



## چکیده

اثر مخلوط حلال‌های تری‌کلرواستیک اسید - متیلن کلرید (TCAc/MC) بر خواص مکانیکی و تغییر شکل شیمیایی الیاف پلی‌استر بررسی شده است. الیاف پلی‌استر آرایش‌یافته در حالت آزاد و زیر کشش به وسیله حلال TCAc/MC در غلظت‌های مختلف TCAc و زمان‌های متفاوت عمل‌آوری شده و نیروی پارگی و ازدیاد طول تا پارگی آنها اندازه‌گیری شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که استحکام الیاف پلی‌استر عمل‌آوری شده در حالت آزاد چندان تغییر نکرده است. اما، ازدیاد طول تا پارگی آنها به مقدار زیادی افزایش یافته است. در حالی که در الیاف عمل‌آوری شده زیر کشش، افزایش استحکام و عدم تغییر زیاد در ازدیاد طول مشاهده شده است. تغییر شکل شیمیایی الیاف پلی‌استر به وسیله فرایند تاب دادن، عمل‌آوری با حلال زیر کشش و بازکردن تاب در شرایط متفاوت انجام شده است. همچنین، مقادیر جمع‌شدگی دائم و قابل بازگشت الیاف تغییر شکل یافته اندازه‌گیری و با جمع‌شدگی الیاف تغییر شکل یافته به روش گرمایی مقایسه شده است. نتایج، افزایش مقادیر جمع‌شدگی را با افزایش غلظت TCAc و زمان عمل‌آوری نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده با توجه به ریزساختار الیاف پلی‌استر بحث شده است.

### واژه‌های کلیدی

تغییر شکل شیمیایی، پلی‌استر،  
الیاف، تری‌کلرواستیک اسید،  
متیلن کلرید

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

[mnouri69@guilan.ac.ir](mailto:mnouri69@guilan.ac.ir)

## Solvent Texturing of Polyester Yarns Using Trichloroacetic Acid/Methylene Chloride

M. Nouri\* and K. Mahfouzi

Guilan University, P.O. Box: 3756, Guilan, Iran

### Abstract

The effects of trichloroacetic acid/methylene chloride (TCAc/MC) on the mechanical properties and solvent texturing of polyester yarns are studied. The treatments are carried out in unstrained and strained states at different concentrations of TCAc for various treatment times. Breaking load and elongation-at-break of treated yarns have been recorded. Treatments of polyester yarns with TCAc/MC in unstrained state have increased the elongation-at-break without significant changes in breaking load. Whereas, treatments of the yarns in strained state improved breaking load without significant changes in elongation-at-break. Solvent texturing of polyester yarns using TCAc/MC has been performed by twisting-solvent setting-untwisting process. The effects of setting times and TCAc concentration on the permanent and reversible shrinkage of textured yarns have been examined. It was shown that the shrinkage and texturing properties of solvent treated yarns increased with increasing concentration of TCAc and setting time. The results are discussed on the basis of the fine structure of polyester yarns.

### Key Words

solvent texturing, polyester,  
fibers, trichloroacetic acid,  
methylene chloride

(\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [mnouri69@guilan.ac.ir](mailto:mnouri69@guilan.ac.ir)

## مقدمه

نخ‌های تغییر شکل یافته، که خاصیت کشسانی دارند، با ایجاد تغییر شکل شدید در ساختار داخلی الیاف و تثبیت این شکل جدید تهیه می‌شوند [۱]. برای مثال در روش تاب مجازی، که یکی از روش‌های ایجاد تغییر شکل در الیاف است، ابتدا نخ‌های با الیاف یکسره تابیده می‌شوند تا ساختاری فنری در الیاف ایجاد شود. سپس، الیاف تابیده شده زیر عمل آوری گرمایی مناسب قرار می‌گیرند تا زنجیرهای پلیمری الیاف در شکل جدید و به حالت فنری تثبیت شوند و در نهایت تاب وارد شده به الیاف باز می‌شود. بدین ترتیب، الیافی با خاصیت فنری ایجاد می‌شود که افزون بر داشتن فرم و موج، خاصیت کشسانی قابل بازگشت نیز دارند. اگر چه تغییر شکل در الیاف به روش‌های مختلفی انجام می‌شود، اما امروزه روش تاب مجازی به عنوان روشی متداول و مهم در تهیه الیاف تغییر شکل یافته شناخته شده است. یکی از مراحل مهم در ایجاد تغییر شکل در الیاف، مرحله تثبیت ساختار داخلی جدید در الیاف تغییر شکل یافته است. ساز و کار عمومی در مرحله تثبیت ساختار داخلی را می‌توان شامل مراحل از بین بردن اتصالات اولیه موجود بین زنجیرهای پلیمری تشکیل دهنده الیاف و تشکیل اتصالات بین زنجیری جدید در محل‌های مناسب و پایدارسازی این ساختار جدید دانست. از بین بردن اتصالات بین زنجیرهای پلیمری در الیاف گرم‌نرم و آزادسازی زنجیرها برای ایجاد اتصال جدید می‌تواند با استفاده از انرژی گرمایی انجام شود. استفاده از مواد شیمیایی مناسب، که دارای پارامتر انحلال پذیری نزدیک به پارامتر انحلال پذیری الیاف باشند، نیز می‌تواند به عنوان روشی جایگزین برای از بین بردن اتصالات بین زنجیرهای پلیمری مورد استفاده قرار گیرد. این روش، که به نام تغییر شکل شیمیایی شناخته شده است، توسط پژوهشگران مختلف روی الیاف نایلون ۶ و پلی‌استر مطالعه شده است [۲-۴].

