



## مروری بر خصوصیات رنگرزی و ثباتی الیاف پلی لاکتیک اسید

شیرین بیاتی<sup>۱</sup>، محمدعلی توانایی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی نساجی، گروه مهندسی شیمی نساجی و علوم الیاف، یزد، ایران، صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵

۲- استادیار، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی نساجی، گروه مهندسی شیمی نساجی و علوم الیاف، یزد، ایران، صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۱۵ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۴/۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۲۲ در دسترس به صورت الکترونیک: ۹۴/۷/۱۱

### چکیده

افزایش آگاهی‌های زیست محیطی، قیمت نفت خام و چالش‌های مربوط به گرم‌شدن زمین، سبب گردید توجه و علاقه به زیست پلیمرها افزایش یابد. از آنجا که این پلیمرها از منابع تجدیدپذیر به دست می‌آیند و زیست تخریب پذیرند، در مقایسه با پلیمرهای با پایه ترکیبات نفتی، دارای حداقل آثار منفی بر محصولات ساخته شده از آنها هستند. یکی از پلیمرهای زیست‌سازگار و زیست تخریب پذیر، پلی لاکتیک اسید (PLA) است که طی سال‌های اخیر در منسوجات با کاربردهای مختلف، مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعه حاضر، رنگرزی الیاف PLA مرور گردیده است. تأثیر شرایط رنگرزی از جمله دما، زمان، pH حمام رنگرزی، ساختار ماده رنگزا و رنگرزی در شرایط امواج فراصوت، بررسی گردیده است. همچنین مقایسه میزان رمق‌کشی الیاف PLA و PET و ثبات‌های رنگرزی الیاف PLA نیز ارائه شده است.

### واژه‌های کلیدی

فرآیند رنگرزی، الیاف پلی لاکتیک اسید، رمق‌کشی، ثبات رنگرزی.

### چکیده تصویری





## Dyeing and fastness properties of poly (lactic) acid fibres: A review

Shirin Bayati, Mohammad Ali Tavanaie\*

Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, University of Yazd, P.O. Box: 89195-741, Yazd, Iran.

### Abstract

Attention to biopolymers has been increased due to increase of the environmental awareness, crude oil price and challenges of earth warming. Because of the polymers derived from renewable sources, using these compounds have the lowest negative effects on the final products as comparing to oil-based polymers. One of the most important biocompatible and biodegradable polymer is poly(lactic) acid (PLA), which has been used in the textiles with different applications. In the present study, dyeing process and fastness properties of the PLA fibers were reviewed. Effects of dyeing condition such as, temperature, time, dye bath pH, dyes structure and dyeing at ultrasonic wave medium were considered. Also exhaustion values of the PLA and PET fibers were compared and dyeing fastnesses of PLA fibers were presented.

### Keywords

Dyeing process, Poly(lactic) acid fibers, Exhaustion, Dyeing fastness.

### Graphical abstract



\*Corresponding author: [ma.tavanaie@yazd.ac.ir](mailto:ma.tavanaie@yazd.ac.ir)

## ۱- مقدمه

حلقه‌گشایی<sup>۵</sup> لاکتیک اسید<sup>۶</sup> صورت می‌گیرد [۱, ۲۴, ۲۵]. حذف آب در نتیجه پلیمریزاسیون تراکمی، با استفاده از حلال، تحت خلاء و دمای بالا صورت می‌گیرد. پلیمریزاسیون حلقه‌گشایی اسید لاکتیک، تحت حرارت صورت می‌گیرد که در اینجا نیاز به استفاده از حلال نمی‌باشد [۱, ۲۴-۲۶]. پلیمریزاسیون حلقه‌گشایی مونومر لاکتیک اسید، سبب تولید پلیمرهایی با نسبت ایزومرهای متفاوت، در محدوده وزن مولکولی وسیع می‌شود و پلیمرهایی با سطوح متفاوت L-لاکتید<sup>۷</sup> و D-لاکتید<sup>۸</sup> ایجاد می‌کند. پلی (L-لاکتید) یک پلیمر نیمه‌بلوری است که مقاومت و پایداری خوبی دارد و نور پلاریزه‌شده را در جهت عقربه‌های ساعت منحرف می‌سازد. پلی (D-لاکتید) دارای ساختار بی‌شکل است، بنابراین نور پلاریزه‌شده را در خلاف جهت عقربه‌های ساعت منحرف می‌کند [۱]. پلی (DL-لاکتید) که از پلیمرشدن مخلوط راسمیک دو نوع L و D لاکتید تهیه می‌شود از نظر نوری خنثی و کاملاً بی‌شکل است. این پلیمر ایجاد شده، نقطه ذوب بلورهایش تقریباً ۲۱۰ °C است که ۲۵ °C از هر یک از پلیمرها با ساختار D و L بیشتر می‌باشد (شکل‌های ۱ الف-ج) [۲۴].

کاهش فرآورده‌های نفتی و پتروشیمی، افزایش گرمای جهانی و آلودگی‌های زیست محیطی سبب گردیده است استفاده از پلیمرهایی زیست تخریب‌پذیر<sup>۱</sup> گسترش یابد. تولید پلیمر پلی‌لاکتیک اسید (PLA) به صورت صنعتی (تولید انبوه) از سال ۲۰۰۲ میلادی توسط شرکت آمریکایی Dow Chemicals<sup>۲</sup> آغاز گردید. استفاده از این ماده به عنوان جایگزین مناسبی برای پلیمرهای تجزیه‌ناپذیر در تولید ظروف، بطری‌ها و بسته‌بندی مواد غذایی به سرعت جای خود را باز کرده و در حال حاضر نیز این روند افزایشی ادامه دارد [۱]. پلیمر PLA یک پلی‌استر گرمانرم<sup>۳</sup> آلیفاتیک<sup>۴</sup> خطی است [۲-۱۱]. PLA به طور ۱۰۰٪ از منابع تجدیدپذیر مانند ذرت، قابل استخراج است [۱۲-۲۳] و علاوه بر گسترش مصرف آن در تولید ظروف پلاستیکی یکبار مصرف [۹, ۱۶]، امروزه در صنایع دیگری از جمله صنعت نساجی نیز کاربرد پیدا کرده است. تولید پلیمر PLA با استفاده از لاکتیک اسید و به دو روش پلیمریزاسیون تراکمی شامل، استفاده از حلال تحت خلاء با درجه حرارت بالا یا پلیمرشدن

<sup>5</sup> Ring opening polymerization

<sup>6</sup> Lactic acid

<sup>7</sup> L-Lactide

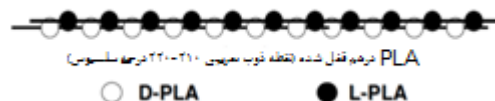
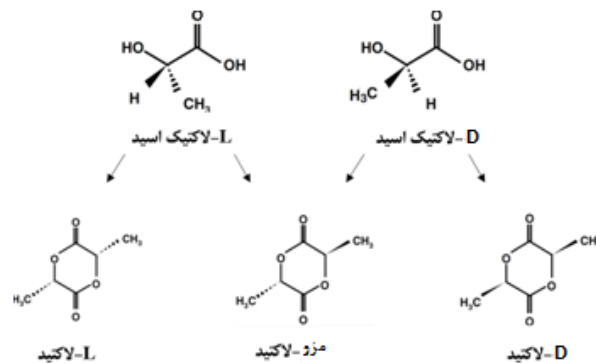
<sup>8</sup> D- Lactide

<sup>1</sup> Biodegradable

<sup>2</sup> www.dow.com

<sup>3</sup> Thermoplastic

<sup>4</sup> Aliphatic



شکل ۱- (الف) - واسطه‌های لاکتید از اسید لاکتیک، (ب) ایزومرهای مختلف PLA در زنجیر (ج) کمپلکس فضایی پلیمر PLA [۲۴].

## ۲- کاربرد الیاف PLA

الیاف پلی استر بیشتر از مصرف ۴۰٪ از پوشاک جهانی را به خود اختصاص داده است که استفاده از آن به طور مداوم در حال افزایش است [۲۴، ۲۷]. برای تولید الیاف پلی استر به منابع سوختی نیاز هست، همچنین این پلیمر غیر قابل تجزیه می باشد و به راحتی قابل بازیافت نیست. در مقابل الیاف PLA تجدیدپذیر هستند و منجر به کاهش میزان دی اکسید کربن در سطح زمین می گردند، بنابراین می تواند جایگزین مناسبی برای الیاف پلی استر باشد [۲۷]. PLA توانست در بسیاری از کاربردها از جمله صنایع نساجی و محصولات یکبار مصرف (لوازم رومیزی، ظروف مواد غذایی، کارتن های تخم مرغ، دسته تیغ صورت تراشی، اسباب بازی ها) نفوذ کند [۲۳، ۳۸]. به دلیل مزایای زیست محیطی، پلیمر PLA نسبت به پلیمرهای مبنی بر منابع نفتی (مانند پلی استر)، استفاده از آن گسترش یافته است [۲۴]. با توجه به افزایش تقاضا، استفاده از PLA در آینده، برای تولید کامپوزیت یا لباس های مخلوط با الیاف طبیعی (به دلیل کاهش در قیمت تمام شده و دسترسی به خواص فیزیکی بهتر) نیز افزایش می یابد [۳۹]. الیاف PLA را می توان برای کشت اندام های مختلف نیز به کار برد. داربست های ساخته شده از الیاف PLA زیست تخریب پذیر و قابل جذب است [۲۳، ۳۸، ۳۹]. کاربردهای تجاری جدیدی از الیاف PLA در پوشاک و محصولات بهداشتی (پوشک بچه، اسفنج های زمین شوی نخی) به دست آمده است [۲۳، ۲۴، ۲۷، ۳۱، ۳۹، ۴۰]. از جمله کاربردهای الیاف PLA ساخت پارچه های بهداشتی، ورزشی، مبلمان، لوازم خانگی و چادرهای صحرایی است [۳۰، ۳۹]. برنامه های کاربردی برای مصرف این الیاف در منسوجات بافته شده، کشیاف و یا منسوجات بی بافت از زمینه های در حال توسعه است [۳۵، ۴۱].

## ۳- شرایط شستشوی پیش از رنگرزی

مطالعه تعداد زیادی از مقالات و مستندات در خصوص رنگرزی الیاف PLA امکان تهیه و ارائه جدول ۱ را در زمینه شرایط حمام شستشو پیش از رنگرزی برای الیاف PLA فراهم نمود.

همان طور که ذکر شد، یکی از روش های اساسی در افزایش نقطه ذوب الیاف (PLA)، تولید کمپلکس فضایی است که ساختار بلوری دارد و از ترکیب الیگومر L-(PLA) و D- به دست می آید. امکان کشش این نوع الیاف در دمای بالا وجود ندارد، اما از قابلیت کشش در حد قابل قبولی برخوردار است [۳، ۲۴]. الیاف PLA به دو روش ذوب ریزی و محلول ریزی تولید می شود و روش متداول، ذوب ریزی است [۱۸، ۲۷]. خواص الیاف PLA شبیه الیاف مصنوعی دیگر است و روش های رنگرزی و تکمیل، برای به حداقل رساندن آسیب به این الیاف، اصلاح شده است [۸]. این الیاف قابلیت رنگ پذیری با رنگرهای دیسپرس را دارا می باشند [۳۱-۲۸، ۲۰، ۱۱]. از فرآیندها و فناوری های متداولی که برای تکمیل الیاف مصنوعی استفاده می شود برای الیاف PLA هم می توان استفاده کرد. در صورت وجود مواد قلیایی، الیاف PLA استحکام خود را به دلیل آبکافت در فرآیندهای مرطوب از دست می دهد، بنابراین در هنگام شستشو و رنگرزی باید به این نکته توجه ویژه داشت [۱۰، ۳۲]. فرآیندهای رنگرزی، تثبیت حرارتی، سفیدکننده ها و شستشو می تواند روی خواص فیزیکی الیاف PLA مؤثر باشد [۱]. حمام رنگرزی در طی فرآیندهای مرطوب باید تنظیم شود زیرا در غیر این صورت، نتیجه آبکافت الیاف PLA خواهد بود [۳۳]. الیاف PLA نه تنها به درجه حرارت های بالا بلکه به قلیا نیز حساس است. آبکافت قلیایی در الیاف PLA نسبت به الیاف PET بیشتر است و فرآیندهای قلیایی به کار برده شده در تولید منسوجات با الیاف PLA می توانند منجر به تخریب این الیاف شده و آن را دچار آسیب های سطحی کند به گونه ای که در حرارت های بالا استحکامش را از دست بدهد [۳۳-۲۸، ۲۰، ۱۱-۸]. بسیاری از خواص الیاف PLA مشابه الیاف پلی استر<sup>۱</sup> است [۳۶]. الیاف PLA از حساسیت حرارتی بیشتری برخوردار است [۱]، در نتیجه شرایط عملیات مرطوب روی این الیاف باید خفیف تر از الیاف PET باشد [۲۶]. در صورت رنگرزی الیاف PLA با رنگرهای دیسپرس، عمق های بیشتر و شیدهای روشن تری را می توان در مقایسه با الیاف PET به دست آورد [۱۱، ۲۴، ۳۷].

