



بهبود رنگپذیری منسوج نایلون ۶ با استفاده از آنزیم لیپاز

مازیار پروین زاده

دانشجوی دکتری، باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۴۴-۱۸۱۵۵
تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۵/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۹/۲۵ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۸۷/۹/۳۰

چکیده

این تحقیق به منظور اصلاح خصوصیات الیاف نایلون ۶ و بررسی خواص مختلف آن شامل رنگپذیری، جذب رطوبت، تغییرات سطحی و ثبات‌های رنگی با استفاده از آنزیم لیپاز انجام شده است. بدین منظور منسوج نایلون ۶ ابتدا با غلظت‌های مختلف آنزیم لیپاز در محلول آب شامل ۱، ۲، ۴ و ۶٪ عمل شده است. سپس عملیات رنگرزی با دو رنگرای اسیدی و دیسپرس انجام شد. نتایج آزمایش رنگ‌سنجی نشان داد که در نمونه‌های عمل شده با آنزیم و سپس رنگرزی شده با هر دو رنگر، مقدار L^* کاهش یافته و با افزایش غلظت آنزیم کاهش بیشتری در مقدار L^* مشاهده می‌شود. نتایج آزمایش رمق‌کشی رنگرهای اسیدی و دیسپرس الیاف عمل شده روند افزایش جذب رنگرها در الیاف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج استحکام کششی منسوج مشاهده می‌شود که فرآیند آنزیمی استحکام، مدول و ازدیاد طول تا حد پارگی منسوج را کاهش می‌دهد. بررسی خواص حرارتی نمونه عمل شده با آنزیم تغییر قابل توجهی را در مقدار آرایش یافتگی لیف در اثر فرآیند آنزیمی تا 300°C را نشان نداد. ولی با افزایش میزان حرارت‌دهی نمونه‌ها در محدوده دمایی $300-400^{\circ}\text{C}$ کاهش قابل توجهی در دمایی تخریب نمونه عمل شده با آنزیم در مقایسه با نمونه عمل نشده مشاهده می‌شود. ثبات شستشویی و نوری نمونه‌های عمل شده با آنزیم مطابق با استاندارد ISO 105-CO5 و نور روز ISO 105-BO1 اندازه‌گیری شد. فرآیند آنزیمی پیش از رنگرزی، ثبات‌های شستشویی و نوری نمونه‌های رنگرزی شده را بهبود می‌دهد که می‌تواند در نتیجه افزایش نفوذ رنگرها به داخل الیاف باشد.

واژه‌های کلیدی: نایلون ۶، آنزیم لیپاز، رنگپذیری، رنگرای اسیدی، رنگرای دیسپرس.

Improvement in Dyeability of Nylon 6 Fibers Using Lipase Enzyme

M. Parvinzadeh

Young researchers club, Islamic Azad University, Shahre Rey Branch, P.O.Box: 18155-144, Tehran, Iran

Abstract

This study was carried out to improve nylon 6 fiber structure and to study different properties including dyeability, moisture absorption, surface changes and color fastness using lipase enzyme. For this purpose, nylon 6 fabrics were first treated with different concentrations of lipase enzyme in water solution including 1, 2, 4 and 6% o.w.f. The dyeing process was then carried out on the treated fabrics with disperse and acid dyes. The results of color measurement on enzyme treated/dyed with these two class of dyes showed that the L^* of enzyme treated samples decreased and more decrease in L^* was observed with an increase in the enzyme percentage. The results of acid and disperse dyes exhaustion on treated fibers showed higher absorption of dyes on fibers. Tensile strength studies indicated that enzymatic processing decreases tenacity, modulus and elongation at break of nylon 6 fabric. Thermal studies of enzyme treated sample did not show significant changes on orientation of fiber after enzyme treatment before the temperature of 300°C . But increase in heating temperature of the sample to the range of $300-400^{\circ}\text{C}$ showed considerable decrease in thermal degradation temperature of enzyme treated sample compared to non-treated one. The wash and light fastnesses properties of samples were measured according to ISO 105-CO5 and Daylight ISO 105-BO1, respectively. Enzyme treatment before dyeing process improves wash and light fastnesses of samples which could be the result of dyes penetration into the fibers. J. Color Sci. Tech. 2(2008), 171-180. © Institute for Colorants, Paint and Coatings.

Key words: Nylon 6, Lipase enzyme, Dyeability, Acid dye, Disperse dye.

۱- مقدمه

آنزیمها کاتالیزورهای زیستی با زنجیره‌های مولکولی پلی‌پپتیدی می‌باشند. این ترکیبات در فرآیندهای نساجی به دلیل عملکرد انتخابی شناخته شده می‌باشند. لیپاز یکی از آنزیم‌های مهم در صنعت نساجی است که برخی از خصوصیات الیاف مختلف را بهبود می‌بخشد [۱-۴].

مطالعات بسیاری در زمینه کاربرد آنزیمها در منسوجات طبیعی انجام شده است که مهمترین آنها شامل تکمیل‌های ضد نم‌زدایی و جمع‌شدگی [۵-۸]، کاهش پرزدهی [۹-۱۲]، افزایش جذب رنگزا در الیاف پشم [۱۳-۱۷]، بهبود زبردست [۱۸]، آهارگیری و اصلاح خواص الیاف پنبه و الیاف گیاهی [۱۹] و صمغ‌گیری ابریشم می‌باشند [۲۰، ۲۱]. آنزیم پروتئاز میزان جذب و سرعت رنگری الیاف پشم با رنگزاهای اسیدی و طبیعی را افزایش می‌دهند و می‌تواند به عنوان مواد کمکی در رنگری الیاف پشم به کار رود [۱۷-۱۳]. اصلاح الیاف مصنوعی از کاربردهای جدید آنزیمها و بخصوص آنزیم لیپاز می‌باشد [۲۲]. الیاف مصنوعی نظیر پلی‌استر و نایلون به دلیل جذب رطوبت کم احساس مطلوب را در فرد استفاده کننده از پوشاک آن ایجاد نمی‌کنند [۲۳-۲۵]. اصلاح سطحی الیاف پلی‌استر و نایلون با استفاده از لیپاز امکان‌پذیر است و در نتیجه نرمی و راحتی پوشاک عمل شده با آنزیم افزایش می‌یابد [۲۳-۲۶].

بیشتر تحقیقات انجام شده در استفاده از آنزیم لیپاز در الیاف مصنوعی بر لیف پلی‌استر می‌باشد. این آنزیمها زاویه تماس آب با الیاف پلی‌استر را کاهش می‌دهند و جذب رطوبت را افزایش می‌دهند. در اثر این عملیات گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل در سطح الیاف ایجاد می‌شود و رنگری الیاف با رنگزاهای کاتیونی و راکتیو امکان‌پذیر می‌شود [۲۴-۲۶].

تحقیقات انجام شده در خصوص عملیات آنزیمی لیف پلی‌استر نشان داده است که آنزیم لیپاز بدون اینکه تغییرات در وزن الیاف ایجاد کند می‌تواند جذب رطوبت آن را افزایش دهد در صورتی که عملیات اصلاح سطحی قلیایی پلی‌استر سبب کاهش وزن الیاف می‌شود. به علاوه عملیات اصلاح سطحی با آنزیم لیپاز تخریب کمتری در سطح الیاف در مقایسه با عملیات قلیایی دارد [۲۴].