سنگوپتا و همکاران [۲] تغییر شکل گرمایی و شیمیایی الیاف نایلون ۶ را به وسیله محلول آبی فنول بررسی کرده‌اند و نتایج مشابهی را برای میزان کشسانی و درصد بلورینگی این الیاف تغییر شکل یافته به دست آورده‌اند. آنها استحکام کمتری را برای الیاف تغییر شکل یافته شیمیایی گزارش کرده‌اند، اما جذب رنگ بیشتری را برای آنها به دست آورده‌اند. هاشمی پور و همکاران [۳] تغییر شکل شیمیایی الیاف پلی‌استر نیمه‌آرایش یافته را به وسیله حلال متیلن کلرید بررسی و پس از ارزیابی اثر زمان عمل آوری با این حلال، زمان ۱۰ تا ۶۰s را برای تغییر شکل شیمیایی پیشنهاد کرده‌اند. در این مطالعه پیشنهاد شده است که کشش روی الیاف نیمه‌آرایش یافته قبل یا هم‌زمان با تغییر شکل شیمیایی انجام شود. همچنین، هاشمی پور و همکاران محاسبه کرده‌اند که هزینه انجام تغییر شکل شیمیایی حدود ۵ برابر کمتر از هزینه انجام تغییر شکل به

روش گرمایی است. از این رو، تغییر شکل شیمیایی می‌تواند از نظر اقتصادی به عنوان روشی جایگزین مورد توجه قرار گیرد. حقیقت کیش و معینی [۴] تغییر شکل شیمیایی الیاف نایلون ۶ را به وسیله محلول آبی فنول و کلروفنول بررسی و مقایسه کرده‌اند و اثر ایجاد تغییر شکل اولیه را به وسیله تابندگی یا بافت [۴] گزارش کرده‌اند. آنها خواص مشابهی برای نخ‌های تغییر شکل یافته به روش شیمیایی و گرمایی ارائه داده‌اند. به تازگی اثر تری کلرواستیک اسید (TCAC) به همراه ترکیباتی نظیر کلروفرم یا متیلن کلرید (MC) بر خواص فیزیکی و ساختار داخلی الیاف پلی‌استر، به عنوان حلالی مؤثر در ایجاد تغییر شکل در ساختار داخلی الیاف پلی‌استر بررسی شده است [۵-۷]. نتایج نشان می‌دهد که TCAC به همراه متیلن کلرید به راحتی ساختار داخلی و خواص فیزیکی الیاف پلی‌استر را تغییر می‌دهد. در این بررسی‌ها، الیاف پلی‌استر به حالت آزاد با حلال‌های مزبور عمل آوری شده و این عملیات به عنوان راهی برای افزایش رنگ‌پذیری الیاف پلی‌استر معرفی شده است. اگر چه تغییر ساختار داخلی و خواص فیزیکی الیاف پلی‌استر به وسیله حلال‌های دیگر نیز گزارش شده است [۸،۹]، اما بررسی‌ها نشان می‌دهد که حلال TCAC به همراه متیلن کلرید بیش از سایر حلال‌ها روی ساختار داخلی الیاف پلی‌استر اثر می‌کند.

در این مقاله، ضمن بررسی برهم‌کنش مخلوط حلال‌های TCAC/MC با الیاف پلی‌استر، اثر مخلوط حلال‌ها در تغییر شکل شیمیایی الیاف پلی‌استر نیز بررسی شده است. با توجه به این که تغییر شکل شیمیایی باید زیر تنش و کشش انجام شود، ابتدا اثر این مخلوط بر الیاف پلی‌استر در حالت آزاد و زیر کشش مورد مقایسه قرار گرفته است، سپس خواص نخ پلی‌استر تغییر شکل یافته به روش شیمیایی مطالعه شده است.

## تجربی

### مواد

در این پژوهش، از نخ پلی‌استر با الیاف یک‌سره نوع خام و آرایش یافته (F-OY) با شماره ۱۵۰ دنیار دارای ۴۸ لیف (۱۵۰D/۴۸f) محصول شرکت پلی‌آکریل اصفهان، نخ پلی‌استر تغییر شکل یافته به روش تاب مجازی تهیه شده از منابع محلی و تری کلرواستیک اسید (TCAC)، متیلن کلرید (MC) و استون نوع آزمایشگاهی محصول شرکت Merck استفاده شده است.

### دستگاه‌ها

برای ایجاد تاب در نخ‌های با الیاف یک‌سره از دستگاه تاب‌سنج شرکت

آزاد ( $L_b$ ) و زیر نیروی  $0.3 \text{ g/den}$  ( $0.2 \text{ g/den}$ ) (زیر کشش  $L_c$ ) اندازه گیری شده است. مقادیر جمع شدگی کل (TS) و جمع شدگی قابل بازگشت (RS) مطابق با معادله‌های زیر محاسبه شده است [۳]:

$$TS = 100 (L_a - L_b) / L_a \quad (1)$$

$$RS = 100 (L_c - L_b) / L_a \quad (2)$$

که در این معادله‌ها،  $L_a$  طول نخ اولیه زیر نیروی  $0.2 \text{ g/den}$ ،  $L_b$  طول نخ پس از قرارگیری در آب  $80^\circ\text{C}$  زیر نیروی  $0.2 \text{ g/den}$  و  $L_c$  طول نخ پس از قرارگیری در آب  $80^\circ\text{C}$  زیر نیروی  $0.2 \text{ g/den}$  است. برای به دست آوردن نتایج جمع شدگی ۱۰ نمونه اندازه گیری شده و میانگین و حدود اطمینان ۹۵ درصد گزارش شده است.

## نتایج و بحث

تغییر شکل شیمیایی شامل تابندگی دسته الیاف به منظور ایجاد تغییر شکل و ایجاد حالت فنری در آنها و سپس عمل آوری دسته الیاف تابیده شده با حلال به منظور تثبیت ساختار جدید در آنهاست. در مرحله بعد، پس از خارج کردن حلال از الیاف و کاهش تنش‌های داخلی ایجاد شده در آنها، تاب ایجاد شده در دسته الیاف باز می‌شود. بدین ترتیب، الیاف دارای فر و موج‌های دائمی تهیه می‌شوند. مقدار فر و موج و تغییر شکل ایجاد شده در الیاف بستگی به مقدار تاب و میزان تثبیت ایجاد شده با حلال دارد. مقدار تثبیت ایجاد شده به وسیله حلال نیز به نوبه خود به برهم کنش حلال با پلیمر، نوع الیاف و مقدار کشش آنها و زمان عمل آوری با حلال وابسته است. برای مطالعه بیشتر اثر مخلوط حلال‌های TCAC/MC روی الیاف پلی‌استر، ابتدا برهم کنش این مخلوط با الیاف پلی‌استر و اثر شرایط عمل آوری با حلال روی خواص مکانیکی الیاف پلی‌استر بررسی شده است.