### 1 Polyester

جدول ۱- شرایط شستشوی پیش از رنگرزی بر اساس منابع مختلف.

مقدار	مراجع	متغیر عملیات شستشو پیش از رنگرزی
۴۰-۵۰	[۱۹]	دما (°C)
۶۰-۷۰	[۹-۱۲]، [۱۶]، [۲۲]، [۳۲-۳۴]، [۴۲-۴۸]	زمان (min)
۱۰-۲۰	[۱۰-۱۲]، [۱۶]، [۱۹]، [۲۲]، [۳۲]، [۳۴]، [۴۲]، [۴۴-۴۸]	
۳۰-۴۰	[۹]، [۳۳] و [۴۳]	مقدار شوینده غیر یونی (%)
۰/۵-۱	[۱۱]، [۱۲]، [۱۶]، [۱۹]، [۲۲]، [۳۳]، [۳۴]، [۴۶ و ۴۷]	
۱/۵-۲	[۴۳] و [۴۵]	سدیم کربنات (%)
۲/۵-۳	[۹]	
۰/۵-۱	[۱۲]، [۲۲]، [۴۳]، [۴۶]، [۴۸ و ۴۹]	
۱/۵-۲	[۱۰]، [۱۶]، [۱۹]، [۳۲]، [۳۴]، [۴۴ و ۴۵]	

فناوری‌های متداولی که برای تکمیل سایر الیاف استفاده می‌شود، برای الیاف PLA هم می‌توان استفاده کرد [۱]. هنگام شستشو و رنگریزی باید به حساس بودن الیاف PLA به قلیا توجه ویژه داشت. فرآیندهای موجود از جمله، رنگریزی، تثبیت حرارتی، سفیدگری و شستشو می‌تواند روی خواص فیزیکی الیاف PLA مؤثر باشد [۳۳]. کارشناسان بهترین شرایط رنگریزی برای الیاف PLA را شرایط اسیدی و خنثی در نظر می‌گیرند. البته استفاده از شرایط قلیایی به مدت طولانی در درجه حرارت بالا تأثیر منفی روی استحکام الیاف PLA می‌گذارد، زیرا آبکافت در سطح مقطع الیاف PLA صورت می‌گیرد. درجه حرارت، pH و زمان رنگریزی، در کاهش وزن مولکولی پلیمرها بسیار مؤثر است [۱]. اختلاط الیاف PLA با الیاف پنبه، سبب بهبود خواص فیزیکی نخ و پارچه نهایی و کاهش قیمت تمام شده محصول خواهد شد. با توجه به اینکه الیاف PLA به قلیا حساس است، بنابراین شرایط رنگریزی محصول مخلوط از این دو لیف باید تحت کنترل باشد. زیرا همانطور که پیش از این نیز ذکر شد شرایط قلیایی شدید (مناسب برای رنگریزی الیاف پنبه) منجر به آبکافت الیاف PLA می‌گردد [۱، ۴۹]. در صورتی که الیاف PLA تحت شرایط خنثی و یا قلیایی به مدت طولانی رنگریزی گردد، سطح مقطع الیاف تخریب شده و در نتیجه استحکام خود را از دست می‌دهند. رنگریزی مخلوط الیاف PLA همراه با الیاف پنبه تحت شرایط خنثی و دمای °C ۱۱۰ صورت می‌گیرد [۱]. در جدول ۲ با توجه به مطالعه مقالات و مستندات در خصوص رنگریزی الیاف PLA، امکان تهیه و ارائه نسخه رنگریزی برای رنگریزی الیاف PLA فراهم گردید.

همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است، با توجه به بیشترین میزان استفاده از شرایط شستشو پیش از رنگریزی در مستندات، بهترین شرایط، دمای °C ۷۰-۶۰، زمان ۲۰-۱۰ دقیقه، مقدار شوینده غیر یونی ۱-۵ درصد و سدیم کربنات ۲-۱/۵ درصد می‌باشد. مقاومت الیاف PLA در برابر مواد قلیایی ضعیف است. مواد قلیایی قوی باعث از بین بردن استحکام این الیاف در نتیجه آبکافت آنها می‌گردد. pH فرآیند مرطوب باید در محدوده ۴-۷، به منظور به حداقل رساندن آبکافت، نگه داشته شود [۴۷]. ماهیت شستشو برای این محصولات به این دلیل است که روغن، واکس، گرد و خاک (آلودگی‌های محیطی) و دیگر ناخالصی‌های موجود را قبل از فرآیندهای مرطوب دیگر، از جمله عملیات‌های رنگریزی، شستشوی احیایی و عملیات تکمیلی، از سطح کالا جدا کنند. شستشو، امکان رنگریزی نایک‌نواخت، لکه‌گذاری روی کالای ساخته شده از الیاف PLA را به علت وجود روغن، واکس و چربی برطرف می‌سازد [۴۳، ۴۲، ۳۷، ۲۴، ۱۹، ۱۱، ۱۰].

#### ۴- شرایط رنگریزی

الیاف PLA شباهت بسیاری با سایر الیاف مصنوعی دارد، اما از آنجایی که خود یک دسته جدید محسوب می‌شود و خواص آن از حساسیت‌هایی برخوردارند، لازم است فرآیندهای رنگریزی و تکمیل آن، با توجه به خواص این الیاف اصلاح گردد تا بتوان به بهترین شرایط آن، دست پیدا کرد [۴۸، ۱۹، ۱]. با توجه به ماهیت آب‌گریز و غیرقطبی این الیاف، آنها را با مواد رنگزای دیسپرس رنگریزی می‌کنند [۴۸، ۴۳، ۴۲، ۱۹، ۱]. باید دما و فشار مناسب رنگریزی را با توجه به حساسیت این الیاف به کاربرد [۱۰]. فرآیندها و

جدول ۲- نسخه رنگریزی بر اساس منابع مختلف مورد مطالعه.

مقدار	مراجع	نسخه رنگریزی
۱-۱/۵	[۹]، [۱۱]، [۲۸]، [۳۰]، [۳۷]، [۴۵]	ماده رنگزا o.w.f % *
۲-۲/۵	[۱۰]، [۱۱]، [۲۰]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۵]، [۴۱]، [۴۵]، [۴۶]، [۵۰-۵۶]	
۳-۴	[۱۹]، [۲۸]، [۳۴]، [۴۵]، [۴۷]	ماده پراکنش کننده (%)
۲	[۹]، [۵۲]، [۵۵]	
۴-۴/۵	[۹]، [۱۰]، [۱۸]، [۲۲]، [۲۸]، [۳۳]، [۳۷]، [۴۰]، [۴۲]، [۴۵-۴۷]، [۴۹]، [۵۱]، [۵۵]، [۵۷]	pH
۵-۵/۵	[۱]، [۱۲]، [۱۹]، [۲۰]، [۳۵]، [۴۱]، [۴۳]، [۴۴]، [۵۲]، [۵۴]، [۵۸]	
۲۰-۳۰	[۱]، [۹-۱۲]، [۲۱]، [۲۲]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۳]، [۳۴]، [۴۰]، [۴۲]، [۴۶]، [۵۴]، [۵۵]، [۵۹]	زمان (دقیقه)
۴۰-۵۰	[۱۱]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۱]، [۴۲]، [۴۵]، [۴۷]، [۴۹]	
۶۰-۷۰	[۲۰]، [۲۱]، [۳۰]، [۳۶]، [۴۲]، [۴۹]، [۵۰]، [۵۱]	
۷۰-۸۰	[۱۱]، [۲۱]، [۳۶]، [۴۳]، [۵۰]، [۵۴]	دما (°C)
۹۰-۱۰۰	[۲۱]، [۳۱]، [۳۶]، [۴۳]، [۴۵]، [۵۰]، [۵۴]	
۱۱۰-۱۲۰	[۱]، [۹]، [۱۰]، [۱۲]، [۱۶]، [۱۹-۲۲]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۳]، [۳۴]، [۳۶]، [۴۰-۴۲]، [۴۴]، [۴۶]، [۴۷]، [۴۹]، [۵۱]، [۵۲]، [۵۴]، [۵۵]، [۵۹]	
۰/۵-۱	[۱]، [۱۲]، [۱۶]، [۲۲]، [۳۰]، [۴۲]، [۴۹]، [۵۵]، [۵۹]	نرخ افزایش دما (°C/min)
۱/۵-۲	[۹]، [۱۰]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۱]، [۲۸]، [۲۹]، [۴۲]، [۴۴]، [۴۶]، [۴۷]، [۵۲]، [۵۴]، [۵۵]	
۲/۵-۳	[۴۲]	
۱/۵-۲	[۳۴]، [۴۲]، [۵۲]، [۵۴]، [۵۵]	نرخ کاهش دما (°C/min)
۲/۵-۳	[۱]، [۹]، [۱۰]، [۱۲]، [۱۶]، [۲۲]، [۲]، [۳۰]، [۳۴]، [۴۰]، [۴۴]، [۴۶]، [۴۷]، [۴۹]، [۵۹]	

