

استفاده از روش طراحی آزمایشات رویه پاسخ (RSM) در مطالعه و پیش بینی تاثیرات توام دمای اکستروژن و شرایط انجماد در فرایند ذوب ریسی بر خواص فیزیکی و مکانیکی نخ نوریس پلی پروپیلن

هدی کسرایهⁱ؛ احمد موسوی شوشتریⁱⁱ؛ احمد بامنی مقدمⁱⁱⁱ؛ محمدعلی توانایی^{iv}

چکیده

خصوصیات ساختاری و فیزیکی لیف نوریس تاثیر زیادی روی خواص نهایی نخ کشیده شده دارد. این خصوصیات برگرفته از ویژگیهای پلیمر، شرایط فرایند ریسندهی، شرایط انجماد و انعقاد لیف می باشد. در این تحقیق تاثیرات توام دمای اکستروژن و شرایط سرمادهی در فرایند ذوب ریسی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور نمونه هایی از پلی پروپیلن در شرایط مختلف دمای اکستروژن و شرایط سرمادهی (فشار و دمای هوای خنک کننده) تولید شد. سپس خواص ساختاری (ضریب شکست مضاعف، چگالی)، خواص حرارتی و خواص فیزیکی آنها (استحکام، ازدیاد طول تا پارگی و جمع شدگی) مورد مطالعه قرار گرفت و در پایان شرایط بهینه برای تولید نخ پلی پروپیلن تعیین گردید. نتایج آزمایشات نشان می دهد که افزایش دمای ریسندهی در صورت ثابت نگه داشتن شرایط سرمادهی، سبب کاهش آرایش یافتگی، استحکام و جمع شدگی و از طرف دیگر افزایش درصد تبلور می گردد. افزایش دما و فشار هوای خنک کننده هم روی خواص فیزیکی و ساختاری (به غیر از درصد تبلور) اثر کاهشی دارد. برای بررسی توام دمای ریسندهی و شرایط سرمادهی از روش رویه پاسخ، RSM (Response Surface Methodology) برای طراحی آزمایشات استفاده شد، که در این طرح اولویت اول برای شرایط تولید بهینه دمای ریسندهی $240/5^{\circ}\text{C}$ ، دمای هوای خنک کننده 18°C و فشار هوای خنک کننده 118 N/m^2 تعیین گردید.

کلمات کلیدی

نخ پلی پروپیلن، خواص ساختاری، خواص فیزیکی، دمای اکستروژن، سرمادهی

Application of Experimental Design Response Surface Methodology (RSM) in Studying and Prediction of Simultaneous Effects of Extrusion Temperature and Cooling Condition on Physical and Mechanical Properties of Polypropylene As-spun Yarn

H. Kasraie, A. M. Shoushtari, A. B. Moghaddam, M. A. Tavanaie

ⁱ کارشناس ارشد مهندسی نساجی، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر Email: hoda.kasraie@gmail.com

ⁱⁱ استادیار دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: Email: amousavi@aut.ac.ir

ⁱⁱⁱ دانشیار دانشکده اقتصاد، گروه آمار دانشگاه علامه طباطبائی Email: bamenimoghaddam@atu.ac.ir

^{iv} دانشجوی دکتری مهندسی نساجی، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر Email: matavanaie@aut.ac.ir



ABSTRACT

As-spun filament yarn properties have high effects on final properties of drawn filament yarns. These properties are influenced significantly by spinning process parameters and freezing conditions.

In this study, the simultaneous effects of extrusion temperature and cooling conditions (cooling air temperature and pressure) on the physical and mechanical properties of as-spun filament yarn samples produced in a melt spinning Pilot Plant under condition of 2200m/min take-up speed, 235-260°C spinning temperature, 18-24 °C cooling air temperature and 90-1302 N/m² cooling air pressure, were investigated.

In order to use an experimental design method and to obtain the optimum condition the Response Surface Methodology were used and according to this method, 15 samples under different extrusion temperatures and cooling conditions were produced. Then structural properties (birefringence, crystallinity), physical properties (tenacity, breaking elongation and shrinkage) and their thermal behavior were evaluated.

Experimental results show that extrusion temperature has significant effects on structural and physical properties of all as-spun fiber samples. Birefringence, tenacity, modulus and shrinkage tests showed decreased trends with increasing extrusion temperature, while density showed an increased trend.

Physical and structural properties (except for density) decreased with increasing cooling air temperature and pressure, while the density showed an increased trend. According to applied experimental design (RSM) the optimum processing conditions were determined in which extrusion temperature of 240 °C, cooling air temperature of 18 °C and cooling air pressure of 118 N/m² were obtained.

KEYWORDS

Polypropylene, Filament yarn, Structural properties, Physical properties, Melt spinning

مولکولی به صورت موازی در امتداد محور الیاف چه در حالت بلورین و چه در حالت غیر بلوری ناشی می‌شود. عوامل زیادی روی آرایش‌یافتگی اثر می‌گذارند که مهم ترین آنها عبارتند از: گرادیان سرعت، توزیع زمان استراحت جریان و زمان ماندگاری پلیمر در خط ریسندگی [۲].

