Tarbiat Modares University

Journal of
Applied Research in Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

The effect of cross-sectional shape of the melt-spun PET multifilament yarn on their physical and crimp properties

Maryam Sabzi Mobarakeh, Mohammad Ali Tavanaie *

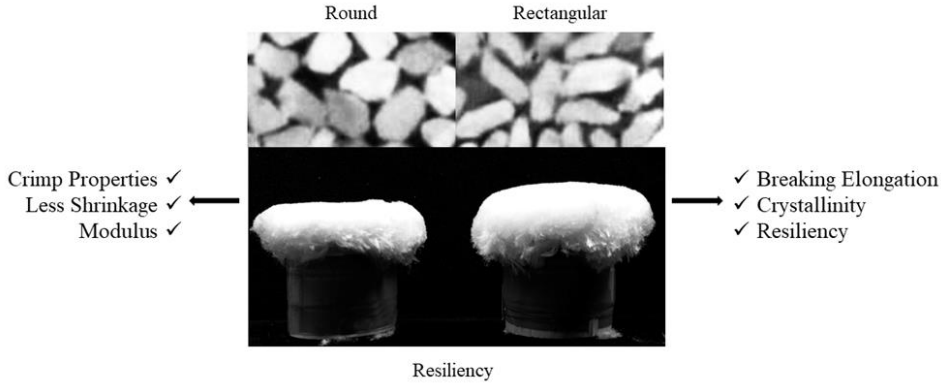
[1] *Textile Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran*

ARTICLE INFO

Received 2024-01-10
Revised 2025-02-01
Accepted 2025-02-12
Available online 2025-09-22
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:
Multifilament yarn
Melt spinning
Texturing
Polyethylene terephthalate
Physical and crimp properties

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: In recent years, various filament cross-sectional shapes have been employed in the production of synthetic multifilament yarns to achieve diverse applications and properties. In this study, the effect of round and rectangular cross-sectional shapes of polyethylene terephthalate (PET) multifilament yarns on the physical and crimp properties of melt-spun and draw-textured yarns was investigated.

Research approach: Partially oriented yarns (POY) were produced using an industrial melt-spinning machine, and draw-textured yarns (DTY) were prepared with an industrial frictional false-twist texturizing machine under identical conditions. All yarn samples with round and rectangular cross-sectional shapes were analyzed in terms of linear density, thermal shrinkage, degree of crystallinity, and tensile properties (strength, elongation at break, and initial modulus). For DTY yarns, additional tests were conducted to evaluate crimp properties (crimp shrinkage, crimp modulus, and crimp stability), resiliency, and the ratio of tension after the twisting zone to tension before the twisting zone (T2/T1). Furthermore, X-ray diffraction was performed on textured yarn samples to examine the fiber microstructure.

Main results: The results revealed that differences in the tensile properties and thermal shrinkage of POY yarns with both cross-sectional shapes were small, despite being statistically significant. However, greater variations were observed in DTY yarns. The DTY yarn with a rectangular cross-sectional shape exhibited higher resiliency than that with a round cross-section. Conversely, the DTY yarn with a round cross-sectional shape demonstrated superior crimp properties, which can be attributed to its higher crystallinity and, consequently, greater softness and texturability compared to the rectangular cross-sectional shape.

* Corresponding author: tavanaie@aut.ac.ir – ORCID: 0000-0001-5134-9251

Copyright@ 2025, The Authors. 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.

نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی–پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

تأثیر شکل سطح مقطع روزنه رشته‌ساز در فرایند ذوب‌ریسی بر خواص فیزیکی و موجی نخ پلی‌اتیلن‌ترفتالات

مریم سبزی مبارکه [۱]، محمدعلی توانائی [۱,*]

[۱] دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: امروزه در تولید الیاف مصنوعی برای ایجاد کاربردها و خواص متنوع، از شکل سطح مقطع‌های عرضی مختلف رشته‌ساز استفاده می‌شود. در این پژوهش تأثیر شکل سطح مقطع عرضی نخ چندرشته‌ای بر خواص فیزیکی و موجی نخ ذوب‌ریسی و تکسچره شده به روش تاب‌مجازی اصطکاکی با شکل سطح مقطع عرضی دایروی و مستطیلی بررسی شده است.

روش تحقیق: نخ‌های چندرشته‌ای نیمه‌آرایش‌یافته (POY) (Partially Oriented Yarns) توسط دستگاه ذوب‌ریسی صنعتی و نخ‌های کشیده-تکسچره شده (Drawn Textured Yarns) (DTY) به‌روش تاب‌مجازی اصطکاکی توسط دستگاه تکسچرایزینگ صنعتی در شرایط یکسان تولید شدند. برای نخ‌های POY با دو سطح مقطع عرضی دایروی و مستطیلی، شکل مقطع عرضی نخ‌ها، چگالی خطی، جمع‌شدگی حرارتی، میزان بلورینگی و خواص کششی (استحکام، ازدیاد طول تا پارگی و مدول) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای نخ‌های DTY علاوه بر آزمون‌های مذکور، خواص موجی (جمع‌شدگی موج، مدول موج و پایداری موج)، مقدار جهندگی نخ‌ها و نسبت تنش بعد از تاب‌دهنده به تنش قبل از تاب‌دهنده‌ی اصطکاکی (T_2/T_1) نیز بررسی شد. به‌علاوه، برای آگاهی از شرایط ساختاری الیاف آزمون پراش پرتوی ایکس برای نمونه‌های DTY انجام شد.

نتایج اصلی: طبق نتایج مشخص شد اختلاف خواص کششی و جمع‌شدگی گرمایی نخ‌های POY برای هر دو سطح مقطع، با وجود معناداری آماری، کم است. درصورتی‌که این اختلاف برای هر دو سطح مقطع دایروی و مستطیلی در نخ‌های DTY بیشتر است. در مقایسه‌ی مقدار جهندگی نخ‌های DTY، نخ با سطح مقطع عرضی مستطیلی مقدار جهندگی بیشتری نسبت به سطح مقطع دایروی نشان داد. به‌علاوه، خواص موجی نخ DTY با سطح مقطع دایروی به‌صورت مشهودی بهتر از سطح مقطع مستطیلی بود که می‌توان علت آن را میزان بلورینگی کمتر نخ DTY با سطح مقطع دایروی نسبت به مستطیلی دانست.

