



# توسعه روش قیطان بافی - پولتروژن و بررسی خواص مکانیکی میله های کامپوزیتی تولید شده با این روش

محمد صالح احمدی<sup>۱</sup>، مجید صفر جوهری<sup>۱</sup>، مجتبی صدیقی<sup>۲\*</sup>، مسعود اسفنده<sup>۳</sup>

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱- دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۱۷۵،

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۳۴۴۱-۱۵۹۱۶

۳- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

دریافت: ۸۷/۲/۲۱، پذیرش: ۸۷/۴/۸

در این پژوهش، فرایند قیطان بافی- پولتروژن برای تولید میله های کامپوزیتی توسعه یافته است. به این منظور، دستگاه قیطان بافی معمولی نساجی پس از بهینه سازی به خط تولید پولتروژن اضافه شد تا امکان تولید میله های کامپوزیتی دارای ساختار تقویت کننده شامل پوسته ای از قیطان و مغزی از الیاف تک جهتی فراهم شود. برای بررسی خواص مکانیکی میله های مزبور، انواع مختلفی از آنها با ضخامت های متفاوت تارهای قیطان و هم چنین با زوایای مختلف بافت تولید و به کمک آزمون های پیچش، کشش و خمش ارزیابی شدند. برای بررسی اثر عملیات قیطان بافی، نتایج حاصل با خواص مکانیکی میله های تک جهتی تولید شده مقایسه شد. نتایج نشان داد، میله های قیطان - پولتروژن شده (BP) نسبت به میله های تک جهتی، مدول برشی بیشتر اما مدول کششی و سختی خمشی کمتری دارند. افزایش ضخامت تارهای قیطان در میله های BP سبب بهبود خواص پیچشی و کاهش خواص کششی و خمشی شد. بیشترین مدول پیچشی در زاویه بافت ۴۵ به دست آمد. مدول کششی و سختی خمشی با افزایش زاویه بافت کم شدند.

## واژه های کلیدی

کامپوزیت،

قیطان بافی، پولتروژن،

میله، خواص مکانیکی

\* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

[mojtaba@aut.ac.ir](mailto:mojtaba@aut.ac.ir)

## Development of Braiding-Pultrusion Method and Investigation of Mechanical Properties of Composite Rods Produced by this Method

M.S. Ahmadi<sup>1</sup>, M.S. Johari<sup>1</sup>, M. Sadighi<sup>2\*</sup>, and M. Esfandeh<sup>3</sup>

1. Textile Engineering Department, P.O. Box: 15875-4413, 2. Mechanical Engineering Department;

P.O. Box: 15916-34411; Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965-115, Tehran, Iran

Received 11 May 2009, accepted 22 June 2009

### Abstract

In this research, a braiding-pultrusion production line is developed by modifying a conventional textile maypole braiding machine and adding it to a pultrusion line for production of braid-pultruded (BP) composite rods. In order to evaluate the mechanical properties of BP rods and study the effect of some braiding parameters, they were produced with different braid roving linear densities and braid angles. The results are also compared to those of unidirectional (UD) pultruded rods which were produced without braided fabric cover, but with the same fiber volume fraction and diameter. The results showed BP rods had higher shear modulus, but lower tensile modulus and flexural rigidity compared to UD rods. It was also concluded that increasing the braid roving linear density leads to an improvement in shear modulus, but a reduction in tensile modulus and flexural rigidity. Moreover, the highest shear modulus is observed in the rod with braid angle of 45°. Tensile modulus and flexural rigidity decrease when braid angle increases.

### Key Words

composite, braiding, pultrusion, rod, mechanical properties

(\* ) To whom correspondence should be addressed.

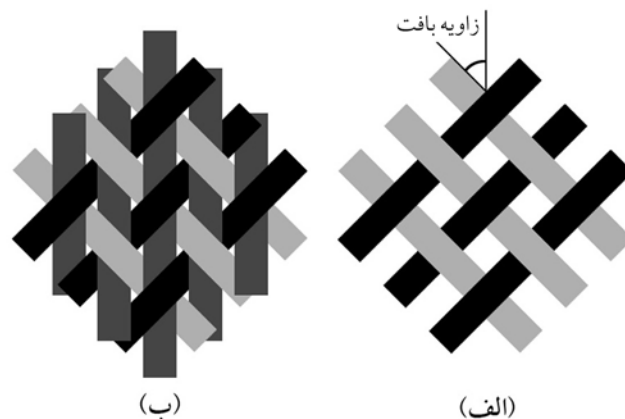
E-mail: [mojtaba@aut.ac.ir](mailto:mojtaba@aut.ac.ir)

## مقدمه

امروزه قطعات میله ای شکل ساخته شده از مواد کامپوزیتی در کاربردهای مختلف صنعتی به کار می روند. این نوع قطعات اگر صرفاً با الیاف تک جهتی تقویت شوند، گرچه استحکام کششی زیادی نشان می دهند [۱]، اما امکان ایجاد ترک در راستای الیاف و شکست محوری در آنها زیاد است [۷-۲]. بنابراین، استفاده از تقویت کننده ای که بتواند خواص عرضی مطلوبی را فراهم سازد، مهم به نظر می رسد.

روش قیطان بافی (braiding)، به عنوان یکی از روش های تولید ساختارهای تقویت کننده کامپوزیت ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تقویت کننده های قیطانی نسبت به سایر تقویت کننده های رقیب مانند تار پودی ها (woven) و رشته پیچی شده ها مزایای متعددی دارند. کامپوزیت های تقویت شده با آنها چقرمگی زیاد و مقاومت زیادی در برابر خستگی نشان می دهند. ساختارهای قیطانی را می توان در محدوده وسیعی از زوایای بافت (از ۱۵ تا ۸۵) تولید کرد. هم چنین، می توان یک مجموعه نخ محوری را برای تولید پارچه های سه محوری به ساختار اضافه کرد. قیطان های سه محوری ثبات ابعادی بیشتر و خواص شبه هم سان گرد دارند (شکل ۱). قیطان ها را می توان به شکل لوله های بدون دوخت یا پارچه هایی تحت که در حاشیه آنها نخ ها انقطاع ندارند (دارای حاشیه مداوم) تولید کرد. عدم انقطاع نخ ها در ساختار قیطان سبب می شود کامپوزیت های تقویت شده با آنها استحکام و مقاومت بیشتری در برابر ایجاد ترک نشان دهند. هم چنین، این مسئله سبب توزیع یکنواخت بارهای وارد شده در کل ساختار می شود. بنابراین، کامپوزیت های قیطانی قابلیت جذب ضربه را به مقدار زیاد دارند [۸].

