

## The Impact Resistance of Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review

Mahmood Mehrdad Shokrieh\* and Majid Jamal Omid

Composites Research Laboratory, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and Dynamics, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, P.O. Box: 16846-13114, Iran

Received 4 April 2010, accepted 10 October 2011

### ABSTRACT

Fiber reinforced composites are widely used instead of traditional materials in various technological applications. Therefore, by considering the extensive applications of these materials, a proper knowledge of their impact behavior (from low- to high-velocity) as well as their static behavior is necessary. In order to study the effects of strain rates on the behavior of these materials, special testing machines are needed. Most of the research efforts in this field are focused on application of real loading and gripping boundary conditions on the testing specimens. In this paper, a detailed review of different types of impact testing techniques and the strain rate dependence of mechanical and strength properties of polymer composite materials are presented. In this respect, an attempt is made to present and summarize the methods of impact tests and the strain rate effects on the tensile, compressive, shear and bending properties of the fiber-reinforced polymer composite materials. Moreover, a classification of the state-of-the-art of the testing techniques to characterize composite material properties in a wide range of strain rates are also given.

#### Key Words:

composite, fiber,  
resin,  
strain rate,  
impact loading

(\*To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: [shokrieh@iust.ac.ir](mailto:shokrieh@iust.ac.ir)

# مروری بر مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف

محمود مهرداد شکریه\*، مجید جمال امیدی

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، قطب علمی مکانیک

جامدات تجربی و دینامیک، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶

دریافت: ۸۹/۱/۱۵، پذیرش: ۹۰/۷/۱۸

## چکیده

امروزه، استفاده از مواد کامپوزیتی به عنوان ماده انتخابی به جای مواد فلزی در بسیاری از کاربردهای فناوری مشاهده می‌شود. بنابراین، با توجه به کاربرد گسترده مواد کامپوزیتی در ساخت اجزای مکانیکی، شناخت خواص ضربه‌ای این مواد (از سرعت کم تا زیاد) هم‌چون خواص ایستای آنها به منظور اطمینان یافتن از قابلیت اطمینان سازه حین باربری امری لازم و ضروری است. برای بررسی آثار سرعت کرنش بر رفتار مواد، نیاز به استفاده از دستگاه آزمون مناسبی است که قابلیت انطباق و مدل‌سازی شرایط دقیق رخداد را داشته باشد. به همین دلیل، مطالعات آزمایشگاهی بیشتر روی ایجاد شرایط واقعی در شرایط کنترل شده متمرکز شده‌اند. در این مقاله انواع روش‌های آزمون ضربه و آثار سرعت کرنش بر خواص مکانیکی و استحکامی مواد کامپوزیتی پایه پلیمری به طور مشروح و تفصیلی مرور شده است. به عبارت دیگر، هدف از این کار ارائه خلاصه‌ای از مطالعات و بررسی‌های انجام شده در ارتباط با روش‌های آزمایش ضربه و آثار سرعت کرنش بر خواص کششی، فشاری، برشی و خمشی مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف است. هم‌چنین، در انتها براساس مطالعات گسترده انجام شده، دسته‌بندی کاملی از انواع روش‌های آزمون در سرعت‌های کرنش مختلف ارائه شده است.

## واژه‌های کلیدی

کامپوزیت،  
الیاف،  
رزین،  
سرعت کرنش،  
بارگذاری ضربه‌ای

شرایط بارگذاری ضربه، طراحی سازه‌ای امکان‌پذیر است که بسیار محافظه‌کار یا تخریب‌پیش از موعد را به همراه دارد. طراحی قابل اعتماد سازه‌ها یا اجزای کامپوزیتی در برابر بارهای ضربه‌ای، مستلزم به دست آوردن خواص مواد کامپوزیتی در سرعت‌های کرنش مختلف است. با تعیین خواص مکانیکی ضربه‌ای مواد کامپوزیتی و بهره‌گیری از آنها در فرایند طراحی، صحت رفتار سازه‌های کامپوزیتی در شرایط بارگذاری ضربه‌ای تضمین می‌شود [۸-۴]. روش‌های آزمایشگاهی در تعیین رفتار ضربه‌ای مواد (از سرعت کم تا زیاد) استفاده می‌شوند. توصیف و به دست آوردن کامل رفتار مواد کامپوزیتی نسبت به محدوده سرعت کرنش و حالت بارگذاری، نیازمند بهره‌گیری از محدوده گسترده‌ای از فنون آزمایشگاهی و طراحی نمونه‌های آزمایشی است.

روش‌های آزمون مختلف دارای مزیت‌ها و محدودیت‌های متفاوتی هستند و برای ارایه نتایج خوب و قابل استناد باید دستگاه و روش آزمون به طور مناسب انتخاب شود. برای کاهش هزینه، اغلب آزمون‌ها روی اندازه کوچک‌تری از مدل اصلی انجام می‌شود. در برخی موارد برای اطمینان از صحت نتایج، تجزیه و تحلیل روی دو نمونه با اندازه‌های مختلف اجرا می‌شود. به بیان دیگر، شرایط آزمون باید شرایط واقعی رخداد روی سازه حقیقی را شبیه‌سازی کند، بنابراین انتخاب دستگاه آزمون مناسب بسیار حایز اهمیت است. از مشکلات عمده دانشمندان در بررسی آثار سرعت کرنش روی عملکرد خواص مواد کامپوزیتی، آثار اینرسی وارد شده در سرعت‌های کرنش زیاد است. به عنوان مثال، تجهیزات آزمون می‌تواند در معرض اختلالات اینرسی در محیط با سرعت کرنش متوسط تا زیاد قرار گیرد. این اختلالات به علت پدیده تشدید مکانیکی است که تجهیزات دستگاه حین آزمون‌ها در سرعت‌های زیاد دریافت می‌کنند. پاسخ‌های اینرسی سامانه‌های آزمایشی با ازدیاد سرعت آزمون افزایش یافته و داده‌ها در این حالت مبهم و مشکوک هستند. به همین دلیل، تحلیل داده‌های آزمایش سخت و غیردقیق می‌شود. بنابراین، برای پژوهشگران غلبه بر مشکلات اینرسی در زمان مطالعه آثار سرعت کرنش روی کامپوزیت‌ها بسیار مهم و حایز اهمیت است.

تاکنون استانداردهای مختلفی بر اساس چگونگی طراحی، ساخت و آماده‌سازی نمونه‌های آزمون، انتخاب دستگاه آزمون، سرعت بارگذاری و سایر ملزومات اجرای آزمون برای به دست آوردن و توصیف خواص مواد کامپوزیتی در شرایط بارگذاری ایستا تدوین شده است [۱۶-۹]. حال آن که در به دست آوردن خواص دینامیکی مواد کامپوزیتی بر خلاف خواص ایستایی آنها، استانداردهای مشخصی برای انتخاب دستگاه آزمون، هندسه نمونه‌های آزمون و

مقدمه	۲۵۷
بررسی دستگاه‌ها و روش‌های آزمون ضربه‌ای	۲۵۸
دستگاه‌های آزمون پاندولی	۲۵۸
دستگاه‌های آزمون ثقلی	۲۵۸
دستگاه‌های آزمون تفنگ گازی	۲۵۹
دستگاه‌های آزمون هاپکینسون و کولسکی	۲۶۰
دستگاه‌های آزمون حلقه انبساطی	۲۶۰
آثار سرعت کرنش بر خواص مواد کامپوزیتی	۲۶۱
آثار سرعت کرنش بر خواص کششی و برشی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف	۲۶۱
آثار سرعت کرنش بر خواص فشاری و خمشی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف	۲۶۳
آثار سرعت کرنش بر خواص کششی، فشاری و برشی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف	۲۶۶
بحث و نتیجه‌گیری	۲۶۷
مراجع	۲۷۳

## مقدمه

در گذشته از کامپوزیت‌ها بیشتر در ساخت سازه‌های ثانویه (فرعی) استفاده می‌شده است. اما، امروزه به دلیل افزایش آگاهی در باره نحوه شکل‌دهی این مواد و افزایش رقابت در بازارهای جهانی برای ساخت قطعات سبک، در بسیاری از کاربردهای مهندسی با فناوری پیش‌رفته، کامپوزیت‌ها می‌توانند ماده انتخابی باشند. مزایای خاص کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزات، نظیر نسبت استحکام و سفتی به وزن زیاد، مقاومت خستگی، مقاومت خوردگی و به ویژه خواص ضربه‌ای زیاد، آنها را برای استفاده در بسیاری از اجزای سازه‌های خودروها، هواپیماها و کشتی‌ها مورد توجه فراوان قرار داده است. در بسیاری موارد در بارگذاری با سرعت کرنش (strain rate) زیاد، اولویت انتخاب با مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف است. در صنعت هوایی، سازه‌های اصلی هواپیما، هم‌چون بال‌ها و پره‌های توربین، به واسطه برخورد پرندگان یا اشیای خارجی دیگر در معرض ضربه با سرعت زیاد قرار دارند. هم‌چنین، سازه‌های دریایی، خودرو و ساختمان نیز در معرض ضربه به واسطه اجسام خارجی هستند. به بیان دیگر، بسیاری از سازه‌ها طی دوران کاربری، در شرایط بارگذاری ضربه‌ای هستند [۱،۲]. پژوهش‌های گسترده در بررسی رفتار مواد کامپوزیتی در سرعت‌های کرنش مختلف، رفتار وابسته به سرعت این نوع مواد را به اثبات رسانده است [۳]. در حالت بهره‌گیری از خواص ایستایی این مواد در طراحی سازه‌ها در

استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها شامل یک ضربه‌زننده فولادی آویخته‌اند. Lal در پژوهش‌های خود از یک پرتابه یک‌سر درگیر استفاده کرد [۱۷-۱۹]. ساز و کار این دستگاه شامل یک سر فولادی به قطر ۱ inch که به انتهای یک تیر انعطاف‌پذیر بسته شده است. به طوری که با عقب کشیدن تیر و رها کردن آن، ضربه به جسم وارد می‌شود. در بسیاری از آزمون‌ها برای اعمال ضربه از یک پرتابه سنگین‌تر مجهز به مبدل‌های نیرو یا حسگرهای سرعت استفاده می‌شود (شکل ۱).

### دستگاه‌های آزمون ثقلی [۲۲-۲۸]

این دستگاه‌ها با طرح‌های مختلف در اعمال ضربه با سرعت کم کاربرد بسیار زیادی دارند. این نوع آزمایش با تغییرات سرعت کرنش

جدول ۱- انواع روش‌های آزمون ضربه.

دستگاه آزمون پاندولی	
Lal [۱۷-۱۹] (۱۹۸۳-۸۴)	Sjoblom and Hwang [۲۰] (۱۹۸۹)
دستگاه آزمون ثقلی	
Lifshitz [۲۲] (۱۹۷۶)	Ambur et al. [۲۳] (۱۹۹۵)
Levin [۲۴] (۱۹۸۶)	Tsai and Tang [۲۵] (۱۹۹۱)
Schoeppner [۲۶] (۱۹۹۳)	Wu and Liau [۲۷] (۱۹۹۴)
دستگاه آزمون تفنگ گازی	
Husman et al. [۲۹] (۱۹۷۵)	Cantwell and Morton [۳۰] (۱۹۸۵)
Qian and Swanson [۳۱] (۱۹۸۹)	Jenq et al. [۳۲] (۱۹۹۲)
Delfosse et al. [۳۳] (۱۹۹۳)	Jenq et al. [۳۴] (۱۹۹۴)
دستگاه آزمون هاپکینسون و کولسکی	
Hopkinson [۳۶] (۱۹۱۴)	Davies [۳۷] (۱۹۴۸)
Kolsky [۳۸] (۱۹۴۹)	Griffiths and Martin [۳۹] (۱۹۷۴)
Harding and Welsh [۴۰] (۱۹۸۳)	Staab and Gilat [۴۱] (۱۹۹۳)
دستگاه آزمون حلقه انبساطی	
Johnson et al. [۴۳] (۱۹۶۳)	Fyfe and Rajendran [۴۴] (۱۹۸۰)
Daniel et al. [۴۷] (۱۹۸۱)	Daniel et al. [۴۸] (۱۹۸۲)

چگونگی روند آزمون در محدوده سرعت‌های کرنش مختلف وجود ندارد. هم‌چنین، بر خلاف فلزات که اطلاعات زیادی از رفتار وابسته به سرعت آنها در مراجع مختلف موجود است، درباره آثار سرعت کرنش روی رفتار مواد کامپوزیتی پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف، مدارک یا مستندات مدونی در دست نیست. به دلیل عدم وجود استانداردهای مشخص در محدوده‌های مختلف سرعت کرنش، پژوهشگران به منظور به دست آوردن خواص ضربه‌ای مواد، با توجه به شرایط آزمایشگاهی موجود، نمونه‌های آزمون را با هندسه‌های مختلف طراحی می‌کنند. بر اساس مطالعات انجام شده در این پژوهش درباره رفتار دینامیکی مواد کامپوزیتی یکسان در سرعت کرنش معین، مشاهدات متناقضی وجود دارد.

در این مقاله، انواع روش‌های آزمون با سرعت‌های بارگذاری مختلف و پژوهش‌های منتشر شده در زمینه آثار سرعت کرنش بر خواص کششی، فشاری، برشی و خمشی مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف بررسی شده است. هم‌چنین، براساس مطالعات انجام شده، دسته‌بندی کاملی از انواع روش‌های آزمون در محدوده‌های سرعت کرنش مختلف ارائه شده است. در جدول ۱، انواع دستگاه‌های آزمون ضربه فهرست شده‌اند که برای مطالعه رفتار مواد در برابر ضربه از سرعت کم تا زیاد کاربرد دارند.

### بررسی دستگاه‌ها و روش‌های آزمون ضربه‌ای

طراحی و ساخت قابل اعتماد سازه‌ها و اجزای کامپوزیتی در برابر ضربه نیازمند دانش کامل و درک صحیح پاسخ مواد کامپوزیتی در شرایط بارگذاری ضربه‌ای است. این موضوع مستلزم استفاده از محدوده گسترده‌ای از فنون آزمایشی و طراحی نمونه‌های آزمایش است. هر چند باید گفت، در بسیاری مواقع امکان استفاده از آزمون‌های ضربه در سرعت‌های کرنش مختلف به منظور تعیین روابط اساسی مواد، هنگامی که حالت تنش و کرنش در نمونه یکنواخت نیست و تنش طی بارگذاری ضربه به سادگی قابل پیش‌نباشد، به آسانی مقدور نیست. در این راستا، مطالعات آزمایشگاهی بیشتر روی جای‌گزینی شرایط واقعی در وضعیت‌های کنترل شده تمرکز دارند. در این بخش، انواع دستگاه‌های آزمون ضربه‌ای برای بررسی پاسخ مواد کامپوزیتی الیافی در سرعت‌های بارگذاری مختلف آورده شده است. هر یک از این دستگاه‌ها می‌توانند دارای طرح‌های متعددی باشند.

