

(۲) الیاف کربن Carbon Fibers

تألیف: دکتر فتح‌الله فرهادی

واژه‌های کلیدی

الیاف کربن، الیاف گرافیت، کامپوزیت‌ها، هوا - فضا، تقویت کننده‌ها

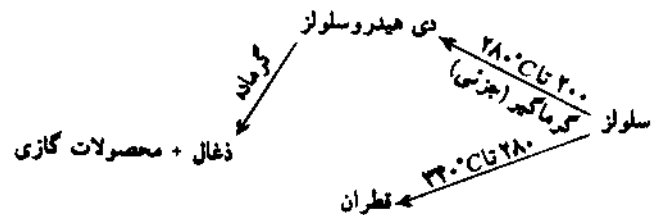
بین الیاف بشر ساخته، که در تولید آنها سعی فراوانی در تقلید از نمونه‌های طبیعی انجام گرفته است. الیاف کربن فایده‌توجه خاصی هستند. این الیاف از چند جنبه اهمیت دارند که عبارت‌اند از:

خصوصیات منحصر به فرد مکانیکی، قیمت رو به کاهش و بهبود تدریجی خواص. فرایندهای تولید الیاف کربن طی مدتی کوتاه، رشد و تکاملی قابل تحسین یافته‌اند و آینده بسیار درخشانی برای کاربرد گسترده آن پیش‌بینی می‌شود. مواد اولیه مناسبتر به منظور دستیابی به خواص برتر، جایگزین اولین مواد به کار رفته شده‌اند. برای هر یک از کاربردهای متنوع، از تولید هواپیمای پرفرمانس بمبافکن تا راکت تنیس ارزان قیمت، الیاف کربن با خصوصیات متنوع تولید می‌گردند. با توجه به اطلاعات عام منتشره در مقالات علمی، تولید این الیاف در مقیاس نسبه صنعتی در سراسر تجهیزات کشور به سهولت امکان‌پذیر است.

Key Words:

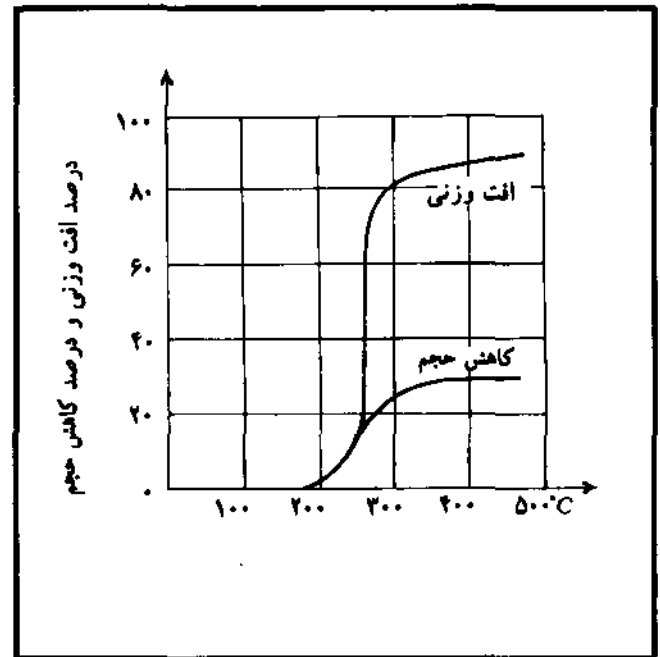
Carbon Fibers, Graphite Fibers, Composites, Aerospace, Reinforcements.

سلولز که ماده تشکیل دهنده عمده جداره سلولهای گیاهی است یک پلی ساکارید، غالباً به صورت الیاف یا فرمول $(C_6H_{10}O_5)_n$ است. به عنوان مثال، الیاف پنبه حاوی بیش از ۹۰ درصد سلولز خالص است. الیاف سلولز مصنوعی که به نام تجاری ریون معروف است نیز چنین مشخصه‌ای دارد. در تولید الیاف کربن از مواد سلولزی دو فرایند متداول است: یکی در دمای بالا و دیگری در دمای پایین.



الیاف کربن از مواد سلولزی با مدول پایین

در تجزیه دمای پایین ابتدا هیدرولیز و سپس اکسایش و شکست ماکرو مولکولی صورت می‌گیرد. روند کاهش وزن یا درصد افت وزنی بر حسب دمای عملیاتی در شکل ۴ نشان داده شده است [5].



شکل ۴- افت وزنی و کاهش حجم سلولز بر حسب دمای عملیاتی

در دمای عملیاتی پایین تا دمای 250°C محصول عمده عمل آب است. در دماهای بالاتر، قطران حاوی گروه‌های هیدروکسیل، متیلن، کربونیل و اولفینی و برخی مواد پیچیده دیگر تشکیل می‌شود. مراحل واکنشی موجود در فرایند تولید الیاف کربن از سلولز را می‌توان به روش

زیر تقسیم‌بندی کرد [5].

مرحله اول: دفع فیزیکی آب بین 25°C تا 150°C

مرحله دوم: خشک شدن واحد ساختاری سلولز بین 150°C تا 240°C

مرحله سوم: تشکیل لایه‌هایی از پیوندهای حلقه مانند کربن و قطع پیوندهای C-O و نیز برخی از پیوندهای C-C از طریق واکنش رادیکال آزاد بین 240°C تا 400°C

مرحله چهارم: حلقوی شدن در بیش از 400°C

این مراحل در شکل ۵ خلاصه شده است.

برای کاهش زمان عملیات حرارتی در مرحله اکسایش اولیه، ابتکار دیگری به کار گرفته شده [7] که عبارت است از عملیات شیمیایی قبل از اولین عملیات حرارتی که شامل آغشته کردن ماده اولیه به محلولی از ۷ درصد حجمی اسید فسفریک در الکل صنعتی است. با این کار می‌توان عملیات حرارتی را به جای محدوده 180°C تا 350°C در محدوده 100°C تا 350°C به انجام رساند [7].

