



تاثیر روش‌های آزمون تک لیف و دسته الیاف بر خواص مکانیکی الیاف کربن

رضا اسلامی فارسانی^{۱*}، سید محمدرضا خلیلی^۲، علیرضا زنگی آبادی^۳ و کوشا عباس بنایی^۴

^۱ استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مواد

^۲ استاد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک

^۳ کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک

^۴ دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۵/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۵

چکیده

استحکام الیاف تقویت‌کننده، موثرترین عامل بر استحکام کامپوزیت‌ها محسوب می‌شود، لذا روش دقیقی برای ارزیابی استحکام آن مورد نیاز است. دو روش برای تعیین استحکام و دیگر خواص کششی الیاف تقویت‌کننده (نظیر الیاف کربن) وجود دارد. این دو روش شامل آزمون تک لیف و آزمون دسته الیاف آغشته شده با رزین می‌باشند. هدف از این تحقیق، مقایسه دو روش مذکور جهت تعیین خواص مکانیکی الیاف کربن بر پایه الیاف پلی اکریلونیتریل (PAN)، است. الیاف کربن به کار رفته در این تحقیق شامل دو نوع الیاف کربن است که خواص مکانیکی آن‌ها شامل استحکام کششی، مدول کششی، کرنش شکست و انرژی شکست با استفاده از دو روش آزمون تک لیف و آزمون دسته الیاف ارزیابی شدند. نتایج نشان می‌دهند که آزمون تک لیف اگرچه روشی دشوار است، اما در مقایسه با آزمون دسته الیاف، استحکام کششی و مدول کششی بزرگتر، و کرنش شکست کوچکتری برای الیاف کربن ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: الیاف کربن؛ خواص کششی؛ آزمون تک لیف؛ آزمون دسته الیاف.

The effect of single filament and tow test methods on the mechanical properties of carbon fibers

R. Eslami-Farsani^{1*}, S.M.R. Khalili², A.R. Zangiabadi³ and K. Abbas Banaie⁴

¹ Assist. Prof., Faculty of Materials Science & Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

² Prof., Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

³ M.Sc., Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

⁴ Ph.D. Student, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

Abstract

The strength of the reinforcing fibers is the main factor affecting the strength of the composites, therefore, accurate method for measuring the strength is needed. There are two methods for determining the strength of the reinforcing fibers (e.g. carbon fiber). They are the methods of single filament and the fiber tow test (fibers impregnated with resin). The main goal of this research is to find the correct procedure of testing carbon fibers with two different methods of single filament and fiber tow test, so comparing the mechanical properties of two types of polyacrylonitrile (PAN) based carbon fibers given by those methods. The fibers used in this research were two types of carbon fibers and their mechanical properties like tensile strength, tensile modulus, breaking strain and fracture energy were studied in both test methods. The results show that although the single filament test method is quite difficult but compared with the fiber tow test method gives higher values for tensile strength and tensile modulus whereas lower value for breaking strain.

Keywords: Carbon fibers; Tensile properties; Single filament test; Tow test.

۱- مقدمه

بعد از گذشت یک دوره ۴۰ ساله که همراه با توسعه و استفاده از الیاف کربن در کاربردهای خاص بود، امروزه الیاف کربن در مرحله تجاری شدن هستند. استفاده از الیاف کربن با سرعت زیادی در حال رشد می‌باشد، مخصوصاً از زمانی که در دهه ۱۹۹۰ میلادی با کاهش قابل توجه قیمت و افزایش دسترسی به آن‌ها همراه شد. تغییر در نسبت کارایی به قیمت باعث شد تا استفاده از کامپوزیت‌های کربن به جای فلزات رونق بگیرد، ضمن آن که امکان استفاده از این الیاف در کاربردهایی که با مواد قبلی امکان پذیر نبود، فراهم شد. بعلاوه تقاضای بازار به نحو فزاینده‌ای به سمت طراحی محصولات تجاری سبک‌تر، مستحکم‌تر و سریع‌تر حرکت می‌کند که با الیاف کربن امکان پذیر می‌باشد [۱].

الیاف کربن ترکیبی از استحکام کششی و مدول کششی بالا به همراه دانسیته پائین ارائه می‌دهند. مقاومت گرمایی خوب در غیاب اکسیژن، هدایت گرمایی بالا، مقاومت پائین الکتریکی، ضریب انبساط حرارتی کوچک و مقاومت عالی در برابر خزش از ویژگی‌های الیاف کربن هستند. کامپوزیت‌های الیاف کربن مقاومت خستگی بهتری نسبت به تمام فلزات دارند و زمانی که این الیاف با یک زربین مناسب ترکیب شوند، کامپوزیت حاصله از مقاوم‌ترین مواد موجود در برابر خوردگی می‌باشد. این خواص منحصر به فرد الیاف کربن نتیجه ریزساختار آنها در جهت طولی و دیگر جهات بوده و عوامل کلیدی تعیین کننده این خواص، مواد اولیه و شرایط تولید می‌باشند [۲].

الیاف کربن با ریسیدن مواد پلیمری ترموپلاستیک، عمدتاً پلی‌اکریلونیتریل (PAN) و قیر، و تبدیل آنها به کربن جهت دار تحت عملیات پیرولیز بدست می‌آیند [۳]. تحقیقات علمی و فنی زیادی در زمینه الیاف کربن صورت گرفته تا خواص مکانیکی این الیاف بهبود یابد [۴].

از آن‌جا که استحکام لیف موثرترین عامل بر استحکام کامپوزیت‌ها می‌باشد، لذا روش دقیقی برای ارزیابی استحکام آن مورد نیاز است. دو روش برای تعیین استحکام و دیگر خواص کششی لیف کربن وجود دارد. این دو روش شامل آزمون تک لیف و آزمون دسته الیاف آغشته شده با رزین می‌باشند [۲]. به علت شکنندگی زیاد الیاف کربن عملاً امکان انجام آزمون دسته الیاف کربن بدون آغشته‌سازی با رزین

وجود ندارد. ضمن آن که یک دسته الیاف شامل تعداد زیادی لیف با استحکام‌های متفاوت و طول‌های اندکی متفاوت است و در صورت اعمال بار به این دسته الیاف، ابتدا الیاف ضعیف‌تر با طول‌های کوتاه‌تر وامانده می‌شوند. اگرچه یک عدد تک لیف ممکن است ضعیف‌تر باشد اما ممکن است طول بلندتری داشته باشد و متعاقباً به علت دیرتر وارد شدن بار به آن، دیرتر نیز وامانده شود. آزمون تک لیف کربن، بر اساس یکی از استانداردهای ISO 11566 [۵]، یا ASTM D3379 [۶]، و آزمون دسته الیاف کربن آغشته شده با رزین، بر اساس یکی از استانداردهای ISO 10618 [۷]، یا ASTM D4018 [۸]، قابل انجام است.