### دستگاه‌های آزمون پاندولی [۲۱-۱۷]

به طور عمومی برای ایجاد ضربه با سرعت کم از سامانه‌های پاندولی



شکل ۲- دستگاه آزمون ثقلی [۲۸].

### دستگاه‌های آزمون تفنگ گازی [۲۹-۳۵]

این دستگاه‌ها معمولاً برای آزمون ضربه با سرعت‌های متوسط و زیاد استفاده می‌شوند. در این نوع دستگاه‌ها، پرتابه با جرم کم با استفاده از هوای فشرده در لوله تفنگ به جلو رانده می‌شود (شکل ۳). هوای فشرده با فشار زیاد به درون مخزن فرستاده شده و به وسیله تنظیم کننده فشار به فشار کنترل شده می‌رسد. با تغییر فشار هوا سرعت اولیه پرتابه تنظیم می‌شود. فشار به کمک یک شیرسلونوئیدی یا ساز و کارهای دیگر آزاد می‌شود. پرتابه از درون لوله تفنگ گذشته و در آستانه خروج از روی یک دستگاه سرعت‌سنج عبور می‌کند. دستگاه سرعت‌سنج شامل یک دیود ساطع‌کننده پرتو نور منفرد و



شکل ۳- دستگاه آزمون تفنگ گازی [۳۵].



شکل ۱- دستگاه آزمون پاندولی [۲۱].

به سادگی قابل انجام است و جزو آزمایش‌های کم هزینه است. هر چند استفاده از این روش برای افزایش حد بالای سرعت کرنش، هنگامی که سرعت به طور مستقیم به ارتفاع سقوط وابسته است، مشکل است.

ساز و کار این ابزار شامل یک ضربه‌زننده با جرم مشخص است که از ارتفاع معینی رها می‌شود و به هدف اصابت می‌کند. برای دستیابی به انرژی ضربه مطلوب، جرم ضربه‌زننده و ارتفاع سقوط قابل تغییر است. تاریخچه نیرو - زمان ضربه‌زننده به سادگی از راه مبدل نیروی وابسته به دست می‌آید. در این سامانه‌ها پرتابه‌های کوچک به سادگی از ارتفاع معینی رها می‌شوند. معمولاً هدایت پرتابه‌های کوچک و بزرگ از ارتفاع معین به ترتیب از راه لوله و ریل انجام می‌شود. در این دستگاه‌ها از یک حسگر به منظور فعال کردن یک وسیله مکانیکی برای جلوگیری از ضربه‌های بعدی، پس از بالا جستن ضربه زننده استفاده می‌شود (شکل ۲).

مثلاً، برای شبیه‌سازی ضربه یک سازه کامپوزیتی با یک پرتابه بزرگ در سرعت کم، هم‌چون افتادن اتفاقی ابزار روی سازه، استفاده از دستگاه آزمون ضربه ثقلی مناسب‌ترین حالت برای شبیه‌سازی است. استفاده از دستگاه‌های آزمون هیدرولیکی برای اعمال بارهای دینامیکی بسیار مناسب و دقیق است، اما این روش آزمایش پرهزینه است و سرعت‌های کرنش محدودی را می‌توان از این نوع دستگاه‌ها گرفت.





شکل ۴- دستگاه آزمون هایپکینسون [۴۲].

از زمان پس از انتشار امواج در طول میله فلزی مطالعه کند. تجربیات استفاده از میله هایپکینسون نوع کششی و فشاری در ارتباط با رفتار وابسته به سرعت مواد فلزی منجر به انطباق این روش در توصیف خواص کامپوزیت‌های پلیمری چندلایه در سرعت‌های کرنش زیاد تا حد  $10^4 \text{ s}^{-1}$  شده است [۴۱-۳۹].

امروزه، تلاش‌های زیادی برای بررسی آثار سرعت کرنش زیاد با استفاده از میله هایپکینسون روی بسیاری از مواد ترد هم‌چون کامپوزیت‌ها و سرامیک‌ها به منظور اندازه‌گیری پاسخ سرعت کرنش مواد در شرایط مختلف بارگذاری (کششی، فشاری، برشی و پیچشی) در حال انجام است.

#### دستگاه‌های آزمون حلقه انبساطی [۴۸-۴۳]

استفاده از نمونه‌های حلقوی نازک در فشار برای آزمون‌های ضربه با سرعت کرنش زیاد و خیلی زیاد استفاده می‌شود. روش آزمون حلقه انبساطی در سال ۱۹۶۳ توسط Johnson و همکاران [۴۳] معرفی شد. ساز و کار این ابزار شامل یک سیلندر با هسته قابل انفجار است. با انفجار ماده منفجره (هسته) موج ضربه‌ای انتشار یافته و سبب اعمال فشار به حلقه می‌شود. روش‌های متفاوتی برای ایجاد شتاب در حلقه وجود دارد [۴۶-۴۴]. در شکل ۵، یکی از انواع دستگاه‌های آزمون به روش حلقه انبساطی آورده شده است. در این نوع آزمون با توجه به شرایط آزمون، تجهیزات خاصی برای گرفتن اطلاعات و دستیابی به منحنی تنش - کرنش در سرعت کرنش اعمالی مورد نیاز است. تجربیات استفاده از روش حلقه انبساطی در پژوهش‌های مربوط به فلزات منجر به انطباق این روش برای توصیف خواص کامپوزیت‌های پلیمری چندلایه در سرعت‌های کرنش خیلی زیاد شده است [۴۷، ۴۸]. لازم به ذکر است، این روش آزمون بسیار پیچیده و هزینه‌بر است.

یک آشکارساز پرتو نور است. پرتابه که طول مشخصی دارد، پرتو نور را قطع کرده و سرعت پرتابه با استفاده از مدت زمان قطع شدن اندازه‌گیری شده و با حسگر محاسبه می‌شود. اغلب دستگاه‌های آزمایشگاهی دارای یک جفت نور آشکارساز - دیود ساطع‌کننده نور هستند. زمان حرکت بین دو حسگر با استفاده از یک شمارشگر رقمی معین و برای محاسبه سرعت پرتابه استفاده می‌شود.

Morton و Cantwell [۳۰] سامانه دیگری را برای محاسبه سرعت پرتابه ابداع کردند. آنها دو سیم نازک را در لوله تفنگ با فاصله معین از هم قرار داده و با مشخص بودن زمان سپری شده در لحظه شکستن سیم اول و دوم، سرعت پرتابه را محاسبه کردند. به طور عمومی رخدادهای ضربه در الگوی سرعتی بالستیک با استفاده از تفنگ باروتی انجام می‌شود. این وسیله هم‌چون تفنگ گازی است. در این حالت برای حرکت دادن پرتابه با جرم کم از باروت استفاده شده و پرتابه‌ها پیش از اصابت به هدف از دهانه تفنگ خارج می‌شوند. به علت بی‌ثباتی حاصل از پرتاب آزاد پرتابه‌ها و مواجه شدن با سرعت‌های خیلی زیاد در الگوی ضربه بالستیک، اندازه‌گیری حرکت پرتابه بسیار پیچیده است. برای مثال، ضربه‌های وارد شده طی نشست و برخاست هواپیما از سطح باند فرودگاه که می‌تواند سبب آسیب دیدن سازه شود، با استفاده از پرتابه‌های کوچک با سرعت زیاد به کمک دستگاه تفنگ گازی به خوبی قابل شبیه‌سازی است.

#### دستگاه‌های آزمون هایپکینسون و کولسکی [۴۲-۳۶]

در سرعت‌های کرنش زیاد، اینرسی و پی‌آمد آن آثار انتشار امواج عوامل مهمی هستند. در نتیجه، باید از روش‌های آزمونی استفاده شود که بیشتر در شکل‌های درگیر با انتشار امواج تنش هستند. میله کولسکی یا میله هایپکینسون جزء دستگاه‌هایی هستند که به طور عمومی برای توصیف رفتار مواد در برابر ضربه در سرعت‌های کرنش زیاد استفاده می‌شوند (شکل ۴).

در این حالت، سامانه بسیار به شرایط تماس حساس است. هدف از استفاده از میله هایپکینسون تعیین تنش، کرنش یا جابه‌جایی‌های ناشی از ضربه سرعت زیاد است که در انتهای میله هنگام پایش پالس‌های کشسان رخ می‌دهد.

میله هایپکینسون اولین بار در سال ۱۹۱۴ توسط Hopkinson [۳۶] ابداع شد. وی از انتشار موج القایی در طول میله فلزی کشسان برای اندازه‌گیری فشار تولید شده طی رویداد ضربه استفاده کرد. هایپکینسون با استفاده از تله‌های اندازه حرکت با طول‌های مختلف توانست تکامل تدریجی و شکل ضربان‌های تنش را هم‌چون تابعی

به تغییرات سرعت کرنش وابسته نیست. همچنین، افزایشی به مقدار ۴۰٪ و ۶۰٪ طی بارگذاری (off-axis) عرضی و برشی به ترتیب در مدول و استحکام نهایی کامپوزیت کولار - اپوکسی مشاهده شد.

طی پژوهشی، اثر سرعت کرنش ( $10^{-3}$  تا  $2000 \text{ s}^{-1}$ ) روی خواص کششی کامپوزیت‌های شیشه - پلی‌استر، شیشه - اپوکسی، کربن - اپوکسی و پلاستیک مهندسی تقویت شده با الیاف کوتاه کربن با زمینه نایلون ۶/۶ (پلی‌آمید) توسط Kawata و همکاران [۵۴،۵۵] بررسی شده است. استحکام کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی و شیشه - پلی‌استر با سرعت کرنش افزایش داشته در حالی که استحکام کربن - اپوکسی و کربن - نایلون ۶/۶ کاهش داشته است.

Hayes و Adams [۵۶]، یک ضربه‌زننده پاندولی ویژه را برای بررسی و مطالعه آثار سرعت کرنش روی خواص کششی کامپوزیت‌های تک‌جهتی شیشه - اپوکسی و کربن - اپوکسی پایه‌ریزی کردند. آنها در پژوهش‌های خود مشاهده کردند، مدول و استحکام کششی کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی در سرعت‌های ضربه در محدوده  $2/7$  تا  $4/9 \text{ m/s}$  به تغییرات سرعت کرنش وابسته نیست. در حالی که مدول و استحکام کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی با افزایش سرعت ضربه کاهش داشته است.

Harding و Welsh [۴۰،۵۷] در مطالعات جداگانه‌ای صحت یک روش آزمون ضربه از سرعت کم به زیاد را با انجام آزمون‌هایی (در محدوده  $10^{-4}$  تا  $1000 \text{ s}^{-1}$ ) روی کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی و شیشه - اپوکسی با درصد حجمی الیاف ۶۰٪ [۴۰] و کامپوزیت‌های شیشه - پلی‌استر، کربن - پلی‌استر و کولار - پلی‌استر را با درصد حجمی الیاف ۴۰٪ [۵۷] بررسی کردند. در پژوهش آنها مشاهده شد، مدول، تنش نهایی و شیوه شکست کامپوزیت کربن - اپوکسی به سرعت کرنش وابسته نیست. استحکام و مدول برای کامپوزیت شیشه - اپوکسی در بیشترین سرعت کرنش حدود دو برابر مقادیر ایستا بود. این افزایش در استحکام کششی بر اساس تغییرات مشاهده شده در شیوه‌های شکست بیان شده است. به طور مشابه، مدول کششی کشسانی کامپوزیت‌های شیشه - پلی‌استر، کربن - پلی‌استر و کولار - پلی‌استر با سرعت کرنش افزایش داشت. این وابستگی ناشی از برهم‌کنش کشسانی بین تقویت‌کننده و ماتریس رزین بیان شده است.

پژوهش‌ها و بررسی‌های انجام شده توسط Chamis و Smith [۵۸] و پژوهش‌های بیشتر توسط Daniel و همکاران [۴۷] روی چندلایه‌های تک‌جهتی کربن - اپوکسی نتایج مشابهی را ارائه کرده است. نتایج حاکی از عدم تغییر استحکام کششی در راستای الیاف و افزایش خواص کششی عرضی و خواص برشی با افزایش سرعت



شکل ۵- دستگاه آزمون حلقه انبساطی [۴۵،۴۶].

## آثار سرعت کرنش بر خواص مواد کامپوزیتی

در زمینه آثار سرعت کرنش بر رفتار مواد فلزی مطالعات بسیاری انجام شده و اطلاعات بسیار زیادی در گستره وسیعی از سرعت‌های کرنش به دست آمده است. در حالی که درباره آثار سرعت کرنش بر رفتار مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف، اطلاعات محدودی در دسترس است. در این بخش، تعداد زیادی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه آثار سرعت کرنش بر خواص کششی، فشاری، برشی و خمشی مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف ارائه شده است.

## آثار سرعت کرنش بر خواص کششی و برشی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف

Rotem و Lifshitz [۴۹]، اثر سرعت کرنش بر خواص کششی کامپوزیت‌های تک‌جهتی با الیاف شیشه و زمینه اپوکسی با درصد حجمی الیاف ۶۰٪ را بررسی کردند. آنها در پژوهش‌های خود افزایش سه برابری را در استحکام کششی و افزایش ۵۰٪ را در مدول با افزایش سرعت کرنش در مقایسه با مقادیر ایستا مشاهده کردند. Davies و Magee [۵۰،۵۱]، اثر سرعت کرنش بر استحکام کششی نهایی کامپوزیت‌های شیشه - پلی‌استر شامل ۳۰٪ الیاف شیشه، ۳۰٪ رزین پلی‌استر به همراه ۴۰٪ پرکننده را بررسی کردند. آنها در پژوهش‌های خود گزارش کردند، کامپوزیت‌های شیشه - پلی‌استر نسبت به سرعت کرنش حساس‌اند و با تغییر سرعت کرنش استحکام آنها تا ۵۵٪ افزایش می‌یابد. Lifshitz [۲۲] در پژوهش‌های خود روی چندلایه‌های ضرب‌دری شیشه - اپوکسی دریافت، مدول کشسان مستقل از سرعت کرنش است و فقط تنش شکست کمی بیشتر از مقدار ایستاست (۳۰٪-۲۰).

