

An Overview of the Mechanical Properties of 3D Woven Fabrics-Reinforced Composites

Mohammad Hasan Boroomand, Ali Asghar Alamdar Yazdi*, and Mohammad Saleh Ahmadi
Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, P.O. Box 89195-741, Yazd, Iran

Received: 13 March 2021, Accepted: 17 July 2021

Abstract

In recent years, there has been a sharp increase in scientific research on 3D textiles as reinforcements for composite materials, due to their unique mechanical properties compared to multilayer 2D textiles. Most textile-reinforced composites are fabricated by placing several layers of two-dimensional fabrics. They have low resistance to delamination under impact forces and their mechanical properties, especially fatigue properties and compressive strength, are seriously reduced after impact. To prevent these problems, it is necessary to strengthen the composite in the third dimension. If three-dimensional textiles are used, the desired thickness, which requires many layers in two-dimensional textiles, can be obtained with fewer layers, resulting in the production of lighter structures with desirable physical and mechanical properties, as well as suitable thermal insulation properties. 3D textile-reinforced composites show different failure modes than laminated composites due to their complex structural properties and mechanical properties. The purpose of this article is to present an overview of previous research works on the tensile, compressive, flexural, shear, and impact properties of three-dimensional composites reinforced with 3D woven fabrics for better understanding the behavior of these types of composites in various applications.

Keywords: composite, mechanical properties, woven fabric, 3 dimensional

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: aalamdar@yazduni.ac.ir

مروری بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌های تار-پودی سه‌بعدی

محمد حسن برومند، علی اصغر علمدار یزدی*، محمد صالح احمدی
یزد، دانشگاه یزد، پردیس فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۲۶

چکیده

کششی، فشاری، خمشی، برشی و ضربه‌ای به‌منظور درک بهتر رفتار این نوع کامپوزیت‌ها در کاربردهای مختلف است.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت، خواص مکانیکی، پارچه تار-پودی، سه‌بعدی

۱ مقدمه

امروزه نقش منسوجات صنعتی در صنایع مختلف افزایش یافته است. این موضوع به‌واسطه خواص برتر این گونه منسوجات مانند سبکی وزن، انعطاف‌پذیری زیاد، ثابت ابعادی قابل کنترل، جذب انرژی زیاد، مقاومت‌های کششی، فشاری و ضربه‌ای زیاد، مقاومت در برابر حلال‌های آلی و شیمیایی، مقاومت در برابر خوردگی و فاسدشدن است. خواص برتر کامپوزیت‌های نساجی در مقایسه با سایر کامپوزیت‌های فلزی و سرامیکی نظیر سبکی، مقاومت و انعطاف‌پذیری زیاد و مقاومت زیاد در برابر خوردگی به انجام پژوهش‌های متمرکز درباره این نوع کامپوزیت‌ها در دانشگاه‌ها، مراکز پژوهشی و آزمایشگاهی برای استفاده در صنایع مختلف منجر شده است [۱-۱۱].

از منسوجات دوبعدی طی ۵۰ سال گذشته به‌طور گسترده در

در سال‌های اخیر، علاقه به پژوهش درباره منسوجات سه‌بعدی به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها، به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد مکانیکی آن‌ها نسبت به منسوجات دوبعدی چندلایه، بسیار افزایش یافته است. بیشتر کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات، با قراردادن لایه‌هایی از پارچه‌های دوبعدی روی هم تولید می‌شوند که مقاومت کمی در برابر لایه‌لایه شدن تحت نیروهای ضربه‌ای دارند. در نتیجه، خواص مکانیکی درون‌صفحه‌ای آن‌ها به‌ویژه خواص خستگی و استحکام فشاری، پس از ضربه به‌طور جدی کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از این معایب، لازم است تا این منسوجات در بعد سوم نیز تقویت شوند. در صورت استفاده از منسوجات سه‌بعدی می‌توان ضخامت مدنظر را، که در منسوجات دوبعدی لایه‌های زیادی می‌طلبد، با لایه‌های کمتری به‌دست آورد. این مسئله به تولید ساختاری سبک با خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب و همچنین خواص عایق گرمایی مناسب، همراه با کاهش زمان تولید منجر می‌شود. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات سه‌بعدی، به‌دلیل ویژگی‌های پیچیده ساختاری و خواص مکانیکی، حالت‌های شکست متفاوتی نسبت به کامپوزیت‌های لایه‌ای نشان می‌دهند. هدف از این مقاله، مرور کلی بر پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سه‌بعدی مانند خواص

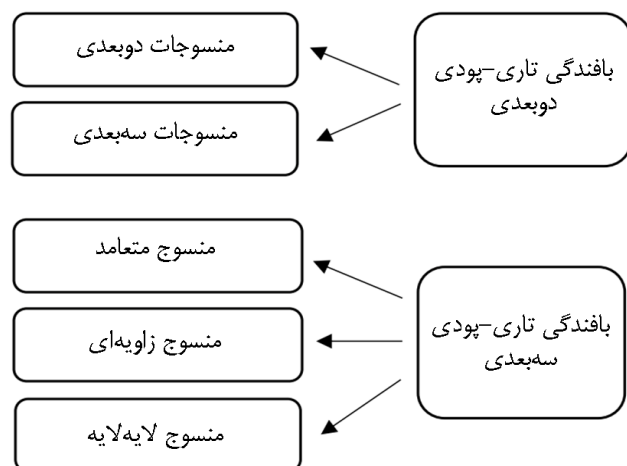
مقایسه با منسوجات دوبعدی دارای خواص برون صفحه‌ای بهتر و درون صفحه‌ای ضعیف‌تر هستند [۲۸، ۲۹].

۲ منسوجات سه‌بعدی

۲-۱ انواع منسوجات سه‌بعدی

به‌طور کلی، امکان تولید منسوجات سه‌بعدی با استفاده از تمام فرایندهای تولید منسوجات شامل بافندگی‌های تاری-پودی و حلقوی، بریدینگ، دوخت و بی‌بافت وجود دارد. منسوج سه‌بعدی تولیدشده با هر یک از این روش‌ها، دارای ساختار و ویژگی‌های منحصر به فرد ویژه آن است، بنابراین خواص مکانیکی و فیزیکی آن‌ها نیز متفاوت خواهد بود [۲۷، ۳۰]. در منسوجات تاری-پودی سه‌بعدی، نخ‌های تار و پود در جهت‌های X و Y در چند لایه درهم تنیده و نخ‌های متصل‌کننده (binder yarn) این لایه‌ها را با هم نگه می‌دارند و مقاومت بین‌لایه‌ای کامپوزیت حاصل را افزایش می‌دهند [۳۴-۳۱، ۱۷]. شکل ۱ دسته‌بندی منسوجات تاری-پودی دوبعدی، سه‌بعدی و فرایند تولید آن‌ها را نشان می‌دهد.

منسوجات تاری-پودی سه‌بعدی براساس فرایند تولید به سه دسته منسوجات سه‌بعدی تولیدشده با فرایند بافندگی تاری-پودی دوبعدی، منسوجات سه‌بعدی تولیدشده با فرایند بافندگی تاری-پودی سه‌بعدی و منسوجات سه‌بعدی تولیدشده با فرایند بی‌بافت نوینگ (non-interlacing, orthogonally, orientating, binding; noobing) تقسیم می‌شوند. منسوجات سه‌بعدی تولیدشده با روش تاری-پودی سه‌بعدی، براساس ساختار آن‌ها به سه دسته لایه‌به‌لایه،



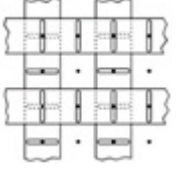
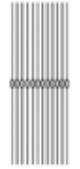
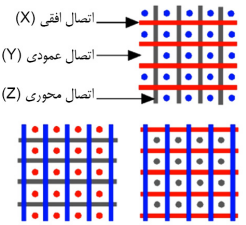
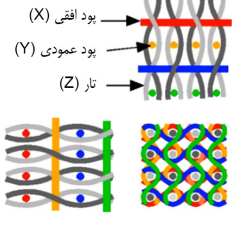
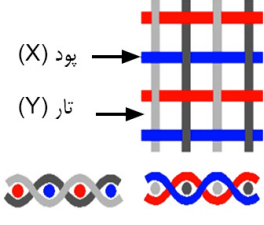
شکل ۱- دسته‌بندی فرایندهای تولید منسوجات سه‌بعدی تاری-پودی [۳۵].

ساخت سازه‌های کامپوزیتی استفاده شده است. بیشتر کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات دوبعدی، با قراردادن لایه‌هایی از پارچه‌های دوبعدی روی هم و متصل کردن آن‌ها به صورت یک ساختار صلب تولید می‌شوند. این لایه‌ها ممکن است از پارچه‌ها و لایه‌های الیاف آرایش‌یافته در جهت‌های مختلف، تشکیل شوند. استفاده از کامپوزیت‌های چندلایه دوبعدی در بسیاری از سازه‌های حساس و ساختارهایی که نیاز به مقاومت زیاد در جهت ضخامت دارند یا تحت تنش‌های برشی در راستای ضخامت و بین‌لایه‌ای قرار می‌گیرند، با توجه به مقاومت کم در برابر ضربه و کاهش خواص مکانیکی در راستای ضخامت به دلیل عدم جهت‌گیری الیاف در این راستا، محدود شده است [۲۰-۱۲].

بسیاری از چندلایه‌های دوبعدی، مقاومت کمی در برابر لایه‌لایه شدن تحت نیروهای ضربه‌ای دارند، در نتیجه خواص مکانیکی درون صفحه‌ای آن‌ها، به ویژه خواص خستگی و استحکام فشاری پس از ضربه، به طور جدی کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از این معایب، لازم است تا این منسوجات در بعد سوم نیز تقویت شوند. در صورت استفاده از منسوجات سه‌بعدی می‌توان ضخامت مدنظر را که در منسوجات دوبعدی لایه‌های زیادی می‌طلبد با لایه‌های کمتری به دست آورد. این مسئله موجب تولید ساختاری سبک با خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب و نیز عایق‌سازی گرمایی مناسب و کاهش زمان تولید می‌شود. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات سه‌بعدی، به دلیل کاربرد در حوزه‌های صنعتی مختلف مانند صنایع هوافضا، دفاعی، خودروسازی، دریایی، حمل و نقل، مولدهای انرژی بادی و ساختمان‌سازی، موضوع بسیاری از مطالعات عددی و تجربی هستند. منسوجات سه‌بعدی از جمله منسوجات پرکاربرد به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها به‌شمار می‌آیند. منسوجات سه‌بعدی را می‌توان با توجه به معیارهای مختلف، از جمله جهت نخ، روش تولید و ویژگی‌های هندسی طبقه‌بندی کرد. این منسوجات دارای الیاف در بعد سوم منسوج (در راستای ضخامت) هستند و با استفاده از حداقل سه دسته الیاف آرایش‌یافته در جهت‌های X، Y و Z تولید می‌شوند [۲۷-۲۱].

کامپوزیت‌های تولیدشده با منسوجات دوبعدی عمدتاً به دلیل خواص مطلوب درون صفحه‌ای (سفتی بیشتر یا نسبت زیاد استحکام به وزن و راحتی ساخت) استفاده می‌شوند. در این کامپوزیت‌ها به دلیل عدم وجود تقویت‌کننده در جهت ضخامت، خواص برون صفحه‌ای بیشتر با خواص رزین ارتباط می‌یابد که موجب محدودیت استفاده از آن‌ها در کاربردهای سازه‌ای با بارگذاری‌های پیچیده می‌شود. به‌طور کلی، منسوجات سه‌بعدی در

جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های فنی فرایندهای بافندگی تار-پودی دوبعدی، سه‌بعدی و نوبینگ [۳۶].

نوبینگ تک‌محوری	بافندگی تار-پودی		مشخصات
	دوبعدی	سه‌بعدی	
سه	دو	سه	تعداد دسته نخ
محوری، اتصال افقی و عمودی	تار و پود	تار، پود افقی و عمودی	نام دسته نخ
ندارد	دارد	دارد	نیاز به تشکیل دهنده
	دوجتهی 	تک‌جتهی 	نوع دهنه
	راستای عرض پارچه راستای ضخامت پارچه	راستای ضخامت پارچه	جهت جابه‌جایی نخ‌های تار-محوری
قرارگیری ردیفی و ستونی	قرارگیری ردیفی و ستونی	قرارگیری کنار هم	آرایش نخ‌های تار-محوری
-	افقی و عمودی	افقی	آرایش دهنه
-	چندتایی در جهت‌های افقی و عمودی	تکی	تعداد دهنه تشکیل‌شده
متغیر نسبت به روش به‌کاررفته	تکی-چندتایی متناظر با تعداد دهنه ایجادشده	تکی	تعداد نخ‌های پود
اتصال	درگیری نخ‌ها	درگیری نخ‌ها	سازوکار انسجام ساختار منسوج
3D	3D	3D و 2.5D، 2D	نوع منسوج قابل تولید
			شکل منسوج تولیدشده

پودی دوبعدی و سه‌بعدی را نشان می‌دهد. منسوجات عمودبرهم سه‌بعدی از پیوستن حداقل سه دسته نخ عمودبرهم در جهت‌های X، Y و Z تولید می‌شوند. نخ‌های تشکیل دهنه منسوج به‌طور خطی و بدون تجعد در جهت‌های

عمودبرهم و همبند (interlocking) زاویه‌ای تقسیم می‌شوند [۱۲]. در جدول ۱ ویژگی‌های فنی فرایندهای بافندگی تار-پودی دوبعدی و سه‌بعدی و نوبینگ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. جدول ۲ مزایا و معایب منسوجات تولیدشده با فرایندهای نساجی تار-

جدول ۲- مزایا و معایب منسوجات تولیدشده با فرایندهای نساجی تار-پودی دوبعدی و سه‌بعدی [۳۷].

معایب	مزایا	فرایند نساجی
خواص بیرون‌صفحه‌ای ضعیف	خواص درون‌صفحه‌ای و آویزش خوب و سرعت زیاد در فرایند تولید پیش‌ساخته	تار-پودی دوبعدی
آویزش و خواص درون‌صفحه‌ای ضعیف	خواص بیرون‌صفحه‌ای خوب، سرعت زیاد در فرایند تولید پیش‌ساخته و امکان تولید اشکال پیچیده	تار-پودی سه‌بعدی

(3DAW) و

- کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج عمودبرهم سه‌بعدی (3DOW).

با در نظر گرفتن زاویه نخ‌های متصل‌کننده، می‌توان بافت‌های عمودبرهم و همبند را تشخیص داد [۲۴].

۲-۲ فرایند تولید منسوجات سه‌بعدی با روش بافندگی تار-پودی

Greenwood از اولین پژوهشگرانی است که روش بافت سه‌بعدی را توصیف کرده است. او در سال ۱۹۷۴ از روش بافندگی تار-پودی دوبعدی برای تولید منسوج سه‌بعدی عمودبرهم استفاده کرد. در این روش، از یک ماشین بافندگی تار-پودی متداول دوبعدی، برای بافت منسوج عمودبرهم سه‌بعدی استفاده شده است [۴۱، ۴۰]. فناوری‌های متداول تشکیل‌دهنده بافندگی مانند دابی و ژاکارد در دستگاه‌های استاندارد بافندگی صنعتی نیز استفاده می‌شوند.

