

بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی الیاف کربن ساخته شده از الیاف پلی اکریلونیتریل تجاری و ویژه

آرمان صدقی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

رضا اسلامی فارسانی^۱ و علی شکوه فر^۲

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی

چکیده

الیاف کربن، ماده‌ای با خواص منحصر به فرد (نظیر استحکام ویژه و مدول ویژه بسیار بالا) است که مانند تقویت‌کننده‌های در انواع کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف به خصوص صنایع هوافضایی و نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الیاف عمدتاً از نوع ویژه‌ای از الیاف پلی‌اکریلونیتریل (PAN) تولید می‌شود. مراحل تولید الیاف کربن شامل پایداری‌سازی اکسیدی در دمای پایین در محیط هوا و کربونیزاسیون الیاف PAN پایداری‌شده در محیط خنثی در دمای بالا است. گرانی قیمت الیاف PAN ویژه و هزینه زیاد فرآیند تولید سبب بالا رفتن قیمت الیاف کربن شده است. در این تحقیق، تولید و بررسی خواص الیاف کربن حاصل از الیاف PAN تجاری ارزان قیمت در مقایسه با الیاف کربن حاصل از الیاف PAN ویژه، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که امکان تولید الیاف کربن از الیاف PAN تجاری با خواص مناسب (اما پایین‌تر در مقایسه با الیاف کربن حاصل از الیاف PAN ویژه) برای به کارگیری در کامپوزیت‌ها وجود دارد. در این حالت، استحکام کششی، مدول الاستیک و دانسیته الیاف کربن حاصل در مقایسه با الیاف کربنی که از الیاف PAN ویژه تولید می‌شود کمتر است. پایین‌تر بودن خواص الیاف کربن حاصل از الیاف PAN تجاری در مقایسه با الیاف PAN ویژه، به علت قطر و دانسیته خطی بالاتر و استحکام کششی کمتر الیاف PAN تجاری است.

واژه‌های کلیدی: الیاف کربن، الیاف پلی اکریلونیتریل تجاری، خواص مکانیکی و فیزیکی

An Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Carbon Fibers Fabricated from Commercial and Special Polyacrylonitrile Fibers

R. Eslami Farsani and A. Shokuhfar

Mech. Eng. Department
Khojeh-Nasir Toosi Univ. of Tech.

A. Sedghi

Mech. Eng. Department
Imam Khomeini International Univ.

ABSTRACT

Carbon fibers are special materials with unique properties (i.e., high specific strength and specific modulus) used as reinforcement in different composites in various applications, e.g., aerospace and defense industries. These fibers are mainly manufactured from special polyacrylonitrile (PAN) fibers. Their fabrication method is composed of oxidative stabilization at low temperature in an air atmosphere following by carbonization at high temperature in an inert atmosphere. However, the high price of these fibers is related to raw material (special PAN fibers) and processing costs. In this study, the properties of carbon fibers fabricated from low cost commercial PAN fibers are compared to carbon fibers produced by special PAN fibers. The results reveals that, carbon fibers could be fabricated by commercial fibers successfully, but their tensile strength, elastic modulus, and densities are less than the carbon fibers fabricated by special PAN fibers. Higher diameter, linear density, and lower tensile strength of commercial PAN fibers are the main parameters which decrease the properties of carbon fibers fabricated from them.

Key Words: Carbon Fibers, Commercial Polyacrylonitrile Fibers, Physical and Mechanical Properties

۱. دانشجوی دکترا: R_eslami@azad.ac.ir

۲. دانشیار: shokuhfar@kntu.ac.ir

۳. استادیار: arman_sedghi@msn.com

مقدمه

حرارتی پایین، دانسیته کم، پایداری گرمایی بالا و استحکام خستگی زیاد) است که به علت قیمت بالای آن ابتدا تنها در صنایع هوافضایی و هواپیماهای نظامی به کار رفت. امروزه، الیاف کربن به عنوان ماده تقویت کننده‌ای در انواع کامپوزیت‌ها با زمینه‌های مختلف، به خصوص زمینه پلیمری، توانسته است در کاربردهای مختلف؛ نظیر هواپیماهای تجاری، صنایع حمل و نقل، ساختمان، و...، جانشین بسیاری از مواد مهندسی مرسوم شود [۵ و ۶].