Daniel و Liber [۵۲،۵۳] اقدام به بررسی و توصیف اثر سرعت کرنش روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تک‌جهتی بور - اپوکسی، شیشه - اپوکسی، کربن - اپوکسی و کولار - اپوکسی کردند. آنها در پژوهش خود با افزایش سرعت کرنش از  $10^{-4}$  تا  $27 \text{ s}^{-1}$  افزایش ۲۰٪ در مدول و استحکام کششی در جهت الیاف را برای کامپوزیت کولار - اپوکسی به دست آوردند. ملاحظه شد، مدول و استحکام کششی کامپوزیت‌های بور - اپوکسی، شیشه - اپوکسی و کربن - اپوکسی

را با درصد وزنی الیاف ۷۰٪ بررسی کردند. در پژوهش‌های انجام شده به ازای افزایش سرعت کرنش، مدول کششی، استحکام کششی، استحکام برشی و مدول برشی به ترتیب به مقدار ۱/۸۲، ۹/۳، ۷/۰۶ و ۱۱/۰۶٪ افزایش داشته است [۶۲].

نتایج حاصل با نتایج پژوهش‌های انجام شده توسط Armenakas و Sciamarella [۶۶]، که تغییری خطی از مدول کششی کشسانی کامپوزیت‌های تک جهتی شیشه با زمینه اپوکسی ( $V_f=0.09$ ) با لگاریتم سرعت کرنش را ارایه می‌کند، مطابقت دارد. هر چند، تنش و کرنش نهایی کامپوزیت با افزایش سرعت کرنش، کاهش داشته است. هم‌چنین، افزایش در انرژی کششی و برشی به ترتیب به مقدار ۱۷ و ۵/۹٪ به ازای افزایش سرعت کرنش مشاهده شده است [۶۵]. این افزایش در خواص به دلیل تغییر در شیوه‌های شکست به ازای افزایش سرعت کرنش است.

اثر سرعت کرنش بر خواص کششی کامپوزیت شیشه-رزین فنولی و شیشه-پلی استر به وسیله Barre و همکاران [۶۷] مطالعه شد. ملاحظه شد، مدول کشسانی و استحکام با سرعت کرنش افزایش می‌یابد.

Melin و Asp [۶۸] رفتار کششی عرضی کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی با درصد حجمی الیاف ۶۵٪ را در محدوده سرعت کرنش  $10^{-3}$  تا  $10^3 s^{-1}$  بررسی کردند. آزمون‌ها در شرایط بارگذاری ایستا و ضربه‌ای روی نمونه‌های لقمه استخوانی شکل انجام شده است. در پژوهش مزبور مشاهده شد، مدول عرضی متوسط مستقل از سرعت کرنش است، در حالی که مدول عرضی اولیه با افزایش سرعت کرنش کاهش کمی داشته است. هم‌چنین، نتایج افزایش کمی در تنش و کرنش شکست با افزایش سرعت کرنش نشان داده است. بنابراین استنتاج شد، هنگام بارگذاری در جهت عرضی، کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی وابستگی کمی به سرعت کرنش نشان می‌دهند.

پژوهش انجام شده توسط Vashchenko و همکاران [۶۹] روی کامپوزیت‌های شیشه-پلی‌آمید رابطه‌ای خطی بین خواص استحکامی کششی کامپوزیت و لگاریتم سرعت کرنش نشان داد. مطالعات و بررسی‌های تجربی درباره آثار سرعت کرنش روی خواص کششی کامپوزیت‌های Glass Bead/HDPE توسط Bai و همکاران [۷۰] انجام شد. آنها با افزایش سرعت کرنش، افزایش در مدول یانگ و استحکام کششی در کامپوزیت بررسی شده را مشاهده کردند. الیاف کوتاه کربن با زمینه پلیمر بلور مایع با درصد وزنی الیاف ۳۰٪ در بارگذاری ایستا ( $10^{-2} s^{-1}$ ) و بارگذاری ضربه‌ای ( $10^4 s^{-1}$ ) توسط Shim و همکاران [۷۱] بررسی شده است. در این پژوهش، برای اعمال ضربه کششی سرعت زیاد از دستگاه آزمون هاپکینسون کششی نوع پاندولی استفاده شده است. آنها دریافتند، کرنش شکست و

بارگذاری بوده است.

آزمون‌های کششی برای پنج سرعت جابه‌جایی (از حدود ۱ تا  $30000 mm/s$ )، برای تعیین اثر سرعت کرنش بر خواص کامپوزیت شیشه-رزین فنولی، توسط Roberts و Harding [۵۹] انجام شده است. افزایش قابل توجهی در استحکام کششی، سفتی کششی و جابه‌جایی شکست در سرعت‌های جابه‌جایی زیاد مشاهده شد. این امر بیانگر وابستگی سرعت مقاومت رزین به تاب‌گیری الیاف و مقاومت استحکام شکست الیاف شیشه است.

Peterson و همکاران [۶۰]، پاسخ کششی نمونه‌های کامپوزیتی مشتمل بر رزین گرمانرم استیرن تقویت شده با الیاف خرد شده شیشه با قطر الیاف ۱۰ و  $13 \mu m$  با درصد حجمی ۸/۴، ۹/۶ و ۹/۸٪ را در محدوده  $10^{-3}$  تا  $10^3 s^{-1}$  مطالعه و افزایش ۵۰ تا ۷۰٪ را در مدول کشسانی و استحکام با افزایش سرعت کرنش مشاهده کردند.

مطالعه و بررسی آثار سرعت کرنش بر رفتار مکانیکی چندلایه ضربه‌دری شیشه-اپوکسی توسط Staab و Gilat [۶۱، ۴۱] با استفاده از دستگاه آزمون سرو-هیدرولیک (برای آزمون شبه‌ایستا) و دستگاه آزمون میله دوتکه هاپکینسون نوع کششی (برای آزمون با سرعت کرنش زیاد)، انجام شده است. آزمون‌های کششی در سرعت‌های کرنش زیاد (از مرتبه  $10^3 s^{-1}$ ) افزایش محسوسی را در حداکثر تنش و کرنش نرمال در مقایسه با مقادیر حاصل از آزمون‌های شبه‌ایستا نشان داده است. این پژوهشگران بیان کردند، اگرچه الیاف و ماتریس هر دو نسبت به سرعت کرنش حساس هستند، ولی اثر الیاف نسبت به ماتریس بیشتر است.

آزمون‌های کششی روی چندلایه‌های شیشه-اپوکسی با درصد وزنی الیاف ۷۰٪ در سرعت‌های جابه‌جایی مختلف ( $10^{-2}$  تا  $10^4 mm/s$ ) به وسیله Okoli و Smith [۶۳، ۶۲] به منظور تعیین آثار سرعت کرنش روی ضریب پواسون (نسبت کرنش عرضی به کرنش طولی) چندلایه کامپوزیتی انجام شد. آنها در پژوهش‌های خود دریافتند، ضریب پواسون نسبت به سرعت کرنش غیرحساس است. غیرحساس بودن ضریب پواسون به سرعت کرنش در چندلایه‌های آزمون شده، به علت وجود الیاف در این کامپوزیت‌ها گزارش شده است. Okoli و Smith [۶۴] اثر سرعت کرنش را روی خواص کششی کامپوزیت شیشه-اپوکسی با درصد وزنی الیاف ۷۰٪ بررسی کردند. آنها دریافتند، استحکام کششی کامپوزیت با سرعت کرنش افزایش می‌یابد. این افزایش در استحکام کششی (با سرعت کرنش) به استحکام افزایشی الیاف شیشه با سرعت کرنش نسبت داده شده است. در مطالعات دیگری Okoli و Smith [۶۲، ۶۵] آثار سرعت کرنش روی خواص کششی و برشی چندلایه‌های شیشه-اپوکسی



## آثار سرعت کرنش بر خواص فشاری و خمشی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف

Sierakowski و Nevill [۷۶]، استحکام فشاری و شکست کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با فولاد با درصد‌های حجمی الیاف ۱۰، ۲۶ و ۴۰٪ را بررسی کردند. پژوهش‌ها براساس آزمون‌های مکانیکی در محدوده سرعت کرنش از  $10^{-5}$  تا  $10^4$   $s^{-1}$  انجام شده است. برای کامپوزیت‌های آزمایش شده، آثار سرعت کرنش به پارامترهای مختلفی نظیر خواص ساختاری کامپوزیت، آرایش هندسی، درصد حجمی تقویت‌کننده و اندازه الیاف تقویتی وابسته بود. آنها حین آزمایش‌های ایستا و ضربه‌ای ( $1000$   $s^{-1}$ ) روی نمونه‌های استوانه‌ای زیر فشار، شیوه‌های شکست بسیار متفاوتی را مشاهده کردند. در این پژوهش، مدول اولیه به ازای سرعت کرنش  $1000$   $s^{-1}$  در مقایسه با سرعت کرنش ایستا بدون تغییر بود، در حالی که استحکام افزایشی به مقدار ۱۰۰٪ داشته است.

Amijima و Fujii [۷۷]، آثار سرعت کرنش بر استحکام فشاری کامپوزیت‌های تک‌جهتی شیشه- پلی‌استر و الیاف بافته شده شیشه- پلی‌استر را بررسی کردند. آنها دریافتند که استحکام فشاری هر دو کامپوزیت با سرعت کرنش افزایش می‌یابد. با این تفاوت که مقدار افزایش در کامپوزیت بافته شده بیشتر از کامپوزیت تک‌جهتی است. Daniel و LaBedz [۷۸]، آثار سرعت کرنش بر خواص فشاری کامپوزیت کربن- اپوکسی را با بهره‌گیری از نمونه‌های حلقه‌ای نازک زیر پالس خارجی (سرعت کرنش  $500$   $s^{-1}$ ) بررسی و مطالعه کردند. در این پژوهش، افزایش کمی در مدول اولیه در راستای الیاف ( $0^\circ$ ) نسبت به مقادیر ایستا گزارش شده، در حالی که در استحکام تغییری مشاهده نشده است. هم‌چنین، در راستای عمود بر الیاف ( $90^\circ$ ) افزایش قابل توجهی در مدول و استحکام گزارش شده است. Cazeneuve و Maile [۷۹]، اثر سرعت کرنش در محدوده  $10^{-3}$  تا  $600$   $s^{-1}$  روی استحکام فشاری نمونه‌های کامپوزیتی تک‌جهتی کربن- اپوکسی با درصد حجمی الیاف ۶۵٪ را مطالعه و افزایش ۵۰٪ در استحکام طولی و افزایش ۳۰٪ در استحکام عرضی را گزارش کرده‌اند.

رفتار فشاری ضربه‌ای کامپوزیت‌های تک‌جهتی شیشه- اپوکسی با درصد حجمی الیاف ۴۵/۶٪ به وسیله Kumar و همکاران [۸۰]، با استفاده از میله کولسکی نوع فشاری برای شش جهت‌گیری الیاف (۰، ۱۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰) در سرعت کرنش  $265 \pm 50$   $s^{-1}$  بررسی و مطالعه شده است. مطالعه روی نمونه‌های لوله‌ای با طول‌های مختلف ۱۲ تا ۳۵ mm و قطرهای ۱۶ تا ۱۷ mm انجام شده است. منحنی‌های

مدول یانگ کامپوزیت به طور قابل توجهی وابسته به تغییرات سرعت کرنش هستند.

Gilat و همکاران [۷۲]، آثار سرعت کرنش (سرعت کرنش شبه‌ایستا  $10^{-5}$   $s^{-1}$ ، سرعت کرنش متوسط  $1$   $s^{-1}$  و سرعت‌های کرنش زیاد  $600$ - $400$   $s^{-1}$ ) را روی خواص کششی نمونه‌های کامپوزیتی کربن- اپوکسی با جهت‌گیرهای مختلف الیاف (۹۰، ۱۰، ۴۵ و  $[\pm 45^\circ]$ ) مطالعه کردند. در این پژوهش، افزایش زیاد سفتی همه نمونه‌ها با افزایش سرعت کرنش مشاهده شد. نمونه‌های کامپوزیتی با جهت‌گیری‌های ۱۰ و ۹۰، افزایش کمی در حداکثر تنش به ازای افزایش سرعت کرنش نشان دادند. بیشترین افزایش در حداکثر تنش، با افزایش سرعت کرنش، روی نمونه‌های کامپوزیتی با جهت‌گیری‌های ۴۵ و  $[\pm 45^\circ]$  گزارش شده است. هم‌چنین، بیشترین کرنش به ازای سرعت‌های کرنش مختلف روی نمونه کامپوزیتی با جهت‌گیری  $[\pm 45^\circ]$  مشاهده شده است.

Fereshteh-Saniee و همکاران [۷۳] مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت‌های تک‌جهتی شیشه- اپوکسی با درصد حجمی الیاف ۵۰٪ را برای شش جهت‌گیری الیاف (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵) در محدوده سرعت کرنش  $10^{-4}$  تا  $1$   $s^{-1}$  با استفاده از دستگاه آزمون کشش (Instron) بررسی کردند. نتایج، افزایش استحکام را برای جهت‌گیری‌های مختلف با افزایش سرعت کرنش نشان داده است. به طوری که در بیشترین سرعت کرنش، افزایشی به مقدار  $4/2$  و  $24/7$ ٪ در مدول و استحکام کششی طولی گزارش شده است.

Taniguchi و همکاران [۷۴] پاسخ به ضربه کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف تک‌جهتی کربن با درصد حجمی الیاف ۶۷٪ را تا محدوده سرعت کرنش  $100$   $s^{-1}$  با استفاده از دستگاه آزمون هاپکینسون نوع کششی بررسی و مطالعه کردند. آنها به منظور استخراج روابط تنش- کرنش کششی، بست خاصی را برای اعمال ضربه استفاده کردند. نتایج آزمون‌ها نشان داد، مدول و استحکام کششی در جهت طولی با افزایش سرعت کرنش تغییری نداشته در حالی که خواص کششی در جهت عرضی و خواص برشی افزایش داشته است.