در فرایند تولید چنانچه عمل کربونیزه کردن در 1000°C تا 2000°C انجام گیرد و برای گرافیتی کردن، الیاف را تا 3000°C حرارت دهیم، وزن مخصوص الیاف حاصل بین $1/23$ تا $1/7$ گرم بر هر سانتی متر مکعب، مقاومت کششی آن بین 345 تا 690 MPa و مدول یانگ آن بین 21 تا 55 GPa خواهد بود. از چنین الیافی به صورت پارچه به کاربردهای فضایی نظیر سپر حرارتی (الیاف آغشته به رزین فنیلی) و در ساخت کامپوزیت‌های کربن - کربن برای قطعات موشک و ترمز هواپیما استفاده می‌شود. مطالعات بسیاری نیز در مورد تأثیر ماهیت گازهای محیط در مراحل فرایند انجام گرفته است [5] و عموماً عملیات حرارتی در محیط آتش‌پذیری مثل هوا انجام می‌شود.

از مطالب پیش گفته در مورد الیاف با مدول پایین چنین می‌توان نتیجه گرفت که:

الف - سلولز یا ریون متداولترین ماده اولیه جهت تولید کربن است.

ب - تجزیه شیمیایی سلولز نسبتاً پیچیده است و فرایند تبدیل، بهره‌ای حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد وزنی دارد.

ج - با تغییر پارامترهایی نظیر سرعت حرارت‌دهی، خشی یا اکسندگی کردن محیط انجام واکنش یا رطوبت محیط تغییرات عمده‌ای در کیفیت الیاف حاصل به وجود می‌آید. گزارش‌هایی نیز درباره استفاده از کاتالیزورهای جهت تسریع حرارت‌دهی و دستیابی به بهره تبدیلی حدود ۴۰٪ است [8]

د - محدوده دمای 250°C تا 300°C در فرایند تجزیه حائز اهمیت بسیار است، زیرا بخش عمده افت وزنی در این محدوده حاصل می‌شود. همزمان با خروج مواد فرار، الیاف ذوب نمی‌شوند ولی کاهش حجم شدیدی در آنها به وجود می‌آید. ذوب شدن الیاف خصلت ضروری در این

رهگذر است.

ه - تحقیقات به عمل آمده نشان می‌دهد که حین حرارت‌دهی الیاف نازک کمتر از الیاف قطور آسیب می‌بینند. دلیل این امر می‌تواند سخنی خروج مواد فرار از جداره الیاف قطورتر باشد. بنابراین الیاف نازکتر بهتر است.

و - ساختار الیاف مدول پایین حاصل از سلولز، بلوری است ولی جهت‌یابی بلورها به نحو مطلوب نمی‌باشد. همین فقدان جهت‌یابی بلورها، دلیل وجود مدول پانگ پایین در این الیاف است.

الیاف کربن از مواد سلولزی با مدول بالا

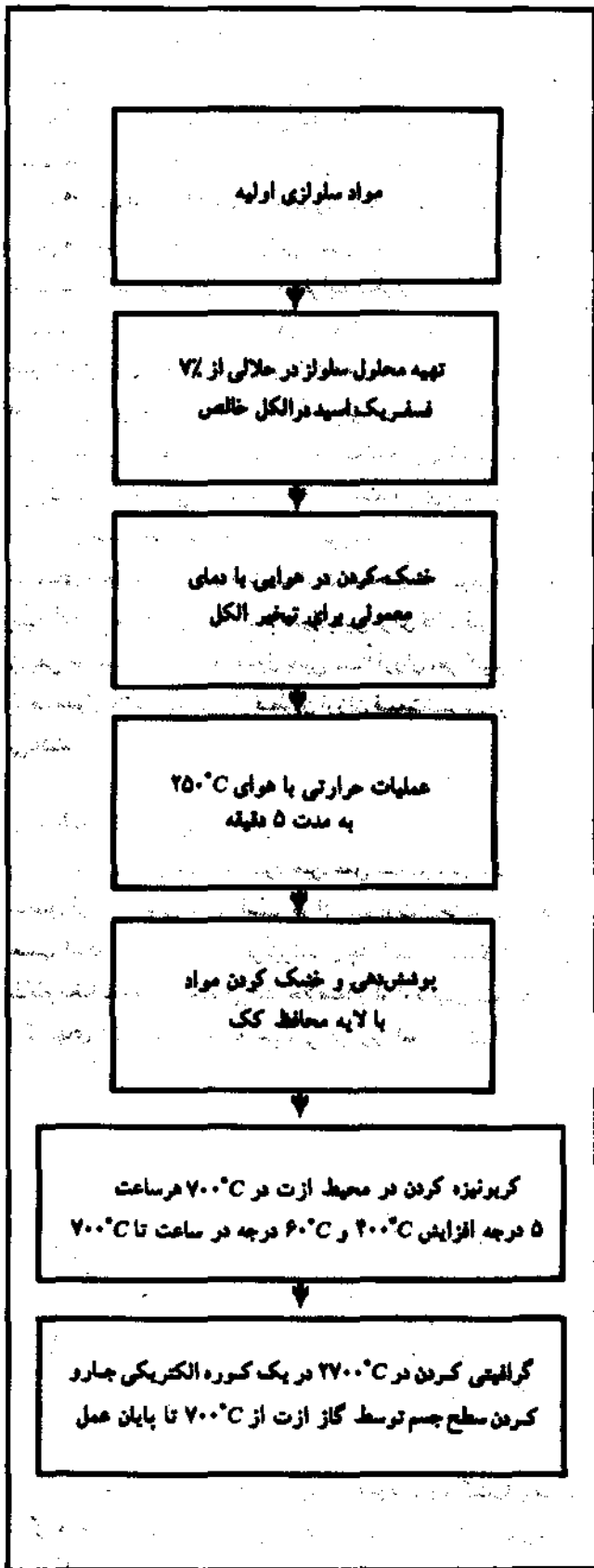
همان‌گونه که ذکر شد بازآرایی مجموعه‌های چند ضلعی گرافیتی و قرار گرفتن آنها در امتداد محور الیاف و نیز کاهش تخلخل، یعنی کم شدن فواصل بین لایه‌های گرافیتی و افزایش وزن مخصوص، موجب افزایش استحکام الیاف و زیاد شدن مدول پانگ الیاف می‌گردد. برای تولید الیاف با مدول بالا لازم است حین عمل حرارت‌دهی، الیاف تحت کششی قرار گیرند. دمای بالای عمل گرافیتی کردن الیاف که به 2700°C الی 3000°C نیز می‌رسد موجب می‌شود که اندازه و موازی بودن لایه‌های گرافیتی به شکل تکامل یافته‌ای در آید و کشش اعمال شده همزمان باعث می‌شود که لایه‌ها به موازات محور الیاف در آیند. آزمایشهایی که به کمک اشعه X و میکروسکپ الکترونی انجام گرفته است این امر را تأیید کرده‌اند. در مورد کشش الیاف حین حرارت‌دهی دو روش گزارش شده است: اولی گذراندن الیاف از داخل لوله گرافیتی که از بیرون توسط مقاومت گرم شده است و دومی گذراندن جریان الکتریسیته از الیافی که تحت کشش است. در هر دو مورد با تعبیه سیستمهای قرقه و وزنه و پیچاندن و باز پیچاندن نخ با سرعتهای متفاوت، میزان کشش اعمال شده تحت کنترل قرار داشته است.

