

# قابلیت ریسندگی و خواص کششی الیاف پلی (اتیلن ترفتالات) با اختلاط سیالات یونی پلیمری حین فرایند مذاب ریزی

## Spinnability and Tensile Properties of Poly(ethylene terephthalate) Fibers Blended with Polymeric Ionic Liquids in Melt Spinning Process

نسرین حقیقت<sup>۱</sup>، محمدعلی توانایی<sup>۱\*</sup>، مهدی صفی<sup>۲</sup>، فرهود نجفی<sup>۳</sup>

۱- یزد، دانشگاه یزد، مجتمع فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵

تهران، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ، صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۲- گروه فیزیک رنگ، ۳- گروه مواد رنگزای آلی

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱۰

### چکیده

سیالات یونی با داشتن خواص ویژه‌ای چون دمای ذوب کم، پایداری گرمایی زیاد، رسانایی الکتریکی زیاد و سایر خواص به‌ویژه به عنوان حلال‌های دوست‌دار محیط زیست استفاده می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهد، استفاده از این مواد در صنعت نساجی بسیار جدید است. به‌طوری که استفاده از سیال یونی در فرایند محلول‌ریسی الیاف ویسکوز به عنوان حلال سلولوز تا این زمان، تنها کاربرد صنعتی این ماده در صنعت نساجی بوده است. در این پژوهش، امکان آمیخته‌کردن پلی (اتیلن ترفتالات) با برخی سیالات یونی پلیمری حین فرایند مذاب‌ریسی برای تولید الیاف پلی (اتیلن ترفتالات)، بررسی شده و خواص کششی الیاف ارزیابی شده است. نتایج نشان داد، سیالات یونی پلیمری به دلیل حساسیت به رطوبت، شرایط بسیار سختی را در اختلاط با پلی (اتیلن ترفتالات) در فرایند مذاب‌ریسی به‌وجود می‌آورند. گرانش‌های آمیخته پلی (اتیلن ترفتالات) و سیالات یونی پلیمری حین فرایند مذاب به‌طور چشمگیری کاهش یافت. با استفاده از زنجیرافزای پلیمری مناسب از کاهش گرانش‌های ممانعت شد. همچنین ملاحظه شد، از بین سیالات یونی پلیمری به‌کار رفته، سیال کاتیونی (لائوریل یورتان) تری‌متیلن مناسب‌ترین سیال یونی پلیمری است، به‌طوری که در یک ترکیب درصد بهینه، کمترین اثر منفی را بر خواص کششی برجای گذاشت.

### مقدمه

نمک‌های آلی یا معدنی خنثی با دمای ذوب کمتر از  $100^{\circ}\text{C}$  هستند که برخی از آنها در دمای محیط نیز به حالت مایع هستند [۲]. این سیالات خواص منحصر به فردی چون پایداری شیمیایی و الکتروشیمیایی خوب، آتشگیری کم، قدرت انحلال زیاد، فشار بخار قابل اغماض و رسانایی یونی بسیار زیاد دارند. این سیالات اغلب به عنوان حلال در واکنش‌های شیمیایی و فرایندهای پلیمر شدن به‌کار می‌روند و از این رو حلال‌های سبز نام گرفته‌اند [۳-۶]. سیالات یونی، جذب رطوبت بسیار زیاد دارند، حداکثر دمای تجزیه گرمایی آن‌ها  $450^{\circ}\text{C}$  و دمای انتقال شیشه‌ای اغلب کمتر از  $50^{\circ}\text{C}$  - برای آنها گزارش شده است [۷]. سیالات یونی معمولاً از یک هسته کاتیونی با حجم

الیاف پلی‌استر با داشتن بیشترین سهم تولید (۷۵٪) در میان سایر الیاف، پلی (اتیلن ترفتالات) در حال حاضر مهم‌ترین لیف متداول صنعتی در دنیا هستند. الیاف پلی (اتیلن ترفتالات) سهم ویژه‌ای را در گروه الیاف پلی (اتیلن ترفتالات) (نزدیک به ۱۰۰٪) به خود اختصاص داده و شناخته شده‌ترین لیف این گروه‌اند. با وجود خواص عالی فیزیکی - مکانیکی، برخی معایب الیاف پلی (اتیلن ترفتالات) را می‌توان با کوپلیمر کردن یا افزودن افزودنی‌های مناسب، اصلاح کرد. از جمله معایب این الیاف می‌توان به مشکلات رنگرزی، جذب رطوبت کم، تجمع زیاد الکتریسیته ساکن و تمایل به آلوده‌شدن سریع و پرتی شدن کالا اشاره کرد [۱]. سیالات یونی

### کلمات کلیدی

سیال یونی پلیمری، الیاف پلی (اتیلن ترفتالات)، قابلیت ریسندگی، خواص کششی

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: ma.tavanaie@yazd.ac.ir

سیالات یونی پلیمری استفاده شده در جدول ۱ آمده است.