در روش تک لیف، حداقل ۲۰ نمونه تک لیف کربن آماده شده و توسط دستگاه آزمون کشش مناسب تحت بارگذاری کششی با سرعت ثابت قرار می‌گیرند تا نمونه شکسته و نمودار نیرو- تغییر طول حاصل گردد [۵]. در آزمون دسته الیاف، نمونه‌ای از دسته الیاف کربن به طور یکنواخت با رزین اپوکسی آغشته شده، پخت شده و یک میله کامپوزیتی باریک به دست می‌آید. نمونه حاصله تحت کشش با سرعت ثابت قرار گرفته و نمودار نیرو- تغییر طول آن توسط دستگاه آزمون کشش ثبت می‌شود. در این روش حداقل باید ۵ نمونه آزموده شود [۷].

آزمون تک لیف، آزمونی نسبتاً دشوار است زیرا لیف کربن بسیار ظریف و شکننده می‌باشد، از این رو این روش به مهارت شخص آزمایش‌گر وابسته است که لیف کربن را بدون آن که آسیبی ببیند از دسته الیاف جدا کرده و نمونه تک لیف را مهیا کند. از طرف دیگر به علت طبیعت خود لیف و نیز عملیات آزمایشگاهی نتایج آزمون تک لیف پراکندگی زیادی از خود نشان می‌دهد و به تعداد زیادی آزمون نیاز است تا از نظر آماری نتیجه‌ای منطقی حاصل گردد [۹]. با این تفاسیر، در بسیاری موارد آزمون دسته الیاف کربن توصیه می‌شود، اگر چه پرهزینه‌تر از آزمون تک لیف بوده و به زمان بیشتری نیاز دارد [۱۰].

آزمون دسته الیاف حداقل ۲ روز زمان نیاز دارد تا الیاف توسط رزین آغشته شده و برای رسیدن به بهترین عملکرد، هم در کوره و هم در دمای اتاق پخت شوند. ضمن آن که وصله‌زنی نمونه‌ها چند ساعت وقت خواهد برد و پس از آن می‌توان نمونه‌ها را تحت آزمون کشش قرار داد. آزمون دسته

۲- مواد، تجهیزات و روش آزمایش

۲-۱- مواد اولیه

دو نوع الیاف کربن مطابق با مشخصات جدول ۱ تحت آزمون قرار گرفتند.

جدول ۱- مشخصات الیاف کربن

کد نمونه	نام تجاری	کشور - شرکت سازنده	میزان کربن (%)	تعداد لیف در یک دسته الیاف	قطر هر لیف (μm)
نوع ۱	T300-TX12k	چین - Haoshi	۹۸/۵	۱۲۰۰۰	۷
نوع ۲	T300	ژاپن - Toray	۹۴	۶۰۰۰	۷

برای ساخت نمونه‌های تک لیف از رزین پتکس ۲۰۰۲ (نوعی چسب چوب) و چسب سیانواکرلیت که در بازار ایران به نام چسب ۱،۲،۳ شناخته می‌شود، به عنوان چسب استفاده شد. برای آغشته‌سازی نمونه‌های دسته الیاف نیز رزین ((ML-۵۰۶)) بر پایه اپوکسی بیس فنول F و هاردنر HA-11 بر پایه هاردنر پلی‌آمین با نسبت ترکیب وزنی ۱۰۰ به ۱۵، از شرکت مواد مهندسی مکرر مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- آزمون تک لیف

آزمون تک لیف کربن بر اساس استاندارد ISO 11566 و با استفاده از دستگاه کشش Instron 5565 با ظرفیت نیروی ۲ KN انجام شد. نمونه تک لیف کربن باید به دقت زیادی از دسته الیاف کربن جدا شده و بر روی قاب آزمون نصب شود. این قاب از یک مقوای نازک به ابعاد ۲۰×۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر ساخته شد و شیار به طول ۲۵ میلی‌متر بر روی آن ایجاد گردید (شکل ۱). برای چسباندن لیف کربن بر روی قاب آزمون از دو نوع چسب (اشاره شده در بخش مواد اولیه) استفاده شد تا تاثیر چسب بر نتایج مورد بررسی قرار گیرد.

هنگام نصب لیف بر روی قاب باید دقت نمود تا طول اندازه گیری یکسان برای تمام نمونه‌ها حاصل گردد. هم‌چنین باید مراقب بود تا لیف آسیبی ندیده و به طور دقیق در مرکز شیار قرار گیرد. پس از نصب لیف بر روی قاب آزمون، نمونه

الیاف هم‌چنین به دلیل نیاز به رزین، تجهیزات آغشته‌سازی، کوره (جهت پخت نمونه‌ها) و نیز کاغذ سمباده و چسب زیاد جهت وصله‌زنی، از آزمون تک لیف هزینه بیشتری دارد. ساخت نمونه‌های تک لیف اگرچه به دقت زیادی نیاز دارد و برای شخص تازه‌کار دشوار است اما در صورت مهارت و دقت آزمایش‌گر، نمونه‌ها ظرف مدت چند ساعت حاضر شده و آماده آزمون می‌باشند و هزینه جانبی چندانی نیز ندارد.

مدول کششی لیف کربن یک خاصیت ذاتی بوده و وابسته به سایز و هم‌جهتی کریستال‌های گرافیتی با محور لیف می‌باشد. هر چه سایز کریستال‌ها بزرگتر بوده و این کریستال‌ها با محور لیف زاویه‌ی کوچکتری بسازند مدول کششی لیف کربن بزرگتر خواهد بود [۲].