### اثر TCAC/MC بر خواص مکانیکی الیاف پلی‌استر

شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب استحکام و ازدیاد طول تا پارگی الیاف تکسچره نشده پلی‌استر را نشان می‌دهند که به حالت آزاد با مخلوط حلال‌های TCAC/MC در غلظت و زمان‌های مختلف عمل آوری شده‌اند.

شکل ۱ نشان می‌دهد که غلظت‌های مختلف آثار متفاوتی بر استحکام الیاف عمل آوری شده دارند. در غلظت ۱ درصد (w/v) تری کلرواستیک اسید در متیلن کلرید، در زمان ۱۰s تغییر معنی داری در استحکام الیاف

فریاب (ایران) استفاده شده است. نیروی پارگی و ازدیاد طول تا پارگی نخ‌ها به وسیله دستگاه استحکام سنج میکرو ۲۵۰ شرکت شرلی انگلستان با فاصله فک‌های ۱۵ cm و با سرعت ازدیاد طول ثابت  $50 \text{ mm/min}$  اندازه گیری شده است. اندازه گیری حداقل برای ۱۰ نمونه انجام و میانگین نتایج و حدود اطمینان ۹۵ درصد گزارش شده است. برای بررسی جمع شدگی نخ‌ها، دستگاه Crimp Tester شرکت شرلی به کار گرفته شده است.

## روش‌ها

### عمل آوری با حلال

نخ‌های با الیاف یک سره بدون تاب در دو حالت آزاد و زیر کشش به وسیله حلال عمل آوری شده‌اند. غلظت حلال مورد استفاده مخلوطی از ۱، ۲/۵ و ۵ درصد TCAC در MC بوده است. زمان عمل آوری با حلال بین ۱۰ تا ۱۸۰s متغیر بوده است. برای عمل آوری نخ‌های زیر کشش، ۲m از نخ با نیروی  $60 \text{ g}$  ( $0.4 \text{ g/den}$ ) به دور ماسوره استیلی متخلخل پیچیده شده است و انتهای نخ‌ها به نحو مناسبی محکم شده است. سپس، ماسوره دارای نخ درون حلال قرار گرفته است. حلال در زمان آزمایش اثری روی ماسوره نداشته است. مقدار حلال مورد استفاده ۲۵ mL متیلن کلرید و مقدار مناسبی از TCAC بوده و عمل آوری با حلال در دمای آزمایشگاه ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ) انجام شده است. در انتهای آزمایش، نخ‌های عمل آوری شده با حلال به طور کامل با استون شسته شده و در دمای آزمایشگاه خشک شدند.

نخ‌های تابدار با اعمال تاب ۲۵۰۰ تاب در متر به ۰/۵ متر از نخ با الیاف یک سره به وسیله دستگاه تاب سنج تهیه شدند. این نخ‌های تابدار با دقت زیر نیروی  $60 \text{ g}$  ( $0.4 \text{ g/den}$ ) به دور ماسوره استیلی متخلخل پیچیده و مشابه با نخ‌های بدون تاب با حلال عمل آوری شدند.

### تغییر شکل شیمیایی

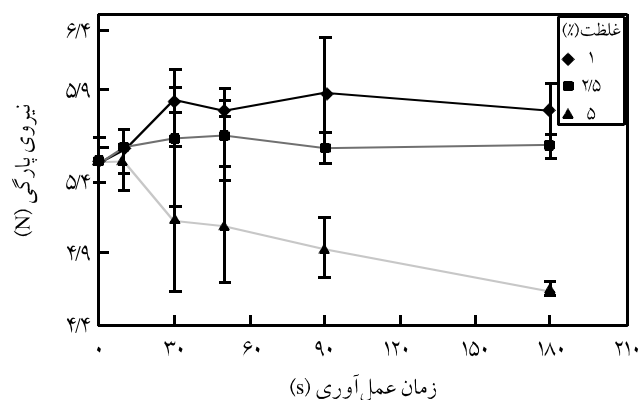
تغییر شکل شیمیایی روی نخ‌های تابدار زیر کشش در غلظت‌های ۱، ۲/۵، ۵ و ۷ درصد TCAC در متیلن کلرید و زمان‌های ۳۰، ۹۰ و ۱۸۰s انجام شده است. پس از عمل آوری نخ‌های تابدار با حلال و شستشو با استون، تاب نخ‌ها پس از یک روز به کمک دستگاه تاب سنج با اعمال تاب در خلاف جهت تاب اولیه باز شد. طولی در حدود ۱۰cm از نخ‌های تغییر شکل یافته به وسیله دستگاه Crimp Tester زیر نیروی  $30 \text{ g}$  ( $0.2 \text{ g/den}$ ) (طول کشیده شده  $L_a$ ) اندازه گیری شده است. این نمونه نخ‌ها زیر نیروی  $0.3 \text{ g}$  ( $0.2 \text{ g/den}$ ) به مدت ۱۰min در آب  $30 \pm 3^\circ\text{C}$  قرار گرفتند و پس از خشک شدن در دمای محیط، طول آنها به کمک دستگاه Crimp Tester زیر نیروی  $0.3 \text{ g}$  ( $0.2 \text{ g/den}$ ) (حالت

محسوسی در اثر عمل‌آوری با حلال افزایش می‌یابد. همچنین، در همه غلظت‌های مورد بررسی پس از زمان ۱۰s ازدیاد طول تا پارگی افزایش می‌یابد و بیشتر شدن زمان عمل‌آوری با حلال اثر معنی‌داری بر افزایش ازدیاد طول تا پارگی الیاف ندارد. ازدیاد طول تا پارگی اگرچه با افزایش زمان عمل‌آوری تغییر محسوسی ندارد، اما مقدار آن با افزایش غلظت TCAC افزایش می‌یابد. به طوری که در غلظت ۱ درصد و پس از زمان ۱۸۰s ازدیاد طول تا پارگی نسبت به الیاف اولیه ۵۸ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که افزایش ازدیاد طول تا پارگی در غلظت ۲/۵ و ۵ درصد به ترتیب ۹۸ و ۱۵۵ درصد بوده است.

