

# مهندسی الیاف، راهی به سوی آینده

Fibre Engineering-the Way Ahead

Dr.J.G Tomka, Leeds University, U.K., Textile Month, September 1991, p.119-122

ترجمه: هوشنگ نصرتی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده نساجی

## چکیده

در این مقاله تقاضای فزاینده برای الیاف مهندسی ویژه جهت کاربردهای فنی مانند کامپوزیتها و منسوجات صنعتی مورد بحث قرار می‌گیرد. جنبه‌های کلیدی مشخص شده عبارت‌اند از تعیین دقیق خواص مورد نیاز الیاف، درک عوامل موثر بر این خواص و توانایی کنترل این عوامل. به طور کلی ارتباط بین خواص الیاف و عوامل موثر بر آنها به خوبی درک شده است و برخی از مسائل باقیمانده به کمک مدل‌سازی کامپیوتری حل می‌شود ولی هنوز لازم است که کنترل ساختار فیزیکی بهتر درک شود. همچنین برجسته‌های اقتصادی در مهندسی الیاف نیز تاکید شده است.

واژه‌های کلیدی: الیاف مهندسی ویژه، کامپوزیتها، منسوجات صنعتی، مدل‌سازی کامپیوتری، ساختار فیزیکی

**Key Words: specifically engineered fibres, composites, industrial textiles, computer modelling, physical structure**

## مقدمه

در اغلب کاربردهای نهایی عمومی (غیرحساس)، الیاف مورد نیاز از بین الیاف تجاری موجود انتخاب می‌شوند به طوری که با کارایی مطلوب کمترین قیمت را نیز دارا باشند. با وجود این کاربردهای ارزشمند و سنتی باعث نوآوری‌هایی شده که الیاف با خواص برتر را پدید آورده‌اند. در واقع کاربردهای صنعتی حساس باعث پیدایش الیاف جدید و ویژه شده‌اند [۲].

هدف از این مقاله بررسی امکان استفاده از رهیافتهای مهندسی

الیاف به طور سنتی، در پارچه و لوازم منزل مصرف داشته‌اند ولی امروزه افزایش سریعی در کاربردهای صنعتی و فنی الیاف، مانند منسوجات صنعتی و کامپوزیتها به چشم می‌خورد. تنوع موارد مصرف نهایی نیازمند طیف گسترده‌ای از خواص الیاف است. الیاف کارآمد باید توازنی از خواص لازم برای کاربرد نهایی مورد نظر را داشته باشند. علاوه بر این بکنواختی الیاف و قیمت آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که با توجه به کارایی آن باید قابل توجیه باشد [۱].

برای طراحی الیاف جدید در شرایط فعلی است. مراحل ضروری برای چنین رهیافتی عبارت‌اند از:

- ۱- مشخص کردن خواص مورد نیاز برای کاربرد نهایی مورد نظر.
- ۲- شناسایی عوامل تعیین‌کننده خواص الیاف برای ایجاد رابطه‌های کمی بین این عوامل و خواص الیاف.
- ۳- تثبیت روشهای کنترل عوامل تعیین‌کننده خواص الیاف.

**بحث**

**مشخص کردن خواص الیاف**

مسئله تعیین خواص بهینه الیاف برای کاربردی معین از مشکل تشخیص سهم الیاف در عملکرد محصول نهایی به ویژه در شرایطی که مجموعه الیاف به هم پیوسته دارای ساختار پیچیده‌ای باشد، ناشی می‌شود. بنابراین، خواص پارچه نه تنها متأثر از خواص الیاف تشکیل‌دهنده آن است بلکه به طور قابل توجهی از ساختمان پارچه و همچنین ساختار و نوع نخ تأثیر می‌پذیرد [۳-۵]. امروزه ارزیابی کمی خواص پارچه که با عملکرد آن ارتباط دارد امکان پذیر است. پیشرفتهای زیادی در زمینه تحلیل عوامل گوناگون موثر بر خواص پارچه صورت گرفته [۴-۵]، ولی متأسفانه به نقش خواص الیاف کمتر بها داده شده است. وان کروئن (فصل ۲۷ [۶]) سعی کرد که مستقیماً سهم خواص الیاف را در ویژگیهای محصول نهایی، مانند برگشت پذیری در چروکهای ایجاد شده، پرزدهی و قابلیت شستشو ارزیابی کند. روش او براساس مقایسه "ویژگیهای مطلوب" با ویژگیهای محصول نهایی که می‌توان توسط الیاف مختلف به دست آورد استوار است. در حالی که این روش به تشخیص نارساییهای الیاف مورد توجه کمک می‌کند، مسئله ارتباط بین تقصدهای محصول و ویژگیهای اساسی الیاف همچنان به قوت خود باقی می‌ماند.