کلیدواژه‌ها

نخ چندرشته‌ای

ذوب‌ریسی

تکسچرایزینگ

پلی‌اتیلن‌ترفتالات

خواص فیزیکی و موجی

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴

دسترس آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: tavanaie@aut.ac.ir – ORCID: 0000-0001-5134-9251

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان. این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

امروزه نخ و الیاف پلی‌اتیلن‌ترفتالات (پلی‌استر) پرمصرف‌ترین الیاف در دنیا با کاربردهای متنوع هستند که به‌روش ذوب‌ریسی (Melt Spinning) تولید می‌شوند. مزیت تولید الیاف به‌روش ذوب‌ریسی نسبت به محلول‌ریسی، سرعت به‌مراتب بالاتر تولید و درنتیجه بازده بالاتر در ذوب‌ریسی است که تولید نخ چندرشته‌ای نیمه‌آرایش‌یافته با سرعت‌های بالاتر از ۳۲۰۰ متر بر دقیقه را در این روش امکان‌پذیر می‌کند [۱]. در فرایند ذوب‌ریسی، شکل سطح مقطع الیاف به‌وسیله‌ی شکل روزنه‌ی رشته‌ساز تعیین می‌شود. شکل سطح مقطع الیاف مصنوعی بر خواصی مانند جلا و درخشندگی، خواص کششی و موجی، انتقال رطوبت، زیردست، میزان جمع‌شدگی و خواص حرارتی تأثیرگذار است. متداول‌ترین شکل سطح مقطع عرضی مورد استفاده برای الیاف مصنوعی، مقطع دایروی (Round) است [۲]. انواع شکل‌های دیگر مقطع عرضی از جمله سه‌پره (Trilobal)، توخالی (Hollow) و مثلثی (Triangular) برای بهبود خواص الیاف پلی‌اتیلن‌ترفتالات مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از شکل‌های سطح مقطع عرضی مورد استفاده در صنعت نساجی، سطح مقطع مستطیلی (Rectangular) یا دانه‌برنجی است که از مصارف جدید آن در صنایع پایین‌دستی می‌توان به نخ‌های پلی‌استر پتویی اشاره کرد.

در تحقیقات انجام‌شده بر نخ نوریس نیمه‌آرایش‌یافته (POY) پلی‌استری، مشخص شده که نخ‌های با سطح مقطع دایروی، چهارپره و هشت‌پره دارای مقادیر استحکام و ازدیاد طول تا پارگی بیشتری نسبت به سطح مقطع‌های سه‌پره و شش‌پره هستند [۳]. همچنین نتیجه‌ی آزمون‌ها روی نخ‌های تکسچره شده تهیه‌شده به‌روش تاب‌مجازی DTY با سطح مقطع‌های مذکور نشان داد جمع‌شدگی موج نخ با سطح مقطع دایروی بیشتر و جمع‌شدگی حرارتی آن کمتر از نخ‌های با سایر سطح مقطع‌هاست که علت آن خاصیت حجیم بودن بیشتر نخ با سطح مقطع دایروی بیان شد [۴]. در تحقیقی دیگر روی خواص نخ‌های کاملاً کشیده‌شده FDY (Fully Drawn Yarn) با سطح مقطع دایره‌ای توخالی، سه‌پره و تخت (Flat) مورد آزمایش قرار گرفت و دریافته شد که به‌علت نحوه‌ی قرارگیری رشته‌ها در کنار همدیگر، خواص نخ با سطح مقطع سه‌پره بهتر از خواص نخ‌های دارای سطح مقطع دایروی، توخالی و تخت است [۵]. تحقیقات بر تأثیر سطح مقطع‌ها روی خواص موجی نخ تکسچره پلی‌آمید۶ نشان داده که عامل ضریب شکل (Shape Factor) بر میزان تاب دریافتی در تاب‌دهندگی اصطکاکی مؤثر است و هرچقدر مقدار ضریب شکل کمتر باشد، خواص موجی نخ بهتر خواهد بود [۶]. الیاف توخالی به‌دلیل توانایی حبس هوا در حفره‌ی میانی خود، خواص گرمایی متفاوتی نسبت به الیاف توپر (Solid) دارند [۷]. مطالعه بر خواص نخ‌های ۴۸ رشته‌ای ۱۶۷ دسی‌تکس پلی‌استری با سطح مقطع‌های دایروی، دایروی توخالی، سه‌پره و سه‌پره توخالی در شرایط ریسندگی یکسان نشان داد که الیاف توخالی دایروی و سه‌پره، آرایش‌یافتگی بیشتر و مقدار مدول و تنش تسلیم بالاتری نسبت به الیاف توپر دارند [۸]. به‌علاوه، ضریب شکل سطح مقطع نخ تأثیر زیادی روی خواص پارچه‌ی تولید شده دارد. با محاسبه‌ی عامل ضریب شکل سطح مقطع‌های مختلف در پارچه‌های بافته‌شده با نخ‌های چندرشته‌ای، مشاهده شد که با افزایش مقدار ضریب شکل، نفوذپذیری هوا و رطوبت کاهش می‌یابد [۹]. در ادامه‌ی آن تحقیق مشخص شد اشکال مختلف سطح مقطع الیاف بر خواص مکانیکی و زیردست پارچه اثرگذار است [۱۰].

در این پژوهش، از دو نوع نخ چندرشته‌ای یکسره POY و DTY با اشکال سطح مقطع دایروی و مستطیلی که به روش ذوب‌ریسی در شرایط یکسان عملیات، تولید و تکسچره شده‌اند، استفاده شده است. هدف بررسی خواص فیزیکی و موجی نخ تکسچره شده و مقایسه‌ی اختلاف موجود در نخ‌های تولیدشده با سطح مقطع‌های عرضی مختلف است. تفاوت حاصل از خواص فیزیکی و موجی نخ‌های چندرشته‌ای پلی‌استر با سطح مقطع مستطیلی (یا دانه برنجی) و دایروی مورد مطالعه دقیق قرار نگرفته است و این در حالی است که رواج رو به توسعه‌ی نخ‌های چندرشته‌ای پلی‌استر با سطح مقطع عرضی مستطیلی در تولید پتو بوده است. همه نمونه نخ‌ها و عملیات انجام‌شده بر آن‌ها در شرایط صنعتی و با استفاده از تجهیزات صنعتی بوده است.

۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد و فرایندها

ماده‌ی اولیه‌ی مورد استفاده در این پژوهش، دانه‌های پلی‌استری براق گرید نساجی شرکت پتروشیمی تندگویان با گرانروی ذاتی ۰/۰۱۵ ± ۰/۶۴ دسی‌لیتر بر گرم، مقدار دی‌اتیلن گلیکول ۰/۹ تا ۱/۴ درصد وزنی و دمای ذوب ۳ ± ۲۵۵ درجه سلسیوس بوده است.

نخ‌های نیمه‌آرایش‌یافته (POY) با نمره‌ی ۵۵۵ دسی‌تکس و ۱۹۲ رشته‌ای (۹۶ رشته دولا) با دو سطح مقطع دایروی و مستطیلی (با نسبت ابعاد ۱ × ۵) توسط خط ذوب‌ریسی VIBA SIAT واقع در شرکت نفیس‌نخ قزوین تولید شده که برخی عوامل مهم تولید در جدول ۱ آمده است. نخ‌های POY تولیدشده، در شرایط یکسان تحت عملیات تکسچرایزینگ توسط ماشین مدل FK6-V1000-Multi ساخت شرکت آلمانی Barmag واقع در شرکت نفیس‌نخ قرار گرفتند که طول گرم‌کن این دستگاه ۲ متر و طول ناحیه‌ی خنک‌کننده ۱/۱ متر است [۱۱]. صفحات اصطکاکی مورد استفاده دارای آرایش ۱-۵-۱ با اعمال تاب در جهت Z و از جنس پلی‌یورتان با ضخامت ۹ میلی‌متر بوده است.