روند افزایش ازدیاد طول در این بررسی مشابه مشاهدات راجندران و همکاران [۵] در بررسی اثر مخلوط حلال‌های TCAC/MC روی الیاف پلی‌استر است. اما، این بررسی در درصد افزایش ازدیاد طول مشاهده شده کمتر از درصد گزارش شده توسط راجندران است. همچنین، راجندران و همکاران کاهش استحکام الیاف را در غلظت ۱ درصد گزارش کرده‌اند. تفاوت در مشاهدات می‌تواند به دلیل زمان عمل‌آوری با حلال باشد که در این بررسی تا ۱۸۰s بوده است، اما راجندران نتایج خود را فقط در زمان ۵min گزارش کرده است.

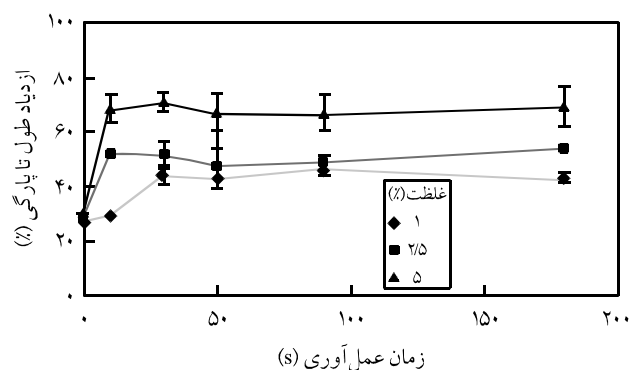
اثر مخلوط حلال TCAC و کلروفرم روی الیاف پلی‌استر در حالت آزاد بررسی شده است [۶،۷]. در این گزارش‌ها نیز نتایج مشابهی برای کاهش استحکام و افزایش ازدیاد طول مشاهده شده است که نشان‌دهنده مشابه بودن اثر دو حلال TCAC/MC و TCAC به همراه کلروفرم است. اگرچه اثر حلال متیلن کلرید به تنهایی در تغییر شکل شیمیایی الیاف پلی‌استر بررسی و گزارش شده است [۳]، اما به نظر می‌رسد که تری کلرواستیک اسید اثر مهمی در برهم‌کنش TCAC/MC با الیاف پلی‌استر دارد.

افزایش قابل توجه ازدیاد طول تا پارگی الیاف پلی‌استر عمل‌آوری شده با مخلوط حلال‌های TCAC/MC پس از زمان کوتاه ۱۰s نشان‌دهنده برهم‌کنش شدید این مخلوط با الیاف پلی‌استر است. برهم‌کنش شدید و سریع TCAC/MC با الیاف پلی‌استر می‌تواند به کمک مدل سه‌فازی پیشنهاد شده برای الیاف پلی‌استر تشریح شود [۵]. در این مدل، ساختار الیاف متشکل از سه بخش متبلور، بی‌نظم و فاز نیمه بلوری میانی در نظر گرفته می‌شود. زنجیرهای پلیمری در این فاز میانی در جهت محور لیف آرایش یافته‌اند و زنجیرهای پلیمری کشیده شده را تشکیل می‌دهند. انتظار می‌رود که حلال وارد شده به ساختار الیاف به ویژه در زمان‌های کم مانند نرم‌کننده عمل کند و اتصالات میانی زنجیرهای کشیده شده را در فاز میانی از بین ببرد. بدین ترتیب، زنجیرهای پلیمری تحرک بیشتری پیدا کرده و به شکل جمع شده در می‌آیند. این جمع شدن زنجیرها منجر به افزایش ازدیاد طول تا پارگی



شکل ۱- نیروی پارگی نخ‌های خام عمل‌آوری شده در شرایط متفاوت و به حالت آزاد.

مشاهده نمی‌شود. اما، پس از زمان ۳۰s افزایش جزئی ولی معنی‌دار در استحکام الیاف مشاهده می‌شود. با افزایش زمان عمل‌آوری در این غلظت، افزایش معنی‌داری در استحکام نسبت به زمان ۳۰s مشاهده نمی‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که زمان ۳۰s برای اثر حلال بر خواص استحکامی الیاف کافی است و افزایش زمان تا ۱۸۰s اثر بیشتری بر استحکام الیاف ندارد. شکل ۱ نشان می‌دهد، افزایش غلظت TCAC روند اثر حلال بر استحکام الیاف را تغییر داده است، به طوری که در غلظت ۲/۵ درصد تغییر معنی‌داری در استحکام آنها مشاهده نمی‌شود و در غلظت ۵ درصد پس از زمان ۳۰s کاهش معنی‌دار در استحکام آنها دیده می‌شود. در این غلظت، در زمان ۱۰s تغییر در استحکام الیاف معنی‌دار نیست و پس از ۳۰s با افزایش زمان عمل‌آوری استحکام الیاف بیشتر کاهش می‌یابد. در شکل ۲ تغییرات ازدیاد طول تا پارگی الیاف در اثر عمل‌آوری با مخلوط حلال‌های TCAC/MC نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود، ازدیاد طول تا پارگی الیاف به طور



شکل ۲- ازدیاد طول تا پارگی نخ‌های خام عمل‌آوری شده در شرایط متفاوت و به حالت آزاد.

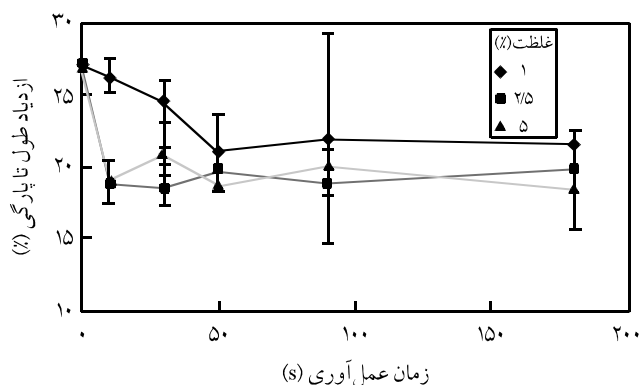
متبلور باشد. با مقایسه نتایج ازدیاد طول تا پارگی که در شکل ۴ نشان داده شده است، حرکت زنجیرهای پلیمری از فاز بی نظم به فاز آرایش یافته میانی منطقی تر به نظر می‌رسد. نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که ازدیاد طول تا پارگی در اثر عمل‌آوری با حلال ۲/۵ تا ۳۰ درصد کاهش یافته است. این کاهش ازدیاد طول تا پارگی به همراه افزایش نسبی استحکام می‌تواند نشان‌دهنده کاسته شدن مناطق بی‌شکل الیاف پلی‌استر و افزایش آرایش یافتگی در الیاف باشد.

