Modares Journal of Biotechnology. 2018;9(1):69-78

Biodegradability Modification of Synthetic Polyamide 6 Fibers via in-Situ Melt Blending with Recycled Poly (Lactic) Acid Plastic Food Container Flakes during the Melt Spinning Process

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Bishal H.[1] *MSc*,
Tavanaie M.A.* *PhD*,
Mahmudi Gevari A.[1] *MSc*

How to cite this article
Bishal H, Tavanaie M A, Mahmudi Gevari A. Biodegradability Modification of Synthetic Polyamide 6 Fibers via in-Situ Melt Blending with Recycled Poly (Lactic) Acid Plastic Food Container Flakes during the Melt Spinning Process. Modares Journal of Biotechnology. 2018;9(1):69-78.

*Textile Engineering Department, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran
[1]Textile Engineering Department, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran

Correspondence
Address: Textile Engineering Department, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran
Phone: +98 (35) 31232560
Fax: +98 (35) 31232560
ma.tavanaie@yazd.ac.ir

Article History
Received: March 25, 2016
Accepted: January 14, 2018
ePublished: February 5, 2017

ABSTRACT

Aims Nylon or polyamide is one of the most used and most important polymers used in the plastic and fiber industries of the world. For this reason, its use is less sensitive to the properties of its very poor biodegradability. Therefore, the aim of the present study was the biodegradability modification of synthetic polyamide 6 (pa6) fibers via in-situ melt blending with recycled poly (lactic) acid plastic food container flakes (r-PLA) during the melt spinning process.

Materials & Methods In this experimental study, polyamide chips 6 in textile industry and Poly (Lactic) Acid Plastic Disposable Container Flakes were used. The weight loss, mechanical properties, and surface morphology variations of pure and modified fiber samples after soil burial test were analyzed for comprehensive biodegradability study of the modified fiber samples. Data were analyzed by One-Way Analysis of Variance.

Findings The mechanical tests performed on Norris fiber showed successful production of blend fibers with the percentages of 5, 10, 20, 30, and 40 of the components of r-PLA and A 50% r-PLA fiber sample did not have acceptable mechanical properties. The changes of PA6/r-PLA blended fibers with a significant increase in r-PLA component in the PA6 substrate were significant.

Conclusion The blend modified of PA6 and Poly (Lactic) recycled samples, with a composition containing from 5% to 40% of the dispersed recycled poly-lactic acid fraction have successfully melt spinning capability. By increasing the percentage of recycled poly lactic acid in the blended fibers, the mechanical properties show improvement in samples of 5% and 10% by weight and show reduction in higher percentages. Iincreasing the biodegradability of modified PA 6 fibers with increasing the r-PLA content is obviously confirmed.

Keywords Blend Fibers; Biodegradability; Polyamide 6; Poly Lactic Acid; Mechanical Properties

CITATION LINKS

[1] Biodegradation of nylon ... [2] Compostable polymer ... [3] Properties of lactic acid based polymers and their correlation with ... [4] Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid ... [5] Biodegradation of ... [6] Fiber ... [7] Study of the biodegrability of degradable/biodegradable plastic material in a controlled composting ... [8] Biodegradability and compostability of lignocellulosic based composite ... [9] Summary of ISO/TC 201 standard: XXXIII, ISO 18115:2001/Amd, 2:2007-surface chemical analysis-vocabulary ... [10] Biodegradation of agricultural plastic ... [11] In situ 1H NMR Study of the biodegradation of xenobiotics: Application to heterocyclic ... [12] Biodegradable plastics and ... [13] Enhanced production of lactic acid by an adapted strain of Lactobacillus delbrueckii ... [14] An overview of polylactides as packaging ... [15] Poly(lactic acid) fiber ... [16] Degradation of poly(lactide)-based biodegradable ... [17] Biodegradable polymer blends and composites from renewable ... [18] Polyethylene-poly(L-lactide) diblock copolymers: Synthesis and compatibilization of poly(L-lactide)/polyethylene ... [19] Melt recycling of poly(lactic acid) plastic wastes to produce biodegradable ... [20] Effect of chain extenders on thermal and mechanical properties of poly (lactic acid) at high processing ... [21] Structure and property of polylactide/polyamide ... [22] Properties enhancement of partially biodegradable polyamide/polylactide blends through ... [23] Morphology, thermal behavior and mechanical properties of binary blends of compatible ... [24] Surprising shape-memory effect of polylactide resulted from toughening by polyamide ... [25] Polyamide-6/poly (lactic acid) blends compatibilized by the maleic anhydride grafted polyethylene-octene ... [26] Green engineered polypropylene biodegradable fibers through blending with recycled poly(lactic) acid ...

Copyright© 2018, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

اصلاح زیست‌تخریب‌پذیری الیاف مصنوعی پلی‌آمید ۶ با آمیختن در جای پرک ظروف پلاستیکی پلی‌لاکتیک‌اسید حین فرآیند ذوب‌ریسی

هستی بی‌شال MSc
گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
محمدعلی توانایی* PhD
گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
ابوالفضل محمودی‌گِوَری MSc
گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده
اهداف: نایلون یا پلی‌آمید یکی از پرکاربردترین و مهم‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در صنایع پلاستیک و الیاف جهان به حساب می‌آید. به همین دلیل در استفاده از آن، کمتر به خواص زیست‌تخریب‌پذیری بسیار ضعیف آن توجه می‌شود. بنابراین پژوهش حاضر با هدف اصلاح زیست‌تخریب‌پذیری الیاف مصنوعی پلی‌آمید ۶ با آمیختن در جای پرک ظروف پلاستیکی پلی‌لاکتیک‌اسید حین فرآیند ذوب‌ریسی انجام شد.
مواد و روش‌ها: در پژوهش تجربی حاضر، چیپس پلی‌آمید ۶ مورد استفاده در صنایع نساجی و پرک‌های پلی‌لاکتیک‌اسید از ظروف یک‌بارمصرف استفاده شد. برای بررسی زیست‌تخریب‌پذیری نمونه‌ها، تغییرات وزن نمونه، خواص مکانیکی بعد از تخریب در خاک و تصاویر میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. داده‌ها با آزمون تحلیل واریانس یک‌راهه تحلیل شدند.
یافته‌ها: آزمون‌های مکانیکی انجام‌گرفته روی الیاف نوریس نشان‌دهنده تولید موفقیت‌آمیز الیاف آمیخته با درصد ترکیب‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰% جزء r-PLA بود و نمونه الیاف حاوی ۵۰% وزنی از پلی‌لاکتیک‌اسید از خواص مکانیکی قابل قبولی برخوردار نبود. تغییرات الیاف آمیخته PA6/r-PLA با افزایش جزء پراکنده r-PLA در بستر PA6 کاملاً معنی‌دار بودند.
نتیجه‌گیری: نمونه آمیخته پلی‌آمید ۶ و پرک پلی‌لاکتیک‌اسید بازیافتی، با ترکیب درصدهای حاوی ۵ تا ۴۰% از جزء پراکنده پرک پلی‌لاکتیک‌اسید بازیافتی به‌خوبی از قابلیت ذوب‌ریسی برخوردارند. با افزایش درصد وزن پرک پلی‌لاکتیک‌اسید بازیافتی در الیاف آمیخته تولیدشده، خواص مکانیکی در نمونه‌های ۵ و ۱۰% وزنی، بهبود و در درصدهای بالاتر کاهش نشان می‌دهند. افزایش میزان تخریب زیستی الیاف اصلاح‌شده پلی آمید ۶ با اضافه‌شدن میزان پرک پلی‌لاکتیک‌اسید بازیافتی، به‌وضوح تایید می‌شود.
کلیدواژه‌ها: الیاف آمیخته پلیمری، زیست‌تخریب‌پذیری، پلی‌آمید۶، پلی‌لاکتیک‌اسید، خواص مکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۷
*نویسنده مسئول: ma.tavanaie@yazd.ac.ir

مقدمه

نایلون یا پلی‌آمید یکی از پرکاربردترین و مهم‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در صنایع پلاستیک و الیاف جهان به‌حساب می‌آید. به‌همین دلیل در استفاده از آن کمتر به خواص زیست‌تخریب‌پذیری بسیار ضعیف آن توجه می‌شود. پلیمرهای پلی‌آمیدی، به‌دلیل داشتن پیوندهای هیدروژنی زیادی که در ساختار مولکولی خود دارند، از زیست‌تخریب‌پذیری پایینی برخوردارند[1]. برای ایجاد خواص زیست‌تخریب‌پذیری و زیست‌سازگارکردن چنین پلیمرهایی می‌توان از روش‌هایی مانند ترکیب‌کردن پلیمر با پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و آمیخته‌سازی، اضافه‌کردن مواد زیست‌تخریب‌پذیری و کامپوزیت‌سازی، استفاده از نانو ذرات و غیره استفاده کرد[2-4].