استحکام لیف کربن همان‌طور که با تئوری گریفیت بیان شده، وابسته به نقایص و یا بحرانی‌ترین نقص موجود در لیف می‌باشد [۱۱]، بنابراین از آن‌جا که احتمال مواجهه با نقایص در لیف با افزایش حجم آن افزایش می‌یابد، استحکام لیف کربن با حجم آن رابطه معکوس دارد [۱۲].

اثر طول اندازه‌گیری بر آزمون الیاف کربن بر پایه PAN توسط "مورتون" [۱۳] و "بری" [۱۴]؛ و همین‌اثر بر آزمون الیاف کربن بر پایه قیر مزوفاز توسط "چواشتیاک" [۱۵] گزارش شده است. "وست بری" و "درژال" گزارش کرده‌اند که کوچک‌ترین طولی که عملاً می‌توان استحکام کششی لیف کربن با آن طول را بدست آورد، ۰/۵ میلی‌متر است [۱۶]، اما در یک کامپوزیت، کوچک‌ترین طول (طول بحرانی) که می‌تواند بار را تحمل کند تقریباً ۰/۳ میلی‌متر است [۱۷]. "تتسوی" و "تاکاشی" دریافتند که استحکام لیف کربن نه تنها به طول لیف بلکه به قطر آن نیز بستگی دارد، به گونه‌ای که وابستگی در راستای شعاعی ۱۰ برابر بزرگتر از وابستگی در راستای طولی می‌باشد [۱۸].

در این تحقیق، خواص کششی لیف کربن توسط دو روش تک لیف و دسته الیاف برای دو نوع از الیاف کربن بر پایه PAN اندازه‌گیری شده است. هدف، مقایسه نتایج حاصل از دو روش و بدست آوردن روش مناسب آزمون خواص کششی لیف کربن می‌باشد. هم‌چنین روش صحیح و دقیق ساخت نمونه تک لیف و نمونه دسته الیاف که پیچیدگی‌های خاص خود را دارند، تشریح شده است.

مدول کششی لیف (E_f) برحسب گیگاپاسکال از رابطه (۳) بدست آمده است.

$$E_f = \left(\frac{F_f}{A_f}\right)\left(\frac{L}{\Delta L}\right) \times 10^{-3} \quad (3)$$

که در آن:

$$F_f = \text{نیروی شکست لیف برحسب نیوتن}$$

$A_f = \text{سطح مقطع عرضی برحسب میلی‌متر مربع مطابق با رابطه (۲)}$

$L = \text{طول اندازه‌گیری برحسب میلی‌متر، که در این آزمون ۲۵ میلی‌متر بوده است.}$

$$\Delta L = \text{تغییر طول در نقطه شکست لیف برحسب میلی‌متر.}$$

میانگین حسابی استحکام و مدول کششی حاصل از آزمون ۲۰ نمونه به عنوان استحکام و مدول لیف گزارش شده است.

انرژی شکست یا مدول چقرمگی، مقدار انرژی کرنشی بر واحد حجم نمونه است که برای شکست آن لازم است. u_f انرژی شکست نمونه با واحد کیلوژول بر مترمکعب یا کیلوپاسکال از رابطه (۴) حاصل گردیده است:

$$u_f = \frac{\sigma_f^2}{2E_f} \quad (4)$$

که در آن:

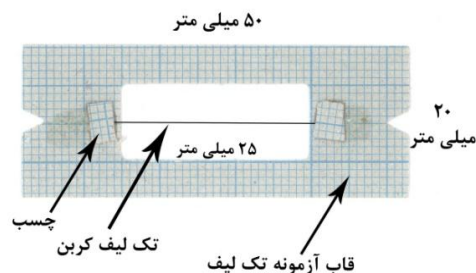
$\sigma_f = \text{استحکام کششی تا نقطه شکست برحسب مگاپاسکال (MPa)}$

$E_f = \text{مدول کشسانی برحسب گیگاپاسکال (GPa)}$

۲-۳- آزمون دسته الیاف

آزمون دسته الیاف براساس استاندارد ISO 10618 و با استفاده از دستگاه کشش Instron 5565 انجام شد. در این آزمایش آغشته‌سازی به صورت دستی انجام گرفت. در هنگام آغشته‌سازی باید دقت نمود تا الیاف تاب نخورده و کاملاً هم راستا با محور طولی نمونه قرار گیرند. حداقل درصد وزنی رزین توسط استاندارد فوق ۳۵٪ توصیه شده که در این آزمون این میزان ۵۰٪ بوده است. هدف از آغشته‌سازی دسته الیاف کربن با رزین این است که در هنگام آزمون کشش، نیرو به طور همزمان و یکنواخت به تک الیافهای موجود در دسته الیاف وارد شود.

در دستگاه آزمون کشش بسته شد. قبل از انجام آزمون، قاب آزمون از میان بریده شده تا بار اعمالی توسط دستگاه تنها به لیف وارد آید. در این آزمون، دقت اندازه‌گیری نیرو، هزارم نیوتن، دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی ده‌هزارم میلی‌متر و سرعت کشش ۵ mm/min بود.



شکل ۱- قاب آزمون تک لیف کربن

استحکام کششی لیف σ_f ، برحسب مگاپاسکال، از رابطه (۱) بدست آمده است:

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} \quad (1)$$

که در آن:

$$F_f = \text{نیروی کششی شکست برحسب نیوتن}$$

$$A_f = \text{سطح مقطع تک لیف برحسب میلی‌متر مربع}$$

A_f براساس روش ارائه شده در استاندارد ISO 11567 و مطابق با رابطه (۲) بدست آمده است:

$$A_f = \left(\frac{1}{c}\right)\left(\frac{t}{\rho}\right) \quad (2)$$

که در آن:

$t = \text{دانسیتته خطی (جرم واحد طول) دسته الیاف بدون آهار برحسب تکس (یک گرم بر هزار متر)}$

$\rho = \text{دانسیتته برحسب کیلوگرم بر متر مکعب}$

$C = \text{تعداد لیف در دسته الیاف (برای الیاف کربن نوع ۱، ۱۲۰۰۰ لیف و برای الیاف کربن نوع ۲، ۶۰۰۰ لیف)}$

این سطح مقطع (A_f)، برای تمامی نمونه‌ها استفاده شده است. دانسیته خطی مطابق با استاندارد ISO 10120 و با دقت دهم گرم و دانسیته الیاف براساس استاندارد ISO 10119 [۲۱] و با روش ستون مدرج بدست آمده است.