خنک‌سازی در فرایند ذوب‌ریسی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا برای تبدیل رشته مذاب به جامد و تشکیل لیف نیاز به از دست دادن گرما و انتقال حرارت به محیط می‌باشد. از طرف دیگر برای دستیابی به سرعت‌های بالای ریسندگی و همچنین برای اینکه خط ریسندگی از پایداری مناسب برخوردار باشد، لازم است که رشته مذاب در یک فاصله محدود که ناحیه خنک‌کننده نام دارد به حالت جامد تبدیل شود، شرایط این ناحیه به همراه دمای ریسندگی خصوصیات لیف را تا حد زیادی تحت تاثیر قرار می‌دهد [۴، ۵]. تنش محوری اعمال شده، تغییرات رئولوژیکی ناشی از کاهش دمای جت، دما و سرعت هوای خنک‌کننده از مهم‌ترین عوامل تغییر فرم مذاب در خط ریسندگی گزارش شده است [۶، ۷]. تغییر در سرعت هوای خنک‌کننده و دمای هوای خنک‌کننده روی مکان لازم برای انجماد لیف تاثیر گذار است [۸]. بلورینگی هم نقش مهمی در ذوب‌ریسی دارد. بلورینگی غیرهمدما و آرایش‌یافته به شرایط ریسندگی بسیار حساس می‌باشد. زمانیکه ریسندگی در بالای دمای ذوب انجام

۱- مقدمه

تولید نخ فیلامنتی در فرایند ذوب‌ریسی شامل آماده‌سازی سیال ریسندگی توسط ذوب نمودن آن، اکستروژن مذاب از رشته‌ساز به داخل اتاقک خنک‌کننده و پیچش فیلامنت‌های تولیدی بر روی بوبین می‌باشد. سپس نخ تولیدی که نخ نوریس نام دارد، تحت فرایندهای تکمیلی نظیر عملیات مکانیکی (کشش) و عملیات حرارتی (تثبیت حرارتی) برای تولید نخ های قابل مصرف در منسوجات قرار می‌گیرد [۲، ۳]. در فرایند تولید نخ نوریس هدف اصلی تولید نخی با استحکام، یکنواختی و آرایش‌یافتگی مناسب و تبلور پایین برای امکان کاربرد در عملیات بعدی (کشش، کشش-تکسچرایزینگ، کشش- پیچش و غیره) می‌باشد. عوامل زیادی روی فرایند ذوب‌ریسی نخ نوریس اثرگذار است که در این میان دمای ریسندگی و شرایط خنک‌سازی از اهمیت بالایی برخوردارند [۲].

دما تاثیر مهمی بر خواص رئولوژیکی مذاب پلیمری دارد. در حالت معمولی با افزایش دما، چسبندگی مذاب و زمان افت تنش‌ها کاهش می‌یابد. افزایش دمای ریسندگی با ثابت نگه داشتن سایر شرایط فرایندی موجب کاهش چسبندگی جت در قسمت‌های بالای خط ریسندگی و کاهش آرایش‌یافتگی در فیلامنت می‌شود [۴]. آرایش‌یافتگی از قرارگرفتن زنجیره‌های

گیرد، در حین خنک شدن فیلامنت‌ها عمل بلوری شدن انجام می‌گیرد [۲]. سرعت هوای خنک‌کننده و دمای هوای خنک‌کننده بطور نسبی روی تنش ریسندهی موثرند. با توجه به شرایط سرمادهی ساختار بلورین پلی‌پروپیلن دو شکل مختلف پیدا می‌کند. چنانچه پلی‌پروپیلن مذاب سریعاً سرد گردد، ساختار بلورین ناپایدار که شبه بلور نام دارد شکل می‌گیرد و چنانچه به آرامی سرد شود ساختار بلورین معروف به منوکلینیک بوجود می‌آید [۵].

ساختار و مورفولوژی نخ نورس تحت تاثیر عوامل مختلفی می‌باشد که تنش موجود در خط ریسندهی از آن جمله می‌باشد. تنش خط ریسندهی بیشتر با کاهش دمای اکستروژن، افزایش سرعت هوای خنک‌کننده و افزایش مقدار زنجیره‌های مولکولی با وزن مولکولی بالا، افزایش می‌یابد. دمای ریسندهی، نرخ خروجی مذاب و سرعت برداشت مهم‌ترین پارامترهایی هستند که می‌توانند اثرات مهمی در فرایند ریسندهی الیاف داشته باشند [۹].

بحث در مورد مدل سازی و پیش بینی خواص لیف بسیار مورد توجه دانشمندان بوده است. در این راستا، ZHANG و همکاران [۱۰] مدلسازی را برای الیاف پلی اتیلن ترفتالات انجام دادند که بر اساس سرعت و دمای هوای خنک کننده، سرعت فیلامنت و دمای ریسندهی بود که مدل آنها امکان پیش گویی خواصی مثل ضریب شکست مضاعف، ازدیاد طول و غیره را می‌دهد. از سوی دیگر، Joen به همراه همکاران [۱۱] مدلسازی چندفیلامنتی را برای الیاف انجام دادند که با استفاده از آن خواص الیاف (تنش، درصد تبلور و شعاع لیف) را به صورت تابعی از دما و سرعت هوای خنک کننده پیش گویی می‌کند. علاوه بر این، Huang [۱۲] با استفاده از شبکه های عصبی و الگوریتم ژنتیک پارامترهای نمره نخ و استحکام را برای الیاف نورس پلی پروپیلن مدلسازی نموده و به این نتیجه رسید که مدل مربوطه ضعف های روش تاگوچی را در مشخص نمودن پارامترهای بهینه بهبود می‌بخشد.