افزایش غلظت TCAC به ۵ درصد در زمان‌های کم، اثر معنی‌داری بر استحکام الیاف نداشته است، اما در زمان‌های بیشتر از ۹۰ s باعث کاهش استحکام الیاف شده است. این در حالی است که در غلظت مزبور، ازدیاد طول تا پارگی الیاف کمتر شده است. این کاهش استحکام همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، می‌تواند نشان‌دهنده نفوذ حلال در غلظت‌های زیاد به درون ساختار بلوری الیاف پلی‌استر و از بین بردن ساختار بلوری آنها باشد. در بررسی قبلی [۱۰] طیف‌های FTIR از نخ‌های پلی‌استر عمل‌آوری شده با TCAC/MC بررسی و مشاهده شد که به هنگام عمل‌آوری نخ‌های پلی‌استر در حالت کشیده شده، درصد زنجیرهای دارای حالت ترانس یا کشیده شده افزایش می‌یابد. در حالی که در نخ‌های عمل‌آوری شده با این حلال به شکل آزاد درصد زنجیرهای دارای حالت کج یا بی‌نظم افزایش می‌یابد. برهم‌کنش حلال با پلیمر می‌تواند در فضای بین مناطق بلوری یا در فضای درون آنها اتفاق بیفتد. در حالت اول، حلال به داخل فضای غیربلوری ساختار پلیمر وارد می‌شود و با از بین بردن اتصالات بین زنجیرهای پلیمری و افزایش حرکت زنجیرها باعث نوآرایی و در نتیجه تبلور ساختار پلیمری می‌شود. در حالت دوم، مولکول‌های حلال به داخل مناطق بلوری نفوذ می‌کنند و این مناطق را از بین می‌برند. در الیاف پلی‌استر عمل‌آوری شده با TCAC/MC به دلیل اثر حلال در تحریک زنجیرهای پلیمری برای ایجاد مناطق بلوری،

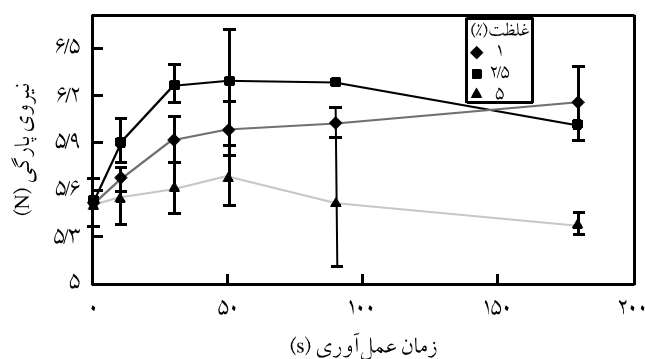
الیاف پلی‌استر عمل‌آوری شده با مخلوط حلال‌های TCAC/MC می‌شود. تغییر جزئی استحکام الیاف عمل‌آوری شده در غلظت ۱ و ۲/۵ درصد TCAC می‌تواند نشان‌دهنده عدم نفوذ حلال به درون ساختار متبلور الیاف پلی‌استر باشد. اما، به نظر می‌رسد که در غلظت‌های بیشتر TCAC که منجر به کاهش استحکام الیاف شده است، نفوذ حلال به داخل ساختار متبلور الیاف نیز اتفاق افتاده باشد. به هر حال، این نفوذ با توجه به کاهش حدود ۱۸ درصدی استحکام پس از زمان ۱۸۰ s نمی‌تواند زیاد باشد.

شکل‌های ۳ و ۴ اثر مخلوط حلال‌های TCAC/MC را روی استحکام و ازدیاد طول تا پارگی الیاف پلی‌استر تکسچره نشده نشان می‌دهد که زیر تنش و در طول ثابت عمل‌آوری شده‌اند. این شکل‌ها آثار متفاوتی را نسبت به اثر حلال روی الیاف عمل‌آوری شده با حلال در حالت آزاد نشان می‌دهند.

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که افزایش زمان عمل‌آوری الیاف پلی‌استر با طول ثابت در مخلوط حلال‌های TCAC/MC به مقدار ۱ درصد باعث افزایش تدریجی استحکام الیاف شده است و این روند افزایش در غلظت ۲/۵ درصد از TCAC/MC با شدت بیشتری اتفاق افتاده است. در غلظت ۵ درصد TCAC/MC تا زمان ۹۰ s تغییر معنی‌داری در استحکام الیاف عمل‌آوری شده مشاهده نمی‌شود، اما در زمان ۱۸۰ s کاهش حدود ۵ درصد در استحکام الیاف مشاهده می‌شود. با توجه به این که الیاف با تنش اولیه وارد حلال شده‌اند، دو دلیل می‌توان برای افزایش استحکام آنها در نظر گرفت. افزایش استحکام می‌تواند به دلیل کشیده شدن زنجیرهای پلیمری از فاز بی‌شکل به مناطق آرایش یافته میانی در ساختار سه‌فازی الیاف پلی‌استر باشد. همچنین، افزایش استحکام می‌تواند به دلیل افزایش درصد بلورینگی در الیاف به واسطه آزاد شدن زنجیرهای پلیمری از اتصالات داخلی و حرکت آنها به فاز



شکل ۴- ازدیاد طول تا پارگی نخ‌های خام عمل‌آوری شده در شرایط متفاوت و زیر کشش.