هوروکس [۳] نمودارهای "شناسایی" الیاف موجود را بنا نهاد که هدف او از آنها روشن ساختن نکات برجسته و کاستیهای الیاف موجود به منظور ارائه مبنایی برای انتخاب الیاف بود.

روش پیشنهاد شده در اینجا درجه بندی خواص الیاف براساس اهمیت آنها در مصرف نهایی موردنظر است. نقطه شروع تهیه فهرست فراگیر از خواص الیاف است. رتوس مطالب چنین فهرستی در جدول ۱ آورده شده است. جزئیات بیشتر همراه با منابع مناسب را می‌توان در مرجع [۱] یافت. نکته مهم دیگر در نظر گرفتن شرایط محیط کاربرد محصول نهایی مانند ترکیب، دما و فشار است. علاوه بر این لازم است به دوام الیاف در شرایط مربوط یعنی جنبه‌های گوناگون پایداری الیاف توجه شود. این موارد شامل پایداری در برابر گرما و اکسایش گرمایی، نور پایداری، پایداری آبکافتی و مقاومت در برابر حلالها و شعله و همچنین زیست پایداری است. روشن است که بر هم کنشهایی بین خواص الیاف، شرایط بهره‌برداری و پایداری درازمدت خواص آنها وجود دارد.

**جدول ۱ - خواص الیاف**

۱- خواص مکانیکی	تغییر شکل کششی (استحکام، سختی)، کار تا حد پارگی) تحمل نیروهای فشاری مقاومت در برابر خش و پیلش
۲- خواص گرمایی	رسانندگی گرمایی
۳- خواص الکتریکی	دماهای انتقال (دمای نقطه ذوب، دمای انتقال شیشه‌ای) رسانندگی
۴- خواص توری	پار کردن الکتریته ساکن جذب و بزرگ نور
۵- اصطکاک	اصطکاک بین الیاف و الیاف و بین الیاف و بستر جلد
۶- خواص سطحی	انرژی سطحی (رطوبت پذیری و چسبندگی)
۷- برهم کنش با آب	رطوبت بازیافتی
۸- رفتار لیف در رنگرزی	جذب رنگ (سرعت و تعادل) ثبات
۹- خواص زیست شناختی	واکنشهای حساسیتی جنبه‌های بهداشت و ایمنی

مرحله بعدی طبقه بندی گروههای خواص الیاف بر حسب اهمیت آنهاست. هر گروه از خواص برحسب اهمیت به صورت عالی و متوسط درجه بندی می‌شود که در مرحله بعد با توجه به تک تک خواص و تعیین ارزشهای مورد نظر، برای مثال در مقایسه با الیاف موجود، هر گروه به طور مفصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. از نمودار درجه بندی برای تولید الیاف جدید استفاده می‌شود و می‌توان آن را همراه با "نمودارهای کارایی" موجود به قصد انتخاب الیاف به کار برد.