### دستگاه‌ها و روش‌ها

به منظور آماده‌سازی مواد اولیه برای کاربرد در فرایند مذاب‌ریسی، گرانول‌های پلی(اتیلن ترفتالات) در گرم‌خانه آزمایشگاهی به مدت ۲ h در دمای  $120^{\circ}\text{C}$  بلوری و پس از آن به مدت ۴ h در دمای  $160^{\circ}\text{C}$  خشک شدند تا آبکافت احتمالی آنها حین فرایند مذاب کم شود. آماده‌سازی سیالات یونی پلیمری با خشک کردن آنها در خلأ به کمک پمپ خلأ مدل Platinum در دماهای مختلف به مدت ۸ h انجام شد.

دمای خشک کردن برای سیالات یونی پلیمری پایه آکرلیک اسید (PC98 و PC99)، پایه پیرولیدونوم (PC109، PC111 و PC108) و پایه آمونیوم (USG2، USG3 و USG4)، به ترتیب ۶۵، ۹۰ و  $100^{\circ}\text{C}$  تنظیم شد. دماهای متفاوت به کار رفته در عملیات خشک کردن به دلیل اختلاف در دمای ذوب سیالات یونی پلیمری مورد استفاده، انتخاب شده‌اند.

### تولید الیاف به روش مذاب‌ریسی

تولید الیاف به وسیله دستگاه مذاب‌ریسی آزمایشگاهی مجهز به اکسترودر تک‌پیچی مدل ITS ساخت شرکت Dynesco کشور آمریکا انجام شد. دمای نواحی گرمایی اکسترودر حین مذاب‌ریسی در دو بخش سر ریسندگی و پیچ اکسترودر  $255^{\circ}\text{C}$  و دور مارپیچ دستگاه طوری تنظیم شد تا مقدار خروجی مواد مذاب مناسب برای ریسندگی رشته الیاف باشد (۱۲ درصد از ظرفیت کل اکسترودر).

برای اختلاط نمونه‌های سیالات یونی پلیمری با پلیمر اصلی، درصد‌های وزنی مختلف با ترازو و با دقت سه رقم اعشار، توزین و بدون وقفه پس از توزیع، همراه با گرانول اصلی، به‌طور مستقیم به مخزن تغذیه اکسترودر وارد شد.

### بررسی تغییرات ظاهری و خواص گرمایی سیالات یونی پلیمری

تغییرات ظاهری و خواص گرمایی سیالات یونی پلیمری، پس از خشک کردن آنها در خلأ، به کمک دستگاه تعیین دمای ذوب BUCHI مدل B-540 بررسی شد. گستره دمای مورد مطالعه روی دستگاه  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $300^{\circ}\text{C}$  و سرعت افزایش دما  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  تنظیم شد.

### ارزیابی کیفیت ریسندگی

برای ارزیابی قابلیت و کیفیت ریسندگی، مواردی مانند تخریب یا عدم تخریب سیال یونی پلیمری همراه مواد اصلی درون اکسترودر، تغییرات ظاهری گرانروی الیاف هنگام خروج از روزنه و قابلیت یا عدم قابلیت ریسندگی (پیوستگی یا عدم پیوستگی جریان جت سیال خروجی از روزنه) بررسی شد.

### چگالی خطی الیاف

چگالی خطی الیاف با استفاده از یک کلاف‌پیچ با محیط ۱ متر و توزین تعداد حداقل ۵ نمونه ۲ متری از هر لیف تولید شده بر حسب دنیبر بر

بزرگ و یک آنیون متصل به آن تشکیل شده‌اند. بنابراین انتظار می‌رود، با یون شدن در محیط‌های تر بتوانند در فرایندهای مختلف نساجی با ایجاد رقابت یونی یا جاذبه یونی بیشتر اثر بسزایی بر خواص نهایی الیاف یا بهینه‌سازی فرایندها داشته باشند. سیالات یونی پلیمری درشت‌مولکول‌های حاصل از پلیمر شدن مونومرهای سیالات یونی هستند که بیشترین کاربرد آنها در پلی‌الکترولیت‌ها گزارش شده است. این مواد خواص بی‌نظیر سیالات یونی را به همراه خواص مفید پلیمر دارند [۸،۹].