آزمون چگالی خطی نخ‌ها برحسب دسی‌تکس با پیچیدن ۵ کلاف ۱۰۰ متری توسط کلاف‌پیچ و اندازه‌گیری جرم کلاف برحسب گرم توسط ترازوی دیجیتال طبق استاندارد ASTM 1907 انجام شد [۱۲]. اندازه‌گیری خواص کششی (استحکام، ازدیاد طول تا پارگی و مدول) توسط دستگاه اتریشی Sigma500 ساخت شرکت Lenzing Instruments به‌کمک استاندارد ASTM 3822 انجام شد [۱۳]. همچنین خواص موجی نخ‌های تکسچره مطابق استاندارد DIN 53840-1 ارزیابی و نتایج آن گزارش شد [۱۴].

مقدار جمع‌شدگی گرمایی نیز طبق استاندارد DIN 53840 با پیچیدن کلاف و اندازه‌گیری طول آن‌ها قبل و بعد از گرمایش از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد.

$$\text{جمع‌شدگی گرمایی (\%)} = \frac{\text{طول اولیه} - \text{طول ثانویه}}{\text{طول اولیه}} \times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

آزمون پراش پرتوی ایکس (XRD) بر اساس قانون براگ (Bragg's Law) مطابق رابطه‌ی ۲، توسط دستگاه مدل PW1730 ساخت شرکت PHILIPS کشور هلند با اندازه گام ۰/۰۵ درجه، زمان هرگام مساوی ۱ ثانیه، طول موج پرتوی ایکس برابر با ۱/۵۴۰۵۶ آنگستروم مطابق استاندارد ملی INSO 21951-1 انجام شد [۱۵]. به‌علاوه، برای تحلیل داده‌های آزمون XRD از دو نرم‌افزار X'Pert HighScore Plus و Origin Pro استفاده شد.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \qquad (۲)$$

آزمون جهندگی نخ‌ها برگرفته از استاندارد ISO 3415 1986 (E) انجام شد [۱۶]. نمونه‌های آزمون جهندگی متشکل از ۶۰۰۰ متر نخ با ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر هستند (T_i). این نمونه‌ها توسط قطعه‌ای لوله پلیکا با ارتفاع ۳ سانتی‌متر به‌طوری احاطه می‌شوند که ۱/۵ سانتی‌متر از نخ‌های بریده‌شده از یک طرف لوله خارج شده باشد و آزاد قرار بگیرند. نمونه‌های آماده‌شده به مدت ۲۴ ساعت تحت فشار وزنه‌ی ۵ کیلوگرمی قرار گرفته و پس از این مدت و حذف نیرو ارتفاع آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود و T_c به‌دست می‌آید. در نهایت، در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت پس از حذف نیرو، ارتفاع مجدداً اندازه‌گیری شده و T_r به‌دست می‌آید. رابطه‌ی ۳ مشخص‌کننده‌ی میزان جهندگی نخ است.

$$\text{جهندگی} = \frac{T_r - T_c}{T_i - T_c} \qquad (۳)$$

تحلیل‌های آماری لوین و T دو مستقل توسط نرم‌افزار IBM SPSS صورت گرفت. در نهایت، برای هر داده مقادیر میانگین، ضریب تغییرات و تشخیص معناداری یا عدم معناداری تفاوت موجود میان میانگین‌ها با سطح اطمینان ۹۵٪ محاسبه و گزارش شد.

جدول ۱ شرایط تولید نخ‌های چندرشته‌ای الف) دستگاه ذوب‌ریسی نخ POY و ب) دستگاه تکسچرایزینگ تاب‌مجازی اصطکاکی

Table 1 Production parameters of multifilament yarns of a) POY melt spinning process, b) Frictional false twist texturing process

(a)			(b)		
Parameter	unit	value	Parameter	unit	value
Chips type	TG640N SBR		**Oil type**	Nasj azma	
Oil type	Tekemoto Delion F-2707-LC		**Linear density**	dtex	333
Linear density	dtex	555	**Number of filaments**	…	192
Number of spinneret holes	…	96	**PLY**	…	2
PLY	…	2	**First heater temperature**	℃	180
Spinning temperature	℃	293	**Second heater temperature**	℃	175
Extruder	rpm	45	**Texturing speed**	m/min	500
Melt pressure	bar	145	**Draw ratio**	…	1.81
Pressure before pump	bar	100	**D/Y**	…	1.8
Pressure at interlacing	bar	2.5	**Friction type**	…	1-5-1 Z
Metering pump capacity	cc/rec	2.4	**Disc type**	…	Polyurethane
Speed of air quench	m/s	0.8	**Type of intermingling jet**	…	Y17
Temperature of air quench	℃	19	**Intermingling jet air pressure**	bar	0.75
Oil percentage	%	12	**Winding angle**	°	29
Godet 1 speed	m/min	2650	**Oil pump speed**	rpm	0.3

جدول ۲* نتایج آزمون‌های چگالی خطی، جمع‌شدگی گرمایی و خواص کششی نخ‌های POY با سطح مقطع‌های دایره‌ای و مستطیلی

Table 2* Results of linear density, thermal shrinkage, and tensile properties of POY yarns with round and rectangular cross-sectional shape

		POY	
		round	rectangular
Linear density (dtex)		574.68 (1.43)	559.24 (2.71)
Shrinkage (%)		58.53 (0.34)	63.96 (0.16)
Tensile properties	Max stress (cN/Tex)	20.3 (2.01)	19.65 (2.74)
	Breaking elongation (%)	145.8 (4.8)	148.2 (5.93)
	Modulus (cN/Tex)	44.39 (0.87)	44.01 (3.26)

* The numbers in parentheses are the coefficient of variant percent of properties

۳ بحث و نتایج

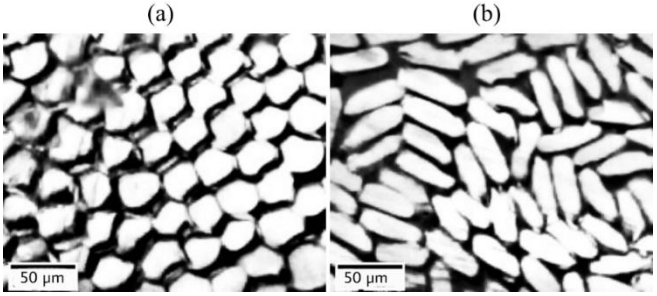
نتایج آزمون‌های چگالی خطی، جمع‌شدگی حرارتی و خواص کششی (استحکام، ازدیاد طول تا پارگی و مدول) در نخ‌های نیمه‌آرایش‌یافته (POY) و آزمون‌های چگالی خطی، میزان بلورینگی، جمع‌شدگی حرارتی، خواص کششی (استحکام، ازدیاد طول تا پارگی و مدول)، خواص موجی (جمع‌شدگی موج، مدول موج و پایداری موج) و جهندگی (Resiliency) در نخ‌های کشیده و تکسچره شده (DTY) به تفکیک در بخش‌های ۳-۱ و ۳-۲ تحلیل و بررسی شده است.