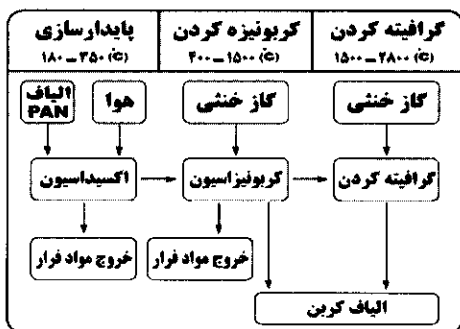
الیاف کربن از ترکیبات آلی مختلفی ساخته می‌شود اما در حال حاضر، سه ماده شامل الیاف PAN ویژه، الیاف سلولز مصنوعی (ریون) و نوعی قیر، سه ماده اولیه اصلی برای تولید الیاف کربن هستند. جزئیات فرآیندهای تولید الیاف کربن از مواد اولیه مذکور متفاوت است اما بخش‌های اصلی این فرآیندها با یکدیگر مشابه‌اند و اساس روش تولید در همه آنها نوعی پیرولیز کنترل شده است [۵ و ۷]. در حال حاضر، الیاف PAN ویژه، متداول‌ترین و مهم‌ترین ماده اولیه برای تولید الیاف کربن محسوب می‌شود، زیرا این الیاف از نقطه ذوب بالا، راندمان تولید مناسب، و سهولت فرآیند ساخت برخوردار است. الیاف PAN، نوعی الیاف اکریلیک (شامل پلیمرهای اکریلونیتریل همراه با حداقل یک کومونومر) با واحد ساختمانی $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}\equiv\text{N}$ است. انواع کومونومرها (نظیر متیل اکریلات، ایتاکونیک اسید و متیل متاکریلات) به منظور تسهیل انحلال پلیمر، بهبود ساختار الیاف، افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود قابلیت نفوذ، و جذب رنگ در الیاف اکریلیک استفاده می‌شوند [۸]. الیاف PAN، به‌عنوان ماده‌ای آلی، نوعی الیاف گرمانرم (ترموپلاستیک) غنی از کربن است که از پلیمرهای حلقوی باز شامل حلقه‌های کربنی به عنوان اسکلت اصلی تشکیل شده است (شکل ۱). ساختار مولکولی این الیاف شامل مجموعه‌ای از زنجیره‌های مولکولی طویل است [۹ و ۱۰].

صنایع هوافضایی از نخستین و در عین حال از اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان الیاف کربن هستند. در این صنایع، به موادی با وزن کم، سفتی بالا، و مقاومت ویژه زیاد همراه با ضریب انبساط حرارتی کم نیاز است. به عبارت دیگر، در کاربردهای هوافضایی، به علت شرایط خاص و نیاز به کیفیت‌های بسیار بالا، موادی با خواص ویژه و منحصر به فرد با کارایی بالا را شناسایی و انتخاب می‌کنند. الیاف کربن یکی از بهترین انتخاب‌ها برای این کاربردها هستند و یکی از اجزای کلیدی در مواد کامپوزیتی مورد استفاده در صنایع هوافضایی و دفاعی محسوب می‌شوند [۱ و ۲].

در صنایع فضایی، کامپوزیت‌های زمینه فلزی (آلومینیوم و منیزیم) با تقویت‌کننده الیاف کربن از مهم‌ترین موادی هستند که در سازه‌های فضایی نظیر ایستگاه فضایی فریدام (Freedom) آمریکا به کار برده شده‌اند. همچنین، کامپوزیت‌های الیاف کربن با زمینه اپوکسی از دهه ۷۰ میلادی به بعد، در ماهواره‌ها، پروب‌های فضایی و آنتن‌ها به عنوان جانشین آلیاژهای آلومینیوم به کار رفته‌اند. علاوه بر این، بسیاری از قطعات موشک‌ها نظیر سپر حرارتی، مخزن سوخت و تقویت‌کننده‌ها در موشک فضایی تیتان (Titan) و موشک‌های استراتژیک نظیر تریدنت (Trident) و همچنین دماغه و بوستر فضایی‌های شاتل نیز از کامپوزیت‌های پلیمری یا کربنی با تقویت‌کننده الیاف کربن ساخته شده‌اند [۲ و ۳]. در صنایع هوایی نیز کامپوزیت‌های حاوی الیاف کربن در هواپیماهای نظامی و غیرنظامی (نظیر F/A-18، F-22، AV-8/B، B-2 و مدل‌های مختلف هواپیماهای بویینگ و ایرباس) در قسمت‌های مختلف ترمز، قطعات بال، دم و بدنه به کار می‌روند [۲ و ۴].

این الیاف، نسل جدیدی از مواد با خواص ویژه (نظیر استحکام کششی و مدول الاستیک بالا، ضریب انبساط

انجام می‌شود که نوع خاصی از الیاف کربن با خواص مشخصی مورد نظر باشد. در شکل (۲)، نمای شماتیک مراحل مختلف ساخت الیاف کربن از الیاف PAN آورده شده است [۶ و ۱۱].