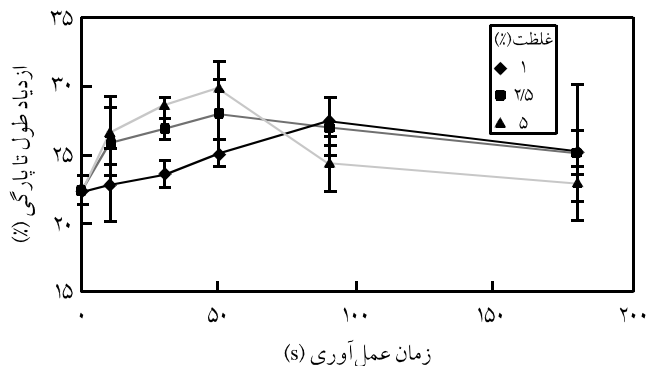


شکل ۳- نیروی پارگی نخ‌های خام عمل‌آوری شده در شرایط متفاوت و زیر کشش.

۶/۸ درصد است، در حالی که این افزایش استحکام برای نخ‌های خام در غلظت مشابه به مقدار ۱۳/۸ درصد در زمان ۳۰s اتفاق می‌افتد. تأخیر در افزایش استحکام نخ‌های تابدار نسبت به نخ‌های خام می‌تواند به دلیل فشرده بودن ساختار نخ تابدار و سخت تر بودن نفوذ حلال به داخل ساختار نخ تابدار باشد. در نخ‌های تابدار به دلیل تاب زیاد، نخ ساختار فشرده‌تری دارد و زمان بیشتری برای نفوذ حلال به داخل ساختار نخ نیاز است. از طرف دیگر، در نخ تابدار الیاف مانند فبر، به طور ماریچ به دور محور طولی نخ پیچیده شده‌اند. بنابراین، کشش وارد شده در جهت محور طولی نخ با مؤلفه ضعیف‌تر و کمتری در جهت محور لیف وارد می‌شود. بنابراین، آرایش یافتگی زنجیره‌های بی‌نظم پلیمری و ورود آنها به فاز آرایش یافته لزوماً در جهت محور الیاف نیست و افزایش کمتر در مقدار استحکام نخ‌های تابدار در اثر عمل‌آوری با حلال می‌تواند به عدم جهت‌گیری زنجیره‌های پلیمری آرایش یافته نسبت به محور الیاف مربوط باشد.

نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد، در اثر عمل‌آوری نخ‌های تابدار با مخلوط حلال‌های TCAC/MC در غلظت ۵ درصد تغییرات استحکام در زمان‌های کم معنی‌دار نیست، اما در زمان ۱۸۰s کاهش حدود ۶/۵ درصد در استحکام مشاهده می‌شود. کاهش استحکام در غلظت زیاد TCAC و زمان طولانی می‌تواند به نفوذ حلال به داخل فاز بلوری الیاف و کاسته شدن این فاز نسبت داده شود.

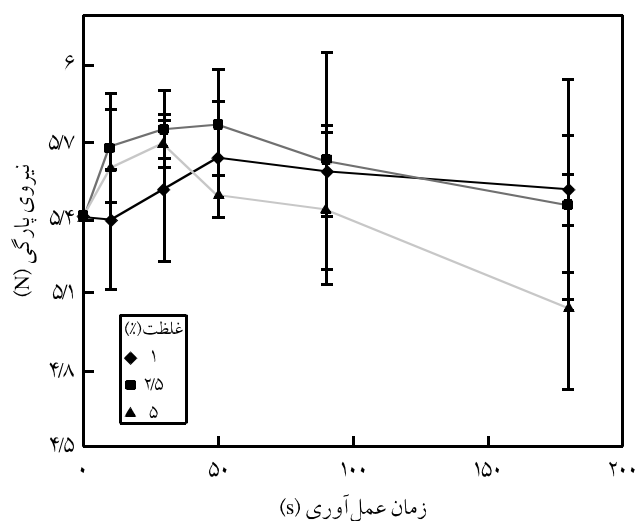
نتایج اندازه‌گیری ازدیاد طول تا پارگی نخ‌های تابدار عمل‌آوری شده با مخلوط حلال‌های TCAC/MC، که در شکل ۶ آمده است، نشان‌دهنده افزایش کم ازدیاد طول تا پارگی است. این افزایش در ازدیاد طول تا پارگی با توجه به ثابت بودن طول نخ، می‌تواند به جمع شدن الیاف به واسطه وجود فضاهای خالی در ساختار نخ تابدار ارتباط پیدا کند. جمع‌شدگی الیاف، همان‌طور که در نخ‌های تکسچره نشده و عمل‌آوری شده با حلال



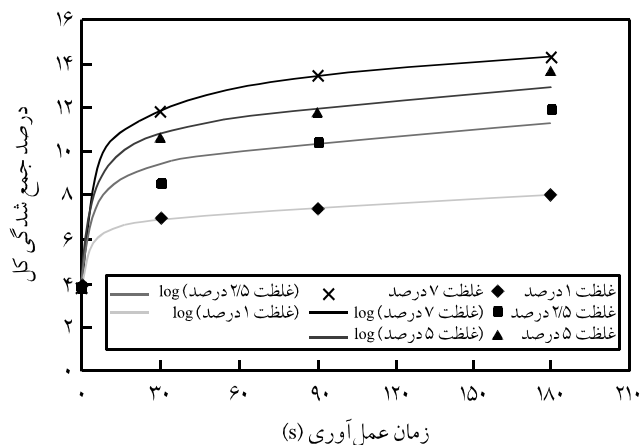
شکل ۶. ازدیاد طول نخ‌های تابدار عمل‌آوری شده در شرایط متفاوت و زیر کشش.

افزایش مناطق بلوری امکان‌پذیر است [۹]. از طرف دیگر، با از بین رفتن اتصالات بین زنجیره‌های پلیمری، امکان جمع شدن زنجیره‌ها و افزایش مناطق بی‌نظم فراهم می‌شود. افزایش تبلور و جهت‌گیری زنجیره‌های پلیمری در جهت محور لیف باعث افزایش استحکام الیاف می‌شود، در حالی که حرکت زنجیره‌های پلیمری از حالت کشیده شده به فاز بی‌نظم باعث افزایش ازدیاد طول تا پارگی و کاهش استحکام می‌شود. بنابراین، در الیاف پلی‌استر عمل‌آوری شده با مخلوط حلال‌های TCAC/MC بدون اعمال کشش به نظر می‌رسد که حرکت زنجیره‌های پلیمری از فاز آرایش یافته به فاز بی‌نظم بیش از افزایش تبلور در الیاف پلی‌استر است، در حالی که در پلی‌استر عمل‌آوری شده با حلال زیر کشش افزایش تبلور در الیاف غالب است.