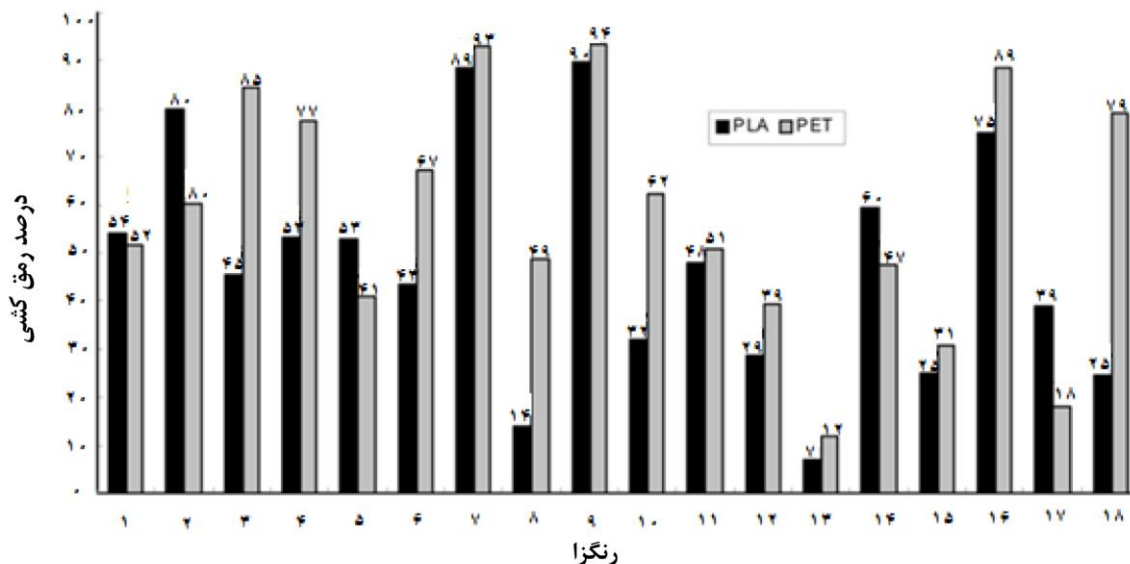
\* درصد وزنی رنگزا درون الیاف

نتایج حاصل از بررسی جدول ۲ نشان می‌دهد که بهترین نسخه رنگرزی (بر اساس بیشترین میزان استفاده محققین) برای الیاف PLA، شامل مقدار رنگزای دیسپرس<sup>۱</sup> ۰.۵-۲٪ o.w.f، pH=۴-۴.۵، زمان ۲۰-۳۰ دقیقه و دمای ۱۱۰-۱۲۰ °C است. تنظیم pH با استفاده از اسیداستیک به همراه بافر سدیم استات است. تمام کالاها بعد از حمام رنگرزی با آب شسته و در هوای محیط خشک می‌گردد [۲۰، ۲۲، ۲۸، ۴۵، ۴۷، ۵۲، ۵۳، ۶۰، ۶۱]. با توجه به خواص منحصر به فرد الیاف PLA در این مطالعات، سعی بر این بود که بتوان محدوده وسیع تری از شرایط بهینه رنگرزی را استخراج کرد. مطالعات اولیه با استفاده از ماده رنگزا با انرژي متوسط انجام گرفته است. در این حال باید درجه حرارت حمام رنگرزی را بین ۹۰ تا ۱۰۰ °C تنظیم کرد تا خواص الیاف PLA به علت آبکافت و جمع‌شدگی از بین نرود [۱، ۱۰، ۳۱، ۳۴، ۴۱، ۴۲]. کراس<sup>۱</sup> و یانگ<sup>۲</sup> به بررسی میزان رمق‌کشی تعدادی از مواد رنگزای دیسپرس با غلظت ۴٪ o.w.f روی پارچه‌های PLA پرداختند و همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، تنها تعدادی از رنگزاهای مورد مطالعه جذب بالایی را روی الیاف PLA از خود نشان دادند. همچنین در این بررسی مشخص گردید که درصد رمق‌کشی رنگزاهای دیسپرس مورد مطالعه، از درصد رمق‌کشی پایین‌تری روی الیاف PLA نسبت به الیاف PET برخوردار است [۴۱]. در صورت مناسب‌بودن شرایط رنگرزی، تعداد محدودی از رنگزاهای دیسپرس

تجاری از درصد رمق‌کشی خوبی روی الیاف PLA برخوردار است [۱، ۳۱، ۴۱، ۴۷، ۶۲]. رنگزای دیسپرس زرد ۵۸ هنگامی که به دمای رنگرزی ۱۰۰ °C نزدیک می‌گردد، میزان رمق‌کشی آن ۱۴٪ افزایش پیدا می‌کند، که این به دلیل افزایش دمای رنگرزی است [۵۰]. از آنجا که الیاف پلی‌لاکتیک اسید از لحاظ ساختاری یک نوع پلی‌استر (زنجیر خطی) است و برخی خواص مشابه به الیاف پلی‌استر دارد و برخلاف پلی‌استر، زیست تخریب‌پذیر نیز هست، مطالعات مقایسه‌ای از سوی برخی محققین منتشر شده است. با مطالعه رنگرزی طیف وسیعی از رنگزاهای دیسپرس با غلظت ۲٪ از ماده رنگزا در دمای ۱۰۰ °C روی الیاف PLA پرداختند، که در بررسی انجام شده ۷ مورد از ۹ رنگزای دیسپرس مورد بررسی، درصد رمق‌کشی زیر ۸۰٪ دارند. رنگزاهای دیسپرسی که درصد رمق‌کشی ۸۰ یا بیشتری روی الیاف PLA دارند در دمای ۱۱۰ °C به مدت ۶۰ دقیقه رنگرزی گردیده‌اند [۳۳، ۵۹]. برخی از مواد رنگزای مورد بررسی آنها، درصد رمق‌کشی‌شان روی الیاف PLA خیلی مشابه الیاف PET حاصل شد. همچنین نشان داده شد که بیشتر مواد رنگزای دیسپرس تجاری از درصد رمق‌کشی بالای ۶۰٪ برخوردار هستند [۳۴، ۴۷]. این محققین اظهار داشتند، دمای حمام رنگرزی به کار برده شده بنا به دلیل ساختار بلورین و کاهش خلل و فرج الیاف، منجر به جذب ماده رنگزا کمتر می‌گردد. برای دستیابی به میزان رمق‌کشی بهتر، ماده رنگزا باید به طور مناسب درون الیاف پخش گردد. بنابراین میزان خلل و فرج بین زنجیرهای پلیمری، بر میزان نفوذ و رمق‌کشی ماده رنگزا بسیار مؤثر است [۲۸].

<sup>۱</sup> درصد وزنی رنگزا درون الیاف

<sup>۱</sup> Karst  
<sup>۲</sup> Yang

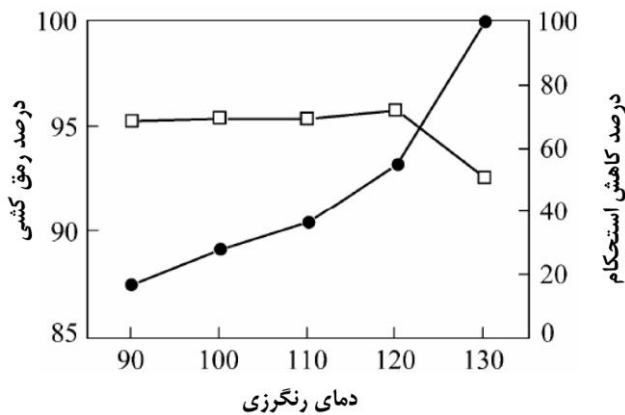


شکل ۲- درصد جذب رنگ برخی از مواد رنگزای دیسپرس با غلظت ۴٪ o.w.f روی پارچه‌های PLA و PET [۴۱]



## ۴-۱- دمای رنگریزی

بر اساس مطالعات صورت گرفته می‌توان گفت که دمای رنگریزی الیاف PLA از تشابه بالای با الیاف PET برخوردار است. رنگریزی الیاف PLA در دمای  $100^{\circ}\text{C}$ ، منجر به کاهش ۴۰٪-۲۰٪ ازدیاد طول تا حد پارگی و همچنین کاهش استحکام کششی می‌گردد. این کاهش به دلیل جمع شدن نخ‌های فیلامنت است. بنابراین تخریب الیاف PLA منجر به از دست دادن ازدیاد طول تا حد پارگی می‌گردد [۵۲]. دمای رنگریزی الیاف PLA با رنگزاهای دیسپرس با سطح انرژی بالا،  $130^{\circ}\text{C}$  و برای رنگزاهای دیسپرس با سطح انرژی پایین،  $110-120^{\circ}\text{C}$  گزارش شده است. الیاف PLA که در دمای  $130^{\circ}\text{C}$  رنگریزی گردیده‌اند، مقاومت کششی و ازدیاد طول‌شان را به‌طور کامل از دست می‌دهند (شکل ۳) [۵۴، ۵۶]. افزایش ازدیاد طول تا حد پارگی در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  و یا کمتر از آن به دلیل جمع‌شدگی الیاف PLA است، که خود منجر به از دست دادن استحکام این الیاف می‌گردد [۲۱، ۳۵، ۵۴]. البته باید عنوان نمود که جمع‌شدگی به دلیل رهایی تنش‌های باقیمانده در الیاف در نواحی بی‌شکل ساختار لیف است، که با کاهش آرایش یافتگی الیاف نیز همراه می‌گردد [۵۴].



شکل ۳- تأثیر دمای رنگریزی بر میزان جذب ماده رنگزا، (مربع کشی و دایره کشی) کاهش استحکام [۲۱].

در صورت انجام رنگریزی الیاف PLA در محلول کربن دی‌اکسید فوق بحرانی ( $\text{SC-CO}_2$ ) در دمای کمتر از  $110^{\circ}\text{C}$ ، اثر تخریبی کمتری روی استحکام نشان داده شده است؛ به‌طوری که استحکام از دست رفته در این نوع رنگریزی معادل استحکام از دست رفته الیاف PLA رنگریزی شده در حمام آب با دمای  $100^{\circ}\text{C}$  است. میزان تخریب الیاف PLA رنگریزی شده در آب بیشتر از محلول کربن دی‌اکسید فوق بحرانی است ( $\text{SC-CO}_2$ ) است، که این به حساس بودن الیاف PLA به عوامل موثر بر رنگریزی از جمله شرایط قلیایی اشاره دارد [۵۱]. همان‌طور که در نتایج اغلب محققین ملاحظه گردید، الیاف PLA در رنگریزی با درجه حرارت بالا استحکام خود را به‌طور قابل توجهی از دست می‌دهند، بنابر این رنگریزی

یکی از عواملی که بر میزان رمق‌کشی الیاف PLA تأثیر می‌گذارد، دمای رنگریزی است. میزان عمق ماده رنگزا روی پارچه PLA با افزایش دمای رنگریزی افزایش پیدا می‌کند و در درجه حرارت‌های بالا ثابت می‌گردد [۵۶، ۵۴، ۵۲، ۴۳، ۳۵، ۸]. با افزایش دمای رنگریزی، فعالیت مولکول‌های ماده رنگزا در منطقه آمورف به دلیل فضایی بیشتری که در اختیار دارد، افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه منجر به دسترسی بهتر مولکول‌های ماده رنگزا به داخل الیاف می‌شود [۶۳، ۵۳، ۴۳، ۱]. همچنین در صورت رنگریزی الیاف PLA در زیر دمای Tg این الیاف ( $70-65^{\circ}\text{C}$ )، از آنجا که زنجیرهای مولکولی الیاف PLA به راحتی نمی‌توانند جا به جا شوند، میزان جذب ماده رنگزا کمتر است. هم چنین افزایش دمای رنگریزی، منجر به افزایش تمایل ذاتی ماده رنگزا به لیف و ضریب نفوذ<sup>۱</sup> می‌گردد. مقدار ضریب انتشار تا دمای  $100^{\circ}\text{C}$  افزایش و سپس کاهش می‌یابد، این به دلیل ساختار متراکم الیاف PLA است [۴۳]. در صورت افزایش دمای رنگریزی، پتانسیل شیمیایی ماده رنگزا افزایش می‌یابد و بنابراین باعث نفوذ سریع‌تر ماده رنگزا به داخل الیاف PLA می‌گردد [۵۲]. وو<sup>۲</sup> و همکاران در رنگریزی الیاف PLA با رنگزای طبیعی زردچوبه، نشان دادند که با افزایش درجه حرارت، زمان نیمه رنگریزی کاهش پیدا می‌کند و جذب ماده رنگزا روی الیاف PLA در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  بسیار سریع‌تر از دمای  $60^{\circ}\text{C}$  و  $80^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. همچنین شیب ایزوترم جذب ماده رنگزای طبیعی زردچوبه روی الیاف PLA با بالا رفتن درجه حرارت افزایش می‌یابد [۴۳]. در رنگریزی الیاف PLA با ماده رنگزای خمی، ساوادا<sup>۳</sup> و همکاران به مطالعه تأثیر دمای رنگریزی پرداختند و نشان دادند، در صورت انجام رنگریزی طولانی تحت درجه حرارت بالا، ممکن است باعث افت پایداری ترکیبات لوکو گردد که در نتیجه میزان رمق‌کشی کاهش می‌یابد. بنابراین برای اجتناب از تجزیه حرارتی ترکیبات لوکو، بدون افت پایداری ماده رنگزا، تنظیم دما و زمان رنگریزی از اهمیت بالایی برخوردار است [۸]. در صورت افزایش بیش از حد دمای رنگریزی، نه تنها تمایل ماده رنگزا به الیاف PLA کاهش می‌یابد، بلکه تخریب قابل توجهی نیز در این الیاف صورت می‌گیرد که این منجر به کاهش میزان رمق‌کشی می‌شود [۶۴، ۵۲، ۵۱، ۲۱]. مطالعات نشان داد که رنگریزی الیاف PLA در درجه حرارت بالا باعث تأثیر مخربی بر الیاف PLA می‌شود [۵۳، ۲۸، ۲۴]. در صورت افزایش دمای رنگریزی، قدرت رنگی (K/S) الیاف PLA نیز افزایش پیدا می‌کند [۵۲، ۴۳، ۳۷، ۲۵]. رنگریزی در درجه حرارت بالا باعث می‌گردد ذرات ماده رنگزای موجود در حمام رنگ، کوچک‌تر گردد بنابراین بالا رفتن غلظت موثر ماده رنگزا منجر به نفوذ بیشتر ماده رنگزا به داخل الیاف می‌شود و دمای رنگریزی در بالا بردن فعالیت دینامیکی مولکولی رنگزاهای، که دارای انرژی پایینی هستند، بسیار مؤثر است، بنابراین می‌تواند سبب افزایش جذب ماده رنگزا گردد [۵۴].