رفتار کامپوزیت‌های بافته شده شیشه با زمینه اپوکسی ( $V_f=0/4$ ) در محدوده سرعت کرنش ۱۴۰ تا  $400$   $s^{-1}$  توسط Naik و همکاران [۷۵] با بهره‌گیری از میله دوتهک هاپکینسون کششی بررسی شد. نتایج به ازای افزایش سرعت کرنش در محدوده  $400$ - $140$   $s^{-1}$ ، افزایشی به مقدار ۸۹-۶۵، ۸۸-۶۳ و ۹۳-۷۵٪ را به ترتیب در استحکام کششی در جهت طولی، عرضی و ضخامت در مقایسه با مقادیر شبه‌ایستا نشان داده است.

وابسته است [۸۴]. بنابراین، در این حالت اثر سرعت کرنش روی مدول یانگ اولیه و استحکام فشاری نهایی مشخص است.

El-Habak [۸۵]، اثر خواص مختلف نظیر درصد حجمی الیاف و اندازه نمونه را در سرعت‌های کرنش زیاد روی الیاف شیشه با رزین اپوکسی ( $V_f = 0/61$ ) و پلی‌استر ( $V_f = 0/49 - 0/67$ ) بررسی کرد. نتایج به شکل منحنی‌های تنش - کرنش و تنش در برابر سرعت کرنش ارائه شده است. در این پژوهش مشاهده شد، به ازای تغییرات سرعت کرنش برای مقادیر  $s^{-1} < 100$ ، تنش فشاری نهایی تحت تأثیر قرار نگرفته، درحالی که به ازای سرعت کرنش در محدوده  $s^{-1} 1000 - 100$ ، مقدار تنش فشاری نهایی به شکل خطی افزایش داشته است. این افزایش به دلیل تغییر در شیوه‌های شکست به ازای افزایش سرعت کرنش بیان شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد، نمونه‌های آزمایش باید دارای نسبت طول به عرض یکسان ( $L/D = 1$ ) باشند. وی بیان کرد، حساسیت به سرعت کرنش به طور ذاتی به نوع ماتریس و درصد حجمی الیاف نیز وابسته است.

Tay و همکاران [۸۶]، آثار سرعت کرنش روی نمونه‌های کامپوزیتی بافته شده شیشه - اپوکسی و اپوکسی خالص را در بارگذاری فشاری ناشی از ضربه‌های سرعت زیاد بررسی کردند. نتایج تجربی در این مطالعه در محدوده سرعت کرنش  $s^{-1} 2500 - 5 \times 10^{-4}$ ، به کمک دستگاه‌های آزمایش هیدرولیکی (برای آزمایش‌های شبه‌ایستا و سرعت‌های کرنش کم) و میله دوتکه هاپکینسون نوع فشاری (برای آزمایش‌های ضربه با سرعت‌های کرنش زیاد) به دست آمده است. مقایسه بین رفتار تنش - کرنش الیاف بافته شده شیشه - اپوکسی و رزین اپوکسی بیانگر وابستگی این نمونه‌ها به تغییرات سرعت کرنش است. این تغییرات در محدوده سرعت کرنش کم ( $s^{-1} \approx 10$ ) بسیار مشهود است. افزایش قابل توجهی در مدول نیز با افزایش سرعت کرنش مشاهده شده است.

Powers و همکاران [۸۷] برای به دست آوردن خواص دینامیکی - فشاری کامپوزیت‌های تک جهتی کربن - اپوکسی در سرعت‌های کرنش مختلف از  $s^{-1} 49$  تا  $s^{-1} 1430$ ، از میله دوتکه هاپکینسون نوع فشاری استفاده کردند. در این پژوهش، تنش تسلیم در هر سه جهت اصلی و مقدار انرژی کرنشی کشسان با سرعت کرنش افزایش داشت. هم‌چنین مشاهده شد، استحکام نهایی، مدول کشسانی و چگالی انرژی کرنشی شکست به سرعت کرنش وابسته نیست. در مطالعه دیگری توسط Powers و همکاران [۸۸] از میله دوتکه هاپکینسون نوع فشاری برای به دست آوردن خواص مکانیکی فشاری کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی و کربن - پلی‌امید استفاده شد. برای هر دو کامپوزیت، در هر سه جهت اصلی در مدول کشسانی، کرنش شکست و استحکام نهایی

تنش - کرنش شبه‌ایستا در سرعت کرنش  $s^{-1} 2 \times 10^{-4}$  با نتایج حاصل از منحنی‌های تنش - کرنش ضربه‌ای مقایسه شده‌اند. نتایج افزایش استحکام و تغییر در شیوه‌های شکست را در سرعت‌های کرنش زیاد به ازای تمام جهت‌گیری‌های مختلف چندلایه شیشه - اپوکسی نشان داده است. نمونه‌ها با جهت‌گیری  $0^\circ$  در امتداد الیاف به واسطه شکافتن کششی شکسته شدند که این شکست، در اثر کرنش‌های کششی عرضی به دلیل اثر پواسون ناشی از بارهای فشاری است. نمونه‌ها با جهت‌گیری  $10^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $45^\circ$  به طور عمده به واسطه برش بین لایه‌های شکسته شدند. با این وجود، ترک‌های حاصل از شکافت کششی نیز در سطح بعضی نمونه‌ها گزارش شده است. آنها در پژوهش‌های خود مشاهده کردند، منحنی‌های تنش - کرنش برای زوایای  $0^\circ$  و  $10^\circ$  رفتاری خطی و برای زوایای بیشتر از  $10^\circ$  رفتار غیرخطی تا شکست دارند. رفتار کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بافته شده شیشه زیر بارگذاری ضربه‌ای فشاری توسط El-Habak [۸۱] بررسی شد. میله دوتکه هاپکینسون نوع فشاری برای ایجاد شکست در محدوده سرعت کرنش از  $s^{-1} 10$  تا  $s^{-1} 10^3$  استفاده شده است. نتایج به ازای همه متغیرهای کامپوزیتی نظیر جهت‌گیری الیاف و درصد حجمی الیاف، افزایش جزیی در استحکام فشاری را نشان داده است. هم‌چنین، در پژوهش روی ماتریس‌های اپوکسی، پلی‌استر و وینیل استر، بیشترین استحکام روی کامپوزیت با زمینه وینیل استر گزارش شده است.

Montiel و Williams [۸۲] برای تعیین خواص فشاری دینامیکی کامپوزیت‌های کربن - پیک با  $48$  لایه با چیدمان  $[0/90]_8$  در سرعت کرنش تا حد  $s^{-1} 8$ ، از دستگاه آزمایش ضربه ثقلی (با ارتفاع زیاد) استفاده کردند. در پژوهش آنها، افزایشی به مقدار  $42$  و  $25\%$  به ترتیب در استحکام و کرنش نهایی در سرعت‌های کرنش زیاد در مقایسه با مقادیر شبه‌ایستا مشاهده شده است. اثر سرعت کرنش روی مدول اولیه نیز ناچیز گزارش شده است.

Harding [۸۳]، اثر سرعت کرنش و هندسه را روی نمونه‌های استوانه‌ای توپر و نوار نازک، که معمولاً برای آزمایش فشاری چندلایه‌های کامپوزیتی پیشنهاد می‌شود، متشکل از چندلایه‌های بافته شده شیشه - اپوکسی با درصد وزنی الیاف  $50\%$  را زیر فشار تا سرعت کرنش  $s^{-1} 860$  بررسی کرد. در این پژوهش، با افزایش سرعت کرنش برای هر دو نمونه افزایش قابل توجهی در مدول اولیه، استحکام و کرنش نهایی مشاهده شد. معمولاً در بارگذاری فشاری، مقاومت برشی ماتریس رزین اپوکسی، به طور قابل توجهی ترکیبی از دو ویژگی کشسان چندلایه و مقاومت شکل‌گیری اتصال برشی است. پژوهش‌ها نشان داده است، رزین اپوکسی به شدت به سرعت کرنش

متوسط تغییری با افزایش سرعت کرنش مشاهده نشد.

Li و همکاران [۸۹]، آثار سرعت کرنش بر خواص فشاری (تنش - کرنش) کامپوزیت‌های پلیمری بلور مایع گرماگرای تقویت شده با الیاف کوتاه شیشه را در محدوده گسترده‌ای از سرعت کرنش ( $10^{-4}$  تا  $350 \text{ s}^{-1}$ ) بررسی کردند.

آزمون‌های فشاری برای سرعت‌های کرنش کم با استفاده از دستگاه آزمایش یونیورسال اینسترون و آزمون‌های سرعت‌های کرنش زیاد با استفاده از روش میله دوتکه هاپکینسون نوع فشاری انجام شده است. آنها دریافتند، مدول فشاری در سرعت‌های کرنش کم ( $10^{-4}$  تا  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) به تغییرات سرعت کرنش وابسته نیست، در حالی که سرعت‌های کرنش بیشتر، موجب افزایش ناگهانی در مدول فشاری می‌شود. تغییرات استحکام فشاری را نیز به شکل خطی با لگاریتم سرعت کرنش گزارش کردند. بررسی و بازبینی ماکروسکوپی نمونه‌های تخریب شده نشان داد، سرعت کرنش اثر بسزایی روی شیوه شکست داشته است.

Takeda و Wan [۹۰] آثار سرعت کرنش بر استحکام فشاری کامپوزیت تک‌جهتی شیشه - پلی استر را با استفاده از روش میله دوتکه هاپکینسون نوع فشاری توسعه داده شده بررسی کردند. با استفاده از این روش بار ضربه در هر لحظه قابل کنترل است و نمونه قابلیت بازیافت در ترازهای مختلف بارگذاری را دارد. در این پژوهش، افزایش استحکام با افزایش سرعت کرنش گزارش شده است.

Tzeng و Abrahamian [۹۱-۹۳]، رفتار مواد کامپوزیتی در برابر ضربه (از سرعت کم تا زیاد) را در کاربردهای مهندسی بالستیک تجزیه و تحلیل کردند. در پژوهش مزبور، روشی آزمایشگاهی به منظور بررسی آثار ضربه روی مواد کامپوزیتی کربن - اپوکسی در سرعت‌های کرنش مختلف که به طور معمول طی زمان پرتاب یک پرتابه وجود دارد، توسعه داده شده است. آثار سرعت کرنش روی استحکام فشاری کربن - اپوکسی با چیدمان  $[(0/45/-45/0)]$  در محدوده سرعت جابه‌جایی  $2/54-0/254 \text{ m/s}$  بررسی شده است. در این پژوهش با افزایش سرعت کرنش، افزایش  $10\%$  در استحکام فشاری مشاهده شده است. هم‌چنین، کرنش  $1/5\%$  زیر ضربه اندازه‌گیری شده، که بزرگ‌تر از کرنش نهایی  $1/1\%$  در وضعیت بارگذاری ایستاست. Lowe [۹۴]، آثار سرعت کرنش بر خواص فشاری عرضی کامپوزیت‌های تک‌جهتی کربن - اپوکسی را بررسی کرد. نتایج پژوهش افزایش در مدول و استحکام عرضی را با افزایش سرعت کرنش نشان داد.

Hsiao و Daniel [۹۵]، رفتار فشاری کامپوزیت تک‌جهتی کربن -

اپوکسی را در محدوده سرعت‌های کرنش کم ( $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) و زیاد ( $10^{-1} >$ ) به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های آزمون هیدرولیکی و ضربه ثقلی توسعه یافته بررسی کردند. در پژوهش یاد شده، استحکام فشاری عرضی در سرعت‌های کرنش زیاد، تقریباً دو برابر مقدار شبه‌ایستا به دست آمده است. در حالی که کرنش نهایی در برابر آثار سرعت کرنش واکنشی نداشته است. خواص فشاری طولی کامپوزیت‌های تک‌جهتی کربن - اپوکسی و متعامد کربن - اپوکسی نیز به ازای سرعت‌های کرنش مختلف معین شده است. نتایج، افزایش در استحکام و کرنش نهایی را نشان داد، در حالی که افزایش کمی در مدول کشسانی اولیه مشاهده شده است. مطالعاتی نیز روی نمونه‌های کامپوزیتی گرمانرم off-axis در محدوده وسیعی از سرعت‌های کرنش انجام شده است. نتایج نشان داد، رفتار کامپوزیت تا حد شکست در راستای الیاف، کشسانی است.

پژوهش‌هایی توسط Woldesenbet و Vinson [۹۶] به منظور بررسی آثار نسبت طول به قطر مختلف (L/D) یا هندسه نمونه نسبت به خواص مواد در سرعت‌های کرنش مختلف بین  $10^2 \times 4$  و  $10^3 \times 1/3 \text{ s}^{-1}$  انجام شده است. نتایج آماری، اثر قابل توجهی روی L/D یا هندسه چندلایه‌های کربن - اپوکسی آزمایش شده در سرعت‌های کرنش مختلف نشان نداده است.

Ninan و همکاران [۹۷] مقاومت ضربه کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی با درصد حجمی الیاف  $65\%$  و جهت‌گیری‌های  $15^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $45^\circ$  را با استفاده از دستگاه آزمایش میله دوتکه هاپکینسون فشاری بررسی کردند. آنها در پژوهش‌های انجام شده افزایش در مقادیر تنش کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی (off-axis) را به ازای افزایش سرعت بارهای فشاری از ایستا به ضربه با جهت‌گیری‌های مختلف گزارش کردند.

Hall و Guden [۹۸] مقاومت ضربه کامپوزیت‌های تک‌جهتی کربن - اپوکسی را در آزمون‌های سرعت کرنش کم تا زیاد بررسی کردند. آزمون‌ها در سرعت‌های کرنش زیاد با استفاده از روش میله هاپکینسون نوع فشاری در محدوده گسترده از سرعت کرنش تا  $2000 \text{ s}^{-1}$  انجام شده است. نتایج پژوهش، افزایش  $67/4\%$  را در استحکام تخریب در جهت عرضی نشان داد. در حالی که تغییر قابل توجهی در مدول یانگ با افزایش سرعت کرنش مشاهده نشده است. در این پژوهش، در محدوده سرعت کرنش بررسی شده مقدار کرنش شکست تقریباً ثابت ( $0.3 \pm 0.5\%$ ) گزارش شده است.