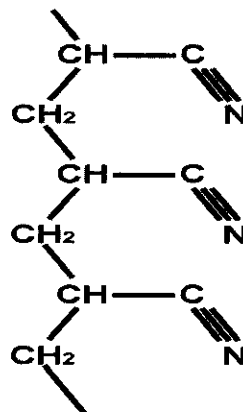


شکل ۲- مراحل ساخت الیاف کربن از الیاف PAN

براساس انتخاب نوع ماده اولیه و همچنین نوع فرآیند تولید، می‌توان انواع الیاف کربن را تولید کرد. این انواع، دارای نظم ساختاری متفاوت و درجه‌های جهت‌گیری کریستالی مختلفی هستند و بر این اساس، خواص آنها، به خصوص مدول و استحکام متفاوتی خواهند داشت. الیاف کربن عموماً براساس مدول الاستیک یا استحکام کششی و یا هر دو طبقه‌بندی می‌شوند. در جدول (۱)، یکی از مرسوم‌ترین طبقه‌بندی‌ها تشریح شده است [۱۲].

جدول ۱- طبقه‌بندی الیاف کربن براساس مدول الاستیک.

نام الیاف کربن	نشانه	مشخصات مکانیکی
الیاف کربن با مدول بسیار بالا	UHM	مدول الاستیک ۶۰۰ GPa یا بالاتر
الیاف کربن با مدول بالا	HM	مدول الاستیک ۶۰۰-۳۵۰ GPa
الیاف کربن با مدول متوسط	IM	مدول ۳۵۰-۲۸۰ GPa و استحکام ۴/۵ GPa یا بالاتر
الیاف کربن با مدول استاندارد	SM	مدول ۲۸۰-۲۰۰ GPa و استحکام ۲/۵ GPa یا بالاتر
الیاف کربن با مدول کم	LM	مدول ۲۰۰ GPa یا پایین‌تر و استحکام ۳ GPa یا پایین‌تر



شکل ۱- ساختار مولکولی الیاف PAN.

تولید الیاف کربن از PAN، شامل سه مرحله اصلی پایدارسازی، کربونیزاسیون و گرافیت‌کردن است. در مرحله اول (مرحله پایدارسازی)، الیاف PAN اولیه در محدوده دمایی ۱۸۰-۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در محیط اکسیدی حرارت می‌بیند تا پلیمرهای حلقوی باز آن به ساختار حلقوی پایدار با حلقه‌های بسته (از طریق تشکیل باند $-C=N-C=N-$) تبدیل شود. در این حالت ساختاری با پایداری حرارتی و جهت‌گیری مولکولی بالا و زنجیره‌های نردبانی شکل به وجود می‌آید. الیاف PAN که در این مرحله پایدار شده‌اند، گرماسخت (ترموست) هستند و با حرارت دیدن در مراحل بعدی ذوب نمی‌شوند. در مرحله دوم (مرحله کربونیزاسیون)، الیافی که در مرحله قبل پایدار شده‌اند، در محدوده دمایی ۴۰۰-۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در اتمسفر خنثی حرارت می‌بینند تا عناصر ناخالص به صورت ترکیبات گازی مختلف حذف شوند و الیاف کربن حاوی اتم‌های کربن بدست‌آید. در مرحله نهایی (مرحله گرافیت‌کردن) نیز با حرارت دادن الیاف کربن در دماهای بالا ($>1500^{\circ}C$) در محیط خنثی، نظم ساختار کریستالی الیاف بهبود و درصد کربن موجود در الیاف افزایش می‌یابد که در این حالت، اصطلاحاً الیاف حاصل را گرافیت گویند. با افزایش دمای گرافیت‌کردن، مدول الاستیک افزایش و استحکام کششی الیاف کاهش خواهد یافت. لذا مرحله گرافیت‌کردن در صورتی

جدول ۲- آنالیز شیمیایی الیاف PAN ویژه و تجاری.

