

افزایش عمق رنگی الیاف پلی‌استر عمل‌آوری شده با باریکه‌ی لیزر

سعید بهروزی نیا*^۱، کامران خراسانی^۱، کاوه سیلاخوری^۱، مجید فرهمندجو^۲

۱. پژوهشکده‌ی فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳-۱۴۳۹۹۵۱۱، تهران - ایران

۲. گروه شیمی، دانشکده‌ی شیمی دارویی، علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۱۱-۱۹۱۳۶۷۴۷، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۹/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۶/۲۶

چکیده: الیاف پلی‌استر به خاطر دارا بودن ضریب شکست بالا و سطح صاف، مقدار زیادی از نور را از سطح خود منعکس می‌کند و از این رو فرایند رنگرزی این الیاف با رنگ‌های تیره به ویژه مشکی به آسانی صورت نمی‌گیرد. میزان بازتاب سطحی نسبتاً بالای ریزالیاف پلی‌استر سبب می‌شود که نسبت به الیاف پلی‌استر متعارف کم‌رنگ‌تر دیده شود، بنابراین برای رسیدن به عمق‌رنگی مشابه، به مقدار رنگ بیش‌تری نیاز است. در این پژوهش ایجاد زبری سطحی با استفاده از عمل‌آوری با باریکه‌های لیزر به عنوان روشی نوین و دوست‌دار محیط زیست در افزایش عمق رنگی و حصول افزایش رنگ در فام مشکی در رنگرزی پارچه‌های پلی‌استر مورد بررسی قرار گرفته است. برای پرتودهی نمونه‌ها از پرتوهای لیزر آرگون فلورید استفاده شد و نمونه‌هایی به منظور ارزیابی تأثیر تعداد تپ‌های پرتودهی، انجام پرتودهی قبل یا بعد از رنگرزی تهیه شد. تغییرهای ایجادشده در عمق رنگی نمونه‌ها با بررسی ریخت‌شناسی سطح به‌وسیله‌ی ریزنگاره‌های میکروسکوپی الکترون روبشی و شاخص بلورینگی و اندازه‌ی بلورینه‌ی الیاف از طریق پراش پرتو ایکس تحلیل شد. داده‌های طیفی نشان داد که در اثر افزایش تعداد تپ‌های پرتودهی، بازتاب در ناحیه‌های مختلف طیف انعکاسی کاهش می‌یابد. بالاترین عمق رنگی در فام مشکی الیاف در تعداد بهینه‌ی تپ ۱۵ حاصل شد.

کلیدواژه‌ها: الیاف پلی‌استر، عمق رنگی، عمل‌آوری با باریکه‌ی لیزر

Increasing of the color depth in polyester fiber treated with laser beam

S. Behrouzinia*¹, K. Khorasani¹, K. Silakhori¹, M. Farahmandjou²

1. Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399511-13, Tehran-Iran

2. Department of Chemistry, Faculty of Pharmaceuticla Chemistry, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, P.O.Box: 19136747-11, Tehran-Iran

Abstract: Due to the high refractive index and smooth surface of Polyester fibers, a significant fraction of the incident light is reflected from their surfaces. Thus, dyeing of these fibers with dark colors, mainly black, makes it a difficult tasks. High surface reflectance of Polyester microfibers reveals that appearance of these fibers is seen paler in consequently comparison to the conventional polyester fibers, and consequence it is required to use a latge amount of color to obtain the same color depth. In this study, upon creating surface roughness by laser beams treatment, as a new and environmental friendly method, was investigated to increase the dark color depth in the dyeing of polyester fabrics. An Argon Fluoride laser was used for the irradiation of the samples. The samples were prepared for evaluating the effects of the number of laser pulses, radiation before and after dyeing. The changes in the color depth of samples were analyzed through surface morphology with SEM images, and crystallinity index and crystal size with X-Ray diffraction. The results from spectra data showed that the reflection at different areas of the reflectance spectrum was reduced by increasing the number of laser pulses irradiation. The maximum deep shade in the black chromic of polyester fiber was achieved at the optimum value of 15 laser pulses.

Keywords: Polyester fiber, Color depth, Laser beam treatment

*Email: sbehrouzi@aioi.org.ir

۱. مقدمه

پلی استر و هم‌چنین عدم وجود گروه‌های با قابلیت جذب رنگزا، رنگرزی این الیاف عمدتاً تنها با رنگزاهای پاشیده^۱ صورت می‌گیرد. رنگزای پاشیده مهم‌ترین طبقه از رنگزاهای هستند که برای رنگرزی پلی‌استرها به کار برده می‌شوند و طیف وسیعی از فام‌های رنگی را با قدرت رنگی خوب و ثبات کافی که برای اکثر مصارف مناسب است به وجود می‌آورند. انحلال‌پذیری رنگزاهای پاشیده در آب، کم است ولی با افزایش دما این انحلال‌پذیری افزایش می‌یابد. عمق رنگی پارچه‌های رنگرزی شده تحت تأثیر غلظت رنگزا و خاصیت‌های نوری الیاف قرار دارد. اندازه‌ی ضریب شکست الیاف در حصول رنگ با عمق بالاتر از اهمیت خاصی برخوردار است [۶]. با افزایش ضریب شکست الیاف، نور در اثر برخورد با سطح لیف بیش‌تر بازتاب می‌یابد و این باعث می‌شود عمق رنگی الیاف کاهش یابد. کاهش ضریب شکست به اندازه‌ی ۰٫۱، نرخ بازتاب را در زاویه‌های کم‌تر از ۴۵° تا ۱/۴٪ کاهش می‌دهد [۷]. الیاف پلی‌استر به علت دارا بودن ضریب شکست بالا (در حدود ۱٫۷۲) و سطح صاف، مقدار زیادی از نور را از سطح خود بازتاب می‌دهد. براساس معادله‌های فرنل که بیان‌گر دامنه‌های موج‌های بازتاب و شکست در اثر عبور موج فرودی از مرز بین دو محیط است، الیاف پلی‌استر بازتاب سطحی در حدود ۷٫۱٪ در مرز هوا/ پلی‌مر دارد. بنابراین رنگرزی پلی‌استر با رنگ‌های تیره به ویژه مشکی یا فرارنگی (استفاده از غلظت‌های بالای رنگزا) مشکل است [۸]. روش دیگر برای افزایش عمق رنگی الیاف پلی‌استر، ایجاد زبری سطحی در این الیاف است که از طریق پدیدار تداخل تخریبی، بازتاب سطحی نور کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین می‌توان از روش‌های شیمیایی اصلاح سطح از جمله هیدرولیز قلیایی و استفاده از ریزذره‌های سیلیکا و روش‌های فیزیکی اصلاح سطح مانند تابش فرابنفش/ ازن، پلاسما و باریکه‌ی لیزر به منظور ایجاد زبری سطح استفاده نمود [۹]. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از فناوری لیزر در اصلاح سطح پلی‌مرها در مقایسه با روش‌های شیمیایی متداول مزیت‌هایی چون انجام عملیات در محیط خشک و دمای پایین، آسیب کم‌تر به خاصیت‌های فیزیکی و مکانیکی کالا، عدم تولید پساب و حفظ محیط زیست، صرفه‌ی اقتصادی