انواع سیالات یونی پلیمری عبارت‌اند از پلی‌کاتیون‌ها، پلی‌آنیون‌ها، دیونیون‌ها (zwitterion) و نیز انواع مختلف کوپلیمرها و ساختارهای درشت‌مولکولی. پلی‌کاتیون‌ها نسبت به پلی‌آنیون‌ها دمای انتقال شیشه‌ای و رسانایی یونی کمتر و پایداری گرمایی بیشتری دارند [۸]. تا کنون نتایج استفاده از سیالات یونی به شکل آمیخته با سایر پلیمرها در فرایندهای مذاب منتشر شده است که برخی از این موارد عبارت‌اند از اختلاط این سیالات با پلی(وینیل کلرید) [۹] و پلی(متیل متاکریلات) [۱۰]، پلی‌لاکتیک اسید [۱۱] و همچنین پلی‌پروپیلن [۱۲-۱۴] که همگی در تهیه شکل‌های مختلف قطعات پلاستیکی و با هدف بهبود خواص آنها انجام شده است. نکته حائز اهمیت که در تمام این مقالات مشترک بوده است، مشاهده بهبود خواص مختلف محصولات پلیمری با افزودن مقادیر کم از سیال یونی است. از آنجا که این مواد به راحتی یون می‌شوند، احتمال بهبود در خواصی چون رنگ‌پذیری، جذب رطوبت و کاهش الکتریسته ساکن مورد انتظار است. بر این اساس در این پژوهش، برای اولین بار از برخی از این سیالات یونی پلیمری حین فرایند مذاب‌ریسی الیاف پلی(اتیلن ترفتالات) استفاده شده و قابلیت و کیفیت ریسندگی آنها مطالعه شده است.

هدف اصلی در این پژوهش ارائه شرایط بهینه مذاب‌ریسی الیاف پلی(اتیلن ترفتالات) با سیال یونی است تا در صورت میسر بودن تولید و دستیابی به خواص مطلوب کششی، سایر قابلیت‌های افزوده شده به این الیاف بررسی شود.

## تجربی

### مواد

از گرانول پلی(اتیلن ترفتالات) نیمه مات ساخت شرکت پتروشیمی تندگویان با گرانروی ذاتی  $0.68 \text{ dL/mg}$  و چگالی  $1.32 \text{ g/cm}^3$  استفاده شد. برای مطالعه جامع کیفیت ریسندگی الیاف پلی(اتیلن ترفتالات) با سیالات یونی پلیمری سعی شد، طیف متنوعی از این سیالات از جمله سیالات یونی پلیمری پایه آکرلیک اسید، سیالات یونی پلیمری پایه پیرولیدونوم و سیالات یونی پلیمری پایه آمونیوم سنتز شده در پژوهشگاه صنایع رنگ ایران استفاده شود.

زنجیرافزای پلیمری پیروملیتیک دی‌انیدرید (PMDA)، محصول شرکت Merck آلمان برای جلوگیری از افت گرانروی مذاب پلی(اتیلن ترفتالات) حین مذاب‌ریسی، تهیه و استفاده شد. کد و نام شیمیایی

جدول ۱- کد و نام شیمیایی سیالات یونی پلیمری استفاده شده در این پژوهش.

ردیف	کد ماده	نام شیمیایی	فرمول ساختاری
۱	PC98	پلی(آکرلیک اسید-کو- مالتیک اسید) تری اتیل آمونیوم	
۲	PC99	پلی(آکرلیک اسید-کو- مالتیک اسید-کو- آکریل آمیدو متیل پروپان سولفونیک اسید) تری اتیل آمونیوم	
۳	PC108	پلی(وینیل پیرولیدون-کو- آکرلیک اسید)	
۴	PC109	پلی(وینیل پیرولیدون-کو- مالتیک اسید)	
۵	PC111	پلی(وینیل پیرولیدون-کو-هیدروکسی متیل متاکریلات)	
۶	USG2	کاتیونی (لائوریل یورتان) تری متیلن	
۷	USG3	کاتیونی (نونیل فنول یورتان) تری متیلن	
۸	USG4	کاتیونی (لائوریل یورتان) هگزامتیلن	

جدول ۳- خواص گرمایی PIL پایه پیرولیدونیموم.

کد ماده	دما (°C)	
	ذوب	شروع تخریب
PC108	ندارد	۱۸۰
PC109	ندارد	۱۷۰
PC111	ندارد	۱۹۵

الیاف تولید شده مشاهده شد. بنابراین، PIL پایه پیرولیدونیموم به دلیل نداشتن پایداری گرمایی کافی قابلیت کاربرد را در فرایند مذاب‌ریسی نداشت.

### بررسی امکان تولید الیاف با سیال یونی پلیمری (PIL) پایه آمونیوم

در جدول ۴، خواص گرمایی سیال یونی پلیمری پایه آمونیوم (کاتیونی) آمده است. بر اساس نتایج جدول ۴، ملاحظه می‌شود، این نوع سیال یونی پلیمری از پایداری گرمایی پیش از دمای ذوب برخوردار بوده و در دمای معینی ذوب شده است. همچنین، تا دماهای زیاد (حدود ۲۷۰°C) تخریب نشده است. بنابراین، احتمالاً PIL کاتیونی پایه آمونیوم برای کاربرد در فرایند مذاب‌ریسی مناسب خواهد بود.