فرایند قیطان بافی قابلیت ترکیب با فرایند پولتروژن را برای تولید انواع مختلف از قطعات پولتروژن شده دارد. در ترکیب این دو فرایند،



شکل ۱ - ساختار پارچه قیطان دوبعدی: (الف) دومحوری و (ب) سه محوری.

قیطان بافی ساختاری را برای مقاومت در برابر نیروهای عرضی ایجاد می کند و پولتروژن امکان تولید پیوسته قطعاتی با کیفیت و دقت زیاد را فراهم می آورد. روش قیطان بافی - پولتروژن به عنوان روشی جدید، کارآمد و کم هزینه برای تولید قطعات کامپوزیتی معرفی شده است [۹،۱۰].

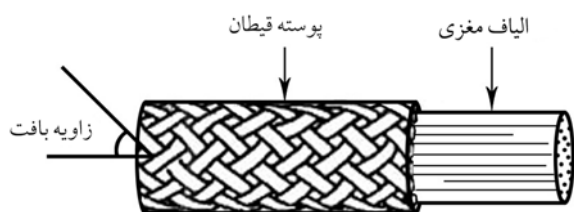
ساختار بسیار ساده که تولید آن به روش قیطان بافی - پولتروژن امکان پذیر است، میله با سطح مقطع گرد است. یک میله قیطان - پولتروژن شده (BP) از پوسته قیطان و مغزی از الیاف تک جهتی تشکیل یافته است (شکل ۲).

لازم به ذکر است، تا کنون کارهای پژوهشی بسیار محدودی در زمینه بررسی خواص مکانیکی این نوع میله ها که موضوع پژوهش حاضر است، انجام شده است که در ادامه به مهم ترین آنها اشاره می شود.

Harris و همکاران [۱۱] نوعی میله کامپوزیتی قیطان - پولتروژن شده هیبریدی را برای تقویت بتن تولید کردند. آنها نشان دادند که میله مزبور بر خلاف میله های تک جهتی که رفتاری ترد نشان می دهند، به طور تدریجی دچار شکست می شود و رفتاری شبه نرم دارد.

Saito و همکاران [۱۲] و نیز Hamada و همکاران [۱۳] رفتار میله های قیطان - پولتروژن شده را با آزمایش خردشدگی بررسی کرده و نشان دادند که در این میله ها پوسته قیطان با اعمال تنش شعاعی مانع از رشد ترک در میان الیاف مغزی می شود. بنابراین، مقدار جذب انرژی زیر نیروهای فشاری در این میله ها نسبت به میله های تک جهتی به طور قابل ملاحظه ای بیشتر است. هم چنین، جنبه های دیگری از خواص میله های BP در چند کار پژوهشی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۴-۱۶].

شایان ذکر است، اگرچه در کاربردهای مهم شناخته شده برای این نوع میله ها، مانند تقویت کننده های بتن و کاشتنی ها، امکان اعمال بارهای مختلف هم چون بارهای کششی، پیچشی و خمشی بر آنها وجود دارد [۱۱،۱۷]، اما مطالعه جامعی در زمینه رفتار این نوع میله ها در برابر بارهای مزبور انجام نشده است. هم چنین، مقایسه کاملی بین خواص مکانیکی این میله ها با میله های تک جهتی انجام نشده است و در حقیقت اطلاعات موجود در زمینه رفتار مکانیکی میله های BP بسیار محدود است. از این



شکل ۲ - ساختار یک میله قیطان - پولتروژن شده (BP).

نخ‌ها با یک‌دیگر درگیر شده و عمل بافت انجام می‌شود. قیطان ممکن است روی جسمی دیگر بافته شود و همانند روکشی آن را در برگیرد که در این حالت لازم است تا جسم مورد نظر از مرکز دستگاه وارد ناحیه بافت شده و با سرعتی برابر با سرعت برداشت به سمت خارج دستگاه حرکت کند.

### توسعه فرایند قیطان بافی - پولتروژن

برای توسعه فرایند قیطان بافی - پولتروژن، دستگاه قیطان بافی دوبعدی معمولی موجود در دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر بهینه‌سازی و با خط پولتروژن موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران ترکیب شد. دستگاه قیطان بافی مزبور از حالت عمودی به افقی تغییر داده شد و به قرقره‌هایی مجهز شد که برای پیچش الیاف شیشه طراحی و ساخته شد. هم‌چنین، پیش‌قالبی برای عبور الیاف مغزی در مرکز ماشین قرار داده شد. زاویه بافت که یکی از مهم‌ترین پارامترهای هندسی ساختار قیطان است و به عنوان زاویه بین نخ‌ها و محور طولی قیطان تعریف می‌شود (شکل ۱)، از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \tan^{-1}(\omega R/v) \quad (1)$$