بدین ترتیب وزن مخصوص نخ حاصل از الیاف فوق در مدول بانگی برابر 1.325 GPa به 1.65 g/cc و در مدول 1.18 GPa به 1.8 g/cc می‌رسد. قیمت این نوع الیاف در یک مقطع زمانی بین ۶۰۰ تا ۱۳۰۰ دلار برای هر کیلو ولی قیمت الیاف با مدول کم در همان زمان بین ۶۰ تا ۱۶۰ دلار برای هر کیلو بوده است. به دلیل حجم کم تولید الیاف با مدول بالا، کاربردهای صرفاً هوا - فضایی مهمترین کاربرد این نوع الیاف گران قیمت بوده‌اند.

در مورد الیاف کربن با مدول بالا نیز می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد:

۱ - مقاومت و مدول کششی تابعی از ساختار بلورین الیاف است. درجه حرارت عمل کربونیزاسیون و گرافیتی کردن الیاف و نیز کشش حین عمل، عوامل بازآرایی بلورین الیاف هستند. هر چه درجه جهت‌یابی در الیاف کاملتر شود، مدول مقدار بالاتری پیدا می‌کند.

۲ - تعدادی روش برای اعمال کشش حین حرارت‌دهی در



شکل ۵ نمودار مراحل تولید الیاف کربن از مواد سلولزی

مقالات آمده است که در همه آنها نکته مهم، کنترل مسیزان کشش در هر مرحله از فرایند می باشد.

تولید الیاف کربن از قطران

قطران مورد استفاده در تولید الیاف کربن می تواند از قیر نفتی یا منابع ذغال سنگی باشد. در هر صورت قطران که حاوی مواد با طیف وسیعی از اوزان مولکولی است به صورت مذاب رسیده می شود و رشته حاصل کربونیزه و سپس گرافیتی می گردد. بر حسب آنکه عمل گرافیتی کردن و بازآرایی اتمهای کربن در امتداد محور الیاف تا چه حدی تحقق پذیرد، الیافی با مدول یانگ پایین، بالا و خیلی بالا حاصل می شود. مزیت عمده قطران آن است که حاوی بیش از ۹۰٪ کربن می باشد.

تولید الیاف کربن با مدول پایین

اولین بار در سال ۱۹۶۲ یک گروه ژاپنی از دانشگاه گونما (Gunma) گزارشی مبنی بر تولید الیاف کربن از قطران انتشار داد. از آنجا که قطران حین حرارت دهی ذوب می شود، ابتدا آن را در مجاورت اوزون و یا هوا به صورت گرما سخت در می آورند. الیاف کربن حاصل، که بعداً در مقیاس تجاری از قیر نفتی تهیه گردید، دارای مدول یانگ پایین و مقاومت کششی نسبتاً کم است و برای کاربردهای صنعتی مثل عایق بندی کوره ها، الکترود سلولهای سوختی (Fuel Cell)، قطعات مقاوم در مقابل سایش، کاسه نمود، و اشراآب بندی، پرکن الیافی برای پلاستیکهای هادی جریان الکتریسیته در نظر گرفته می شود.

فرایند تولید الیاف از قطران ذغال سنگ به مدت کوتاهی مورد مطالعه بوده است ولی چون این قطران حاوی مقادیر قابل ملاحظه ای املاح معدنی می باشد و علیرغم انجام عملیات استخراج با حلال، این املاح مشکلاتی را حین فرایند به وجود می آورند و مقاومت کششی الیاف را کم می کنند، به همین دلیل تولید الیاف از قطران ذغال سنگ هرگز در مقیاس تجاری انجام نشد. البته فرایندهای دیگری با استفاده از ذغال سنگ می بایست طی سالهای ۱۹۸۶ یا ۱۹۸۷ در مقیاس تجاری به بازار ارائه می شد [۱]. در تولید الیاف، از قطران مایع که دارای خواص همگنی است، استفاده می شود و حین عمل رشتن، گرما سخت کردن و کربونیزه کردن همین همگنی حفظ می شود. مدول یانگ برای چنین الیافی کمتر از ۷۰ GPa و مقاومت کششی آنها کمتر از ۱۰ GPa است.

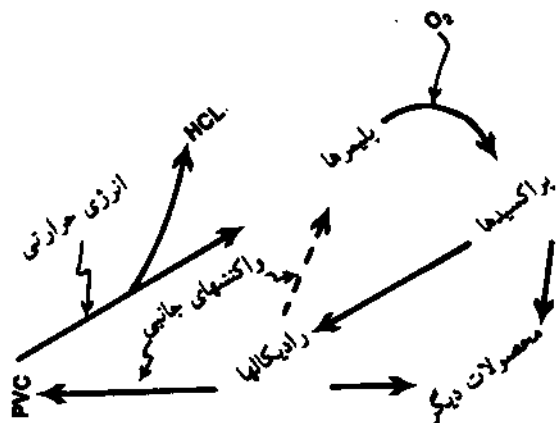
الیاف کربن حاصل از قطران با مدول بالا

الیاف مدول پایین به دست آمده را می توان با روش اعمال تنش حین عمل گرافیتی کردن به الیاف مدول بالا تبدیل کرد. چنین راه حلی در ۱۹۷۰ توسط شرکت یونیون کارباید ارائه گردید. ایده کلیدی در فرایند تبدیل فوق، استفاده از قطران مایع بلورین به نام مزوفاز (mesophase) است، که تحت جریان برشی ابتدا از آن رشتههایی تهیه می کنند و سپس آنها را تحت عملیات حرارتی قرار می دهند. بدین ترتیب رشته حاصل از