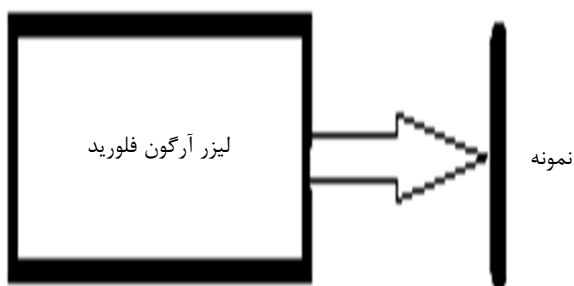
به‌کارگیری فرایندهای شیمیایی در صنعت نساجی همواره با مصرف زیاد انرژی، آب و مواد شیمیایی همراه بوده و از طرف دیگر حجم بالایی از مواد آلاینده و محصول‌های سمی را وارد محیط زیست می‌کند. بنابراین بهره‌گیری از فرایندهای تکمیلی خشک (بدون استفاده از آب و مواد شیمیایی) با کم‌ترین میزان تولید پساب به منظور اصلاح سطح‌های الیاف برای کسب قابلیت رنگرزی، افزایش چسبندگی، جذب رطوبت، رسانندگی الکتریکی و بهبود ظاهر رنگی، در حال حاضر از اولویت‌های صنعت نساجی به حساب می‌آید [۱، ۲]. در دهه‌های اخیر تحول‌های بزرگی در ابداع روش‌های مختلف به‌منظور بهبود و تغییر خواص سطحی مواد ایجاد شده است [۳، ۴]. ویژگی مهم و اساسی این روش‌ها براساس امکان تغییر خواص الیاف بدون تغییر در خواص توده‌ی ماده است. یکی از روش‌های نوین در این حوزه، استفاده از باریکه‌های لیزر است. باریکه‌های لیزر قادرند بدون استفاده از آب و مواد شیمیایی، خواص الیاف را به صورت فیزیکی و بدون تغییر خواص توده‌ی الیاف تحت تأثیر قرار دهند. این روش از آن‌جا که فاقد آلودگی زیست محیطی است و اثرگذاری آن تنها محدود به سطح الیاف است به عنوان جای‌گزینی برای فرایندهای مرطوب مطرح شده و توجه پژوهش‌گران را در سال‌های اخیر به خود جلب نموده است [۳، ۴]. هم‌اکنون الیاف پلی‌استر جای‌گاه اول را از نظر میزان تولید در میان الیاف مصنوعی به خود اختصاص داده و سهم آن از کل تولید جهانی الیاف هم‌چنان رو به افزایش است. معروف‌ترین و کاربردی‌ترین عضو از خانواده‌ی پلی‌استرها، پلی‌اتیلن ترفتالات است که از پلی‌مری شدن تراکمی الکل دو عاملی اتیلن گلیکول و اسید دوعاملی ترفتالیک اسید به دست می‌آید. پلی‌استرها به صورت یک پلی‌مر تراکمی حاوی گروه‌های استری در زنجیره تعریف می‌شوند که این واحدهای استری اصولاً پیوند اصلی زنجیرهای پلی‌مری را تشکیل می‌دهند. به‌طور کلی در اثر واکنش یک کربوکسیلیک اسید دو عاملی با یک دیول دو عاملی، پیوند استری تولید می‌شود و با پیشروی این واکنش‌ها پلی‌استر به‌وجود می‌آید [۵]. این الیاف وقتی برای مدت طولانی در معرض نور آفتاب قرار گیرد مقاومت خود را تا حدودی از دست می‌دهد و این امر به دلیل جذب پرتوهای فرابنفش است. به علت ساختار متراکم الیاف

1. Dispersed

۲. ترتیب آزمایشی

از پرتوهای لیزر اگزایمر آرگون فلورید با طول موج ۱۹۳ nm مدل LPX200 (LAMBDA PHYSIK) برای ایجاد تله‌های نوری و افزایش زبری سطح الیاف پلی استر به منظور افزایش عمق رنگی در فام مشکی استفاده شده است. نرخ تکرار ۱ Hz و پهنای تپ لیزر ۱۵ ns است. ترتیب آزمایشی در شکل ۱ آورده شده است. پرتو لیزر به طور مستقیم و بدون استفاده از عدسی و در محیط هوا در مساحتی حدود $2 \times 2 \text{ cm}^2$ بر روی نمونه‌ها با شاریدگی 40 mJ cm^{-2} تابانده می‌شود.