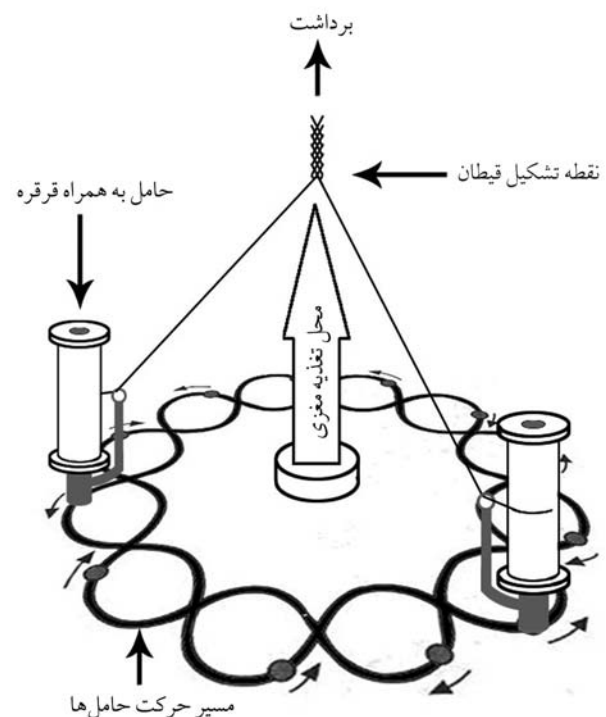
که در آن  $\alpha$  زاویه بافت،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای متوسط قرقره‌ها حول مرکز ماشین،  $R$  شعاع مغزی و  $v$  سرعت برداشت است. در دستگاه‌های قیطان بافی، برای تغییر زاویه بافت از تغییر سرعت برداشت دستگاه استفاده می‌شود. اما، از آن‌جا که در ترکیب فرایندهای قیطان بافی و پولتروژن، سرعت برداشت قیطان همان سرعت تولید پولتروژن است. تغییر در مقدار آن موجب تغییر زمان پخت قطعه می‌شود. بنابراین در کار حاضر، برای تغییر زاویه بافت از تغییر سرعت زاویه‌ای متوسط قرقره‌ها حول مرکز ماشین استفاده شده است. به این منظور، یک موتور گیربکس و اینورتور برای انتقال حرکت به قرقره‌های دستگاه به کار گرفته شده است. با این روش تغییر زاویه بافت حین تولید با سهولت و انعطاف‌پذیری زیاد ممکن شده است.

دستگاه قیطان بافی پس از بهینه‌سازی و اعمال تغییرات با خط پولتروژن ترکیب و در فضایی بین حمام رزین و قالب داغ قرار داده شده است (شکل ۴). در این فرایند، الیاف تک‌جهتی مورد نیاز در مغزی از قفسه برداشت می‌شود و پس از عبور از یک مجموعه راهنما وارد حمام رزین شده و در آن‌جا به طور کامل به رزین آغشته می‌شود. الیاف پس از خروج از حمام به سمت دستگاه قیطان بافی هدایت می‌شود و از داخل پیش‌قالب تعبیه شده در مرکز آن عبور می‌کند. وظیفه پیش‌قالب، جمع و متراکم کردن الیاف مغزی به شکل دسته‌ای متراکم با سطح مقطع گرد،

رو هدف از این پژوهش، در ابتدا توسعه خط تولید قیطان بافی - پولتروژن و بررسی پارامترهای مؤثر بر تولید میله‌های کامپوزیتی استوانه‌ای با این روش و سپس مطالعه خواص پیچشی، کششی و خمشی میله‌های تولیدی و مقایسه با خواص میله‌های تک‌جهتی است. هم‌چنین، اثر برخی پارامترها مانند ضخامت تارهای قیطان و زاویه آن بر خواص مکانیکی میله‌های BP نیز مطالعه شده است.

### اصول روش قیطان بافی دوبعدی

در تولید قیطان، سه یا تعداد بیشتری نخ به طور مورب و با ترتیب خاصی به هم بافته شده و ساختاری مسطح، لوله‌ای یا سه‌بعدی را به وجود می‌آورند. اصول کلی تولید قیطان در ماشین قیطان بافی معمولی موسوم به ماشین Maypole در شکل ۳ نشان داده شده است. در این ماشین تعدادی قرقره روی حامل‌های خود حول مسیری مدور، در جهات مخالف هم به حرکت در می‌آیند (نیمی از قرقره‌ها به طور ساعت‌گرد و نیمی دیگر به شکل پاد ساعت‌گرد دوران می‌کنند). انتهای تمام نخ‌ها در یک سمت از ماشین قیطان بافی هم‌گرا می‌شوند که در واقع محل تشکیل قیطان است. قیطان تشکیل شده با سرعت معین از روی دستگاه برداشت می‌شود. هریک از نخ‌ها در ساختار قیطان مسیر ماریچی را طی می‌کنند. در واقع هر زمان که قرقره‌ها از کنار یک‌دیگر عبور می‌کنند،



شکل ۳ - نمایی از دستگاه قیطان بافی دوبعدی.

کامپوزیتی با روش قیطان بافی - پولتروژن و با استفاده از الیاف شیشه و رزین پلی استر تولید شدند. الیاف شیشه مورد استفاده در مغزی از نوع تار و تولید شرکت Cam Elyaf و الیاف به کار رفته در عملیات قیطان بافی نیز از نوع تار و تولید شرکت CPIC بود. از رزین پلی استر سیر نشده ایزوفتالیک ۷۴۱۱۲۹ ساخت شرکت صنایع شیمیایی بوشهر در این کار استفاده شد.

برای انجام آزمون پیچش دستگاه STS-50 و برای آزمون کشش و خمش، دستگاه STM-150 هر دو ساخت شرکت طراحی مهندسی سنتام به کار گرفته شد.

## روش‌ها

### آماده‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی اثر ضخامت تارهای بافته بر خواص مکانیکی میله‌های BP، سه نوع میله با استفاده از تارهای ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰tex در قیطان بافی تولید شد. زاویه بافت در این نمونه‌ها ۴۵ انتخاب شد. برای بررسی زاویه بافت، دو نوع میله دیگر با زوایای ۳۰ و ۵۵ تولید شد. به منظور بررسی اثر عملیات قیطان بافی، یک نوع میله تک جهتی (UD) بدون استفاده از پوسته قیطان تولید شد. تمام نمونه‌ها با قطر  $6 \pm 0.1$  mm تهیه شدند و عملیات قیطان بافی برای تمام نمونه‌های BP با استفاده از هشت قرقره تارهای شیشه و با بافت الماسی (تکرار یک رو، یک زیر) انجام شد. یادآور می‌شود، تمام نمونه‌ها با درصد حجمی نسبتاً یکسانی تولید شدند که این مسئله بر اساس محاسبات و با تغییر دادن تعداد رشته تارهای مورد استفاده در مغزی انجام شد. پس از تولید میله‌ها، تعدادی نمونه از هر نوع میله، برای تعیین مقدار واقعی درصد حجمی الیاف، آزمون تعیین

پیش از بافته شدن لایه قیطان حول آن است.