تحقیقات کمی در خصوص اصلاح الیاف نایلون با آنزیمها انجام شده است [۲۶-۳۰]. در تحقیقی پلیمر نایلون تحت عمل با دو نوع باکتری قرار گرفت و تغییرات ایجاد شده در آن تحت طیف‌سنجی

NMR بررسی گردید. تغییرات ایجاد شده روی نایلون نشان داد که در اثر عمل با باکتری گروه‌های CHO، NHCHO، CH₃ و CONH₂ در الیاف ایجاد می‌شود [۲۷، ۲۸]. همچنین تصاویر میکروسکوپی از الیاف نایلون ۶ نشان داد که باکتری‌ها با گذشت زمان تغییرات سطحی و عمقی ایجاد می‌کنند [۲۷، ۲۸]. در تحقیق دیگری اثر آنزیمها بر خواص الیاف نایلون ۶۶ بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با گذشت زمان عملیات آنزیمی میزان گروه‌های عاملی آمین آزاد شده در محلول افزایش یافته و وزن مولکولی زنجیره‌های پلیمری کاهش می‌یابد. این اثر با گذشت زمان از ۶ به ۲۴ ساعت افزایش یافته است. در این تحقیق در اثر فرآیند آنزیمی بر روی الیاف نایلون، مونومرها و الیگومرها از الیاف نایلون به شکل محلول در حمام عملیات آنزیمی آزاد شده و میزان گروه‌های آمین آزاد این فرآیند قابل اندازه‌گیری با رنگزاهای راکتیو می‌باشد [۲۹]. آنزیمها می‌توانند ثبات‌های شستشویی الیاف نایلون رنگری شده با رنگزاهای اسیدی را افزایش دهند [۳۰]. این تحقیق به منظور بررسی خواص مختلف الیاف نایلون ۶ از جمله میزان رنگپذیری پس از عمل با آنزیم لیپاز انجام شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی و وسایل

منسوج نایلون ۶ با بافت تار پودی با مشخصات جدول ۱ برای انجام آزمایشات استفاده شده است. از مواد شیمیایی شوینده غیریونی Rockapon RCP-5 (شرکت راک شیمی)، آنزیم لیپاز Lipex 50T (شرکت نوو نوردیسک^۱ دانمارک)، اسید سولفوریک (شرکت مرک)، رنگزای اسیدی اسید آبی ۹۲ (شرکت صنایع رنگزای سرن^۲)، رنگزای دیسپرس قهوه‌ای ۱ (شرکت صنایع رنگزای سرن)، اسید استیک (شرکت مرک)، دیسپرس کننده اکالین F (شرکت ساندوز) و یکنواخت‌کننده لوگال RDL (شرکت رزین ساوه) استفاده شد.

مؤلفه‌های رنگی *L، *a، *b، *C و h نمونه‌های عمل شده با استفاده از رنگ‌سنج COLOUR EYE 7000A (شرکت گرتاگ مک‌بث) با زاویه دید ۱۰ درجه تحت منبع نوری D₆₅ در سیستم استاندارد رنگ CIELAB اندازه‌گیری شد.

1- Novo nordisk

2- Serene dyestuff industries ltd

جدول ۱: مشخصات منسوج نایلون ۶ مورد استفاده در آزمایش.

نمره نخ پود (دنیر)	نمره نخ تار (دنیر)	تعداد پود (در ۱ سانتیمتر)	تعداد تار (در ۱ سانتیمتر)	وزن در متر مربع (گرم/متر مربع)
۱۲۰	۷۰	۲۰	۲۵	۱۵۶

رنگری در دمای جوش ادامه یافت. در انتها نمونه‌های رنگری شده آبکشی شدند.

اندازه‌گیری میزان رطوبت بازیافتی مطابق با استاندارد ASTM 2654-76 انجام شده است. در این آزمایش میزان رطوبت بازیافتی با استفاده از فرمول زیر محاسبه شده است:

$$\% \text{ رطوبت بازیافتی} = (W_1 - W_2) / W_2 \times 100$$

W_1 میزان وزن نمونه‌ها پس از اشباع در رطوبت استاندارد و W_2 وزن نمونه‌ها در حالت کاملاً خشک می‌باشد.

برای تعیین ثبات رنگ در برابر شستشو از روش استاندارد ISO 105-CO5 استفاده شد. نمونه‌های مورد آزمایش بین دو نمونه سفید یکی از جنس پنبه و دیگری نایلون قرار گرفت و در حمام محتوی ۵٪ از صابون استاندارد شستشو در 50°C و نسبت الیاف به حمام ۱:۵۰ به مدت ۳۰ دقیقه عمل شستشو انجام شد. تغییرات رنگ نمونه مورد آزمایش و لکه‌گذاری نمونه‌های سفید با معیار خاکستری مورد سنجش قرار گرفت.

روش کار جهت ارزیابی ثبات رنگ در برابر نور روز مطابق با استاندارد ISO 105-BO1 نور روز می‌باشد. نمونه‌های مورد آزمایش به مدت ۱ هفته به طور مداوم در فصل بهار در معرض نور خورشید قرار گرفت و ثبات نوری نمونه‌ها با نمونه‌های استاندارد آبی سنجیده شدند. جهت بررسی ثبات نوری به روش دستگاهی، نمونه‌های عمل شده با ۶٪ از آنزیم و سپس رنگری شده با رنگزای اسیدی و دیسپرس با نمونه عمل نشده با آنزیم و رنگری شده در دستگاه ثبات نوری زئوتست مدل ۱۵۰S مطابق با استاندارد نور روز ISO 105-B02 قرار گرفتند.

هر آزمایش بر روی ۵ نمونه از منسوج نایلون ۶ انجام گرفت و انحراف معیار نمونه‌ها کمتر از ۵٪ می‌باشد که در جداول نتایج مشخص شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی رمق‌کشی و مؤلفه‌های رنگی نمونه‌ها

جدول ۲ میزان رمق‌کشی و مؤلفه‌های رنگی L^* ، a^* ، b^* و C^* و h نمونه‌های عمل شده با آنزیم لیپاز و سپس رنگری شده با رنگزاهای اسیدی و دیسپرس در مقایسه با نمونه‌های عمل نشده با آنزیم را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج میزان رمق‌کشی رنگزای اسیدی در نمونه‌های عمل شده با ۱٪ آنزیم لیپاز افزایش می‌یابد و با افزایش درصد آنزیم به غلظت‌های بالاتر تا ۶٪ این روند ادامه دارد. به علاوه در اثر عمل با ۱٪ از آنزیم و سپس رنگری با رنگزای اسیدی، میزان L^* در نمونه‌ها در

تغییرات الیاف پس از فرآیند آنزیمی با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور از دستگاه BOMEM - MB 100 SERIES (شرکت هارتمن و بورون) استفاده شد.

برای بررسی استحکام نمونه‌ها از دستگاه Electronic Tensile Strength and Elongation Tester TT - 10 KG که طبق استاندارد ASTM D5034 انجام شده است (شرکت فرایاب) استفاده شد.