**عوامل تعیین کننده خواص الیاف**

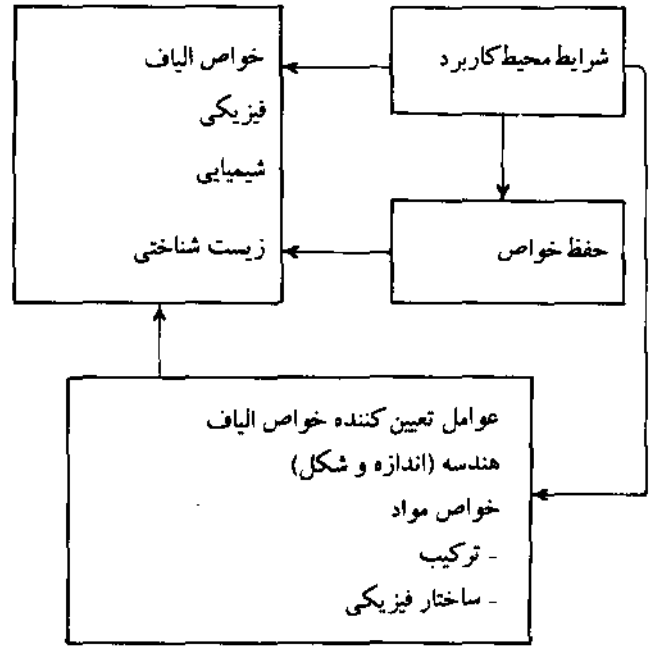
مانند سایر کالاهای دارای شکل مشخص خواص الیاف نیز توسط هندسه آنها (شکل و ابعاد) و خواص ماده یا مواد تشکیل دهنده مشخص می‌شود که این خواص نیز به نوبه خود به وسیله ترکیب (یعنی غلظت، اجزای تشکیل دهنده و پیکربندی همه اجزای سازنده) و ساختار فیزیکی (یعنی آرایش مولکولها) تعیین می‌شوند [۱]. بدیهی است که این عوامل تحت تأثیر محیط کاربرد الیاف قرار می‌گیرند (شکل ۱).

مشخصه‌های اصلی هندسه الیاف شامل موارد زیرند.

- مساحت سطح مقطع (که به چگالی خطی ارتباط دارد).
- شکل سطح مقطع
- تغییر شکل محوری
- طول الیاف
- توپولوژی سطحی
- اندازه، شکل و توزیع فضاهای خالی

تشکیل دهنده فازهای جداگانه‌اند.

سومین عامل تعیین کننده خواص الیاف ساختار فیزیکی است. در سطحی ساده ساختار فیزیکی معمولاً "بر اساس بلورینگی و جهت یابی بیان می‌شود. با وجود این، استفاده از یک روش عمومی که در آن مشخصه‌های اصلی ساختار فیزیکی (۱) درجه نظم و آرایش فضایی مولکولهای تشکیل دهنده و توزیع این نظم در الیاف و (۲) درجه گسترش زنجیر در امتداد محور الیاف در نظر گرفته می‌شوند مناسبتر است [۱]. نظم و سختی زنجیرهای پلیمر برای این دو مشخصه بسیار مؤثرند. برای به دست آوردن توصیفی از ساختار فیزیکی که در حد امکان کامل باشد، گاهی به کار بردن برخی از روشهای تجربی تکمیلی ضرورت پیدا می‌کند [۱] و در آن صورت نتایج حاصل برای فرمولبندی یک مدل ساختاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. الیاف تولید شده از پلیمرهای زنجیری خطی انعطاف پذیر که دارای ساختار شیمیایی با نظم کافی هستند اغلب به صورت ساختارهای "دوفازی" در نظر گرفته می‌شوند که در آنها نواحی منظم بلورچه‌ها در یک ماتریس پیوسته غیر بلوری قرار می‌گیرد. این ماتریس از زنجیرهای تاخورده، قطعات انتهایی زنجیرها و مولکولهای پیوند دهنده تشکیل شده است (شکل ۲).

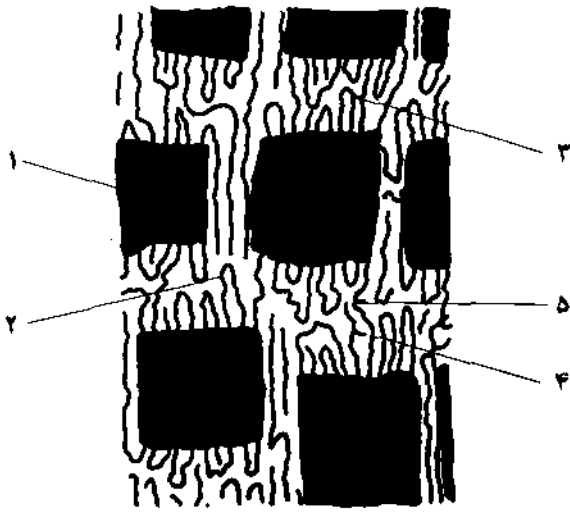


شکل ۱ - خواص الیاف، خلاصه ای از برهم کشها

مولکولهای پیونددهنده بیشترین اهمیت را در خواص مکانیکی الیاف دارند زیرا آنها در ساختار، اجزای تحمل کننده بار هستند. برای چنین الیافی تعداد بسیاری مدل‌های ساختاری دیگر پیشنهاد شده‌اند که مدل ریویزیونی سه نوع منطقه مختلف از آن جمله‌اند [۱۰ و ۱۱]. با وجود این،

