



الیاف

بررسی خواص استحکامی لایه نانولیفی دارای اتصالات بین الیاف

پریا اردلانی^۱ / مریم یوسفزاده^۱

چکیده

محصول فرآیند الکترووریسی به طور معمول لایه‌ای نانولیفی است که دارای خواص استحکامی مشخصی تابع نوع ماده، مورفولوژی و ساختار آن است. ویژگی‌های مکانیکی نانوالیاف از جمله میزان استحکام کششی با توجه به کاربرد نهایی بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش جهت افزایش خواص کششی لایه، پس از تولید لایه نانولیفی از پلیمر پلی‌اکریلونیتریل (PAN)، روشه‌ای غوطه‌وری در سامانه حلالی DMF، لایه‌نشانی دورانی و الکتروپاشی پلی‌وینیل استات (PVAc) بر روی لایه برای ایجاد اتصالات بین نانولیفی انجام شد و خواص استحکام کششی آنها مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه ۵ ثانیه غوطه‌ور شده در سامانه حلالی DMF، نمونه لایه‌نشانی دورانی خشک شده در آن و نمونه الکتروپاشی فیوز شده به ترتیب استحکام تا حد پارگی ۱۷۶ درصد، ۸۶ درصد و ۸۸ درصد افزایش یافت. کمترین کاهش کرنش مربوط به نمونه‌های الکتروپاشی (۱ درصد) و بیشترین مدول مربوط به نمونه ۵ ثانیه غوطه‌وری در سامانه حلالی DMF بود (۱۶۱ درصد)

۱-مقدمه

الکترووریسی یک روش به نسبت آسان و در عین حال کارآمد برای تولید نانوالیاف با سطح مخصوص و تخلخل بالا، اتصال زیاد منافذ لایه و وزن سبک است و در سال‌های اخیر در زمینه‌های مختلف از جمله فیلترهای تصفیه آب، مهندسی بافت، حسگرها، رگ‌های مصنوعی و پوشاک محافظ مورد استفاده قرار گرفته است. در بیشتر این کاربردها، پایداری مکانیکی داربست‌های نانولیفی با انعطافپذیری و مقاومت بالا حائز اهمیت است.

یکی از مؤثرترین روش‌ها برای بهبود یکپارچگی و مقاومت مکانیکی لایه الکترووریسی شده، ایجاد نقاط اتصال لیف با لیف درون لایه و افزایش مقاومت آن است. با وجود مطالعات مربوط به نوع ماده، تغییر شکل، جهت‌گیری، هندسه و اندازه الیاف که اثرات قابل توجهی بر خواص مختلف مکانیکی نانوالیاف و سازه متشکل از آن دارد، در مورد نحوه اثر اتصال لیف با لیف اطلاعات زیادی در دسترس نیست. در این راستا در این تحقیق جهت افزایش استحکام کششی و مدول الاستیک لایه نانوالیاف با حفظ بیشینه انعطاف‌پذیری، چند روش عملیات تکمیلی بر روی لایه بعد از الکترووریسی و نیز در حین آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

۲- اصول تجربی

برای تهیه نانوالیاف از پلیمر پلی‌اکریلونیتریل (PAN) با وزن مولکولی ۱۰۰,۰۰۰ گرم بر مول، حلال دیمتیل فرم‌امید (DMF)، پلیمر پلی‌وینیل استات (PVAc) و حلال استیک اسید استفاده شد. جهت آماده‌سازی محلول الکترووریسی پایه ۱۵ درصد، ۰/۷۵ گرم از پلیمر پلی‌اکریلونیتریل به ۵ سی سی حلال DMF افزوده شد و برای ۲۴ ساعت با همزن مغناطیسی همزده شد.

۳۰ میلی لیتر سامانه حلالی حاوی ۷۰ درصد DMF آماده شد. جهت آماده‌سازی ۵ میلی لیتر محلول PVAc ۷ درصد وزنی وزنی، ۰/۳۵ گرم از گرانول پلی‌وینیل استات در ۲/۳ میلی لیتر استیک اسید و ۲/۳ میلی لیتر آب مقطر برای ۱ ساعت با همزن مغناطیسی همزده شد.

