



بررسی تجربی تأثیر توالی لایه‌چینی بر خواص مکانیکی و رفتار ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا

هادی رزقی ملکی^{1,3*}، بابک عبازاده¹، پویا پرونده^{2,3}

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب

2- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، دانشگاه بناب، بناب

* صندوق پستی 55513-95133، hrezghimaleki@ubonab.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1405/03/19

پذیرش: 1405/06/11

کلیدواژگان:

رفتار مکانیکی،

کامپوزیت‌های هیبریدی،

ضربه سرعت پایین،

توالی لایه‌چینی،

جذب انرژی

چکیده

در این پژوهش، اثر توالی لایه‌چینی بر خواص مکانیکی و رفتار ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های هیبریدی اینگرا/کتان به صورت تجربی بررسی شد. بدین منظور، دو آرایش متقارن $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ به روش لایه‌چینی دستی ساخته و تحت آزمون‌های کشش، خمش و ضربه سرعت پایین قرار گرفتند. آزمون ضربه در سه سطح انرژی 5.64 J، 11.28 J و 22.56 J انجام شد و پاسخ نمونه‌ها با استفاده از منحنی‌های نیرو - زمان، نیرو - جابجایی و انرژی جذب‌شده - زمان ارزیابی گردید. نتایج کشش نشان داد که نمونه $[I_2/F_2]_s$ با استحکام کششی 75 مگاپاسکال و مدول کششی 5.08 گیگاپاسکال عملکرد بهتری نسبت به نمونه $[F_2/I_2]_s$ با استحکام 71 مگاپاسکال و مدول 4.51 گیگاپاسکال دارد. در آزمون خمش استحکام خمشی نمونه $[F_2/I_2]_s$ 128 مگاپاسکال و مدول خمشی 0.095 گیگاپاسکال به دست آمد، در حالی که نمونه $[I_2/F_2]_s$ کرنش خمشی بیشتری (5.75٪) از خود نشان داد. همچنین، نتایج آزمون ضربه نشان داد که قرارگیری الیاف کتان در لایه‌های سطحی موجب افزایش نیروی بیشینه در سطوح انرژی متوسط و بالا شد، در حالی که قرارگیری الیاف اینگرا در لایه‌های بیرونی با ایجاد منحنی‌های نیرو - زمان متقارن‌تر، کاهش تدریجی نیروی تماس و تأخیر در گسترش آسیب‌های داخلی، موجب بهبود عملکرد ضربه‌ای کامپوزیت گردید.

Experimental investigating the effect of stacking sequence on mechanical properties and low-velocity impact behavior of flax/innegra hybrid composites

Hadi Rezghi Maleki^{1,3*}, Babak Abazadeh¹, Pooya Parvande^{2,3}

1- Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

2- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Composite Research Laboratory, University of Bonab, Bonab, Iran

* P.O.B. 55513-95133, Bonab, Iran, hrezghimaleki@ubonab.ac.ir

Keywords

Mechanical behavior, Hybrid composites,
Low-velocity impact, Stacking sequence,
Energy absorption

Abstract

In this study, the effect of stacking sequence on the mechanical properties and low-velocity impact behavior of hybrid Innegra/flax composites was experimentally investigated. Two symmetric stacking sequences, $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$, were fabricated using the hand lay-up technique and subjected to tensile, flexural, and low-velocity impact tests. Low-velocity impact tests were conducted at three impact energy levels of 5.64, 11.28, and 22.56 J. The impact response was evaluated using force-time, force-displacement, and absorbed energy-time curves. The tensile results revealed that the $[I_2/F_2]_s$ laminate exhibited superior mechanical performance, achieving a tensile strength of 75 MPa and a tensile modulus of 5.08 GPa, compared with 71 MPa and 4.51 GPa for the $[F_2/I_2]_s$ laminate. In the flexural test, the $[F_2/I_2]_s$ laminate exhibited a flexural strength of 128 MPa and a flexural modulus of 0.095 GPa, whereas the $[I_2/F_2]_s$ laminate showed a higher flexural strain of 5.75%. Furthermore, the impact results demonstrated that placing flax fibers in the outer layers increased the peak impact force at intermediate and high impact energy levels. In contrast, positioning Innegra fibers in the outer layers produced more symmetric force-time responses, a more gradual reduction in contact force, and delayed the propagation of internal damage, thereby enhancing the overall impact performance of the hybrid composite.

1- مقدمه

کامپوزیت‌ها به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین و پرکاربردترین مواد مهندسی، به دلیل قابلیت طراحی هدفمند خواص و دستیابی هم‌زمان به وزن کم، استحکام بالا و عملکرد مکانیکی مطلوب، نقش مهمی در صنایع هوافضا، خودروسازی، دریایی، انرژی و سازه‌های مهندسی ایفا می‌کنند [1]. این مواد با ترکیب دو یا چند فاز متمایز، امکان بهینه‌سازی خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی، سفتی خمشی، مقاومت به ضربه و ظرفیت جذب انرژی را فراهم می‌سازند؛ به‌گونه‌ای که عملکرد حاصل از آن‌ها فراتر از هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده به‌تنهایی است [2، 3]. در سال‌های اخیر، با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و نیاز به توسعه مواد پایدار، توجه قابل‌توجهی به کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی معطوف شده است. این دسته از کامپوزیت‌ها به دلیل وزن کم، تجدیدپذیری منابع، هزینه تولید پایین‌تر و سازگاری با محیط‌زیست، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی بخشی از کامپوزیت‌های متداول مطرح شده‌اند و پتانسیل بالایی برای کاربرد در صنایع مختلف دارند [4، 5].

باوجود این مزایا، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی با محدودیت‌هایی نظیر استحکام و سفتی کمتر نسبت به الیاف مصنوعی، پراکندگی خواص مکانیکی، حساسیت به رطوبت و رفتار شکست پیچیده مواجه هستند که می‌تواند کاربرد آن‌ها را در شرایط بارگذاری سازه‌ای محدود سازد. در این راستا، توسعه کامپوزیت‌های هیبریدی به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد مکانیکی این مواد موردتوجه قرار گرفته است [6]. کامپوزیت‌های هیبریدی حاصل از ترکیب الیاف طبیعی و الیاف مصنوعی با چقرمگی بالا، رویکردی مؤثر برای دستیابی به تعادل میان خواص مکانیکی، وزن سازه و الزامات زیست‌محیطی ارائه می‌دهند. الیاف اینگرا به‌عنوان یک الیاف پلی‌اولفینی با چگالی بسیار پایین، چقرمگی بالا و قابلیت جذب انرژی مناسب، به دلیل عملکرد مطلوب در برابر بارگذاری‌های ضربه‌ای و دینامیکی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، الیاف کتان به دلیل استحکام و مدول ویژه مناسب، وزن پایین و تجدیدپذیر بودن، گزینه‌ای مناسب برای توسعه کامپوزیت‌های پایدار محسوب می‌شوند. بنابراین، ترکیب این دو الیاف می‌تواند با بهره‌گیری از سفتی و استحکام کتان و قابلیت تغییرشکل و جذب انرژی اینگرا، خواص مکانیکی متعادل‌تری را برای کاربردهای تحت بارگذاری‌های استاتیکی و ضربه‌ای فراهم کند [7-10].

علاوه بر نوع و ترکیب الیاف، رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های چندلایه به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر عامل‌های ساختاری، به‌ویژه آرایش لایه‌چینی قرار دارد. توالی قرارگیری لایه‌ها می‌تواند نحوه انتقال تنش، توزیع کرنش، آغاز و گسترش ترک و در نهایت مکانیزم‌های شکست را کنترل کرده و تأثیر مستقیمی بر خواص کششی، خمشی و مقاومت به ضربه کامپوزیت‌ها داشته باشد. از دیدگاه مهندسی مواد، پاسخ مکانیکی کامپوزیت‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف نتیجه برهم‌کنش پیچیده بین خواص ذاتی الیاف، چسبندگی الیاف - زمینه و معماری لایه‌ای است. آرایش نامناسب لایه‌چینی می‌تواند منجر به تمرکز تنش، جدایش لایه‌ها و شکست زود هنگام شود، درحالی‌که طراحی بهینه توالی لایه‌ها قادر است انتقال تنش مؤثرتر، تأخیر در آغاز ترک و افزایش ظرفیت جذب انرژی را به همراه داشته باشد [11، 12]. ازاین‌رو، بررسی سیستماتیک اثر آرایش لایه‌چینی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی، به‌ویژه در سیستم‌های نوینی مانند اینگرا/کتان، برای توسعه و بهینه‌سازی این مواد در کاربردهای مهندسی امری ضروری به‌شمار می‌رود. [13، 14]

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی رفتار دوام، جذب انرژی و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی و هیبریدی پرداخته‌اند. کالابرسی و همکاران [15] اثر هیبریدسازی الیاف شیشه بر رفتار دوام کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کتان و همچنین کامپوزیت‌های هیبریدی شیشه/کتان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که الیاف شیشه نقش مهمی در بهبود پایداری جذب آب در این کامپوزیت‌ها ایفا می‌کنند، به‌طوری‌که میزان جذب آب در کامپوزیت‌های الیاف کتان حدود 12 برابر بیشتر از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه گزارش شد.

ساتیش کومار و همکاران [16] سه نوع کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف طبیعی شامل الیاف علف مار¹، الیاف نارگیل² و الیاف موز را مورد بررسی قرار دادند. همچنین، استحکام کششی و خمشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف علف مار، هیبرید علف مار/نارگیل و هیبرید علف مار/موز را تعیین کردند. نتایج نشان داد که در مقایسه با کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف علف مار، کامپوزیت‌های هیبریدی علف مار/نارگیل و علف مار/موز منجر به بهبود قابل‌توجه استحکام کششی و خمشی شدند. ونکوته ردی و همکاران [17] محتوای الیاف پارچه‌ای در کامپوزیت‌های هیبریدی الیاف کاپوک³ و سیسال و همچنین نسبت حجمی نسبی بین الیاف را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش درصد الیاف سیسال منجر به افزایش سفتی و بهبود خواص خمشی کامپوزیت می‌شود. همچنین، مطالعات انجام‌شده بر روی هیبرید الیاف سیسال و موز با نسبت‌های مختلف 1:1، 3:1 و 3:1 نشان داد که بیشترین انرژی فعال‌سازی، استحکام کششی و استحکام خمشی در نسبت 1:3 به دست می‌آید.

رزقی ملکی و همکاران [18] رفتار مکانیکی و ضربه‌ای کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که کامپوزیت‌های دارای زمینه اپوکسی در آزمایش‌های کشش و خمش عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های وینیل استر دارند. همچنین، اگرچه کامپوزیت بازالت/اپوکسی انرژی ضربه بیشتری جذب کرد، اما آسیب‌های داخلی گسترده‌تری را نیز تجربه نمود. در مقابل، کامپوزیت بازالت/وینیل استر با جذب انرژی کمتر، در سطوح پایین انرژی ضربه بازگشت نسبی انرژی از خود نشان داد. این نتایج بیانگر تأثیر قابل‌توجه نوع ماتریس بر رفتار مکانیکی و ضربه‌ای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت است.

دوس سانتوس و همکاران [19] مطالعه‌ای مقایسه‌ای بر روی خواص الیاف سیسال و پیساوا انجام دادند. در این پژوهش، خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، کارایی، رفتار تغییر شکل و قابلیت خمش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که الیاف سیسال در مقایسه با پیساوا عملکرد مؤثرتری به‌عنوان تقویت‌کننده از خود نشان می‌دهد.

دش و همکاران [20] یک بررسی تجربی درباره تأثیر توالی لایه‌چینی و هیبریدسازی الیاف شیشه، کربن، کولار و بازالت بر خواص مکانیکی و مقاومت به سایش کامپوزیت‌های پلیمری انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که کامپوزیت‌هایی که لایه‌های کربنی در سطوح خارجی دارند، از استحکام نهایی کششی و خمشی به‌مراتب بالاتری برخوردار هستند. این پژوهش نشان داد که معماری الیاف در کامپوزیت‌های هیبریدی می‌تواند تعادلی بهینه میان استحکام، پایداری زیست‌محیطی و یکپارچگی سازه‌ای ایجاد کند. همچنین، هیبریدسازی الیاف به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش مقاومت به سایش معرفی شد که این موضوع ناشی از برهم‌کنش‌های ویژه میان سطح پلیمر و

³ Kapok¹ Snake grass² Coir

2- تجربی

1-2- مواد و روش ساخت

در این پژوهش، الیاف کتان بافته‌شده و الیاف اینگرا بافته‌شده به‌عنوان مواد تقویت‌کننده مورد استفاده قرار گرفتند. ماتریس پلیمری از رزین اپوکسی EPL 1012 به همراه هاردنر EPH 112 انتخاب شد. چگالی سطحی الیاف کتان و اینگرا به ترتیب 200 و 120 گرم بر مترمربع استفاده شد. خواص مکانیکی مواد اولیه شامل الیاف و سیستم رزین - هاردنر در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی اجزای سازنده

Table 1 Mechanical properties of the constituent materials

واحد	الیاف کتان	الیاف اینگرا	رزین اپوکسی
چگالی	1.35	0.84	1.05-1.20
استحکام کششی	630	667	80-95
مدول کششی	60	14.8	3.2-3.7
ازدیاد طول	1.5	12	5-6
استحکام خمشی	-	-	120-150
مدول خمشی	-	-	3.3-3.8

به‌منظور بررسی اثر توالی لایه‌چینی بر رفتار مکانیکی و ضربه‌ای کامپوزیت‌های هیبریدی، نمونه‌ها با دو آرایش لایه‌چینی متقارن شامل $[I_2/F_2]_s$ و $[F_2/I_2]_s$ ساخته شدند که در آن I نشان‌دهنده لایه‌های اینگرا و F نشان‌دهنده لایه‌های کتان است. این دو آرایش به‌گونه‌ای انتخاب شدند که لایه‌های هم‌جنس به‌صورت بلوکی¹ در کنار یکدیگر قرار گرفته و با ثابت نگه‌داشتن تعداد لایه‌ها، ضخامت، نوع مواد و فرایند ساخت، تنها محل قرارگیری بلوک‌های اینگرا و کتان در ضخامت چندلایه تغییر کند. بدین ترتیب، اثر جابه‌جایی بلوک‌های الیاف بر رفتار مکانیکی و ضربه‌ای، بدون تأثیر سایر متغیرهای طراحی، به‌صورت مستقیم قابل‌ارزیابی است. در این دو آرایش، موقعیت قرارگیری الیاف اینگرا و کتان در ضخامت چندلایه تغییر داده شده است؛ به‌گونه‌ای که در آرایش $[I_2/F_2]_s$ الیاف اینگرا در لایه‌های سطحی و در آرایش $[F_2/I_2]_s$ الیاف کتان در لایه‌های سطحی قرار گرفته‌اند. نمایش شماتیک توالی لایه‌ها برای تمامی نمونه‌ها در شکل 1 ارائه شده است.

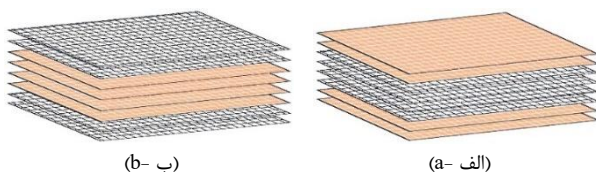


Fig. 1 Schematic illustration of the stacking sequences of the composite laminates: a) $[F_2/I_2]_s$, b) $[I_2/F_2]_s$.

شکل 1 نمایش شماتیک آرایش‌های مختلف لایه‌چینی چندلایه‌های کامپوزیتی: الف) $[F_2/I_2]_s$ ، ب) $[I_2/F_2]_s$

فرایند ساخت کامپوزیت‌ها به روش لایه‌چینی دستی انجام شد. در این روش، پارچه‌های بافته‌شده اینگرا و کتان پس از آغشته‌سازی کامل با رزین اپوکسی و اطمینان از توزیع یکنواخت رزین، مطابق با آرایش‌های لایه‌چینی موردنظر روی یکدیگر قرار گرفتند. به‌منظور یکسان‌سازی هندسه نمونه‌ها و حذف اثر تغییرات ابعادی، تمامی چندلایه‌ها با استفاده از یک فریم به ابعاد 250×250 میلی‌متر و ضخامت 3.2 میلی‌متر ساخته شدند. پس از تکمیل

ذرات ساینده است. افزون بر این، افزایش انرژی شکست حاصل از سازگاری بالای الیاف و ماتریس نقش مهمی در بهبود دوام کامپوزیت در برابر سایش ایفا می‌کند.

ساپوان و همکاران [21] بر ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته‌شده از رزین پلی‌استر غیراشباع تقویت‌شده با الیاف بازالت و شیشه متمرکز بود. آن‌ها کامپوزیت‌های مختلفی را با ترکیب رزین پلی‌استر غیراشباع، الیاف بازالت و الیاف شیشه تهیه کردند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف بازالت به کامپوزیت‌های پلی‌استر غیراشباع تقویت‌شده با الیاف شیشه موجب افزایش چگالی، استحکام کششی و خواص خمشی می‌شود. به‌طور کلی، یافته‌ها حاکی از آن است که حضور الیاف بازالت باعث بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی می‌شود.

بوزکورت و همکاران [22] تأثیر افزودن الیاف بازالت در کنار الیاف شیشه بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولیدشده به روش قالب‌گیری انتقال رزین با کمک خلأ را بررسی کردند. آن‌ها نسبت‌های مختلفی از الیاف بازالت و شیشه را در چندلایه‌های کامپوزیتی مورد ارزیابی قرار دادند تا اثر هیبریدسازی بر رفتار مکانیکی این کامپوزیت‌ها مشخص شود. نتایج آزمایش کشش تک‌محوره نشان داد که هیبریدسازی منجر به کاهش استحکام کششی و مدول کششی کامپوزیت‌ها می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییر نوع و نسبت الیاف در ساختار هیبریدی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها داشته باشد.

الحجاجة و همکاران [23] به بررسی رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌های هیبریدی شامل الیاف کربن بافته‌شده و الیاف کتان با آرایش‌های یک‌چپته و متقاطع در ماتریس اپوکسی پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که الیاف کتان با آرایش متقاطع، عملکرد و مقاومت به ضربه بهتری را فراهم می‌کنند. سبحانی و همکاران [24] رفتار ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت‌شده با الیاف آباکا و لاستیک را با آرایش‌های مختلف لایه‌چینی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که توالی لایه‌چینی تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ ضربه‌ای کامپوزیت‌ها دارد؛ به‌طوری‌که آرایش $[A/R/A]$ بیشترین ظرفیت جذب انرژی را از خود نشان داد، در حالی که آرایش $[A/R/A/R/A]$ مقاومت بیشتری در برابر گسترش آسیب در تمامی سطوح انرژی ضربه داشت. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مناسب توالی لایه‌چینی می‌تواند تعادل مطلوبی میان جذب انرژی و مقاومت در برابر آسیب در کامپوزیت‌های هیبریدی ایجاد کند.

با وجود مطالعات انجام‌شده بر روی کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت‌شده با الیاف طبیعی و مصنوعی، بخش عمده پژوهش‌های پیشین بر بررسی اثر نوع الیاف، کسر حجمی الیاف یا خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها متمرکز بوده‌اند و نقش توالی لایه‌چینی در کامپوزیت‌های هیبریدی اینگرا/کتان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، تاکنون مطالعه‌ای که به‌صورت هم‌زمان اثر آرایش لایه‌چینی را بر رفتار کششی، خمشی و پاسخ ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های هیبریدی اینگرا/کتان بررسی کند، گزارش نشده است. از این‌رو، در پژوهش حاضر، دو آرایش هیبریدی و متقارن $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ با کسر حجمی یکسان الیاف ساخته شدند تا اثر موقعیت قرارگیری الیاف اینگرا و کتان بر خواص کششی، خمشی و رفتار ضربه سرعت پایین این کامپوزیت‌ها به‌صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج این پژوهش می‌تواند دیدگاه مناسبی برای طراحی و بهینه‌سازی کامپوزیت‌های هیبریدی با تعادل مطلوب میان ظرفیت تحمل بار، جذب انرژی و مقاومت در برابر آسیب فراهم سازد.

¹ Block Stacking

که در آن ΔL تغییر طول اندازه‌گیری شده توسط اکستنسومتر و L_g طول اولیه ناحیه گنج می‌باشد. استحکام کششی نهایی به‌عنوان بیشینه تنش تحمل‌شده پیش از شکست نمونه تعریف شد. تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط انجام شدند و برای هر آرایش لایه‌چینی، پنج نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نهایی به‌صورت میانگین گزارش شدند.

2-3- آزمایش خمش

آزمایش خمش به‌منظور بررسی رفتار خمشی و تعیین استحکام خمشی و کرنش خمشی در لحظه شکست کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا مطابق با استاندارد ASTM D790M-17 انجام شد [26]. نمونه‌ها از صفحات کامپوزیتی ساخته‌شده تهیه شده و ابعاد آن‌ها مطابق با الزامات استاندارد با اندازه 127×12.7 میلی‌متر بود. نسبت طول دهانه به عمق نمونه‌ها برابر با 16:1 انتخاب شد. آزمایش‌های خمش به‌صورت سه‌نقطه‌ای و با استفاده از دستگاه آزمایش یونیورسال STM-150 انجام شدند. بارگذاری به‌صورت جابه‌جایی محور و با سرعت ثابت 2 میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد تا شرایط شبه‌استاتیکی فراهم گردد. در طول آزمایش، نیروی اعمالی و جابه‌جایی مرکز دهانه نمونه به‌صورت پیوسته ثبت شد. تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط انجام شدند و برای هر آرایش لایه‌چینی، 5 نمونه مورد آزمایش قرار گرفت تا از تکرارپذیری نتایج اطمینان حاصل شود. شکل 3 نمونه‌ای از آرایش آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و نحوه اعمال بار بر روی نمونه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

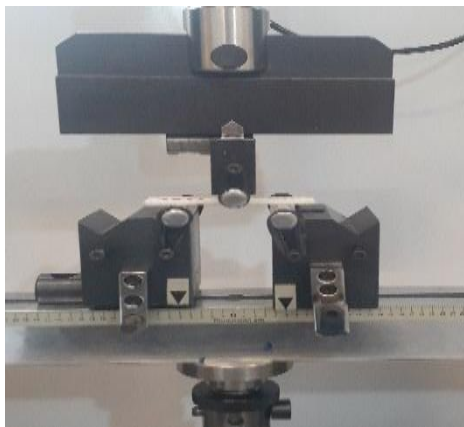


Fig. 3 Schematic view of the three-point bending test performed on composite specimens using the STM-150 universal testing machine.

شکل 3 نمای از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای انجام‌شده بر روی نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از دستگاه STM-150.

استحکام خمشی از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3)$$

که در آن P بیشینه نیروی اعمال‌شده، L طول دهانه، b عرض نمونه و d ضخامت نمونه است. کرنش خمشی سطحی در لحظه شکست از رابطه زیر به دست آمد:

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (4)$$

که در آن D جابه‌جایی مرکز دهانه در لحظه شکست می‌باشد. نتایج نهایی به‌صورت میانگین مقادیر به‌دست‌آمده از نمونه‌های آزمایش‌شده برای هر آرایش لایه‌چینی گزارش شد.

فرایند لایه‌چینی، نمونه‌ها به مدت 24 ساعت تحت فشار یکنواخت پرس و در دمای محیط قرار گرفتند تا رزین پخت اولیه شده و ساختار چندلایه تثبیت شود. سپس، به‌منظور دستیابی به پخت کامل، نمونه‌ها به مدت 6 ساعت در دمای 60 درجه سانتی‌گراد در کوره قرار داده شدند. این سیکل پخت باهدف تکمیل فرایند پخت رزین، بهبود چسبندگی الیاف - ماتریس و دستیابی به خواص مکانیکی نهایی انتخاب شد. پس از ساخت، کسر حجمی الیاف نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D3171M-15 و با استفاده از روش هضم ماتریس در اسید تعیین شد و مقدار آن برای تمامی نمونه‌ها برابر با 43% به دست آمد. استفاده از فریم با ابعاد و ضخامت ثابت، در کنار یکسان بودن کسر حجمی الیاف، امکان مقایسه مستقیم اثر توالی لایه‌چینی بر خواص مکانیکی و رفتار ضربه‌ای را فراهم کرد.