در استفاده از آمیخته‌سازی و ترکیب‌کردن پلیمرها باید به این نکته توجه داشت که قسمت زیست‌تخریب‌پذیر، سرعت و میزان تخریب در پلیمر نهایی را تعیین می‌کند[5]. میزان قابلیت تخریب جزء زیست‌تخریب‌پذیر و همچنین سازگاری آن با پلیمر اصلی، یکی از مهم‌ترین عوامل استفاده از آمیخته‌سازی برای ایجاد یک آمیخته زیست‌تخریب‌پذیر است. در دسته‌بندی مواد و پلیمرهای زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر، استفاده از پلیمرهایی که از منابع تجدیدپذیر تولید می‌شوند، ارزش و صرفه زیست‌محیطی و اقتصادی بالاتری در درازمدت خواهد داشت.

به‌طور کلی پلیمرهای تولیدشده از منابع تجدیدپذیر را می‌توان در سه طبقه شامل پلیمرهای طبیعی (نشاسته، پروتئین و سلولز)، پلیمرهای مصنوعی بشرساخت مانند پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) و پلیمرهایی که از تخمیرهای میکروبی به‌دست می‌آیند (پلی‌هیدروکسی‌بوتیرات) دسته‌بندی کرد[6]. ویژگی مهم این پلیمرها، تخریب‌پذیری آنها در محیط زیست و سازگاری محصول تخریب‌شده آنها با محیط زیست است. با استفاده از ترکیب‌کردن مناسب پلیمرها بر پایه سوخت‌های فسیلی و پلیمرهای بر پایه مواد تجدیدپذیر، به‌صورت کامپوزیت یا آمیخته، می‌توان پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر باارزش افزوده و سازگار با محیط زیست را تولید کرد. این محصولات جدید آمیخته‌ای یا کامپوزیتی بسیار باارزش و با خواصی بهتر از هر کدام از پلیمرهای سازنده به‌صورت جدا هستند[7]. آمیخته‌های زیست‌تخریب‌پذیر اغلب با استفاده از مخلوط‌کردن یک پلیمر یا رزین گرمانرم با یک پلیمر یا رزین زیست‌تخریب‌پذیر تولید می‌شود. در چنین آمیخته‌هایی، بعد از فروپاشی جزء زیست‌تخریب‌پذیر، پودر یا ذرات ماده گرمانرم نباید محیط را آلوده سازد.

یک آمیخته زیست‌تخریب‌پذیر، طبق تعاریف و استانداردهای بین‌المللی باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد. برای مثال انجمن آمریکایی استاندارد آزمون مواد (ASTM)، پلاستیک زیست‌تخریب‌پذیر را پلاستیکی معرفی می‌کند که در آن تخریب بر اثر میکروارگانیزم‌ها مثل باکتری‌ها، قارچ‌ها و کپک‌ها به‌طور طبیعی رخ دهد[7]. طبق استانداردهای موسسه بین‌المللی استاندارد (ISO و CEN)[8, 9] نیز پلاستیک زیست‌تخریب‌پذیر، پلاستیکی است که در واکنش‌های طبیعی با ریزجانداران مثل قارچ‌ها، باکتری‌ها و کپک‌ها به بخش‌هایی با وزن مولکولی پایین‌تر تبدیل شود. با استفاده از تعاریف ارایه‌شده و به‌خصوص استاندارد ISO، می‌توان بیان داشت که یک پلاستیک زیست‌تخریب‌پذیر، پلاستیکی است که ساختار شیمیایی آن تحت شرایط معین دچار تغییرات عمده شود و بعضی خواص خود را از دست بدهد که این اطلاعات را می‌توان با استفاده از روش‌های آزمون‌های استاندارد به‌دست آورد و پلاستیک مورد نظر را دسته‌بندی نمود.

پلی‌لاکتید یا پلی‌لاکتیک‌اسید، یک محصول زیست‌سازگار است که می‌توان آن را از منابع تجدیدپذیر تولید کرد (با تخمیر نشاسته ذرت و تبدیل آن به لاکتیک‌اسید و نهایتاً تولید پلیمر پلی‌لاکتیک‌اسید)[10]. پلی‌لاکتیک‌اسید خاصیت زیست‌تخریب‌پذیری مناسبی در محیط اطراف و همچنین در بدن انسان دارد. علاوه بر این، PLA کمپوست‌شونده نیز هست که برای انسان و محیط زیست هیچ سمیتی ندارد. PLA خواص مکانیکی و قابلیت‌های بسیار مناسب و بالایی شبیه پلیمرهای صنعتی مثل پلی‌اتیلن و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) دارد. از این محصول و همچنین آمیخته‌های آن به‌دلیل ویژگی‌های زیادی که دارد در

صنایع پزشکی، دارویی، زیستی و همچنین در صنایع بسته‌بندی و نساجی به‌طور فزاینده‌ای استفاده می‌شود[11-15]. در صنایع پزشکی با توجه به خاصیت زیست‌تخریب‌پذیری بالای PLA و لاکتید (LA) و سمیت بسیارکم، در سیستم‌های دارورسانی و همچنین برای محکم‌کردن استخوان‌های شکسته بسیار استفاده می‌شود[16]. از کامپوزیت‌های PLA نیز برای روکش‌دهی در صنایع خودروسازی، کامپیوترهای شخصی و همچنین موبایل‌ها استفاده می‌شود. مزیت بزرگ PLA، قابلیت اصلاح و تغییر ساختار آن در راستای بهبود خواص فیزیکی یا زیست‌تخریب‌پذیری آن به‌صورت دلخواه و برای استفاده‌های گوناگون است. برای تغییر در خواص فیزیکی یا زیست‌تخریب‌پذیری باید از روش آمیخته‌کردن یا روش کامپوزیت‌سازی استفاده کرد. بسته به خواصی که درنهایت از محصول آمیخته انتظار می‌رود، پرکننده (پلیمر دوم) و میزان مصرف آن انتخاب شود. همچنین در انتخاب پرکننده، سادگی انجام آمیخته‌سازی و برتری محصول از نظر تجاری نیز مهم هستند[15]. پلی‌لاکتیک‌اسید یک پلیمر گرمانرم است، از این رو می‌توان آن را با پلیمرهای مختلف آلیفاتیک یا آروماتیک که دمای ذوب نزدیک به هم داشته باشند، به‌صورت آمیخته ترکیب کرد. استفاده از ضایعات PLA در بازیافت و تولید الیاف (به‌صورت الیاف یک‌جزیی و آمیخته‌ای با پلیمر پلی‌پروپیلن) نیز مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج به‌دست آمده نیز از نظر خواص فیزیکی و زیست‌تخریب‌پذیری بسیار رضایت‌بخش بوده است[17-19]. استفاده از مواد بازیافتی پلی‌لاکتیک‌اسید و پیداکردن روشی که بتوان مجدداً از آنها استفاده نمود، به نوبه خود ایجاد یک ارزش افزوده برای یک ماده دورریختنی یا ماده‌ای با روش‌های بازیافت متداول پرهزینه است. علاوه بر این اگر این ماده بتواند خواصی نامطلوب از ماده دیگری را بهبود بخشد، اهمیت این پژوهش را نشان می‌دهد، بنابراین استفاده از این ماده نه‌تنها راه حلی برای کاهش آلودگی‌های ناشی از این پلاستیک‌های دورریز است، بلکه به‌لحاظ اقتصادی نیز ارزش افزوده قابل قبولی با تولید یک پلیمر جدید ایجاد خواهد شد. ترکیب‌کردن پرک‌های بازیافتی پلی‌لاکتیک‌اسید (r-PLA) و PA دو مزیت اصلی دارد؛ اول اینکه بازیافت یک ماده زیست‌تخریب‌پذیر ارزشمند (r-PLA) که در روش‌های متدوال بازیافت آنها، تبدیل به کود یا در یک فرآیند هزینه‌بر، تبدیل به مونومرهای اولیه می‌شود و دوم اینکه طبق بررسی‌های انجام‌شده روی آمیخته با درصدهای مختلف r-PLA می‌توان بیان داشت که این آمیخته با تغییر میزان سهم r-PLA، قابلیت کنترل زمان تخریب داشته و برای استفاده‌های زیادی می‌توان از این کارآیی بهره برد.

