

نشریه نساجی و پلیمر

سال ۱۰، شماره ۲، فصلنامه، بهار ۱۴۰۱

از انتشارات انجمن علوم و فناوری مهندسی نساجی ایران (ITAST)

فهرست مطالب

- ۳ مقاومت به کلر غشای کامپوزیتی فیلم نازک پلی آمیدی عامل دار شده با پلیمر درخت سانی پلی آمیدوآمین
نگار صالحی بیدختی، پگاه اسدی فرد، سمیه اکبری
- ۱۵ راهبردهای توسعه علوم و فناوری لایه های محافظ در برابر گلوله ها و ترکش ها
سید جلال الدین نجفی، داریوش سمنانی، حنیف کازرونی، ایمان فروغی حسن آبادی
- ۳۱ الکتروریسی هم زمان دو جزء پلی اتر سولفون/پلی وینیل الکل-ژئولیت برای کاربردهای زیست پزشکی
فاطمه حقدوست، سید هژیر بهرامی، جلال برزین، آزاده غایی
- ۴۹ اثر ساختار پارچه تار پودی بر بازده صافش آب
فریده حاجیانی، حسن سلیمی، علی اصغر اصغریان جدی، حسن رحیم زاده، هوشنگ نصرتی
- ۶۵ بررسی و مدل سازی اثر مواد مختلف پرکننده بر خواص جذب صوت قالی بستر دو گانه ایران
طوبی اردکانی، علی اصغر علمدار، مرتضی ودود
- ۷۹ اثر طرح بافت و ظرافت نخ پود پرکننده بر خواص فیزیکی پارچه های سه لایه تار پودی
یاسمن اکبیا، نازنین اعزازشهابی، هوشنگ نصرتی

کلیه مقالات به طور برخط در قالب PDF در پایگاه اینترنتی نشریه در دسترس هستند.

نشانی دفتر نشریه: تهران، خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی، کدپستی ۱۵۹۱۴

پست الکترونیکی: irantast@gmail.com

پایگاه اینترنتی: <http://www.itast.ir>

اعضای هیئت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا)

دکتر محمد ذره‌بینی
دانشگاه صنعتی اصفهان
zarrebini@cc.iut.ac.ir

دکتر دیوید استاوسکی
دانشگاه صنعتی لوج
dawid.stawski@p.lodz.pl

دکتر علی اصغر علمدار یزدی
دانشگاه یزد
aalamdar@yazd.ac.ir

پروفسور اشتیاق
دانشگاه دهلی
ishtiaque@iitd.ac.in

دکتر ریچارد مایکل کوزولسکی
دانشگاه پوزنان لهستان
sekretariat@iwnirz.pl

دکتر بهنام پوردیهیمی
دانشگاه کارولینای شمالی
bpourdey@ncsu.edu

دکتر ناصر محمدی
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
mohamadi@aut.ac.ir

دکتر حسین توانایی
دانشگاه صنعتی اصفهان
tavanai@cc.iut.ac.ir

دکتر محسن میرآفتاب
دانشگاه بولتون
m.miraftab@bolton.ac.uk

دکتر محمد حقیقت کیش
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
mkish@aut.ac.ir

عنوان و چکیده مقاله‌های این نشریه در مراکز زیر درج می‌شود:

- Islamic World Science Citation Center (ISC)
- Magiran

دفتر نشریه در پذیرش، رد، چاپ و اصلاحات مقالات آزاد است.
مطالب درج‌شده در مقالات الزاما نقطه‌نظرهای هیئت تحریریه را ارائه نمی‌دهد.

Chlorine Resistance of Thin Film Composite Polyamide Membrane Functionalized by Poly(amidoamine) Dendrimer

Negar Salehi Beydokhti, Pegah Asadi Fard, and Somaye Akbari*

Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box 15875-4413, Tehran, Iran

Received: 2 February 2021, Accepted: 24 August 2021

Abstract

Surface modification is one of the most techniques to improve the performance of thin film composite polyamide membrane (TFC). In this study, 0.5, 1, and 1.5 w/v% concentrations of the second generation of poly(amidoamine) dendrimer polymer (PAMAM, G2) were utilized to investigate the improvement of membrane performances. Physicochemical properties of the pristine and modified membranes were characterized using water contact angle measurement, ATR-FTIR, and SEM. Membranes separation performance was examined in a forward osmosis system using synthetic brackish water. 1% concentration of PAMAM (TFC-1% PAMAM) was considered as the optimized modified membrane with the best water flux and salt rejection results. According to the results, the water flux of TFC-1% PAMAM compared to that of pristine TFC decreased, while the salt rejection increased, respectively. In addition, passive chlorination tests were performed for pristine TFC and TFC-1% PAMAM. It was observed that the water flux for the unmodified TFC increased from 5.0 ± 1.1 to 5.8 ± 0.8 (16% increased). In contrast, the water flux for TFC-1% PAMAM increased from 4.7 ± 0.6 to 4.9 ± 0.6 (4% increased). Salt rejection for unmodified TFC decreased from 97.6 ± 0.9 to 93.7 ± 1.5 (4% decreased) and for TFC-1% PAMAM decreased from 98.5 ± 0.3 to 95.5 ± 1.2 (3% reduction). The results confirmed the membrane performance improvement after surface modification by PAMAM. The enhanced chlorination resistance of TFC-1% PAMAM was attributed to the scavenger role of the extra amine and amide groups in PAMAM.

Keywords: thin film composite polyamide membrane, poly(amidoamine) dendrimer polymer, surface modification, forward osmosis, chlorine resistance

(*) To whom correspondence should be addressed.

E-mail: akbari_s@aut.ac.ir

فشرده، فضای خالی بین شاخه‌ها برای جذب مولکول‌های مهمان و تعداد زیادی گروه‌های فعال انتهایی است [۱۱، ۱۲]. در این مقاله، از پلیمر درخت‌سان پلی (آمیدوآمین) نسل ۲ برای اصلاح سطح و بهبود پایداری غشا به کلر استفاده شده است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی غشای اصلاح‌شده و غشای خام پیش و پس از عملیات کلرزنی بررسی شده است.

۲ تجربی

۲-۱ مواد

غشای کامپوزیتی فیلم نازک پلی‌آمیدی تجاری، از شرکت Vontron چین تهیه شد. از پلیمر پلی (آمیدوآمین) نسل ۲ درخت-سان، ساخت شرکت Delta لهستان به‌عنوان ماده افزودنی برای اصلاح سطح غشای کامپوزیتی فیلم نازک پلی‌آمیدی تجاری استفاده شد. نمک سدیم کلرید به‌عنوان عامل ایجاد فشار اسمزی، از شرکت Merck و محلول سدیم هیپوکلریت با درصد کلر فعال موجود ۱۸٪ از شرکت بوژنه تهیه شد.

۲-۲ روش‌ها

در این پژوهش، از آزمون طیف‌سنجی زیرقرمز به‌وسیله دستگاه نورطیف‌سنج Nicolet 670 (ATR-FTIR) در دمای محیط و محدوده $4000-650\text{ cm}^{-1}$ با ۶۴ پوشش برای شناسایی ساختار سطحی غشا استفاده شد. تجزیه و تحلیل طیفی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار OMNIC انجام گرفت. همچنین، برای سنجش میزان آب‌دوستی سطح غشاها در دمای محیط، زاویه تماس سطح آن‌ها طبق استاندارد ASTM D 724-99 با ۲۰ بار تکرار انجام و به‌کمک نرم‌افزار Digimizer محاسبه شد. برای بررسی شکل‌شناسی سطح غشاها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) Philips استفاده شد.

۲-۳ اصلاح غشای کامپوزیتی فیلم نازک پلی‌آمیدی تجاری

برای اصلاح غشای کامپوزیتی فیلم نازک پلی‌آمیدی تجاری، محلول پلیمر پلی (آمیدوآمین) در حلال آب مقطر به غلظت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ وزنی-حجمی تهیه شد. غشای تجاری روی یک صفحه شیشه‌ای ثابت شد و روی آن قاب‌های سیلیکونی و تفلون نسوز قرار گرفت و به‌کمک گیره‌هایی از هر چهار طرف محکم شد. سپس، محلول پلیمر درخت‌سان تهیه‌شده بر سطح غشا در دمای

(forward osmosis) از اهمیت بسیاری برخوردار است [۲].

غشای کامپوزیتی فیلم نازک (thin film composite membrane) مبتنی بر پلی‌آمید از جمله غشاها در کاربرد در صنعت آب‌شیرین‌کن است. این غشاها چندلایه به‌طور معمول از یک لایه پلی‌آمیدی با اتصالات عرضی به ضخامت 200 nm روی لایه پشتیبان متخلخل پلی‌سولفون و لایه وب بی‌بافت پلی‌استر قرار دارد. لایه پلی‌آمید نقش گزینشی و سایر لایه‌ها نقش پشتیبان مکانیکی را دارند [۳، ۴]. برجسته‌ترین کاربرد غشای نازک کامپوزیتی آمیدی مربوط به تصفیه آب آشامیدنی است. غشا، گامی کلیدی در ضدعفونی جریان آب اولیه است. چنین جریانی ممکن است، دارای انواع باکتری و عوامل بیماری‌زا باشد و کلر یکی از معمول‌ترین ماده‌های اکسند برای تصفیه و ضدعفونی آب است [۵]. اگرچه غشاها کامپوزیتی فیلم نازک به‌دلیل گزینش‌پذیری و شار آب زیاد شناخته‌شده هستند، اما ناپایداری لایه گزینشی غشا در برابر مواد اکسند همچون کلر، مشکلات جدی از جمله کاهش طول عمر و عملکرد برای این غشاها ایجاد کرده است [۶، ۷].

غشاهایی که در فرایند تصفیه آب‌های طبیعی و زائد به‌کار برده شده‌اند، اغلب در معرض غلظت کم کلر در آب خوراک قرار دارند. کلر از نظر شیمیایی نسبت به اکثر پلیمرهای سازنده غشاها تجاری دارای عملکرد بسیار تهاجمی است. تخریب غشا به‌دلیل تغییرات ساختار ویژه درون پلیمر در پاسخ به قرارگیری در معرض کلر است. این تغییرات در غشاها پلی‌آمیدی در نتیجه حمله کلر به نیتروژن آمید و حلقه‌های آروماتیک است. محصولات جانبی حاصل ممکن است، باعث تغییر شکل در زنجیر پلیمر یا شکاف در پیوندهای آمیدی شود. سازوکار شیمیایی دقیق برهم‌کنش‌های کلر و پلی‌آمید و از بین رفتن غشا کاملاً مشخص نیست، اما مطالعات زیادی برای توضیح سازوکار واکنش کلر با لایه پلی‌آمیدی انجام شده است [۵، ۸].

راهبردهای مختلفی برای بهبود مقاومت غشاها کامپوزیتی فیلم نازک به کلر مانند پوشش‌دهی سطح غشا، پلیمرشدن پیوندی، استفاده از مونومرها و استفاده از گروه‌های آمید سوم پیشنهاد شده است [۹، ۱۰]. از این رو، در پژوهش حاضر از درخت‌سان‌هایی (dendrimers) با گروه انتهایی فعال آمین برای افزایش پایداری سطح غشا استفاده شد. درخت‌سان‌ها درشت‌مولکول‌هایی در ابعاد نانو، کروی شکل و پرشاخه بوده که دارای هسته مرکزی و تعداد زیادی شاخه هستند. با توجه به ساختار منحصر به فرد، این پلیمرها دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت هستند، که آن‌ها را از پلیمرهای خطی متمایز می‌کند. این خواص ویژه شامل شکل

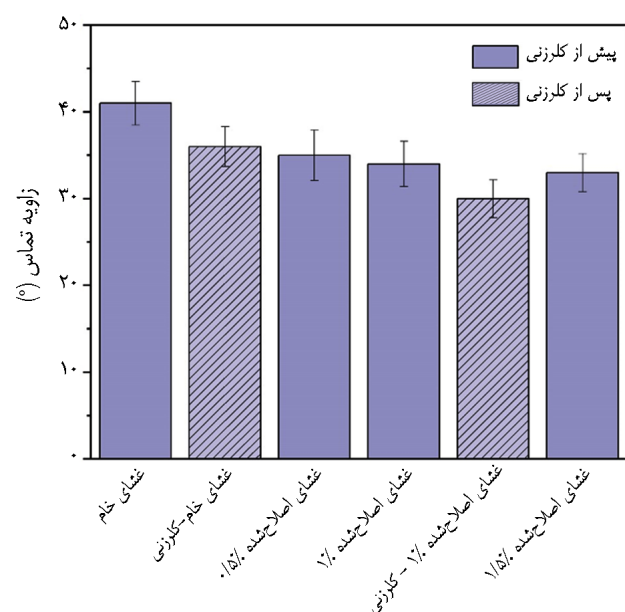
۵-۲ کلر زنی غشا

غشاهای خام و اصلاح شده تجاری با محلول پلیمر درخت سان در غلظت بهینه ۱٪ در معرض محلول کلر ۵۰۰ ppm به مدت ۲۴ h قرار گرفت [۱۷، ۱۸]. ابتدا غشاهای خام و اصلاح شده در محلول کلر، در ۴ دمای مختلف ۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ °C نگهداری شدند. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون اسمز مستقیم مشاهده شد، بهترین بازده در دمای ۵ °C امکان پذیر است. در نتیجه، این دما برای بررسی اثر کلر بر عملکرد غشا، انتخاب شد.

نتایج و بحث

۱-۳ بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی غشاها

شکل ۱ نشان دهنده میانگین زاویه تماس آب، روی سطح سه غشای اصلاح شده با محلول پلیمر درخت سان با غلظت های ۰/۵، ۱ و ۱/۵٪ و غشای خام است. با توجه به نتایج مشاهده شد، زاویه تماس غشای خام ۴۱±۲/۵° است که با اصلاح آن مقدار زاویه تماس کاهش یافت. همچنین مشاهده شد، با افزایش غلظت محلول پلیمر درخت سان از ۰/۵٪ به ۱/۵٪، میانگین زاویه تماس از ۳۵±۲/۹° به ۳۳±۲/۲° کاهش یافت. این موضوع نشانگر افزایش ترشوندگی سطح غشاهای اصلاح شده و افزایش آب دوستی آنها با ازدیاد غلظت محلول پلیمر درخت سان است. علت این امر،



شکل ۱- زاویه های تماس غشای خام و غشاهای اصلاح شده پیش و پس از کلر زنی.

۵۰ °C به طور یکنواخت ریخته و به مدت ۵ min برای تشکیل اتصالات عرضی در موقعیت افقی، زمان داده شد. پس از آن، به کمک غلتک تفلونی به آرامی محلول اضافه آن گرفته و در نهایت به مدت ۱۰ min در دمای ۵۰ °C تثبیت شد. در انتها، سطح غشای اصلاح شده با آب مقطر شسته شد. غشای اصلاح شده درون آب مقطر و در یخچال نگهداری شد [۱۲].

۴-۲ آزمون اسمز مستقیم

سلول غشایی جریان عرضی با مساحت مؤثر ۱۳/۵۸ cm² و دو پمپ الکتریکی ساخت شرکت Lead Fluid Technology برای به گردش درآوردن محلول خوراک و مکند (draw) استفاده شد. همچنین، از ترازوی دیجیتالی ساخت شرکت Shenzhen Amput Electronic Technology برای اندازه گیری کاهش وزن خوراک و دستگاه رسانایی سنج ساخت شرکت Thermo Scientific برای اندازه گیری میزان رسانندگی محلول های خوراک و مکند استفاده شد. برای بررسی عملکرد غشاها، در فشار ۰/۲ bar و سرعت جریان ۴۵ mL/min، از محلول های ۱ و ۳۲ g/L سدیم کلرید به عنوان محلول های خوراک و مکند استفاده شد [۱۳، ۱۴].

پس از پایدار سازی غشا، مقدار شار آب و شار نمک برگشتی (reverse salt flux)، درصد دفع نمک (salt rejection) و مقدار شار مواد محلول برگشتی خاص (specific reverse solute flux, SRSF) هر یک از غشاها، به ترتیب با کمک معادلات (۱) تا (۴) محاسبه شد [۱۵، ۱۶]:

$$J_w = \frac{W_0 - W_e}{\rho A \Delta t} \quad (1)$$

$$J_s = \frac{(W_e \times C_{f,e}) - (W_0 \times C_{f,0})}{\rho A \Delta t} \quad (2)$$

$$R(\%) = \left(1 - \frac{J_s / J_w}{C_{d,0} + C_{d,e}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

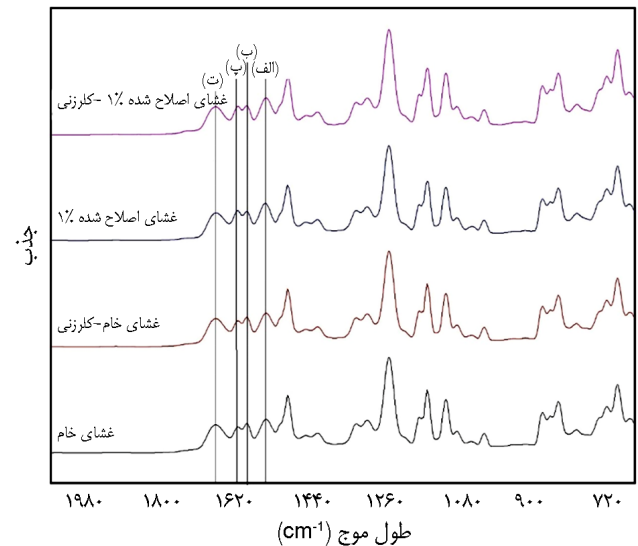
$$SRSF = \frac{\text{Flux}}{\text{Re verse}} \quad (4)$$

که در آن ها، W_0 و W_e به ترتیب وزن محلول خوراک پیش و پس از آزمایش (g)، ρ چگالی آب (g/L)، A مساحت مؤثر غشا (m²)، $C_{f,0}$ و $C_{f,e}$ به ترتیب غلظت محلول خوراک پیش و پس از آزمایش و $C_{d,0}$ و $C_{d,e}$ به ترتیب غلظت محلول مکند پیش و پس از آزمایش است.

خمش‌نی‌تروژن-هیدروژن در صفحه ناشی شده است [۲۱]. پیک در 1609 cm^{-1} مربوط به کشش حلقه کربن=کربن یا ارتعاشات نی‌تروژن-هیدروژن در آمید آروماتیک است [۲۲]. پیک در 1663 cm^{-1} که به آمید ۱ نسبت داده شده، مربوط به کشش کربن=اکسیژن و کربن-نی‌تروژن و ارتعاشات تغییر شکل کربن-کربن-نی‌تروژن است [۲۳، ۲۴]. پیک 1580 cm^{-1} که مربوط به پلی‌سولفون است، به عنوان پیک استاندارد در نظر گرفته شده و تمام طیف‌ها نسبت به آن نرمال شد. با مقایسه شدت پیک‌ها در 1541 cm^{-1} و 1609 cm^{-1} برای دو غشای خام و اصلاح‌شده پیش از کلرزی، مشاهده شد، شدت پیک‌ها برای غشای اصلاح‌شده بیش از غشای خام است. این مسئله حاکی از وجود پیوندهای آمیدی بیشتر در نتیجه واکنش پلی(آمیدوآمین) درخت‌سان با سطح غشای پلی‌آمیدی است. همچنین مشاهده شد، پیک آمید ۲ در 1541 cm^{-1} برای دو غشای خام و اصلاح‌شده پیش از کلرزی از شدت و گستردگی بیشتری نسبت به این غشاها پس از کلرزی برخوردار است. علت این موضوع، تجزیه پیوندهای نی‌تروژن-هیدروژن ناشی از جایگزینی هیدروژن با کلر است. افزون بر این دیده شد، شدت پیک در 1541 cm^{-1} برای غشای اصلاح‌شده بیش از غشای خام است. این افزایش شدت ناشی از وجود گروه‌های فعال آمیدی به علت واکنش پلی(آمیدوآمین) درخت‌سان با سطح غشای پلی‌آمیدی و در دسترس بودن آن‌ها در برابر کلر بوده که در نتیجه موجب حفظ گروه‌های آمیدی در برابر حمله کلر شده است [۵، ۱۰].

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح غشاها را نشان می‌دهد. در هر ۴ غشا تصاویر برگ‌مانند مشاهده می‌شود. این تصاویر برگ‌مانند برای غشاها کلرزه از یکنواختی کمتری برخوردار بوده که به علت از بین رفتن گروه‌های آمیدی در برابر حمله کلر است [۹، ۱۰].

شکل ۴ مقادیر شارهای آب، نمک برگشتی و مواد محلول برگشتی خاص غشای خام و سه غشای اصلاح‌شده با غلظت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵٪ محلول پلیمر درخت‌سان را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که مقدار شار آب غشای اصلاح‌شده با ۰/۵٪ محلول پلیمر درخت‌سان، به نسبت غشای خام از $1/1 \pm 0/5$ به $4/6 \pm 0/4\text{ LMH}$ (که $1\text{ LMH} = 1\text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$) کاهش یافت. علت فشرده‌تر و متراکم‌تر شدن سطح غشا، پیوند با پلیمر درخت‌سان است [۲۵]. همچنین مشاهده شد، با افزایش غلظت محلول از ۰/۵ به ۱ و ۱/۵٪ مقدار شار آب به ترتیب به $4/7 \pm 0/6\text{ LMH}$ و $4/8 \pm 0/1\text{ LMH}$ افزایش یافت. علت این مسئله، افزایش گروه‌های آب‌دوست انتهایی آمین بر سطح غشا بوده



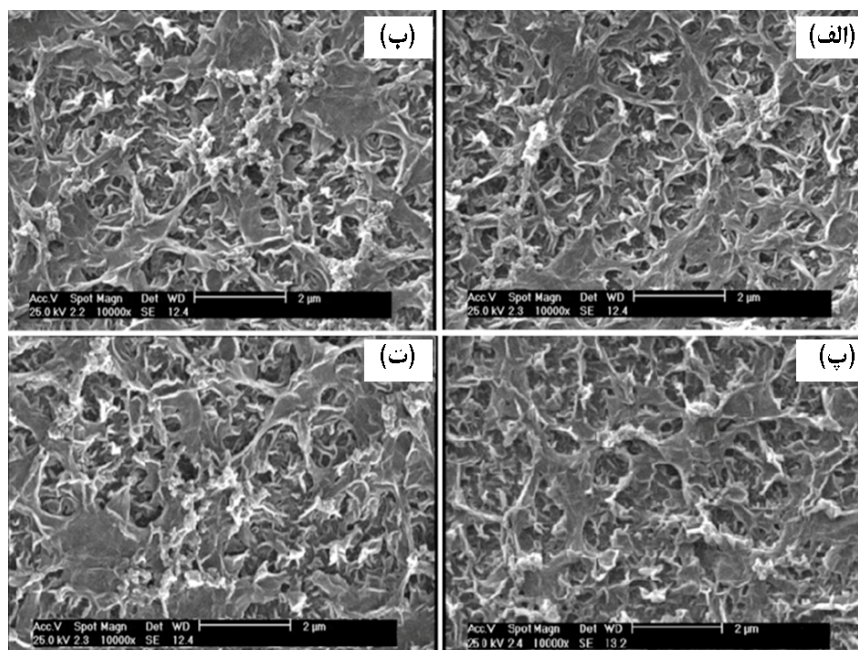
شکل ۲- طیف زیرقرمز غشاها خام و اصلاح‌شده پیش و پس از کلرزی: (الف) آمید ۲ (ارتعاشات خمش، 1541 cm^{-1})، (ب) پلی‌سولفون (ارتعاشات کششی، 1580 cm^{-1})، (پ) آمید آروماتیک (ارتعاشات کششی، 1609 cm^{-1}) و (ت) آمید ۱ (ارتعاشات کششی، 1663 cm^{-1}).

افزایش گروه‌های آب‌دوست و قطبی انتهایی مانند آمین در محلول درخت‌سان با افزایش میزان غلظت است.

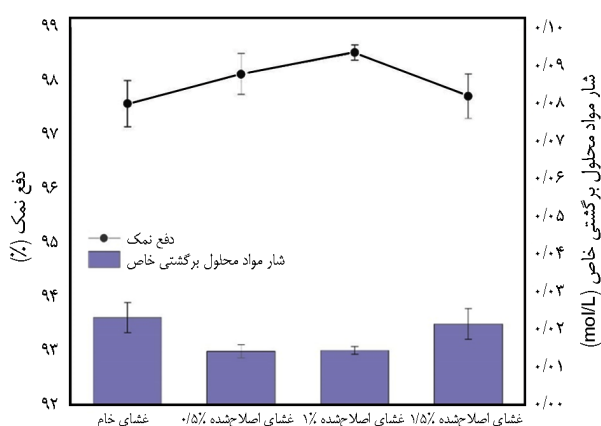
همچنین، میانگین زاویه تماس غشای خام پس از کلرزی از $41 \pm 2/5$ به $36 \pm 2/3$ کاهش و میانگین زاویه تماس غشای اصلاح‌شده بهینه ۱٪ از $34 \pm 2/5$ به $30 \pm 2/2$ کاهش یافت. افزایش آب‌دوستی پس از کلرزی به تشکیل گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیلیک اسید ناشی از آبکافت پیوند کربن-نی‌تروژن نسبت داده شده است [۱۹].