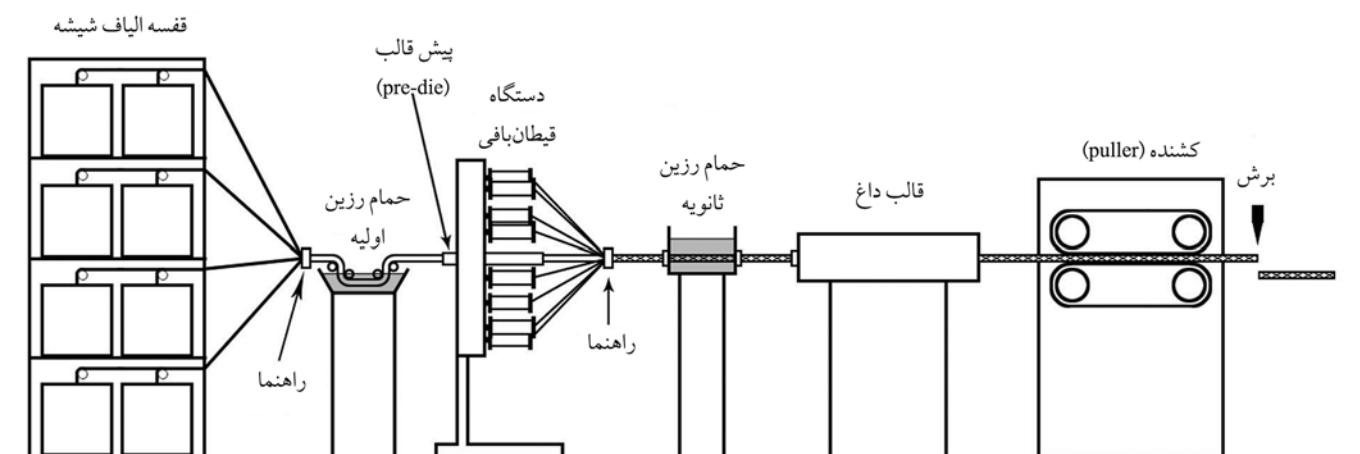
یکی از نکات مهم در عملیات قیطان بافی - پولتروژن، آغشته‌سازی الیاف قیطان به رزین است. البته از آن جا که در پژوهش حاضر، هدف تولید نمونه‌هایی با نسبت‌های کم وزنی قیطان به مغزی بود، رزین اضافی الیاف مغزی برای آغشته‌سازی الیاف قیطان نسبتاً کافی بود. زیرا الیاف قیطان زیر کشش به دور الیاف مغزی بافته می‌شدند و سبب بیرون زدن رزین اضافی موجود در آن می‌شدند. با این حال برای اطمینان از آغشته شدن کامل الیاف قیطان به رزین، یک حمام رزین ثانویه طراحی و ساخته شد و پس از دستگاه قیطان بافی تعبیه شد. در ورودی و خروجی حمام مزبور، دو راهنما متناسب با قطر ساختار قرار داده شد تا رزین از حمام به کندی خارج شود. حین کار، رزین خارج شده به داخل حمام بازگشت داده می‌شد.

پس از حمام رزین ثانویه، ساختار قیطان مغزی دار وارد قالبی داغ می‌شود که در آن عملیات پخت رزین انجام می‌شود و میله صلب کامپوزیتی شکل می‌گیرد. حرکت الیاف در کل مسیر یاد شده به کمک عملیات کشش واحد کشنده (puller) انجام می‌شود که پس از قالب قرار می‌گیرد. میله تولید شده، در انتهای خط به طول مطلوب برش داده می‌شود.

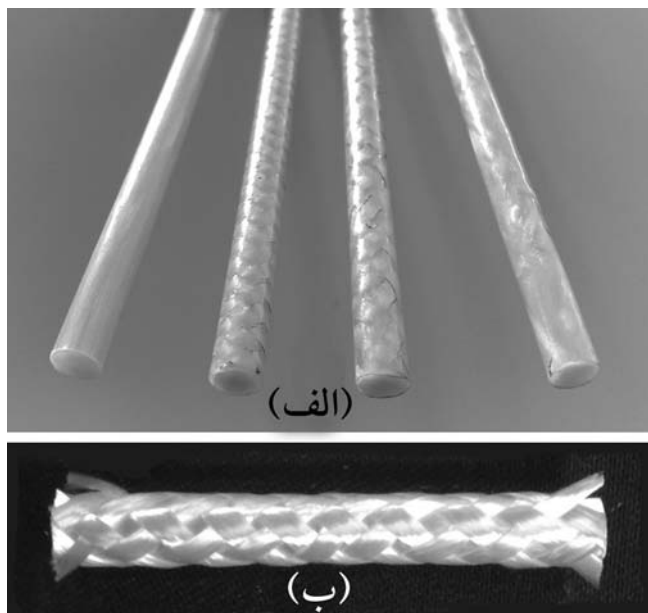
## تجربی

### مواد و دستگاه‌ها

برای تولید نمونه‌های مورد نیاز در آزمون‌های تجربی، میله‌های



شکل ۴ - نمایی از خط قیطان بافی - پولتروژن توسعه یافته در کار حاضر.



شکل ۵ - تصویر: (الف) برخی نمونه های تولیدی و (ب) تصویر یک نمونه پس از آزمون تعیین درصد حجمی الیاف.