2-2- آزمایش کشش

آزمایش کشش به‌منظور ارزیابی رفتار مکانیکی کششی و تعیین خواص نظیر استحکام کششی نهایی و کرنش شکست کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا مطابق با استاندارد ASTM D3039M-17 انجام شد. نمونه‌ها از صفحات کامپوزیتی ساخته‌شده با آرایش‌های مختلف لایه‌چینی تهیه شده و ابعاد آن‌ها مطابق با الزامات استاندارد 250×25 میلی‌متر برش داده شدند [25]. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه آزمایش یونیورسال STM-150 انجام شدند. بارگذاری به‌صورت جابه‌جایی محور و با سرعت ثابت 2 میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد تا شرایط شبه‌استاتیکی برقرار باشد. در طول آزمایش، نیروی اعمالی و کرنش محوری نمونه به‌صورت پیوسته ثبت گردید. اندازه‌گیری کرنش با استفاده از اکستنسومتر متصل به ناحیه گنج نمونه انجام شد و براین‌اساس، منحنی‌های تنش - کرنش برای هر نمونه استخراج گردیدند. شکل 2 نمایی از دستگاه آزمایش کشش STM-150 و نحوه قرارگیری نمونه کامپوزیتی در فک‌های دستگاه در طول انجام آزمایش کشش تک‌محوره را نشان می‌دهد.



Fig. 2 View of the STM-150 universal testing machine and the configuration of the composite specimen during the uniaxial tensile test.

شکل 2 نمایی از دستگاه آزمایش یونیورسال STM-150 و نحوه قرارگیری نمونه کامپوزیتی در فک‌های طی انجام آزمایش کشش تک‌محوره.

تنش کششی اسمی از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

که در آن F نیروی اعمالی و A سطح مقطع اولیه نمونه است. کرنش کششی از رابطه زیر به دست آمد:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_g} \quad (2)$$

4-2- آزمایش ضربه سرعت پایین

آزمایش ضربه سرعت پایین مطابق استاندارد ASTM D7136M-15 برای ارزیابی رفتار ضربه‌ای انجام شد [27]. تجهیزات آزمایش شامل سیستم ضربه با وزنه سقوط‌کننده مجهز به ضربه‌زن نیم‌کروی با قطر 16 میلی‌متر بود. نمونه‌های کامپوزیتی با ابعاد 100×150 میلی‌متر استفاده شدند. نمونه‌ها در یک فیکسچر فولادی با حفره 75×125 میلی‌متر نصب شدند تا در هنگام ضربه امکان تغییر شکل آزادانه فراهم باشد. برای اندازه‌گیری نیروی ضربه از لودسل پیزوالکتریک استفاده شد که داده‌ها به سیستم ثبت داده DEWE-43A با نرخ نمونه‌برداری 20 کیلوهرتز منتقل می‌گردید تا پاسخ دینامیکی با وضوح بالا ثبت شود. به‌منظور حذف نویزهای فرکانس بالا و حفظ ویژگی‌های اصلی سیگنال، داده‌های نیرو با استفاده از فیلتر پایین‌گذر Butterworth (IIR) پردازش شدند. انرژی ضربه با تغییر ارتفاع رهاسازی ضربه‌زن، درحالی‌که جرم آن ثابت و برابر 5.75 کیلوگرم بود، کنترل شد. سه سطح انرژی ضربه در سطوح پایین، متوسط و بالا (به ترتیب 5.64، 11.28 و 22.56 ژول) برای انجام آزمون انتخاب شد. برای هر آرایش لایه‌چینی و در هر سطح انرژی، سه نمونه مورد آزمون قرار گرفت. شکل 4 نمای کلی دستگاه آزمایش ضربه سرعت پایین و نمونه تحت آزمون را نشان می‌دهد.



(الف - ا)



(ب - ب)

Fig. 4 General view of the low-velocity impact test apparatus: a) Open view b) View of the sample and impactor

شکل 4 نمای کلی از دستگاه آزمایش ضربه سرعت پایین: (الف) نمای باز (ب) نمای نمونه و ضربه‌زن

داده‌های آزمایش شامل نیرو و زمان برای تحلیل پاسخ نمونه‌ها در برابر ضربه و مقاومت آن‌ها در برابر آسیب مورد بررسی قرار گرفت. نیروی مورد استفاده در محاسبات، نیروی تماس ثبت‌شده توسط لودسل بود. سیگنال نیرو پیش از انجام آزمون صفر (Zero/Tare) شد؛ از این‌رو، وزن ساکن ضربه‌زن در سیگنال اندازه‌گیری شده لحاظ نشده و محاسبات سرعت، جابجایی و انرژی جذب‌شده مطابق روابط ارائه‌شده در استاندارد ASTM D7136/D7136M-15 انجام شد. سرعت ضربه‌زن در هر لحظه $v(t)$ ، جابجایی ضربه‌زن $\delta(t)$ و انرژی جذب‌شده $E_a(t)$ با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند:

$$v(t) = v_i + gt - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \quad (5)$$

$$\delta(t) = \delta_i + v_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left(\int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt \quad (6)$$

$$E_a(t) = \frac{m \times (v_i^2 - (v(t))^2)}{2} + m \times g \times \delta(t) \quad (7)$$

که در این معادلات، v_i سرعت اولیه ضربه‌زن، g شتاب گرانش، $F(t)$ نیروی ضربه در زمان t ، m جرم ضربه‌زن، δ_i جابجایی اولیه و t زمان است.

3- بحث و نتایج

3-1- نتایج آزمایش کشش

به‌منظور بررسی تأثیر توالی لایه‌چینی بر رفتار کششی کامپوزیت‌های هیبریدی اینگرا/کتان، آزمون کشش بر روی دو آرایش $[I_2/F_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ مطابق استاندارد ASTM D3039 انجام شد. شکل 5 منحنی‌های نیرو - جابجایی حاصل از این آزمون را برای هر دو آرایش نشان می‌دهد. این منحنی‌ها بر اساس میانگین نتایج آزمون‌های تکراری برای هر آرایش ترسیم و برازش شده‌اند تا رفتار متوسط نمونه‌ها را نمایش دهند، همچنین اطلاعات مناسبی از نحوه انتقال بار، ظرفیت تحمل نیرو و رفتار تغییر شکل نمونه‌ها تا لحظه شکست ارائه می‌دهند.

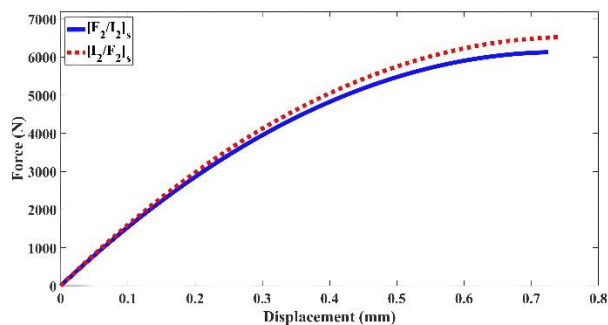


Fig. 5 Force-displacement curves obtained from the tensile test of Innegra/flax composite laminates with different stacking sequences.

شکل 5 منحنی‌های نیرو - جابجایی حاصل از آزمایش کشش چندلایه‌های کامپوزیتی اینگرا/کتان با آرایش‌های مختلف لایه‌چینی

همان‌گونه که در شکل 5 مشاهده می‌شود، هر دو آرایش روند افزایش نیرو را تا رسیدن به بار بیشینه نشان می‌دهند. رفتار غیرخطی ملایم منحنی‌های نیرو - جابجایی را می‌توان به ماهیت هیبریدی چندلایه‌ها و خواص ذاتی اینگرا نسبت داد. حضور الیاف اینگرا با مدول الاستیسیته کمتر و کرنش شکست بیشتر نسبت به الیاف کتان، سبب می‌شود این الیاف به‌صورت تدریجی در تحمل بار مشارکت کرده و در کنار الیاف کتان، پاسخ کششی متفاوتی نسبت به کامپوزیت‌های متداول با رفتار کاملاً خطی ایجاد کنند [7]. با ادامه بارگذاری، هر دو نمونه تا رسیدن به نیروی بیشینه روند مشابهی داشته و پس از آغاز شکست، افت ناگهانی نیرو مشاهده می‌شود.

تفاوت در شیب منحنی‌ها و مقدار جابجایی نهایی دو آرایش بیانگر آن است که توالی لایه‌چینی تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار کششی کامپوزیت‌های هیبریدی دارد. بر اساس مقادیر مدول الاستیسیته ارائه‌شده در جدول 2، آرایش $[I_2/F_2]_s$ با مدول 5.081 گیگاپاسکال، سفتی بیشتری نسبت به آرایش $[F_2/I_2]_s$ با مدول 4.507 گیگاپاسکال از خود نشان داد. علاوه بر این، کرنش نهایی بیشتر این آرایش بیانگر حفظ مناسب‌تر قابلیت تغییر شکل در کنار افزایش صلیبیت است. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر توالی لایه‌چینی می‌تواند به‌طور هم‌زمان بر صلیبیت و رفتار تغییر شکل کامپوزیت‌های هیبریدی اثرگذار باشد.

جدول 2 خواص کششی چندلایه‌های کامپوزیتی اینگرا/کتان با آرایش‌های مختلف لایه‌چینی.

Table 2 Tensile properties of Innegra/flax composite laminates with different stacking sequences.

نمونه	نیرو (N)	جابه‌جایی (mm)	تنش (MPa)	کرنش %	مدول (GPa)
[F ₂ /I ₂] _s	6095.25±541	0.7265±0.134	71±4.3	1.4410±0.26	4.507±0.558
[I ₂ /F ₂] _s	6532.25±1149	0.7421±0.154	75±14	1.4842±0.30	5.081±0.694

تغییر شکل تدریجی شده و موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش و کاهش تمرکز تنش در ناحیه بارگذاری می‌شوند. در نتیجه، پاسخ خمشی نمونه به تدریج از رفتار خطی فاصله گرفته و با افزایش تغییر شکل، رفتار غیرخطی بارزتری از خود نشان می‌دهد.

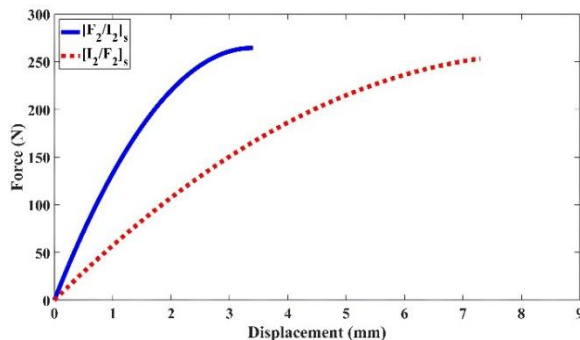


Fig. 6 Force-displacement curves obtained from the flexural test of Innegra/flax composite laminates with different stacking sequences.

شکل 6 منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی حاصل از آزمایش خمش چندلایه‌های کامپوزیتی اینگرا/کتان با آرایش‌های مختلف لایه‌چینی

مقادیر عددی ارائه شده در جدول 3 این مشاهدات را به صورت کمی تأیید می‌کند. نمونه [F₂/I₂]_s با تنش خمشی 128 MPa و مدول خمشی 0.095 GPa، نسبت به نمونه [I₂/F₂]_s با تنش خمشی 112 MPa و مدول خمشی 0.041 GPa، مقاومت و سفتی خمشی بیشتری از خود نشان می‌دهد، اما جابه‌جایی آن (3.44 mm) به طور قابل توجهی کمتر از نمونه [I₂/F₂]_s (7.335 mm) است. در مقابل، نمونه [I₂/F₂]_s با وجود تنش و مدول خمشی پایین‌تر، کرنش خمشی بالاتری (5.75٪) از خود نشان می‌دهد که بیانگر شکل‌پذیری بیشتر و ظرفیت بالاتر آن برای تحمل تغییر شکل‌های خمشی پیش از شکست است. این رفتار را می‌توان به حضور الیاف اینگرا در لایه‌های سطحی نسبت داد که به دلیل مدول الاستیسیته پایین‌تر و کرنش شکست بالاتر، موجب افزایش انعطاف‌پذیری و توزیع مناسب‌تر تنش در حین بارگذاری خمشی می‌شوند.

مدول خمشی نمونه [F₂/I₂]_s حدود 2.3 برابر بیشتر از نمونه [I₂/F₂]_s بود که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه آرایش لایه‌چینی و نوع الیاف سطحی بر سفتی خمشی کامپوزیت است. همچنین، اختلاف مدول خمشی بین دو آرایش به مراتب بیشتر از اختلاف مدول کششی آن‌ها است؛ این موضوع بیانگر حساسیت بالاتر رفتار خمشی نسبت به موقعیت لایه‌های سطحی است، زیرا در بارگذاری خمشی بیشترین تنش‌های کششی و فشاری در لایه‌های خارجی ایجاد می‌شوند، در حالی که در بارگذاری کششی، تنش به صورت یکنواخت‌تر در ضخامت کامپوزیت توزیع می‌شود.

اگرچه اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده بین دو آرایش جزئی است، اما این تفاوت‌ها بیانگر نقش مؤثر توالی لایه‌چینی در نحوه انتقال بار و توزیع تنش در ساختار کامپوزیت است. به طور کلی، نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد که آرایش [I₂/F₂]_s عملکرد مکانیکی مطلوب‌تری نسبت به آرایش [F₂/I₂]_s از نظر نیروی بیشینه، تنش کششی، مدول الاستیسیته و کرنش نهایی ارائه می‌دهد. این یافته‌ها بیانگر آن است که با انتخاب مناسب توالی لایه‌ها می‌توان پاسخ کششی کامپوزیت‌های هیبریدی اینگرا/کتان را متناسب با نیازهای کاربردی بهینه‌سازی کرد.

3-2- نتایج آزمایش خمش

شکل 6 منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی حاصل از آزمایش خمش چندلایه‌های کامپوزیتی اینگرا/کتان با آرایش‌های مختلف لایه‌چینی را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها بر اساس میانگین نتایج آزمون‌های تکراری برای هر آرایش ترسیم و برازش شده‌اند تا رفتار خمشی متوسط نمونه‌ها را نمایش دهند. از آنجاکه در آزمایش خمش بیشترین تنش‌های کششی و فشاری در سطوح خارجی چندلایه ایجاد می‌شود، نقش لایه‌های بیرونی در تعیین رفتار خمشی بسیار پررنگ‌تر از آرایش کشش است. به همین دلیل، تفاوت در جایگاه لایه‌های کتان و اینگرا تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر شیب اولیه، نیروی بیشینه و جابه‌جایی نهایی منحنی‌ها خواهد داشت. بررسی منحنی‌های شکل 6 نشان می‌دهد که چندلایه هیبریدی [I₂/F₂]_s، که در آن لایه‌های اینگرا در سطوح بیرونی قرار گرفته‌اند، شیب اولیه ملایم‌تری داشته و با افزایش تدریجی نیرو، جابه‌جایی قابل توجهی را تجربه می‌کند. این رفتار بیانگر ماهیت نرم و شکل‌پذیر الیاف اینگرا و توانایی بالای آن در تحمل تغییر شکل‌های بزرگ بدون شکست ناگهانی است. در مقابل، نمونه [F₂/I₂]_s که الیاف کتان در لایه‌های بیرونی آن قرار دارند، شیب اولیه بیشتری از خود نشان می‌دهد و در جابه‌جایی نسبتاً کمتری به نیروی بیشینه می‌رسد. این رفتار نشان‌دهنده انتقال مؤثر تنش در لایه‌های سطحی کتان و تحمل بالای بار خمشی پیش از شکست می‌باشد. تفاوت محسوس در جابه‌جایی نهایی این دو آرایش حاکی از آن است که حضور الیاف اینگرا در لایه‌های بیرونی منجر به افزایش قابل توجه انعطاف‌پذیری و تغییر شکل خمشی می‌شود، در حالی که قرارگیری الیاف کتان در سطوح خارجی باعث افزایش صلبیت و کاهش جابه‌جایی می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهد که مهندسی لایه‌های سطحی ابزار مؤثری برای کنترل رفتار خمشی کامپوزیت‌های چندلایه است. همچنین، غیرخطی بودن منحنی نیرو - جابه‌جایی در نمونه [I₂/F₂]_s نسبت به نمونه [F₂/I₂]_s مشهودتر است. این رفتار را می‌توان به قرارگیری الیاف اینگرا در لایه‌های بیرونی نسبت داد. الیاف اینگرا به دلیل چقرمگی بالا، کرنش شکست زیاد و قابلیت تحمل تغییر شکل‌های بزرگ، پیش از وقوع شکست نهایی دچار

جدول 3 خواص کششی چندلایه‌های کامپوزیتی اینگرا/کتان با آرایش‌های مختلف لایه‌چینی.

Table 3 Flexural properties of Innegra/flax composite laminates with different stacking sequences.

نمونه	نیرو (N)	جابه‌جایی (mm)	تنش خمشی (MPa)	کرنش خمشی (%)	مدول خمشی (GPa)
[F ₂ /I ₂] _s	267.2±32.2	3.44±0.05	128±8.6	2.25±0.5	0.095±0.006
[I ₂ /F ₂] _s	253.5±32.9	7.335±1.23	112±4.4	5.75±1.0	0.041±0.013

وجود افت ناگهانی در منحنی‌ها نشان می‌دهد که در این سطح انرژی، نمونه‌ها دچار شکست فاجعه‌آمیز یا نفوذ کامل ضربه‌زن نشده‌اند و بخش عمده انرژی از طریق تغییر شکل خمشی و مکانیزم‌های آسیب درون‌ساختاری جذب شده است.

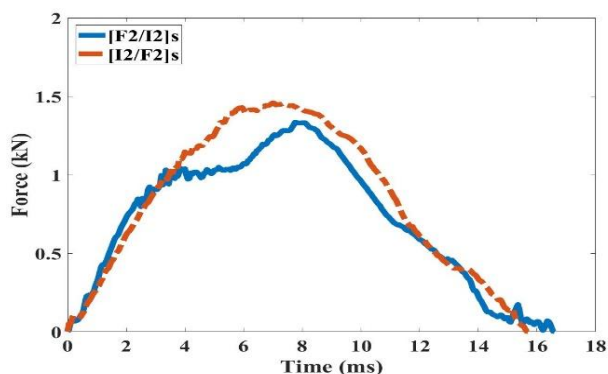


Fig. 8 Force-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 5.64 J.

شکل 8 منحنی‌های نیرو - زمان کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[I_2/F_2]_s$ و $[F_2/I_2]_s$ تحت انرژی ضربه 5.64 J.

مقایسه منحنی‌ها نشان می‌دهد که نمونه $[I_2/F_2]_s$ نیروی بیشینه بالاتری نسبت به نمونه $[F_2/I_2]_s$ ارائه می‌دهد (به ترتیب 1.45 و 1.31 کیلو نیوتون، مطابق جدول 4). همچنین، منحنی این نمونه تقارن بیشتری بین مراحل بارگذاری و باربرداری نشان می‌دهد که بیانگر انتقال تدریجی‌تر انرژی و پاسخ پایدارتر سازه در طول برخورد است. در مقابل، کاهش سریع‌تر نیرو پس از رسیدن به مقدار بیشینه در نمونه $[F_2/I_2]_s$ می‌تواند ناشی از آغاز زودتر آسیب‌های موضعی مانند ترک خوردگی ماتریس، جدایشگی الیاف-ماتریس و آسیب‌های بین‌لایه‌ای باشد.

نامتقارن بودن بیشتر منحنی نیرو - زمان در نمونه $[F_2/I_2]_s$ نیز مؤید این موضوع است. در این آرایش، قرارگیری الیاف کتان در لایه‌های بیرونی اگرچه موجب افزایش سفتی اولیه و انتقال سریع‌تر بار می‌شود، اما به دلیل کرنش شکست کمتر این الیاف، پس از رسیدن به نیروی بیشینه، کاهش سفتی سازه با نرخ بیشتری رخ می‌دهد. در نتیجه، منحنی از حالت متقارن فاصله می‌گیرد. از سوی دیگر، قرارگیری لایه‌های اینگرا در آرایش $[I_2/F_2]_s$ موجب افزایش قابلیت توزیع تنش در ناحیه تماس شده است. الیاف اینگرا به دلیل چگالی پایین، کرنش شکست بالا و چقرمگی مناسب، توانایی بیشتری در جذب انرژی ضربه و کاهش تمرکز تنش دارند. در نتیجه، بخشی از انرژی ضربه از طریق تغییر شکل این الیاف مستهلک شده و از گسترش سریع آسیب جلوگیری می‌شود. به‌طوری‌که آرایش مناسب لایه‌ها می‌تواند موجب افزایش نیروی بیشینه و بهبود پاسخ ضربه‌ای سازه شود.

تصاویر ماکروسکوپی شکل 9 نیز اطلاعات ارزشمندی در خصوص نحوه توزیع آسیب در این سطح انرژی ارائه می‌کنند. همان‌طور که در سطوح رویی نمونه‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ مشاهده می‌شود، اثر برخورد ضربه‌زن عمدتاً به ناحیه تماس محدود شده و هیچ‌گونه شکست گسترده، پارگی الیاف یا ترک‌های قابل مشاهده در سطح نمونه‌ها دیده نمی‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که انرژی 5.64 J برای ایجاد آسیب سطحی شدید در هر دو آرایش لایه‌چینی کافی نبوده است. در سطوح پشتی نیز تنها آثار جزئی تغییر شکل موضعی مشاهده می‌شود که ناشی از تنش‌های کششی ایجادشده در سمت مقابل برخورد است.

به‌منظور تأیید نتایج حاصل از آزمون خمش، تصاویر نمونه‌های پس از آزمون در شکل 7 ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نمونه $[I_2/F_2]_s$ که الیاف اینگرا در لایه‌های بیرونی آن قرار دارند، پیش از شکست دچار تغییر شکل خمشی بیشتری شده و خمش قابل توجه‌تری را نسبت به نمونه $[F_2/I_2]_s$ تجربه کرده است. در مقابل، نمونه $[F_2/I_2]_s$ با وجود تحمل تنش خمشی بالاتر، در جابجایی کمتری دچار شکست شده که بیانگر رفتار صلب‌تر این آرایش است. این مشاهدات با منحنی‌های نیرو - جابجایی و مقادیر کمی ارائه‌شده در جدول 3 کاملاً همخوانی داشته و نقش تعیین‌کننده آرایش لایه‌چینی و الیاف سطحی را در کنترل رفتار خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی تأیید می‌کند.



Fig. 7 Photographs of the specimens after the flexural test: a) $[F_2/I_2]_s$, b) $[I_2/F_2]_s$.

شکل 7 تصاویر نمونه‌ها پس از آزمون خمش: الف) $[F_2/I_2]_s$ ، ب) $[I_2/F_2]_s$.

به‌طور کلی، قرارگیری الیاف اینگرا در لایه‌های بیرونی (نمونه $[I_2/F_2]_s$) موجب افزایش چشمگیر شکل‌پذیری، کرنش خمشی و ظرفیت تغییر شکل می‌شود، درحالی‌که حضور الیاف کتان در سطوح خارجی (نمونه $[F_2/I_2]_s$) به افزایش تنش خمشی و مدول خمشی منجر می‌گردد. این ویژگی، قابلیت طراحی این کامپوزیت‌های هیبریدی را برای دستیابی به تعادل میان استحکام خمشی و انعطاف‌پذیری در کاربردهای سازه‌ای به‌خوبی نشان می‌دهد.