نمونه‌های پارچه‌ای پلی استر، قبل و بعد از رنگرزی، با تعداد متفاوت تپ‌های باریکه‌ی لیزر پرتو دهی شدند. پس از پرتو دهی، ریخت‌شناسی سطح الیاف به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) مدل ایکس ال -۳۰ (فیلیپس) و ساختار داخلی الیاف به وسیله‌ی دستگاه پراش پرتو ایکس مدل اکسپرت-ام پی دی (فیلیپس) مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین دستگاه رنگرزی آزمایشگاهی پلی مت مدل آهیبا-۱۰۰۰ (دیتا کالر)²، دستگاه طیف‌سنج تبدیل فوریه‌ی زیرقرمز (FTIR-ATR) مدل بومم ام بی-۱۰۰ (هارتمن براون)⁴ و میکروسکوپ نوری مدل سی اس ام-۷۰۰ (سی اس ام)⁵ استفاده شد. برای این کار از پلی استر کرپ با ویژگی‌های چگالی 1.02 gm^{-3} ، نمره‌ی نخ تار ۱۵۸/۹۶ و نمره‌ی نخ پود 1 den filament ۱۵۳/۹۶، تراکم نخ تار 54 inch^{-2} ، تراکم نخ پود 33 inch^{-2} ، طرح بافت تافته و به ضخامت 0.23 mm استفاده شد.



شکل ۱. ترتیب آزمایشی استفاده شده.

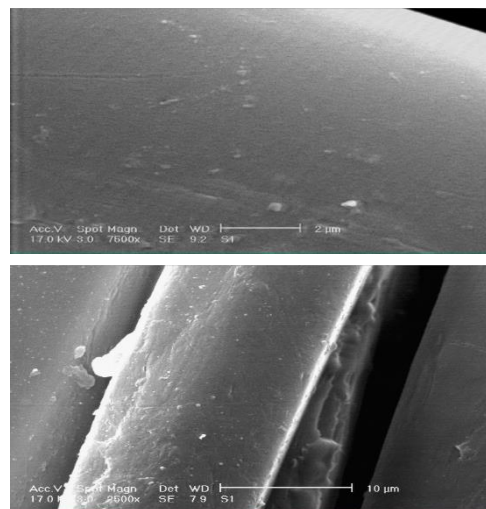
و ایمنی بالا دارد [۱۰]. تجزیه‌ی نورشیمیایی پیوندهای شیمیایی از طریق جذب مستقیم فوتون‌های لیزر و تخریب نورگرمایی به عنوان دو سازوکار اصلی تغییر سطح‌های پلی مری که در معرض تابش لیزر قرار می‌گیرند شناخته شده است. مقدار نقش این دو پدیدار در یک پلی مر معین بستگی به طول موج لیزر، شار، تعداد تپ باریکه‌ی لیزر، بسامد و پهنای زمانی تپ باریکه‌ی لیزر دارد [۱۱]. طیف خروجی لیزرهای اگزایمر در ناحیه‌ی فرابنفش می‌افتد که در آن فوتون‌ها از انرژی بالایی برخوردارند و در ضمن اثرهای گرمایی ناچیز دارند؛ از طرفی اکثر پلی مرها از جمله پلی استرها در این ناحیه‌ی طیفی (حدود ۱۵۰ تا 300 nm) جذب خیلی بالایی دارند و لیزرهای اگزایمر را به خوبی جذب می‌کنند که این باعث تغییر در ساختار داخلی ماده می‌شود. جذب فوتون‌های پرانرژی لیزر اگزایمر توسط پلی مر باعث تحریک پیوندهای شیمیایی به سطوح انرژی بالاتر از انرژی تفکیک شده و موجب بریدگی زنجیره‌ی پلی مری و شکستن پیوندهای شیمیایی می‌شود. این پدیدار به کندی نور تجزیه‌ای معروف است [۱۰]. تغییرات سطحی ایجاد شده به وسیله‌ی لیزرهای اگزایمر در الیاف پلی مری شامل ساختارهای موجی شکل و لوله‌ای شکل در مقیاس میکرومتر است که تأثیرات قابل توجهی روی خواص اصلی الیاف از قبیل قابلیت چسبندگی ذره‌ها و پوشش‌ها، خواص ترشوندگی و ظاهر نوری دارند [۱۲]. مطابق با نظریه، ایجاد ساختار موجی شکل در پلی مر به وسیله‌ی لیزر اگزایمر بر پایه‌ی اختلاف ضریب جذب بین ناحیه‌های آمورف و بلوری در الیاف پلی مری است که سبب اختلاف در نرخ کندی بین این دو ناحیه می‌شود. در نتیجه یک ساختار سطحی زبر بر روی پلی مر ایجاد می‌شود [۱۳].

در این مقاله اثر پرتوهای لیزر اگزایمر از نوع آرگون فلورید با طول موج ۱۹۳ nm بر تغییرات عمق رنگی و حصول عمق رنگی بالا در فام مشکی پارچه‌های پلی استر مورد توجه قرار گرفته است. به منظور تعیین شرایط بهینه برای حصول عمق رنگی بالا در فام مشکی، تعداد متفاوت تپ‌های پرتو دهی و انجام پرتو دهی قبل و بعد از رنگرزی نیز بررسی شده است.

1. (Philips) XL30
2. (Philips) XPERT-MPD
3. (Data Color) Ahiba 1000
4. Hartman Braun BOMEM MB-100
5. (CSM) CSM 700