رسیدن مذاب (Melt Spinning) که به صورت لیف یکسره و مداومی در می آید حاوی مولکولهای کربن با آرایش همسو با محور الیاف شدیداً جهت دار است که در تمامی مراحل عملیاتی آن را حفظ می کند. همین فرایند با سرمایه گذاری ارتش آمریکا تکمیل شد و در سال ۱۹۷۵ لیف یکسره تولید شد. بعدها در سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۲ با تغییراتی، الیاف با مدول خیلی بالا (بین ۶۹۰-۸۳۰ GPa) تولید و به صورت تجاری عرضه شد. بهره تبدیل در این فرایند ۸۰ تا ۹۰ درصد وزنی است. مزیت این فرایند در این است که الیاف حاصل «گرافیتی تر» از هر فرایند دیگری، حتی از فرایند PAN، می باشد و طی آن نیز نیازی به کشیدن الیاف حین عملیات حرارتی نیست. چنین الیافی وزن مخصوصی برابر ۲ گرم بر سانتی متر مکعب و ضریب هدایت حرارتی بسیار بالا، هدایت الکتریکی بسیار زیاد، مقاومت خوب در مقابل اکسایش و پایداری ابعادی خوب یا به تعبیری ضریب انبساط حرارتی بسیار کوچکی دارد. این خصوصیات، برای چند کاربرد هوا-فضایی از جمله دهانه خروج دود از موتور راکتها، دماغه موشکها و سازه های ماهواره ای بسیار مناسب است. همچنین در ترمز هواپیماها از چنین الیافی استفاده می شود. نوع مدول پایین برای قالب گیری ورقه ای یا تزریقی مناسب است. الیاف مدول پایین نسبتاً ارزان (هر کیلو ۱۷ دلار) و الیاف مدول بالای تهیه شده از قطران ارزان قیمت ترین الیاف کربن می باشند.

تولید الیاف کربن از پی وی سی

ماده پی وی سی که خود حین عمل پلیمر شدن حاوی اجسام حاصل از واکنشهای جانبی است، در اثر حرارت تجزیه می شود و بر حسب اینکه شرایط عمل در برگیرنده آن چه باشد، محصولات مختلفی در مقاطع مختلف زمانی ایجاد می کند. خلاصه ای از امکانهای مختلف وقوع واکنشهای شاخه ای و تجزیه حرارتی در زیر آمده است:



وجود عنصر کلر موجب پیدایش محصولات و واکنشهای متعددی می گردد. همان گونه که در بازبایی مصنوعات ساخته شده از پی وی سی نیز تشکیل کلریدریک اسید مساله ساز است، در مورد تولید الیاف کربن از پی وی سی نیز پیدایش کلریدریک اسید انواع واکنشها را ایجاد می کند.

مکانیسم تولید را به اشکال مختلف بیان کرده‌اند ولی مختصراً می‌توان اشاره نمود که مواد واسطه‌ای مثل پلی‌انهای کوتاه و بلند، نمکهای کربونیوم، و در صورت حضور اکسیژن، بنزن، مونو و دی‌اکسید کربن، هیدروکربنها، آب، و در حضور پرکسیدها، هیدروپروکسیدها و گروههای کربونیل و برخی مواد دیگر ممکن است تشکیل شوند. کلریدریک اسید متصاعد شده ممکن است با جداره ظرف وارد واکنش شود و محصولات آن را ایجاد کند که در شاخه‌ای شدن زنجیر پلیمر و تجزیه آن دخالت کند. اثر اتمسفر خنثی، تجزیه حرارتی مقدماتی، دمای تجزیه، جذب گازهای حاصل از تجزیه و اثر عوامل دیگر بر کیفیت محصول و واکنش در مقالات آمده است [5, 9]. حاصل این مطالعات را می‌توان چنین خلاصه کرد:

- الف - تولید الیاف گرافیتی از الیاف پی وی سی میسر است.
- ب - جهت بهبود ساختار الیاف، باید ترجیحاً الیاف پی وی سی را در معرض اکسایش مقدماتی قرارداد تا اسکلت نردبانی شکل در الیاف ایجاد شود و بتوان تا پایان عملیات فرایندی از این امر سود جست.
- ج - جهت اکسایش حین تجزیه حرارتی باید محیط توسط هوا یا اکسیژن به صورت مناسبی تهویه و تجدید گردد.
- د - گاز HCl تولیدی را باید ترجیحاً از محیط عمل دور کرد.
- ه - جداره ظرف تجزیه حرارتی باید در مقابل خوردگی ناشی از گاز HCl مقاوم باشد.

تولید الیاف کربن از پان (پلی اکریلونیتریل)

در تولید الیاف کربن از پان (Polyacrylonitrile) نیز مانند تولید الیاف از منابع دیگر سه مرحله اصلی وجود دارد. آماده‌سازی طی عملیات حرارتی، کربونیزاسیون و گرافیتی کردن: تفاوت اساسی این الیاف با الیاف تولیدی از ریون در آن است که از پان یک ساختار نردبانی در مرحله مقدماتی عملیات حرارتی که الیاف طی آن تحت کشش است، ایجاد می‌شود و این جهت‌یابی اساساً در همه مراحل دیگر نیز حفظ می‌گردد. به‌علاوه الیاف حاصل از سلولز و پان تنها الیافی هستند که تا قبل از تبدیل به‌ذغال، ذوب نمی‌شوند بنابراین هیت لیفی خود را حفظ می‌کنند.