در شکل ۲ طیف زیرقرمز غشاها خام و اصلاح‌شده بهینه با محلول ۱٪ وزنی-حجمی پلیمر درخت‌سان، پیش و پس از کلرزی نشان داده شده است. در تمام غشاها، به علت وجود لایه تقویت‌کننده پلی‌سولفون، پیک در محدوده 1580 ، 1504 و 1488 cm^{-1} دیده شد که با ارتعاشات کششی گروه آروماتیک در ارتباط است. در محدوده 1385 – 1365 cm^{-1} پیک ضعیف کربن-هیدروژن مربوط به $\text{C}(\text{CH}_3)_2$ و در محدوده 1350 – 1280 cm^{-1} و 1180 – 1145 cm^{-1} به ترتیب پیک‌های مربوط به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن SO_2 است. افزون بر این، پیک در محدوده 1245 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی نامتقارن کربن-اکسیژن-کربن گروه آریل-اکسیژن-آریل وجود دارد [۲۰].

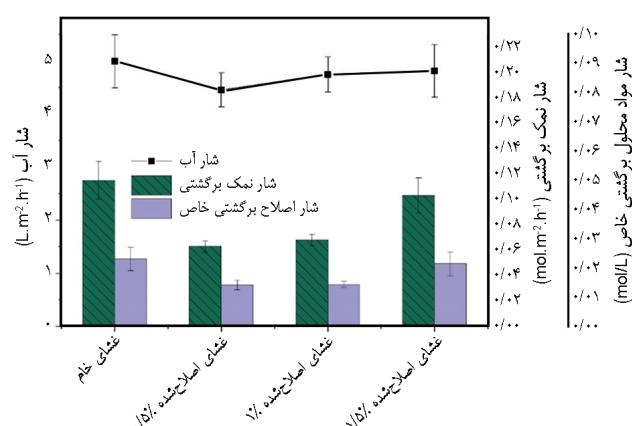
در هر ۴ غشا، پیک‌های پلی‌آمیدی در 1541 ، 1609 و 1663 cm^{-1} مشاهده شد. پیک در 1541 cm^{-1} مربوط به آمید ۲ بوده که از حرکت



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح غشای: (الف) خام، (ب) خام کلرزده، (پ) اصلاح شده ۱٪ و (ت) اصلاح شده ۱٪ کلرزده.



شکل ۵- درصد دفع نمک و شار مواد محلول برگشتی خاص غشاهای اصلاح شده و خام.



شکل ۴- شارهای آب، نمک برگشتی و مواد محلول برگشتی خاص غشاهای اصلاح شده و خام.

برگشتی خاص غشاهای خام و اصلاح شده با غلظت های ۰/۵، ۱ و ۱/۵٪ محلول پلیمر درخت سان است. نتایج نشان داد، درصد دفع نمک غشای خام $97/6 \pm 0/9$ است که با اصلاح آن در غلظت های ۰/۵ و ۱٪ به ترتیب به $98/2 \pm 0/8$ و $98/5 \pm 0/3$ افزایش یافت. علت این افزایش، فشرده تر و متراکم تر شدن سطح غشا در اثر پیوند با پلیمر درخت سان است [۲۵]. با افزایش غلظت از ۱٪ به ۱/۵٪ مشاهده شد، دفع نمک به $97/7 \pm 0/8$ کاهش یافته است. علت آن واکنش گروه های آب دوست انتهایی آمین با یکدیگر در نتیجه افزایش غلظت محلول پلیمر درخت سان و تشکیل حفره هایی بر

که موجب افزایش مقدار ترشوندگی و آب دوستی غشاست. برای مقایسه بهتر غشاهای، نتایج شار مواد محلول برگشتی خاص هر یک از غشاهای رسم شد. مشاهده شد، غشای خام با مقدار $0/23 \text{ mol/L}$ بیشترین و غشای اصلاح شده با $0/14 \text{ mol/L}$ از کمترین شار مواد محلول برگشتی خاص برخوردارند.

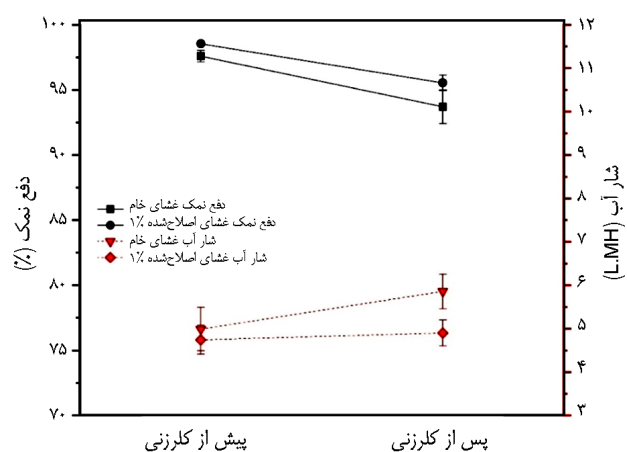
۲-۳ عملکرد جداسازی غشا

شکل ۵ نشان دهنده مقدار درصد دفع نمک و شار مواد محلول

شار آب برای غشای اصلاح شده از $4/7 \pm 0/6$ به $4/9 \pm 0/6$ LMH (۴٪) افزایش یافت. کلرژنی باعث کاهش درصد دفع نمک در هر دو غشا شد که ممکن است، نشانگر تخریب ساختار لایه پلی آمیدی ناشی از کاهش اتصال عرضی و تبلور آن باشد [۵،۲۶]، به گونه ای که درصد دفع نمک غشای خام از $97/6 \pm 0/9$ به $93/7 \pm 1/5$ (۴٪) و غشای اصلاح شده از $98/5 \pm 0/3$ به $95/5 \pm 1/2$ (۳٪) کاهش یافت. با توجه به مقدار شار آب و درصد دفع نمک غشاها پیش و پس از کلرژنی، غشای اصلاح شده عملکرد بهتری نسبت به غشای خام نشان داد. این مسئله ناشی از وجود گروه های فعال آمیدی به علت واکنش پلی (آمیدوآمین) درخت سان با سطح غشای پلی آمیدی و در دسترس بودن آن ها در برابر کلر است.

در مطالعه ای وطن پور و سندگان [۲۷] نشان دادند، اصلاح سطح غشای تجاری کامپوزیتی فیلم نازک پلی آمیدی ((TFC BW30 (filmtec)) به وسیله پلی (آمیدوآمین) درخت سان باعث بهبود عملکرد غشا در برابر کلر (۱۰۰۰ ppm.h و pH=۴) شده است. نتایج نشان داد، مقدار افت شار آب غشای اصلاح شده با پلیمر درخت سان، از ۷۷/۲٪ به ۶۱٪ و مقدار افت دفع نمک از ۳/۹۵٪ به ۱/۱۵٪ نسبت به غشای تجاری اصلاح نشده، کاهش یافته است. همچنین دیده شد، با اصلاح سطح غشای تجاری با پلیمر درخت سان و گرافن اکسید، مقدار افت شار آب و دفع نمک به ترتیب به ۵۸/۹٪ و ۰/۹۳٪ کاهش یافت. در جدول ۱ برخی از مطالعات انجام شده در زمینه مقاومت غشاهای کامپوزیتی فیلم نازک پلی آمیدی به کلر در سامانه اسمز معکوس آمده است.

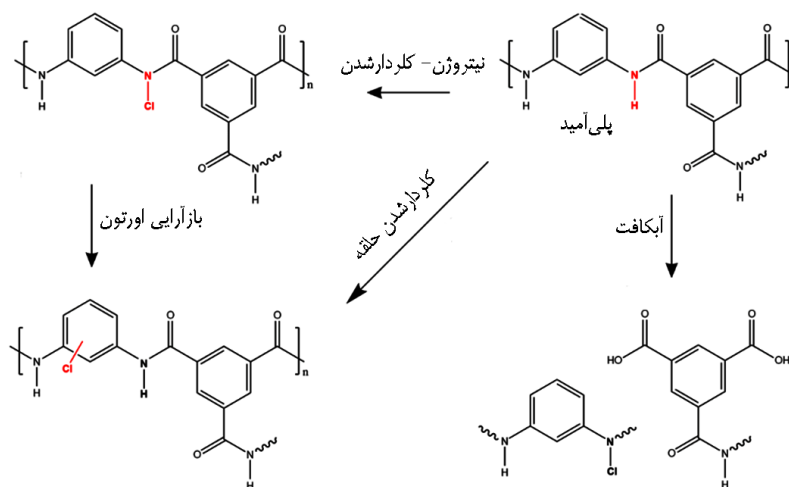
در جدول ۲ مقایسه ای از این پژوهش با برخی مطالعات انجام شده در زمینه مقاومت غشاهای کامپوزیتی فیلم نازک پلی آمیدی به کلر،



شکل ۶- درصد دفع نمک و شار آب دو غشای خام و اصلاح شده ۱٪ پیش و پس از کلرژنی.

سطح غشاست. این حفره ها باعث کاهش دفع نمک شده اند. همچنین مشاهده شد، میان شار مواد محلول برگشتی خاص و دفع نمک رابطه معکوس وجود دارد و هرچه شار مواد محلول برگشتی خاص غشا کمتر باشد، میزان گزینش پذیری آن بیشتر است. با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش ها، غشای اصلاح شده با محلول ۱٪ پلیمر درخت سان، به عنوان غشای بهینه در نظر گرفته شد.

شکل ۶ نشان دهنده شار آب و درصد دفع نمک دو غشای خام و اصلاح شده با ۱٪ پلیمر درخت سان پیش و پس از قرارگیری در محلول کلر است. دیده شد، شار آب هر دو غشا پس از کلرژنی افزایش یافت که علت آن آبکافت زنجیر پلی آمیدی ناشی از کلر است. بیشترین افزایش شار آب برای غشای خام است که از $5/0 \pm 1/1$ به $5/8 \pm 0/8$ (۱۶٪) افزایش یافت. این در حالی است که



شکل ۷- سازوکارهای نیتروژن-کلردار شدن، کلر زدن حلقه و آبکافت در حمله کلر به غشای پلی آمیدی.

جدول ۱- مطالعات انجام شده در زمینه مقاومت به کلر غشاهای کامپوزیتی فیلم نازک پلی آمیدی در سامانه اسمز معکوس.

مرجع	شرایط کلرزنی		پس از کلرزنی		پیش از کلرزنی		شرایط آزمون اسمز معکوس		نوع غشا
	pH	در معرض سدیم هیپوکلریت (ppm.h)	دفع نمک (%)	شار آب (LMH)	دفع نمک (%)	شار آب (LMH)	فشار (bar)	غلظت سدیم کلرید (ppm)	
۱۷	۹	۱۲۰۰۰	۹۷/۳	۳۵/۲	۹۸/۶	۱۶/۱	۲۰	۳۰۰۰	TFC
	۹	۱۲۰۰۰	۹۶/۸	۶۵	۹۶/۶	۳۹	۲۰	۳۰۰۰	TFN-HNT-G2
۲۲	۱۰/۵	۱۰۰۰۰	۸۰/۴	۱۶/۹	۸/۶	۱۵/۱	۱۵/۵	۲۰۰۰	TFC
	۱۰/۵	۱۰۰۰۰	۹۷/۵	۱۹/۸	۹۷/۵	۱۶/۷	۱۵/۵	۲۰۰۰	ایزوفتالویل کلرید
۲۸	۹	۱۵۰۰۰	۹۸/۵	۱۴/۵	۹۸/۲	۱۵/۲	۵	۵۰۰	TFC BW30FR (Dow)
	۹	۱۵۰۰۰	۹۵/۹	۴۲/۹	۹۸/۱	۲۶	۵	۵۰۰	TFC (Hangzhou Tianchuang)
	۹	۱۵۰۰۰	۹۸/۴	۲۹/۵	۹۸/۴۵	۲۸/۸	۵	۵۰۰	g-TFC (پلی وینیل الکل)
۲۹	۷	۴۸۰۰۰	۹۱/۱	۳۲/۵	۹۹/۳	۹/۱۸	۱۵/۵	۲۰۰۰	TFC
	۷	۴۸۰۰۰	۹۹/۱	۱۷/۸	۹۹/۴	۱۶/۱	۱۵/۵	۲۰۰۰	g-TFN (گرافن اکسید (GO))
۳۰	۴	۱۰۰۰	۹۳/۷	۱۲۴	۹۷	۱۰۵/۸	۱۵/۵	۲۰۰۰	TFC RE4024-TL (Woongin)
	۴	۱۰۰۰	۹۴/۹	۹۰	۹۶/۹	۷۹/۵	۱۵/۵	۲۰۰۰	g-TFC RE4024-TL (ایمیدازولیدینیل اوره) ^۱
۲۷	۴	۱۰۰۰	۹۲/۳	۷/۹	۹۶/۱	۳۴/۶	۱۵	۲۰۰۰	TFC BW30 (Filmtec)
	۴	۱۰۰۰	۹۴/۱	۱۲/۶	۹۵/۲	۳۲/۳	۱۵	۲۰۰۰	TFC BW30-g-PAMAM
	۴	۱۰۰۰	۹۶/۳	۱۰/۲	۹۷/۲	۳۴/۸	۱۵	۲۰۰۰	TFC BW30-g-PAMAM-GO
۲۲	۳/۵	۱۰۰۰۰	۶۲/۵	۲۵/۸	۹۸/۶	۱۵/۱	۱۵/۵	۲۰۰۰	TFC
	۳/۵	۱۰۰۰۰	۸۰	۲۰/۸	۹۷/۵	۱۶/۷	۱۵/۵	۲۰۰۰	ایزوفتالویل کلرید
۳۱	-	۵۰۰	۶۷/۱	۴۸/۶	۹۸	۲۲/۱	۵۵	۳۵۰۰۰	TFC
	-	۵۰۰	۷۵/۲	۳۸/۹	۹۴/۱	۳۱/۱	۵۵	۳۵۰۰۰	TFC/aPES
	-	۵۰۰	۸۲/۵	۳۸/۴	۹۷/۷	۳۴/۵	۵۵	۳۵۰۰۰	^۲ TFN/aPES-HBP-g-silica

^۱ پیوند و قابل کاهش، داده ها پس از یک چرخه کلرزنی و^۲ پلی (آریل اتر سولفون) - پیوند یافته با نانوذرات سیلیکا و * دفع نمک بر اساس رسانندگی محلول.

جدول ۲- مقایسه مطالعات انجام‌شده در زمینه مقاومت به کلر غشاهای کامپوزیتی فیلم نازک پلی‌آمیدی در سامانه اسمز مستقیم.

مرجع	شرایط کلرزنی		پس از کلرزنی		پیش از کلرزنی		شرایط آزمون اسمز مستقیم		نوع غشا
	pH	در معرض سدیم هیپوکلریت (ppm.h)	شار نمک برگشتی (GMH)	شار آب (LMH)	شار نمک برگشتی (GMH)	شار آب (LMH)	سدیم کلرید (M)	غلظت سدیم کلرید (g/L)	
این پژوهش	۵/۵	۱۲۰۰۰	۱۷/۳	۵/۸	۶/۷۲	۵/۰	۰/۵۴	۱	غشای خام
	۵/۵	۱۲۰۰۰	۵/۱	۴/۹	۳/۹۷	۴/۷	۰/۵۴	۱	غشای اصلاح‌شده با ۱٪
۳۲	۵/۵	۲۰۰۰	۱/۱	۰/۶	۲۴/۳	۱۷	۲	DI	TFC
	۵/۵	۸۰۰۰	۴/۳	۴	۲۴/۳	۱۷	۲	DI	TFC
	۵/۵	۲۰۰۰	۱۴/۴	۲/۹	۲۵/۲	۲۲/۷	۲	DI	^۱ TFC/ASM-3
	۵/۵	۸۰۰۰	۱۴/۳	۴/۳	۲۵/۲	۲۲/۷	۲	DI	TFC/ASM-3
	-	۱۰۰۰	۲۱۰	۵	۵/۵	۱۲/۷	۱	DI	TFC
۳۳	-	۲۴۰۰۰	-	-	۵/۵	۱۲/۷	۱	DI	TFC
	-	۱۰۰۰	۴	۸/۸	۴/۳	۸/۳	۱	DI	^۱ LDH _{de} -TFC-3
	-	۲۴۰۰۰	۲۳	۱۴/۳	۴/۳	۸/۳	۱	DI	LDH _{de} -TFC-3
	۷	۱۲۰۰۰	>۹۰	۳۳	۲/۵	۲۰	۱	DI	TFC
۹	۷	۱۶۰۰۰	>۱۷۰	۲۸	۲/۵	۲۰	۱	DI	TFC
	۷	۱۲۰۰۰	<۷	۳۹/۵	۴/۳	۲۵	۱	DI	^۲ TFC/QDAP-0.6
	۷	۱۶۰۰۰	۷/۷۳	۴۱	۴/۳	۲۵	۱	DI	TFC/QDAP-0.6
	۷	۴۸۰۰۰	۴۱/۹	۳۹	۱۵/۶	۱۶/۵	۲	DI	TFC
۳۴	۷	۴۸۰۰۰	۱۳/۸	۳۸/۳	۱۲/۵	۳۵/۵	۲	DI	^۲ TFC- PEI- 5p
	۷	۴۸۰۰۰	۱۵/۶	۲۹/۷	۱۴/۱	۲۷	۲	DI	^۵ TFC- PEI- 5c

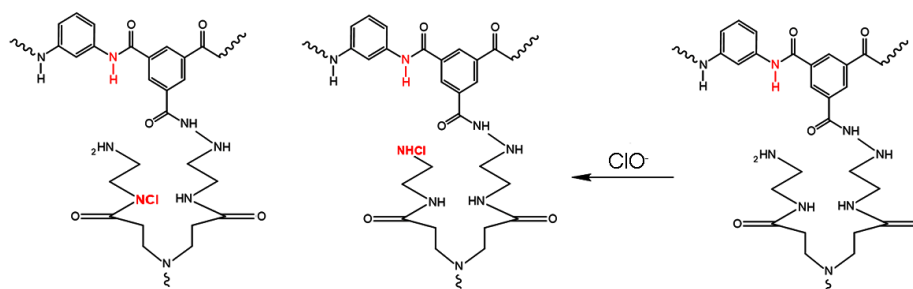
^۱ مجموعه‌ای از مواد سولفونات آروماتیک با آب‌دوستی زیاد (ASMs)،

^۲ اتصال نانوذرات هیدروکسید دولایه به غشا با روش رسوبی (LDH_{de}).

^۳ اصلاح سطح غشا با ۶،۲-دی‌آمینو پیریدین (۰/۶٪ wt) و ^۳ پروموپروپیلونیک اسید،

^۴ اصلاح سطح با پلی‌اتیلن ایمین و فسفونیک اسید و

^۵ اصلاح سطح با پلی‌اتیلن ایمین و کربوکسیلیک اسید.



شکل ۸- واکنش کلر با گروه‌های آمین و آمید پلی (آمیدوآمین) درخت‌سان.

نتیجه‌گیری

در سامانه اسمز مستقیم آمده است.

ناپایداری غشاهای کامپوزیتی فیلم نازک پلی آمیدی تجاری در برابر کلر، از چالش‌های جدی برای نمک‌زدایی آب است. در این پژوهش، با استفاده از اصلاح سطح غشای تجاری پلی آمیدی به کمک پلیمر پرشاخه معادل نسل ۲ پلی (آمیدوآمین) درخت‌سان در سه غلظت ۰/۵، ۱ و ۱/۵٪ وزنی-حجمی به این مسئله پرداخته شد. نتایج آزمون اسمز مستقیم نشان داد، با اصلاح غشای تجاری مقدار شار آب کمی کاهش و درصد دفع نمک به نسبت غشای خام افزایش یافته است. آزمایش‌های کلرزی همراه با بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی تأیید کرد، گروه‌های آمین و آمید اضافی در پلی (آمیدوآمین) درخت‌سان به عنوان رباینده کلر عمل کرده و از غشای تجاری تا حدودی محافظت کرده است. با این حال، سازوکار دقیق کلرزی غشا باید موضوع پژوهش‌های بیشتری قرار گیرد. با توجه به نتایج مشاهده شد، مقدار شار آب برای غشای خام از $5/0 \pm 1/1$ به $5/8 \pm 0/8$ LMH (۱۶٪) و شار آب برای غشای اصلاح‌شده بهینه با غلظت ۱٪ از $4/7 \pm 0/6$ به LMH $4/9 \pm 0/6$ (۴٪)، افزایش یافت. همچنین دیده شد، درصد دفع نمک غشای خام از $97/6 \pm 0/9$ به $93/7 \pm 1/5$ (۴٪) و غشای اصلاح‌شده از $98/5 \pm 0/3$ به $95/5 \pm 1/2$ (۳٪) کاهش یافت. نتایج این پژوهش نشان از بهبود ویژگی غشا پس از اصلاح سطح با ترکیبات آمین درخت‌سان، به ویژه مقاومت به کلرزی دارد.

مراجع

[1] M. Li, Z. Lv, J. Zheng, J. Hu, C. Jiang, M. Ueda, X. Zhang, and L. Wang, "Positively charged nanofiltration membrane with dendritic surface for toxic element removal", *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 784-792, 2017.

۳-۳ سازوکار پیشنهادی تخریب لایه پلی آمیدی به وسیله کلر

شکل ۷ سازوکار پیشنهادی حمله کلر به لایه پلی آمیدی غشای کامپوزیتی فیلم نازک را نشان می‌دهد. یکی از این سازوکارها، حمله بار جزئی مثبت کلر به جفت الکترون ناپیوندی نیتروژن گروه آمید و مختل شدن پیوند هیدروژنی موجود در لایه پلی آمیدی، معروف به نیتروژن-کلردار شدن (N-chlorination) و جایگزینی اتم کلر با هیدروژن گروه آمیدی است. این فرایند ممکن است به وسیله آبکافت و شکاف پیوند کربن-نیتروژن در لایه پلی آمیدی دنبال شود. سازوکار دیگر، تخریب برگشت‌ناپذیر زنجیرهای موجود در لایه پلی آمید به وسیله کلردار شدن حلقه با حمله مستقیم کلر به حلقه آروماتیک است. سازوکار پیشنهادی دیگر، حمله سریع کلر به پیوند نیتروژن-کربن و به دنبال آن کاهش کلر از حلقه آروماتیک از طریق بازآرایی درون مولکولی، معروف به بازآرایی‌های اورتون (Orton rearrangements) و آبکافت است. به طور کلی، کلر به جفت الکترون نیتروژن آمید و حلقه آروماتیک در لایه پلی آمیدی حمله کرده، که به تغییر شکل در زنجیر پلیمر یا شکاف زنجیری در پیوندهای آمید منجر شده است [۳۵، ۲۶].

در شکل ۸ نقش دفاعی گروه‌های آمین در دسترس پلی (آمیدوآمین) درخت‌سان در برابر حمله مستقیم کلر به لایه پلی آمیدی نشان داده شده است. وجود گروه‌های آمین در دسترس پس از اصلاح سطح، سبب واکنش کلر آزاد به جای حمله به لایه پلی آمیدی است، از این رو، مقاومت به کلر برای غشای اصلاح‌شده توجیه می‌شود.