روش‌های زیادی برای بافت منسوجات سه‌بعدی وجود دارد. دستگاه‌های بافندگی مخصوصی برای تولید منسوجات سه‌بعدی عمودبرهم طراحی و ساخته شده‌اند. Fukuta با ساخت یک ماشین بافندگی تار-پودی سه‌بعدی، منسوج سه‌بعدی تولید کرد. اختراع Fukuta که براساس روش متداول بافندگی بود، روش‌های قرارگیری الیاف را اضافه کرد. در این روش، نخ‌های تار در چندلایه آرایش موازی یافته‌اند. هر لایه دارای تعدادی نخ است که در یک صفحه افقی موازی با نخ‌های مجاور یا در یک فاصله برابر از نخ‌های مجاور حرکت می‌کنند. این نخ‌ها از میان تعدادی سوراخ که با

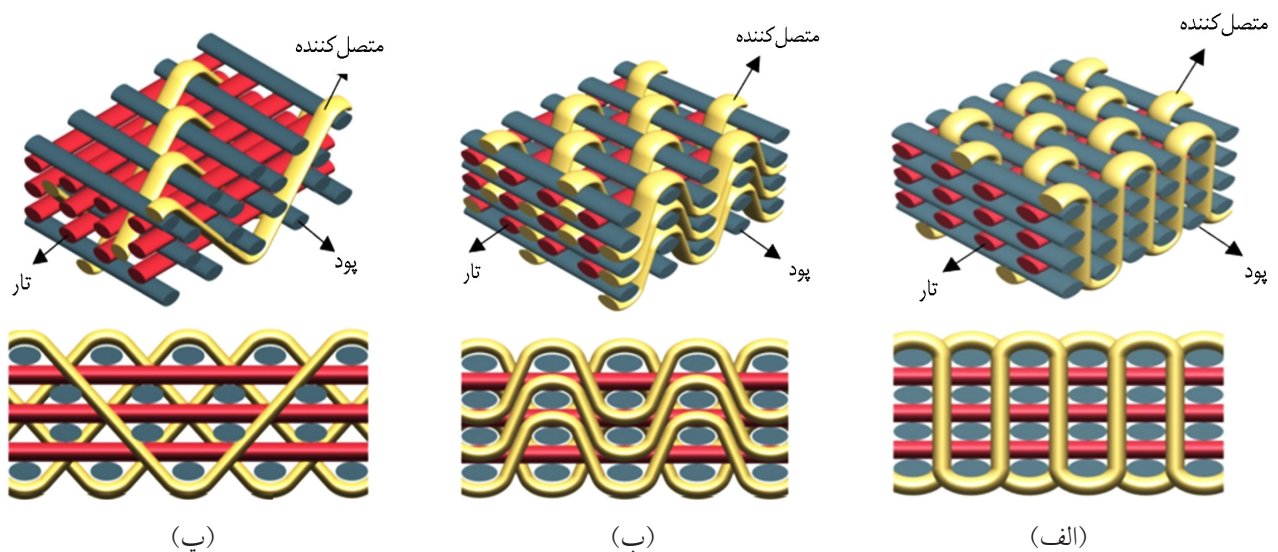
مربوط قرار می‌گیرند و پیوستگی ساختار با به هم پیوستن نخ‌ها در سطوح منسوج به‌استثنای سطح انتهایی آن حاصل می‌شود. بنابراین، منسوجات مزبور در مقایسه با منسوجات تار-پودی معمول، دارای ساختارهای متفاوتی هستند. منسوج عمودبرهم سه‌بعدی همچون سایر ساختارهای سه‌بعدی، به دلیل وجود نخ‌هایی در راستای ضخامت منسوج، مقاومت زیادی در برابر لایه‌لایه شدن دارد، اما وجود این نخ‌ها، باعث کاهش برخی از خواص درون‌صفحه‌ای می‌شود. برای بهبود این خواص می‌توان نخ‌های محوری زاویه‌دار را به ساختار اضافه کرد [۳۰، ۳۵، ۳۸].

در بافت عمودبرهم سه‌بعدی، نخ‌های متصل‌کننده زاویه ۹۰° می‌یابند. در بافت همبند سه‌بعدی، نخ‌های متصل‌کننده، زاویه‌ای کمتر از ۹۰° دارند که به آن زاویه موجی گفته می‌شود. وقتی نخ‌ها یا متصل‌کننده تمام ضخامت بافت را می‌گیرند و با تمام لایه‌ها درگیر می‌شوند، آن را بافت چندلایه سه‌بعدی (۰۰) می‌نامند. در بافت همبند زاویه‌ای، نخ‌های تار مستقیم هستند و فرم موج کمی دارند. در مقابل، نخ‌های پود به دلیل کمبود کششی که در جهت پود ایجاد می‌شود، فرم موج بیشتری دارند [۳۴-۳۱، ۱۷]. شکل ۲ ساختار بافت منسوجات سه‌بعدی لایه به لایه، همبند زاویه‌ای و عمودبرهم را نشان می‌دهد.

سه دسته مهم از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات سه‌بعدی تار-پودی وجود دارد که عبارت از:

- کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی لایه به لایه (3DLAW)،

- کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی همبند زاویه‌ای



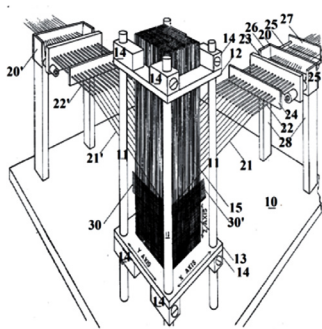
شکل ۲- ساختار بافت منسوجات سه‌بعدی: (الف) عمودبرهم، (ب) همبند زاویه‌ای و (پ) لایه به لایه [۳۹].

تار، پود و متصل‌کننده در جهت‌های X ، Y و Z و نخ‌های پرکننده به‌صورت اریب در جهت ضخامت هستند [۴۶].

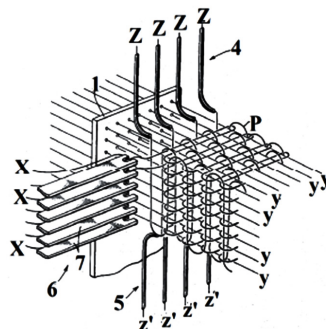
در ماشین بافندگی سه‌بعدی دیگری که برای تولید منسوج عمودبرهم سه‌بعدی توسط Weinberg طراحی شد، امکان ایجاد دهنه میان لایه‌های نخ‌های تار وجود دارد، بنابراین نخ‌های پود عمودبرهم می‌توانند به‌آسانی در هر جهت در ساختار قرار داده شوند. نخ‌های تار از میان دو صفحه موازی سوراخ‌دار کشیده می‌شوند. فاصله بین دو صفحه باید برای انجام عملیات تشکیل دهنه و پودگذاری کافی باشد. صفحه بالایی می‌تواند روی نخ‌های تار بلغزد در حالی که از صفحه پایینی برای محکم نگه‌داشتن سرنخ‌های تار استفاده می‌شود [۴۷]. Evans منسوجات بافته‌شده عمودبرهم سه‌بعدی را با به‌کاربردن میله‌های پولتروشدده میان لایه‌ها توسعه داد. نخ‌های محوری بین ردیف‌ها و ستون‌های مورب قرار داده شدند تا لایه‌های تار را در سطح مقطع ساختار بافته‌شده باز کنند [۴۸]. Bilisik و محمد اصلاح با فن بافت سه‌بعدی چندمحوری روش Evans را اصلاح کردند [۴۹]. Deemey یک دستگاه بافندگی را برای تولید منسوجات بافته‌شده عمودبرهم سه‌بعدی اصلاح کرد [۵۰]. Chiu با روش بافندگی، چند سامانه تاری، منسوجات سه‌بعدی عمودبرهم و همبند را با استفاده از یک دستگاه بافندگی

فاصله‌های یکسان افقی و عمودی در یک شانه قرار دارند، عبور می‌کنند. سازوکار پودگذاری شامل تعدادی از صفحه‌هاست که برای قراردادن پود در بین لایه‌های مربوط از نخ‌های تار تحت کشش، با فاصله‌های یکسان از یکدیگر قرار گرفته‌اند [۴۲، ۴۳].

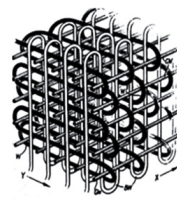
King برای تولید منسوجات عمودبرهم سه‌بعدی، یک ماشین بافندگی سه‌بعدی را طراحی کرد. در این ماشین، نخ‌های متصل‌کننده در جهت Z ثابت هستند. ابتدا نخ‌های تار در جهت X وارد می‌شوند و در جای خود قرار می‌گیرند. سپس، نخ پود در جای خود در جهت Y قرار می‌گیرد [۴۲]. محمد و Zhang نیز براساس فرایند بافندگی تاری-پودی متداول دو‌بعدی، منسوج عمودبرهم سه‌بعدی را تولید کردند. در این فرایند، از دو گروه نخ‌های پود برای پودگذاری استفاده شد [۴۴]. روش سه‌بعدی دیگری توسط Domeij و Khokar ارائه شد. در این روش، نخ‌های محوری Z در یک قاب شبکه و مطابق با شکل سطح مقطع قرار گرفته‌اند. نخ‌های اتصال افقی و عمودی، حول سطرها و ستون‌های نخ‌های محوری و در یک مسیر حلقه بسته حرکت می‌کنند [۴۵]. Crawford منسوج سه‌بعدی همبند زاویه‌ای را در یک دستگاه بافندگی سه‌بعدی تولید کرد. منسوج تولیدشده دارای ۴ مجموعه نخ (تار، پود، متصل‌کننده و پرکننده) بود. در این منسوج، نخ‌های



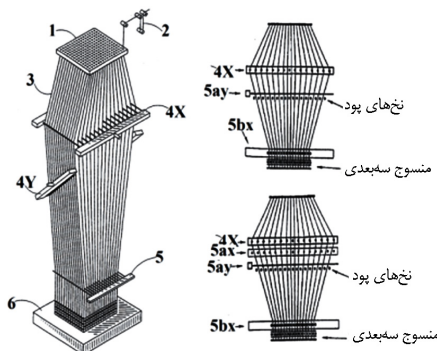
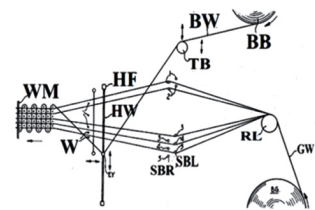
(محمد و Zhang ۱۹۹۲)



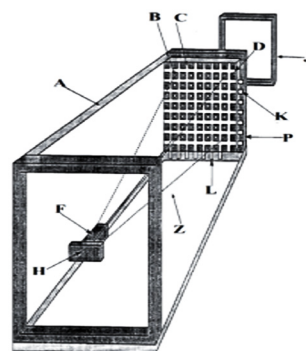
(King, ۱۹۷۶)



(Greenwood, ۱۹۷۴)



(Weinberg, ۱۹۹۵)



(Domeij و Khokar, ۱۹۹۹)

شکل ۳- تجهیزات و روش‌های تولید منسوج سه‌بعدی [۳۸].

نخ‌های تار کمتر بوده، اما از میانگین مقاومت شکست بیشتر است [۵۶].

Callus و همکاران خواص کششی و شکست کامپوزیت‌های 3DOW و 3DAW نرمال و آفست شیشه-وینیل استر را برای اثر بافت تقویت‌کننده مقایسه کردند. تفاوت بافت آفست با نرمال در الگوی بافت نخ‌های اتصال‌دهنده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، خواص مکانیکی و سازوکارهای شکست در این سه کامپوزیت مشابه است [۵۷]. Yu و همکاران دریافتند، در کامپوزیت‌های 3DOW کربن-اپوکسی تراکم نخ‌ها در جهت پود همراه با نخ‌های پرکننده، به دلیل تفاوت در کسر حجمی الیاف و درجه خمیدگی نخ‌ها از تراکم آن‌ها در جهت تار بیشتر است. نخ‌های پرکننده (به‌ویژه در جهت تار) مدول و کشش را افزایش می‌دهند. دلیل افزایش مدول و کشش، تراکم است [۵۸، ۵۹]. Larry و همکاران درباره مقاومت کامپوزیت‌های 3DOW کربن-اپوکسی مطالعاتی انجام دادند. در این کار، از ۲، ۴ و ۶ نخ پود منسوج عمودبرهم سه‌بعدی استفاده و مشخص شد که به‌کاربردن نخ‌های ظریف و نازک به مدول زیاد در کامپوزیت‌ها منجر می‌شود. در این حالت، امکان یکسان‌سازی اثرهای کسر حجمی الیاف وجود نداشت [۶۰]. Huang و همکاران در مطالعه اثر نخ‌های متصل‌کننده بر کامپوزیت‌های 3DLAW، 3DOW و 3DLAW شیشه-اپوکسی مشاهده کردند، با افزایش نمره نخ‌های متصل‌کننده، مدول و مقاومت کششی در جهت ضخامت، افزایش و در جهت نخ‌های تار و پود، کاهش پیدا می‌کند. آن‌ها همچنین دریافتند، مقاومت کششی کامپوزیت‌های 3DOW و 3DAW بهتر از کامپوزیت‌های 3DLAW است [۶۱]. Brandt و Arendts، داده‌های مدول کششی و تنش کششی کامپوزیت‌های 3DLAW، 3DOW و 3DLAW چندلایه کربن-اپوکسی و کامپوزیت 3DLAW شیشه-اپوکسی در جهت نخ‌های تار و پود را بررسی کردند. آن‌ها متوجه شدند، تنش در کامپوزیت‌های 3DOW بیش از بقیه کامپوزیت‌ها بوده، ولی مدول کششی در همه آن‌ها تقریباً یکسان است. همچنین، بیشترین مقدار خمیدگی در میان کامپوزیت‌های مورد مقایسه برای کامپوزیت 3DLAW شیشه-اپوکسی به دست آمد [۶۲، ۶۳].