<sup>1</sup> Diffusion coefficient

<sup>2</sup> Wu

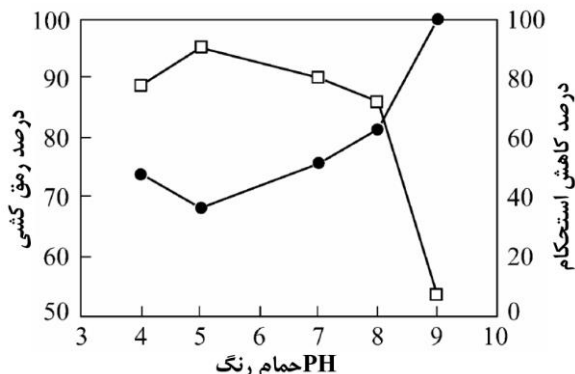
<sup>3</sup> Sawada

<sup>4</sup> Supercritical carbon dioxide

پلیمریزاسیون الیاف PLA، که خود منجر به افزایش مناطق قابل دسترس برای نفوذ ماده رنگزا به داخل الیاف می‌گردد، باعث می‌شود که در مدت زمان کوتاه‌تری میزان جذب ماده رنگزا، افزایش پیدا کند [۵۴]. در صورت افزایش زمان رنگرزی، pH حمام رنگ کاهش پیدا می‌کند [۱۶، ۵۲]. درجه اصلی آبکافت PLA، هنگام رنگرزی، تحت کنترل میزان نفوذ مولکول‌های آب است. زیرا آبکافت و کاهش طول زنجیر پلیمر استری و بوجود آمدن گروه‌های کربوکسیل اسید آزاد در حمام می‌شود. این موضوع سبب کاهش pH حمام رنگ و اسیدی شدن آن می‌گردد که به دلیل آبکافت شدن الیاف PLA، جذب ماده رنگزا صورت نمی‌گیرد [۵۲، ۶۶]. زمان رنگرزی علاوه بر اینکه عوامل مهمی بر میزان جذب رنگزا می‌باشد، تأثیر به‌سزایی نیز بر خواص فیزیکی الیاف PLA دارد. هنگامی که زمان رنگرزی افزایش پیدا کند، میزان ماده رنگزای بیشتری به ساختار الیاف نفوذ می‌کند. همچنین عمق ماده رنگزا نیز افزایش پیدا می‌کند. از نظر اقتصادی به صرفه‌تر می‌باشد که، در مدت زمان کوتاه‌تر به میزان عمق رنگزای بیشتر با یکنواختی بالا دست پیدا کرد.

### ۴-۳- pH رنگرزی

از عوامل دیگری که بر میزان رمق‌کشی تأثیر گذار است، pH حمام رنگ می‌باشد. pH حمام رنگ علاوه بر میزان جذب ماده رنگزا، بر میزان استحکام الیاف نیز مؤثر است. تأثیر pH حمام رنگرزی بر میزان رمق‌کشی الیاف PLA در حضور ماده رنگزای دیسپرس توسط لیانگ<sup>۱</sup> و همکاران در شکل (۵) به خوبی نشان داده شده است [۲۱]. میزان رمق‌کشی ماده رنگزا روی الیاف PLA در pH=۴ ابتدا افزایش و از pH=۵ تا ۹ شروع به کاهش می‌کند [۲۱، ۵۳، ۵۴]. استفاده از pH‌های بیشتر منجر به تخریب الیاف PLA می‌گردد، که در نتیجه این الیاف استحکام خود را از دست می‌دهند. وجود مناطق قابل دسترس، به دلیل دسترسی آسان مولکول‌های آب به فضایی بیشتر، منجر به افزایش آبکافت PLA می‌گردد [۲۱، ۵۴].

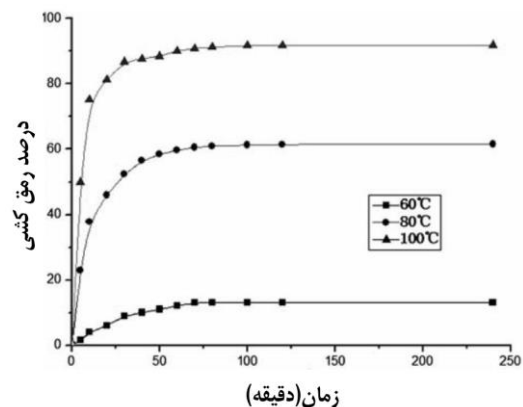


شکل ۵- تأثیر pH حمام رنگ روی رنگ‌پذیری الیاف PLA، (رمق‌کشی، ■ کاهش استحکام) [۲۱].

الیاف PLA در درجه حرارت بالای ۱۱۰ °C صورت نمی‌گیرد [۵۴]. جذب ماده رنگزا توسط الیاف PLA حداکثر تا دمای ۱۱۰ °C مناسب می‌باشد، چرا که الیاف رنگرزی شده در این دما قابلیت انعطاف‌پذیری (کشش) خود را تا این دما حفظ می‌کنند و رنگرزی در دمای بالا منجر به ایجاد الیاف شکننده می‌گردد [۵۶]. دمای نرم شدن الیاف PLA در فشار اتمسفر حدود ۶۰ °C است. از طرف دیگر دمای نرم شدن ظاهری الیاف PLA، در شرایط آزمایشگاهی در صورت بسته‌بودن مخزن رنگرزی، کاهش پیدا می‌کند. بنابراین رنگرزی طولانی، تحت شرایط نامناسب، ممکن است باعث کاهش میزان رنگ‌پذیری شود [۸، ۲۱]. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، افزایش دمای رنگرزی منجر به افزایش انرژی داده شده به محلول رنگرزی می‌شود، که خود منجر به افزایش سرعت جذب ماده رنگزا در ساختار الیاف PLA می‌گردد. همچنین با افزایش دمای رنگرزی سرعت نفوذ نیز افزایش پیدا می‌کند. در صورت افزایش دمای رنگرزی، سرعت رنگرزی افزایش یافته و به تبع آن زمان نیمه رنگرزی کاهش پیدا می‌کند.

### ۴-۲- زمان رنگرزی

زمان رنگرزی بر میزان جذب ماده رنگزا بسیار مؤثر گزارش شده است [۸، ۲۱، ۵۳، ۶۵]. به طوری که با افزایش زمان رنگرزی میزان عمق رنگ روی الیاف PLA نیز افزایش پیدا می‌کند. افزایش عمق رنگزا تا زمانی که به تعادل (نقطه اشباع) برسد صورت می‌گیرد، اما بعد از تعادل، در بعضی موارد، میزان عمق رنگ روی الیاف PLA کاهش یافته است [۸، ۴۹، ۵۴] و در برخی بدون تغییر گزارش شده است [۸، ۵۲]. در بررسی تأثیر زمان بر خواص کششی الیاف، ملاحظه شده است که در صورت افزایش زمان رنگرزی، میزان استحکام الیاف PLA کاهش می‌یابد [۲۱، ۵۱، ۵۳] و همکاران تفاوت جذب رنگ الیاف PLA در دماهای مختلف رو به صورت شکل ۴ نشان داده‌اند [۴۳].



شکل ۴- رمق‌کشی رنگزای دیسپرس روی الیاف PLA تابع زمان رنگرزی [۴۳].

مدت زمان تعادل رنگرزی در حمام حاوی محلول فوق بحرانی دی‌اکسید کربن (SC-CO<sub>2</sub>) در همان ۱۰ دقیقه نخست است [۵۴]. در حالی که مدت زمان تعادل رنگرزی در حمام آب به مدت ۳۰-۶۰ دقیقه می‌باشد [۵۱، ۵۲، ۵۴]. در صورت تغییر در ساختار بلورین و درجه

<sup>1</sup> Liang



مواد رنگزا با ساختار جدید دارای انرژی متوسط می‌باشند [۵۳]. حضور زنجیره آلکیل (آبگریز) در ساختار مولکول ماده رنگزا، منجر به افزایش میل ترکیبی بین ماده رنگزا و لیف می‌گردد [۲۱، ۵۳]. همچنین در صورت افزایش بیش از حد طول زنجیره آلکیل در ساختار مولکولی ماده رنگزا، علاوه بر اینکه میزان رمق‌کشی ماده رنگزا کاهش می‌یابد [۵۰]، بازده کروموفور ماده رنگزا نیز کاهش پیدا می‌کند [۲۳]. برای مواد رنگزای دیسپرس که در ساختار خود دارای گروه (cyclo-C<sub>6</sub>H<sub>11</sub>) و فنیل هستند، مدت زمان تعادل جذب رنگ ۳۰ دقیقه است. در صورت حضور گروه هپتان، ((CH<sub>2</sub>)<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>)، (cyclo-C<sub>6</sub>H<sub>11</sub>)، و ((CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>CH<sub>3</sub>) در ساختار رنگزای دیسپرس، مدت زمان تعادل جذب رنگ ۳۰-۲۰ دقیقه گزارش شده است [۲۱]. بر اساس پیشنهاد ارائه شده توسط کراست و یانگ [۴۱]، مواد رنگزای دیسپرس با ساختار جدید می‌تواند به صورت تجاری برای پارچه‌های PLA به کار برده شود و ممکن است از درصد رمق‌کشی بالاتری در الیاف PLA برخوردار باشند. آنها اظهار داشتند، مواد رنگزای دیسپرس که حاوی تعداد بیشتری از گروه‌های -NHCOR، -NR<sub>2</sub>، -NHR COR و OR؛ گروه‌های -OH، -NH<sub>2</sub>، -NO<sub>2</sub> و یا گروه‌های -CH<sub>2</sub> nCH<sub>3</sub> و هالید هستند، حلالیت‌شان به الیاف PLA نزدیک‌تر است. حلالیت رنگزاهای دیسپرس با ساختار آنتراکینون به الیاف PLA نزدیک نیست. ادعا شده است که رنگزاهای آنتراکینون که دارای گروه R یا گروه‌های (CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>CH<sub>3</sub> - طولانی می‌باشند، می‌توانند حلالیت‌شان به الیاف PLA نزدیک گردد. الیاف PLA دارای ساختار آب‌گریز<sup>۲</sup> هستند، بنابراین تمایل بیشتری برای جذب مواد رنگزای آب‌گریز از خود نشان می‌دهند [۲۸]. در صورت جایگزین شدن گروه هیدروکسیل (-OH) در مولکول ماده رنگزا، نسبت به گروه آمینو (NH<sub>2</sub>)، میزان تغییر در انرژی برهم‌کنش بین ماده رنگزا و لیف (ΔU<sub>dye-PLA</sub>) بیشتر باشد، به علت برقرار کردن پیوندهای هیدروژنی بیشتر توسط گروه هیدروکسیل است [۳۱]. با توجه به جدول ۳ مواد رنگزا با ساختار آزو، دی فنیل مونو آزو و گروه دی استیل-اتانل آمین (-N(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>OCOCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) یا تری هیدروفنیل مونوآزو، کاهش در انرژی برهم‌کنش بین رنگزا و لیف (ΔU<sub>dye-PLA</sub>) را در میان تعویض مواد رنگزا از خود نشان می‌دهند. جایگزین شدن گروه‌های دی استیل-اتانل آمین، متیل (CH<sub>3</sub>) در ساختار رنگزای دیسپرس، بیشترین کاهش را در مقدار ΔU<sub>dye-PLA</sub> دارد، به این دلیل است که جایگزین کردن دو گروه از آنها در ماده رنگزا موجب فعل و انفعالات دوقطبی با الیاف PLA می‌شود. مواد رنگزای دیسپرس نازنجی ۲۹ و دیسپرس زرد ۲۱۱ که دارای گروه‌های نیترو (NO<sub>2</sub>) هستند، بیشترین کاهش را در مقدار ΔU<sub>dye-PLA</sub> دارند، علت آن هم فعل و انفعالات دوقطبی این مواد رنگزا با الیاف PLA و جایگزین‌های دیگری که روی آنها صورت می‌گیرد، است. بر اساس این نتایج، مواد رنگزایی که دارای فعل و انفعالات قوی تری هستند، قادرند پیوندهای قوی تری را با الیاف PLA برقرار کنند. بالا بودن مقدار منفی در ΔU<sub>dye-PLA</sub> نشان دهنده درصد جذب بالای ماده رنگزا روی الیاف PLA