بررسی خواص میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی پویشی LEO 440i که ۳۰۰۰۰۰ برابر بزرگنمایی و دقت ۳٫۵ نانومتر را دارد انجام شد.

جهت مطالعه تأثیر آنزیم بر میزان تخریب یا تجزیه مناطق آرایش یافته الیاف نایلون ۶ از دستگاه گرماسنج پویشی تفاضلی (DSC) (شرکت Polymer Laboratories) تحت گاز نیتروژن و گرمادهی با نرخ ۲۰ درجه بر دقیقه استفاده شد.

بررسی ثبات‌های رنگی: دستگاه استفاده شده جهت انجام آزمایش ثبات شستشویی (SDL) Rotowash color fastness tester می‌باشد. رمق‌کشی با استفاده از طیف‌سنجی UV-Vis (UV-210PC) (شرکت شیمادزو ژاپن) بررسی شد.

۲-۲- روش کار

عملیات شستشوی اولیه برای خالص‌سازی نمونه‌های نایلون ۶ پیش از شروع آزمایشات آنزیمی انجام شد. بدین منظور نمونه‌ها با ۵٪ از شوینده غیریونی در حمامی با L:G برابر ۱:۲۰ به مدت ۱۵ دقیقه در 60°C عمل شدند.

نمونه‌های شستشو شده در حمام‌هایی با درصدهای ۱٪، ۲٪، ۴٪ و ۶٪ از آنزیم لیپاز در pH ۶٫۵ و 30°C به مدت ۸۰ دقیقه با L:G=۱:۲۰ عمل شدند. شرایط آزمایش مطابق توصیه شرکت تولید کننده آنزیم می‌باشد.

پس از عملیات آنزیمی جهت زدودن نمونه‌ها از آنزیم لیپاز و از بین بردن فعالیت آن عملیات خنثی‌سازی در محیط اسیدی در pH ۴ به مدت ۵ دقیقه در 90°C انجام شد.

نمونه‌های عمل شده با آنزیم به طور جداگانه در حمام‌های محتوی ۱٪ رنگزای اسیدی، ۴٪ اسید استیک با L:R برابر ۱:۴۰ قرار گرفتند. رنگری در 40°C آغاز شد و حمام‌های رنگری به مدت ۲۰ دقیقه به جوش رسید و به مدت یک ساعت رنگری در دمای جوش ادامه یافت. در انتها نمونه‌های رنگری شده آبکشی شدند.

نمونه‌های عمل شده با آنزیم به طور جداگانه در حمام‌های محتوی ۱٪ رنگزای دیسپرس، ۴٪ اسید استیک و ۱٪ دیسپرس کننده با L:R=۱:۴۰ قرار گرفتند. رنگری در 40°C آغاز شد و حمام‌های رنگری به مدت ۲۰ دقیقه به جوش رسید و به مدت یک ساعت

گروه‌های عاملی بیشتر که قابلیت رنگرزی با رنگزاهای اسیدی را دارند در مقایسه با لیف عمل نشده با آنزیم ایجاد می‌شود که در نتیجه جذب رنگزای اسیدی در نایلون افزایش می‌یابد. این نتیجه در آزمایش محققان دیگر نیز تأیید شده است [۲۵،۲۷،۲۹].

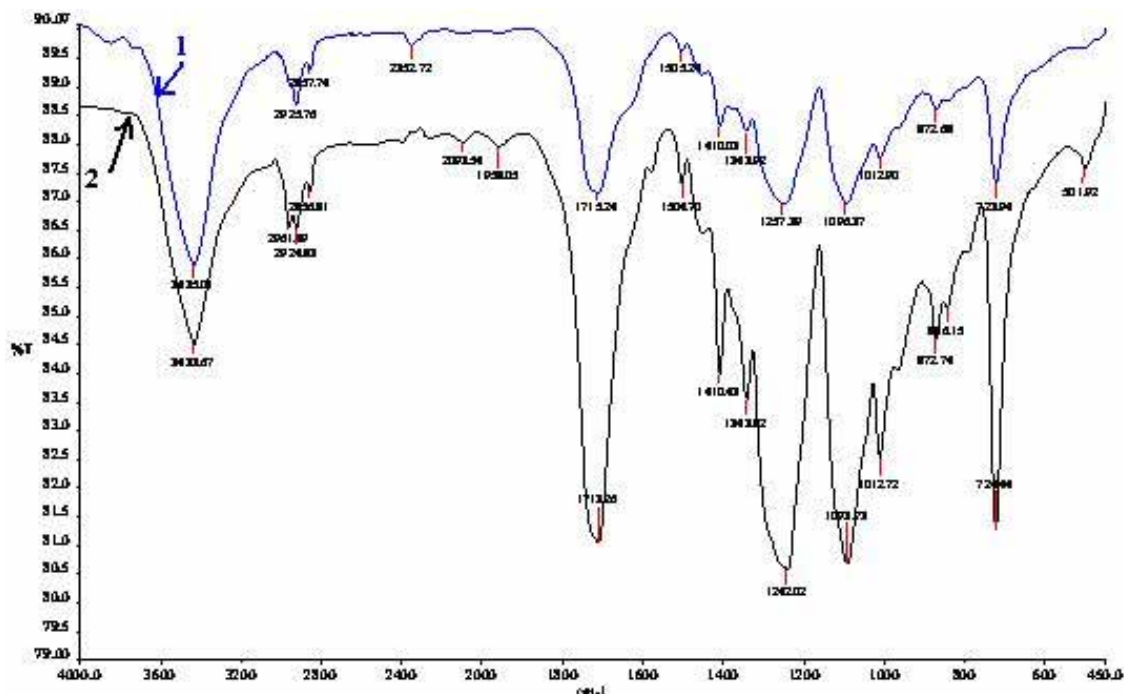
نتایج مشابه در رنگرزی الیاف نایلون عمل شده با آنزیم با رنگزای دیسپرس به دست آمد. بدین ترتیب که در اثر عمل الیاف نایلون با ۱٪ از آنزیم لیپاز میزان جذب رنگزای دیسپرس نیز مشابه رنگزای اسیدی افزایش و این روند با افزایش غلظت آنزیم ادامه داشت. نتایج تغییرات مؤلفه‌های رنگی نمونه‌های رنگرزی شده با رنگزاهای دیسپرس نیز مشابه رنگزاهای اسیدی است و مقدار L^* در نمونه‌های آنزیمی در مقایسه با نمونه‌های عمل نشده کاهش یافت. به علاوه تغییر قابل توجهی در مقادیر مؤلفه‌های a^* ، b^* ، C^* و h این نمونه‌ها در اثر فرآیند آنزیمی مشاهده نشد. با توجه به اینکه آنزیم می‌تواند در نواحی آرایش نیافته لیف بیشتر نفوذ کند لذا تجزیه و هیدرولیز این نواحی را تسریع نموده و جذب رنگزای دیسپرس را نیز در الیاف بهبود می‌دهد. این روند با افزایش غلظت آنزیم نیز دیده می‌شود [۲۷،۲۸،۳۹]. نتایج آزمون رمق‌کشی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری مؤلفه‌های رنگی نمونه‌ها مطابقت دارد.

