

بکارگیری روش تاگوچی به منظور طراحی بهینه پارامترهای موثر لوله های کامپوزیتی تحت بار ضربه کم سرعت در شرایط دمایی مختلف

محمد امین ترابی زاده*، استادیار، گروه صنعت، دانشگاه جامع علمی کاربردی، تهران، ایران، torabizadeh@yahoo.com

ستار مالکی، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران، s.maleki@qiet.ac.ir

چکیده

به علت توسعه کاربرد مواد کامپوزیتی به صورت لوله و اتصالات در خطوط انتقال و پالایشگاههای صنایع پتروشیمی و گاز، شناخت دقیق رفتار مکانیکی و طراحی بهینه آنها در شرایط کاری بسیار ضروری است. در این مطالعه با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی، به ارائه مدل عددی جهت بررسی رفتار لوله های کامپوزیتی، ساخته شده با الیاف شیشه و رزین های متفاوت، در برابر بارهای ضربه ناشی از سقوط وزنه افتان در دماهای مختلف کاری پرداخته شده است. لوله ها با سه نوع رزین اپوکسی، ونیل استر و پلی استر تولید و در محدوده دمایی ۱۵- تا ۱۰۰ درجه سلسیوس مورد آزمایش قرار گرفته است. به منظور ارزیابی مدل، نتایج مدل عددی در حالات مختلف با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه و تاثیر هر یک از عوامل کنترلی روی پاسخ مکانیکی لوله ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آن است که لوله با رزین اپوکسی و دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس بهترین عملکرد در برابر بار ضربه را داشته و همچنین با افزایش دمای محیط، ظرفیت حمل بار لوله کاهش و زمان برخورد ضربه زنده افزایش پیدا می کند. **واژه های کلیدی:** لوله کامپوزیتی، ضربه کم سرعت، دمای کارکرد، روش تاگوچی، بهینه سازی، رزین پلیمری.

Application of Taguchi Method to Optimization Design of Effective Parameters of Composite Pipes under Low Velocity Impact in Different Temperature Conditions

M. A. Torabizadeh
S. Maleki

Industrial Department, University of Applied Science and Technology, Tehran, Iran
Department of Mechanical Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

Abstract

Due to the development of using composite pipes and fittings in transmission lines and refineries of petrochemical and gas industries, knowledge of mechanical behavior and their optimal design in working conditions is essential. In this study, by using the Taguchi experimental design method, a numerical model is presented to investigate the behavior of composite pipes, made of glass fibers and different resins, against impact loads due to drop weight at different operating temperatures. The pipes are produced with three types of epoxy resins, vinyl ester and polyester and have been tested in the temperature range of -15°C to 100°C . In order to evaluate the model, the results of the numerical model in different cases are compared with experimental ones and the effect of each of the control factors on the mechanical response of the pipe is evaluated. The results show that the pipe with epoxy resin and temperature of 100°C has the best performance against impact load and also with increasing ambient temperature, the load carrying capacity of the pipe decreases and the impact time of the impactor increases.

Keywords: Composite pipe, Low velocity impact, Operating temperature, Taguchi method, Optimization, Polymeric resin.

مانده لوله های 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، عدم وجود شناخت دقیق و کافی از تاثیر پارامترهای موثر تولید بر رفتار لوله و اتصالات کامپوزیتی در شرایط کاری مورد استفاده می باشد. لذا شناخت دقیق و کافی از رفتار این مواد در شرایط کاری و تولیدی متفاوت بسیار مهم و ضروری است.

سوجی و همکاران [۱] به بهینه سازی کامپوزیتهای خودگیرا با استفاده از روش تاگوچی پرداخته اند. آنها در مدل خود پنج عامل کنترلی در سطوح مختلف و شش پاسخ نمونه ها را در نظر گرفته اند. در نهایت مقادیر بهینه هر یک از عوامل کنترلی برای بهینه سازی توابع پاسخ تعیین و به منظور ارزیابی صحت مدل عددی ارائه شده، مقادیر عددی مدل با آزمایشگاهی مقایسه گردید. کم و همکاران [۲] بهینه سازی خواص مکانیکی نمونه های تولیدی از چاپگر سه بعدی با

۱- مقدمه

یکی از مهمترین کاربردهای کامپوزیت ها در خطوط انتقال و پالایشگاههای صنایع پتروشیمی و گاز در مناطق جنوب کشور می باشد. در سالهای اخیر، استفاده از مواد کامپوزیتی در صنایع مختلف کشور توسعه یافته است. جایگزینی مواد کامپوزیتی با مواد فلزی سنتی، علی الخصوص در مناطق نفت خیز جنوب کشور، به علت ویژگی های فیزیکی منحصر به فرد این مواد است. سبکی وزن، مقاومت ایده آل آنها در برابر شرایط خوردگی و شرایط محیطی (دما، رطوبت، محیط اسیدی و...) نسبت به مواد فلزی معمول از جمله آن ویژگی هاست. در این میان، شرایط دمایی و رطوبت از جمله مهمترین عوامل محیطی در معرض لوله و اتصالاتی است که در مناطق جنوب کشور استفاده شده است. همچنین استحکام در برابر بار ضربه ای یکی از بزرگترین نگرانی ها در این شرایط کاری می باشد. بارهای ضربه می تواند بر اثر سقوط اجسام و ابزارها در حین نصب، بهره برداری و تعمیرات بوجود آید و آسیب های داخلی قابل توجهی را ایجاد و موجب کاهش مقاومت باقی-

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: torabizadeh@uast.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۸/۳۰