بارگذاری قرار داشت. نمونه‌ها توسط دستگاه کشش تحت بارگذاری کششی با سرعت ثابت قرار گرفتند تا اینکه نهایتاً شکستند. در این آزمون سرعت کشش ۵ mm/min بوده است. از نمونه‌هایی که حین کشش در گیره‌ها دچار شکستگی شوند، یا از بین گیره‌ها یا وصله‌ها بلغزند، صرف نظر شده و آزمون با نمونه جدید تکرار می‌شود؛ اگر نمونه‌ها با دقت و به شکل صحیح ساخته شوند بندرت موردی پیش می‌آید که نمونه در وصله یا گیره بشکند یا حین کشش از وصله خارج شود.

استحکام کششی مطابق با رابطه (۱) محاسبه شده که در آن A_f از رابطه (۵) بدست آمده است:

$$A_f = \frac{T_{ff}}{\rho_f} \quad (5)$$

T_{ff} = دانسیته خطی الیاف بدون آهار برحسب تکس

ρ_f = دانسیته الیاف برحسب کیلوگرم بر مترمکعب

دانسیته خطی از استاندارد ISO 1889 [۲۲] و درصد وزنی آهار الیاف براساس استاندارد ISO 10548 [۲۳] محاسبه شده است. دانسیته الیاف نیز بر اساس استاندارد ISO 10119 بدست آمده است.

مدول کشسانی مطابق با رابطه (۳) بدست آمد، با این تفاوت که L_0 طول اندازه‌گیری در این آزمون ۱۵۰ میلی متر بوده است. میانگین حسابی استحکام و مدول کششی برای ۵ عدد نمونه به عنوان نتایج گزارش شده است. در این آزمون نیز انرژی شکست مطابق با رابطه (۴) بدست آمده است.

۳- نتایج و بحث

جدول ۲، خواص الیاف کربن نوع ۱ و جدول ۳، خواص الیاف کربن نوع ۲ را که از آزمون تک لیف با استفاده از دو چسب متفاوت حاصل شده‌اند، نمایش می‌دهند.

همان‌گونه که از مقادیر هر دو جدول ۲ و ۳ مشخص می‌باشد، استفاده از رزین پتکس به عنوان چسب برای ساخت نمونه‌های تک لیف مقادیر بالاتری برای استحکام، کرنش شکست و انرژی شکست الیاف کربن داده است. در مورد الیاف نوع ۱، استحکام کششی بدست آمده با استفاده از رزین

نمونه‌ها پس از آغشته‌سازی به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق (25°C) و سپس به مدت ۲ ساعت در دمای 50°C توسط کوره پخت شدند. طول کلی هر نمونه ۲۵ سانتی‌متر و طول اندازه‌گیری آن ۱۵ سانتی‌متر بوده است. به دو سر نمونه (میله کامپوزیتی) وصله زده شد تا این‌که نمونه در گیره‌های دستگاه کشش حین آزمون، لغزش نداشته باشد. بعلاوه وصله‌ها از شکستن نمونه در گیره جلوگیری کرده و نیز امکان تنظیم دقیق نمونه در گیره‌ها را فراهم می‌کند.

شکل وصله‌ها باید متناسب با گیره‌های دستگاه باشد. گیره‌های استفاده شده در این آزمون گیره‌های تخت با سطحی زبر بودند. پس از آزمون وصله‌های مختلف مشاهده شد که مناسب‌ترین وصله برای نمونه‌های دسته الیاف کربن، وصله‌هایی از جنس کاغذ سمباده می‌باشد (شکل ۲). ورق‌های سمباده مورد استفاده، از نوع P100 بودند که نمونه‌ها توسط چسب سیانواکریلیت به آنها متصل شدند.



شکل ۲- نمونه آزمون کشش دسته الیاف کربن

برای نصب دقیق نمونه‌ها بین ورق‌های سمباده از کاغذهای شطرنجی کمک گرفته شد. روش کار به این ترتیب بود که ابتدا دو ورق سمباده مستطیل شکل از سمت غیر زبر به طور دقیق رو به رو هم و با فاصله ۱۵ سانتی‌متر، بر روی کاغذ شطرنجی چسبانده شد، سپس سمباده‌ها از سمت زبر توسط چسب پوشیده شده و نمونه با دقت روی چسب قرار گرفت به نحوی که دقیقاً در وسط عرض سمباده‌ها و کاملاً میزان بود. دو ورق سمباده دیگر مشابه با ورق‌های قبلی، از طرف زبر بر روی آنها قرار گرفته و اتصال کامل شد.

ابعاد وصله‌ها برابر با ابعاد گیره‌های دستگاه آزمون کشش (۵۰×۲۶ mm) بود. نمونه‌ها زمانی وصله زده شدند که رزین آن کاملاً خشک شده بود. پس از آن که چسب وصله‌ها خشک شد، نمونه‌ها تحت آزمون قرار داده شدند.

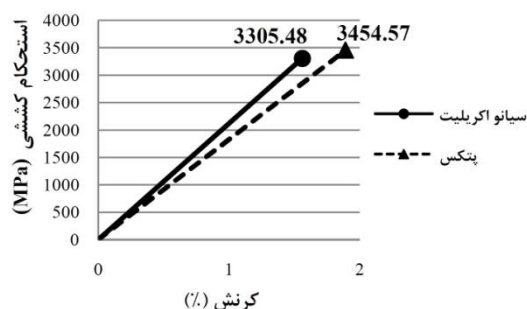
هر نمونه به شکل دقیق بین گیره‌های دستگاه آزمون کشش بسته شد به طوری که کاملاً در راستای محور

جدول ۲- خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف کربن نوع ۱ براساس آزمون تک لیف با استفاده از دو چسب متفاوت