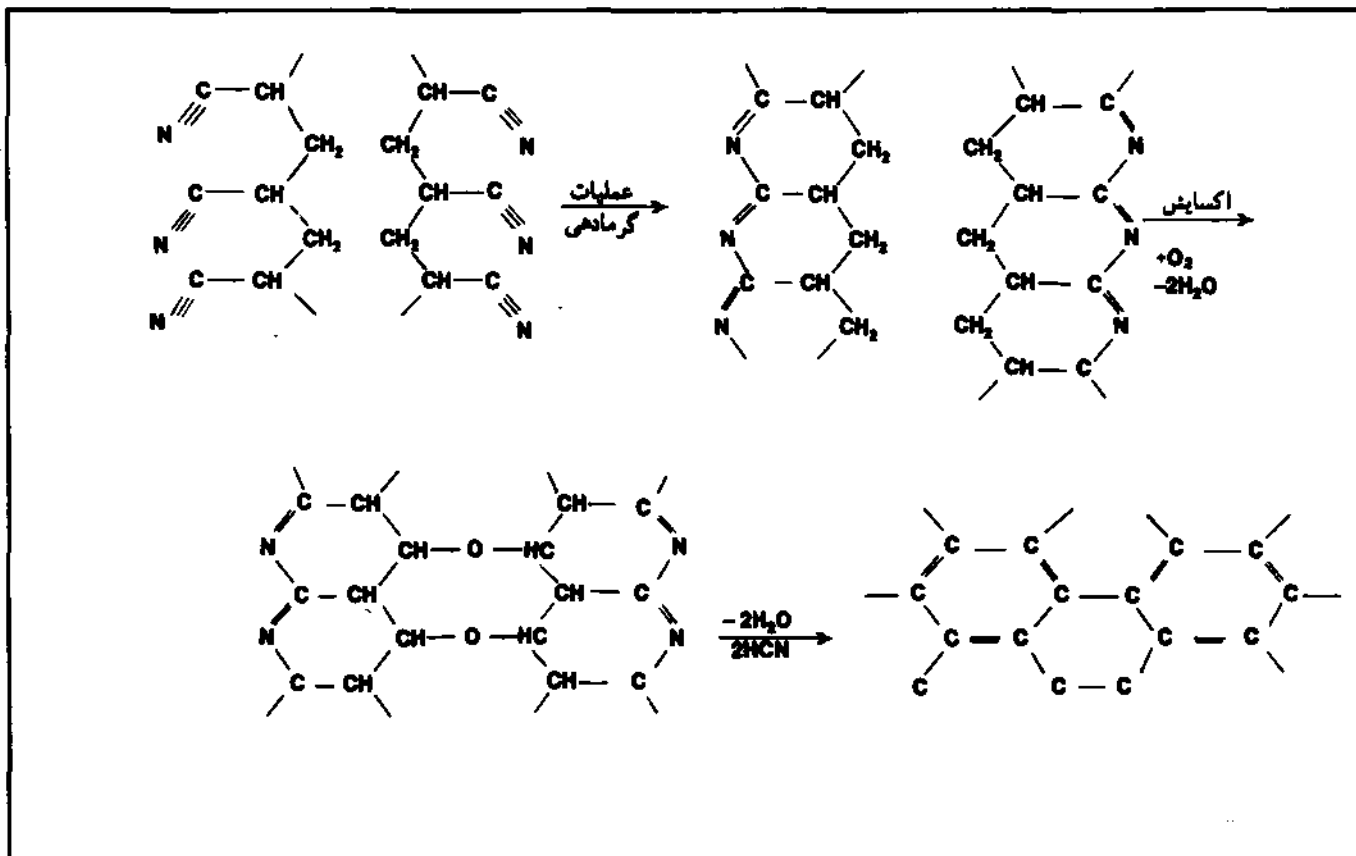
عملیات مقدماتی حرارتی: اولین مرحله تولید عبارت است از اکسید کردن الیاف پان در محیط اکسنده‌ای مثل هوا در دمای بین 190°C تا 280°C به مدت 0.5 تا 5 ساعت که طی آن الیاف تحت کشش قرار دارد تا الیاف جمع نشوند و درجه بالایی از بازآرای مولکولها در امتداد الیاف حاصل گردد. از آنجا که در عملیات حرارتی، مقادیر زیادی گرما تولید می‌شود مراقبتی برای اجتناب از خارج شدن عملیات از کنترل باید انجام شود. مطالعاتی نیز در مورد عملیات حرارتی در محیط گوگرد [2] و نیز افزودن یونهای فلزی که نقش کاتالیزور را در اکسایش دارند [8]، به‌منظور کاهش زمان اقامت الیاف در کوره، انجام شده است. بنابراین مهمترین مسائل در این مرحله، عبارت‌اند از خروج مقادیری گاز سمی، اعمال کشش و کنترل دما روی الیاف. الیاف حاصل از این مرحله هنوز

جسمی آلی و سیاه رنگ‌اند. در مورد این مرحله یک راه‌حل جایگزین نیز ارائه شده که عبارت است از گذراندن الیاف از روی استوانه‌های داغ بین 200°C - 400°C در یک محیط اکسنده.

کربونیزاسیون الیاف: الیاف طی این مرحله در دمای 1000°C تا 1300°C در محیطی خنثی، تحت کشش، حرارت می‌بینند. طی این مرحله مقادیری از انواع گازها از جمله سیانیدریک اسید، HCN، حاصل می‌شود که باید مراقبت‌های لازم جهت خنثی‌سازی این ماده سمی (از قبیل تعبیه برج شستشو، Scrubber) به‌عمل آورد. در این مرحله الیاف حاوی ۹۲ تا ۹۵ درصد کربن، عمدتاً به‌صورت بلورهای بسیار ریز و مقادیر کمی نیز ازت است. بخش عمده گازهای فرار متصاعد شده که ۵۰ درصد وزن الیاف را تشکیل می‌دهد در کمتر از 1000°C تولید می‌شوند. الیاف حاصل که اولین بار در سال ۱۹۷۰ به‌بازار ارائه گردید دارای مدول یانگی برابر 1 GPa بودند و مقاومت خوبی نیز داشتند. این نوع الیاف حدوداً دوازده سال حاکم بلامنازع در بازار بودند [1]. طبعاً در این فاصله تحقیقات برای بهبود خواص نیز متوقف نماند. یکی از عوامل افزایش مقاومت کششی، بی‌نظمی‌های سطحی و نیز ترکهای سطح الیاف شناخته شد. با تدبیرهایی، این بی‌نظمی‌ها کاهش یافت و در سال ۱۹۷۶ الیافی با مدول 1.93 GPa تا 2.41 و مقاومت کششی برابر $2/4$ تا $2/5\text{ GPa}$ و نیز وزن مخصوص بین $1/7$ تا $1/8\text{ g/cc}$ به‌بازار عرضه گردید. علاوه بر این الیافی که در سال ۱۹۷۰ حدود کیلویی ۱۰۰۰ دلار فروخته می‌شد در ۱۹۷۶ به‌قیمت ۴۰ تا ۸۰ دلار برای هر کیلو، با کیفیت برتری که ذکر شد، به‌فروش رسید. این الیاف در اوائل دهه ۷۰ ابتدا در قطعات غیر حساس هواپیما به‌صورت الیاف پیش‌آغشته (Pre-impregnated یا Prepreg) مورد استفاده قرار گرفتند ولی در سالهای بعد چون قیمت آنها به‌شدت کاهش یافت و در نتیجه با مصالح دیگر صنایع هوایی قابل رقابت بود، در قطعات عمده سازه‌های هواپیمایی مورد استفاده قرار گرفت. طبیعی است که در این مورد نیز مشتری اصلی و سرمایه‌گذار عمده در تحقیقات، سازمانهای نظامی و سازندگان هواپیماهای نظامی بودند.