[2] P. Lu, S. Liang, T. Zhou, X. Mei, Y. Zhang, C. Zhang, A. Umar, H. Wang, and Q. Wang, "Typical thin-film composite (TFC) membranes modified with inorganic nanomaterials for forward osmosis: a review", *Nanosci. Nanotechnol. Lett.*, vol. 8, no. 11, pp. 906-

- 916, 2016.
- [3] W.J. Koros and C. Zhang, "Materials for next-generation molecularly selective synthetic membranes", *Nat. Mater.*, vol. 16, no. 3, pp. 289-297, 2017.
- [4] R. Verbeke, W. Arts, E. Dom, M. Dickmann, W. Egger, G. Koeckelberghs, A. Szymczyk, and I.F. Vankelecom, "Transferring bulk chemistry to interfacial synthesis of TFC-membranes to create chemically robust poly(epoxyether) films", *J. Membr. Sci.*, vol. 582, pp. 442-453, 2019.
- [5] R. Verbeke, V. Gomez, and I.F. Vankelecom, "Chlorine-resistance of reverse osmosis (RO) polyamide membranes", *Prog. Polym. Sci.*, vol. 72, pp. 1-15, 2017.
- [6] N. Park, B. Kwon, I.S. Kim, and J. Cho, "Biofouling potential of various NF membranes with respect to bacteria and their soluble microbial products (SMP): characterizations, flux decline, and transport parameters", *J. Membr. Sci.*, vol. 258, no. 1-2, pp. 43-54, 2005.
- [7] A. Ettori, E. Gaudichet-Maurin, J.-C. Schrotter, P. Aimar, and C. Causserand, "Permeability and chemical analysis of aromatic polyamide based membranes exposed to sodium hypochlorite", *J. Membr. Sci.*, vol. 375, no. 1-2, pp. 220-230, 2011.
- [8] M. Al-Abri, B. Al-Ghafri, T. Bora, S. Dobretsov, J. Dutta, S. Castelletto, L. Rosa, and A. Boretti, "Chlorination disadvantages and alternative routes for biofouling control in reverse osmosis desalination", *NPJ Clean Water*, vol. 2, no. 1, pp. 1-16, 2019.
- [9] J. Wang, S. Zhang, P. Wu, W. Shi, Z. Wang, and Y. Hu, "In situ surface modification of thin-film composite polyamide membrane with zwitterions for enhanced chlorine resistance and transport properties", *ACS Appl. Mater. Interf.*, vol. 11, no. 12, pp. 12043-12052, 2019.
- [10] C. Liu, Y. Guo, X. Wei, C. Wang, M. Qu, D.W. Schubert, and C. Zhang, "An outstanding antichlorine and antibacterial membrane with quaternary ammonium salts of alkenes via in situ polymerization for textile wastewater treatment", *Chem. Eng. J.*, vol. 384, pp. 123306, 2020.
- [11] D.A. Bosman, H. Janssen, and E. Meijer, "About dendrimers: structure, physical properties, and applications", *Chem. Rev.*, vol. 99, no. 7, pp. 1665-1688, 1999.
- [12] A. Sarkar, P.I. Carver, T. Zhang, A. Merrington, K.J. Bruza, J.L. Rousseau, S.E. Keinath, and P.R. Dvornic, "Dendrimer-based coatings for surface modification of polyamide reverse osmosis membranes", *J. Membr. Sci.*, vol. 349, no. 1-2, pp. 421-428, 2010.
- [13] J.R. McCutcheon, R.L. McGinnis, and M. Elimelech, "A novel ammonia—carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process", *Desalination*, vol. 174, no. 1, pp. 1-11, 2005.
- [14] P. Zhao, B. Gao, Q. Yue, S. Liu, and H.K. Shon, "The performance of forward osmosis in treating high-salinity wastewater containing heavy metal Ni^{2+} ", *Chem. Eng. J.*, vol. 288, pp. 569-576, 2016.
- [15] N. Akther, S. Daer, Q. Wei, I. Janajreh, and S.W. Hasan, "Synthesis of polybenzimidazole (PBI) forward osmosis (FO) membrane and computational fluid dynamics (CFD) modeling of concentration gradient across membrane surface", *Desalination*, vol. 452, pp. 17-28, 2019.
- [16] B. Hu, M. Jiang, S. Zhao, X. Ji, Q. Shu, B. Tian, T. He, and L. Zhang, "Biogas slurry as draw solution of forward osmosis process to extract clean water from micro-polluted water for hydroponic cultivation", *J. Membr. Sci.*, vol. 576, pp. 88-95, 2019.
- [17] F. Asempour, S. Akbari, M.H. Kanani-Jazi, A. Atashgar, T. Matsuura, and B. Kruczek, "Chlorine-resistant TFN RO membranes containing modified poly (amidoamine) dendrimer-functionalized halloysite nanotubes", *J. Membr. Sci.*, vol. 623, pp. 119039, 2021.
- [18] A. Simon, L.D. Nghiem, P. Le-Clech, S.J. Khan, and J.E. Drewes, "Effects of membrane degradation on the removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) by NF/RO filtration processes", *J. Membr. Sci.*, vol. 340, no. 1-2, pp. 16-25, 2009.
- [19] V.T. Do, C.Y. Tang, M. Reinhard, and J.O. Leckie, "Effects of chlorine exposure conditions on physiochemical properties and performance of a polyamide membrane Mechanisms and implications", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 24, pp. 13184-13192, 2012.
- [20] C.Y. Tang, Y.-N. Kwon, and J.O. Leckie, "Effect of membrane chemistry and coating layer on physiochemical properties of thin film composite polyamide RO and NF membranes: I. FTIR and XPS characterization of polyamide and coating layer chemistry", *Desalination*, vol. 242, no. 1-3, pp. 149-167, 2009.
- [21] Y.-N. Kwon and J.O. Leckie, "Hypochlorite degradation of crosslinked polyamide membranes: I. Changes in chemical/morphological properties", *J. Membr. Sci.*, vol. 283, no. 1-2, pp. 21-26, 2006.
- [22] Y. Yao, W. Zhang, Y. Du, M. Li, L. Wang, and X. Zhang, "Toward enhancing the chlorine resistance of reverse osmosis membranes: an effective strategy via an end-capping technology", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 3, pp. 1296-1304, 2019.
- [23] D. Emadzadeh, W. Lau, M. Rahbari-Sisakht, H. Ilbeygi, D. Rana, T. Matsuura, and A. Ismail, "Synthesis, modification and optimization of titanate nanotubes—

- polyamide thin film nanocomposite (TFN) membrane for forward osmosis (FO) application”, *Chem. Eng. J.*, vol. 281, pp. 243-251, 2015.
- [24] C.Y. Tang, Y.-N. Kwon, and J.O. Leckie, “Effect of membrane chemistry and coating layer on physiochemical properties of thin film composite polyamide RO and NF membranes: II. membrane physiochemical properties and their dependence on polyamide and coating layers”, *Desalination*, vol. 242, no. 1-3, pp. 168-182, 2009.
- [25] X. Zhao, J. Li, and C. Liu, “Improving the separation performance of the forward osmosis membrane based on the etched microstructure of the supporting layer”, *Desalination*, vol. 408, pp. 102-109, 2017.
- [26] J. Glater, S.-k. Hong, and M. Elimelech, “The search for a chlorine-resistant reverse osmosis membrane”, *Desalination*, vol. 95, no. 3, pp. 325-345, 1994.
- [27] V. Vatanpour and A. Sanadgol, “Surface modification of reverse osmosis membranes by grafting of polyamidoamine dendrimer containing graphene oxide nanosheets for desalination improvement”, *Desalination*, vol. 491, pp. 114442, 2020.
- [28] Y. Hu, K. Lu, F. Yan, Y. Shi, P. Yu, S. Yu, S. Li, and C. Gao, “Enhancing the performance of aromatic polyamide reverse osmosis membrane by surface modification via covalent attachment of polyvinyl alcohol (PVA)”, *J. Membr. Sci.*, vol. 501, pp. 209-219, 2016.
- [29] H.-R. Chae, J. Lee, C.-H. Lee, I.-C. Kim, and P.-K. Park, “Graphene oxide-embedded thin-film composite reverse osmosis membrane with high flux, anti-biofouling, and chlorine resistance”, *J. Membr. Sci.*, vol. 483, pp. 128-135, 2015.
- [30] J. Xu, Z. Wang, L. Yu, J. Wang, and S. Wang, “A novel reverse osmosis membrane with regenerable anti-biofouling and chlorine resistant properties”, *J. Membr. Sci.*, vol. 435, pp. 80-91, 2013.
- [31] S.G. Kim, J.H. Chun, B.-H. Chun, and S.H. Kim, “Preparation, characterization and performance of poly (arylene ether sulfone)/modified silica nanocomposite reverse osmosis membrane for seawater desalination”, *Desalination*, vol. 325, pp. 76-83, 2013.
- [32] Q.-W. Meng and Q. Ge, “Enhancing chlorine resistance and water permeability during forward osmosis separation using superhydrophilic materials with conjugated systems”, *ACS Appl. Mater. Interf.*, vol. 12, no. 31, pp. 35393-35402, 2020.
- [33] P. Lu, S. Liang, T. Zhou, T. Xue, X. Mei, and Q. Wang, “Layered double hydroxide nanoparticle modified forward osmosis membranes via polydopamine immobilization with significantly enhanced chlorine and fouling resistance”, *Desalination*, vol. 421, pp. 99-109, 2017.
- [34] L. Shen, F. Wang, L. Tian, X. Zhang, C. Ding, and Y. Wang, “High-performance thin-film composite membranes with surface functionalization by organic phosphonic acids”, *J. Membr. Sci.*, vol. 563, pp. 284-297, 2018.
- [35] G.-R. Xu, J.-N. Wang, and C.-J. Li, “Strategies for improving the performance of the polyamide thin film composite (PA-TFC) reverse osmosis (RO) membranes: Surface modifications and nanoparticles incorporations”, *Desalination*, vol. 328, pp. 83-100, 2013.

Strategies for the Development of Science and Technology of Protective Layers Against Bullets and Fragments

Seyed Jalaledin Najafi¹, Dariush Semnani², Hanif Kazerooni^{1*}, and Iman Forooghi Hassanabadi¹

1. Suprme University of National Defense, Department of Amad, Defense Technology and Passive Defense, Tehran, Iran

2. Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box 15875-4413, Tehran, Iran

Received: 23 June 2021, Accepted: 11 October 2021

Abstract

It is very important to maintain the health and resistance of the military and security forces against bullets and fragments from explosions on the battlefields. Due to the increasing development of technology for making weapons and ammunition and the need to increase the efficiency and comfort of personal armor in order to be able to use them more and more widely, research and development in this field has always been ongoing. In order to focus and macro-policy at the national level, the development of science and technology development strategies for protective layers against bullets and fragments from explosions is targeted in this study. For this purpose, using the SWOT analysis method and obtaining the opinion of the elites in this field, the required strategies have been extracted. The strategies obtained in order of priority include increasing international interactions to supply raw materials for the production of bulletproof layers, expanding research and development in universities and research centers, improving defense in the field of military protection, more attention to domestic production and self-sufficiency in advanced fiber production and other materials are needed to make bulletproof layers and to raise the awareness of government officials, managers and policymakers about advanced fibers. Paying attention to these strategies can put all ongoing research activities related to the future of this field in a logical direction, prevent duplication and by creating structures and incentives, lead to the growth and development of bulletproof layers technology in the country.

Keywords: strategic management, SWOT analysis, bulletproof layers, high performance fibers

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hanif.kazerooni@gmail.com

۲ تجزیه

۲-۱ مروری بر ادبیات پژوهش

از آغاز پیدایش بشر، مادامی که انسان سلاح‌های خود را توسعه داده است، به‌طور هم‌زمان به تولید زره‌های شخصی برای مقابله و کاهش اثر آن‌ها نیز پرداخته است. با بررسی زره‌های شخصی ساده و ناخوشایند روم باستان تا زره‌های شوالیه‌های قرون وسطی، روند پیشرفت و مدرن‌سازی این حوزه مشاهده می‌شود. اختراع باروت سبب توقف توسعه زره‌های یادشده برای چند قرن شد [۲].

زره‌های مدرن که در زمان جنگ جهانی دوم و جنگ کره به‌وجود آمد، اولین تجربه برای ساخت انواع سبک و توانمند بود. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های فنی در ساخت مواد کامپوزیتی برای به‌کارگیری آن‌ها در ساخت محافظ‌های شخصی به سرعت رشد کرده است. پلاستیک‌های تقویت‌شده، سرامیک‌ها و منسوجات برای ساخت زره‌های سبک‌وزن توسعه یافته است. در اوایل دهه ۱۹۶۰، زره‌های سرامیکی اولین پیشرفت‌های فنی را با کاهش وزن و در عین حال افزایش حفاظت بالستیک به ارمغان آوردند. در اواخر دهه ۱۹۶۰ بود که الیاف جدید نساجی کشف شدند و انقلابی در تولید نسل جدید زره‌های شخصی کم‌وزن به‌وجود آمد [۳]. در اوایل سال ۱۹۶۵ میلادی، گروه پژوهشی DuPont الیاف آرامید جدیدی را به نام کولار ۱۶ معرفی کرد. این الیاف مستحکم‌تر از فولاد بوده و مقاومت بالستیک (ballistic resistance) بیشتری داشتند. کولار پیشرفت بسیار عظیمی در کارایی زره‌های شخصی ایجاد کرد [۴،۵].

به‌طور کلی، زره‌های مدرن به دو دسته زره‌های بدن سخت (hard body armour) و زره‌های بدن نرم (soft body armour) تقسیم می‌شوند. زره‌های سخت از مواد بالستیک (مقاوم در برابر برخورد پرتابه‌ها) سخت مانند سرامیک‌ها، صفحات پلاستیکی یا فلزی ساخته می‌شوند. در ساخت زره‌های نرم از مواد لیفی سبک‌وزن پلیمری مصنوعی استفاده می‌شود. این مواد مقاومت بالستیک بسیار زیادی نشان می‌دهند. مواد به‌کاررفته در زره‌های مصرفی از منسوجات شامل آرامیدها مانند کولار، توارون (Twaron) و تکنورا (Technorra)، پلی‌اتیلن فراسنگین بسیار آرایش‌یافته نظیر اسپکترا (Spectra) و داینیما (Dyneema)، پلی (پارافیلن-۶،۲-بنزوبیس‌اکسازول) یا PBO مانند زایلون (Zylon)، پلی‌آمیدها (مانند نایلون) و غیره است. امروزه، برخی از این مواد مانند آرامیدها به‌وفور در ساخت زره‌های پیشرفته به‌کارگرفته می‌شوند. در ادامه، توضیحات مختصری درباره برخی از مهم‌ترین الیاف استفاده‌شده

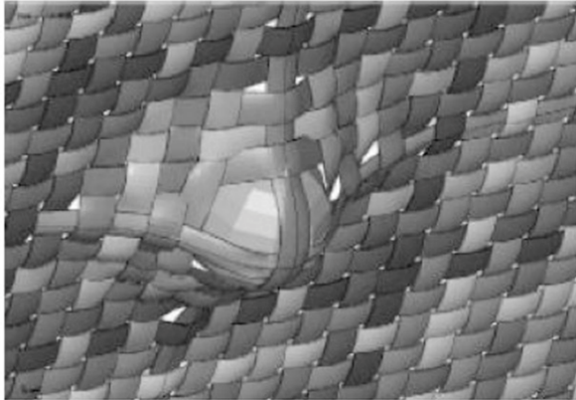
می‌کردند. در برابر این موضوع، ضخامت زره‌ها نیز افزوده شد. اما این تغییر، باعث افزایش وزن و دست و پاگیر شدن آن‌ها شد و استفاده از این نوع زره‌ها را با محدودیت فراوانی مواجه ساخت. تا سال‌ها، زره‌های شخصی از سلاح‌ها عقب مانده بودند تا اینکه دانشمندان در قرن بیستم و به‌ویژه در دهه ۱۹۶۰ با تکیه بر پیشرفت دانش متالورژی و پلیمر، جلیقه‌های ضدگلوله مقاوم و جدیدی را عرضه کردند [۱].

زره‌های شخصی جدید در مقایسه با انواع قدیمی‌تر، از الیاف بسیار مستحکم با شبکه متراکم تشکیل شده‌اند که از قطعات سنگین فلزی ساخته می‌شدند. سازوکار عملکرد آن‌ها بدین صورت است که با تکیه بر ساختار شبکه‌ای، انرژی گلوله در سطح وسیعی پراکنده و جذب می‌شود، در عین حال نباید به سمت داخل بدن تغییر شکل دهند، زیرا ممکن است صدمات شدیدی به اجزای داخلی بدن وارد کنند.

امروزه با افزایش جمعیت در شهرهای بزرگ، میزان جرم و جنایت نیز افزایش یافته است. سرقت مسلحانه و آدم‌ربایی از جمله جرم‌هایی هستند که وقوع آن‌ها افزایش یافته است. در نتیجه محافظت در برابر تهدیدات اسلحه‌های کوچک یکی از موارد مهم در این زمینه شده است.

تاکنون فعالیت‌های مختلفی در کشور برای پژوهش و توسعه ساخت لایه‌های محافظ در برابر گلوله‌ها و ترکش‌های حاصل از انفجار انجام گرفته و محصولات مختلفی نیز تولید شده است. با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته در این مطالعه، عمدتاً محصولات تولیدی کارایی کافی نداشته‌اند یا به‌دلیل استفاده از فناوری قدیمی یا عدم استفاده از مواد اولیه روز دنیا، به‌طور عمده نمی‌توانند توسط نیروهای مسلح استفاده شوند. همچنین، پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه نیز به‌طور پراکنده و بدون توجه به یک نقشه راه مشخص انجام گرفته است. بنابراین در مطالعه حاضر، تدوین راهبردهای توسعه علوم و فناوری لایه‌های محافظ در برابر گلوله‌ها و ترکش‌های حاصل از انفجار هدف‌گذاری شده است. در این مطالعه، پژوهشگران بر این باورند که توجه و عمل به راهبردهای تدوین‌شده و قرارگیری در یک مسیر مشخص، می‌تواند سبب هم‌راستایی فعالیت‌های پژوهشی شود، از انجام فعالیت‌های تکراری جلوگیری کند و موجب ارتقای دانش فنی موجود در داخل کشور شود.

چشم‌انداز این حوزه را می‌توان دستیابی به دانش فنی روز با امکان ساخت محصولات به‌روز و با امکان ارتقای فنی آن‌ها با توجه به نیازهای آتی در نظر گرفت.



شکل ۱- تصویر گلوله گیرافتاده در ساختار پارچه [۱۰].

الیاف تشکیل‌دهنده و هندسه پارچه (مانند نوع بافت، تعداد الیاف در نخ و چگالی نخ‌ها) در واحد سطح و غیره است [۹]. چگالی نخ‌ها یا درواقع چگالی بافت (ضریب پوشاندگی) با توجه به عرض ناحیه بافت و تعداد نخ‌های تار و پود مشخص می‌شود و شاخصی برای تعیین مساحت پوشش‌یافته با پارچه است. شکل ۱ نمایانگر گلوله‌ای است که در ساختار پارچه‌ای با بافت متراکم تافته گیر افتاده است.

اصل اساسی در عملکرد زره‌های شخصی، تبدیل سریع و توزیع انرژی جنبشی گلوله پرتاب‌شده به انرژی کرنشی سامانه محافظ بالستیک است. زره‌های شخصی مدرن با سه روش، حفاظت مورد نیاز را تأمین می‌کنند:

- ۱- زره، پرتابه را به‌طور کامل پس می‌زند (این روش معمول نیست)،
- ۲- زره، پرتابه را با ازبین‌بردن انرژی جنبشی آن در راستای صفحه آن متوقف می‌کند و
- ۳- ترکیب حالت‌های ۱ و ۲ [۱۱، ۱۲].

وقتی گلوله‌ای به زره شخصی برخورد می‌کند، در شبکه‌ای از الیاف بسیار مستحکم گرفتار می‌شود. این الیاف انرژی برخورد گلوله به زره را جذب یا توزیع می‌کنند. درنتیجه، گلوله تغییر شکل می‌یابد و گاهی به‌شکل قارچ درمی‌آید. انرژی اضافی گلوله به‌وسیله لایه‌های پی‌درپی مواد به‌کاررفته در جلیقه تا زمان توقف کامل آن جذب می‌شود. از آنجا که الیاف در یک تک‌لایه یا لایه‌های مجاور هم با یکدیگر وارد عمل می‌شوند، سطح وسیعی از زره در ممانعت از نفوذ پرتابه درگیر می‌شود. این موضوع سبب ازبین‌رفتن نیروهای می‌شود که به جراحات غیرنفوذی در اعضای داخلی بدن، موسوم به ترومای غیرنافذ، منجر می‌شوند [۱۳، ۱۴]. این فرایند در شکل ۲ نشان داده شده است.

در حفاظت بالستیک ارائه می‌شود.

تا پیش از سال ۱۹۷۲، الیاف پلی‌آمید یا نایلون‌ها بسیار مطرح بودند. نایلون ۶۶ (نایلون بالستیک) دارای درجه بلورینگی زیاد و ازدیاد طول کم است و همچنان در زره‌های شخصی استفاده می‌شود [۶، ۷].

آرامیدها مشهورترین الیاف سنتز شده کارا با ساختار آلی هستند. آرامیدها از استحکام کششی و مقاومت گرمایی بیشتری در مقایسه با نایلون‌ها برخوردارند. پارآرامیدها (با نام تجاری کولار و توارون) دارای استحکام کششی و مقاومت گرمایی بیشتری در مقایسه با آرامیدها هستند. استحکام ضربه‌ای زیاد پارآرامیدها سبب شهرت زیاد این مواد به‌عنوان اولین نسل مواد به‌کاررفته در جلیقه‌های ضدگلوله شده است [۵].

الیاف کولار که اولین بار توسط شرکت DuPont ساخته شد، امروزه به‌طور گسترده در زره‌های مدرن کم‌وزن به‌کارگرفته شده و حفاظت بالستیک را نسبت به پیشینیان آن به‌شدت بهبود بخشیده است. الیاف کولار ترکیب منحصر به فردی از خواص، شامل استحکام کششی زیاد با وجود سبکی، ازدیاد طول تا پارگی کم، مدول کشسانی زیاد، رسانندگی الکتریکی کم، مقاومت شیمیایی زیاد، انقباض گرمایی کم، چقرمگی زیاد (کار تا حد پارگی)، پایداری ابعادی عالی، استحکام برشی زیاد و مقاومت در برابر آتش هستند. این الیاف ۵ مرتبه مستحکم‌تر از فولادی با وزن مشابه بوده و از وزن کم، انعطاف‌پذیری و راحتی برخوردارند [۴، ۸]. توارون نوع دیگری از الیاف پارآرامید است که توسط شرکت AkzoNobel (هم‌اکنون توسط شرکت Teijin) ساخته شده و امروزه شهرت زیادی در استفاده در زره‌های شخصی دارد. گزارش شده است، جلیقه‌های ساخته‌شده از توارون CT، ۲۳٪ سبک‌تر از سایر جلیقه‌ها با آرامیدهای استاندارد هستند [۵].

الیاف اسپکترا تولیدی شرکت AlliedSignal (هم‌اکنون شرکت Honeywell) نوعی الیاف پلی‌اتیلن با استحکام بسیار زیاد هستند. به‌طور کلی، الیاف اسپکترا در یک وزن یکسان با فولاد، ۱۰ مرتبه قوی‌تر بوده و دوام بیشتری نسبت به پلی‌استر دارند. همچنین، استحکام ویژه آن ۴۰٪ بیش از الیاف آرامید است [۵]. الیاف زایلون (PBO) نوع جدیدی از الیاف کارا بوده که توسط شرکت Toyobo معرفی شده است و امروزه در زره‌های مدرن به‌کارگرفته می‌شوند. الیاف زایلون استحکام و مدولی تقریباً دو برابر الیاف آرامید دارد [۵]. پارچه‌های ضدگلوله از الیافی با استحکام و مدول زیاد مانند کولار، توارون و داینیما ساخته می‌شوند. کارایی بالستیک این پارچه‌ها وابسته به خواص مکانیکی (به‌ویژه خواص دینامیکی)

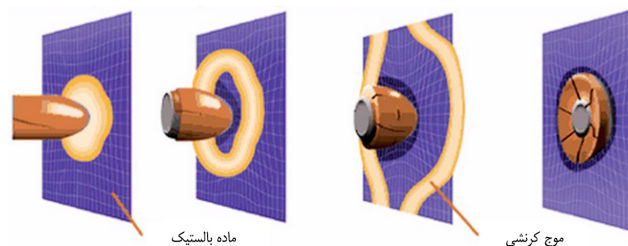
مشارکت فعال تولیدکنندگان زره‌های شخصی و کاربران آن تدوین شده است، این اطمینان را می‌دهد که انواع مختلف زره‌ها، چه سطح حداقل از محافظت بالستیک را فراهم می‌کنند. طبقه‌بندی انواع مختلف زره‌ها براساس این استاندارد مطابق جدول ۱ است. لازم به ذکر است، هم‌اکنون استاندارد NIJ به‌وسیله واحدهای ساخت زره‌های شخصی و نیروهای نظامی و امنیتی کشور ایران استفاده می‌شود [۱۷].

امروزه پژوهش و توسعه فراوانی برای ارتقای خواص زره‌ها، به‌ویژه در حوزه سبک‌سازی، افزایش راحتی کاربران و قابلیت آن‌ها برای مقابله با انواع جدید مخاطرات حاصل از گلوله‌ها و ترکش‌های حاصل از انفجار در جریان است. از جمله برخی از مطالعات اخیر، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استفاده از ساختارهای جدید مانند نانولوله‌های کربنی، گرافن و ساخت نانوکامپوزیت‌های آن‌ها برای استفاده در لایه‌های ضدگلوله [۱۸، ۱۹]،

- ساخت کامپوزیت‌های هیبرید الیاف ویژه برای دستیابی به خواص برتر هر یک از آن‌ها [۲۰]،

- استفاده از ساختارهای جدید صفحات سرامیکی و ترکیب آن‌ها با الیاف ویژه [۲۱]،



شکل ۲ - فرایند نفوذ گلوله [۱۵].

به‌دلیل افزایش شدید تلفات نیروهای پلیس در ایالات متحده در دهه ۱۹۶۰، سازمان ملی اجرای قانون و عدالت کیفری ایالات متحده (National Institute of Law Enforcement and Criminal Justice, NILECJ)، سلف سازمان ملی دادگستری ایالات متحده (National Institute of Justice, NIJ)، یک برنامه پژوهشی را برای پژوهش و توسعه درباره زره‌های سبک‌وزن برای استفاده تمام‌وقت نیروهای پلیس در مأموریت، ترتیب داد. هدف‌گذاری انجام‌شده توسط NIJ آن بود که با احتمال ۹۵٪، فرد پس از برخورد گلوله‌ای با کالیبر ۰/۳۸ و سرعت ۸۰۰ ft/s، بتواند زنده بماند. همچنین، احتمال نیاز به انجام جراحی در صورت برخورد گلوله ۱۰٪ یا کمتر باشد [۱۶].