اصلاحات انجام شده در روش تاگوچی در بخش مدل سازی پاسخ ها سبب معرفی روش جدید رویه پاسخ توسط آمارشناسان و ریاضیدانان گردیده است. که این روش در طراحی آزمایشات یک روش بسیار مناسب می‌باشد، زیرا با کاهش تعداد نمونه ها علاوه بر نتیجه گیری مناسب، امکان پیش گویی خواص را با استفاده از مدل های بدست آمده می‌دهد [۱].

در این تحقیق، ریسندهی پلی‌پروپیلن در شرایط توام دمای ریسندهی و سرمادهی مورد مطالعه قرار گرفته است. محدوده دمای ریسندهی 225°C تا 260°C ، دمای هوای خنک‌کننده 18°C تا 24°C و فشار هوای خنک‌کننده 90 N/m^2 تا 130 N/m^2

انتخاب گردید. برای طراحی آزمایشات از روش RSM (رویه پاسخ) استفاده شده است که بر اساس محدوده‌های مشخص شده برای دمای ریسندهی، دما و فشار هوای خنک‌کننده، تعداد و مشخصات نمونه‌ها برای تولید انتخاب و طراحی گردید.

۲- تجربیات

مواد مصرفی مورد استفاده در این آزمایشات شامل گرانول و لعاب ریسندهی می‌باشد. برای تهیه نمونه نخ‌های مورد نیاز از گرانول پلی‌پروپیلن، 730 S محصول پتروشیمی اراک با شاخص جریان مذاب $16/8\text{ g}/10\text{ min}$ ، MFI استفاده شد و لعاب ریسندهی نیز به نام $\text{Stantex-T}900$ ساخت شرکت سمند گستر شیمی می‌باشد که با غلظت امولسیون ۱۵ درصد تهیه و مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱- دستگاهها

برای تهیه نمونه‌های نورس از یک واحد نوبریسی نیمه صنعتی (pilot plant) ساخت شرکت Automatik استفاده شد. خواص مکانیکی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری خواص کششی مدل $\text{EMTY}2050$ ساخت شرکت فناوری نوین Elima انجام شد. برای اندازه‌گیری ضریب شکست مضاعف از یک میکروسکوپ تداخلی (مدل $\text{Amplival Interphak}$) ساخت شرکت کارل زیس (Carl Ziess Jena) استفاده شد. برای بررسی خواص حرارتی نخ‌های فیلامنتی نورس از دستگاه گرماسنج پویشی تفاضلی مدل 2010 ساخت شرکت TA Instrument امریکا استفاده گردید.

۲-۲- روش ها (تهیه نمونه‌های نورس)

به علت اینکه تاثیرات توام دمای ریسندهی و شرایط سرمادهی مدنظر می‌باشد و از آنجاکه محدوده دمای ریسندهی 225°C تا 260°C ، دمای هوای خنک‌کننده 18°C تا 24°C و فشار هوا 90 N/m^2 تا 130 N/m^2 محدود و وسیعی است، لذا از یک روش طراحی آزمایشات به نام RSM، روش رویه پاسخ استفاده شده است که تعداد ۱۵ نمونه را مطابق شرایط مندرج در جدول (۱) انتخاب نموده است، این در حالی است که بدون استفاده از این روش باید تعداد ۳۵ نمونه تهیه می‌گردید [۱].

۲-۳- ارزیابی خواص

آزمایشاتی که روی لیف انجام می‌شود، شامل تعیین جمع‌شدگی، اندازه‌گیری خواص مکانیکی، تعیین چگالی، اندازه‌گیری ضریب شکست مضاعف و اندازه‌گیری خواص حرارتی می‌باشد. خواص کششی نخ‌های نورس مطابق

استاندارد ASTM D2822-95a و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری خواص کششی که بر اساس سیستم نرخ ثابت ازدیاد طول کار می‌کند، اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری جمع‌شدگی نخ‌ها مطابق استاندارد ASTM D2259-91a انجام گردید. برای تعیین جرم مخصوص نخ‌ها از روش غوطه‌وری، طبق آزمایش استاندارد ASTM DV92 استفاده شد. برای اندازه‌گیری ضریب شکست مضاعف از یک میکروسکوپ تداخلی گفته شده در قسمت قبل استفاده می‌شود. برای بررسی خواص حرارتی نخ‌های نورپس از دستگاه گرماسنج پویسی با مشخصات ذکر شده در بخش قبل استفاده گردید [۱۲]، [۱۴]، [۱۵].

جدول (۱): مشخصات نمونه‌های تولیدشده

نمونه	دمای ریسندگی (°C)	دمای هوای خنک‌کننده (°C)	فشار هوای خنک‌کننده (N/m ²)
۱	۲۳۷	۲۱	۱۱۷
۲	۲۴۰	۱۹	۱۰۰
۳	۲۴۰	۲۳	۱۳۳
۴	۲۴۸	۱۸	۱۱۷
۵	۲۴۸	۲۱	۹۳
۶	۲۴۸	۲۱	۱۱۷
۷	۲۴۸	۲۱	۱۱۷
۸	۲۴۸	۲۱	۱۱۷
۹	۲۴۸	۲۱	۱۱۷
۱۰	۲۴۸	۲۱	۱۱۷
۱۱	۲۴۸	۲۱	۱۴۰
۱۲	۲۴۸	۲۴	۱۱۷
۱۳	۲۵۶	۱۹	۱۳۳
۱۴	۲۵۶	۲۳	۱۰۰
۱۵	۲۶۰	۲۱	۱۱۷

