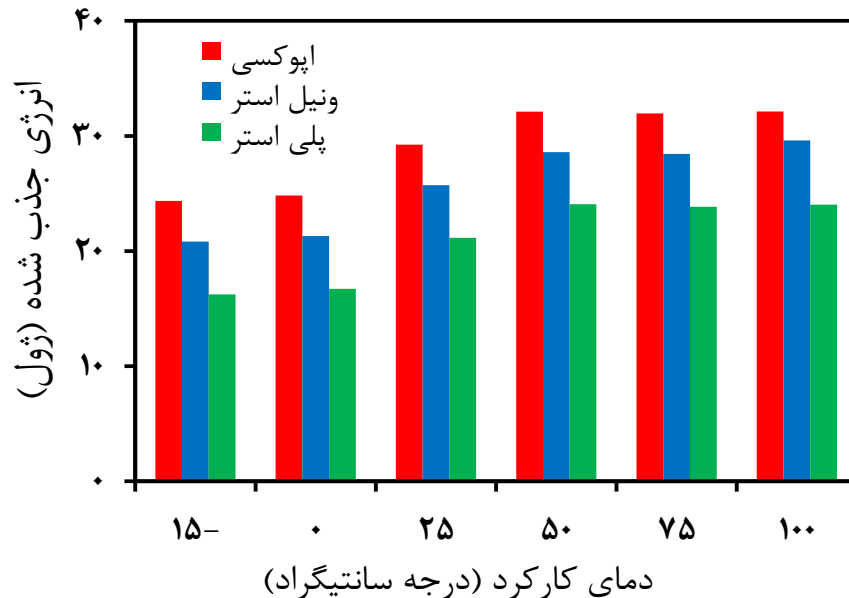


نمودار ۵- اثرات نسبت سیگنال به نویز و مقدار میانگین برای بیشینه نیروی برخورد و سه عامل کنترلی

همانگونه که قبلاً نیز بدان اشاره شد، در هر حالت وضعیت مطلوب برای هر یک از عوامل کنترلی (دما، انرژی ضربه و نوع رزین) و در خصوص هر کدام از عوامل پاسخ (انرژی جذب شده، نیروی برخورد و زمان برخورد) در مقدار بیشینه سیگنال به نویز اتفاق خواهد افتاد. لذا با مرور این اشکال و مقایسه عملکرد انواع رزین مورد استفاده در این مطالعه، ملاحظه می شود که به ترتیب بهترین عملکرد مربوط به رزین اپوکسی بوده و نوع ونیل استر و پلی استر در مراتب بعدی قرار دارند. همچنین، با افزایش دمای کارکرد، با تغییر خاصیت چقرمگی ماده، استحکام مکانیکی لوله در برابر ضربه مکانیکی افزایش می یابد، به نحوی که در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد بالاترین مقدار جذب انرژی ضربه مشاهده می شود. علاوه بر این با مقایسه نتایج آزمایشگاهی در حالات مختلف نتیجه مشابهی در این خصوص حاصل می گردد. نمودار (۶) به مقایسه عملکرد سه نوع رزین تحت انرژی ضربه متفاوت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد پرداخته است.



نمودار ۶- مقایسه عملکرد سه نوع رزین تحت انرژی ضربه متفاوت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد



نمودار ۷- مقایسه عملکرد سه نوع رزین تحت دماهای کاری مختلف و انرژی ضربه ۳۰ ژول

همچنین نمودار (۷) نیز به مقایسه نتایج رزین‌های مختلف با انرژی ضربه ثابت ۳۰ ژول در دماهای مختلف کاری پرداخته است. همانگونه که ملاحظه می‌شود و قبلاً نیز بدان اشاره شده بود، با افزایش دما، میزان قابلیت جذب انرژی مواد کامپوزیتی استفاده شده نیز افزایش می‌یابد.