الزامات عملکرد آخرین استاندارد NIJ (NIJ 0101.04) که با

جدول ۱- خلاصه متغیرهای آزمایش بالستیک و الزامات کارایی انواع زره‌پوش‌ها [۱۷].

الزامات کارایی		متغیرهای آزمایش					
تعداد برخورد لازم در زاویه	حداکثر عمق تغییر شکل (mm)	تعداد برخورد لازم در زاویه	حداقل سرعت لازم گلوله (m/s)	جرم اسمی گلوله (g)	مهمات استفاده‌شده	تعداد آزمایش‌ها	نوع زره
۳۰°		۰°					
۲	۴۴	۴	۲۵۹	۱۰/۲	۳۸ ویژه سربی نوک‌گرد (RN) ^۱	۱	نوع ۱
۲	۴۴	۴	۳۲۰	۲/۶	۲۲ سربی خان‌بلند پرسرعت ^۲ (LRHV)	۲	
۲	۴۴	۴	۳۸۱	۱۰/۲	۳۷ مگنوم JSP	۱	نوع ۲-۸
۲	۴۴	۴	۳۳۲	۸	۹ mm FMJ	۲	
۲	۴۴	۴	۴۲۵	۱۰/۲	۳۷ مگنوم JSP	۱	نوع ۲
۲	۴۴	۴	۳۵۸	۸	۹ mm FMJ	۲	
۲	۴۴	۴	۴۲۶	۱۵/۵۵	۴۴ مگنوم سربی نیمه‌سریپهن ^۳ ته‌پوش‌دار (SWC-gas checked)	۱	نوع ۳-۸
۲	۴۴	۴	۴۲۶	۸/۰	۹ mm FMJ	۲	
۰	۴۴	۶	۸۳۸	۹/۷	۷/۶۲ mm FMJ		نوع ۳
۰	۴۴	۱	۸۶۸	۱۰/۸	AP30-06 (ضدزره) ^۴		نوع ۴

^۱ round nose، ^۲ long rifle high velocity، ^۳ semi wad cutter و ^۴ armour piercing.

جدول ۲- تصویر کلی ماتریس SWOT [۲۷].

ماتریس عوامل خارجی	ماتریس عوامل داخلی	
	نقاط قوت (S)	نقاط ضعف (W)
فرصت‌ها (O)	راهبردهای SO بهره‌گیری از قوت‌ها برای بهره‌برداری از فرصت‌ها	راهبردهای WO بهره‌گیری از فرصت‌ها برای از بین بردن نقاط ضعف
تهدیدها (T)	راهبردهای ST دوری کردن از تهدیدات با استفاده از نقاط قوت	راهبردهای WT دوری کردن از تهدیدات و کاهش نقاط ضعف

آینده ارزیابی و شناسایی شده و راهبردهای مناسب برای رویارویی با آن‌ها انتخاب می‌شود [۲۷]. تصویر کلی ماتریس SWOT در جدول ۲ نشان داده شده است. این ماتریس از ابزارهای مهمی است که به کمک آن می‌توان اطلاعات مربوط به عوامل داخلی و خارجی را مقایسه و انواع راهبردهای ممکن را ارائه کرد. این راهبردها در گروه‌های WO، SO، ST و WT به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند:

– راهبردهای SO: در قالب این راهبردها، مجموعه با استفاده از نقاط قوت داخلی می‌کوشد تا از فرصت‌های خارجی بهره‌برداری کند.

– راهبردهای WO: هدف از این راهبردها آن است که مجموعه با بهره‌برداری از فرصت‌های موجود در محیط خارج بکوشد تا نقاط ضعف داخلی را بهبود بخشد.

– راهبردهای WT: مجموعه‌هایی که این راهبردها را به اجرا درمی‌آورند، حالت تدافعی به خود می‌گیرند و هدف آن‌ها، کاهش نقاط ضعف داخلی و پرهیز از تهدیدات ناشی از محیط خارجی است.

– راهبردهای ST: مجموعه‌ها در اجرای این راهبرد می‌کوشند با استفاده از نقاط قوت خود اثرهای ناشی از تهدیدات موجود در محیط را کاهش دهند یا آن‌ها را از بین ببرند.

۴-۲ ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی (ماتریس QSPM)

ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی، روشی تحلیلی است که با آن جذابیت نسبی راهبردها مشخص می‌شود. در هنگام استفاده از آن باید از قضاوت شهودی زیادی برخوردار بود. برای تکمیل این ماتریس، فرصت‌ها و تهدیدهای مهم خارجی و نقاط قوت و ضعف مهم داخلی در ستون سمت راست نوشته شده و به هر یک از آن‌ها که در موفقیت سازمان نقش دارند، ضریب داده می‌شود. این ضرایب در ستون بعدی نوشته شده و در ستون‌های بعد به ترتیب

– بهره‌گیری از ساختارهای مختلف بافت پارچه برای دستیابی به نوع بافت مناسب [۲۲]،

– استفاده از الیاف تک‌جهتی پلی‌اتیلن فراسنگین (UHMWPE) برای ارتقای خواص ضربه‌ای لایه‌های ضدگلوله [۲۳] و

– استفاده از کامپوزیت‌های الیاف طبیعی به دلیل خواص زیست‌تخریب‌پذیری، قیمت مناسب و وزن سبک [۲۴، ۲۵].

۲-۲ چارچوب تدوین راهبردها

در دنیای مدرن امروزی، هدایت مسیر توسعه فناوری، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، که در مراحل ابتدایی پیشرفت در برخی از حوزه‌های فناوری قرار دارند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. توسعه فناوری را که شامل هدف‌گذاری، تدوین راهبردها، تقویت سیاست‌ها و تعریف اقدامات است، نمی‌توان به سیر عمومی بازار آزاد واگذار کرد. در نتیجه، دولت‌ها با تدوین راهبردهای توسعه فناوری، نقشه‌ای برای برنامه‌ریزی در سطح ملی طراحی و به‌طور هدفمند مسیر توسعه فناوری مربوط را مشخص می‌کنند [۲۶].

راهبردها، مجموعه‌ای از جهت‌گیری‌هایی است که با مشخص کردن خطوط کلی، از عدم قطعیت موجود در توسعه فناوری می‌کاهند و به پرسش‌های اساسی سیاست‌گذاران در مسیر اهداف کلان پاسخ می‌دهند. راهبردها را می‌توان در واقع تعیین‌کننده مجموعه جهت‌گیری‌ها برای رسیدن به اهداف دانست. به بیان دیگر، راهبرد ملی فناوری، تعیین‌کننده چیرستی و چگونگی توسعه فناوری در سطح کلان است [۲۶].

در این مطالعه تلاش بر آن است تا با بهره‌گیری از نظرهای اساتید فن که به مطالعه اسناد تدوین‌شده پرداخته و تجارب مختلفی در اجرای آن‌ها نیز داشته‌اند، تا حد ممکن از تکرار تجربه‌های غلط جلوگیری و راهبردهایی منطبق بر نیازهای روز کشور و با بهره‌گیری از ادبیات علمی روز تدوین شود.

۳-۲ روش تحلیل SWOT

از روش‌های مهم و کارآمد در برنامه‌ریزی راهبردی، استفاده از روش تحلیل SWOT است. با استفاده از این روش، نقاط قوت (strengths)، ضعف (weaknesses)، فرصت‌ها (opportunities) و تهدیدها (threats) با نگاهی به فضای داخلی و عوامل بیرونی تعیین می‌شوند. سپس، راهبردها بر مبنای ماتریس SWOT استخراج می‌شوند. در تجزیه و تحلیل SWOT، با بررسی عوامل داخلی و خارجی، فرصت‌ها، تهدیدها، قوت‌ها و ضعف‌های مجموعه در

۳ نتایج و بحث

۳-۱ لایه‌های ضدگلوله در ایران

براساس مصاحبه‌های انجام‌گرفته و اخذ نظر خبرگان، پژوهش و توسعه برای ساخت جلیقه‌های ضدگلوله در ایران از حدود ۳۰ سال پیش آغاز شده است. فعالیت‌های انجام‌شده عمدتاً در مجتمع میلاد در مجموعه وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح است. هم‌اکنون، انواع جلیقه‌های ضدگلوله با سطوح مختلف استاندارد NIJ تولید می‌شود. تولید این جلیقه‌ها با توجه به سفارش نیروهای مختلف نظامی و انتظامی کشور و براساس نیاز و مورد مصرف آن‌ها انجام می‌شود. در ساخت این جلیقه‌ها عمدتاً از الیاف کولار و صفحات سرامیکی برای دستیابی به سطح محافظت III-A و IV برای مقابله با گلوله‌هایی با کالیبر زیاد (مانند کلاشینکف و ژ ۳-کالیبر ۷/۶۲ mm) استفاده می‌شود.

در بررسی‌های انجام‌گرفته در واحد آماد ناجا مشخص شد، جلیقه‌های تولیدی سفارش نیروی انتظامی با نام‌هایی مانند رویین ۱ (برای استفاده‌های شهری و مقابله با گلوله کلت با سطح استاندارد NIJ III-A)، رویین ۲ (برای استفاده نیروهای مرزبان با سطح استاندارد NIJ IV) و رویین ۳ (برای استفاده نیروهای ویژه با سطح استاندارد NIJ IV) نام‌گذاری شده‌اند. مهم‌ترین مشکلات گزارش‌شده در ساخت و استفاده از جلیقه‌های تولیدی به شرح زیر است:

- وزن بسیار زیاد جلیقه‌های تولیدی که باعث عدم امکان تحرک کافی نیروهای استفاده‌کننده می‌شود،
- پراکندگی محل خدمت نیروهای ناجا و نیاز به جلیقه‌هایی که در چهار فصل امکان استفاده داشته باشند،
- عدم امکان دسترسی به الیاف ویژه مدرن و روزآمد که سبب کاهش وزن لایه‌های تولیدی می‌شود،
- حذف بخش‌های کم‌کاربرد جلیقه‌ها مانند کناره پهلوها، کشاله ران، شانه‌ها و گردن برای کاهش وزن،
- عدم به‌کارگیری کلاه‌های محافظ به‌دلیل واردشدن آسیب بسیار زیاد به گردن در اثر برخورد گلوله (مخصوصاً گلوله‌هایی با کالیبر زیاد)،
- وزن بسیار زیاد لایه‌های سرامیکی در جلیقه‌های محافظ با سطح استاندارد NIJ III-A و IV و
- عدم فرهنگ‌سازی مناسب نیروها برای التزام به استفاده از جلیقه‌ها به‌عنوان یکی از تجهیزات همراه آن‌ها.

راهبردهای استخراج‌شده نوشته می‌شود. در ستون هر یک از راهبردها با توجه به عوامل مشخص‌شده در ردیف‌ها نمره جذابیت اختصاص می‌یابد (از ۱ برای کمترین تا ۴ برای بیشترین). درنهایت، حاصل ضرب نمره جذابیت در ضرایب در ستون دیگری در زیر راهبرد نوشته می‌شود و این اعداد با یکدیگر جمع می‌شوند. با مقایسه حاصل جمع اعداد به‌دست‌آمده، می‌توان جذابیت راهبردها را اولویت‌بندی کرد.

۲-۵ روش تحقیق

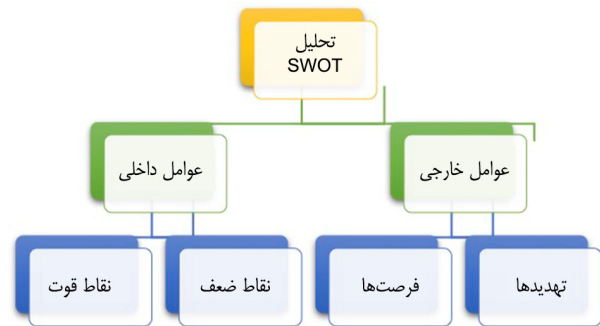
پژوهش‌های علمی براساس نقطه‌نظرها و رویکردهای متفاوت تقسیم‌بندی شده است. این پژوهش از منظر مکان آن، از نوع پژوهش‌های کتابخانه‌ای، اینترنتی و میدانی به‌حساب می‌آید. از منظر قلمرو سازمانی، این پژوهش فراسازمانی بوده و در سطح ملی تعریف می‌شود. از منظر زمان اثرگذاری سند تنظیم‌شده، می‌توان آن را در بازه ۵-۱۰ سال آینده پس از تصویب در نظر گرفت. قلمرو موضوعی این پژوهش، ارتقای حفاظت از جان نیروهای نظامی کشور ایران، به‌ویژه نیروهای زمینی در برابر مخاطرات حاصل از گلوله‌ها و ترکش‌های حاصل از انفجار است.

در این مطالعه، جامعه آماری مصرف‌کنندگان لایه‌های ضدگلوله، نیروهای مسلح کشور ایران، به‌ویژه نیروهای زمینی ارتش، سپاه، انتظامی و امنیتی (به‌ویژه محافظان اشخاص و مقامات و از این قبیل) است. جامعه آماری افرادی که از آن‌ها نظرخواهی شده است، نخبگان نظامی و دانشگاهی مرتبط با ساخت لایه‌های ضدگلوله و مواد اولیه مورد نیاز آن است. در این مطالعه، برای جمع‌آوری اطلاعات و اخذ نظر کارشناسی نخبگان تلاش شده است، با کلیه افراد در دسترس مرتبط با این صنعت که می‌توان با آن‌ها مصاحبه کرد، تماس برقرار شود.

در مطالعه حاضر، برای جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برای تدوین راهبردها، از پرسش‌نامه (در مجموع ۲۲ پرسش‌نامه) استفاده شده است. همچنین، جلسات هم‌اندیشی و اخذ نظر کارشناسی نخبگان نظامی و دانشگاهی مرتبط با حوزه لایه‌های ضدگلوله برگزار شده و از افراد و سازمان‌های مرتبط با این حوزه دعوت به‌عمل آمده است. افزون بر جلسات هم‌اندیشی برگزارشده، مصاحبه‌هایی نیز به‌طور مفصل با نخبگان این حوزه انجام گرفته (تعداد ۶ مصاحبه) و نظرهای مبسوط آن‌ها، افزون بر پرسش‌نامه یادشده اخذ شده است. با استفاده از روش‌های مطرح‌شده، داده‌های مورد نیاز برای تحلیل و استخراج راهبردها با استفاده از روش تحلیل SWOT، جمع‌آوری شده است.

در این مطالعه در بخش عوامل داخلی در بررسی نقاط قوت و ضعف، رویدادهای دفاعی، سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، قانونی و زیست‌محیطی بررسی شده‌اند. نقاط قوت عواملی هستند که با در نظر گرفتن هدف راهبردی و بررسی هر عامل در تحقق هدف یادشده تعیین می‌شوند. در مقابل نقاط ضعف، عواملی هستند که کشور در آن زمینه‌ها قابلیت لازم را ندارد و رقبا دارای قابلیت‌های برتری هستند. در بخش عوامل خارجی در بررسی فرصت‌ها و تهدیدها، رویدادهای دفاعی، سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فناورانه بررسی شده‌اند. هر مجموعه، برای بهره‌گیری از فرصت‌های خارجی و پرهیز از آثار ناشی از تهدیدها یا کاهش آن‌ها، باید راهبردهایی تدوین کند. بدین دلیل، شناسایی، نظارت و ارزیابی فرصت‌ها و تهدیدهای خارجی می‌تواند موفقیت مجموعه را تضمین کند.

برای استخراج راهبردها با استفاده از ماتریس SWOT، فهرست مهم‌ترین نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها شناسایی شده و با استفاده از پرسش‌نامه‌هایی شامل موارد مزبور، از خبرگان نظرسنجی شده است. با استفاده از برآیند نظر نخبگان، جدول ارزیابی عوامل داخلی (جدول ۳) و عوامل خارجی (جدول ۴) تشکیل شده است.



شکل ۳- عوامل مؤثر در تحلیل SWOT.

۲-۳ تدوین راهبردها

در این مطالعه در بررسی تحلیل SWOT، عوامل داخلی آن‌هایی هستند که در داخل کشور بر موضوع مطالعه‌شده، اثرگذار بوده و توسط سیاست‌گذاران کنترل‌پذیر است. عوامل خارجی نیز آن‌هایی هستند که در خارج کشور بررسی و اثرگذاری شده و از کنترل مدیران کشور و سیاست‌گذاران این حیطه خارج هستند. عوامل داخلی به دو دسته نقاط ضعف و قوت و عوامل خارجی به دو دسته فرصت‌ها و تهدیدها تقسیم می‌شوند. نمای کلی عوامل اثرگذار مطابق شکل ۳ است.

جدول ۳- جدول ارزیابی عوامل داخلی شامل نقاط قوت و ضعف.

عنوان	رویداد	شماره	عوامل داخلی	امتیاز	ضریب	امتیاز نهایی
نقاط قوت	دفاعی	S1	پیشرفت‌های چشمگیر ایران در حوزه‌های دفاعی	۰/۰۲۱	۳/۵	۰/۰۷۵
		S2	قابلیت تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله در صنایع دفاعی کشور	۰/۰۱۷	۴	۰/۰۶۷
		S3	تولید برخی از الیاف پیشرفته مانند الیاف کولار، پلی‌اتیلن فراسنگین، الیاف کربن و غیره در صنایع وابسته به نیروهای مسلح کشور	۰/۰۱۵	۴	۰/۰۶۲
		S4	وجود تجربه ۸ سال جنگ تحمیلی در ساخت لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۲۱	۳/۲	۰/۰۶۶
نقاط قوت	سیاسی	S5	سیاست کلی تقویت زیرساخت‌های دفاعی در راستای ارتقای محافظت جانی نیروهای نظامی	۰/۰۲۰	۳/۶	۰/۰۷۴
		S6	اراده مسئولان عالی‌رتبه کشور برای تولید و طراحی الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله روزآمد در داخل کشور	۰/۰۱۸	۴	۰/۰۷۳
		S7	توجه ویژه به فناوری‌های راهبردی مانند هسته‌ای، نانوفناوری، ساخت الیاف و مواد سرامیکی پیشرفته، زیست‌فناوری، هوافضا و غیره توسط سیاستمداران عالی‌رتبه کشور	۰/۰۱۹	۳/۸	۰/۰۷۴
		S8	وجود کارخانه‌ها و واحدهای تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله در کشور	۰/۰۱۷	۳/۹	۰/۰۶۴
نقاط قوت	اقتصادی	S9	حمایت مالی از شرکت‌های دانش‌بنیان و نخبگان دانشگاهی	۰/۰۱۹	۴	۰/۰۷۶
		S10	قابلیت اشتغال‌زایی زیاد	۰/۰۲۰	۳	۰/۰۶۱
		S11	ارزش افزوده زیاد در ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله در برابر واردات کالای آماده	۰/۰۲۲	۳/۴	۰/۰۷۳
		S12	جلوگیری از خروج ارز از کشور	۰/۰۲۲	۳	۰/۰۶۵

ادامه جدول ۳

عنوان	رویداد	شماره	عوامل داخلی	امتیاز	ضریب	امتیاز نهایی
	اجتماعی	S13	فراوانی فارغ التحصیلان دانشگاهی در رشته‌های مورد نیاز برای تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۲۰	۳/۷	۰/۰۷۵
		S14	وجود جمعیت جوان، متعهد و متخصص آماده به کار در کشور	۰/۰۲۳	۳/۵	۰/۰۸۱
فناورانه		S15	سابقه تاریخی صنعت بزرگ نساجی و الیاف در ایران	۰/۰۲۳	۳	۰/۰۶۸
		S16	وجود مراکز دانشگاهی و پژوهشکده‌های علمی و پژوهشی مرتبط و روند روزافزون پژوهش‌های علمی در حوزه الیاف و منسوجات پیشرفته	۰/۰۲۲	۳/۷	۰/۰۸۰
		S17	تعامل مراکز علمی و دانشگاهی داخلی با مراکز پژوهشی نظامی کشور	۰/۰۱۸	۳/۸	۰/۰۶۹
		S18	پیشرفت‌های چشمگیر علمی و فناوریانه کشور در حوزه‌های نانو فناوری و غیره که می‌تواند کمک بسیار بزرگی به تولید و طراحی لایه‌های ضدگلوله باشد.	۰/۰۲۰	۳/۸	۰/۰۷۷
		S19	قابلیت کاربرد الیاف پیشرفته در صنایع غیرنظامی مانند خودروسازی و غیره	۰/۰۲۱	۴	۰/۰۸۴
		S20	وجود شرکت‌های دانش‌بنیان توانمند در حوزه‌های تولید الیاف و منسوجات نوین	۰/۰۱۸	۳/۷	۰/۰۶۷
		S21	وجود منابع عظیم نفت و گاز و توانمندی‌های صنعت پتروشیمی در تولید مواد اولیه تولید الیاف پیشرفته	۰/۰۲۳	۳/۲	۰/۰۷۳
قانونی		S22	تأکید برنامه‌ها و اسناد بالادستی از جمله سیاست‌های کلی نظام و برنامه افق چشم‌انداز ۱۴۰۴ بر خودکفایی کشور در حوزه‌های دفاعی و امنیتی	۰/۰۲۱	۴	۰/۰۸۴
		S23	قانون امکان به کارگیری افراد مستعد و نخبه از طریق امریه و کسر خدمت برای انجام پروژه‌های پژوهشی نظامی	۰/۰۲۰	۳/۴	۰/۰۶۸
زیست محیطی		S24	قابلیت بازیافت ضایعات صنایع تولید الیاف پیشرفته و ساخت لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۱۵	۳	۰/۰۴۶
دفاعی		W1	نبود ظرفیت و بودجه کافی برای برطرف کردن نیازهای نیروهای مسلح در حوزه تأمین پوشاک ضدگلوله	۰/۰۱۹	۱/۵	۰/۰۲۸
		W2	به‌روزر نبودن و عدم تناسب کافی لایه‌ها و پوشاک ضدگلوله با تهدیدات نوین	۰/۰۱۹	۲	۰/۰۳۹
		W3	خلأ هدف‌گذاری و چشم‌انداز در راستای تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۱۹	۱/۴	۰/۰۲۶
سیاسی		W4	عدم حمایت دولت از صنایع تولید الیاف پیشرفته	۰/۰۱۸	۲	۰/۰۳۷
		W5	عدم آگاهی کافی مسئولان دولتی مربوط نسبت به اهمیت الیاف پیشرفته در صنایع نظامی و غیرنظامی	۰/۰۲۰	۱/۸	۰/۰۳۶
		W6	عدم باور مسئولان نسبت به ظرفیت‌های داخلی ساخت الیاف پیشرفته	۰/۰۲۰	۱/۵	۰/۰۳۰
		W7	عدم توجه کافی مسئولان نسبت به ایجاد شرایط ساخت الیاف پیشرفته با قابلیت کاربرد نظامی، به‌ویژه در دوران تحریم این مواد	۰/۰۱۹	۱/۹	۰/۰۳۶
		W8	تغییر رویکردها با تغییر دولت‌ها	۰/۰۲۲	۱/۵	۰/۰۳۳
اقتصادی		W9	بودجه پژوهشی کم دانشگاه‌ها و مراکز علمی کشور	۰/۰۲۰	۱/۷	۰/۰۳۵
		W10	وابستگی اقتصاد کشور به نفت و ترجیح خرید اقلام آماده بر پژوهش و توسعه در ساخت و بومی‌سازی آن‌ها	۰/۰۲۲	۱/۴	۰/۰۳۰
		W11	قاچاق کالا، واردات بی‌رویه و بی‌توجهی به تولید داخل	۰/۰۱۹	۱	۰/۰۱۹
		W12	تورم زیاد، کاهش ارزش پول ملی و نوسانات قیمت ارز	۰/۰۲۲	۱/۲	۰/۰۲۶
		W13	قیمت تمام‌شده ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله در برابر واردات اقلام آماده	۰/۰۱۸	۱/۶	۰/۰۲۹
		W14	عدم اعتماد مصرف‌کننده به محصولات داخلی	۰/۰۱۹	۱/۳	۰/۰۲۵
	اجتماعی					

نقاط
ضعف

ادامه جدول ۳

عنوان	رویداد	شماره	عوامل داخلی	امتیاز	ضریب	امتیاز نهایی
فناورانه		W15	عدم دسترسی به دانش و فناوری تولید برخی از الیاف پیشرفته و منسوجات ضدگلوله نظامی	۰/۰۲۰	۲	۰/۰۴۰
		W16	عدم حضور واحدهای پژوهش و توسعه پویا و فعال در صنایع تولید الیاف و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۱۸	۱/۹	۰/۰۳۵
		W17	استفاده از دستگاه‌ها و ماشین‌آلات فرسوده و قدیمی در صنایع تولید الیاف و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۱۸	۱/۴	۰/۰۲۵
		W18	ارتباط ضعیف صنایع تولیدکننده الیاف و لایه‌های ضدگلوله با دانشگاه‌ها و مراکز علمی	۰/۰۱۹	۲	۰/۰۳۸
		W19	موازی‌کاری مراکز علمی و پژوهشی در حوزه الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۱۸	۱/۸	۰/۰۳۳
		W20	کمبود تجهیزات آزمایشگاهی و صنعتی پیشرفته و به‌روز دنیا در کشور	۰/۰۱۸	۱/۶	۰/۰۲۹
		W21	مشکلات تأمین مواد اولیه مورد نیاز برای ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۲۱	۲	۰/۰۴۳
		W22	عدم نیاز محوربودن پژوهش‌های دانشگاهی در حوزه صنعت نساجی و الیاف کشور	۰/۰۲۱	۱/۸	۰/۰۳۸
قانونی		W23	بی‌توجهی به سندهای بالادستی جمهوری اسلامی	۰/۰۱۹	۱/۶	۰/۰۳۰
		W24	دیوان‌سالاری (bureaucracy) پیچیده اداری در مسیر تولید	۰/۰۲۲	۱/۵	۰/۰۳۴
		W25	عدم حمایت اثربخش در ارائه تسهیلات به بخش خصوصی و شرکت‌های دانش‌بنیان در حوزه ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۱۹	۱/۸	۰/۰۳۴
		W26	مشکلات ترخیص مواد اولیه وارداتی صنعت ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله از گمرک	۰/۰۱۹	۱/۲	۰/۰۲۳
زیست‌محیطی		W26	خطرهای زیست‌محیطی پساب صنایع تولید الیاف	۰/۰۱۵	۱	۰/۰۱۵
			جمع	۱/۰۰۰		۲/۵۴۷

جدول ۴- جدول ارزیابی عوامل خارجی شامل فرصت‌ها و تهدیدها.