سایر شرایط و ویژگی‌های ثابت فرایند برای کلیه نمونه‌ها در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): ویژگی‌های ثابت برای کلیه نمونه‌ها

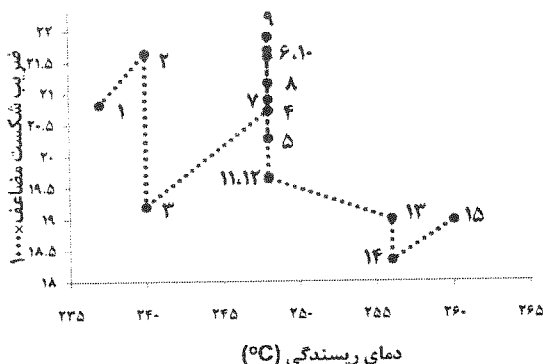
سرعت	سرعت غلتک	سرعت پمپ	سرعت پمپ
غلتک شیاردار (m/min)	اصطکاکی (m/min)	لغاب زنی (rpm)	ریسندگی (rpm)
۲۲۰۰	۲۰۰۰	۴۷/۷	۱۲/۱

۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی خواص فیلامنت‌های ریسیده شده

نمودار شکل (۱) تغییرات ضریب شکست مضاعف نمونه‌های نورپس را نسبت به دمای ریسندگی نشان می‌دهد. مطابق

نمودار شکل (۱) ملاحظه می‌شود که ضریب شکست مضاعف با افزایش دمای ریسندگی تقریباً یک روند کاهشی داشته است. البته این تفاوت در نمونه شماره ۱ و شماره ۱۵ محسوس تر است، به این خاطر که این دو نمونه تنها در دمای ریسندگی تفاوت دارند و نمونه شماره ۱۵ که دمای بالاتری دارد، دارای ضریب شکست مضاعف کمتری نسبت به نمونه شماره ۱ می‌باشد. محاسبات آماری نشان می‌دهد که نمونه‌های تولیدشده در شرایط مختلف دمای ریسندگی و شرایط سرمادهی تفاوت معناداری را در ضریب شکست مضاعف نشان می‌دهند. بر این اساس نمونه‌های تولیدشده در دمای ریسندگی ۲۵۶ °C و ۲۶۰ °C نمونه های (۱۳، ۱۴، ۱۵) دارای کمترین ضریب شکست مضاعف هستند. همچنین نمونه‌های تولید شده در دماهای ۲۳ °C و ۲۴ °C (نمونه های ۳، ۱۲، ۱۴) هوای خنک‌کننده هم نسبت به سایر نمونه‌ها از ضریب شکست مضاعف کمتری برخوردار هستند. در مورد نمونه ۴ و ۱۲ که تنها در دمای هوای خنک‌کننده با هم تفاوت دارند، با افزایش دمای هوای خنک‌کننده، کاهش ضریب شکست مضاعف و آرایش‌یافتگی ایجاد می‌گردد. نمونه‌های تولید شده در فشار ۱۱۷ N/m²، دارای بیشترین ضریب شکست مضاعف هستند. همچنین مقایسه نمونه های ۵ و ۱۱ که به ترتیب دارای کمترین و بیشترین فشار هوای خنک‌کننده هستند و سایر شرایط تولیدشان (دمای ریسندگی و دمای هوای خنک‌کننده) ثابت است، با افزایش فشار کاهش آرایش‌یافتگی بوجود می‌آید، که این مساله را می‌توان به علت سریع‌تر خنک شدن نمونه ۱۱ که دارای فشار هوای خنک‌کننده بالاتری است توجیه کرد. Hotter [۱۶] به همراه همکاران، اثرات توأم دمای ریسندگی و سرعت برداشت را روی ضریب شکست مضاعف مطالعه نمودند و در محدوده سرعت برداشت مورد مطالعه در این مقاله، با افزایش دمای ریسندگی پی به کاهش ضریب شکست مضاعف بردند که با نتایج موجود سازگاری دارد.



شکل (۱): تغییرات ضریب شکست مضاعف نمونه های نورپس نسبت به دمای ریسندگی

نتایج تحلیل آماری نشان داد که تغییر دمای ریسندگی منجر به تفاوت معناداری در چگالی نمونه‌ها گردیده است. از لحاظ آماری دماهایی که منجر به تفاوت معناداری در چگالی می‌شوند به سه سطح دسته‌بندی می‌شوند. سطح ۱ دما °C ۲۳۷، سطح ۲ دماهای ۲۴۰، ۲۴۸ و °C ۲۵۶ و سطح ۳ دمای °C ۲۶۰ را شامل می‌شوند که اختلاف چگالی بین سطوح دمایی ۱ و ۳ بیشتر می‌باشد.

