

بررسی تجربی پارامترهای فرایند تریسی و خواص فیزیکی نخریس بر خواص ساختاری الیاف پلی اتر سولفون

حسین قشلاقی قدیم^۱، علی دنیوی^۲

۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، h.gheshlagi@urmia.ac.ir

۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۵

چکیده

در این پژوهش، از نوعی پمپ سرنگی جهت بررسی تأثیر خواص فیزیکی نخریس دستگاه و خواص فیزیکی فرایند تریسی روی خواص ساختاری الیاف پلی اتر سولفون استفاده شده است. با استفاده از روش ریسندگی تر و فرایند جدایی فازی، الیاف پلیمری توپر بر پایه طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ، طرح مرکب مرکزی برای ساخت یک مدل آماری جهت پیش‌بینی دقیق استحکام کششی نسبت بهینه قطر الیاف به قطر نخریس ($d_p/d_n = 1$) تولید شد. الیاف پلیمری تولیدشده به‌عنوان جاذب در جذب اتمی استفاده شده است. یکی از اهداف این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای سرعت ریسندگی، نسبت طول به قطر نخریس، قطر نخریس و درصد وزنی پلیمر بر خواص مکانیکی و ساختاری نمونه‌هاست. برای بررسی خواص ساختاری، نمونه‌ها تحت آزمایش دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفتند؛ تصاویر مربوط به این آزمون نشان داد که ساختار میکروسلولی بسیار مناسبی حاصل شده است. با استفاده از تحلیل واریانس داده‌ها مشخص شد پارامترهای فیزیکی نخریس بیشترین اثر را در بهبود خواص الیاف تولیدشده دارند. نتایج تحلیل واریانس داده‌ها نشان داد که نسبت طول به قطر نخریس و قطر نخریس با بیشترین تأثیرگذاری به ترتیب روی داده‌های استحکام کششی و نسبت بهینه قطر الیاف به قطر نخریس، مؤثرتر از شرایط فرایندی می‌باشد. نهایتاً برای حداکثر کردن مقدار استحکام کششی و مقدار بهینه نسبت قطر الیاف به قطر نخریس، بهینه‌سازی به روش تابع مطلوبیت انجام و با نتایج تجربی فرایند ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های رویه پاسخ به‌دست آمده از کفایت خوبی جهت پیش‌بینی مقادیر متغیرهای پاسخ برخوردارند.

واژگان کلیدی

الیاف پلیمری، نخریس، پمپ سرنگی، تریسی، روش سطح پاسخ

۱. مقدمه

پلیمری و ساخت آنها انجام شده است. در این میان تلاش محققان سنگاپوری و ژاپنی نمود بیشتری داشته است. ساخت نخریس

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه فرایندهای موجود در ساخت الیاف پلیمری و دستگاه‌های لازم برای شکل‌دادن به محلول‌های

به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای ساخت غشاهای الیافی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و محققان زیادی در زمینه ساخت این وسیله موفق به ثبت اختراع شده‌اند. مثلاً ونتولد و همکاران (۱۹۹۸) اختراعی را در زمینه ساخت الیاف پلیمری ثبت کردند که با استفاده از پلی‌سولفون به‌عنوان ماده پلیمری، متیل پیرولیدون به‌عنوان حلال و یک مکانیزم ساخت الیاف، الیاف نامتقارن تدارک دیده بودند. فرایندی که آنها استفاده کرده بودند فرایند تر ریزی بود [۱]. در این روش محلولی که باید از آن الیاف ساخته شود، از درون یک نخ‌ریس عبور داده می‌شود. فرم این نخ‌ریس ممکن است به نحوی باشد که درون الیاف هوا یا سیالی جریان داشته باشد و سبب تشکیل لایه جداساز در قسمت درونی الیاف شود و یا اینکه محلول پس از خروج از نخ‌ریس از یک شکاف هوا عبور می‌کند؛ لذا در قسمت خارجی الیاف لایه جداساز شکل می‌گیرد. کاپنتایدیکس و همکاران (۲۰۰۲) ترکیبی از پلی ایمید و پلی‌اتر سولوفن را برای ساخت الیاف پلیمری به‌کار گرفتند و موفق شدند تا از آن در جداسازی گازی استفاده کنند. در این کار آزمایشگاهی اثر پارامترهای اصلی فرایند تر ریزی مانند غلظت محلول پلیمری، اندازه شکاف هوا و سرعت تولید الیاف بر ساختار و همچنین خواص جداسازی ترکیبی در جداسازی گازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در یک غلظت خاص از محلول پلیمری به نام غلظت بحرانی محلول پلیمری دچار تغییر عمده‌ای در تورفتگی زنجیره‌های پلیمری درهم می‌گردد. الیافی که محلول آنها دارای همچنین غلظتی باشد، دارای لایه سطحی بسیار نازک و حداقل تخلخل سطحی است [۲]. جیان لین و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای در ارتباط با تأثیر نسبت طول به قطر نخ‌ریس بر خواص و ریخت‌شناسی الیاف تولیدشده، سه نسبت طول به قطر سر نخ‌ریس^۱ صفر، ۲ و ۴ را مشخص کردند. آنها براساس مشاهدات خود توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ نشان دادند که در نسبت طول به قطر صفر، روی سطح مقطع الیاف منافذی با اندازه‌های مختلف و شکاف و خلل و فرج به وجود می‌آید. در حالتی که در نسبت ۲ هنوز شکاف‌های کوچک در سطح الیاف باقی‌مانده است. اما در نسبت ۴، سطح الیاف صاف و بدون خلل و فرج شد. در حالت کلی مجموع خلل و فرج سطحی با افزایش نسبت طول به قطر نخ‌ریس کاهش می‌یابد [۳]. طبق مطالعات انجام‌شده توسط زیابیسکی (۱۹۹۲) آثار کشش سطحی و جاذبه زمین (ناشی از وزن رشته‌ها) معمولاً در مقایسه با سایر

موارد ناچیز و کمتر از ۱ درصد کشش کل را شامل است که برای سرعت‌های کم یا زیاد قابل صرف‌نظر است. علاوه بر مواردی که ذکر شد، وزن مولکولی پلیمر مورد استفاده نیز در خصوصیات الیاف تولیدی مؤثر است. افزایش وزن مولکولی سبب افزایش نیروی رئولوژیکی و در نتیجه منجر به تنش بیشتر در الیاف می‌شود، که شکل‌گیری الیاف را در سرعت کمتری امکان‌پذیر می‌سازد [۴]. در بررسی دیگری توسط زیابیسکی (۱۹۷۶) در مورد پلیمر با وزن مولکولی بالاتر نشان می‌دهد که الیاف تولیدی در مقایسه با الیاف ریسیده شده از همان پلیمر با وزن مولکولی پایین‌تر، در سرعت کمتری به خصوصیات مورد نظر می‌رسند. مثلاً افزایش جرم حجمی و تبلور و کاهش در میزان جمع‌شدگی در جوش، در سرعت‌های پایین‌تری صورت می‌پذیرد [۵]. بررسی‌های انجام‌شده توسط فوستر و همکاران (۱۹۹۲) بر روی سه نوع پلیمر PET با وزن مولکولی مختلف نشان می‌دهد که افزایش وزن مولکولی در هر سرعت ریسندگی منجر به تشکیل بلورهای بزرگتر، به‌خصوص در جهت طولی می‌گردد [۶].

برای ساخت الیاف پلیمری روش‌های مختلفی وجود دارد. الیاف پلیمری با توجه به جنس، شکل و اندازه نهایی می‌توانند توسط چندین روش از قبیل خودآرایی، برق‌ریسی و جدائی فاز تهیه گردد [۷-۸]. در این تحقیق از فرایند جداسازی فازی جهت تولید الیاف پلیمری نامتقارن و متقارن که گاهی فرایند وارونه‌سازی فازی نیز نامیده می‌شود استفاده شده است. این روش برای پلیمرهایی استفاده می‌شود که بتوان آنها را در یک حلال مناسب حل کرد، چون محلول مستقیماً از طریق نازل اکستروود می‌شود تا روی بستر رسوب کند. در این تحقیق پارامترهایی که بر ریخت‌شناسی^۳ الیاف تر ریزی شده مانند قطر الیاف و یکنواختی آن تأثیرگذار است مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای الیاف مورد مطالعه در این مقاله کاربردهای زیادی عنوان شده است که از مهمترین آنها کاربرد این الیاف به‌عنوان جاذب در دستگاه جذب اتمی است [۹]. از دیگر موارد کاربرد این الیاف در پوشش مقاوم در برابر ضربات بالستیکی با وزن کم در صنایع خودروسازی است.