در بررسی صورت گرفته به تأثیر pHهای مختلف بر میزان جذب ماده رنگزای دیسپرس روی الیاف PLA پرداخته شد [۵۴]، همان‌طور که مشخص گردید، در مورد مواد رنگزای دیسپرس قرمز ۸۲ و دیسپرس آبی ۷۹، میزان عمق رنگ‌شان هنگامی که pH حمام از ۴ به ۸ افزایش پیدا می‌کند، حدود ۲۵٪ افزایش می‌یابد که این برخلاف مواد رنگزای دیسپرس متعارف است. ماده رنگزای دیسپرس آبی ۷۹ در رنگزای الیاف PET، یک ماده رنگزای حساس به pH می‌باشد به طوری که در محدوده pH بالاتر از ۶، میزان جذب ماده رنگزا کاهش می‌یابد [۵۴]. بنابراین با توجه به تأثیر pH بر میزان قدرت رنگی (K/S)، دقت در تنظیم pH برای رنگزای PLA بسیار لازم و ضروری است [۵۴، ۵۲]. با توجه به حساسیت الیاف PLA به شرایط قلیایی و اسیدی قوی، pH حمام رنگزای باید تحت کنترل قرار بگیرد، انجام رنگزای در این pHها نه تنها بر میزان جذب رنگزا مؤثر نیست، بلکه تأثیر مخربی بر ساختار الیاف PLA نیز دارد. با توجه به نتایج مقالات موجود، محدوده pH خنثی مناسب‌ترین محدوده برای جذب میزان رنگزای بیشتر در الیاف PLA است.

#### ۴-۴- تأثیر ساختار ماده رنگزا بر میزان جذب

در بررسی صورت گرفته توسط شیر<sup>۱</sup> و همکارانش نشان داده شد که، مواد رنگزای دیسپرس خطی، مانند مواد رنگزا با ساختار "آزو" بیشتر برای رنگزای الیاف PLA نسبت به الیاف PET به کار برده می‌شود، که به دلیل ساختار خطی این نوع الیاف است. رنگزاهای دیسپرس با گروه کربونیل، به دلیل ساختار غیرخطی، از پراکندگی خوبی روی الیاف PLA برخوردار نیستند [۵۰]. بنابراین پیشنهاد گردیده است که مواد رنگزای دیسپرس با گروه کربونیل و مواد رنگزای آنتراکینونی برای رنگزای الیاف PLA مورد استفاده قرار نگیرد. مواد رنگزای دیسپرسی که دارای انرژی متوسطی می‌باشند از رنگزای مناسب‌تری روی الیاف PLA برخوردار هستند [۴۵]. بر اساس تحقیقاتی که توسط شرکت DyStar روی رنگزای PLA انجام داده است، گزارش شده است که مواد رنگزای دیسپرسی که دارای انرژی متوسط می‌باشند، به‌طور معمول از درصد رمق‌کشی بالاتری برخوردار هستند [۱]. مواد رنگزای دیسپرس با ساختار آزو و مواد رنگزای دیسپرس با ساختار آنتراکینون از درصد رمق‌کشی ۵۸٪-۲۷ برخوردار می‌باشند [۵۳]. مشخص گردید که در صورت جایگزین کردن گروه‌های دی استیل-اتانل آمین (N(CH<sub>2</sub>H<sub>2</sub>OCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) روی ساختار ماده رنگزا می‌تواند میزان درصد جذب را به میزان ۹۰٪ افزایش داد [۵۲]، زیرا هر چه ساختار ماده رنگزا خطی‌تر باشد، میزان جذب ماده رنگزا به الیاف PLA بیشتر می‌شود [۴۱]. در صورتی که در ساختار ماده رنگزا گروه R موجود در حلقه فنیل، از هیدروژن به کلر (Cl) و یا متیل (CH<sub>3</sub>) تغییر پیدا کند، تأثیر کمی بر میزان رمق‌کشی ماده رنگزا روی الیاف PLA دارد که آن به دلیل تغییر در طول موج بیشینه جذب است و همچنین این

<sup>1</sup> Scheyer

<sup>2</sup> Hydrophobe

مایع رنگزا و شتاب در نفوذ ماده رنگزا به درون الیاف می‌گردد [۱۱]. افزایش قدرت رنگی در مورد الیاف PLA به علت جداسدن مولکول‌های ماده رنگزای دیسپرس است که در نتیجه حضور امواج فراصوت، باعث افزایش فام در رنگرزی در دمای ۳۰ تا ۷۰ °C می‌شود [۳۷]. امواج فراصوت موجب کاهش تبلور الیاف PLA در هنگام رنگرزی با ماده رنگزای دیسپرس قرمز ۶۰ می‌گردد که این افزایش قدرت رنگی را در پی دارد. بازده ماده رنگزای دیسپرس روی الیاف PLA در حضور امواج فراصوت از آنجا که موجب جداسازی مولکول‌های ماده رنگزا از محلول می‌شود، افزایش یافته است. افزایش بیش از حد درجه حرارت می‌تواند باعث جداسازی یا شکسته‌شدن مولکول‌های ماده رنگزا شود و در نتیجه جذب ماده رنگزا کاهش می‌یابد [۳۷، ۱۱]. امواج فراصوت با امکان رنگرزی در دمای کمتر، احتمال آسیب به الیاف PLA را نیز کاهش می‌دهد [۱۱].

در نهایت می‌توان بیان نمود، استفاده از عوامل فیزیکی در هنگام رنگرزی از جمله امواج فراصوت، با افزایش انرژی سیستم و تحرک زیاد مولکول‌های مواد رنگزا، منجر به دست یابی به میزان رمق‌کشی بیشتر می‌گردد.

است. ضعیف‌ترین جایگزینی، مربوط به Br-/Cl- است. جایگزین کردن گروه دی استیل-اتانول‌آمین، دی‌فنیل مونوآزو، دی‌فنیل آمین، متین در رنگزاها باعث می‌شود درصد جذب بالای ۹۰٪ پیش‌بینی گردد [۴۷، ۳۱]. زنجیره آلکیل آب‌گریز مولکول ماده رنگزا باعث افزایش میل ترکیبی بین ماده رنگزا و لیف می‌گردد. در نتیجه مولکول‌های ماده رنگزا به میزان بالایی جذب الیاف PLA می‌شود و میزان رمق‌کشی را افزایش می‌دهند. مقادیر K/S نمونه‌های رنگرزی شده، با افزایش غلظت، افزایش می‌یابد. افزایش طول زنجیره آلکیل زمانی که غلظت ماده رنگزا کم است منجر به کاهش مقدار K/S می‌گردد. افزایش طول زنجیره آلکیل باعث کاهش بازده کروموفور ماده رنگزا می‌شود [۴۳، ۴۳، ۳۴]. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، با توجه به ساختار خطی الیاف PLA، هر چقدر ساختار مولکول ماده رنگزای دیسپرس بکار رفته خطی‌تر باشد، میزان رمق‌کشی ماده رنگزا نیز افزایش پیدا می‌کند. در صورت جایگزین کردن گروه‌های کشنده الکترون بر روی ساختار ماده رنگزای دیسپرس، میزان رمق‌کشی نیز افزایش پیدا می‌کند. ساختار مولکول ماده رنگزا یکی از عوامل مهم در تعیین سرعت رنگرزی می‌باشد.

#### ۴-۵- تأثیر رنگرزی در حضور امواج فراصوت

در صورت حضور امواج مافوق صوت، زمانی که دمای رنگرزی بین ۳۰ تا ۷۰ °C باشد، می‌توان به شیدهای عمیق‌تر و میزان روشنایی بیشتری نسبت به زمانی که رنگرزی در غیاب امواج فراصوت انجام می‌شود، دست پیدا کرد [۳۷]. رنگرزی صورت گرفته در دمای ۸۰ °C در حضور امواج فراصوت باعث افزایش رنگ‌پریدگی می‌گردد و منجر به پایین آمدن قدرت رنگی (K/S) و کم رنگ شدن کالا در مقایسه با زمانی است که رنگرزی بدون حضور امواج فراصوت انجام گرفته است. نکته قابل توجه این است که میزان طول موج بیشینه در تمام رنگرزی‌های صورت گرفته در حضور امواج فراصوت باعث بالا رفتن قدرت رنگی در دمای ۸۰ °C می‌شود. همچنین باعث حذف هوا از سطح الیاف، آشفتنگی بیشتر

#### ۵- مقایسه رمق‌کشی بین الیاف PLA و PET

همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، الیاف پلی‌لاکتیک اسید از لحاظ ساختاری یک نوع پلی‌استر (زنجیر خطی) است و برخی خواص مشابه به الیاف پلی‌استر دارد و برخلاف پلی‌استر، زیست تخریب‌پذیر نیز هست، بنابراین مطالعات مقایسه‌ای از سوی برخی محققین منتشر شده است. غلظت‌های مختلفی از رنگزای دیسپرس روی الیاف PLA و PET به منظور پیدا کردن کمترین میزان مصرف ماده رنگزا برای دستیابی به ثابت کیوبلکامانک معادل ۱۰ در هر دو الیاف مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج به دست آمده نشان داد میزان ماده رنگزای مورد نیاز برای الیاف PLA کمتر است [۴۷، ۲۸، ۲۱، ۱].

جدول ۳- کاهش در انرژی بر هم‌کنش بین مواد رنگزای دیسپرس گوناگون با ساختار اصلی دی‌فنیل مونوآزو، تترا هیدرو فنیل، فنیل مونوآزو و الیاف PLA بعد از تعویض گروه که از ماده رنگزا حذف شده بود [۳۱].