دستی انجام شد و گشتاور اعمالی در هر زاویه پیچش به کمک حس گر دستگاه معین و نمایش داده می شد. این دستگاه دارای صفحه ای مدرج برای نشان دادن زاویه پیچش بود و پیچش نمونه ها با دقت زیاد و با گام ۵ درجه تا شکست کامل انجام شد. شکست نمونه ها در این آزمون در ناحیه خارج از دو لوله فلزی و نزدیک به مرکز نمونه اتفاق افتاد. نمودار گشتاور - زاویه پیچش با استفاده از اطلاعات به دست آمده برای تمام نمونه ها رسم شد. به منظور تحلیل رفتار برشی میله ها، مدول برشی از معادله (۲) محاسبه شد:

$$G = \frac{T.L}{J.\theta} \quad (2)$$

درصد حجمی الیاف انجام شد. هم چنین، پس از آزمون مزبور درصد وزنی پوسته به مغزی با جدا کردن این دو جزء و توزین آنها برای تمام میله ها معین شد. مشخصات میله های تولیدی در جدول ۱ آمده است. در شکل ۵ - الف تصویر برخی نمونه های تولیدی و در شکل ۵ - ب تصویر نمونه پس از آزمون تعیین درصد حجمی الیاف نشان داده شده است.

میله های تولید شده به منظور تهیه نمونه های مورد نیاز در آزمون های پیچش، کشش و خمش مورد استفاده قرار گرفتند. برای آزمون پیچش، قطعاتی به طول ۱۲۰ mm از هر نوع میله برش داده شد. دو سر قطعات داخل لوله های آهنی که به طول ۴۵ mm، قطر داخلی ۶/۲ mm و قطر خارجی ۱۲۰ mm طراحی و ساخته شدند، به کمک رزین اپوکسی چسبانده شد. برای اطمینان از نیچیدن میله داخل لوله زیر بار پیچشی، یک پین فولادی در هر انتهای قطعه تعبیه شد (شکل ۶).

به منظور تهیه نمونه های آزمون کشش، میله هایی به طول ۴۵۰ mm برش داده شد. به کمک سوهان نرم در دو انتهای هر قطعه چند خراش کم عمق ایجاد شد. سپس، عملیات رشته پیچی به طور دستی و با استفاده از الیاف شیشه و رزین اپوکسی روی طول ۱۰۰ mm از هر انتها انجام شد، تا قطر دو سر نمونه به حدود ۱۵۰ mm برسد. پس از پخت رزین، برای یکنواخت کردن سطوح رشته پیچی شده، عملیات سنگ زنی روی آنها انجام شد (شکل ۷).

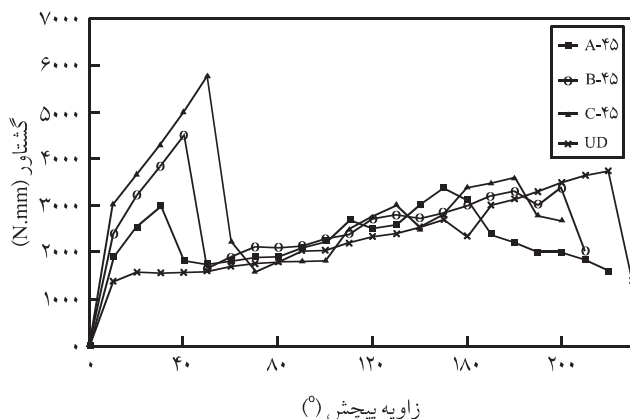
نمونه های مورد نیاز در آزمون خمش سه نقطه ای، به طول ۲۵۰ mm برش داده شدند. ۱۲۰ mm از آن طول برای قرار گرفتن بین دو تکیه گاه دستگاه و طول اضافی برای اطمینان از عدم سر خوردن نمونه در نظر گرفته شد.

## آزمون ها

برای انجام آزمون پیچش، تعداد چهار نمونه از هر نوع میله به وسیله دستگاه STS-50 آزمایش شد. در این دستگاه عملیات پیچش به شکل

جدول ۱ - مشخصات میله های تولیدی.

کد میله	چگالی خطی تارهای قیطان (tex)	چگالی خطی دسته الیاف مغزی (tex)	زاویه بافت (°)	درصد حجمی الیاف (%)	درصد وزنی پوسته به مغزی (%)
A-۴۵	۸×۳۰۰	(۲۴۰۰×۱۸)+۱۵۰۰	۴۵	۶۳/۱	۷/۷
B-۴۵	۸×۶۰۰	(۲۴۰۰×۱۷)+۳۰۰	۴۵	۶۳/۵	۱۳/۷
C-۴۵	۸×۹۰۰	(۲۴۰۰×۱۵)+۱۸۰۰	۴۵	۶۳/۴	۲۶/۹
C-۳۰	۸×۹۰۰	(۲۴۰۰×۱۶)+۱۲۰۰	۳۰	۶۳/۱	۲۷/۵
C-۵۵	۸×۹۰۰	۲۴۰۰×۱۴	۵۵	۶۷/۴	۴۰/۸
UD	---	۲۴۰۰×۲۰	---	۶۰/۶	۰

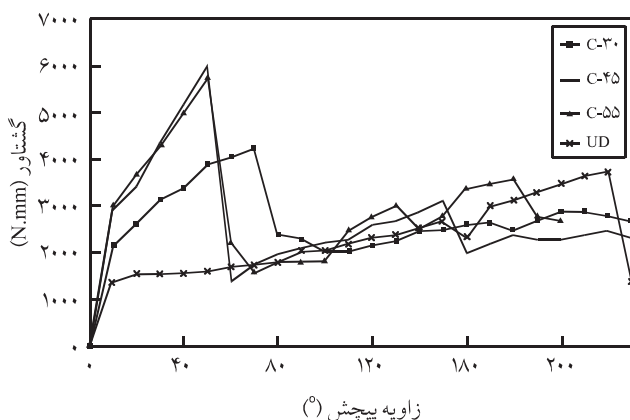


شکل ۸ - نمودار گشتاور - زاویه پیچش برای میله های A-45، B-45، C-45 و UD.