در دماهای پایین ریسندگی، چسبندگی به مقدار حدنصاب برای ریسندگی نرسیده پس نمی‌تواند تنش‌های برشی و کششی لازم را تحمل کند. به همین دلیل ۴ درجه اختلاف دما، منجر به تفاوت قابل ملاحظه بین چگالی نمونه‌های تولید شده در دمای °C ۲۳۶ و °C ۲۴۰ می‌شود. ولی در دماهای ریسندگی در محدوده °C ۲۴۰-۲۵۶ چسبندگی به میزان قابل پذیرش رسیده و تنش‌هایی که اعمال می‌شود، تا اندازه‌ای در این محدوده به صورت مشابه می‌باشد با مقایسه چگالی و درصد تبلور نمونه ۴ و ۱۲ که تنها تفاوت شرایط تولیدشان دمای هوای خنک‌کننده می‌باشد، ملاحظه می‌شود که چگالی و درصد تبلور نمونه ۴ کمتر از نمونه ۱۲ می‌باشد. این مساله به این علت است که در نمونه شماره ۱۲ چون دمای هوای خنک‌کننده بالاتر است (بالاترین دمای هوای خنک‌کننده) بنابراین یکنواخت‌تر منجمد شده و زنجیره‌ها فرصت بهتری برای تبلور و آرایش‌یافتگی دارند و تنش اعمال شده یکنواخت‌تر عمل می‌کند. Kohler و همکاران [۱۷] در ذوب ریزی با سرعت پایین پلی پروپیلن ایزوتاکتیک با افزایش سرمادهی افزایش بلورینیگی را پی بردند، که با نتایج ارائه شده در این مقاله سازگار می‌باشد و فقط شرایط ذوب ریزی آزمایشگاه سرعت متوسط می‌باشد. نمودار شکل (۲) تغییرات چگالی را نسبت به دمای ریسندگی نشان می‌دهد.

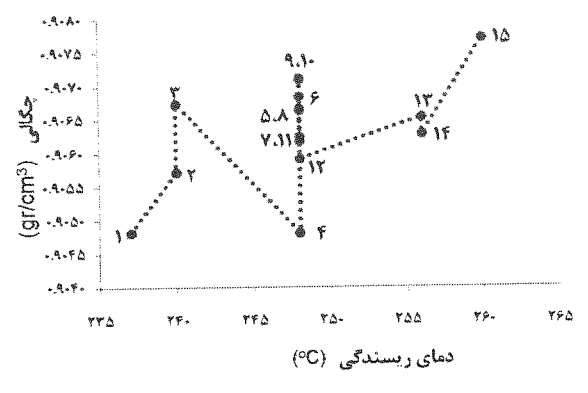
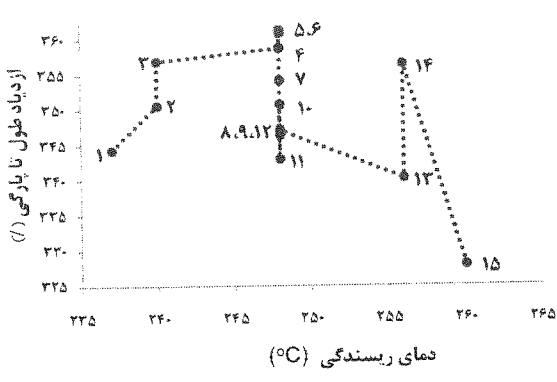
با توجه به تحلیل آماری دمای ریسندگی نسبت به شرایط سرمادهی اثرگذاری بیشتری در استحکام نمونه‌ها دارد. زیرا با افزایش دمای ریسندگی بدون تغییر شرایط دیگر آرایش‌یافتگی کم می‌شود، و بدنبال آن استحکام نمونه‌ها نیز باید کاهش یابد، که این مساله در مورد نمونه‌های شماره ۱ و ۱۵ که تنها تفاوت آنها در دمای ریسندگی می‌باشد، قابل دیدن است. که این نتایج با نتایج YANG سازگار می‌باشد [۱۹، ۱۸].

مقایسه نمونه شماره ۵ و ۱۱ که تنها در فشار هوای خنک‌کننده تفاوت دارند و سایر شرایط تولید آنها (دمای ریسندگی و دمای هوای خنک‌کننده) ثابت می‌باشد، با افزایش فشار کاهش استحکام دیده می‌شود. البته نمونه شماره ۵ و ۱۱ از لحاظ آماری اختلاف معناداری ندارند، ولی تغییرات استحکام نمونه ۱۱ شدیدتر از نمونه ۵ می‌باشد که شاید به دلیل فشار

بالاتر نمونه ۱۱ می‌باشد. زیرا فشار بالاتر جریان اغتشاشی بیشتری در مسیر انجماد ایجاد می‌کند که منجر به نایکنواختی ساختاری بیشتری می‌شود و اثر آن در خواص فیزیکی دیده می‌شود. با توجه به نمونه ۴ و ۱۲ ملاحظه می‌شود که افزایش دمای هوای خنک‌کننده در صورت ثابت بودن سایر شرایط تولید کاهش استحکام را باعث می‌شود، که این کاهش با کاهش آرایش‌یافتگی قابل توجیه می‌باشد. با افزایش آرایش‌یافتگی در جهت محور لیف ضریب شکست مضاعف افزایش خواهد یافت. بنابراین نتایج استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی تا حد زیادی توسط آرایش‌یافتگی قابل توجیه خواهد بود.