استفاده از r-PLA با درصدهای پایین، می‌تواند در بهبود خواص زیستی PA بسیار تاثیرگذار باشد و در موارد زیادی از جمله محصولات پلاستیکی مورد استفاده در کشاورزی گلخانه‌ای مفید باشد. در کشاورزی گلخانه‌ای گاهی لازم است تا پلاستیک در مرور زمان، خواص مکانیکی خود را از دست دهد یا حتی به‌صورتی در خاک از بین برود که آمیخته‌سازی در این مورد قابلیت ایجاد این خاصیت را دارد. آمیخته پلیمر PA و پلیمر خالص PLA در موارد و اهداف متعدد مورد استفاده قرار گرفته است و برخی از نتایج در ادامه اشاره شده است. *خانکروا* و همکاران[20]، آمیخته پلیمری PLA/PA6 را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از یک ماده افزودنی که باعث افزایش طول زنجیره‌های مولکولی هنگام ذوب‌شدن نمونه می‌شود، دمای ذوب PLA آنقدر بالا رود تا به‌راحتی با پلی‌آمید ۶ ذوب و بدون ایجاد تخریب مولکولی در بستر پلی‌آمید پخش شود. اظهار شده است که استفاده از این ماده با جلوگیری از کاهش وزن مولکولی PLA، خواص مکانیکی (استحکام کششی و ضربه‌ای) بهتری نیز حاصل می‌شود. بررسی‌های بیشتر روی خواص آمیخته PLA/PA6 توسط *فنگ* و *یه*[21]، قسمت PLA به‌عنوان بستر درنظر گرفته شده و PA6 در آن با درصد ترکیب‌های متفاوتی پراکنده شده است و هدف از انجام پژوهش، بهبود خواص سختی PLA با ترکیب آن با PA6 بوده است. در نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش سهم PA6 در آمیخته، بلورینگی بخش PA6 افزایش می‌یابد، در حالی که برای بخش PLA، کاهش بلورینگی ملاحظه شده است. در بحث موفولوژی نمونه‌ها، امتزاج‌پذیری کم گزارش شده است (به‌واسطه عدم تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین زنجیره‌ها) و در بحث خواص مکانیکی نیز افزایش میزان ازدیاد طول تا حد پارگی و استحکام کششی خوبی برای نمونه‌هایی شامل ۱۵ تا ۲۰% وزنی از PA گزارش شده است. *کوچارزیک* و همکاران به بررسی خواص آمیخته PLA/PA6 پرداخته‌اند. تغییرات مورفولوژیکی ساختار آمیخته پلیمری در دو مرحله انجام شده است، ابتدا خود آمیخته به‌تنهایی در درصد ترکیب‌های مختلف و در ادامه ایجاد آمیخته با سازگارکننده اضافه‌شده برای ایجاد پایداری و سطح تماس بیشتر در نمونه‌ها انجام شده است[22]. *استاکلت* و همکاران، خواص حرارتی، مکانیکی و مورفولوژی پلیمرهای آمیخته PLA/PA11 را مورد بررسی قرار داده‌اند. امتزاج‌پذیری کم از جمله نتایج گزارش‌شده است. همچنین در رابطه با خواص ساختاری و بلورینگی، تغییری در رفتار آمیخته با کم و زیادشدن درصد نمونه‌ها دیده نشده است. خواص مکانیکی نمونه‌ها نیز در دمای اتاق، بهبود چندانی را نشان نمی‌دهد[23]. پژوهش‌های مشابه آنچه بیان شد، در چندمورد دیگر نیز انجام شده است. به‌طور کلی در همه موارد بهبود خواص مکانیکی (برای جزء PLA) در نمونه‌های آمیخته، مشاهده شده است. علاوه بر این، خواص مشابهی در مورد مورفولوژی تشکیل جزء پراکنده نیز بیان شده است. برای مثال، نمونه‌های آمیخته در همه موارد و امتزاج پذیری کمی (به‌واسطه عدم تشکیل اتصالات هیدروژنی بین زنجیره‌های پلیمری) بیان شده است[24-26].

در پژوهش حاضر، تولید الیاف آمیخته‌ای پلی‌آمید۶ و پرک ظروف یکبار مصرف پلی‌لاکتیک‌اسید و بررسی تغییرات زیست‌تخریب‌پذیری آن با روش‌های مختلف مانند تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)، تغییرات خواص مکانیکی و تغییرات وزنی بر اثر تخریب زیستی در آزمون استاندارد خاک (Soil Burial Test) صورت گرفت. بنابراین پژوهش حاضر با هدف اصلاح زیست‌تخریب‌پذیری الیاف مصنوعی پلی‌آمید ۶ با آمیختن در جای پرک ظروف پلاستیکی پلی‌لاکتیک‌اسید حین فرآیند ذوب‌ریسی انجام شد.

مواد و روش‌ها

در پژوهش تجربی حاضر، چیپس پلی‌آمید ۶ مورد استفاده در صنایع نساجی (شرکت سهامی الیاف؛ ایران) با دمای ذوب ۲۱۰°C با گرانروی نسبی ۲/۳۳ و پرک‌های پلی‌لاکتیک‌اسید از ظروف یک‌بارمصرف (کوپتاینر؛ ایالات متحده) تهیه شد.

تولید الیاف آمیخته پلی‌آمید ۶-پلی‌لاکتیک‌اسید: پرک ضایعات پلی‌لاکتیک‌اسید و چیپس پلی‌آمید ٦ در دمای ۸۲°C به‌مدت ١٤ ساعت به‌منظور خشک‌شدن، ازدست‌دادن رطوبت و رسیدن به

شرایط مناسب برای ذوب‌ریسی، درون آون با هوای خشک قرار داده شدند. به‌منظور تولید الیاف آمیخته، نسبت‌های وزنی مورد نیاز به‌صورت دستی، توزین و آمیخته‌سازی شدند. تولید الیاف به‌روش ذوب‌ریسی در دمای ۲۲۰°C انجام شد. الیاف حاوی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰% وزنی PLA با استفاده از دستگاه ذوب‌ریسی آزمایشگاهی LaboratoryMixing Extruder (دینیسکو؛ ایالات متحده) انجام شد. این دستگاه که به‌طور خاص برای تولید آمیخته‌های پلیمری به‌روش مذاب عرضه شده است، در بخش اندازه‌گیری پیچ اکسترودر از طراحی خاص برای اعمال تنش برشی بسیارزیاد و پراکندگی مناسب جزء پراکنده در بستر برخوردار است. نمونه الیاف نوریس (As-spun) خالص پلی‌آمید ۶ و آمیخته‌ها برای بررسی خواص نهایی و زیست‌تخریب‌پذیری آنها مورد عملیات کشش سرد قرار گرفتند.

برای تولید الیاف کشیده‌شده (FOY) لازم است تا الیاف نوریس تولیدشده در سرعت پایین (LOY)، به‌میزان معینی کشیده شوند تا ساختار درونی الیاف، آرایش‌یافتگی یابند و با گذشت زمان به‌دلیل ناپایداری ساختار آنها تخریب رخ ندهد. برای ایجاد کشش سرد ابتدا میزان ازدیاد طول تا حد پارگی الیاف نوریس (LOY) تعیین شد (e_{bu}) و با استفاده از فرمول زیر برای رسیدن به میزان کشش باقیمانده استاندارد، نسبت کششی برای الیاف تعیین شد:

$$\lambda = \frac{1+\frac{e_{bu}}{100}}{1+\frac{e_{bd}}{100}}$$

λ: نسبت کشش مورد نیاز برای تولید الیاف کشیده‌شده؛

e_{bu}: میزان درصد ازدیاد طول تا هنگام پارگی الیاف کشیده‌نشده؛

e_{bd}: میزان ازدیاد طول تا حد پارگی مورد نیاز باقی‌مانده الیاف کشیده‌شده است.

الیاف پلی‌آمید به‌دلیل ساختار کامل بلورین و پایداری ساختارش، به‌طور متداول در صنعت به‌صورت سرد کشیده می‌شوند. البته الیاف کشیده‌شده به‌صورت سرد و بدون تثبیت حرارتی، احتمال آسودگی تنش و جمع‌شدگی پس از فرآیند را دارد، لیکن به‌منظور حذف عوامل موثر بر خواص الیاف و زیست تخریب‌پذیری آنها، عملیات کشش، به‌روش سرد و بدون تثبیت حرارتی انجام شد. عملیات کشش در دمای اتاق (حدود ۲۵°C) و با توجه به نسبت کشش محاسبه‌شده، به‌وسیله دستگاه آزمون خواص کششی (الیما؛ ایران) انجام شد. مقدار نسبت کشش به‌صورتی محاسبه شد که ازدیاد طول تا حد پارگی نمونه الیاف بعد از کشش، درحدود ۳۰ با حد رواداری ۵% شود.

آماده‌سازی فضای انجام آزمون زیست‌تخریب‌پذیری: برای انجام آزمون‌های زیست‌تخریب‌پذیری نمونه‌ها طبق استاندارد 30-2004 AATCC RA31 عمل شده است. طبق استاندارد، رطوبت خاک مورد استفاده باید بین ۲۵ تا ۳۵% وزنی باشد. اندازه ذرات خاک نیز باید به‌گونه‌ای باشد که خاک از الک با اندازه ۶میلی‌متر عبور کند و نوع خاک مورد استفاده، خاک باغچه است. برای تعیین رطوبت خاک، ابتدا مقداری از خاک را برداشته و بعد از توزین همان مقدار در دمای ۱۰۵°C به‌مدت نیم‌ساعت خشک می‌شود. وزن خاک خشک‌شده محاسبه و با استفاده از اختلاف وزن خاک خشک و تر، میزان رطوبت تعیین می‌شود. سپس خاک‌های آماده‌شده با شرایط استاندارد در جعبه‌های ازپیش‌تعبیه‌شده ریخته شد. نحوه قرارگرفتن الیاف در زیر خاک نیز باید به گونه‌ای باشد تا حداقل ۱۰سانتی‌متر خاک در زیر نمونه‌ها باشد و مقدار ۲سانتی‌متر نیز باید خاک روی آنها ریخته شود. سطح نمونه‌ها نیز باید صاف و ارتفاع آنها یکسان باشد.