۲. طراحی آزمایش‌ها

هدف این تحقیق بهینه‌سازی توابع پاسخ؛ یعنی بیشینه‌سازی مقدار استحکام کششی و دستیابی به نسبت قطر الیاف به قطر نخ‌ریس واحد است. بدین‌منظور با استفاده از روش رویه پاسخ توابع پاسخ

مدلسازی شدند و با استفاده روش توابع مطلوبیت مقدار بهینه پارامترها استخراج شد. برای مدلسازی فرایند ابتدا آزمایش‌های طراحی شده انجام و مقدار توابع پاسخ برای هر آزمایش استخراج شد. سپس برای مدلسازی با روش رویه پاسخ و استخراج روابط بین متغیرهای مستقل و توابع پاسخ، از مدل مرتبه دوم به صورت رابطه ۱ استفاده شد [۱۰].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k (\beta_i x_i) + \sum_{i=1}^k (\beta_{ii} x_i^2) + \sum_i \sum_j (\beta_{ij} x_i x_j) + \varepsilon \quad (1)$$

به طوری که در رابطه ۱، β_0 عرض از مبدا، β_i ضریب رگرسیون خطی عامل i ام، β_{ii} ضریب رگرسیون درجه دوم عامل i ام، β_{ij} اثر متقابل عامل i ام و عامل j ام و Y متغیر وابسته می‌باشد. همان‌طور که در بیان مسئله ذکر شد، یک هدف از مطالعه حاضر برآورد مدلی به منظور تعیین مقادیر بهینه متغیرهای ورودی براساس متغیرهای پاسخ استحکام کششی و نسبت قطر الیاف به قطر نخ‌ریس است. در این تحقیق ابتدا پارامترهای تأثیرگذار مسئله انتخاب شدند. نسبت طول نخ‌ریس به قطر و قطر نخ‌ریس به عنوان مهم‌ترین پارامترها انتخاب شدند. سپس با توجه به شرایط عملی هنگام تولید نمونه‌ها و کنترل‌پذیری عوامل، سرعت ریسندگی و درصد وزنی پلیمر به عنوان دو عامل دیگر انتخاب شدند. پس از انتخاب عوامل فوق، بایستی سطوح آنها انتخاب می‌شدند. با توجه به مطالعات فراوان انجام شده مشاهده شد که اغلب در محدوده نسبت ۱ تا ۷ برابر، نسبت طول به قطر سر نخ‌ریس، بهترین شرایط جهت بهبود خواص الیاف پلیمری به دست می‌آید. بنابراین در پژوهش حاضر ۳ سطح، نسبت ۱، ۴ و ۷ به عنوان سطوح نسبت طول به قطر سر نخ‌ریس در نظر گرفته شدند. برای تعیین سطوح قطر نخ‌ریس براساس ایده پژوهش و کاربرد این الیاف، کمترین و بیشترین قطر به ترتیب ۰/۴ و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته و مابین این دو قطر به سه سطح مساوی تقسیم گردید. شد سطوح قطر سر نخ‌ریس به صورت ۰/۴ و ۱/۲ و ۲ درصد در نظر گرفته شد [۱۱]. برای تعیین سطوح سرعت ریسندگی، با انجام آزمایش‌ها مشخص شد که در سرعت‌های پایین‌تر از ۳ متر بر دقیقه نمونه‌ها شکل کامل خود را نمی‌گیرند و نمونه‌های ناقصی تولید می‌شوند. بنابراین ۳ متر بر دقیقه به عنوان کمترین سرعت ریسندگی در نظر گرفته شد. از طرفی با توجه به

ظرفیت دستگاه تزریق، ۹ متر بر دقیقه به عنوان بیشترین سرعت ریسندگی در نظر گرفته شد. بین این دو سرعت به سه سطح مساوی تقسیم گردید. برای تعیین سطوح درصد وزنی پلیمر، کمترین و بیشترین درصد وزنی پلیمر با توجه به شرایط عملی هنگام تولید نمونه‌ها و تحقیقات پیشین انجام شده به ترتیب ۱۵ و ۲۵ درصد در نظر گرفته شد [۱۲-۱۳]. به این ترتیب پارامترهای مسئله و سطوح در نظر گرفته شده برای آنها مطابق جدول ۱ انتخاب شدند. با طراحی آزمایش‌ها به روش طرح مرکب مرکزی، تعداد ۳۰ آزمایش برای این فرایند توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به دست آمد. در جدول ۲ طراحی آزمایش‌ها آمده است.

۳. نمونه‌سازی

جهت انجام فرایند تزریق از دستگاه اکستروژن پیستونی از نوع پمپ سرنگی که شامل بخش‌های مختلف تولید فشار، سیستم کنترل تزریق، نخ‌ریس و حمام انقباض می‌باشد طراحی و ساخته شد. [۱۴-۱۵]. شکل ۱ نمایی از دستگاه پس از بستن تمامی تجهیزات را نشان می‌دهد. طراحی و ساخت دقیق نخ‌ریس تأثیر زیادی در سطح مقطع رشته و خواص الیاف تولید شده دارد. بنابراین طراحی مطلوب نخ‌ریس برای هر نوع الیافی مورد نیاز است. نخ‌ریس دستگاه تزریق استفاده شده در تحقیق حاضر از جنس استیل ۳۱۶ است و انحراف مجاز سوراخ‌های آن مطابق با استاندارد ایزو ۹۰۰۰ با انحراف مجاز بین‌المللی ۶^۴ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود هر نخ‌ریس سه ویژگی دارد:

۱. نسبت طول به قطر
۲. زاویه مخروطی سر نخ‌ریس
۳. قطر داخلی نخ‌ریس

در طراحی نخ‌ریس به عنوان یکی از بخش‌های مهم فرایند، ابعاد مجزا باید به گونه‌ای طراحی شود که در مدت معین حجم محلول پلیمری وارده به نخ‌ریس برای شکل‌دهی پلیمر کافی باشد و الیاف تولید شده دارای کیفیت مطلوب فیزیکی باشند [۱۶-۱۷]. قسمت زاویه مخروط (α) با توجه به پیشنهاد محققان این فرایند، مقدار ۲۰ درجه انتخاب شد [۱۸]. با توجه به اینکه الیاف تولید شده به عنوان جاذب در دستگاه طیف سنج جذب اتمی استفاده می‌شوند و باید پایداری مکانیکی و شیمیایی و حلالیت بالا در محلول‌های مختلف داشته باشند، از پلیمرهایی چون پلی‌سولفون،

پلی اتر سولفون و پلی آکریلونیتریل که در حلال‌های متداول مانند دی متیل استامید، دی متیل سولفواکساید حل می‌شوند استفاده می‌شود. در این طرح با توجه به پیشنهادهاى محققان [۱۹-۲۰]، از پلی اتر سولفون که یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین الیاف مصنوعی به‌شمار می‌رود و در فرایند تر ریسی کاربرد دارد، به‌عنوان جامد پلیمری استفاده شده است. مکانیزم دوفازی شدن

برای فیلم پلی اتر سولفون شامل مراحل شیشه‌ای شدن، جدایی فاز مایع - مایع و انتقال محلول ژله‌ای به‌صورت برگشت‌پذیر حرارتی است. از دی متیل سولفواکساید نیز به‌عنوان حلال استفاده شده است. در تحقیق حاضر از آب با دمای ۲۵ درجه به‌عنوان ماده منعقدکننده (ضد حلال) استفاده شد [۲۱]. گفتنی است بر الیاف خروجی از نازل کشش اعمال نمی‌شود.