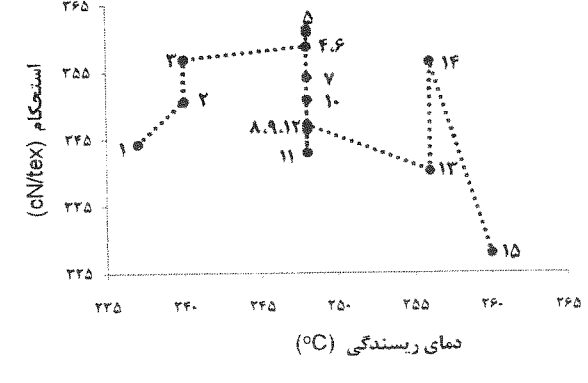
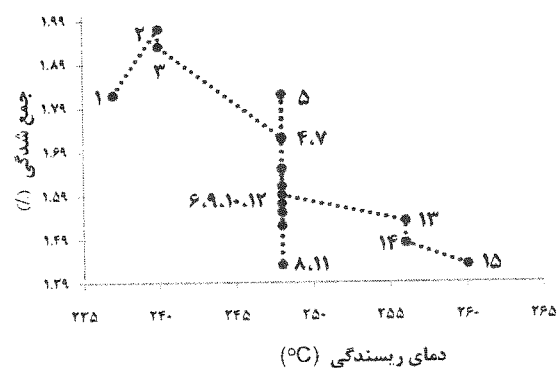
نمودار شکل‌های (۳) و (۴) تغییرات خواص مکانیکی را نسبت به دمای ریسندگی نشان می‌دهد. با توجه به تحلیل آماری با ضریب اطمینان ۹۵٪ فیلامنت‌های تولید شده در شرایط مختلف تفاوت معناداری در جمع‌شدگی با یکدیگر نشان دادند. با افزایش دمای ریسندگی جمع‌شدگی کاهش پیدا کرده است. از لحاظ آماری جمع‌شدگی نمونه‌های تولید شده در دو سطح دمایی با یکدیگر اختلاف معناداری دارند، که سطح ۱ شامل دماهای ریسندگی ۲۳۶ و °C ۲۴۰ و سطح دمایی ۲ شامل ۲۴۸، ۲۵۶ و °C ۲۶۰ می‌باشد. کاهش جمع‌شدگی با افزایش دما به این خاطر است که با افزایش دما آرایش‌یافتگی کاهش می‌یابد و تنش‌های باقیمانده در لیف کمتر شده و جمع‌شدگی کاهش می‌یابد.

همچنین نمونه‌های تولید شده در دماهای مختلف هوای خنک‌کننده از لحاظ آماری تفاوت معناداری با هم ندارند، ولی نمونه‌های تولیدی در فشارهای مختلف هوای خنک‌کننده تفاوت معناداری نشان دادند. همچنین مقایسه نمونه‌های ۴ و ۱۲ که تنها در دمای هوای خنک‌کننده تفاوت دارند و به ترتیب دارای کمترین و بیشترین دمای هوای خنک‌کننده هستند، نشان می‌دهد که با افزایش دمای هوای خنک‌کننده جمع‌شدگی کاهش می‌یابد. با توجه به نمونه‌های ۵ و ۱۱ که تمامی شرایط تولید ثابت است و تنها اختلاف فشار زیادی دارند، از نظر آماری اختلاف معناداری در جمع‌شدگی دیده شده و با افزایش فشار کاهش جمع‌شدگی ملاحظه گردیده است. نمودار شکل (۵) تغییرات جمع‌شدگی را نسبت به دمای ریسندگی برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده با نتایج Mukhopadhyay سازگار می‌باشد [۲۰].



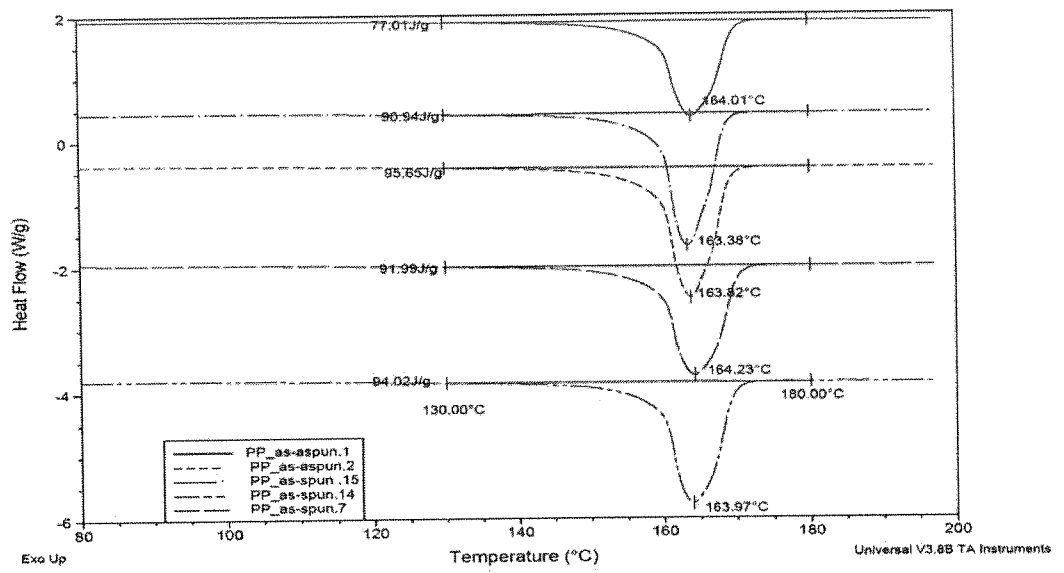
شکل (۴): تغییرات ازدیاد طول تا حد پارگی نمونه های نوریس نسبت به دمای ریسندگی نسبت به دمای ریسندگی

شکل (۲): تغییرات چگالی نمونه های نوریس نسبت به دمای ریسندگی



شکل (۵): تغییرات جمع شدگی نمونه های نوریس نسبت به دمای ریسندگی

شکل (۳): تغییرات استحکام نمونه های نوریس نسبت به دمای ریسندگی



شکل (۶): نتایج آزمایش آنالیز حرارتی برای نمونه ۵

۳-۲- میزان بلورینگی بوسیله آنالیز حرارتی

به دلیل محدودیت در انجام این آزمایش فقط گرمای ذوب ۵ نمونه از نمونه های تولید شده (از هر دمای تولیدی یک نمونه) با استفاده از فرمول شماره (۱) اندازه گیری شد که نتایج آن در جدول (۲) آمده است.