به‌منظور تعیین خواص نمونه‌های تخریب‌شده، آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی، تغییرات وزنی و تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای به‌دست‌آوردن مورفولوژی سطحی روی نمونه‌ها انجام شد. برنامه زمان‌بندی برداشت نمونه‌ها به‌منظور بررسی میزان تخریب زیستی، به‌صورت ۱۰، ۲۵، ۴۵، ۶۵ و ۸۵ روز بود (برای هر بازه زمانی نمونه‌های جداگانه با خواص یکسان استفاده شد).

مطالعه زیست‌تخریب‌پذیری با ارزیابی خواص مکانیکی: پس از گذشت ۱۰روز، اولین دسته از الیاف از زیر خاک بیرون آورده شد و مطابق استاندارد، خواص مکانیکی آن تحت شرایط مشابه با قبل از قرارگرفتن نمونه زیر خاک، به‌دست آمد. دسته الیاف بعدی، نیز در مدت زمان‌های ذکرشده به‌همین ترتیب مورد آزمایش و خواص مکانیکی آنها با استفاده از دستگاه آزمون خواص کششی (الیما؛ ایران) مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این آزمون، اندازه اولیه الیاف ۱۰سانتی‌متر و سرعت کشش ۵۰۰میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد.

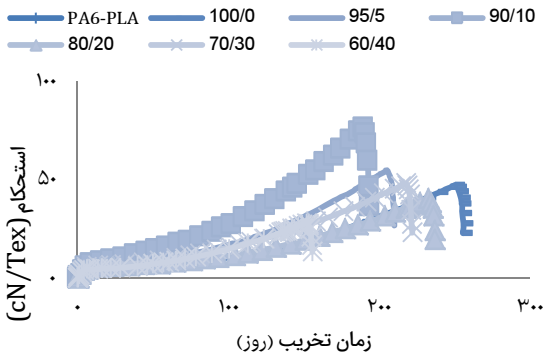
مطالعه زیست‌تخریب‌پذیری با ارزیابی تغییر وزن: در هریک از جعبه‌های تعیین‌شده یک‌دسته از الیاف برای بررسی تغییرات وزنی مورد استفاده قرار گرفت. دسته الیاف علامت‌گذاری شد تا هنگام قرارگرفتن در زیر خاک با دیگر دسته‌های مشابه، تداخل پیدا نکند. اختلاف وزن نمونه بعد از شست‌وشو و خشک‌شدن با وزن نمونه قبل از قرارگرفتن در زیر خاک، به‌صورت درصد تغییرات، تعیین و به‌عنوان درصد تغییر وزن گزارش شد.

مطالعه زیست‌تخریب‌پذیری با ارزیابی خواص مورفولوژیک: به‌منظور بررسی مورفولوژی الیاف و بررسی تخریب صورت‌گرفته روی آنها، تصویری از الیاف، قبل و بعد از قرارگرفتن زیر خاک با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Vega 3 (TESCAN؛ جمهوری چک) تهیه شد. تصاویر الیاف در بزرگ‌نمایی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ برابر مورد مطالعه قرار گرفتند. برای بررسی تخریب و تغییر ظاهری الیاف باید سطح نمونه به‌طور واضح دیده و بررسی شود، به‌همین دلیل تصاویر با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ در پژوهش حاضر نشان داده شد.

تحلیل داده‌ها از طریق آزمون تحلیل واریانس یک‌راهه برای بررسی نتایج خواص کششی صورت گرفت.

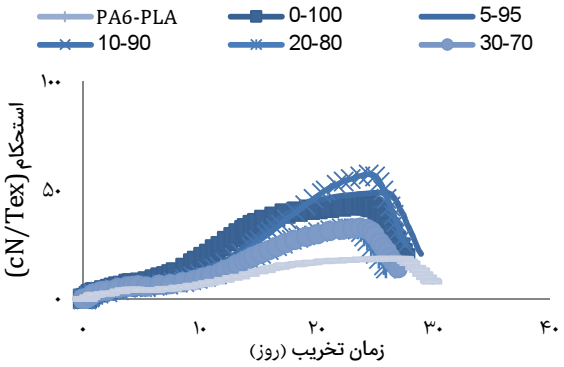
یافته‌ها

آزمون‌های مکانیکی انجام‌گرفته روی الیاف نوریس، نشان‌دهنده تولید موفقیت‌آمیز الیاف آمیخته با درصد ترکیب‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰%، جزء r-PLA بود. نمونه الیاف حاوی ۵۰% وزنی از پلی‌لاکتیک‌اسید در فرآیند تولید، مشکل چندانی نشان نداد، ولی از خواص مکانیکی قابل قبولی برخوردار نبود و ازدیاد طول تا حد پارگی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داد (نمودار ۱).



نمودار ۱) نمودار تغییرات تنش در برابر ازدیاد طول الیاف کشیده‌نشده

با کشش نمونه‌ها مقدار ازدیاد طول تا حد پارگی به‌یک میزان معین رسانیده شد و مقدار مدول اولیه و استحکام نیز به‌واسطه افزایش آرایش‌یافتگی در ساختار الیاف، افزایش یافت (نمودار ۲).



نمودار ۲) نمودار تغییرات تنش در برابر ازدیاد طول الیاف کشیده‌شده

تغییرات الیاف آمیخته کشیده‌نشده (F=۲۰/۱۴؛ p<۰/۰۰۳؛ جدول ۱) و کشیده‌شده (F=۳۵/۳۳؛ p<۰۰۱؛ جدول ۲) PA6/r-PLA با افزایش جزء پراکنده r-PLA در بستر PA6 کاملاً معنی‌دار بودند.

جدول ۱) میانگین استحکام الیاف آمیخته کشیده‌نشده (مرتبط با شکل ۱)

گروه (r-PLA/PA6) (درصد)	میانگین
۰/۱۰۰	۱۳/۵۵±۰/۷۵
۵/۹۵	۱۸/۹۵±۸/۴۳
۱۰/۹۰	۲۷/۳۳±۲/۶۷
۲۰/۸۰	۱۲/۲۷±۲/۰۵
۳۰/۷۰	۱۵/۲۶±۲/۱۰
۶۰/۴۰	۱۱/۱۶±۲/۰۰

جدول ۲) میانگین استحکام الیاف آمیخته کشیده‌شده (مرتبط با شکل ۲)

گروه (r-PLA/PA6) (درصد)	میانگین
۰/۱۰۰	۱۷/۳۷±۰/۹۲۹
۵/۹۵	٤۹/٦۲±۲/۰۸
۱۰/۹۰	۵۷/۷۷±٤/٤۸
۲۰/۸۰	۳۳/۲٤±۲/٤۲
۳۰/۷۰	۳۳/۱۵±۵/۱۰
٦۰/٤۰	۱۸/۸۹±۲/۵۷

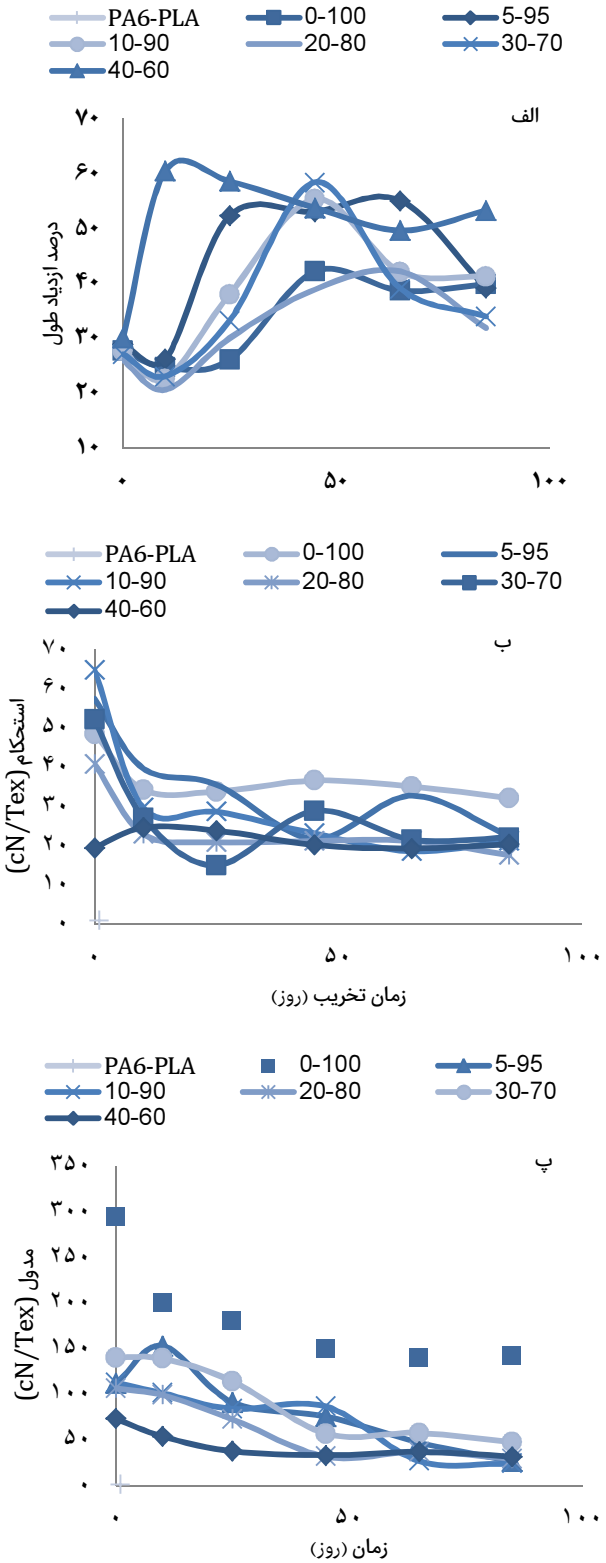
بر اثر قرارگرفتن نمونه‌ها زیر خاک، ازدیاد طول نمونه‌ها ابتدا زیاد و سپس کم شد (نمودار ۳).