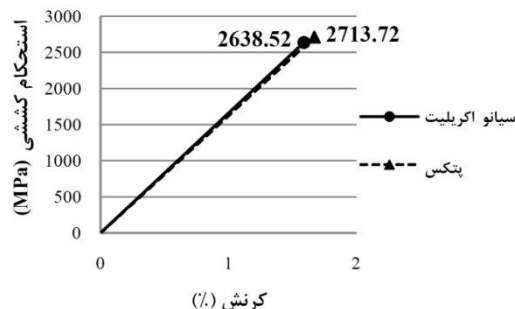
نوع چسب	میانگین نیروی شکست (N)	دانسیتیه خطی (tex)	دانسیتیه (Kg/m ^۲)	سطح مقطع (mm ^۲)	استحکام کششی (MPa)	کرنش شکست (%)	مدول کششی (GPa)	انرژی شکست (MPa)
سیانو اکریلیت	۰/۱۰۰	۰/۰۶۶۷	۱۷۶۰	$۳/۷۹۰ \times ۱۰^{-۵}$	۲۶۳۸/۵۲	۱/۵۹	۱۶۵/۹۲	۲۰/۹۸
رزین پتکس	۰/۱۰۳	۰/۰۶۶۷	۱۷۶۰	$۳/۷۹۰ \times ۱۰^{-۵}$	۲۷۱۳/۷۲	۱/۶۷	۱۶۴/۶۰	۲۲/۳۷

جدول ۳- خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف کربن نوع ۲ براساس آزمون تک لیف با استفاده از دو چسب متفاوت

نوع چسب	میانگین نیروی شکست (N)	دانسیتیه خطی (tex)	دانسیتیه (Kg/m ^۲)	سطح مقطع (mm ^۲)	استحکام کششی (MPa)	کرنش شکست (%)	مدول کششی (GPa)	انرژی شکست (MPa)
سیانو اکریلیت	۰/۱۲۴	۰/۰۶۶۷	۱۷۷۸	$۳/۷۵۱ \times ۱۰^{-۵}$	۳۳۰۵/۴۸	۱/۵۶	۲۱۱/۸۰	۲۵/۷۹
رزین پتکس	۰/۱۳۰	۰/۰۶۶۷	۱۷۷۸	$۳/۷۵۱ \times ۱۰^{-۵}$	۳۴۵۴/۵۷	۱/۸۹	۱۸۲/۱۸	۳۲/۵۷



شکل ۴- نمودار تنش-کرنش نمونه تک لیف کربن نوع ۲، با دو چسب سیانو اکریلیت و رزین پتکس



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش نمونه تک لیف کربن نوع ۱، با دو چسب سیانو اکریلیت و رزین پتکس

نوع ۲، این اختلاف به ۱۳ درصد رسیده است. با توجه به این نتایج، استفاده از رزین پتکس نسبت به چسب سیانو اکریلیت برای ساخت نمونه‌های تک لیف مناسب‌تر بوده زیرا نتایج واقعی‌تری داده است.

شکل‌های ۳ و ۴، رفتار تنش-کرنش الیاف نوع ۱ و ۲ را بر اساس نتایج آزمون‌های تک لیف نمایش می‌دهد. چنان‌که از شکل‌ها دیده می‌شود نتایج آزمون تک لیف وابستگی زیادی به شرایط ساخت نمونه‌ها از جمله چسب داشته و استفاده از دو چسب متفاوت در ساخت نمونه‌ها، منجر به دو رفتار متفاوت از لیف کربن شده است؛ به گونه‌ای که در مورد هر دو نوع الیاف، با استفاده از چسب پتکس، استحکام کششی بالاتری در مقایسه با چسب سیانو اکریلیت حاصل

پتکس به عنوان چسب، ۲۷۱۳ MPa بوده که در مقایسه با استحکام کششی بدست آمده با استفاده از چسب سیانو اکریلیت ۳ درصد افزایش یافته است. همچنین کرنش شکست ۵ درصد و انرژی شکست ۶ درصد افزایش نشان داده است. در مورد الیاف نوع ۲، استحکام کششی بدست آمده با استفاده از رزین پتکس به عنوان چسب، ۳۴۵۴ MPa بوده که در مقایسه با استحکام کششی بدست آمده با استفاده از چسب سیانو اکریلیت ۴ درصد افزایش یافته است. همچنین کرنش شکست ۲۱ درصد و انرژی شکست ۲۶ درصد افزایش یافته است. مدول کشسانی الیاف نوع ۱، با استفاده از رزین پتکس ۱۶۴ GPa و با استفاده از چسب سیانو اکریلیت ۱۶۵ GPa بوده که ۱ درصد کاهش نشان داده است. در مورد الیاف

نمونه‌های ساخته شده با رزین پتکس با نتایج آزمون دسته الیاف مقایسه شده‌اند. جدول‌های ۴ و ۵، به ترتیب برای الیاف کربن نوع ۱ و ۲، نتایج آزمون کشش دسته الیاف را در مقایسه با نتایج آزمون کشش تک لیف (با چسب رزین پتکس) نشان می‌دهند. رفتار تنش-کرنش الیاف کربن نوع ۱ و ۲ نیز بر اساس داده‌های جدول‌های ۴ و ۵، در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

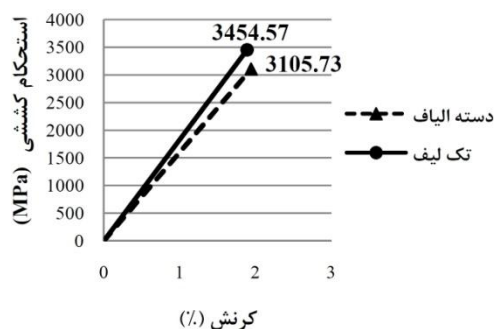
شده اما شیب نمودار که بیانگر سفتی و مدول کششی لیف می‌باشد کوچک‌تر شده است. همچنین با مقایسه دو نمودار مشخص می‌شود که استفاده از دو چسب متفاوت بر رفتار و خواص لیف نوع ۲ تاثیر بیش‌تری گذاشته است. براساس آنچه گفته شد، استفاده از رزین پتکس نسبت به چسب سیانواکرلیت برای ساخت نمونه‌های تک لیف مناسب‌تر است. بر این اساس، نتایج حاصل از آزمون تک لیف

جدول ۴- خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف کربن نوع ۱ براساس آزمون‌های تک لیف (با چسب رزین پتکس) و دسته الیاف