کاهش در انرژی بر هم‌کنش بین رنگزا و لیف (کیلو کالری برمول)						گروه‌های حذف شده
قرمز ۱۶۷	بنفش ۳۳	آبی ۷۹	آبی ۳۵۶	قرمز ۸۲	قهوای ۱	Original_ ΔU <sub>dye-PLA</sub> -N(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OCOCH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -N(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OH) <sub>2</sub> -NHCOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -NHCOCH <sub>3</sub> -COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -NO <sub>2</sub> -OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -CH <sub>3</sub> -CN -Cl/-Br
-۱۳۵	-۱۱۸	-۱۱۷	-۱۱۱	-۱۱۱	-۹۶	
60	54	53	46	47	NA	
NA	NA	NA	NA	NA	۳۰	
۲۸	NA	NA	NA	NA	NA	
NA	NA	۲۶	NA	NA	NA	
NA	NA	NA	۲۰	NA	NA	
۱۸	۱۷	۱۴	۱۵	۱۱	۲۲	
NA	NA	۱۰	NA	NA	NA	
NA	۷	NA	۶	NA	NA	
NA	۳	NA	NA	۵	NA	
-۱	NA	۰	NA	NA	۰	

نیز تأثیر چشمگیری داشته است. از آنجا که ساختار الیاف PLA متراکم است، در صورت جایگزین شدن گروه‌های بزرگتر در ساختار ماده رنگزا، میزان رمق‌کشی هم کاهش پیدا می‌کند. با افزایش غلظت رنگزا، مقدار K/S نیز تا حدی افزایش و سپس ثابت می‌شود. همواره طول موج بیشینه مواد رنگزا به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر میل می‌کند. طول موج بیشینه در مورد الیاف PLA رنگزای شده با این مواد رنگزا کمتر از الیاف PET است و ممکن است به علت تأثیر پلیمر روی خاصیت طیفی این مواد رنگزا باشد و موجب تغییر طول موج در الیاف شود. تفاوتی که درصد رمق‌کشی بین الیاف PLA و PET وجود دارد را می‌توان به تفاوت نوع ارتباط بین ماده رنگزا و لیف ارتباط دارد [۱]. رفتار ماده رنگزا به تنهایی به غیر از در نظر گرفتن عوامل دیگر روی الیاف PLA، از رفتار رنگزای روی PET کاملاً متفاوت است. الیاف PLA رنگزای شده با ماده رنگزای دیسپرس قرمز ۶۰، نفوذ بالایی را نشان می‌دهد، اما اشباع کم ماده رنگزا از مشخصات آن است. گزارش گردیده است که میزان انتشار ماده رنگزا در PLA بسیار بالاتر از الیاف PET است. تعادل کم اشباع ماده رنگزا در الیاف PLA منجر به پایین‌تر شدن جذب ماده رنگزا و خواص ساختاری ضعیف‌تری در مقایسه با الیاف PET می‌شود [۳۳].

#### ۶- شرایط شستشوی احیایی

شستشوی احیایی به منظور حذف رنگزاها و مواد کمکی اضافی از سطح کالا صورت می‌گیرد که حمام شستشوی احیایی حاوی ۵-۲ g/l سود و ۱-۵ g/l سدیم سولفات به مدت زمان ۳۰-۲۰ دقیقه در دمای ۸۰-۶۰ °C است [۹، ۲۰، ۲۲، ۳۳، ۳۴، ۴۰، ۴۶، ۵۹، ۶۳]. این عملیات موجب جلوگیری از خروج ماده رنگزا و مواد کمکی از لایه‌های درونی الیاف می‌گردد [۹، ۱۰]. سطح فعال‌های موجود در لایه‌های سطحی، هنگام شستشوی احیایی خارج می‌شود. انجام شستشوی احیایی در دمای پایین، همچنین نفوذ آب و مواد شیمیایی به داخل الیاف، باعث می‌شود که تمایل مهاجرت ماده رنگزا از داخل الیاف به سطح کاهش یابد [۲۱]. بازده شستشوی احیایی، تابعی از ساختار شیمیایی رنگزای دیسپرس است [۱، ۲۱].

مواد رنگزای دیسپرس با ساختار "آزو" که برای رنگزای پارچه‌های PLA به کار برده می‌شود در مقایسه با پارچه‌های PET ضریب خاموشی مولار ( $\epsilon_{\max}^1$ ) بیشتری دارند. با میزان مصرف کمتری از ماده رنگزا می‌توان به شیدهای عمیق‌تری روی پارچه‌های PLA دست پیدا کرد [۱، ۳۴]. جدول ۴ تعدادی از رنگزاهای به کار رفته که روی الیاف PLA، مورد مقایسه با الیاف PET قرار گرفته است را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است برای به‌دست آوردن قدرت رنگی معادل ۱۰، مقدار رنگزای مصرفی روی الیاف PLA نیز کاهش پیدا می‌کند [۱]، که این به دلیل پایین بودن ضریب شکست الیاف PLA در مقایسه با الیاف PET است، در نتیجه می‌توان شیدهای عمیق بصری را در آن مشاهده کرد [۱، ۸، ۲۸، ۳۴].

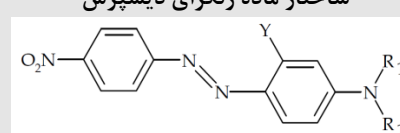
بازده رنگی روی الیاف PLA در مقایسه با الیاف PET در یک مقدار یکسان از ماده رنگزای به کار رفته، بیشتر است که این موضوع به علت بازتاب کمتر الیاف PLA است [۱، ۲۸]. تفاوت در بازده چشمی الیاف PLA و PET رنگزای شده به دو عامل مهم از جمله، درصد رمق‌کشی و قدرت تهرنگ می‌توان نسبت داد. با به کار بردن رنگ‌های با تهرنگ ضعیف، نمی‌توان به شیدهای عمیقی دست پیدا کرد [۱].

در الیاف PLA میزان برداشت با توجه به مواد رنگزای دیسپرس مختلف متفاوت است، در حالی که این میزان تفاوت در الیاف PET کمتر است. تغییر گروه‌های جانبی موجود در ساختار ماده رنگزا باعث می‌شود میزان برداشت ماده رنگزا درون الیاف PLA نسبت به الیاف PET به علت نفوذ کم گروه‌های جانبی کمتر گردد [۱، ۲۸، ۳۴].

توانایی [۶۷] در بخشی از مطالعه خود در خصوص تولید الیاف PLA از پرک ظروف پلاستیکی PLA به مقایسه رفتار رنگزای الیاف بازیافت شده PLA نسبت به الیاف بازیافت شده PET در دمای ۱۱۰ °C پرداخته است. مقایسه انجام شده نشان داد که میزان رمق‌کشی در الیاف بازیافت شده PLA نسبت به الیاف بازیافت شده PET در این دما بسیار بیشتر است. همچنین رنگ اولیه الیاف PLA بازیافتی کاملاً سفید گزارش شده است، در حالیکه الیاف بازیافت شده PET بر اثر اکسایش حین اکستروژن، به رنگ زرد روشن تمایل دارند و این در شفافیت رنگ نهایی پس از رنگزای

<sup>1</sup> Molar extinction coefficient

جدول ۴- غلظت ماده رنگزای به کار برده شده برای به‌دست آوردن بازده رنگ چشمی،  $k/s$  معادل ۱۰ برای الیاف PLA و PET [۱]

غلظت ماده رنگزای بکار رفته		گروه R <sub>1</sub>	گروه Y	ساختار ماده رنگزای دیسپرس	
روی PET	روی PLA				
۰/۱۶	۰/۱۲	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	H		D1
۰/۲۶	۰/۱۷	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OCOCH <sub>3</sub>	H		D2
۰/۱۶	۰/۱۰	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	CH <sub>3</sub>		D3
۰/۳۱	۰/۲۴	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OH	CH <sub>3</sub>		D4
۰/۲۵	۰/۲۰	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OCOCH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub>		D5

ساختار ماده رنگزای دیسپرس تأثیر مثبتی بر ثبات نوری از خود نشان می‌دهند، در حالی که گروه متیل در ساختار رنگزای دیسپرس اثر منفی را روی ثبات نوری دارد [۲۷]. پارچه PLA که با عمق بیشتری از ماده رنگزای دیسپرس آزو رنگرزی گردیده است، ثبات نوری بالاتری را نسبت به پارچه PLA که با عمق کمتر رنگرزی شده، از خود نشان می‌دهد [۱]. به طور کلی پارچه‌های PLA رنگ شده با رنگزای دیسپرس، هنگامی که عمق رنگ‌شان بیشتر باشد، تمایل دارند که ثبات نوری بالاتری را نسبت به زمانی که با عمق کمتری رنگرزی شده، از خود نشان دهند، چرا که میزان رمق‌کشی بیشتر است [۵۱، ۳۴، ۲۸، ۱]. سوئست<sup>۳</sup> و همکارانش [۱] اذعان داشتند که، وجود اتم هیدروژن داخل رنگزای دیسپرس با ساختار آنتراکینون به دلیل برقراری پیوند هیدروژنی منجر به بهبود ثبات نوری روی الیاف PLA می‌شود. ثبات نوری روی رنگزاهای آنتراکینون با گروه آمینه آروماتیک یا گروه آمینو-سیکلو-چرب نسبت به رنگزاهای آنتراکینون با گروه آمینو چرب از آنجا که طول زنجیره آلکیل افزایش پیدا می‌کند و میزان جذب ماده رنگزا بیشتر می‌گردد، بالاتر است [۵۳، ۱]. مونگ<sup>۴</sup> و همکارانش به بررسی تأثیر جذب UV در ثبات نوری پارچه PLA رنگ شده با رنگزای دیسپرس با گروه بنزو تری‌آزول پرداختند، که نشان داد ثبات نوری پارچه‌های PLA رنگ شده با رنگزای دیسپرس با ساختار "آزو" به مقدار ۱/۸-۰/۸ درجه افزایش پیدا کرد، از سوی دیگر به نظر می‌رسد تأثیر جذب UV در ثبات نوری پارچه PLA رنگرزی شده با آنتراکینون، ناچیز و زیان بخش می‌باشد [۴۸]. ثبات نوری الیاف PLA در مقایسه با الیاف PET که هر دو با عمق یکسانی رنگ شده‌اند، به میزان ۱-۰/۵ درجه کمتر می‌باشد [۳۶، ۳۴، ۲۸، ۱۹، ۱]. از سوی دیگر در گزارشی که توسط چوی<sup>۵</sup> و سیو<sup>۶</sup> [۳۴] ارائه شده، ثبات نوری رنگزاهای دیسپرس با ساختار آنتراکینون با گروه نیترو، فنیل آمین و مونو آزو روی پارچه PLA بسیار مشابه پارچه PET می‌باشد، البته به غیر از رنگزای دیسپرس آبی با ساختار مونو آزو (دیسپرس آبی ۲۸۴).

### ۷-۲- ثبات شستشوی

در بررسی که توسط یانگ و هوذا<sup>۷</sup> صورت گرفت، ثبات شستشوی روی الیاف PLA رنگرزی شده با ماده رنگزای دیسپرس نسبت به الیاف PET کمتر است [۲۸]. نمره نخ و ظرافت در ثبات شستشوی بسیار مؤثر است [۱۹]. ثبات شستشویی برای پارچه PLA رنگرزی شده با ۰.۴ o.w.f یک واحد کمتر و یا مشابه با الیاف PET رنگرزی شده با همان غلظت است. لیانگ و همکارانش به بررسی تأثیر رنگزای دیسپرس با سه سطح انرژی مختلف روی ثبات شستشوی پرداختند که نشان داد، در صورت رنگرزی پارچه PLA با غلظت ۰.۲٪ میزان ثبات شستشوی ۱-۰/۵ درجه کمتر از PET رنگرزی شده با همان غلظت است [۲۱]. نتایج نشان داد که سطح

برای این که این عملیات، کمترین آسیب را به الیاف PLA رنگ شده وارد کند، میزان استفاده از مواد شیمیایی را باید کاهش داد. بعد از رنگرزی و خشک کردن کالاها، شستشویی احیایی باعث کاهش عمق رنگرزی با رنگزاهای دیسپرس، به دلیل حذف رنگزاهای اضافی از سطح کالا می‌گردد. همچنین سطح فعال‌ها، مواد بازدارنده مهاجرت رنگزا و بقایای مواد کربری نیز در این عملیات، از سطح الیاف، جدا می‌شوند. با این حال شرایط قلیایی را برای الیاف PLA بسیار ضعیف در نظر می‌گیرند، چرا که این شرایط موجب آبکافت قلیایی الیاف PLA می‌شود. بعد از شستشوی احیایی، کالاها را باید با آب گرم و سپس با آب سرد به مدت ۵-۲ دقیقه آبکشی کرده تا سطح آن خنثی شود، سپس کالا را در دمای اتاق قرار داده تا خشک شود [۲۲، ۲۰].