نمونه‌های ۵ و ۱۰% حاوی پرک پلی‌لاکتیک‌اسید، در حدود ۶۰% اُفت خواص مکانیکی (استحکام و مدول اولیه الیاف) را نشان دادند و این مقدار برای نمونه‌های بعدی، مقداری کاهش یافت (در حالی که خواص نهایی آنها پایین‌تر از نمونه‌های حاوی ۵% و ۱۰% r-PLA بود؛ نمودار ۳- "ب" و "پ").

تغییرات خواص مکانیکی الیاف اصلاح‌شده بعد از ۸۵ روز تخریب زیستی در زیر خاک و میزان زیست‌تخریب‌پذیری آنها براساس درصد تغییرات به‌وجودآمده تعیین شد و نکته مهم، افزایش میزان ازدیاد طول تا حد پارگی بود (جدول ۳؛ نمودار ۳- الف).

تغییرات ممکن روی الیاف درمقایسه با الیافی که زیر خاک قرار نگرفتند، به‌خوبی مشهود بود. در نمونه با ۲۰، ۳۰ و ۴۰% از r-PLA در الیاف آمیخته، رشد میکروارگانیزم‌ها به‌صورت شدیدی افزایش داشت. پارگی سطحی الیاف در نمونه آمیخته شامل ۴۰% وزنی از پلی‌لاکتیک‌اسید به‌وضوح، در اکثر الیاف مورد بررسی دیده شد.

توده‌های ایجادشده بر اثر مرور زمان بزرگتر شد و حجم بیشتری از سطح نمونه را مورد تخریب قرار داد. روز ۸۵ام حالتی را نشان داد که توده ایجادشده روی نمونه به داخل نمونه نفوذ کرده و مرحله بالاتری از تخریب را نمایش داد (شکل‌های ۱ الی ۵).

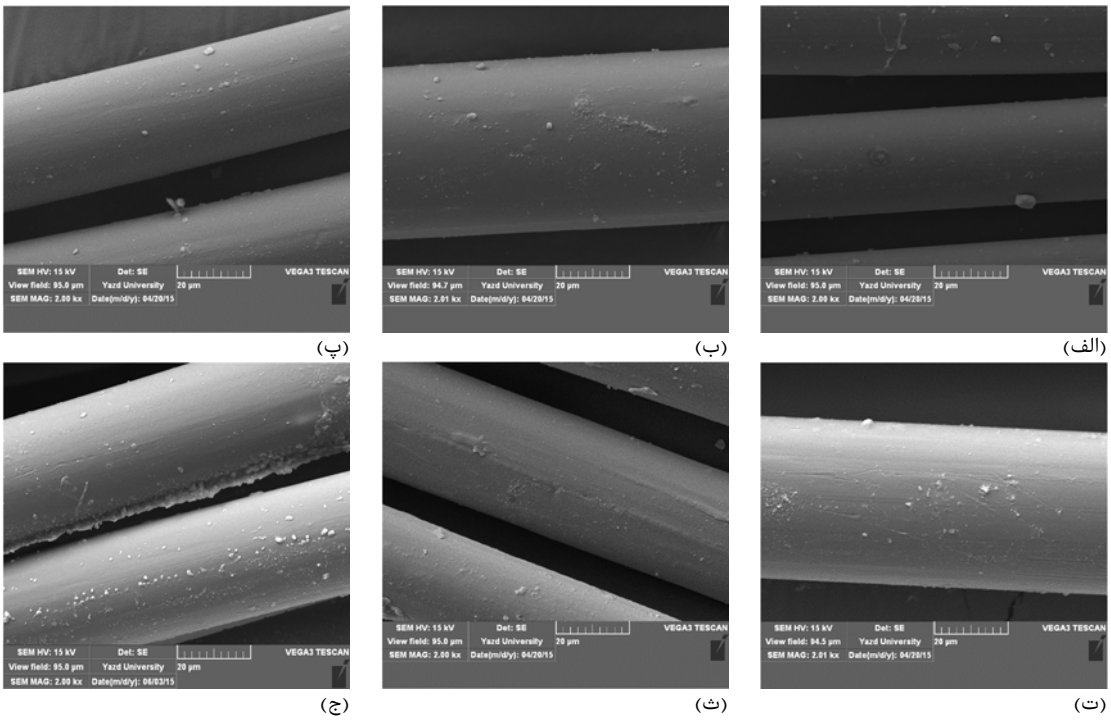


نمودار ۳) تغییرات ایجادشده در خواص مکانیکی الیاف طی آزمون زیست‌تخریب‌پذیری در خاک. **الف:** ازدیاد طول تا حد پارگی؛ ب: استحکام؛ پ: مدول اولیه

جدول ۳) تغییرات خواص مکانیکی بعد از ۸۵ روز در الیاف و میزان زیست‌تخریب‌پذیری آنها (درصد تغییرات در روزهای مختلف)

نمونه (PA6/r-PLA)	نمره الیاف*	مدول (cN/Tex)		استحکام (cN/Tex)		ازدیاد طول تا حد پارگی (%)	
		بعد از ۸۵ روز	درصد تغییر نسبت به نمونه بدون تخریب	بعد از ۸۵ روز	درصد تغییر نسبت به نمونه بدون تخریب	بعد از ۸۵ روز	درصد تغییر نسبت به نمونه بدون تخریب
۱۰۰/۰	۶/۱۰±۰/۰۷	۱۴۲/۲۱	۳۲/۰	۲۸/۶	۳۳/۷	۳۹/۸	-۳۰/۴
۹۵/۵	۵/۹۲±۰/۰۶	۲۶/۵۹	۷۶/۲	۲۲/۴	۶۱/۰	۳۹/۱	-۲۶/۲
۹۰/۱۰	۶/۰۸±۰/۰۸	۲۴/۱۳	۷۸/۶	۲۱/۲	۶۷/۳	۴۱/۲	-۳۲/۸
۸۰/۲۰	۸/۰۰±۰/۰۶	۲۹/۳۶	۷۲/۴	۱۷/۷	۵۶/۸	۳۱/۸	-۱۸/۵
۷۰/۳۰	۶/۴۲±۰/۱۰	۴۷/۷۶	۶۶/۰	۳۲/۲	۴۲/۷	۳۳/۹	-۲۰/۲
۶۰/۴۰	۹/۲۳±۰/۰۵	۳۱/۷۹	۵۶/۶	۲۰/۴	۴/۴	۵۳/۲	-۴۳/۶

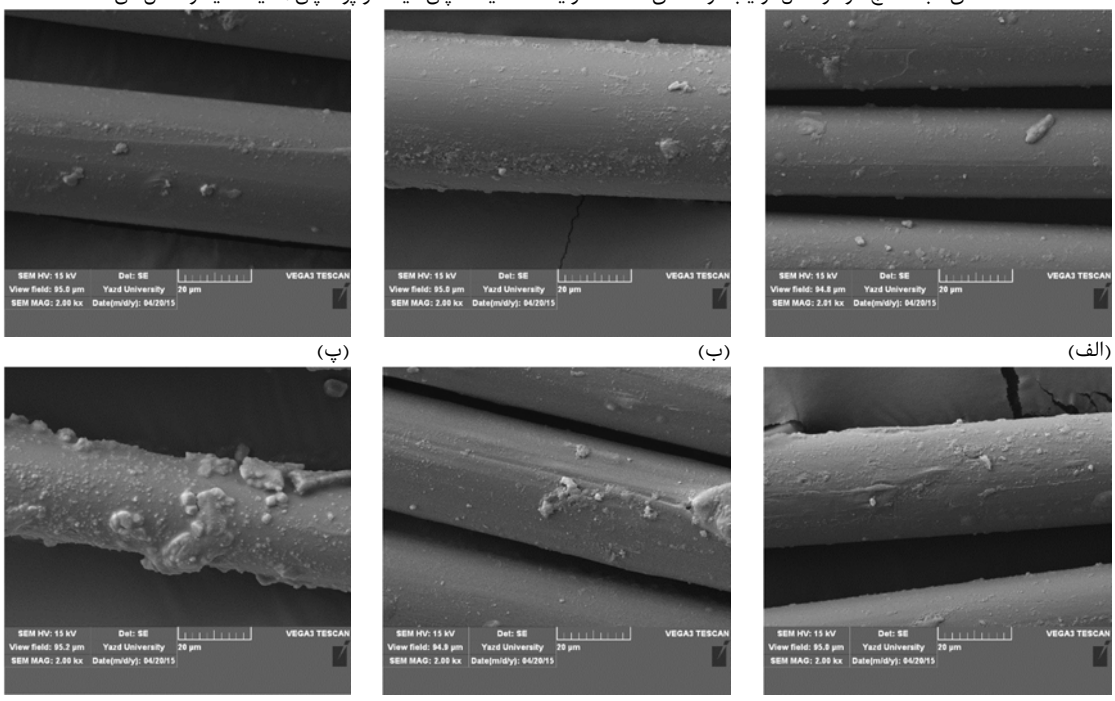
*نمره الیاف کشیده‌شده قبل از قرارگرفتن زیر خاک بر حسب دنیر