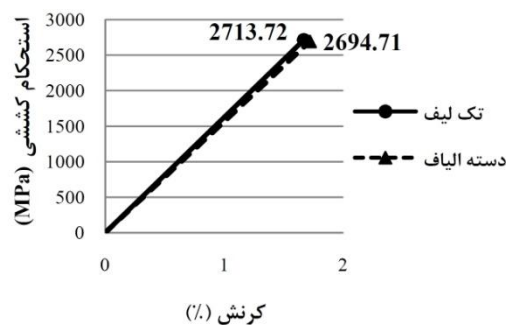
روش آزمون	میانگین نیروی شکست (N)	دانسیتته خطی (tex)	دانسیتته (Kg/m ^۳)	سطح مقطع (mm ^۲)	استحکام کششی (MPa)	کرنش شکست (%)	مدول کششی (GPa)	انرژی شکست (MPa)
دسته الیاف	۱۲۲۶/۰۹۴	۸۰۰	۱۷۶۰	۰/۴۵۵	۲۶۹۴/۷۱	۱/۷۲	۱۵۶/۸۱	۲۳/۱۵
تک لیف	۰/۱۰۳	۰/۰۶۶۷	۱۷۶۰	۳/۷۹۰×۱۰ ^{-۵}	۲۷۱۳/۷۲	۱/۶۷	۱۶۴/۶۰	۲۲/۳۷

جدول ۵- خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف کربن نوع ۲ براساس آزمون‌های تک لیف (با چسب رزین پتکس) و دسته الیاف

روش آزمون	میانگین نیروی شکست (N)	دانسیتته خطی (tex)	دانسیتته (Kg/m ^۳)	سطح مقطع (mm ^۲)	استحکام کششی (MPa)	کرنش شکست (%)	مدول کششی (GPa)	انرژی شکست (MPa)
دسته الیاف	۶۹۸/۷۹۰	۴۰۰/۴	۱۷۷۸	۰/۲۲۵	۳۱۰۵/۷۳	۱/۹۴	۱۵۸/۱۲	۳۰/۱۵
تک لیف	۰/۱۳۰	۰/۰۶۶۷	۱۷۷۸	۳/۷۵۱×۱۰ ^{-۵}	۳۴۵۴/۵۷	۱/۸۹	۱۸۳/۱۸	۳۲/۵۷



شکل ۶- نمودار تنش-کرنش تک لیف و دسته الیاف کربن نوع ۲



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش تک لیف و دسته الیاف کربن نوع ۱

ارائه شده است نیز حاکی از بالاتر بودن مقادیر استحکام کششی حاصل از آزمون تک لیف می‌باشد. برای الیاف HM-S، استحکام کششی ارائه شده براساس آزمون تک لیف (میانگین ۱۰ نمونه)، $2/23$ GPa و براساس آزمون دسته الیاف (میانگین ۳ نمونه)، $2/09$ GPa بوده است که این مقادیر، اختلاف ۷ درصدی را نشان می‌دهند. در مورد الیاف HT-S، استحکام کششی براساس آزمون تک لیف (میانگین ۱۰ نمونه)، $2/61$ GPa و براساس آزمون دسته الیاف (میانگین ۳ نمونه)، $2/59$ GPa گزارش شده است که این مقادیر، اختلافی کمتر از ۱ درصد را نشان می‌دهند [۲۴].

همان‌گونه که در جدول‌های ۴ و ۵ آمده است، مدول کششی بدست آمده از روش‌های تک لیف و دسته الیاف برای الیاف نوع ۱ به ترتیب 164 GPa و 156 GPa و برای الیاف نوع ۲ به ترتیب 183 GPa و 158 GPa می‌باشد. در هر دو مورد، مدول بدست آمده از روش تک لیف بزرگتر از مدول بدست آمده از روش دسته الیاف می‌باشد. در مورد الیاف نوع ۱، اختلاف مدول‌ها ۵ درصد، اما در مورد الیاف نوع ۲، این اختلاف ۱۴ درصد می‌باشد که همانند استحکام، مدول‌های بدست آمده برای الیاف نوع ۱، از دو روش تک لیف و دسته الیاف، نسبت به الیاف نوع ۲، اختلاف کمتری نشان می‌دهند. مقادیر مدول کششی الیاف کربن HM-S و الیاف کربن HT-S حاصل از کار سایر محققان نیز حاکی از بالاتر بودن نتایج حاصل از آزمون تک لیف در مقایسه با آزمون دسته الیاف برای این دو نوع الیاف می‌باشد. برای الیاف HM-S، مدول کششی ارائه شده براساس آزمون تک لیف (میانگین ۱۰ نمونه)، 395 GPa و براساس آزمون دسته الیاف (میانگین ۳ نمونه)، 382 GPa بوده است که این مقادیر، اختلاف ۳ درصدی را نشان می‌دهند. در مورد الیاف HT-S، مدول کششی براساس آزمون تک لیف (میانگین ۱۰ نمونه)، 268 GPa و براساس آزمون دسته الیاف (میانگین ۳ نمونه)، 248 GPa گزارش شده است که این مقادیر، اختلافی ۸ درصدی را نشان می‌دهند [۲۴].

مدول کشسانی یک خاصیت ذاتی بوده و وابسته به هم راستایی کریستال‌های کربن با محور طولی لیف است. هرچه زاویه هم راستایی کریستال‌ها کوچک‌تر باشد، مدول کشسانی بزرگ‌تر خواهد بود. بنابراین تعجب‌آور نخواهد بود که آزمون تک لیف، مدول کشسانی بزرگ‌تری بدهد زیرا در نمونه تک

مطابق با نتایج جدول‌های ۴ و ۵ و شکل‌های ۵ و ۶، مقدار میانگین بدست آمده برای استحکام کششی الیاف نوع ۱ از روش دسته الیاف و تک لیف (با چسب پتکس) به ترتیب 2694 MPa و 2713 MPa، و برای الیاف نوع ۲ به ترتیب 3105 MPa و 3465 MPa می‌باشد. اختلاف مقادیر استحکام بدست آمده از دو روش آزمون برای الیاف نوع ۱، کمتر از ۱ درصد است، اما در مورد الیاف نوع ۲ این اختلاف حدوداً ۱۲ درصد می‌باشد.