عنوان	رویداد	شماره	عوامل خارجی	امتیاز	ضریب	امتیاز نهایی
فرصت‌ها	دفاعی	O1	مراودات دفاعی کشور با برخی از کشورهای دارای منافع مشترک منطقه	۰/۰۲۸	۳/۵	۰/۰۹۹
	سیاسی	O2	روابط سیاسی خوب با برخی از کشورهای قدرتمند در صنایع نظامی مانند چین و روسیه	۰/۰۳۵	۳/۸	۰/۱۳۱
		O3	سیاست گسترش تعامل بیشتر با دنیا برای تأمین مواد اولیه مورد نیاز و دانش فنی ساخت آن‌ها	۰/۰۳۱	۳/۵	۰/۱۰۷
		O4	موقعیت راهبردی ایران در منطقه	۰/۰۳۷	۳	۰/۱۱۱
اقتصادی		O5	بهره‌گیری از فرصت صادرات الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله به کشورهای همسایه و متحدان نظامی و تأمین نیازهای آن‌ها	۰/۰۳۱	۳/۲	۰/۰۹۹
		O6	بهره‌گیری از فرصت جنگ تجاری دو قدرت اصلی اقتصادی جهان یعنی چین و آمریکا با رویکرد جلب توجه به بازار ایران، به‌ویژه درباره کالاهای تحریم‌شده از طرف آمریکا	۰/۰۳۱	۳	۰/۰۹۲
		O7	استفاده از مناسبات اقتصادی با کشورهای دوست و همسایه برای دورزدن تحریم‌ها و تهیه مواد و تجهیزات مورد نیاز برای تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۳۲	۳/۵	۰/۱۱۳
		O8	موقعیت مکانی مناسب کشور برای صادرات	۰/۰۳۶	۳	۰/۱۰۹
		O9	ارزآوری صادرات الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۳۶	۳/۸	۰/۱۳۷
		O10	وجود نیروی کار و انرژی ارزان‌قیمت در مقایسه با سایر کشورها	۰/۰۳۵	۳/۴	۰/۱۱۸

ادامه جدول ۴

عنوان	رویداد	شماره	عوامل خارجی	امتیاز	ضریب	امتیاز نهایی
اجتماعی	O11	O12	وجود نخبگان متخصص و با تجربه ایرانی خارج از کشور و قابلیت استفاده از دانش آن‌ها	۰/۰۳۵	۳/۷	۰/۱۳۰
			برگزاری نمایشگاه‌ها و کنفرانس‌های بین‌المللی و معرفی محصولات جدید	۰/۰۳۰	۳/۴	۰/۱۰۱
	O13	O14	توسعه روزافزون فناوری‌های نوین در جهان و امکان استفاده از آن‌ها در تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۳۴	۳/۸	۰/۱۲۸
فناورانه	همکاری‌های علمی بین‌المللی پژوهشگران کشور با پژوهشگران کشورهای پیشرفته به روش‌های مختلف مانند فرصت‌های مطالعاتی اساتید و دانشجویان		۰/۰۳۱	۳/۹	۰/۱۲۳	
تهدیدها	دفاعی	T1	تهدیدات نظامی دائمی علیه جمهوری اسلامی که ضرورت نیاز به جدیدترین فناوری‌ها در طراحی و تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله را روشن می‌سازد.	۰/۰۳۷	۲	۰/۰۷۴
		T2	احتمال نفوذ و خرابکاری دستگاه‌های امنیتی دشمن در صنایع تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله یا فروش تجهیزات معیوب و دست‌کاری‌شده	۰/۰۳۲	۱/۶	۰/۰۵۲
		T3	پیشرفت‌های روزافزون سلاح‌ها و تجهیزات نظامی دنیا و ظهور تهدیدهای نوپدید نظامی	۰/۰۳۶	۲	۰/۰۷۳
		T4	تحریم الیاف و منسوجات نظامی پیشرفته	۰/۰۳۶	۲	۰/۰۷۲
	سیاسی	T5	تأثیرپذیری زیاد اقتصاد کشور از موضوعات سیاست خارجی	۰/۰۳۵	۱/۳	۰/۰۴۶
		T6	تحریم‌های همه‌جانبه و عدم امکان تهیه تجهیزات، ماشین‌آلات و مواد روزآمد دنیا	۰/۰۳۴	۲	۰/۰۶۸
		T7	ناامنی و تحولات سال‌های اخیر منطقه خاورمیانه	۰/۰۳۴	۱/۸	۰/۰۶۱
		T8	نفوذ عوامل بیگانه در سطوح مدیریتی و تصمیمات ملی	۰/۰۳۱	۱/۵	۰/۰۴۷
	اقتصادی	T9	قیمت تمام‌شده زیاد تجهیزات و زیرساخت‌های خارجی مورد نیاز برای تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۳۱	۲	۰/۰۶۳
		T10	عدم حضور سرمایه‌گذار خارجی در کشور	۰/۰۳۱	۱/۴	۰/۰۴۴
		T11	مشکلات مربوط به واردات محصولات آماده شرکت‌های خارجی	۰/۰۳۲	۱/۵	۰/۰۴۸
		T12	عدم عضویت ایران در سازمان تجارت جهانی	۰/۰۳۱	۱	۰/۰۳۱
		T13	مشکلات مبادله بانکی با شرکت‌های خارجی	۰/۰۳۵	۱/۴	۰/۰۴۸
اجتماعی	T14	مهاجرت متخصصان و نیروهای ماهر در حوزه الیاف و منسوجات پیشرفته از کشور	۰/۰۳۵	۱/۶	۰/۰۵۶	
فناورانه	T15	عدم همکاری علمی و فنی مراکز پژوهشی معتبر دنیا با ایران در تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله	۰/۰۳۵	۲	۰/۰۶۹	
	T16	وابستگی فنی کشور به ماشین‌آلات خارجی	۰/۰۳۳	۱/۷	۰/۰۵۷	
			جمع	۱/۰۰۰		۲/۵۰۴

که شامل قوت‌ها و ضعف‌های کلیدی این حوزه هستند، از طریق جدول ارزیابی عوامل داخلی ارزیابی و امتیازبندی می‌شوند تا وضعیت کلی کشور از نظر برخورداری از قوت‌ها و ضعف‌های داخلی مشخص شود. با استفاده از این جدول، هر یک از عوامل راهبردهای داخلی ارزیابی می‌شود که در جدول اولویت عوامل داخلی شناسایی شده است. از بررسی این عوامل، قوت‌ها و ضعف‌ها فهرست می‌شوند. قوت‌ها و ضعف‌های شناسایی شده در

در این جدول‌ها، امتیازها براساس نظر نخبگان محاسبه شده و ضرایب نیز با توجه به اهمیت هر یک از عوامل برای وزن‌دهی به آن‌ها توسط پژوهشگران مشخص شده است. ستون امتیاز نهایی حاصل ضرب دو ستون امتیاز و ضریب است.

از طریق جدول ارزیابی عوامل داخلی، عوامل شناسایی شده در داخل کشور اولویت‌بندی می‌شوند تا عوامل راهبردی داخلی برای بررسی بیشتر تعیین شوند. عوامل راهبردی شناسایی شده،

۱	داخلی ۲/۵		۴
	I محافظه‌کار	II تهاجمی	
	خارجی ۲/۵		۱
	III تدافعی	IV رقابتی	

شکل ۴- ماتریس چهارخانه‌ای عوامل داخلی و خارجی.

خانه IV باشد، راهبرد رقابتی (نگهداری و حمایت بیرونی) توصیه می‌شود. با توجه به امتیازات نهایی به‌دست‌آمده، در ماتریس چهارخانه‌ای موقعیت مجموعه در لبه قسمت II قرار گرفته است. در نتیجه راهبرد تهاجمی را می‌توان توصیه کرد، ولی با توجه به نزدیکی به قسمت‌های I و IV، راهبردهای رقابتی و محافظه‌کارانه را هم باید در نظر داشت.

۳-۴ تعیین راهبردها با استفاده از تحلیل SWOT

در این مطالعه برای تشکیل ماتریس SWOT و استخراج راهبردها، نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای مهم‌تر از میان عوامل شناسایی‌شده براساس نظرهای نخبگان انتخاب و براساس آن‌ها، راهبردها تعیین شده است. عوامل انتخاب‌شده و راهبردهای استخراج‌شده مطابق جدول ۵ است.

۳-۵ ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی (QSPM)

برای تشکیل ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی، راهبردهای استخراج‌شده از ماتریس SWOT به‌صورت ۵ راهبرد اساسی زیر تقسیم‌بندی و در جدول ۷ قرار داده شده است. برای سهولت در تنظیم جدول، کدهای R1 تا R5 برای مشخص‌کردن راهبردهای استفاده شده و هر یک از آن‌ها براساس تجمیع و اشتراک راهبردهای استخراج‌شده مطابق جدول ۶ به‌دست آمده است. موارد پراهمیت‌تر فرصت‌ها، تهدیدها، نقاط قوت و نقاط ضعف با توجه به کد تعیین‌شده در قسمت قبل، در جدول ۷ قرار داده شده است. در این جدول، ضرایب اهمیت براساس نظرهای جمع‌آوری‌شده از پرسش‌نامه‌ها و نمره جذابیت براساس تحلیل گروه پژوهشگران تعیین شده است:

- R1: گسترش پژوهش و توسعه در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی،
R2: افزایش تعاملات بین‌المللی و بهره‌گیری از روابط خوب سیاسی برای تأمین مواد اولیه لایه‌های ضدگلوله و ساخت آن‌ها،
R3: ارتقای زیرساخت‌های دفاعی در حوزه محافظت جانی نیروهای نظامی،

یک ستون ماتریس قرار می‌گیرند و با استفاده از ضرایب تعیین‌شده توسط پژوهشگران امتیازبندی می‌شوند تا درنهایت مشخص شود که کشور در این حوزه دارای قوت یا ضعف است. چنانچه جمع کل امتیاز نهایی در این ماتریس بیش از ۲/۵ باشد، بدین معنی است که طبق پیش‌بینی‌های به‌عمل‌آمده، قوت‌های پیش روی کشور بر تهدیدهای آن غلبه می‌کند. براساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۳، عدد امتیاز نهایی برابر با ۲/۵۴۷ بوده که این عدد بیانگر غلبه مختصر نقاط قوت بر نقاط ضعف است.

با استفاده از ماتریس ارزیابی عوامل خارجی، هر یک از عوامل راهبردی محیط‌های کلان و تخصصی که در ماتریس اولویت عوامل خارجی شناسایی و اولویت‌بندی شده‌اند، ارزیابی و از بررسی این عوامل فرصت‌ها و تهدیدها شناسایی می‌شوند. عوامل در یک ستون ماتریس قرار گرفته و با استفاده از ضرایب و رتبه‌های خاصی امتیازبندی می‌شوند، تا درنهایت مشخص شود که آیا کشور در آینده‌ای که می‌خواهد برای آن برنامه‌ریزی شود فرصت‌های بیشتری دارد یا با تهدیدهای بیشتری مواجه خواهد شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۴، عدد امتیاز نهایی برابر با ۲/۵۰۴ بوده که بیانگر غلبه فرصت‌ها بر تهدیدهاست. ولی با توجه به نزدیکی بسیار زیاد این عدد به مرز عدد ۲/۵، نمی‌توان غلبه فرصت‌ها بر تهدیدها را خیلی زیاد و به‌شکل غالب در نظر گرفت.

۳-۳ تجزیه و تحلیل عوامل داخلی و خارجی

برای تشکیل این ماتریس، باید نمره‌های حاصل از ماتریس‌های ارزیابی عوامل داخلی و خارجی را در ابعاد افقی و عمودی این ماتریس قرار داده تا جایگاه فعلی مجموعه در خانه‌های این ماتریس مشخص شود و بتوان راهبرد مناسبی را برای آن اتخاذ کرد. از آنجا که در تحلیل SWOT چهار دسته راهبرد WO، ST، SO، و WT برای مجموعه معین می‌شود، مناسب است تا این ماتریس هم به گونه‌ای ترسیم شود که نشانگر ۴ خانه اصلی و در پی آن توصیه‌کننده ۴ دسته راهبرد اصلی باشد. بنابراین، از ماتریس چهارخانه‌ای استفاده شده است.

در ماتریس چهارخانه‌ای، امتیازات نهایی ماتریس‌های ارزیابی عوامل داخلی و خارجی در دو بخش قوی (۲/۵ تا ۴) و ضعیف (۱ تا ۲/۵) قرار داده می‌شوند (شکل ۴). چنانچه موقعیت مجموعه از نظر نمره‌های عوامل خارجی و داخلی در خانه I باشد، راهبرد محافظه‌کارانه (نگهداری و حمایت درونی)، اگر در خانه II باشد، راهبرد تهاجمی (رشد و توسعه)، چنانچه در خانه III باشد، راهبرد تدافعی (برداشت، واگذاری، کاهش و انحلال) و بالاخره اگر در

جدول ۵- ماتریس SWOT براساس نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای شناسایی‌شده برای استخراج راهبردها.

نقاط قوت	نقاط ضعف	فرصت‌ها
- پیشرفت‌های چشمگیر ایران در حوزه‌های دفاعی - وجود تجربه ۸ سال جنگ تحمیلی در ساخت لایه‌های ضدگلوله - سیاست کلی تقویت زیرساخت‌های دفاعی در راستای ارتقای محافظت جانی نیروهای نظامی - ارزش افزوده زیاد در ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله در برابر واردات کالای آماده - جلوگیری از خروج ارز از کشور - فراوانی فارغ‌التحصیلان دانشگاهی در رشته‌های مورد نیاز برای تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله - جمعیت جوان، متعهد و متخصص آماده به‌کار در کشور - سابقه تاریخی صنعت بزرگ نساجی و الیاف در ایران - وجود مراکز دانشگاهی و پژوهشکده‌های علمی و پژوهشی مرتبط و روند روزافزون پژوهش‌های علمی در حوزه الیاف و منسوجات پیشرفته - قابلیت کاربرد الیاف پیشرفته در صنایع غیرنظامی مانند خودروسازی و غیره - وجود منابع عظیم نفت و گاز و توانمندی‌های صنعت پتروشیمی در تولید مواد اولیه تولید الیاف پیشرفته	- عدم آگاهی کافی مسئولان دولتی مربوط نسبت به اهمیت الیاف پیشرفته در صنایع نظامی و غیرنظامی - تغییر رویکردها با تغییر دولت‌ها - بودجه پژوهشی کم دانشگاه‌ها و مراکز علمی کشور - وابستگی اقتصاد کشور به نفت و ترجیح خرید اقلام آماده بر پژوهش و توسعه در ساخت و بومی‌سازی آن‌ها - تورم زیاد، کاهش ارزش پول ملی و نوسانات قیمت ارز - عدم دسترسی به دانش و فناوری تولید برخی از الیاف پیشرفته و منسوجات ضدگلوله نظامی - مشکلات تأمین مواد اولیه مورد نیاز برای ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله - عدم نیاز به محور بودن پژوهش‌های دانشگاهی در حوزه صنعت نساجی و الیاف کشور - دیوان‌سالاری پیچیده اداری در مسیر تولید	- روابط سیاسی خوب با برخی از کشورهای قدرتمند در صنایع نظامی مانند چین و روسیه - موقعیت راهبردی ایران در منطقه - استفاده از مناسبات اقتصادی با کشورهای دوست و همسایه برای دورزدن تحریم‌ها و تهیه مواد و تجهیزات - مورد نیاز برای تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله - موقعیت مکانی مناسب کشور برای صادرات - ارزآوری صادرات الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله - وجود نیروی کار و انرژی ارزان‌قیمت در مقایسه با سایر کشورها، وجود نخبگان متخصص و باتجربه ایرانی خارج کشور و قابلیت استفاده از دانش آن‌ها - توسعه روزافزون فناوری‌های نوین در جهان و امکان استفاده از آن‌ها در تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله
راهبردهای SO	راهبردهای WO	فرصت‌ها
SO1: تلاش برای استفاده بیشتر از نخبگان متخصص و فارغ‌التحصیلان دانشگاهی داخل و خارج کشور در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی در رشته‌های مرتبط با تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله SO2: بررسی بیشتر و عمیق‌تر فناوری‌های نوین در جهان و تلاش برای به‌کارگیری آن‌ها در مراکز دانشگاهی و پژوهشگاه‌های علمی و پژوهشی در حوزه الیاف و منسوجات پیشرفته SO3: استفاده بیشتر از روابط خوب سیاسی با برخی کشورهای قدرتمند مانند روسیه و چین برای تقویت زیرساخت‌های دفاعی در بخش اقلام محافظ جان نیروهای نظامی SO4: بهره‌مندی از ارزش افزوده زیاد ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله با وجود منابع عظیم نفت و گاز برای خودکفایی در حوزه‌های دفاعی و امنیتی در کنار موقعیت مناسب منطقه‌ای برای صادرات به سایر کشورها	WO1: استفاده از پتانسیل ارزآوری صادرات الیاف پیشرفته و محصولات ساخته‌شده از آن‌ها و صرفه‌جویی ارزی واردات آن‌ها برای افزایش آگاهی مسئولان دولتی نسبت به اهمیت ساخت و توسعه این اقلام WO2: تلاش برای به‌کارگیری بیشتر نخبگان متخصص و باتجربه ایرانی خارج کشور در پژوهش‌های دانشگاهی برای ارتقای سطح دانش و فناوری ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله WO3: امکان بهره‌مندی بیشتر از روابط خوب با کشورهای قدرتمند در صنایع نظامی مانند روسیه و چین برای رفع مشکل تأمین مواد اولیه ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله WO4: امکان تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله با صرفه اقتصادی مناسب به‌دلیل نیروی کار و هزینه انرژی ارزان‌قیمت در مقایسه با واردات آن‌ها به‌دلیل کاهش ارزش پول ملی و نوسانات قیمت ارز و تأثیر فراوان آن بر قیمت تمام‌شده کالای وارداتی	- روابط سیاسی خوب با برخی از کشورهای قدرتمند در صنایع نظامی مانند چین و روسیه - موقعیت راهبردی ایران در منطقه - استفاده از مناسبات اقتصادی با کشورهای دوست و همسایه برای دورزدن تحریم‌ها و تهیه مواد و تجهیزات - مورد نیاز برای تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله - موقعیت مکانی مناسب کشور برای صادرات - ارزآوری صادرات الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله - وجود نیروی کار و انرژی ارزان‌قیمت در مقایسه با سایر کشورها، وجود نخبگان متخصص و باتجربه ایرانی خارج کشور و قابلیت استفاده از دانش آن‌ها - توسعه روزافزون فناوری‌های نوین در جهان و امکان استفاده از آن‌ها در تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله
راهبردهای ST	راهبردهای WT	تهدیدها
ST1: لزوم توجه بیشتر به پژوهش و توسعه و ساخت الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله و دستیابی به جدیدترین فناوری‌ها در طراحی و ساخت آن‌ها به‌دلیل تهدیدات نظامی دائمی علیه کشور و تحریم این مواد و کالاهای ST2: لزوم استفاده و توجه بیشتر به فارغ‌التحصیلان دانشگاهی مرتبط با تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله به‌دلیل مهاجرت روزافزون آن‌ها در کنار عدم همکاری علمی و فنی مراکز پژوهشی معتبر دنیا و تحریم‌های همه‌جانبه ST3: اهمیت بیشتر به تقویت زیرساخت‌های دفاعی کشور در راستای محافظت جانی نیروهای نظامی به‌دلیل پیشرفت روزافزون سلاح‌ها و تجهیزات نظامی دنیا و ظهور تهدیدهای نوپدید نظامی ST4: توجه بیشتر به تولید داخل الیاف پیشرفته و سایر مواد مورد نیاز در ساخت لایه‌های ضدگلوله برای جلوگیری از خروج ارز در کنار مشکلات مبادلات بانکی با شرکت‌های خارجی	WT1: لزوم توجه بیشتر و افزایش بودجه تحقیقاتی دانشگاه‌ها و مراکز علمی کشور با توجه به مهاجرت متخصصان و نیروهای ماهر و عدم همکاری علمی و فنی مراکز پژوهشی دنیا برای تولید الیاف پیشرفته WT2: اهمیت خودکفایی در تولید الیاف پیشرفته و سایر اقلام دفاعی کشور با توجه به تحریم‌های همه‌جانبه و عدم امکان تهیه تجهیزات روز دنیا در کنار عدم دسترسی به دانش و فناوری ساخت اقلام نظامی WT3: تلاش برای ارتقای آگاهی مسئولان دولتی نسبت به اهمیت الیاف پیشرفته در صنایع نظامی با توجه به پیشرفت روزافزون سلاح‌ها و تجهیزات نظامی دنیا و ظهور تهدیدهای نوپدید نظامی	- تهدیدات نظامی دائمی علیه جمهوری اسلامی که ضرورت نیاز به جدیدترین فناوری‌ها در طراحی و تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله را روشن می‌سازد. - پیشرفت‌های روزافزون سلاح‌ها و تجهیزات نظامی دنیا و ظهور تهدیدهای نوپدید نظامی - تحریم الیاف و منسوجات نظامی پیشرفته - تأثیرپذیری زیاد اقتصاد کشور از موضوعات سیاست خارجی - تحریم‌های همه‌جانبه و عدم امکان تهیه تجهیزات روزآمد دنیا - مشکلات مبادله بانکی با شرکت‌های خارجی - مهاجرت متخصصان و نیروهای ماهر در حوزه الیاف و منسوجات پیشرفته از کشور - عدم همکاری علمی و فنی مراکز پژوهشی معتبر دنیا با ایران در تولید الیاف پیشرفته و لایه‌های ضدگلوله

R4: توجه بیشتر به تولید داخلی و خودکفایی در تولید الیاف

پیشرفته و مواد مورد نیاز در ساخت لایه‌های ضدگلوله و

R5: ارتقای آگاهی مسئولان و مدیران دولتی و سیاست‌گذاران

نسبت به الیاف پیشرفته.

با توجه به جمع نمره به‌دست‌آمده در هر راهبرد، می‌توان آن‌ها را

به‌ترتیب جدول ۸ اولویت‌بندی کرد.

جدول ۶- راهبردهای استفاده‌شده در تعیین هر یک از راهبردهای نهایی.

راهبردهای استفاده‌شده در استخراج راهبرد نهایی	راهبرد نهایی
SO1 – SO2 – WO2 – ST1 – ST2 – WT1	R1
SO3 – WO3	R2
SO2 – ST1 – ST2 – ST3 – WT2 – WT3	R3
SO4 – WO4 – WT2 – ST4	R4
WO1 – WT3	R5

جدول ۷- ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی.