Dai و همکاران گزارش کردند، ساختارهای فشرده به دلیل حداقل فروموج در الیاف و کم‌شدن حفره‌های داخل بافت، خواص کششی بیشتری دارند [۶۴]. Huo و همکاران درباره اثر نرخ‌های متفاوت کرنش بر خواص کششی منسوج 3DAW کربن-اپوکسی مطالعاتی انجام دادند. Gerlach همان کار را برای کامپوزیت کربن-اپوکسی انجام داد. وی بدین نتیجه رسید، با افزایش نرخ کرنش، مدول و

تولید کرد که دارای سه راپیر با سامانه تشکیل دابی بود [۵۱]. شکل ۳ تصویر برخی از تجهیزات و روش‌های تولید منسوج سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

۳ خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات سه‌بعدی تار-پودی

۳-۱ خواص کششی

در بیشتر مطالعات با وجود متفاوت بودن مواد، منحنی‌های تنش-کرنش این نوع کامپوزیت‌ها تقریباً مشابه و قابل مقایسه هستند. Cox، Chen و Quinn دریافتند، تا کرنش حدود ۰/۶٪ برای کامپوزیت‌های 3DOW کربن-اپوکسی، یک ناحیه خطی اولیه وجود دارد [۵۴-۵۲]. Chen و همکاران درباره کشش نخ‌های تار و پود در لایه‌های مختلف کامپوزیت‌های 3DAW مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها متوجه شدند، سفتی کششی به‌طور پیوسته در جهت تار و پود افزایش پیدا می‌کند و سبب آن نخ‌های پود مستقیم و تار متحرک در منسوج است. به دلیل سهم پودها در تحمل نیرو، مقاومت نیز روندی مشابه سفتی دارد. مقاومت در جهت نخ‌های پود بیش از مقاومت در جهت نخ‌های تار است.

در مطالعات Tan درباره همین کامپوزیت، افزایش مقاومت تا ۵۲٪ به دست آمد [۵۳]. Quinn مطالعاتی درباره تراکم نخ‌های متصل‌کننده در جهت تار و پود کامپوزیت‌های سه‌بعدی کربن-اپوکسی انجام داد. وی بدین نتیجه رسید، مدول و تنش کششی با افزایش نخ‌های متصل‌کننده افزایش می‌یابد [۵۴]. Guess و همکاران کامپوزیت‌های 3DAW و DLAW کولار-اپوکسی را با هم مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند، نمودار تنش-کرنش در کامپوزیت 3DAW به‌صورت خطی است، در حالی که در کامپوزیت 3DLAW در کرنش ۳-۲/۵٪ نمودار غیرخطی بوده و سپس به‌طور خطی ادامه پیدا می‌کند. مدول‌های اولیه و مقاومت کششی در کامپوزیت 3DLAW کولار-اپوکسی به ترتیب ۵۰٪ و ۳۵٪ نسبت به کامپوزیت 3DAW کاهش می‌یابد. فرض بر این است، موج‌دار شدن و تجعد دلیل اصلی کاهش مدول در کامپوزیت 3DAW است [۵۵]. Tan و همکاران دریافتند، میانگین مدول یانگ در جهت نخ‌های پود فقط ۱۵/۵٪ بیش از مدول یانگ در جهت نخ‌های تار است. در کامپوزیت‌های 3DOW کربن-اپوکسی میانگین تنش شکست در جهت پود از تنش در جهت تار بیشتر است. همچنین، میانگین کرنش شکست در جهت نخ‌های پود از کرنش شکست در جهت

تمام سطوح تنش مطالعه شده است. در کامپوزیت‌های 3DOW برخلاف کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج چهارلایه دوبعدی، لایه‌لایه‌شدن مشاهده نشد. به‌طور کلی، تجعد موجود در منسوج چهارلایه دوبعدی باعث ایجاد نقاط تمرکز تنش شده و شرایط شروع آسیب اولیه و پیش‌روی آسیب سریع‌تری را در حین بارگذاری چرخه‌ای کامپوزیت سبب می‌شود [۷۲]. Karahan و همکاران رفتار خستگی کششی کامپوزیت‌های 3DOW کربن-اپوکسی را بررسی کرده‌اند. نتایج ارائه‌شده شامل داده‌های آزمایش شبه‌ایستای پیش از خستگی، پیشرفت آسیب خستگی و آزمایش شبه‌ایستای پس از خستگی در جهت نخ‌های محوری و متصل‌کننده است [۷۳].

Lomov و همکاران رفتار مکانیکی کامپوزیت 3DOW کربن-اپوکسی تحت بارگذاری کششی صفحه‌ای را بررسی کردند. مطالعه آرایش الیاف در این پژوهش، مستقیم‌بودن نخ‌های درون‌صفحه‌ای را نشان داده است. برای بررسی آسیب کامپوزیت، از ترکیب روش‌های انتشار صوت و عکس‌برداری از آسیب با پرتو X استفاده شده است. محدوده شروع آسیب به‌دست‌آمده، بیش از مقادیر گزارش‌شده برای کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی تقویت‌شده با همین ساختار بوده است. مقایسه رفتار کامپوزیت‌های 3DAW و 3DOW نشان می‌دهد، منسوج عمودبرهم کرنش تا پارگی زیادی را همانند منسوج همبند از خود نشان نمی‌دهند [۷۴]. Dash و همکاران با مطالعه کامپوزیت 3DAW پلی‌استر بدین نتیجه رسیدند، افزایش تراکم نخ‌های پود باعث بهبود عملکرد کششی و ازدیاد طول بیشتر (۱۰٪ افزایش) کامپوزیت می‌شود [۷۵].

Tan و همکاران در پژوهشی به بررسی رفتار مکانیکی و سازوکار شکست کامپوزیت‌های 3DOW کربن-اپوکسی پرداختند. آن‌ها با ارائه مدل‌های تحلیلی و اجزای محدود، خواص مکانیکی و مقاومت شکست این نوع کامپوزیت‌ها را پیش‌بینی کردند. آزمایش کشش شبه‌ایستا برای اندازه‌گیری مدول یانگ درون‌صفحه‌ای، ضریب پواسون، مقاومت و کرنش شکست در دو جهت نخ‌های تار و پود در نمونه‌های کامپوزیتی انجام گرفت و سطوح شکست برای تحلیل سازوکار شکست با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. در این پژوهش، مطابقت مطلوبی بین نتایج مدل‌های ارائه‌شده با داده‌های تجربی خواص مکانیکی و مقاومت شکست گزارش شد [۵۶،۷۶]. Karahan و همکاران مدل اجزای محدود را برای پیش‌روی آسیب در کامپوزیت‌های 3DOW شیشه-اپوکسی و منسوج چهارلایه با بافت ساده ارائه کردند. در این مدل در مقیاس مزو، پیش‌بینی خواص مکانیکی کامپوزیت

تنش کششی کاهش پیدا می‌کند. همچنین میانگین مدول در جهت پود کمی کمتر از میانگین مدول در جهت تار است [۶۵،۶۶]. Tsai و همکاران خواص خستگی و فرایند آسیب کامپوزیت‌های 3DAW سه‌لایه و پنج‌لایه تحت بار کششی را مقایسه کردند. ابتدا ترک‌های عرضی در بین نخ‌های تار مشاهده شد. سپس، اتصال بین نخ‌های تار و پود از هم جدا شده که به کشیدگی و تغییر شکل ماتریس و سپس شکستگی نخ‌های پود منجر شد [۶۷].

Muñoz و همکاران آزمون کشش در جهت نخ‌های تار و پرکننده را برای کامپوزیت هیبرید 3DOW کربن-شیشه انجام دادند. تحلیل آن‌ها نشان داد، تغییر شکل کشسان به‌وسیله مدول کشسانی و کسر حجمی الیاف در راستای نیرو کنترل می‌شود [۶۸]. Yu و همکاران سازوکار شکست تحت کشش کامپوزیت‌های 3DAW شیشه-اپوکسی را بررسی کردند. آن‌ها ارتباط بین ساختار پیچیده سه‌بعدی ترک‌های سطحی و عرضی را با ساختار الیاف مشخص کردند. همچنین نشان دادند، ترک‌خوردگی عرضی از مناطق غنی از نخ‌های پود و نه غنی از رزین، آغاز می‌شود [۶۹]. Topal و همکاران آسیب خستگی کامپوزیت‌های 3DOW شیشه-اپوکسی تحت کشش را در جهت نخ‌های تار بررسی کردند. آن‌ها دریافتند، کاهش سفتی و اتلاف انرژی در سه مرحله رخ می‌دهد: تغییر سریع در مرحله اول، تغییر آرام در مرحله دوم و تغییر سفتی و اتلاف انرژی به‌طور بسیار نامنظم در مرحله سوم که به شکست در کامپوزیت منجر می‌شود [۷۰]. Ivanov و همکاران خواص کششی کامپوزیت‌های 3DOW شیشه-اپوکسی و کامپوزیت چهارلایه با بافت ساده را با کسر حجمی تقریباً برابر مقایسه کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، کامپوزیت‌های سه‌بعدی مورد مطالعه دارای مقاومت صفحه‌ای، کرنش شکست و آستانه شروع آسیب بسیار بیشتری نسبت به کامپوزیت دوبعدی هستند. رشد ترک‌های عرضی در کامپوزیت 3DOW دارای تأخیر بوده و این کامپوزیت‌ها بسیار کمتر در معرض تشکیل، انتشار و ترک‌های سطحی نخ و ماتریس هستند [۷۱]. Carvelli و همکاران رفتار خستگی کششی کامپوزیت‌های 3DOW شیشه-اپوکسی و منسوج چهارلایه با بافت ساده با ضخامت و کسر حجمی الیاف نسبتاً برابر را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان دادند، کامپوزیت 3DOW دارای خواص کششی شبه‌ایستای بهتری است و زمانی که در جهت نخ‌های پرکننده تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، دوام خستگی بیشتری نسبت به منسوج چهارلایه دوبعدی دارد. همچنین، دوام خستگی کامپوزیت 3DOW در جهت نخ‌های پرکننده بیش از مقدار متناظر آن در جهت نخ‌های متصل‌کننده، در

مزیت استفاده از کامپوزیت‌های 3DOW در مقاومت، سفتی و پیش‌روی آسیب نسبت به سایر کامپوزیت‌ها، وجود حداقل تجعد و فرموج در نخ‌های تقویت‌کننده ذکر شد [۷۸]. خواص کششی درون‌صفحه‌ای بسیاری از انواع مختلف کامپوزیت‌های سه‌بعدی به‌طور تجربی به‌دست آمده و سپس با ساختار منسوجات دویبعدی و بی‌بافت مقایسه شده‌اند. از نتیجه‌گیری‌های رایج درباره خواص کششی به‌دست‌آمده توسط پژوهشگران، این است که با داشتن حداقل فرموج در منسوج می‌توان خواص کششی کامپوزیت را بهبود بخشید. کم یا زیادبودن فرموج، بستگی به نوع و ساختار بافت استفاده‌شده در منسوج سه‌بعدی دارد [۸۱-۷۹، ۷۱، ۶۱، ۵۷، ۵۲]. جدول ۳ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با خواص کششی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

۳-۲- خواص فشاری

منحنی تنش-کرنش تحت فشار، پیش از شکست تقریباً خطی است. با افزایش حجم نخ‌های متصل‌کننده، قابلیت فشرده‌سازی

شامل مدول کشسانی اولیه، ضریب پواسون و نمودار تنش-کرنش تطابق خوبی با داده‌های تجربی داشت، اما مقاومت و کرنش نهایی رضایت‌بخشی گزارش نشد. تغییرات مقاومت الیاف شیشه در فرایندهای نساجی و آسیب لایه‌لایه‌شدن موضعی، به‌عنوان دلایل این ناسازگاری ذکر شد [۷۷].

Bogdanovich و همکاران به بررسی رفتار کششی شبه‌ایستای کامپوزیت‌های 3DOW کربن-اپوکسی پرداختند. در این پژوهش، کامپوزیت تحت بارگذاری کششی محوری در راستای نخ‌های محوری، متصل‌کننده و زاویه دار ۴۵° قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر مقاومت کششی بیشتر این کامپوزیت نسبت به کامپوزیت 3DAW کربن-اپوکسی است. آن‌ها حالت‌های شکست را در مراحل مختلف افزایش بارگذاری کششی نیز تحلیل کرده و سازوکارهای اصلی پیش‌روی آسیب شامل الگوهای ترک شکل‌گرفته را در هر مرحله شناسایی کردند. مشاهده شد، شروع آسیب برای این کامپوزیت، در کرنشی مشابه چندلایه‌ای‌های دویبعدی معمول اتفاق می‌افتد. در حالی که کرنش شروع آسیب برای سایر کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی مطالعه‌شده به‌طور معنی‌داری کمتر است. دلیل

جدول ۳- نتایج پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با خواص کششی.

نوع منسوج	ماده	هدف آزمایش	نتایج
3DAW	کربن-اپوکسی	مطالعه خواص مکانیکی و مقایسه آن‌ها با کامپوزیت‌های دویبعدی	کامپوزیت تولیدی با زوایای (۰، ۶۰ و ۶۰)، مدول کششی درون‌صفحه‌ای و استحکام بسیار نزدیکی به کامپوزیت‌های دویبعدی دارد [۸۲].
3DAW	شیشه-اپوکسی	اثر جهت‌گیری نخ‌های متصل‌کننده بر خواص کششی	کامپوزیت تولیدشده با زاویه ۹۰° نخ‌های متصل‌کننده در منسوج سه‌بعدی، بهترین مقاومت در برابر کشش را نسبت به سایر کامپوزیت‌های تولیدی با زوایای (۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰) نشان داد [۸۳].
3DLAW	شیشه-اپوکسی	اثر سرعت پودگذاری بر خواص کششی	مقاومت کششی کامپوزیت شماره ۲ (با سرعت ۱۴ پود/cm) از کامپوزیت شماره ۱ (با سرعت ۴ پود/cm) در جهت تار و پود بیشتر است [۸۴].
3DOW	کربن-اپوکسی	ارزیابی خواص کششی و مقایسه با کامپوزیت دویبعدی منسوج سرزه ۲×۲	خواص کششی و برشی برون‌صفحه‌ای و درون‌صفحه‌ای بهتر از کامپوزیت دویبعدی بود [۸۰].
3DAW	کربن-اپوکسی	اثر افزایش دما (با استفاده از نیتروژن مایع) بر خواص کششی	افزایش دما اثر مهمی بر خواص کششی کامپوزیت دارد. بیشترین و کمترین مقاومت کششی کامپوزیت به‌ترتیب در دمای ۲۰۰- و ۱۵۰°C + اتفاق افتاد [۸۵].
3DOW	کربن-اپوکسی	مطالعه درباره تراکم نخ‌های متصل‌کننده در جهت تار و پود	مدول و تنش کششی با افزایش نخ‌های متصل‌کننده افزایش می‌یابد [۵۴].
3DAW 3DLAW	کولار-اپوکسی	مطالعه رفتار کششی	مدول‌های اولیه و مقاومت کششی در کامپوزیت 3DLAW به‌ترتیب ۵۰ و ۳۵٪ نسبت به کامپوزیت 3DAW کاهش پیدا می‌کنند [۵۵].