Hosur و همکاران [۹۹]، پاسخ کامپوزیت‌های چندلایه کربن - اپوکسی را زیر بارگذاری فشاری در سرعت‌های کرنش  $82$ ،  $164$  و  $817 \text{ s}^{-1}$  مطالعه کردند. نتایج پژوهش، افزایش قابل توجهی را در

هیدرولیک و دستگاه آزمایش هاپکینسون نوع فشاری انجام شده است. نتایج پژوهش‌ها، افزایش در استحکام فشاری عرضی را برای هر دو کامپوزیت با افزایش سرعت کرنش نشان داده است. Sims و همکاران [۱۰۳]، آثار سرعت کرنش روی استحکام خمشی چندلایه‌های پارچه شیشه-پلی‌استر را بررسی کرده و افزایش استحکام خمشی را در محدوده وسیعی از سرعت‌های جابه‌جایی از  $10^{-6}$  تا  $10^{-1}$  m/s گزارش کردند. در مطالعه دیگری، Okoli [۶۵] آثار سرعت کرنش بر خواص خمشی چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه-اپوکسی را بررسی کرده و افزایشی به مقدار ۸/۵٪ را در انرژی خمشی به ازای افزایش سرعت کرنش گزارش کرده است. این افزایش به دلیل تغییر در شیوه‌های شکست است.

### آثار سرعت کرنش بر خواص کششی، فشاری و برشی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف

Groves و همکاران [۱۰۴]، رفتار کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی را در محدوده گسترده‌ای از سرعت کرنش ( $10^{-3}$  تا  $10^0$  s<sup>-1</sup>) در کشش و فشار ارزیابی کردند. در این پژوهش، بسته به سرعت بارگذاری از دستگاه‌های آزمون مختلفی نظیر دستگاه آزمون هیدرولیکی، دستگاه آزمون ضربه ثقلی و دستگاه آزمایش میله دوتکه هاپکینسون استفاده شده است.

نتایج پژوهش، افزایش در هر دو خواص کششی و فشاری (استحکام و مدول) را با افزایش سرعت کرنش نشان داده است. Daniel و همکاران [۱۰۵] رفتار مواد کامپوزیتی کربن-اپوکسی را در سرعت‌های کرنش زیاد، با استفاده از سه روش آزمون بررسی کردند. در اولین روش آزمون ضربه، رفتار طولی، عرضی و برشی صفحه‌ای چندلایه‌های نازک کربن-اپوکسی تا محدوده سرعت کرنش  $500$  s<sup>-1</sup> در شرایط بارگذاری کششی مطالعه شد. در جهت طولی، مدول به طور متوسط با سرعت کرنش افزایش داشته (تا ۲۰٪ بیشتر از مقدار ایستا) در حالی که استحکام و کرنش نهایی تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته است.

مدول و استحکام در جهت عرضی (نسبت به الیاف) افزایش ناگهانی بیش از مقدار ایستا داشته در حالی که افزایش کمی در کرنش نهایی دیده شده است. افزایش ۳۰٪ در مدول برشی صفحه‌ای و استحکام مشاهده شده است. در دومین روش آزمون ضربه، رفتار طولی، عرضی و برشی صفحه‌ای چندلایه‌های نازک کربن-اپوکسی در شرایط بارگذاری فشاری بررسی شد. در این بخش مدول طولی در بیشترین سرعت کرنش ( $90$  s<sup>-1</sup>) افزایشی به مقدار ۳۰٪ نسبت به مقدار ایستا داشته در حالی که تغییرات استحکام و کرنش نهایی،

استحکام فشاری و مدول یانگ با افزایش سرعت کرنش در مقایسه با مقادیر ایستا نشان داده است.

Ochola و همکاران [۱۰۰]، آثار سرعت کرنش (شبه‌ایستا -  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup>، ضربه  $500$  s<sup>-1</sup>) را روی استحکام و کرنش شکست کامپوزیت‌های متعامد کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی زیر بارگذاری فشاری بررسی و مطالعه کردند. آنها در این پژوهش‌ها، نسبت کرنش شکست کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن را به ازای سرعت‌های کرنش کم (۹٪) به زیاد (۲٪)، برابر با ۴/۵ گزارش کردند.

Gilat و همکاران [۷۲] نیز کرنش شکست مشابهی را (۲٪) در سرعت‌های کرنش زیاد روی نمونه‌های کامپوزیتی کربن-اپوکسی زیر بارگذاری کششی، مشاهده کردند. هم‌چنین در پژوهش‌های انجام شده توسط Ochola و همکاران، مقدار کرنش شکست در سرعت‌های کرنش  $10^{-3}$  و  $500$  s<sup>-1</sup>، روی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه به ترتیب ۱۵ و ۴٪ گزارش شده است. نتایج بیانگر کاهش مقاومت ضربه کامپوزیت شیشه-اپوکسی نسبت به کامپوزیت کربن-اپوکسی با افزایش سرعت کرنش است. در سرعت‌های کرنش کم نتایج مشابهی برای مقادیر میانگین تنش فشاری نهایی کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی (به ترتیب  $495$  و  $508$  MPa) مشاهده شده است. این بدان مفهوم است که نوع الیاف در سامانه زیر فشار محوری اثر قابل توجهی بر تنش نهایی در جهت الیاف ندارد.

در این زمینه، نتایج مشابهی توسط Matthews و Rawlings [۱۰۱] در ارتباط با استحکام طولی شبه‌ایستای کربن و شیشه گزارش شده است (۹۵۰-۶۵۰ MPa برای کربن و ۱۲۰۰-۷۰۰ MPa برای شیشه). در سرعت‌های کرنش زیاد مقادیر میانگین تنش نهایی کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی به ترتیب  $498$  و  $602$  MPa گزارش شده است. به طوری که به ازای افزایش سرعت کرنش از  $10^{-3}$  به  $500$  s<sup>-1</sup>، مقدار تنش فشاری در شیشه-اپوکسی (۱۸/۵٪) نسبت به کربن-اپوکسی (۰/۶٪) افزایش چشم‌گیری داشته است. پژوهش‌ها روی خواص کشسانی، افزایش سفتی از  $6$  GPa در  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup> به  $23$  GPa در سرعت کرنش  $500$  s<sup>-1</sup> را در کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی نشان داده است. مدول کشسانی کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی به ازای افزایش سرعت کرنش از  $10^{-3}$  به  $500$  s<sup>-1</sup>، معادل ۷۵/۸٪ (به ترتیب به مقدار  $19/4$  GPa و  $1/7$ ) افزایش داشته است.

مطالعه و بررسی آثار سرعت کرنش بر استحکام فشاری عرضی کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی و کربن-اپوکسی در محدوده  $10^{-4}$  تا  $500$  s<sup>-1</sup> توسط Tsai و Kuo [۱۰۲] با استفاده از دستگاه آزمایش سرو-

در مطالعه دیگری شکریه و جمال امید [۱۱۳]، آثار سرعت کرنش را بر خواص برشی صفحه‌ای کامپوزیت شیشه - اپوکسی در محدوده سرعت کرنش برشی  $0/002$  تا  $140 s^{-1}$  بررسی کردند. در پژوهش انجام شده به ازای افزایش سرعت کرنش، افزایشی به مقدار  $37\%$  در استحکام برشی مشاهده شده است. در حالی که در بیشترین سرعت کرنش کاهش به مقدار  $15\%$  در مدول برشی در مقایسه با مقادیر شبه‌ایستا گزارش شده است. آنها تغییر رفتار خواص ماده کامپوزیتی در سرعت‌های بارگذاری مختلف را براساس ماهیت گرانو ماتریس پلیمری و اثر شیوه‌های شکست، تغییرات اساسی در روند توالی تخریب، بیان کردند. هم‌چنین، نتایج پژوهش‌ها افزایش چشم‌گیری را در مقدار جذب انرژی که در طراحی سازه‌های زیر بارگذاری دینامیکی بسیار حایز اهمیت است، به ازای افزایش سرعت کرنش نشان داده است [۱۱۰-۱۰۷].

شکریه و جمال امید با بهره‌گیری از نتایج حاصل از آزمون‌های مختلف در محدوده وسیعی از سرعت کرنش و ارایه مدل مادی و مدل تخریب وابسته به سرعت کرنش، یک مدل عددی آسیب پیش‌رونده دینامیکی را به منظور بررسی رفتار سازه‌های کامپوزیتی در شرایط بارگذاری دینامیکی پایه‌ریزی کردند [۱۱۴، ۱۱۲].

## بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، کارهای انجام شده در ارتباط با آثار سرعت کرنش بر خواص کششی، فشاری، برشی و خمشی مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف به طور مفصل بررسی شده است. نتایج حاصل از بررسی خواص مواد کامپوزیتی در سرعت‌های کرنش مختلف، رفتار وابسته به سرعت این نوع مواد را نشان می‌دهد. این تغییر رفتار در خواص مواد کامپوزیتی در سرعت‌های بارگذاری مختلف نشأت گرفته از ماهیت گرانو ماتریس پلیمری و تغییرات اساسی در روند توالی تخریب است. هم‌چنین، رفتار مواد کامپوزیتی در هر سرعت کرنش معین ارتباط مستقیم به نوع الیاف و رزین دارد.

از عوامل مهم در بررسی رفتار مواد کامپوزیتی در سرعت‌های کرنش مختلف، انتخاب درست دستگاه آزمون و بهره‌گیری مناسب از آن است. در این راستا با توجه به مطالعات گسترده انجام شده در این مقاله، دسته‌بندی کامل و دقیقی از انواع روش‌های آزمایش برای توصیف رفتار مواد کامپوزیتی در حوزه‌های مختلف سرعت کرنش بر اساس آزمون‌های کششی، فشاری و برشی در جدول ۲ ارایه شده است.

مساوی یا کمتر از مقدار ایستا بوده است. مدول و استحکام در جهت عرضی (نسبت به الیاف) در سرعت کرنش  $210 s^{-1}$  افزایش ناگهانی نسبت به مقادیر ایستا داشته در حالی که کرنش نهایی کمتر از حالت ایستا به دست آمده است. افزایش  $30\%$  در مدول برشی داخل صفحه و استحکام نیز مشاهده شده است. در سومین روش آزمون ضربه، رفتار عرضی چندلایه‌های ضخیم کربن - اپوکسی در شرایط بارگذاری فشاری تا سرعت کرنش  $80 s^{-1}$  بررسی شد. در این حالت افزایش کمی در مدول عرضی با افزایش سرعت کرنش (تا  $18\%$  بیش از مقدار ایستا) گزارش شده است در حالی که استحکام و کرنش نهایی به ترتیب افزایشی به مقدار  $50\%$  و  $30\%$  بیش از مقادیر ایستا مشابه داشته است.

Lee و همکاران [۱۰۶] استحکام کششی و فشاری طولی کامپوزیت شیشه - اپوکسی با درصد حجمی الیاف  $60\%$  را در محدوده سرعت کرنش  $1$  تا  $200 s^{-1}$  با استفاده از ساز و کارهای افزایش سرعت کرنش، اندازه‌گیری کردند. نتایج حاصل، افزایش در استحکام (کششی و فشاری) را با افزایش سرعت کرنش نشان داده است. به طوری که به ازای سرعت کرنش  $50 s^{-1}$ ، استحکام (کششی - فشاری) به مقدار  $80\%$  نسبت به مقدار ایستا ( $0/01 s^{-1}$ ) افزایش داشته است.

شکریه و جمال امید [۱۰۷-۱۱۴] رفتار کششی، فشاری و برشی کامپوزیت‌های تک‌جهتی شیشه-اپوکسی با درصد حجمی الیاف  $50\%$  را در پنج سرعت جابه‌جایی  $0/0216$ ،  $0/027$ ،  $0/035$  و  $0/0427$  (محدوده سرعت کرنش  $0/001$  تا  $100 s^{-1}$ ) مطالعه کردند. آنها برای اجرای آزمون‌های ضربه کششی، فشاری و برشی از دستگاه آزمایش سرو-هیدرولیک با سرعت زیاد توسعه یافته استفاده کردند. به منظور اجرایی شدن مراحل آزمون‌ها و به دست آوردن روابط تنش - کرنش، یک بست ویژه نیز طراحی و توسعه داده شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های مختلف، تغییرات قابل توجهی را در خواص کامپوزیت شیشه - اپوکسی با افزایش سرعت کرنش نشان داده است. به طوری که در بررسی مقاومت ضربه نمونه‌های کششی و فشاری، افزایشی به مقدار  $12\%$  و  $52\%$  در مدول و استحکام کششی طولی و افزایشی به مقدار  $53/4\%$  و  $66/9\%$  در مدول و استحکام فشاری طولی در بیشترین سرعت کرنش در مقایسه با مقادیر حاصل از آزمون‌های شبه ایستا گزارش شده است [۱۱۰-۱۰۷].

کارهای انجام شده در ارتباط با آثار سرعت کرنش بر رفتار عرضی کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی، افزایشی به مقدار  $14\%$  و  $41/4\%$  را در مدول و استحکام کششی عرضی و  $23/4\%$  و  $31/4\%$  را در مدول و استحکام فشاری عرضی در مقایسه با مقادیر شبه‌ایستا متناظر نشان داده است [۱۱۲، ۱۱۱].



جدول ۲- دسته‌بندی روش‌های آزمون مختلف بر اساس سرعت کرنش.

نوع آزمون	سرعت کرنش اعمالی ( $s^{-1}$ )	دستگاه آزمون
کششی	$< 0/1$	دستگاه‌های آزمون متعارف
کششی	$0/1 - 100$	دستگاه سرو- هیدرولیک
کششی	$100 - 10^4$	دستگاه آزمون میله‌های پکینسون
کششی	$10^4$	حلقه انبساطی
کششی	$> 10^5$	Flyer plate
فشاری	$< 0/1$	دستگاه‌های آزمون متعارف
فشاری	$0/1 - 100$	دستگاه سرو- هیدرولیک
فشاری	$0/1 - 500$	دستگاه آزمون ثقلی و Cam plastometer
فشاری	$200 - 10^5$	دستگاه آزمون میله‌های پکینسون و تفتنگ‌گازی
برشی	$< 0/1$	دستگاه‌های آزمون متعارف
برشی	$0/1 - 100$	دستگاه سرو- هیدرولیک
برشی	$10 - 10^3$	ضربه پیچشی
برشی	$100 - 10^4$	دستگاه آزمون میله‌های پکینسون
برشی	$10^3 - 10^4$	برش دوشیاری و پانچ

آثار سرعت بارگذاری بر رفتار مواد کامپوزیتی در محدوده سرعت کرنش یکسان وجود دارد. به طوری که با افزایش سرعت بارگذاری نتایج ارایه شده توسط پژوهشگران مختلف در بررسی رفتار مکانیکی و استحکامی ماده کامپوزیتی در محدوده سرعت کرنش یکسان در مقایسه با مقادیر شبه‌ایستا رفتار متفاوتی (بی‌اثر، کاهش یا افزایش) را نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر عدم وجود دیدگاه‌های مشخص در توصیف رفتار وابسته به سرعت مواد کامپوزیتی در مقایسه با مواد فلزی است. در این راستا به منظور روشن شدن مطالب ارایه شده در ارتباط با تناقض‌های موجود، خلاصه‌ای از مشاهده‌ها در محدوده سرعت‌های جابه‌جایی یا کرنش مختلف در جدول ۳ آورده شده است.