پس از اختلاط گرانول‌های PET با PIL در داخل اکسترودر، افت گرانیوی مذاب خروجی از رشته‌ساز (مشاهده بصری) ناچیز بود و قابلیت ریسندگی الیاف به‌وجود آمد. اما تنها در طول مدت زمان ۱۵ min امکان تولید الیاف با خواص مناسب و یکنواخت به لحاظ خواص کششی ظاهری، وجود داشت و پس از این مدت الیاف تغییر رنگ داده و حالت ترد و شکننده پیدا کرد. در این شرایط با افزودن زنجیرافزای پلیمری از افت گرانیوی جلوگیری شد.

زنجیرافزای پیروملیتیک دی‌انیدرید (PMDA) با برقراری پیوند با گروه‌های فعال انتهای زنجیرهای پلی (اتیلن ترفتالات)، سبب افزایش طول و در نتیجه افزایش گرانیوی مذاب پلی (اتیلن ترفتالات) می‌شد. برای تعیین نوع و درصد وزنی بهینه PIL و نیز درصد وزنی بهینه PMDA، الیاف با انواع PIL پایه آمونیوم کاتیونی (لائوریل یورتان) تری‌متیلن، کاتیونی (نونیل فنیل یورتان) تری‌متیلن و کاتیونی (لائوریل یورتان) هگزامتیلن (USG2، USG3، USG4) تهیه شدند.

جدول ۴- خواص گرمایی PIL پایه آمونیوم.

کد ماده	دما (°C)	
	ذوب	شروع ژل شدن
USG2	۹۴	۱۰۰
USG3	۹۶	۱۰۰
USG4	۷۰	۱۰۰

اساس استاندارد ASTM D1907 اندازه‌گیری شد. اما، مترآژ کلاف‌ها به دلیل عدم سهولت بازشدن الیاف از بوبین‌های کوچک دستگاه مذاب‌ریسی آزمایشگاهی ۲ متری تهیه شد.

### خواص کششی الیاف

خواص کششی این الیاف شامل استحکام و ازدیاد طول تا پارگی و درصد نایکنواختی هر یک از این خواص به کمک دستگاه استحکام‌سنج آزمایشگاهی SDL مدل Micro350 و بر اساس استاندارد ASTM D2256 ارزیابی شد که در این عمل فاصله دو فک ۵ cm و سرعت دستگاه ۵۰۰ mm/min تنظیم شد.

### نتایج و بحث

#### بررسی امکان تولید الیاف با سیال یونی (PIL) پلیمری پایه آکریلیک اسید

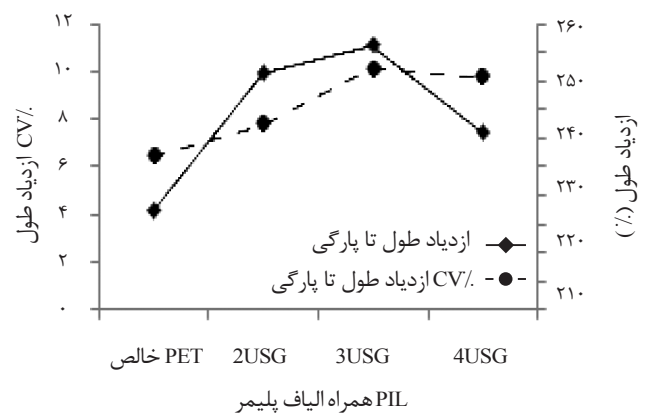
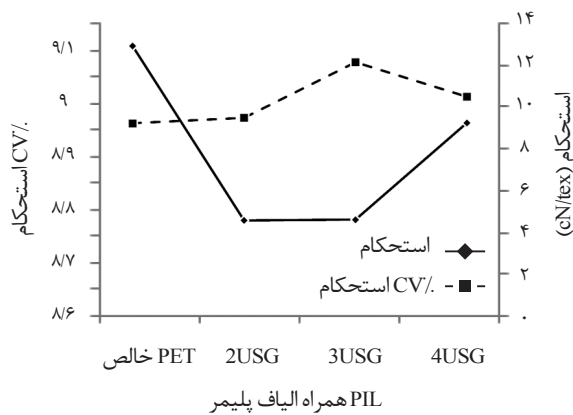
اختلاط گرانول‌های پلی‌استر با PIL آنیونی پایه آکریلیک اسید موجب تخریب مذاب پلیمری در داخل اکسترودر، افت شدید گرانیوی مذاب خروجی از رشته‌ساز و از بین رفتن قابلیت ریسندگی الیاف شد. درباره علت وقوع این پدیده، با توجه به نتایج جدول ۲ می‌توان گفت، PIL آنیونی پایه آکریلیک اسید، فاقد دمای ذوب است و در واقع به سبب وجود تعداد زیاد اتصالات عرضی بین زنجیرهای این سیال یونی پلیمری، پیش از ذوب، تخریب گرمایی رخ می‌دهد [۱۶]. بنابراین، PIL استفاده شده در این بخش پایداری گرمایی کافی را برای اختلاط با پلی (اتیلن ترفتالات) حین فرایند مذاب‌ریسی ندارد.