نام ماده	درصد وزنی
اکریلو نیتریل (AN)	۹۴
متیل اکریلات (MA)	۴/۷
ایتاکونیک اسید (IA)	۱/۳

انواع الیاف PAN مورد بررسی، در طی ۲ مرحله به الیاف کربن تبدیل شدند. ابتدا در مرحله پایدارسازی، الیاف PAN، درون کوره محفظه‌ای با قابلیت گردش هوا قرار داده شدند. سپس در مدت نیم ساعت دمای کوره از دمای محیط به دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش و در ادامه و در مدت ۱۰ ساعت، دمای الیاف PAN درون کوره از ۲۰۰ به ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد رسد (هر ۱۵ دقیقه، یک درجه افزایش دما) تا این الیاف پایدار شوند. در مرحله دوم (مرحله کربونیزاسون)، محصول حاصل از مرحله قبل (الیاف PAN پایدارشده)، درون کوره لوله‌ای افقی با لوله سرامیکی از جنس سیلیمانیت قرار داده شد. آن الیاف در محیط نیتروژن با خلوص بالا (۹۹/۹۹۹۹ درصد) در مدت یک ساعت تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم و سپس در این دما در محیط نیتروژن به مدت ۱۰ دقیقه حرارت دیدند تا الیاف کربن حاصل شد.

برای بررسی خواص و مشخصات انواع الیاف PAN مورد آزمایش، الیاف PAN پایدارشده و الیاف کربن تولیدی از آنها نیز از تجهیزات مختلفی استفاده شد. میکروسکوپ الکترونی SEM مارک CAMSCAN مدل MV۲۳۰۰، برای بررسی ساختار میکروسکوپی و تعیین قطر الیاف مورد استفاده قرار گرفت. همچنین دستگاه ستون دانسیته (ساخته شده در آزمایشگاه)، برای تعیین دانسیته الیاف براساس استاندارد ۱۰۱۱۹ ISO (روش استاندارد بین‌المللی تعیین دانسیته الیاف کربن) و بر مبنای سنجش دانسیته ۳ نمونه مشابه و تعیین میانگین آنها مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، دستگاه تست کشش اینسترون (Instron) مدل

الیاف کربن را به علت دارا بودن خواص ویژه و توان بالقوه در دامنه وسیعی از کاربردهای صنعتی و تجاری به کار می‌برند. کامپوزیت‌های حاوی این الیاف مقاوم‌تر از فولاد، سفت‌تر از تیتانیوم و سبک‌تر از آلومینیم هستند. اما همچنان قیمت زیاد این الیاف و بالطبع کامپوزیت‌های ساخته شده از آن، به‌عنوان مانعی بزرگ در مسیر گسترش کاربرد الیاف کربن است. قیمت بالای مواد اولیه (الیاف PAN ویژه) و همچنین هزینه زیاد فرآیند تولید الیاف کربن، از مهم‌ترین عوامل بالا بودن قیمت تمام شده این محصول هستند [۱۰ و ۱۱]. الیاف PAN ویژه‌ای که به عنوان ماده اولیه برای الیاف کربن استفاده می‌شود، نوع خاصی از این الیاف است که با انواع تجاری آن با کاربرد در زمینه‌های نساجی (نظیر تولید البسه و همچنین فرش ماشینی و پتو) متفاوت است. الیاف PAN تجاری در مقایسه با الیاف ویژه قیمت پایین‌تری دارد. بنابراین در صورت تولید الیاف کربن از آن، قیمت الیاف کربن نیز کاهش می‌یابد.

در این تحقیق، نمونه‌ای از الیاف PAN تجاری به همراه نمونه‌ای از الیاف PAN ویژه که ماده اولیه برای تولید الیاف کربن است آزمایش شدند. ابتدا امکان تولید الیاف کربن از الیاف PAN تجاری بررسی و سپس خواص الیاف کربن حاصل با خواص الیاف تولید شده از الیاف PAN ویژه، مقایسه شد.

مواد اولیه و روش آزمایش

دو نوع الیاف PAN شامل نوع ویژه و نوع تجاری (هر دو ساخت یک کارخانه در روسیه)، به عنوان مواد اولیه برای تولید الیاف کربن انتخاب شدند. مطابق با جدول (۲)، هر دو الیاف آنالیز شیمیایی مشابه دارند. براساس اطلاعات کارخانه سازنده الیاف PAN، دانسیته خطی الیاف PAN ویژه و تجاری به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۱۷ تکس و تعداد لیف در هر دسته برای الیاف PAN ویژه، ۳۰۰۰ عدد و برای الیاف PAN تجاری، ۳۲۰۰۰۰ عدد بود.