۳-۱ تأثیر شکل سطح مقطع عرضی بر چگالی خطی، جمع‌شدگی گرمایی و خواص کششی نخ POY

نتایج و ضریب تغییرات آزمون‌های چگالی خطی، جمع‌شدگی گرمایی و خواص کششی نخ‌های POY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی در جدول ۲ آورده شده است.

چگالی خطی نخ POY با سطح مقطع دایروی ۵۷۴/۶۸ دسی‌تکس و چگالی خطی نخ با سطح مقطع مستطیلی، ۵۵۹/۲۴ دسی‌تکس به‌دست آمد که نشان‌دهنده‌ی کاهش چگالی خطی نخ POY با سطح مقطع مستطیلی در قیاس با سطح مقطع دایروی است. آزمون آماری مشخص کرد این اختلاف بین میانگین داده‌های چگالی خطی معنادار است. از آن‌جا که هردو نخ کاملاً در شرایط یکسان و هم‌زمان در دستگاه ذوب‌ریسی تولید شدند، همچنین نرخ دبی جرمی به‌کاررفته برای هر دو نمونه یکسان بوده است و تنها تفاوت در شکل سطح مقطع عرضی این دو بوده است، این اختلاف به‌واسطه میزان تنش واردشده به دو نخ در میدان جریان ریسندگی به‌دلیل نحوه انتقال نیرو در این دو شکل مختلف بوده است. می‌توان نتیجه گرفت در شرایط کاملاً یکسان تولید، انتقال نیرو در شکل مقطع عرضی دایروی سهل‌تر صورت گرفته است و سیال پلیمر تحت تنش کمتری قرار داشته است و کمتر ازدیاد طول پیدا کرده است. از این رو چگالی خطی آن کمی بیشتر از سطح مقطع مستطیلی شده است. هرچند اختلاف ناچیز نتایج استحکام و ازدیاد طول تا حد پارگی آن‌ها این میزان ازدیاد طول بیشتر نخ با مقطع عرضی مستطیلی را تأیید نمی‌کند و احتمالاً این اختلاف کم به تغییرات ساختاری هنگام انجماد رشته‌ها ارتباط دارد.

شکل ۱ تصویر میکروسکوپی سطح مقطع عرضی نخ‌های POY با شکل‌های دایروی و مستطیلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که کاملاً مشهود است، به‌دلیل پدیده‌ی تورم حدیده (منفذی) در سیالات گرانروکشسان (viscoelastic)، شکل مقطع رشته‌های نخ نسبت به شکل روزنه‌ی رشته‌ساز دچار تغییرشکل شده است؛ به همین علت شکل رشته‌های خارج‌شده از روزنه‌ی مستطیلی‌شکل اصطلاحاً به‌شکل دانه‌برنجی درآمده است. در سطح مقطع دایروی تورم منفذی باعث تغییر شکل کلی در سطح‌مقطع نمی‌شود؛ زیرا دایره شکلی متقارن است و در نتیجه تورم در تمام جهات یکسان خواهد بود. اما درباره‌ی روزنه‌ی مستطیلی تورم منفذی باعث تغییر شکل مقطع فیلامنت‌ها می‌شود. مقدار تقریبی ضریب شکل برای سطح مقطع رشته‌های دایروی عدد صفر و برای سطح مقطع رشته‌های مستطیلی عدد ۰/۳ محاسبه شد که این نشان دهنده انحراف بیشتر این شکل سطح مقطع عرضی از حالت ایده‌آل بوده است. فشردگی رشته‌ها در تصاویر به‌دلیل روش تهیه‌ی نمونه برای بررسی در زیر میکروسکوپ نوری است که به‌طور معمول در این روش تهیه در مقطع عرضی دیده می‌شود.

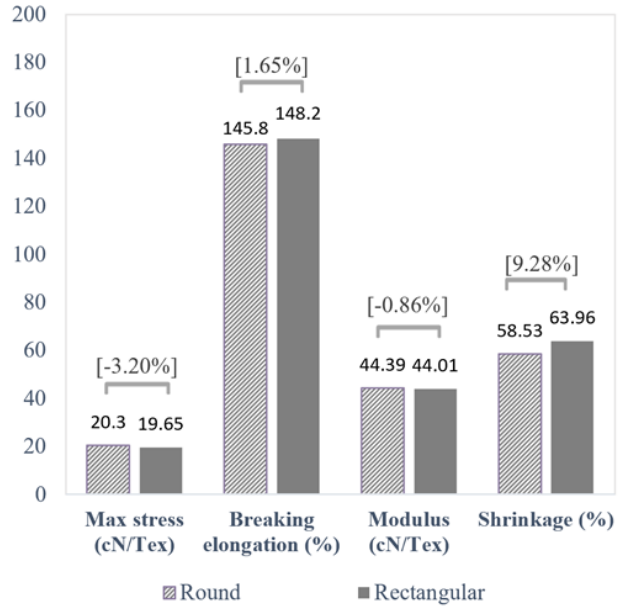


شکل ۱ تصویر میکروسکوپی مقطع عرضی نخ‌های چندرشته‌ای پلی‌استر POY با سطح مقطع الف) دایروی و ب) مستطیلی

Figure 1 Microscopic images of PET POY multifilament yarns with; a) round and b) rectangular cross-sectional shapes

نمودارهای شکل ۲ مقادیر جمع‌شدگی گرمایی برحسب درصد، استحکام برحسب سانتی‌نیوتن بر تکس، ازدیاد طول تا پارگی برحسب درصد و مدول برحسب سانتی‌نیوتن بر تکس در نخ‌های POY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی را نشان می‌دهند. باتوجه به نمودار شکل ۲ و آزمون‌های آماری انجام‌شده، مقدار جمع‌شدگی گرمایی نخ با سطح مقطع عرضی مستطیلی به‌صورت معناداری بیشتر از دایروی اندازه‌گیری شد. این نتیجه احتمالاً به‌دلیل بیشتر بودن نیروی کشیدگی حاصل از بلورینگی (Stress-Induced Crystallization) در ساختار نخ POY با سطح مقطع عرضی مستطیلی هنگام انجماد در ناحیه‌ی انجماد رشته‌ها است که منجر به بیشتر شدن جمع‌شدگی گرمایی نخ POY با سطح مقطع عرضی مستطیلی‌شکل شده است. این نتیجه با کاهش بیشتر چگالی خطی این نخ نسبت به نخ با شکل مقطع عرضی دایروی نیز کاملاً همخوانی داشته و گمانه‌زنی مرتبط با بالاتر بودن تنش اعمال‌شده به ساختار رشته‌ها با مقطع عرضی مستطیلی را قوت می‌بخشد.