جدول ۱. پارامترها و سطوح مورد استفاده در آزمایش‌ها

واحد	سطوح آزمایش			فاکتور	شماره
	-۱	۰	۱		
m/min	۳	۶	۹	سرعت ریسنجی (V)	۱
wt%	۱۵	۲۰	۲۵	درصد وزنی پلیمر (P)	۲
mm	۰/۴	۱/۲	۲	قطر سر نخ‌ریس (D)	۳
—	۱	۴	۷	نسبت (L/D)	۴

جدول ۲. مشخصات فنی متغیرهای ورودی آزمایشات

شماره	سرعت ریسنجی	درصد وزنی پلیمر	قطر سر نازل	نسبت L/D	شماره	سرعت ریسنجی	درصد وزنی پلیمر	قطر سر نازل	نسبت L/D
۱	۳	۱۵	۰/۴	۱	۱۶	۹	۲۵	۲	۷
۲	۹	۱۵	۰/۴	۱	۱۷	۳	۲۰	۱/۲	۴
۳	۳	۲۵	۰/۴	۱	۱۸	۹	۲۰	۱/۲	۴
۴	۹	۲۵	۰/۴	۱	۱۹	۶	۱۵	۱/۲	۴
۵	۳	۱۵	۲	۱	۲۰	۶	۲۵	۱/۲	۴
۶	۹	۱۵	۲	۱	۲۱	۶	۲۰	۰/۴	۴
۷	۳	۲۵	۲	۱	۲۲	۶	۲۰	۲	۴
۸	۹	۲۵	۲	۱	۲۳	۶	۲۰	۱/۲	۱
۹	۳	۱۵	۰/۴	۷	۲۴	۶	۲۰	۱/۲	۷
۱۰	۹	۱۵	۰/۴	۷	۲۵	۶	۲۰	۱/۲	۴
۱۱	۳	۲۵	۰/۴	۷	۲۶	۶	۲۰	۱/۲	۴
۱۲	۹	۲۵	۰/۴	۷	۲۷	۶	۲۰	۱/۲	۴
۱۳	۳	۱۵	۲	۷	۲۸	۶	۲۰	۱/۲	۴
۱۴	۹	۱۵	۲	۷	۲۹	۶	۲۰	۱/۲	۴
۱۵	۳	۲۵	۲	۷	۳۰	۶	۲۰	۱/۲	۴

برای اندازه‌گیری استحکام کششی الیاف مورد آزمایش از دستگاه آزمون LA-7000-AL با حداکثر ظرفیت ۲۰۰ کیلو نیوتن و با توجه به مقالات مشابه در زمینه بررسی خواص مکانیکی پلی اتر سولفون از سرعت کشش ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه و همچنین

جهت اندازه‌گیری قطر الیاف از میکرومتر دیجیتال اینسایز ۳۱۰۹ با دقت یک‌هزارم میلی‌متر استفاده شد. برای شروع کار با دستگاه اندازه‌گیری استحکام کششی الیاف مورد آزمایش ابتدا از کالیبره بودن آن اطمینان حاصل شد. نیرویی که بین دو فک دستگاه به

۴. نتایج و بحث

با توجه به کاربرد این الیاف به عنوان جاذب در این پژوهش مقادیر بهینه پارامترهای ورودی را می توان در سطوح مختلف انتخاب کرد. مثلاً اگر الیاف پلیمری در دستگاه جذب اتمی به عنوان جاذب عمل کنند، الیاف تولیدشده باید خلل و فرج و حفره های بیشتری در سطح داشته باشند تا غلظت مقادیر بسیار جزئی و ناچیز عناصر فلزی نمونه های مورد آزمایش را در خود جذب کرده تا بتوان درصد عناصر را به دست آورد. بنابراین از تصاویر SEM برای بررسی دقیق خواص ساختاری الیاف استفاده شده است.

۴-۱. تحلیل متغیر پاسخ نسبت قطر الیاف به قطر نخ ریس

تحلیل واریانس پرکاربردترین تحلیل برای بررسی اثر عوامل روی فرایند است. تحلیل واریانس با فرض گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آن به آزمون فرضیه تهی با استفاده از مقدار p می پردازد. گوسی بودن توزیع خطا از روی نمودار احتمال مقادیر باقیمانده که در شکل ۴ آورده شده، بررسی می شود. پراکندگی توزیع نقاط، اطراف خط مورب نشان دهنده گوسی بودن توزیع مقادیر باقیمانده یا همان خطاهاست. علاوه بر آن مقدار p که مقدار عددی آزمون گوسی بودن توزیع را در اختیار می گذارند روی نمودار آورده شده است. بزرگتر بودن p از مقدار بازه اطمینان (0.05) نشان می دهد که مدل تخمینی برازش شده در سطح اطمینان 0.05 قرار دارد [۱۰]. جدول ۴ نتایج به دست آمده از تحلیل نسبت قطر الیاف به قطر نخ ریس را نشان می دهد. پارامترهایی که سطح اطمینان کمتر از 0.05 دارند پارامتر مؤثر و بقیه غیرمؤثر هستند. ضریب تعیین به عنوان نسبت تغییرات توصیف شده توسط مدل به تغییرات کل بیان می شود که معیاری از درجه تناسب برازش است. بنابراین هرچه مقدار ضریب تعیین به یک نزدیک تر شود، قدرت مدل برازش یافته در توصیف تغییرات پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل بیشتر می باشد. ضریب تعیین مدل به دست آمده، 0.979 می باشد که نشان از دقت بالای مدل دارد. همچنین ارزش p عامل عدم برازش مدل، 0.697 شد که نشان دهنده غیر مؤثر بودن این عامل و برازش مؤثر مدل است.

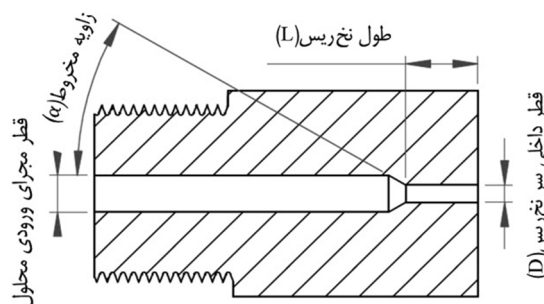
۴-۱-۱. بررسی اثر پارامترهای ورودی بر نسبت قطر الیاف به قطر نخ ریس

نمودار تأثیر اصلی عوامل می تواند برای ترسیم طرح استنتاجی اولیه ای درباره تأثیر عوامل و تعاملات آنها بر متغیر خروجی

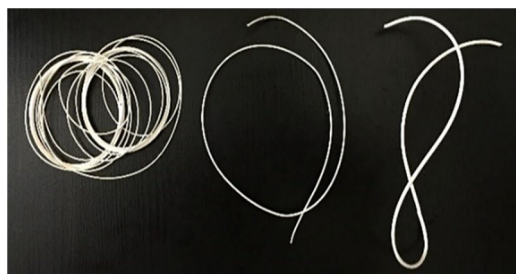
الیاف به طول 10 سانتی متر اعمال می شود از صفر شروع شد و به تدریج تا زمان پارگی الیاف افزایش یافت و استحکام کششی نهایی در لحظه قبل از پارگی برحسب نیرو بر سطح مقطع محاسبه شد. گفتنی است آزمایش ها در هر سطح، در 3 تکرار انجام شد و میانگین این 3 تکرار به عنوان داده نهایی گزارش شد. آزمون کشش نمونه های الیاف پلیمری مطابق با استانداردهای ASTM-D638 انجام گرفت. شکل ۳ تعدادی از نمونه های تولیدی را نشان می دهد. همچنین جدول ۳ داده های اولیه به دست آمده پس از انجام آزمایش ها را نشان می دهد. در حین انجام آزمایش فشار در تمام نقاط یکنواخت است و از افت فشار و اصطکاک به دلیل ناچیز بودن صرف نظر می شود. نهایتاً نمونه ها توسط دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی میرا 3 ساخت شرکت تسکان جهت مشاهده ساختار سلولی سطح مقطع نمونه ها تصویربرداری شد.