این موضوع قابل انتظار است که آزمون تک لیف مقادیر بالاتری برای استحکام کششی بدهد. استحکام کششی به شدت تحت تاثیر نقایص موجود در الیاف است، از این رو استحکام کششی با افزایش حجم نمونه کاهش خواهد یافت. افزایش طول اندازه‌گیری و تعداد الیاف با افزایش نقایص و در نتیجه کاهش استحکام همراه است. به علاوه وجود ترک‌های ریز موجود در رزین نمونه دسته الیاف، منجر به واماندگی زودرس نمونه شده و باعث کاهش استحکام آن می‌شود. نمونه دسته الیاف قبل از رسیدن به استحکام نهایی در هنگام اعمال نیرو، به حدی از تنش خواهد رسید که رزین آن شروع به ترک خوردن و جدایش از الیافی می‌کند که در جهت اعمال نیرو نمی‌باشند، سپس این ترک‌ها در میان نمونه کامپوزیتی منتشر و نهایتاً منجر به شکست نمونه خواهند شد. در این حالت شکست نمونه پیش از رسیدن الیاف به استحکام واقعی‌شان رخ می‌دهد. برای جبران اثر ترک‌های ریز موجود در رزین می‌توان سرعت آزمون کشش دسته الیاف را افزایش داد. این کار اگرچه ممکن است رفتار رزین اپوکسی را تردتر کند اما فرصت رشد از ترک‌های ریز گرفته شده و استحکام نمونه به استحکام واقعی الیاف نزدیک می‌شود.

اختلاف مقادیر استحکام بدست آمده از دو روش آزمون برای الیاف نوع ۱، کمتر از ۱ درصد است، اما در مورد الیاف نوع ۲ این اختلاف حدوداً ۱۲ درصد می‌باشد. دلیل اختلاف کمتر مشاهده شده برای الیاف نوع ۱، می‌تواند خلوص بالاتر این الیاف ($98/5$ درصد کربن برای الیاف نوع ۱، در مقابل ۹۴ درصد کربن برای الیاف نوع ۲) باشد، اگرچه تعداد تک لیف‌های موجود در دسته الیاف برای الیاف نوع ۲ کمتر است. داده‌ها و مشخصات مربوط به الیاف کربن مدول بالا (HM-S) و نیز الیاف کربن استحکام بالا (HT-S)، که توسط سایر محققان به تفکیک آزمون‌های دسته الیاف و تک لیف

مربوطه ۴ درصد کوچک‌تر می‌باشد. اما در مورد الیاف نوع ۲، انرژی شکست نمونه‌های تک لیف ۳۲/۵۷ MPa است که از انرژی شکست نمونه‌های دسته الیاف ۶ درصد بزرگ‌تر می‌باشد. این تفاوت وابسته به مقادیر استحکام و مدول کششی حاصل شده از دو روش برای دو نوع الیاف می‌باشد.

در انتها باید به این نکته اشاره کرد که آزمون تک لیف کربن اگرچه مقادیر بزرگ‌تری برای خواص کششی می‌دهد اما از لحاظ اپراتوری دشوارتر از آزمون دسته الیاف بوده، ضمن آن که نتایج حاصل از آن به علت طبیعت خود لیف و نیز وابستگی به شرایط نمونه سازی و عملیات آزمایشگاهی پراکندگی زیادی دارد و نیازمند بررسی‌های آماری می‌باشد. از این رو اگرچه ممکن است استفاده از روش آزمون تک لیف برای اهداف تحقیقاتی یا کنترل کیفیت مناسب باشد اما در شرایط کاربردی روش دسته الیاف برتری خواهد داشت و این آزمون چشم‌انداز بهتری از خواص الیاف کربن در شرایط عملی ارائه خواهد داد زیرا در عمل، لیف کربن باید در کنار هزاران یا میلیون‌ها لیف دیگر در یک قطعه کامپوزیتی بکار رود.

۴- نتیجه‌گیری

۱- استفاده از رزین پتکس در مقایسه با چسب سیانوآکرلیت، برای ساخت نمونه‌های تک لیف کربن مناسب تر است زیرا برای هر دو نوع الیاف کربن (انواع ۱ و ۲)، مقادیر استحکام و کرنش شکست حاصل از آزمون تک لیف نمونه‌هایی که با رزین پتکس ساخته شده‌اند بالاتر می‌باشد، اگرچه مدول کششی آن پایین‌تر است. در مورد الیاف نوع ۱، با استفاده از رزین پتکس به جای چسب سیانوآکرلیت، استحکام کششی لیف ۳ درصد و کرنش شکست آن ۵ درصد و انرژی شکست ۶ درصد افزایش یافته، در حالی که مدول کششی ۱ درصد کاهش یافته است. اما در مورد الیاف نوع ۲، با استفاده از رزین پتکس به جای چسب سیانوآکرلیت، استحکام کششی لیف ۴ درصد، کرنش شکست ۲۱ درصد و انرژی شکست آن ۲۶ درصد افزایش یافته، در حالی که مدول کششی آن ۱۳ درصد کاهش یافته است.

۲- مقادیر استحکام و مدول بدست آمده از آزمون تک لیف کربن برای هر دو نوع الیاف، بالاتر از مقادیر حاصل از آزمون دسته الیاف بوده، اما کرنش شکست در آزمون دسته الیاف

لیف، کریستال‌ها هم‌راستایی بیشتری با محور بارگذاری دارند اما در نمونه دسته الیاف امکان این‌که تمام الیاف هم راستا باشند ضعیف خواهد بود، و در هنگام ساخت نمونه کامپوزیتی این امکان ضعیف‌تر نیز خواهد شد. قابل ذکر است به علت مشابه انتظار می‌رود که با افزایش تعداد الیاف در نمونه دسته الیاف، مدول کشسانی کاهش یابد.

