



بررسی تجربی خواص ضربه ای چند لایه ای های فلز - الیاف

مجتبی صدیقی*، سهیل داریوشی

تهران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۵۹۱۶/۳۴۳۱۱

دریافت: ۸۶/۱۲/۱۳، پذیرش: ۸۷/۶/۱۱

چکیده

امروزه کامپوزیت های لایه ای فلز - الیاف به واسطه دارا بودن خواص مکانیکی خوب و وزن کم بسیار مورد توجه طراحان، به ویژه در صنایع هوا فضا، قرار گرفته اند. در پژوهش حاضر، نمونه های کامپوزیتی آلومینیم - شیشه به روش لایه گذاری دستی ساخته شد و اثر تغییر زاویه الیاف، چگونگی لایه گذاری و مقاومت به ضربه آنها به طور عملی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه ها طبق استاندارد ASTM D256-93a ویزه پلاستیک ها و استاندارد ASTM E23-01، که برای فلزات است، در دو اندازه کوچک و بزرگ تهیه و در دو دستگاه آزمون ضربه با ظرفیت انرژی کم و زیاد آزمایش شدند. نتایج حاصل از آزمون ضربه چارپی نشان می دهد که وجود لایه کامپوزیتی با زاویه الیاف صفر درجه خواص ضربه ای را به شدت بهبود می بخشد، از سوی دیگر، محل قرارگیری لایه ها نیز بسیار مهم است. دریا جنس لایه ها نیز می توان گفت، وجود لایه های آلومینیمی بیش از لایه های کامپوزیتی خواص مکانیکی را بهبود می بخشد و نیز مقدار جذب انرژی نمونه ها در دستگاه با ظرفیت انرژی زیاد، بیشتر از مقدار انرژی جذب شده در دستگاه با ظرفیت انرژی کم است.

واژه های کلیدی

چندلایه ای فلز - الیاف، ضربه،
زاویه الیاف، الیاف شیشه،
لایه گذاری

*مسئول مکاتبات، پیام نگار:

mojtaba@aut.ac.ir

An Experimental Study on Impact Behavior of Fiber/Metal Laminates

M. Sadighi* and S. Darushi

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15916/34311,
Tehran, Iran

Received 3 March 2008; accepted 1 September 2008

Abstract

During the last decades a new class of materials named fiber/metal laminates (FMLs) was introduced. It is a hybrid composite consisting of alternating thin layers of metal sheets and fiber-reinforced composite material. FMLs have both low weight and good mechanical properties. In this study, the impact behavior of this attractive material is investigated. The effect of fiber angle, stacking sequence and capacity of test apparatus were examined. In addition specimens have been prepared in two sizes according to two standards of ASTM D256-93a for plastics and then ASTM E23-01 for metals. Test results show that suitable layering, using more aluminum layers and fiber sheets with zero angle in laminates improve the impact strength. The amount of energy absorption in heavy apparatus is higher than the light apparatus.

Key Words

fiber-metal laminates, impact,
fiber angle, glass fiber,
stacking sequence

(* To whom correspondence should
be addressed.

E-mail: mojtaba@aut.ac.ir

مقدمه

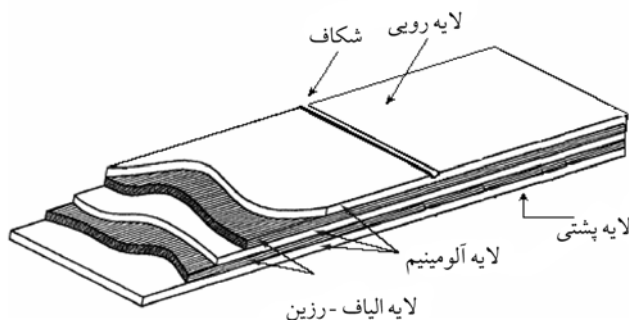
امروزه، کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز - الیاف در کاربردهای متفاوت و زیادی استفاده می‌شوند، از آن جمله می‌توان به کاربرد آنها در سازه بال‌ها، بدنه و محافظ‌های سفینه‌ها اشاره کرد [۱۴-۱۲].

کامپوزیت‌های GLARE را می‌توان متناسب با کاربرد، با خواص متفاوت ساخت. با ایجاد تغییر در سامانه الیاف - رزین، نوع ورق‌های آلومینیم و ضخامت آنها، زاویه الیاف، چگونگی لایه‌گذاری و نحوه پیش‌آماده‌سازی سطح ورق‌ها، می‌توان هر یک از خواص مورد نیاز را بهبود بخشید [۱۰].

خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز - الیاف در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در مراکز پژوهشی، دانشگاه‌ها و صنایع هوافضا بررسی شده است. آزمون کشش، فشار، برش و ضربه اصلی‌ترین آزمون‌های مورد استفاده برای مشخص کردن خواص مکانیکی این نوع کامپوزیت‌ها هستند [۲۰-۱۵].

نتایج کار پژوهشگران روی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف شیشه - آلومینیم نشان می‌دهد، در حالی که مقاومت به ضربه لایه‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه به طور قابل ملاحظه‌ای از آلومینیم هم کمتر است، ولی مقاومت به ضربه و مقاومت به رشد خرابی در کامپوزیت لایه‌ای الیاف شیشه - آلومینیم از آلومینیم بهتر است [۱۶-۱۴].

Wu و همکاران [۱۷] اثر ضربه کم سرعت و مقاومت به رشد تخریب در چندلایه‌های GLARE را بررسی کرده و نشان داده‌اند که برای این کامپوزیت‌ها در ضربه‌های کم سرعت، هنگامی که فرورفتگی ایجاد نشود، جدایش لایه‌ها هم رخ نمی‌دهد. در مواردی هم که فرورفتگی ایجاد می‌شود، اندازه جدایش معمولاً کوتاه‌تر از ابعاد فرورفتگی است. بنابر این، حتی پس از ضربه، این مواد استحکام باقی مانده زیادی دارند. Vlot و همکاران [۱۳] رفتار آلومینیم، کامپوزیت‌های الیاف شیشه و رزین اپوکسی، الیاف کربن و رزین اپوکسی و کامپوزیت‌های چند لایه



شکل ۱ - ترتیب قرارگیری لایه‌های کامپوزیت لایه‌ای فلز - الیاف (لایه چینی ۳/۲).

مواد کامپوزیتی در دهه‌های اخیر به منظور ساخت سازه‌هایی با قابلیت‌های ویژه، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. صنایع نظامی اولین مکان‌هایی بودند که پس از جنگ جهانی دوم، کامپوزیت‌ها را در ساخت هواپیماها و سایر سازه‌های هوافضا مورد استفاده قرار دادند. نوآوری‌هایی که در زمینه کامپوزیت‌ها رخ داده به طراحان این امکان را داده است که سازه‌هایی با وزن بسیار کمتر و مقاومت بیشتر طراحی کنند. کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزات خواص بسیار خوبی نشان می‌دهند، به ویژه زمانی که نسبت مقاومت به وزن زیاد، مقاومت در برابر خستگی و ضربه یا خوردگی اهمیت پیدا می‌کند [۷-۱].

پیش‌رفت‌هایی که در زمینه تقویت الیاف پیوسته ایجاد شده باعث ساخت الیاف مختلف با خواص مکانیکی خوب شده است. این نوآوری زمینه را برای ساخت نسل جدیدی از کامپوزیت‌ها با نام کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز - الیاف مهیا کرده است. این کامپوزیت‌ها متشکل از لایه‌های نازک فلز هستند که در میان آنها الیاف با جنس مختلف، قرار می‌گیرند و به وسیله رزین به هم متصل می‌شوند [۱۰-۸].