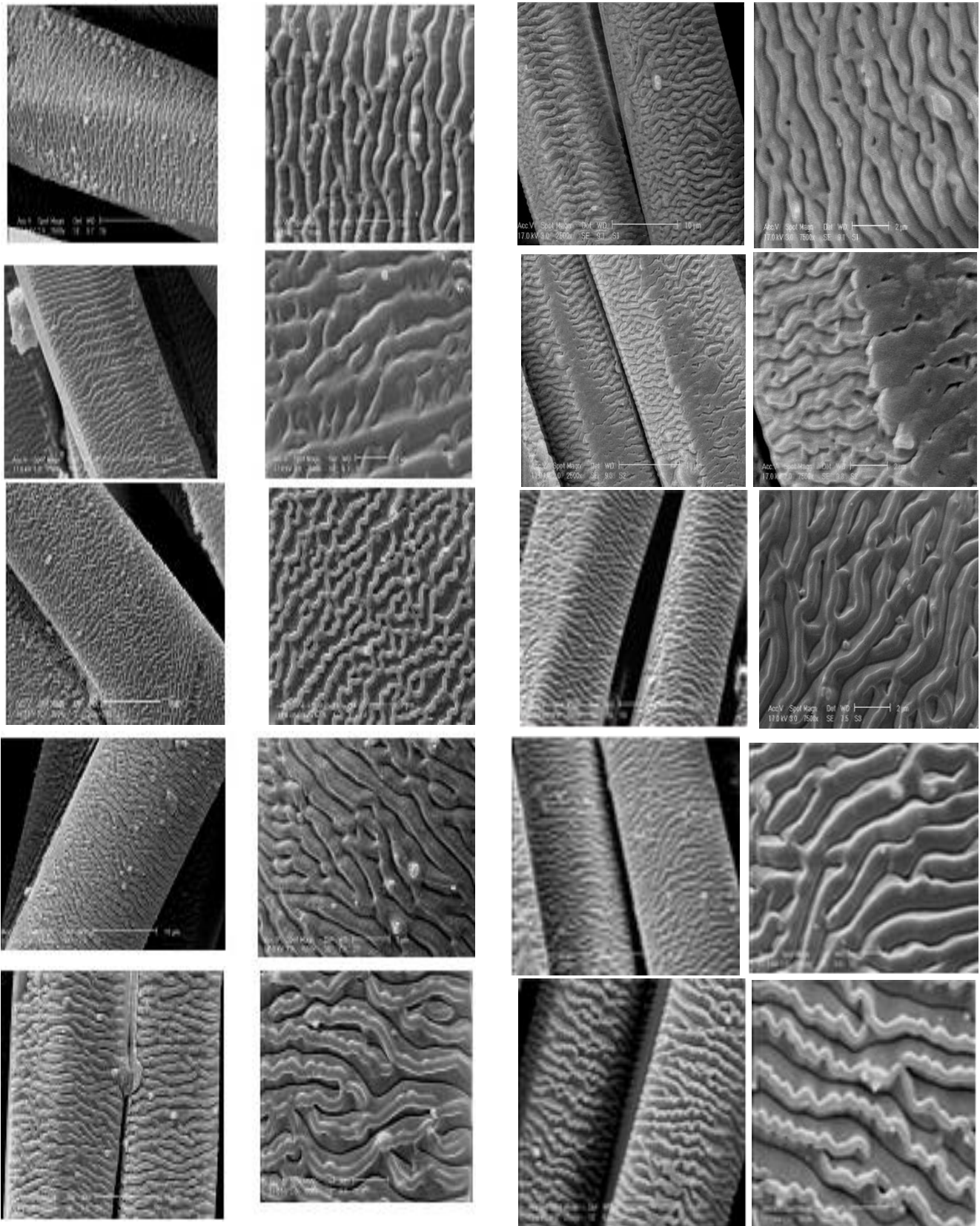
۳. انجام آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور برطرف کردن روغن‌های ریسندگی و ناخالصی‌های احتمالی، پارچه‌های پلی‌استر در محلول 2 g L^{-1} شوینده‌ی نانیونیک (مرک) با نسبت مایع به کالای ۵۰:۱ در دمای 40°C به مدت ۲۰ دقیقه شستشو داده شده و سپس با آب سرد آبکشی و در دمای محیط بدون اعمال تنش خشک شدند. پارچه‌ها با ابعاد $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ در فاصله‌ی ۲ m از چشمه‌ی پرتو لیزر تحت زاویه‌ی 90° قرار گرفتند. اندازه‌ی شاریدگی لیزر 40 mJ cm^{-2} بود و نمونه‌ها تحت تابش لیزر با تعداد تپ‌های متفاوت (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، و ۴۰) پرتودهی شدند. بررسی تصویرهای میکروسکوپ نوری الیاف پلی‌استر پرتودهی‌شده نشان داد که برای تعداد تپ‌های کم‌تر از ۵ و شاریدگی لیزری کوچک‌تر از 40 mJ cm^{-2} هیچ میکروساختار زبری در سطح الیاف به وجود نمی‌آید. به منظور بررسی تأثیر تعداد تپ‌های پرتولیزر و انجام پرتودهی قبل و بعد از رنگرزی بر ریخت‌شناسی سطح الیاف پلی‌استر از میکروسکوپ الکترون روبشی استفاده شد. شکل ۲ ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون روبشی (SEM) الیاف پلی‌استر پرتوندیده را در بزرگ‌نمایی‌های ۲۵۰۰ و ۷۵۰۰ نشان می‌دهد. این شکل شبیه تصویرهای مربوط به نمونه‌هایی است که تحت تابش لیزر با تعداد تپ‌های کم‌تر از ۵ و شاریدگی لیزری کوچک‌تر از 40 mJ cm^{-2} قرار گرفته باشند. این تصویرها نشان می‌دهد که الیاف پلی‌استر پرتوندیده دارای سطحی نسبتاً صاف است هر چند قطعه‌های کوچکی بر سطح الیاف دیده می‌شود که احتمالاً به دلیل حذف ناکافی مواد شیمیایی در عملیات شستشو از سطح الیاف است.



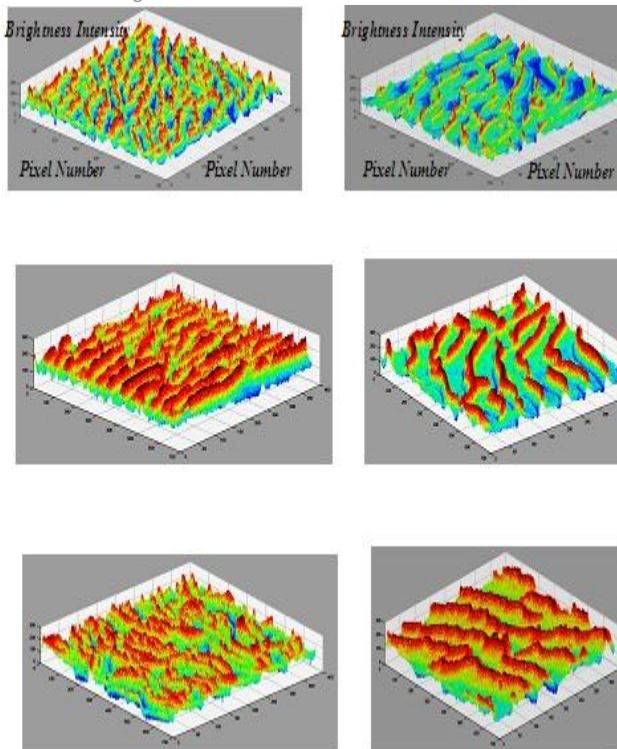
شکل ۲. ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون روبشی (SEM) الیاف پلی‌استر پرتوندیده با بزرگ‌نمایی‌های ۷۵۰۰ (بالا) و ۲۵۰۰ (پایین).