3-3- نتایج ضربه سرعت پایین

به‌منظور ارزیابی اثر توالی لایه‌چینی بر رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا، آزمایش ضربه سرعت پایین در سه سطح انرژی 5.64 J، 11.28 J و 22.56 J انجام شد. پاسخ دینامیکی نمونه‌ها از طریق تحلیل منحنی‌های نیرو - زمان، نیرو - جابجایی و انرژی - زمان مورد بررسی قرار گرفت. این منحنی‌ها اطلاعات جامعی در خصوص سفتی اولیه، نیروی بیشینه، میزان تغییر شکل، ظرفیت جذب انرژی و فرایند انتقال انرژی در طول برخورد فراهم می‌کنند و امکان مقایسه عملکرد ضربه‌ای آرایش‌های مختلف لایه‌چینی را مهیا می‌سازند. علاوه بر این، به‌منظور شناسایی مکانیزم‌های آسیب و ارزیابی تأثیر موقعیت لایه‌های کتان و اینگرا بر نحوه گسترش خرابی، سطوح رویی و پشتی نمونه‌ها پس از آزمایش ضربه به‌صورت ماکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفتند. تحلیل هم‌زمان پاسخ‌های مکانیکی و الگوهای آسیب، دیدگاه جامعی در خصوص نقش توالی لایه‌چینی در مقاومت ضربه‌ای، جذب انرژی و تحمل آسیب کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا ارائه می‌دهد.

شکل 8 منحنی‌های نیرو - زمان نمونه‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ را در انرژی ضربه 5.64 J نشان می‌دهد. در هر دو نمونه، نیرو در ابتدای برخورد به‌صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد که بیانگر پاسخ الاستیک اولیه سازه و سفتی مناسب چندانلایه در برابر بارگذاری ضربه‌ای است. با افزایش زمان تماس، نیرو به‌تدریج به مقدار بیشینه رسیده و سپس روند کاهشی پیدا می‌کند. عدم

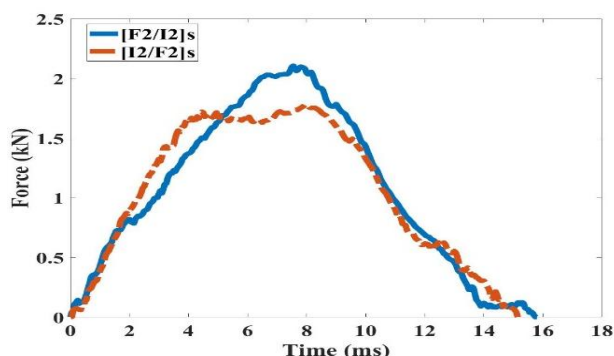


Fig. 10 Force-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 11.28 J.

شکل 10 منحنی‌های نیرو - زمان کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 11.28 J.

باوجود نیروی بیشینه بالاتر در نمونه $[F_2/I_2]_s$ ، شکل منحنی نمونه $[I_2/F_2]_s$ متقارن‌تر بوده و روند افزایش و کاهش نیرو در آن یکنواخت‌تر است. در مطالعات انجام‌شده بر روی کامپوزیت‌های هیبریدی گزارش شده است که متقارن بودن بیشتر منحنی نیرو - زمان معمولاً بیانگر توزیع مناسب‌تر تنش و جذب تدریجی‌تر انرژی در طول فرایند برخورد است [28]. در مقابل، وجود نوسانات بیشتر و افت سریع‌تر نیرو در نمونه $[F_2/I_2]_s$ می‌تواند نشان‌دهنده آغاز و توسعه آسیب‌های داخلی نظیر ترک‌های ماتریسی و لایه‌لایه‌شدن بین‌لایه‌ای در حین بارگذاری باشد.

تصاویر ماکروسکوپی شکل 11 نیز تفاوت رفتار دو آرایش لایه‌چینی را به‌خوبی نشان می‌دهند. در سطوح رویی هر دو نمونه، آثار آسیب همچنان محدود بوده و تنها اثر موضعی برخورد ضربه‌زن مشاهده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که بخش عمده آسیب در داخل ضخامت چندلایه‌ها یا در سطح پشتی متمرکز شده است. باین‌حال، در سطح پشتی نمونه $[F_2/I_2]_s$ یک ناحیه آسیب خطی و نسبتاً گسترده در اطراف مرکز برخورد مشاهده می‌شود که بیانگر افزایش تنش‌های کششی و توسعه آسیب در سمت مقابل محل ضربه است. در مقابل، سطح پشتی نمونه $[I_2/F_2]_s$ تنها آثار محدودی از تغییر شکل موضعی را نشان می‌دهد و نشانه‌ای از گسترش قابل‌توجه آسیب مشاهده نمی‌شود.

این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه نمونه $[F_2/I_2]_s$ در این سطح انرژی نیروی بیشینه بیشتری را تحمل کرده است، اما نمونه $[I_2/F_2]_s$ توانایی بالاتری در محدود کردن گسترش آسیب دارد. به بیان دیگر، آرایش $[I_2/F_2]_s$ با توزیع مناسب‌تر تنش و جذب تدریجی‌تر انرژی، از تمرکز تنش در سطح پشتی جلوگیری کرده و موجب کاهش شدت آسیب قابل مشاهده شده است. این رفتار با نقش شناخته‌شده الیاف اینگرا در افزایش چقرمگی، جذب انرژی و بهبود مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت‌های هیبریدی مطابقت دارد.

شکل 12 منحنی‌های نیرو - زمان نمونه‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ را تحت انرژی ضربه 22.56 J نشان می‌دهد. با افزایش انرژی ضربه از 11.28 J به 22.56 J، هر دو نمونه افزایش محسوسی در نیروی بیشینه از خود نشان می‌دهند که بیانگر مشارکت بیشتر لایه‌های کامپوزیتی در تحمل بار اعمالی است. در این سطح انرژی، نمونه $[F_2/I_2]_s$ بیشترین نیروی بیشینه را در میان تمامی سطوح انرژی مورد بررسی ثبت کرده و مقدار آن به حدود 2.97 کیلو نیوتن می‌رسد، درحالی‌که مقدار نیروی بیشینه برای نمونه $[I_2/F_2]_s$ حدود 2.17 کیلو نیوتن است. این رفتار نشان می‌دهد که با افزایش انرژی ضربه، آرایش $[F_2/I_2]_s$ توانایی بیشتری در تحمل بار متمرکز پیش از گسترش آسیب

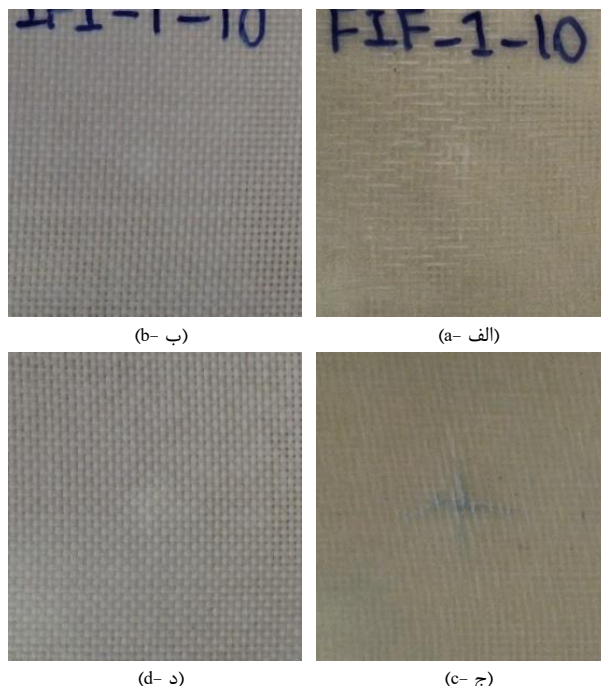


Fig. 9 Macroscopic images of impact-induced damage at an impact energy of 5.64 J: a) front surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, b) front surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen, c) rear surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, and d) rear surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen.

شکل 9 تصاویر ماکروسکوپی سطوح آسیب‌دیده کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا پس از آزمایش ضربه با انرژی 5.64 J: (الف) سطح رویی نمونه $[F_2/I_2]_s$ ، (ب) سطح رویی نمونه $[I_2/F_2]_s$ ، (ج) سطح پشتی نمونه $[F_2/I_2]_s$ و (د) سطح پشتی نمونه $[I_2/F_2]_s$.

در این محدوده انرژی معمولاً آسیب‌های اولیه به‌صورت ترک‌های ریز ماتریسی و لایه‌لایه‌شدن‌های محدود در نواحی زیرسطحی ایجاد می‌شوند که الزاماً در بررسی ماکروسکوپی قابل مشاهده نیستند.

همچنین محدود بودن آثار آسیب در هر دو سطح نمونه‌ها با شکل منحنی‌های نیرو - زمان مطابقت دارد. در واقع، حفظ پیوستگی منحنی پس از رسیدن به نیروی بیشینه و نبود افت ناگهانی نیرو بیانگر آن است که ساختار چندلایه همچنان توانایی تحمل بار را پس از آغاز آسیب حفظ کرده است. این رفتار معمولاً در کامپوزیت‌های هیبریدی دارای چقرمگی مناسب مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده جذب تدریجی انرژی از طریق مجموعه‌ای از مکانیزم‌های آسیب شامل تغییر شکل خمشی، ترک‌های ماتریسی محدود، جداشدگی موضعی الیاف و لایه‌لایه‌شدن‌های کوچک بین لایه‌ای است.

شکل 10 منحنی‌های نیرو - زمان نمونه‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ را تحت انرژی ضربه 11.28 J نشان می‌دهد. با افزایش انرژی ضربه نسبت به سطح 5.64 J، نیروی بیشینه در هر دو آرایش افزایش یافته است که نشان‌دهنده مشارکت بیشتر لایه‌ها در تحمل بار و فعال شدن مکانیزم‌های جذب انرژی است. مطابق جدول 4، نیروی بیشینه نمونه $[F_2/I_2]_s$ در این سطح انرژی برابر با 2.10 کیلو نیوتون بوده، در حالی‌که این مقدار برای نمونه $[I_2/F_2]_s$ برابر با 1.78 کیلو نیوتون به دست آمده است. این اختلاف نشان می‌دهد که قرارگیری لایه‌های کتان در سطوح خارجی می‌تواند در این سطح انرژی موجب افزایش ظرفیت تحمل بار اولیه و مقاومت بیشتر در برابر اعمال نیروی ضربه شود.

در مقابل، نمونه $[I_2/F_2]_s$ اگرچه نیروی بیشینه کمتری را تجربه می‌کند، اما منحنی نیرو - زمان آن همچنان رفتار یکنواخت‌تر و متقارن‌تری نسبت به نمونه $[F_2/I_2]_s$ دارد. حفظ شکل نسبتاً متقارن منحنی حتی در انرژی 22.56 J نشان می‌دهد که انتقال بار و توزیع تنش در این آرایش لایه‌چینی به‌صورت تدریجی‌تری انجام شده است. چنین رفتاری در کامپوزیت‌های هیبریدی معمولاً به توانایی بیشتر ساختار در کنترل رشد آسیب و جلوگیری از تمرکز تنش نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، طولانی‌تر شدن مدت تماس در هر دو نمونه نسبت به سطوح انرژی پایین‌تر بیانگر افزایش سهم مکانیزم‌های جذب انرژی مبتنی بر تغییر شکل خمشی و آسیب‌های داخلی در پاسخ ضربه‌ای کامپوزیت است.

تصاویر ماکروسکوپی شکل 13 نیز بیانگر افزایش شدت آسیب در مقایسه با سطوح انرژی 5.64 J و 11.28 J هستند. در سطح رویی هر دو نمونه، ناحیه تماس ضربه‌زن به‌وضوح قابل مشاهده بوده و آثار فشردگی موضعی در اطراف محل برخورد ایجاد شده است. باین‌حال، در نمونه $[F_2/I_2]_s$ گستره آسیب در سطح پشتی بیشتر بوده و آثار تغییر شکل و سفیدشدگی ناشی از تمرکز تنش در ناحیه وسیع‌تری مشاهده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش انرژی ضربه، بخشی از انرژی جذب‌شده به صورت آسیب‌های داخلی و تغییرشکل‌های موضعی در سمت کششی چندلایه آزاد شده است. در مقابل، نمونه $[I_2/F_2]_s$ علی‌رغم تحمل نیروی بیشینه کمتر، آسیب متمرکزتر و محدودتری را در سطح پشتی نشان می‌دهد. این رفتار را می‌توان به نقش الیاف اینگرا در افزایش چقرمگی بین‌لایه‌ای، توزیع یکنواخت‌تر تنش و جذب تدریجی انرژی نسبت داد.

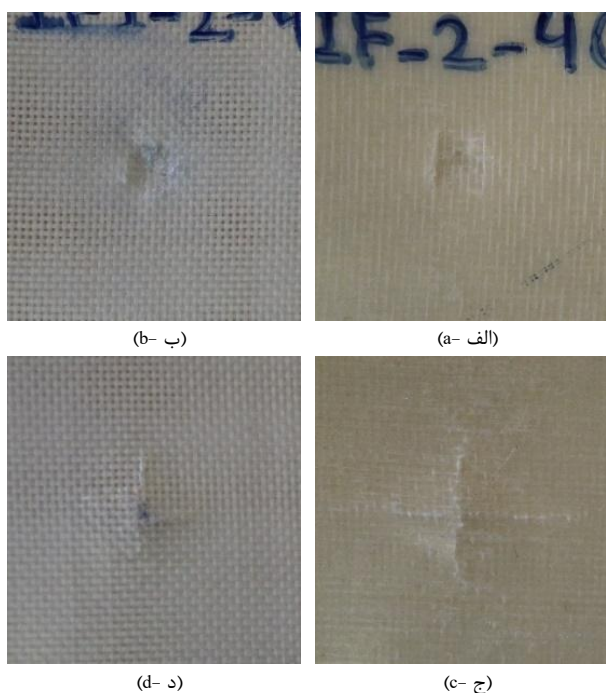


Fig. 13 Macroscopic images of impact-induced damage at an impact energy of 22.56 J: a) front surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, b) front surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen, c) rear surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, and d) rear surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen.

شکل 13 تصاویر ماکروسکوپی سطوح آسیب‌دیده کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا پس از آزمایش ضربه با انرژی 22.56 J: الف) سطح رویی نمونه $[F_2/I_2]_s$ ، ب) سطح رویی نمونه $[I_2/F_2]_s$ ، ج) سطح پشتی نمونه $[F_2/I_2]_s$ و د) سطح پشتی نمونه $[I_2/F_2]_s$.

از خود نشان می‌دهد. افت سریع نیرو پس از رسیدن به نیروی بیشینه در نمونه $[F_2/I_2]_s$ بیانگر کاهش سریع‌تر ظرفیت باربری سازه در اثر گسترش آسیب‌های داخلی است. با آغاز ترک‌خوردگی ماتریس، جداسازی بین‌لایه‌ای و شکست تدریجی الیاف، سفتی مؤثر چندلایه کاهش یافته و در نتیجه نیروی تماس با نرخ بیشتری افت می‌کند. همچنین، نوسانات جزئی مشاهده‌شده در انتهای منحنی را می‌توان به ارتعاشات سیستم ضربه‌زن-نمونه و تماس‌های متناوب در مرحله بازگشت ضربه‌زن نسبت داد که در اثر آزاد شدن انرژی ذخیره‌شده پس از برخورد ایجاد می‌شوند.

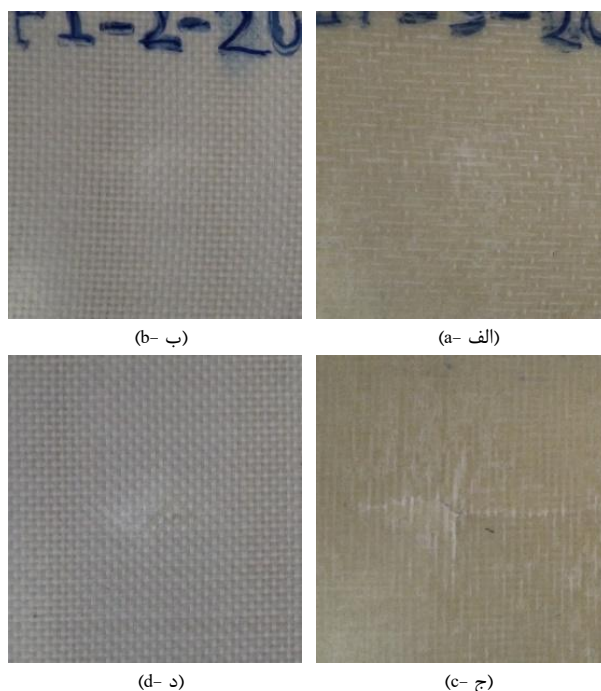


Fig. 11 Macroscopic images of impact-induced damage at an impact energy of 11.28 J: a) front surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, b) front surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen, c) rear surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, and d) rear surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen.

شکل 11 تصاویر ماکروسکوپی سطوح آسیب‌دیده کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا پس از آزمایش ضربه با انرژی 11.28 J: الف) سطح رویی نمونه $[F_2/I_2]_s$ ، ب) سطح رویی نمونه $[I_2/F_2]_s$ ، ج) سطح پشتی نمونه $[F_2/I_2]_s$ و د) سطح پشتی نمونه $[I_2/F_2]_s$.

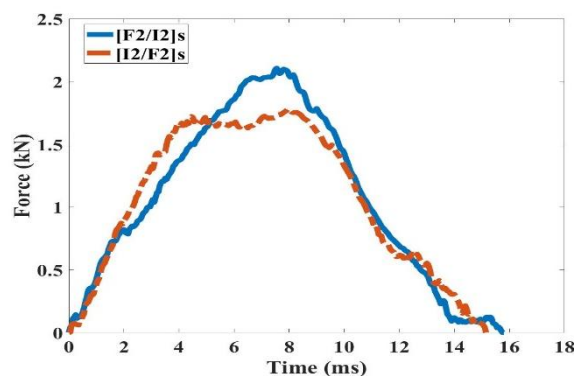


Fig. 12 Force-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 22.56 J.

شکل 12 منحنی‌های نیرو - زمان کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 22.56 J.

و ماتریس است. همچنین فاصله نسبتاً کم بین مسیر بارگذاری و باربرداری در هر دو نمونه نشان می‌دهد که بخش عمده انرژی ضربه به‌صورت الاستیک ذخیره شده و پس از برخورد به ضربه‌زن بازگردانده شده است.

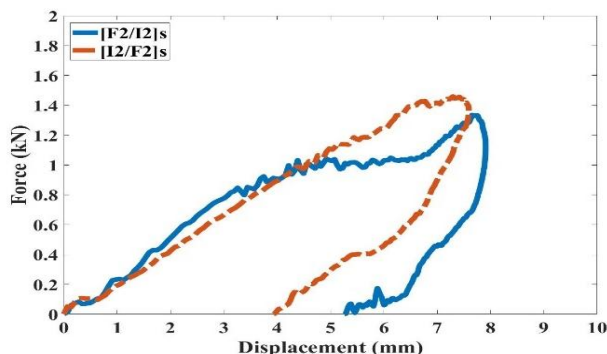


Fig. 14 Force-displacement curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 5.64 J.

شکل 14 منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 5.64 J.

شکل 15 منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ را تحت انرژی ضربه 11.28 J نشان می‌دهد. در مقایسه با انرژی 5.64 J، حداکثر جابه‌جایی هر دو نمونه افزایش یافته است که نشان‌دهنده مشارکت بیشتر تغییر شکل خمشی و افزایش سهم مکانیزم‌های جذب انرژی در ساختار کامپوزیت است. مطابق جدول 4، جابه‌جایی نهایی نمونه‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ در این سطح انرژی به ترتیب 7.27 و 8.03 میلی‌متر به دست آمده است. افزایش جابه‌جایی حداکثر بیانگر آن است که با افزایش انرژی ضربه، بخشی از انرژی اعمال‌شده علاوه بر تغییر شکل الاستیک، صرف ایجاد آسیب‌های داخلی و تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر شده است. در هر دو نمونه، منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی همچنان به‌صورت حلقه بسته مشاهده می‌شوند که نشان‌دهنده وقوع پدیده بازگشت الاستیک و بازگشت ضربه‌زن پس از برخورد است. این موضوع بیان می‌کند که انرژی اعمالی هنوز به حدی نرسیده است که موجب نفوذ کامل یا شکست فاجعه‌آمیز سازه شود. با این حال، افزایش فاصله بین مسیر بارگذاری و باربرداری و نسبت به انرژی 5.64 J نشان می‌دهد که سهم انرژی مستهلک‌شده در اثر آسیب‌های داخلی افزایش یافته و میزان انرژی برگشتی کاهش پیدا کرده است.

نمونه $[I_2/F_2]_s$ جابه‌جایی بیشتری را پیش از شروع مسیر بازگشت تجربه می‌کند، درحالی‌که نمونه $[F_2/I_2]_s$ در جابه‌جایی کمتری وارد مرحله باربرداری می‌شود. بنابراین می‌توان انتظار داشت که در این سطح انرژی، آسیب‌های زیرسطحی نسبت به انرژی 5.64 J گسترش بیشتری یافته باشند. همچنین شکل حلقه هیستریزس در نمونه $[I_2/F_2]_s$ نسبت به نمونه $[F_2/I_2]_s$ یکنواخت‌تر و متقارن‌تر است. این رفتار نشان می‌دهد که فرایند جذب و آزادسازی انرژی در این آرایش به‌صورت تدریجی‌تر انجام شده و گسترش آسیب با نرخ کنترل‌شده‌تری صورت گرفته است. در مقابل، تغییرات موضعی مشاهده‌شده در منحنی $[F_2/I_2]_s$ می‌تواند نشان‌دهنده آغاز ناپایداری‌های ناشی از رشد آسیب‌های داخلی باشد. این موضوع با نتایج تصاویر میکروسکوپی نیز همخوانی دارد، زیرا در این سطح انرژی آثار آسیب در سطح پشتی نمونه $[F_2/I_2]_s$ آشکارتر از نمونه $[I_2/F_2]_s$ مشاهده شد.

به‌طور کلی، نتایج منحنی‌های نیرو-زمان نشان می‌دهد که توالی لایه‌چینی نقش تعیین‌کننده‌ای در پاسخ ضربه‌ای کامپوزیت‌های هیبریدی اینگرا/کتان دارد. نمونه $[F_2/I_2]_s$ به دلیل قرارگیری الیاف کتان در لایه‌های سطحی، در سطوح انرژی متوسط و بالا نیروی بیشینه بالاتری را تحمل کرده که بیانگر انتقال مؤثرتر بار و سفتی بیشتر لایه‌های بیرونی است. در مقابل، نمونه $[I_2/F_2]_s$ با قرارگیری الیاف اینگرا در لایه‌های سطحی، رفتار متقارن‌تری در منحنی نیرو-زمان از خود نشان داد که حاکی از توزیع تدریجی‌تر تنش، جذب مؤثرتر انرژی و تأخیر در گسترش آسیب‌های داخلی است. همچنین، نامتقارن بودن بیشتر منحنی‌های نمونه $[F_2/I_2]_s$ را می‌توان به آغاز زودتر آسیب‌های موضعی پس از رسیدن به نیروی بیشینه نسبت داد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب توالی لایه‌چینی می‌توان تعادل مطلوبی میان ظرفیت تحمل بار، جذب انرژی و مقاومت در برابر آسیب در کامپوزیت‌های هیبریدی اینگرا/کتان ایجاد کرد.

