



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:

پذیرش:

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 به شمار 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 $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ 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.

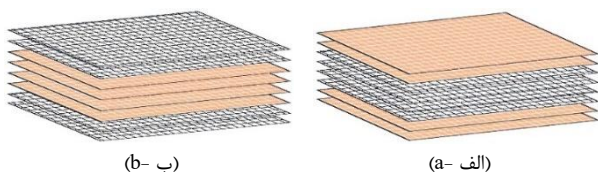


Fig. 1 Schematic illustration of the stacking sequences of the composite laminates: a) $[F_2/I_2]_s$, b) $[I_2/F_2]_s$.

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

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 تحمل شده 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 ساخته شده 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.

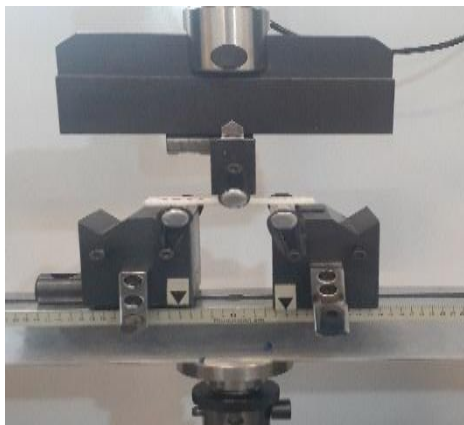


Fig. 3 Schematic view of the three-point bending test performed on composite specimens using the STM-150 universal testing machine.

شکل 3 نمای از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای انجام شده 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 اعمال شده، 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 به‌دست آمده از نمونه‌های آزمایش شده 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 ساخته شده 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 براین اساس، 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.

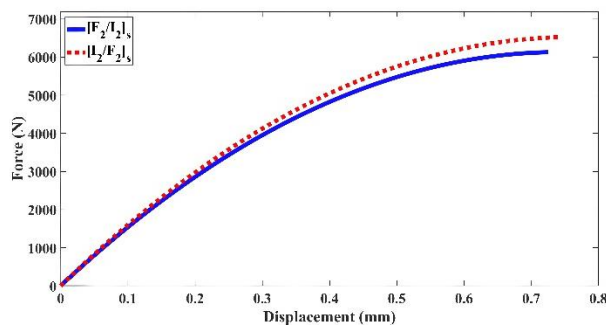


Fig. 5 Force-displacement curves obtained from the tensile test of Innegra/flax composite laminates with different stacking sequences.

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 صلبیت است. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر توالی لایه‌چینی می‌تواند به‌طور هم‌زمان بر صلبیت 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.

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

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.

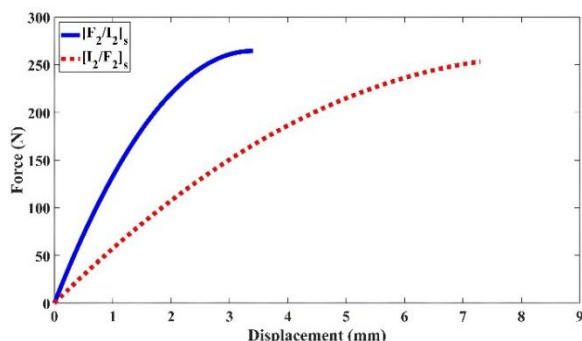


Fig. 6 Force-displacement curves obtained from the flexural test of Innegra/flax composite laminates with different stacking sequences.

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.

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

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.

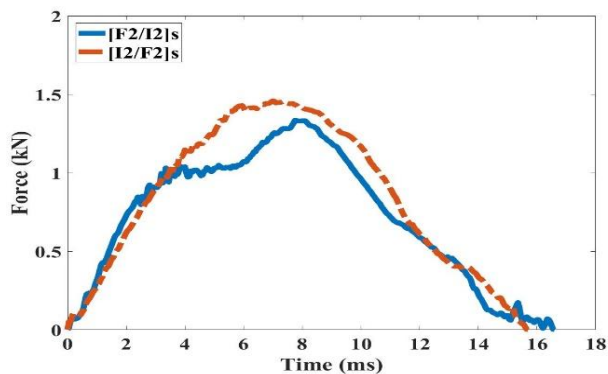


Fig. 8 Force-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 5.64 J.