در شکل ۳ ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون روبشی (SEM) الیاف پلی‌استر پرتودهی‌شده با تعداد متفاوت تپ‌های تابش لیزر قبل از رنگرزی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در اثر پرتودهی نمونه‌ها با لیزر، تغییرهای قابل توجهی در ریخت‌شناسی سطح الیاف نسبت به نمونه‌ی پرتوندیده به وجود آمده است، به طوری که شیارها، حفره‌ها، ساختارهای شبکه‌ای و ساختارهای موجی تناوبی در سطح الیاف به وجود آمده است. این مشاهده‌ها به دلیل اختلاف ضریب جذب نواحی آمورف و بلوری الیاف پلی‌استر است که سبب اختلاف در نرخ کندگی بین این دو ناحیه و ایجاد ساختارهای شبکه‌ای و ساختارهای موجی تناوبی در ابعاد میکرومتر بر سطح الیاف شده است [۱۳]. با افزایش تعداد تپ‌های باریکه از ۵ به ۱۵، شیارهای ایجاد شده بر سطح الیاف به شکل حفره‌های عمیق و کم‌عرض در آمده و لیزر با سازوکار نورشیمیایی همانند مته‌های سوراخ‌کاری ایفای نقش نموده که سبب افزایش عمق حفره‌ها شده است. با ادامه‌ی روند افزایش تعداد تپ‌های پرتودهی از ۱۵ به ۴۰، سازوکار نورگرمایی لیزر ایفای نقش نموده است که سبب کاهش عمق نفوذ پرتو به درون الیاف و ایجاد کانال‌های افقی عریض در سطح الیاف شده است [۱۳]. با افزایش شاریدگی و یا تعداد تپ‌ها یک گذار ساختاری بین سطح‌های زبر و ناصاف و سطح‌های نرم و صاف رخ می‌دهد، به طوری که با افزایش تعداد تپ‌ها، مقدار چگالی انرژی جذب‌شده در الیاف بیش‌تر شده است به طوری که باعث ذوب موضعی سطح شده و در اثر تخریب گرمایی حالت ناصافی پلی‌مر به حالت صاف در آورده شده است. البته این عمل در تعداد تپ‌های بیش‌تر صورت گرفته است. در شکل ۴، تصویرهای SEM الیاف پلی‌استر پرتودهی‌شده با تعداد متفاوت تپ‌های باریکه‌ی لیزر بعد از عملیات رنگرزی نشان داده شده است. در شکل ۴، مشاهده می‌شود با افزایش تعداد تپ‌های باریکه از ۵ به ۱۵ تعداد حفره‌ها و شبکه‌ای شدن ساختارهای زبر در سطح الیاف افزایش یافته است. با ادامه‌ی روند افزایش تعداد تپ‌های باریکه از ۱۵ به ۴۰، حفره‌ها تبدیل به شبکه‌ای از کانال‌های عریض شده‌اند.



شکل ۴. تصویرهای SEM با بزرگ‌نمایی ۷۵۰۰ (سمت راست) و ۲۵۰۰ (سمت چپ) الیاف پلی‌استر پرتوده‌ی شده با تعداد متفاوت (به ترتیب از بالا به پایین ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۴۰) تپ باریکه‌ی لیزر بعد از عملیات رنگریزی.

شکل ۳. تصویرهای SEM با بزرگ‌نمایی ۷۵۰۰ (سمت راست) و ۲۵۰۰ (سمت چپ) الیاف پلی‌استر پرتوده‌ی شده با تعداد متفاوت (به ترتیب از بالا به پایین ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۴۰) تپ باریکه‌ی لیزر قبل از رنگریزی.

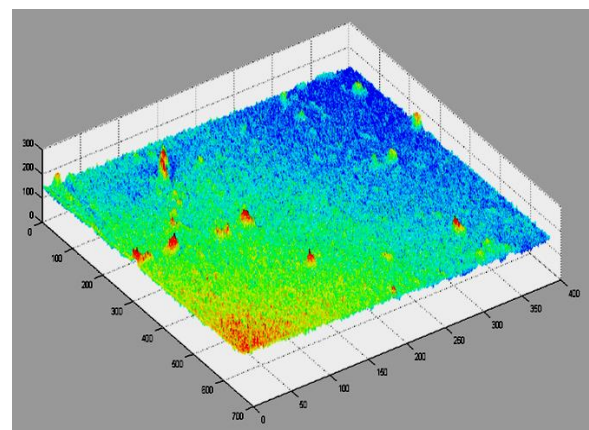


شکل ۶. تصویرهای سه بعدی سطح الیاف پلی استر پرتو دهی شده به ترتیب از بالا به پایین با تعداد ۱۵، ۲۰ و ۴۰ تپ باریکه‌ی لیزر، در قبل (سمت چپ) و بعد از رنگرزی (سمت راست).