محلول PAN به سرنگ الکترووریسی منتقل و الکترووریسی با نرخ تغذیه ۰/۳ میلی لیتر

بر ساعت و ولتاژ اعمالی ۲۰ کیلو ولت در فاصله ۱۶ سانتی‌متر انجام شد.

به منظور ایجاد اتصالات بین لیفی لایه تولید شده به مدت زمان ۵، ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه در سامانه حلالی DMF غوطه‌ور شد. همچنین با استفاده از روش پوشش‌دهی دورانی، محلول ۷ درصد پلی‌وینیل استات بر روی لایه اولیه لایه‌نشانی شد.

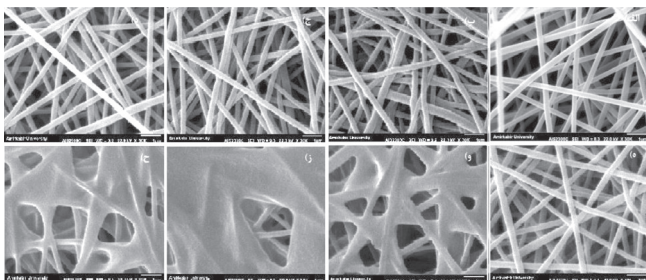
جهت اضافه کردن نانوذرات PVAc به ساختار لایه نانولیفی، الکترووریسی همزمان محلول PAN و الکتروپاشی محلول PVAc انجام شد. شرایط الکتروپاشی محلول پلی‌وینیل استات با نرخ تغذیه ۰/۳ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ اعمالی ۵ کیلو ولت در فاصله ۱۲ سانتیمتر تنظیم شد.

نمونه‌هایی که در تولید آنها از محلول پلی‌وینیل استات استفاده شد با استفاده از دو روش مختلف در آن ۶۰ درجه سلسیوس و فیوزینگ ۶۰ درجه سلسیوس در فشار ۲ بار خشک شد.

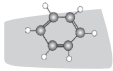
جهت بررسی ساختار سطحی و مورفولوژی لایه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و برای انجام آزمون استحکام کششی از دستگاه اینسترون استفاده شد و برای هر نمونه کمینه ۵ بار تکرار شد و نتایج مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

در بررسی استحکام نانوالیاف، یکنواختی آنها و عدم وجود عیوب ساختاری بسیار



شکل ۱- تصویر SEM از لایه نانوالیاف PAN (الف) نمونه خام، (ب) ۵ ثانیه غوطه‌وری در سامانه حلالی DMF، (ج) ۶۰ ثانیه غوطه‌وری در سامانه حلالی DMF، (د) ۱۲۰ ثانیه غوطه‌وری در سامانه حلالی DMF، (ه) الکترووریسی و الکتروپاشی همزمان خشک شده در آن، (و) الکترووریسی و الکتروپاشی همزمان فیوز شده، (ز) لایه‌نشانی فیوز شده و (ح) لایه‌نشانی خشک شده در آن.



نمودارهای میانگین شکل ۲، استحکام تا حد پارگی کلیه نمونه‌ها نسبت به نمونه خام (الف) افزایش یافته است.

در نمونه‌های (ب) تا (ج) در ثانیه‌های ابتدایی غوطه‌وری حلال الیاف را متورم و نرم می‌کند و اتصال بین لیفی شکل می‌گیرد. بیشترین بهبود استحکام تا حد پارگی مربوط به نمونه‌های غوطه‌وری در حلال است که نکته قابل توجه عدم کاهش کرنش در این نمونه‌هاست.

به عبارتی در عین حفظ انعطاف‌پذیری و کشسانی، استحکام تا ۱۷۶ درصد افزایش یافته است. در نمونه (ب) مقدار مدول الاستیک بیش از سه برابر شده است. در نمونه‌های غوطه‌وری با افزایش زمان غوطه‌وری به ۶۰ ثانیه استحکام به نسبت در این نمونه‌ها کاهش داشته است. پس از ۱۲۰ ثانیه غوطه‌وری میزان استحکام تا حد پارگی نسبت به نمونه ۵ ثانیه کاهش یافته ولی همچنان از لایه خام بیشتر است. در نمونه‌هایی که همزمان با الکتروپاشی آنها الکتروپاشی محلول PVAc انجام شده است، شیب اولیه نمودار که نشان‌دهنده مقاومت اولیه لایه در برابر کشش است، نیز افزایش یافته است.