در سال ۱۹۸۲ اولین محصول از چند لایه‌های فلز - الیاف با نام تجاری ARALL (aramid reinforced aluminum laminates) توسط ALCOA به بازار عرضه شد. این کامپوزیت متشکل از لایه‌های آلومینیم بود که در بین آنها الیاف آرامید قرار داشت. یکی از محصولات بسیار موفق در این زمینه که در دانشگاه Delf در هلند ساخته شد، نوعی کامپوزیت لایه‌ای فلز - الیاف بود که از ورق‌های آلومینیم 7475-T761 و الیاف آرامید تشکیل می‌شد و به وسیله چسب اپوکسی به هم متصل شده بودند. لایه‌های فلزی به کار رفته در این دسته از کامپوزیت‌ها خواص ضربه‌ای کامپوزیت را بسیار بهتر می‌کنند. در سال ۱۹۸۷ ثبت اختراعی در زمینه کامپوزیت GLARE (glass reinforced aluminum laminates) توسط AKZO به ثبت رسید. در سال ۱۹۹۱، AKZO و ALCOA همکاری خود را به منظور تجاری سازی تولید GLARE آغاز کردند [۱۲-۱۰].

در ساخت کامپوزیت‌های GLARE با تغییر زاویه الیاف در هر یک از لایه‌های موجود در بین ورق‌های آلومینیم می‌توان نوع متفاوتی از GLARE را تولید کرد (شکل ۱).

مطالعات انجام شده در زمینه کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز - الیاف نشان داده است که قیمت یک کیلوگرم آنها ۵ تا ۱۰ برابر قیمت یک کیلوگرم آلومینیم مورد استفاده در صنایع هواپیماسازی است، اما استفاده از این کامپوزیت‌ها حداقل ۲۰ درصد وزن سازه را سبک‌تر می‌کند. بنابر محاسبات سازندگان هواپیما جای‌گزینی آلومینیم با کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز - الیاف به واسطه خواص مکانیکی عالی آنها سودمند است [۱۰].

رزین اپوکسی EP-1 بود. اپوکسی مورد استفاده با چگالی $1.2-1.1 \text{ g/cm}^3$ و گرانی $1200-1000 \text{ MPas}$ از شرکت Huntsman تهیه شد و سپس با نسبت ۱:۱۰ با سخت کننده مخلوط و به مدت ۲۴ h در دمای محیط و زیر فشار 0.38 MPa پخت شد. الیاف شیشه مورد استفاده از جنس E-Glass تک جهتی با مدول کشسان 86 GPa و مدول برشی $32/6 \text{ GPa}$ بود.

دستگاه‌ها و روش‌ها

سطوح ورق‌های آلومینیم با چربی زدایی اولیه، ایجاد خراش به وسیله سمباده نرم و سپس پاک کردن با حلالی قوی مثل استون آماده شد. استفاده از روش‌های آماده‌سازی سطح قدرت اتصال بین لایه فلز و رزین را به شدت افزایش می‌دهد.

نمونه‌ها به روش لایه‌گذاری دستی در گروه ۱ و ۲ ساخته شدند. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که درصد حجمی الیاف به دست آمده به طور میانگین ۵۶ درصد است. نمونه‌های گروه ۱ از سه لایه آلومینیم ساخته شدند که دو لایه کامپوزیت شیشه - اپوکسی بین آنها قرار داشت و نمونه‌های گروه ۲ از دو لایه آلومینیم ساخته شدند که در میان لایه‌های کامپوزیت شیشه - اپوکسی قرار گرفته بودند.

به منظور طراحی آزمایش برای نمونه‌های گروه ۱ از نرم افزار Statgraphics Plus 2.1 استفاده شد. مدل مورد استفاده پاسخ سطح (surface response) بود و طراحی با دو متغیر و در سه سطح انجام شد [۱۹]. متغیرهای مورد بررسی زوایای الیاف در دو لایه کامپوزیت شیشه - اپوکسی بود و حد پایین برای هر دو متغیر ۰ درجه و حد بالا ۹۰ درجه معین شد. علاوه بر این، توزیع آزمایش‌ها به شکل تصادفی بود تا از اثر عوامل محیطی بر نتایج حاصل اجتناب شود.

طبق طراحی آزمایش انجام گرفته، نمونه‌های گروه ۱ در ۹ نوع با زوایای الیاف متفاوت ساخته شد تا بررسی دقیقی روی اثر زاویه الیاف بر خواص ضربه‌ای این دسته از کامپوزیت‌ها انجام شود. لازم به ذکر است که در این مطالعه بررسی روی خواص نمونه‌های گروه ۱ متمرکز شده و تنها دو نمونه از گروه ۲ به منظور مقایسه، بررسی می‌شود. نام‌گذاری، نحوه لایه‌گذاری و زاویه الیاف هر نمونه، در جدول ۱ آمده است.

به منظور بررسی هر چه دقیق‌تر، از آن‌جا که استاندارد ویژه و مجزایی برای کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز - الیاف وجود ندارد و این نوع کامپوزیت‌ها را بر اساس بعضی خواص می‌توان به فلزات و بر اساس برخی دیگر به کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه دانست، نمونه‌ها در دو اندازه کوچک و بزرگ آماده شدند. نمونه‌های بلند طبق استاندارد ASTM D256-93a ویژه پلاستیک‌ها تهیه شدند و دارای ابعاد $127 \times 127 \text{ mm}$ بودند (شکل ۲) و نمونه‌های کوچک طبق استاندارد ASTM E23-01 ویژه فلزات آماده شدند که ابعاد آنها $55 \times 10 \text{ mm}$ بود (شکل ۳).

GLARE، ARALL و CARL (carbon reinforced laminates) را زیر بارگذاری‌های کششی، فشاری و ضربه کم سرعت و پرسرعت بررسی کرده‌اند.

Cantwell و Abdullah [۱۸] کامپوزیت‌های متشکل از الیاف بافته شده شیشه و رزین پلی پروپیلن و ورق آلومینیم را زیر ضربه پرسرعت بررسی کردند. با استفاده از نتایج آزمایش و روش تحلیلی نشان داده شده است، که مقاومت به سوراخ‌شدگی و انرژی لازم برای عبور ضربه زننده چند برابر آلومینیم است.