کربونیزاسیون الیاف می‌تواند به‌صورت پیوسته یا نوبتی (batch) در صورت اعمال کشش لازم) در کوره‌های برقی یا گازسوز انجام شود. مشکل عمده در این مرحله نیز مراقبت برای جلوگیری از تشکیل ترک و تخلخل است.

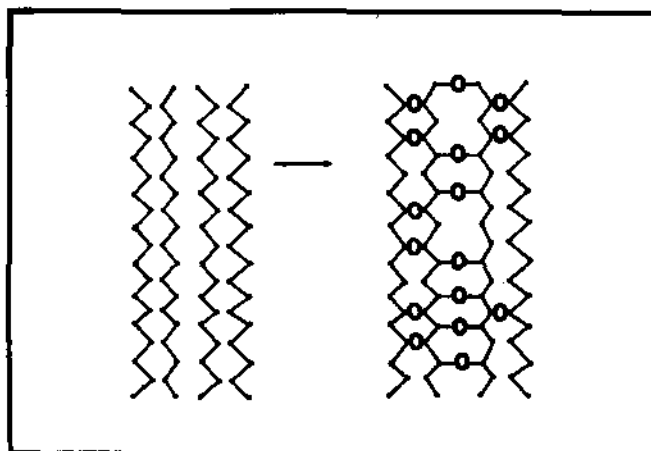
گرافیتی کردن الیاف کربن: الیاف کربونیزه به‌دست آمده از مرحله قبلی را این بار در محیطی خنثی تا دماهای بالا، بین 1500°C تا 3000°C حرارت می‌دهند تا ساختار نردبانی پان تغییر شکل نهایی پیدا کند و به‌صورتی که لایه‌های گرافیت کاملاً در امتداد محور الیاف قرار گیرند. شکل ۶ الف و ب نحوه تحول انجام یافته در مولکول پان حین مراحل مختلف عملیاتی را نشان می‌دهد [5]. شکل ۷ نیز نمودار مدلی را نشان می‌دهد که براساس اطلاعات حاصل از روش رامان میکروپور (Raman Microprobe) و نیز فوتوالکترون اسپکتروسکوپی با اشعه X، بنا نهاده



شکل ۶ - الف مراحل مختلف آرایش اتمهای کربن در الیاف کربن حاصل از PAN

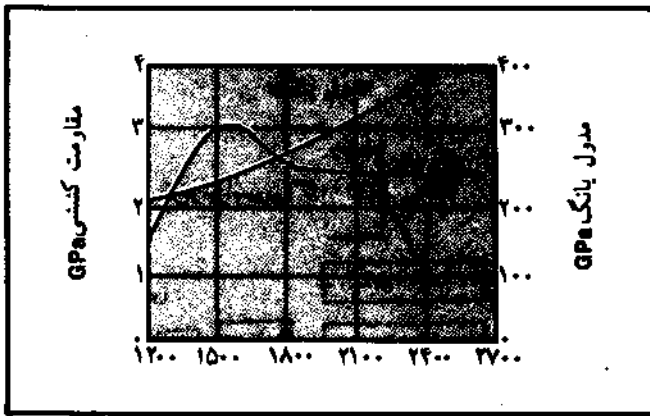
ضروری در مرحله گرافیتی کردن الیاف، جلوگیری از نفوذ اکسیژن در کوره است و تقریباً همگان از گاز آرگون استفاده می کنند. البته استفاده از هلیوم نیز گزارش شده است ولی به هیچ وجه استفاده از ازت مجاز نیست زیرا ازت در بیش از 2000°C با کربن ترکیبات سیانوزنی می دهد. شار حرارتی در این کوره بسیار زیادت از کوره کربونیزاسیون است زیرا تقریباً هیچ گاز فراری متصاعد نمی شود و پیدایش ساختار گرافیتی نسبتاً سریع است. در اینجا نیز دو شکل پیوسته و نویسی متداول است. البته در نوع پیوسته کوره را در دو بخش یکی افقی و دیگری قائم نیز می توان ساخت.

الیاف حاصل از مرحله گرافیتی کردن در اوائل دهه ۸۰ دارای مقاومت کششی حدود $3/5$ تا $4/0$ GPa بود ولی در سال ۱۹۸۲ الیافی با مقاومت کششی $5/5$ GPa نیز ارائه شد و شکل ۸ نحوه تکامل الیاف از نظر مقاومت کششی را نشان می دهد [2]. موفقیت در تولید این الیاف مدیون انتخاب الیاف اولیه ای با قطری کمتر از قطرهای متداول است (۳ تا ۶ میکرومتر در مقایسه با ۷ میکرومتر). علیرغم نظرات متناقض ابراز شده [1,2] به نظر می رسد از نظر اکسایش، پیدایش ترک و تخلخل که همگی عوامل مهم در مقاومت کششی الیاف هستند، قطر الیاف تعیین کننده است. اهمیت آن بدین علت است که خروج مواد فرار در مرحله اکسایش از



شکل ۶ - ب نمودار ساده شده آرایش مولکولی PAN و نحوه قرار گرفتن پیوند اکسیژن روی زنجیرهای همسایه. مولکول اکسیژن و لایه های مجاور متوالی PAN به صورت سه بعدی به نحوی به یکدیگر پیوند می یابند که حين حرارت دهی تا نشوند و تغییر شکل نایند.