شکل‌های ۵ و ۶ تغییرات استحکام و ازدیاد طول تا پارگی نخ تابدار تهیه شده را در اثر عمل‌آوری با مخلوط حلال‌های TCAC/MC در غلظت‌ها و زمان‌های مختلف نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روند تغییرات استحکام نخ‌های تابدار پس از عمل‌آوری با حلال مشابه با نخ‌های تکسچره نشده و عمل‌آوری شده زیر کشش است. اما، مقدار تغییرات استحکام در نخ‌های تابدار کمتر از نخ تکسچره نشده است. در غلظت ۱ درصد TCAC/MC استحکام نخ تابدار در اثر عمل‌آوری با حلال تغییر معنی‌داری نداشته است، در حالی که در نخ‌های خام تا ۱۱ درصد افزایش استحکام مشاهده می‌شود. در غلظت ۲/۵ درصد TCAC/MC روند افزایشی برای استحکام نخ‌های تابدار مشاهده می‌شود که مقدار حداکثر افزایش استحکام در زمان ۵۰s حدود



شکل ۵. نیروی پارگی نخ‌های تابدار عمل‌آوری شده در شرایط متفاوت و زیر کشش.



شکل ۸- مقادیر جمع شدگی قابل بازگشت برای نخ‌های تغییر شکل یافته و تثبیت شده با حلال (جمع شدگی قابل بازگشت نخ تغییر شکل یافته به روش تاب مجازی و تثبیت گرمایی = ۱۵/۵ درصد).

لگاریتمی به دست آمده برای ارتباط بین جمع شدگی کل و جمع شدگی قابل بازگشت با زمان نشان دهنده افزایش شیب تغییرات جمع شدگی با افزایش غلظت TCAC است. شیب منحنی برای جمع شدگی کل در زمان واحد برای غلظت ۱ درصد TCAC معادل ۰/۶۶ و برای غلظت ۷ درصد TCAC برابر ۲/۳۱ است. این موضوع نشان دهنده ۳/۵ برابر شدن سرعت افزایش جمع شدگی کل با زمان است. افزایش سرعت برای جمع شدگی قابل بازگشت در زمان واحد ۲/۵ برابر است. بنابراین، جمع شدگی حاصل از تغییر شکل شیمیایی وابستگی بیشتری به غلظت حلال مورد استفاده نسبت به زمان صرف شده در این تغییر شکل دارد. مقایسه جمع شدگی نخ‌های تغییر شکل یافته به وسیله حلال با نتایج جمع شدگی نخ پلی‌استر با نمره مشابه که به روش تاب مجازی و گرما تغییر شکل یافته و به طور صنعتی در صنایع نساجی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد که در عمل آوری نخ تابدار با حلال ۵ درصد TCAC/MC در زمان بیش از ۱۸۰s یا با حلال ۷ درصد TCAC/MC در زمان بیش از ۳۰s می‌توان نخ تغییر شکل یافته را با خواص نزدیک به نخ‌های تغییر شکل یافته به روش گرمایی به دست آورد. این موضوع نشان دهنده امکان استفاده از حلال TCAC/MC در تغییر شکل شیمیایی الیاف پلی‌استر است.

### نتیجه‌گیری

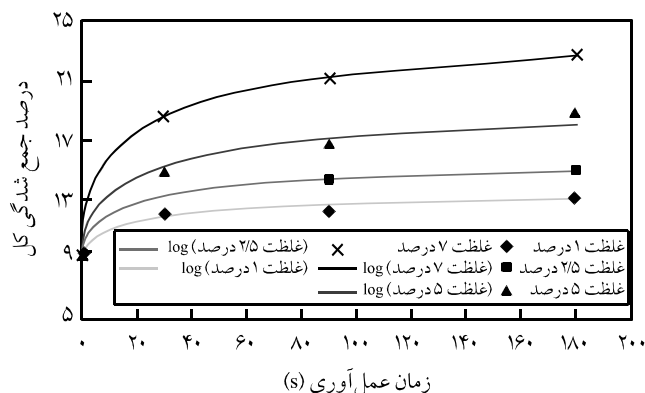
حلال تری‌کلرواستیک اسید برهم کنش زیادی با الیاف پلی‌استر دارد. شدت و نحوه برهم کنش این حلال با الیاف پلی‌استر بستگی به غلظت

بدون اعمال کشش مشاهده شد، می‌تواند منجر به افزایش از دیاد طول تا پارگی شود.

### خواص نخ‌های تغییر شکل یافته

در شکل‌های ۷ و ۸ نتایج اندازه‌گیری جمع شدگی دائمی و جمع شدگی قابل بازگشت نخ‌های تابدار عمل‌آوری شده با مخلوط حلال‌های TCAC/MC پس از بازکردن تاب نشان داده شده است. همچنین، نتایج با جمع شدگی نخ پلی‌استر تغییر شکل یافته به روش متداول تاب مجازی که به طور صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده تغییر محسوس و معنی دار جمع شدگی دائمی و قابل بازگشت نخ‌های عمل‌آوری شده با حلال است. همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند، مقدار جمع شدگی‌های اندازه‌گیری شده وابسته به غلظت TCAC و زمان عمل‌آوری با حلال است، به طوری که با افزایش غلظت و زمان عمل‌آوری مقادیر جمع شدگی نیز افزایش یافته است.

شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند، تغییرات جمع شدگی‌های دائم و قابل بازگشت نسبت به زمان در همه غلظت‌ها به شکل لگاریتمی است. به طوری که در زمان‌های اولیه عمل‌آوری با حلال، درصد جمع شدگی الیاف به سرعت افزایش و با گذشت زمان سرعت افزایش این درصد کاهش می‌یابد. در حقیقت با استفاده از غلظت مناسب حلال، می‌توان در زمان کوتاهی به مقادیر زیادی جمع شدگی قابل بازگشت دست یافت که از ویژگی‌های مهم نخ‌های تغییر شکل یافته است. نتایج نشان دهنده نیاز به زمانی کمتر از ۹۰s است که با نتایج ارائه شده توسط هاشمی پور [۳] مطابقت دارد. این زمان کوتاه می‌تواند منجر به افزایش سرعت در تغییر شکل الیاف شود که از نظر صنعتی دارای اهمیت است. روابط



شکل ۷- مقادیر جمع شدگی کل برای نخ‌های تغییر شکل یافته و تثبیت شده با حلال (جمع شدگی کل نخ تغییر شکل یافته به روش تاب مجازی و تثبیت گرمایی = ۳۲/۲ درصد).