#### بررسی امکان تولید الیاف با سیال یونی پلیمری (PIL) پایه پیرولیدونیموم

نتایج حاصل از بررسی خواص گرمایی PIL آنیونی در جدول ۳ آمده است. طبق نتایج، PIL پایه پیرولیدونیموم نیز پایداری گرمایی کافی را برای کاربرد در فرایند مذاب‌ریسی نداشت. اما، به دلیل امکان هم‌پلیمر شدن این سیال یونی در دمای زیاد، کوپلیمر شدن در شرایط اختلاط با پلی (اتیلن ترفتالات) و عدم بروز ناپایداری گرمایی، امکان تولید الیاف با اختلاط گرانول‌های PET با این نوع PIL داخل اکسترودر بررسی شد. نتیجه اینکه افت گرانیوی مذاب خروجی از رشته‌ساز (مشاهده بصری) بسیار کم بود و قابلیت تولید الیاف وجود داشت. اما، PIL موجود در مذاب به شکل گلوله‌های ریز قهوه‌ای رنگ در بین

جدول ۲- خواص گرمایی PIL پایه آکریلیک اسید.

کد ماده	دما (°C)	
	ذوب	شروع تخریب
PC98	ندارد	۷۳
PC99	ندارد	۷۸



شکل ۱- استحکام و ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌های الیاف پلی(اتیلن ترفتالات) دارای ۳٪ انواع PIL و ۰/۰۴٪ از PMDA.

درصدهای وزنی ۱، ۲، ۳ و ۵٪، به همراه درصدهای وزنی ۰، ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۱٪ از PMDA استفاده شد. سپس، رفتار الیاف حین تولید و نیز خواص ظاهری الیاف تولیدی ارزیابی و خواص کششی الیاف محتوی انواع PIL پایه آمونیوم، الیاف محتوی درصدهای وزنی PIL پایه آمونیوم کد USG2 و الیاف محتوی ۳ درصد وزنی PIL کد USG2 و درصدهای وزنی PMDA بررسی شد. در جدول ۵ خواص کششی نمونه الیاف محتوی ۳ درصد وزنی PILهای مختلف پایه آمونیوم به همراه ۰/۰۴ درصد PMDA آمده است. در شکل ۱ نیز روند تغییرات خواص کششی برای امکان مقایسه آسان تر نشان داده شده است.

وجود در مذاب پلیمری پلی استر سبب تغییر گرانیوی مذاب پلیمری و در نتیجه تغییر چگالی خطی الیاف آمیخته با سیال یونی پلیمری شده است. طبق داده‌های جدول ۵ افزودن دو کد با کد USG2 و کد USG4 سبب افزایش چگالی خطی الیاف شده است، در حالی که افزودن سیال یونی پلیمری با کد USG3 سبب کاهش چگالی خطی الیاف شده است. مهم ترین دلیلی که بر اساس مشاهدات می توان برای این تغییرات چگالی خطی ذکر کرد، تغییرات گرانیوی مذاب (سیالیت مذاب ریسندگی) بوده است که معمولاً با افزایش گرانیوی به دلیل افزایش تورم مواد در خروج از روزنه (در نبود پمپ دنده‌ای)، مقدار خروجی مذاب بیشتری را در میدان کششی قرار داده و سبب افزایش جزئی چگالی خطی شده است. همان طور که در شکل ۱ ملاحظه می شود، وجود PIL و جدول ۶- خواص کششی نمونه‌ها دارای درصدهای مختلف سیال یونی با کد USG2 و ۰/۰۴٪ از PMDA.

استحکام را کاهش و درصد نایکنواختی نمونه‌ها را افزایش می دهد. به دلیل اهمیت زیاد یکنواختی خواص کششی، نمونه محتوی USG2 که پس از نمونه محتوی USG3 کمترین کاهش استحکام را موجب شده و نیز کمترین درصد نایکنواختی را ایجاد کرده است، بهترین نوع PIL برای تولید الیاف پلی استر است که نتایج حاصل از مقایسه ازدیاد طول تا پارگی و درصد نایکنواختی این خاصیت نیز همین مطلب را بیان می کند. نتایج حاصل از مقایسه ازدیاد طول تا پارگی و درصد نایکنواختی حاصل نیز همین مطلب را تأیید می کند. وجود در الیاف PET سبب افزایش ازدیاد طول تا پارگی و بهبود یکنواختی این الیاف می شود. هر چند با کد USG3 بیشترین افزایش ازدیاد طول تا پارگی را باعث شده است، اما با کد USG2 به دلیل ایجاد کمترین درصد نایکنواختی در خواص الیاف، مطلوب ترین نتایج را نشان داده است. بدین ترتیب، خواص کششی نمونه‌های شامل درصدهای وزنی مختلف از PIL با کد USG2 بررسی شد. در جدول ۶ خواص کششی نمونه الیاف محتوی درصدهای مختلف سیال یونی با کد USG2 و ۰/۰۴٪ از PMDA آمده است. شکل ۲ تغییرات خواص کششی نمونه الیاف شامل درصدهای مختلف سیال یونی را با کد USG2 و ۰/۰۴٪ از PMDA نشان می دهد.