گرافیتی کردن برای تولید الیافی با مدول بالا ضروری است و با دماهایی بیش از 2500°C انجام پذیر است. برای این کار همواره از کوره های برقی استفاده می شود که خود جداره های گرافیتی دارند. مساله



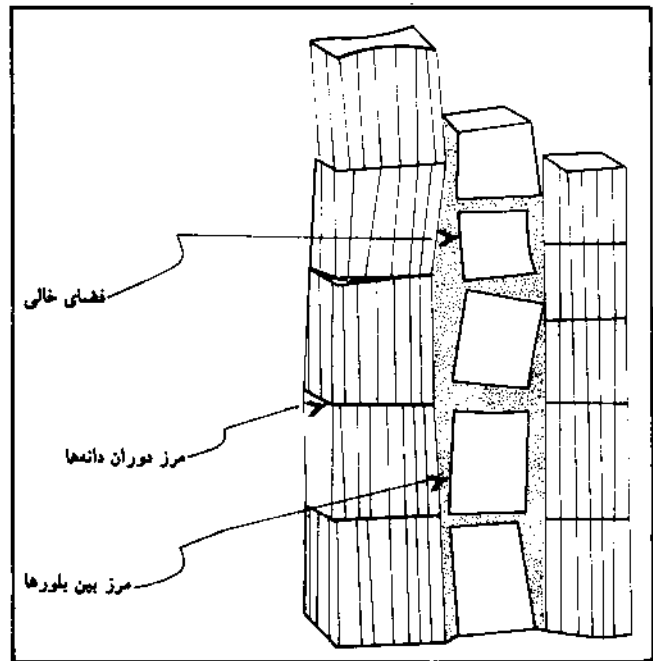
شکل ۹ تغییرات مقاومت کششی و مدول یانگ بر حسب دما

عملیات حرارتی اثرات سوء برجای می‌گذارد و از آن باید اجتناب کرد. عملیات حرارتی مطابق شکل ۱۰ پیشنهاد شده است. اهمیت عملیات بهبود خواص سطحی الیاف نیز در تهیه و تولید کامپوزیت ظهور خواهد نمود. سعی فراوانی انجام گرفته تا عملیات سطحی با عملیات حرارتی تلفیق گردد. شکل ۱۱ نمونه‌ای از تجهیزات عملیات سطحی را نشان می‌دهد.

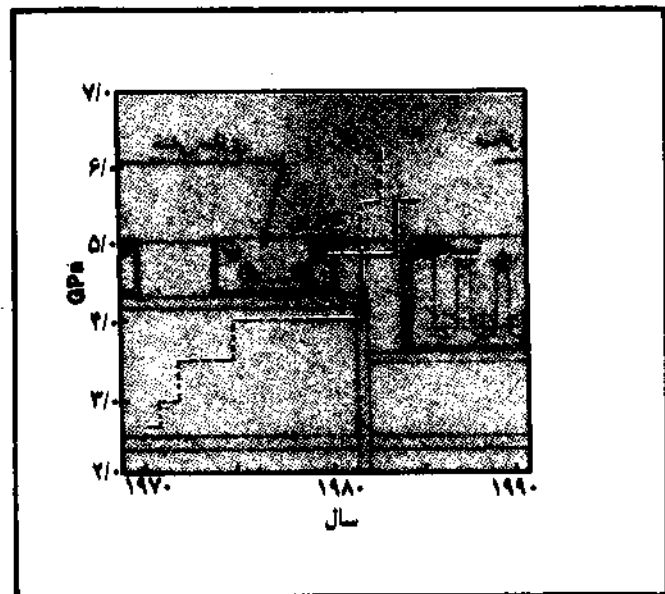
نتیجه‌گیری

استفاده از الیاف کربن به دلیل گستردگی کاربرد و خواص برتر آن، همان‌گونه که الکترونیک به یک ضرورت در زندگی روزمره تبدیل شده است. اجتناب ناپذیر است. کامپوزیت‌های الیاف کربن با توجه به کاهش حتمی قیمت تمام شده، جانشین بسیاری از مصالح و مواد دیگر خواهند شد. به دلیل همین موقعیت برتر و ویژه، تولید الیاف کربن نیز برای صنایع کشور ما یک ضرورت است.

فرایند تولید الیاف مستلزم مواد اولیه، امکانات تولید و دانش فنی انجام کار است. از بین مواد اولیه پیشنهادی، استفاده از پلی‌اکریلونیتریل در برنامه‌های کوتاه مدت و استفاده از قطران ذغال سنگ یا قطران نفتی در برنامه‌های دراز مدت، توصیه می‌شود. تولید الیاف نیاز به دانش تولید ماهایی بیش از 1500°C دارد. طراحی و ساخت کوره‌های اکسایش اولیه (کمتر از 1000°C) با استفاده از کوره‌های برقی و مواد نسوز داخلی به راحتی میسر است. کشش الیاف حین اکسایش به صورت پیوسته نیز مستلزم پیش‌بینی برخی نکات و ابتکارات است که به راحتی مقدور می‌باشد. کوره‌های مورد نیاز در مراحل بعدی فرایند نیز اجباراً باید از مصالحی نظیر کامپوزیت‌های سرامیکی یا کامپوزیت‌های کربن - گرافیت بهره‌جویند تا انجام عملیات در ماهایی بیش از ۱۰۰۰ امکان‌پذیر باشد.