کامپوزیت‌های GLARE دارای مجموعه خواص منحصر به فردی هستند که از آن جمله می‌توان به مقاومت خستگی خوب، خواص استاتیک ویژه، مقاومت ضربه عالی، مقاومت پس ماند و حساسیت به ترک خوب و مقاومت در برابر آتش و خوردگی بسیار زیاد را نام برد [۱۸-۱۲]. در این مقاله اثر پارامترهای مختلف مثل زاویه الیاف، تعداد لایه‌ها از هر جنس و اندازه نمونه، روی خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف شیشه - آلومینیم به طور عملی مورد بررسی قرار گرفت. شرایط آزمایش‌ها به کمک نرم افزار آماری طراحی شد و ۹ دسته نمونه با زاویه الیاف متفاوت از هم که ترکیبی از زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه بود مطابق با استانداردهای موجود ساخته و آماده شد. به منظور بررسی اثر جنس لایه‌ها نیز ۴ مجموعه نمونه تهیه شد که دو به دو زوایای الیاف یکسان ولی لایه‌گذاری متفاوت داشتند. در مجموعه اول این نمونه‌ها سه لایه آلومینیم و دو لایه کامپوزیت شیشه - اپوکسی و در مجموعه دوم، سه لایه کامپوزیت شیشه - اپوکسی، که دو لایه آلومینیم در بین آنها بود، در کنار هم قرار گرفتند. کلیه نمونه‌ها در دو اندازه کوچک (طبق استاندارد فلز) و بزرگ (طبق استاندارد پلاستیک) ساخته شدند و اثر انتخاب نوع استاندارد بر نتایج آزمون ضربه کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف - فلز مورد بررسی قرار گرفت. برای این دسته از کامپوزیت‌ها که خواص فلز و خواص کامپوزیت‌های الیافی را یک جا دارند، هنوز استاندارد ویژه‌ای تدوین نشده است. بدین ترتیب، تعداد زیادی از عوامل اثر گذار بررسی شد که بر اساس اطلاعات مؤلفان تا کنون چنین بررسی جامعی توسط سایر پژوهشگران انجام نشده است.

تجربی

مواد

مواد مصرفی برای ساخت کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز - الیاف GLARE، ورق آلومینیم 1050 AA به ضخامت 0.5 mm ، الیاف شیشه تک جهتی و

جدول ۱ - مشخصات مواد مورد استفاده.

کد نمونه	گروه	زاویه الیاف	ترتیب لایه‌ها	نمای کلی لایه‌های اپوکسی - شیشه
A	۲و۱	۰-۰	Al/GE/Al/GE/Al	
B	۱	۹۰-۹۰	Al/GE/Al/GE/Al	
C	۱	۰-۹۰	Al/GE/Al/GE/Al	
D	۱	۹۰-۰	Al/GE/Al/GE/Al	
E	۱	۴۵-۴۵	Al/GE/Al/GE/Al	
F	۱	۰-۴۵	Al/GE/Al/GE/Al	
G	۱	۴۵-۰	Al/GE/Al/GE/Al	
H	۱	۹۰-۴۵	Al/GE/Al/GE/Al	
I	۱	۴۵-۹۰	Al/GE/Al/GE/Al	
J	۲	۰-۰-۰	Al/GE/Al/GE/Al	
K	۲	۹۰-۹۰-۹۰	Al/GE/Al/GE/Al	



شکل ۳ - نمونه‌های کوتاه آزمون ضربه پیش از انجام آزمایش.

ضربه نمونه‌های کوتاه در این دو دستگاه آمده است. همان‌طور که از شکل پیداست، مقدار جذب انرژی نمونه‌ها در دستگاه سنگین ۱۵۰ J بیشتر از جذب انرژی در دستگاه سبک ۶ J است، چون در دستگاه سنگین تعداد لایه‌های بیشتری به مرحله شکست می‌رسند و مقدار

جدول ۲ - مقدار انرژی جذب شده در آزمون ضربه برای هر نمونه.

نمونه بلند (kJ/m^2)		نمونه کوتاه (kJ/m^2)		کد نمونه
دستگاه ۶ J	دستگاه ۱۵۰ J	دستگاه ۱۵۰ J	دستگاه ۶ J	
۹/۸۶	۲۷۵	۱۸۷	۸۹	A
۳۲	۳۲	۲۹	۳۲	B
۸۷/۸	۲۱۲	۷۹/۳	۷۵	C
۱۱۴	۲۲۵	۱۰۸	۸۸	D
۷۴/۸	۱۳۶	۸۲/۲	۷۴	E
۱۰۳	۱۷۰	۱۰۹	۸۰	F
۱۳۵	۳۲۴	۱۹۱	۸۲	G
۴۴	۴۴	۴۶	۴۲	H
۸۹/۸	۲۲۰	۷۶/۶	۷۰	I
۶۳/۹	۲۰۰/۶	۱۵۷	۶۷	J
۴۲/۸	۴۱/۸	۲۷۶	۴۲	K

دو دستگاه آزمون ضربه متفاوت به کار گرفته شد. دستگاه سنگین Denison با ظرفیت ۱۵۰ J و دستگاه سبک Ueshima که ظرفیت آن ۶ J بود (شکل ۴).

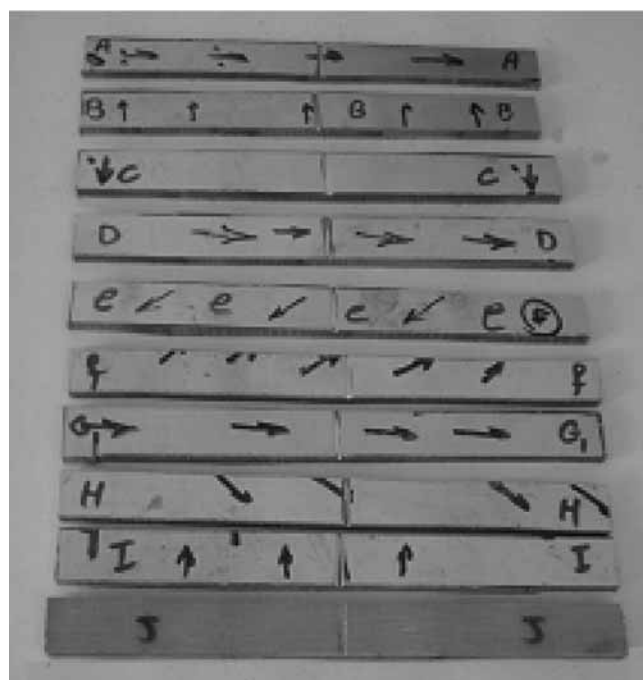
نتایج و بحث

نتایج حاصل نشان می‌دهد که جذب انرژی نمونه‌ها در دستگاه‌های مختلف، به دلیل تغییر شیوه شکست و تعداد لایه‌های شکسته شده متفاوت است. ولی، روند کاهش یا افزایش برای هر نوع نمونه در هر دستگاه یکسان است. نتایج هر آزمایش در جدول ۲ آمده و سپس با رسم نمودارهای مقایسه‌ای بحث و بررسی شده است.

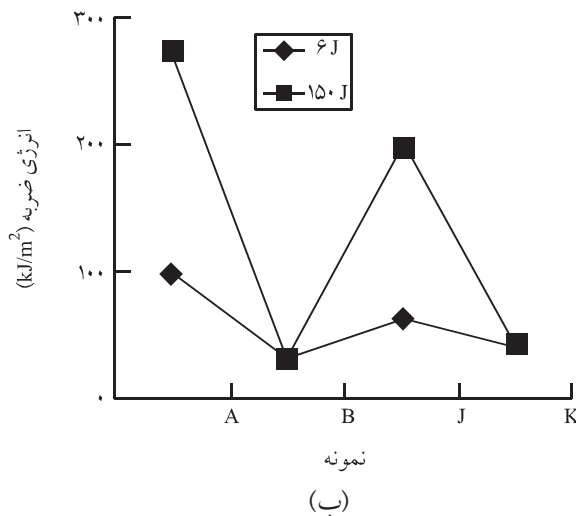
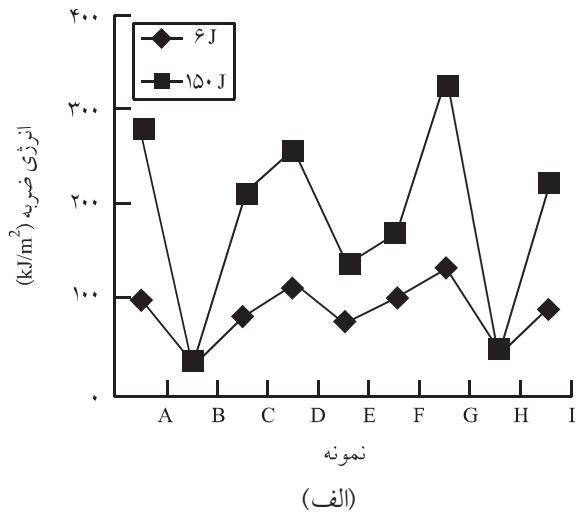
در این بخش مجموعه‌ای از نمودارها برای مقایسه نمونه‌های A تا I که زاویه الیاف مختلف دارند و مجموعه دیگر برای مقایسه نمونه‌های A و B با J و K که دو به دو زاویه الیاف یکسان و تعداد لایه‌های متفاوت دارند، اختصاص داده شده است.