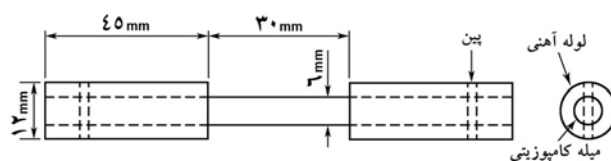
می یابد تا زمانی که شکست کامل پوسته قیطان رخ دهد و مقدار گشتاور دچار افت شدیدی شود. در این لحظه جدایی بین پوسته قیطان و مغزی رخ می دهد و سبب افت شدید استحکام برشی می شود. این رفتار در تمام میله های BP دیده می شود.

با توجه به مشخصات میله های A-45، B-45 و C-45 در شکل های ۸ و ۱۰ می توان دریافت که مدول برشی در میله های با تارهای قیطان ضخیم تر، بیشتر است. هم چنین با افزایش ضخامت تارهای قیطان، گشتاور شکست پوسته قیطان افزایش می یابد.

مقایسه خواص میله های C-30، C-45 و C-55 نشان می دهد که بیشترین مدول برشی در میله با زاویه بافت 45 به دست آمده است که با توجه به نظریه های مکانیک کامپوزیت نیز مورد انتظار است. البته بیشترین مقدار گشتاور شکست پوسته قیطان در میله C-55 رخ داد. این



شکل ۹ - نمودار گشتاور - زاویه پیچش برای میله های C-30، C-45، C-55 و UD.



شکل ۶ - نمایی از نمونه تولیدی برای آزمون پیچش.

که در آن G مدول برشی، J ممان اینرسی قطبی سطح مقطع میله،  $\theta$  زاویه پیچش، L طول و D قطر میله است.

برای آزمون کشش، دستگاه STM-150 به کار گرفته شد. آزمون به کمک یک کشش سنج و با سرعت 5 mm/min انجام شد. از هر نوع میله سه نمونه زیر آزمون کشش قرار گرفته و مدول کششی از اطلاعات تنش - کرنش برای تمام نمونه ها محاسبه شد.

آزمون خمش سه نقطه ای نیز به کمک دستگاه STM-150 انجام شد. در این دستگاه فاصله بین دو تکیه گاه 120 mm و سرعت بارگذاری 5 mm/min انتخاب شد. چهار نمونه از هر نوع میله در آزمایش خمش سه نقطه ای قرار گرفته و سختی خمشی برای هر نمونه از نمودار نیرو - جابه جایی و با توجه به معادله (۳) محاسبه شد:

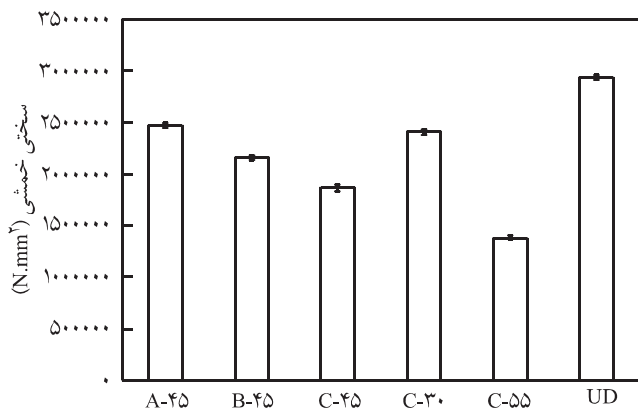
$$EI = \frac{P.L^3}{48\delta} \quad (3)$$

که در آن EI سختی خمشی، E مدول کشسان، I ممان دوم اینرسی سطح مقطع میله، P نیروی اعمالی به مرکز میله، L طول میله و  $\delta$  جابه جایی است.

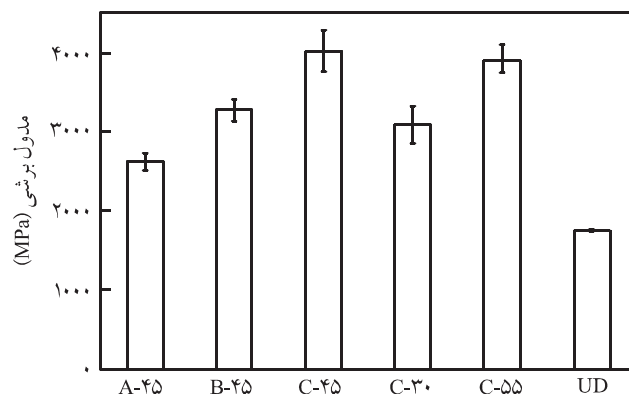
## نتایج و بحث

نمودارهای گشتاور - زاویه پیچش میله های تولید شده در شکل های ۸ و ۹ آمده است. مدول برشی محاسبه شده میله ها نیز در شکل ۱۰ مقایسه شده اند. در میله های BP نمودار گشتاور - زاویه پیچش در ابتدای کار به شکل کاملاً کشسان و بدون شکستگی الیاف است. سپس، الیاف موجود در پوسته قیطان به تدریج شروع به شکست می کنند. در این ناحیه، رفتار گشتاور - زاویه پیچش به شکل شبه خطی، ولی با شیبی کمتر ادامه

شکل ۷ - تصویر یک نمونه تولیدی برای آزمون کشش.



شکل ۱۲ - سختی خمشی میله های تولیدی.



شکل ۱۰ - مدول برشی میله های تولیدی.

علت است که تمام میله ها با درصد حجمی الیاف نسبتاً یکسانی تولید شدند. در نتیجه، برای تولید میله هایی با تارهای قیطان ضخیم تر، تعداد رشته های کمتری از الیاف مغزی در ساختار استفاده شد (جدول ۱). بنابراین، با افزایش ضخامت تارهای قیطان، مقدار الیاف آرایش یافته در راستای محوری کاهش و مقدار الیاف مایل افزایش می یابد که این مسئله سبب کاهش خواص کششی و در نتیجه خمشی میله می شود.

مقایسه خواص میله های C-45، C-30 و C-55 نشان می دهد که با کاهش زاویه تارهای قیطان، مدول کششی و سختی خمشی افزایش می یابد. برای این موضوع دو دلیل قابل ذکر است:

- کاهش زاویه بافت و نزدیک شدن راستای الیاف قیطان به راستای محوری سبب مشارکت بیشتر این الیاف در تحمل بارهای کششی می شود.