استفاده از مواد الیاف طبیعی را با در نظر گرفتن سه عامل کنترلی، نوع پر کننده، زاویه قرار گیری میز و نرخ اشغال در روش تاگوچی مورد بررسی قرار داده و مقادیر بهینه هریک از پارامترهای پاسخ تعیین شده است. سینگ و همکاران [۳] به مطالعه اثر نانو تیبوب های کربنی روی کامپوزیتهای چند دیواره با الیاف کولار و بهینه سازی پارامترهای تولیدی آنها با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی پرداخته اند. دای و همکاران [۴] با استفاده از روش تاگوچی، مطالعه اثر سه پارامتر تولیدی کامپوزیتهای الیاف کربنی روی پاسخ مکانیکی صفحات تک جهته را ارائه داده اند. نتایج آنها عملکرد بهینه تولید را در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، فشار ۳ مگاپاسکال و دمای ماندگاری ۳۰ دقیقه پیشنهاد می دهد. دونتسوف و همکاران [۵] با بکارگیری روش تاگوچی به بهینه سازی شرایط استفاده از چاپگرهای سه بعدی با در نظر گرفتن سه عامل کنترلی پرداخته و نتایج سرعت دوران ۵۵ دور بر دقیقه، دمای اکستروژن ۲۲۰ درجه سلسیوس و نوع سه گانه اکستروژن پیشنهاد شده است. کوچوک و همکاران [۶] به بهینه سازی پارامترهای تولید کامپوزیتهای کربیدی با ماتریس منیزیم با استفاده از روش تاگوچی پرداخته اند. توابع هدف آنها چگالی، سختی و استحکام خمشی نمونه ها تعیین شده است. با استفاده از روش تاگوچی و آنالیز واریانس داده ها، مقادیر پارامترهای تولیدی مواد مفروض با استفاده از روش ریخته گری متالورژی پودر تعیین گردیده است. دنیسون [۷] در تحقیق خود با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی به بهینه سازی پارامترهای تولید کامپوزیت ها با الیاف طبیعی و رزین اپوکسی به منظور حصول بیشینه استحکام کششی و خمشی پرداخته شده است. ضخامت صفحه و درصد غلظت هیدروکسید سدیم را به عنوان پارامترهای تولیدی در نظر گرفته شده است. در نهایت با مقایسه مدل عددی ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی خود به ارزیابی نهایی و قابلیت اطمینان مدل دست یافتند. ازبک و همکاران [۸] به مطالعه تجربی و آزمایشگاهی رفتار تخریب عرضی لوله های هیبرید کربن-شیشه و غیر هیبرید تحت فشار استاتیکی پرداخته اند. 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 پیچش الیاف لوله بود. ترابی زاده و فریدون [۹] 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 ضربه زننده مورد ارزیابی قرار گرفت و بسته به نوع کاربرد، ترکیب بهینه ساخت نمونه ها برای دستیابی به بهترین عملکرد صفحه حاصل شد. نینگ و همکارانش [۱۰] 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 لایه ای و تخریب الیاف در سطوح انرژی بالاتر می باشد. هاوا و همکاران [۱۱] به بررسی استحکام ضربه لوله در فشار کاری دلخواه و متاثر از دما و رطوبت محیطی پرداخته اند. همچنین آنها شکل تخریب لوله را نیز ارزیابی کردند. به منظور ارزیابی اثر دما و رطوبت، لوله ها به مدت زمانی معینی در آب با دمای ۸۰

درجه سلسیوس نگه داری و سپس با سطوح مختلف انرژی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج بیانگر کاهش نیروی برخورد و افزایش مقدار انرژی جذب شده تا ۵۰۰ ساعت ماندگاری نسبت به نمونه در شرایط محیطی عادی می باشد. با افزایش زمان ماندگاری تا ۱۵۰۰ ساعت بسته به سطح انرژی ضربه، یا تغییرات ثابت و یا رفتار معکوس گزارش شده است. ویجا یا [۱۲] با مطالعه رفتار ضربه کم سرعت روی لوله های 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 می یابد. آنها آزمایشات خود را روی نمونه با ضخامت جداره ۴ و ۶ میلیمتر و انرژی ضربه ۲۰، ۲۵ و ۳۰ ژول انجام دادند. شریعیات و همکاران [۱۳] به تحلیل عددی ضربه کم سرعت سازه های ورق مستطیلی پروالاستیک پرداخته اند. در این مقاله برای در نظر گرفتن وابستگی زمانی معادلات حاصله، از روش انتگرال گیری زمانی عددی نیومارک استفاده شده است. داور و همکاران [۱۴] به بررسی ضربه سرعت پایین بر ورقهای کامپوزیتی پایه فلز با استفاده از سه مدل با تکیه گاه ساده مورد بررسی قرار گرفته است. اعتبار سنجی نتایج عددی آنها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تجربی سایر محققان صورت گرفته است. علوی نیا و رحمانی [۱۵] به بررسی تجربی و عددی رفتار مکانیکی سازه های ساندویچی استوانه ای پر شده با فوم پلیمری تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه پرداخته است.

با توجه به مرور مطالعات پیشین در این خصوص، با عنایت به ضرورت وجود دانش کافی از رفتار لوله و اتصالات کامپوزیتی، و با توجه به اعلام نیاز بخش صنعت در این خصوص توسط شرکت تولیدی نوین کامپوزیت صدرا، در این مقاله به بررسی رفتار مکانیکی لوله های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه و رزین های مختلف، تحت بار ضربه کم سرعت و نیز شرایط دمایی متفاوت پرداخته شده است. لازم به ذکر است به علت تفاوت در هندسه، روش تولید و پارامترهای تولید صفحه و لوله و به تبع آن تفاوت در رفتار مکانیکی آنها، در این مطالعه بررسی روی نمونه های لوله انجام شده است. با توجه به هزینه های بالای ساخت و آزمایش نمونه ها و نیز امکان تحلیل آماری داده ها و ارائه مدل عددی رفتار، در این تحقیق از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است. در این روش با در نظر گرفتن سه عامل کنترلی دمای کارکرد (۱۵-، ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سلسیوس)، 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)، سه پارامتر پاسخ موثر در بار ضربه (بیشینه نیروی برخورد، زمان برخورد ضربه زننده و مقدار انرژی جذب شده توسط لوله) مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته و میزان معناداری هریک از عوامل کنترلی روی پارامترهای پاسخ بررسی می شود. ساخت نمونه ها و انجام آزمایشات با استفاده از استاندارد [۱۶] ASTM D2444 صورت می گیرد. به منظور حذف خطاهای آزمایشگاهی هر حالت آزمایش بر روی سه نمونه تکرار و میانگین آماری نتایج مورد استفاده قرار گرفته است. با تحلیل آماری داده های آزمایشگاهی، تاثیر معنادار عوامل کنترلی روی هر یک از پارامترهای پاسخ لوله بررسی و در نهایت مدل عددی برای نیروی برخورد ضربه زننده، زمان برخورد و انرژی جذب شده بر حسب دمای کارکرد و انرژی ضربه وارده به ازای نوع رزین استفاده شده در ساخت