بررسی اثر نوع دستگاه بر نتایج حاصل از آزمون ضربه

در شکل ۵ الف و ب به ترتیب نتایج حاصل از آزمون ضربه نمونه‌های بلند گروه ۱ و ۲ که در دو دستگاه ۱۵۰ J و ۶ J مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، با هم مقایسه شده است. در شکل ۶ الف و ب نیز نتایج حاصل از آزمون



شکل ۲ - نمونه‌های بلند آزمون ضربه پیش از انجام آزمایش.



شکل ۵- بررسی اثر نوع دستگاه بر نتایج نمونه‌های بلند: (الف) گروه ۱ و (ب) گروه ۲.

و هر دو، یک عدد را نشان دادند، روند کاهشی یا افزایشی که در بین نمونه‌ها وجود دارد کاملاً یکسان است و این مسئله نشان می‌دهد که برای مقایسه مقاومت به ضربه نمونه‌ها، می‌توان به هر دو نتیجه استناد کرد و نوع دستگاه (سبک یا سنگین) تفاوتی در روند نتایج ایجاد نمی‌کند و می‌توان از هر یک از دستگاه‌ها که دسترسی به آن ساده‌تر است، استفاده کرد. آنچه ذکر شد برای نمونه‌های بلند و کوتاه صحیح است، البته در نمونه‌های کوتاه به دلیل کمتر بودن انرژی جذب شده و شبیه بودن شیوه‌های شکست، نتایج به هم نزدیک‌تر هستند. به طوری که علاوه بر B و H نمونه‌های C، E و I نیز انرژی جذب شده یکسانی در هر دو دستگاه دارند.



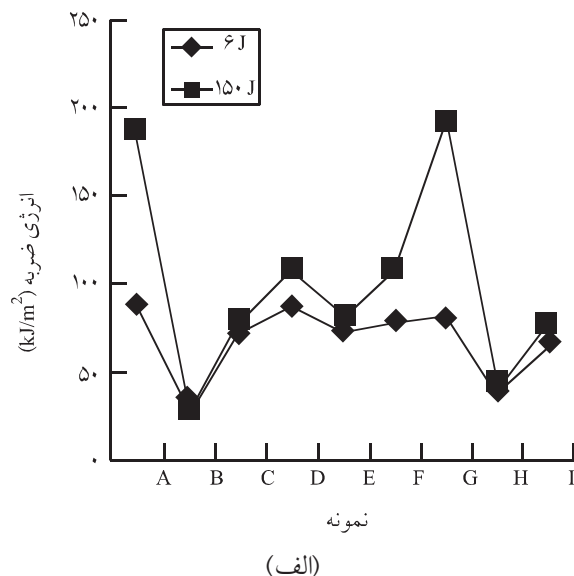
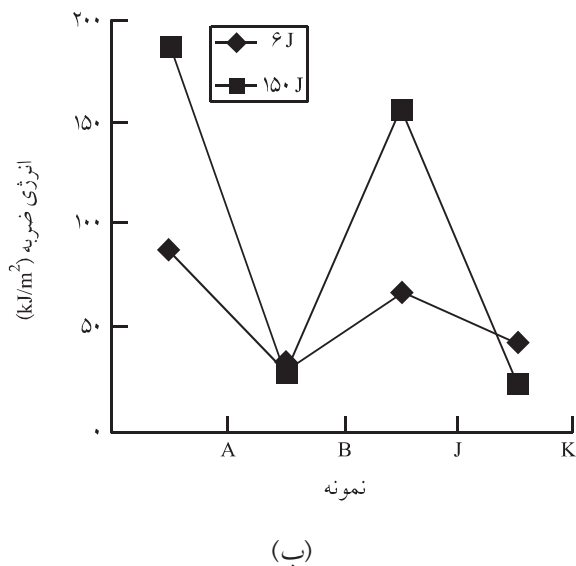
(الف)



(ب)

شکل ۴- دستگاه آزمون ضربه: (الف) ۱۵۰ J و (ب) ۶ J.

جدایش لایه‌ها نیز بیشتر است. جز در نمونه‌های B و H در گروه ۱ و نمونه‌های B و K در گروه ۲، که به دلیل کم بودن انرژی جذب شده به وسیله این نمونه‌ها، هر دو دستگاه قادر به تخریب یکسان نمونه‌ها شدند



شکل ۶- بررسی اثر نوع دستگاه بر نتایج نمونه های کوتاه: (الف) گروه ۱ و (ب) گروه ۲.

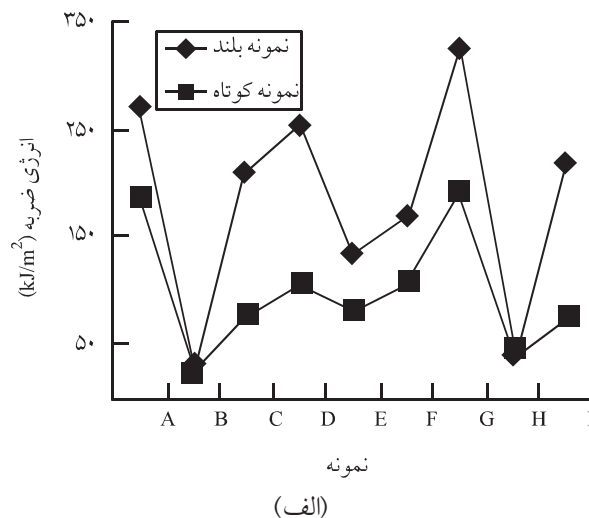
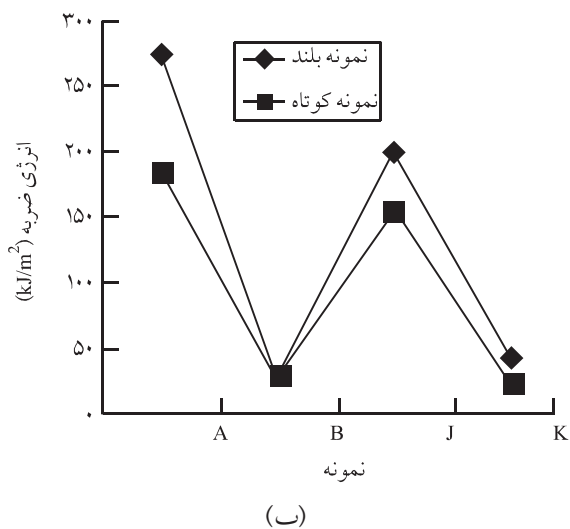
نتایج تقریباً یکسانی را نشان می دهند. پس چنان چه هدف، مقایسه انرژی جذب شده به وسیله نمونه باشد، می توان از نمونه ای که ساخت آن ساده تر و کم هزینه تر است (معمولاً نمونه های کوتاه تر) استفاده کرد.