$$X = \left(\frac{\Delta H}{\Delta H^*} \right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن X درصد تبلور، ΔH آنتالپی نمونه و ΔH^* آنتالپی نمونه صد درصد بلوری است. مقایسه نمونه ۱ و ۱۵ که شرایط سرمادهی یکسانی برای تولید دارند و دمای ریسندگی آنها متفاوت است، نشان می دهد که افزایش دمای ریسندگی موجب افزایش درصد تبلور شده است، که این نتیجه با نتایج بدست آمده از آزمایش چگالی مطابقت دارد و مقدار درصد تبلور بدست آمده از روش ارزیابی چگالی بیشتر است. نتایج آزمایش آنالیز حرارتی برای ۵ نمونه اندازه گیری شده در شکل (۶) آورده شده است.

جدول (۳): نتایج آزمایش DSC

نمونه	گرمای ذوب (J/g)	دمای ذوب (°C)	درصد تبلور (%)
نمونه ۱	۷۷/۰۱	۱۶۴/۰۱	۲۶/۸۴
نمونه ۲	۹۵/۶۵	۱۶۳/۸۲	۴۵/۷۶
نمونه ۷	۹۱/۹۹	۱۶۴/۲۳	۴۴/۰۱
نمونه ۱۴	۹۴/۰۲	۱۶۳/۹۷	۴۴/۹۸
نمونه ۱۵	۹۰/۹۴	۱۶۳/۳۸	۴۳/۵۱

۳-۳- تعیین شرایط بهینه تولید با استفاده از روش رویه پاسخ (RSM)

روش رویه پاسخ، روشی برای مشخص کردن پاسخ بهینه است. در مورد این تحقیق، آزمون آماری RSM شرایط فرایندی تولید نمونه بهینه را با هدف آرایش یافتگی بالا و تبلور پایین مشخص کرد که البته علاوه بر ۱ نمونه که بهترین خواص را دارد، ۵ نمونه دیگر که دارای شرایط خوبی هستند نیز تعیین گردید که مشخصات آنها در جدول (۴) آمده است. همچنین شکل (۷) رویه پاسخ بدست آمده برای درصد تبلور را در دمای ثابت ۲۴۸ °C نشان می دهد. که این رویه در واقع با در نظر گرفتن شرایط بهینه بدست آمده است.

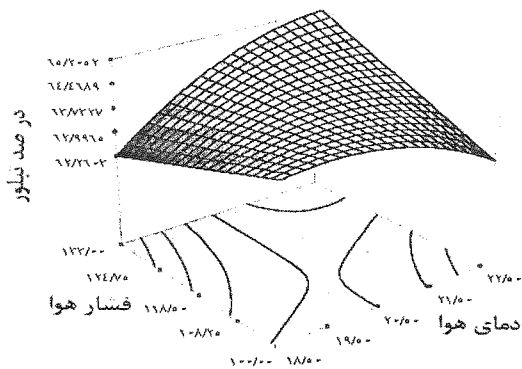
روش رویه پاسخ برای بدست آوردن نمونه بهینه رابطه بین متغیرها را مدل سازی کرده که برای آرایش یافتگی مدل ارایه شده به صورت فرمول شماره (۲) بدست آمد.

$$(2) \quad \begin{aligned} \text{آرایش یافتگی} = & -15/748 + 0/118 T_s + 0/12 T_{air} \\ & + 0/012 P_{air} - 2/472 \times 10^{-2} T_s^2 \\ & - 2/072 \times 10^{-2} T_{air}^2 - 5/339 \times 10^{-5} P_{air}^2 \end{aligned}$$

که در آن T_s دمای ریسندگی، T_{air} دمای هوای خنک کننده و P_{air} فشار هوای خنک کننده است. مدل ارائه شده بیانگر تاثیرات توأم دمای ریسندگی و شرایط سرمادهی می باشد و نشان می دهد که با تغییر دمای ریسندگی، سایر پارامترها باید چگونه تغییر کنند تا خواص نمونه بهینه باشد. همچنانکه انتظار می رفت نتایج بدست آمده از روش RSM با گمانه زنی های بخش های قبل سازگار است. بنابراین RSM می تواند روش خوبی برای طراحی آزمایشات باشد.

جدول (۴): مشخصات شرایط فرایندی نمونه های بهینه مشخص شده توسط روش RSM

نمونه های بهینه به ترتیب اولویت	دمای ریسندگی (°C)	دمای خنک کننده (°C)	فشار هوای خنک کننده (N/m ²)
نمونه منتخب	۲۴۰/۵	۱۸	۱۱۸
اولویت دوم	۲۴۰/۳	۱۸	۱۱۸
اولویت سوم	۲۴۰/۷	۱۸	۱۱۹
اولویت چهارم	۲۴۰	۱۸	۱۲۰
اولویت پنجم	۲۴۰	۲۱	۱۰۷
اولویت ششم	۲۴۰	۲۲	۱۰۴



شکل (۷): رویه بدست آمده برای درصد تبلور در شرایط ثابت ریسندگی در دمای ۲۴۸ °C

ع- نتیجه گیری

همان طور که در بخش های قبل گفته شد، تولید نمونه ها در شرایط تغییرات توأم دمای ریسندگی و سرمادهی انجام گرفت. مطابق داده های بدست آمده از آزمایشات با افزایش دمای