- به منظور تولید نمونه ها با درصد حجمی الیاف یکسان، در میله های BP دارای زاویه بافت کمتر، مقدار بیشتری از الیاف مغزی به کار رفت (جدول ۱).

با توجه به نتایج یاد شده مشخص است که عملیات قیطان بافی در بهبود رفتار پیچشی میله های پولتروژن شده بسیار مؤثر است. البته بدیهی است بسته به مشخصات مورد نیاز از میله کامپوزیتی، می توان مقادیر بهینه ای را برای ضخامت تارهای قیطان و زاویه آن طوری انتخاب کرد که علاوه بر دست یابی به خواص پیچشی مطلوب، خواص کششی و خمشی میله را در سطح قابل قبولی حفظ کرد.

### نکاتی در باره کار با فرایند قیطان بافی - پولتروژن

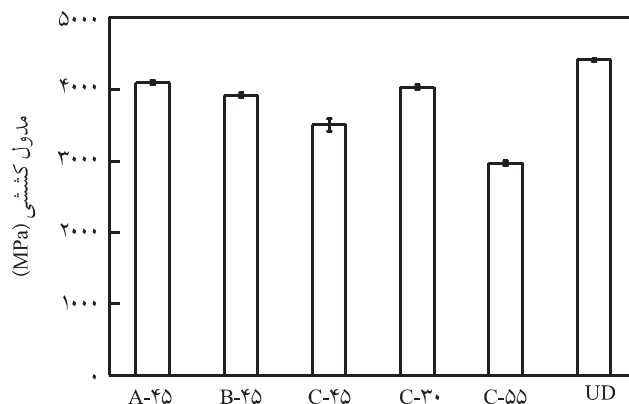
در زیر نکاتی چند در زمینه تولید قطعات به روش قیطان بافی - پولتروژن که طی مطالعات و تجربیات پژوهش حاضر به دست آمده است، اشاره می شود:

مسئله ممکن است به علت برخی ناپیکنواختی ها در امر تولید و تهیه نمونه های آزمون به ویژه در نمونه C-45 باشد.

از مقایسه خواص میله UD با میله های BP می توان به سادگی دریافت که عملیات قیطان بافی چگونه رفتار پیچشی این میله ها را تغییر می دهد. واضح است که میله UD کمترین مدول برشی را در بین تمام میله های تولید شده دارد. جالب توجه است که حتی در میله A-45 که با کمترین درصد وزنی پوسته به مغزی به مقدار ۷/۷ درصد تولید شده است، مدول برشی در حدود ۷۵ برابر مدول برشی میله UD است.

مدول کششی و سختی خمشی میله ها در شکل های ۱۱ و ۱۲ مقایسه شده است. دیده می شود که میله UD بیشترین مدول کششی و سختی خمشی را دارد که مورد انتظار است. زیرا، بیشترین خواص کششی زمانی حاصل می شود که تمام الیاف در راستای اعمال نیرو (راستای محوری) آرایش یافته باشند.

دیده می شود در میان میله های BP که با افزایش ضخامت تارهای بافته، مدول کششی و سختی خمشی کاهش می یابند. این مسئله به این



شکل ۱۱ - مدول کششی میله های تولیدی.

زیادی از الیاف به داخل قالب انجام می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای توسعه فرایند قیطان بافی - پولتروژن، دستگاه قیطان بافی معمولی نساجی بهینه‌سازی و به خط پولتروژن اضافه شد. به کمک این روش، امکان تولید میله‌هایی با ساختار تقویت‌کننده شامل پوسته‌ای از پارچه قیطان و مغزی از الیاف تک‌جهتی فراهم شد. برای بررسی خواص مکانیکی این نوع از میله‌ها و مطالعه اثر برخی پارامترهای قیطان بافی، انواع مختلفی از میله‌های قیطان - پولتروژن شده (BP) با تغییر ضخامت تارهای قیطان و هم‌چنین زاویه آن تولید شدند. افزون بر این، برای بررسی اثر عملیات قیطان بافی، نوعی میله تک‌جهتی، بدون استفاده از پوسته قیطان، به کمک عملیات پولتروژن تولید شد. تمام میله‌ها با قطر و درصد حجمی الیاف یکسان تهیه و با آزمون‌های پیچش، کشش و خمش بررسی شدند.

نتایج نشان داد، عملیات قیطان بافی اثر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود مدول برشی میله‌های پولتروژن شده دارد، اما سبب کاهش مدول کششی و سختی خمشی نسبت به میله‌های تک‌جهتی تولید شده با درصد حجمی الیاف یکسان می‌شود. به علاوه مشخص شد، با افزایش ضخامت تارهای قیطان، مقدار بهبود مدول برشی و هم‌چنین افت مدول کششی و سختی خمشی، نسبت به میله تک‌جهتی افزایش می‌یابد. بیشترین مدول برشی در زاویه بافت ۴۵ مشاهده شد. حال آن‌که، افزایش زاویه بافت سبب کاهش مدول برشی و سختی خمشی میله‌ها شد.

### قدردانی

از آقایان مهندس امیرمسعود رضادوست، دکتر علیرضا ثابت و آقایان فرهاد انتظامی از پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران و هم‌چنین آقای مهندس امیرعباس بصیری از شرکت طراحی مهندسی سنتام که با راهنمایی‌ها و کمک‌های ارزشمند خود نقش مهمی در به ثمر رسیدن این پژوهش داشتند، تقدیر و تشکر می‌شود.

### مراجع

1. Grove S.M., Optimum Fiber Orientation in Filament Wound Structures, *J. Mater. Sci. Lett.*, **5**, 1203-1213, 1999.
2. Crossman F.W., Warren W.J., Wang A.S.D., and Law G.E., Initi-

۱- برای رزین زنی به نخ‌های قیطان در فرایند قیطان بافی - پولتروژن، روش‌های محدودی در برخی مقالات ارائه شده است [۱۲-۱۴]. یکی از این روش‌ها، استفاده از پرده رزین است که در آن نخ‌های قیطان پس از بازشدن از روی قرقره و در منطقه هم‌گرایی، پیش از نقطه تشکیل قیطان با جریان مداومی از رزین خیس می‌شوند که روی آنها ریخته می‌شود. رزین جمع‌آوری شده برای استفاده مجدد پمپ می‌شود.