Morton [۲۰] نیز با بررسی آثار اندازه نمونه و اندازه نیروی ضربه زننده بر مقاومت به ضربه کامپوزیت های لایه ای، چند ضربه تصحیح برای ایجاد توافق بین قوانین اثر اندازه و نتایج تجربی ارائه داد. هم چنین، او دریافت که نمونه های کوچک تر همیشه مقاومت به ضربه بیشتری از

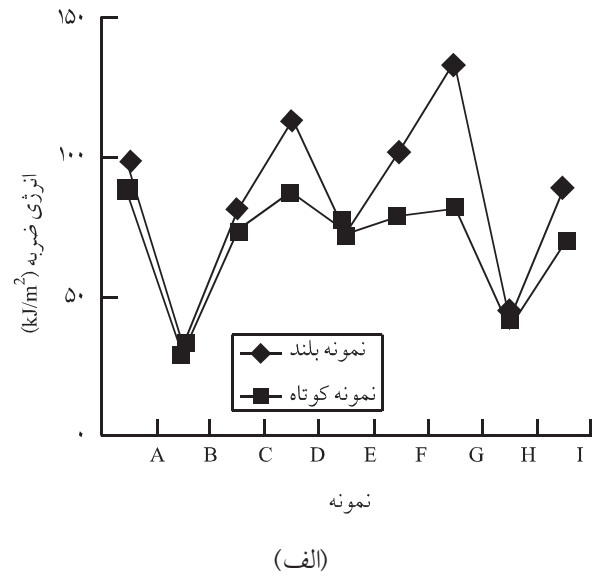
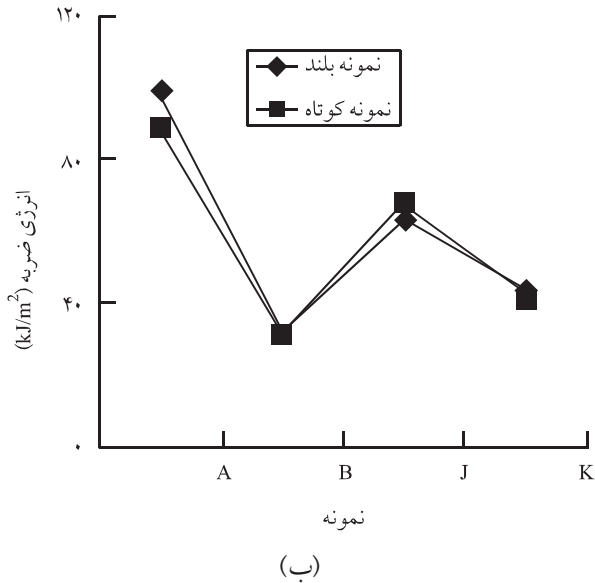
بررسی اثر اندازه نمونه بر نتایج حاصل از آزمون ضربه

در شکل های ۷ و ۸ به ترتیب نتایج حاصل از مقایسه نمونه های بلند و کوتاه گروه ۱ و ۲ آمده است که جداگانه در دستگاه های ۱۵۰ J (شکل ۷ الف و ب) و ۶ J (شکل ۸ الف و ب) آزمایش شدند. در هر دو دستگاه نمونه های بلند جذب انرژی بیشتری داشته اند، ولی روند افزایش و کاهش جذب انرژی کاملاً یکسان است.

در دستگاه ۶ J تفاوت انرژی جذب شده بین نمونه های کوتاه و بلند کمتر از دستگاه ۱۵۰ J است، به طوری که نمونه های A، B، C، E و H



شکل ۷- بررسی اثر اندازه نمونه بر نتایج در دستگاه ۱۵۰ J: (الف) گروه ۱ و (ب) گروه ۲.



شکل ۸- بررسی اثر اندازه نمونه بر نتایج در دستگاه J: ۶ (الف) گروه ۱ و (ب) گروه ۲.

آلومینیم شکسته شده که در جدول‌های ۳ و ۴ ذکر شده‌اند. Qian و همکاران [۲۱] نیز اثر اندازه را بر خواص ضربه‌ای بررسی کردند و دریافتند که اندازه نمونه‌ها اثر زیادی بر مقاومت به لایه لایه شدن آنها دارد. در این پژوهش نیز داده‌های تجربی موجود در جدول‌های ۳ و ۴ نتایج مشابهی را نشان می‌دهد.

نمونه‌های بزرگ‌تر دارند. در پژوهش حاضر نیز نتیجه گفته شده تأیید شد. مقدار جذب انرژی تابع پارامترهای بسیاری است. برای هر نمونه مقدار اهمیت و نحوه دخالت هر پارامتر بررسی شده و توضیح داده می‌شود. چهار پارامتر مهم که در تمام نمونه‌ها لازم است، بررسی شوند شامل فاصله جدایش لایه‌ها، زاویه خم شدگی و تعداد لایه‌های شیشه و

جدول ۳- بررسی پارامترهای مختلف برای نمونه‌های کوتاه شکسته شده در دستگاه‌های ۶ و J: ۱۵۰.

کد نمونه	تعداد لایه‌های آلومینیم شکسته شده		تعداد لایه‌های GE شکسته شده		زاویه خم شدگی (°)		فاصله جدایش لایه‌ها (mm)	
	۱۵۰ J	۶ J	۱۵۰ J	۶ J	۱۵۰ J	۶ J	۱۵۰ J	۶ J
A	۱	۱	۱	۱	۷۲	۴۷	۲۳	۳۰
B	۲	۲	۲	۲	۱۰۳	۱۰۳	۹	۷
C	۲	۲	۷۵	۷۵	۷۵	۸۰	۱۷	۶
D	۱	۱	۷۵	۷۵	۱۰۲	۹۵	۲۴	۲۶
E	۲	۲	۲	۲	۱۰۵	۱۰۱	۱۵	۲۰
F	۲	۲	۷۵	۷۵	۶۷	۸۳	۲۱	۱۹
G	۱	۱	۱	۱	۹۶	۸۵	۳۷	۳۴
H	۲	۲	۲	۲	۱۰۶	۱۰۵	۱۸	۲۰
I	۲	۲	۷۵	۲	۱۰۱	۱۰۷	۱۰	۹
J	۰	۰	۲	۱	۱۱۳	۴۳	۲۶	۵۲
K	۲	۲	۳	۳	-	*	-	-

* نمونه کاملاً شکسته، زاویه خم شدگی و فاصله جدایش برای آن تعریف نمی‌شود.

جدول ۴ - بررسی پارامترهای مختلف برای نمونه‌های بلند شکسته شده در دستگاه‌های ۶ J و ۱۵۰ J.