مقایسه با نمونه عمل نشده با آنزیم کاهش و با افزایش درصد آنزیم روند کاهش در میزان L^* ادامه دارد. با توجه به نتایج تغییر قابل توجهی در مقادیر مؤلفه‌های a^* ، b^* ، C^* و h در اثر فرآیند آنزیمی مشاهده نمی‌شود. کاهش در مقادیر L^* در نمونه‌های رنگرزی شده با رنگزای اسیدی می‌تواند در نتیجه افزایش هیدرولیز و در نتیجه افزایش مکان‌های قابل جذب رنگزای اسیدی در اثر فرآیند آنزیمی باشد.

الیاف نایلون ۶ مورد استفاده در پوشاک دارای ساختاری در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد کریستالی است و دارای زنجیره‌های بلند بدون گروه‌های جانبی حجیم در ساختار خود است. از مهم‌ترین خصوصیات ساختار الیاف نایلون وجود پیوندهای هیدروژنی بین زنجیری است که در خواص مختلف آن تأثیر بسزایی دارد. مطالعات نشان داده است که زنجیره‌های الیاف نایلون صفحات فیبریلی تشکیل داده‌اند که در این فیبریلهای لاملها مناطق کریستالی را تشکیل می‌دهند. این لاملها از طریق زنجیره‌های مولکولی بلند بین فیبریلی با یکدیگر ارتباط دارند [۳۱-۳۴]. آنزیم لیپاز می‌تواند با نفوذ به مناطق آرایش نیافته سطح و داخل ساختار الیاف عمل هیدرولیز و شکست زنجیرها را انجام دهد [۲۶،۲۷،۲۹،۳۵]. علاوه با توجه به نتایج می‌توان استدلال نمود که آنزیم لیپاز روند تجزیه زنجیره‌های پلی‌آمید را تسریع نموده و الیاف با

جدول ۲: میزان رمق‌کشی و مؤلفه‌های رنگی منسوج نایلون ۶ عمل شده با آنزیم لیپاز و سپس رنگرزی شده با ۱٪ از رنگزاهای اسیدی و دیسپرس (مقادیر انحراف معیار در داخل پرانتز مشخص شده است).

رنگزا	آنزیم (%)	رمق کشی (%)	L^*	a^*	b^*	C^*	h
اسیدی	۰	۶۵ (۱،۵)	۴۱،۱۳ (۱،۲)	-۱،۶۸ (۰،۰۱)	-۲۷،۳۴ (۱،۵)	۲۷،۳۹ (۱،۰)	۲۶۶،۴۷ (۵،۸)
	۱	۶۷ (۱،۷)	۴۰،۰۰ (۱،۳)	-۱،۸۷ (۰،۰۲)	-۲۷،۵۲ (۱،۹)	۲۷،۵۹ (۱،۴)	۲۶۶،۱۰ (۶،۵)
	۲	۶۸ (۱،۳)	۳۸،۶۴ (۱،۵)	-۱،۶۱ (۰،۰۲)	-۲۷،۵۲ (۱،۶)	۲۷،۶۲ (۱،۲)	۲۶۶،۶۵ (۸،۲)
	۴	۷۰ (۰،۸)	۳۸،۳۰ (۱،۵)	-۱،۵۸ (۰،۰۲)	-۲۷،۲۴ (۱،۲)	۲۷،۲۹ (۱،۱)	۲۶۶،۶۷ (۱،۳)
	۶	۷۳ (۱،۷)	۳۷،۵۰ (۱،۱)	-۱،۴۴ (۰،۰۲)	-۲۷،۳۵ (۱،۱)	۲۷،۳۹ (۱،۴)	۲۶۶،۹۷ (۲،۹)
	دیسپرس	۰	۵۰ (۱،۲)	۴۴،۱۵ (۱،۶)	۱۵،۶۵ (۰،۳)	۳،۱۷ (۰،۱)	۱۶،۱۹ (۰،۵)
۱		۵۱ (۰،۷)	۴۳،۹۵ (۱،۳)	۱۵،۰۶ (۰،۴)	۳،۰۷ (۰،۵)	۱۵،۳۷ (۰،۳)	۱۱،۵۳ (۱،۵)
۲		۵۲ (۰،۸)	۴۳،۳۸ (۱،۳)	۱۵،۹۹ (۰،۴)	۳،۳۶ (۰،۴)	۱۶،۰۶ (۰،۵)	۱۵،۹۷ (۱،۵)
۴		۵۵ (۱،۸)	۴۱،۲۵ (۱،۹)	۱۵،۵۸ (۰،۵)	۳،۳۱ (۰،۴)	۱۶،۹۲ (۱،۵)	۱۲،۰۰ (۱،۵)
۶		۵۸ (۱،۱)	۴۰،۶۳ (۱،۵)	۱۵،۱۶ (۰،۷)	۳،۷۹ (۰،۸)	۱۶،۶۲ (۰،۱)	۱۴،۰۵ (۱،۵)



شکل ۱: طیف FTIR نمونه خام نایلون ۶ (نمودار ۱) و نمونه عمل شده با آنزیم لیپاز (نمودار ۲).

نتایج طیف FTIR در نمونه‌های عمل شده با آنزیم در مقایسه با نمونه عمل نشده، نشان دهنده تجزیه و هیدرولیز گروه‌های شیمیایی مختلف بخصوص گروه‌های آمیدی (-CONH-) می‌باشد.

۳-۳- بررسی میزان رطوبت بازیافتی

نتایج آزمایش بررسی رطوبت بازیافتی نمونه های نایلون ۶ عمل شده با آنزیم لیپاز در مقایسه با نمونه عمل نشده در جدول ۳ نشان داده شده است. میزان رطوبت بازیافتی نمونه عمل شده با محلول ۰.۱٪ از آنزیم لیپاز در مقایسه با نمونه عمل نشده افزایش دارد و با افزایش غلظت آنزیم به مقادیر بالاتر تا ۰.۶٪ این روند افزایش ادامه یافت.

جدول ۳: میزان رطوبت بازیافتی منسوج نایلون ۶ عمل شده با آنزیم لیپاز در غلظت‌های مختلف (مقادیر انحراف معیار در داخل پرانتز مشخص شده است)

آنزیم (%)	رطوبت بازیافتی (%)
۰	۳,۳۵ (۰,۰۷)
۱	۳,۶۸ (۰,۰۸)
۲	۴,۰۵ (۰,۰۵)
۴	۴,۴۳ (۰,۰۵)
۶	۴,۵۸ (۰,۰۷)

۳-۲- بررسی تغییرات شیمیایی

طیف امواج مادون قرمز نمونه عمل شده با ۰.۶٪ آنزیم لیپاز و نمونه عمل نشده در شکل ۱ نشان داده شده است. ارتعاشات پیوندهای N-H از نوع کششی و خمشی در پلی‌آمیدها عموماً در نواحی 3500 cm^{-1} و 3100 cm^{-1} - 1640 cm^{-1} - 1550 cm^{-1} ظاهر می‌شوند که بستگی به نوع آمید اولیه و ثانویه، ماهیت محیطی که ترکیب در آن قرار دارد (مایع و جامد) و پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی دارد. پیوند ارتعاشی خمشی C=O معمولاً بین نواحی 1640 cm^{-1} و 1670 cm^{-1} ظاهر می‌شود که با پیوند ارتعاشی N-H همپوشانی دارد [۳۶].