دلیل این پدیده حضور ذرات الکتروپاشی شده PVAc در میان الیاف الکتروپاشی شده است. با حرارت دادن به لایه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، این ذرات پلیمری ذوب شده و اتصالات بین لیفی را ایجاد کرده است. با توجه به الکتروپاشی هم‌زمان با الکتروپاشی، ذرات به صورت یکنواخت در میان لایه الیاف قرار گرفته است و تشکیل لایه فیلم‌های ناحیه‌ای نداده است.

درصد کرنش در این نمونه‌ها نیز تغییر محسوسی نکرده است ولی میزان افزایش استحکام آنها کمتر از نمونه‌های غوطه‌وری است. در مقایسه دو نمونه لایه‌نشانی شده (ز ح)، هر دو نمونه نسبت به لایه خام اولیه به ترتیب افزایش ۵۵ و ۸۶ درصدی استحکام داشته است.

دلیل این پدیده حضور PVAc در ساختار لایه و ایجاد اتصالات بین لیفی است که باعث افزایش مقاومت کششی لایه شده است. با گرم کردن لایه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، PVAc ذوب شده و سبب ایجاد نتایج کمی در جدول (۱) خلاصه شده است. با غوطه‌وری لایه تولید شده PAN در سامانه حلالی DMF، در سه زمان ۵، ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه استحکام تا حد پارگی به ترتیب ۱۷۶، ۱۳۱ و ۷۶/۶ درصد افزایش داشت. با لایه‌نشانی محلول PVAc بر روی لایه PAN بر اساس روش خشک کردن، کرنش در مقایسه با نمونه خام، در نمونه خشک شده با آن ۵۴ درصد و در نمونه فیوز شده ۷۰ درصد کاهش نشان داد.

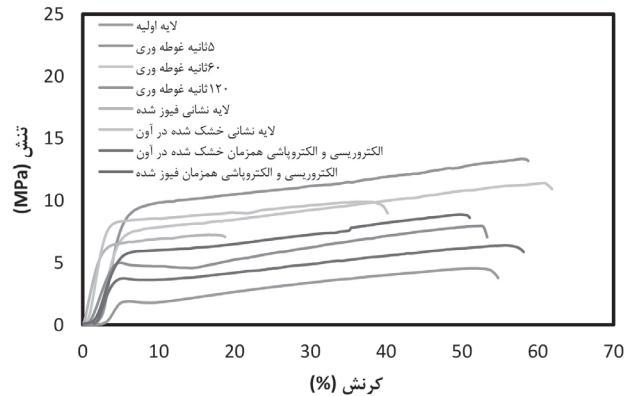
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سه روش مختلف جهت ایجاد اتصالات بین لیفی به هدف افزایش استحکام لایه و حفظ انعطاف‌پذیری استفاده شد.

بر طبق نتایج، غوطه‌وری در سامانه حلالی DMF به مدت ۵ ثانیه دارای بهترین اثر بود. ضمن سادگی و سهولت در اجرای این روش، این نمونه دارای بیشترین استحکام تا حد پارگی و مدول الاستیک در کنار کمترین تغییرات در کرنش نسبت به لایه اولیه بود. همچنین ساختار و مورفولوژی لایه ۵ ثانیه غوطه‌ور شده در سامانه حلالی DMF در مقایسه با لایه اولیه و تخلخل آن تغییر محسوسی نکرده است.

پی‌نوشت

۱- دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر



شکل ۲- نمودار تنش-کرنش لایه اولیه، ۵، ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه غوطه‌وری در سامانه حلالی DMF، الکتروپاشی و الکتروپاشی هم‌زمان خشک شده در آن و فیوز شده، لایه‌نشانی خشک شده در آن و فیوز شده.