ادامه جدول ۳

نوع منسوج	ماده	هدف آزمایش	نتایج
3DOW	کربن-اپوکسی	مطالعه بر رفتار کششی	میانگین مدول یانگ در جهت نخ‌های پود فقط ۱۵/۵٪ بیش از مدول یانگ در جهت نخ‌های تار است. همچنین، میانگین تنش شکست در جهت پود از تنش در جهت تار بیشتر است [۵۶].
3DOW 3DAW	شیشه-وینیل استر	بررسی خواص کششی کامپوزیت‌های 3DOW و 3DAW نرمال و آفست برای مقایسه اثر بافت تقویت‌کننده	خواص مکانیکی و سازوکارهای شکست در این سه کامپوزیت مشابه بوده است [۵۷].
3DOW	کربن-اپوکسی	مطالعه رفتار کششی	نخ‌های پرکننده (مخصوصاً در جهت تار) مدول و کشش را افزایش می‌دهند. دلیل افزایش مدول و کشش، تراکم است [۵۸،۵۹].
3DOW	کربن-اپوکسی	مطالعه مقاومت کششی	استفاده از نخ‌های ظریف و نازک به مدول زیاد در کامپوزیت‌ها منجر می‌شود [۶۰].
3DOW 3DAW 3DLAW	شیشه-اپوکسی	اثر نخ‌های متصل‌کننده	با افزایش نمره نخ‌های متصل‌کننده، مدول و مقاومت کششی در جهت ضخامت افزایش و در جهت نخ‌های تار و پود کاهش می‌یابد. مقاومت کششی کامپوزیت‌های 3DOW و 3DAW بهتر از کامپوزیت‌های 3DAW است [۶۱].
3DOW 3DAW 3DLAW	کربن-اپوکسی	مطالعه رفتار مکانیکی	تنش کششی در کامپوزیت‌های 3DOW، بیش از بقیه کامپوزیت‌ها بوده ولی مدول کششی در همه آن‌ها تقریباً یکسان است [۶۲،۶۳].
3DLAW	کربن-اپوکسی	اثر نرخ‌های متفاوت کرنش بر خواص کششی	با افزایش نرخ کرنش، مدول و تنش کششی کاهش پیدا می‌کند. [۶۵،۶۶].
3DAW	کربن-اپوکسی	خواص خستگی و فرایند آسیب تحت بار کششی	ابتدا ترک‌های عرضی در بین نخ‌های تار مشاهده شد. سپس اتصال بین نخ‌های تار و پود از هم جدا شده که به کشیدگی و تغییر شکل ماتریس و پس از آن شکستگی نخ‌های پود منجر شد [۶۷].
3DOW	کربن-شیشه	آزمون کشش در جهت نخ‌های تار و پرکننده	تغییر شکل کشسان به وسیله مدول کشسانی و کسر حجمی الیاف در راستای نیرو کنترل می‌شود [۶۸].
3DAW	شیشه-اپوکسی	بررسی سازوکار شکست تحت کشش	ترک خوردگی عرضی از مناطق غنی از نخ‌های پود و نه از مناطق غنی از رزین آغاز می‌شود [۶۹].
3DOW	شیشه-اپوکسی	بررسی آسیب خستگی در کامپوزیت تحت کشش در جهت نخ‌های تار	کاهش سفتی و اتلاف انرژی در سه مرحله اتفاق می‌افتد: تغییر سریع در مرحله اول، تغییر آرام در مرحله دوم و تغییر بسیار نامنظم سفتی و اتلاف انرژی در مرحله سوم که به شکست کامپوزیت منجر می‌شود [۷۰].
3DOW	شیشه-اپوکسی	مقایسه خواص کششی با کامپوزیت چهارلایه با بافت ساده	کامپوزیت‌های سه‌بعدی مطالعه‌شده دارای مقاومت صفحه‌ای، کرنش شکست و آستانه شروع، آسیب بسیار بیشتری نسبت به کامپوزیت دویعدی هستند [۷۱].
3DOW	شیشه-اپوکسی	مقایسه رفتار خستگی کششی با منسوج چهارلایه با بافت ساده	کامپوزیت سه‌بعدی خواص کششی شبه‌ایستای بهتری دارد و زمانی که در جهت نخ‌های پرکننده تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، دوام خستگی بیشتری نسبت به منسوج چهارلایه دویعدی دارد. در کامپوزیت‌های 3DOW برخلاف کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج چهارلایه دویعدی، لایه‌لایه شدن مشاهده نشد [۷۲].

ادامه جدول ۳

نوع منسوج	ماده	هدف آزمایش	نتایج
3DOW 3DAW	کربن-اپوکسی شیشه-اپوکسی	بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت تحت بارگذاری کششی	کامپوزیت 3DOW کرنش تا پارگی زیادی را همانند کامپوزیت 3DAW نشان نمی‌دهند [۷۴].
3DAW	پلی‌استر-اپوکسی	مطالعه رفتار کششی	افزایش تراکم نخ‌های پود باعث بهبود عملکرد کششی و ازدیاد طول بیشتر (%۱۰ افزایش) کامپوزیت می‌شود [۷۵].
3DOW	کربن-اپوکسی	بررسی رفتار مکانیکی و سازوکار شکست با ارائه مدل‌های تحلیلی و اجزای محدود	مطابقت مطلوبی بین نتایج مدل‌های ارائه‌شده با داده‌های تجربی خواص مکانیکی و مقاومت شکست گزارش شد [۵۶،۷۶].
3DOW 3DAW	کربن-اپوکسی	بررسی رفتار کششی شبه‌ایستا	مقاومت کششی کامپوزیت 3DOW نسبت به کامپوزیت 3DAW بیشتر است [۷۲].
3DOW 3DAW	کربن-اپوکسی	اثر ساختار الیاف بر خواص مکانیکی	کامپوزیت 3DAW مقاومت به‌مراتب بیشتری در برابر کشش نسبت به کامپوزیت 3DOW نشان می‌دهد [۶۷].
3DOW 3DAW	کربن-اپوکسی	بررسی رفتار کششی شبه‌ایستا	مقاومت کششی کامپوزیت 3DOW بیش از کامپوزیت 3DAW است. همچنین مشاهده شد، شروع آسیب برای این کامپوزیت در کرنشی مشابه چندلایه‌ای دوبعدی معمول اتفاق می‌افتد، در حالی که کرنش شروع آسیب برای سایر کامپوزیت‌های مطالعه‌شده به‌طور معنی‌داری کمتر است [۷۸].
3DOW 3DAW	کربن-اپوکسی	مقایسه خواص مکانیکی	کامپوزیت 3DOW در مجموع، خواص مکانیکی بهتری نسبت به کامپوزیت 3DAW در جهت تار دارد. خواص مکانیکی هر دو کامپوزیت در جهت پود و خواص کششی و خمشی هر دو کامپوزیت در جهت ضخامت، مشابه بودند. مشخص شد، خواص خمشی کامپوزیت‌ها به تعداد نخ‌های متصل‌کننده بستگی دارد [۸۶].

تنش بیشینه فشاری و کرنش فشاری مربوط نیز به نرخ کرنش حساس هستند. شکست فشاری نمونه‌های کامپوزیتی، بیشتر دارای حالت شکست برشی بودند و در نرخ کرنش زیاد به‌طور کامل دچار شکست شدند، حال آنکه در بارگذاری شبه‌ایستا تنها تغییر شکل فشاری مشاهده شد [۸۸].

Zhang و همکاران، رفتار شبه‌ایستا و رفتار فشاری تحت نرخ کرنش زیاد کامپوزیت‌های 3DOW را در سه جهت بررسی کردند. حساسیت نرخ تنش و ناهمسانی رفتار فشاری مدل با نتایج تجربی مشاهده و مشخص شد، مدل اجزای محدود، شکل مشابهی از شکست را به‌صورت "جاروماند" در یک انتهای کامپوزیت در هر دو جهت نخ‌های تار و پود و یک ناحیه شکست برشی مایل در جهت نخ‌های Z پیش‌بینی می‌کند. نتایج نشان داد، نخ‌های متصل‌کننده به‌طور درخور توجهی در پاسخ به نیروهای درون‌صفحه‌ای مشارکت می‌کنند [۸۹]. Wan و همکاران برای تجزیه و تحلیل رفتار آسیب کامپوزیت‌های 3DOW تحت فشار زیاد، روشی را برای مدل‌سازی

کامپوزیت‌های 3DOW کاهش پیدا می‌کند. Mahadik و همکاران اثر تراکم منسوج و نخ بر خواص فشاری کامپوزیت 3DAW را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند، افزایش کسر حجمی نخ‌های تار، باعث کاهش استحکام فشاری کامپوزیت تا مرحله متراکم‌شدن بعدی می‌شود. در حالی که افزایش نخ‌های پود باعث افزایش با شیب تند مقاومت و کاهش جزئی مدول کامپوزیت می‌شود [۷۹]. Kou و همکاران نشان دادند، تفاوت در ساختار و تراکم ممکن است، جهت و نحوه شکست را در هنگام بارگذاری فشاری تغییر دهند [۸۰]. Ding و همکاران دریافتند، با افزایش نرخ کرنش، مدول و تنش تقریباً به‌طور خطی تغییر می‌کنند، در حالی که کرنش شکست با تغییر شکل الیاف در کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی و شیشه-پلی‌استر تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی کاهش پیدا می‌کند [۸۷]. Sun و همکاران رفتار فشاری کامپوزیت 3DAW شیشه-وینیل استر را با نرخ‌های کرنش مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد، منحنی‌های تنش-کرنش، به نرخ بارگذاری و سفتی فشاری،

قابلیت فشرده‌سازی درخور توجه نبود [۹۱]. Hosur و همکاران خواص فشاری کامپوزیت‌های 3DLAW کربن-اپوکسی را تحت نرخ‌های مختلف کرنش بررسی کردند. نتایج نشان داد، مقاومت و سفتی دینامیک در مقایسه با مقاومت و سفتی ایستا افزایش درخور توجهی دارد [۹۲].

Endruweit و همکاران، قابلیت انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌های 3DOW را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در فشار کم، کاهش ارتفاع حفره‌ها ممکن است ضخامت منسوج در کامپوزیت را کاهش دهد. در فشار زیاد، فشار دسته‌های الیاف و تغییرات سطح مقطع آن‌ها غالب بود. در فشار چرخه‌ای، پس از چرخه اول به دلیل مرتب‌سازی مجدد بسته‌های الیاف، فشار ثابت مانده است. برای کامپوزیت‌های 3DOW سازوکار اصلی فشار، فشار بسته‌های الیاف بود [۹۳]. Haque و همکاران پاسخ تنش-کرنش

ساختار در چند مقیاس ارائه کردند. این مدل و شبیه‌سازی عددی با استفاده از نتایج آزمون فشار در دامنه نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۰۱ تا s^{-1} ۲۱۰۰ تأیید شدند [۹۰].

Zhang و همکاران، تغییر شکل برشی کامپوزیت تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی را بررسی کردند. در نرخ زیاد تنش، در ناحیه وسیعی از کامپوزیت‌های 3DOW، مشاهده شد که انرژی با سرعت زیاد پخش می‌شود. در فشار کم، کاهش ارتفاع حفره‌های خالی ممکن است ضخامت منسوج در کامپوزیت را کاهش دهد. در فشار زیاد، تراکم نخ‌ها و تغییر در سطح مقطع آن‌ها اهمیت دارد. پس از چرخه اول به دلیل تغییر آرایش الیاف، فشار چرخه‌ای قابلیت فشرده‌سازی را کاهش می‌دهد و در چرخه‌های فشار بعدی تقریباً ثابت می‌ماند. سازوکار اصلی فشار برای کامپوزیت‌های 3DOW، فشرده‌گی دسته‌های الیاف بود. همچنین، اثر آرایش مجدد و کاهش

جدول ۴- نتایج پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با خواص فشاری.

نوع منسوج	ماده	هدف آزمایش	نتایج
3DAW	کربن-اپوکسی	اثر فرایند بافندگی بر رفتار فشاری	تفاوت در ساختار و تراکم ممکن است جهت و نحوه شکست را در هنگام بارگذاری فشاری تغییر دهد [۸۳].
3DOW	شیشه-اپوکسی شیشه-پلی‌استر	بررسی خواص فشاری	با افزایش نرخ کرنش، مدول و تنش تقریباً به‌طور خطی تغییر می‌کنند در حالی که کرنش شکست با تغییر شکل الیاف در کامپوزیت کاهش پیدا می‌کند [۸۷].
3DOW	بازالت-وینیل‌استر	بررسی رفتارهای شبه‌ایستا و فشاری تحت نرخ کرنش زیاد	حساسیت نرخ تنش و ناهمسانی رفتار فشاری مدل با نتایج تجربی مشاهده شد. نتایج نشان داد، نخ‌های متصل‌کننده به‌طور درخور توجهی در پاسخ به نیروهای درون‌صفحه‌ای مشارکت می‌کنند [۸۹].
3DLAW	کربن-اپوکسی	بررسی رفتار فشاری	مقاومت و سفتی پویا در مقایسه با مقاومت و سفتی ایستا افزایش درخور توجهی دارد [۹۲].
3DOW	کربن-اپوکسی	بررسی قابلیت انعطاف‌پذیری	فشار بسته‌های الیاف، سازوکار اصلی فشار است [۹۳].
3DLAW	شیشه-وینیل‌استر	اثرهای رطوبت و دما بر رفتار کامپوزیت تحت نرخ کرنش زیاد	افزایش رطوبت و دما باعث کاهش مقاومت کامپوزیت در برابر بارگذاری‌های فشاری می‌شود. همچنین، استحکام تا پارگی و کرنش تا پارگی کامپوزیت تحت بارگذاری نرخ کرنش زیاد افزایش پیدا می‌کند [۹۴].
3DAW	شیشه-وینیل‌استر	مطالعه رفتار فشاری	منحنی‌های تنش-کرنش و حداکثر تنش فشاری به نرخ کرنش وابسته هستند. سفتی و تنش بیشینه فشاری با افزایش نرخ کرنش به‌طور خطی زیاد می‌شوند [۹۵].
3DLAW	کربن-اپوکسی	بررسی رفتار فشاری	خم‌شدن دسته‌های الیاف، صاف و بدون فر و موج‌شدن آن‌ها، دو پدیده اصلی اثرگذار بر رفتار فشاری کامپوزیت هستند [۹۶].

دوبعدی لایه لایه است [۹۸].

Jin و همکاران دریافتند، کامپوزیت‌های 3DOW نسبت به کامپوزیت‌های 3DAW می‌توانند تحمل بارهای خمشی یا جذب انرژی بیشتری داشته باشند. اما در خمش سه نقطه‌ای، تنها می‌توانند مدت زمان کوتاهی خستگی را تحمل کنند. همچنین مشاهده کردند، لایه لایه شدن و گسستگی نخ‌ها در ماتریس، به دلیل تفاوت تنش لایه‌ای در خمش سه نقطه‌ای است [۹۹]. Sun و همکاران، نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای را برای ۵ نوع مختلف کامپوزیت تحت بارهای شبه ایستا بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند، با افزایش کسر حجمی نخ‌های متصل کننده در منسوج، مقاومت خمشی افزایش پیدا می‌کند، در حالی که مدول خمشی به طرافت نخ‌های متصل کننده بستگی دارد. افزون بر این، فشار بیشتر در حین تولید به تراکم نخ‌ها و تجعد آن‌ها منجر می‌شود و این مسئله در مقاومت خمشی کامپوزیت‌ها مزیت بخش است [۱۰۰]. Zhang و همکاران آزمون خمش سه نقطه‌ای تحت بارهای شبه ایستا را برای ۵ نوع مختلف کامپوزیت 3DLAW عمودبرهم تحت بارهای شبه ایستا انجام دادند و مدول خمشی، تنش خمشی و کرنش تا شکست کامپوزیت‌ها را بررسی کردند. مشخص شد با افزایش ضخامت نمونه‌ها، کرنش تا شکست افزایش پیدا می‌کند. نتایج تجربی نشان داد، پیچ خوردگی الیاف در سمتی که فشار روی نمونه‌ها ایجاد می‌شود، به عنوان سازوکار محدودکننده مقاومت برای کامپوزیت‌های تحت بار خمشی به شمار می‌رود [۱۰۱].