شکل ۱ پیوند ارتعاشی آمید ثانویه در 3435 cm^{-1} در نایلون ۶ را نشان می‌دهد. پیک‌های 1650 cm^{-1} - 1550 cm^{-1} ارتعاشات کششی N-H را نشان می‌دهد که با ارتعاشات گروه‌های C=O در الیاف همپوشانی دارد. نوار 1715 cm^{-1} ناشی از ارتعاشات کششی گروه C=O در آمید ثانویه بوده که از ناحیه 1640 cm^{-1} انتقال یافته است. این انتقال نوار، رزونانس بین مولکول‌ها در زنجیرهای پلی‌آمید را تأیید می‌کند. شدت نوار پهن در 3433 cm^{-1} کاهش یافته که ناشی از شکستن برخی از گروه‌های پلی‌آمید پس از فرآیند آنزیمی است. نوار 1242 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات خمشی N-H و کششی C-N بوده که حضور پیوندهای شیمیایی C-N-H پس از فرآیند آنزیمی نایلون ۶ را تأیید می‌کند. به علاوه پس از عملیات آنزیمی شدت نوارهای 1715 cm^{-1} و 1723 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی و خمشی C=O و NH افزایش یافته است که هیدرولیز زنجیرهای پلی‌آمید را تأیید می‌کند.

بهینه‌سازی فرآیند آنزیمی جهت جلوگیری از کاهش استحکام الیاف نایلون ضروری است. در غلظت ۲٪ از آنزیم، درصد کاهش استحکام در حدود ۷٪ می‌باشد و با افزایش غلظت آنزیم تا ۶٪، درصد کاهش استحکام به حدود ۱۸٪ رسیده است. لذا پیشنهاد می‌شود که آنزیم مصرفی بر روی الیاف نایلون ۶ مورد استفاده در پوشاک ۳-۲٪ باشد.

۳-۵- بررسی خواص میکروسکوپی

شکل ۲ نشان دهنده سطح الیاف نایلون ۶ خام و عمل شده با محلول ۶٪ از آنزیم لیپاز با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر می‌باشد. با توجه به شکل ۲-الف مشاهده می‌شود که الیاف نایلون ۶ دارای سطح نسبتاً یکنواختی است و در برخی از مناطق سطح الیاف ذراتی وجود دارد که می‌تواند ناخالصی و ذرات گرد و غبار موجود در هوا باشد که به الیاف چسبیده‌اند. شکل ۲-ب تغییرات سطح الیاف نایلون ۶ در اثر عمل با آنزیم لیپاز در محلول ۶٪ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲-ب تغییرات در سطح لیف یکنواخت نیست و تفاوت قابل ملاحظه‌ای در سطح لیف در اثر هیدرولیز آنزیمی مشاهده نشده است. احتمالاً هیدرولیز و تخریب بخش‌هایی از مناطق آرایش نیافته در ساختار داخلی الیاف وجود دارد. بعلاوه تغییرات ایجاد شده در ساختار الیاف در نواحی داخلی الیاف به دلیل نفوذ آنزیم صورت گرفته است که سبب افزایش جذب رنگزها و کاهش استحکام الیاف شده‌اند.

۳-۶- بررسی خواص گرمایی

شکل ۳ طیف DSC الیاف نایلون ۶ خام و عمل شده با محلول ۶٪ از آنزیم لیپاز را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار حرارتی الیاف عمل نشده، درجه حرارت شیشه‌ای پیکی گرماگیر در حدود ۵۳ °C دارد که در اثر فرآیند آنزیمی به ۵۵ °C رسیده است که تغییر قابل توجهی را نشان نمی‌دهد. درصد آرایش یافتگی یک پلیمر با درجه حرارت شیشه‌ای آن رابطه مستقیم دارد و با کاهش درصد آرایش یافتگی

انتقال رطوبت از پوست به ناحیه‌های بالاتر در طی پوشش منسوجات توسط انسان نشان‌دهنده قابلیت تنفس و راحتی در منسوج است و عامل مهمی در راحتی انسان می‌باشد [۳۷]. با توجه به اینکه زنجیرهای پلی‌آمید در نواحی آرایش نیافته در اثر عمل با آنزیم ممکن است تحت تجزیه قرار گیرند لذا دسترسی آب به این نواحی در الیاف عمل شده با آنزیم بیشتر می‌باشد. این خاصیت مطلوبی در پوشاک نایلون ۶ عمل شده با آنزیم‌ها است که در نتیجه میزان تنفس‌پذیری و راحتی در پوشش را در افراد استفاده کننده از پوشاک عمل شده با آنزیم افزایش می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش رطوبت بازیافتی با نتایج حاصل از رمق‌کشی رنگزها در الیاف در اثر عمل با آنزیم‌ها مطابقت دارد.

۳-۴- بررسی استحکام نمونه‌ها

جدول ۴ مدول، استحکام و ازدیاد طول تا پارگی برای نمونه‌های نایلون ۶ عمل شده با آنزیم لیپاز با درصدهای ۱، ۲، ۴ و ۶٪ در مقایسه با نمونه عمل نشده را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استحکام، ازدیاد طول تا پارگی و مدول نمونه‌های عمل شده با ۱٪ از آنزیم در مقایسه با نمونه عمل نشده کاهش یافته است و با افزایش درصد آنزیم این کاهش ادامه دارد. با توجه به این نتیجه و در مقایسه با نتایج آزمایشات قبل می‌توان استنباط نمود که آنزیم تا حدی می‌تواند به فضاهای داخلی در مناطق آرایش نیافته الیاف نفوذ کرده است و سبب هیدرولیز بخشی از گروه‌های آمیدی و در نتیجه کاهش در مقادیر استحکام، ازدیاد طول تا پارگی و مدول نمونه‌ها می‌گردد.

عدم استفاده بهینه از آنزیم لیپاز می‌تواند سبب صدمه و تخریب بخشی از مناطق آرایش نیافته الیاف نایلون و کاهش استحکام آن گردد ولی در رنگرزی، مولکول‌های رنگزای دیسپرس قابلیت نفوذ بیشتر به داخل الیاف را دارد و رنگزهای اسیدی نیز می‌توانند با گروه‌های هیدرولیز شده واکنش دهند. کنترل میزان نفوذ آنزیم و

جدول ۴: خصوصیات مکانیکی نخ نایلون ۶ عمل شده با آنزیم لیپاز در غلظت‌های مختلف (انحراف معیار کمتر از ۵٪)