نتایج آزمایشات نشان داد که دمای ریسندگی و شرایط سرمادهی بطور توأم روی خواص لیف تاثیرگذار است. برای طراحی آزمایشات و تعیین شرایط بهینه از روش RSM استفاده شد که بر اساس این روش ۱۵ نمونه در شرایط مشخص شده برای تولید تعیین گردید. سپس با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایشات و داده‌هایی که در ابتدای کار به عنوان بهینه برای نرم‌افزار تعریف شد، یک محدوده را به عنوان بهترین محدوده انتخاب کرد. اولویت نخست برای شرایط تولید بهینه، دمای ریسندگی $240/5^{\circ}\text{C}$ ، دمای هوای خنک‌کننده 18°C و فشار هوای خنک‌کننده 118 N/m^2 تعیین گردیده است.

ریسندگی بدون تغییر شرایط سرمادهی کاهش ضریب شکست مضاعف و آرایش‌یافتگی دیده می‌شود. همچنین خواص فیزیکی از قبیل استحکام و جمع‌شدگی نیز با افزایش دمای ریسندگی، روند کاهشی نشان می‌دهد. ولی درصد تبلور مطابق هر دو روش ستون مدرج و آنالیز حرارتی با افزایش دما، روند افزایشی دارد.

در مورد شرایط سرمادهی نیز با افزایش دما و فشار هوای خنک‌کننده، کاهش ضریب شکست مضاعف و آرایش‌یافتگی و خواص فیزیکی دیده می‌شود. ولی درصد تبلور با افزایش دما و فشار هوای خنک‌کننده افزایش می‌یابد.

۵- مراجع

- [۱] Y. Jeon and C. Cox "Modeling of Multifilament PET Fiber Melt-Spinning" *Journal of Applied Polymer Science*,(2008), 110,2153-2163.
- [۲] C. Huang, T. Tang "Parameter optimization in melt spinning by neural networks and genetic algorithms " *Int J Adv Manuf Technol*,(2006) ,27,1113-1118.
- [۳] Annual Book of ASTM Standards, D3822-95a, 07, 02, 2001.
- [۴] Annual Book of ASTM Standards, D2259-91, 07, 01, 2001.
- [۵] Annual Book of ASTM Standards, 08, 01, 2001.
- [۶] J. F. Hotter, J. A. Cuculo, P. A. Tucker "Effects of modified air quenches on the high-speed melt spinning process" *Journal of Applied Polymer Science*,(1991) ,43,1511-1520.
- [۷] W.H. Kohler, A. J. McHugh "Sensitivity analysis of low-speed melt spinning of isotactic polypropylene" *Chemical Engineering Science*,(2007) ,62,2690-2697.
- [۸] R. YANG, R.R.Mather and A.F.Fotheringham "Processing, Structure, and Mechanical Properties of As-Spun Polypropylene Filaments—A Systematic Approach Using Factorial Design and Statistical Analysis", *Journal of Applied Polymer Science*,(2005) ,96,144-154.
- [۹] R. YANG, R.R.Mather and A.F.Fotheringham "The Influence of Fiber Processing Parameters on the Structural Properties of As-spun Polypropylene Fibers: a Factorial Design Approach" *Journal of Applied Polymer Science*,(2003) ,93,568-576.
- [۱۰] S. Mukhopadhyay, B. L. Deopura, R. Alagirusamy "Studies on Production of Polypropylene Filaments with Increased Temperature Stability" *Journal of Applied Polymer Science*,(2005) ,101,838-842.
- [۱] مونتگمری، "طرح و تحلیل آزمایش‌ها"، شاهکار، پروین،
- [۲] A.Ziabicki, "Fundamental of fibre formation ", wiley, New York, 1976.
- [۳] E.Andreassen, K.Grostad, O.Myhre, M.Braanthen, E.Hinrichsen, A. Syre, T.Lovgren, "Melting Behavior of Polypropylene Fibers Studied by Differential Scanning Calorimetry", *Journal of Applied Polymer Science*, (1995) ,57,1075-1084.
- [۴] M.Ahmed, "Poly Propylene fibres and Science Technology ", Elseveir, Amsterdam, 1982.
- [۵] James.Alex, "An Overview of Quench Systems ", IFJ,(1991),101-104.
- [۶] Jr, I. DIACIK and M.JAMBRICH," Influence of Cooling Condition on the structure and properties of high-Speed spun polypropylene fibres" , *Acta Polymerica*,(1990), 41.
- [۷] A. Dutta," Melt Spinning of (Multifilament) Poly (ethylene terephthalate) Fibers", *Polymer Engineering & Science*, (1987), 27, 1050-1058.
- [۸] A.Dutta and V.M.Nadkarni," Identifying Critical Process Variables in Poly (ethylene terephthalate) Melt Spinning ", *Textile Research Journal*, (1984).
- [۹] Y.C.BHUVANESH and V.B. GUPTA , " Computer simulation of Melt Spinning of Polypropylene Fibers Using a Steady-state Model ",*Journal of Applied Polymer Science*,(1995),58,663-674.
- [۱۰] C. Zhang , C. Wang , H. Wang and Y. Zhang "Multifilament Model of PET Melt Spinning and Prediction of As-spun Fiber's Quality" *Journal of Macromolecular Science, Part B*,(2007) ,46,793-806.