اثر ساختار و نوع بافت منسوج سه بعدی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های 3DOW و 3DAW کربن-اپوکسی توسط Dai و همکاران بررسی و مشخص شد، عملکرد مکانیکی آن‌ها تحت تأثیر پراکندگی توزیع رزین و فروموج منسوج است. هرچه فروموج الیاف کمتر و پراکندگی رزین در تمام نقاط کامپوزیت یکسان تر باشد، کامپوزیت عملکرد بهتری نشان می‌دهد. نتایج نشان دادند، کامپوزیت 3DAW مقاومت به مراتب بیشتری در برابر کشش، ضربه و خمش نسبت به کامپوزیت 3DOW نشان می‌دهد [۶۴].

Vadlamani و همکاران پیش روی آسیب کامپوزیت‌های 3DOW شیشه-اپوکسی و منسوج سه لایه با بافت ساده را تحت کشش و خمش بررسی کرده‌اند. نتایج و آزمون کشش دوجوری در این پژوهش نشان داد، ترک در ماتریس در کرنشی معادل ۰/۷٪ شروع به رشد می‌کند. در بارگذاری خمشی، رشد ترک در جهت تار به دلیل رشد ترک‌های مجاور صفحه کششی سریع تر است [۱۰۲]. Bilisik خواص برشی و خمشی کامپوزیت‌های 3DOW کربن-اپوکسی تک محوری و چندمحوری را مقایسه و نشان داد، مقاومت و

فشاری کامپوزیت‌های سه بعدی در جهت ضخامت شیشه-وینیل استر را در نرخ کرنش 490 s^{-1} تا 1470 s^{-1} و دمای $23-240 \text{ }^\circ\text{C}$ بررسی کردند. نتایج نشان دادند، افزایش رطوبت و دما باعث کاهش مقاومت کامپوزیت در برابر بارگذاری‌های فشاری می‌شود. همچنین، استحکام و کرنش تا پارگی کامپوزیت تحت بارگذاری نرخ کرنش زیاد، افزایش پیدا می‌کند [۹۴]. Baozhong و همکاران رفتار فشاری کامپوزیت‌های 3DAW شیشه-وینیل استر را در نرخ‌های متفاوت کرنش بررسی کردند. نتایج نشان داد، منحنی‌های تنش-کرنش و حداکثر تنش فشاری به نرخ کرنش وابسته هستند. سفتی و تنش بیشینه فشاری با افزایش نرخ کرنش به طور خطی زیاد می‌شوند [۹۵]. Vernet و همکاران با مطالعه کامپوزیت 3DLAW کربن-اپوکسی بدین نتیجه رسیدند، خم شدن دسته‌های الیاف، صاف و بدون فروموج شدن آن‌ها، دو پدیده اصلی اثرگذار بر رفتار فشاری کامپوزیت است [۹۶]. جدول ۴ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده مرتبط با خواص فشاری کامپوزیت‌های تقویت شده با منسوج سه بعدی را نشان می‌دهد.

۳-۳ خواص خمشی

نخ‌های پرکننده نقش مهمی در بهبود خواص کامپوزیت‌ها دارند. Yang دریافت، به دلیل تراکم نخ‌های پود، قرارگیری آن‌ها باعث افزایش تنش و کاهش مدول خمشی می‌شود. Chen و همکاران مشاهده کردند، با افزایش تعداد لایه‌ها سفتی خمشی در کامپوزیت‌های 3DAW در جهت نخ‌های پود نسبت به نخ‌های تار بیشتر افزایش پیدا می‌کند [۵۳، ۵۹]. Dai و همکاران نشان دادند، اگر نخ‌های متصل کننده دارای زاویه باشند، ساختار از خواص خمشی زیادی برخوردار و از لایه لایه شدن طولانی جلوگیری می‌شود [۶۴]. Gerlach و همکاران نشان دادند، کسر حجمی الیاف به طور درخور توجهی بر میزان تنش، به ویژه در جهت پود، اثرگذار است [۶۶]. Ding و همکاران دریافتند، در کامپوزیت‌های 3DOW، به دلیل خم شدن نخ‌ها در جهت اعمال نیرو، خواص بدون لایه لایه شدن کامپوزیت کاهش می‌یابد. اما این کاهش، نسبت به چندلایه‌های دوبعدی کمتر است [۸۳].

Kuo و همکاران آزمون خمشی را برای کامپوزیت 3DOW کربن-اپوکسی انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند، حلقه‌های نخ‌های اتصال دهنده در سطح منسوج سه بعدی، از گسترش ترک جلوگیری می‌کنند و باعث انحراف آن می‌شوند [۹۷]. Adanur و همکاران، ساختار کامپوزیت‌های سه بعدی 3DLAW شیشه-اپوکسی را بررسی و گزارش کردند که مقاومت خمشی آن‌ها بیش از منسوجات

سه‌بعدی توسط Jin, Wang و Chou بررسی و مشخص شد که افزایش نخ‌های متصل‌کننده باعث مقاومت کامپوزیت در برابر بارهای خمشی می‌شود [۷۹، ۱۰۵، ۱۰۶]. جدول ۵ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با خواص خمشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

۳-۴ خواص برشی

منحنی تنش-کرنش برشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی بسیار غیرخطی است [۲۴]. Brandt و همکاران، مقاومت برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های 3DAW و 3DOW را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند، مقاومت برشی کامپوزیت‌های 3DAW

مدول خمشی کامپوزیت‌های 3DOW تک‌محوری برخلاف مقاومت، مدول و برش درون‌صفحه‌ای آن، بیش از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج چندمحوری است. این نتیجه حاکی از آن است که نخ‌های زاویه‌دار سبب افزایش خواص برشی درون‌صفحه‌ای و کاهش خواص خمشی کامپوزیت چندمحوری می‌شوند [۱۰۳]. میناپور و همکاران رفتار خمشی کامپوزیت 3DOW عمودبرهم کربن-اپوکسی را با استفاده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای بررسی کردند. در این مطالعه، از چهار نوع بافت متفاوت در کامپوزیت‌ها استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد، افزایش تراکم نخ‌های تار و پود به افزایش کسر حجمی و مدول خمشی منجر می‌شود [۱۰۴]. اثر ساختار بافت استفاده‌شده بر خواص خمشی کامپوزیت‌های

جدول ۵- نتایج پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با خواص خمشی.

نوع منسوج	ماده	هدف آزمایش	نتایج
3DAW	کربن-اپوکسی	مطالعه رفتار خمشی	با افزایش تعداد لایه‌ها، سفتی خمشی در جهت نخ‌های پود نسبت به نخ‌های تار بیشتر افزایش پیدا می‌کند [۵۳، ۵۹].
3DOW	بازالت-وینیل استر	بررسی رفتار شبه‌ایستا و رفتار فشاری تحت نرخ کرنش زیاد	در این کامپوزیت‌ها به دلیل خم شدن نخ‌ها در جهت اعمال نیرو، خواص بدون لایه‌لایه شدن کاهش می‌یابد، اما این کاهش نسبت به کامپوزیت‌های دوبعدی کمتر است [۸۳].
3DOW	کربن-اپوکسی	مطالعه رفتار خمشی	حلقه‌های نخ‌های اتصال‌دهنده در سطح منسوج سه‌بعدی، از گسترش ترک جلوگیری می‌کنند و باعث انحراف ترک می‌شوند [۹۷].
3DLAW	شیشه-اپوکسی	بررسی قابلیت انعطاف‌پذیری	مقاومت خمشی بیش از منسوجات دوبعدی لایه‌لایه است [۹۸].
3DOW 3DAW	شیشه-وینیل استر	اثر ساختار 3DAW تحت بارگذاری چرخ‌های خمشی	کامپوزیت‌های 3DOW نسبت به کامپوزیت‌های 3DAW می‌توانند تحمل بارهای خمشی یا جذب انرژی زیادی داشته باشند، اما در خمش سه‌نقطه‌ای تنها می‌توانند مدت زمان کوتاهی خستگی را تحمل کنند. لایه‌لایه شدن و گسستگی نخ‌ها در ماتریس به دلیل تفاوت تنش لایه‌ای در خمش سه‌نقطه‌ای است [۹۹].
3DOW	کربن-اپوکسی	مطالعه رفتار خمشی تحت آزمون خمش	با افزایش کسر حجمی نخ‌های متصل‌کننده در منسوج، مقاومت خمشی افزایش می‌یابد، در حالی که مدول خمشی به ظرافت نخ‌های متصل‌کننده بستگی دارد. افزون بر این، فشار بیشتر در حین تولید به تراکم نخ‌ها و تجعد آن‌ها منجر می‌شود و این مسئله در مقاومت خمشی کامپوزیت‌ها مزیت‌بخش است [۱۰۰].
3DLAW	کربن-اپوکسی	مطالعه رفتار خمشی تحت آزمون خمش	با افزایش ضخامت نمونه‌ها، کرنش تا شکست افزایش می‌یابد. پیچ‌خوردگی الیاف در سمتی که فشار روی نمونه‌ها ایجاد می‌شود، به‌عنوان سازوکار محدودکننده مقاومت برای کامپوزیت‌های تحت بار خمشی به‌شمار می‌رود [۱۰۱].

ادامه جدول ۵

نوع منسوج	ماده	هدف آزمایش	نتایج
3DOW 3DAW	کربن-اپوکسی	اثر ساختار الیاف بر خواص مکانیکی	عملکرد کامپوزیت‌ها تحت تأثیر پراکندگی توزیع رزین و فروموج منسوج هستند. هرچه فروموج الیاف کمتر و پراکندگی رزین در تمام نقاط کامپوزیت یکسان‌تر باشد، کامپوزیت عملکرد بهتری نشان می‌دهد. کامپوزیت 3DAW نسبت به کامپوزیت 3DOW، مقاومت به مراتب بیشتری در برابر خمش نشان می‌دهد [۶۴].
3DOW	شیشه-اپوکسی	مطالعه پیش‌روی آسیب	ترک در ماتریس در کرنش معادل ۰/۷٪ شروع به رشد می‌کند. در بارگذاری خمشی رشد ترک در جهت تار به دلیل رشد ترک‌های مجاور صفحه کششی سریع‌تر است [۱۰۲].
3DOW	کربن-اپوکسی	مقایسه خواص برشی و خمشی	مقاومت و مدول خمشی کامپوزیت‌های 3DOW تک‌محوری، برخلاف مقاومت و مدول برشی درون‌صفحه‌ای آن، بیش از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج چندمحوری است. این نتیجه حاکی از آن است که نخ‌های زاویه‌دار سبب افزایش خواص برشی درون‌صفحه‌ای و کاهش خواص خمشی کامپوزیت چندمحوری می‌شوند [۱۰۳].
3DOW	کربن-اپوکسی	مطالعه رفتار خمشی	افزایش تراکم نخ‌های تار و پود به افزایش کسر حجمی و مدول خمشی منجر می‌شود [۱۰۴].
3DOW 3DAW 3DLAW	کربن-اپوکسی	مطالعه رفتار مکانیکی	کامپوزیت 3DLAW، بیشترین مقدار خمیدگی در میان کامپوزیت‌های مقایسه‌شده را به دست آورد [۶۲،۶۳].

Hiley و همکاران نشان دادند، تنش برشی بین‌لایه‌ای با ازدیاد نرخ کرنش افزایش می‌یابد. همچنین برای مقاومت نخ‌های متصل‌کننده، تنش در جهت نخ‌های تار کمتر از تنش در جهت نخ‌های پود است [۱۱۰،۱۱۱].

Sun و همکاران دریافته‌اند، در کامپوزیت‌های 3DOW، شیشه-پلی‌استر با افزایش نرخ کرنش، تنش شکست کاهش پیدا می‌کند. همچنین، تنش شکست بیشتر و مدول کمتر در جهت نخ‌های پود نسبت به نخ‌های تار مشاهده شد [۱۱۲]. Muñoz و همکاران پاسخ برشی درون‌صفحه‌ای کامپوزیت‌های هیبرید 3DOW را مطالعه و تغییر شکل و میکروسازوکار شکست را با استفاده از اندازه‌گیری تنش و میکروتوموگرافی پرتو ایکس تجزیه و تحلیل کردند. در این کار، کرنش شکست بسیار زیاد (۳۸٪) مشاهده شد که بسیار بیش از کامپوزیت‌های لایه‌ای دوبعدی بود [۱۱۳].

خواص برشی بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌های سه‌بعدی با نخ‌های متصل‌کننده باید بیشتر بررسی شود. در آزمون برشی، مقاومت برشی درون‌صفحه‌ای در مواد و ساختارهای مختلف ثابت باقی می‌ماند،

به دلیل قابلیت تحمل بار بیشتر به وسیله نخ‌های متصل‌کننده، از کامپوزیت‌های 3DOW بیشتر است [۶۳]. Gerlach و همکاران درباره خواص برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت 3DAW کربن-اپوکسی پژوهش‌هایی انجام دادند. آن‌ها بدین نتیجه رسیدند، تنش در جهت نخ‌های تار نسبت به نخ‌های پود به میزان بیشتری کاهش پیدا می‌کند. وجود نخ‌های متصل‌کننده باعث افزایش مقاومت پسماند می‌شوند [۶۶]. Chang و همکاران تعیین کردند، کامپوزیت‌های سرامیکی تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی به دلیل وجود تغییر شکل‌های ناشی از ترک تحت بارگذاری برشی درون‌صفحه‌ای، رفتار تنش-کرنش غیرخطی دارند [۱۰۷]. Boisse, Zhang و همکاران بر اثر تراکم و زاویه برش کامپوزیت‌های 3DAW مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها دریافته‌اند، با افزایش تراکم منسوج، عملکرد برشی کاهش پیدا می‌کند. تنش در ابتدا با زاویه کم و به طور آرام شروع می‌شود و سپس به سرعت افزایش می‌یابد [۱۰۸]. مطالعات Dong و همکاران درباره کامپوزیت‌های 3DOW و 3DAW نشان داد، کسر حجمی الیاف باعث افزایش تنش برشی بین‌لایه‌ای می‌شود [۱۰۹]. Hallett

زیادی در برابر لایه‌لایه‌شدن نسبت به کامپوزیت‌های 3DLAW دارد و در برابر آسیب‌های بالستیک مقاوم است [۱۱۶]. همچنین Vaidya و همکاران مشاهده کردند، کامپوزیت 3DAW دارای مقاومت بیشتری در برابر ضربه است. نخ‌های متصل‌کننده در صورت وارد آمدن ضربه به کامپوزیت، تمام لایه‌های منسوج را در کنار هم نگه می‌دارد و مقاومت کامپوزیت در برابر لایه‌لایه‌شدن را افزایش می‌دهد [۱۱۷]. با این حال، Minh و همکاران اعلام کردند، کامپوزیت 3DAW در برابر ضربه بالستیک مقاومت زیادی نشان می‌دهد. اما لبه‌های آزاد کامپوزیت آسیب می‌بیند که دلیل آن اختلاف تجعد نخ‌ها در جهت نخ‌های تار و پود است [۱۱۸].