آنزیم (%)	مدول اولیه (g/tex)	درصد کاهش استحکام پس از فرآیند آنزیمی	ازدیاد طول تا پارگی (%)	طول تا پارگی پس از فرآیند آنزیمی	درصد کاهش استحکام (g/tex)	درصد کاهش استحکام پس از فرآیند آنزیمی
۰	۲۷,۵ (۰,۵)	-	۳,۳۲ (۰,۷)	-	۶,۲۵ (۰,۲)	-
۱	۲۶,۲ (۰,۴)	۴,۷	۳۰,۳ (۰,۶)	۶,۱	۶,۰۵ (۰,۲)	۳,۲
۲	۲۴,۵ (۰,۵)	۱۰,۹	۲۸,۱ (۰,۶)	۱۳	۵,۷۷ (۰,۲)	۷,۶
۴	۲۴,۱ (۰,۴)	۱۲,۳	۲۷,۰ (۰,۴)	۱۶,۴	۵,۵۰ (۰,۲)	۱۲
۶	۲۲,۷ (۰,۴)	۱۷,۴	۲۶,۹ (۰,۳)	۱۶,۷	۵,۱۰ (۰,۲)	۱۸,۴

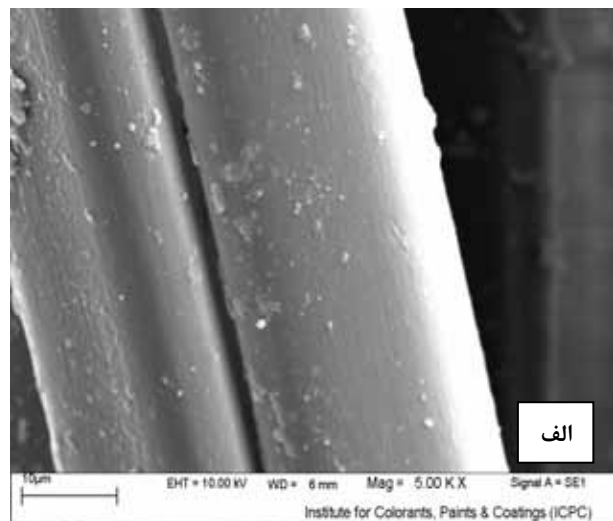
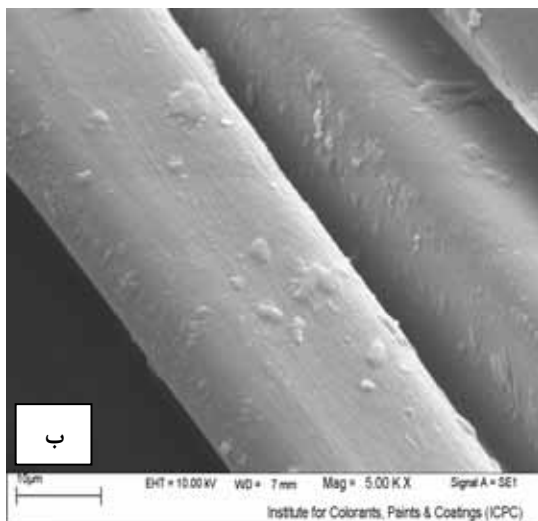
تعداد گروه‌های آمینی افزایش می‌یابد در نتیجه تعداد مولکول‌های پیوند دهنده بین رنگزای اسیدی و الیاف افزایش یافته و رنگزاهای متصل شده ثبات شستشویی بیشتری در برابر شوینده‌ها دارند [۲۹،۳۰]. میزان لکه‌گذاری در نمونه‌های همراه پشمی و پنبه‌ای کاهش یافت. این نتیجه با نتایج آزمایشات رنگ‌سنجی و رنم‌کشی حمام‌ها نیز مطابقت دارد.

با توجه به نتایج ثبات نوری به روش ISO-R-105 در نمونه‌های عمل شده با آنزیم لیپاز و سپس رنگریزی شده با رنگزای اسیدی، ثبات نوری تغییری نداشت در صورتی که عمل با آنزیم، ثبات نوری الیاف رنگریزی شده با رنگزای دیسپرس را بهبود داده است که احتمالاً به دلیل نفوذ بیشتر رنگزای دیسپرس در نمونه‌های عمل شده با آنزیم می‌باشد. پس از قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه زوتست، ثبات نوری نمونه عمل شده با ۶٪ از آنزیم و سپس رنگریزی شده با رنگزای اسیدی در مقایسه با نمونه عمل نشده و سپس رنگریزی شده ۵ است و تغییری نداشت در صورتی که ثبات نوری در مورد رنگزای دیسپرس از ۴-۳ در نمونه عمل نشده به ۵-۴ در نمونه آنزیمی افزایش یافت. عوامل مؤثر در ثبات نوری رنگزاهای شامل ساختار شیمیایی رنگزا، غلظت رنگزا در الیاف، وضعیت فیزیکی قرارگیری رنگزا در الیاف، نوع لیف، نوع و شدت منبع نوری و حضور جاذب‌های UV یا سایر مواد در کنار رنگزا می‌باشند.

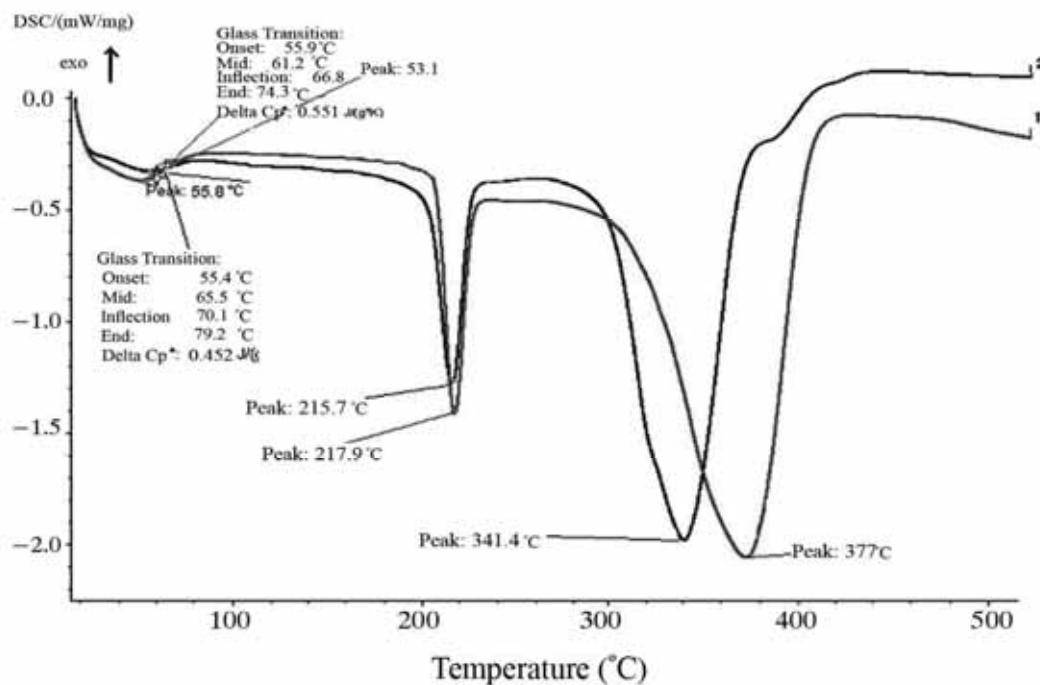
یک پلیمر درجه حرارت شیشه‌ای آن نیز کاهش می‌یابد [۳۸]. بیک گرمگیر درجه حرارت ذوب نایلون ۶ نیز در حدود 218°C است که پس از فرآیند آنزیمی در حدود 215°C را نشان داده است. با افزایش دمای حرارت‌دهی نمونه‌ها در دستگاه گرماسنج پویشی تفاضلی در محدوده دمایی 300°C تا 400°C کاهش قابل توجهی در درجه حرارت تخریب الیاف نایلون ۶ پس از فرآیند آنزیمی در مقایسه با نمونه عمل نشده مشاهده شده است. این کاهش از درجه حرارت 377°C برای نمونه اولیه به 341°C برای نمونه عمل شده با ۶٪ آنزیم بوده است. با توجه به کاهش دمای تخریب نمونه عمل شده با آنزیم در منحنی‌های شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند آنزیمی می‌تواند میزان آرایش یافتگی الیاف نایلون ۶ را تا حدودی کاهش دهد که با نتایج حاصل از آزمایش بررسی استحکام نمونه‌ها مطابقت دارد.