استحکام نخ POY با سطح مقطع عرضی دایروی کمی بیشتر از سطح مقطع مستطیلی اندازه‌گیری شد که با توجه به آزمون‌های آماری انجام‌شده، این اختلاف نیز با سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار است. احتمالاً یکی از عوامل مؤثر بر استحکام نخ، شکل قرارگیری رشته‌ها در کنار همدیگر است که هرچه رشته‌ها متراکم‌تر کنار یکدیگر قرار بگیرند، مقدار استحکام افزایش می‌یابد [۳]. با توجه به این مطلب می‌توان اختلاف کم بین نتیجه‌ی آزمون استحکام را توجیه کرد. مقدار ازدیاد طول تا پارگی به‌دست‌آمده برای نخ‌های POY با مقطع عرضی مستطیلی بیشتر از دایروی به‌دست آمد که بر اساس آزمون آماری مشخص شد این اختلاف معنادار نبوده و داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون ازدیاد طول تا پارگی بر نخ‌های POY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی تفاوت آماری ندارند. البته نیک واضح است که نخ با استحکام بیشتر احتمالاً از آرایش‌یافتگی زنجیرهای بیشتری برخوردار است و به تبع آن مقدار ازدیاد طول تا حد پارگی آن کمتر خواهد بود و این موضوع در نتایج قابل ملاحظه است.



شکل ۲* تأثیر شکل سطح مقطع عرضی نخ بر میزان جمع‌شدگی حرارتی و خواص کششی نخ‌های پلی‌استرPOY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی

Figure 2* Effect of fiber cross-sectional shape on thermal shrinkage and tensile properties of multifilament PET yarns

* The numbers in brackets are the verification percent of properties between rectangular and round cross section shapes

از نتایج به‌دست‌آمده دریافت می‌شود مقدار مدول اولیه برای نخ POY با سطح مقطع عرضی دایروی کمی بیشتر از سطح مقطع مستطیلی است، البته این تغییر بدون اختلاف معنادار است، اما با ادعای بیشتر بودن آرایش-یافتگی زنجیرهای مولکولی در نخ با شکل مقطع عرضی دایروی مطابقت دارد. در مجموع، اختلاف ازدیاد طول تا پارگی و مدول در نخ‌های POY با شکل سطح مقطع دایروی و مستطیلی بدون تغییر معنادار، اما مقادیر چگالی خطی، جمع‌شدگی حرارتی و استحکام دارای اختلاف معنادار بر اساس آزمون‌های آماری با سطح اطمینان ۹۵ درصد ارزیابی شدند.

۳-۲ تأثیر شکل سطح مقطع عرضی بر میزان بلورینگی، جمع‌شدگی گرمایی و خواص کششی و موجی نخ DTY

جدول ۳ میانگین نتایج و ضریب تغییرات آزمون‌های چگالی خطی، جمع‌شدگی گرمایی، خواص کششی و خواص موجی نخ‌های کشیده تکسچره شده DTY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی را نشان می‌دهد.

مقادیر چگالی خطی برای نخ DTY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی به‌ترتیب مساوی ۳۶۶/۲ و ۳۵۵/۵۴ دسی‌تکس اندازه‌گیری شد. میانگین چگالی خطی نخ DTY با سطح مقطع دایروی بیشتر از سطح مقطع مستطیلی اندازه‌گیری شد که طبق نتایج آماری، اختلاف‌ها با سطح اطمینان ٪۹۵ معنادار است. این اختلاف هم با توجه به بالاتر بودن چگالی خطی نخ نوریس با شکل مقطع عرضی دایروی نسبت به نخ با شکل مقطع عرضی مستطیلی کاملاً قابل توجیه است.

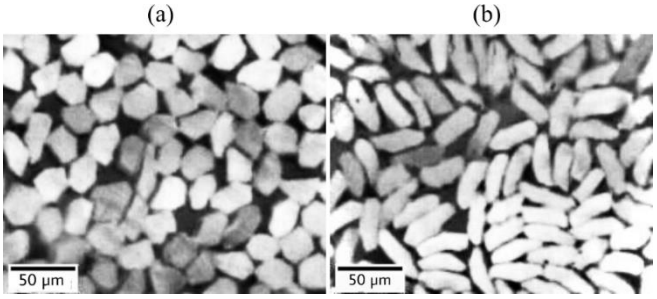
شکل ۳ تصویر میکروسکوپی مقطع عرضی نخ‌های DTY تولیدشده به‌روش تکسچرایزینگ تاب‌مجازی اصطکاکی با سطح مقطع دایروی و مستطیلی را نشان می‌دهد.

جدول ۳* نتایج آزمون‌های چگالی خطی، جمع‌شدگی، خواص کششی و خواص موجی نخ‌های پلی‌استر تکسچره DTY با سطح مقطع‌های دایروی و مستطیلی

Table 3* Results of linear density, thermal shrinkage, tensile, and textured (DTY) PET yarns with round and crimp tests of rectangular cross-sectional shapes

		DTY	
		round	rectangular
Linear density (dtex)		366.2 (2.55)	355.54 (1.32)
Shrinkage (%)		4.36 (0.01)	6.12 (0.3)
Tensile properties	Max stress (cN/Tex)	33.47 (0.69)	34.06 (1.18)
	Breaking elongation (%)	25.23 (1.12)	27.8 (1.91)
	Modulus (cN/Tex)	274.4 (3.09)	245.78 (2.57)
Crimp properties	CC %	5.63 (0.28)	4.46 (0.25)
	CM %	3.19 (0.008)	2.91 (0.38)
	CS %	74.46 (3.77)	47.08 (9.23)

* The numbers in parentheses are the coefficient of variant percent of properties

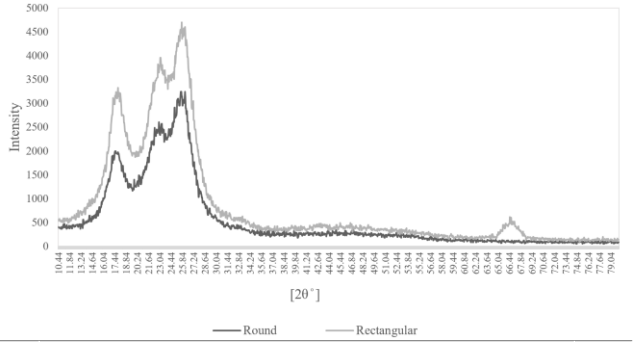


شکل ۳ تصویر میکروسکوپی رشته‌های نخ‌های DTY با سطح مقطع الف) دایروی و ب) مستطیلی

Figure 3 Microscopic images of POY multifilament yarns with: a) round and b) rectangular cross-sectional shapes

مقایسه‌ی تصویر میکروسکوپی مقطع عرضی نخ‌های POY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی در شکل ۱ با مقطع عرضی نخ‌های DTY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی در شکل ۳ نشان می‌دهد ابعاد سطح مقطع نخ‌های DTY کاهش یافته است که به‌علت کشش اعمال‌شده در فرایند تکسچرایزینگ است. بطور کلی رشته‌ها در نخ نوریس تکسچره نشده سطحی صاف دارند که این موضوع باعث می‌شود رشته‌های نخ نیمه‌آرایش‌یافته بصورت متراکم‌تری کنار همدیگر قرار بگیرند. انجام عملیات تکسچرایزینگ به دلیل ایجاد تموج و خاصیت حجیم بودن در نخ، باعث بهم ریختگی شکل ظاهری و فاصله گرفتن فیلامنت‌ها از هم می‌شود. همچنین تغییر شکل محسوس رشته‌های نخ‌های DTY در مقایسه با نخ POY آن به‌دلیل تاب اعمال شده به نخ طی عملیات تکسچرایزینگ و عدم تقارن این شکل مقطع عرضی نسبت به دایروی است که چولگی بیشتر آن را توجیه می‌کند.