آزمایشات محققان دیگر بر روی دسته‌های ۶۰۰۰، ۹۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ تایی (۶k، ۹k و ۱۲k) الیاف کربن با کارایی بالا (XA-S) نیز نشان‌دهنده کاهش مقدار مدول کشسانی با افزایش تعداد الیاف در دسته الیاف است، به گونه‌ای که مقدار مدول از ۲۴۴ GPa برای نمونه ۶k به مقدار ۲۳۶ GPa برای نمونه ۹k و به مقدار ۲۲۷ GPa برای نمونه ۱۲k می‌رسد. یعنی به ازای افزوده شدن هر ۱۰۰۰ لیف به دسته الیاف، مدول کشسانی تقریباً ۱ درصد کاهش یافته است. در مورد استحکام کششی، روند کاملاً نزولی مشاهده نشده است، به گونه‌ای که ابتدا با افزایش تعداد الیاف در دسته الیاف از ۶k به ۹k، استحکام کششی ۴ درصد کاهش یافته و از مقدار ۳/۷۰ GPa به مقدار ۳/۵۴ GPa رسیده، اما پس از آن (۱۲k)، ۲ درصد افزایش نشان داده و به مقدار ۳/۶۳ GPa رسیده است [۲۵].

در مورد هر دو نوع الیاف آزموده شده، کرنش شکست در آزمون دسته الیاف اندکی بزرگتر از کرنش شکست در آزمون تک لیف می‌باشد که این می‌تواند به دلیل خاصیت کامپوزیتی نمونه دسته الیاف باشد. بر اساس نتایج جدول ۴، کرنش شکست الیاف نوع ۱ در آزمون تک لیف ۱/۶۷ درصد و در آزمون دسته الیاف ۱/۷۲ درصد می‌باشد که با یکدیگر ۳ درصد اختلاف دارند. در مورد الیاف نوع ۲ نیز، همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود، کرنش شکست در آزمون تک لیف، ۱/۸۹ درصد بوده، که نسبت به کرنش شکست در آزمون دسته الیاف، ۱/۹۴ درصد، ۳ درصد کوچک‌تر است.

انرژی شکست که بیان‌گر میزان انرژی کرنشی بر واحد حجم نمونه تا لحظه شکست می‌باشد، همان‌گونه که در جدول ۵ دیده می‌شود، برای نمونه‌های تک لیف کربن نوع ۲، بزرگ‌تر از نمونه‌های دسته الیاف می‌باشد، در حالی که طبق داده‌های جدول ۴، در مورد الیاف نوع ۱ این قضیه برعکس می‌باشد. انرژی شکست نمونه‌های تک لیف کربن نوع ۱، ۲۲/۳۷ MPa بوده و از انرژی شکست نمونه‌های دسته الیاف

- [10] Yu W, Yao J (2007) Tensile strength and its variation of pan-based carbon fibers. II, calibration of the variation from testing. *J Appl Polym Sci* 104(4): 2625–2632.
- [11] Griffith AA (1921) The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philos Trans R Soc London, Ser. A* 221: 163–198.
- [12] Pardini LC, Manhani LGB (2002) Influence of the testing gage length on the strength, young's modulus and weibull modulus of carbon fibres and glass fibres. *Mater Res* 5(4): 411–420.
- [13] Moreton R (1969) The effect of gauge length on the tensile strength of R.A.E. carbon fibres. *Fiber Sci Technol* 1(4): 273–284.
- [14] Barry PW (1987) Experimental data for the longitudinal tensile strength of unidirectional fibrous composites - Part 1: fiber and matrix, *Fiber Sci Technol* 11(4): 245–255.
- [15] Chwastiak S, Barr J, Didchenko R (1979) High strength carbon fibres from mesophase pitch. *Carbon* 17(1): 49–53.
- [16] Westbury MC, Drzal T (1991) *J Compos Tech Res* 13(1): 22–28.
- [17] Donnet JB, Bansal RC (1990) *Carbon fibers*. 2nd edn., Marcel Dekker, New York.
- [18] Tagawa T, Miyata T (1997) Size effect on tensile strength of carbon fibers. *Mater Sci and Eng A* 238: 336–342.
- [19] ISO 11567, Carbon fiber, Determination of filament diameter and cross-sectional area.
- [20] ISO 10120, Carbon fiber, Determination of linear density.
- [21] ISO 10119, Carbon fiber, Determination of density.
- [22] ISO 1889, Reinforcement yarns, Determination of linear density.
- [23] ISO 10548, Carbon fiber, Determination of size content.
- [24] Morgan P (2005) *Carbon fibers and their composites*. Taylor & Francis, New York: 85.
- [25] Goggin PR, A method of measuring the quality of carbon fibers, *AERE R-7790*.
- مقدار بالاتری دارد. اختلاف مقادیر استحکام بدست آمده از دو روش آزمون برای الیاف نوع ۱، کمتر از ۱ درصد بوده، اما در مورد الیاف نوع ۲ این اختلاف حدوداً ۱۲ درصد بوده است. در مورد الیاف نوع ۱، اختلاف مدول‌ها ۵ درصد، اما در مورد الیاف نوع ۲، این اختلاف ۱۴ درصد بدست آمده است. اختلاف کرنش شکست در آزمون تک لیف و دسته الیاف، برای هر دو نوع الیاف ۳ درصد مشاهده شده است. انرژی شکست نمونه های تک لیف در مورد الیاف نوع ۲، ۶ درصد بزرگتر اما در مورد الیاف نوع ۱، ۴ درصد کوچکتر از نمونه های دسته الیاف بدست آمده است.

مراجع

- [1] Walsh PJ (2001) *Carbon fibers*, ASM handbook. Zoltek Corporation. St. Louis.
- [2] Morgan P (2005) *Carbon fibers and their composites*. Taylor & Francis, New York.
- [3] Buckley JD, Edie DD (1993) *Carbon-Carbon materials and composites*. William Andrew Publishing, New York.
- [4] Montes-Moran M, Gauthier W, Martinez A, Tascon J (2004) Mechanical properties of high-strength carbon fibers. validation of an end-effect model for describing experimental data. *Carbon*, 42: 1275–1278.
- [5] ISO 11566, Carbon fiber, Determination of the tensile properties of single-filament of specimens.
- [6] ASTM D 3379, Standard test method for tensile strength and young's modulus for high-modulus single-filament materials.
- [7] ISO 10618, Carbon fiber, Determination of the tensile properties of resin impregnated yarns.
- [8] ASTM D 4018, Standard test methods for properties of continuous filament carbon and graphite fiber tows.
- [9] Yu W, Yao J (2006) Tensile strength and its variation of pan-based carbon fibers. I, statistical distribution and volume dependence. *J Appl Polym Sci* 101(5): 3175–3182.