در حالی که مقاومت برشی بین‌لایه‌ای دارای تفاوت‌های خاصی است [۲۴]. جدول ۶ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با خواص برشی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

۳-۵ خواص ضربه‌ای

منشأ بارهای ضربه‌ای عمدتاً شامل برخورد اجسامی که در ارتفاع کم پرواز می‌کنند، حمله پرنده‌گان، موج ضربه ناشی از اصابت بالستیک و برخورد قطعه‌هاست [۱۱۵]. Li و همکاران با مطالعه کامپوزیت 3DAW اظهار داشتند، این نوع کامپوزیت مقاومت

جدول ۶- نتایج پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با خواص برشی.

نوع منسوج	ماده	هدف آزمایش	نتایج
3DAW 3DOW	کربن-اپوکسی	مطالعه مقاومت برشی	مقاومت برشی کامپوزیت‌های 3DAW به دلیل وجود نخ‌های متصل‌کننده قابلیت تحمل بار بیشتری نسبت به کامپوزیت‌های 3DOW دارد [۶۳].
3DAW	کربن-اپوکسی	مطالعه مقاومت برشی	تنش در جهت نخ‌های تار نسبت به نخ‌های پود به میزان بیشتری کاهش پیدا می‌کند. وجود نخ‌های متصل‌کننده باعث افزایش مقاومت پسماند می‌شوند [۶۶].
3DOW	کربن-سیلیکون کاربید	خواص مکانیکی و فرایند آسیب تحت بارگذاری برشی	کامپوزیت‌های سرامیکی تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی، به دلیل وجود تغییر شکل‌های ناشی از ترک تحت بارگذاری برشی درون‌صفحه‌ای، رفتار تنش- کرنش غیرخطی دارند [۱۰۷].
3DAW	کربن-شیشه-آرامید	اثر تراکم و زاویه برش	با افزایش تراکم منسوج، عملکرد برشی کاهش پیدا می‌کند. تنش در ابتدا با زاویه کم و به‌طور آرام شروع می‌شود و سپس به سرعت افزایش پیدا می‌کند [۱۰۸].
3DOW 3DAW	کربن-اپوکسی	مطالعه مقاومت برشی	کسر حجمی الیاف باعث افزایش تنش برشی بین‌لایه‌ای می‌شود [۱۰۹].
3DOW	کربن-اپوکسی	اثر نرخ کرنش بر مقاومت برشی	تنش برشی بین‌لایه‌ای با ازدیاد نرخ کرنش افزایش می‌یابد. همچنین، برای مقاومت نخ‌های متصل‌کننده، تنش در جهت نخ‌های تار کمتر از تنش در جهت نخ‌های پود است [۱۱۰، ۱۱۱].
3DOW	شیشه-پلی‌استر	مطالعه رفتار برشی	با افزایش نرخ کرنش، تنش شکست کاهش پیدا می‌کند. همچنین، تنش شکست بیشتر و مدول کمتر در جهت نخ‌های پود نسبت به نخ‌های تار مشاهده شد [۱۱۲].
3DLAW	کربن-اپوکسی	مطالعه پاسخ برشی درون‌صفحه‌ای	کرنش شکست بسیار زیاد (۳۸٪) بسیار بیشتر از کامپوزیت‌های لایه‌ای دوبعدی مشاهده شد [۱۱۳].
3DOW	کربن-اپوکسی	مدل‌سازی آسیب شکست برشی	هیچ یک از الیاف به‌طور کامل شکسته نشدند. یک مدل ماتریسی برای ازبین‌بردن آسیب ناشی از برش ارائه شد [۱۱۴].

[۱۱۹]. جذب انرژی زیاد زمانی حاصل می‌شود که انرژی به‌خوبی در امتداد الیاف توزیع شود. Jia و همکاران درباره نفوذ بالستیک بر کامپوزیت 3DOW با استفاده از گلوله فولادی مطالعه کردند. پژوهشگران دریافتند، کامپوزیت سه‌بعدی عمودبرهم از مقاومت خوبی در برابر ضربه برخوردار است. زیرا، به‌دلیل وجود نخ‌های Z

بدین ترتیب گزارش شده است، کامپوزیت‌های 3DOW عملکرد خوبی دارند. Baucom و همکاران توضیح دادند، کامپوزیت‌های سه‌بعدی عمودبرهم، سازوکار جذب انرژی خاصی برای ضربه در سرعت کم دارند آن‌ها انرژی را در فضای زیادی پخش می‌کنند و در یک نقطه متمرکز نمی‌کنند تا کمترین آسیب به کامپوزیت برسد

جدول ۷- نتایج پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با خواص ضربه.

نوع منسوج	ماده	هدف آزمایش	نتایج
3DAW 3DLAW	آرامید-پلی‌استر	مطالعه مقاومت در برابر ضربه	کامپوزیت 3DAW مقاومت زیادی در برابر لایه‌لایه شدن نسبت به کامپوزیت‌های 3DLAW دارد و در برابر آسیب‌های بالستیک مقاوم است [۱۱۶].
3DAW	کربن-سیلیکون کاربید	تحلیل سازوکار شکست در اثر ضربه	کامپوزیت در برابر ضربه بالستیک مقاومت زیادی نشان می‌دهد. اما لبه‌های آزاد کامپوزیت آسیب می‌بیند که دلیل آن اختلاف تجعد نخ‌ها در جهت نخ‌های تار و پود است [۱۱۸].
3DOW	شیشه-اپوکسی	تجمع آسیب در اثر ضربه	این کامپوزیت‌ها، سازوکار جذب انرژی خاصی برای ضربه در سرعت کم دارند، انرژی را در فضای زیادی پخش می‌کنند و در یک نقطه متمرکز نمی‌کنند تا کمترین آسیب به کامپوزیت برسد [۱۱۹].
3DOW	آرامید-شیشه	نفوذ بالستیک کامپوزیت با استفاده از گلوله فولادی مطالعه	این نوع کامپوزیت از مقاومت خوبی در برابر ضربه برخوردار است، زیرا به‌دلیل وجود نخ‌های Z در جهت ضخامت، لایه‌لایه شدن رخ نمی‌دهد [۱۲۰].
3DOW	شیشه-اپوکسی	تحلیل سازوکار آسیب	کامپوزیت‌ها، به‌دلیل برهم‌کنش نخ‌های پود و متصل‌کننده، مقاومت در برابر ضربه بهتری نسبت به کامپوزیت‌های بافته‌شده با منسوجات دوبعدی دارند [۱۲۱، ۱۲۲].
3DOW	شیشه-اپوکسی	بررسی حالت‌های خرابی و شکست کامپوزیت	نخ‌های Z به‌طور مؤثر ترک‌های بین لایه‌ها را محدود کرده و از رشد آن‌ها جلوگیری می‌کنند [۱۲۳].
3DOW 3DAW	آرامید-پلی‌اتیلن	مقاومت در برابر ضربه	برای مقاومت بیشتر این کامپوزیت‌ها در برابر ضربه بالستیک بهتر است از الیاف آرامید به‌جای پلی‌اتیلن استفاده شود [۱۲۴].
3DOW	آرامید-شیشه- پلی‌استر	رفتار ضربه‌ای و جذب انرژی	جذب انرژی کامپوزیت‌ها با افزایش سرعت ضربه، افزایش می‌یابد و کامپوزیت در اثر بار ضربه‌ای وارد شده، برخلاف کامپوزیت‌های دوبعدی، لایه‌لایه نمی‌شود [۱۲۵].
3DOW	کولار-شیشه	شبیه‌سازی اجزای محدود آسیب ضربه‌ای بالستیک	کامپوزیت‌های تقویت‌شده با این منسوجات، مدول صفحه‌ای و مقاومت لایه‌لایه‌شدگی زیادی دارند. انتظار می‌رود، ویژگی‌های برجسته این گونه ساختارها باعث افزایش کاربرد آن‌ها در حفاظت بالستیک شود [۱۲۶].
3DOW 3DAW	کربن-اپوکسی	اثر ساختار الیاف بر خواص مکانیکی	کامپوزیت 3DAW مقاومت به‌مراتب بیشتری در برابر ضربه نسبت به کامپوزیت 3DOW نشان می‌دهد [۶۴].
3DAW	کربن-اپوکسی	مطالعه خواص مکانیکی و مقایسه با کامپوزیت‌های دوبعدی	کامپوزیت تولیدی مقاومت بیشتری در برابر ضربه و رشد ترک نسبت به کامپوزیت‌های دوبعدی دارد [۸۲].

خواص مکانیکی و کاربردهای کامپوزیت‌های سه‌بعدی، به‌ویژه کامپوزیت‌های 3DAW، 3DLAW و 3DOW بررسی شد. همچنین، به نتایج تحلیل خواص کامپوزیت‌ها در جهت نخ‌های تار، پود و متصل‌کننده پرداخته شد. هرچند با توجه به پیچیدگی ساختاری کامپوزیت‌های سه‌بعدی، این بررسی نمی‌تواند شامل همه جزئیات باشد و لزوم انجام پژوهش‌های بیشتر در این حوزه احساس شده که به نوبه خود باعث کشف ویژگی‌های جدید این نوع کامپوزیت‌ها می‌شود. پژوهشگران مطالعات زیادی درباره خواص کششی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات سه‌بعدی انجام داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، منحنی‌های تنش-کرنش در این کامپوزیت‌ها، ابتدا به‌طور خطی بوده و سپس در کرنش‌های کم به‌صورت غیرخطی تغییر روند می‌دهند. بررسی خواص کششی در جهت‌های نخ‌های تار و پود در ساختارهای مختلف نشان می‌دهد، نخ‌های متصل‌کننده اثر چشمگیری بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها دارند. شکست، آسیب‌های پیش‌رونده و خستگی در بسیاری از آزمایش‌های کشش مشاهده شد. در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی، فرموج کمتر الیاف درون‌صفحه‌ای کامپوزیت (که تحت تأثیر معماری ساختار منسوج است)، افزایش تراکم نخ‌های پود، افزایش چگالی خطی و هیبریدکردن الیاف به بهبود مقاومت کششی این کامپوزیت‌ها کمک بسیار زیادی می‌کند. آزمون خمش سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای روش معمولی برای بررسی خواص خمشی و خستگی است. در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی در مقایسه با کامپوزیت‌های چندلایه دو‌بعدی، خواص خمشی ضعیف‌تر است. اگرچه پیشرفت‌هایی در زمینه بهبود خواص خمشی کامپوزیت‌ها انجام شده است، اما مطالعات و پژوهش‌های بیشتری در این زمینه لازم به‌نظر می‌رسد. افزایش تعداد لایه‌ها در این نوع کامپوزیت‌ها، روش مطلوب و مؤثری برای افزایش مقاومت خمشی است. افزایش تراکم تار و پود می‌تواند برای استحکام برشی مفید باشد. استفاده از یک منسوج هیبریدی در این نوع کامپوزیت‌ها، با تراکم یکسان نخ‌های تار و پود و افزایش تعداد نقاط برخورد در ساختار بافت منسوج می‌تواند باعث افزایش مقاومت کامپوزیت در برابر ضربه شود. به‌نظر می‌رسد، خم‌شدن نخ‌های تار دلیل اصلی شکست در فشار محوری باشد. پژوهش‌های بسیاری درباره خواص کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی با نرخ کرنش متفاوت متمرکز شده‌اند. در نرخ کرنش زیاد، الیاف به‌راحتی آسیب می‌بینند. همچنین بهتر است، برای افزایش مقاومت در برابر برخورد بالستیک از الیافی مانند آرامید به‌جای پلی‌اتیلن استفاده شود.

در جهت ضخامت، لایه‌لایه‌شدن رخ نمی‌دهد [۱۲۰].

منسوجات سه‌بعدی می‌توانند بر بسیاری از مشکلات ناشی از لایه‌لایه‌شدن در کامپوزیت‌ها غلبه کنند. Bahei, Baucom و همکاران نشان دادند، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی، به‌دلیل برهم‌کنش بین نخ‌های پود و متصل‌کننده، مقاومت در برابر ضربه بهتری نسبت به کامپوزیت‌های بافته‌شده با منسوجات دو‌بعدی دارند [۱۲۱، ۱۲۲]. Rao و همکاران با بررسی چند حالت خرابی و شکست کامپوزیت‌های 3DOW نشان دادند، نخ‌های Z به‌طور مؤثر ترک‌های بین لایه‌ها را محدود کرده و از رشد آن‌ها جلوگیری می‌کنند [۱۲۳]. Jayasundara در بررسی کامپوزیت‌های 3DOW و 3DAW آرامید و پلی‌اتیلن بدین نتیجه رسید، برای مقاومت بیشتر این کامپوزیت‌ها در برابر ضربه بالستیک بهتر است از الیاف آرامید به‌جای پلی‌اتیلن استفاده شود [۱۲۴].