نمودار شکل ۴ از آزمون پراش پرتوی ایکس نمونه‌های DTY حاصل شد. این گراف توسط نرم‌افزار تحلیل شد و میزان بلورینگی، مکان قله‌ها، نوع بلورها، فاصله‌ی صفحات بلوری و ابعاد بلور برای هر قله محاسبه شد. طبق داده‌های درج‌شده از آزمون پراش پرتوی ایکس در شکل ۴، میزان بلورینگی نخ DTY با سطح مقطع مستطیلی بیشتر از بلورینگی نخ با سطح مقطع دایروی تعیین شد.



Cross-sectional shape	Miller indices (010)			(012)			(101)			(212) - (300)			Degree of crystallinity (%)
	2θ [°]	d-spacing [Å]	Crystal Size [Å]	2θ [°]	d-spacing [Å]	Crystal Size [Å]	2θ [°]	d-spacing [Å]	Crystal Size [Å]	2θ [°]	d-spacing [Å]	Crystal Size [Å]	
Round	17.49	5.07	129.89	23.1	3.85	114.77	26.05	3.42	115.42	...	...	...	18.9
Rectangular	17.61	5.04	113.79	23.09	3.85	227.88	26.24	3.4	183.93	66.75	1.4	214.51	26.1

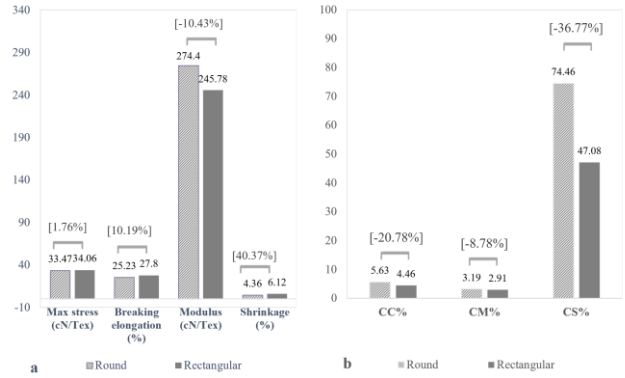
شکل ۴ نمودار و داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون پراش پرتوی ایکس نخ DTY با سطح مقطع‌های دایروی و مستطیلی

Figure 4 Graph and data obtained from XRD test of DTY with round and rectangular cross-sectional shapes

در فرایند ذوب‌ریسی، بیشینه مقدار بلورینگی مذاب پلیمری در ناحیه‌ی انجماد (هنگام سردشدن) اتفاق می‌افتد. با توجه به این‌که رشته‌های مستطیلی از سمت طول مستطیل در مقابل محفظه‌ی وزش هوای خنک قرار می‌گیرند، هوا به سطح بیشتری از مذاب برخورد کرده، انجماد مذاب پلیمری در مقطع عرضی کمتری نسبت به شکل مقطع عرضی دایروی صورت می‌گیرد. درنتیجه میزان بلورینگی نخ با شکل مقطع عرضی مستطیلی بیشتر از بلورینگی نخ با شکل مقطع عرضی دایروی است. از دیدگاه رئولوژیکی، هرچه خاصیت گرانروی الیاف بیشتر باشد، راحت‌تر در برابر تنش‌ها تغییر شکل پیدا می‌کنند. به بیان دیگر هرچه میزان بلورینگی در ماده‌ی جامد گرانروکشسان بیشتر شود، مقدار کشسانی نیز بیشتر می‌شود و در نتیجه، ماده در برابر نیروهایی که به آن اعمال می‌شود مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. بنابراین در نخ تکسچره با سطح مقطع دایروی به‌دلیل مقدار کمتر بلورینگی، ساختار آریخت‌تر (More Amorphous) و انعطاف‌پذیرتر است.

همچنین به‌طور میانگین اندازه‌ی بلور برای نخ DTY با سطح مقطع مستطیلی بیشتر از اندازه‌ی بلور نخ DTY با سطح مقطع دایروی به‌دست آمد؛ که خود گواهی دیگر بر تبلور بهتر و کامل‌تر رشته نخ با شکل مقطع عرضی مستطیلی نسبت به شکل مقطع عرضی دایروی است. فاصله‌ی صفحات بلوری در هر قله برای هر دو نمونه بدون تغییر معنادار است.

نمودار شکل ۵ الف مقایسه‌ی مقادیر استحکام، ازدیاد طول تا پارگی و مدول نخ‌های DTY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی را نشان می‌دهد. میزان جمع‌شدگی گرمایی نخ‌های DTY متأثر از نخ POY پایه‌ی آن‌ها و برای نخ DTY با سطح مقطع مستطیلی حدود ۴۰٪ بیشتر از سطح مقطع دایروی به‌دست آمد. جمع‌شدگی گرمایی نخ‌های رشته‌ای از پلیمرهای مصنوعی، با میزان تنش‌های باقی‌مانده در ساختار آن حین فرایند رابطه‌ی مستقیم و با میزان بلورینگی در ریزساختار نخ رابطه‌ی عکس دارد. هرچند میزان بلورینگی نخ DTY با شکل مقطع عرضی مستطیلی بیشتر از دایروی است، اما این عامل نتوانسته سبب کاهش جمع‌شدگی نخ شود و این اختلاف حاکی از بیشتربودن تنش‌های باقی‌مانده از فرایند در نخ با شکل مقطع عرضی مستطیلی است.



شکل ۵* تأثیر شکل سطح مقطع عرضی نخ چندرشته‌ای پلی‌استر بر الف) میزان جمع‌شدگی حرارتی و خواص کششی (استحکام، ازدیاد طول تا پارگی و مدول) و ب) خواص موجی نخ‌های DTY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی

Figure 5* Effect of fiber cross-sectional shape of PET textured yarns on a) thermal shrinkage and tensile properties and b) crimp properties of DTY yarns with round and rectangular cross-sectional shapes

* The numbers in brackets are the verification percent of properties between rectangular and round cross-sections