راهبرد R5		راهبرد R4		راهبرد R3		راهبرد R2		راهبرد R1		ضریب اهمیت	ورودی‌ها
جمع	نمره	جمع	نمره	جمع	نمره	جمع	نمره	جمع	نمره		
۰/۸۷	۲	۰/۱۳۰	۳	۰/۱۳۰	۳	۰/۰۸۷	۲	۰/۰۸۷	۲	۰/۰۴۳	S1
۰/۰۴۲	۱	۰/۰۴۲	۱	۰/۱۷۰	۴	۰/۰۸۵	۲	۰/۰۴۲	۱	۰/۰۴۲	S4
۰/۱۲۶	۳	۰/۱۲۶	۳	۰/۱۶۷	۴	۰/۱۶۷	۴	۰/۱۲۶	۳	۰/۰۴۲	S5
۰/۰۸۴	۲	۰/۰۴۲	۱	۰/۰۴۲	۱	۰/۱۲۶	۳	۰/۰۸۴	۲	۰/۰۴۲	S10
۰/۱۷۶	۴	۰/۰۸۸	۲	۰/۰۸۸	۲	۰/۱۳۲	۳	۰/۱۳۲	۳	۰/۰۴۴	S11
۰/۰۸۹	۲	۰/۱۳۴	۳	۰/۰۴۵	۱	۰/۰۸۹	۲	۰/۰۴۵	۱	۰/۰۴۵	S12
۰/۱۶۵	۴	۰/۱۲۴	۳	۰/۱۲۴	۳	۰/۱۲۴	۳	۰/۱۶۵	۴	۰/۰۴۱	S13
۰/۱۴۲	۳	۰/۱۸۹	۴	۰/۱۴۲	۳	۰/۱۴۲	۳	۰/۱۸۹	۴	۰/۰۴۷	S14
۰/۰۹۲	۲	۰/۰۴۶	۱	۰/۰۴۶	۱	۰/۰۹۲	۲	۰/۱۳۹	۳	۰/۰۴۶	S15
۰/۱۳۲	۳	۰/۱۳۲	۳	۰/۱۳۲	۳	۰/۱۳۲	۳	۰/۱۷۶	۴	۰/۰۴۴	S16
۰/۱۶۵	۴	۰/۱۲۴	۳	۰/۱۲۴	۳	۰/۱۲۴	۳	۰/۱۶۵	۴	۰/۰۴۱	S18
۰/۱۲۹	۳	۰/۱۲۹	۳	۰/۰۸۶	۲	۰/۱۲۹	۳	۰/۱۷۲	۴	۰/۰۴۳	S19
۰/۰۹۳	۲	۰/۰۹۳	۲	۰/۰۹۳	۲	۰/۰۹۳	۲	۰/۰۹۳	۲	۰/۰۴۷	S21
۰/۰۸۶	۲	۰/۱۲۹	۳	۰/۱۲۹	۳	۰/۱۲۹	۳	۰/۰۸۶	۲	۰/۰۴۳	S22
۰/۱۶۵	۴	۰/۱۶۵	۴	۰/۱۲۴	۳	۰/۱۶۵	۴	۰/۱۲۴	۳	۰/۰۶۲	W5
۰/۱۳۵	۳	۰/۰۹۰	۲	۰/۱۳۵	۳	۰/۰۹۰	۲	۰/۰۹۰	۲	۰/۰۶۶	W8
۰/۱۲۶	۳	۰/۱۶۷	۴	۰/۱۶۷	۴	۰/۱۲۶	۳	۰/۱۶۷	۴	۰/۰۵۸	W9
۰/۰۸۸	۲	۰/۱۳۲	۳	۰/۰۸۸	۲	۰/۰۸۸	۲	۰/۰۸۸	۲	۰/۰۶۵	W10
۰/۰۴۴	۱	۰/۰۸۸	۲	۰/۰۴۴	۱	۰/۰۴۴	۱	۰/۰۸۸	۲	۰/۰۶۴	W12
۰/۰۸۲	۲	۰/۱۲۲	۳	۰/۱۲۲	۳	۰/۱۲۲	۳	۰/۱۶۳	۴	۰/۰۶۲	W15
۰/۰۸۷	۲	۰/۱۷۴	۴	۰/۱۷۴	۴	۰/۱۷۴	۴	۰/۱۷۴	۴	۰/۰۶۲	W21
۰/۰۸۶	۲	۰/۱۲۹	۳	۰/۰۸۶	۲	۰/۱۲۹	۳	۰/۱۷۲	۴	۰/۰۶۰	W22
۰/۰۴۶	۱	۰/۰۴۶	۱	۰/۰۴۶	۱	۰/۰۴۶	۱	۰/۰۹۱	۲	۰/۰۶۶	W24
۰/۱۸۵	۳	۰/۰۶۲	۱	۰/۱۸۵	۳	۰/۲۴۶	۴	۰/۲۴۶	۴	۰/۰۶۵	O2
۰/۱۳۱	۲	۰/۰۶۶	۱	۰/۰۶۶	۱	۰/۱۹۷	۳	۰/۱۳۱	۲	۰/۰۶۴	O4
۰/۱۱۵	۲	۰/۰۵۸	۱	۰/۱۷۳	۳	۰/۲۳۰	۴	۰/۱۷۳	۳	۰/۰۶۲	O7
۰/۰۶۵	۱	۰/۱۲۹	۲	۰/۰۶۵	۱	۰/۱۲۹	۲	۰/۱۲۹	۲	۰/۰۶۱	O8
۰/۱۹۲	۳	۰/۱۲۸	۲	۰/۱۲۸	۲	۰/۱۲۸	۲	۰/۱۲۸	۲	۰/۰۶۲	O9
۰/۱۲۳	۲	۰/۱۲۳	۲	۰/۱۲۳	۲	۰/۱۲۳	۲	۰/۱۲۳	۲	۰/۰۶۲	O10
۰/۱۸۷	۳	۰/۲۴۹	۴	۰/۲۴۹	۴	۰/۱۸۷	۳	۰/۲۴۹	۴	۰/۰۶۲	O11

ادامه جدول ۷

ورودی‌ها	ضریب اهمیت	راهبرد R1		راهبرد R2		راهبرد R3		راهبرد R4		راهبرد R5	
		نمره	جمع	نمره	جمع	نمره	جمع	نمره	جمع	نمره	جمع
O13	۰/۰۶۲	۴	۰/۲۴۰	۴	۰/۲۴۰	۳	۰/۱۸۰	۳	۰/۱۸۰	۲	۰/۱۲۰
T1	۰/۰۶۶	۲	۰/۱۳۱	۴	۰/۲۶۲	۴	۰/۲۶۲	۴	۰/۲۶۲	۴	۰/۲۶۲
T3	۰/۰۵۸	۳	۰/۱۹۴	۳	۰/۱۹۴	۴	۰/۲۵۹	۳	۰/۱۹۴	۳	۰/۱۹۴
T4	۰/۰۶۵	۴	۰/۲۵۶	۳	۰/۱۹۲	۴	۰/۲۵۶	۴	۰/۲۵۶	۳	۰/۱۹۲
T5	۰/۰۶۴	۱	۰/۰۶۲	۴	۰/۲۴۹	۱	۰/۰۶۲	۱	۰/۰۶۲	۲	۰/۱۲۵
T6	۰/۰۶۲	۳	۰/۱۸۲	۳	۰/۱۸۲	۳	۰/۱۸۲	۱	۰/۱۸۲	۴	۰/۲۴۳
T13	۰/۰۶۲	۲	۰/۱۲۳	۲	۰/۱۲۳	۱	۰/۰۶۲	۳	۰/۱۸۵	۳	۰/۱۸۵
T14	۰/۰۶۰	۴	۰/۲۴۹	۴	۰/۲۴۹	۳	۰/۱۸۷	۳	۰/۱۸۷	۲	۰/۱۲۵
T15	۰/۰۶۶	۴	۰/۲۴۶	۳	۰/۱۸۵	۴	۰/۲۴۶	۳	۰/۱۸۵	۳	۰/۱۸۵
جمع	۱	۵/۷۲۲	۵/۷۵۲	۵/۷۵۲	۵/۷۵۲	۵/۱۸۹	۵/۱۴۹	۵/۱۴۹	۵/۱۴۹	۵/۰۹۴	۵/۰۹۴

جدول ۸- اولویت راهبردهای استخراج شده براساس ماتریس برنامه‌ریزی راهبردی کمی.

اولویت	کد	عنوان راهبرد	جمع نمره جذابیت
۱	R2	افزایش تعاملات بین‌المللی و بهره‌گیری از روابط خوب سیاسی برای تأمین مواد اولیه لایه‌های ضدگلوله و ساخت آن‌ها	۵/۷۵۲
۲	R1	گسترش پژوهش و توسعه در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی	۵/۷۲۲
۳	R3	ارتقای زیرساخت‌های دفاعی در حوزه محافظت جانی نیروهای نظامی	۵/۱۸۹
۴	R4	توجه بیشتر به تولید داخلی و خودکفایی در تولید الیاف پیشرفته و مواد مورد نیاز در ساخت لایه‌های ضدگلوله	۵/۱۴۹
۵	R5	ارتقای آگاهی مسئولان و مدیران دولتی و سیاست‌گذاران نسبت به الیاف پیشرفته	۵/۰۹۴

شرح زیر است:

۴ نتیجه‌گیری

- افزایش تعاملات بین‌المللی و بهره‌گیری از روابط خوب سیاسی برای تأمین مواد اولیه لایه‌های ضدگلوله و ساخت آن‌ها،
 - گسترش پژوهش و توسعه در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی،
 - ارتقای زیرساخت‌های دفاعی در حوزه محافظت جانی نیروهای نظامی،
 - توجه بیشتر به تولید داخل و خودکفایی در تولید الیاف پیشرفته و مواد مورد نیاز در ساخت لایه‌های ضدگلوله و
 - ارتقای آگاهی مسئولان و مدیران دولتی و سیاست‌گذاران نسبت به الیاف پیشرفته.
 امید آن می‌رود، با توجه به راهبردهای استخراج شده و تدوین برنامه‌های اقدام، گام‌های مؤثری برای ارتقای صنعت لایه‌های ضدگلوله در کشور برداشته شود.

در این پژوهش، موضوع حفاظت جانی نیروهای نظامی و انتظامی کشور از منظر پوشاک ضدگلوله و اهمیت استفاده از لایه‌های ضدگلوله برای مقابله با خطرهای مختلف با رویکرد مدیریت راهبردی بحث و بررسی شد. در ابتدا، تاریخچه زره‌های شخصی، سیر تحول مواد به‌کاررفته در زره‌ها، به‌ویژه الیاف کارا، مانند الیاف کولار و پلی‌اتیلن فراستگین، ساختار پارچه‌های ضدگلوله، سازوکار عملکرد لایه‌های ضدگلوله، استانداردهای بین‌المللی جلیقه‌های ضدگلوله و طبقه‌بندی آن‌ها به‌اختصار بررسی شد. همچنین، در بخش چارچوب تدوین راهبردها، روش تحلیل SWOT برای استخراج راهبردها براساس داده‌های حاصل از نظرهای نخبگان این حوزه بررسی شد. راهبردهای به‌دست‌آمده به‌ترتیب اولویت به

مراجع

- [1] Introduction to the bulletproof vests and how they work (Persian), 2012. Available: http://irartesh.ir/post/576/%D8%AC%D9%84%DB%8C%D9%82%D9%87_%D8%B6%D8%AF_%DA%AF%D9%84%D9%88%D9%84%D9%87_%D9%88_%DA%A9%D8%A7%D8%B1_%D8%A2%D9%86.html.
- [2] J.P. Carothers, *Body Armor. A Historical Perspective*, USMC CSC, 1988.
- [3] F. Wilkinson, *Battle Dress; a Gallery of Military Style and Ornament*, New York: Doubleday, 1969.
- [4] DuPont, *Personal Body Armour Facts Book*, 1994.
- [5] *Textiles for Protection*, 1st ed., R.A. Scott Ed. Casmbridge: Woodhead, 2005.
- [6] "Fiber Chemistry", in *Handbook of Fiber Science and Technology*, vol. 4, M. Lewin and E.M. Pearce Eds. New York: Marcel Dekker, 1985.
- [7] "High Technology Fibers: Part B", in *Handbook of Fiber Science and Technology*, vol. 3, M. Lewin and J. Preston Eds. Bosa Roca, USA: Taylor & Francis, 1989.
- [8] DuPont, *Technical Guide for Kevlar Aramid Fiber*, 1994.
- [9] S. Adanur, *Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles*, 1st ed., Boca Raton: CRC, 1995.
- [10] D. Dimeski, V. Srebrenkoska, and N. Mirceska, "Ballistic impact resistance mechanism of woven fabrics and their composites", *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 12, 2015.
- [11] I.S. Chocron-Benloulou, J. Rodríguez, and V. Sánchez-Gálvez, "A simple analytical model to simulate textile fabric ballistic impact behavior", *Text. Res. J.*, vol. 67, no. 7, pp. 520-528, 1997.
- [12] P. Cuniff, "A semiempirical model for the ballistic impact performance of textile-based personnel armor", *Text. Res. J.*, vol. 66, no. 1, pp. 45-58, 1996.
- [13] D. Roylance, A. Wilde, and G. Tocci, "Ballistic impact of textile structures", *Text. Res. J.*, vol. 43, no. 1, pp. 34-41, 1973.
- [14] B. Cheeseman and T. Bogetti, "Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates", *Compos. Struct.*, vol. 61, no. 1-2, pp. 161-173, 2003.
- [15] C. Antibala, *Bulletproof vests overview*. 2016; Available: <https://desarrollodefensay tecnologibelica.blogspot.com/2016/03/informacion-general-de-chalectos.html>.
- [16] Justice, N.I.o., Resistance of Body Armour, in NIJ Standard-0101.04. June 2001.
- [17] Justice, N.I.o., NIJ Standard-0101.04, in *Ballistic Resistance of Personal Body Armor*. 2000, National Institute of Justice: Washington, DC
- [18] R.A. Bizao, L.D. Machado, J.M. de Sousa, N.M. Pugno, and D.S. Galvao, "Scale effects on the ballistic penetration of graphene sheets", *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 6750, 2018.
- [19] Z. Benzait and L. Trabzon, "A review of recent research on materials used in polymer-matrix composites for body armor application", *J. Compos. Mater.*, vol. 52, no. 23, pp. 3241-3263, 2018.
- [20] E. Randjbaran, R. Zahari, N.A. Abdul Jalil, and D.L.A. Abdul Majid, "Hybrid composite laminates reinforced with kevlar/carbon/glass woven fabrics for ballistic impact testing", *Sci. World J.*, vol. 2014, article ID 413753, 2014.
- [21] D. Hu, Y. Zhang, Z. Shen, and Q. Cai, "Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems", *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 13, pp. 10368-10376, 2017.
- [22] A. Jabbar, M.H. Malik, T. Hussain, A. Zulifqar, and M. Tausif, "Comparison of mechanical and ballistic performance of composite laminates produced from single-layer and double-layer interlocked woven structures", *Polym. Compos.*, vol. 35, no. 8, pp. 1583-1591, 2014.
- [23] Y. Yang and X. Chen, "Investigation of failure modes and influence on ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) uni-directional laminate for hybrid design", *Compos. Struct.*, vol. 174, pp. 233-243, 2017.
- [24] M.Y. Khalid, A. Al Rashid, Z.U. Arif, W. Ahmed, H. Arshad, and A.A. Zaidi, "Natural fiber reinforced composites: sustainable materials for emerging applications", *Results Eng.*, vol. 11, article ID 100263, 2021.
- [25] G.A. Kumar, M.R. Kumar, A.M. Ramesh Babu, R.R. Kumar, G.S. Kumar, and P. Parameswaran, "Experimental analysis on ballistic performance of newly developed sandwich hybrid natural composites", *Mater. Today: Proceedings*, vol. 21, pp. 41-44, 2020.
- [26] N. Bagheri-Moghaddam, S.S. Ghazi Nouri, E. Moalemi, and S.M. Mousavi, *Methodology of National Documentation of Strategic Technologies*. Tehran: National Research Institute for Science Policy (NRISP), 2018.
- [27] F.R. David, *Strategic Management*, Prentice Hall, 2007; Translated by: S.M. Arabi and A. Parsaeian (Persian), Cultural Research Office, Tehran.

Polyethersulfone/Polyvinyl Alcohol-Zeolite Conjugate Electrospinning for Biomedical Applications

Fatemeh Haghdoust¹, S. Hajir Bahrami^{1*}, Jalal Barzin², and Azadeh Ghaee³

1. Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box 15875-4413, Tehran, Iran

2. Department of Biomaterials, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14965-115, Tehran, Iran

3. Department of Life Science Engineering, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, P.O. Box 14155-6619, Tehran, Iran

Received: 11 August 2021, Accepted: 11 October 2021

Abstract

Nanofibers have attracted a lot of interest in the biomedical field, specifically in nanoscience and nanotechnology. It is challenging to use electrospinning for the achievement of novel nanofibrous composites by the use of inorganic precursors without beads and with a uniform diameter. In this research, the development of biocompatible conjugate electrospinning nanofiber membranes containing zeolite was studied. Nanofiber membranes based on polyestersulfone as the first component and polyvinyl alcohol loaded with zeolite as the second component were prepared using the conjugate electrospinning method. Smooth, uniform nanofibers without the beads containing zeolite in the polymer substrate were observed by scanning electron microscopy (SEM). Conjugate electrospinning nanofiber membranes showed good tensile strength (3/42 MPa) and elastic modulus (48/5 MPa) after thermal crosslinking. In addition, the contact angle was reduced by the addition of polyvinyl alcohol/zeolite, which could eliminate the limitations of polyethersulfone-based membranes due to their high hydrophobicity. The MTT results and cell culture also showed that the polyester sulfone/polyvinyl alcohol-zeolite conjugate electrospinning nanofiber scaffolds made in this study have excellent biological and non-toxic compatibility for the growth of L929 fibroblasts. Therefore, PES/PVA-zeolite conjugate electrospinning nanofiber membranes can provide biomedical applications.

Keywords: conjugate electrospinning nanofibrous membrane, biocompatible nanofiber, polyether sulfone, zeolite

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hajirb@aut.ac.ir

الکتروریسی همزمان دو جزء پلی اترسولفون/پلی وینیل الکل-ژئولیت برای کاربردهای زیست پزشکی

فاطمه حقدوست^۱، سید هژیر بهرامی^{۲*}، جلال برزین^۳، آزاده غایی^۳

۱- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، گروه مهندسی پلیمرهای زیست سازگار، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

۳- تهران، دانشگاه تهران، دانشکده علوم و فنون نوین، گروه مهندسی پزشکی، صندوق پستی ۶۶۱۹-۱۴۱۵۵

دریافت: ۱۴۰۰/۵/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۱۹

چکیده

الکل-ژئولیت ساخته شده در این مطالعه دارای زیست سازگاری عالی بوده و برای رشد سلول های فیبروبلاست L929 غیرسمی هستند. بنابراین، غشای الکتروریسی شده همزمان دوجزئی پلی اترسولفون/پلی وینیل الکل-ژئولیت دارای قابلیت کاربرد در زمینه های زیست پزشکی است.

واژه های کلیدی: غشای نانوالیافی الکتروریسی شده همزمان، نانوالیاف زیست سازگار، پلی اترسولفون، ژئولیت

۱ مقدمه

مهندسی بافت، تخصصی میان رشته ای است که به سرعت رو به تحول بوده و هدف آن حل مشکلات پزشکی مرتبط با بازسازی بافت های آسیب دیده است. با ظهور نانوفناوری، انگیزه بیشتری برای پیشرفت در این حوزه ایجاد شده است. نانوفناوری، روش های نسبتاً ساده ای را برای فرمول بندی نانومواد در زمینه کاربردهای بازسازی بافت ارائه می دهد که می تواند از شکل شناسی یک ماتریس برون سلولی طبیعی تقلید کند و بر رفتار سلول اثر بگذارد [۱]. نانوالیاف دارای سطح ویژه و نسبت سطح به حجم زیاد هستند. نانوالیاف قابلیت تشکیل شبکه ای از توری های بسیار متخلخل با اتصال درخور توجه

با توسعه نانوفناوری، نانوالیاف برای کاربرد در زیست پزشکی، توجه بسیاری را جلب کرده اند. استفاده از الکتروریسی برای دستیابی به کامپوزیت های نانوالیاف با استفاده از پلیمر و ماده معدنی، با ساختاری بی دانه و قطر یکنواخت چالش برانگیز است. این پژوهش، بر توسعه غشاهای نانوالیاف الکتروریسی شده همزمان دوجزئی زیست سازگار دارای ژئولیت متمرکز شده است. غشاهای برپایه نانوالیاف پلی اترسولفون به عنوان جزء اول و پلی وینیل الکل بارگذاری شده با ژئولیت به عنوان جزء دوم، با استفاده از روش الکتروریسی همزمان دوجزئی تهیه شد. نانوالیاف با سطح صاف، یکنواخت و بی دانه که حاوی ژئولیت در بستر پلیمری است، به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شد. غشاهای نانوالیاف الکتروریسی شده همزمان دوجزئی پس از اتصال عرضی گرمایی، استحکام کششی (۳/۴۲ MPa) و مدول کشسانی (۴۸/۵ MPa) مطلوبی را نشان دادند. افزون بر این، زاویه تماس با افزودن پلی وینیل الکل-ژئولیت کاهش یافت که می تواند به رفع محدودیت های غشاهای برپایه پلی اترسولفون به دلیل آبگریزی بسیار زیاد آن منجر شود. همچنین، از نتایج سمیت سلولی و کشت سلولی مشخص شد، داربست های نانوالیاف الکتروریسی شده همزمان دوجزئی پلی اترسولفون/پلی وینیل

می‌افتد، کاربرد این پلیمر را به‌عنوان ماده زیست‌سازگار محدود می‌کند. بنابراین، تلاش‌های زیادی برای بهبود سازگاری غشای نانوالیاف پلی‌اترسولفون از طریق ترکیب، پوشش‌دهی و پیوندزنی مولکول‌ها یا ذرات مختلف آب‌دوست انجام گرفته است. از آنجا که باور بر این است که وجود گروه‌های دارای بار منفی مانند کربوکسیلیک اسید (COOH-)، سولفونات ($\text{SO}_3\text{-}$) و هیدروکسید (OH-) در سطح غشا می‌تواند از طریق نیروهای دافعه با خون دارای بار منفی تشکیل لخته را مهار کنند، بسیاری از پژوهشگران با معرفی این گروه‌ها در ساختار، نانوالیاف ضدانعقادی جدیدی را سنتز کرده‌اند [۶].

Ma و همکاران [۹]، پلی‌یورتان سولفونات‌دار را سنتز و با پلی‌اترسولفون مخلوط کردند. غشای حاصل، چسبندگی پروتئین کمتر و زمان لخته‌شدن بهتری را نشان داد. مشتقات اسید هیالورونان سولفات‌دار با افزایش درجه سولفون‌دارشدن، اتصال پلاکت را کاهش داده و خون‌سازگاری مناسبی را ارائه می‌دهند. Ni و همکاران، خون‌سازگاری پلی‌اترسولفون با ترکیب پلی‌اترسولفون سولفونات‌دار و پلی‌اترسولفون کربوکسیلیک را افزایش دادند [۱۰]. پلی‌وینیل الکل، افزودنی آب‌دوست رایج در افزایش آب‌دوستی غشاهای نانوالیاف پلی‌اترسولفون است. هم‌زمان، پلی‌وینیل الکل آب‌دوستی غشا را بهبود می‌دهد [۱۱]. بنابراین برای افزایش آب‌دوستی پلیمر پلی‌اترسولفون، پلی‌وینیل الکل می‌تواند گزینه مناسبی باشد. پلی‌وینیل الکل به‌عنوان پلیمری مهم بی‌شکل، با سمیت شیمیایی کم، زیست‌سازگاری زیاد، حل‌پذیری عالی در اکثر حلال‌های آلی و قابلیت الکتروروسی مناسب شناخته می‌شود. بنابراین، با توجه به این دلایل، پلی‌وینیل الکل در کاربردهای پزشکی مانند پانسمان زخم [۱۲]، رهایش دارو [۱۳]، عدسی تماسی و غیره استفاده می‌شود. همچنین، به‌دلیل تمایل به خون، پلاسما و بافت زنده به‌عنوان پروتز استفاده می‌شود [۱۴، ۱۵]. پلی‌وینیل الکل، با توجه به خواص گسترده، هزینه نسبتاً کم، در دسترس بودن زیاد و حل‌پذیری در محلول‌های آبی، برای تولید لیاف الکتروروسی شده و اصلاح آب‌گریزی ساختار پلی‌اترسولفون در نظر گرفته شد [۱۳]. نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با وجود داشتن خواص منحصر به فرد، به‌دلیل آب‌دوستی زیاد چندان قابل استفاده نیستند. این موضوع، چالشی اساسی برای کاربرد آن‌ها در زمینه‌های مختلف پزشکی است. از ساده‌ترین روش‌ها برای کاهش حل‌پذیری پلی‌وینیل الکل، ترکیب آن با پلیمرهای آب‌گریز است. بسیاری از پژوهشگران برای رفع این مشکل، ایجاد پیوند عرضی در نانوالیاف الکتروروسی شده پلی‌وینیل الکل را پیشنهاد داده‌اند [۱۶، ۱۷]. متداول‌ترین اتصال‌دهنده‌های

میان منافذ را دارند. سطح ویژه، تخلخل زیاد، حجم و اندازه منافذ نانوالیاف، اثر درخور توجهی بر چسبندگی سلول، رشد و تکثیر آن در کاربردهای مهندسی بافت دارند. همچنین، درباره رهایش ماده زیست‌فعال (دارو یا عصاره‌های گیاهی مختلف)، ساختار داخلی نانوالیاف اثر زیادی بر آزادسازی تدریجی دارد [۲].