فاصله جدایش لایه‌ها (mm)		زاویه خم شدگی (°)		تعداد لایه‌های GE شکسته شده		تعداد لایه‌های آلومینیم شکسته شده		کد نمونه
۱۵۰ J	۶ J	۱۵۰ J	۶ J	۱۵۰ J	۶ J	۱۵۰ J	۶ J	
۶۴	۷	۵۱	۷	۱	۰	۱.۵	۱	A
۲۲	۷۲	۱۲۵	۷۲	۲	۲	۲	۲	B
۵۸	۴۸	۶۲	۴۸	۷۵	۱	۲	۱	C
۷۶	۲۰	۱۲۹	۲۰	۷۵	۱	۱	۱	D
۲۷	۷۱	۱۱۴	۷۱	۲	۱	۲	۱	E
۴۹	۶۱	۷۵	۶۱	۲	۱	۲	۱	F
۳۱	۳۵	۶۰	۳۵	۱	۰	۲	۱	G
۷۴	۶۶	۹۰	۶۶	۲	۲	۲	۲	H
۵۹	۴۶	۶۶	۴۶	۲	۱	۲	۲	I
۰	۰	-	۰	۳	۱	۲	۰	J
-	-	-	*-	۳	۳	۲	۲	K

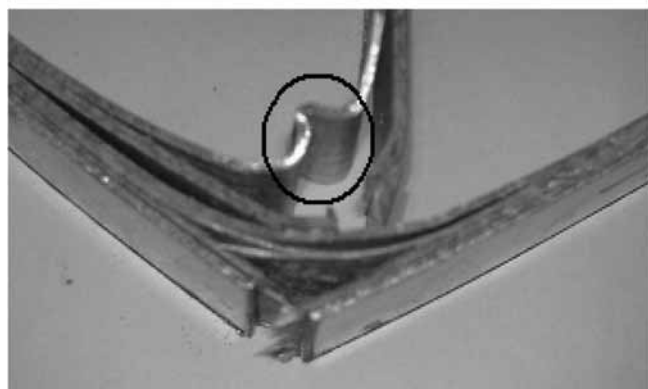
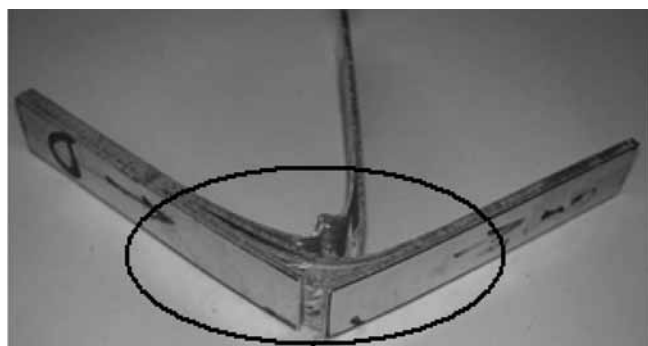
* نمونه کاملاً شکسته، زاویه خم شدگی و فاصله جدایش برای آن تعریف نمی‌شود.

بررسی اثر زاویه الیاف بر نتایج حاصل از آزمون ضربه

لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف صفر درجه مقاومت نمونه را به شدت افزایش می‌دهند، چنان‌چه این لایه در بخش پشتی نمونه قرار گیرد که چکش به طور مستقیم با آن برخورد دارد، مثل نمونه‌های C و F مقاومت خوبی نشان می‌دهد و سالم می‌ماند. افزون بر این، از لایه آلومینیم پشت خود هم محافظت می‌کند و چنان‌چه این لایه در بخش جلویی نمونه قرار گیرد، مثل نمونه‌های D و G موج ضربه را باز می‌گرداند و باعث شکست و جدایش لایه‌ها در بخش پشتی می‌شود، این مسئله را به وضوح در شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان مشاهده کرد.

لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف ۹۰ درجه اگر در جلو نمونه و پشت آن قرار گیرند، باعث شکست سریع لایه‌های دو طرف خود می‌شوند، چون در این لایه‌ها الیاف بار را تحمل نمی‌کنند و کامپوزیت از محل ماتریس بین الیاف می‌شکند (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳).

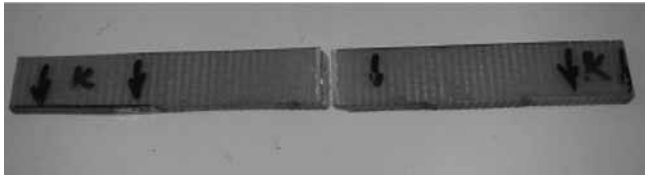
لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف ۴۵ درجه اگر در بخش پشتی نمونه که چکش به طور مستقیم با آن برخورد دارد، قرار گیرند، انرژی



شکل ۱۰ - نمونه بلند D شکسته شده در دستگاه ۱۵۰ J.



شکل ۹ - نمونه بلند D شکسته شده در دستگاه ۶ J.

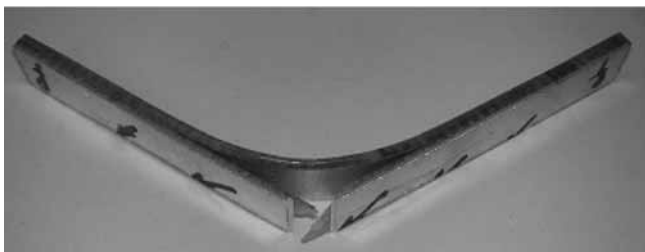


شکل ۱۳ - نمونه بلند K شکسته شده در دستگاه J ۶.

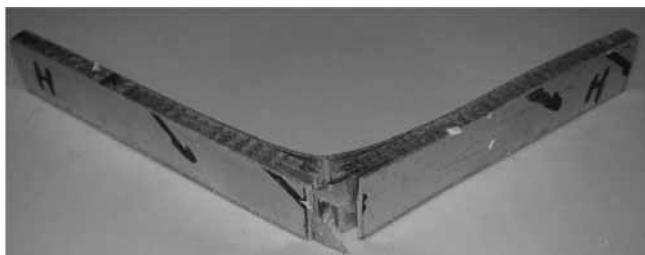
نمی‌کند، پس در مجموع ترکیب لایه‌های (Al/GE45/Al) جذب انرژی متوسطی دارد (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).

چینش لایه‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای هم از اهمیت زیادی برخوردار است. با مقایسه نمونه‌های C، D، F و G و تفاوت نسبتاً زیاد انرژی جذب شده به وسیله آنها این نتیجه حاصل می‌شود که هر چند لایه کامپوزیتی با الیاف صفر درجه به دلیل تحمل بار به وسیله الیاف، مقاومت زیادی دارد. ولی لایه صفر درجه‌ای که در جلوی نمونه قرار می‌گیرد، مقاومت نمونه را به شدت افزایش می‌دهد. مثلاً در نمونه G علت جذب زیاد انرژی را می‌توان به وجود لایه کامپوزیتی با زاویه الیاف صفر درجه در جلو و قرار گرفتن لایه کامپوزیتی با زاویه الیاف ۴۵ درجه در پشت مربوط دانست.

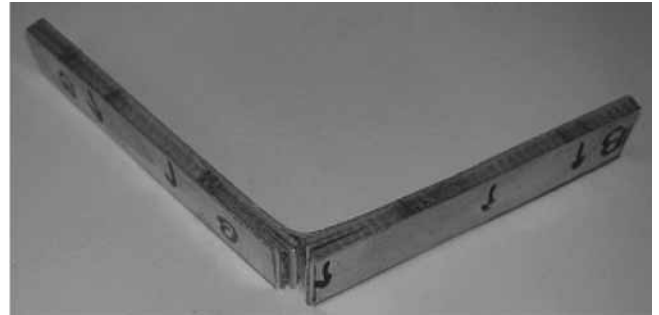
با بررسی نمونه‌های I و H دیده می‌شود که در مقایسه لایه کامپوزیت با الیاف ۹۰ و ۴۵ درجه بهتر است که لایه ۴۵ درجه در پشت قرار گیرد. اهمیت توجه به نحوه قرار گرفتن لایه‌ها از این روست که فرایند ساخت و برش نمونه‌های با زاویه الیاف کامپوزیت یکسان، با هم مشابه است و تنها باید در نصب نمونه‌ها تغییر ایجاد کرد تا مقاومت بیشتری به دست



شکل ۱۴ - نمونه بلند E شکسته شده در دستگاه J ۱۵۰.