شکل 8 منحنی‌های نیرو - زمان کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[F_2/I_2]_s$ و $[I_2/F_2]_s$ 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 ترک‌خوردگی 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 چندلایه در برابر بارگذاری ضربه‌ای است. با افزایش زمان تماس، نیرو به‌تدریج به مقدار بیشینه رسیده و سپس روند کاهشی پیدا می‌کند. عدم

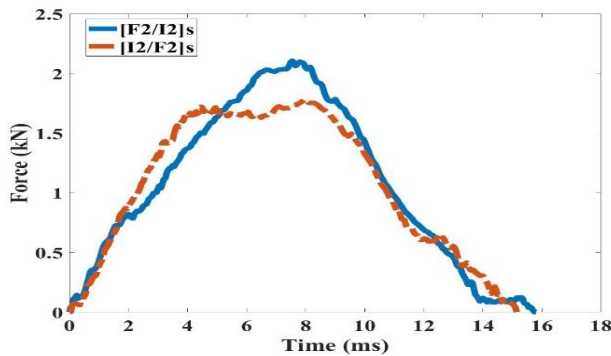


Fig. 10 Force-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 11.28 J.

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

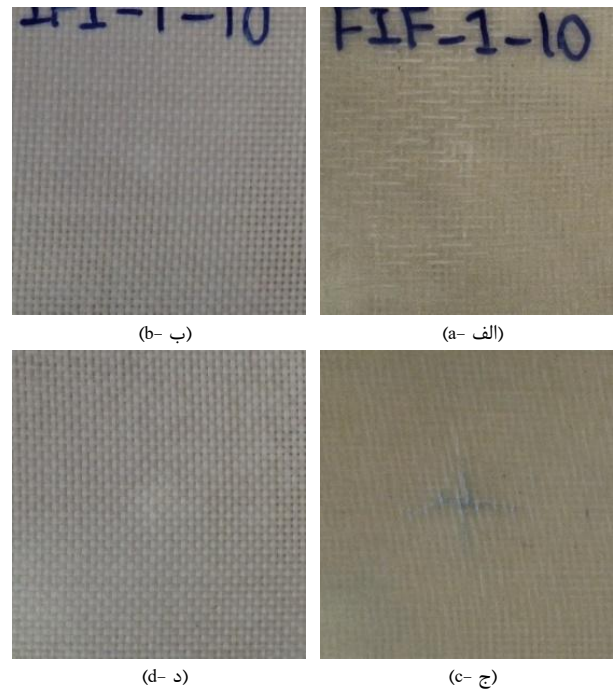


Fig. 9 Macroscopic images of impact-induced damage at an impact energy of 5.64 J: a) front surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, b) front surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen, c) rear surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, and d) rear surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen.

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.

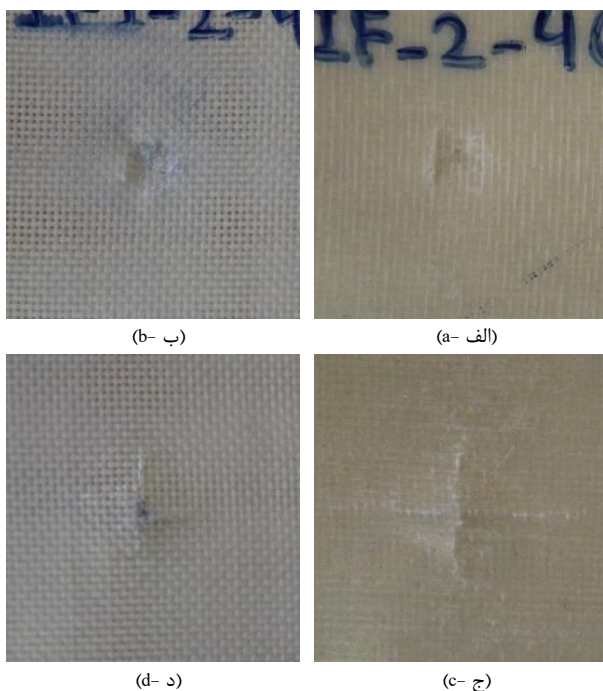


Fig. 13 Macroscopic images of impact-induced damage at an impact energy of 22.56 J: a) front surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, b) front surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen, c) rear surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, and d) rear surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen.

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، جدایش لایه‌ای 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.