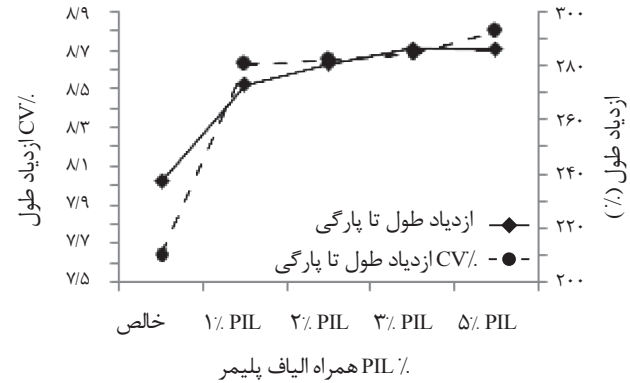
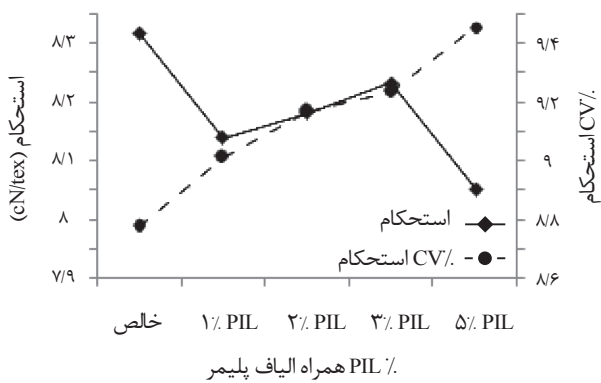
افزایش درصد وزنی PIL با کد USG2 همان طور که در جدول ۶ جدول ۶- خواص کششی نمونه‌ها دارای درصدهای مختلف سیال یونی با کد USG2 و ۰/۰۴٪ از PMDA.

چگالی خطی (den)	ازدیاد طول تا پارگی (%)	استحکام (cN/tex)	مقدار PIL (%)
۸/۲۳	۲۳۷/۲۶۲ (۷/۶۴)	۸/۳۱۶ (۸/۷۷۷) *	PET خالص
۸/۲۸	۲۳۷/۲۹ (۸/۶۳۱)	۸/۱۳۹ (۹/۰۱)	۱
۸/۳۲	۲۸۰/۸۵۴ (۸/۶۵۵)	۸/۱۸ (۹/۱۶۸)	۲
۸/۵۳	۲۸۶/۸۲۱ (۸/۶۸۸)	۸/۲۳۲ (۹/۲۳۵)	۳
۸/۸۷	۲۸۶/۲۰۴ (۸/۸۰۵)	۸/۰۵۱ (۹/۴۵۴)	۵

\* اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار داده‌هاست.

نوع لیف	ازدیاد طول (%)	استحکام (cN/tex)	چگالی خطی (den)
PET خالص	۲۲۷/۲۳ (۶/۴۳۶)	۹/۱۱ (۹/۲۲۴) *	۸/۴۸
PET/USG2	۲۵۱/۴۲ (۷/۷۶۸)	۸/۳۹۱ (۹/۴۹۶)	۸/۹۱
PET/USG3	۲۵۶/۳۶ (۱۰/۱۵)	۸/۳۹۴ (۱۲/۱۷۴)	۸/۳۷
PET/USG4	۲۴۰/۹۸ (۹/۷۸۷)	۸/۷۹۳ (۱۰/۵۱۱)	۸/۵۴

\* اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار داده‌هاست.



شکل ۲- استحکام و ازدیاد طول تا پارگی الیاف PET دارای درصدهای مختلف USG2 و ۰/۰۴ wt٪ از PMDA.