شکل ۱. طرح مونتاژ شده دستگاه تولید الیاف توپر



شکل ۲. پارامترهای مجرای نخ ریس



شکل ۳. نمایی از الیاف تولیدشده در سه قطر مختلف 0.04 ، 0.12 و 0.2

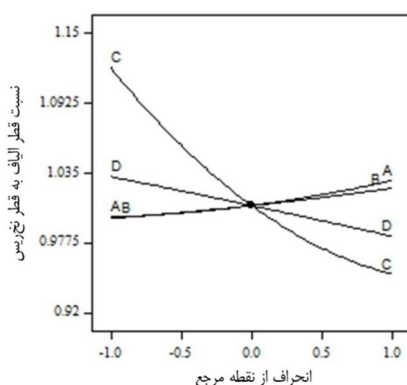
میلی متر

الیاف به قطر نخریس افزایش یافته و در مقدار $(dp/dn = 1)$ به مقدار بهینه حدود ۲۰ می‌رسد، با افزایش بیشتر درصد وزنی نسبت قطر الیاف به قطر نخریس افزایش می‌یابد. لذا در درصدهای کمتر از ۲۰ قطر الیاف کوچکتر از مقدار واقعی است و در درصدهای بالاتر قطر الیاف بزرگتر. به‌طور کلی با افزایش درصد وزنی پلیمر، نسبت قطر الیاف به قطر نخریس افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۸ افزایش غلظت پلیمر سبب ایجاد ساختار اسفنجی برای پلیمر پلی‌اتر سولفون می‌گردد. این افزایش به این دلیل است که در طول تر ریزی، وقتی گرانیوی به‌اندازه کافی زیاد می‌شود، سرعت جابه‌جایی محلول پلیمر هنگام خروج از نخریس و جابه‌جایی حلال با ضد حلال پایین است، در نتیجه الیاف با ساختار منظم و با تقارن بیشتر تشکیل می‌شود، نهایتاً الیاف تولید شده تحت کشش کمتری قرار گرفته و قطر از مقدار واقعی بیشتر می‌شود. با افزایش گرانیوی، درصد وزنی پلیمر در حجم مشخص از الیاف تولید شده بیشتر و قطر الیاف نیز زیاد می‌شود.

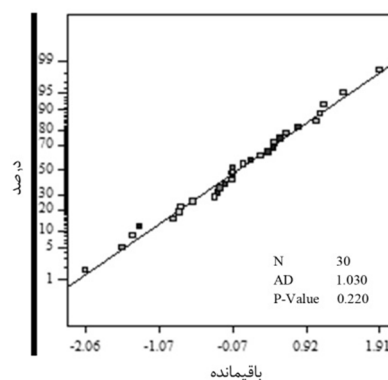
استحکام کششی به کار رود. این نمودار در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل های ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت ریسندگی، نسبت قطر الیاف به قطر نخریس افزایش یافته و به مقدار بهینه حدود ۶ متر بر دقیقه می‌رسد. افزایش بیشتر سرعت ریسندگی نسبت قطر الیاف به قطر نخریس را افزایش می‌دهد. با توجه به شکل ۷، این افزایش به این دلیل است که زمانی که نرخ تغذیه افزایش می‌یابد، قطر الیاف یا اندازه دانه‌ها نیز متناظر با آن زیاد خواهد شد؛ زیرا حجم بزرگتری از محلول از نوک نخریس بیرون کشیده می‌شود. از طرف دیگر، با افزایش نرخ تغذیه برابر با نرخ محلول حمل شده توسط جت فشار نیز زیاد می‌شود. در نتیجه محلول به میزان بیشتری کشیده می‌شود و این عمل در مقابل افزایش قطر با افزایش نرخ تغذیه قرار گرفته و محدودیتی را در افزایش قطر الیاف ایجاد می‌کند که این امر در قطرهای کوچکتر بیشتر به چشم می‌آید. از شکل های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که ابتدا با افزایش درصد وزنی پلیمر، نسبت قطر

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمایش‌ها

شماره	نسبت قطر الیاف به نازل (dp/dn)	استحکام کششی (TS)	شماره	نسبت قطر الیاف به نازل (dp/dn)	استحکام کششی (TS)	شماره	نسبت قطر الیاف به نازل (dp/dn)	استحکام کششی (TS)
۱	۱/۱۲۵	۱۳/۹۵	۱۱	۱/۰۸۱۵	۱۲/۲۸	۱	۱/۱۲۵	۱۴/۸۰
۲	۱/۱۷۵	۱۵/۷۸	۱۲	۱/۱۲۷۵	۱۳/۲۹	۲	۰/۹۵۲۵	۱۵/۶۵
۳	۱/۱۵۷	۱۵/۰۲	۱۳	۰/۹۴۹	۱۲/۸۷	۳	۱/۰۳۲	۱۳/۶۵
۴	۱/۲۲۲	۱۶/۴۹	۱۴	۰/۹۴۵	۱۴/۲۴	۴	۰/۹۸۳	۱۵/۰۸
۵	۰/۹۵۵	۱۵/۶۱	۱۵	۰/۹۴۹	۱۳/۱۲	۵	۱/۰۰۹۱	۱۵/۴۲
۶	۰/۹۶۵	۱۷/۴۷	۱۶	۰/۹۶۲۵	۱۴/۰۷	۶	۱/۰۰۴۱	۱۴/۷۵
۷	۰/۹۶	۱۴/۶۶	۱۷	۱	۱۳/۶۵	۷	۱/۰۱۰۸	۱۴/۷۲
۸	۰/۹۸۵	۱۶/۴۹	۱۸	۱/۰۲۷۸	۱۴/۶۳	۸	۱/۰۱۲۵	۱۵/۰۲
۹	۱/۰۰۵	۱۴/۱۰	۱۹	۰/۹۹۵۵	۱۲/۶۷	۹	۱/۰۰۶۶	۱۵/۵۱
۱۰	۱/۰۸۷۵	۱۴/۸۵	۲۰	۱/۰۲۵	۱۴/۵۳	۱۰	۱/۰۰۸۳	۱۵/۰۲



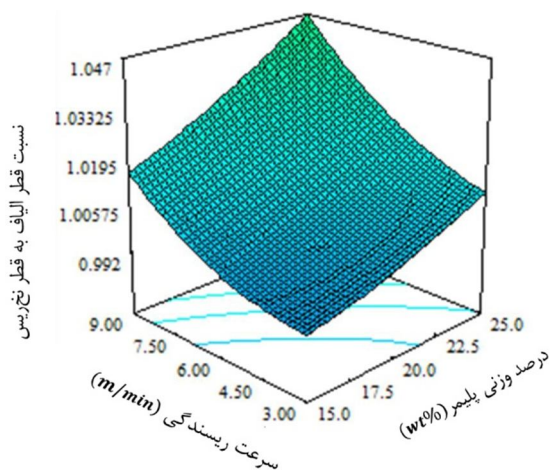
شکل ۵. تأثیر پارامترهای ورودی بر نسبت قطر الیاف به قطر نخریس



شکل ۶. نمودار احتمال گوسی مقادیر باقیمانده برای متغیر پاسخ نسبت قطر الیاف به قطر نخریس

جدول ۴. تحلیل واریانس پارامترهای ورودی برای متغیر پاسخ نسبت قطر الیاف به قطر نخریس

احتمال P	احتمال F	میانگین مربعات	مدل
<۰/۰۰۰۱	۴۹/۰۳	۰/۰۱۲	رگرسیون
<۰/۰۰۰۱	۳۱/۹۴	۰/۰۰۴۰۷	سرعت ریسندگی
۰/۰۰۵	۲۱/۱۰	۰/۰۰۲۴۵	درصد وزنی پلیمر
<۰/۰۰۰۱	۹۰/۱۴	۰/۱۳	قطر سر نخریس
<۰/۰۰۰۱	۵۵/۴۰	۰/۰۱۱	نسبت (L/D)
۰/۰۰۷	۱۹/۸۲	۰/۰۰۰۰۸	V-V
۰/۱۸۷	۱/۹	۰/۰۰۰۰۹۴	P-P
<۰/۰۰۰۱	۳۷/۸۴	۰/۰۰۰۲۰۹	D-D
۰/۵۵۱	۰/۷۴	۰/۰۰۰۰۰۱۸	(L/D)·(L/D)
۰/۰۰۶	۹/۷۴	۰/۰۰۰۱۹۶	V-P
<۰/۰۰۰۱	۳۳/۳۲	۰/۰۰۱۴۸	V·D
۰/۰۰۹	۸/۲۱	۰/۰۰۰۲۰۳	V·(L/D)
۰/۰۱۹	۱۹/۱۵	۰/۰۰۰۷۳۹	P·D
۰/۱۱۲	۲/۸۴	۰/۰۰۰۰۱۴	P·(L/D)
<۰/۰۰۰۱	۴۲/۶۲	۰/۰۰۴۶۵	D·(L/D)
۰/۹۴	۰/۳۷	۰/۰۰۰۰۰۲۹	عدم برازش