(الف) (ب) (پ)

(ت) (ث) (ج)

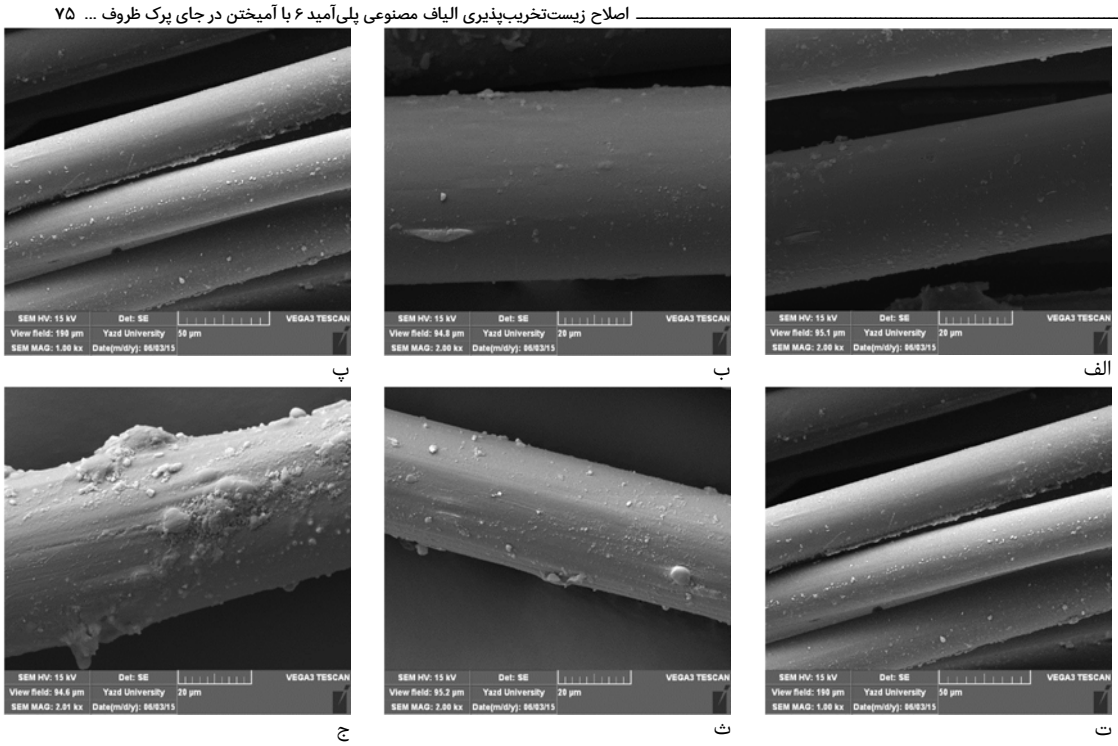
شکل ۱) الیاف پلی‌آمید ۶ خالص و آمیخته با r-PLA قبل از انجام آزمون زیست‌تخریب‌پذیری (**الف:** PLA6 خالص، ب: ۹۵/۵، پ: ۹۰/۱۰، ت: ۸۰/۲۰، ث: ۷۰/۳۰، ج: ۶۰/۴۰)؛ قسمت‌های "ب" تا "ج" از هر شکل ترکیب درصدهای مختلف تولیدشده آمیخته پلی‌آمید ۶ و پرک پلی‌لاکتیک‌اسید را نشان می‌دهد.



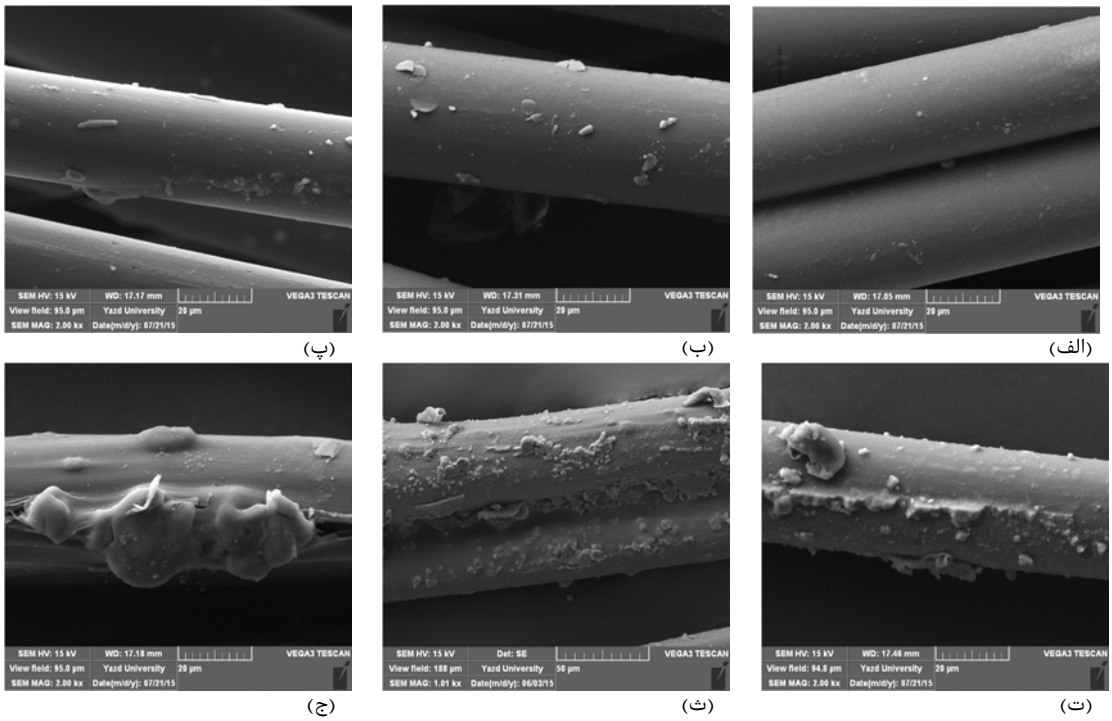
(الف) (ب) (پ)

(ت) (ث) (ج)

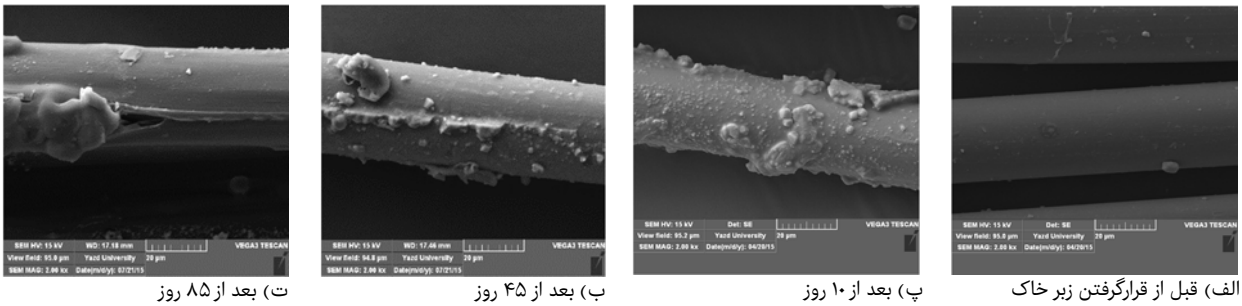
شکل ۲) الیاف پلی‌آمید ۶ خالص و آمیخته PA6/r-PLA با r-PLA بعد از انجام آزمون زیست‌تخریب‌پذیری (روز دهم)؛ توضیحات مثل شکل قبل است.



شکل ۳) الیاف پلی‌آمید ۶ خالص و آمیخته با r-PLA بعد از قرارگرفتن در زیر خاک (روز ۴۵ام)؛ توضیحات مثل شکل قبل است.