با مقایسه‌ی نتایج آزمون‌ها بر نخ‌های POY و DTY با سطح مقطع عرضی دایروی و مستطیلی مشخص شد مقادیر استحکام و مدول برای نخ‌های DTY و مقدار ازدیاد طول پارگی برای نخ‌های POY بیشتر است؛ زیرا کشش اعمال‌شده به نخ در فرایند تکسچرایزینگ باعث افزایش آرایش‌یافتگی زنجیرهای مولکولی می‌شود. هرچه آرایش‌یافتگی زنجیرهای مولکولی در راستای لیف بیشتر شود، مقاومت و سختی آن افزایش می‌یابد. بنابراین میزان کشش باقی‌مانده‌ی نخ کمتر شده، مقدار استحکام افزایش و ازدیاد طول تا پارگی کاهش پیدا می‌کند. همچنین مقدار مدول اولیه که متأثر از میزان بلورینگی و میزان آرایش‌یافتگی مناطق بلوری و آریخت است نیز افزایش می‌یابد. همسو با مقایسه‌ی مقادیر استحکام نخ‌های POY با شکل مقطع عرضی دایروی و مستطیلی، تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در مقادیر استحکام نخ‌های DTY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی مشاهده نشد. درصورتی‌که مقدار ازدیاد طول تا پارگی نخ DTY با سطح مقطع مستطیلی به مقدار جزئی بیشتر از دایروی به‌دست آمد که علت اصلی آن بیشتر بودن اندازه‌ی ازدیاد طول تا پارگی نخ POY پایه‌ی آن است. طبق آزمون‌های آماری مشخص شد اختلاف در استحکام نخ‌های DTY با شکل سطح مقطع دایروی و مستطیلی بدون تغییر معنادار، اما مقادیر چگالی خطی، جمع‌شدگی گرمایی، ازدیاد طول تا پارگی و مدول دارای اختلاف معنادار هستند.

در اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، نسبت میزان کشیدگی بعد از تاب‌دهنده به میزان کشیدگی قبل از تاب‌دهنده، T_2/T_1 برای نخ با شکل مقطع عرضی دایروی مساوی با ۱/۰۶ (میزان کشیدگی قبل از تاب‌دهنده برابر با ۱۱۳/۶و کشیدگی بعد از تاب‌دهنده برابر با ۱۲۰/۸) و برای نخ با شکل مقطع عرضی مستطیلی ۱/۱۴ (میزان کشیدگی قبل از تاب‌دهنده برابر با ۱۰۳/۱ و کشیدگی بعد از تاب‌دهنده برابر با ۱۱۸/۱) به‌دست آمد. مقدار عددی مناسب برای نسبت T_2/T_1 باید عددی در حدود ۱/۱ باشد تا نخ حاصل از تکسچرایزینگ عاری از عیوب مختلف باشد. از آن‌جایی که تفاوت زیادی بین T_2/T_1 دو نمونه مشاهده نشد و مقدار هر دو در محدوده‌ی قابل قبولی قرار گرفت، نمی‌توان کشش قبل و بعد تاب‌دهنده‌ی اصطکاکی را مؤثر بر خواص موجی نخ‌ها دانست.

بر اساس نتایج درج‌شده در نمودار شکل ۵ ب مشخص شد خواص موجی نخ تکسچره (جمع‌شدگی موج، مدول موج و پایداری موج) برای نخ DTY با سطح مقطع عرضی دایروی بهتر از سطح مقطع مستطیلی است. همان‌طور که گفته شد، با کاهش میزان بلورینگی در ریزساختار نخ، مقدار انعطاف‌پذیری آن افزایش یافته، تاب بهتری در فرایند تاب‌مجازی اصطکاکی به نخ در ناحیه قبل از تاب‌دهنده‌های اصطکاکی اعمال شده و پس از باز شدن تاب بعد از ناحیه تاب‌دهنده، فر و موج بیشتری در آن ایجاد می‌شود. درنتیجه خواص موجی نخ DTY با سطح مقطع عرضی دایروی به‌شکل قابل‌توجهی بهتر از نخ با سطح مقطع مستطیلی است. به‌علاوه، هرچه مقدار ضریب شکل سطح مقطع نخ کمتر باشد، خواص موجی آن بهتر خواهد بود. طبق محاسبات انجام‌شده، مقدار ضریب شکل برای نخ با سطح مقطع دایروی به‌طور تقریبی برابر با صفر و برای نخ با سطح مقطع مستطیلی تقریباً ۰/۳ به‌دست آمد که نتایج حاصل از آزمایش‌ها را تأیید می‌کند. بیشترین تغییرات خواص موجی به‌ترتیب به پایداری موج، جمع‌شدگی موج و مدول موج اختصاص داشت که آزمون‌های آماری با سطح معناداری ۹۵ در صد نشان داد اختلافات برای پایداری موج (۳۶٫۷۷٪) و جمع‌شدگی موج (۲۰٫۷۸٪) معنادار و برای مدول موج (۸٫۷۸٪) بدون تغییرات معنادار است.

آزمون جهندگی نیز برای نمونه‌ها با دو سطح مقطع دایروی و مستطیلی در دو بازه زمانی ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است.

نتایج اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بر نخ‌های تکسچره نشان داد در هر دو بازه زمانی انتخاب‌شده برای آزمون، مقدار جهندگی برای نخ DTY با شکل مقطع عرضی مستطیلی بیشتر بوده و شکل سطح مقطع دایروی تحت نیرو، خاصیت برگشت‌پذیری ضعیف‌تری نشان داده است. همسو با نتایج حاصل درباره‌ی ارتباط میزان بلورینگی با خواص موجی نخ‌ها، علت بیشتر بودن مقدار جهندگی نخ با سطح مقطع مستطیلی نسبت به دایروی، میزان بلورینگی بیشتر آن است. در واقع بلورها در ریزساختار پلیمری نخ، نواحی سختی هستند که از انعطاف‌پذیری نخ می‌کاهد و در اعمال تنش‌های ایستا یا پویا، بازگشت‌پذیری بیشتری را نسبت به نمونه‌های با بلورینگی کمتر نشان می‌دهد. در دو نمونه‌ی آزمون جهندگی برای نخ‌های DTY با سطح مقطع عرضی دایروی و مستطیلی تصویربرداری‌شده در شکل ۶، اختلاف ارتفاع نمونه‌ها به‌وضوح قابل مشاهده است. این نتیجه به‌خصوص دلیل اصلی توسعه استفاده از شکل سطح مقطع عرضی مستطیلی را در کاربردهایی (مانند فرش‌ها، پتوها، موکت‌های خاب‌دار و غیره) که جهندگی نخ در وضعیت خاب منسوج بافته‌شده اهمیت زیادی دارد، روشن می‌سازد.