شکل ۶. نمایش نمودار سه بعدی اثر هم‌زمان دو متغیر سرعت - درصد وزنی پلیمر بر نسبت قطر الیاف به قطر نخریس

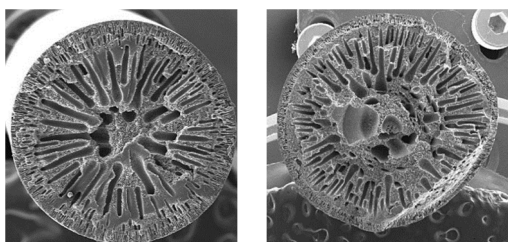
مقدار بهینه، قطر الیاف تولیدشده بیشتر از مقدار واقعی می‌شود و با بیشتر شدن آن از مقدار بهینه قطر الیاف تولیدشده کمتر می‌شود. بنابراین افزایش و کاهش بیش از حد قطر نخریس اثر چندانی بر بهبود نسبت قطر الیاف به قطر نخریس ندارد. مطابق با شکل ۱۰، این می‌تواند به این صورت توجیه شود که وقتی اندازه قطره در نوک روزنه کاهش می‌یابد (شکل ۱۰ الف)، هنگام خروج محلول از سر نخریس زمان کمتری طول می‌کشد تا عمل جدایی فاز انجام شود و پلیمر رسوب کند. به دلیل سرعت بالای این فرایند ساختار الیاف تولیدشده مشبک مانند می‌شود و ساختار متخلخل

با توجه به اینکه گره‌خوردگی زنجیرهای پلیمری تأثیر مهمی در دانه‌ای شدن الیاف ترریسی شده دارد، برای تهیه الیاف بدون مهره، یک گرانیوی حداقل لازم است. با توجه به جدول ۴ از تحلیل واریانس ملاحظه می‌شود که قطر نخریس یکی از پارامترهای اساسی و مهم‌ترین آنهاست. ترکیب D و D^2 هر دو در نسبت قطر الیاف به قطر نخریس تأثیر دارند. با توجه به شکل ۹، افزایش در قطر با سرعت بیشتری، نسبت قطر الیاف به قطر نخریس را افزایش می‌دهد و در مقدار $1/2$ میلی‌متر به نسبت $(d_p/d_n=1)$ می‌رسد. مشخص است که با کاهش قطر نخریس از

مولکولی یا گرانیوی سیال بیشتر باشد و قطر نازل کمتر باشد، در سرعت ثابت تنش بیشتری بر پلیمر اعمال می‌شود و برای رهایی از تنش پسماند به زمان اقامت (طول بیشتر نازل) نیاز است. بنابراین در مقدار نسبت طول به قطر سر نخ‌ریس کم، تنش پسماند ایجاد شده باعث اختلال در یکنواختی جریان محلول در لوله می‌شود و در هنگام خروج محلول از سر نخ‌ریس درجه بالایی از تورم الیاف تر ریزی شده مشاهده می‌شود و نسبت قطر الیاف به قطر نخ‌ریس تولید شده بزرگ‌تر از یک می‌شود. با افزایش نسبت طول به قطر سر نخ‌ریس الیافی با ساختار یکنواخت و همگن تولید می‌شود. ولی با افزایش بیش‌ازحد نسبت طول به قطر سر نخ‌ریس، نسبت قطر نخ‌ریس به الیاف تولید شده کوچکتر از یک می‌شود.

پیدا می‌کند و قطر الیاف تولید شده بزرگتر از مقدار واقعی می‌شود. برعکس، در قطرهای بزرگ‌تر از مقدار بهینه فرایند تغییر فاز به‌کندی صورت می‌گیرد و ساختار فیزیکی الیاف متراکم‌تر می‌شود و قطر الیاف کوچک‌تر از مقدار واقعی می‌شود.

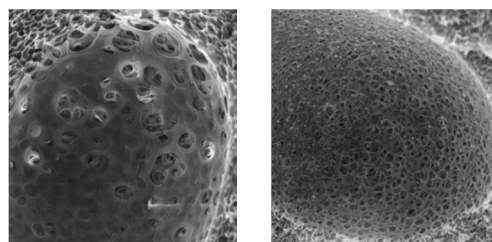
از شکل ۹ ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت طول به قطر سر نخ‌ریس، نسبت قطر الیاف به قطر نخ‌ریس کاهش یافته و به مقدار بهینه در حدود ۵ می‌رسد. با بررسی شکل ۱۱ این امر می‌تواند به این صورت توجیه شود که ارتباط بین طول به قطر نازل در تورم یا شیرینک الیاف خروجی از نازل مربوط به نسبت زمان لازم برای رهایی از تنش ناشی از جریان در نازل (زمان استراحت) نسبت به زمان اقامت در نازل است. هرچه وزن



(ب)

(الف)

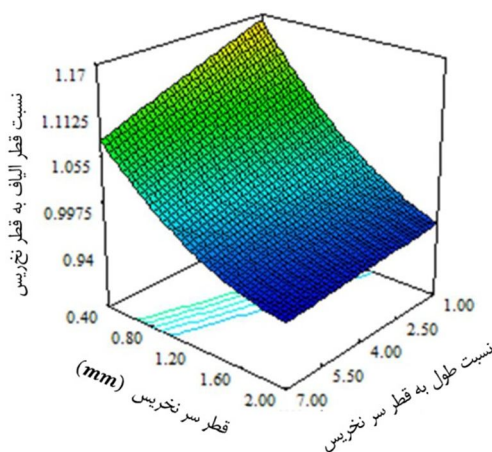
شکل ۸. تصاویر SEM با بزرگنمایی ۱۵۰ برابر (الف) آزمایش نوزدهم، (ب) آزمایش بیستم



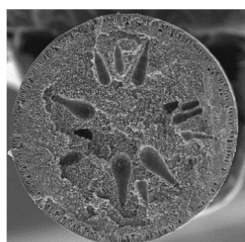
(ب)

(الف)

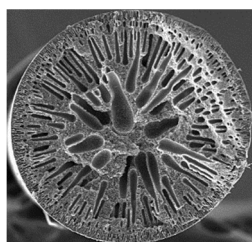
شکل ۷. تصاویر SEM از سطح مقطع برش خورده الیاف با بزرگنمایی ۱۵۰۰ برابر مربوط به (الف) آزمایش شماره ۱۷، (ب) آزمایش شماره ۱۸



شکل ۹. نمایش نمودار سه‌بعدی، اثر هم‌زمان دو متغیر قطر سر نازل - نسبت طول به قطر سر نخ‌ریس بر نسبت قطر الیاف به قطر نخ‌ریس

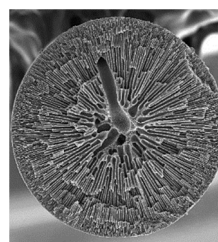


(ب)

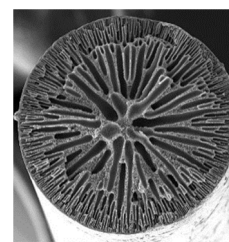


(الف)

شکل ۱۱. تصاویر SEM از سطح مقطع برش خورده الیاف با بزرگنمایی ۱۵۰ برابر، (الف) آزمایش شماره ۲۳، (ب) آزمایش شماره ۲۴



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. تصاویر SEM از سطح مقطع برش خورده الیاف با بزرگنمایی ۱۵۰ برابر مربوط به (الف) آزمایش شماره ۲۱، (ب) آزمایش شماره ۲۲