Luo و همکاران رفتار ضربه‌ای و جذب انرژی کامپوزیت‌های هیبرید 3DOW آرامید-شیشه را تحلیل کردند. منسوج سه‌بعدی با استفاده از الیاف آرامید، شیشه و کامپوزیت نهایی با تزریق رزین پلی‌استر با استفاده از روش قالب‌گیری انتقالی رزین تولید شد. در این پژوهش، منحنی‌های نیرو-جابجایی کامپوزیت در آزمایش ضربه عرضی با روش هاپکینسون اصلاح‌شده، برای تحلیل نرخ کرنش در جذب انرژی به‌دست آمد. نتایج حاکی از آن است، جذب انرژی کامپوزیت‌ها با افزایش سرعت ضربه، افزایش می‌یابد و کامپوزیت در اثر بار ضربه‌ای واردشده، برخلاف کامپوزیت‌های دو‌بعدی، لایه‌لایه نمی‌شود [۱۲۵]. Sun و همکاران به شبیه‌سازی اجزای محدود آسیب ضربه‌ای بالستیک کامپوزیت‌های 3DOW کولار-شیشه با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداختند. آن‌ها بیان کردند، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با این منسوجات، مدول صفحه‌ای و مقاومت لایه‌لایه‌شدگی زیادی دارند و انتظار می‌رود، ویژگی‌های برجسته این گونه ساختارها باعث افزایش کاربرد آن‌ها در حفاظت بالستیک شود. اعتقاد این پژوهشگران بر این است، چنین پژوهشی باید برای طراحی زره‌های ضدگلوله با منسوج عمودبرهم سه‌بعدی گسترش یابد [۱۲۶]. جدول ۷ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوج سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله، بخش گسترده‌ای از پیشرفت‌های اخیر در زمینه

۵ مهم‌ترین چالش‌ها و فعالیت‌های پژوهشی آینده

اتصال ضعیف با اکثر ماتریس‌ها هستند. بنابراین به‌نظر می‌رسد، هیبرید کردن آن‌ها با بعضی از الیاف مصنوعی، برای جبران برخی نقص‌های ذکر شده و بهبود کارایی کامپوزیت نهایی نقش بسزایی داشته باشد. به‌نظر می‌رسد، استفاده از الیاف طبیعی برای ساخت تقویت‌کننده‌های سه‌بعدی و رفع مشکلات موجود در آینده بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

برخی از خواص مکانیکی مانند نفوذ در برابر چاقو، مقاومت در برابر خستگی، آزمون‌های دینامیکی و ثبات گرمایی، بازراندگی در برابر آتش برای این نوع کامپوزیت‌ها تعیین نشده یا به‌صورت بسیار محدود تعیین شده است. نیاز است، این آزمایش‌ها بیشتر درباره این کامپوزیت‌ها انجام شود و ویژگی‌ها و قابلیت‌های آن‌ها را افزایش دهد. پژوهشگران بیشتر در این زمینه باعث افزایش کارایی و قابلیت کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات سه‌بعدی می‌شوند. به‌عنوان مثال، می‌توان کامپوزیتی طراحی کرد که در لایه‌های مختلف منسوجات سه‌بعدی آن از نخ‌های مقاوم در برابر آتش و سازگار با بدن انسان استفاده شده یا در تولید آن از منسوجات هوشمند بهره گرفته شود. در این زمینه فضای زیادی برای انجام کارهای پژوهشی وجود دارد و به‌نظر می‌رسد در آینده توجه بیشتری معطوف به این حوزه شود.

بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات سه‌بعدی نشان می‌دهد، تقویت در بعد سوم لزوماً مترادف با افزایش خواص مکانیکی در منسوجات سه‌بعدی و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با آن‌ها نیست [۱۲۷]. بنابراین، تولید کامپوزیت‌های سه‌بعدی با حداقل افت خواص درون‌صفحه‌ای نسبت به کامپوزیت‌های دوطبقه‌ای، یکی از چالش‌های مهم در این حوزه است. همچنین، در زمینه مقایسه انواع کامپوزیت‌های سه‌بعدی با یکدیگر و مقایسه آن‌ها با کامپوزیت‌های دوطبقه‌ای مطالعات جامع‌تری مورد نیاز بوده که امید است در پژوهش‌های آینده بیشتر به آن پرداخته شود.

در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده درباره کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات سه‌بعدی، از الیاف مصنوعی استفاده شده است. در سالیان اخیر، الیاف طبیعی به‌علت سبک‌بودن، زیست‌تخریب‌پذیری، سازگاری با محیط زیست و قیمت کم بسیار مورد توجه بوده و استفاده از آن‌ها به‌عنوان جایگزینی برای الیاف مصنوعی در صنعت کامپوزیت مدنظر قرار گرفته است. از سوی دیگر، این مواد دارای معایبی چون خواص مکانیکی نسبتاً کم، جذب رطوبت و

مراجع

- [1] A.C. Long, *Design and Manufacture of Textile Composites*, Cambridge: Woodhead, 2005.
- [2] M.N. Saleh, G. Lubineau, and P. Potluri, "Micro-mechanics based damage mechanics for 3D orthogonal woven composites: experiment and numerical modelling", *Compos. Struct.*, vol. 156, pp. 115–124, 2016.
- [3] R. Horrocks and S. Anand, *Handbook of Technical Textile*, Cambridge: Woodhead, 2000, pp. 13-16.
- [4] R.D. Adams, "50 years in carbon fibre, 60 years in composites", In *The Structural Integrity of Carbon Fiber Composites*, Beaumont PWR, chap. 1, C. Soutis (Ed.), Springer, 2016.
- [5] Y. Rahali, "Computation of the effective mechanical properties including nonclassical moduli of 2.5D and 3D interlocks by micromechanical approaches", *Compos. Part B*, vol. 98, pp. 194–212, 2016.
- [6] Y. Rahali, "Numerical identification of classical and nonclassical moduli of 3D woven textiles and analysis of scale effects", *Compos. Struct.*, vol. 135, pp. 122–139, 2016.
- [7] N. Castaneda, B. Wisner, J. Cuadra, S. Amini, and A. Kontsos, "Investigation of the Z-binder role in progressive damage of 3D woven composites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 98, pp. 76–89, 2017.
- [8] S. Kazemahvazi, N. Khokar, S. Hallstrom, H.N.G. Wadley, and V.S. Deshpande, "Confluent 3D-assembly of fibrous structures", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 127, pp. 95–105, 2016.
- [9] M.N. Saleh, A. Yudhanto, P. Potluri, G. Lubineau, and C. Soutis, "Characterising the loading direction sensitivity of 3D woven composites: effect of z-binder architecture", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 90, pp. 577–588, 2016.
- [10] A.R. Labanieh, Y. Liu, D. Vasiukov, D. Soulat, and S. Panier, "Influence of off-axis in-plane yarns on the mechanical properties of 3D composites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 98, pp. 45–57, 2017.
- [11] R. Umer, H. Alhussein, J. Zhou, and W. Cantwell,

- “The mechanical properties of 3D woven composites”, *J. Compos. Mater.*, vol. 51, no. 12, pp. 1703–1716, 2017.
- [12] F.K. Ko and L.Y. Wan, “Textile structural composites: from 3-D to 1-D fiber architecture”, In *The Structural Integrity of Carbon Fiber Composites: Fifty Years of Progress and Achievement of the Science, Development, and Applications*, Springer, 2016, pp. 795–847.
- [13] P. Potluri, P. Hogg, and M. Arshad, “Influence of fiber architecture on impact damage tolerance in 3D woven composites”, *Appl. Compos. Mater.*, vol. 19, no. 5, pp. 799–812, 2012.
- [14] F. Dau, D. ML, and Y. Duplessis-Kergomard, “Experimental investigations and variability considerations on 3D interlock textile composites used in low velocity soft impact loading”, *Compos. Struct.*, vol. 153, pp. 369–379, 2016.
- [15] A. Hallal, R. Younes, and F. Fardoun, “Improved analytical model to predict the effective elastic properties of 2.5D interlock woven fabrics composite”, *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 10, pp. 3009–3028, 2012.
- [16] M. Ansar, W. Xinwei, and Z. Chouwei, “Modeling strategies of 3D woven composites: a review”, *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 8, pp. 1947–1963, 2011.
- [17] X. Chen, *Advances in 3D Textiles*, Cambridge: Woodhead, 2015.
- [18] L. Tong, A.P. Mouritz, and M.K. Bannister, “Stitched composites”, In *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*, Elsevier, 2002, pp. 163–204.
- [19] J. Hu, *3-D Fibrous Assemblies*, 1st ed., UK: Woodhead, 2008.
- [20] K. Warren, R. Lopez-Anido, and J. Goering, “Experimental investigation of three dimensional woven composite”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 73, 2015, pp. 242–259.
- [21] B.K. Behera and R. Mishra, “3-Dimensional weaving”, *Indian J. Fibre Text. Res.*, vol. 33, no. 3, pp. 274–287, 2008.
- [22] M.H. Mohamed and A.E. Bogdanovich, “Comparative analysis of different 3D weaving process, machines and products”, in *Proceeding of 17th International Conference on Composite Materials*, Edinburgh, UK, pp. 27-31, 2009.
- [23] A. Miravete, *3-D Textile Reinforcements In Composite Materials*, Woodhead, 1999.
- [24] T. Huang, Y. Wang, and G. Wang, “Review of the mechanical properties of a 3D Woven composite and its applications”, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, vol. 57, no. 8, pp. 740–756, 2017.
- [25] H. Hamada, K. Kameo, M. Sakaguchi, H. Saito, and M. Iwamoto, “Energy-absorption properties of braided composite rods”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 5, pp. 723–729, 2000.
- [26] A.P. Mouritz, M.K. Bannister, P.J. Falzon, and K.H. Leong, “Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites”, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, vol. 30, no. 12, pp. 1445–1461, 1999.
- [27] K. Bilisik, “New method of weaving multiaxis three dimensional flat woven fabric: feasibility of prototype tube carrire weaving”, *Fibre. Text. East. Eur.*, vol. 17, no. 6, pp. 63–69, 2009.
- [28] V.A. Guénon, T.W. Chou, and J.W. Gillespie, “Toughness properties of a three-dimensional carbon-epoxy composite”, *J. Mater. Sci.*, vol. 24, no. 11, pp. 4168–4175, 1989.
- [29] D.S. Ivanov, S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, M. Karahan, and I. Verpoest, “A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 2: comprehensive experimental results”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, no. 8, pp. 1144–1157, 2009.
- [30] N. Khokar, “3D-Weaving and Noobing: Characterization of Interlaced and Non-interlaced 3D Fabric Forming Principles”, *PhD dissertation*, Chalmers University of Technology, 1997.
- [31] R. Kamiya, B.A. Cheeseman, P. Popper, and T.-W. Chou, “Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: a review”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 33–47, 2000.
- [32] D. Jetavat and P. Potluri, “Extension of 3D Weaving Concepts for Near-Net Preforming”, *49th AIAA SDM Conference*, 2008.
- [33] X. Chen, L.W. Taylor, and L.-J. Tsai, “An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites”, *Text. Res. J.*, vol. 81, no. 9, pp. 932–944, 2011.
- [34] O.A. Golra, J. Tariq, N. Ehsan, and E. Mirza, “Strategy for introducing 3D fiber reinforced composites weaving technology”, *Procedia Technol.*, vol. 1, pp. 211–216, 2012.
- [35] F. Stig, “3D-woven reinforcement in composites”, *PhD dissertation*, KTIL School of Engineering Sciences, Stockholm, Sweden, 2012.
- [36] N. Khokar, “Making the uniaxial noobing process industrially relevant”, in *5th World Conference on 3D Fabrics and Their Applications*, Delhi, India, 2013.
- [37] H.B. Dexter, “Development of textile reinforced composites for aircraft structures”, in *4th International Symposium for Textile Composites Kyoto Institute of Technology*, Kyoto, Japan, October 12-14, 1998,
- [38] P. Gurkan, “3D woven fabrics”, in *Woven Fabrics*, INTECH Open Access, 2012, pp.91-120.

- [39] T. Gereke and C. Cherif, "A review of numerical models for 3D woven composite reinforcements", *Compos. Struct.*, vol. 209, pp. 60–66, 2019.
- [40] K. Greenwood, "Loom and method for creating an article", *U.S. Patent* 3,818,951, pp. 6–25, 1974.
- [41] S. Rudov-Clark, A. Mouritz, L. Lee, and M. Bannister, "Weaving damage to three-dimensional glass-polymer composites", in *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2003.
- [42] R.W. King, "Three dimensional fabric material", *U.S. Patent*, no. 4038440, pp. 7–26, 1977.
- [43] K. Fukuta, R. Miyashita, J. Sekiguti, Y. Nagatsuka, S. Tsuburaya, E. Aoki, and M. Sasahara, "Three-dimensional fabric, and method and loom construction for the production thereof", *U.S. Patent* 10, 3834424, pp. 41–48, 1974.
- [44] M. Mohamed and Z.-H. Zhang, "Method of forming variable cross-sectional shaped three-dimensional fabrics", *U.S. Patent* 5,085,252, 1992.
- [45] T. Khokar and N. Domeij, "A Device for Producing Integrated Non-woven Three Dimensional Fabric", *Stiftelsen Chalmers Ind.*, pp. 509–944, 1999.
- [46] J.A. Crawford, *Recent Developments in Multidirectional Weaving*, NASA Conference, Publication No. 2420, 1985, pp. 259–269.
- [47] A. Weinberg, "Method of shed opening of planar warp for high density three dimensional Weaving", *U.S. Patent* 5449025, 1995.
- [48] R.G. Evans, "Air jet machine and diagonal Z loop fabric pattern for three dimensional fabrics", *U.S. Patent* 5924459, 1999.
- [49] A. Bilisik and M.H. Mohamed, "Multiaxis 3D weaving machine and properties of multiaxial 3D woven carbon/epoxy composites", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 29, no. 8, pp. 1173–1186, 2009.
- [50] S. Deemey, "The new generation of carpet weaving machines combines flexibility and productivity", *Inter. Textile Bull.*, vol. 46, no.1, 2002.
- [51] C.-H. Chiu and C.-C. Cheng, "Weaving method of 3D woven preforms for advanced composite materials", *Text. Res. J.*, vol. 73, no. 1, pp. 37–41, 2003.
- [52] B.N. Cox, M.S. Dadkhah, and W.L. Morris, "On the tensile failure of 3D woven composites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 27, no. 6, pp. 447–458, 1996.
- [53] X. Chen, M. Spola, J.G. Paya, and P.M. Sellabona, "Experimental studies on the structure and mechanical properties of multi-layer and angle-interlock woven structures", *J. Text. Inst.*, vol. 90, no. 1, pp. 91–99, 1999.
- [54] J.P. Quinn, A.T. McIlhagger, and R. McIlhagger, "Examination of the failure of 3D woven composites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 2, pp. 273–283, 2008.
- [55] K.L. Reifsnider et al., "Comparison of interlocked fabric and laminated fabric kevlar 49/epoxy composites", *J. Compos. Technol. Res.*, vol. 7, no. 4, pp. 136, 1985.
- [56] P. Tan, L. Tong, G.P. Steven, and T. Ishikawa, "Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part I. Experimental investigation", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 31, no. 3, pp. 259–271, 2000.
- [57] P.J. Callus, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, and K.H. Leong, "Tensile properties and failure mechanisms of 3D woven GRP composites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 30, no. 11, pp. 1277–1287, 1999.
- [58] Y.M. Yu, X.-J. WANG, Z.-H. WANG, and Y.-C. LI, "Experiment study of mechanical properties of 3D orthogonal woven composite", *J. Exp. Mech.*, pp. 206–212, 2008.
- [59] C.Y. Yang, J.-L. Li, L. Chen, and G.-L. Zhang, "Study of relationship between structures and mechanical properties of three-dimensional angle-interlock woven carbon/resin composites", *J. Aeronaut. Mater.*, vol. 26, no. 5, pp. 51–55, 2006.
- [60] L.C. Dickinson and A.E. Bogdanovich, "On the understanding of tensile elastic and strength properties of integrally woven 3D carbon composites", In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Proceedings, pp. 59–62, 2002.
- [61] H. Gu and Z. Zhili, "Tensile behavior of 3D woven composites by using different fabric structures", *Mater. Des.*, vol. 23, no. 7, pp. 671–674, 2002.
- [62] A. Brandt and Drechsler, "The application of 3D reinforced fiber preforms to improve the properties of composites", *The 34th International SAMPE Symposium*, Reno, Nevada, 1989.
- [63] J. Brandt, K. Drechsler, and F.-J. Arendts, "Mechanical performance of composites based on various three-dimensional woven-fibre preforms", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 3, pp. 381–386, 1996.
- [64] S. Dai, P.R. Cunningham, S. Marshall, and C. Silva, "Influence of fibre architecture on the tensile, compressive and flexural behaviour of 3D woven composites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 69, pp. 195–207, 2015.
- [65] Y. Hou, H. Hu, B. Sun, and B. Gu, "Strain rate effects on tensile failure of 3-D angle-interlock woven carbon fabric", *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 857–866, 2013.
- [66] R. Gerlach, "In-plane and through-thickness properties, failure modes, damage and delamination in 3D woven carbon fibre composites subjected to impact loading", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 72, no. 3, pp. 397–411, 2012.
- [67] K.-H. Tsai, C.-H. Chiu, and T.-H. Wu, "Fatigue