خطی، و استحکام کششی اولیه، مهم‌ترین تفاوت‌های این دو نوع الیاف هستند [۱۳ و ۱۰]. براساس نتایج جدول (۲)، ترکیب شیمیایی دو نمونه الیاف مورد بررسی (A و B) یکسان است و هر دو حاوی AN به همراه MA و IA با درصدهای مشابه هستند. مطابق با اطلاعات اولیه و نتایج جدول (۳)، چهار تفاوت بین الیاف ویژه (نمونه A) و الیاف تجاری (نمونه B) وجود دارد. قطر، دانسیته خطی و درصد افزایش طول نسبی نمونه A کمتر از نمونه B است و استحکام کششی آن بالاتر است. پس از اندازه‌گیری خواص نمونه‌های A و B، این نمونه‌ها پایدار و سپس کربونیزه شدند تا الیاف کربن حاصل شود. در جدول (۴)، خواص نمونه‌های A و B پس از پایدارسازی ارائه شده است.

جدول ۴- خواص الیاف PAN تجاری و ویژه پس از پایدارسازی.

نام نمونه PAN	قطر (μ)	دانسیته حجمی (gr/cm ³)	استحکام کششی (MPa)	میزان کاهش استحکام نسبت به استحکام اولیه PAN
A	۹/۵	۱/۳۷	۵۳۱	۲۸/۴
B	۱۲	۱/۳۶	۲۴۸	۲۷

مطابق با اطلاعات جدول‌های (۳) و (۴)، دانسیته حجمی الیاف PAN پایدار در مقایسه با الیاف PAN برای هر دو نمونه A و B افزایش یافته است در حالی که قطر و استحکام کششی در این حالت کاهش یافته است. افزایش دانسیته و کاهش قطر الیاف ناشی از خروج ترکیبات فرار و همچنین کاهش خلل و فرج است [۱۱]. کاهش استحکام کششی در مرحله پایدارسازی نیز به علت تغییر برخی پیوندها؛ از جمله تبدیل پیوندهای بین نیتروژن و کربن از حالت سه گانه ($C \equiv N$) به پیوند دوگانه ($C = N$) است. در این حالت نیروی کمتری برای غلبه بر این پیوند و گسیختگی آن وجود دارد. بنابراین استحکام الیاف PAN پایدار همواره کمتر از الیاف PAN اولیه است.

۵۵۶۵ نیز برای تعیین استحکام کششی براساس استاندارد ISO ۱۱۵۶۶ (روش استاندارد بین‌المللی تعیین استحکام کششی لیف کربن) و همچنین تعیین مدول الاستیک و درصد افزایش طول استفاده شد. برای سنجش خواص مذکور، نمونه‌های تک لیف به طول ۲۵ میلی‌متر آماده و دو طرف هر نمونه بر روی قایب مستطیلی شکل مقوایی نازک چسبانده شد. سپس قاب حاوی نمونه، از دو قسمت چسب خورده بر روی دو گیره دستگاه کشش نصب شدند و با قیچی، دو طرف قاب به موازات طول لیف برش خوردند. در نهایت باری به میزان ۲/۵ نیوتن با سرعت (mm/min) ۲ بر هر لیف اعمال شد تا نیروی لازم برای گسیختگی لیف توسط دستگاه تعیین شود. سپس استحکام کششی، مدول الاستیک و درصد افزایش طول برای ۲۵ لیف در هر نمونه اندازه‌گیری و میانگین نتایج ۲۵ آزمایش به عنوان نتیجه برای هر نمونه گزارش شد.

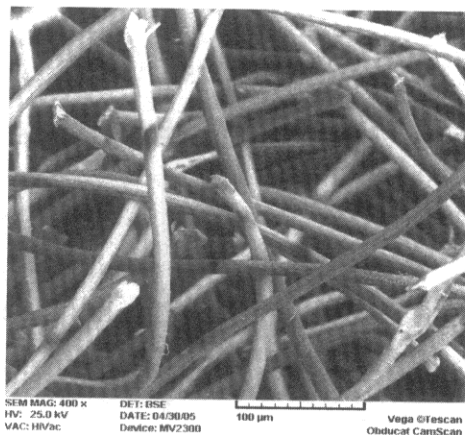
نتایج و بحث

خواص دو نوع الیاف PAN مورد بررسی، براساس روش اشاره شده در بخش مواد و روش آزمایش، اندازه‌گیری شدند. نتایج، در جدول (۳) ارائه شده است.

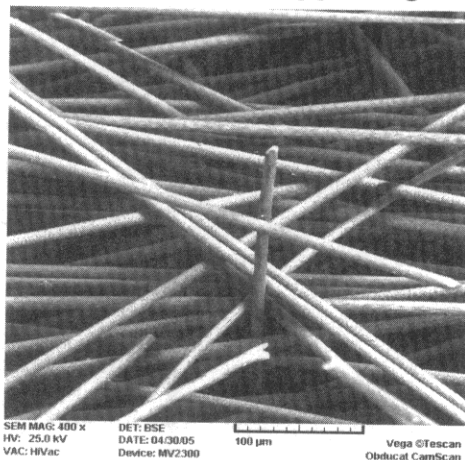
جدول ۳- بررسی خواص انواع الیاف PAN تجاری و ویژه.