۴-۱-۲. تحلیل رگرسیون نسبت قطر الیاف به قطر نخریس

تحلیل برازش چندگانه برای یافتن رابطه‌ای بین پارامترها و متغیر پاسخ نسبت قطر الیاف به قطر نخریس انجام شد. با توجه به تحلیل واریانس، چندجمله‌ای مرتبه دوم گزینه مناسبی بود. معادله برازش با مقادیر واقعی (کد نشده) بر اساس عوامل جدول ۱ به صورت رابطه ۲ ارائه شد:

$$y(d_p/d_n) = +1.182 - 0.00066V + 0.0002945P - 0.18295D - 0.012324L/D + 0.0006175V^2 + 7.6316P^2 + 0.255193D^2 - 0.000094(L/D)^2 + 0.00023V \cdot P - 0.0041V \cdot D - 0.0004V \cdot L/D - 0.016875P \cdot D - 0.0000625P \cdot L/D + 0.0710939D \cdot L/D \quad (2)$$

حال با توجه به مدل رگرسیون به دست آمده، نیاز به آزمایش‌های عملی مرتفع می‌گردد، به طوری که با استفاده از آنها می‌توان برای هر مقدار از پارامترهای تنظیمی، مقادیر نسبت قطر الیاف به قطر نخریس را با دقت بالا پیش‌بینی نمود.

۴-۲. تحلیل متغیر پاسخ استحکام کششی

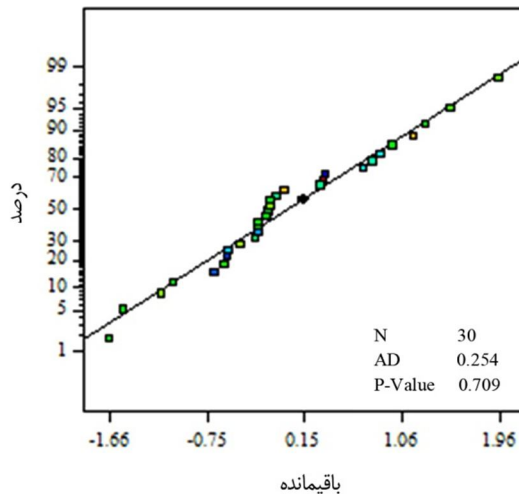
با توجه به نمودار توزیع باقیمانده‌ها (شکل ۱۲) می‌توان گفت توزیع نرمال وجود دارد. نقاط به دست آمده از آزمایش‌ها به خط توزیع نزدیکتر است و توزیع باقیمانده‌ها به صورت نرمال است و این نشان می‌دهد روند آزمایش‌ها به درستی انجام شده است.

جدول ۵ تحلیل واریانس برای متغیر پاسخ استحکام کششی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که ۰/۹۸۰۱ می‌باشد که نشان از دقت بالای مدل است. همچنین ارزش P، عامل عدم برازش مدل، ۰/۹۷۶ شده که نشان‌دهنده غیر مؤثر بودن این عامل و برازش مؤثر مدل است.

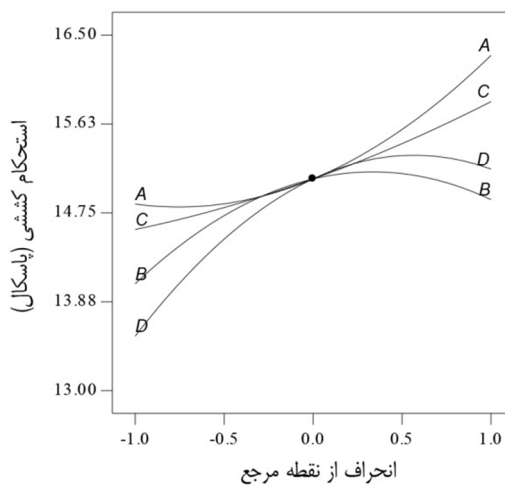
۴-۲-۱. بررسی اثر پارامترها بر استحکام کششی الیاف

تأثیر پارامترهای ورودی بر متغیر پاسخ استحکام کششی در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. از جدول ۵ و شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ملاحظه می‌شود که سرعت یکی از پارامترهای اساسی است. ساختمان داخلی الیاف با افزایش سرعت ریسندگی تغییر نموده و

خصوصیات آن از الیاف با آرایش یافتگی پایین، به سمت الیاف با آرایش یافتگی کامل، میل می‌نماید. این اختلاف همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود به دلیل تفاوت در ساختمان داخلی آنهاست. الیاف تولیدی در سرعت‌های بالا دارای تبلور بیشتری نسبت به الیاف تولیدی در سرعت‌های پایین می‌باشند.



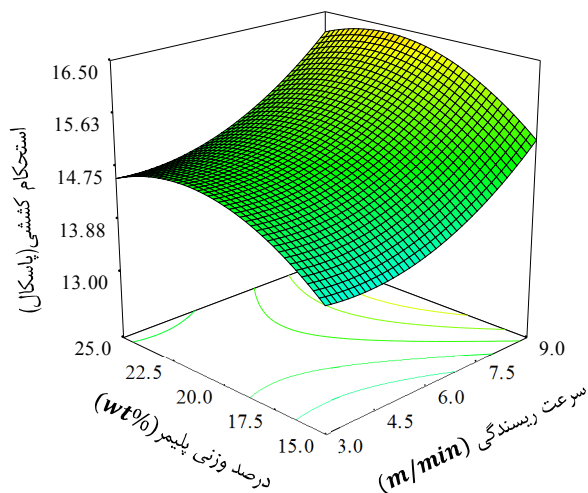
شکل ۱۲. نمودار احتمال گوسی مقادیر باقیمانده برای متغیر پاسخ استحکام کششی



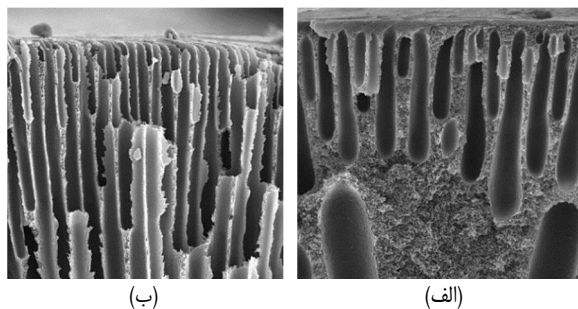
شکل ۱۳. تأثیر پارامترهای ورودی بر استحکام کششی

با توجه به نتایج به دست آمده از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد وزنی پلیمر، استحکام کششی افزایش یافته و به مقدار بهینه (در حدود ۲۲ درصد وزنی) می‌رسد. این پارامتر معیاری از میزان گره‌خوردگی مولکول‌های پلیمری در حلال است و متناسب با طول زنجیره پلیمری است، در درصد وزنی پایین به دلیل پایین بودن گراندوی استحکام کششی الیاف

استحکام کششی ندارد. با توجه به شکل ۱۸، این می تواند به این صورت توجیه شود که در نسبت های پایین (شکل ۱۸ الف)، اختلال در یکنواختی جریان گرانیوی محلول در لوله ایجاد می شود و در هنگام خروج محلول از سر نخریس، زنجیرها دچار کشش و آرایش یافتگی نامنظم می شوند و تنش پسماند ایجاد شده باعث کاهش استحکام کششی می شود. در مجموع خلل و فرج سطحی، خلل و فرج کل حجمی با افزایش نسبت طول به قطر سر نخریس کاهش می یابد. با افزایش نسبت طول به قطر سر نخریس ساختار یکنواخت و همگن تولید می شود. با توجه به تحقیقات انجام شده می توان گفت با افزایش بیش از حد این نسبت، جریان مشروب بارش توصیف قابل مشاهده ای از بیشتر شدن شدت جریان از حاشیه به سمت مرکز نخریس است. این جریان شایع ترین علت ایجاد تنش، نایکنواختی سطح رشته ها و شکستگی الیاف است.