### ۷-۳- ثبات رنگی الیاف PLA

ثبات رنگی الیاف یا انواع سازه‌های نساجی از جمله مهم‌ترین عامل برای ارزیابی میزان جذب ماده رنگزا توسط الیاف یا سازه‌های نساجی می‌باشد. بر اساس مطالعه تعداد زیادی از مقالات و مستندات موجود به بررسی ثبات نوری و شستشویی پرداخته شده است.

### ۷-۱- ثبات نوری

هنگامی که پارچه PLA تحت تابش نور در محدود امواج فرابنفش<sup>۱</sup> (UV) در فضای باز قرار بگیرد، باعث محوشدن رنگ پارچه می‌گردد که این نسبت به زمانی که تحت تابش نور در محدود UV در فضایی بسته قرار بگیرد، بیشتر است. دلیل آن نیز به تفاوت در توزیع طول موج منبع نور گزارش کرده‌اند. الیاف PLA با توجه اینکه مقدار بیشتری از پرتو UV (در محدوده ۲۷۰-۲۴۰ نانومتر) نسبت به PET از خود عبور می‌دهد، باعث می‌گردد که خاصیت ثبات نوری در منسوج PLA رنگرزی شده با ماده رنگزای دیسپرس نسبت به PET کمتر باشد. تخریب کروموفور رنگزا به ویژه برای رنگزاهای آبی در شرایط مذکور دلیل اصلی این اختلاف است [۳۳، ۱۹، ۱]. ون<sup>۲</sup> و همکارانش [۵۱] به بررسی ثبات رنگزاهای دیسپرس با ساختار آزو و آنتراکینون روی پارچه‌های PLA پرداختند که نشان داده شد که در پارچه‌های PLA (رنگ شده با رنگزای دیسپرس آزو تجاری با غلظت ۰.۲ o.w.f) میزان رنگ‌زدایی با پرتو دهی هنگامی که در معرض منبع نوری قوس کربن قرار می‌گیرد، افزایش پیدا می‌کند. مواد رنگزای دیسپرس با ساختار آزو هنگامی که گروه‌های الکیل اتیلن (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>CN) یا اتوکسی اتیلن (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>OCOCH) آن تعویض گردد، از جمله در مورد رنگزای (دیسپرس نارنجی ۸۲، دیسپرس قرمز ۵۲، دیسپرس قرمز ۸) منجر به نمایش بیشتری از ثبات نوری می‌شود، چرا که حلالیت این مواد رنگزا با گروه‌های موجود به لیف نزدیک‌تر می‌گردد و میزان جذب ماده رنگزا افزایش پیدا می‌کند [۱]. همچنین حضور گروه‌های سیانو و کلرو در

<sup>3</sup> Suesat

<sup>4</sup> Moig

<sup>5</sup> Choi

<sup>6</sup> Seo

<sup>7</sup> Huda

<sup>1</sup> Ultra violet

<sup>2</sup> Wen

منظور ترکیب با الیاف طبیعی برای به دست آوردن خواص فیزیکی بهتر را دارا می‌باشد. رنگرزی PLA در شرایط اسیدی و یا خنثی صورت می‌گیرد، چراکه شرایط قلیایی در درجه حرارت بالا، باعث از بین بردن استحکام PLA می‌شود. مواد رنگرزی دیسپرسی که درصد رمل کمی ۸۰ و یا بالاتر از آن را ایجاد نموده اند، در دمای  $110^{\circ}\text{C}$  رنگرزی گردیده است. رنگرزی الیاف PLA در دمای  $80^{\circ}\text{C}$  بنا به دلیل نزدیک بودن به دمای انتقال شیشه‌ای و ساختار بلورین این الیاف منجر به کاهش در میزان جذب رنگرزی می‌گردد. انجام عملیات شستشویی احیایی بعد از رنگرزی به منظور حذف مواد رنگرزی و مواد کمکی اضافی، صورت می‌گیرد. همان‌طور که در مطالعات نشان داده شد، با افزایش دما و زمان رنگرزی میزان عمق ماده رنگرزی روی الیاف PLA افزایش پیدا کرده است. در صورت افزایش درجه حرارت، زمان نیمه‌رنگرزی کاهش و قدرت رنگی (K/S) افزایش پیدا می‌کند. همچنین انجام رنگرزی در مدت زمان طولانی، منجر به کاهش استحکام الیاف PLA می‌گردد. pH حمام رنگرزی یکی از عوامل بسیار مؤثر بر میزان جذب ماده رنگرزی و استحکام الیاف PLA می‌باشد. رنگرها با انرژی متوسط از میزان رمل کمی بالاتری برخوردار است. در صورت افزایش ترکیبات خطی به ساختار رنگرزی منجر به افزایش جذب رنگرزی می‌شود. تفاوتی که در درصد رمل کمی بین الیاف PLA و PET می‌باشد را می‌توان به تفاوت در نوع ارتباط رنگرزی و لیف نسبت داد. هر چند عمق رنگرزی در پارچه‌های PLA بیشتر باشد، کالا از ثبات نوری بالاتر برخوردار است. همچنین رنگرزی‌های دیسپرسی با ساختار "آزو" از ثبات نوری بالاتری برخوردار است. در مطالعات انجام شده نشان داده شد که ثبات شستشویی روی الیاف PLA رنگ شده با رنگرزی دیسپرسی، نسبت به الیاف PET کمتر می‌باشد. در مجموع می‌توان به این نکته اشاره نمود که الیاف PLA از پتانسیل بسیار خوبی برای جذب مواد رنگرزی در دماهای کم با مواد رنگرزی دیسپرسی برخوردارند، لیکن باید شرایط رنگرزی به لحاظ دما و pH به‌طور کامل تحت کنترل باشد تا آسیبی به خواص الیاف وارد نشود. همچنین انتخاب زمان مناسب می‌تواند سبب کاهش مصرف مواد رنگرزی و بهبود اقتصادی عملیات رنگرزی شود. انتخاب مواد رنگرزی دیسپرسی با گروه‌های جانبی مناسب نیز از نکات مهم در دستیابی به عملیات رنگرزی مطلوب تر الیاف PLA به‌شمار می‌رود.

انرژی مواد رنگرزی دیسپرسی تأثیر قابل توجهی روی ثبات شستشویی دارد [۵۳، ۶۸]. ماده رنگرزی دیسپرسی با انرژی متوسط از ثبات شستشویی خوبی روی الیاف PLA برخوردار می‌باشد [۵۳]. الیاف PLA اجازه عبور بیشتری از رنگرزی را به داخل ساختار خود می‌دهد، در نتیجه در هنگام آزمون ثبات شستشویی میزان ماده رنگرزی بازگشت داده شده به حمام بیشتر است، که این موجب کاهش ثبات شستشویی می‌گردد [۱]. بورکین شاول<sup>۱</sup> و همکارانش [۳۶] به بررسی عملیات شستشویی پی در پی در دماهای مختلف پرداختند که نشان داد، هر چقدر تعداد آزمون‌های شستشو افزایش پیدا کند، میزان روشنایی افزایش و عمق رنگ کاهش پیدا می‌کند. در صورت انجام رنگرزی در دمای بالا، میزان رنگرزی پس داده شده به حمام رنگ کمتر، بنابراین از ثبات شستشویی بالاتری برخوردار است [۲۷، ۳۶]. با این حال چاپیر [۵۰] اذعان داشت که، بیشتر رنگرزی‌های دیسپرسی روی الیاف PLA از ثبات شستشویی قابل قبولی برای کاربردهای پوشاک برخوردار است. ثبات شستشویی روی الیاف PLA با مقدار آیزومر D- زیاد و D- کم تفاوت کمی دارد، اگر چه دمای انتقال شیشه‌ای این دو به هم نزدیک می‌باشد [۱۹، ۲۸]. در گزارشی که توسط ون و همکارانش [۵۱] ارائه گردید نشان داد شده است که ثبات شستشویی از الیاف PLA رنگ شده در محلول (SC-CO<sub>2</sub>) مناسب بوده است. تفاوت در ثبات نوری بین پارچه‌های PLA و PET نسبت به ثبات شستشویی کمتر است. ثبات شستشویی الیاف PLA رنگ شده در مقایسه با الیاف PET رنگرزی شده، به میزان ۱ تا ۲ درجه پایین‌تر است [۱، ۱۹، ۲۸، ۳۴، ۵۰].

## ۸- نتیجه‌گیری

امروزه به دلیل آلودگی‌های زیست محیطی استفاده از منابع زیست تخریب پذیر افزایش پیدا کرده است. تولید پلیمر PLA با استفاده از پلی لاکتیک اسید صورت می‌گیرد. الیاف PLA به دما و شرایط قلیایی بسیار حساس است به طوری که با قرار گرفتن در شرایط قلیایی قوی، آبکافت می‌شود. PLA کاربرد فراوانی در صنایع پلاستیک، پزشکی و نساجی به

<sup>1</sup> Burkinshaw

## ۹- مراجع

- J. Suesat, P. Suwanruji, "Dyeing and fastness properties of Disperse dyes on poly (lactic acid) fiber, In: Textile dyeing" (Edited by P. Hauser), Intech Publisher, 2011.
- R. Karst, M. Hain, Y. Yang, "Care of PLA textiles", Res. J. Text. Appa. 13, 69-74, 2009.
- M. H. Hutchinson, J. R. Dorgan, D. M. Knauss, S. B. Hait, "Optical properties of polylactides", Polym. Eng. Sci. 14, 119-124, 2006.
- R. S. Blackburn, X. Zhao, D. W. Farrington, L. Johnson, "Effect of D-isomer concentration on the coloration properties of poly (lactic acid)", Dyes Pigm. 70, 251-258, 2006.
- Q. Wang, L. Su, X. Fan, J. Yuan, L. Cui, P. Wang, "Effects of lipase on poly (lactic acid) fibers", Fiber Polym. 10, 333-337, 2009.
۶. ف. آزادی منش، " پلی لاکتیک اسید و عوامل مؤثر بر خواص آن"، بسیار، ۱۲۴، ۵۶-۵۳، ۱۳۹۱.
- K. Sugiura, S. Ogawa, I. Tabata, T. Hori, "Impregnation of tranilast to the poly (lactic acid) fiber with supercritical carbon dioxide and the release behavior of tranilast", Sen'i Gakkaish, 61, 159-165, 2005.
- K. Sawada, M. Ueda, "Optimization of dyeing poly (lactic acid) fibers with vat dyes", Dyes Pigm. 74, 81-84, 2007.
- S. M. Burkinshaw, D. S. Jeong, "The clearing of poly (lactic acid) fibres dyed with Disperse dyes using ultrasound. Part1: Colorimetric analysis", Dyes Pigm. 77, 171-179, 2008.
- S. M. Burkinshaw, D. S. Jeong, "The clearing of poly (lactic acid) fibres dyed with Disperse dyes using ultrasound: Part2: fastness", Dyes Pigm. 77, 180-190, 2008.