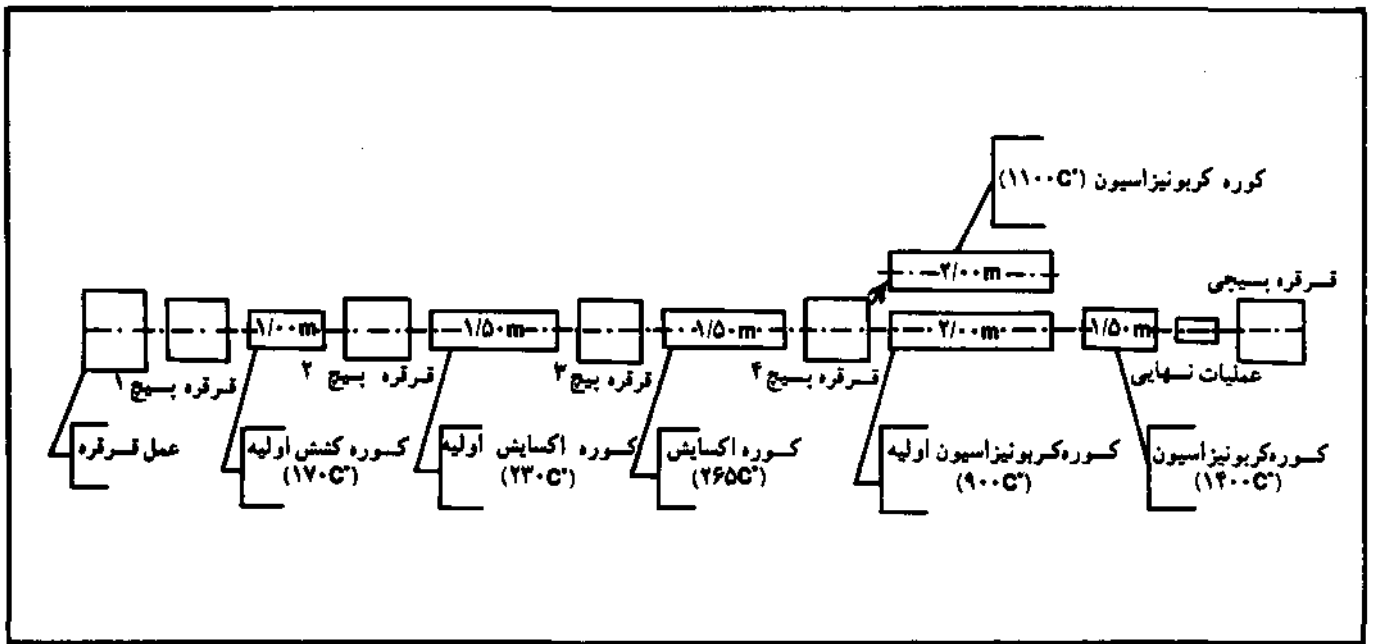


شکل ۷ - مدلی برای الیاف کربن به دست آمده از PAN

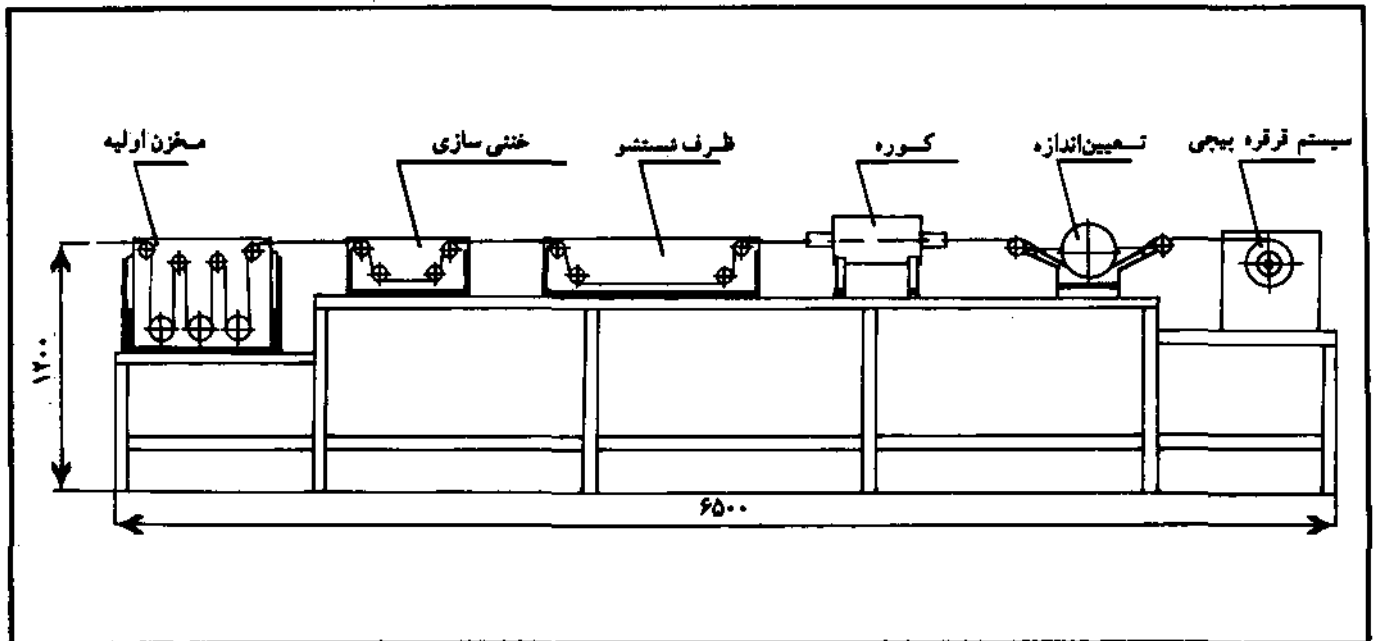


شکل ۸ - تکامل مقاومت کششی الیاف کربن

الیاف نازک آسانتر از الیاف قطور است. بهر حال تاثیر عملیات حرارتی بر ساختار هسته داخلی الیاف و نیز بر پیوسته بیرونی آن نیاز به تحقیق دارد. به همین دلیل غالب محققین بر روی الیاف تولیدی خود یا خریداری شده از دیگران آزمون معروف تغییر مدول یانگ و مقاومت کششی بر حسب دما را انجام داده و حاصل تجارب خود را منتشر کرده‌اند [2,5,6,9] (شکل ۹). نکته ظریف دیگری را که باید یادآوری کنیم. این است که غالب الیاف پلی‌اکریلونیتریل تجاری عرضه شده به بازار حاوی اصلاح‌مختلفی مثل براق‌کننده‌ها و مواد رنگی هستند. این مواد بر کیفیت الیاف حین



شکل ۱۰ - عملیات حرارتی



شکل ۱۱ - عملیات سطحی

- [3] T. Hayashi et. al, Progress in Science & Eng of Composites, Ed., ICCM - IV, Tokyo, 1982.
- [4] C.G. Gogos & Z. Tadmor, Polymer Processing, Chem. Eng. Progress, June 1987.
- [5] R. M. Gill, Carbon Fibers in Composite Materials, Butterworth, 1972
- [6] M. Akbarian & M. Mehrabzadeh, Polymer Science & Technology, Vol 2 No 1, 1989 (in Farsi)
- [7] U.S. Patent 3,305, 315 (1966)
- [8] I. Mochida et al, Carbon, vol 18, pp 117 - 123, 1980
- [9] M. Langley, Carbon Fibers in Engineering, Mc Graw Hill, 1973.

REFERENCES

- [1] R.B. Seymour, G.S. Kirshenbaum, High Performance Polymers, Elsevier, 1986.
- [2] Proceeding of the International Symposium on Fiber Science Technology, Hakone, Japan, Elsevier, 1985.