شکل ۱۴. نمودار سه بعدی اثر هم زمان دو متغیر سرعت - درصد وزنی پلیمر بر استحکام کششی



شکل ۱۵. تصاویر SEM از سطح مقطع برش خورده الیاف با بزرگنمایی ۱۵۰۰ برابر مربوط به الف) آزمایش شماره ۱۷، ب) آزمایش شماره ۱۸

کاهش می یابد. در درصد وزنی بالا، همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، به دلیل گره خوردگی بیشتر مولکول های پلیمری و اینکه جابه جایی حلال با ضدحلال در سرعت پایینی انجام می گیرد زمان کافی برای تشکیل ساختار منظم و با تقارن بیشتر وجود دارد، استحکام بیشتر می شود. با توجه به شکل ۱۶ با افزایش قطر نخریس در حالت کلی استحکام کششی افزایش می یابد. با توجه به مقدار ماکزیمم استحکام کششی، قطر نخریس به مقدار بهینه (حدود ۲ میلی متر) می رسد.

جدول ۵. تحلیل واریانس پارامتر های ورودی برای استحکام کششی

مدل	میانگین مربعات	F احتمال	P احتمال
رگرسیون	۲/۸۱	۵۲/۸۳	<۰/۰۰۰۱
سرعت ریسندهی	۹/۶۴	۱۸۱/۰۱	<۰/۰۰۰۱
درصد وزنی پلیمر	۳/۰۹	۵۸/۰۳	<۰/۰۰۰۱
قطر سر نخریس	۷/۱۳	۱۳۳/۹۱	<۰/۰۰۰۱
نسبت (L/D)	۱۲/۱۸	۲۲۸/۷۸	<۰/۰۰۰۱
V·V	۰/۶۱	۱۱/۴۳	۰/۰۰۴۱
P·P	۰/۹۹	۱۸/۵۷	۰/۰۰۰۶
D·D	۰/۰۴۵	۰/۸۵	۰/۳۷۳۲
(L/D)·(L/D)	۱/۳۶	۲۵/۶۲	<۰/۰۰۰۱
V·P	۰/۰۳۶	۰/۶۷	۰/۴۲۶۴
V·D	۰/۰۴۱	۰/۷۸	۰/۳۹۲۱
V·(L/D)	۰/۴۶	۸/۶۵	۰/۰۱۰۱
P·D	۰/۱۲	۲/۳۱	۰/۱۴۹۷
P·(L/D)	۰/۱۳	۲/۵	۰/۱۳۴۵
D·(L/D)	۱/۴۸	۲۷/۸۵	<۰/۰۰۰۱
عدم برازش	۰/۰۵۳	۰/۲۳	۰/۹۷۶۵

با تحلیل شکل ۱۷ می توان گفت با افزایش قطر نخریس با توجه به کاهش سرعت تبادل حلال و ضد حلال در بخش مرکزی الیاف در قطرهای بزرگ، ساختار مولکولی در کل الیاف منظم تر و متراکم تر است. در صورتی که در قطرهای پایین به دلیل بالا بودن سرعت تبادل، ساختار مولکولی بی نظمی بیشتری دارد و استحکام پایین است. از شکل ۱۶ ملاحظه می شود با افزایش نسبت طول به قطر سر نخریس استحکام کششی افزایش یافته و به مقدار بهینه (در حدود ۶/۸) می رسد. افزایش بیشتر نسبت طول به قطر سر نخریس بالای مقدار بهینه اثر چندانی بر بهبود

۴-۲-۲. مدل به دست آمده برای استحکام کششی

با بررسی و تحلیل نتایج و داده‌ها با اعمال ضرایب به دست آمده، معادله برازش با مقادیر واقعی (کد نشده) برای استحکام کششی به دست آمد، با تابع رگرسیون به دست آمده، بدون انجام آزمایش‌ها می‌توان مقادیر استحکام کششی برای الیاف تولیدی را حدس زد (رابطه ۳).

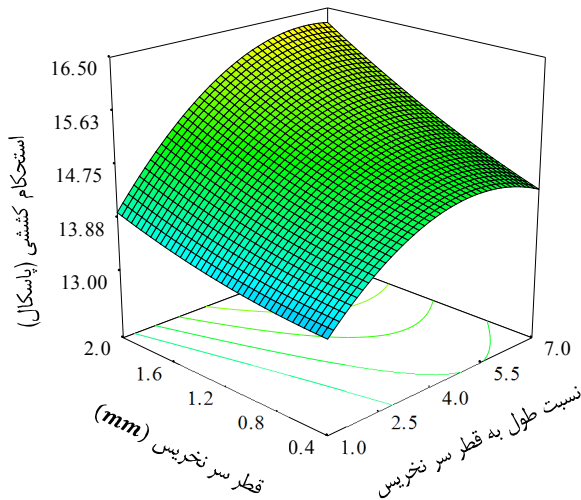
$$\begin{aligned}
 TS = & +0.22889 - 0.51519V \\
 & + 1.05447P \\
 & +0.34989D + 0.53222L/D \\
 & + 0.053852V^2 \\
 & -0.02471P^2 + 0.20605D^2 \\
 & - 0.080626(L/D)^2 \quad (3) \\
 & +0.00314V \cdot P - 0.0212V \cdot D \\
 & + 0.01885V \cdot L/D \\
 & -0.0022344P \cdot D + 0.00608417P \cdot L/D \\
 & + 0.12684D \cdot L/D
 \end{aligned}$$

۴-۳. بهینه‌سازی هم‌زمان متغیرهای پاسخ استحکام

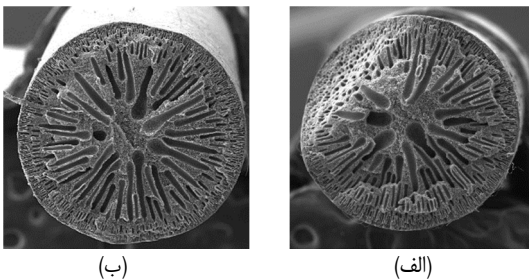
کششی و نسبت قطر الیاف به قطر نخ‌ریس

با استفاده از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ، شرایط بهینه برای پارامترهای ورودی، مورد مطالعه قرار گرفت. در این روش فاکتوری به نام مطلوبیت وجود دارد که با تعریف هدف مورد نظر، این فاکتور میزان نزدیک بودن جواب‌ها را به واقعیت مشخص می‌کند. میزان مطلوبیت، هرچقدر به ۱ نزدیک‌تر باشد مفهوم مطلوبیت بیشتر بوده و نشان‌دهنده ایده‌آل‌ترین شرایط برای متغیر پاسخ خواهد بود. با استفاده از فرمان بهینه‌ساز پاسخ نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، می‌توان فاکتورهای تنظیمی جهت دستیابی به حالت بهینه هم‌زمان دو خروجی را پیش‌بینی کرد. هدف از این کار به حداکثر رساندن استحکام کششی و دستیابی به مقدار بهینه است. علت انتخاب این مقادیر دستیابی به اهدافی که در این تحقیق مشخص شده است و قابل قبول بودن این مقادیر در صنعت می‌باشد. پس از تنظیم این مقادیر در نرم‌افزار، میزان ورودی‌ها جهت حصول مقادیر بهینه هم‌زمان دو متغیر پاسخ، همراه با درصد مطلوبیت محاسبه شده است. مطابق نتایج به دست آمده میزان مطلوبیت، نزدیک به یک (۰/۹۵) بوده که میزان نزدیک بودن جواب‌ها را به واقعیت نشان می‌دهد. با تنظیم سرعت ریسندگی ۹ متر بر دقیقه، نسبت طول به قطر سر نخ‌ریس، درصد وزنی پلیمر ۲۵ و قطر نخ‌ریس ۱/۳۸ میلی‌متر، می‌توان به استحکام کششی

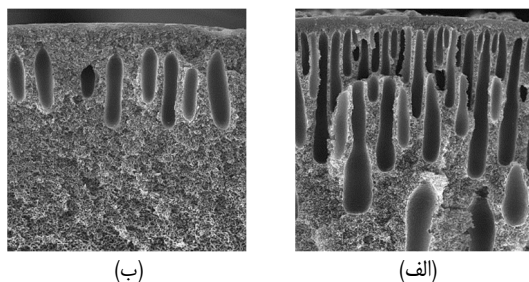
۱۶/۸ پاسکال و نسبت $(d_p/d_n = 1)$ دست‌یافت. برای سنجش صحت مقادیر ورودی لازم، برای حصول شرایط مطلوب، سه مرتبه با استفاده از مقادیر پیشنهاد شده فاکتورها به صورت تجربی آزمایش‌هایی صورت پذیرفت و مشخص گردید که با استفاده از این مقادیر پارامترهای ورودی می‌توان به استحکام کششی ۱۶/۳ پاسکال و نسبت $(d_p/d_n = 0/99)$ دست‌یافت که با درصد خطای کمتر از ۴ درصد، حاکی از صحت پیش‌بینی نرم‌افزار و دقت بالای مدل ارائه شده برای دو خروجی است [۲۲].