امروزه تاثیر شکل هندسی الیاف به خوبی روشن شده است و اهمیت آنها را در محصولات متنوعی که بر اساس اصلاحات هندسی پدید آمده‌اند منعکس می‌سازد. ریزالیاف (micro-fibres) که امروزه توجه زیادی را به خود جلب کرده نمونه بارزی از انواع شکل هندسی است.

کلیدی بودن نقش نسبت اجزای سازنده الیاف در طبقه‌بندی ژنریک آنها منعکس است. در اینجا تنها الیاف ساخته شده از پلیمرهای سنتزی خطی مورد بررسی قرار خواهند گرفت، زیرا برای استفاده در رهیافتهای مهندسی از همه مناسبترند. مشخصات اصلی ساختار شیمیایی یک پلیمر با قابلیت تبدیل به الیاف عبارت‌اند از: بیکربندی، غلظت، ترتیب تمام واحدهای تکرار شونده همراه با ساختار و غلظت گروههای انتهایی، وزن مولکولی و توزیع وزن مولکولی. ساختار شیمیایی بر بعضی از خواص الیاف مانند جذب رطوبت، رفتار لیف در عملیات رنگرزی، دماهای تبدیل و پایداری الیاف تاثیر بسزایی دارد. رابطه‌های کمی بین ساختار شیمیایی و بسیاری از این خواص وجود دارد. روش تجربی مفید ویژه‌ای توسط وان کروئن [۶] ابداع شده است. سهم گروه اتمهای تشکیل دهنده در خواص گوناگون پلیمر جمع پذیر محسوب می‌شود. لیکن، در برخی موارد باید ضریب تصحیح کاملاً مشخصی به کار برده شود. اگرچه یک پلیمر جزء اصلی سازنده الیاف سنتزی است ولی باید به این نکته مهم توجه کرد که برخی خواص را می‌توان با استفاده از افزودنیهای مناسب (مانند جلازداها، پایدارکننده‌ها، رنگدانه‌ها و غیره) اصلاح کرد. سرانجام باید به اهمیت روزافزون الیاف چند جزئی اشاره کرد که شامل چند پلیمر



شکل ۲ - نمودار اجمالی ساختار الیاف آرایش یافته نیمه بلوری از پلیمرهای زنجیری انعطاف پذیر خطی: بلورچه‌ها (۱)، نشاندهنده در یک ماتریس غیربلوری (۲)، شامل زنجیرهای تاخورده (۳)، قطعات انتهایی زنجیر (۴) و مولکولهای پیونددهنده (۵)

می‌کند. به طور کلی، تولید الیاف سنتزی شامل مراحل مختلفی مانند ریسندگی (که اکستروژن نیز نامیده می‌شود)، کشش (drawing) که به طور اختیاری با عملیات بافت دهی (texturing) دنبال می‌شود، تثبیت گرمایی (heat setting)، برش الیاف (cutting) و غیره است [۱۸]. ترکیب الیاف تولید شده را مواد اولیه مشخص می‌کند. تغییرات جزئی، که ممکن است در حال فراورش رخ دهد، اینک به خوبی درک شده‌اند و کارهای تنظیمی مورد نیاز را می‌توان انجام داد.