۲- یکی از مشکلات موجود در راه تولید قطعات به روش قیطان بافی - پولتروژن، اصطکاک موجود بین نخ‌های قیطان و جداره داخلی قالب است. این مسئله سبب تغییر زاویه بافت و ایجاد اختلال در امر تولید می‌شود. برای رفع این مشکل، می‌توان کشش نخ‌های قیطان را افزایش داد که تا حدی ثابت ساختار قیطان را در پی دارد. اما بهترین روش، تغذیه مجموعه تارها به قالب در مکانی پس از دستگاه قیطان بافی است، به نحوی که تارهای مزبور، پیرامون ساختار قیطان را فراگرفته و به عنوان حائلی بین جداره داخلی قالب و نخ‌های قیطان عمل کنند. بدیهی است برای آغشته‌سازی این تارها به رزین باید روشی مانند روش رزین زنی به نخ‌های قیطان اتخاذ شود.

۳- باید توجه داشت که تعداد قرقره‌های نخ مورد استفاده در قیطان بافی، قطر نخ‌های قیطان و زاویه آنها با توجه به قطر مغزی انتخاب شود. حد نهایی پوشش مغزی به وسیله نخ‌های قیطان که در آن بافت قیطان به حد بیشینه تراکم رسیده و هیچ فضای خالی بین نخ‌های آن وجود ندارد، زمانی اتفاق می‌افتد که:

$$\frac{w}{\cos \alpha} = \frac{2P}{N} \quad (۴)$$

که در آن،  $w$  عرض نخ‌های قیطان،  $P$  محیط مغزی،  $N$  تعداد کل نخ‌های قیطان و  $\alpha$  زاویه بافت است. عرض نخ‌های بافته از عواملی چون نمره تار نخ‌های قیطان، مقدار تاب (در صورت وجود) و قطر راهنمای سر حامل تأثیرپذیر است. محیط مغزی نیز به عواملی چون مجموع نمره تار رشته‌های مغزی، قطر پیش‌قالب و کشش نخ‌های قیطان بستگی دارد.

۴- یکی از مزایای روش قیطان بافی - پولتروژن، امکان تولید قطعاتی با درصد حجمی الیاف زیاد است. این مسئله به علت متراکم کردن الیاف مغزی به وسیله نخ‌های قیطان و در نتیجه ایجاد سهولت در ورود حجم

ation and Growth of Transverse Cracks and Edge Delamination in Composite Laminates: Part 2 (Experimental Correlation), *J. Compos. Mater.*, **14**, 88-108, 1980.



3. Lee J.W. and Daniel I.M., Progressive Transverse Cracking of Crossply Composite Laminates, *J. Compos. Mater.*, **11**, 1225-1243, 1990.
4. Maddocks J.R. and McManus H.L., Prediction of Microcracking in Composite Laminates under Thermomechanical Loading, *Polym. Polym. Compos.*, **5**, 304-314, 1996.
5. Michii Y.C. and McManus H.L., Prediction of Microcracking Distributions in Composite Laminates Using a Monte-Carlo Simulation Method, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **13**, 1220-1230, 1997.
6. Tsai C.L. and Daniel I.M., The Behavior of Cracked Cross-ply Composite Laminates under Simple Shear Loading, *Compos. Eng.*, **1**, 3-11, 1991.
7. Wang S.D. and Crossman F.W., Edge Effect on Thermally Induced Stresses in Composite Laminates, *J. Compos. Mater.*, **11**, 300-312, 1977.
8. Potluri P., Rawal A., Rivaldi M., and Porat I., Geometrical Modelling and Control of a Triaxial Braiding Machine for Producing 3D Performs, *Composites: Part A*, **34**, 481-492, 2003.
9. Fujita A., Nakatani T., Uozumi T., Kameo K., Nakai A., and Hamada H., Crush Energy Absorption of Braided Composite Rods, *Proceedings of the Fifth Japan International SAMPE Symposium*, Tokyo, 1231-1234, 28-30 October, 1997.
10. Hamada H. and Ramakrishna S., Impact Performance of Glass Cloth/Epoxy Composite Tubes with Different Surface Treatment, *Compos. Interface*, **4**, 1-10, 1996.
11. Harris H.G., Somboonsong W., and Ko F.K., New Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar for Concrete Structures, *J. Compos. Constr.*, **2**, 28-37, 1998.
12. Saito H., Chirwa E.C., Inai R. and Hamada H., Energy Absorption of Braiding Pultrusion Process Composite Rods, *Compos. Struct.*, **55**, 407-417, 2002.
13. Hamada H., Kameo K., Sakaguchi M., Saito H., and Iwamoto M., Energy-Absorption Properties of Braided Composite Rods, *Compos. Sci. Technol.*, **60**, 723-729, 2000.
14. Lam H. and Ko F.K., Composite Manufacturing by Braidtrusion Process, *Proceedings of the 33rd International SAMPE Technical Conference*, Seattle, 532-539, 6-8 May, 2001.
15. Boss J.N. and Ganesh V.K., Fabrication and Properties of Graded Composite Rods for Biomedical Applications, *Compos. Struct.*, **73**, 289-293, 2006.
16. Hampton F.P., Lam H., Ko F.K., and Harris H.G., Design Methodology of a Ductile Hybrid FRP for Concrete Structures by the Braidtrusion Process, *Proceedings of the 46th International SAMPE Symposium and Exhibition*, California, 2421-2432, 7-9 May, 2001.
17. Hiermer T., Schmitt-Thomas Kh.G., and Yang Z.G., Mechanical Properties and Failure Behavior of Cylindrical CFRP-Implant-Rods under Torsion Load, *Composites: Part A*, **29A**, 1453-1461, 1998.