شکل ۱۶. نمایش نمودار سه‌بعدی، اثر هم‌زمان دو متغیر قطر سر نازل - نسبت طول به قطر سر نخ‌ریس بر استحکام کششی



شکل ۱۷. تصاویر SEM با بزرگنمایی ۳۰۰ برابر؛ الف) آزمایش ۲۱ ب) آزمایش ۲۲



شکل ۱۸. تصاویر SEM از سطح مقطع برش خورده الیاف با بزرگنمایی ۱۵۰۰ برابر مربوط به الف) آزمایش ۲۳ ب) آزمایش ۲۴

۵. نتیجه‌گیری

می‌دهد: L/D ، قطر نازل، درصد وزنی پلیمر و سرعت ریسندگی، بیشترین اثر را در بهبود خواص الیاف دارد. از دیگر پارامتر اثرگذار نخ‌ریس بر روی الیاف می‌توان به زاویه مخروطی سر نازل اشاره نمود. همچنین با توجه به تطابق و همخوانی مناسب نتایج تجربی و نتایج حاصل از طراحی آزمایش‌ها (درصد خطای کمتر از ۴ درصد)، می‌توان گفت توابع رگرسیون به‌دست‌آمده ابزاری قدرتمند جهت پیش‌بینی مقادیر متغیرهای پاسخ است. همچنین نتایج حاصل از روش پاسخ سطح تأییدکننده صحت نتایج تجربی و نتایج به‌دست‌آمده از روش طراحی آزمایش‌هاست.

در تحقیق حاضر، تأثیر پارامترهای فیزیکی نخ‌ریس و شرایط فرایندی شامل سرعت ریسندگی درصد وزنی پلیمر بر استحکام کششی و نسبت d_p/d_n (قطر الیاف تولیدشده به قطر نازل) توسط طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ بررسی شد. الیاف پلیمری با طراحی یک نوع پمپ سرنگی و نخ‌ریس دستگاه تولید الیاف توپ‌تکرشته، با استفاده از روش تغییر فازی تولید شد. جهت بررسی میزان اثرگذاری هر یک از ترم‌های مدل بر بهبود خواص نخ‌ریس، از روش تحلیل واریانس استفاده شد. با مطالعه بهینه‌سازی آزمایش‌ها، شرایط بهینه نخ‌ریس تعیین شده است. نتایج نشان

۶. مأخذ

- [1] P. G. Wenthold, M. Randal, *Hollow Fiber Membranes and Method of Manufacture*, Vol. 33, No. 9, pp. 796–802, 1998.
- [2] G. C. Kapantaidakis, G. H. Koops, M. Wessling, Effect of Spinning Conditions on The Structure and The Gas Permeation Properties of High Flux Polyethersulfonepolyimide Blend Hollow Fibers, *Desalination*, Vol. 144, pp. 121-125, 2002.
- [3] J. Lin, J. Shang, J. Zhao, Effect of The Size of Spinneret On The Thermal Stability of Chemically Liquefied Wood, *Wood Research*, Vol. 59, No. 5, pp. 59, 731-738, 2014.
- [4] A. Ziabicki, J. Tian, *Necking in high speed Fiber spinning revisited*, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 47, No. 5, pp. 57-74, 1992.
- [5] A. Ziabicki, *Fundamental of Fiber Formation*, *the Science of Fibre Spinning and Drawing*, pp. 306-308, New York, 1976.
- [6] W. Foster, K. Mukhopadhyay, O. Babbington, Structural Morphology of High Speed Spun Polyester Fibers, *Tex. Res J*, Vol. 6, pp. 403-405, 1992.
- [7] S. Ramakrishna, K. Fujihara, W. Teo, T. Lim, *An Introduction to Electro Spinning and Nano Fiber*, World Scientific Publishing, Singapore, 2005.
- [8] Y. P. Neo, S. Ray, A. J. Eastal, M. Nikolaidis, Influence of Solution and Processing Parameters Towards The Fabrication of Electro Spun Zein Fibers with Sub-Micron Diameter, *Journal of Food Engineering*, Vol. 109, No. 4, pp. 645–651, Auckland, 2012.
- [9] Z. M. Huang, Y. Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna, A Review On Polymer Nan Fibers By Electro Spinning and Their Applications in Nano Composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 63, No. 15, pp. 2223–2253, China, 2003.
- [10] H. Myers, D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Design Experiments*, John Wiley & Sons, 2009.
- [11] A. L. Andrad, *Science And Technology of Polymer Nanofibers*, John Wiley & sons, 2008.
- [12] Y. P. Neo, S. Ray, A. J. Eastal, Influence of Solution And Processing Parameters Towards The Fabrication of Electrospun Zein Fibers With Sub-Micron Diameter, *Journal of Food Engineering*, Vol. 109, pp. 645–651, 2012.
- [13] S. L. Shenoya, W. D. Bates, H. L. Frisch, Role of Chain Entanglements On Fiber Formation During Electrospinning of Polymer Solutions: Good Solvent, Non-Specific Polymer–Polymer Interaction Limit, *Polymer*, Vol. 46, pp. 3372–3384, 2005.
- [14] B. Wijnen, E. J. Hunt, G. C. Anzalone, *Open-Source Syringe Pump Library*, Plos One, pp. 3-8, United Kingdom, 2014.
- [15] Z. Tadmor, C. G. Gogos, Principles of Polymer Processing, *Technology & Engineering*, pp. 198-240, Israel, 1980.

- [16] E. Vennat, C. Bogicevic, J. M. Fleureau, Demineralized Dentin 3D Porosity and Pore Size Distribution Using Mercury Porosimetry, *Dental Materials*, Vol. 25, No. 6, pp. 729-735, 2009.
- [17] J. P. Penning, A. A. Devries, A. J. Pennings, The Effect of Fiber Diameter On The Drawing Behavior of Gel-Spun Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fibers, *Polymer Bulletin*, Vol. 31, No. 2, pp. 243-248, 1993.
- [18] Y. Li, C. Cao, T. S. Chung, Fabrication of Dual-Layer Poly Ether Sulfone (PES) Hollow Fiber Membranes With An Ultrathin Dense-Selective Layer For Gas Separation, *Journal of Membrane Science*, Vol. 245, No. 2, pp. 53-60, 2004.
- [19] T. S. Chung, J. J. Qin, J. Gu, Effect of Shear Rate Within The Spinneret On Morphology, Separation Performance and Mechanical Properties of Ultrathin Poly Ether Sulfone Hollow, *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, No. 6, pp. 1077-1091, 2000.
- [20] Y. P. Neo, S. Ray, A. J. Eastal, Influence of Solution And Processing Parameters Towards The Fabrication of Electrospun Zein Fibers With Sub-Micron Diameter, *Journal of Food Engineering*, Vol. 109, pp. 645-651, 2012.
- [21] S. L. Shenoya, W. D. Bates, H. L. Frisch, Role of Chain Entanglements On Fiber Formation During Electrospinning of Polymer Solutions: Good Solvent, Non-Specific Polymer-Polymer Interaction Limit, *Polymer*, Vol. 46, pp. 3372-3384, 2005.
- [22] W. John, D. C. Montgomery, *Introduction To Statistical Quality Control*, 2005.

پی نوشت

-
1. L/D
 2. Scanning electron microscope
 4. Morphology
 4. International Tolerance 6