۳- روش طراحی آزمایش تاگوچی

با توجه به هزینه بالای تولید نمونه ها 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. طراحی آزمایش ها یکی از قوی ترین تکنیک ها برای بهبود کیفیت و بهره‌وری است. در اواخر دهه ۱۹۴۰، دکتر تاگوچی مفاهیم آماری جدیدی را معرفی کرد که بعدها ثابت شد که ابزار ارزشمندی برای کنترل و بهبود کیفیت هستند. از آن زمان، بسیاری از صنعتگران ژاپنی از این تکنیک برای بهبود محصولات و کیفیت فرآیند استفاده کردند. روش تاگوچی با روش های مرسوم آزمایش کاملا متفاوت است. این روش بر طراحی آزمایش ها و انجام تعداد محدودی آزمایش متمرکز است، در حالی که در روش های مرسوم باید تمام ترکیبات ممکن آزمایش شود. طراحی آرایه متعام تاگوچی نوعی طرح فاکتوریل کسری عمومی است که بر اساس یک ماتریس طراحی پیشنهاد شده توسط دکتر تاگوچی امکان در نظر گرفتن یک زیرمجموعه انتخابی از ترکیب عوامل متعدد در سطوح مختلف را فراهم می کند. آرایه های متعام تاگوچی متعادل هستند تا اطمینان حاصل شود که تمام سطوح همه عوامل به یک اندازه در نظر گرفته می شوند. آرایه‌های متعام با شناسایی مجموعه‌ای از استراتژی‌های قوی در طراحی آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز را به‌طور چشمگیری کاهش دادند. در این پژوهش برای در نظر گرفتن سه عامل کنترل این مطالعه، از طرح استاندارد مبتنی بر تاگوچی، L_{18} ، استفاده شد. سه عامل کنترلی با سطوح مختلف در نظر گرفته شده است. این طراحی اولیه از سه عنصر کنترل با سطوح کنترلی متفاوت استفاده می کند. علاوه بر این، این طرح قادر به بررسی اثرات متقابل بین عوامل است. در این روش با توجه به تعداد پارمترهای اصلی و نیز سطوح مختلف مساله، حالت‌های مورد نیاز جهت انجام آزمایش طراحی می گردد. جدول ۱ پارامترهای اصلی کنترلی و سطح هر کدام را در این تحقیق نشان می دهد. با توجه به پارامترهای مندرج در جدول ۱ و استفاده از چند جمله ای L_{18} در روش تاگوچی به منظور طراحی آزمایشات، به جای انجام ۵۴ حالت آزمایش منحصر بفرد، با تعداد ۱۸ آزمایش منحصر بفرد می توان تاثیر کلیه پارامترها و سطوح آنها را مورد بررسی قرار داد.

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

تاگوچی						
نام عامل	کد	سطح هر عامل				
کنترلی	عامل	۱	۲	۳	۴	۵
دما (°C)	A	-۱۵	۰	۲۵	۵۰	۷۵
انرژی ضربه (J)	B	۱۰	۲۰	۳۰		
نوع رزین	C	اپوکسی	پلی-استر	ونیل-استر		

۴- 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 اون موجود در آن آزمایشگاه که در کنار تجهیزات

لوله ارائه گردیده است. به منظور ارزیابی صحت و دقت مدل عددی، نتایج آزمایشگاهی با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل در حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه می شود. در نهایت، سطح آسیب نمونه و نیز مکانیزم تخریب لوله کامپوزیتی بر اساس مشاهدات چشمی مورد بررسی و بحث قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش ساخت نمونه ها

لوله های کامپوزیتی تولید شده در این تحقیق با استفاده از روش پیشگی الیاف توسط شرکت نوین کامپوزیت ساخته شده است. در این روش، الیاف شیشه و رزین بر روی یک قالب فلزی دوار با ابعاد هندسی مشخص پیچیده می شوند. در این فرآیند دسته هایی 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. نمونه های تولیدی لوله با قطر خارجی ۱۵۰ میلی متر، ضخامت جداره ۱ میلی متر و از جنس الیاف شیشه می باشد. نمونه ها از لوله های تولیدی به طول ۲/۳ متر در ابعاد مورد نیاز برش زده می شود. زاویه قرارگیری الیاف شیشه حدود $\pm 57^\circ$ درجه با 40° عدد نخ است. عرض باند الیاف در هر قالب در حین فرآیند تولید ۱۰۰ میلیمتر با حوضچه رزین ثابت بوده و نمونه ها پس از تولید به طور کامل پست کیور شده است. همچنین در این مطالعه از سه رزین اپوکسی مایع از نوع EPIRAN-06-SPL، رزین پلی استر ایزوفتالیک MVO-140 و رزین ونیل استر VE375 استفاده شده است. شکل ۱ نمونه های تولیدی برش خورده بر اساس ابعاد استاندارد با سه رزین مختلف اپوکسی، ونیل استر و پلی استر را بر اساس طراحی آزمایش صورت گرفته نشان می دهد.

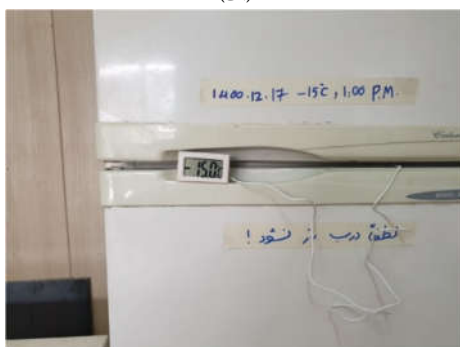


شکل ۱- نمونه های تولیدی با رزین های مختلف بر اساس طراحی آزمایش تاگوچی

تست ضربه استقرار دارد تامین گردید. داده های آزمایش ضربه در این دستگاه توسط لودسل ۵۰۰۰ نیوتنی متصل به ضربه زننده کروی آن اندازه گیری و ثبت می گردد. به منظور بررسی قابلیت اطمینان به نتایج آزمایشگاهی، در هر حالت آزمایش سه تکرار انجام می گردد و در نهایت میانگین نتایج مورد استفاده قرار خواهد گرفت. شکل ۲-الف تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده به همراه آون و فریزر ایجاد دماهای بالا و پایین را نشان می دهد. به منظور اطمینان از صحت و دقت دماسنج هر یک از تجهیزات دمایی، دماسنج دیجیتال کالیبره شده با دقت ± 1 درجه سلسیوس نیز مورد استفاده قرار گرفته است. (شکل ۲-ب) در کلیه دماهای کارکرد محیطی، با توجه به توصیه استاندارد ASTM D2444 بر اساس تمرین استاندارد [۱۷] D618 که حداقل ۴۰ ساعت ماندگاری برای نمونه ها با ضخامت کمتر از ۷ میلی متر است، نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای مورد نظر به جهت هم دمایی و نفوذ در ضخامت نمونه نگهداری شده است. بر اساس این استاندارد و به منظور حفظ تعادل دمایی، حداکثر مدت زمان خروج نمونه از محفظه دمایی (فریزر و آون) تا انجام آزمایش، ۱۵ ثانیه و نیز انحراف دمایی ± 2 درجه سلسیوس تعیین شده است. در این تحقیق که محفظه های دمایی در مجاورت دستگاه ضربه قرار گرفته، در مدت زمان کوتاه تری انجام آزمایش مقدور می باشد. همچنین در این مطالعه، از فیکسچر ۷ شکل با زاویه ۹۰ درجه با حداقل طول ۱۵۰ میلیمتر برای قرارگیری نمونه ها وفق توصیه استاندارد فوق، استفاده میشود. (شکل ۲-ج)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- (الف) نمای کلی تجهیزات مورد استفاده جهت انجام آزمایش های تجربی (ب) دماسنج دیجیتال کالیبره شده (ج) فیکسچر مورد استفاده جهت انجام آزمایش