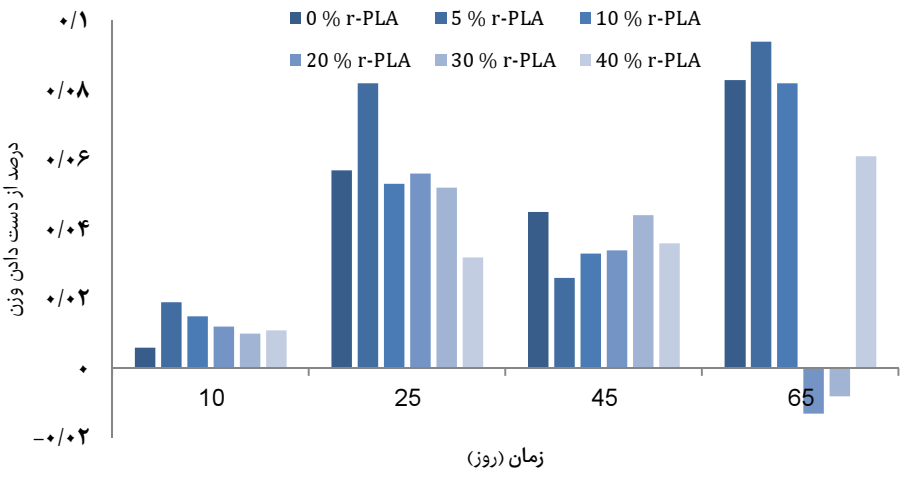


شکل ۴) الیاف پلی‌آمید ۶ خالص و آمیخته PA6/r-PLA بعد از قرارگرفتن در زیر خاک (روز ۸۵ام)؛ توضیحات مثل شکل قبل است.



الف) قبل از قرارگرفتن زیر خاک　　پ) بعد از ۱۰ روز　　ب) بعد از ۴۵ روز　　ت) بعد از ۸۵ روز

شکل ۵) تغییرات ایجادشده روی الیاف آمیخته PA6/r-PLA با ۴۰% جزء r-PLA در زمان‌های متفاوت (قبل و بعد از قرارگرفتن زیرخاک، بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰برابر)



نمودار ۴) درصد تغییرات وزنی نمونه‌ها به‌تفکیک میزان جزء پرک پلی‌لاکتیک‌اسید بازیافتی در الیاف اصلاح‌شده

تغییرات صورت‌گرفته در اثر تخریب زیستی و قرارگرفتن ریزجانداران روی الیاف در اثر قرارگرفتن نمونه‌ها زیر خاک، برای زمان‌های ۱۰، ۴۵ و ۸۵ روز (شکل ۳-۱) و همچنین تغییرات ایجادشده روی الیاف آمیخته با ۴۰% r-PLA، در زمان‌های متفاوت با استفاده از تصاویر SEM (شکل ۴) تعیین شد. بر اثر مرور زمان، تغییرات سطح نمونه در اثر حضور ریزجانداران به‌خوبی قابل مشاهده بود. قرارگرفتن ریزجانداران روی سطح نمونه، تجمع و تخریب سطحی نمونه را با مقایسه تصاویر می‌توان دریافت. تغییرات در سطح نمونه الیاف حاوی ۴۰% r-PLA، در حالی که خواص نهایی آنها پایین‌تر از نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰% r-PLA بود، تعیین شد (شکل ۵).

تغییرات وزنی نشان داد که تا روز ۴۵ام تقریباً فرآیند تخریب بر فرآیند رشد ریزجانداران غلبه داشت، ولی در روز ۶۵ام حضور ریزجانداران روی برخی از نمونه‌ها (۲۰ و ۳۰% دارای r-PLA) افزایش زیادی داشت و همین امر سبب شد تا تغییرات به‌صورت عکس صورت گیرد (نمودار ۴).

بحث

هدف پژوهش حاضر، اصلاح زیست‌تخریب‌پذیری الیاف مصنوعی پلی‌آمید ۶ با آمیختن در جای پرک ظروف پلاستیکی پلی‌لاکتیک‌اسید حین فرآیند ذوب‌ریسی بود. نتایج نشان‌دهنده تولید موفقیت‌آمیز الیاف آمیخته با درصد ترکیب‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰% جزء r-PLA بود. نمونه الیاف حاوی ۵۰% وزنی از پلی‌لاکتیک‌اسید از خواص مکانیکی قابل قبولی برخوردار نبود. مقدار مدول اولیه و استحکام به‌واسطه افزایش آرایش‌یافتگی در ساختار الیاف افزایش یافت که مشابه آن در پژوهش *خانکرو*/ و همکاران نیز گزارش شده است[20].

معنی‌داربودن تغییرات استحکام الیاف آمیخته PA6/r-PLA با افزایش جزء پراکنده r-PLA در بستر PA6، نیز با افزایش یک پلیمر به‌عنوان جزء پراکنده در بستر، کاملاً انتظار می‌رفت. افزایش ازدیاد طول نمونه‌ها به‌دلیل نحوه اعمال کشش (کشش سرد) قابل توجیه بود. بدین صورت که نمونه کشیده‌شده اگر تثبیت حرارتی نشود با قرارگرفتن در شرایط مساعد، قابلیت برگشت به حالت کشیده‌نشده را (بر اثر آسودگی تنش و جمع‌شدگی) دارد. کاهش حداکثر ازدیاد طول تاحد پارگی نمونه‌ها، به‌دلیل تخریب ایجادشده بر اثر فعالیت ریزجانداران به‌وجود می‌آید.

نمونه‌های ۵ و ۱۰% حاوی پرک پلی‌لاکتیک‌اسید، در حدود ۶۰% اُفت خواص مکانیکی (استحکام و مدول اولیه الیاف) را نشان دادند. این امر به‌دلیل کاهش اُفت این خواص به‌واسطه بیشترشدن میزان حضور r-PLA در الیاف آمیخته اولیه بود. با بیشترشدن میزان جزء r-PLA، ساختار درونی الیاف آمیخته (مقدار بلورینگی و آرایش‌یافتگی و یکنواختی ساختمان بستر و جزء پراکنده) دچار تغییر می‌شود که باعث اُفت خواص مکانیکی می‌شود. این تاثیر بیشتر در استحکام خود را نشان داد، به‌طوری که می‌توان تغییرات اندک این مشخصه در نمونه ۴۰درصدی r-PLA را مشاهده کرد. در این نمونه هر چند تغییرات دیگر (تغییرات وزنی و ظاهری در تصاویر SEM و همچنین مدول) حاکی از تخریبی بالاتر از دیگر نمونه‌ها داشت، ولی به‌دلیل تفاوت اولیه زیاد ساختار الیاف با ۴۰% جزء بازیافتی پلی‌لاکتیک‌اسید و مقدار زیاد بخش‌های آمورف ساختار، بعد از گذشت ۸۵ روز ماندن زیر خاک نیز تغییر چندانی در سهم نواحی بلوری و آمورف رخ نداد و تغییرات زیاد مشابه نمونه‌های پیشین (۵ و ۱۰% دارای r-PLA) ملاحظه نشد.

براساس آنچه بیان شد، ایجاد الیاف کشیده‌شده با استفاده از روش کشش سرد انجام شد و با قرارگرفتن الیاف در شرایط مورد نیاز (زیر خاک با رطوبت استاندارد)، آسودگی تنش اتفاق افتاد و آرایش‌یافتگی ایجادشده در اثر کشش در الیاف، کاهش یافت و در نهایت منجر به ازدیاد طول تا حد پارگی باقی‌مانده، بیشتر شد. در تغییرات ازدیاد طول تا حد پارگی در طول آزمون، ابتدا ازدیاد طول بیشتر و سپس کم شد. زیادشدن براساس آنچه بیان شد و کم‌شدن آن نیز در اثر تخریب زیستی نمونه‌ها بود.

تکرار این پارگی و قابل پیش‌بینی‌نبودن رخداد آن در طول الیاف و همچنین پیوسته‌نبودن و طولانی‌بودن ترک‌ها و شکاف‌ها در طول الیاف، نشان‌دهنده تخریب توسط ریزجانداران است. سایر ترکیب درصدهای نمونه آمیخته نیز به‌همین ترتیب تخریب داشتند. به این صورت که هرچه میزان سهم r-PLA بیشتر بود، مقدار تخریب نیز بیشتر قابل رویت بود. مشابه این نتیجه در پژوهشی به‌وضوح دیده شده است[27].

ریزجاندار با استفاده از پلیمر به‌عنوان ماده غذایی، باعث تخریب

نمونه‌ها می‌شود. این فرآیند باعث کاهش وزن خواهد شد که در پژوهش حاضر نیز کاهش وزن ایجادشده در اثر تخریب زیستی در الیاف آمیخته نشان داده شد. البته بررسی تغییر وزن در بسیاری از موارد با مشکلاتی از جمله عدم قابلیت تشخیص به‌دلیل حضور خود ریزجانداران روی نمونه روبه‌رو است. برای مثال باکتری‌ها با تشکیل کلنی (تجمع) روی نمونه باعث افزایش وزن خواهند شد، در صورتی که ایجاد کلنی به‌علت مصرف پلیمر و کاهش وزن حقیقی ماده مورد آزمون است. این عوامل باعث می‌شود تا مقدار تغییر وزن در نمونه پایین باشد (در موارد مشابه متعددی نیز تغییرات وزن به همین شکل مشاهده شده است)[13, 14]. البته وجود ریزجاندارن در تصاویر SEM نیز به‌خوبی آشکار بود و می‌توان با توجه به حجم آنها از تاثیری که می‌توانند روی تغییر وزن داشته باشند، پی‌برد.