نوع الیاف PAN	نام نمونه PAN	قطر (μ)	دانسیته حجمی (gr/cm ³)	استحکام کششی (MPa)	افزایش طول نسبی (درصد)
الیاف ویژه	A	۱۳	۱/۱۹	۷۴۲	۲۰
الیاف تجاری	B	۱۵	۱/۱۹	۳۴۰	۲۸

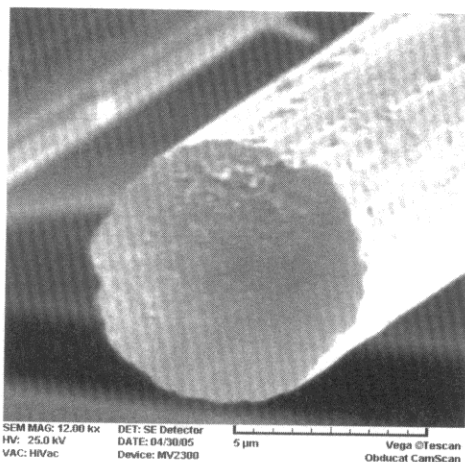
الیاف PAN ویژه مورد استفاده برای تولید الیاف کربن از جنبه‌های مختلفی می‌تواند با الیاف تجاری به کاررفته در صنایع نساجی تفاوت دارد. ترکیب شیمیایی (به خصوص میزان و نوع کومونومرها)، قطر، دانسیته



شکل ۳- تصویر SEM الیاف PAN تجاری.



شکل ۴- تصویر SEM الیاف PAN تجاری پایداری شده.



شکل ۵- تصویر SEM الیاف کربن حاصل از

الیاف PAN تجاری.

که مقدار این کاهش به درصد تبدیل پیوندها وابسته است [۱۴].

مرحله پایداری، مهم‌ترین مرحله در فرآیند تولید الیاف کربن است؛ چون تنها با انجام فرآیند پایداری کامل می‌توان به الیاف کربن با خواص مکانیکی مطلوب دست یافت. محققان در مراجع مختلف، برای پایداری کامل، معیارهای متفاوتی ارائه داده‌اند. آذروا (Azarova) [۱۵]، کاهش حدود ۲۵-۳۰ درصدی در استحکام کششی برای الیاف PAN پایداری شده را به عنوان معیار معرفی کرده است.

مطابق با نتایج جدول (۴)، می‌توان گفت نمونه‌های A و B هر دو کاملاً پایدار شده‌اند. چون هر دو معیار ذکر شده برای پایداری کامل را دارند. دانسیته نمونه‌های A و B، به ترتیب ۱/۳۷ و ۱/۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و میزان کاهش استحکام کششی آنها نیز به ترتیب ۲۸/۴ و ۲۷ درصد است که همه این نتایج، در محدوده‌های ذکر شده برای اطمینان از پایداری کامل قرار دارند.

در اشکال (۳) تا (۵) به ترتیب تصویر SEM الیاف PAN تجاری (نمونه B)، الیاف پایداری شده و الیاف کربن نهایی حاصل از آن نشان داده شده است. تصاویر مذکور نشان می‌دهند که شکل مقطع الیاف PAN اولیه، گرد هستند و این شکل در طول فرآیند پایداری و کربنیزه کردن بدون تغییر مانده است. بنابراین، می‌توان گفت در فرآیند تولید الیاف کربن از الیاف PAN تجاری، شکل مقطع الیاف در طی مراحل مختلف تغییری نمی‌کند و شکل اولیه حفظ می‌شود. در این حالت، تفاوت تنها در کاهش قطر الیاف و در نتیجه کاهش اندازه سطح مقطع آن در طی فرآیند تولید الیاف کربن است که این تغییر ناشی از خروج ترکیبات مختلف به صورت انواع گازها و کاهش جرم الیاف است.

در جدول (۵)، خواص الیاف کربن حاصل از دو نمونه الیاف PAN ویژه و تجاری پس از پایدارسازی و کربونیزاسیون، ارائه شده است.

جدول ۵- خواص الیاف نهایی.