11. S. M. Burkinshawa, D. S. Jeong, "The dyeing of poly (lactic acid) fibres with Disperse dyes using ultrasound: Part I Initial studies", *Dyes Pigm.* 92, 1025-1030, **2012**.
  12. D. Phillips, J. Suesat, M. Wilding, D. Farrington, S. Sandukas, J. Bone, S. Dervan, "Effect of heat setting on dimensional stability and dyeing properties of poly (lactic acid) fibres", *Coloration Technology.* 119, 128-133, **2003**.
  13. J. Koh, "Dyeing with Disperse dyes, In: Textile Dyeing" (Edited by P. Hauser), Intech Publisher, **2011**.
  14. F. Fattahi, H. Izadan, A. Khoddami, "Investigation into the Effect of UV/Ozone Irradiation on dyeing behaviour of poly (lactic acid) and poly (ethylene terephthalate) substrates", *Color Colorants Coat.* 5, 15-22, **2012**.
  15. D. Garlotta, "A literature review of poly (lactic acid)", *J. Polym. Environ.* 9, 64-84, **2001**.
  16. S. Ujjin, S. Jantip, "Study on the dyeing properties of poly (lactic acid) and silk yarns with natural dyes", *Adva. Mater. Res.* 486, 384-387, **2012**.
  17. K. E. Perepelkin, "Chemistry and technology of chemical fibers, polylactide fibers: fabrication, properties, use prospects", *Fiber Chemistry.* 34, 12-24, **2002**.
  18. C. I. Idumah, A. N. Nwachukwu, B. N. Akubue, "Comparative evaluation of the effects of time of heat setting and wet processing on shearing properties of knitted Ingeo™ Poly (lactic acid) (PLA) and polyethyleneterephthalate fabric", *American J. Mater. Eng. Technol.* 2, 1-6, **2014**.
  19. M. Maffhur, M. A. Hira, "Specialty fibres-IV: poly lactic acid fibres", *Man-made Textile in India*, 232-237, **2008**.
  20. C. I. Iduma, A. N. Nwachukwu, "Comparative analysis of the effects of time of heat setting and wet processing on tensile properties of treated and untreated knitted PLA fabric", *American J. Mater. Eng. Technol.* 1, 40-45, **2013**.
  21. H. Liang, Z. Shufen, T. Bingtao, W. Lili, Y. Jinzong, "Dyeability of polylactide fabric with hydrophobic anthraquinone dyes", *Chinese J. Chem. Eng.* 17, 156-159, **2009**.
  22. O. Avinc, J. Bone, H. Owens, D. Phillips, M. Wilding, "Preferred alkaline reduction-clearing conditions for use with dyed Ingeo poly (lactic acid) fibres", *Color. Technol.* 122, 157-161, **2006**.
  23. B. Gupta, N. Revagade, J. Hilborn, "Poly (lactic acid) fiber: An overview", *Prog. Polym. Sci.*, 32, 455-482, **2007**.
  24. D. W. Farrington, J. Lunt, S. Davies, R. S. Blackburn, "Poly (lactic acid) fibers (Chapter 6), in: Biodegradable and sustainable fibers (edited by R. S. Blackburn)", Woodhead Publishing, 191-220, **2005**.
  25. S. H. Lee, I. Y. Kim, W. S. Song, "Biodegradation of polylactic acid (PLA) fibers using different enzymes", *Macromol. Res.* 22, 657-663, **2014**.
  26. D. E. Henton, P. Gruber, J. Lunt, J. Randall, "Polylactic acid technology", (in: "Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites", (edited by A. K. Mohanty, M. Misra, L. T. Drzal), CRC Press, **2005**.
  27. J. S. Dugan, "Novel Properties of PLA Fibers", *Int. Nonwov. J.* 10, 29-33, **2001**.
  28. Y. Yang, S. Huda, "Comparison of Disperse dye exhaustion, color yield, and colorfastness between polylactide and poly (ethylene terephthalate)", *J. Appl. Polym. Sci.* 90, 3285-3290, **2003**.
  29. L. He, S. F. Zhang, B. T. Tang, L. L. Wang, J. Z. Yang, "Dyes with high affinity for polylactide", *Chinese Chem. Lett.* 18, 1151-1153, **2007**.
  30. L. S. Ying, "The effect of atmospheric pressure plasma treatment on dyeing properties of poly (lactic) acid fabric", B.Sc. Thesis, Institute of Textiles & Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, **2010**.
  31. D. Karst, D. Nama, Y. Yang, "Effect of Disperse dye structure on dye sorption onto PLA fiber", *Colloid Interf. Sci.* 310, 106-111, **2007**.
  32. G. A. Baig, "Reduction clearing of simulated disperse dyed PLA fabrics and their tensile properties", *Colloid Interf. Sci.* 38, 22-28, **2013**.
  33. O. Avinc, A. Khoddami, "Overview of poly (lactic acid) fibre", *Fibre Chem.* 42, 68-78, **2010**.
  34. J. h. Choi, W. Y. Seo, "Coloration of poly (lactic acid) with Disperse dyes comparison to poly (ethylene terephthalate) of dyeability, Shade and Fastness", *Fiber. Polym.* 7, 270-275, **2006**.
  35. N. Sisodia, M. S. Parmar, "Dyeing behavior and fastness properties of corn (PLA) fiber", *IOSR J. Polym. Text. Eng.* 1, 1-7, **2014**.
  36. S. M. Burkinshawa, D. S. Jeong, T. I. Chun, "The coloration of poly (lactic acid) fibres with indigoid dyes: Part 2: Wash fastness", *Dyes Pigm.* 97, 374-387, **2013**.
  37. S. M. Burkinshaw, D. S. Jeong, "The dyeing of poly (lactic acid) fibres with Disperse dyes using ultrasound: Part 2- Fastness", *Dyes Pigm.* 92, 988-994, **2012**.
  38. M. Jamshidian, E. A. Tehrani, M. Imran, M. Jacquot, S. Desobry, "Poly-Lactic acid: production, applications, nanocomposites, and release studies", *Comp. Rev. Food Sci. Food Safe.* 9, 552-571, **2010**.
۳۹. ا. نوپاشانی، م. لطفی، ا. قادری نسب، "مروری بر تولید پلی لاکتیک اسید (PLA) از زیست توده"، *بسیار*، ۶۶-۷۵، ۱۳۹۲
40. C. Idumah, A. Nwachukwu, B. Akubue, C. Anyigor, "A study of the effects of time of heat setting and wet processes on shearing (Gf/Cm) properties of treated and untreated griegie knitted Ingeo™ poly (lactic acid) (PLA) and polyethylen eterephthalate (PET) fabric", *J. Text. Sci. Eng.* 4, 2165-8064, **2013**.
  41. D. Karst, Y. Yang, "Using the solubility parameter to explain Disperse dye sorption on polylactide", *J. Appl. Polym. Sci.* 96, 416-422, **2005**.
  42. J. Lunt, J. Bone, "Propertis and dyeabilty of fibers and fabrics producedb from polylactide (PLA) polymers", *Annual International Conference & Exhibition of AATCC.* **2008**.
  43. J. Wu, H. Guo, J. Ke, J. Fan, "Studies on kinetic and thermodynamic parameters of natural dye curcumin on PLA fibre", *Fiber Text. Res.* 38, 424-426, **2013**.
  44. R. H. Yang, C. W. Kan, "Effect of heat setting parameters on some properties of PLA knitted fabric", *Fiber. Polym.* 14, 1347-1353, **2013**.
  45. O. Avinc, D. Phillips, M. Wilding, "Influence of different finishing conditions on the wet fastness of selected Disperse dyes on polylactic acid fabrics", *Color. Technol.* 125, 288-295, **2009**.
  46. S. M. Burkinshaw, D. S. Jeong, "The clearing of poly (lactic acid) fibres dyed with Disperse dyes using ultrasound: Part 3", *Dyes Pigm.* 77, 387-394, **2008**.
  47. J. H. Choi, H. Y. Lee, A. D. Towns, "Dyeing Properties of Novel Azo Disperse Dyes Derived from Phthalimide and Color Fastness on Poly(lactic acid) Fiber", *Fiber. Polym.* 11, 199-204, **2010**.
  48. K. Mogi, H. Kubokawa, T. Hatakeyama, "Effect of dyeing on melting behavior of poly (lactic acid) fabric", *J. Therm. Anal. Calori.* 70, 867-875, **2002**.
  49. D. Phillips, J. Suesat, M. Wilding, D. Farrington, S. Sandukas, J. Bone, S. Dervan, "Thermal migration of selected Disperse dyes on poly (ethylene terephthalate) and poly (lactic acid) (Ingeo) fibers", *color. Technol.* 120, 260-264, **2004**.
  50. L. E. Scheyer, A. Chiweshe, "Application and performance of Disperse dyes on polylactic acid (PLA) fabric", *Proceeding of the AATCC International Conference and Exhibition*, 298-305, **2001**.



51. H. Wen, J. J. Dai, "Dyeing of Polylactide Fibers in Supercritical Carbon Dioxide," *J. Appl. Polym. Sci.* 105, 1903-1907, **2007**.
52. M. B. Bilal, P. V. Raynard, B. Haidar, G. Colombe, A. Lallam, "A study of the structural changes during the dyeing process of Ingeo fibers of poly (lactic acid)", *Text. Res. J.* 81, 838-846, **2011**.
53. L. He, L. Lu, S. Zhang, H. S. Freeman, "Synthesis and application of yellow azo-anthraquinone Disperse dyes for polylactide fibres", *Color. Technol.* 126, 92-96, **2010**.
54. Y. Yang, S. Huda, "The balance between dyeing and physical properties of PLA", *Annual International Conference & Exhibition of AATCC*, 196-203, **2008**.
55. I. Drivas, R. S. Blackburn, C. M. Rayner, "Natural anthraquinonoid colorants as platform chemicals in the synthesis of sustainable Disperse dyes for polyesters", *Dyes Pigment.* 88, 7-17, **2011**.
56. M. S. Lopes, A. L. Jardini, R. M. Filho, "Synthesis and characterizations of poly (lactic acid) by ring-opening polymerization for biomedical applications", *Chem. Eng. Transact.* 38, 331-336, **2014**.
57. S. D. Kim, E. J. Park, "Relation between chemical structure of yellow Disperse dyes and their lightfastness", *Fiber. Polym.* 2, 159-163, **2001**.
58. Y. Furuhashi, Y. Kimura, N. Yoshie, H. Yamane, "Higher-order structures and mechanical properties of stereocomplex-type poly (lactic acid) melt spun fibers", *Polymer* 47, 5965-5972, **2006**.
59. J. H. Choi, M. h. Kim, J. S. Park, J. M. Jeon, D. O. Kim, A. D. Towns, "Coloration of Poly (lactic acid) with Disperse Dyes. II. Dyeing characteristics and color fastness", *Fiber. Polym.* 8, 37-42, **2007**.
60. D. Karst, M. Hain, Y. Yang, "Mechanical properties of polylactide after repeated cleanings", *J. Appl. Polym. Sci.* 108, 2150-2155, **2008**.
61. R. Auras, "Polylactic acid as a new biodegradable commodity polymer polylactic", [https:// www.msu.edu/~aurasraf /](https://www.msu.edu/~aurasraf/), Viewed at Aug. **2015**.
62. C. Idumah. I, A. N. Nwachukwu, "Effects of time of heat setting on the tensile properties of ingeo™ poly (lactic acid) (PLA) fabric", *Int. J. Energ. Environ.* 4, 797-806, **2013**.
63. S. M. Burkinshaw, A. Negrou, "The wash-off of dyeings using interstitial water part 1: initial studies", *Dyes Pigment.* 90, 177-190, **2011**.
64. O. Avinc, H. A. Eren, P. Uysal, "Ozone applications for after-clearing of Disperse-dyed poly (lactic acid) fibers", *color. Technol.* 128, 479-487, **2012**.
65. G. H. Koo, J. Jang, "Surface Modification of Poly (Lactic Acid) by UV/Ozone Irradiation", *Fiber. Polym.* 9, 674-678, **2008**.
66. F. Burkersroda, L. Schedl, A. Pferich, "Why degradable polymers undergo surface erosion or bulk erosion", *Biomaterials.* 23, 4221-4231, **2002**.
67. M. A. Tavanaie, "Melt recycling of poly (lactic) acid plastic wastes to produce biodegradable fibers", *Polym-Plast. Technol.* 53, 742-751, **2014**.
68. J. G. Pérez, J. C. V. Infante, E. F. Urquiza, P. Pages, F. Carrasco, O. O. Santana, M. L. MasPOCH, "Fracture behavior of quenched poly(lactic acid)", *Exp. Polym. Lett.* 5, 82-91, **2011**.