جدول ۲- اطلاعات تنظیم دستگاه آزمایش ضربه بر اساس سرعت

لحظه برخورد ضربه زننده		
انرژی جنبشی مورد نیاز (ژول)	سرعت لحظه برخورد (متر بر ثانیه)	ارتفاع رهاسازی ضربه زننده 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 زننده 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 زننده به نمونه، از یک سرعت سنج دیجیتال با حسگر 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 زننده محاسبه می گردد تا اثر کاهشی اصطکاک ریل ها جبران گردد. اطلاعات دستگاه در این خصوص در جدول ۲ نشان داده شده است. داده های نیروی برخورد توسط مدار حسگر 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.

۵- نتایج آزمایشات تجربی

با توجه به توضیحات بخشهای قبلی، آزمایشها بر اساس طراحی تاگوچی در دماها و انرژی ضربه متفاوت انجام می شود. در اینجا به دلیل محدودیت فضا، صرفاً به ارائه تصاویر نمونه های پس از آزمایش در دو دمای ۱۵- و ۱۰۰ درجه سلسیوس بر اساس طراحی آزمایش صورت گرفته، اکتفا می شود. شکل ۳ نتایج آزمایشات ضربه روی لوله کامپوزیتی در دمای ۱۵- درجه سلسیوس را نشان می دهد. در این دما روی سه نوع نمونه کامپوزیتی با رزین های مختلف و انرژی ضربه متفاوت آزمایش تکرار شده است.

همانگونه که در تصاویر مشاهده می شود، با افزایش انرژی ضربه همانطور که مورد انتظار هم بود، میزان سطح تخریب لوله افزایش پیدا کرده است. همچنین اینکه در دو حالت شکل (الف) نفوذ ضربه زنده در لوله به طور کامل صورت گرفته در صورتیکه در حالت سوم صرفاً اندکی تخریب از نوع ترک ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس مشاهده می شود. در صورتی که تخریب الیاف در نزدیکی محل نفوذ ضربه زنده در وضعیت نفوذ کامل، به وضوح قابل مشاهده است. در دمای اتاق، سطح تخریب نمونه در اطراف محل نفوذ کمتر از دمای ۱۵- درجه سلسیوس 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 کاهش یافته، استحکام در برابر ضربه نیز کمتر و در نهایت مقدار انرژی جذب شده توسط لوله کاهش می یابد. این مشاهدات آزمایشگاهی در مقالات سایر محققان نیز گزارش شده است. [۱۰] شکل ۴ نمودارهای نیرو-زمان برای حالت لوله پلی استر با انرژی ضربه ۳۰ ژول در دماهای مختلف و شکل ۵ نمودارهای نیرو-جابجایی برای حالت لوله اپوکسی با انرژی ضربه ۱۰ ژول در دماهای مختلف را نشان می دهد.

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 مقادیر مندرج در این جدول میانگین مقادیر سه تکرار آزمایش در هر حالت می باشد.



اپوکسی- ۱۰ ژول E11-1 ونیل استر- ۲۰ ژول V21-2 پلی استر- ۳۰ ژول P31-3
(الف)



ونیل استر- ۱۰ ژول V13-7 RT ① پلی استر- ۲۰ ژول P23-8 RT ② اپوکسی- ۳۰ ژول E33-9 RT ③
(ب)

شکل ۳- نمونه ها پس از آزمایش ضربه در دمای (الف) ۱۵- درجه سلسیوس (ب) ۲۵ درجه سلسیوس با رزین و انرژی های ضربه متفاوت

۶- تحلیل آماری داده های آزمایش تجربی

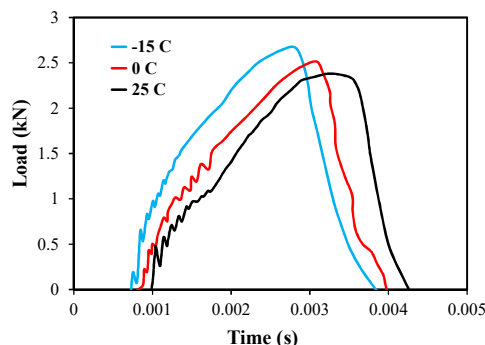
در این بخش، با استفاده از تحلیل داده های آزمایشگاهی به کمک بسته نرم افزاری مینی تب، مدل عددی رفتار لوله های کامپوزیتی تحت شرایط بار ضربه کم سرعت بر حسب دمای کارکرد و مقدار انرژی ضربه ارائه و مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۶-۱- نسبت سیگنال به نویز

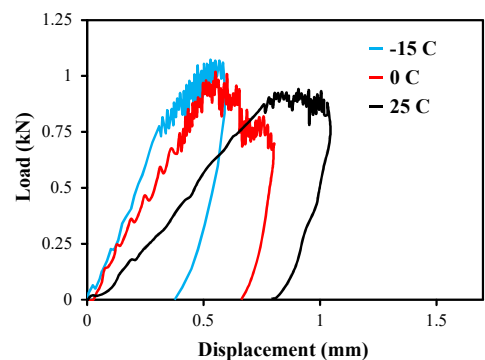
نسبت سیگنال به نویز معیاری برای مقایسه سطح سیگنال مورد نظر نسبت به سطح نویز پس زمینه است. این نسبت، به عنوان نسبت قدرت سیگنال به نویز تعریف می شود که اغلب بر حسب دسی بل بیان می شود. بزرگتر-بهرتر، کوچکتر-بهرتر و اسمی-بهرتر سه نوع مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل نسبتهای سیگنال به نویز هستند. جدول ۴ متوسط اثرات عوامل کنترلی روی پارامترهای پاسخ این مطالعه را نشان می دهد. این جدول مقدار نسبی اثرات را بر اساس آمار دلتا مقایسه می کند که به رتبه هایی گفته می شود که تفاوت بین کمترین و بالاترین میانگین ها برای عامل انتخاب شده است.