هندس الیاف و ساختار فیزیکی آن را شرایط مختلف فراورش تعیین می‌کند. معمولاً کنترل هندسه الیاف با مشکل مهمی مواجه نمی‌شود اگرچه در عمل بدیهی است که برای حداقل چگالی خطی قابل دستیابی حدی وجود دارد. متأسفانه درباره کنترل ساختار فیزیکی به ویژه در مورد الیافی که از پلیمرهای زنجیری خطی انعطاف پذیر تولید می‌شوند اطلاعات کافی در دست نیست. از اهمیت برهم کنش بین تنشها، دما و زمان باخبریم ولی ربط دادن دقیق این متغیرهای اساسی به متغیرهای واقعی فرایند مشکل است. حتی وقتی متغیرهای اساسی به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند یا از کمیتهای اندازه‌گیری شده دیگر محاسبه می‌گردند، پیش ما از تشکیل ساختار الیاف کامل نیست. با اینکه سینتیک تبلور تنش القایی ناهمدا (stress-induced non-isothermal crystallization) مربوط به مذاب ریزی (melt spinning) و کشش الیاف (fibre drawing) هنوز به طور کامل درک نشده است اما دست کم می‌توان با انتخاب شرایط فراورش، بلورینگی الیاف و تا حد معینی اندازه بلورچه‌ها را تغییر داد.

کنترل پیکربندی درشت زنجیر که با کسر مولکولهای پیوند دهنده ارتباط دارد بسیار مشکل است. به نظر می‌رسد که کلید درک این ساختار الیاف یک شبکه گذرا است که از درهم رفتگی زنجیر ناشی می‌شود. این شبکه که در مذاب یا در محلول غلیظ پلیمر وجود دارد در الیاف تازه رشته (as-spun) نیز حفظ می‌شود و نسبت کنش قابل دستیابی را محدود می‌کند. وقتی این شبکه به طور کامل گسترش یابد الیاف می‌شکنند [۱]. متقاعد کننده ترین نقش محدود کننده شبکه پلیمری

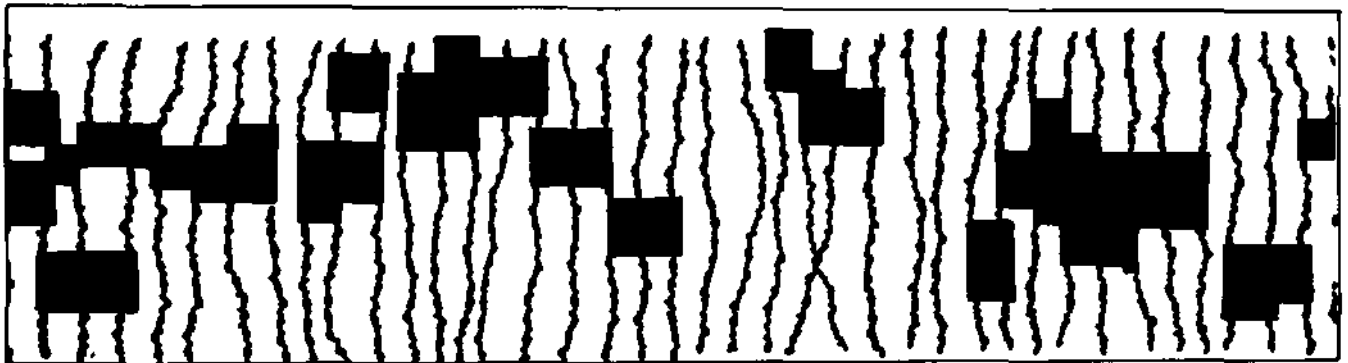
اختلاف بین مدل‌های مختلف آن طور که به نظر می‌رسد بنیادی نیست [۱]. روشن است که مسئله اصلی، پیکربندی درشت زنجیر (chain macroconformation) در ارتباط با محور الیاف است، زیرا تعیین کننده به هم پیوستگی ساختار (کسر مولکولهای اتصال دهنده) و حد و نوع تا خوردن زنجیر است.

در مواردی که الیاف از پلیمرهای زنجیری خطی سخت تولید شده باشند، مسئله پیکربندی درشت پیش نمی‌آید و زنجیرهای گسترش یافته به طور عمده موازی با محور الیاف قرار می‌گیرند. هوموپلیمرهایی مانند پلی (p- فن ترفتالامید) الیاف بسیار بلوری (کولاروتورون) را نتیجه می‌دهند که ممکن است آنها را به صورت ساختارهای بلوری تک فاز همراه با نقصهایی توصیف کرد. به علت پایداری چنین الیافی به دست آوردن ریز نگارهای الکترونی شبکه‌های ریشه دار از ساختار الیاف ممکن شده است [۱۲ و ۱۳]. بنابراین، روش استنتاج غیر مستقیم که برای الیاف حاصل پلیمرهای زنجیری خطی انعطاف پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد با شواهد واقعی جایگزین شده است.