زیر تنش می‌تواند باعث افزایش آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری و افزایش تبلور در الیاف پلی‌استر شود. در الیاف پلی‌استر عمل‌آوری شده با مخلوط حلال‌های TCAC/MC بدون اعمال کشش به نظر می‌رسد که حرکت زنجیرهای پلیمری از فاز آرایش یافته به فاز بی‌نظم بیش از افزایش تبلور در الیاف پلی‌استر است، در حالی که در پلی‌استر عمل‌آوری شده با حلال زیر کشش افزایش تبلور در الیاف غالب است. برهم‌کنش الیاف پلی‌استر با مخلوط حلال‌های TCAC/MC نشان‌دهنده امکان تغییر شکل شیمیایی الیاف پلی‌استر با این حلال است. جمع‌شدگی دائم و جمع‌شدگی قابل بازگشت الیاف تغییر شکل یافته با حلال TCAC/MC در غلظت ۷ درصد TCAC و زمان ۱۸۰s به ترتیب ۲۲/۸ و ۱۴/۵ درصد به دست آمده است که مشابه مقادیر مربوط به الیاف پلی‌استر تغییر شکل یافته به روش گرمایی است. مقادیر جمع‌شدگی و تغییر شکل حاصل در الیاف پلی‌استر وابسته به غلظت TCAC و زمان عمل‌آوری با حلال است و با افزایش غلظت TCAC و زمان عمل‌آوری به شکل لگاریتمی افزایش می‌یابد. اما، غلظت TCAC اثر بیشتری نسبت به زمان عمل‌آوری در تغییر شکل شیمیایی دارد.

TCAC، زمان عمل‌آوری با حلال و تنش وارد شده به الیاف دارد. عمل‌آوری الیاف پلی‌استر با مخلوط حلال‌های TCAC/MC در حالت آزاد، در غلظت‌های کمتر از ۵ درصد موجب تغییر زیادی در استحکام پارگی الیاف نمی‌شود. اما، در غلظت ۵ درصد TCAC کاهش در استحکام الیاف اتفاق می‌افتد. ازدیاد طول تا پارگی الیاف عمل‌آوری شده در حالت آزاد به طور محسوسی افزایش یافته و این افزایش متناسب با غلظت TCAC بوده است. به طوری که درصد افزایش ازدیاد طول تا پارگی پس از زمان ۱۸۰s در غلظت ۱ درصد TCAC برابر ۵۸ و در غلظت ۵ درصد TCAC معادل ۱۵۵ درصد بوده است.

عمل‌آوری الیاف پلی‌استر با این حلال زیر کشش، موجب افزایش استحکام الیاف در غلظت‌های ۱ و ۲/۵ درصد TCAC شده است و در غلظت ۵ درصد TCAC کاهش حداکثر ۲/۳ درصد در استحکام الیاف مشاهده شده است. این در حالی است که ازدیاد طول تا پارگی الیاف در این شرایط، کمی کاهش می‌یابد. بنابر این، عمل‌آوری با حلال در شرایط مختلف اثر متفاوتی بر ریز ساختار الیاف پلی‌استر دارد. به نظر می‌رسد که این امر در حالت آزاد باعث حرکت زنجیرهای پلیمری در فاز آرایش یافته و انتقال آنها به فاز بی‌نظم می‌شود. در حالی که عمل‌آوری الیاف

## مراجع

- Hearle J.W.S., Hollick L. and Wilson D.K., *Yarn Texturing Technology*, Woodhead, England, Chap. 2, 2001.
- Sengupta A.K., Glanchandani J.K. and Jindal S.K., A Comparative Study of Thermomechanical and Chemomechanical Texturing of Nylon 6 Multifilament Yarns, *Text. Res. J.*, **49**, 360-364, 1979.
- Hashemi-Pour M., Lee H.S., Tucker P.A. and Cates D.M., Solvent Texturing of Polyester Yarn, Part I: Sequential Texturing, *Text. Res. J.*, **63**, 108-130, 1993.
- Haghighat Kish M. and Moini T., Chemical Setting of Nylon 6 Multifilament Yarns in Twist and Knit- de- Knit Texturing, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, **4**, 198-208, 1995.
- Rajendran S., Ramasamy S.S. and Mishra S.P., Tensile Behavior of Polyester Yarns Modified by Trichloroacetic Acid-Methylene Chloride Treatment, *J. Appl. Polym. Sci.*, **59**, 99-108, 1996.
- Chidambaram D., Venkatraj R. and Manisankar P., Solvent Induced Modification in Polyester Yarns, I. Mechanical Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **87**, 500-510, 2003.
- Chidambaram D., Venkatraj R. and Manisankar P., Solvent Induced Modification in Polyester Yarns, II. Structural and Thermal Behavior, *J. Appl. Polym. Sci.*, **89**, 1555-1566, 2003.
- Jameel H., Noether H.D. and Rebenfeld L., The Effects of Orientation and Crystallinity on the Solvent-Induced Crystallization of Poly(ethylene terephthalate), II. Physical Structure and Morphology, *J. Appl. Polym. Sci.*, **27**, 773-793, 1982.
- Im S.S. and Lee H.S., Kinetics Studies of Solvent-Induced Crystallization of Drawn Poly(ethylene terephthalate) by the *In Situ* Density Measurement, *J. Appl. Polym. Sci.*, **37**, 1801-1814, 1989.
- Davoudpour Y. and Nouri M., FTIR Study on the Structure of Trichloroacetic Acid/Methylene Chloride Treated Polyester Fibers (*Persian*), *The 6th National Conference on Textile Engineering*, Isfahan, Iran, 38, May 2007.