ساختارهای مختلف نانوالیاف، مانند ساختارهای هسته-پوسته، چندجزئی، لیاف توخالی و متخلخل می‌توانند با استفاده از طراحی‌های ویژه رشته‌ساز تولید شوند. با کنترل اندازه، سطح و محتوای نانوالیاف می‌توان به نوعی اصلاح‌شده با ویژگی‌های بسیار فعال سطحی دست یافت. از شکل‌شناسی و ساختارهای ویژه نانوالیاف می‌توان در کاربردهای پیشرفته مانند جذب، دارورسانی، رشد و تکثیر سلولی، ذخیره انرژی و حسگرهای گاز استفاده کرد. در این میان، ساختار هم‌زمان دوجزئی نانوالیاف با تأکید بر سازوکار و عملکرد آن‌ها، بسیار اهمیت دارد.

ساختار شبکه نانوالیاف نقش مهمی در پشتیبانی از رشد سلول دارد. شبکه نانوالیاف محیطی پویا و سه‌بعدی ایجاد می‌کند که در آن سلول‌ها حفظ می‌شوند. برهم‌کنش‌های سلول‌های ساکن و نانوالیاف در تعیین تکثیر و فعالیت حاصل در داربست‌های بافت حیاتی است. پژوهش‌های اخیر نشان داده است، نانوالیاف ماتریس برون‌سلولی مانند کلاژن و الاستین، پشتیبانی فیزیکی و زیستی بسیار خوبی برای اتصال و تکثیر سلول دارند. داربست‌های نانوالیاف متخلخل سه‌بعدی، از سلول‌های بنیادی مختلف و متمایز برای بازسازی بسیاری از بافت‌های سخت و نرم پشتیبانی کرده‌اند [۳-۱]. در این میان، خواص مکانیکی سامانه‌های نانوالیاف بسیار مهم است. مقاومت لیاف و اثرهای چسبندگی لیاف به یکدیگر بر خواص مکانیکی غشای نانوالیاف بسیار اثرگذار است. برای دستیابی به ویژگی‌های مکانیکی مناسب، روش‌های مختلفی مانند عمل‌آوری‌های گرمایی، استفاده از نانوذرات و پیوند ناشی از حلال میان لیاف معرفی شده است [۴، ۵].

در میان انواع مختلف سامانه‌های نانولیفی که برای کاربردهای زیستی تولید می‌شوند، پلی‌اترسولفون (PES) دارای خواص مکانیکی، گرمایی، اکسایشی و تشکیل فیلم و همچنین زیست‌سازگاری است. غشاهای نانوالیاف پلی‌اترسولفون در زمینه‌های زیست‌پزشکی عمدتاً برای اندام‌های مصنوعی و ابزارهای زیست‌پزشکی استفاده می‌شوند. همچنین، در زمینه تصفیه خون مانند خون‌پالایی، غشای دیالیز و جمع‌آوری پلاسما استفاده می‌شوند [۸-۶]. با این حال، جذب پروتئین در سطح پلی‌اترسولفون و تشکیل لخته و در پی آن رسوب غشاها، که اغلب به‌دلیل ماهیت آب‌گریزی شدید آن اتفاق

در میان فن‌های مختلف، تولید الیاف ژئولیت از طریق الکتروریسی روشی کارآمد، مقیاس‌پذیر و اقتصادی برای تولید الیاف از چند نانومتر تا قطر چند میکرون است. با این حال، چالش‌های مرتبط با بهینه‌سازی پارامترهای مختلف محلول و فرایند بسیار زیاد است [۳۳]. انیس و همکاران در سال ۲۰۱۵، الیاف میکروژئولیت-Y و نانوالیاف نازک ژئولیت-LTL را از طریق تعلیق محلول چسبناک ذرات ژئولیت و پلی‌وینیل‌پیرولیدون با نسبت ۱:۱ وزنی تولید کردند. تنوع درخور توجه قطر الیاف برای هر دو نوع الیاف ژئولیت مشاهده شد [۳۴]. Tavolaro و همکاران در سال ۲۰۱۶ درباره کاربردهای ژئولیت در حوزه زیست‌پزشکی پژوهش‌هایی انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که ژئولیت، به دلیل آماده‌سازی مناسب و قابلیت استفاده مجدد، شرایط سترون‌سازی راحت، پایداری مناسب در محیط آبی، قابلیت جذب یون‌های سمی، خاصیت ضدباکتری و زیست‌سازگاری مناسب را برای توسعه سلول داراست [۳۵].

در پژوهش‌های انجام‌شده توسط پژوهشگران، به‌منظور رهایش تدریجی دارو از سامانه‌های دارورسانی به‌وسیله مواد معدنی و آلی، از مزایای ساختارهای ایمیدازولات ژئولیت استفاده شد. ایمیدازولات ژئولیت مشابه چارچوب‌های فلزی بوده و متشکل از واحدهای غیرآلی، مراکز فلزی روی با چهار اتصال آلی (۲-متیل ایمیدازولات) است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد ایمیدازولات ژئولیت مانند تخلخل زیاد، منافذ بزرگ، سطح ویژه زیاد، پایداری گرمایی و شیمیایی استثنایی (برخلاف سایر چارچوب‌های فلزی-آلی) و زیست‌سازگاری مناسب، آن را به نامزد امیدبخشی برای کاربردهای رهایش دارو تبدیل کرده است [۳۶]. پلی‌وینیل الکل برای مخلوط‌شدن با ژئولیت‌ها بسیار مناسب است. این ماده به‌عنوان چسب برای اتصال نانوذرات ژئولیت عمل می‌کند. بدین ترتیب در این پژوهش، از پلیمر پلی‌اتر سولفون به‌عنوان تقویت‌کننده در فرایند الکتروریسی هم‌زمان دوجزئی استفاده شده است. براساس شواهد پیشین، پلی‌اتر سولفون ماده مفیدی برای افزایش استحکام غشای نانوالیاف است.

هدف این مطالعه، بررسی الکتروریسی هم‌زمان دو جزء پلی‌اتر سولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت با درصدهای مختلف ژئولیت است. شکل‌شناسی و ساختار شیمیایی غشاهای نانوالیاف پلی‌اتر سولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، تجزیه و تحلیل عناصر موجود در سطح و طیف‌سنجی تبدیل فوری زیرقرمز (FTIR) بررسی شده‌اند. خواص مکانیکی و میزان آب‌دوستی سطح نانوالیاف نیز ارزیابی شد. همچنین، قابلیت زیست‌سازگاری نانوالیاف از طریق آزمون سمیت

خطی برای پلی‌وینیل الکل شامل گلو تارآلد هید [۱۸] گلیوکسال [۱۹]، دی‌ایزوسیانات‌ها [۲۰]، ترانس گلو تامیناز و جنپین [۲۱] هستند. خطوط عرضی با ترکیبات هیدروکسیل موجود در زنجیر پلیمر واکنش می‌دهند که می‌توانند به تشکیل پیوندهای عرضی منجر شوند. از آنجا که خطوط عرضی بسیار واکنش‌پذیر و برخی از آن‌ها سمی هستند، موجب ژل‌شدن پلیمر در طول فرایند می‌شوند. بنابراین، ساختن نانوالیاف پلی‌وینیل الکل پیوندخورده بدون داشتن هیچ‌گونه اثرهای سوء در بحث زیست‌سازگاری، چالش‌برانگیز است. یکی دیگر از روش‌های تثبیت نانوالیاف پلی‌وینیل الکل (PVA)، عمل‌آوری گرمایی است. اگرچه مطالعات انجام‌شده مربوط به تثبیت نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با عمل‌آوری گرمایی بسیار محدود بوده، اما مشخص شده است، عمل‌آوری گرمایی بیش از دمای انتقال شیشه‌ای برای پلی‌وینیل الکل، ساختار را عمدتاً از طریق افزایش بلورش پلیمر تثبیت می‌کند [۱۶، ۱۷]. گروه‌های هیدروکسیل پلی‌وینیل الکل می‌توانند پیوندهای هیدروژنی ایجاد کنند که به دلیل عمل‌آوری گرمایی به تشکیل بلورهای کوچک منجر می‌شوند. این حوزه‌های بلوری به‌عنوان اتصال‌های عرضی برای نگه‌داشتن ساختار سه‌بعدی در کنار هم عمل می‌کنند [۱۶، ۱۷]. Wong و همکاران گزارش دادند، عمل‌آوری گرمایی باعث افزایش بلورش نانوالیاف پلی‌وینیل الکل می‌شود. با افزایش دمای عمل‌آوری یا زمان آن می‌توان به پایداری الیاف در آب دست یافت. در مطالعه دیگری توسط Hong و همکاران، عمل‌آوری گرمایی برای نانوالیاف پلی‌وینیل الکل-نیترات نقره استفاده شد که در آن تثبیت خوب ساختار نانوالیاف پلی‌وینیل الکل الکتروریسی‌شده در برابر حل‌پذیری در آب گزارش شده است [۱۶، ۲۲].

ژئولیت‌ها خانواده‌ای از مواد آلومینوسیلیکات غیرآلی متخلخل هستند. دارا بودن منافذ با ابعاد مولکولی کاملاً مشخص، پایداری گرمایی زیاد و همچنین ویژگی‌های تبادل یون، آن‌ها را برای کاربردهای مختلف در زمینه‌های جذب [۲۳-۲۵]، کاتالیزورها [۲۶-۲۸] و کاربردهای زیست‌پزشکی [۲۹، ۳۰] مناسب می‌سازد. ترکیبی از ژئولیت‌ها با پلیمرها برای تولید غشای نانوالیاف جذاب است، به‌ویژه اگر بتوان روش ساده و سریعی برای تولید غشای ژئولیت ایجاد کرد. چند راهبرد برای غشاهای کامپوزیتی پلیمر-ژئولیت وجود دارد. در برخی مطالعات، غشاهای ماتریس مخلوط با توزیع همگنی از ذرات ژئولیت در پلیمر بیشتر برای جداسازی گاز ارائه شده‌اند. راهبرد دیگر قرارگیری لایه نازکی از نانوزئولیت‌ها بر لایه پشتیبانی از پلیمر متخلخل و به دنبال آن رسوب لایه پلیمر فعال روی فیلم ژئولیت است [۳۱، ۳۲].

سلولی بررسی شد.

۲ تجربی

۱-۲ مواد

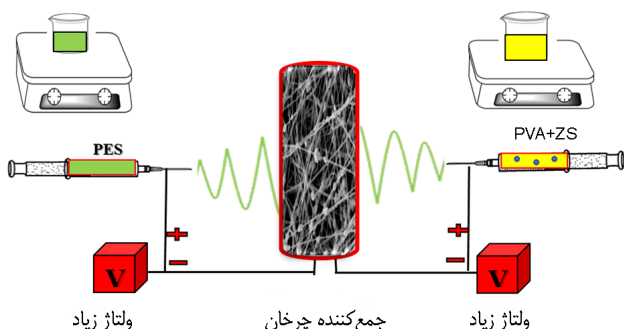
پلی اترسولفون (E6020) با وزن مولکولی 58000 g/mol از شرکت BASF، پلی وینیل الکل با وزن مولکولی 76000 g/mol ، زئولیت سنتزی ZSM-5 شرکت ایران زئولیت ($56 \text{ nm} \times 54 \text{ nm}$)، دی متیل فراماید (DMF) و استون از شرکت Merck تهیه شدند. تمام مواد بدون هرگونه خالص سازی استفاده شدند.

۲-۲ روش تهیه نانوالیاف الکتروریسی

آماده سازی محلول های الکتروریسی به طور جداگانه برای دو جزء انجام شد.

الکتروریسی جزء اول: در مرحله اول، الکتروریسی پلی اترسولفون در حلال دی متیل فراماید برای ایجاد نانوالیاف یکنواخت و بی دانه انجام شد. بدین منظور، همان طور که در کار پیشین ما گفته شد، محلول $25\% \text{ wt}$ پلیمر در حلال دی متیل فراماید در دمای محیط حل و الکتروریسی با نرخ تغذیه 0.5 mL/h و ولتاژ 16 kW انجام شد [۳۷].

الکتروریسی جزء دوم (پلیمر-زئولیت): برای تهیه سطح یکنواختی از نانوالیاف حاوی ذرات زئولیت به همراه پلی وینیل الکل، در ابتدا باید تعلیق مناسبی از ذرات زئولیت پایدار در حلال ایجاد کرده تا بتوان از آن در الکتروریسی استفاده کرد. برای توزیع بهتر و همگن تر ذرات زئولیت، از فراصوت دهی کاونده ای در حمام یخ استفاده شد. زئولیت با درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ (نسبت به پلیمر پلی وینیل الکل) بررسی شد. سپس، محلول پلی وینیل الکل در دمای 80°C تهیه و به زئولیت اضافه شد. در نهایت، پراکنش حاصل به مدت 24 h در دمای محیط تحت هم زدن مداوم قرار گرفت. پراکنش پیش از الکتروریسی، به منظور جلوگیری از رسوب نانو ذرات طی الکتروریسی به مدت 1 h با فراصوت دهی همگن سازی شد. از استوانه چرخان با سرعت چرخش 200 rpm/min (قطر استوانه 31 cm) پوشش یافته با ورق آلومینیومی با فاصله 15 cm از سوزن به عنوان جمع کننده الیاف استفاده شد. سرعت تغذیه محلول الکتروریسی جزء دوم 0.7 mL/h در نظر گرفته شد. همچنین، ولتاژ اعمالی 18 kV بود و الکتروریسی در شرایط محیط (دمای 25°C ، رطوبت نسبی 65%) انجام شد. شکل ۱، نمایی از



شکل ۱- نمایی از الکتروریسی هم زمان دوجزئی.

الکتروریسی هم زمان دوجزئی را نشان می دهد.

در ادامه، به منظور ایجاد پایدار سازی گرمایی نانوالیاف در محیط آبی از عمل آوری گرمایی استفاده شد. نمونه ها درون گرم خانه با دمای 150°C به مدت ۶، ۱۲ و 24 h قرار گرفتند. با توجه به اینکه دمای تخریب پلی وینیل الکل 200°C است، دمای 150°C برای ایجاد اتصال عرضی در نمونه ها انتخاب شد. محلول گلو تار آلدهید به دلیل سمیت و آلودگی محیط زیست در این پروژه استفاده نشد.

۳-۲ مشخصه یابی نانوالیاف

۱-۳-۲ میکروسکوپ الکترونی روبشی و تعیین عناصر سطح

برای بررسی شکل شناسی سطح از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل XL30 ساخت شرکت Philips هلند استفاده شد. قطعاتی از نمونه با استفاده از طلا پوشش دهی شدند. حدود ۱۰۰ عدد از الیاف در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با استفاده از نرم افزار Digimazer اندازه گیری و سپس با نرم افزار Origin Pro نمودار بافت نگاشت (histogram) رسم شد.

۲-۳-۲ رسانندگی الکتریکی محلول

رسانندگی با استفاده از دستگاه رسانایی سنج Orion 3 Star ساخت شرکت ThermoScientific ارزیابی شد. برای به دست آوردن رسانندگی الکتریکی نمونه ها، کاونده به مدت 30 s در دمای محیط در محلول غوطه ور شد تا به عدد ثابت رسید.

۳-۳-۲ طیف سنجی زیر قرمز تبدیل فوری

برای بررسی پیوندهای شیمیایی از دستگاه طیف سنج مدل Nicolet Nexus 670 استفاده شد. این آزمون به منظور بررسی گروه های شیمیایی پودر زئولیت ZSM-5، نانوالیاف پلی وینیل الکل و پلی اترسولفون و نیز نانوالیاف الکتروریسی شده هم زمان دوجزئی پلی اترسولفون/پلی وینیل الکل-زئولیت انجام شد.

شدند. در مرحله اول، نمونه‌ها به مدت ۲۰ min در محلول ۷۰٪ اتانول قرار داده و سپس با محلول بافر فسفات به مدت ۴۰ min شست‌وشو داده شدند. سپس، تحت تابش UV به مدت ۲۰ min قرار گرفتند. نمونه‌ها در چاهک ۲۴ خانه‌ای گذاشته شدند. یک چاهک بدون نمونه نیز به عنوان نمونه کنترل تعیین شد. در ادامه، MTT روی نمونه‌ها ریخته و نمونه‌ها در آنکوباتور با دمای ۳۷ °C به مدت ۴ h قرار داده شد. پس از این مدت MTT و محیط از چاهک‌ها خارج و بقیه بلورهای MTT با افزودن ۲۰۰ µL حلال دی‌متیل سولفوکسید پراکنده شدند. در ادامه، نمونه‌ها به چاهک‌های ۹۶ خانه‌ای منتقل شدند. برای اندازه‌گیری مقادیر جذب از microplate reader در طول موج ۵۴۰ nm استفاده شد. تمام آزمون‌ها ۳ بار تکرار و میانگین مقادیر به عنوان نتیجه نهایی گزارش شدند. درصد زنده‌مانی از طریق معادله زیر محاسبه شد:

$$\text{کنترل/جذب متوسط نمونه‌های تیمار شده} = \text{درصد سلول‌های زنده} \times 100 \quad (2)$$

۲-۳-۸ تحلیل آماری

برای بررسی تفاوت معنی‌داری میان داده‌های به دست آمده از نرم‌افزار Graphpad استفاده شد. آزمون آماری تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و آزمون Tukey در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد. $P \leq 0.05$ نشانگر اختلاف معناداری میان نمونه‌ها بوده و $P \geq 0.05$ عدم معناداری اختلاف میان نمونه‌ها را گزارش می‌کند.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ بررسی شکل‌شناسی

الکتروریسی هم‌زمان دوجزئی به عنوان روشی بسیار کارآمد و ساده برای تولید الیاف در مقیاس میکرو و نانو است. الکتروریسی با ایجاد ساختاری در محدوده میکرومتر یا نانومتر، می‌تواند نسبت سطح به حجم و تخلخل زیادی را در سطح ایجاد کند. غشاهای تهیه شده با روش الکتروریسی به عنوان گزینه بسیار مناسبی برای رشد و تکثیر سلولی در نظر گرفته می‌شوند. افزون بر این، استفاده از ژئولیت و بارگذاری آن می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی نانوالیاف و همچنین تکثیر سلولی کمک ویژه‌ای کند.

به طور کلی در الکتروریسی هم‌زمان دوجزئی، برای تولید الیافی صاف و بی‌دانه، پارامترهای مختلف از جمله غلظت پلی‌اتر سولفون،

۲-۳-۴ خواص مکانیکی نانوالیاف

خواص مکانیکی نانوالیاف با آزمون کشش تک‌محور بررسی شد. ابتدا ضخامت نمونه‌ها با ضخامت‌سنج رقمی اندازه‌گیری شد. از دستگاه کشش تک‌محور Instron 5566 ساخت انگلستان استفاده شد. نمونه‌ها با ابعاد $3 \times 5 \times 0.5$ cm^۲ آماده شدند. مقدار نیروی وارد شده به نانوالیاف ۱۰ N با سرعت کشش ۵ mm/min بود.

۲-۳-۵ زاویه تماس و میزان تورم نمونه‌های نانوالیاف

ماهیت آب‌دوستی-آب‌گریزی غشاهای نانوالیاف در برهم‌کنش میان سلول‌ها و غشا (چسبندگی و رشد سلول‌ها و پروتئین‌ها) نقش مهمی ایفا می‌کند. آب‌دوستی سطح غشاهای نانوالیاف دارای ۲۰ wt % ژئولیت با استفاده از آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس آب نانوالیاف در حالت ایستا بررسی شد. نمونه‌ها با ابعاد 2×2 cm^۲ از نانوالیاف تهیه و روی یک پایه نگه‌دارنده قرار داده شدند. قطره آب به حجم ۱۰ µL با میکروسرنج در سه نقطه مجزا روی سطح هر یک از نانوالیاف ریخته و با دوربین Sony مدل SSCDC318P ساخت ژاپن از قطره عکس‌برداری شد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار Digimizer، سنجش زاویه تماس قطره با سطح مدنظر انجام شد. برای محاسبه درصد تورم نمونه‌های نانوالیاف، ابتدا وزن خشک (M_d) آن‌ها یادداشت شد. در ادامه، نمونه‌ها به مدت ۰/۵، ۲ و ۶ h در آب مقطر قرار داده شدند. پس از آن، آب اضافی نمونه‌ها با کاغذ صافی گرفته و وزن مرطوب در هر زمان (M_t) یادداشت شد. درصد تورم با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$\text{درصد تورم} = \frac{M_t - M_d}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

۲-۳-۶ تجزیه گرم‌اوزن‌سنجی

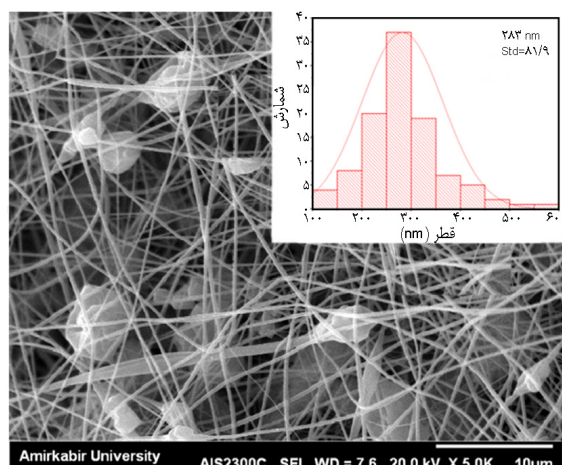
تجزیه گرم‌اوزن‌سنجی تمام نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Q500 TGA بررسی شد. تمام نمونه‌ها از ۲۵ °C تا ۸۰۰ °C با سرعت گرمایش ۲۰ °C/min در جو N₂ بررسی شدند.

۲-۳-۷ سمیت سلولی نمونه‌های نانوالیاف

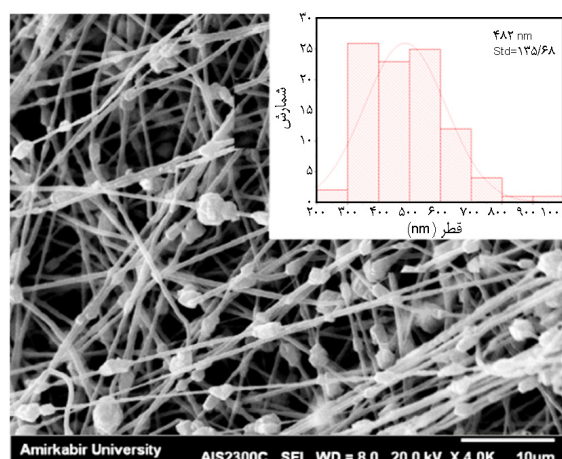
به منظور بررسی اثر سمیت سلولی نانوالیاف بر رشد و تکثیر سلول‌ها از روش رنگ‌سنجی MTT استفاده شد. در این راستا، از رده‌های سلولی فیروبلاست L929 استفاده شد. پودر MTT (۳-(۵-دی‌متیل تیزول)-۵،۲-دی‌فنیل تترازولیوم برمید) نوعی نمک تترازولیوم محلول در آب است. سلول‌های فیروبلاست با تعداد 5×10^4 سلول رشد داده شدند. نمونه‌ها در دو مرحله سترون

هستند و میانگین قطر ذرات آن‌ها ۸۶۸ nm است، که به‌طور درخور توجهی بیش از قطر الیاف است. از آنجا که تعلیق ژئولیت به‌طور مستقل امکان الکتروریسی ندارد، به نوعی ماده افزودنی پلیمری قابل رسیدن نیز نیاز است. بنابراین، محلول پلیمری پلی‌وینیل الکل چسبناک اختلاط‌پذیر با ژئولیت برای الکتروریسی استفاده شد. پلی‌وینیل الکل، به‌عنوان چسب برای اتصال نانوذرات ژئولیت عمل می‌کند. با وجود این، مقدار اضافی پلی‌وینیل الکل باعث فروپاشی الیاف پس از اتصال عرضی گرمایی می‌شود. از این رو، الیاف یکنواخت با مقاومت قابل قبول و بی‌دانه مورد نیاز بود. بدین منظور، دو مقدار ۵٪ و ۱۰٪ wt از پلی‌وینیل الکل به‌همراه ۱۰٪ wt از ژئولیت الکتروریسی شدند.

مهم‌ترین مؤلفه مؤثر طی فرایند الکتروریسی، غلظت محلول پلیمری است. غلظت محلول پلیمری بر سه پارامتر مهم گرانی،

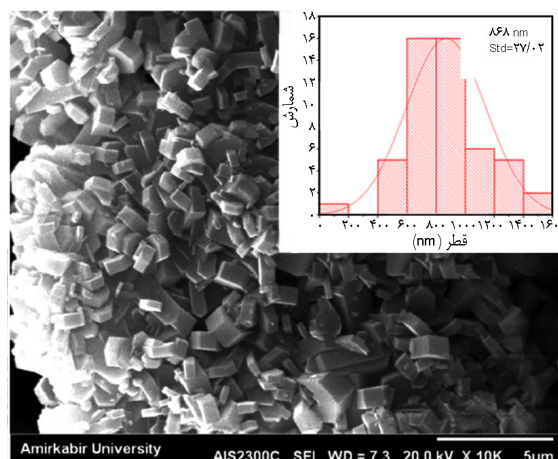


(الف)

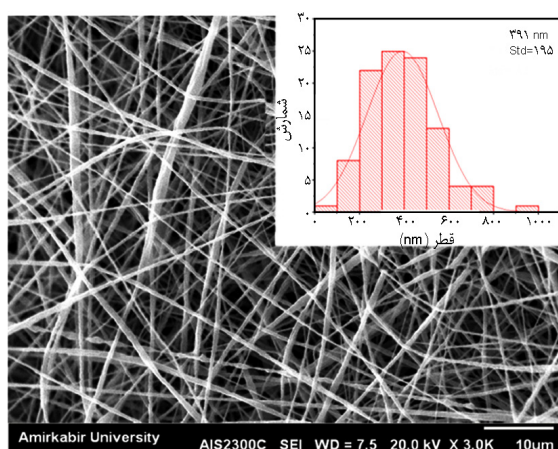


(ب)

شکل ۳- تصویر شکل‌شناسی از نانوالیاف: (الف) ۵٪ wt پلی‌وینیل الکل- ۱۰٪ wt ژئولیت و (ب) ۱۰٪ wt پلی‌وینیل الکل- ۱۰٪ wt ژئولیت.