در مورد کوپلیمرهای گرماگری نخ مانندزا (thermotropic nematogenic) سخت و نیمه سخت [۱۴] بی قاعدگی ساختار شیمیایی محدودیتی در تبلور به وجود می‌آورد. چنین الیافی حاوی آرایه‌ای از زنجیرهای موازی محور لیف به همراه موزاییکی از نواحی بلوری ظریف است که از توالی جور واحدهای تشکیل دهنده، تشکیل شده است [۱۵]. امروزه تلاشهایی صورت می‌گیرد تا مدلسازی زنجیر مولکولی [۱۶] به مدلسازی مجموعه‌های زنجیری بسط داده شود (شکل ۳) [۹ و ۱۷]. روشن است که یک مدل ساختاری جهانی که بتواند برای همه انواع الیاف سنتزی مورد استفاده قرار گیرد وجود ندارد. گرچه هنوز مسائل حل نشده‌ای وجود دارد، ولی اکنون ساختار فیزیکی و اثر آن بر خواص الیاف به خوبی درک شده است.

کنترل عوامل تعیین کننده

محصول هر فرایند تولیدی را انتخاب مواد اولیه و شرایط فراورش تعیین



شکل ۳- مدل ساختار الیاف حاصل از کوپلی استر نخ مانندزا، برای جزئیات مرجع [۱۷] را ببینید.

مطالب خلاصه‌ای که در اینجا ارائه شد نشان می‌دهد که مهندسی الیاف باید تلاشی واقعا منضبط باشد و از علوم، تکنولوژی و اقتصاد بهره گیرد. هماهنگی موفق در چنین تلاشی نیاز به مدیریتی روشنفکر و جدی دارد. هنوز درک ما کامل نیست و اغلب استفاده از رهیافت تجربی "دانش فنی" به جای "دانش نظری" مورد نظر ضرورت پیدا می‌کند. در هر حال این باور وجود دارد که مهندسی الیاف راهی مستقیم و درست به سوی آینده است.

### مراجع

- 1 Tomka J.G., in "Comprehensive Polymer Science", 2, "Polymer Properties", Edited by C.Booth and C.Price, Pergamon, Oxford, p.487, 1988.
- 2 Hongu T. and Phillips G.O., "New Fibres", Ellis Horwood, Chichester, 1990.
- 3 Horrocks R., *Textile Horizons*, 3 (1), 38, 1983.
- 4 Kawabata S., Postler R. and Niva M. (eds.), *Objective Specification of Fabric Quality, Mechanical Properties and Performance*, Textile Machinery Society of Japan, Osaka, 1982.
- 5 Jayaraman S., *J. Text. Inst.* 81, 185, 1990.
- 6 Van Krevelen D.W., *Properties of Polymers, Correlation with Chemical Structure*, Elsevier, Amsterdam, 1976.
- 7 Morton W.E. and Hearle, J.W.S., *Physical Properties of Textile Fibres*, The Textile Institute/Heinemann, London, 1975.
- 8 Hearle J.W.S., *Polymers and Their Properties, 1: Fundamentals of Structure and Mechanics*, Ellis Horwood, Chichester, 1982.
- 9 Johnson D.J., Tomka J.G. and Karacan I., in Proceedings of the International Conference on Fibre and Textile Science, The Institute of Textile Science, Ottawa, p.93, 1991.
- 10 Prevorsek D.C., Tirpak G.A., Harget P.J. and Reimschuessel A.C., *J. Macromol. Sci-Phys.*, B9, 733, 1974.
- 11 Prevorsek D.C., Butler R.H., Kwon Y.D., Lamb G.E.R. and Sharma R.K., *Text. Res. J.* 47, 107, 1977.
- 12 Dobb M.G., Johnson D.J. and Saville B.P., *J. Polym. Sci.*,

موفقیت در ژل رسی (gel spinning) پلی اتیلن با وزن مولکولی زیاد است. در صورت استفاده از محلول پلیمر با غلظت کم، میزان درهم رفتگی زنجیر کم می‌شود. در نتیجه، نسبت‌های کشش قابل دستیابی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و الیاف حاصل دارای مدول اولیه و استحکام فوق العاده بالایی خواهند بود.