نام نمونه	قطر (μ)	استحکام کششی (MPa)	دانسیته حجمی (gr/cm^3)	مدول الاستیک (GPa)
A	۶/۶	۳۴۵۰	۱/۷۸	۱۹۷
B	۸	۲۷۱۰	۱/۷۴	۱۶۶

نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که قطر الیاف کربن حاصل از هر دو نمونه A و B، در مقایسه با قطر الیاف PAN و قطر الیاف پایدارشده، کاهش و دانسیته آن افزایش یافته است. علت این امر، خروج عمده عناصر غیرکربنی به صورت ترکیبات گازی (نظیر H_2O ، NH_3 ، CO ، N_2 و HCN) است که این امر با کاهش قطر الیاف و کاهش جرم آن و در نتیجه افزایش دانسیته همراه است [۱۶].

با وجود آن که آنالیز شیمیایی نمونه‌های الیاف اولیه (نمونه‌های A و B) مشابه بود و شرایط پایدارسازی و کربونیزاسیون برای هر ۲ نمونه یکسان در نظر گرفته شد اما الیاف کربن حاصل از نمونه A از خواص فیزیکی و مکانیکی بالاتری برخوردار است. علت این موضوع، تفاوت در خواص اولیه این دو نوع الیاف PAN (شامل قطر، دانسیته خطی و استحکام کششی اولیه الیاف) است. البته درصد افزایش طول نسبی این دو نمونه نیز متفاوت است و این درصد برای نمونه A کمتر است. در برخی موارد، درصد افزایش طول نسبی کمتر الیاف PAN، الیاف کربن بهتری می‌دهد اما در مجموع این موضوع عمومیت ندارد. پس این پارامتر نمی‌تواند مانند پارامتری مشخص برای الیاف PAN و الیاف کربن حاصل از آن مورد استفاده قرار گیرد [۱۰].

استحکام کششی الیاف کربن تابعی از استحکام الیاف PAN به عنوان ماده اولیه است [۸]. بنابراین با توجه به این که

استحکام نمونه A به عنوان ماده اولیه از استحکام نمونه B بالاتر است، در نتیجه الیاف کربن حاصل از آن نیز در شرایط تولید یکسان، استحکام کششی بالاتری خواهد داشت.

هر چه قطر الیاف PAN اولیه کمتر باشد، امکان پایدارسازی کامل نیز افزایش می‌یابد. این موضوع بدان علت است که فرآیند پایدارسازی در حالت جامد-گاز انجام می‌شود و این واکنش با پدیده دیفیوژن کنترل می‌شود. لذا حداقل قطر و دانسیته خطی برای اطمینان از دیفیوژن مناسب و انجام کامل فرآیند پایدارسازی در کل لیف (از سطح تا مغز آن) ترجیح داده می‌شود [۱۳]. در نمونه‌های تحت بررسی، قطر و دانسیته خطی اولیه نمونه A کمتر از B است. از طرف دیگر، در مرحله پایدارسازی، دانسیته الیاف پایدارشده حاصل از نمونه A، $1.37 \text{ gr}/\text{cm}^3$ است که از دانسیته الیاف پایدار شده حاصل از نمونه B ($1.36 \text{ gr}/\text{cm}^3$) بالاتر است. پیش از این نیز گفته شد که کسب دانسیته حجمی در محدوده $1.35-1.40$ گرم بر سانتی‌متر مکعب معیاری برای پایدارسازی کامل و دانسیته بالاتر در این محدوده نشان‌دهنده پایدارسازی کامل‌تر است. بنابراین می‌توان گفت نمونه A به علت دانسیته خطی و قطر اولیه کمتر شرایط پایدارسازی کامل‌تری دارد و در نتیجه استحکام کششی و مدول الاستیک الیاف کربن حاصل از آن نیز بالاتر خواهد بود.

در جدول (۶)، استحکام ویژه (نسبت استحکام به دانسیته) و سفتی ویژه (نسبت مدول به دانسیته) الیاف کربن حاصل از نمونه‌های A و B همراه با الیاف شیشه و آلومینیم آورده شده است.

جدول ۶- استحکام ویژه و سفتی ویژه انواع الیاف

کربن تولیدی در مقایسه با الیاف شیشه و آلومینیم.