۷-۳- بررسی ثبات‌های رنگی

جدول ۵ ثبات شستشویی و نوری نمونه‌های عمل شده با آنزیم و سپس رنگریزی شده با رنگزاهای اسیدی و دیسپرس را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند آنزیمی پیش از رنگریزی، ثبات‌های شستشویی نمونه‌های رنگریزی شده را بهبود می‌دهد که می‌تواند در نتیجه افزایش نفوذ رنگزاهای اسیدی و دیسپرس به داخل الیاف باشد. در اثر فرآیند آنزیمی برخی از زنجیرهای پلی‌آمید هیدرولیز شده و



شکل ۲: الیاف نایلون ۶ با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر: الف) عمل نشده و ب) عمل شده با ۶٪ آنزیم لیپاز.



شکل ۳: طیف DSC الیاف نایلون ۶: نمودار (۱) عمل نشده، نمودار (۲) عمل شده با ۶٪ آنزیم لیپاز.

جدول ۵: ثبات شستشویی و نوری منسوج نایلون ۶ عمل شده با آنزیم لیپاز و سپس رنگریزی شده با ۱٪ از رنگزاهای اسیدی و دیسپرس

رنگزا	آنزیم (%)	ثبات شستشویی	لکه گذاری الیاف پشم	لکه گذاری الیاف پنبه	۲ روز نوردهی	۷ روز نوردهی
اسیدی	۰	۳	۳-۴	۴	۵-۶	۵-۶
	۱	۴	۴-۵	۴-۵	۵-۶	۵-۶
	۲	۴-۵	۴-۵	۴-۵	۵-۶	۵-۶
	۴	۴-۵	۴-۵	۴-۵	۵-۶	۵-۶
	۶	۴-۵	۴-۵	۴-۵	۵-۶	۵-۶
دیسپرس	۰	۳-۴	۳-۴	۴-۵	۴	۴
	۱	۴-۵	۴-۵	۴-۵	۴-۵	۴-۵
	۲	۴-۵	۴-۵	۴-۵	۵	۵
	۴	۵	۴-۵	۴-۵	۵	۵
	۶	۵	۴-۵	۴-۵	۵	۵

جذب شده توسط الیاف در اثر عمل با آنزیم افزایش یافت. آنزیم لیباز روند تجزیه زنجیرهای پلی آمید را تسریع می کند و الیاف با گروه‌های عاملی بیشتر که قابلیت رنگرزی با رنگزاهای اسیدی را دارند در مقایسه با لیف عمل نشده با آنزیم ایجاد می شود. تغییرات ایجاد شده در اثر فرآیند آنزیمی، مربوط به ارتعاشات کششی N-H و C-N است که در گروه‌های C-N-H نایلون ۶ ایجاد شده است. کاهش شدت نوار پهن در 3423 cm^{-1} و افزایش شدت نوارهای 1715 cm^{-1} و 723 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی و خمشی C=O و NH از شکستن برخی از گروه‌های پلی آمید و هیدرولیز زنجیرهای پلی آمید پس از فرآیند آنزیمی را تأیید می کند. استحکام، ازدیاد طول تا پارگی و مدول نمونه‌های عمل شده با آنزیم لیباز در مقایسه با نمونه عمل نشده کاهش یافت که احتمالاً به دلیل هیدرولیز بخشی از زنجیرهای پلی آمید می باشد. با توجه به تصاویر میکروسکوپی میزان تغییرات سطحی کمی در الیاف مشاهده می شود. فرآیند آنزیمی پیش از رنگرزی، ثبات‌های شستشویی و ثبات نوری نمونه‌های رنگرزی شده را بهبود داد که می تواند در نتیجه افزایش نفوذ و جذب رنگزها به داخل الیاف باشد. با توجه به اینکه امروزه بسیاری از تحقیقات در زمینه اصلاح خواص الیاف مصنوعی جهت استفاده راحت تر در پوشاک می باشد فرآیند آنزیمی می تواند به عنوان روشی بسیار مفید در این زمینه مطرح باشد.

عمل کردن نمونه‌ها با آنزیم سبب افزایش تجمع رنگزای دیسپرس و نفوذ به داخل الیاف می شود و زمانی که غلظت رنگزا در الیاف افزایش یابد اتلاف انرژی نور جذب شده در الیاف سریع تر است و تجزیه نوری رنگزا کندتر می باشد. در نتیجه با افزایش غلظت رنگزا در الیاف میزان رنگ‌پذیری نمونه‌ها در معرض نور آفتاب کاهش می یابد [۳۹،۴۰]. از طرف دیگر رطوبت نسبی محیط و دما دو عامل مؤثر در رنگ‌پذیری الیاف رنگرزی شده می باشند. با افزایش میزان رطوبت موجود در الیاف، رادیکال‌های فعال ایجاد شده در اثر رطوبت و اکسیژن موجود در محیط به همراه انرژی امواج الکترومغناطیس در طی فرآیند اکسیداسیون نوری، سرعت رنگ‌پذیری در الیاف را افزایش می دهند. هرچه غلظت رنگزا در الیاف افزایش یابد به دلیل افزایش تجمع رنگزا، تأثیر رطوبت موجود در الیاف در کاهش ثبات نوری کمتر می باشد [۴۱-۴۴]. با افزایش زمان نوردهی نمونه‌ها از ۲ به ۷ ساعت تغییری در ثبات نوری نمونه‌ها مشاهده نمی شود که نشان می دهد تغییرات ثبات نوری نمونه‌ها تا حدی با گذشت زمان است و افزایش زمان نوردهی تأثیری در کاهش ثبات نوری ندارد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایش رمق کشی، رنگ‌سنجی و جذب رطوبت، میزان جذب رنگزاهای اسیدی و دیسپرس و همچنین میزان رطوبت