مهم است، چراکه عیوبی مثل دانه تسبیحی می‌تواند باعث تمرکز تنش در ساختار و کاهش استحکام شود. تصاویر SEM نمونه PAN و سایر نمونه‌هایی که در مراحل تکمیلی مورد عملیات پوشش دهی قرار گرفتند، در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج حاکی از یکنواختی نانوالیاف و عدم وجود اشکالات ساختاری در لایه‌هاست. قطر نانوالیاف 285 ± 30 PAN است و این مقدار در نمونه (ب) حدود ۲۰ درصد افزایش و در نمونه‌های (ج) و (د) به ترتیب $2/75$ و $5/73$ درصد کاهش نشان داد. در نمونه‌های لایه‌نشانی (ز ح) به ترتیب ۳۰ و ۲۸ درصد افزایش نشان داد. با الکتروپاشی محلول PVAc هم‌زمان با الکتروپاشی محلول PAN میانگین قطر نانوالیاف در لایه خشک شده با آن تغییر نکرد و در لایه فیوز شده ۲۶ درصد افزایش نشان داد. غوطه‌وری در سامانه حلالی باعث تغییر جزئی در مورفولوژی سطحی و زبری بیشتر آن شده است. (ب د) سه نمونه‌ای که در سامانه حلالی قرار گرفتند اتصال مشهودی در نقاط برخورد با یکدیگر نشان نمی‌دهند و ساختار ظاهری حفظ شده است. مدت زمان غوطه‌وری نیز تغییر چندانی در ظاهر نانوالیاف نداشته و ساختار حفظ شده است.

در نمونه (ه) که الکتروپاشی و الکتروپاشی هم‌زمان انجام شده است، در لایه‌هایی بین نانوالیاف حضور نانوذرات پلیمر دوم مشهود است، مزیت این روش قرارگیری عامل اتصال در تمام لایه‌هاست. بعد از عملیات فیوزینگ، به دلیل وجود عامل فشار، حضور پلیمر اتصال‌دهنده در سطح مشخص شده و ذرات به شکل فیلم درآمده‌اند (و) در نمونه‌هایی که پلیمر اتصال‌دهنده به روش پوشش سطحی روی لایه قرار گرفته است (ز ح)، حضور آن در هر دو روش خشک شدن مشهود است. در این نمونه‌ها تخلخل و تنفس‌پذیری لایه به شدت کاهش پیدا کرده است که خود در استفاده آن ایجاد محدودیت می‌کند.

تمام نمونه‌ها تحت آزمایش استحکام کششی قرار گرفتند. طبق نتایج مندرج در

جدول ۱- نتایج آزمایش استحکام کششی نمونه‌های مورد بررسی.

کد نمونه	استحکام تا حد پارگی (MPa)	کرنش تا حد پارگی (%)	مدول الاستیک (MPa)
الف) لایه اولیه	$4/54 \pm 0/75$	$53/11 \pm 8/31$	$0/18 \pm 0/20$
ب) ۵ ثانیه غوطه‌وری در سامانه حلالی	$12/67 \pm 1/88$	$50/30 \pm 13/90$	$2/81 \pm 0/35$
ج) ۶۰ ثانیه غوطه‌وری در سامانه حلالی	$10/58 \pm 1/53$	$47/37 \pm 15/17$	$0/51 \pm 0/09$
د) ۱۲۰ ثانیه غوطه‌وری در سامانه حلالی	$8/09 \pm 0/97$	$52/29 \pm 12/05$	$1/56 \pm 0/16$
ه) الکتروپاشی و الکتروپاشی هم‌زمان خشک شده در آن	$6/28 \pm 0/76$	$52/08 \pm 7/76$	$1/47 \pm 0/02$
و) الکتروپاشی و الکتروپاشی هم‌زمان فیوز شده	$8/65 \pm 0/79$	$52/45 \pm 11/1$	$1/76 \pm 0/22$
ز) لایه‌نشانی فیوز شده	$7/10 \pm 0/63$	$16/08 \pm 5/41$	$2/68 \pm 0/34$
ح) لایه‌نشانی خشک شده در آن	$8/54 \pm 1/52$	$24/70 \pm 14/26$	$3/02 \pm 0/64$