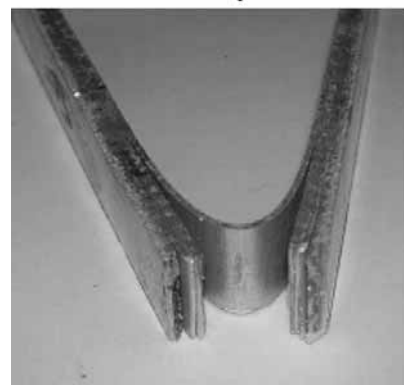
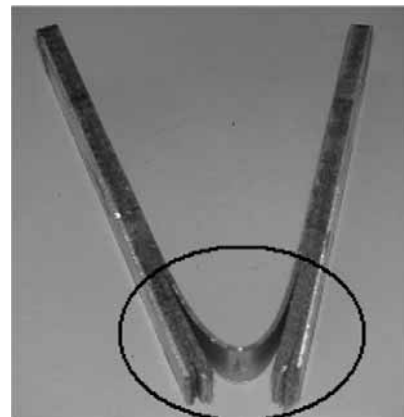


شکل ۱۵ - نمونه بلند H شکسته شده در دستگاه J ۶.

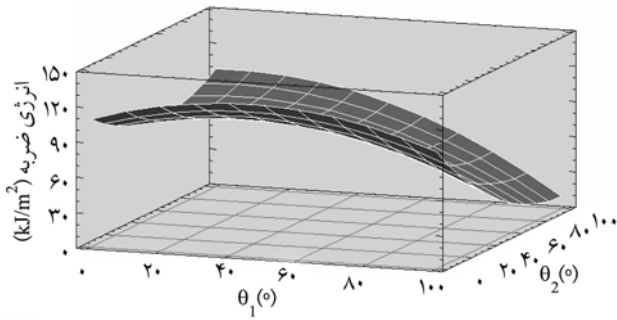


شکل ۱۱ - نمونه بلند B شکسته شده در دستگاه J ۶.

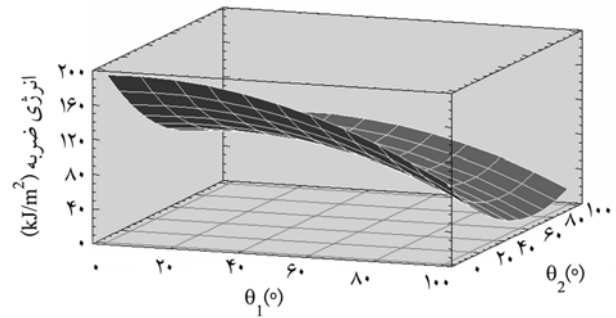
ضربه‌ای جذب شده را افزایش می‌دهند، زیرا نیروی وارد شده باعث شکست کامپوزیت روی خط ۴۵ درجه و موازی الیاف می‌شود و این نوع شکست موجب پاره شدن لایه آلومینیمی جلوی آن می‌شود، یعنی آلومینیم ابتدا دچار کرنش پلاستیک زیادی شده و سپس می‌شکند که این امر باعث جذب انرژی زیادی به وسیله لایه آلومینیمی می‌شود، ولی چون لایه کامپوزیتی با زاویه الیاف ۴۵ درجه از قسمت ماتریس می‌شکند و شکستی در الیاف ایجاد نمی‌شود، انرژی زیادی جذب



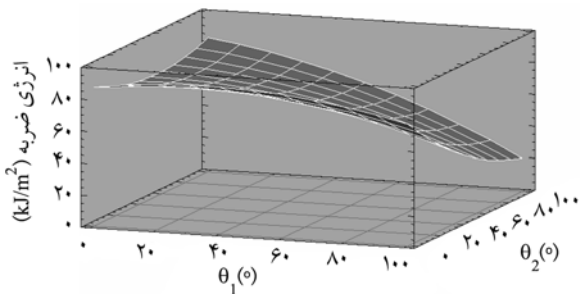
شکل ۱۲ - نمونه بلند شکسته شده B در دستگاه J ۱۵۰.



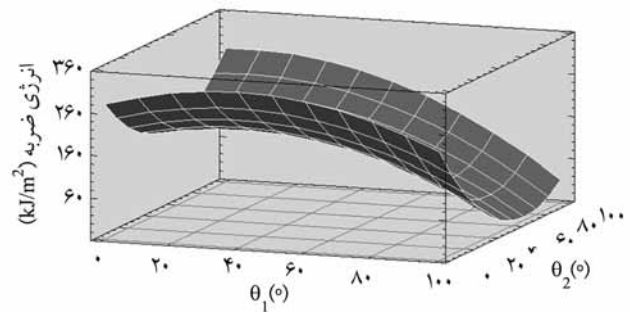
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۶ - نمودارهای سطح پاسخ: (الف) نمونه‌های بلند در دستگاه ۶ J، (ب) نمونه‌های بلند در دستگاه ۱۵۰ J، (ج) نمونه‌های کوتاه در دستگاه ۶ J و (د) نمونه‌های کوتاه در دستگاه ۱۵۰ J.

$$(۲) \quad \begin{aligned} \text{انرژی ضربه} &= ۲۷۸۴ + ۲/۴۲۲(\theta_1) - ۵/۱۴۸(\theta_2) - ۰/۰۳۰۵(\theta_1)^۲ \\ &- ۰/۰۱۹۷(\theta_1\theta_2) + ۰/۰۵۱۰(\theta_2)^۲ \end{aligned}$$

برای نمونه‌های کوتاه آزمایش شده در دستگاه ۶ J:

$$(۳) \quad \begin{aligned} \text{انرژی ضربه} &= ۸۶/۹۴ + ۰/۲۷۰۳(\theta_1) - ۰/۳۹۶۳(\theta_2) \\ &- ۰/۰۰۳۷(\theta_1)^۲ - ۰/۰۰۵۲(\theta_1\theta_2) + ۰/۰۰۳۶(\theta_2)^۲ \end{aligned}$$

برای نمونه‌های کوتاه آزمایش شده در دستگاه ۱۵۰ J:

$$(۴) \quad \begin{aligned} \text{انرژی ضربه} &= ۱۹۳/۴ + ۰/۱۷۹۶(\theta_1) - ۲/۷۳۵(\theta_2) \\ &- ۰/۰۱۱۷(\theta_1)^۲ - ۰/۰۰۳۶(\theta_1\theta_2) + ۰/۰۱۶۲(\theta_2)^۲ \end{aligned}$$

نتیجه‌گیری

در این مقاله نمونه‌هایی از جنس کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز - الیاف با زوایای الیاف متنوع، طبق دو استاندارد فلز و پلاستیک تهیه شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که: - لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف صفر درجه مقاومت به ضربه نمونه

آید. این کار هیچ هزینه اضافی برای ساخت سازه‌ها در بر ندارد، ولی مقاومت را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد.