تجزیه و تحلیل تاگوچی از مقادیر انرژی جذب شده لوله در مقابل فاکتورهای کنترلی فرض شده نشان می دهد 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. این نشان می دهد که مهم ترین عامل برای انرژی جذب شده لوله در مقابل فاکتورهای کنترلی فرض شده، انرژی برخورد ضربه زنده است، به دنبال آن نوع رزین لوله و دمای کارکرد محیطی عوامل بعدی موثر در بررسی صورت گرفته، می باشد. در خصوص زمان برخورد ضربه زنده به لوله، ضریب دلتا دمای کارکرد محیطی، انرژی برخورد ضربه زنده و نوع رزین لوله به ترتیب ۰/۴، ۳ و ۰/۰۳ است. این بدان معنی است که اصلی ترین عامل برای این فاکتور کنترلی، دمای کارکرد محیطی و به دنبال آن انرژی برخورد ضربه زنده و نوع رزین لوله است. در نهایت برای بیشینه نیروی برخورد ضریب دلتا انرژی برخورد ضربه زنده، دمای کارکرد محیطی و نوع رزین لوله به ترتیب ۸، ۳/۹۹ و ۰/۵۰ بوده که به این معنی است که مهم ترین عامل انرژی برخورد ضربه زنده و پس از آن دمای کارکرد محیطی و نوع رزین لوله قرار دارد.

تحلیل واریانس داده ها مجموعه ای از مدل های آماری و روش های برآورد مرتبط با آن ها برای تجزیه و تحلیل تفاوت های بین گروه ها است. در این مطالعه، اهمیت آماری پارامترهای کنترلی بر عوامل پاسخ مفروض با استفاده از روش خطی تحلیل واریانس داده ها انجام پذیرفت. تأثیر انرژی برخورد ضربه زنده، دمای کارکرد محیطی و نوع رزین لوله بر واریانس کل نتایج برای سطح معنی داری ۰/۵ درصد (سطح اطمینان ۹۹/۵ درصد) در نظر گرفته شد. جدول ۵، نتایج تحلیل واریانس داده های مساله را روی مهم ترین عامل پاسخ (انرژی جذب شده) نشان می دهد. واضح است که هر سه عامل کنترلی مفروض در این تحقیق روی پاسخ میزان انرژی جذب شده لوله اثر معناداری دارند. در این میان انرژی برخورد ضربه زنده و نوع رزین لوله با $p < 0.05$ بیشترین تاثیر و دمای کارکرد محیطی با $p < 0.003$ کمترین اثر را روی این عامل کنترلی از خود نشان میدهد.

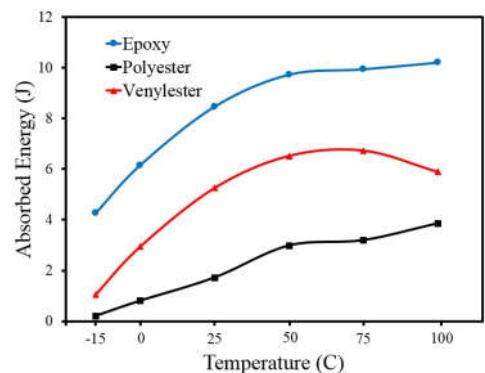


شکل ۴- نمودار نیرو-زمان برای حالت لوله پلی استر با انرژی ضربه ۱۰ ژول در دماهای مختلف



شکل ۵- نمودارهای نیرو-جابجایی برای حالت لوله اپوکسی با انرژی ضربه ۱۰ ژول در دماهای مختلف

شکل ۶ به مقایسه تاثیر استفاده از رزین های مختلف در ساخت لوله های کامپوزیتی در بازه دمایی مورد مطالعه با انرژی ضربه ۱۰ ژول پرداخته است. همانگونه که در نمودار قابل ملاحظه است، بهترین عملکرد در جذب انرژی ناشی از ضربه مربوط به رزین اپوکسی می باشد. رزین های ونیل استر و پلی استر به ترتیب در رده های بعدی قرار گرفته است. موضوع اثرگذاری نوع رزین در انرژی جذب شده لوله در بخش بعدی با استفاده از روش تحلیل آماری نیز نشان داده خواهد شد.



شکل ۶- انرژی جذب شده توسط رزین های مختلف در دماهای متفاوت با انرژی ضربه ۱۰ ژول

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	E11-۱	۳/۷۶	۱/۱۲	۴/۹۸
۲	۲۰	-۱۵	ونیل استر	V21-۲	۳/۵۹	۱/۶۲	۱۰/۰۱
۳	۳۰	-۱۵	پلی استر	P31-۳	۳/۷۲	۲/۶۷	۱۵/۲۰
۴	۱۰	۰	اپوکسی	E12-۴	۳/۹۸	۰/۹۷	۶/۱۱
۵	۲۰	۰	ونیل استر	V22-۵	۳/۸۰	۱/۵۴	۱۰/۲۵
۶	۳۰	۰	پلی استر	P32-۶	۳/۹۴	۲/۶۰	۱۵/۲۱
۷	۱۰	۲۵	ونیل استر	V13-۷	۴/۴۳	۰/۸۹	۴/۵۰
۸	۲۰	۲۵	پلی استر	P23-۸	۴/۲۳	۱/۴۸	۱۰/۳۶
۹	۳۰	۲۵	اپوکسی	E33-۹	۴/۳۸	۲/۵۴	۳۰
۱۰	۱۰	۵۰	پلی استر	P14-۱۰	۴/۸۷	۰/۸۰	۳/۴۴
۱۱	۲۰	۵۰	اپوکسی	E24-۱۱	۴/۶۵	۱/۳۷	۲۰
۱۲	۳۰	۵۰	ونیل استر	V34-۱۲	۴/۸۱	۲/۰۱	۳۰
۱۳	۱۰	۷۵	ونیل استر	V15-۱۳	۵/۰۹	۰/۹۷	۵/۱۸
۱۴	۲۰	۷۵	پلی استر	P25-۱۴	۴/۸۶	۱/۲۰	۱۴/۷۸
۱۵	۳۰	۷۵	اپوکسی	E35-۱۵	۵/۰۳	۱/۸۷	۳۰
۱۶	۱۰	۱۰۰	پلی استر	P16-۱۶	۵/۳۱	۰/۶۰	۳/۵۰
۱۷	۲۰	۱۰۰	اپوکسی	E26-۱۷	۵/۰۷	۱/۱۸	۲۰
۱۸	۳۰	۱۰۰	ونیل استر	V36-۱۸	۵/۲۵	۱/۷۱	۳۰

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

عوامل پاسخ	انرژی جذب شده			زمان برخورد			بیشینه نیروی برخورد			
	عامل کنترلی	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	-۲/۴۹	-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	