افزایش درصد وزنی PMDA تا ۰/۰۴ wt٪، کاهش استحکام و افزایش درصد نایکنواختی این خاصیت را به همراه داشته است. علت آن را نیز این طور می توان بیان کرد که این ترکیب با ایجاد پیوند بین زنجیرهای پلیمری الیاف، از تخریب زنجیرهای پلیمری بلند PET در مجاورت PIL ممانعت می کند. به ویژه ۴ wt٪ PMDA مقدار یکنواختی را تا حد قابل توجهی بهبود می بخشد. اما افزودن بیشتر از مقدار بهینه PMDA، افزایش بیش از حد گرانیوی مذاب و افت خواص کششی

نیز ملاحظه می شود، گرانیوی مذاب پلیمری را کاهش و نمره الیاف تولیدی را افزایش داده است. در مجاورت PIL، استحکام الیاف کاهش و درصد نایکنواختی آن افزایش می یابد. اما افزایش مقدار PIL تا ۳٪ وزنی، با افزایش استحکام نسبت به سایر نمونه های محتوی PIL همراه است و مقدار افزایش درصد نایکنواختی کمتری نیز دارد. اما می توان اذعان داشت، ۳٪ وزنی PIL با کد USG2 درصد وزنی بهینه برای تولید الیاف PET است. افزایش درصد وزنی PIL اثر چندانی بر افزایش بیشتر گرانیوی و همچنین درصد نایکنواختی این خاصیت ندارد. بنابراین بر اساس استحکام کششی حاصل، ۳ درصد وزنی مقدار بهینه سیال یونی پلیمری، نسبت به پلیمر اصلی است. بهبود استحکام و عدم تغییر قابل توجه در ازدیاد طول تا پارگی الیاف PET با افزایش درصد وزنی PIL می تواند به این دلیل باشد که PIL در پلیمر PET، باعث تشکیل تعداد بیشتری پیوندهای ثانویه بین زنجیرهای پلیمری الیاف می شود. در بخش پایانی نیز، اثر مقدار افزایش PMDA بر خواص الیاف PET به همراه ۳ درصد سیال یونی با کد USG2 بررسی شد. در جدول ۷ و شکل ۳، خواص کششی الیاف PET حاوی ۳ wt٪ PIL با کد USG2 و درصدهای مختلف PMDA آمده است.

نتایج جدول ۷ نشان می دهد، افزودن PMDA و افزایش درصد وزنی این ترکیب گرانیوی مذاب پلیمری را بهبود بخشیده و مانع از افت گرانیوی و افزایش قابل توجه چگالی خطی الیاف شده است. همچنین،

جدول ۷- خواص کششی الیاف PET دارای ۳ wt٪ PIL با کد USG2 و درصدهای مختلف PMDA

چگالی خطی (den)	ازدیاد طول (%)	استحکام (cN/tex)	مقدار PMDA (%)
۱۱/۱	۲۲۷/۲۳ (۴/۹۷)	۹/۶۰۶ (۱۱/۶۴۹) <sup>o</sup>	PET
۱۲/۳	۲۱۷/۰۶ (۷/۲۳)	۸/۵۵۱ (۱۲/۱۱۶)	۰
۱۱/۵	۲۳۱/۵۴۱ (۶/۳۳)	۸/۳۰۲ (۱۲/۱۵۶)	۰/۰۲
۱۱/۵	۲۶۶/۱۸۲ (۶/۲۸)	۸/۵۹۳ (۱۱/۸۰۶)	۰/۰۴

\* اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار داده هاست.

شکل ۳- استحکام و ازدیاد طول تا پارگی الیاف PET حاوی ۳ wt٪ از USG2 و درصدهای مختلف PMDA.

مناسب کاربرد در فرایند مذاب‌ریسی نیست. سیالات یونی پلیمری حین آمیخته کردن با پلیمر اصلی پلی(اتیلن ترفتالات) در حالت مذاب، گرانیوی مذاب را کاهش می‌دهند که در مواردی که این کاهش گرانیوی چشمگیر نباشد، امکان برطرف کردن آن با استفاده از زنجیرافزای پلیمری (همچون PMDA که در این پژوهش استفاده شده است) وجود دارد. به دلیل حساسیت پلی‌استر به رطوبت در فرایند مذاب‌ریسی و جذب رطوبت بسیار زیاد PDL، این سیالات باید در شرایط خلأ و جریان گاز نیتروژن، خشک شوند و خشک کردن آن‌ها در گرم‌خانه معمولی رطوبت را تا حد لازم کاهش نمی‌دهد.

در نهایت باید عنوان کرد، در شرایطی که قابلیت ریسندگی الیاف پلی(اتیلن ترفتالات) با سیال یونی پلیمری برقرار شد، کاهش جزئی استحکام و افزایش ازدیاد طول تا پارگی الیاف و افزایش نایکنواختی این ویژگی‌ها حاصل شد. افزودن زنجیرافزا نیز مانع این تغییر خواص نشد. اما، در مقداری بهینه باعث کاهش نایکنواختی‌های حاصل در خواص کششی شد. با توجه به روند رو به رشد کاربرد سیالات یونی و سیالات یونی پلیمری می‌توان اطمینان داشت، سنتز این مواد در ابعاد صنعتی با قیمت‌های مقرون به صرفه میسر شده و استفاده از این مواد به عنوان افزودنی‌ها در فرایندهای مختلف شیمیایی، از جمله فرایندهای نساجی کاملاً اقتصادی شود. در تأیید این موضوع می‌توان به استفاده صنعتی نمونه تجاری این ماده در فرایند ترریسی الیاف ویسکوز اشاره کرد.