تغییرات وزنی در نمونه الیاف با توجه به حضور ریزجانداران و اثر آنها در تخریب زیستی نمونه الیاف، یک فرآیند رقابتی است. به این معنی که تخریب انجام‌شده روی نمونه‌ها باعث می‌شود تا با مصرف کربن قابل استفاده در الیاف توسط ریزجانداران، کاهش وزن رخ دهد. علاوه بر این حضور خود ریزجانداران نیز باعث می‌شود تا وزن نمونه افزایش پیدا کند. تغییرات وزنی که در پژوهش حاضر نشان داده شد، نمایانگر این مهم بود که تا روز ۴۵ام تقریباً فرآیند تخریب بر فرآیند رشد ریزجانداران غلبه داشت، ولی در روز ۶۵ام حضور ریزجانداران روی برخی از نمونه‌ها (۲۰ و ۳۰% دارای r-PLA) افزایش زیادی داشت و همین امر سبب شد تا تغییرات به‌صورت عکس صورت پذیرد.

به‌طور کلی، نمونه‌های تولیدشده دارای خواص مکانیکی مطلوب و قابل قبولی بودند و خواص مکانیکی نمونه‌ها (مدول و استحکام) تخریب با روند مشابهی را در اثر قرارگرفتن زیر خاک نشان داد. نمونه ۵ و ۱۰% پلی‌لاکتیک‌اسید بیشترین تغییر و نمونه خالص کمترین تغییر را نشان داد. تغییرات ظاهری و مورفولوژیکی الیاف با استفاده از تصاویر SEM بررسی شد که تغییر در سطوح به‌واسطه حضور میکروارگانیزم‌ها و اثراتی که روی نمونه‌ها داشتند، قابل بررسی است. نمونه الیاف آمیخته بر اثر تخریب زیستی با کاهش وزن روبه‌رو شد. نمونه با حضور ۴۰% وزنی r-PLA بیشترین تخریب در اثر قرارگرفتن در زیر خاک را از خود نشان داد (با توجه به تغییرات مدول، تصاویر SEM و یکنواختی در کاهش وزن در اثر قرارگرفتن در زیر خاک). نمونه‌های ۲۰ و ۳۰% نیز تخریب زیادی، مخصوصاً در مدول اولیه متحمل شدند. برای تعیین نمونه‌ای که بتوان در گستره کاربردی زیادی از آن استفاده نمود و انتظار داشت تا در پایان عمر مفید خود برای طبیعت حداقل ضرر را داشته باشد، می‌توان از بین نمونه‌ها به نمونه ۲۰ و ۳۰% وزنی r-PLA از این الیاف اشاره کرد.

محدودیت‌های پژوهش حاضر شامل فقدان تولیدکننده داخلی پلیمر PLA و سایر پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر، محدودیت در دستیابی ظروف پلاستیکی PLA تولیدشده از گریدهای متفاوت (با وزن مولکولی متفاوت) و عدم فرهنگ‌سازی گسترده و مطلوب در حوزه مصرف محصولات سبز و زیست‌تخریب‌پذیر در کشور بود.

استفاده از پلیمر PLA تازه‌تولیدشده در تولید الیاف آمیخته برای بررسی و مقایسه با نمونه‌های این پژوهش و استفاده از سایر محصولات تولیدشده از PLA با گریدهای مختلف (با وزن مولکولی متفاوت) به‌عنوان پلاستیک بازیافتی از پیشنهادات این پژوهش است.

نتیجه‌گیری

نمونه آمیخته پلی‌آمید ۶ و پرک پلی‌لاکتیک‌اسید بازیافتی، با ترکیب درصدهای حاوی ۵ تا ۴۰% از جزء پراکنده پرک پلی‌لاکتیک‌اسید بازیافتی به‌خوبی از قابلیت ذوب‌ریسی برخوردارند. با افزایش درصد وزن پرک پلی‌لاکتیک‌اسید بازیافتی در الیاف آمیخته تولیدشده، خواص مکانیکی در نمونه‌های ۵ و ۱۰% وزنی، بهبود و در درصدهای بالاتر کاهش نشان می‌دهند. افزایش میزان تخریب زیستی الیاف اصلاح‌شده پلی‌آمید ۶ با اضافه‌شدن میزان پرک پلی‌لاکتیک‌اسید بازیافتی، به‌وضوح تایید می‌شود.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: هستی بی‌شال (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰%)؛ محمدعلی توانایی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰%)؛ ابوالفضل محمودی‌گِوَری (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۰%).

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

1- Negoro S. Biodegradation of nylon oligomers. App Microbiol Biotechnol. 2000;54(4):461-6.
2- Rodnik E. Compostable polymer materials. Amsterdam: Elsevier; 2008.
3- Södergård A, Stolt M. Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition. Prog Polym Sci. 2002;27(6):1123-63.
4- Lunt J. Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. Polym. Degrad Stab. 1998;59(1-3):145-52.
5- Shimao M. Biodegradation of plastics. Curr Opin Biotechnol. 2001;12(3):242-7.
6- Tavanaei MA, Hadadi H. Fiber engineering. Tehran: Sharh; 2012. [Persian]
7- Vaverková M, Toman F, Adamcová D, Kotovicová J. Study of the biodegrability of degradable/biodegradable plastic material in a controlled composting environment. Ecol Chem Eng S. 2012;19(3):347-58.
8- Sudhakar M, Andrew A, Murali M R, Manju M, Amar M. Biodegradability and compostability of lignocellulosic based composite materials. Renew Mater. 2013;1(4):253-72.
9- Seah MP. Summary of ISO/TC 201 standard: XXXIII, ISO 18115:2001/Amd, 2:2007-surface chemical analysis-vocabulary-amendment 2. Surf Interface Anal. 2008;40(11):1500-2.
10- Kyrikou I, Briassoulis D. Biodegradation of agricultural plastic films: A critical review. J Polym Environ. 2007;15(2):125-50.
11- Delort AM, Combourieu N. In situ 1H NMR Study of the biodegradation of xenobiotics: Application to heterocyclic compounds. J Ind Microbiol Biotechnol. 2001;26(1-2):2-8.
12- Doi Y, Fukuda K, editors. Biodegradable plastics and polymers. Amsterdam: Elsevier Science; 1994.
13- Lee K. Enhanced production of lactic acid by an adapted strain of Lactobacillus delbrueckii subsp, Lactis. World J Microbiol Biotechnol. 2007;23(9):1317-20.

14- Auras R, Harte B, Selke S. An overview of polylactides as packaging materials. Macromol Biosci. 2004;4(9):835-64.
15- Gupta B, Revagade N, Hilborn J. Poly(lactic acid) fiber: An overview. Prog Polym Sci. 2007;32(4):455-82.
16- Tsuji H. Degradation of poly(lactide)-based biodegradable materials. In: Albertov LB, editor. Polymer degradation and stability research developments. New York: Nova Science Publishers; 2007.
17- Yu L. Biodegradable polymer blends and composites from renewable resources. New York: John Wiley & Sons; 2009.
18- Wang Y, Hillmyer MA. Polyethylene-poly(L-lactide) diblock copolymers: Synthesis and compatibilization of poly(L-lactide)/polyethylene blends. J Polym Sci Part A Polym Chem. 2001;39(16):2755-66.
19- Tavanaie MA. Melt recycling of poly(lactic acid) plastic wastes to produce biodegradable fibers. Polym Plast Technol Eng. 2014;53(7):742-51.
20- Khankrua R, Pivsa-Art S, Hiroyuki H, Suttiruengwong S. Effect of chain extenders on thermal and mechanical properties of poly (lactic acid) at high processing temperatures: Potential application in PLA/Polyamide 6 blend. Polym Degrad Stab. 2014;108:232-40.
21- Feng F, Ye L. Structure and property of polylactide/polyamide blends. J Macromol Sci Part B. 2010;49:6:1117-27.
22- Kucharczyk P, Sedlarik V, Miskolczi N, Szakacs H, Kitano T. Properties enhancement of partially biodegradable polyamide/polylactide blends through compatibilization with novel polyalkenyl-poly-maleic-anhydride- amide/imide-based additives. J Reinf Plast Compos. 2012;31(3):189-202.
23- Stoclet G, Seguela R, Lefebvre JM. Morphology, thermal behavior and mechanical properties of binary blends of compatible biosourced polymers: Polylactide/ polyamide11. Polymer. 2011;52(6):1417-25.
24- Zhang W, Chen L, Zhang Z. Surprising shape-memory effect of polylactide resulted from toughening by polyamide elastomer. Polymer. 2009;50(5):1311-5.
25- Wang YL, Hu X, Li H, Ji X, Li ZM. Polyamide-6/poly (lactic acid) blends compatibilized by the maleic anhydride grafted polyethylene-octene elastomer. Polym Plast Technol Eng. 2010;49(12):1241-6.
26- Wang YL, Hu X, Li H, Ji X, Li ZM. Polyamide-6/poly(lactic acid) blends compatibilized by the maleic anhydride grafted polyethylene-octene elastomer. Polym Plast Technol Eng. 2010;49(12):1241-6.
27- Tavanaie MA, Mahmudi A. Green engineered polypropylene biodegradable fibers through blending with recycled poly(lactic) acid plastic wastes. Polym Plast Technol Eng. 2014;53(14):1506-17.