از آنجایی که در نتایج فوق، برای ۳۶ حالت از آزمایش‌های مورد نیاز، از خروجی مدل تحلیلی تاگوچی و پیش‌بینی آن تولید شده استفاده شده است و در مراجع مورد مطالعه قبلی نیز داده‌ای با مواد اولیه مشابه تحقیق حاضر، جهت مقایسه و اطمینان از صحت کارکرد مدل یافت نشد، جهت اطمینان از صحت عملکرد روش پیش‌بینی تاگوچی، از میان ۱۸ حالت آزمایش انجام شده، تعدادی از نتایج مدل با نتایج واقعی در جدول (۵) مقایسه گردیده است. مقادیر این جدول تطابق خوبی بین داده‌های واقعی از آزمون‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل فعلی را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقایسه نتایج واقعی آزمایشگاهی با نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل تاگوچی در سه آزمایش نمونه

| شماره آزمایش | کد نمونه | مقادیر واقعی حاصل از آزمایش تجربی | | | مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از مدل فعلی | | |
|--------------|----------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | | زمان برخورد (ms) | بیشینه نیروی برخورد (kN) | میزان انرژی جذب شده (J) | زمان برخورد (ms) | بیشینه نیروی برخورد (kN) | میزان انرژی جذب شده (J) |
| ۶ | ۳۲-۶P | ۳/۹۴ | ۲/۶۰ | ۱۵/۲۱ | ۳/۹۶ | ۲/۴۸ | ۱۶/۰۱ |
| ۱۱ | ۲۴-۱۱E | ۴/۶۵ | ۱/۳۷ | ۲۰ | ۴/۶۰ | ۱/۲۹ | ۲۱/۲۲ |
| ۱۸ | ۳۶-۱۸V | ۵/۲۵ | ۱/۷۱ | ۳۰ | ۵/۲۵ | ۱/۸۴ | ۲۸/۶۳ |

۷- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی رفتار لوله های کامپوزیتی الیاف شیشه در شرایط مختلف کاری در برابر بارهای ضربه ناشی از سقوط اجسام پرداخته شد. بدین منظور و با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، سه عامل کنترلی دمای کارکرد لوله، انرژی برخورد ضربه زننده و نوع رزین لوله انتخاب و ۱۸ حالت آزمایش منحصر به فرد تعیین گردید. ساخت نمونه ها بر اساس استاندارد موجود و با روش رشته پیچی در ابعاد مورد نیاز تولید شد. برای انجام آزمایش ضربه از دستگاه آزمایش ضربه افتان و جهت ایجاد دمای مورد نظر، از یک دستگاه فریزر و آون صنعتی استفاده شد. داده های آزمایشگاهی با استفاده از روش تاگوچی در بسته نرم افزاری مینی تب مورد ارزیابی آماری قرار گرفت. مکانیزم تخریب و سطح تخریب لوله به صورت چشمی ارزیابی شد. موارد زیر به عنوان نتیجه گیری قابل توجه می باشد:

- هر سه عامل کنترلی انرژی برخورد ضربه زننده، نوع رزین لوله و دمای کارکرد روی میزان جذب انرژی ضربه توسط لوله اثر معناداری دارد. در صورتیکه عامل نوع رزین لوله روی زمان برخورد ضربه زننده و نیز بیشینه نیروی برخورد تاثیر معناداری از خود نشان نمی دهد.
- با افزایش دما از دمای اتاق، با تغییر خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی، سطح تخریب و زمان برخورد افزایش یافته و در طرف مقابل بیشینه نیروی برخورد کاهش می یابد.
- خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی با کاهش دمای محیط شکننده و تردتر شده در نتیجه همزمان با افزایش استحکام کششی و مدول الاستیسیته مواد در دمای پایین، چقرمگی ماده (کرنش شکست) نیز کاهش پیدا میکند و لذا استحکام در برابر ضربه کاهش می یابد.
- بهترین عملکرد جذب انرژی ضربه توسط لوله به ترتیب با رزین اپوکسی، ونیل استر و پلی استر می باشد. از طرفی لوله در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد بیشترین و در دمای محیطی ۱۵- درجه سانتیگراد کمترین جذب انرژی ضربه را داشته است.

منابع

- [1] R. Karakuzu, A. Djele, and A. Dogan, "High Temperature Effect on Quasi-static and Low Velocity Impact Behaviors of Advanced Composite Materials," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 235, No. 23, pp. 7110-7119, 2021/12/01 2021, doi: 10.1177/09544062211007169.
- [2] N. H. Farhood, S. Karuppanan, H. H. Ya, and M. T. H. Sultan, "Experimental Investigation on the Effects of Glass Fiber Hybridization on the Low-velocity Impact Response of Filament-wound Carbon-based Composite Pipes," *Polymers and Polymer Composites*, Vol. 29, No. 7, pp. 829-841, 2021/09/01 2020, doi: 10.1177/0967391120938181.