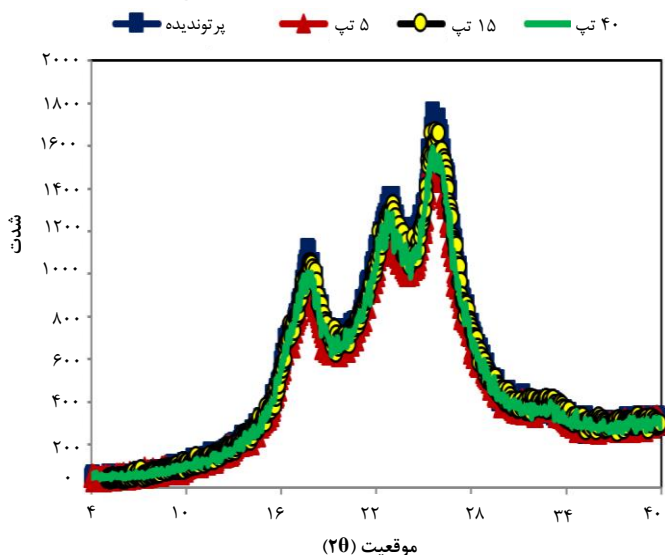
هم‌چنین مشاهده می‌شود که شبکه‌ای شدن ساختارهای زیر در سطح الیاف پرتو دهی شده در بعد از رنگرزی نسبت به نمونه‌های قبل از رنگرزی افزایش یافته است. بیش‌ترین تعداد حفره و ساختارهای شبکه‌ای، در سطح الیاف پرتو دهی شده با ۱۵ تپ باریکه مشاهده می‌شود. افزایش تعداد حفره‌ها و ساختارهای شبکه‌ای در سطح الیاف سبب کاهش تداخل تخریبی موج‌های نور و افزایش بازتاب نور از سطح می‌شود. با مقایسه‌ی تصویرهای سه بعدی نمونه‌های پرتو دهی شده با تعداد تپ‌های مشابه، قبل و بعد از رنگرزی می‌توان دریافت که در نمونه‌های پرتو دهی شده در قبل از رنگرزی به دلیل ایجاد حفره‌های عمیق در سطح الیاف، زبری سطح الیاف بالاتر بوده و ساختارهای ایجاد شده در سطح الیاف نقش مؤثرتری در افزایش تداخل تخریبی موج‌های نوری پیدا کرده‌اند. در نمونه‌های پرتو دهی شده در بعد از رنگرزی، نقش رنگزا بر افزایش حفاظت الیاف در برابر پرتوهای فرابنفش لیزر، عامل اساسی تشکیل حفره‌های کم‌عمق در سطح الیاف بوده است [۱۵]. به منظور بررسی تأثیر پرتو دهی بر ساختار الیاف پلی استر آزمایش پراش پرتو ایکس بر روی نمونه‌های

تحلیل سه بعدی ساختارهای زیر ایجاد شده در سطح الیاف پلی استر به کمک تصویرهای سه بعدی، توسط میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM) و با برنامه‌ی رایانه‌ای تدوین شده در محیط نرم‌افزار متلب به انجام رسید. در این تصویرها طبق برنامه‌ی رایانه‌ای، شدت روشنایی (بعد سوم) برحسب تعداد پیکسل‌ها در صفحه اندازه‌گیری شده است. در شکل ۵ تصویر سه بعدی سطح الیاف پلی استر پرتو ندیده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که سطح الیاف پرتو ندیده نسبتاً صاف و با زبری سطحی بسیار ناچیز است و اثری از حفره‌ها، منفذها و خلل و فرج در سطح این الیاف دیده نمی‌شود.

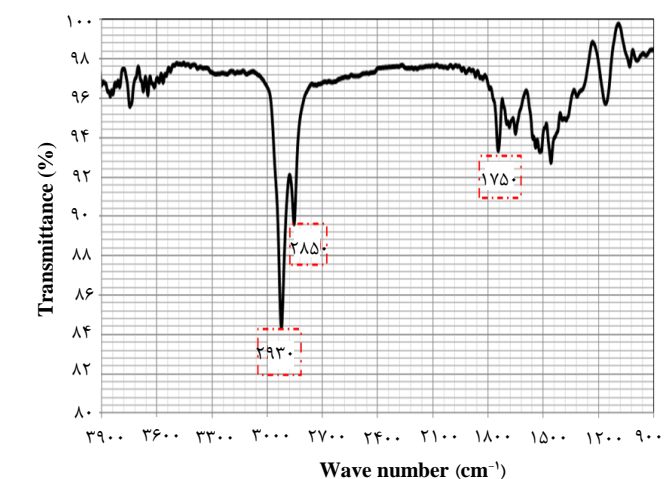
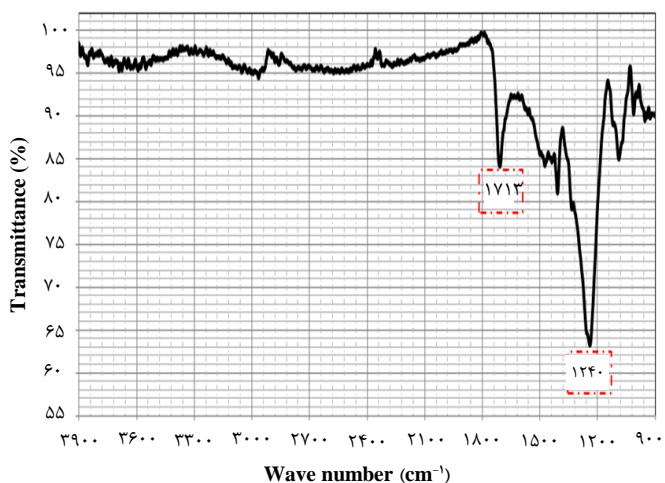
شکل ۶ تصویرهای سه بعدی سطح این نمونه‌ها را پس از پرتو دهی در قبل (سمت چپ) و بعد از رنگرزی (سمت راست) نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در اثر پرتو دهی، ساختارهای شبکه‌ای زیر کاهش یافته و حفره‌های عمیق در سطح الیاف ایجاد شده است. حفره‌های عمیق در سطح الیاف پلی استر می‌تواند منجر به افزایش تداخل تخریبی موج‌های نور شود. کاهش ساختارهای شبکه‌ای، کاهش بازتاب نور از سطح را نیز به همراه خواهد داشت [۱۴]. با افزایش تعداد تپ‌های باریکه از ۱۵ به ۴۰ (به ترتیب از بالا به پایین در شکل ۶) میزان شبکه‌ای شدن ساختارهای زیر در سطح الیاف کاهش یافته است که این امر سبب می‌شود تا مقدار بازتاب نور از سطح کم‌تر شده و حفره‌ها با تبدیل شدن به کانال‌های افقی عریض تأثیر بیش‌تری در تداخل تخریبی موج‌های نوری داشته باشد.