علاوه بر این، شکل منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی اطلاعات مهمی درباره مکانیزم پاسخ کامپوزیت در برابر ضربه ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، این منحنی‌ها بسته به سطح انرژی ضربه و میزان آسیب ایجادشده می‌توانند به سه حالت اصلی مشاهده شوند. در حالت بازگشت الاستیک³، ضربه‌زن پس از برخورد و بدون ایجاد نفوذ کامل از سطح نمونه بازمی‌گردد و منحنی به‌صورت یک حلقه بسته ظاهر می‌شود. در حالت نفوذ²، ضربه‌زن در نمونه فرو می‌رود، اما از آن عبور کامل نمی‌کند و منحنی به‌صورت حلقه باز مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده جذب انرژی بیشتر و ایجاد آسیب‌های داخلی نظیر ترک‌خوردگی ماتریس، جدایش لایه‌ها و شکست الیاف است. در نهایت، در حالت سوراخ‌شدگی کامل⁴، ضربه‌زن از نمونه عبور کرده و افت ناگهانی نیرو در انتهای منحنی مشاهده می‌شود. از این‌رو، بررسی شکل منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی، علاوه بر ارزیابی ظرفیت تحمل بار و میزان تغییر شکل، اطلاعات ارزشمندی درباره نوع پاسخ سازه، مکانیزم آسیب و نحوه جذب انرژی در کامپوزیت‌های هیبریدی فراهم می‌کند.

شکل 14 منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ را تحت انرژی ضربه 5.64 J نشان می‌دهد. این منحنی‌ها اطلاعات مهمی درباره میزان تغییر شکل سازه، نحوه جذب انرژی و رفتار بازگشت ضربه‌زن پس از برخورد ارائه می‌کنند. در هر دو نمونه، تشکیل حلقه بسته نیرو - جابه‌جایی نشان‌دهنده بازگشت ضربه‌زن پس از برخورد و وقوع پدیده بازگشت الاستیک است. بسته بودن منحنی‌ها بیانگر آن است که انرژی اعمالی برای ایجاد نفوذ یا شکست کامل کافی نبوده و ساختار کامپوزیت پس از تحمل ضربه، بخش قابل توجهی از انرژی ذخیره‌شده را مجدداً آزاد کرده است. مطابق جدول 4، حداکثر جابه‌جایی نمونه‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ به ترتیب 5.28 و 3.91 میلی‌متر است که نشان می‌دهد در این سطح انرژی، پاسخ سازه عمدتاً تحت تأثیر تغییر شکل خمشی قرار داشته است. با این حال، تفاوت در شکل حلقه‌های نیرو - جابه‌جایی بیانگر تفاوت در نحوه جذب و بازگرداندن انرژی در دو آرایش لایه‌چینی است. نمونه $[I_2/F_2]_s$ مسیر بارگذاری و باربرداری یکنواخت‌تر و متقارن‌تری را نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر توزیع مناسب‌تر تنش و محدود بودن آسیب‌های داخلی باشد. در مقابل، نمونه $[F_2/I_2]_s$ دارای نوسانات جزئی در طول بارگذاری است که احتمالاً ناشی از آغاز ترک‌های ریز ماتریسی یا جدایش‌های موضعی در فصل مشترک الیاف

³ Perforation

¹ Rebound

² Penetration

اگرچه منحنی‌ها همچنان به صورت بسته مشاهده می‌شوند و وقوع بازگشت الاستیک را نشان می‌دهند، اما فاصله قابل توجه بین مسیر بارگذاری و باربرداری در مقایسه با سطوح انرژی پایین‌تر بیانگر کاهش سهم انرژی برگشتی و افزایش انرژی جذب‌شده توسط ساختار است. به عبارت دیگر، بخشی از انرژی که در انرژی‌های پایین‌تر به صورت الاستیک به ضربه‌زن بازگردانده می‌شد، در این سطح انرژی صرف ایجاد آسیب و تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر شده است. علاوه بر این، افزایش نوسانات در بخش باربرداری، به‌ویژه در نمونه $[F_2/I_2]_s$ ، نشان می‌دهد که فرایند آزاد شدن انرژی ذخیره‌شده در ساختار به صورت یکنواخت انجام نشده است.

به‌منظور درک بهتر نحوه جذب و جذب انرژی در کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا، تغییرات انرژی جذب‌شده بر حسب زمان نیز مورد بررسی قرار گرفت. منحنی‌های انرژی جذب‌شده - زمان اطلاعات ارزشمندی درباره فرایند انتقال انرژی از ضربه‌زن به سازه، میزان انرژی ذخیره‌شده و بازگردانده‌شده در طول برخورد و همچنین کارایی سازه در جذب انرژی ضربه فراهم می‌کنند. در این منحنی‌ها، مقدار بیشینه انرژی جذب‌شده بیانگر حداکثر انرژی منتقل‌شده به نمونه بوده، درحالی‌که اختلاف بین انرژی بیشینه و انرژی نهایی جذب‌شده می‌تواند معیاری از میزان انرژی برگشتی ناشی از پدیده بازگشت الاستیک باشد. از این‌رو، تحلیل منحنی‌های انرژی - زمان در کنار نتایج نیرو - زمان و نیرو - جابه‌جایی، دید جامع‌تری از اثر توالی لایه‌چینی بر رفتار ضربه‌ای و مکانیزم‌های جذب انرژی در کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا ارائه می‌دهد.

شکل 17 تغییرات انرژی جذب‌شده بر حسب زمان را برای کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 5.64 J نشان می‌دهد. در هر دو نمونه، در مراحل اولیه برخورد، انرژی جذب‌شده به صورت پیوسته افزایش می‌یابد که بیانگر انتقال انرژی جنبشی ضربه‌زن به سازه و ذخیره آن به شکل تغییر شکل الاستیک و آسیب‌های اولیه است. روند تقریباً مشابه دو منحنی در این مرحله نشان می‌دهد که هر دو آرایش لایه‌چینی در آغاز برخورد رفتار نزدیک به یکدیگر داشته‌اند. مطابق جدول 4، انرژی جذب‌شده نهایی نمونه‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ در این سطح انرژی به ترتیب 5.27 J و 4.28 J به دست آمده است که نشان‌دهنده تفاوت در میزان انرژی مستهلک‌شده توسط دو آرایش لایه‌چینی است. با ادامه فرایند برخورد، انرژی جذب‌شده در هر دو نمونه به مقدار بیشینه‌ای نزدیک به انرژی اعمالی می‌رسد. رسیدن منحنی‌ها به این نقطه متناظر با لحظه توقف سرعت ضربه‌زن و آغاز بازگشت آن از سطح نمونه است. پس از این مرحله، کاهش انرژی جذب‌شده مشاهده می‌شود که ناشی از بازگرداندن بخشی از انرژی ذخیره‌شده به ضربه‌زن در اثر پدیده بازگشت الاستیک است. میزان افت انرژی پس از رسیدن به مقدار بیشینه، شاخص مناسبی برای ارزیابی سهم رفتار الاستیک و قابلیت بازیابی انرژی در سازه محسوب می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که نمونه $[F_2/I_2]_s$ در پایان برخورد مقدار انرژی جذب‌شده بیشتری را نسبت به نمونه $[I_2/F_2]_s$ حفظ کرده است. این موضوع بیانگر آن است که بخش بزرگ‌تری از انرژی اعمال‌شده در این آرایش به صورت آسیب‌های داخلی و تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر مستهلک شده و انرژی کمتری به ضربه‌زن بازگردانده شده است. در مقابل، نمونه $[I_2/F_2]_s$ افت بیشتری را پس از رسیدن به مقدار بیشینه انرژی نشان می‌دهد که بیانگر سهم بیشتر انرژی برگشتی و رفتار الاستیک‌تر این آرایش است.

این نتایج با مشاهدات حاصل از منحنی‌های نیرو - زمان و نیرو - جابه‌جایی نیز همخوانی دارد. اگرچه در انرژی 5.64 J هر دو نمونه دچار آسیب محدودی شده‌اند، اما حفظ انرژی جذب‌شده بیشتر در نمونه $[F_2/I_2]_s$ نشان می‌دهد که

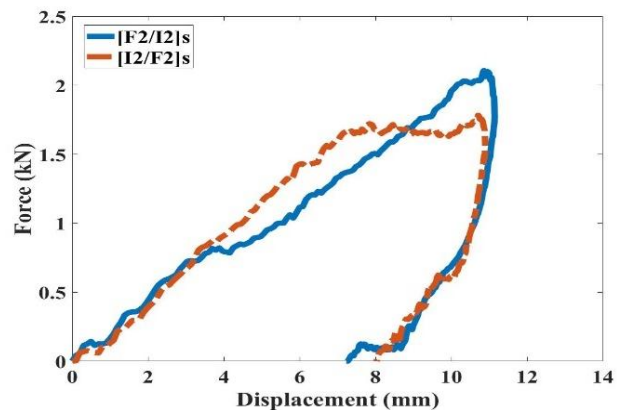


Fig. 15 Force-displacement curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 11.28 J.

شکل 15 منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 11.28 J.

شکل 16 منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ را تحت انرژی ضربه 22.56 J نشان می‌دهد. با افزایش انرژی ضربه به 22.56 J، حداکثر جابه‌جایی هر دو نمونه نسبت به سطوح انرژی قبلی به‌طور محسوسی افزایش یافته است. مطابق جدول 4، جابه‌جایی نهایی نمونه‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ در این سطح انرژی به ترتیب 12.16 و 15.94 میلی‌متر ثبت شده است. این افزایش جابه‌جایی بیانگر آن است که تغییر شکل خمشی به‌تنهایی قادر به جذب انرژی اعمالی نبوده و سهم مکانیزم‌های آسیب‌محور در جذب انرژی افزایش یافته است. در واقع، با افزایش انرژی برخورد، بخش بیشتری از انرژی صرف ایجاد و گسترش آسیب‌های داخلی شده و ساختار برای جذب انرژی ناچار به تحمل تغییر شکل‌های بزرگ‌تری شده است. همچنین حلقه‌های هیستریزس در این سطح انرژی بزرگ‌تر از دو سطح انرژی پیشین هستند که نشان‌دهنده افزایش اتلاف انرژی در طول فرایند برخورد است. بر اساس مطالعات انجام‌شده بر روی کامپوزیت‌های هیبریدی تحت ضربه سرعت پایین، افزایش مساحت محصور شده توسط منحنی نیرو - جابه‌جایی معمولاً با رشد ترک‌های ماتریسی، توسعه لایه‌لایه‌شدن بین‌لایه‌ای، جداشدگی الیاف از ماتریس و افزایش تغییر شکل‌های دائمی همراه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در انرژی 22.56 J، آسیب‌های داخلی نقش پررنگ‌تری در فرایند جذب انرژی ایفا می‌کنند [29].

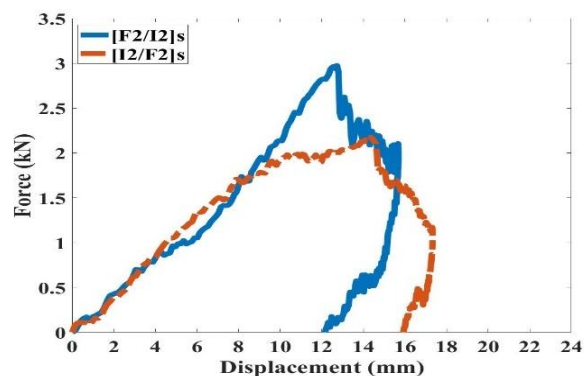


Fig. 16 Force-displacement curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 22.56 J.

شکل 16 منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 22.56 J.

شکل 19 تغییرات انرژی جذب‌شده بر حسب زمان را برای کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 22.56 J نشان می‌دهد. در مراحل اولیه برخورد، روند افزایش انرژی جذب‌شده در هر دو نمونه تقریباً مشابه بوده و بیانگر انتقال تدریجی انرژی جنبشی ضربه‌زن به ساختار کامپوزیت است. با ادامه فرایند برخورد، مقدار انرژی جذب‌شده در هر دو آرایش و به بیشینه خود نزدیک می‌شود که این نقطه متناظر با توقف لحظه‌ای ضربه‌زن و آغاز مرحله بازگشت آن است. مطابق جدول 4، انرژی جذب‌شده نهایی نمونه‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ در این سطح انرژی به ترتیب 22.56 J و 21.65 J به دست آمده است که نشان‌دهنده جذب بخش عمده انرژی اعمالی توسط هر دو آرایش است. پس از رسیدن به مقدار بیشینه، کاهش انرژی جذب‌شده در هر دو نمونه مشاهده می‌شود که ناشی از بازگشت بخشی از انرژی ذخیره‌شده به ضربه‌زن در اثر پدیده بازگشت الاستیک است. باین‌حال، میزان افت انرژی در دو آرایش یکسان نیست. نمونه $[F_2/I_2]_s$ کاهش بیشتری را پس از رسیدن به نقطه اوج نشان می‌دهد، درحالی‌که نمونه $[I_2/F_2]_s$ بخش بزرگ‌تری از انرژی جذب‌شده را تا انتهای برخورد حفظ می‌کند. این موضوع بیانگر آن است که در انرژی 22.56 J آرایش $[I_2/F_2]_s$ توانایی بیشتری در حفظ انرژی مستهلک‌شده و کاهش انرژی برگشتی به ضربه‌زن دارد.

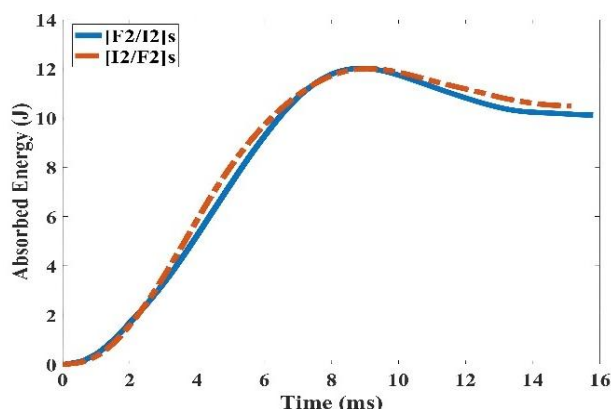


Fig. 18 Absorbed energy-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 11.28 J.

شکل 18 منحنی‌های انرژی جذب‌شده - زمان کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 11.28 J.

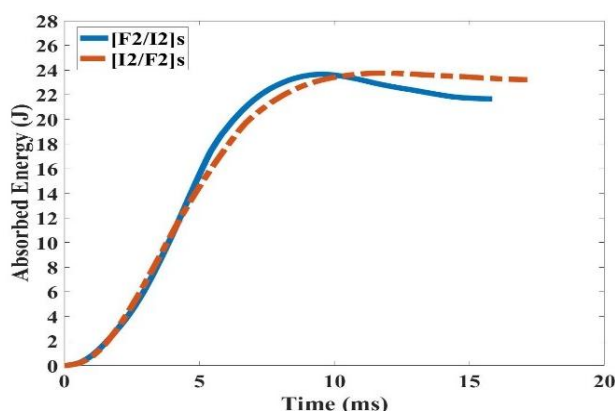


Fig. 19 Absorbed energy-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 22.56 J.

شکل 19 منحنی‌های انرژی جذب‌شده - زمان کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 22.56 J.

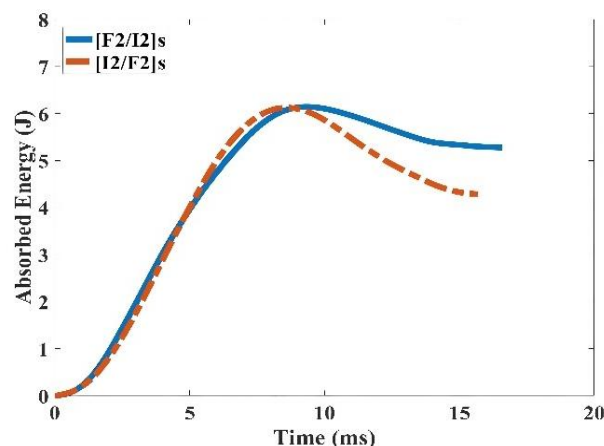


Fig. 17 Absorbed energy-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 5.64 J.

شکل 17 منحنی‌های انرژی جذب‌شده - زمان کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 5.64 J.

این آرایش ظرفیت بالاتری برای جذب انرژی ضربه از طریق مکانیزم‌های آسیب‌زایی در مقیاس ریز دارد، درحالی‌که آرایش $[I_2/F_2]_s$ به دلیل بازگرداندن بخش بیشتری از انرژی به ضربه‌زن، رفتار ارتجاعی‌تر و آسیب کمتری را تجربه کرده است.

شکل 18 تغییرات انرژی جذب‌شده بر حسب زمان را برای کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ تحت انرژی ضربه 11.28 J نشان می‌دهد. مشابه نتایج مشاهده‌شده در انرژی 5.64 J، در مراحل اولیه برخورد، انرژی جذب‌شده در هر دو نمونه به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد که بیانگر انتقال تدریجی انرژی جنبشی ضربه‌زن به سازه است. نزدیکی دو منحنی در این مرحله نشان می‌دهد که هر دو آرایش لایه‌چینی در آغاز فرایند برخورد رفتار مشابهی از خود نشان داده‌اند. مطابق جدول 4، انرژی جذب‌شده نهایی نمونه‌های $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ در این سطح انرژی به ترتیب 10.12 J و 10.49 J به دست آمده است که نشان‌دهنده تفاوت محدود در میزان انرژی مستهلک‌شده بین دو آرایش است. با ادامه تماس، انرژی جذب‌شده در هر دو نمونه افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود می‌رسد. این نقطه متناظر با لحظه‌ای است که سرعت ضربه‌زن به صفر رسیده و فرایند بازگشت آن آغاز می‌شود. پس از رسیدن به این مقدار بیشینه، کاهش تدریجی انرژی جذب‌شده در هر دو نمونه مشاهده می‌شود که ناشی از بازگشت بخشی از انرژی ذخیره‌شده به ضربه‌زن در اثر پدیده بازگشت الاستیک است.

باوجود شباهت مقدار بیشینه انرژی جذب‌شده در دو آرایش، تفاوت در انرژی نهایی جذب‌شده قابل توجه است. نمونه $[I_2/F_2]_s$ در انتهای برخورد مقدار انرژی جذب‌شده بیشتری را نسبت به نمونه $[F_2/I_2]_s$ حفظ کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که در این سطح انرژی، آرایش $[I_2/F_2]_s$ توانسته است سهم بیشتری از انرژی ضربه را در قالب آسیب‌های داخلی و تغییرشکل‌های برگشت‌ناپذیر جذب کند، درحالی‌که در نمونه $[F_2/I_2]_s$ بخش بیشتری از انرژی به ضربه‌زن بازگردانده شده است. این نتیجه با رفتار مشاهده‌شده در منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی نیز همخوانی دارد، جایی که نمونه $[I_2/F_2]_s$ جابه‌جایی بیشتری را پیش از بازگشت ضربه‌زن تجربه کرده بود. همچنین کاهش کمتر انرژی جذب‌شده پس از رسیدن به مقدار بیشینه در نمونه $[I_2/F_2]_s$ بیانگر کاهش سهم انرژی برگشتی و افزایش کارایی جذب انرژی در این آرایش لایه‌چینی است.

پاسخ به ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا، آزمایش‌های تجربی کشش، خمش و ضربه در سطوح مختلف انرژی انجام گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها به شرح زیر است:

- نتایج آزمایش کشش نشان داد که توالی لایه‌چینی تأثیر محسوسی بر خواص کششی کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا دارد. آرایش $[F_2/I_2]_s$ به دلیل قرارگیری لایه‌های کتان در سطوح خارجی، استحکام و مدول کششی بالاتری نسبت به آرایش $[I_2/F_2]_s$ از خود نشان داد.
- در آزمایش خمش نیز نمونه $[F_2/I_2]_s$ عملکرد بهتری داشته و مقادیر بالاتری از استحکام و مدول خمشی را ارائه کرد. این رفتار به نقش مؤثر لایه‌های کتان در تحمل تنش‌های خمشی حداکثر در نواحی سطحی چندلایه نسبت داده می‌شود.
- بررسی منحنی‌های نیرو - زمان در سطوح انرژی 5.64 J و 11.28 J و 22.56 J نشان داد که نمونه $[F_2/I_2]_s$ در تمامی سطوح انرژی دارای نیروی بیشینه بالاتری است. همچنین پاسخ این نمونه در مراحل اولیه برخورد سفتی بیشتری را نشان داد، درحالی‌که منحنی‌های نمونه $[I_2/F_2]_s$ متقارن‌تر بوده و بیانگر توزیع مناسب‌تر تنش و گسترش تدریجی‌تر آسیب در ساختار است.
- تحلیل منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی نشان داد که هر دو آرایش در دو سطح اول انرژی دچار پدیده بازگشت الاستیک شده‌اند. با این حال، نمونه $[I_2/F_2]_s$ به‌ویژه در انرژی‌های بالاتر، جابه‌جایی نهایی بیشتری را تجربه کرد که بیانگر افزایش قابلیت تغییر شکل و جذب انرژی از طریق مکانیزم‌های آسیب‌زایی نظیر لایه‌لایه‌شدن، ترک‌خوردگی ماتریس و جداسازی الیاف از ماتریس است.
- نتایج حاصل از منحنی‌های انرژی جذب شده - زمان نشان داد که با افزایش انرژی ضربه، تفاوت عملکرد دو آرایش لایه‌چینی آشکارتر می‌شود. درحالی‌که در انرژی 5.64 J نمونه $[F_2/I_2]_s$ انرژی نهایی بیشتری را حفظ کرد، در سطوح انرژی 11.28 J و 22.56 J آرایش $[I_2/F_2]_s$ انرژی بیشتری را جذب و در ساختار نگه داشت. این موضوع نشان می‌دهد که قرارگیری لایه‌های اینگرا در سطوح خارجی می‌تواند در شرایط ضربه با انرژی بالاتر موجب بهبود ظرفیت جذب و اتلاف انرژی و در نتیجه افزایش مقاومت به آسیب شود.

همچنین فاصله میان انرژی بیشینه و انرژی نهایی جذب‌شده در نمونه $[I_2/F_2]_s$ کمتر از نمونه $[F_2/I_2]_s$ است که نشان‌دهنده کاهش انرژی برگشتی و افزایش سهم انرژی مصرف‌شده در ایجاد آسیب‌های داخلی و تغییرشکل‌های دائمی در این آرایش است.

مقایسه نتایج شکل‌های 17 تا 19 نشان می‌دهد که با افزایش انرژی ضربه، اختلاف عملکرد دو آرایش لایه‌چینی در جذب انرژی آشکارتر می‌شود. درحالی‌که در انرژی 5.64 J نمونه $[F_2/I_2]_s$ انرژی نهایی بیشتری را حفظ کرده بود، در سطوح انرژی 11.28 J و 22.56 J آرایش $[I_2/F_2]_s$ عملکرد بهتری از خود نشان داده و انرژی بیشتری را در ساختار نگه داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش شدت ضربه، قرارگیری لایه‌های اینگرا در سطوح خارجی چندلایه می‌تواند نقش مؤثرتری در کنترل آسیب و افزایش ظرفیت جذب انرژی ایفا کند.