- [3] R. Ghajar and A. Rassaf Sohi, "Effect of Impactor Shape and Temperature on the Behavior of E-glass/epoxy Composite Laminates," (in Persian), *Mdrsjrns*, Vol. 14, No. 10, pp. 1-8, 2015. [Online]. Available: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-856-en.html>.
- [4] L. Gemi, M. Kayrıcı, M. Uludağ, D. S. Gemi, and Ö. S. Şahin, "Experimental and Statistical Analysis of Low Velocity Impact Response of Filament Wound Composite Pipes," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 149, pp. 38-48, 2018/09/15/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.006>.
- [5] Ö. Özbek, N. F. Doğan, and Ö. Y. Bozkurt, "An Experimental Investigation on Lateral Crushing Response of Glass/Carbon Intraply Hybrid Filament Wound Composite Pipes," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42, No. 7, p. 389, 2020/07/03 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02475-3.
- [6] M. A. Torabizadeh and A. Fereidoon, "Applying Taguchi Approach to Design Optimized Effective Parameters of Aluminum Foam Sandwich Panels Under Low-Velocity Impact," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 46, No. 4, pp. 851-862, 2022/12/01 2022, doi: 10.1007/s40997-021-00441-5.
- [7] L. Gemi, "Investigation of the Effect of Stacking Sequence on Low Velocity Impact Response and Damage Formation in Hybrid Composite Pipes under Internal Pressure. A Comparative Study," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 153, pp. 217-232, 2018/11/15/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.056>.
- [8] V. VijayaRajan and R. Muruganandhan, "Impact Analysis of Carbon/Glass/Epoxy Hybrid Composite Pipes," *International Journal of Recent Technology and Engineering*, Vol. 8, No. 4, p. 5, 2019, doi: 10.35940/ijrte.C4798.118419.
- [9] P. B. Gning, M. Tarfaoui, F. Collombet, L. Riou, and P. Davies, "Damage Development in Thick Composite Tubes under Impact Loading and Influence on Implosion Pressure: Experimental Observations," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, No. 4, pp. 306-318, 2005/06/01/ 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.11.004>.
- [10] A. Hawa, M. S. Abdul Majid, M. Afendi, H. F. A. Marzuki, N. A. M. Amin, F. Mat, and A. G. Gibson, "Burst Strength and Impact Behaviour of Hydrothermally Aged Flass Fibre/Epoxy Composite Pipes," *Materials & Design*, Vol. 89, pp. 455-464, 2016/01/05/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.082>.
- [11] M. A. Caminero, I. García-Moreno, and G. P. Rodríguez, "Experimental Study of the Influence of Thickness and Ply-stacking Sequence on the Compression After Impact Strength of Carbon Fibre Reinforced Epoxy Laminates," *Polymer Testing*, Vol. 66, pp. 360-370, 2018/04/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.02.009>.
- [12] C. Liu, Y. X. Zhang, and L. Ye, "High Velocity Impact Responses of Sandwich Panels with Metal Fibre Laminate Skins and Aluminium Foam Core," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 100, pp. 139-153, 2017/02/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.09.004>.

[13] Standard Test Method for Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a Tup (Falling Weight), A. S. f. T. a. Materials, 1999, doi: <https://doi.org/10.1520/D2444-99>.

[14] Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing, A. S. f. T. a. Materials, 2008, doi: <https://doi.org/10.1520/D0618-21>.

Behavior of Glass Fiber Composite Pipes under Impact Load at Different Temperature Conditions: An Experimental Study

*Corresponding author: **Mohammad Amin Torabizadeh**

Assistant Professor, Industrial Department, University of Applied Science and Technology, Mashhad, Iran
torabizadeh@uast.ac.ir

Sattar Maleki

Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Quchan University of Technology, Quchan, Iran
s.maleki@qiet.ac.ir

Abstract

In this paper, the behavior of composite tubes made of glass fibers under low velocity impact loads due to falling weight in the temperature range of -15°C to 100°C is investigated. For this purpose, composite tubes with glass fibers and three types of epoxy resins, vinyl ester and polyester are produced and tested in different impact energy levels and temperature conditions. Maximum impact force, impact time and absorbed energy are compared with each other for different situations. The results indicate that the epoxy resin tubes has a better performance in impact energy absorption than the other two types of resin used. As operating temperature increases, load carrying capacity of the tubes decreases, while the duration of impact time and amount of energy absorption increase.

Keywords: Composite pipes, Low velocity impact, Operating temperature, Experimental study, Filament winding method