شکل ۵. تصویر سه بعدی سطح الیاف پلی استر پرتو ندیده.



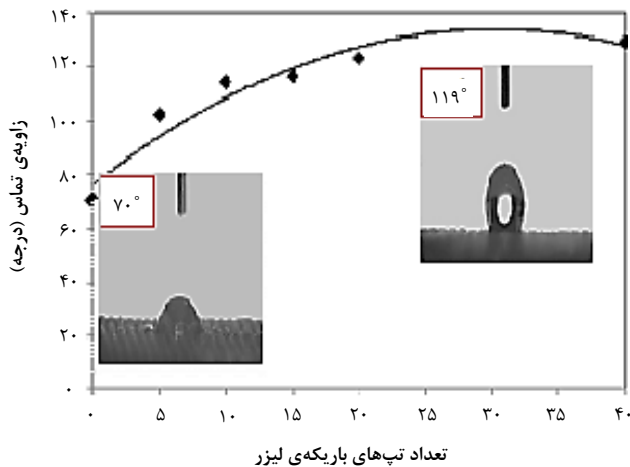
شکل ۷. الگوی پراش پرتو ایکس الیاف پلی استر.



شکل ۸. طیف‌های مادون قرمز پارچه‌ی پلی استر پرتوندیده (بالا) و پرتوده‌ی شده با ۱۵ تپ باریکه‌ی لیزر (پایین).

پرتوده‌ی شده با تعداد ۵، ۱۵ و ۴۰ تپ در قبل از رنگریزی انجام شد. ارزیابی شاخص بلورینگی و اندازه‌ی بلورینه‌ی الیاف پرتوده‌ی شده نشان می‌دهد که با افزایش تعداد تپ‌های باریکه، شاخص بلورینگی (نسبت ناحیه‌های بلورینگی یا بلوری به ناحیه‌های غیربلوری یا آمورف) و اندازه‌ی بلورینه‌ی الیاف پلی استر کاهش یافته است، این امر می‌تواند افزایش نفوذ مولکول‌های رنگزا به درون ساختار الیاف و جذب رنگ بالاتر الیاف را به همراه داشته باشد. شکل ۷، منحنی‌های پراش پرتو ایکس از الیاف پلی استر پرتوده‌ی شده با تعداد تپ‌های متفاوت باریکه‌ی لیزر را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۷، ملاحظه می‌شود که در شکل و موقعیت مکانی قله‌های مربوط به نمونه‌های پرتوده‌ی شده و هم‌چنین پرتوندیده تغییری حاصل نشده است. از روی این شکل پیداست که در موقعیت‌های ۱۸، ۲۲ و 24.5° بیشینه‌های موضعی در شدت رخ داده است. در نمونه‌های پرتوندیده و پرتوده‌ی شده با تعداد متفاوت تپ، مقدارهای این شدت‌ها تغییر یافته است. در مرحله‌ی بعد، طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیرقرمز به منظور بررسی تغییرهای صورت‌گرفته در ساختار شیمیایی سطح الیاف پلی استر بر اثر پرتوده‌ی به کار گرفته شد. شکل ۸ طیف‌های مادون قرمز پارچه‌های پلی استر پرتوندیده و پرتوده‌ی شده با ۱۵ تپ باریکه‌ی لیزر را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با پرتوده‌ی الیاف پلی استر، قله در 1713 cm^{-1} که مربوط به عامل استری (C=O) است به طول موج‌های بالاتر یعنی به 1750 cm^{-1} که مربوط به عامل کربوکسیلیک اسید (COOH) است جابه‌جا شده است. قطبیت کم‌تر عامل کربوکسیلیک اسید نسبت به عامل استری کاهش آبدوستی الیاف پلی استر را به همراه خواهد داشت [۱۶]. به علاوه قله در 1240 cm^{-1} که مربوط به عامل اتتری (C-O-C) است در الیاف پرتوده‌ی شده حذف شده است. افزایش شدید شدت دو قله‌ی 2930 cm^{-1} و 2850 cm^{-1} مربوط به ارتعاش‌های کششی پیوندهای C-H الیاف پلی استر، مؤید ایجاد لایه‌ی کربنی بر سطح الیاف ناشی از کربن‌دارشدن سطح الیاف در اثر پرتوهای لیزر است و افزایش آب‌گریزی این الیاف را در پی دارد. به‌طور کلی سازوکار احتمالی برای تغییرات صورت‌گرفته در اثر پرتوده‌ی الیاف پلی استر با باریکه‌ی لیزر تبدیل عامل استری به عامل کربوکسیلیک اسید است [۱۷].



شکل ۹. نمودار تغییرات زاویه‌ی تماس قطره‌ی آب با پارچه‌های پلی‌استر برحسب تعداد متفاوت تپ‌های باریکه‌ی لیزر.

نوری داشته باشند. بیش‌ترین تعداد حفره‌ها در سطح الیاف پرتوده‌ی شده با تعداد ۱۵ تپ مشاهده شده است که این مقدار، بهینه تعداد تپ برای ایجاد بیشینه عمق رنگی الیاف پلی‌استر در فام مشکی است. بررسی شاخص بلورینگی و اندازه‌ی بلورینه‌ی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در اثر تابش‌دهی با باریکه‌های لیزر شاخص بلورینگی (افزایش مناطق آمورف) و اندازه‌ی بلورینه‌ی الیاف پلی‌استر کاهش می‌یابد. این امر باعث افزایش نفوذ مولکول‌های رنگزا به درون ساختار پلی‌استر و جذب رنگ بالاتر در این الیاف می‌شود. بررسی ساختار شیمیایی سطح پارچه‌های پلی‌استر پرتوده‌ی شده، با بهره‌گیری از طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیرقرمز نشان داد که تبدیل عامل استری به عامل کربوکسیلیک اسید تبدیل‌یافته و هم‌چنین افزایش شدید ارتعاش‌های کششی نوار C-C سبب کاهش جذب آب و افزایش زاویه‌ی تماس قطره‌ی آب با سطح نمونه‌ها می‌شود.