برای رفع تناقض‌های موجود در خصوص آثار سرعت بارگذاری بر خواص کششی، فشاری، برشی و خمشی مواد کامپوزیتی، مطالعات و بررسی‌های منسجم بسیار زیادی به منظور ارایه دیدگاه‌های یکسان مورد نیاز است که این امر مستلزم بازنگری همه نتایج ارایه شده با هدف هم‌سان‌سازی نوع آزمایش، نوع الیاف و رزین استفاده شده، طراحی نمونه‌ها، شیوه انجام آزمایش و سایر پارامترهای اثرگذار است.

از آن جا که رفتار مواد کامپوزیتی به تغییرات سرعت کرنش وابسته است. بنابراین، به منظور دستیابی به محصولی مناسب باید رفتار وابسته به سرعت این مواد در طراحی‌ها و تحلیل‌های سازه‌ای لحاظ شود. این امر، نیازمند ارایه و توسعه معادلات پایه‌ای قابل اعتماد به منظور بیان آثار سرعت کرنش در توصیف رفتار یک یا گروهی از مواد است. به طوری که بتوان به کمک این معادلات، تغییرات سفتی، استحکام و کرنش تخریب مواد را در محدوده گسترده از سرعت کرنش بیان کرد.

در زمینه بررسی مقاومت ضربه‌ای مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف خرد شده تصادفی که امروزه در گستره وسیعی از کاربردهای مهندسی و فرایندهای صنعتی استفاده می‌شوند، مطالعات محدودی انجام شده است. بنابراین، بررسی و به دست آوردن جزئیات آثار سرعت کرنش بر خواص کششی، فشاری و برشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف خرد شده تصادفی پیشنهاد می‌شود.

از دیگر موارد حایز اهمیت در طراحی آزمایش‌های دینامیکی مواد کامپوزیتی، طراحی ساز و کارهای راه‌اندازی مناسب برای ایجاد حالت تنش مطلوب، ثابت کردن مناسب نمونه‌ها در مجموعه آزمون، انتخاب یا طراحی هندسه نمونه‌ها، مدت آزمون و زمان تعادل، اندازه‌گیری دقیق پارامترهای گذرا و جمع آوری، مدیریت و تفسیر داده‌هاست. لازم به ذکر است، در بررسی رفتار مواد کامپوزیتی در برابر ضربه (از سرعت کم تا زیاد) برخلاف خواص ایستایی آنها، استانداردهای مشخصی برای هندسه نمونه‌های آزمون و چگونگی انجام آزمایش در محدوده‌های سرعت کرنش مختلف وجود نداشته و پژوهشگران بر اساس شرایط تجربی نمونه‌های آزمون با هندسه‌های مختلف را طراحی می‌کنند. با توجه به نتایج پژوهش‌های ارایه شده، مشاهدات متناقضی برای

جدول ۳- خلاصه‌ای از اطلاعات منتشر شده در خصوص آثار سرعت بارگذاری بر خواص کششی، فشاری، برشی و خمشی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف.

مراجع	مواد مطالعه شده	محدوده سرعت یا جابه‌جایی یا سرعت کرنش	مشاهدات
Rotem and Lifshitz [۴۹] (۱۹۷۱)	شیشه - اپوکسی	$10^{-3} - 30 \text{ s}^{-1}$	افزایش در استحکام و مدول کششی با افزایش سرعت بارگذاری برای کامپوزیت‌های تک جهتی شیشه - اپوکسی
Davies and Magee [۵۰، ۵۱] (۱۹۷۵، ۱۹۷۷)	شیشه - پلی استر	$10^{-3} - 10^3 \text{ s}^{-1}$	افزایش در استحکام کششی نهایی با افزایش سرعت کرنش
Lifshitz [۲۲] (۱۹۷۶)	شیشه - اپوکسی	$4/2 \text{ m/s}$ ایستا	مستقل بودن رفتار مدول کششی نسبت به سرعت کرنش، افزایش در تنش شکست با افزایش سرعت کرنش برای چندلایه‌های ضرب‌دری شیشه - اپوکسی
Daniel and Liber [۵۲، ۵۳] (۱۹۷۶، ۱۹۷۸)	بور - اپوکسی، شیشه - اپوکسی، کربن - اپوکسی و کولار - اپوکسی	$1/4 \times 10^{-4} - 27 \text{ s}^{-1}$	افزایش در استحکام و مدول کششی با افزایش سرعت بارگذاری برای کامپوزیت‌های کولار - اپوکسی، غیرحساس بودن رفتار استحکام و مدول کششی نسبت به سرعت بارگذاری برای کامپوزیت‌های بور - اپوکسی، شیشه - اپوکسی و کربن - اپوکسی
Daniel et al. [۴۷] (۱۹۸۱)	کربن - اپوکسی	$100 - 500 \text{ s}^{-1}$	غیرحساس بودن رفتار استحکام کششی طولی نسبت به سرعت بارگذاری برای کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی، افزایش در خواص کششی عرضی و برشی با افزایش سرعت بارگذاری
Kawata et al. [۵۴، ۵۵] (۱۹۸۱، ۱۹۸۲)	شیشه - پلی استر، شیشه - اپوکسی، کربن - اپوکسی و الیاف کوتاه کربن - نایلون ۶۶	$10^{-3} - 2000 \text{ s}^{-1}$	افزایش در استحکام کششی برای کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی و شیشه - پلی استر و کاهش در استحکام کششی برای کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی و کربن - نایلون ۶۶ با افزایش سرعت بارگذاری
Hayes and Adams [۵۶] (۱۹۸۲)	شیشه - اپوکسی و کربن - اپوکسی	$2/7 - 4/9 \text{ m/s}$	غیرحساس بودن رفتار استحکام و مدول کششی نسبت به سرعت کرنش برای کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی، کاهش در استحکام و مدول کششی با افزایش سرعت بارگذاری برای کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی
Harding and Welsh [۵۷] (۱۹۸۳، ۱۹۸۵)	کربن - اپوکسی، شیشه - پلی استر، کربن - پلی استر و کولار - پلی استر	$10^{-4} - 10^3 \text{ s}^{-1}$	غیرحساس بودن رفتار مدول کششی و تنش شکست نسبت به سرعت کرنش برای کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی، افزایش در مدول کششی با افزایش سرعت بارگذاری برای کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی، شیشه - پلی استر، کربن - پلی استر و کولار - پلی استر
Chamis and Smith [۵۸] (۱۹۸۴)	کربن - اپوکسی	$381 \text{ s}^{-1}$ ایستا	غیرحساس بودن رفتار استحکام کششی طولی نسبت به سرعت بارگذاری برای کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی، افزایش در خواص کششی عرضی و خواص برشی با افزایش سرعت بارگذاری

مشاهدات	محدوده سرعت جابه‌جایی یا سرعت کرنش	مواد مطالعه شده	مراجع
افزایش در استحکام کششی، سفتی کششی و جابه‌جایی تخریب با افزایش سرعت بارگذاری	$1 \times 10^{-3} - 20 \text{ m/s}$	شیشه - رزین فنولی	Roberts and Harding [59] (1991)
افزایش در استحکام و مدول کششی با افزایش سرعت بارگذاری	$1/167 \times 10^{-3} - 6 \text{ s}^{-1}$	الیاف شیشه کوتاه بریده در رزین استیرن - مالیک انیدرید	Paterson et al. [60] (1991)
افزایش در تنش و کرنش کششی نهایی با افزایش سرعت بارگذاری	$10^{-9} - 10^3 \text{ s}^{-1}$	شیشه - اپوکسی	Staab and Gilat [61, 61] (1993, 1995)
افزایش در استحکام کششی، مدول کششی، استحکام برشی و مدول برشی، افزایش در انرژی کششی، برشی و خمشی با افزایش سرعت بارگذاری	$8 \times 10^{-6} - 4 \text{ m/s}$	شیشه - اپوکسی	Okoli and Smith [62, 64, 65] (1999, 1999, 2001)
افزایش در مدول کششی و کاهش در تنش و کرنش نهایی با افزایش سرعت بارگذاری	$4/42 \times 10^{-4} - 500 \text{ s}^{-1}$	شیشه - اپوکسی	Armenakas and Sciamarella [66] (1973)
افزایش در استحکام و مدول کششی با افزایش سرعت بارگذاری	$0/1 - 10 \text{ s}^{-1}$	شیشه - پلی استر و شیشه - فنولی	Barre et al. [67] (1996)
وابستگی کمی به سرعت کرنش تنها در خواص کششی عرضی	$10^3 - 10^3 \text{ s}^{-1}$	کربن - اپوکسی	Melin and Asp [68] (1999)
افزایش در استحکام کششی با افزایش سرعت بارگذاری	$3/3 \times 10^{-9} - 12 \text{ m/s}$	شیشه - پلی آمید	Vashchenko et al. [69] (2000)
افزایش در استحکام و مدول کششی با افزایش سرعت بارگذاری	$3 \times 10^{-9} - 8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$	دانه شیشه - HDPE	Bai et al. [70] (2000)
افزایش در حداکثر تنش و کرنش کششی و افزایش در مدول کششی با افزایش سرعت بارگذاری	$1 \text{ s}^{-1} - 600 \text{ s}^{-1}$ $\sim 400$	کربن - اپوکسی	Gilat et al. [72] (2002)
افزایش در استحکام و مدول کششی طولی با افزایش سرعت کرنش	$10^{-4} - 0/1 \text{ s}^{-1}$	شیشه - اپوکسی	Fereshteh-Saniee et al. [73] (2005)
افزایش در استحکام کششی در جهت طولی، عرضی و ضخامت کامپوزیت بافته شده شیشه - اپوکسی با افزایش سرعت کرنش	$140 - 400 \text{ s}^{-1}$	شیشه - اپوکسی	Naik et al. [75] (2010)
غیرحساس بودن رفتار مدول فشاری نسبت به سرعت کرنش، افزایش در استحکام فشاری با افزایش سرعت کرنش	$10^{-9} - 10^4 \text{ s}^{-1}$	فولاد - اپوکسی	Sierakowski and Nevill [76] (1971)
افزایش در استحکام فشاری با افزایش سرعت بارگذاری	$10^3 - 10^3 \text{ s}^{-1}$	شیشه - پلی استر	Amijima and Fujii [77] (1980)
افزایش کمی در مدول فشاری نسبت به سرعت کرنش در راستای الیاف، غیرحساس بودن رفتار استحکام نسبت به سرعت کرنش در راستای الیاف، افزایش در استحکام و مدول فشاری با افزایش سرعت کرنش در راستای عمود بر الیاف	$500 \text{ s}^{-1}$	کربن - اپوکسی	Daniel and LaBedz [78] (1983)

مراجع	مواد مطالعه شده	محدوده سرعت یا جابه‌جایی یا سرعت کرنش	مشاهدات
Cazeneuve and Maile [۷۹] (۱۹۸۵)	کربن - اپوکسی	$10^{-3} - 100 \text{ s}^{-1}$	افزایش در استحکام فشاری طولی و عرضی با افزایش سرعت بارگذاری
Kumar et al. [۸۰] (۱۹۸۶)	شیشه - اپوکسی	$265 (\pm 50) \text{ s}^{-1}$	افزایش در استحکام فشاری با افزایش سرعت بارگذاری
El-Habak [۸۱] (۱۹۹۱)	شیشه - اپوکسی، شیشه - پلی استر، شیشه - وینیل استر	$10 - 10^3 \text{ s}^{-1}$	افزایش جزئی در استحکام فشاری با افزایش سرعت کرنش، گزارش شده بیشترین استحکام بین کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی، شیشه - پلی استر و شیشه - وینیل استر برای کامپوزیت با زمینه وینیل استر.
Montiel and Williams [۸۲] (۱۹۹۲)	کربن PEEK	$\sim 8 \text{ s}^{-1}$	افزایش در کرنش نهایی و استحکام فشاری با افزایش سرعت کرنش
Harding [۸۳] (۱۹۹۳)	شیشه - اپوکسی	$860 \text{ s}^{-1}$	افزایش در مدول اولیه، استحکام و کرنش نهایی فشاری با افزایش سرعت کرنش
El-Habak [۸۵] (۱۹۹۳)	شیشه - اپوکسی و شیشه - پلی استر	$100 - 1000 \text{ s}^{-1}$	افزایش در تنش فشاری نهایی با افزایش سرعت کرنش
Tay et al. [۸۶] (۱۹۹۵)	شیشه - اپوکسی	$5 \times 10^4 - 2500 \text{ s}^{-1}$	افزایش در مدول فشاری با افزایش سرعت کرنش
Powers et al. [۸۷ ، ۸۸] (۱۹۹۵)	کربن - اپوکسی و کربن - پلی آمید	$49 - 1430 \text{ s}^{-1}$	افزایش در تنش تسلیم فشاری و انرژی کرنش کشسانی با افزایش سرعت بارگذاری برای کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی، غیرحساس بودن رفتار استحکام نهایی و مدول کشسانی نسبت به سرعت بارگذاری برای کامپوزیت‌های کربن - اپوکسی و کربن - پلی آمید
Li et al. [۸۹] (۱۹۹۵)	الیاف شیشه کوتاه - بلور مایع	$10^{-4} - 350 \text{ s}^{-1}$	افزایش در استحکام و مدول فشاری با افزایش سرعت بارگذاری
Takeda and Wan [۹۰] (۱۹۹۵)	شیشه - پلی استر	$10^{-3} - 750 \text{ s}^{-1}$	افزایش در استحکام فشاری با افزایش سرعت بارگذاری
Tzeng and Abrahamian [۹۱ - ۹۳] (۱۹۹۵ ، ۱۹۹۶ ، ۱۹۹۸)	کربن - اپوکسی	$0.254 - 2/54 \text{ m/s}$	افزایش در استحکام و کرنش فشاری با افزایش سرعت بارگذاری
Lowe [۹۴] (۱۹۹۶)	کربن - اپوکسی	$1/7 \times 10^{-7} - 1/7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	افزایش در مدول و استحکام فشاری عرضی با افزایش سرعت کرنش
Hsiao and Daniel [۹۵] (۱۹۹۸)	کربن - اپوکسی	$> 10 \text{ s}^{-1}$	افزایش در استحکام فشاری طولی و عرضی برای کامپوزیت‌های تک‌جهتی کربن - اپوکسی و افزایش در کرنش نهایی طولی با افزایش سرعت کرنش در حالی که کرنش نهایی عرضی نسبت به سرعت کرنش غیرحساس بوده است، افزایش در استحکام و کرنش نهایی با افزایش سرعت کرنش برای کامپوزیت‌های متعامد کربن - اپوکسی