۵- مراجع

1. P. Atkins, J. D. Paula. Physical chemistry. 7th Ed. UK: Oxford University Press, (2001).
2. Y. M. Galante, D. Foglietti, C. Tonin, R. Innocenti, F. Ferro, R. Monteverdi. Enzyme applications in fiber processing, 24. American Chemical Society, (1998), 294-305.
3. A. Cavaco-Paulo. Processing textile fibers with enzymes: an overview. In: ACS Symposium Series, 687(1998), 180-189.
4. R. J. Beynon, J. S. Bond. Proteolytic enzymes: a practical approach. Oxford: Oxford University Press, (2001).
5. E. Heine, H. Hocker, Enzyme treatments for wool and cotton. *Rev. Prog. Coloration*. 25(1995), 57-63.
6. N. Duran, M. Duran. Enzyme applications in the textile industry. *Rev. Prog. Coloration*. 30(2000), 41-44.
7. R. Makinson. Shrinkproofing of wool. NY: Marcel Dekker; (1979).
8. D. P. Bishop, J. Shen, E. Heine, B. Hollfelder. The use of proteolytic enzymes to reduce wool fiber stiffness and prickly. *J. Text. Inst.* 89(1998), 546-53.
9. D. Clark, Enzyme treatment for removing pills from garment dyed goods. *Int. Dyer*. 178(1993), 20.
10. H. Nolte, D. P. Bishop, H. Hocker. Effects of proteolytic and lipolytic enzymes on untreated and shrink-resist-tested wool. *J. Text. Inst.* 87(1996), 212-226.
11. G. Mazzuchetti, C. Vineis. Study of the enzyme treatments effect on the pilling behavior of knitted wool fabrics. *Autex. Res. J.* 5(2005), 55-60.
12. Kurashiki Spinning Co., Japanese P 58,144,105.
13. A. Riva, I. Algaba, R. Prieto, Dyeing kinetics of wool fabrics pretreated with a protease. *Color. Technol.* 118(2002), 59-63
14. A. Riva, A. J. M. Bordas, Prieto R. Enzymes as auxiliary agents in wool dyeing. *J. Soc. Dyers. Color.* 115(1999), 125-129.
15. E. Tsatsaroni, M. Liakopoulou-kyriakides, I. Eleftheriadis. Comparative study of dyeing properties of two yellow natural pigments: effects of enzymes and proteins. *Dyes. Pigments*. 37(1998), 307.
16. M. Parvinzadeh, Effect of proteolytic enzyme on dyeing of wool with madder. *Enzyme. Microbial. Technol.* 40(2007), 1719-1722
17. D. Ciechańska, J. Kazimierczak, Enzymatic treatment of fibers from regenerated cellulose. *Fibers. Textiles Eastern Europe*. 14(2006), 92-95.
18. D. Clark, Enzyme treatment for removing pills from garment dyed goods. *International Dyer*. 178(1993), 20-21.
19. G. Buschle-Diller, C. Fanter, F. Loth. Structural changes in hemp fibers as a result of enzymatic hydrolysis with mixed

- enzyme systems. *Text. Res. J.* 69(1999), 244-251.
20. M. Arami, S. Rahimi, L. Mivehie, F. Mazaheri, N. M. Mahmoodi. Degumming of Persian silk with mixed protolytic enzymes. *J. Appl. Polym. Sci.* 106(2007), 267-275.
21. G. Freddi, R. Mossotti, R. Innocenti. Degumming of silk fabric with several proteases. *J. Biotechnol.* 106(2003), 101-112.
22. G. M. Gübitz, A. Cavaco-Paulo. New substrates for reliable enzymes: enzymatic modification of polymers. *Curr. Opin. Biotech.* 14(2003), 577-582.
23. G. Fischer-Colbrie, S. Heumann, S. Liebming, E. Almansa, A. Cavaco-Paulo, G. M. Gübitz. New enzymes with potential for PET surface modification. *Biocatal. Biotransfor.* 22(2004), 341-346.
24. H. R. Kim, W. S. Song, Lipase treatment of polyester fabrics. *Fiber. Polym.* 7(2006), 339-343.
25. S. Heumann, A. Eberl, H. Pobeheim, S. Liebming, G. Fischer-Colbrie, E. Almansa, A. Cavaco-Paulo, G. M. Gübitz, New model substrates for enzymes hydrolyzing poly ethylene terephthalate and polyamide fibers. *J. Biochem. Bioph. Meth.* 39(2006), 89-99.
26. U. Klun, J. Friedrich, A. Krzan, Polyamide 6 fiber degradation by a lignolytic fungus. *Polym. Degrad. Stabil.* 79(2003), 99-104.
27. T. Deguchi, Y. Kitaoka, M. Kakezawa, T. Nishida, Purification and characterization of a nylon-degrading enzyme. *Appl. Environ. Microbiol.* 64(1998), 1366-1371.
28. T. Deguchi, M. Kakezawa, T. Nishida, Nylon biodegradation by lignin-degrading fungi. *Appl. Environ. Microbiol.* 63(1997), 329-331
29. C. M. Silva, A. Cavaco-Paulo, Monitoring biotransformations in polyamide fibres. *Biocatal. Biotransfor.* 22(2004), 357-60.
30. S. M. Burkinshaw, B. Bahojb-Allafan, The development of a metal-free, tannic acid-based aftertreatment for nylon 6,6 dyed with acid dyes-part 3: Different enzymes. *Dyes. Pigments.* 60(2004), 91-102.
31. G. Franz, Fibers, Synthetic Inorganic. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6th Ed., Wiley-VCH, Weinheim, 13(2003), 359-373.
32. J. E. McIntyre, Synthetic Fibers: Nylon, Polyester, Acrylic, Polyolefin. Woodhead Pub. Cambridge, (2005), 20-88.
33. M. Lewin, Handbook of Fiber Chemistry. CRC Press, New York, (2007), 1-26.
34. F. Fourne, Synthetic Fibers: Machines and Equipment, Manufacture, Properties. Hanser Publishers, Munich, (1999), 67-94.
35. T. Hayashi, K. Nakayama, M. Mochizuki, T. Masuda. Studies on biodegradable poly (hexano-6-lactone) fibers-Part 3: Enzymatic degradation in vitro. *Pure Appl. Chem.* 74(2002), 869-880.
36. J. M. Julian, D. G. Anderson, A. H. Brandau, J. R. McGinn, A. M. Millon. Qualitative analysis. In: D. R. Brezinski, editor. An infrared spectroscopy atlas for the coatings industry. 1st Ed. Pennsylvania. (1991), 30-51.
37. J. Guo, The effects of household fabric softeners on the thermal comfort and flammability of cotton and polyester fabrics [dissertation] Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University 121 p. Available from: University digital library, etd-05072003-143334, (2003).
38. W. Groenewoud, Characterisation of polymers by thermal analysis, Elsevier, Netherland, (2001), 10-16.
39. J. Oakes, Photofading of textile dyes. *Rev. Prog. Color.* 31(2001), 21-28.
40. A. T. Balazsy, D. Eastop, Chemical principles of textile conservation, John Wiley ltd, Singapore, (1998), 36-41.
41. T. Padfield, S. Landi, The light-fastness of the natural dyes, Studies in Conservation. 11(1966), 181-196.
42. S. N. Batchelor, D. Carr, C. E. Coleman, L. Fairclough, A. Jarvis, The photofading mechanism of commercial reactive dyes on cotton. *Dyes. Pigments.* 59(2003), 269-275.
43. Y. A. Ershov, G. E. Krichevskii, Light fastness of coloured polymeric materials. *Russ. Chem. Rev.* 43(1974), 210-223.
44. S. Shakra, H. L. Hanna, A. Hebeish, Some fading characteristics of various monoazo dyes on polyester. *Macromol. Mater. Eng.* 93(1981), 75-81.