- behavior of 3D multi-layer angle interlock woven composite plates”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 2, pp. 241–248, 2000.
- [68] R. Muñoz, V. Martinez, F. Sket, C. González, and J. LLorca, “Mechanical behavior and failure micromechanisms of hybrid 3D woven composites in tension”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 59, pp. 93–104, 2014.
- [69] B. Yu, R.S. Bradley, C. Soutis, P.J. Hogg, and P.J. Withers, “2D and 3D imaging of fatigue failure mechanisms of 3D woven composites”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 77, pp. 37–49, 2015.
- [70] S. Topal, L. Baiocchi, A.D. Crocombe, S.L. Ogin, P. Potluri, P.J. Withers, M. Quaresimin, P.A. Smith, M.C. Poole, and A.E. Bogdanovich, “Late-stage fatigue damage in a 3D orthogonal non-crimp woven composite: An experimental and numerical study”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 79, pp. 155–163, 2015.
- [71] S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, D.S. Ivanov, D. Mungalov, M. Karahan, and I. Verpoest, “A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 1: materials, methods and principal results”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, no. 8, pp. 1134–1143, 2009.
- [72] V. Carvelli, G. Gramellini, S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, D.D. Mungalov, and I. Verpoest, “Fatigue behavior of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass reinforced composites”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 14, pp. 2068–2076, 2010.
- [73] M. Karahan, S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, and I. Verpoest, “Fatigue tensile behavior of carbon/epoxy composite reinforced with non-crimp 3D orthogonal Woven fabric”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 16, pp. 1961–1972, 2011.
- [74] S. Lomov, A. Bogdanovich, M. Karahan, D. Mungalov, and I. Verpoest, “Mechanical behaviour of non-crimp 3D woven carbon/epoxy composite under in-plane tensile loading”, in *18th International Conference on Composite Materials*, 2011.
- [75] A.K. Dash and B.K. Behera, “Role of weave design on the mechanical properties of 3D woven fabrics as reinforcements for structural composites”, *J. Text. Inst.*, vol. 109, no. 7, pp. 952–960, 2018.
- [76] P. Tan, L. Tong, and G.P. Steven, “Behavior of 3D orthogonal woven CERP composites: part II. FEA and analytical modeling approaches”, *Composites*, vol. Part 4, Vo. 31, pp. 259–271, 2000.
- [77] M. Karahan and I. Verpoest, “Finite element modeling of progressive damage in non-crimp 3D orthogonal weave and plain weave E-glass composites”, In *2nd World Conference on 3D Fabrics and their Applications*, Greenville, South Carolina, USA, 2009.
- [78] A.E. Bogdanovich, M. Karahan, S.V. Lomov, and I. Verpoest, “Quasi-static tensile behavior and damage of carbon/epoxy composite reinforced with 3D non-crimp orthogonal woven fabric”, *Mech. Mater.*, vol. 62, pp. 14–31, 2013.
- [79] S. Chou, H.C. Chen, and H.E. Chen, “Effect of weave structure on mechanical fracture behavior of three-dimensional carbon fiber fabric reinforced epoxy resin composites”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 23–35, 1992.
- [80] F. Stig and S. Hallström, “Assessment of the mechanical properties of a new 3D woven fibre composite material”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 11–12, pp. 1686–1692, 2009.
- [81] B.N. Cox, M.S. Dadkhah, W.L. Morris, and J.G. Flintoff, “Failure mechanisms of 3D woven composites in tension, compression, and bending”, *Acta Metall. Mater.*, vol. 42, no. 12, pp. 3967–3984, 1994.
- [82] W. Zhou, T. Wente, D. Liu, X. Mao, D. Zeng, H. Torab, J. Dahl, and X. Xiao “A comparative study of a quasi 3D woven composite with UD and 2D woven laminates”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 139, pp. 106139, 2020.
- [83] S.Y. Nayak, S.B. Satish, M.T.H. Sultan, C.R. Kini, K.R. Shenoy, R. Samant, P.P. Sarvade, A. Azriff Basri, and F. Mustapha, “Influence of fabric orientation and compression factor on the mechanical properties of 3D E-glass reinforced epoxy composites”, *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 8517–8527, 2020.
- [84] M. Dahale, G. Neale, R. Lupicini, L. Cascone, C. McGarrigle, J. Kelly, E. Archer, E. Harkin-Jones, and A. McIlhagger, “Effect of weave parameters on the mechanical properties of 3D woven glass composites”, *Compos. Struct.*, vol. 223, pp. 110947, 2019.
- [85] W.F. Han, D.S. Li, and L. Jiang, “Mechanical properties and failure mechanisms of 3D six-directional braided composites at elevated and liquid nitrogen temperatures”, *Mater. Lett. X*, vol. 6, pp. 100035, 2020.
- [86] Q. Hu, H. Memon, Y. Qiu, W. Liu, and Y. Wei, “A comprehensive study on the mechanical properties of different 3D woven carbon fiber-epoxy composites”, *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 12, pp. 1–13, 2020.
- [87] X. Ding, and H.L. Yi, “The bending fatigue behavior and compressive properties of 3D woven composites”, in *The 14th Session of the National Composite Materials*, China, 2006.
- [88] B. Sun, B. Gu, and X. Ding, “Compressive behavior of 3D angle-interlock woven fabric composites at various strain rates”, *Polym. Test.*, vol. 24, no. 4, pp. 447–454, 2005.

- [89] F. Zhang, K. Liu, Y. Wan, L. Jin, B. Gu, and B. Sun, "Experimental and numerical analyses of the mechanical behaviors of three-dimensional orthogonal woven composites under compressive loadings with different strain rates", *Int. J. Damage Mech.*, vol. 23, no. 5, pp. 636–660, 2013.
- [90] Y. Wan, B. Sun, and B. Gu, "Multi-scale structure modeling of damage behaviors of 3D orthogonal woven composite materials subject to quasi-static and high strain rate compressions", *Mech. Mater.*, vol. 94, no. 12, pp. 1–25, 2016.
- [91] Y. Zhang, F. Sun, Y. Wang, L. Chen, and N. Pan, "Study on intra/inter-ply shear deformation of three dimensional woven preforms for composite materials", *Mater. Des.*, vol. 49, pp. 151–159, 2013.
- [92] M.V. Hosur, J. Alexander, U.K. Vaidya, and S. Jeelani, "High strain rate compression response of carbon/epoxy laminate composites", *Compos. Struct.*, vol. 52, no. 3–4, pp. 405–417, 2001.
- [93] A. Endruweit and A.C. Long, "Analysis of compressibility and permeability of selected 3D woven reinforcements", *J. Compos. Mater.*, vol. 44, no. 24, pp. 2833–2862, 2010.
- [94] A. Haque and M.K. Hossain, "Effects of moisture and temperature on high strain rate behavior of S2-glass-vinyl ester woven composites", *J. Compos. Mater.*, vol. 37, no. 7, pp. 627–647, 2003.
- [95] B. Sun, B. Gu, and X. Ding, "Compressive behavior of 3-D angle-interlock woven fabric composites at various strain rates", *Polym. Test.*, vol. 24, no. 4, pp. 447–454, 2005.
- [96] N. Vernet and F. Trochu, "Analysis and modeling of 3D interlock fabric compaction behavior", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 80, pp. 182–193, 2016.
- [97] W.S. Kuo, "The role of loops in 3D fabric composites", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 1835–1849, 2000.
- [98] S. Adanur and C.A. Tam, "On-machine interlocking of 3D laminate structures for composites", *Compos. Part B Eng.*, vol. 28, no. 5–6, pp. 497–506, 1997.
- [99] L. Jin, Y. Yao, Y. Yu, G. Rotich, B. Sun, and B. Gu, "Structural effects of three-dimensional angle-interlock woven composite undergoing bending cyclic loading", *Sci. China Phys., Mech. Astron.*, vol. 57, no. 3, pp. 501–511, 2013.
- [100] F. Sun, Y. Sun, and Q. Zhang, "Experimental investigation on bending behavior of 3D non-crimp orthogonal composite", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 20, pp. 1869–1878, 2014.
- [101] D. Zhang, A.M. Waas, and C.-F. Yen, "Progressive damage and failure response of hybrid 3D textile composites subjected to flexural loading, part I: experimental studies", *Int. J. Solids Struct.*, vol. 75–76, pp. 309–320, 2015.
- [102] S. Vadlamani, Z. Kakaratsios, S.L. Ogin, D.A. Jesson, A.S. Kaddour, P.A. Smith, J. Sirichantra, and A.E. Bogdanovich, "Damage development in a glass/epoxy non-crimp 3D orthogonal woven fabric composite", In *Proceeding of 18th International Conference on Composite Materials*, Jeju, Korea, pp. 21–26, 2011.
- [103] K. Bilisik, "Multiaxis 3D woven preform and properties of multiaxis 3D woven and 3D orthogonal woven carbon/epoxy composites", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 29, no. 8, pp. 1173–1186, 2010.
- [104] S. Minapoor, S. Ajeli, and M. Salmani Tehrani, "Investigation into tensile strength of noncrimp three-dimensional orthogonal woven structure", *J. Ind. Text.*, vol. 49, no. 2, pp. 200–218, 2019.
- [105] Y. Wang and D. Zhao, "Effect of Fabric Structures on the Mechanical Properties of 3-D Textile Composites", *J. Ind. Text.*, vol. 35, no. 3, pp. 239–256, 2006.
- [106] L. Jin, Z. Niu, B.C. Jin, B. Sun, and B. Gu, "Comparisons of static bending and fatigue damage between 3D angle-interlock and 3D orthogonal woven composites", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 31, no. 14, pp. 935–945, 2012.
- [107] Y.J. Chang, G.Q. Jiao, and B. Wang, "Mechanical properties and damage process of a three-dimensional woven ceramic composite under in-plane shear loading", *J. Inorg. Mater.*, vol. 22, no. 1, pp. 113–118, 2007.
- [108] P. Boisse, B. Zouari, and J.-L. Daniel, "Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite preforming", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 12, pp. 2201–2212, 2006.
- [109] L. Dong and J. Harding, "A single-lap shear specimen for determining the effect of strain rate on the interlaminar shear strength of carbon fibre-reinforced laminates", *Composites*, vol. 25, no. 2, pp. 129–138, 1994.
- [110] S.R. Hallett, C. Ruiz, and J. Harding, "The effect of strain rate on the interlaminar shear strength of a carbon/epoxy cross-ply laminate: comparison between experiment and numerical prediction", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 749–758, 1999.
- [111] M.J. Hiley, L. Dong, and J. Harding, "Effect of strain rate on the fracture process in interlaminar shear specimens of carbon fibre-reinforced laminates", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 28, no. 2, pp. 171–180, 1997.
- [112] B. Sun and B. Gu, "Shear behavior of 3D orthogonal woven fabric composites under high strain rates", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 25, no. 17, pp. 1833–1845, 2006.

- [113] R. Muñoz, C. González, and J. Llorca, "Mechanisms of in-plane shear deformation in hybrid three-dimensional woven composites", *J. Compos. Mater.*, vol. 49, no. 30, pp. 3755–3763, 2015.
- [114] C. Garcia, A. Hurmane, F.X. Irisarri, F. Laurin, S. Leclercq, and R. Desmorat, "Experimental analysis and damage modeling of the shear-out failure mode of a 3D woven composite lug", *Compos. Struct.*, vol. 261, pp. 113522, 2021.
- [115] D.P.C. Aiman, M.F. Yahya, and J. Salleh, "Impact properties of 2D and 3D woven composites : a review", In *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, vol. 1774, no. 1, pp. 020002, 2016.
- [116] Z. Li, B. Sun, and B. Gu, "FEM simulation of 3D angle-interlock woven composite under ballistic impact from unit cell approach", *Comput. Mater. Sci.*, vol. 49, no. 1, pp. 171–183, 2010.
- [117] A. Vaidya, U. Vaidya, and N. Uddin, "Impact response of three-dimensional multifunctional sandwich composite", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 472, no. 1, pp. 52–58, 2010.
- [118] C. Ha-Minh, "Analysis on failure mechanisms of an interlock woven fabric under ballistic impact", *Eng. Fail. Anal.*, vol. 18, no. 8, pp. 2179–2187, 2011.
- [119] J.N. Baucom, M.A. Zikry, and A.M. Rajendran, "Low-velocity impact damage accumulation in woven S2-glass composite systems", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 10, pp. 1229–1238, 2006.
- [120] X. Jia, B. Sun, and B. Gu, "Ballistic penetration of conically cylindrical steel projectile into 3D orthogonal woven composite: a finite element study at microstructure level", *J. Compos. Mater.*, vol. 45, no. 9, pp. 965–987, 2011.
- [121] Y.A. Bahei-El-Din and M.A. Zikry, "Impact-induced deformation fields in 2D and 3D woven composites", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 7, pp. 923–942, 2003.
- [122] J.N. Baucom and M.A. Zikry, "Evolution of failure mechanisms in 2D and 3D woven composite systems under quasi-static perforation", *J. Compos. Mater.*, vol. 37, no. 18, pp. 1651–1674, 2003.
- [123] P.M. Rao, T.R. Walter, and B. Sankar, "Analysis of failure modes in three-dimensional woven composites subjected to quasi-static indentation", *J. Compos. Mater.*, vol. 48, no. 20, pp. 2473–2491, 2014.
- [124] H. Jayasundara, "The impact resistance of composite materials-a review", *Composites*, vol. 22, no. 5, pp. 347–362, 2012.
- [125] Y. Luo, L. Lv, B. Sun, Y. Qiu, and B. Gu, "Transverse impact behavior and energy absorption of three-dimensional orthogonal hybrid woven composites", *Compos. Struct.*, vol. 81, no. 2, pp. 202–209, 2007.
- [126] B. Sun, Y. Liu, and B. Gu, "A unit cell approach of finite element calculation of ballistic impact damage of 3-D orthogonal woven composite", *Compos. Part B*, vol. 40, no. 6, pp. 552–560, 2009.
- [127] Z. Aboura, K. Khellil, M.L. Benzeggagh, A. Bouden, and R. Ayad, "A new generation of 3D composite materials: Advantage and disadvantage", in *Damage and Fracture Mechanics: Failure Analysis of Engineering Materials and Structures*, Springer, 2009.