تشکر و قدردانی

از زحمات‌های آقایان قاسم عزیزآبادی و محمود فتحعلیان در کمک به انجام آزمایش‌ها تشکر می‌شود.

به دلیل ایجاد شیارها و ساختارهای شبکه‌ای زیر روی سطح لیف و هم‌چنین به دام افتادن هوا در میان شیارهای ایجادشده در سطح لیف در اثر تابش لیزر، زبری سطح کالا افزایش یافته و بنابراین میزان آب‌دوستی نمونه کاهش یافته است.

در انتها، وابستگی زاویه‌ی تماس قطره‌ی آب روی سطح لیف به تعداد تپ‌های باریکه‌ی لیزر در شکل ۹ ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که تابش باریکه‌ی لیزر با ایجاد لایه‌ی کربنی آب‌گریز در سطح و افزایش زبری سطح الیاف می‌تواند سبب افزایش زاویه‌ی تماس نمونه‌ها شود به طوری که با افزایش تعداد تپ‌های باریکه، زاویه‌ی تماس نمونه‌ها یک روند صعودی دارد. تغییرات احتمالی در ساختار شیمیایی الیاف پرتوده‌ی شده از جمله کاهش تعداد و نوع گروه‌های قطبی سطح نیز ممکن است در افزایش زاویه‌ی تماس نمونه‌ها نقش داشته باشد.

۴. نتیجه‌گیری و بحث

تصویرهای میکروسکوپی الکترون روبشی (SEM) الیاف پلی‌استر نشان می‌دهد که با به عمل‌آوری الیاف با باریکه‌ی لیزر آرگون فلورید تغییرهای ریخت‌شناختی در سطح الیاف با حضور شیارها، حفره‌ها، ساختارهای شبکه‌ای و ساختارهای موجی تناوبی ایجاد می‌شود. با افزایش تعداد تپ‌های باریکه از ۵ به ۱۵ شیارهای ایجادشده در سطح الیاف به شکل حفره‌های عمیق و کم‌عرض در می‌آید و لیزر با سازوکار نورشیمیایی سبب افزایش عمق حفره‌ها و ساختارهای شبکه‌ای در سطح الیاف می‌شود. ایجاد حفره‌های عمیق بر سطح الیاف پلی‌استر می‌تواند نقش تله‌ی نوری را در برخورد نور با سطح ایفا نموده و منجر به افزایش تداخل تخریبی موج‌های نور شود. افزایش مقدار ساختارهای شبکه‌ای نیز افزایش بازتاب نور از سطح را به همراه خواهد داشت. با ادامه‌ی روند افزایش تعداد تپ‌های باریکه‌ی لیزر از ۱۵ به ۴۰ سازوکار نورگرمایی لیزر ایفای نقش نموده و سبب کاهش عمق نفوذ پرتو به درون الیاف و کاهش مقدار ساختارهای شبکه‌ای و ایجاد کانال‌های افقی عریض در سطح الیاف می‌شود. این امر سبب می‌شود تداخل تخریبی موج‌های نور از سطح الیاف کاهش یافته و حفره‌ها با تبدیل‌شدن به کانال‌های افقی عریض تأثیر کم‌تری در تداخل تخریبی موج‌های

مراجع

1. S. Behrouzinia, et al, *Color appearance change of polyester fiber treated with laser beam*, 3th Conference on laser and their applications, 1-4 (2015).
2. Sh. Nourbakhsh, A. Talebian, K. Shabestarizadeh, *The application of laser in modifying some surface properties of textiles*, Scientific Journal of Textile Science and Technology, **1**, 103-111 (2010).
3. Y. Angelova, L. Lazov, S. Mezinska, *Innovative Laser Technology in Textile Industry Proceeding of the 11th International Scientific and Practical Conference*, **III**, 15-21 (2017).
4. K. Akiwowo, et al, *Digital Laser-dyeing for Polyester Fabrics*, Journal of Textile Design Research and Practice, **2** (2), 133-152 (2014).
5. J.E. McIntyre, *Synthetic fibers: nylon, polyester, acrylic*, Woodhead & CRC Press (2005).
6. H. Hongu, G.O. Phillips, *New fibers*, Woodhead press (1997).
7. S. Yamaguchi, H. Takanabe, *Fibers having fine concave and convex surface from silica hybrid polyester*, Seni Gakkaishi, **57** (4), 111-119 (2001).
8. H.R. Lee, D.J. Kim, K.H. Lee, *Anti-reflective coating for the deep coloring of PET fabrics using an atmospheric pressure plasma technique*, Surface and Coating Technology, **142**(144), 468-473 (2001).
9. H. Barani, S. Peyvandi, *Enhanced deep coloring of micro polyester fabric*, Materials Science, **16** (2) (2010).
10. M. Ozdemir, H. Sadikoglu, *A new and emerging technology: Laser-induced surface modification of polymers*, Trends in Food Science & Technology, **9**, 159-167 (1998).
11. R. Srinivasan, B. Braren, *Ultraviolet laser ablation of organic polymers*, Chemical Reviews, **89** (6), 1303-1316 (1989).
12. D. Knittel, W. Kesting, E. Schollmeyer, *Surface structuring of synthetic fibers by UV laser irradiation, Part I: Phenomenological Report*, Polymer International, **43**, 231-239 (1997).
13. Y. Novis, et al, *Structural origin of surface morphological modifications developed on poly (ethylene terephthalate) by excimer laser photoablation*, Journal of Applied Physics, **64**(1), 365-370 (1988).
14. J. Jang, Y. Jeong, *Nano roughening of PET and PTT fabrics via continuous UV/O₃ irradiation*, Dyes and Pigments, **69**, 137-143 (2006).
15. M. Stepankova, J. Wiener, K. Rusinova, *Decolourization of vat dyes on cotton fabric with infrared laser light*, Cellulose, **18**(2), 469-478 (2011).
16. F.J. Holler, D.A. Skoog, D.M. West, *Fundamental of analytical chemistry*, Springer (1996).
17. H. Watanabe, M. Yamamoto, *Laser ablation of Poly (ethylene terephthalate)*, Journal of Applied Polymer Science, **64**, 1203-1209 (1997).