علاوه بر انرژی جذب‌شده مطلق، بررسی ظرفیت جذب انرژی ویژه امکان ارزیابی کارایی وزنی کامپوزیت‌ها را فراهم می‌کند. این پارامتر با در نظر گرفتن انرژی جذب‌شده نسبت به جرم نمونه، معیار مناسب‌تری برای مقایسه عملکرد سازه‌های سبک‌وزن محسوب می‌شود. همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌شود، مقدار انرژی ویژه در هر دو آرایش با افزایش انرژی ضربه افزایش یافته است که نشان‌دهنده فعال شدن مکانیزم‌های بیشتر جذب انرژی در سطوح بالاتر برخورد است. در آرایش $[F_2/I_2]_s$ ، مقدار انرژی ویژه از 0.08 J/g در انرژی 5.64 J به 0.38 J/g در انرژی 22.56 J افزایش یافت، در حالی‌که این مقدار برای آرایش $[I_2/F_2]_s$ از 0.08 J/g به 0.40 J/g رسید. مقایسه دو آرایش نشان می‌دهد که اگرچه نمونه $[F_2/I_2]_s$ در انرژی بالاتر نیروی بیشینه بیشتری را تحمل می‌کند، اما قرارگیری لایه‌های اینگرا در سطوح خارجی در آرایش $[I_2/F_2]_s$ موجب بهبود اندک ظرفیت جذب انرژی ویژه شده است. این رفتار را می‌توان به چگالی پایین، کرنش شکست بالا و قابلیت تغییرشکل بیشتر الیاف اینگرا نسبت داد که امکان اتلاف انرژی از طریق تغییرشکل‌های گسترده‌تر و کنترل توسعه آسیب را فراهم می‌کند. بنابراین، از دیدگاه طراحی سازه‌های سبک‌وزن، آرایش $[I_2/F_2]_s$ می‌تواند مزیت بیشتری در جذب انرژی به ازای واحد جرم ارائه دهد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر توالی لایه‌چینی بر رفتار مکانیکی و

جدول 4 نتایج کمی آزمون ضربه سرعت پایین

Table 4 Quantitative results of the low-velocity impact test.

نمونه	انرژی سقوط (J)	نیروی بیشینه (kN)	جابه‌جایی نهایی (mm)	انرژی جذب شده (J)	انرژی ویژه (J/g)
$[F_2/I_2]_s$	5.64	1.31	5.28	5.27	0.08
	11.28	2.10	7.27	10.12	0.17
	22.56	2.97	12.16	22.56	0.38
$[I_2/F_2]_s$	5.64	1.45	3.91	4.28	0.08
	11.28	1.78	8.03	10.49	0.19
	22.56	2.17	15.94	21.65	0.40

5- فهرست علائم

E	مدول یانگ (Nm^{-2})
P	نیرو (Nm^{-2})
A_0	سطح مقطع اولیه
ΔL	تغییر طول (m)
L_g	طول گیج (m)
b	عرض مقطع تیر (m)
d	ضخامت مقطع تیر (m)
D	گشتاور انحنای تیر (N.m^2)
L	طول تیر (m)
$v(t)$	سرعت جسم در زمان (m/s)
v_i	سرعت اولیه جسم (m/s)
g	شتاب جاذبه زمین (m/s^2)
t	زمان (s)
$F(t)$	نیروی وارد بر جسم در زمان (N)
m	جرم جسم (kg)
$E_a(t)$	انرژی جذب شده (J)

علائم یونانی

σ	تنش (Nm^{-2})
σ_f	تنش خمشی (Nm^{-2})
ε	کرنش
ε_f	کرنش خمشی
$\delta(t)$	جابه‌جایی جسم در زمان (m/s)
δ_i	جابه‌جایی اولیه جسم (m)

زیرنویس‌ها

0	اولیه
i	مقدار اولیه
a	جذب شده
f	خمش
g	گیج

6- مراجع

- [1] Taheri-Behrooz, F., Torabia, M., "Low-velocity impact performance of the carbon/epoxy plates exposed to the cyclic temperature," *Steel Compos. Struct.*, Vol. 48, No. 3, pp. 305–320, 2023.
- [2] Sadighi, M., Alderliesten, R., "Impact fatigue, multiple and repeated low-velocity impacts on FRP composites: A review," *Composite Structures*, Vol. 297, No. pp. 115962, 2022.
- [3] Mani, M., Thiyagu, M., Krishnan, P. K., "Review of the effects of low-velocity impact events on advanced fiber-reinforced polymer composite structures," *Materials Today: Proceedings*, Vol. No. pp. 2023.
- [4] Parvande, P., Hamedi, M., Rezghi Maleki, H., "Investigation of Glass, Basalt, and Hybrid Fibers Effect on the Mechanical Behavior and Energy Absorption of Fiber–Metal Laminates Based on 5052 Aluminum alloy," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 12, No. 1, pp. 2704–2716, 2025.
- [5] Maleki, H., Roustaei, M., Parvande, P., Meric, D., Gedikli, H., "Investigation of the effect of Kevlar and glass fibers on the flexural and impact behavior of sandwich composite panels with a rubberized cork core," *Steel and Composite Structures*, Vol. 58, No. 4, pp. 2026.
- [6] Rezghi Maleki, H., Nasimi, L., "Effect of date palm fiber length on mechanical and thermal properties of hybrid date palm/glass fiber reinforced composites," *Cellulose*, Vol. No. pp. 1–17, 2025.
- [7] Yorseng, K., Srisuk, R., Ayyappan, V., Thirugnanasambandam, A., Rangappa, S. M., Siengchin, S., "Lightweight Innegra–Hemp/Epoxy hybrid composites: effects of weathering on Mechanical, Thermal, and viscoelastic properties," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 27, No. 3, pp. 1025–1041, 2026.
- [8] Selver, E., Dalfi, H. K., Potluri, P., "Enhancing the mechanical performance of notched glass/epoxy composite laminates via hybridisation with thermoplastic fibres," *Journal of Composite Materials*, Vol. 57, No. 23, pp. 3703–3721, 2023.
- [9] Ayyappan, V., Tingsuthiwat, J., Raghunathan, V., Sanjay, M. R., Siengchin, S., "Quasi-static–cyclic and fatigue properties of carbon–innegra/pineapple multi-material laminates," *Industrial Crops and Products*, Vol. 222, No. pp. 119894, 2024.
- [10] Yorseng, K., Rangappa, S. M., Ayyappan, V., Srisuk, R., Siengchin, S., "Bioepoxy based advanced lightweight hybrid composites from hemp fibers: towards greener production," *Journal of Building Engineering*, Vol. 86, No. pp. 108808, 2024.
- [11] Yorseng, K., Srisuk, R., Ayyappan, V., Thirugnanasambandam, A., Rangappa, S. M., Siengchin, S., "Lightweight Innegra–Hemp/Epoxy hybrid composites: effects of weathering on Mechanical, Thermal, and viscoelastic properties," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. No. pp. 1–17, 2025.
- [12] Karimzadeh, A., Yahya, M., Abdullah, M., Wong, K., "Effect of stacking sequence on mechanical properties and moisture absorption characteristic of hybrid PALF/glass fiber composites," *Fibers and Polymers*, Vol. 21, No. 7, pp. 1583–1593, 2020.
- [13] Sathiyaseelan, P., Sellamuthu, P., Palanimuthu, L., "Influence of stacking sequence on mechanical properties of areca-kenaf fiber-reinforced polymer hybrid composite," *J. Nat. Fibers*, Vol. 19, No. pp. 369–381, 2020.
- [14] Khan, M. Z. N., Hao, Y., Hao, H., Shaikh, F. U. A., Liu, K., "Mechanical properties of ambient cured high-strength plain and hybrid fiber reinforced geopolymer composites from triaxial compressive tests," *Construction and Building Materials*, Vol. 185, No. pp. 338–353, 2018.
- [15] Calabrese, L., Fiore, V., Scalici, T., Valenza, A., "Experimental assessment of the improved properties during aging of flax/glass hybrid composite laminates for marine applications," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 136, No. 14, pp. 47203, 2019.
- [16] Sathishkumar, T., Navaneethakrishnan, P., Shankar, S., Kumar, J., "Mechanical properties of randomly oriented snake grass fiber with banana and coir fiber-reinforced hybrid composites," *Journal of composite materials*, Vol. 47, No. 18, pp. 2181–2191, 2013.
- [17] Venkata Reddy, G., Venkata Naidu, S., Shobha Rani, T., "A study on hardness and flexural properties of kapok/sisal composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 28, No. 16, pp. 2035–2044, 2009.
- [18] Rezghi Maleki, H., Parvande, P., "Comparison of mechanical properties and low velocity impact behavior of basalt/epoxy and basalt/vinyl ester composites," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 4, pp. 2584–2596, 2025.
- [19] dos Santos, F. M., de Souza, T. F., Barquete, D. M., Amado, F. D., "Comparative analysis of the sisal and piassava fibers as reinforcements in lightweight cementitious composites with EVA waste," *Construction and Building Materials*, Vol. 128, No. pp. 315–323, 2016.
- [20] Dash, S., Satpathy, M. P., Routara, B. C., Pati, P. R., Gantayat, S., "Enhancing mechanical and tribological performance of hybrid composites: an experimental study utilizing response surface methodology and firefly algorithm," *Polymer Composites*, Vol. 45, No. 17, pp. 15924–15940, 2024.
- [21] Sapuan, S. M., Aulia, H. S., Ilyas, R. A., Atiqah, A., Dele-Afolabi, T. T., Nurazzi, M. N., Supian, A. B. M., Atikah, M. S. N., "Mechanical properties of longitudinal basalt/woven-glass-fiber-

- reinforced unsaturated polyester-resin hybrid composites," *Polymers*, Vol. 12, No. 10, pp. 2211, 2020.
- [22] Bozkurt, Ö. Y., Erklığ, A., Bozkurt, Y. T., "Influence of basalt fiber hybridization on the vibration-damping properties of glass fiber reinforced epoxy laminates," *Materials Research Express*, Vol. 6, No. 1, pp. 015301, 2018.
- [23] Al-Hajaj, Z., Sy, B. L., Bougherara, H., Zdero, R., "Impact properties of a new hybrid composite material made from woven carbon fibres plus flax fibres in an epoxy matrix," *Composite Structures*, Vol. 208, No. pp. 346–356, 2019.
- [24] Shaik, M. S., Sankarasubramanian, H., Suyambulingam, I., "Effect of Stacking Sequence on the Low Velocity Impact Performance of Abaca/Rubber Hybrid Polymer Composites," *Polymer Composites*, Vol. No. pp. 2026.
- [25] Astm D3039/D3039m-08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM.
- [26] Astm D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM.
- [27] Astm D7136/D7136m-15 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event, ASTM.
- [28] Sarasini, F., Tirillò, J., D'Altilia, S., Valente, T., Santulli, C., Touchard, F., Chocinski-Arnault, L., Mellier, D., Lampani, L., Gaudenzi, P., "Damage tolerance of carbon/flax hybrid composites subjected to low velocity impact," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 91, No. pp. 144–153, 2016.
- [29] Ma, B., Cao, X., Feng, Y., Song, Y., Yang, F., Li, Y., Zhang, D., Wang, Y., He, Y., "A comparative study on the low velocity impact behavior of UD, woven, and hybrid UD/woven FRP composite laminates," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 271, No. pp. 111133, 2024.



ارزیابی رفتار مکانیکی کامپوزیت هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف الکترورسی شده پلی یورتان تحت بارگذاری های کششی و خمشی

سپهر شریعتی راد¹، حسین ابراهیم نژاد خالجیری^{2*}، علی اکبر قادی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان

2- استادیار، گروه مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان

* زنجان، صندوق پستی 45371-38791، ebrahimnezhad@znu.ac.ir، ghadi@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1405/04/21

پذیرش: 1405/06/22

کلیدواژگان

الیاف الکترورسی شده،

کامپوزیت هیبریدی،

پلی یورتان،

خواص مکانیکی.

چکیده

در این کار پژوهشی تاثیر افزودن الیاف الکترورسی شده پلی یورتان بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بررسی شد. بدین منظور، کامپوزیت های حاوی لایه های مختلف الیاف پلی یورتان (0، 1، 2، 3 و 5) و 4 لایه الیاف شیشه به صورت هیبریدی با چیدمان های متقارن ساخته شدند. سپس تحت بارگذاری های کششی و خمشی، خواص مکانیکی آن ها مورد ارزیابی قرار گرفت. تحت بارگذاری کششی، کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده دارای بیشترین استحکام کششی و مدول الاستیک بود، در حالی که افزودن یک لایه الیاف الکترورسی شده پلی یورتان، به ترتیب باعث کاهش 4.5 و 32.4 درصدی این خواص نسبت به کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده شد. در مقابل، افزودن یک لایه الیاف الکترورسی شده موجب افزایش 82 درصدی انرژی جذب شده، از 4.61×10^3 kJ/m³ به 8.39×10^3 kJ/m³ شد. همچنین، بیشترین کرنش شکست، برابر با 0.051 mm/mm، در کامپوزیت حاوی 5 لایه الیاف الکترورسی شده بدست آمد که نسبت به مقدار 0.026 mm/mm در کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده، 96.2 درصد افزایش نشان داد. تحت بارگذاری خمشی، بیشترین استحکام خمشی در کامپوزیت حاوی 2 لایه الیاف الکترورسی شده، با مقدار 262 MPa، حاصل شد که در مقایسه با مقدار 150 MPa در کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده، 74.7 درصد افزایش داشت. همچنین، مدول خمشی با افزایش تعداد لایه های الیاف الکترورسی شده افزایش یافت و از 11.18 GPa در کامپوزیت بدون الیاف الکترورسی شده به 18.72 GPa در نمونه حاوی 5 لایه رسید که بیانگر افزایش 67.3 درصدی است.

Assessing the mechanical behaviour of hybrid electrospun polyurethane-glass fibers/epoxy composite under the tensile and flexural loadings

Sepehr Shariati Rad¹, Hossein Ebrahimnezhad-Khaljiri^{1*}, Aliakbar Ghadi^{1*}

1- Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

* P.O.B. 45371-38791, Zanjan, Iran, ebrahimnezhad@znu.ac.ir, ghadi@znu.ac.ir

Keywords

Electrospun fibers,
Hybrid composite,
Polyurethane,
Mechanical properties.

Abstract

In this research work, the effect of adding electrospun polyurethane fibers on the mechanical properties of epoxy/glass fiber composites was investigated. For this purpose, composites containing different layers of polyurethane fibers (0, 1, 2, 3, and 5) and 4 layers of glass fibers were fabricated in a hybrid manner with symmetric layups. Then, their mechanical properties were evaluated under tensile and flexural loadings. Under tensile loading, the composite without electrospun fibers exhibited the highest tensile strength and elastic modulus, while the addition of one layer of electrospun polyurethane fibers resulted in 4.5% and 32.4% reductions in these properties, respectively, compared with the composite without electrospun fibers. In contrast, the addition of one layer of electrospun fibers resulted in an 82% increase in absorbed energy, from 4.61×10^3 kJ/m³ to 8.39×10^3 kJ/m³. Moreover, the highest fracture strain, equal to 0.051 mm/mm, was obtained in the composite containing 5 layers of electrospun fibers, which showed a 96.2% increase compared with the value of 0.026 mm/mm for the composite without electrospun fibers. Under flexural loading, the highest flexural strength was obtained in the composite containing 2 layers of electrospun fibers, with a value of 262 MPa, which represented a 74.7% increase compared with the value of 150 MPa for the composite without electrospun fibers. Furthermore, the flexural modulus increased with increasing number of electrospun fiber layers, from 11.19 GPa in the composite without electrospun fibers to 18.72 GPa in the specimen containing 5 layers, representing a 67.3% increase.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Shariati Rad, S., Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., Ghadi, A., "Assessing the mechanical behaviour of hybrid electrospun polyurethane-glass fibers/epoxy composite under the tensile and flexural loadings," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 13, No. 1, pp. 2959-2968, 2026. <https://doi.org/10.22068/jstc.2026.2094283.1965>

1- مقدمه

کامپوزیت های هیبریدی با ترکیب دو یا چند نوع تقویت کننده، به عنوان رویکردی مؤثر برای دستیابی همزمان به خواص مکانیکی مطلوب و بهبود عملکرد مورد توجه قرار گرفته اند. تقویت کننده های جدید از جمله تقویت کننده های پلیمری مانند الیاف کولار¹ و پلی اتیلن² رشد و توسعه مناسبی در سال های اخیر داشته اند [1-3] که قابلیت استفاده در کامپوزیت ها بخصوص کامپوزیت های هیبریدی را دارند. رشد و توسعه فناوری های نوین منجر به تولید الیاف پلیمری جدید شده است. یکی از روش های توسعه یافته به منظور تولید الیاف پلیمری، روش الکترورسی³ می باشد که یک روش چندمنظوره و کارآمد برای تولید الیاف بسیار نازک است [4].

فرآیند الکترورسی به این صورت عمل می کند که یک میدان الکتریکی قوی به محلول پلیمری ویسکوز در یک لوله موئین⁴ اعمال می شود. این میدان، دافعه های بین بارهای سطحی مایع ایجاد می کند که با کشش سطحی مخالفت می کند. هنگامی که میدان الکتریکی به اندازه کافی قوی باشد، سطح محلول به شکل یک مخروط تیلور درمی آید. در یک مقدار بحرانی از میدان الکتریکی، نیروی دافعه بر کشش سطحی غلبه کرده و یک جت باردار از محلول، از نوک مخروط خارج می شود. با شتاب گرفتن و نازک شدن جت در میدان الکتریکی، دافعه شعاعی بارها باعث تقسیم جت اولیه به رشته های متعدد می شود که این فرآیند پاشش⁵ نام دارد. این جت ها سپس جامد شده و به صورت الیاف جامد روی یک جمع کننده الکتریکی⁶ قرار می گیرند [5،6].

صغقی و همکاران [7] تاثیر نایلون 6.6 الکترورسی شده بر مود I و II شکست کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه را بررسی کردند. بدین منظور در ابتدا این محققان نایلون 6.6 با غلظت وزنی 14 درصد در حلال اسید فورمیک⁷/کلروفرم⁸ با نسبت 50:50 v/v حل کردند. سپس با اعمال ولتاژ 23 kV، سرعت تزریق 0.005 ml/min، قطر نازل 0.8 mm و فاصله نازل تا جمع کننده 10 cm در مدت زمان 60 min، فرآیند الکترورسی نایلون 6.6 را انجام دادند. قطر الیاف الکترورسی شده در این کار پژوهشی، 150 nm گزارش شد. نتایج بدست آمده نشان داد افزودن الیاف الکترورسی شده نایلون 6.6 به کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه باعث شد تا مود شکست I و II در این کامپوزیت، به ترتیب، 62 و 109 درصد بهبود یابد. نتایج حاصل از بررسی میکروسکوپی نشان داد که نانوالیاف نایلون 6.6 با مکانیزم پل زنی باعث بهبود خواص مود I و II شکست در کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه شده است.

نگوین و همکاران [8] نانوالیاف پلی استایرن با محدوده قطر 40-80 nm را به روش الکترورسی سنتز کردند و تاثیر آن بر مود I تافنس شکست کامپوزیت اپوکسی/الیاف پلی استایرن را بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که افزودن 0.07 wt.% نانوالیاف استایرن به پلیمر اپوکسی باعث شد تا فاکتور تمرکز تنش (K_{IC}) از $0.631 \text{ MPa.m}^{1/2}$ به $0.839 \text{ MPa.m}^{1/2}$ افزایش یابد که بهبود 42.2 درصدی را نشان داد. همچنین تافنس شکست بین لایه های اولیه⁹ و پیشرونده¹⁰ به ترتیب به میزان 43 و 47 درصد بهبود یافتند. نتایج آنالیز میکروسکوپی در این کار پژوهشی نشان داد که بیرون کشیدگی¹¹ الیاف در حین لایه لایه شدگی اولیه¹² باعث بهبود تافنس شکست شده است.

نیسیانی و همکاران [9] تاثیر الیاف الکترورسی شده و اصلاح شده پلی-اکریلونیتریل¹³ بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی الیاف کربن را بررسی کردند. در این کار پژوهشی از پلیمر اصلاح شده اکریلونیتریل متصل شده به گلیسیدیل متااکریلات¹⁴ استفاده و الکترورسی شد که در بین لایه های الیاف کربن در کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن قرار داده شد. نتایج گزارش شده نشان داد که گلیسیدیل متااکریلات نه تنها باعث بهبود استحکام کششی نانوالیاف الکترورسی پلی اکریلونیتریل شده است، بلکه باعث افزایش قطر الیاف نیز شده است. افزودن پلیمر گلیسیدیل متااکریلات باعث شده است که اندرکنش بین الیاف اکریلونیتریل و زمینه اپوکسی بهبود یابد که باعث بهبود 8، 9، 6 و 8 درصدی در خواص استحکام کششی، استحکام برشی، استحکام خمشی و جذب انرژی ضربه کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن حاوی الیاف اکریلونیتریل بدون اصلاح شده است. همچنین نسبت به کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن بدون نانوالیاف اکریلونیتریل، خواص ذکر شده به ترتیب، 28، 41، 32 و 21 درصد بهبود یافتند.

دانگ و همکاران [10] در ابتدا الیاف پلی لاکتیک اسید الکترورسی شده را ساخته و سپس کامپوزیت اپوکسی/الیاف پلی لاکتیک اسید ساخته و خواص مکانیکی آن بررسی شد. میزان الیاف اضافه شده به زمینه اپوکسی، 3، 5 و 10 درصد وزنی بود. نتایج بدست آمده نشان داد که مدول خمشی در نمونه های حاوی 5 و 10 درصد وزنی الیاف الکترورسی شده پلی لاکتیک اسید، به ترتیب 50.8 و 24 درصد بهبود یافت. استحکام خمشی این دو کامپوزیت نیز روند بهبود نشان داد که به ترتیب 31.6 و 4.8 درصد گزارش شد. نتایج آنالیز میکروسکوپی فصل مشترک قوی بین الیاف پلی لاکتیک اسید و زمینه اپوکسی را نشان داد. این محققان بیان کردند که نانوالیاف الکترورسی شده با دارا بودن ساختار شبکه ای مانع مهمی در تحرک زنجیره های مولکولی اپوکسی می باشد که باعث بهبود خواص حرارتی زمینه اپوکسی شده است.

یکی از گروه های بزرگ پلیمری بسیار پرکاربرد در صنعت، خانواده پلیمرهای پلی یورتان می باشد. در میان این گروه، پلی یورتان ترموپلاستیک¹⁵ رفتاری بین یک الاستومر و یک پلاستیک را دارا می باشد. این ویژگی باعث شده است تا پلی یورتان ترموپلاستیک علاوه بر خاصیت ارتجاعی، خواص مکانیکی مناسبی از خود در مقایسه با الاستومرها نشان دهد [11،12]. بررسی های انجام شده نشان می دهد که الکترورسی پلی یورتان ترموپلاستیک یکی از موضوعات بسیار نوین برای تولید مواد جدید برای کاربردهای جدید می باشد. استفاده از الیاف الکترورسی شده پلی یورتان ترموپلاستیک به عنوان تقویت کننده در سازه های کامپوزیتی موضوعی است که تاکنون بررسی نشده است. بنابراین هدف تحقیق حاضر، تولید الیاف پلی یورتان الکترورسی و استفاده از آن به عنوان تقویت کننده دوم در کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه می باشد. لازم به ذکر است الیاف شیشه و پلی یورتان ترموپلاستیک با چیدمان های متفاوت در کامپوزیت زمینه اپوکسی قرار گرفته و خواص مکانیکی آن ها تحت بارگذاری های کششی و خمشی مورد بررسی قرار گرفتند. تعداد لایه های الیاف پلی یورتان الکترورسی شده در کامپوزیت هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان ترموپلاستیک متغیر در نظر گرفته شده در این کار پژوهشی می باشد.

⁹ Interlaminar fracture toughness¹⁰ Propagation interlaminar fracture toughness¹¹ Pulling out¹² Delamination¹³ Polyacrylonitrile¹⁴ Glycidyl methacrylate¹⁵ Thermoplastic polyurethane¹ Kevlar² Polyethylene³ Electrospinning⁴ Spinneret⁵ Spraying⁶ Collector⁷ Formic acid⁸ Chloroform

2- بخش تجربی

1-2- معرفی مواد

در این پژوهش از الیاف شیشه کلاس E با چگالی سطحی 200 g/m^2 و با بافت ساده ساخت شرکت لینتک¹ کشور چین استفاده شده است. همچنین از رزین اپوکسی با نام تجاری KER 828 ساخت شرکت کومهو² (کره جنوبی) و هاردنر آمینی تتا³ خریداری شده از شرکت شیمی افسون استفاده شده است. پلیمر پلی‌یورتان ترموپلاستیک تهیه شده برای این پژوهش TPU با گرید 1190 ساخت شرکت WANHUA Wanthane واقع در چین است. به منظور حل کردن پلی‌یورتان ترموپلاستیک از حلال دی‌متیل‌فرمامید استفاده شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که این حلال با فرمول شیمیایی $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$ امکان حل کردن پلی‌یورتان ترموپلاستیک به منظور استفاده در فرآیند الکترورسی به منظور ساخت الیاف با اندازه، شکل و زمان تبخیر مناسب را دارد.