به منظور نتیجه‌گیری بهتر، تحلیل آماری نتایج به وسیله نرم افزار Statgraphics Plus 2.1 انجام شد و نمودارهای سطح پاسخ برای هر چهار حالت مورد آزمایش (دو اندازه نمونه و دو نوع دستگاه) برای نمونه‌های A تا I بر اساس سطح برآزش شده بر داده‌های تجربی ترسیم شد. این نمودارها سطح انرژی جذب شده بر حسب زوایای لایه رویی ۱ و لایه پشتی ۲ را نشان می‌دهند و با استفاده از آنها می‌توان مقدار انرژی جذب شده برای هر ترکیبی از زوایا را به دست آورد و نیز در این سطح پاسخ بیشینه‌ها نشان دهنده بهترین مجموعه ۱ و ۲ هستند (شکل ۱۶-الف تا ۱۶-د). معادله‌های برآزش سطح برای هر یک از حالت‌های آزمایش در زیر آمده است:

برای نمونه‌های بلند آزمایش شده در دستگاه ۶ J:

$$(۱) \quad \begin{aligned} \text{انرژی ضربه} &= ۱۰۸/۵ + ۰/۹۳۱۵(\theta_1) - ۰/۹۶۸۵(\theta_2) - ۰/۰۱۰۲(\theta_1)^۲ \\ &- ۰/۰۰۸۱(\theta_1\theta_2) + ۰/۰۰۸۸(\theta_2)^۲ \end{aligned}$$

برای نمونه‌های بلند آزمایش شده در دستگاه ۱۵۰ J:

- نمونه‌های کوتاه جذب انرژی کمتری دارند و چنان چه دستگاه آزمون ضربه‌ای که در اختیار است، ظرفیت کمی دارد، بهتر است که نمونه‌ها در اندازه کوتاه و طبق استاندارد فلز تهیه و آزمون شوند.

- روند کاهشی یا افزایشی در جذب انرژی ضربه‌ای که در بین نمونه‌های کوتاه و بلند وجود دارد، کاملاً یکسان است و این مسئله نشان می‌دهد که اگر مقایسه مقاومت به ضربه نمونه‌ها مطرح باشد، می‌توان به هر دو نتیجه استناد کرد و نوع دستگاه (سبک یا سنگین) تفاوتی در روند نتایج ایجاد نمی‌کند و می‌توان از هر یک از دستگاه‌ها که دسترسی به آن ساده‌تر است، استفاده کرد.

را به شدت افزایش می‌دهند.

- لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف ۹۰ درجه نمونه را شکننده‌تر می‌کنند.

- لایه‌های کامپوزیتی با زاویه الیاف ۴۵ درجه، اگر در بخش پشتی نمونه قرار گیرند، انرژی ضربه‌ای جذب شده را افزایش می‌دهند.

- لایه‌گذاری مناسب می‌تواند انرژی جذب شده در ضربه و هم‌چنین مقدار خرابی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد.

- داشتن لایه‌های آلومینیمی بیشتر در مقایسه با لایه‌های کامپوزیتی، مقاومت نمونه را بهبود می‌بخشد.

مراجع

1. Botelho E.C., Almeida R.S., Pardini L.C., and Rezende M.C., Elastic Properties of Hygrothermally Conditioned Glare Laminate, *Int. J. Eng. Sci.*, **45**, 163-172, 2007.
2. Cortes P. and Cantwell W.J., The Prediction of Tensile Failure in Titanium-based Thermoplastic Fibre-Metal Laminates, *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 2306-2316, 2006.
3. Shokrieh M.M., Toozandeh Jani H., and Omid M.J., Considering the Effects of Cross - Section and Fiber Orientation of Composite Tubes under Axial Loading in Energy Absorption, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, **20**, 289-296, 2007.
4. Wu G., Tan Y., and Yang J.M., Evaluation of Residual Strength of Notched Fiber Metal Laminates, *Mater. Sci. Eng. A*, **457**, 338-349, 2007.
5. Langdon G.S., Cantwell W.J., and Nurick G.N., The Blast Response of Novel Thermoplastic-Based Fibre-Metal Laminates - Some Preliminary Results and Observations, *Compos. Sci. Technol.*, **65**, 861-872, 2005.
6. Hessabi Z.R., Majidi B., and Aghazadeh J., Effects of Stacking Sequence on Fracture Mechanisms in Quasi-isotropic Carbon/Epoxy Laminates under Tensile Loading, *Iran. Polym. J.*, **14**, 531-538, 2005.
7. Langdon G.S., Nurick G.N., Lemanski S.L., Simmons M.C., Cantwell W.J., and Schleyer G.K., Failure Characterisation of Blast-loaded Fibre-Metal Laminate Panels Based on Aluminium and Glass-Fibre Reinforced Polypropylene, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 1385-1405, 2007.
8. Kawai M., Hachinohe A., Takumida K., and Kawase Y., Off-axis Fatigue Behaviour and Its Damage Mechanics Modelling for Unidirectional Fibre-Metal Hybrid Composite: GLARE 2, *Composites, Part A*, **32**, 13-19, 2001.
9. Wittenberg T.C., Van Baten T.J., and Boer A., Design of Fiber Metal Laminate Shear Panels for Ultra-High Capacity Aircraft, *Aircraft Design*, **4**, 99-113, 2001.
10. Vlot A. and Gunnink J.W., *Fibre Metal Laminates*, Kluwer Academic, Netherlands, 3-31, 2001.
11. Vogelesang L.B. and Vlot A., Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Structures, *J. Mater. Process. Technol.*, **103**, 1-5, 2000.
12. Van Rooijen R., Sinke J., De Vries T.J., and Van Der Zwaag S., Property Optimization in Fibre Metal Laminates, *Appl. Compos. Mater.*, **11**, 63-76, 2004.
13. Vlot A., Impact Loading on Fibre Metal Laminates, *Int. J. Impact Eng.*, **18**, 291-307, 1996.
14. Botelho E.C., Silva R.A., Pardini L.C., and Rezende M.C., A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/Epoxy/Aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures, *Mater. Res.*, **9**, 247-256, 2006.
15. Volt A., Vogelesang L.B., and Vries T.J.D., Towards Application of Fiber Metal Laminates in Larger Aircraft, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, **71**, 558-570, 1999.
16. Laliberte J.F., Poon C., Straznicki P.V., and Fahr A., Post-impact Fatigue Damage Growth in Fiber-Metal Laminates, *Int. J. Fatigue*, **24**, 249-256, 2002.
17. Wu G., Yang J.M., and Hahn H.T., The Impact Properties and Damage Tolerance and of Bi-directionally Reinforced Fiber Metal Laminates, *J. Mater. Sci.*, **42**, 948-957, 2007.

18. Abdullah M.R. and Cantwell W.J., The Impact Resistance of Polypropylene Based Fiber-Metal Laminates, *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 1682-1693, 2006.
19. Montgomery D.C., *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, New York, Chap. 11, 2000.
20. Morton J., Scaling of Impact-Loaded Carbon-Fiber Composites, *AIAA J.*, **26**, 989-994, 1988.
21. Qian Y., Swanson S.R., Nuismer R.J., and Bucinell R.B., An Experimental Study of Scaling Rules for Impact Damage in Fiber Composites. *J. Compos. Mater.*, **24**, 559-570, 1990.