پلیمرهای زنجیری سخت به سهولت در جهت محور لیف آرایش می‌یابند. خواص مکانیکی الیاف حاصل بیشتر به وسیله شقی زنجیر، طول زنجیر و برهم کنشهای جانبی بین زنجیرها تعیین می‌شود [۱۷]. در اینجا مشکل اصلی از بین بردن نقصهاست.

روشن است که کنترل ساختار فیزیکی، به ویژه در مورد الیاف تولید شده از پلیمرهای زنجیری خطی انعطاف پذیر در مهندسی الیاف هنوز مرحله‌ای رضایت بخش نیست و در این زمینه تحقیقات بیشتری مورد نیاز است.

### رابطه بین قیمت و کارایی الیاف

یک لیف جدید تنها در صورتی می‌تواند از نظر تجاری موفق باشد که کارایی آن بتواند قیمت تمام شده‌اش را توجیه کند. باید تاکید کرد که قیمت تمام شده نه تنها شامل بهای مواد اولیه و هزینه‌های فراورش می‌شود، بلکه هزینه‌های تحقیقات، توسعه و بازاریابی را نیز دربر خواهد داشت. علاوه بر این، قیمت الیاف جدید همیشه با ارزیابی اقتصادی مقیاس صنعتی آن (economy of scale factor) تعیین می‌شود.

امروزه پیش‌بینی هزینه تولید در مورد مقیاسی معین با بررسی واحد پیلوت مربوط (pilot plant) امکان پذیر است. به هر حال تعیین ارزش کارایی الیاف به آسانی میسر نیست. داده‌های کمی را تنها می‌توان برای خواص ساده مانند استحکام و شقی به دست آورد [۲۰] ولی آثار شرایط کاربرد نهایی و پایداری الیاف (شکل ۱ را ببینید) نیز باید در نظر گرفته شوند. موفقیت علمی و فنی الیاف جدید موفقیت تجاری آن را تضمین نمی‌کند. درس مهمی را که باید از تجارب پیشین فراگرفت تجزیه و تحلیل الیاف کارآمدی است که در عمل موفقیت چندانی نیافته‌اند [۲۱]. پیش‌بینی شانس موفقیت یک نوع جدید الیاف کار ساده‌ای نیست. به عنوان مثال، مشاهده شده است که صنایع در مورد تجاری کردن الیاف کارآمد که از پلیمرهای بلورم‌ایع گرماگرا (thermotropic liquid crystalline polymers) تولید شده‌اند، در مقیاس حقیقی تردید دارند [۱۴].

### نتیجه گیری

در حال حاضر گرایش به فوق تخصصی شدن کاربرد الیاف وجود دارد. اغلب به مسائل ایجاد شده در اطراف فعالیت اصلی توجه کافی نمی‌شود.

- 421, 1990.
- 18 McIntyre J.E. and Denton M.J. in *"Encyclopedia of Polymer Science and Engineering"*, **6** (edited by Mark H.F. etal), Wiley, New York, p.802, 1987.
- 19 Lemstra P.J., Kirschbaum R., Ohta T. and Yasuda H., in *"Developments in Oriented Polymers"*, **2** (edited by Ward I.M.), Elsevier, London, p.39, 1987.
- 20 Hearle J.W.S. and Du G.W., *J. Text. Inst.*, **81**, 360, 1990.
- 21 Mulder K.F., to be published.
- Polym. Phys. Ed.*, **15**, 2201, 1977.
- 13 Dobb M.G., Johnson D.J. and Saville B.P., *J. Polym. Sci., Polym. Symposia*, **58**, 237, 1977.
- 14 Tomka J.G., *Textile Month*, P.41, August 1989.
- 15 Erdemir A.B., Johnson D.J., Karacan I., and Tomka J.G., *Polymer*, **29**, 597, 1988.
- 16 Johnson D.J., Karacan I. and Tomka J.G., *Polymer*, **31**, 8, 1990.
- 17 Johnson D.J., Karacan I. and Tomka J.G., *J. Text. Inst.*, **81**,