مشاهدات	محدوده سرعت جابه‌جایی یا سرعت کرنش	مواد مطالعه شده	مراجع
غیرحساس بودن رفتار استحکام نسبت به سرعت کرنش	$2 \times 10^{-2} - 1/3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	کربن - اپوکسی	Woldesenbet and Vinson [۹۶] (۱۹۹۹)
افزایش در تنش فشاری با افزایش سرعت بارگذاری	$400 - 700 \text{ s}^{-1}$	شیشه - اپوکسی	Ninan et al. [۹۷] (۲۰۰۱)
افزایش در استحکام فشاری عرضی با افزایش سرعت کرنش، افزایش کمی در مدول فشاری عرضی نسبت به سرعت کرنش، غیرحساس بودن رفتار کرنش نهایی عرضی نسبت به سرعت کرنش	$2000 \text{ s}^{-1}$ ایستا	کربن - اپوکسی	Hall and Gudun [۹۸] (۲۰۰۱)
افزایش در استحکام و مدول فشاری با افزایش سرعت کرنش	$82, 164$ و $817 \text{ s}^{-1}$	کربن - اپوکسی	Hosur et al. [۹۹] (۲۰۰۱)
افزایش در تنش فشاری نهایی با افزایش سرعت کرنش برای کامپوزیت متعامد شیشه - اپوکسی، افزایش جزئی در تنش فشاری نهایی برای کامپوزیت متعامد کربن - اپوکسی، افزایش مدول کشسانی برای کامپوزیت‌های متعامد شیشه - اپوکسی و کربن - اپوکسی و کاهش در کرنش نهایی برای کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی و کربن - اپوکسی با افزایش سرعت بارگذاری	$450 \text{ s}^{-1}$	شیشه - اپوکسی و کربن - اپوکسی	Ochola et al. [۱۰۰] (۲۰۰۴)
افزایش استحکام فشاری عرضی با افزایش سرعت بارگذاری برای کامپوزیت‌های شیشه - اپوکسی و کربن - اپوکسی	$10^{-4} - 500 \text{ s}^{-1}$	شیشه - اپوکسی و کربن - اپوکسی	Tsai and Kuo [۱۰۲] (۲۰۰۶)
افزایش در استحکام خمشی با افزایش سرعت بارگذاری	$10^{-7} - 10^{-1} \text{ m/s}$	نمد شیشه - پلی استر	Sims et al. [۱۰۳] (۱۹۸۸)
افزایش در خواص کششی و فشاری (استحکام و مدول) با افزایش سرعت کرنش	$0 - 3000 \text{ s}^{-1}$	کربن - اپوکسی	Groves et al. [۱۰۴] (۱۹۹۳)
افزایش در مدول کششی و فشاری طولی با افزایش سرعت بارگذاری، غیرحساس بودن رفتار استحکام و کرنش کششی و فشاری طولی نسبت به سرعت بارگذاری، افزایش در استحکام و مدول کششی و فشاری عرضی با افزایش سرعت بارگذاری در حالی که کرنش کششی نسبت به سرعت بارگذاری غیرحساس بوده است.	$1 \times 10^{-4} - 500 \text{ s}^{-1}$	کربن - اپوکسی	Daniel et al. [۱۰۵] (۱۹۹۵)
افزایش در استحکام کششی و فشاری با افزایش سرعت کرنش	$1 - 200 \text{ s}^{-1}$	شیشه - اپوکسی	Lee et al. [۱۰۶] (۲۰۰۰)
افزایش در استحکام و مدول کششی و فشاری طولی، افزایش در استحکام و مدول کششی و فشاری عرضی، کاهش در مدول برشی، افزایش در استحکام برشی و افزایش در انرژی کششی و فشاری با افزایش سرعت بارگذاری	$10^{-3} - 100 \text{ s}^{-1}$	شیشه - اپوکسی	Shokrieh and Jamal Omid [۱۰۷-۱۱۴] (۲۰۰۹ ، ۲۰۱۱)



## مراجع

- Zukas, J.A., *High Velocity Impact Dynamics*, John Wiley and Sons, 1990.
- Reid S.R. and Zhou G., *Impact Behaviour of Fibre-Reinforced Composite Materials and Structures*, Woodhead, Cambridge and CRC, 2000.
- Impact Response and Dynamic Failure of Composites and Laminate Materials, Trans Tech*, Kim J.K. and Yu T.X. (Eds.), Key Engineering Materials, Zurich, Switzerland, 141-143, 402-497, 1998.
- Mallick P.K. and Broutman L.J., Static and Impact Properties of Laminated Hybrid Composites, *J. Test. Evaluat.*, **5**, 190-200, 1977.
- Sierakowski R.L., *High Strain Rate Resting of Composites*, Rajendran A.M., Nicholas T. (Eds.), Dynamic Constitutive-Failure Models, AFWAL-TR-88-4229, Wright-Patterson Air Force Base, OH, USA, 1988.
- Al-Salehi F.A.R., Al Hassani S.T.S., and Hinton M.J., An Experimental Investigation into the Strength of Angle Ply GRP Tubes under High Rate of Loading, *J. Compos. Mater.*, **23**, 288-305, 1989.
- Al-Salehi F.A.R., Al-Hassani S.T.S., Bastaki N.M., and Hinton M.J., Rate Effects on Aramid Fibre/Epoxy (KRP) Tubes under Hoop Loading, *J. Compos. Mater.*, **24**, 894-917, 1990.
- Jenq S.T. and Sheu S.L., High Strain Rate Compressional Behavior of Stitched and Unstitched Composite Laminates with Radial Constraint, *J. Compos. Struct.*, **25**, 427-438, 1993.
- ASTM D 3039-76, Standard Test Method for Properties of Fiber-Resin Composites, ASTM Designation, 118-22, 1989.
- ASTM D 3479-76, Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Oriented Fiber-Resin Matrix Composites, ASTM Designation, 142-44, 1990.
- ASTM D 3410-87, Standard Test Method for Compressive Properties of Unidirectional or Crossly Fiber Resin Composites, ASTM Designation, 132-41, 1987.
- ASTM D 695-89, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, ASTM Designation, 197-201, 1989.
- ASTM D 3518-76, Standard Practice for In-Plane Shear Stress-Strain Response of Unidirectional Reinforced Plastics, ASTM Designation, 145-50, 1982.
- ASTM D 4255-83, Standard Guide for Testing In-Plane Properties of Composite Laminates, ASTM Designation, 195-204, 1983.
- ASTM D 2733-70, Standard Methods of Test for Interlaminar Shear Strength of Structural Reinforced Plastics at Elevated Temperatures, ASTM Designation, 773-776, 1970.
- ASTM D 3846-93, Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics, ASTM Designation, 435-37, 1993.
- Lal K.M., Low Velocity Transverse Impact Behavior of 8-Ply, Graphite-Epoxy Laminates, *J. Reinforc. Plast. Compos.*, **2**, 216-225, 1983.
- Lal K.M., Residual Strength Assessment of Low Velocity Impact Damage of Graphite-Epoxy Laminates, *J. Reinforc. Plast. Compos.*, **2**, 226-238, 1983.
- Lal K.M., Evaluation of Residual Strength of Composite Laminates Damaged by Low Velocity Impacts, *Proceeding of 6th International Conference on Fracture (ICF6)*, Pergamon, 2933-2943, 1984.
- Sjoblom P. and Hwang B., Compression-after Impact: The \$5,000 Data point, *Proceeding of 34th International. SAMPE Symposium.*, Reno, Nevada, May 8-11, 1411-1421, 1989.
- [www.zwick.com.au/pdf/brochures/14\\_573\\_HIT\\_FP\\_E.pdf](http://www.zwick.com.au/pdf/brochures/14_573_HIT_FP_E.pdf), Available in 2 May 2007.
- Lifshitz J.M., Impact Strength of Angle Ply Fiber Reinforced Materials, *J. Compos. Mater.*, **10**, 92-101, 1976.
- Ambur D.R., Prasad C.B., and Waters W.A., A Dropped Weight Apparatus for Low Speed Impact Testing of Composite Structures, *J. Experiment. Mechanic.*, **35**, 77-82, 1995.
- Levin K., Effect of Low-Velocity Impact on Compressive Strength of Quasi-Isotropic Laminate, *Proceeding of American Society for Composite, First Technical Conference*, Dayton, OH, USA, 313-326, 1986.
- Tsai X. and Tang J., Impact Behavior of Laminated Glass Fiber Composites by Weight Dropping Testing Method, *International SAMPE Symposium and Exhibition*, **36**, 1118-1127, 1991.
- Schoeppner G.A., Low Velocity Impact Response of Tension Preloaded Composite Laminates, *10th DoD/NASA/FAA Conference on Fibrous Composites in Structural Design*, Nov. 1-4,

- Hilton Head Island, S.C., 1993.
27. Wu E. and Liao J., Impact of Unstitched and Stitched Laminates Bi-line Loading, *J. Compos. Mater.*, **28**, 1640-1658, 1994.
  28. Shokrieh M.M., Tozandehjani H., and Jamal Omidi M., Effect of Fiber Orientation and Cross Section of Composite Tubes on their Energy Absorption Ability in Axial Dynamic Loading, *J. Mechanic. Compos. Mater.*, **45**, 567-576, 2009.
  29. Husman G.E., Whitney J.M., and Halpin J.C., Residual Strength Characterization of Laminated Composite Subjected to Impact Loading, *ASTM STP*, 568, 92-113, 1975.
  30. Cantwell W.J. and Morton J., Detection of Impact Damage in CFRP Laminates, *J. Compos. Struct.*, **3**, 241-257, 1985.
  31. Qian Y. and Swanson S.R., Experimental Measurement of Impact Response in Carbon/Epoxy Plates, AIAA Paper 89-1276-CP, *Proceeding of 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC, Struct., Struct. Dyn. Mater. Conf., Mobile, Al*. 1989.
  32. Jenq S.T., Wang S.B., and Sheu L.T., Model for Predicting the Residual Strength of GFRP Laminates Subject to Ballistic Impact, *J. Reinforc. Plast. Compos.*, **11**, 1127-1141, 1992.
  33. Delfosse D., Pageau G., Bennett A., and Pousatrip A., Instrumented Impact Testing at High Velocities, *J. Compos. Technol. Res.*, **15**, 38-45, 1993.
  34. Jenq S.T., Jing H.S., and Chung C., Predicting the Ballistic Limit for Plain Woven Glass/Epoxy Composite Laminate, *Int. J. Impact Eng.*, **15**, 451-464, 1994.
  35. <http://astro.kent.ac.uk/facilities/lgg.htm>, available in 2 May 2007.
  36. Hopkinson B., A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of High Explosives or by the Impact of Bullets, *Phil. Trans. R. Soc. London A*, **213**, 437-456, 1914.
  37. Davies R.M., A simple Modification of the Hopkinson Pressure bar, *Proceeding 7th International Congress on Applied Mechanics*, 1, 404, 1948.
  38. Kolsky H., An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading, *Proc. Phys. Soc. London*, **62B**, 676-700, 1949.
  39. Griffiths L.J. and Martin D.J., A study of the Dynamic Behaviour of a Carbon-Fiber Composite Using the SPLIT HOPKINSON PRESSURE BAR, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **7**, 2329-2341, 1974.
  40. Harding J. and Welsh L.M., A Tensile Testing Technique for Fiber-Reinforced Composites at Impact Rates of Stain, *J. Mater. Sci.*, **18**, 1810-1826, 1983.
  41. Staab G.H. and Gilat A., High Strain Rate Characterization of Angle-Ply Glass/Epoxy Laminates, *Proceeding 9th International Conference on Composite Materials, ICCM IX, Madrid, Spain*, **5**, 278-85, 1993.
  42. Kaiser M.A., *Advancements in the Split Hopkinson Bar Test*, MSC Thesis, Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute, 1998.
  43. Johnson P.C., Stern B.A., and Davis R.S., Symposium on the Dynamic Behavior of Materials, Special Technical Publication No. 336, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 195, 1963.
  44. Fyfe I.M. and Rajendran A.M., Dynamic Pre-strain and Inertia Effects on the Fracture of Metals, *J. Mechanic. Phys. Solid.*, **28**, 17-26, 1980.
  45. Gourdin W.H., Weinland S.L., and Boling R.M., Development of the Electromagnetically Launched Expanding Ring as a High Strain-Rate Technique, *Rev. Scientific Instrument.*, **60**, 1989.
  46. Satapathy S. and Landen D., Expanding Ring Experiments to Measure High-Temperature adiabatic properties, *Int. J. Impact Eng.*, **33**, 735-744, 2006.
  47. Daniel I.M., LaBedz R.H., and Liber T., New Method for Testing Composites at Very High Strain Rates, *J. Experiment. Mechanics.*, **21**, 71-77, 1981.
  48. Daniel I.M., Hamilton W.G., and Labeledz R.H., Strain Rate Characterization of Unidirectional Graphite Epoxy Composites, *Compos. Mater., Test. Design, ASTM STP*, **787**, 393-413, 1982.
  49. Rotem A. and Lifshitz J.M., Longitudinal Strength of Unidirectional Fibrous Composite under High Rate of Loading, *Proceeding of 26th Annual Technology Conference, Society for Plastics Industry, Reinforced Plastics/Composites Division, Washington DC, Section 10-G, 1-10*, 1971.
  50. Davies R.G. and Magee C.L., Effect of Strain Rate Upon the Tensile Deformation of Materials, *J. Eng. Mater. Technol.*, **97**, 151-155, 1975.
  51. Davies R.G. and Magee C.L., Effect of Strain Rate Upon the Bending Behavior of Materials, *J. Eng. Mater. Technol.*, **99**, 47-51, 1977.
  52. Daniel I.M. and Liber T., Strain Rate Effects on the Mechanical Properties of Fiber Composites, Report NASA CR-135087, Part 3, 1976.