الیاف را موجب شد تا حدی که اندازه‌گیری خواص کششی الیاف حاصل، میسر نبود. بنابراین درصد وزنی بهینه کاربرد، ۰/۰۴ wt. % از PMDA است. مقایسه مقادیر ازدیاد طول تا پارگی و درصد نایکنواختی این خاصیت نیز این انتخاب بهینه را تأیید می‌کند. با توجه به شکل ۳، ملاحظه می‌شود، افزایش درصد وزنی PMDA، ازدیاد طول تا پارگی الیاف PET حاصل را به مقدار قابل توجهی بهبود بخشیده و نیز درصد نایکنواختی این خاصیت کاهش یافته است. این موضوع می‌تواند به ایجاد یکنواختی در گرانیوی مذاب پلیمری که بهبود در آرایش‌یافتگی زنجیرهای پلیمری الیاف و در نتیجه توزیع یکنواخت نیرو در راستای محور طولی الیاف را در پی دارد، نسبت داده شود.

## نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتیجه حاصل از پژوهش انجام شده این است که سیالات یونی پلیمری استفاده شده، پایداری گرمایی لازم را برای کاربرد در فرایند مذاب‌ریسی نداشته و در زمان تولید الیاف پلی‌استر در دمای زیاد، تغییر حالت می‌دهند و معمولاً تخریب می‌شوند. همچنین در صورت عدم تخریب نیز به دلیل جذب رطوبت زیاد حین فرایند، سبب افت شدید گرانیوی سیال و عدم قابلیت ریسندگی می‌شوند. به‌ویژه PIL آنیونی استفاده شده که پایداری گرمایی کمتری نسبت به PIL کاتیونی دارد،

## مراجع

1. توانایی مع. و حدادی ه.، مهندسی الیاف، جلد اول: الیاف آمیخته پلیمری، انتشارات شرح، بهار ۱۳۹۱.
2. Khupse N.D. and Kumar A., Ionic liquids, new material with wide application, *J. Phys. Chem.*, 49, 635-648, 2010.
3. Welton T. and Armstrong D.W., Chiral ionic liquids as stationary phases in gas solvents for synthesis and catalysis, *J. Chem. Rev.*, 99, 2071-2084, 1999.
4. Wasserscheid P. and Welton T., *Ionic Liquids in Synthesis*, Wiley-VCH, Weinheim, 2007.
5. Wilks J.S., Properties of ionic liquid solvents for catalysis, *J. Mol. Catal. A: Chem.*, 214, 11-17, 2004.
6. Rogers R.D., Seddon K.R., and Volkov S., *Green Industrial Application of Polymeric Ionic Liquids*, New York, 2003.
7. Belieres J.P. and Angell C.A., Protic ionic liquids: Preparation, characterization, and proton free energy level representation, *J. Phys. Chem.*, 111, 4926-4937, 2007.
8. Yuan J. and Antonietti M., Poly(ionic liquid): Polymers expanding classical property profiles, *Polymer*, 52, 1469-1482, 2011.
9. Rahman M. and Brazel C.S., Ionic liquids: New generation stable plasticizers for Poly(vinyl chloride), *Polym. Degrad. Stab.*, 91, 3371-3382, 2006.
10. Scott M.P., Rahman M., and Brazel C.S., Application of ionic liquids as low volatility plasticizers for PMMA, *Eur. Polym. J.*, 39, 1947-1953, 2003.
11. Park K., Ha Jin U.K., and Xanthos M., Ionic liquids as plasticizer/lubricant for poly(lactic acid), *J. Polym. Degrad. Stab.*, 94, 834-840, 2009.
12. Yunsheng D., Haiou T., Xiaomin Zh., Shuying Wu., and Renyan X., Effects of 1-n-tetradecyl-3-methyl imidazolium bromide on the properties of polypropylene, *J. Appl. Polym. Sci.*, 109, 1138-1142, 2008.
13. Ding Y., Tang H., Zhang X., Wu S., and Xiong R., Antistatic ability of 1-n-tetradecyl-3-methylimidazolium bromide and its effects on the structure and properties of polypropylene, *Eur. Polym. J.*, 44, 1247-1251, 2008.
14. Ding Y., Tang H., Zhang X., Wu S., and Xiong R., Effects of 1-n-Tetradecyl-3-methylimidazolium bromide on the properties of polypropylene, *J. Appl. Polym. Sci.*, 109, 1138-1142, 2008.