2-2- فرآیند الکترورسی الیاف پلی‌یورتان ترموپلاستیک

در ابتدا نیاز است تا محلول مورد نیاز برای ساخت الیاف الکترورسی که شامل گرانول پلی‌یورتان و حلال دی‌متیل‌فرمامید DMF است، تهیه شود. بدین منظور، گرانول‌ها با نسبت 1 به 5 با حلال (1 gr پلیمر و 5 gr حلال) توسط دستگاه همزن در دمای اتاق به مدت 12 ساعت داخل بشر شیشه‌ای هم زده شدند تا محلول پلیمری یک دست ساخته شود. در قدم بعدی محلول پلیمری به حجم 5 mL با سرنگ اضافه و در داخل دستگاه الکترورسی قرار داده شد. برای شروع ساخت الیاف، پارامترهای مختلف دستگاه تنظیم شد که شامل ولتاژ 14 kV، نرخ پاشش 3 mL/h، سرعت چرخش جمع‌کننده 500 rpm، فاصله نوک نازل تا جمع‌کننده 20 cm و گیج یا اندازه سوزن 18 بوده است که در این حالت جت به خوبی تشکیل و الیاف به درستی روی ورقه آلومینیومی جمع‌کننده در دمای اتاق جمع‌آوری شدند (شکل 1 الف)). بعد از اتمام فرآیند الکترورسی ورقه‌های آلومینیومی حاوی الیاف در دمای محیط قرار داده شدند تا مقادیر ناچیز حلال به طور کامل تبخیر شود تا برای استفاده در زمینه کامپوزیت مناسب باشد [14,13].

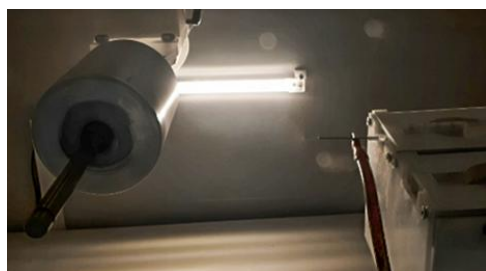
2-3- ساخت کامپوزیت

مرحله بعدی پژوهش، ساخت کامپوزیت زمینه اپوکسی ساده و کامپوزیت زمینه اپوکسی حاوی الیاف الکترورسی می‌باشد. ابتدا الیاف شیشه در ابعاد $22 \times 12 \text{ cm}^2$ به تعداد 4 عدد برش داده شدند. در قدم بعدی نسبت الیاف شیشه و زمینه اپوکسی پیش از افزودن لایه‌های الیاف الکترورسی شده پلی‌یورتان، به ترتیب 50:50 wt.% در نظر گرفته شد. نسبت رزین به هاردنر برابر با 100 به 10 درصد وزنی می‌باشد. بعد از انجام این اقدامات، الیاف شیشه و اپوکسی آماده برای ساخت کامپوزیت شدند که نمونه اول، کامپوزیت حاوی الیاف شیشه (4 لایه الیاف) و بدون الیاف الکترورسی شده بود که به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شد.

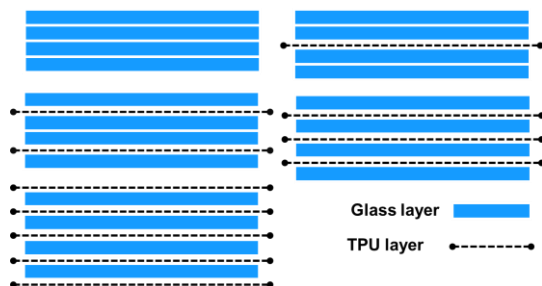
نمونه‌های بعدی به همین شکل با اضافه کردن الیاف الکترورسی شده که به ترتیب حاوی 1، 2، 3 و 5 لایه الیاف پلی‌یورتان می‌باشد که مطابق شکل 1 (ب)، لایه‌چینی و ساخته شدند [15]. هر نمونه بعد از مدت 12 ساعت از قالب خارج و به مدت 7 روز در دمای اتاق قرار گرفتند تا فرآیند پخت آن کامل شود.

2-4- مشخصه‌یابی

نمونه‌های آزمون کشش با توجه به استاندارد ASTM D3039 و با ابعاد $200 \times 20 \text{ mm}^2$ بریده و با سرعت کشش 2 mm/min کشیده شدند. همچنین، نمونه‌های آزمون خمش با توجه به استاندارد ASTM D790 با ابعاد $100 \times 15 \text{ mm}^2$ آماده شده و با سرعت 1 mm/min آزمایش شدند. ضخامت نمونه‌های ساخته شده 0.8 mm می‌باشد که طول سنج در آزمون خمش 32 برابر آن در نظر گرفته شد. به منظور بررسی ریزساختار کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی- گسیل میدانی⁴ (FESEM) استفاده شد.



(الف-ا)



(ب-ب)



(ج-ج)

Fig. 1. The Fabrication process of composites: a) electrospinning process of thermoplastic polyurethane; b) designed different stacking sequences in hybrid glass fibers-TPU fibers/epoxy composites; c) prepared samples

شکل 1 فرآیند ساخت کامپوزیت‌ها: الف) فرآیند الکترورسی پلی‌یورتان ترموپلاستیک، ب) طراحی چیدمان‌های مختلف در کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف TPU، ج) نمونه‌های آماده شده

³ Triethylenetetramine⁴ Field emission scanning electorne microscope¹ Lintex² Kumhu

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی رفتار مکانیکی تحت بارگذاری کششی

شکل 2 نمودار تنش-کرنش مربوط به کامپوزیت های اپوکسی/الیاف شیشه حاوی لایه های مختلف الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان را نشان می دهد. با توجه به این شکل می توان داده های ارزشمندی از رفتار تنش-کرنش کامپوزیت های ساخته شده بدست آورد که تاثیر هیبرید کردن الیاف الکتروریسی شده با الیاف شیشه را نشان می دهد. این داده های ارزشمند شامل استحکام کششی، کرنش شکست، مدول الاستیک و مساحت زیر نمودار تنش-کرنش می باشند. خلاصه نتایج حاصل از نمودارهای تنش-کرنش در جدول 2 آورده شده است. شکل 3 براساس داده های بدست آمده از شکل 2 و جدول 1 رسم شده است. براساس شکل 3 می توان مشاهده کرد که استحکام کششی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بدون الیاف پلی یورتان الکتروریسی شده در حدود 312 MPa می باشد. افزودن یک لایه الیاف الکتروریسی شده باعث شده است تا میزان استحکام کششی اندکی کاهش یافته و به مقدار 298 MPa برسد. این روند کاهشی با اضافه شدن دو لایه الیاف الکتروریسی بیشتر شده، به طوری که میزان استحکام کششی به 262 MPa رسید.

با مقایسه کامپوزیت حاوی دو لایه الیاف الکتروریسی شده با دیگر کامپوزیت ها می توان دریافت که کمترین میزان استحکام کششی در این کامپوزیت بدست آمده است. استحکام کششی در نمونه حاوی سه لایه الیاف الکتروریسی شده تقریباً اختلاف اندکی با استحکام کششی کامپوزیت حاوی یک لایه الیاف الکتروریسی دارد. در نمونه حاوی 5 لایه الیاف الکتروریسی شده استحکام کششی مجدد روند نزولی نشان داده و به مقدار 281 MPa رسید.

این رفتار غیر یکنواخت را می توان به تغییر در چیدمان لایه ای و میزان حضور الیاف الکتروریسی شده در ناحیه بین لایه های الیاف شیشه نسبت داد. حضور لایه های الکتروریسی شده می تواند ضخامت ناحیه غنی از رزین و مسیر انتقال بار بین لایه های تقویتی را تغییر دهد. این موضوع می تواند بر میزان انتقال تنش از زمینه به الیاف شیشه و در نتیجه بر استحکام کششی کامپوزیت اثرگذار باشد. در مطالعات انجام شده بر کامپوزیت های شیشه/اپوکسی حاوی لایه های الکتروریسی شده نیز نشان داده شده است که حضور ساختارهای نانو یا میکروالیاف الکتروریسی شده می تواند ناحیه غنی از رزین بین لایه های تقویتی را تغییر داده و بر پاسخ مکانیکی کامپوزیت اثر بگذارد [17,16]. از طرف دیگر، پلی یورتان ترموپلاستیک دارای رفتار الاستومری و استحکام پایین تری نسبت به زمینه اپوکسی و الیاف شیشه است [18]. بنابراین افزایش مقدار آن در فصل مشترک بین لایه های الیاف شیشه می تواند موجب کاهش ظرفیت انتقال بار و در نتیجه کاهش استحکام کششی شود.

مطالعات پیشین نشان می دهد که حضور لایه های نانوالیافی در کامپوزیت های شیشه/اپوکسی می تواند ساختار ناحیه بین لایه ای، مسیر انتشار ترک و پاسخ مکانیکی کامپوزیت را تغییر دهد [16,7]. از سوی دیگر، شبکه الیاف الکتروریسی شده می تواند با ایجاد پل زنی، بیرون کشیدگی و شکست الیاف و همچنین انحراف یا پین شدن ترک، مسیر انتشار ترک را تغییر داده و انرژی مورد نیاز برای شکست را تحت تاثیر قرار دهد [19]. بنابراین، اثر لایه های الکتروریسی شده بر استحکام تنها تابع تعداد لایه ها نبوده و به نحوه توزیع آن ها، میزان نفوذ رزین و برهم کنش آن ها با زمینه و الیاف شیشه نیز وابسته است. این عوامل می توانند توضیحی برای افزایش جزئی استحکام در نمونه حاوی سه لایه و وجود رفتار غیریکنواخت در استحکام کششی باشد.

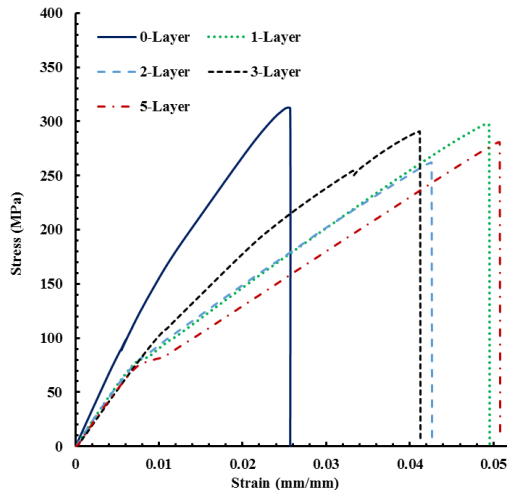


Fig. 2. The stress-strain curve of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the tensile loading

شکل 2 نمودار تنش-کرنش کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان تحت بارگذاری کششی

جدول 1 خلاصه نتایج حاصل از نمودار تنش-کرنش کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان تحت بارگذاری کششی

Table 1 The summary results obtained from stress-strain curve of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the tensile loading

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	کرنش شکست (mm/mm)	مدول الاستیک (GPa)	انرژی جذب شده (10^3 kJ/m^3)
0-Layer	312	0.026	16.93	4.61
1-Layer	298	0.050	11.44	8.39
2-Layer	262	0.043	11.31	6.43
3-Layer	291	0.041	10.42	6.99
5-Layer	281	0.051	10.52	7.90

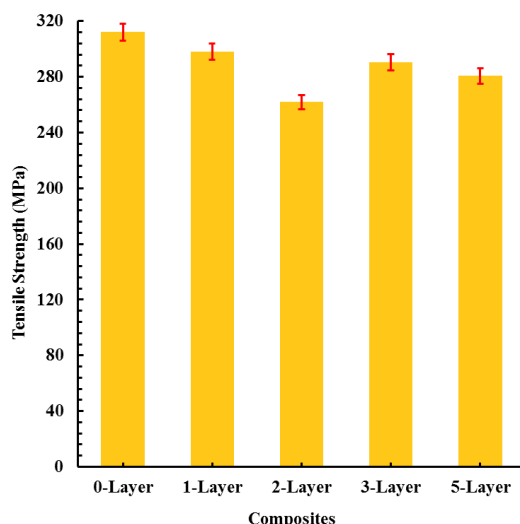


Fig. 3. The effect of different layers of electrospun polyurethane fibers on the fracture strength of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the tensile loading

شکل 3 تاثیر لایه های مختلف الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان بر استحکام شکست کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان تحت بارگذاری کششی

شکل 5 کرنش شکست کامپوزیت های هیبریدی حاوی تعداد مختلفی از لایه های الیاف الکترووریسی شده پلی یورتان را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، کامپوزیت بدون الیاف الکترووریسی شده دارای کرنش شکست 0.026 mm/mm است. با افزودن یک لایه الیاف الکترووریسی شده، کرنش شکست به 0.050 mm/mm افزایش یافت که نشان دهنده افزایش قابل توجه تغییر شکل پذیری کامپوزیت است. این افزایش را می توان به ماهیت الاستومری پلی یورتان و قابلیت تغییر شکل بالاتر آن نسبت به اجزای سخت تر کامپوزیت نسبت داد. حضور شبکه الیاف پلی یورتان در ناحیه بین لایه های می تواند با ایجاد یک ناحیه انعطاف پذیرتر، امکان تحمل تغییر شکل بیشتری را پیش از شکست فراهم کند. مطالعات انجام شده بر کامپوزیت های حاوی لایه های الکترووریسی شده نیز نشان داده اند که حضور نانوالیاف در ناحیه بین لایه های می تواند رفتار تغییر شکل و مکانیزم انتشار ترک را تحت تأثیر قرار دهد [8,7]. با افزایش تعداد لایه های الیاف الکترووریسی شده به دو و سه لایه، کرنش شکست به ترتیب به 0.043 mm/mm و 0.041 mm/mm کاهش یافت. این کاهش را می توان به تغییر در ساختار و شرایط انتقال بار در ناحیه بین لایه های نسبت داد. افزایش تعداد لایه های الکترووریسی شده می تواند مقدار فاز پلی یورتان افزایش داده و در نتیجه نحوه توزیع تنش و انتقال بار بین زمینه اپوکسی و الیاف شیشه را تغییر دهد. با افزایش تعداد لایه ها به 5 لایه، کرنش شکست مجدداً افزایش یافته و به 0.051 mm/mm رسید که بیشترین مقدار در میان نمونه های مورد بررسی است. این افزایش مجدد می تواند ناشی از افزایش سهم فاز انعطاف پذیر پلی یورتان و تغییر در رفتار تغییر شکل ناحیه بین لایه های باشد. در مجموع، رفتار غیر یکنواخت کرنش شکست در این کامپوزیت های هیبریدی را می توان حاصل برهم کنش هم زمان بین ماهیت الاستومری الیاف الکترووریسی شده پلی یورتان، تعداد و چیدمان لایه های الکترووریسی شده، ساختار بین لایه های و شرایط انتقال بار دانست [8,7].

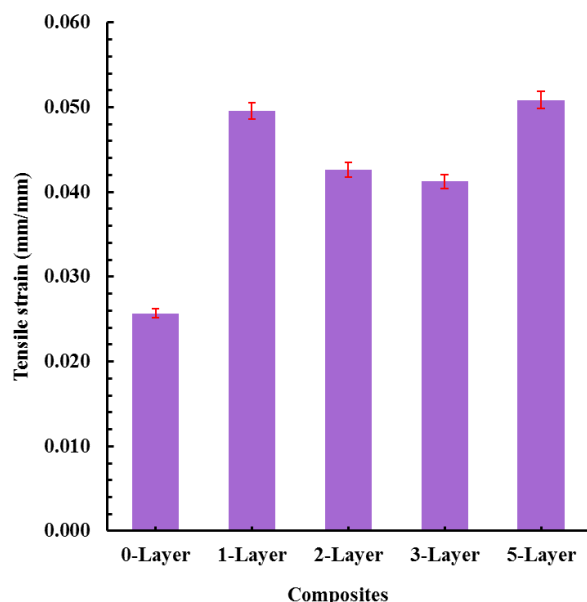


Fig. 5. The effect of different layers of electrospun polyurethane fibers on the fracture strain of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the tensile loading

شکل 5 تاثیر لایه های مختلف الیاف الکترووریسی شده پلی یورتان بر کرنش شکست کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان تحت بارگذاری کششی

شکل 4 مدول الاستیک در کامپوزیت های هیبریدی حاوی لایه های مختلف الیاف الکترووریسی شده پلی یورتان را نشان می دهد. براساس این شکل و جدول 1 می توان دریافت که نمونه کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه با مدول الاستیک 16.93 GPa دارای بیشترین مدول الاستیک در مقایسه با کامپوزیت های هیبریدی است. بررسی نتایج نشان می دهد که الیاف پلی یورتان به دلیل ماهیت الاستومری خود، مدول الاستیک بسیار پایین تری در مقایسه با زمینه اپوکسی و الیاف شیشه دارند؛ بنابراین، جایگزینی بخشی از ساختار سخت کامپوزیت با لایه های الکترووریسی شده پلی یورتان می تواند سختی مؤثر کامپوزیت را کاهش دهد. این رفتار با نتایج گزارش شده برای کامپوزیت های حاوی لایه های الکترووریسی شده نیز مطابقت دارد، که در آن کاهش سختی یا مدول در اثر حضور فازهای پلیمری نرم تر در ساختار کامپوزیت به تفاوت مدول اجزای تشکیل دهنده و تغییر شرایط انتقال بار نسبت داده شده است [8,7]. نمونه های دارای یک و دو لایه الیاف الکترووریسی شده پلی یورتان دارای مدول الاستیک مشابهی هستند که به ترتیب برابر با 11.44 GPa و 11.31 GPa می باشند. این مقادیر نشان دهنده کاهش 32.4 و 33.2 درصدی مدول الاستیک نسبت به کامپوزیت بدون الیاف الکترووریسی شده هستند. با افزایش تعداد لایه های الیاف پلی یورتان، مدول الاستیک همچنان در محدوده مقادیر پایین تر قرار گرفته و به ترتیب به 10.42 GPa و 10.52 GPa برای کامپوزیت های دارای سه و پنج لایه الیاف الکترووریسی شده می رسد. این روند کاهشی را می توان به افزایش سهم فاز پلی یورتان با مدول پایین و تغییر در شرایط انتقال بار در ساختار چندلایه نسبت داد. در واقع، از آنجا که بار اعمالی در راستای کشش باید از زمینه اپوکسی و ناحیه بین لایه های الیاف شیشه منتقل شود، افزایش سهم یک فاز الاستومری در ساختار می تواند سختی مؤثر و ظرفیت انتقال بار سازه را کاهش دهد. بنابراین، این روند کاهشی را می توان حاصل برهم کنش بین اختلاف مدول اجزای تشکیل دهنده، مقدار فاز پلی یورتان و تغییر شرایط انتقال بار در ساختار هیبریدی دانست [8,7].

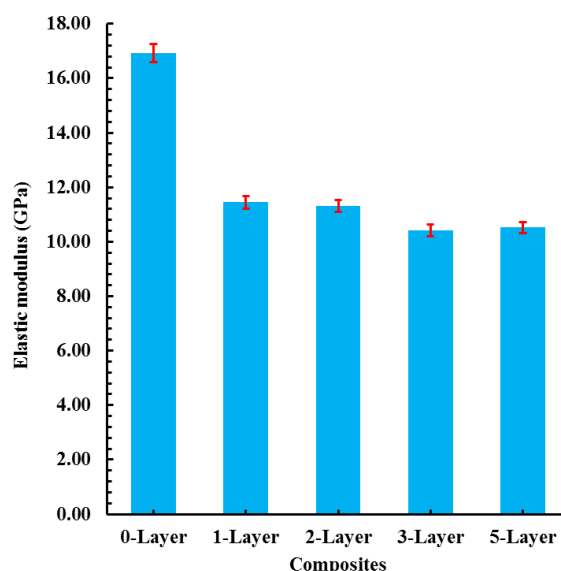


Fig. 4. The effect of different layers of electrospun polyurethane fibers on the elastic modulus of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites

شکل 4 تاثیر لایه های مختلف الیاف الکترووریسی شده پلی یورتان بر مدول الاستیک کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان

2-3- بررسی رفتار مکانیکی تحت بارگذاری خمشی

شکل 7 نمودار تنش- کرنش کامپوزیت های هیبریدی حاوی لایه های مختلف الیاف پلی یورتان الکتروریسی شده را نشان می دهد. خلاصه نتایج حاصل از این آزمون در جدول 2 آورده شده است.

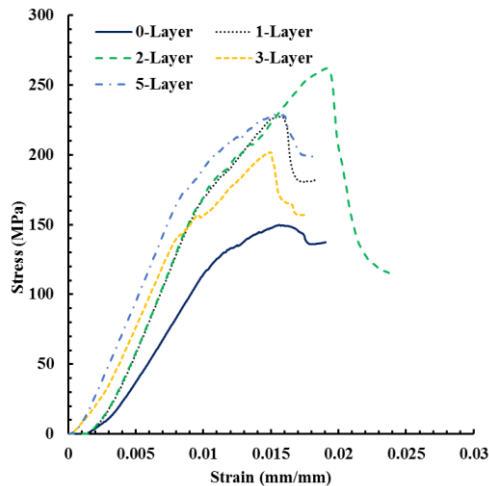


Fig. 7. The stress-strain curve of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the flexural loading

شکل 7 نمودار تنش- کرنش کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان تحت بارگذاری خمشی

جدول 2 خلاصه نتایج حاصل از نمودار تنش- کرنش کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان تحت بارگذاری خمشی

Table 2 The summary results obtained from stress-strain curve of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the flexural loading

کد نمونه	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)	کرنش خمشی (mm/mm)
0-Layer	150	11.18	0.019
1-Layer	227	15.51	0.018
2-Layer	262	16.88	0.024
3-Layer	201	17.26	0.017
5-Layer	229	18.72	0.018

شکل 8 براساس داده های محاسبه شده در جدول 2 رسم شده است که نشان دهنده تغییرات استحکام خمشی بر حسب تعداد لایه های الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان می باشد. براساس این شکل، نمونه کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه دارای استحکام خمشی 150MPa می باشد. با افزودن یک لایه الیاف الکتروریسی شده، میزان استحکام شکست افزایش یافته و به 227 MPa می رسد. این خاصیت در نمونه حاوی دو لایه الیاف الکتروریسی شده روند بهبود خود را ادامه داده و به مقدار 262 MPa می رسد. در کامپوزیت هیبریدی حاوی سه لایه الیاف الکتروریسی شده استحکام خمشی با یک کاهش در مقایسه با کامپوزیت های یک لایه و دو لایه در استحکام خمشی مواجه شد، به طوری که مقدار آن به 201MPa رسید. در نمونه حاوی 5 لایه الیاف الکتروریسی شده دوباره استحکام خمشی بهبود یافته و به 229 MPa رسید. با توجه به داده های بدست آمده می توان دریافت که کامپوزیت حاوی دو لایه الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان و بدون الیاف الکتروریسی شده به ترتیب، بیشترین و کمترین میزان استحکام خمشی در مقایسه با دیگر کامپوزیت های هیبریدی داشتند.