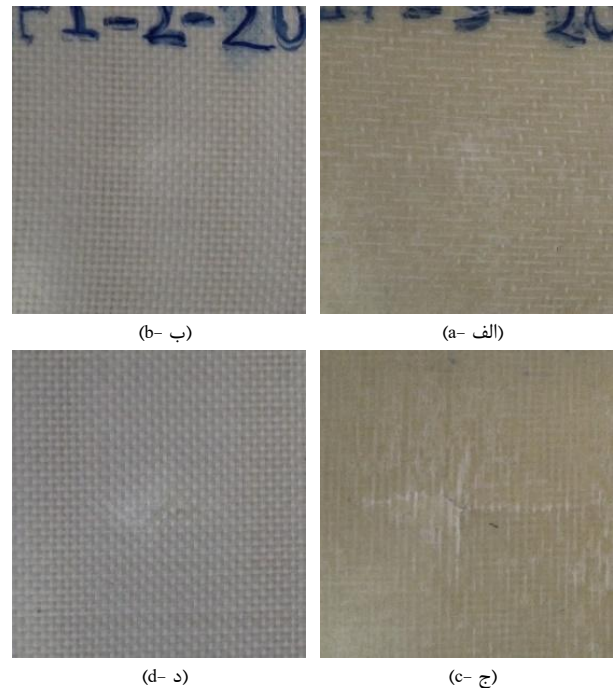


Fig. 11 Macroscopic images of impact-induced damage at an impact energy of 11.28 J: a) front surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, b) front surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen, c) rear surface of the $[F_2/I_2]_s$ specimen, and d) rear surface of the $[I_2/F_2]_s$ specimen.

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 $[I_2/F_2]_s$.

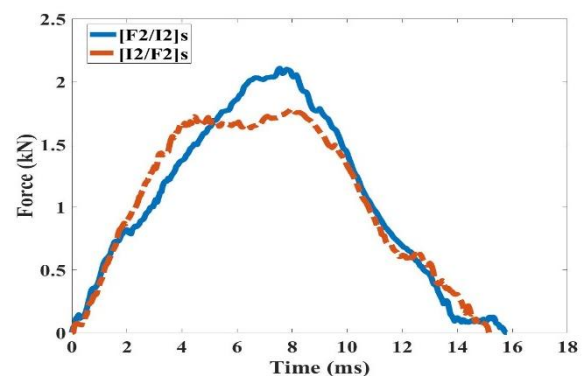


Fig. 12 Force-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 22.56 J.

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.

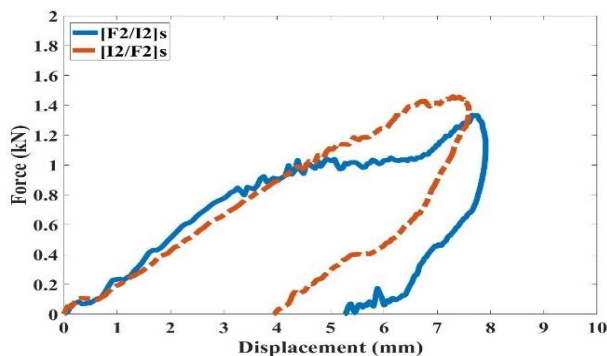


Fig. 14 Force-displacement curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 5.64 J.

شکل 14 منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی کامپوزیت‌های هیبریدی کتان/اینگرا با آرایش‌های لایه‌چینی $[I_2/F_2]_s$ و $[F_2/I_2]_s$ 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 به‌ترتیب 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 الاستیک¹، 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 کامل³، 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 $[I_2/F_2]_s$ و $[F_2/I_2]_s$ 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 $[I_2/F_2]_s$ به‌ترتیب 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

¹ Rebound

² Penetration

³ Perforation

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

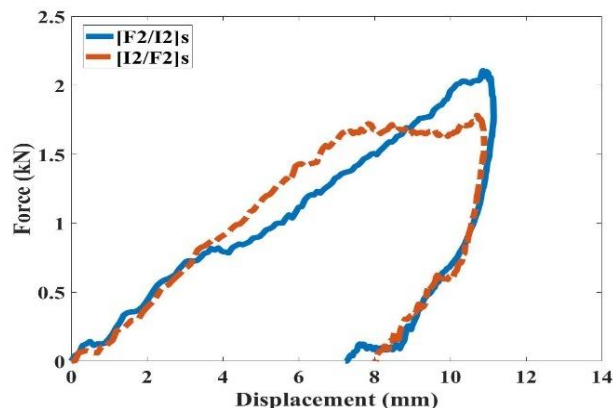


Fig. 15 Force-displacement curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 11.28 J.