۲-۶- تحلیل واریانس

تحلیل واریانس داده‌ها مجموعه‌ای از مدل‌های آماری و روش‌های برآورد مرتبط با آن‌ها برای تجزیه و تحلیل تفاوت‌های بین گروه‌ها است. در این مطالعه، اهمیت آماری پارامترهای کنترلی بر عوامل پاسخ مفروض با استفاده از روش خطی تحلیل واریانس داده‌ها انجام پذیرفت. تأثیر انرژی برخورد ضربه زنده، دمای کارکرد محیطی و نوع رزین لوله بر واریانس کل نتایج برای سطح معنی‌داری ۰/۵ درصد (سطح اطمینان ۹۹/۵ درصد) در نظر گرفته شد. جدول ۵، نتایج تحلیل واریانس داده‌های مساله را روی مهم‌ترین عامل پاسخ (انرژی جذب شده) نشان می‌دهد. واضح است که هر سه عامل کنترلی مفروض در

این تحقیق روی پاسخ میزان انرژی جذب شده لوله اثر معناداری دارند. در این میان انرژی برخورد ضربه زنده و نوع رزین لوله با $p < ۰/۰۵$ بیشترین تأثیر و دمای کارکرد محیطی با $p < ۰/۰۰۳$ کمترین اثر را روی این عامل کنترلی از خود نشان میدهد.

جدول ۵- داده های تحلیل واریانس مقادیر میانگین برای عامل پاسخ انرژی جذب شده

منبع داده	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	R-Sq	R-Sq (Adj)
انرژی برخورد	۲	۱۲۶۲/۱۱	۱۲۶۲/۱۱	۶۳۱/۰۵۶	۱۶۳/۵۹	۰	۹۸/۱۷٪	۹۸/۰۸٪
دمای کارکرد	۵	۱۹۰/۶۱	۱۹۰/۶۱	۳۸/۱۲۲	۹/۸۸	۰/۰۰۳		
نوع رزین	۲	۲۰۵/۳۶	۲۰۵/۳۶	۱۰۲/۶۸۱	۲۶/۶۲	۰		
خطای باقی مانده	۷	۳۰/۸۶	۳۰/۸۶	۳/۸۵۸				
مجموع	۱۸	۱۶۸۸/۹۴						

جدول ۶- داده های تحلیل واریانس مقادیر میانگین برای عامل پاسخ زمان برخورد ضربه زننده

منبع داده	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	R-Sq	R-Sq (Adj)
انرژی برخورد	۲	۰/۱۴۵۹۱	۰/۱۴۵۹۱	۰/۰۷۲۹۶	۵۰/۲۷	۰	۹۹/۸۰٪	۹۹/۵۷٪
دمای کارکرد	۵	۵/۵۴۰۸۹	۵/۵۴۰۸۹	۱/۱۰۸۱۸	۷۶۳/۵۳	۰		
نوع رزین	۲	۰/۰۰۱۹۴	۰/۰۰۱۹۴	۰/۰۰۰۹۷	۰/۶۷	۰/۵۳۸		
خطای باقی مانده	۷	۰/۰۱۱۶۱	۰/۰۱۱۶۱	۰/۰۰۱۴۵				
مجموع	۱۸	۵/۷۰۳۶						

جدول ۷- داده های تحلیل واریانس مقادیر میانگین برای عامل پاسخ بیشینه نیروی برخورد

منبع داده	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	R-Sq	R-Sq (Adj)
انرژی برخورد	۲	۵/۵۰۵۸۳	۵/۵۰۵۸۳	۲/۷۵۲۹۲	۸۲/۰۷	۰	۹۷/۹۹٪	۹۷/۸۷٪
دمای کارکرد	۵	۰/۸۹۲۸۵	۰/۸۹۲۸۵	۰/۱۷۸۵۷	۵/۳۲	۰/۰۱۹		
نوع رزین	۲	۰/۰۳۱۰۳	۰/۰۳۱۰۳	۰/۰۱۵۵۲	۰/۴۶	۰/۶۴۵		
خطای باقی مانده	۷	۰/۲۶۸۳۳	۰/۲۶۸۳۳	۰/۰۳۳۵۴				
مجموع	۱۸	۶/۶۹۸۰۵						

۳-۶- مدل عددی پیش بینی رفتار

به منظور دستیابی به مدل عددی رفتار لوله، از امکان رگرسیون مستقیم روی داده ها در نرم افزار Minitab بهره برده شده است. بدین جهت باید متغیرهای مستقل و وابسته شناسایی شوند. در این تحقیق همانگونه که در جدول ۱ نیز ذکر شد، دمای کارکرد، نوع رزین استفاده شده در ساخت لوله و انرژی ضربه به عنوان عوامل کنترلی (متغیرهای مستقل) و بیشینه نیروی برخورد، زمان برخورد ضربه زننده و میزان انرژی جذب شده توسط لوله به عنوان متغیرهای پاسخ (وابسته) در نظر گرفته شده است. به این ترتیب ۱۸ نمونه شاخص اطلاعاتی با استفاده از آرایه متعامد L_{18} ایجاد و ضرایب رگرسیون برای هر حالت تعیین شد. معادلات مدل عددی ساخته شده برای هر متغیر وابسته به شرح زیر خواهد بود.

$$\text{Time (ms)} = A * E(J) + 0.0319 T(^{\circ}\text{C}) - 0.000607 T(^{\circ}\text{C}) * E(J) - 0.000054 T(^{\circ}\text{C}) * T(^{\circ}\text{C}) - 0.00870 E(J) * E(J) \quad (1)$$

$$\text{Load (kN)} = B * E(J) + 0.00456 T(^{\circ}\text{C}) - 0.000477 T(^{\circ}\text{C}) * E(J) - 0.000003 T(^{\circ}\text{C}) * T(^{\circ}\text{C}) + 0.000021 E(J) * E(J) \quad (2)$$

$$\text{Absorbed Energy (J)} = C + 0.665 * E(J) + 0.0846 T(^{\circ}\text{C}) + 0.00289 T(^{\circ}\text{C}) * E(J) - 0.000840 T(^{\circ}\text{C}) * T(^{\circ}\text{C}) + 0.00612 E(J) * E(J) \quad (3)$$

که در آن A، B و C ضرایب ثابتی است که بسته به نوع رزین استفاده شده در ساخت لوله مطابق جدول ۸ خواهد بود. به منظور ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان مدل عددی ارائه شده، نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به مرور مقالات مشابه در این خصوص، حداکثر خطای ۲۰٪ میان نتایج قابل قبول می باشد. با