شکل 6 میزان انرژی جذب شده توسط کامپوزیت های هیبریدی مورد مطالعه قبل از شکست تحت بارگذاری کششی را نشان می دهد. براساس این شکل کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بدون الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان با انرژی شکست $4.61 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ کمترین میزان انرژی جذب شده تا قبل از شکست را در مقایسه با کامپوزیت های هیبریدی مورد مقایسه دارد. با توجه به شکل 6 می توان دریافت که کامپوزیت هیبریدی حاوی یک لایه الیاف الکتروریسی شده بیشترین انرژی جذب شده قبل از شکست تحت بارگذاری کششی را دارد. به طوری که در مقایسه با نمونه بدون الیاف الکتروریسی شده، به مقدار 82.0 درصد بهبود در انرژی جذب شده مشاهده می شود. در نمونه حاوی دو لایه الیاف الکتروریسی شده یک افت محسوسی در جذب انرژی نسبت به نمونه حاوی یک لایه الیاف الکتروریسی مشاهده می شود. در نمونه حاوی دو لایه الیاف الکتروریسی شده میزان جذب انرژی بدست آمده برابر با $6.43 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ می باشد که 23.4 درصد کاهش نسبت به نمونه حاوی یک لایه الیاف الکتروریسی شده و 21.7 درصد بهبود نسبت به نمونه بدون الیاف الکتروریسی شده را نشان می دهد. با افزایش تعداد لایه ها به 3 و 5 لایه روند انرژی جذب شده به صورت افزایشی می باشد، به طوری که در این نمونه ها انرژی جذب شده به ترتیب $6.99 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ و $7.90 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ می باشند.

براساس بررسی های انجام شده، انرژی جذب شده وابسته به تنش شکست و کرنش شکست می باشد. با توجه به این که استحکام شکست نمونه حاوی یک لایه بسیار نزدیک به استحکام شکست نمونه بدون الیاف الکتروریسی شده می باشد، اما کرنش شکست این نمونه در مقایسه با کرنش شکست نمونه بدون الیاف الکتروریسی شده، تقریباً دو برابر می باشد. همین امر باعث شده است، که انرژی شکست در این نمونه در مقایسه با دیگر کامپوزیت ها بیشترین مقدار باشد. این امر می تواند نشان دهنده بهبود رفتار شکست در کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه تنها با افزودن یک لایه الیاف الکتروریسی شده (بدون تغییر ضخامت) باشد [20].

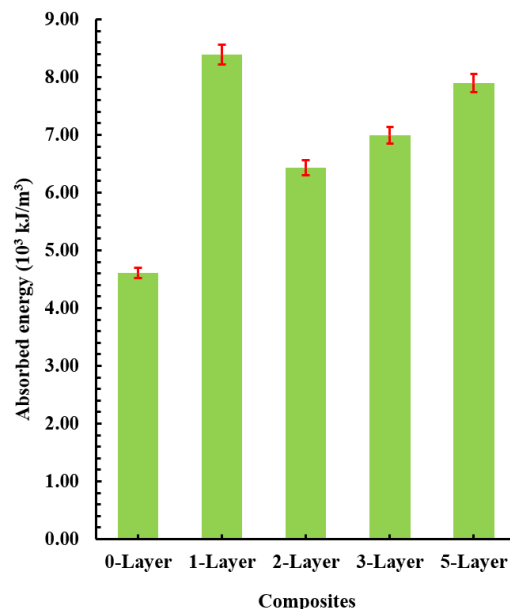


Fig. 6. The effect of different layers of electrospun polyurethane fibers on the absorbed energy of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites under the tensile loading

شکل 6 تاثیر لایه های مختلف الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان بر انرژی جذب شده کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان تحت بارگذاری کششی

کششی نیست و می‌توان انتظار داشت که یک لایه الکترووریسی شده در بارگذاری خمشی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به بارگذاری کششی از خود نشان دهد.

شکل 9 مدول خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه و الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بدون الیاف الکترووریسی شده دارای مدول خمشی 11.18 GPa می‌باشد. در کامپوزیت‌های هیبریدی حاوی یک، دو، سه و پنج لایه الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان مدول خمشی به ترتیب 15.51، 16.88، 17.26، 18.72 و 18.72 GPa می‌باشد. این بدین معنی است که با افزایش تعداد لایه‌های الیاف الکترووریسی شده، مدول خمشی نیز بهبود یافته و در نهایت در نمونه حاوی پنج لایه الیاف الکترووریسی شده به بیشترین مقدار خود یعنی 18.72 GPa می‌رسد که نسبت به مقدار 11.18 GPa در کامپوزیت بدون الیاف الکترووریسی شده، نشان‌دهنده افزایش 67.3 درصدی است. با مقایسه بین نتایج بدست آمده از مدول الاستیک و مدول خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده می‌توان دریافت که الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان با دارا بودن خاصیت الاستومری پلی‌یورتان باعث بهبود خاصیت برگشت‌پذیری در بارگذاری‌های خمشی می‌شود. این رفتار را می‌توان به تفاوت مکانیزم انتقال بار و تغییر شکل کامپوزیت در بارگذاری خمشی نسبت داد. در آزمون خمشی، پاسخ کلی نمونه تنها به سختی اجزای تشکیل‌دهنده وابسته نیست، بلکه رفتار ناحیه بین‌لایه‌ای و نحوه توزیع تنش در هنگام اعمال بار نیز نقش مهمی دارد. شبکه الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان می‌تواند در ناحیه بین‌لایه‌ای با زمینه اپوکسی برهم‌کنش داشته و تغییر شکل موضعی و انتشار آسیب را تحت تأثیر قرار دهد. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که حضور لایه‌های الکترووریسی شده در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی می‌تواند رفتار مکانیکی و پاسخ بین‌لایه‌ای کامپوزیت را تغییر دهد.

بنابراین، افزایش تدریجی مدول خمشی با افزایش تعداد لایه‌های الکترووریسی شده را می‌توان به تغییر در رفتار ناحیه بین‌لایه‌ای، توزیع تنش و محدود شدن تغییر شکل موضعی در ساختار هیبریدی نسبت داد. همچنین، ماهیت الاستومری پلی‌یورتان امکان تحمل تغییر شکل و بازتوزیع تنش در ناحیه بین‌لایه‌ای را فراهم می‌کند و می‌تواند از تمرکز شدید تغییر شکل در یک ناحیه جلوگیری کند. در نتیجه، اگرچه پلی‌یورتان به‌تنهایی دارای سختی کمتری نسبت به الیاف شیشه است، حضور کنترل‌شده آن در ساختار چندلایه می‌تواند پاسخ خمشی کل کامپوزیت را از طریق تغییر رفتار بین‌لایه‌ای تحت تأثیر قرار دهد. افزایش پیوسته مدول خمشی از 11.18 GPa در نمونه بدون الیاف الکترووریسی شده به 18.72 GPa در نمونه حاوی پنج لایه نیز نشان می‌دهد که در شرایط آزمون حاضر، افزایش تعداد لایه‌های الکترووریسی شده موجب تغییر مطلوب پاسخ خمشی کامپوزیت شده است. از این رو، رفتار مدول خمشی را نمی‌توان صرفاً بر اساس مدول پایین‌تر پلی‌یورتان نسبت به الیاف شیشه تفسیر کرد، بلکه باید نقش هم‌زمان چیدمان لایه‌ای، رفتار بین‌لایه‌ای، انتقال تنش و قابلیت تغییر شکل پلی‌یورتان را نیز در نظر گرفت [21-23].

شکل 10 رفتار کرنشی کامپوزیت‌های هیبریدی و غیرهیبریدی ساخته شده تحت بارگذاری خمشی را نشان می‌دهد. براساس این شکل می‌توان دریافت که میزان کرنش خمشی قبل از شکست در نمونه‌های حاوی یک، سه و پنج لایه تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با نمونه بدون الیاف الکترووریسی شده نشان نداد. این نتایج می‌تواند فرضیه بهبود رفتار برگشت‌پذیری در کامپوزیت‌های ساخته شده را تایید نماید.

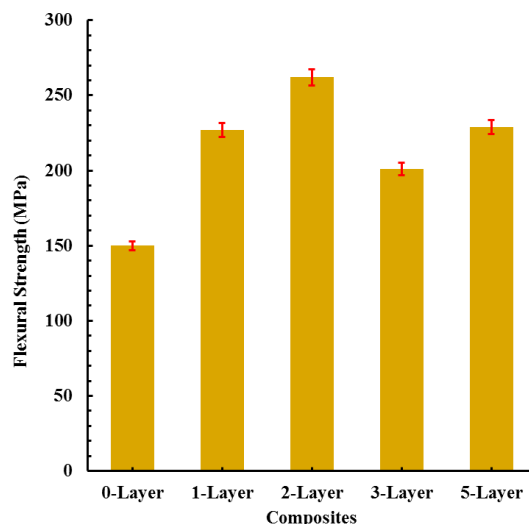


Fig. 8. The effect of different layers of electrospun polyurethan fibers on the flexural strength of hybrid glass fibers-electrospun polyurethan fibers composites

شکل 8 تاثیر لایه‌های مختلف الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان بر استحکام خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی‌یورتان

با نگاه عمیق‌تر به نتایج بدست آمده، دو رفتار قابل توجه در خواص مکانیکی مشاهده می‌شود. با تغییر چیدمان در لایه‌چینی کامپوزیت‌های هیبریدی روند بهبود استحکام خمشی تغییر می‌کند. همچنین با مقایسه داده‌های استحکام کششی می‌توان دریافت که لایه‌های الیاف الکترووریسی شده در بارگذاری عمود بر این الیاف مقاومت خوبی از خود نشان داده، اما در بارگذاری کششی چنین رفتاری مشاهده نمی‌شود.

این تفاوت در پاسخ کامپوزیت تحت بارگذاری‌های مختلف را می‌توان به نقش متفاوت لایه‌های الکترووریسی‌شده در انتقال بار و کنترل آسیب نسبت داد. در بارگذاری خمشی، ایجاد تنش‌های کششی و فشاری در مقطع کامپوزیت موجب می‌شود نواحی بین‌لایه‌ای و برهم‌کنش میان لایه‌های تقویتی نقش مهمی در آغاز و انتشار آسیب داشته باشند. در این شرایط، شبکه الیاف الکترووریسی‌شده می‌تواند با ایجاد برهم‌کنش با زمینه و ترک‌های در حال رشد، موجب تغییر مسیر انتشار ترک و افزایش مقاومت در برابر گسترش آسیب شود. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که استفاده از لایه‌های الیافی الکترووریسی‌شده در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی می‌تواند با فعال کردن مکانیزم‌هایی مانند پل‌زنی الیاف، انحراف مسیر ترک و جلوگیری از گسترش سریع آسیب، رفتار بین‌لایه‌ای کامپوزیت را بهبود دهد [7، 8]. در مقابل، در بارگذاری کششی، بخش عمده بار در راستای الیاف شیشه و درون صفحه کامپوزیت منتقل می‌شود و بنابراین ظرفیت تحمل بار بیشتر به عملکرد الیاف شیشه و انتقال مؤثر تنش از زمینه به این الیاف وابسته است. در این حالت، حضور فاز پلی‌یورتان با ماهیت الاستومری و انعطاف‌پذیری بالاتر می‌تواند انتقال مستقیم بار به الیاف شیشه را تحت تأثیر قرار دهد و الزاماً به افزایش استحکام کششی منجر نشود. از سوی دیگر، افزایش تعداد لایه‌های الکترووریسی‌شده می‌تواند نحوه توزیع این فاز در ساختار چندلایه و برهم‌کنش آن با لایه‌های شیشه و زمینه اپوکسی را تغییر دهد. بنابراین، اثر آن بر خواص مکانیکی به نوع و جهت بارگذاری وابسته خواهد بود. از این جهت، افزایش مقاومت در برابر آسیب بین‌لایه‌ای یا بهبود استحکام خمشی لزوماً به معنای افزایش استحکام

گذاشته و الیاف با کیفیت مطلوب را ندهد. بنابراین با انتخاب دقیق عامل‌های تاثیرگذار می‌توان از تشکیل این زائده‌ها جلوگیری نمود.

با نگاه دقیق‌تر به تصویر میکروسکوپی الیاف الکترووریسی شده می‌توان دریافت که سطح الیاف الکترووریسی شده کاملاً صاف نمی‌باشد و اندکی زبری در سطح دیده می‌شود. وجود زبری سطح باعث ایجاد اتصال مناسب بین زمینه اپوکسی و الیاف الکترووریسی شده می‌شود. به عبارت دیگر، وجود سطح ناصاف در حین ساخت کامپوزیت باعث می‌شود تا زمینه مایع آن سطح را خیس نماید و پس از فرآیند پخت باعث تشکیل قفل‌های مکانیکی² شود [24]. تشکیل این قفل‌های مکانیکی باعث بهبود چسبندگی الیاف به زمینه و امکان انتقال مناسب‌تر بار به الیاف شود.

شکل 12 آنالیز میکروسکوپی از سطح مقطع شکست کامپوزیت هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی‌یورتان الکترووریسی شده را نشان می‌دهد. در این شکل، برای الیاف شیشه و پلی‌یورتان، مکانیزم شکست الیاف، پدیده بیرون کشیدگی الیاف و همچنین عبور ترک از میان الیاف برای الیاف شیشه مشاهده می‌شود. شکست الیاف نشان‌دهنده مشارکت الیاف در انتقال و تحمل بار اعمال شده تا رسیدن به نقطه شکست است. همچنین، بیرون کشیدگی الیاف و تغییر مسیر ترک در ساختار کامپوزیت از جمله مکانیزم‌هایی هستند که می‌توانند با افزایش مسیر انتشار ترک و مصرف انرژی بیشتر در فرآیند شکست، بر رفتار شکست و قابلیت جذب انرژی کامپوزیت اثرگذار باشند. با نگاه دقیق‌تر به شکل 12، لایه الکترووریسی شده قرارگرفته بین لایه‌های الیاف شیشه نیز قابل مشاهده است. در ناحیه مورد بررسی، نشانه مشخصی از جدایش گسترده بین لایه‌ای در فصل مشترک لایه الیاف شیشه و لایه الکترووریسی شده مشاهده نمی‌شود. این مشاهده می‌تواند بیانگر چسبندگی مناسب در این ناحیه باشد که احتمالاً به بهم‌کنش مناسب میان زمینه اپوکسی و الیاف الکترووریسی شده مربوط است [21,20]. بنابراین، شکست مشاهده‌شده را نمی‌توان صرفاً به جدایش بین لایه‌ای نسبت داد، بلکه مجموعه‌ای از مکانیزم‌های شکست شامل شکست الیاف، بیرون کشیدگی الیاف و عبور یا تغییر مسیر ترک در ساختار کامپوزیت در فرآیند شکست نقش دارند.

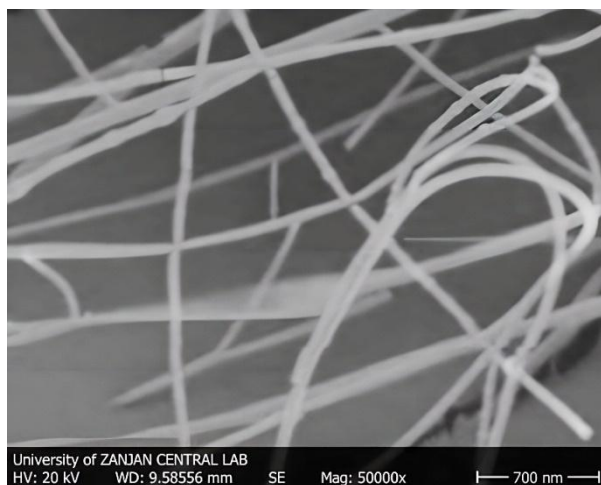


Fig. 11. The FESEM analysis from electrospun polyurethan fibers for using in hybrid glass fibers-electrospun polyurethan fibers composites

شکل 11 آنالیز FESEM از الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان به منظور استفاده در کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی‌یورتان

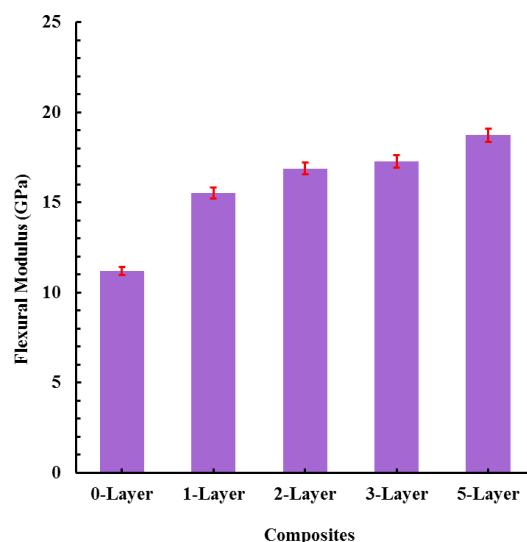


Fig. 9. The effect of different layers of electrospun polyurethan fibers on the flexural modulus of hybrid glass fibers-electrospun polyurethan fibers composites

شکل 9 تاثیر لایه‌های مختلف الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان بر مدول خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی‌یورتان

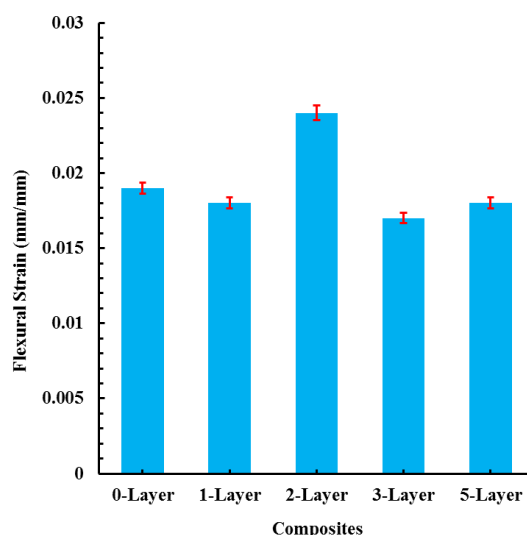


Fig. 10. The effect of different layers of electrospun polyurethan fibers on the flexural strain of hybrid glass fibers-electrospun polyurethan fibers composites

شکل 10 تاثیر لایه‌های مختلف الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان بر کرنش خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی‌یورتان

3-3 بررسی میکروساختاری

شکل 11 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از الیاف پلی‌یورتان الکترووریسی شده است. با توجه به این شکل قطر الیاف الکترووریسی شده در محدوده 50-100 nm اندازه‌گیری شد. میانگین قطر الیاف اندازه‌گیری شده 64 nm با انحراف معیار 12nm می‌باشد. همچنین میانه اندازه قطر الیاف در حدود 61nm می‌باشد. این تصویر نشان می‌دهد در حین فرآیند سنتز الیاف الکترووریسی شده پلی‌یورتان، زائده‌های کروی شکل¹ تشکیل نشده است. تشکیل این زائده‌ها می‌تواند بر فرآیند سنتز الیاف الکترووریسی شده تاثیر

² Mechanical locks

¹ Bead

همچنین، با استفاده از این آنالیز مشخص شد که شکست الیاف، بیرون کشیدگی الیاف و عبور ترک از میان الیاف، از جمله مکانیزم های مشاهده شده در فرآیند شکست این کامپوزیت های هیبریدی بودند.

5- منابع

- [1] Raju, A., Shanmugaraja, M., "Recent researches in fiber reinforced composite materials: A review," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, pp. 9291-9296, 2021.
- [2] Ebrahimnezhad Khaljiri, H., Eslami Farsani, R., Khorsand, H., Abbas Banaie, K., "Hybridization effect of fibers reinforcement on tensile properties of epoxy composites," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.
- [3] Singh, J., Kumar, M., Kumar, S., Mohapatra, S. K., "Properties of glass-fiber hybrid composites: a review," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 56, No. 5, pp. 455-469, 2017.
- [4] Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "Experimental investigation of the synthetic polymeric nanofibers prepared via electrospinning," In *Electrospun Nanofibres*, CRC Press, Boca Raton, pp. 56-77, 2023.
- [5] Xue, J., Wu, T., Dai, Y., Xia, Y., "Electrospinning and electrospun nano fibers : methods, materials, and applications," *Chemical Reviews*, Vol. 119, No. 8, pp. 5298-5415, 2019.
- [6] Al-abduljabbar, A., Farooq, I., "Electrospun polymer nanofibers: processing, properties, and applications," *Polymers*, Vol. 15, No. 1, 65, 2023.
- [7] Saghafi, H., Palazzetti, R., Zucchelli, A., Minak, G., "Influence of electrospun nanofibers on the interlaminar properties of unidirectional epoxy resin/glass fiber composite laminates," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 34, No. 11, pp. 907-914, 2015.
- [8] Nguyen, D. D., Vu, C. M., Choi, H. J., "Improvement of the mode I interlaminar fracture toughness of glass fiber/epoxy composites using polystyrene electrospun nanofibers," *Polymer Bulletin*, Vol. 75, No. 11, pp. 5089-2189, 2018.
- [9] Neisiany, R. E., Khorasani, S. N., Naeimirad, M., Lee, J. K. Y., Ramakrishna, S., "Improving mechanical properties of carbon/epoxy composite by incorporating functionalized electrospun polyacrylonitrile nanofibers," *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 302, No. 5, 1600551, 2017.
- [10] Dong, Y., Mosaval, T., Haroosh, H. J., Umer, R., Takagi, H., Lau, K. T., "The potential use of electrospun polylactic acid nanofibers as alternative reinforcements in an epoxy composite system," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 52, No. 9, pp. 618-623, 2014.
- [11] Cui, M., Chai, Z., Lu, Y., Zhu, J., Chen, J., "Developments of polyurethane in biomedical applications: A review," *Resources Chemicals and Materials*, Vol. 2, No. 4, pp. 262-276, 2023.
- [12] Das, A., Mahanwar, P., "A brief discussion on advances in polyurethane applications," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 93-101, 2020.
- [13] Yang, Z., Peng, H., Wang, W., Liu, T., "Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 116, No. 5, pp. 2658-2667, 2010.

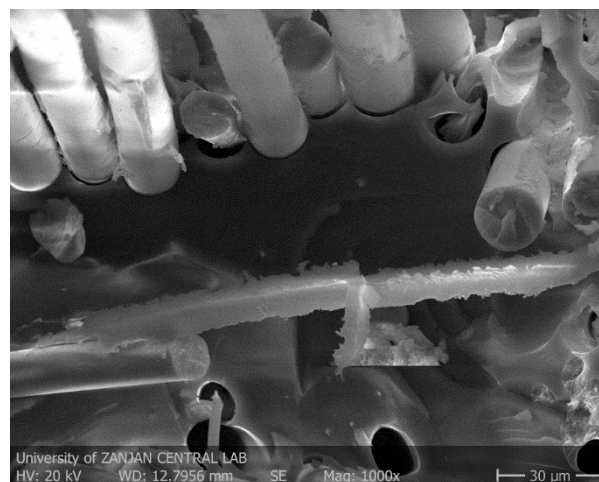


Fig. 12. The FESEM analysis from the fracture surface of hybrid glass fibers-electrospun polyurethane fibers composites

شکل 12 آنالیز FESEM از سطح مقطع شکست کامپوزیت های هیبریدی اپوکسی/الیاف شیشه-الیاف پلی یورتان

4- جمع بندی

در این کار پژوهشی الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان ترموپلاستیک به صورت چیدمان های متفاوت ساخته و به کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه اضافه شد. کامپوزیت های هیبریدی ساخته شده تحت بارگذاری های کششی و خمشی قرار گرفتند. نتایج حاصل از این کار تحقیقاتی به صورت زیر است:

1- در میان کامپوزیت های هیبریدی ساخته شده، کامپوزیت حاوی یک لایه الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان دارای بیشترین استحکام کششی بود که مقدار عددی آن 298 MPa می باشد. همچنین، بیشترین مدول الاستیک در میان کامپوزیت های هیبریدی در این کامپوزیت مشاهده شد که مقدار آن 11.44 GPa می باشد. بیشترین انرژی جذب شده نیز به این کامپوزیت تعلق داشت که مقدار آن برابر با $8.39 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ بود. در مقایسه با کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بدون الیاف الکتروریسی شده، افزودن یک لایه الیاف الکتروریسی شده موجب کاهش 4.5 درصدی استحکام کششی و کاهش 32.4 درصدی مدول الاستیک شد، در حالی که انرژی جذب شده 82 درصد افزایش یافت.