جدول ۴ نتایج آزمون جهندگی در ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت برای نخ‌های DTY با مقطع عرضی دایروی و مستطیلی

Table 4 Results of resiliency test in 30 minutes and 24 hours of PET textured filament yarns with round and rectangular cross-sectional shapes

Cross-sectional shape	Resiliency in 30 minutes	Resiliency in 24 hours
Round	0.16	0.52
Rectangular	0.31	0.8

شکل ۶ مقایسه‌ی جهندگی (ایستادگی) نخ‌های رشته‌ای تکسچره پلی‌استر با سطح مقطع الف) دایروی و ب) مستطیلی

Figure 6 Comparison of textured PET filament samples resiliency with a) round and b) rectangular cross-sectional shapes

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش خواص فیزیکی نخ نوریس نیمه‌آرایش‌یافته (POY) و خواص فیزیکی و موجی نخ‌های تکسچره شده به روش تاب‌مجازی اصطکاکی (DTY) با دو سطح مقطع عرضی دایروی و مستطیلی که در شرایط یکسان ذوب‌ریسی و تکسچره شده است، مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر استحکام نخ POY با سطح مقطع عرضی دایروی بیشتر از مستطیلی و استحکام برای نمونه‌های DTY با سطح مقطع عرضی مستطیلی بیشتر از دایروی ملاحظه شد. به‌علاوه، ازدیاد طول تا پارگی نخ‌های POY و DTY با سطح مقطع مستطیلی اندکی بیشتر از دایروی دیده شد. نتایج آزمون T مستقل استحکام نخ‌های POY و ازدیاد طول تا پارگی نخ‌های DTY نشان داد دو نمونه با سطح مقطع دایروی و مستطیلی به‌لحاظ آماری دارای اختلاف معنادار هستند. همچنین این آزمون نشان داد که تفاوت معناداری بین مقادیر ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌های POY و استحکام نخ‌های DTY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی وجود ندارد. با وجود اختلاف ناچیز میان مدول نخ‌های POY با سطح مقطع دایروی و مستطیلی، تغییرات مدول در نخ‌های DTY کاملاً مشهود و مقدار آن برای نخ با سطح مقطع دایروی بیشتر از مستطیلی است. همچنین بدیهی است که مقدار استحکام و مدول برای نخ‌های DTY به‌دلیل اعمال کشش به نخ و افزایش آرایش‌یافتگی در فرایند تکسچرایزینگ بیشتر از نخ POY است و این موضوع برای ازدیاد طول تا پارگی برعکس

است. همچنین مقدار جمع‌شدگی گرمایی نخ DTY با شکل مقطع عرضی مستطیلی، باوجود بیشتر بودن میزان بلورینگی ریزساختار آن، بیشتر از جمع‌شدگی نخ با شکل مقطع دایروی بود.

در بررسی میزان بلورینگی نخ‌های DTY مشاهده شد درصد بلورینگی نخ با سطح مقطع مستطیلی بیشتر از دایروی است که به‌تبع آن، انعطاف‌پذیری ساختار نخ کاهش یافته، خواص موجی نخ تکسچره نسبت به نخ با شکل سطح مقطع دایروی ضعیف‌تر شده است. مقادیر T_2/T_1 دو سطح مقطع با اختلاف اندک و قابل چشم‌پوشی به‌دست آمد؛ بنابراین تأثیری از این ضریب در خواص نخ به‌وجود نیامده است. اما بررسی میزان جهندگی نخ DTY برای سطح مقطع مستطیلی به‌وضوح بیشتر ملاحظه شد و سطح مقطع دایروی تحت نیرو خاصیت برگشت‌پذیری ضعیف‌تری نشان داد و این نتیجه نشان می‌دهد در کاربردهایی که نخ رشته‌ای قرار است نقش نخ خاب را در منسوج داشته باشد و تحت بارهای ایستای طولانی مدت یا بارهای پویای کوتاه یا بلند مدت قرار گیرد، می‌تواند گزینه بهتری برای کیفیت نهایی محصول باشد.

بررسی و مقایسه‌ی خواص فیزیکی و موجی نخ‌های تکسچره رشته‌ای با سطح مقطع عرضی به‌شکل دایروی و مستطیلی، باوجود کاربردشان در صنعت نساجی و وجود متقاضی، مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش، علاوه بر بررسی نخ تکسچره تولیدشده در واحد صنعتی با دو سطح مقطع دایروی و مستطیلی، خاصیت جهندگی این دو نمونه نیز مقایسه شده است تا با توجه به نتایج حاصل، نخ با سطح مقطع مناسب بتواند در واحدهای تحقیق و توسعه‌ی صنعتی و دانشگاهی مورد استفاده قرار گیرد.

۵ قدردانی

لازم است از مدیریت محترم شرکت نفیس‌نخ به‌ویژه جناب آقای مهندس کشاورز و مدیر فروش سابق این شرکت جناب آقای مهندس بحرکاظمی برای همکاری و پیگیری‌های صمیمانه در تولید نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش تشکر و قدردانی شود.

مراجع

1. Fourne F., *Synthetic Fibers (Machines and Equipment, Manufacture, Properties)*, Hanser Publishers, Munich, 1999.
2. Bueno M. A., Aneja A. P., and Renner M., Influence of the shape of fiber cross section on fabric surface characteristics, *J. Mater. Sci.*, 39(2), 557–564, 2004.
3. Babaarslan O. and Hacioğullari S. Ö., Effect of fibre cross-sectional shape on the properties of POY continuous filaments yarns, *Fibers Polym.*, 14(1), 146–151, 2013.
4. Babaarslan O., An investigation on the properties of polyester textured yarns produced with different fiber cross-sectional shapes An investigation on the properties of polyester textured yarns produced with different fiber cross-sectional shapes, *Indastria Textila*, 69(4), 2018.
5. TOYDEMİR Y. and VATANSEVER BARAMOL D., Properties investigation of polyester yarns with different cross-sections, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, 10(1), 170–176, 2021.
6. Tajali B., *Comparision of PA6 filaments cross-sectional shapes on false-twist texured yarn properties*, MSc Thesis, Isfahan University of Technology, Textile Engineering Department, 2002.
7. Karaca E. and N. Kahraman N., Effects of Fiber Cross Sectional Shape and Weave Pattern on Thermal Comfort Properties of Polyester Woven Fabrics, 109, 2012.
8. Karaca E. and Ozcelik F., Influence of the cross-sectional shape on the structure and properties of polyester fibers, *J. Appl. Polym. Sci.*, 103,(4), 2615–2621, 2007.
9. Taylor P. Behera B. K. and Singh M.K., Role of filament cross-section in properties of PET multifilament yarn and fabric. Part I: Effect of fibre cross-sectional shape on transmission behaviour of fabrics, *The Journal of The Textile Institute*, 37–41, 2014.
10. Taylor P. Behera B.K. and Singh M.K., Role of filament cross-section in properties of PET multifilament yarn and fabric. Part II: effect of fibre cross-sectional shapes on fabric hand, *The Journal of The Textile Institute*, 37–41, 2014.
11. Barmag, FK-1000 Technical Data Sheet.
12. Standard Test Method for Linear Density of Yarn (yarn number) by the skein method, Annual Book of ASTM Standard, 01, 03, D 1907-01, 2007.
13. Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers, Annual Book of ASTM Standard, 07, 02, D3822-95a. 2001.
14. Testing of Textiles, Determination of Parameters for The Crimp of Tuxtured Filament Yarns, DIN, DIN 53840 Part 1, 1983.
15. Nanotechnology - Charactrization of Nanomaterials by X-Ray Diffraction (XRD) - Part 1: Test Method, Iranian National Standardization Organization, INSO 21951 part 1, 2017.
16. Textile Floor Coverings, Determination of Thickness Loss After Brief, Moderate Static Load, ISO, ISO 3415:1986, 1986.