53. Daniel I.M. and Liber T., Testing of Fiber Composites at High Strain Rates, *Proceeding of 2nd International Conference on Composite Materials, ICCM II*, Toronto, Canada, 1003-1118, 1978.
54. Kawata K., Hondo A., Hashimoto S., Takeda N., and Chung H.L., Dynamic Behaviour Analysis of Composite Materials, *Proceeding of Japan-US Conference on Composite Materials*, Kawata K. and Akasaka T. (Eds.), Japan Society for Composite Materials, Tokyo, 2-11, 1981.
55. Kawata K., Hashimoto S., and Takeda N., Mechanical Behaviours in High Velocity Tension of Composites, *Proceeding 4th International Conference on Composite Materials, ICCM IV*, Hayashi T. et al. (Eds.), Tokyo, Japan, 829-836, 1982.
56. Hayes S.V., and Adams D.F., Rate Sensitive Tensile Impact Properties of Fully and Partially Loaded Unidirectional Composites, *J. Test. Evaluat.*, **10**, 61-68, 1982.
57. Welsh L. M. and Harding J., Effect of Strain Rate on the Tensile Failure of Woven Reinforced Polyester Resin Composites, *J. Phys. Colloque C5*, **46**, 405-414, 1985.
58. Chamis C.C. and Smith G.T., Environmental and High Strain Rate Effects on Composites for Engine Applications, *AIAA J.*, **22**, 128-134, 1984.
59. Roberts S. and Harding J., Effect of Strain Rate on the Tensile Failure of Glass-Fibre Braided Tubes, *J. de Physique IV*, **1**, C3-353-C3-359, 1991.
60. Peterson B.L., Pangborn R.N., and Pantano C.G., Static and High Strain Rate Response of a Glass fiber reinforced thermoplastic, *J. Compos. Mater.*, **25**, 887-906, 1991.
61. Staab G.H. and Gilat A., High Strain Rate Response of Angle-Ply Glass/Epoxy Laminates, *J. Compos. Mater.*, **29**, 1308-1320, 1995.
62. Okoli O.I. and Smith G.F., Overcoming Inertial Problems in the High Strain Rate Testing of a Glass/Epoxy Composite, *Proceeding of Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference (ANTEC)*, Advanced Polymer Composites Division, 2, 2998-3002, 1995.
63. Okoli O.I. and Smith G.F., The Effect of Strain Rate and Fiber Content on the Poisson's Ratio of Glass/Epoxy Composites, *J. Compos. Struct.*, **48**, 157-161, 2000.
64. Okoli O.I. and Smith G.F., Aspects of the Tensile Response of Random Continuous Glass/Epoxy Composites, *J. Reinforc. Plast. Compos.*, **18**, 606-613, 1999.
65. Okoli O.I., The Effects of Strain Rate and Failure Modes on the Failure Energy of Fiber Reinforced Composites, *J. Compos. Struct.*, **54**, 299-303, 2001.
66. Armenakas A.E. and Sciammarella C.A., Response of Glass-Fibers-Reinforced Epoxy Specimens to High Rates of Tensile Loading, *J. Experiment. Mechanic.*, **13**, 433-440, 1973.
67. Barre S., Chotard T., and Benzeggagh M.L., Comparative Study of Strain Rate Effects on Mechanical Properties of Glass Fibre-Reinforced Thermoset Matrix Composites, *J. Compos. Part A*, **27**, 1169-1181, 1996.
68. Melin L.G. and Asp L.E., Effects of Strain Rate on Transverse Tension Properties of a Carbon/Epoxy Composite: Studied by Moiré Photography, *J. Compos. Part A*, **30**, 305-316, 1999.
69. Vashchenko A., Spiridonova I., and Sukhovaya E. Deformation and Fracture of Structural Materials under High-rate Strain, *Metalurgija/Metallurgy*, **39**, 89-92, 2000.
70. Bai S.L., Cao K., Chen J.K., and Liu Z.D., Tensile Properties of Rigid Glass Bead/HDPE Composites, *J. Polym. Polym. Compos.*, **8**, 413-418, 2000.
71. Shim V.P.W., Yuan J., and Lim C.T., Dynamic Tensile Response of a Carbon Fiber Reinforced LCP Composite and Its Temperature Sensitivity, *Proceedings of SPIE, Chau F.S. and Quan C. (Eds.)*, 4317, 100-105, 2001.
72. Gilat A., Goldberg R.K., and Roberts G.D., Experimental Study of Strain-Rate-Dependent Behavior of Carbon/Epoxy Composite, *J. Compos. Sci. Technol.*, **62**, 1469-1476, 2002.
73. Fereshteh-Saniee F., Majzooobi G.H., and Bahrami M., An Experimental Study on the Behavior of Glass-Epoxy Composite at Low Strain Rates, *J. Mater. Proc. Technol.*, 162-163, 39-45, 2005.
74. Taniguchi N., Nishiwaki T., and Kawada H., Tensile Strength of Unidirectional CFRP Laminate under High Strain Rate, *J. Adv. Compos. Mater.*, **16**, 167-180, 2007.
75. Naik N.K., Yernamma P., Thoram N.M., Gadipatri R., and Kavala V.R., High Strain Rate Tensile Behavior of Woven Fabric E-Glass/Epoxy Composite, *J. Polym. Test.*, **29**, 14-22, 2010.
76. Sierakowski R.L. and Nevill G.E., Dynamic Compressive Strength and Failure of Steel Reinforced Epoxy Composites, *J. Compos. Mater.*, **5**, 362-377, 1971.
77. Amijima S. and Fujii T., Compressive Strength and Fracture Characteristics of Fiber Composites under Impact Loading, *Proceeding of 3rd International Conference on Composite Ma-*

- terials, *ICCM III*, Bunsell A.R. (Ed.), Paris, France, 399-413, 1980.
78. Daniel I.M. and LaBedz R.H., Method for Compression Testing of Composite Materials at High Strain Rates, Compression Testing of Homogeneous Materials and Composites, ASTM STP 808, Chait R. and Papirno R. (Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 121-139, 1983.
  79. Cazeneuve C. and Maile J.C., Study of the Behaviour of Carbon Fibre Composites under Different Deformation Rates, *J. Phys. Colloque C5*, **46**, 551-556, 1985.
  80. Kumar P., Garg A., and Agarwal B.D., Dynamic Compressive Behaviour of Unidirectional GFRP for Various Fiber Orientations, *J. Mate. Lett.*, **4**, 111-116, 1986.
  81. El-Habak A.M.A., Mechanical Behaviour of Woven Glass Fibre Reinforced Composites under Impact Compression Load, *J. Compos.*, **22**, 129-134, 1991.
  82. Montiel D.M. and Williams C.J., A Method for Evaluating the High Strain Rate Compressive Properties of Composite Materials, In Composite materials: Testing and Design, ASTM STP 1120, Grimes G.C. (Ed.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Vol. 10, 54-65, 1992.
  83. Harding J., Effect of strain Rate and Specimen Geometry on the Compressive Strength of Woven Glass-Reinforced Epoxy Laminates, *J. Compos.*, **24**, 323-332, 1993.
  84. Lindholm U.S., Some Experiments with the Split Hopkinson Pressure Bar, *J. Mechanic. Phys. Solid.*, **12**, 317-335, 1964.
  85. El-Habak A.M.A., Compressive Resistance of Unidirectional GFRP under High Rate of Loading, *J. Compos. Technol. Res.*, **15**, 311-317, 1993.
  86. Tay T.E., Ang H.G., and Shim V.P.W., An Empirical Strain Rate-Dependent Constitutive Relationship for Glass-Fiber Reinforced Epoxy and Pure Epoxy, *J. Compos. Struct.*, **33**, 201-210, 1995.
  87. Powers B.M., Vinson J.R., and Hall I.W., High Strain Rate Mechanical Properties of IM7/8551-7 Graphite Epoxy Composite, *Proceeding of 10th Technical Conference of the American Society for Composites*, 227-238, 1995.
  88. Powers B.M., Vinson J.R., Wardle M., and Scott B., High Strain Rate Effects on Two AS4 Graphite Fiber Polymer Matrix Composites, In High Strain Rate Effects on Polymer, Metal and Ceramic Matrix Composites and Other Advanced Materials, *ASME*, **48**, 179-189, 1995.
  89. Li R.K.Y., Lu S.N., and Choy C.L., Tensile and Compressive Deformation of a Short-glass-fiber-reinforced Liquid Crystalline Polymer, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **8**, 304-322, 1995.
  90. Takeda N. and Wan L., Impact Compression Damage Evolution in Unidirectional Glass Fiber Reinforced Polymer Composites, In High Strain Rate Effects on Polymer, Metal and Ceramic Matrix Composites and Other Advanced Materials, *ASME*, **48**, 109-113, 1995.
  91. Tzeng J.T. and Abrahamian A.S., Dynamic Compressive Properties of Composites at Interior Ballistic Rates of Loading-Experimental Method, *Compos. Eng.*, **5**, 501-508, 1995.
  92. Tzeng J.T. and Abrahamian A.S., Dynamic Compressive Properties of Laminated Composites at High Rates of Loading, *Proceeding 11th Technical Conference of the American Society for Composites*, 178-188, 1996.
  93. Tzeng J.T. and Abrahamian A.S., An Experimental Method for Compressive Properties of Laminated Composites at High Rates of Loading, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **11**, 133-143, 1998.
  94. Lowe A., Transverse Compressive Testing of T300/914, *J. Mater. Sci.*, **31**, 1005-1111, 1996.
  95. Hsiao H.M. and Daniel I.M., Strain Rate Behavior of Composite Materials, *J. Compos. Part B*, **29B**, 521-533, 1998.
  96. Woldesenbet E. and Vinson J.R., Specimen Geometry Effects on High Strain-Rate Testing of Graphite/Epoxy Composites, *AIAA J.*, **37**, 1102-1106, 1999.
  97. Ninan L., Tsai J. and Sun C.T., Use of Split Hopkinson Pressure bar for Testing Off-axis Composites, *Int. J. Impact Eng.*, **25**, 291-313, 2001.
  98. Hall I.W. and Guden M., High Strain Rate Testing of a Unidirectionally Reinforced Graphite Epoxy Composite, *J. Mater. Sci. Lett.*, **20**, 897-899, 2001.
  99. Hosur M.V., Alexander J. and Vaidya U.K., High Strain Rate Compression of Carbon/Epoxy Laminate Composites, *J. Compos. Struct.*, **52**, 405-417, 2001.
  100. Ochola R.O., Marcus K., Nurick G.N., and Franz T., Mechanical Behaviour of Glass and Carbon Fiber Reinforced Composites at Varying Strain Rates, *J. Compos. Struct.*, **63**, 455-467, 2004.
  101. Matthews F.L. and Rawlings R.D., *Composite Materials: Engineering Science*, 270, 1994.

102. Tsai J.L. and Kuo, J.C., Investigating Strain Rate Effect on Transverse Compressive Strength of Fiber Composites, *Key Eng. Mater.*, 306-308 II, 733-738, 2006.
103. Sims G.D. *Proceeding of 6th International Conference on Composite Materials and 2nd European Conference on Composite Materials*, Imperial College, London, 3, 494-507, 1988.
104. Groves S.E., Sanchez R.J., Lyon R.E. and Brown A.E., High Strain Rate Effects for Composite Materials, In *Composite Materials: Testing and Design*, Vol. 11, ASTM STP 1206, Camponeschi E.T.(Ed.) American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 162-176, 1993.
105. Daniel I.M., Hsiao H.M., and Cordes R.D., Dynamic Response of Carbon/Epoxy Composites, In *High Strain Rate Effects on Polymer, Metal and Ceramic Matrix Composites and other Advanced Materials*, *ASME*, 48, 167-177, 1995.
106. Lee D.G., Lim T.S., and Cheon S.S., Impact Energy Absorption Characteristics of Composite Structures, *J. Compos. Struct.*, 50, 381-390, 2000.
107. Shokrieh M.M. and Jamal Omid M., Tension Behavior of Unidirectional Glass/Epoxy Composites under Different Strain Rates, *J. Compos. Struct.*, 88, 595-601, 2009.
108. Shokrieh M.M. and Jamal Omid M., Tensile Response of Glass-fiber Reinforced Polymeric Composites under Different Strain Rates, *Proceeding of 7th International Conference on Composite Science and Technology*, Sharjah, United Arab Emirates, 2009.
109. Shokrieh M.M. and Jamal Omid M., Compressive Response of Glass-fiber Reinforced Polymeric Composites to Increasing Compressive Strain Rates, *J. Compos. Struct.*, 89, 517-523, 2009.
110. Shokrieh M.M. and Jamal Omid M., Experimental Study of Strain Rate Effects on the Compressive Properties of Glass/Epoxy Composites, *Proceeding of 8th International Conference of Iranian Aerospace Society (IAS)*, Shahinshahr, Esfahan, 2009.
111. Shokrieh M.M. and Jamal Omid M., Investigating the Transverse Behavior of Glass-Epoxy Composite under Intermediate Strain Rates, *J. Compos. Struct.*, 93, 690-696, 2011.
112. Shokrieh M.M. and Jamal Omid M., Development of a Strain-Rate Dependent Progressive Damage Model for Crash Analysis of Composite Laminates, *DYMAT 2009*, EDP Sciences, 1263-1269, 2009.
113. Shokrieh M.M. and Jamal Omid M., Investigation of Strain Rate Effects on In-Plane Shear Properties Of Glass/Epoxy Composites, *J. Compos. Struct.*, 91, 95-102, 2009.
114. Shokrieh M.M. and Jamal Omid M., Dynamic Progressive Damage Modeling of Fiber-Reinforced Composites under Different Strain Rates, *J. Compos. Mater.*, 44, 2723-2745, 2010.