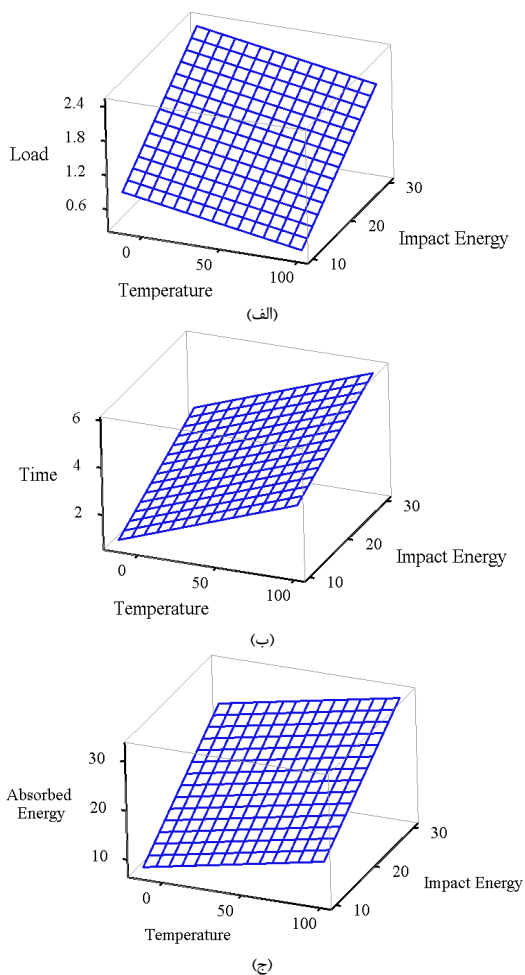
مقایسه صورت گرفته در این مطالعه، به طور میانگین خطای ۵/۳۷٪ حاصل گردید که حاکی از دقت بسیار قابل قبول مدل عددی ارائه شده می باشد. شکل ۷ مقایسه خطای هر یک از متغیرهای وابسته بین داده های آزمایشگاهی و مدل پیش بینی عددی حاضر را به همراه درصد خطای هر یک بازای هر حالت از آزمایش نشان می دهد.

جدول ۸- ضرایب ثابت در روابط مدل عددی پیش بینی رفتار لوله

نوع رزین لوله	مقادیر ضرایب ثابت در روابط مدل عددی		
	A	B	C
اپوکسی	۰/۳۹۱۱	۰/۰۸۸۱	-۱/۱۱
پلی استر	-۰/۰۴۶	-۰/۱۴۲	-۷/۸۶
ونیل استر	۰/۱۶۳	-۰/۰۷۲۹	-۴/۳۲

از آنجاییکه کاربرد لوله های کامپوزیتی با رزین های مختلف و در شرایط دمایی متفاوت در حوزه صنایع پتروشیمی و نیز مطالعات تحقیقاتی محققان گسترش فراوانی یافته، لذا استفاده از مدل حاضر به منظور پیش بینی رفتار مکانیکی این مواد می تواند با صرفه جویی در زمان و هزینه بسیار مفید و کاربردی باشد. این مدل قابلیت برون یابی داده ها در بازه های متفاوت را نیز دارا است.

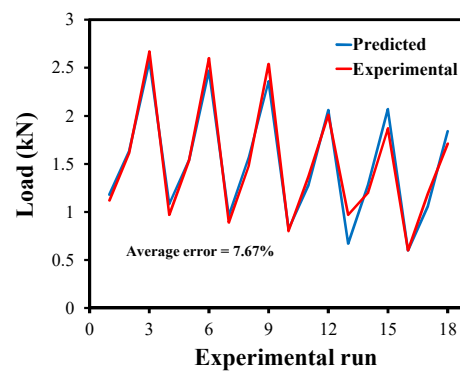
همچنین اثر متقابل عوامل کنترلی (متغیرهای مستقل) بر پارامترهای پاسخ (متغیرهای وابسته) از طریق رسم نمودارهای تعامل سه بعدی در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که شکل مشخص است، در خصوص متغیر وابسته بیشینه نیروی برخورد، انرژی ضربه تاثیر بیشتری نسبت به دمای کارکرد از خود نشان می دهد. در صورتیکه در خصوص دو متغیر وابسته زمان و انرژی جذب شده، تاثیر دمای کارکرد بیش از میزان انرژی ضربه می باشد.



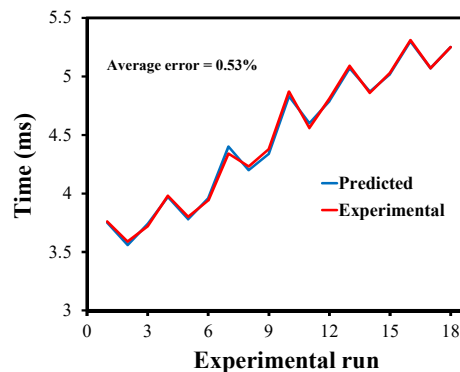
شکل ۸- نمودارهای اثر متقابل کمیت های مستقل برای کمیت های وابسته (الف) نیروی برخورد ضربه زنده (ب) زمان برخورد ضربه زنده (ج) انرژی جذب شده

برای انجام آزمایش ضربه از دستگاه آزمایش ضربه افتان و جهت ایجاد دمای مورد نظر، از یک دستگاه فریزر و اون صنعتی استفاده گردید. بیشینه نیروی برخورد، زمان برخورد ضربه زنده و انرژی ضربه جذب شده توسط لوله نیز به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. داده های آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزاری مینی تب مورد ارزیابی آماری قرار گرفت. میزان معناداری اثر متغیرهای مستقل روی متغیرهای وابسته و اولویت هریک با تحلیل نسبت سیگنال به نویز و واریانس تعیین و در نهایت مدل عددی بر حسب متغیرهای مستقل به منظور پیش بینی رفتار لوله (متغیرهای وابسته) بازای هر نوع رزین ارائه گردید. به منظور ارزیابی صحت و دقت مدل، نتایج پیش بینی مدل با مقادیر آزمایشگاهی تجربی مقایسه و بیشترین نقش اثرگذاری روی متغیرهای وابسته با رسم نمودارهای سه بعدی اثر متقابل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مکانیزم تخریب و سطح تخریب لوله بر اساس مشاهدات چشمی در حالات مختلف اندازه گیری و تفسیر شد. موارد زیر به عنوان نتیجه گیری قابل توجه می باشد:

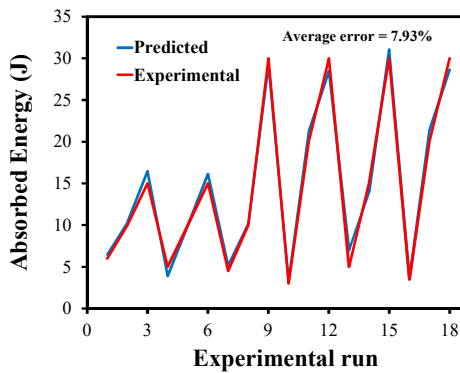
- هر سه عامل کنترلی (متغیر مستقل) انرژی برخورد ضربه زنده، نوع رزین لوله و دمای کارکرد روی میزان جذب انرژی ضربه توسط لوله



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷- نتایج آزمایشگاهی و عددی حاصل از مدل برای (الف) نیروی برخورد ضربه زنده (ب) زمان برخورد ضربه زنده (ج) انرژی جذب شده

۷- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی رفتار لوله های کامپوزیتی الیاف شیشه ساخته شده با سه نوع رزین مختلف در شرایط دمایی مختلف کاری تحت بار ضربه ناشی از سقوط اجسام پرداخته شد. بدین منظور و با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، سه عامل کنترلی (متغیر مستقل) دمای کارکرد لوله، انرژی برخورد ضربه زنده و نوع رزین لوله انتخاب و آزمایشهای تجربی در ۱۸ حالت منحصر به فرد (با سه تکرار) انجام شد. ساخت لوله ها بر اساس استاندارد موجود و با روش پیشخالی الیاف انجام و سپس نمونه ها در ابعاد مورد نیاز برش زده شد.

- [8] Özbek O., Doğan NF., Bozkurt OY., 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, pp. 389, 2020.
- [9] Torabizadeh MA, Fereidoon A., Applying Taguchi Approach to Design Optimized Effective Parameters of Aluminum Foam Sandwich Panels under Low-Velocity Impact. *Iranian Journal of Science and Technology - Trans Mechanical Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s40997-021-00441-5>, 2021.
- [10] Gning BP., Tarfaoui M., Collombet F., Riou L., Davies P., Damage development in thick composite tubes under impact loading and influence on implosion pressure: experimental observations. *Composites: Part B*, Vol. 36, pp. 306-318, 2005.
- [11] Hawa A., Abdul Majid MS., Afendi M., Marzuki HFA., Amin NAM., Mat F., Gibson AG., Burst strength and impact behaviour of hydrothermally aged glass fibre/epoxy composite pipes. *Materials Design*, Vol. 89, pp. 455-464, 2015.
- [12] VijayaRajan V., Muruganandhan R., Impact Analysis of Carbon/Glass/Epoxy Hybrid Composite Pipes. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, Vol. 8, pp.6002-6006, 2019.
- [13] Shariyat M., Jahanigiri M., Asgari M., Numerical low-velocity impact and structural damping analysis of a rectangular poroelastic plate. *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, Vol. 49(4), pp. 115-124, 2018.
- [14] Davar A., Labbafian A., Heydari M., Eskandari J., New Contact Force Estimation Procedures with Application to Low-Velocity Impact on Fiber Metal Laminate (FML) Plates. *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, Vol. 51(4), pp. 463-472, 2021.
- [15] Alavi Nia A., Rahmani R., Experimental and Numerical Investigations of Mechanical Behavior of EVA Foam-filled
- [16] Cylindrical Sandwich Structures Subjected to Axial Quasi-static and Impact Loading. *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, Vol. 49(2), pp. 169-178, 2018.
- [17] ASTM D2444. Standard Test Method for Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a Tup (Falling Weight), 1999.
- [18] ASTM D618. Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing, 2008.
- اثر معناداری دارد. در مقابل نوع رزین لوله روی زمان برخورد ضربه زننده و بیشینه نیروی برخورد تاثیر معناداری ندارد.
- 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) ماده نیز کاهش پیدا میکند و لذا استحکام در برابر ضربه کاهش می یابد.
 - بهترین عملکرد جذب انرژی ضربه مربوط به لوله ساخته شده با رزین اپوکسی می باشد. از طرفی لوله در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس بیشترین و در دمای محیطی ۱۵- درجه سلسیوس کمترین جذب انرژی ضربه را داشته است.
 - مدل پیش بینی رفتار لوله بر حسب متغیرهای مستقل برای هر نوع رزین، با میانگین خطای ۵/۳۷٪ نسبت به نتایج آزمایشهای تجربی، دارای دقت و قابلیت اطمینان بسیار خوبی بوده که با صرفه جویی در زمان و هزینه و بدون نیاز به انجام آزمایش با دقت بسیار بالا قابل استفاده خواهد بود.
 - با رسم نمودارهای اثر متقابل متغیرهای مستقل روی هریک از متغیرهای وابسته مشخص گردید که انرژی ضربه بیشترین تاثیر بر بیشینه نیروی برخورد، و دمای کارکرد بیشترین تاثیر را روی زمان برخورد و انرژی جذب شده، داشته است.

۸- مراجع

- [1] Suji D., Adesina A., Mirdula R., Optimization of self-compacting composite composition using Taguchi-Grey relational analysis. *Materialia*, Vol. 15, pp.1-7, 2021.
- [2] Kam M., Ipekci A., Sengul O., Taguchi optimization of fused deposition modeling process parameters on mechanical characteristics of PLA + filament material. *Scientia Iranica B*, Vol. 29, pp.78-89, 2022.
- [3] Singh T., Chauhan R., Patnaik A., Gangil B., Nain R., Kumar A., Parametric Study and optimization of Multiwalled Carbon Nanotube Filled Friction Composite Materials Using Taguchi Method. *Polymer Composites*, Vol. 39, pp. 1109-1117, 2017.
- [4] Dai G., Zhan L., Guan C., Huang M., Optimization of molding process parameters for CF/PEEK composites based on Taguchi method. *Composites and Advanced Materials*, Vol. 30, pp.1-8, 2021.
- [5] Dontsov YV., Panin SV., Buslovich DG., Berto F., Taguchi Optimization of Parameters for Feedstock Fabrication and FDM Manufacturing of Wear-Resistant UHMWPE-Based Composites. *Materials*, Vol. 13, pp. 2718, 2020.
- [6] Küçük O., Elfarah TT., Islak S., Özorak C., Optimization by Using Taguchi Method of the Production of Magnesium-Matrix Carbide Reinforced Composites by Powder Metallurgy Method. *Metals*, Vol. 7, pp. 352, 2017.
- [7] Dennison MS., Rajasekaran R., An application of Taguchi method for fabrication factors optimisation of banyan aerial root fibre reinforced polymer composite. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, DOI: 10.1080/14484846.2020.1832728, 2020.