نام ماده	استحکام ویژه (N.m/gr)	سفتی ویژه (N.m/gr)
الیاف کربن حاصل از نمونه A	۱۹۲۸	۱۱۰۶۷۴
الیاف کربن حاصل از نمونه B	۱۵۵۷	۹۵۴۰۲
الیاف شیشه	۱۳۴۵	۴۰۳۹۲
آلومینیم	۳۴۲	۱۴۱۸۹

3. Rice, W.C. "Economics of Solid Rocket Booster for Space Shuttle", *Acta Astronautica*, Vol. 6, No. 12, pp. 1685-1694, 1979.
4. Howlett, B.W. "The Fabrication and Properties of Carbon Fiber/Metal Matrix Composites", *Plastic Institute Conf. on Carbon Fibers*, 1991.
5. Bansal, R.C. and Donnet, J.B. "Comprehensive Polymer Science-Polymer Reaction", Pergamon Press, Oxford, pp. 501-520, 1990.
6. Donnet, J.B. "Carbon Fibers", Marcel and Dekker, New York, 1984.
7. Kostikov, V.I. "Fibre Science and Technology", Chapman and Hall, London, pp. 231-240, 1995.
8. Masson, J.C. "Acrylic Fiber Technology and Applications", Marcel and Dekker, New York, pp. 363-365, 1995.
9. Garg, K.K. "Poly-Acrylonitrile and Copolymers", *Synthetic Fibers J.*, pp. 29-35, 1985.
10. Chair, S.S. "Characterization of Acrylic Fibers Used for Making Carbon Fibers", *Fiber Science and Technology*, Vol. 15, pp. 53-160, 1981.
11. Rajalingam, P. and Radhakrishnan, G. "Polyacrylonitrile Precursor for Carbon Fibers", *JMS-REV Macromol. Chem. Phys.*, C31, No. 283, pp. 301-310, 1991.
12. Goodhew, P.J. "A Review of the Fabrication and Properties of Carbon Fibers", *Materials Science and Eng. Vol. 17*, pp. 3-30, 1975.
13. Edie, D.D. "The Effect of Processing on the Structure and Properties of Carbon Fibers", *Carbon J.*, Vol. 36, No. 4, pp. 345-362, 1998.
14. Bahl, O.P. "Recent Advances in Carbon Fiber Technology", *J. Sci. and Ind. Research*, Vol. 38, pp. 537-554, 1977.
15. Azarova, M.T. "Study of Thermal Conversions of Polyacrylonitrile Fibers", *Int. Symp. on Chemical Fibers, Kalinin, Russia*, pp. 56, 1974.
16. Mukhopadhyay, S.K. and Zhu, Y. "Structure-Property Relationships of PAN Precursor Fibers During Thermo-Oxidative Stabilization", *Textile Res. J.*, Vol. 65, No. 1, pp. 25-31, 1995.

نتایج استحکام ویژه سفتی ویژه، در جدول (۶) نشان می‌دهند، که خواص مذکور برای الیاف کربن حاصل از نمونه A بالاتر از نمونه B است. همچنین، مقادیر استحکام ویژه و سفتی ویژه الیاف کربن تولیدی از نمونه‌های A و B بالاتر از مقادیر این خواص برای الیاف شیشه و آلومینیم است. می‌توان گفت، الیاف کربن حاصل از نمونه B (الیاف PAN تجاری) نیز می‌تواند به عنوان ماده تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها در بسیاری از کاربردها به کار گرفته شود. البته با توجه به قیمت تجاری الیاف کربن (۳۵-۱۰۰ دلار به ازای هر کیلوگرم)، در مقایسه با قیمت تجاری الیاف شیشه نوع E به عنوان پرمصرف‌ترین نوع الیاف شیشه (۱-۲ دلار به ازای هر کیلوگرم)، این الیاف نمی‌تواند جایگزین الیاف شیشه در کاربردهای مرسوم صنعتی و تجاری شود اما در مواردی که خواص بالاتری در مقایسه با الیاف شیشه مدنظر باشد، این الیاف قابلیت جایگزینی دارد.

نتیجه‌گیری

تولید الیاف کربن از الیاف PAN تجاری ارزان قیمت امکان‌پذیر است اما قطر و دانسیته خطی بالاتر و استحکام کششی کمتر اولیه الیاف PAN تجاری در مقایسه با الیاف PAN ویژه سبب می‌شود که الیاف کربن حاصل از آن، خواص فیزیکی و مکانیکی پایین‌تری داشته باشد. دانسیته، استحکام کششی و مدول الاستیک الیاف کربن حاصل از الیاف PAN تجاری کمتر از الیاف کربن حاصل از الیاف PAN ویژه است.

الیاف کربنی که از الیاف PAN تجاری ارزان قیمت تولید می‌شوند، با وجود خواص پایین‌تر، در مقایسه با انواع تولید شده از الیاف PAN ویژه، قیمت کمتری دارد و می‌تواند مانند ماده تقویت‌کننده‌ای در بسیاری از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف استفاده شود.

مراجع

1. Walsh, P. "ASM Handbook of Composites", ASM International, Ohio, pp. 49-53, 2001.
2. Wrzesien, A.P. "Carbon Fiber Composites", U.S. Pat. No. 3971669.