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].

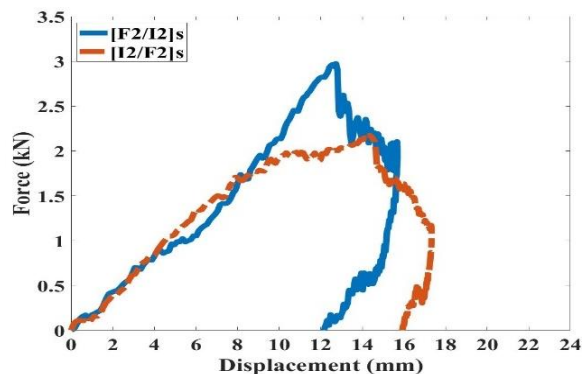


Fig. 16 Force-displacement curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 22.56 J.

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.

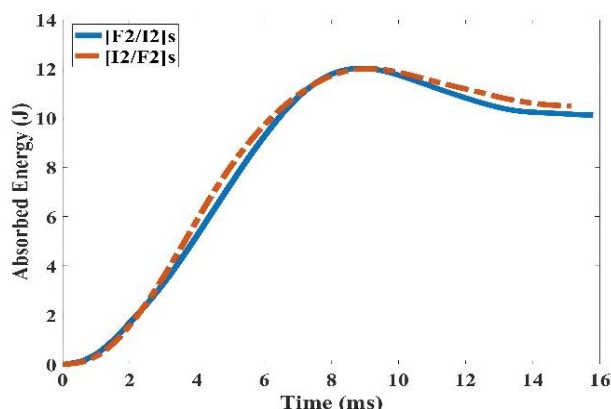


Fig. 18 Absorbed energy-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 11.28 J.

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.

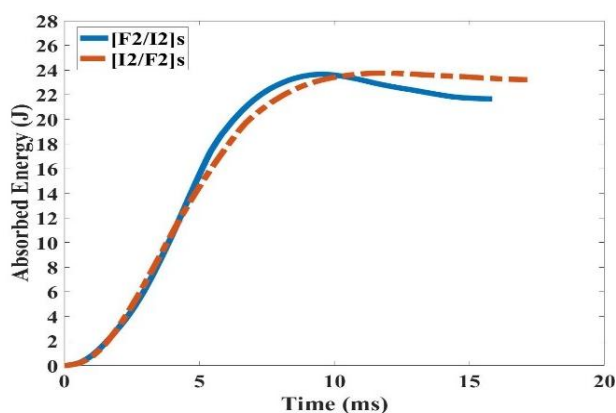


Fig. 19 Absorbed energy-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 22.56 J.

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.

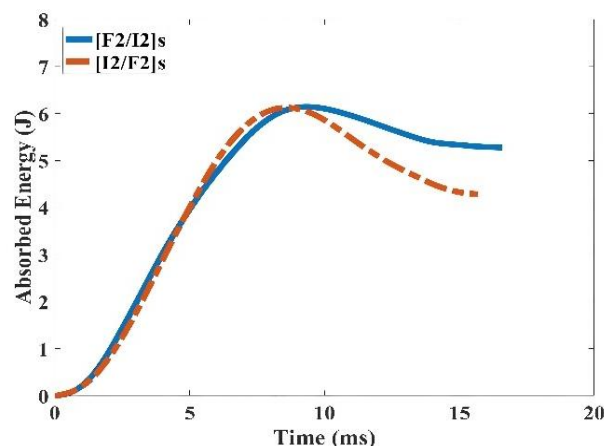


Fig. 17 Absorbed energy-time curves of flax/Innegra hybrid composites with stacking sequences $[F_2/I_2]_s$ and $[I_2/F_2]_s$ under an impact energy of 5.64 J.

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 قابل‌توجه 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 J 5.64، J 11.28 و J 22.56 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 J 5.64 نمونه $[F_2/I_2]_s$ انرژی نهایی بیشتری را حفظ کرد، در سطوح انرژی J 11.28 و J 22.56 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 J 5.64 نمونه $[F_2/I_2]_s$ انرژی نهایی بیشتری را حفظ کرده بود، در سطوح انرژی J 11.28 و J 22.56 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 J 5.64 به 0.38 J/g در انرژی J 22.56 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- نتیجه گیری

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 گِیج (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
$\delta(t)$	جابجایی جسم در زمان (m/s)
δ_i	جابجایی 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.