2- بیشترین کرنش شکست تحت بارگذاری کششی در کامپوزیت هیبریدی حاوی 5 لایه به دست آمد که مقدار آن برابر با 0.051 mm/mm بود. این مقدار در مقایسه با مقدار 0.026 mm/mm در کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بدون الیاف الکتروریسی شده، نشان دهنده افزایش 96.2 درصدی کرنش شکست است. 3- کامپوزیت حاوی 2 لایه الیاف الکتروریسی شده با استحکام خمشی 262 MPa، بیشترین استحکام خمشی را در مقایسه با کامپوزیت های هیبریدی و کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه داشت. این مقدار در مقایسه با استحکام خمشی 150 MPa در کامپوزیت بدون الیاف الکتروریسی شده، افزایش 74.7 درصدی را نشان داد.

4- مدول خمشی با افزایش تعداد لایه های الیاف الکتروریسی شده بهبود یافت، به طوری که در نمونه حاوی 8 لایه الیاف الکتروریسی شده مقدار آن به 18.72 GPa رسید. این مقدار در مقایسه با مقدار 11.18 GPa در کامپوزیت بدون الیاف الکتروریسی شده، بیانگر افزایش 67.3 درصدی مدول خمشی است.

5- با استفاده از آنالیز میکروسکوپی مشخص شد که الیاف الکتروریسی شده پلی یورتان ترموپلاستیک دارای میانگین قطر 64 nm هستند و سطحی زبر دارند.

- [14] Kucinska-Lipka, J., Gubanska, I., Janik, H., Sienkiewicz, M., "Fabrication of polyurethane and polyurethane based composite fibres by the electrospinning technique for soft tissue engineering of cardiovascular system," *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 46, No. 2015, pp. 166-176, 2015.
- [15] Bavafa Bigdilou, M., Eslami-Farsani, R., Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "The effect of carbon nanotubes on high velocity impact behavior of hybrid Kevlar- ultrahigh molecular weight polyethylene fibers composite with interlayer configuration", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 533-540, 2020.
- [16] De Schoenmaker, B., Van der Heijden, S., De Baere, I., Van Paepegem, W., De Clerck, K., "Effect of electrospun polyamide 6 nanofibres on the mechanical properties of a glass fibre/epoxy composite", *Polymer testing*, Vol. 32, No. 8, pp. 1495-1501, 2013.
- [17] Metin, F., Avci, A., "Compression and interlaminar shear properties of nanoparticle doped hybrid nanofiber interleaved glass/epoxy composites," *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, Vol. 22, No. 2021, pp.1-9, 2021.
- [18] Zhou, Z., Tang, W., Xu, T., Zhao, W., Zhang, J., Bai, C., "Flexible strain sensors based on thermoplastic polyurethane fabricated by electrospinning: A review," *Sensors*, Vol. 24, No. 15, 4793 , 2024.
- [19] Mahato, B., Lomov, S. V., Shiverskii, A., Owais, M., Abaimov, S. G., A review of electrospun nanofiber interleaves for interlaminar toughening of composite laminates. *Polymers*, Vol. 15, No. 6, 1380, 2023.
- [20] Ghadi, A., Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., Ghezelbash, A., "The simultaneous effect of graphene and nanoclay on the mechanical properties of multi-scale composite by dispersing and coating," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 37, pp. 4732-4738, 2025.
- [21] Palazzetti, R., "Flexural behavior of carbon and glass fiber composite laminates reinforced with Nylon 6, 6 electrospun nanofibers," *Journal of Composite Materials*, Vol. 49, No. 27, pp. 3407-3413, 2015.
- [22] Metin, F., Avci, A., "In-plane quasi-static and out-of-plane dynamic behavior of nanofiber interleaved glass/epoxy composites and finite element simulation," *Composite Structures*, Vol. 270, 114085, 2021.
- [23] Palazzetti, R., Zucchelli, A. J. C. S., "Electrospun nanofibers as reinforcement for composite laminates materials—a review," *Composite Structures*, Vol. 182, pp. 711-727, 2017.
- [24] Taşyürek, M., Kara, M., "Low-velocity impact response of pre-stressed glass fiber/nanotube filled epoxy composite tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 55, No. 7, pp. 915-926, 2021.
- [25] Dhilipkumar, T., Rajesh, M., "Effect of using multiwall carbon nanotube reinforced epoxy adhesive in enhancing glass fiber reinforced polymer composite through cocure manufacturing technique," *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 8, pp. 758-3772, 2021.
- [26] Monticeli, F. M., Pitanga, M. Y., Cioffi, M. O. H., Voorwald, H. J. C., "Mode I and mode II delamination of carbon/glass/epoxy hybrid composite: A statistics-based analysis," *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 8, pp. 3857-3869, 2021.



قالب پیش‌نویس مقاله برای نشریه علوم و فناوری کامپوزیت با بکارگیری امکانات استایل (سبک) در نرم‌افزار ورد (استایل عنوان)

نام و نام‌خانوادگی نگارنده اول¹، نام و نام‌خانوادگی نگارنده دوم^{2*}، نام و ... نگارنده سوم³، ... (استایل نویسندگان)

1- مرتبه علمی نگارنده، رشته تخصصی، نام سازمان، نام شهر (استایل مشخصات نویسندگان)

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* شهر، صندوق پستی 16846-13114، پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات (استایل مشخصات نویسندگان)

اطلاعات مقاله: چکیده (سبک عنوان چکیده)

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان (استایل عنوان کلید واژگان)

حداقل 3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده کاما (استایل کلیدواژگان)

بخش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای کلید واژگان است و تمامی اجزای آن مانند بخش فارسی است. قلم انگلیسی به کار رفته در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو رومن است.

در این قالب (تمپلیت)، شیوه‌ی تهیه‌ی سریع ساختار مقاله با استفاده از امکانات استایل (سبک) نرم‌افزار ورد برای مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت شرح داده شده است. روش قالب‌بندی مقاله، بخش‌های مختلف آن، انواع قلم‌ها و اندازه آن‌ها، به‌طور کامل در استایل‌ها تهیه شده است و کافی است نویسندگان با کپی کردن متن مقاله و چسباندن (پیست) آن در بخش‌های مختلف و انتخاب استایل مربوط، مقاله خود را تهیه نمایند. نویسندگان محترم مقالات باید توجه داشته باشند، مجله از پذیرش مقالاتی که خارج از این قالب تهیه شده باشند، معذور است. برای آماده‌سازی مقاله از همین فایل و کمک گرفتن از نوار ابزار «استایل‌ها» (Styles) استفاده کنید. توجه شود که از نسخه ورد 2010 برای نگارش مقالات استفاده شود تا هماهنگی‌های لازم بین کاربران نظیر سردبیر، دبیر تخصصی، داور و ویراستار برقرار گردد. چکیده برای مقاله پژوهشی کامل حداقل 180 و حداکثر شامل 250 کلمه می‌باشد. چکیده باید به‌طور صریح و شفاف، موضوع و هدف پژوهش، روش‌های انجام و نتایج آن را مطرح کند. در چکیده از ذکر جزئیات کار، شکل‌ها، جدول‌ها، فرمول‌ها، مراجع و پاورقی پرهیز شود. لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.

A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in microsoft word (Style: English Title)

Name Surname¹, Fathollah Taheri-Behrooz^{2*}, Davoud Shahgholian³, ... (Style: Authors)

1- Name of the Department, University Name, City, Country.

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, email@address.ac.ir (Style: Authors' Affiliation)

Keywords (Style: Keywords Title)

Between 3 and 5 words, with separator comma (Style: Keywords), As:
Composites, Foam, Shear, Deflection

Abstract (Style: Abstract Title)

The abstract should briefly summarize the main contents of your contribution. It must be limited between 180 to 250 words for full research paper. The abstract should include a definition of the problem, assumptions, method of solution, summary of results. It should clearly state the objective, results and the conclusion of the work. Please do not insert any picture, diagram, table, references and other media material in your abstract. (Style: Abstract)

1- مقدمه (سبک عنوان سطح 1)
برای آماده‌سازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت)¹ استفاده نمایید. نوع صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان محترم، یک کپی از این فایل را در قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با
کپی و سپس چسباندن (پیست)² متن خود در این فایل، سبک³ مربوط را انتخاب نمایید. همچنین در هر قسمت از مقاله پس از پیست کردن متن می‌توانید از مسیر زیر، به طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:
Paste option → match with Destination format

کپی و سپس چسباندن (پیست)² متن خود در این فایل، سبک³ مربوط را انتخاب نمایید. همچنین در هر قسمت از مقاله پس از پیست کردن متن می‌توانید از مسیر زیر، به طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:
Paste option → match with Destination format

³ Style

¹ Template

² Paste

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Avand, R., Ghaderi Hamidi, A., Pourabdoli, M., "A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in Microsoft word," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 13, No. 1, pp. 2969-2972, 2026. <https://doi.org/...>

...

شکل‌ها و نمودارها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند. برای این منظور، پس از کلیک روی شکل از مسیر زیر محل آن را در مکان‌های ذکر شده، مشخص نمایید:

Picture Tools -> Format -> Arrange -> Position

محورهای مختصات فقط با پارامتر توصیف می‌شوند.

عناوین افقی و عمودی شکل‌ها اگر بصورت بدون بعد باشند، غیرایتنالیک می‌آیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتنالیک می‌آیند (توجه شود واحدها همواره در کل شکل‌ها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتنالیک می‌آیند).

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن² با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکل‌ها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.

شکل‌ها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین³) رسم می‌شود. مجله به‌صورت سیاه و سفید چاپ می‌شود. بنابراین اجزای شکل‌ها و نمودارها باید به‌گونه‌ای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. به‌خصوص در شکل‌هایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.

استفاده از کلمات فارسی در شکل‌ها قابل قبول نمی‌باشد و کلیه توضیحات، ارقام، ارجاع‌ها و غیره بایستی با استفاده از کلمات و ارقام انگلیسی صورت گیرند. این کلمات و ارقام بایستی با استاندارد یکسان و مناسب در کل شکل‌های هر مقاله ارائه گردند.

در کلیه محورهای شکل‌ها باید درجه‌بندی آن‌ها روبه داخل باشد.

از نویسندگان محترم درخواست می‌گردد تا هر شکل و نموداری را به صورت یک مجموعه واحد در مقاله وارد نمایند تا از به هم‌ریختگی شکل و توضیحات آن اجتناب شود.

شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.

برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه شکل‌ها و نمودارها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

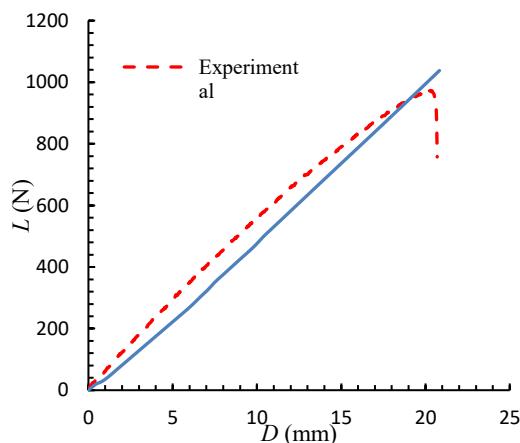


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

پاراگراف‌های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه‌ی 5 میلی‌متر از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

موقع استفاده از علائمی نظیر ، : ، ؛ و غیره، به خاطر داشته باشید که کلیه‌ی این علائم بدون فاصله از حرف قبلی و با یک فاصله از حرف بعدی نوشته می‌شوند.

حداکثر صفحات پیش‌نویس مقاله 15 صفحه (با رعایت قالب فعلی) است. (استایل متن اصلی)

1-1- اشاره به مراجع (استایل عنوان سطح 2 و 3)

اشاره به مراجع با علامت [1] در متن مقاله شروع می‌شود و بقیه مراجع نیز به ترتیب ادامه می‌یابند. مراجع باید به ترتیب ارجاع در متن شماره‌گذاری شوند و نمی‌توان به مرجع شماره 4 زودتر از مرجع شماره 3 اشاره کرد. در اشاره به چند منبع پشت سر هم، به جای ذکر تک‌تک آن‌ها می‌توان یک‌جا اشاره کرد [3-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیرمتوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می‌شود [3,5,7].

از ارجاع به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-15]" خودداری شود. در مقاله‌های پژوهشی ارجاع باید به طور عمده در بخش‌های اصلی مقاله صورت گیرد. مراجعی که فقط در مقدمه آورده شده‌اند در واقع مرجع پژوهش نیستند و تعداد آن‌ها باید اندک باشد.

1-2- اعداد و کلمات انگلیسی (استایل عنوان سطح 2 و 3)

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی¹ مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آن‌ها را در متن مقاله به کار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات به‌صورت زیرنویس اشاره شود.

در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، بایستی تمامی اعداد مقاله به صورت انگلیسی تایپ شوند و از به کار بردن ممیز فارسی خودداری شود. به طور مثال 1.2 صحیح و 1/2 غلط می‌باشد.

اشاره به زیرنویس در هر صفحه از مقاله با عدد 1 شروع می‌شود. باید توجه کرد که از زیرنویس وقتی استفاده می‌شود که اولین بار آن کلمه در متن مقاله استفاده می‌شود و در دفعات بعدی نیازی به تکرار زیرنویس نیست.

2- شکل‌ها، نمودارها و جدول‌ها (استایل عنوان سطح 1)

شکل‌ها، جدول‌ها و نمودارها نیز با فرمت دوستونی در مقاله درج می‌شوند. در صورتی که نتوان آن‌ها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج می‌شوند. (استایل متن اصلی)

2-1- شکل‌ها و نمودارها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم شکل‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، شکل‌ها و نمودارها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند. عنوان شکل‌ها در زیر شکل قرار می‌گیرند (عنوان شکل به صورت انگلیسی در زیر شکل و سپس عنوان فارسی در زیر عنوان انگلیسی قرار می‌گیرد).
- عنوان فارسی شکل بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی شکل بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
- به همه‌ی شکل‌ها و نمودارها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به شکل‌ها در متن، با ذکر شماره شکل و همان سبک متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.

³ Gridlines

¹ English (Style: Sub Title)

² Times New Roman

2-2- جدول‌ها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم جدول‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- جدول‌ها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند که در بالای جدول قرار می‌گیرند (عنوان جدول به صورت فارسی بالاتر از عنوان انگلیسی قرار دارد).
 - عنوان فارسی جدول بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی جدول بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
 - جدول‌ها حتی‌الامکان فقط با سه خط افقی اصلی و بدون خطوط عمودی تنظیم می‌شوند.
 - به همهی جدول‌ها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدول‌ها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.
 - جدول‌ها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند.
 - استفاده از اعداد فارسی در جدول‌ها قابل قبول نمی‌باشد.
 - در صورتی که از جدول‌های سایر منابع استفاده شود، ذکر شماره مرجع در هر دو عنوان فارسی و انگلیسی جدول ضروری می‌باشد.
 - متون داخل جدول‌ها باید به زبان فارسی و با قلم بی‌نازنین در اندازه 9pt تهیه شوند. استفاده از پارامترهای تعریف شده در جداول بخصوص سرستون‌ها بلامانع است. اندازه قلم برای پارامترهای انگلیسی و لاتین، 7pt با نوع قلم تایمز نیو رومن می‌باشد.
 - جدول‌ها را به صورت زمینه سفید تهیه نمایید. از زمینه‌های رنگی و خاکستری در تهیه جدول‌ها پرهیز نمایید.
- جدول 1 نمونه صحیح جدول مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.
- برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه جدول‌ها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

جدول 1 اندازه فونت‌ها (استایل: عنوان جدول)

Table 1 Fonts sizes (Style: Table Title)

زبان متن	فارسی	لاتین
نوع قلم	بی‌نازنین	تایمز نیو رومن
اندازه قلم	10	9
عناوین بخش‌های سطح 1	10	9
عناوین بخش‌های سطح 2	9	8
متن اصلی مقاله	10	9
عنوان شکل‌ها و جدول‌ها	9	8
متن داخل شکل‌ها	---	8
پاورقی و پی‌نوشت	8	7
متن در جدول‌ها	9	8
فرمول‌ها ^(*)	9	9
شماره روابط	---	9
مراجع	---	8

^(*) فونت فرمول لاتین می‌تواند کامبریا مَث نیز باشد.

3- روابط و فرمول‌های ریاضی (استایل عنوان سطح 1)

روابط و فرمول‌های ریاضی با استفاده از ابزار معادله¹ موجود در نرم‌افزار آفیس با قلم کامبریا مَث² 9pt و از سمت چپ تایپ می‌شوند و با شماره‌گذاری از یک

مشخص شده و برای اشاره به آن‌ها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده می‌شود. یادآور می‌شود در نسخه‌های 2007 به بعد نرم‌افزار آفیس، فونت کامبریا مَث به‌طور پیش‌فرض برای نوشتن روابط و فرمول‌ها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتی‌المقدرو برای تایپ فرمول‌ها از نرم‌افزار مَث‌تایپ³ استفاده نشود.

در نوشتن فرمول‌ها رعایت نکات زیر الزامی است:

- 1- در فرمول‌نویسی پارامترها و متغیرها به صورت ایتالیک می‌آیند، ولی اعداد، کلمات، توابع مشخص و واحدها به صورت غیرایتالیک می‌آیند.
- 2- در صورتی که فرمول طولانی باشد و طول آن از یک سطر تجاوز کند، باید در جای مناسب شکسته شده و ادامه فرمول در سطر بعدی آورده شود و از فشرده کردن آن پرهیز شود.
- 3- وقتی ادامه فرمول در سطری بعدی آورده می‌شود، باید از سطر دوم به بعد از سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.
- 4- شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج می‌شود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته می‌شود.
- 5- دقت شود از نقطه ممیز یا همان نقطه پایان جمله $(a.b)$ به جای نقطه ضرب $(a \cdot b)$ استفاده نشود.

$$\overline{Q_{11}^K} = Q_{11}^K \cos^4 \theta^k + 2(Q_{12}^K + Q_{66}^K) \sin^2 \theta^k \cos^2 \theta^k + Q_{22}^K \sin^4 \theta^k \quad (1)$$

$$\Pi = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{N_0} (T_i - U_i + W_i) dt \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xy}^0 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (a-3)$$

4- قواعد نوشتاری (استایل عنوان سطح 1)

تلاش شود در متن مقاله از جملات رسا، گویا و کوتاه استفاده شود و از نوشتن جملات تودرتو پرهیز شود. جداسازی اجزای مختلف یک جمله نیز نقش زیادی در فهم آسان آن دارد. درستی نوشتار بر پایه‌ی املای زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می‌شود.

در افعال حال و گذشته استمراری باید دقت شود که «می» از جزء بعدی فعل جدا نماند. برای این منظور از «فاصله‌ی متصل» استفاده کنید. برای نوشتن فاصله‌ی متصل از «کلید Ctrl» به همراه «کلید -» استفاده کنید. همچنین دقت کنید که جزء «می» و جزء بعدی فعل را به‌صورت یکپارچه ننویسید. بنابراین «می‌شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «می‌شود» است.

در مورد «ها»ی جمع نیز دقت کنید که از کلمه‌ی جمع بسته شده جدا نوشته شود. برای جدانویسی نیز از فاصله‌ی متصل استفاده کنید. مثلاً «شکل‌ها» را به‌صورت «شکل‌ها» بنویسید. جمع بستن کلمات پارسی یا لاتین با قواعد زبان عربی اشتباه است. بنابراین، «پیشنهادهات» و «ساتید» اشتباه و درست آن‌ها «پیشنهاده‌ها» و «استادان» است.

1-4- علائم، نشانه‌ها و ارقام (استایل عنوان سطح 2 و 3)

از علائم و نشانه‌های متداول در زبان فارسی و همچنین از علائم و نشانه‌های به‌کار رفته در متون مهندسی مکانیک می‌توان استفاده نمود. استفاده از ممیز

³ Math Type

¹ Insert -> Symbols -> Equation

² Cambria Math

فارسی خطر به هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم علایم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست علایم باید دقیقاً یکسان باشد.

در صورت نیاز، لیست علایم و نشانه‌ها، در انتهای مقاله و پیش از مراجع درج می‌شود. این لیست به صورت جدول دوستونی و ترتیب الفبایی تنظیم شده و هر سطر به ترتیب شامل نماد و شرح (و ابعاد) آن است. مثال:

5- فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

E مدول یانگ (Nm^{-2})

P نیرو (Nm^{-2})

T دما (K)

علایم یونانی

σ تنش (Nm^{-2})

ε کرنش

بالانویس‌ها

k تعداد لایه

زیرنویس‌ها

cr بحرانی

Ave مقدار متوسط

6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها (استایل عنوان سطح 1)

در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست علایم و نشانه‌ها آورده می‌شود. باید به پیوست‌ها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

7- مراجع (استایل عنوان سطح 1)

تمامی مراجع با قلم تایمز نیو رومن 8 نوشته می‌شوند. شماره مرجع داخل کروشه و با ایجاد بیرون‌زدگی 5 میلی‌متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می‌شود. نکات زیر را در مرجع‌نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

✓ لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.

✓ نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونت‌ها در مرجع‌نویسی باید با همان دقتی که در نمونه‌ها به آن اشاره شده است، رعایت شود.

✓ مجدداً تاکید می‌شود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-10]" خودداری شود.

✓ مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.

✓ از ارجاع به مدارک قدیمی، بی ارتباط با اهداف اصلی مقاله و مطالبی که به صورت توضیحات و قوانین آشکار و آشنا برای مهندسان است، خودداری نمایید. به عنوان مثال، "قانون دوم نیوتن بصورت زیر است [5]". این نوع ارجاع نادرست است و کمکی به خواننده در درک مطلب نخواهد داشت.

✓ از ارجاع به پایان‌نامه‌های کارشناسی خودداری نمایید.

✓ نام مجله‌ها و نظایر آن به‌طور کامل و بدون اختصار آورده شود.

تذکر: برای نوشتن مراجع می‌توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت¹ در نرم‌افزار اندنوت² استفاده کنید. این فایل از طریق وب-سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرم‌افزار انتقال یابد. این پوشه معمولاً در مسیر زیر در دسترس است:

Program Files → EndNote X# → Styles

برای مراجع فارسی در این نرم‌افزار کافی است در قسمت زبان³ مرجع، عبارت (In Persian) درج شود.

مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی، نام، عنوان، نام مجله، شماره جلد، صفحات ابتدایی و انتهایی و سال انتشار.

(توجه شود حروف اول در عناوین مقالات بخش مراجع همه بزرگ باشند)

مثال:

- [1] Switzky, H. and Cary, J. W., "Minimum Weight Design of Cylindrical Structures," AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 2330-2337, 1963.

مراجع فارسی زبان باید به صورت معادل انگلیسی آن‌ها درج شده و از عبارت In Persian استفاده شود مانند:

- [2] Safarabadi, M., "More Accurate Evaluation of Curing Residual Stress Field Considering Interphase Characteristics," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 3-12, 2014.

کتاب‌ها در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ، شماره صفحه و سال انتشار.

مثال:

- [3] Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 1976.

پایان نامه‌ها:

- [4] Carlson, W. R., "Dialectic and Rhetoric in Pierre Bayle," MSc Thesis, Yale University, USA, 1977.

ثبت اختراع:

- [5] Chin D.A. and Irvin D.J., "Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel," US Pat. 6, 685, 442, 2004.

پایگاه‌های الکترونیکی:

- [6] Mauritz K., "Sol-gel Chemistry," <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm>, available in 13, February 2005.

استانداردها:

- [7] Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, D 4493-94, 2000.

³ Language

¹ JSTC.ens (EndNote Style)

² EndNote