(الف)



(ب)

شکل ۲- تصویر شکل‌شناسی و توزیع قطر: (الف) ذرات ژئولیت و (ب) نانوالیاف پلی‌اتر سولفون.

پلی‌وینیل الکل و ژئولیت، و لثا اعمال‌شده، سرعت جریان محلول پلیمری و فاصله سوزن تا جمع‌کننده در هر دو جزء بررسی شد. پارامترهای الکتروریسی، با استفاده از شرایطی شامل ولتاژ ۱۶-۱۸ kV، سرعت جریان محلول پلیمری ۰/۵-۰/۷ mL/h و فاصله سوزن تا جمع‌کننده ۱۵-۱۲/۰۵ cm به‌ترتیب برای جزء اول و دوم حاصل شد. شکل‌شناسی ذرات ژئولیت استفاده‌شده در این پژوهش با میکروسکوپ الکترونی روبشی و نمودار توزیع قطر در شکل ۲الف نشان داده شده است. از شکل ۲ب مشاهده می‌شود، نانوالیاف پلی‌اتر سولفون، به‌صورت الیافی به‌هم‌پیوسته و بی‌دانه با میانگین قطر ۳۹۱ nm الکتروریسی شده‌اند.

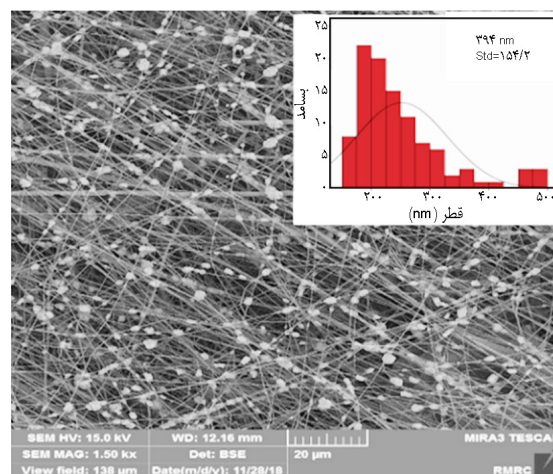
در مرحله دوم، ترکیبی از ژئولیت به‌همراه پلی‌وینیل الکل برای تولید جزء دوم در فرایند الکتروریسی هم‌زمان دوجزئی نهایی، ساخته شد. شکل ۲الف، تصاویر شکل‌شناسی و توزیع اندازه ذرات ژئولیت را نشان می‌دهد. ذرات ژئولیت ZSM-5 تقریباً چهارضلعی

با ۱۰٪ wt (شکل ۳ب) با میانگین قطر ۴۸۲ nm و الیافی صاف و بی‌دانه استفاده شد.

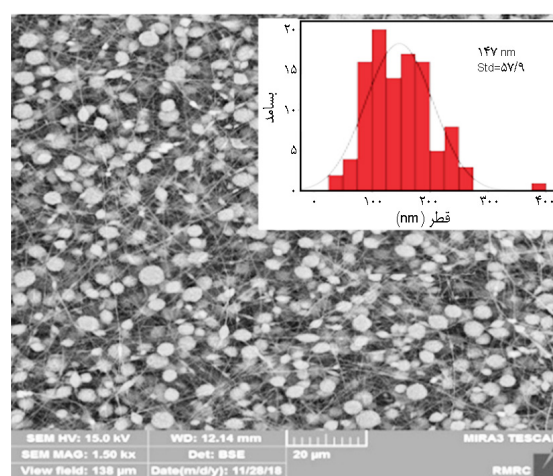
افزودن ژئولیت، به تولید نانوالیاف با توزیع قطر باریک‌تر منجر می‌شود. کاهش قطر نانوالیاف در اثر افزودن ذرات معدنی می‌تواند به دلیل چگالی بار و رسانندگی الکتریکی بیشتر محلول با وجود ژئولیت باشد [۳۷]. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای رسانندگی محلول پلیمری، مقدار رسانندگی پلی‌وینیل الکل-۱۰٪ ژئولیت، پلی‌وینیل الکل-۲۰٪ ژئولیت و پلی‌وینیل الکل-۳۰٪ ژئولیت به ترتیب ۲۳/۷، ۳۷/۸۷ و ۴۹/۶۹ $\mu\text{S}/\text{cm}$ به‌دست آمد. نتایج حاصل از وجود ماده معدنی ژئولیتی، مطابق نتایج مطالعات پیشین ما بود که مشاهده شد، افزودن ژئولیت به محلول پلی‌وینیل پیرولیدون موجب کاهش قطر نانوالیاف حاصل می‌شود [۳۵]. افزون بر این، با افزودن ژئولیت به‌عنوان ماده معدنی به محلول پلیمر پلی‌وینیل الکل، رسانندگی الکتریکی محلول افزایش یافته و باعث کشش بیشتر جت شده است. در کار حاضر، از الکتروریسی هم‌زمان دوجزئی کامپوزیت پلی‌اترسولفون (۲۵٪ wt)/پلی‌وینیل الکل (۱۰٪ wt)-ژئولیت (۲۰٪ wt)، نانوالیافی صاف با توزیع یکنواخت ژئولیت حاصل شد (شکل ۴الف). همان‌طور که از تصاویر شکل ۴ب مشخص است، با افزایش بیشتر ژئولیت (۳۰٪ wt)، قطر الیاف به‌طور معناداری کاهش یافته و به ۱۴۷ nm رسیده است. افزون بر این، وجود دانه‌ها در ساختار نانوالیاف مشهود است که نشان از نایکنواختی الیاف دارد. تصاویر طیف‌سنجی پرتو ایکس با انرژی پاشنده از الیاف نیز توزیع مناسب ذرات ژئولیت (با تأیید درصد Si و Al) در ترکیب الیاف را تأیید می‌کند (شکل ۵).

۲-۳ بررسی نتایج طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوری

شکل ۶ طیف‌های FTIR نانوالیاف پلی‌اترسولفون، پودر ژئولیت و نانوالیاف پلی‌وینیل الکل، پلی‌وینیل الکل-ژئولیت، الکتروریسی-شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت و الکتروریسی‌شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت اتصال عرضی‌یافته با عمل‌آوری گرمایی را نشان می‌دهد. پیک‌های شاخص پلی‌وینیل الکل نوارهای پهن مشاهده‌شده بین 3550 cm^{-1} تا 3200 cm^{-1} مربوط به کشش OH از پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی و درون‌مولکولی هستند. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در نمونه نانوالیاف الکتروریسی‌شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت اتصال عرضی‌یافته با عمل‌آوری گرمایی این پیک مشاهده نمی‌شود که تأییدی بر انجام این عمل‌آوری است. نوار ارتعاشی مشاهده‌شده



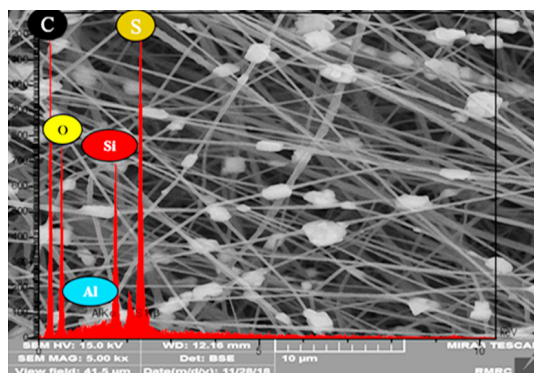
(الف)



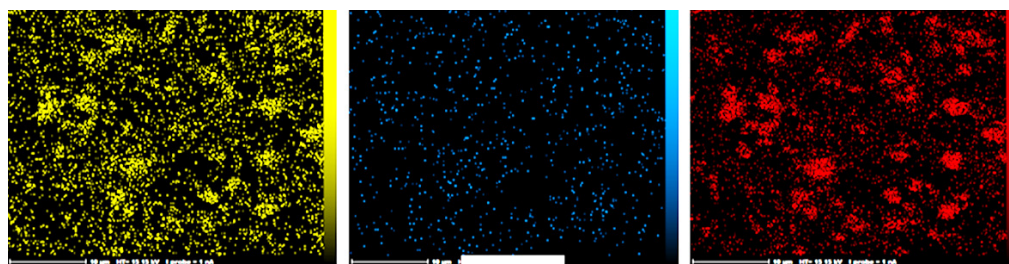
(ب)

شکل ۴- (الف) تصویر شکل‌شناسی و توزیع قطر نانوالیاف از نانوالیاف الکتروریسی‌شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت با نسبت: (الف) ۲۰/۲۵ wt-۱۰٪ و (ب) ۳۰/۲۵ wt-۱۰٪.

رسانندگی و کشش سطحی اثرگذار است. افزایش غلظت باعث افزایش جرم پلیمر در جت ریسندگی می‌شود و قطر نانوالیاف افزایش می‌یابد. همچنین، باعث کاهش دانه در سطح نانوالیاف می‌شود. در این شرایط، گرانیروی افزایش می‌یابد و اتصال قوی‌تری میان زنجیرهای پلیمری ایجاد می‌شود که کشش را دشوارتر می‌کند. در برخی پلیمرها با افزایش غلظت، چگالی بار محلول هم زیاد می‌شود. این مسئله، به نیروی قوی‌تری برای کشش الیاف منجر می‌شود. در این شرایط، انتظار کاهش قطر الیاف را داریم. بنابراین، همان‌طور که از تصاویر شکل‌شناسی شکل ۳الف مشخص است، نمونه با غلظت ۵٪ پلی‌وینیل الکل دارای الیافی نایکنواخت با دانه‌های فراوان است. بنابراین در این مطالعه، از پلی‌وینیل الکل



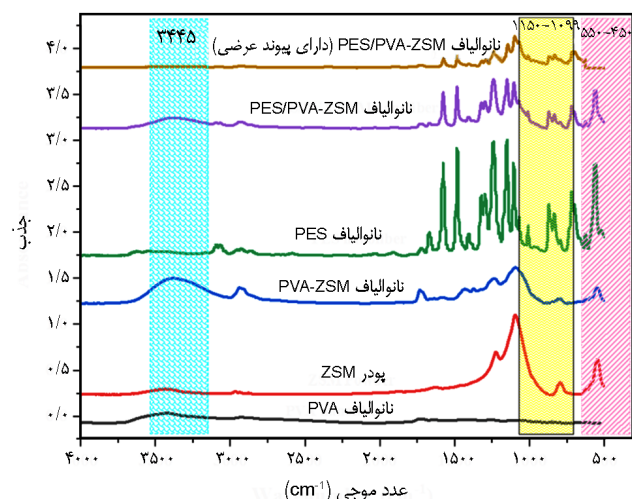
(الف)



(ب)

شکل ۵- (الف) تصویر شکل شناسی و (ب) طیف پرتو ایکس با انرژی پاشنده از نمونه های الکتروریسی شده هم زمان دوجزئی از پلی اترسولفون/ پلی وینیل الکل-ژئولیت (۲۵/۲۰ wt-%).

پیک قوی در 1097 cm^{-1} مربوط به کشش ارتعاشی Si(Al)-O ژئولیت است. نوارهای موجود در منطقه $546-446\text{ cm}^{-1}$ نشانگر وجود یک ساختار حلقه ای با پنج عضو متصل T-O-T (Al و Si) در



شکل ۶- طیف FTIR نانوالیاف پلی اترسولفون و پلی وینیل الکل و پودر ژئولیت و نانوالیاف الکتروریسی شده هم زمان دوجزئی پلی اترسولفون/پلی وینیل الکل-ژئولیت بدون و با اتصال عرضی ایجاد شده با عمل آوری گرمایی.

میان 2845 cm^{-1} و 2925 cm^{-1} به کشش C-H در گروه های آلکیل اشاره دارد و نوارهای 1328 cm^{-1} و 1441 cm^{-1} به دلیل کشش آلیفاتیک است [۱۸،۳۸]. منحنی جذب FTIR نانوالیاف پلی اترسولفون، پیک هایی را در 1578 cm^{-1} و 1409 cm^{-1} نشان داد که به ارتعاش کششی حلقه های بنزنی پایدار شیمیایی مربوط است. پیوند کششی مربوط به C-C در محدوده 1486 cm^{-1} مشاهده می شود. پیک مشاهده شده در محدوده 1244 cm^{-1} نشانگر پیوند کششی آروماتیک اتر بوده و پیوند کششی C-O در محدوده 1106 cm^{-1} نمایانگر پلی اترسولفون خالص است. افزون بر این، نانوالیاف پلی اترسولفون دارای جذب ضعیفی در نزدیکی 1670 cm^{-1} بوده که ناشی از ارتعاش کششی پیوند C=C حلقه های بنزن است. طیف نانوالیاف پلی اترسولفون در محدوده $1280-1300\text{ cm}^{-1}$ پیکی را ایجاد می کند که ارتعاش کششی نامتقارن پیوندهای S=O را نشان می دهد. سپس، ارتعاش کششی متقارن آن پیوندها در $1148-1152\text{ cm}^{-1}$ ظاهر می شود. این نتایج با یافته های گزارش های پیشین مطابقت دارد [۳۷،۳۹]. افزون بر مولکول های آب جذب شده به وسیله پیوند هیدروژنی، ارتعاشی که در محدوده پیک های $1650-3430\text{ cm}^{-1}$ دیده می شود، به کشش و خمش OH موجود در سطح مواد معدنی مربوط است. پیک جذب در 1225 cm^{-1} نیز پیوندهای C-N را نشان می دهد.

جدول ۱- پیک‌های مشاهده شده در نانوالیاف الکتروریسی شده همزمان دوجزئی پلی اترسولفون/پلی وینیل الکل-ژئولیت.

پیک جذب (cm^{-1})	پلیمر	پیوند شیمیایی تأیید شده
۳۲۰۰-۳۵۵۰	PVA	O-H پیوند داخلی هیدروژن
۳۰۰۰-۲۸۴۰	PVA	C-H از گروه آلکیل
۱۷۳۵-۱۷۵۰	PVA	C=O
۱۱۴۱	PVA	C-O
۱۰۸۵-۱۱۵۰	PVA	C-O-C
۱۴۱۷-۱۴۶۱	PVA	CH ₂
۱۱۶۰-۱۰۸۰-۱۱۰۶-۱۰۷۲	PES	C-C آلیفاتیک-خمشی هیدروژن آروماتیک
۱۱۵۲	PES	کشش متقارن SO ₂
۱۲۹۵-۱۳۲۳-۱۲۹۸	PES	کشش S=O و کشش نامتقارن C-SO ₂ -C
۱۴۸۶	PES	مشخصه پلیمر PES
۳۴۴۶	ژئولیت	کشش در پیوند O-H
۱۰۹۷	ژئولیت	کشش ارتعاشی Si(Al)-O
۵۷۰-۵۲۰	ژئولیت	ساختار حلقه‌ای شکل با ۵ عضو متصل T-O-T (Si و Al)

ژئولیت) تا حدودی افزایش یافته است که از لحاظ آماری دارای اختلاف معنی دار هستند (شکل ۷). با افزودن بیش از ۲۰٪ ژئولیت به نمونه‌های غشای کامپوزیتی نانوالیاف استحکام کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش، عدم توزیع مناسب ذرات ژئولیت (در غلظت wt ۳۰٪) در محلول پلیمر پلی وینیل الکل است که به کاهش قطر الیاف و نیز وجود دانه‌های زیاد در سطح نانوالیاف منجر می‌شود. تحلیل آماری نتایج نانوالیاف دارای ۲۰ wt ٪ و ۳۰٪ ذرات ژئولیت اختلاف معنی داری را در سطح $p < 0.001$ نشان می‌دهد. در نتیجه، با افزایش wt ۳۰٪ ژئولیت، دستیابی به توزیع یکنواخت در محلول پلیمری مناسب برای الکتروریسی و تولید نانوالیاف یکنواخت و بی‌دانه امکان‌پذیر نیست. مدول کشسانی نانوالیاف الکتروریسی شده همزمان دوجزئی دارای wt ۲۰٪ ژئولیت، پس از ایجاد اتصال عرضی گرمایی به‌طور معنادار افزایش یافت (شکل ۷). پلی وینیل الکل با وجود داشتن کاربردهای گسترده در زمینه‌های

بوده که از ویژگی‌های ژئولیت است. بر این اساس، این نوارها درجه بلورش و ترکیب ساختار را بازتاب می‌دهند [۳۷، ۴۰]. پیک‌های FTIR نانوالیاف الکتروریسی شده همزمان دوجزئی PES/PVA-ZSM همان‌طور که در جدول ۱ شرح داده شده، قابل مشاهده است. این نتایج، ترکیب موفق سه جزء را در نانوالیاف الکتروریسی شده همزمان دوجزئی تأیید می‌کنند.

۳-۳ بررسی خواص مکانیکی نانوالیاف

یکی از ویژگی‌های بسیار مهم در کاربردهای زیست‌پزشکی غشاهای نانوالیاف، پایداری مکانیکی آن‌هاست. در شکل ۷ و جدول ۲، خواص مکانیکی غشاهای نانوالیاف، استحکام کششی، مدول کشسانی و ازدیاد طول تا پارگی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، استحکام کششی نانوالیاف پلی اترسولفون با افزودن جزء دوم نانوالیاف (پلی وینیل الکل-)

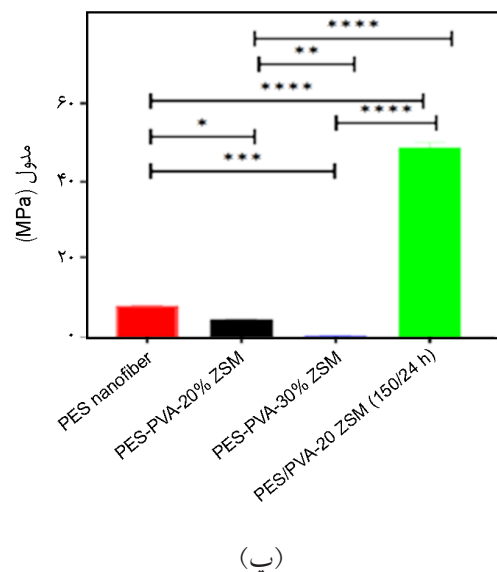
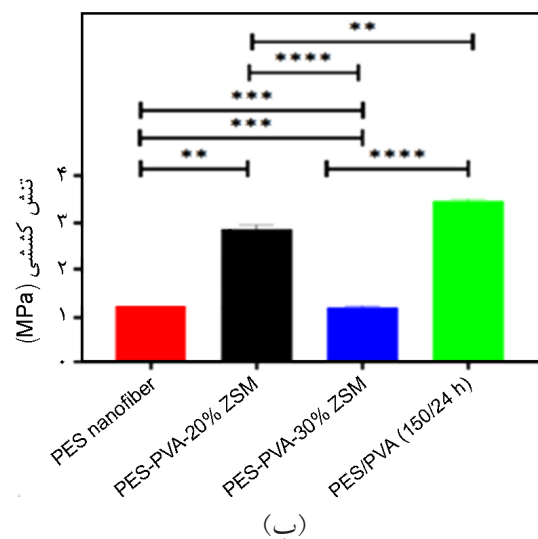
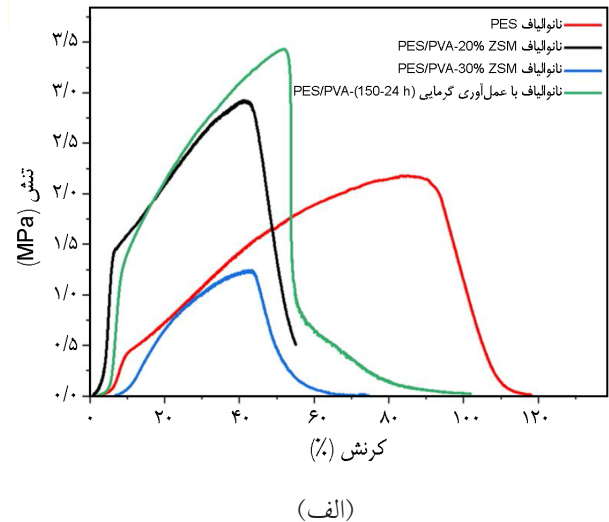
جدول ۲- تنش کششی، مدول کشسانی و کرنش کششی نانوالیاف.

نمونه نانوالیاف	تنش (MPa)	کرنش (%)	مدول کشسانی (MPa)
نانوالیاف PES	۲/۰۶	۸۲/۱۲	۸/۵
نانوالیاف PES/PVA-20% ZSM	۲/۸۷	۴۰/۰۲	۵
نانوالیاف PES/PVA-30% ZSM	۱/۲	۴۱/۵۴	۰/۸۷
نانوالیاف PES/PVA-20% ZSM با اتصال عرضی گرمایی	۳/۴۲	۵۰/۶۷	۴۸/۵

مهندسی بافت، زخم‌پوش‌ها و صنایع غذایی، از ناپایداری زیادی در آب برخوردار است. از این رو، این مسئله چالش اساسی برای کاربرد بالقوه آن در زمینه‌های مختلف به‌شمار می‌رود. بسیاری از پژوهشگران برای رفع این مشکل، در نانوالیاف الکتروریسی پلی‌وینیل الکل اتصال متقابل ایجاد کرده‌اند. اتصال عرضی با اتصال زنجیرهای پلیمری به یکدیگر، شبکه سه‌بعدی ایجاد می‌کند، بنابراین پایداری نانوالیاف و همچنین سایر خواص فیزیکی را افزایش می‌دهد. اتصال متقابل عرضی را می‌توان به دو دسته شیمیایی و فیزیکی تقسیم کرد [۱۶، ۴۱]. اتصال عرضی شیمیایی به‌وسیله شبکه‌های متقابل شیمیایی مانند گلو تار آلدهید، بیس‌اپوکسید، دی‌ایزوسیانات، متاکریلات و عوامل چندمنظوره انجام می‌شود که پیوندهای کووالانسی دائمی و برگشت‌ناپذیری را میان زنجیرهای پلیمرها ایجاد می‌کنند. اتصال عرضی فیزیکی ممکن است با یخ‌زدگی-آب‌شدگی (freeze-thawing)، خنک‌سازی با کشش بعدی، عمل‌آوری گرمایی و اصلاح با متانول انجام شود. متانول با اتصال پیوند هیدروژنی یا سایر نیروهای بین‌مولکولی، شبکه پلیمر را در کنار هم نگه می‌دارد و به اتصال متقابل شیمیایی ترجیح داده می‌شود. زیرا پیوند عرضی شیمیایی، پیوندهای کووالانسی را به‌وسیله عوامل شیمیایی ایجاد می‌کند که می‌تواند زیست‌سازگاری نانوالیاف را کاهش دهد [۱۶، ۴۱، ۴۲]. اتصال عرضی گرمایی در نانوالیاف حاوی پلی‌وینیل الکل، نشانگر افزایش درخور توجه استحکام کششی با توجه به تحلیل‌های آماری قابل مشاهده در شکل ۷ ب است. دمای انتخاب‌شده در این پژوهش، بیش از دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌وینیل الکل در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده با مطالعات انجام‌شده توسط صاحب و همکاران در سال ۲۰۱۴ مطابقت دارد [۴۲]. اتصالات عرضی نانوالیاف به‌وسیله عمل‌آوری گرمایی تأثیری بر شکل‌شناسی نانوالیاف ندارد و فقط کمی باعث تغییر رنگ نمونه‌های نانوالیاف از سفید به زرد می‌شود.

۳-۴ بررسی میزان درصد تورم و زاویه تماس

برای توصیف ترشوندگی و نفوذپذیری، زاویه تماس نانوالیاف پلی‌اتر سولفون، پلی‌وینیل الکل-ژئولیت، پلی‌اتر سولفون پلی‌وینیل الکل-ژئولیت اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل ۸ الف نشان داده شده است، زاویه تماس آب در نانوالیاف پلی‌اتر سولفون خالص ۱۲۵ °C است. نانوالیاف پلی‌اتر سولفون، سطح به‌شدت آب‌گریزی را نشان می‌دهد که به زبری زیاد سطح و هوای محبوس‌شده میان منافذ الیاف مربوط است [۴۳]. افزون بر این نتایج نشان داد، ترشوندگی با وجود پلی‌وینیل الکل به‌عنوان یک پلیمر به‌شدت

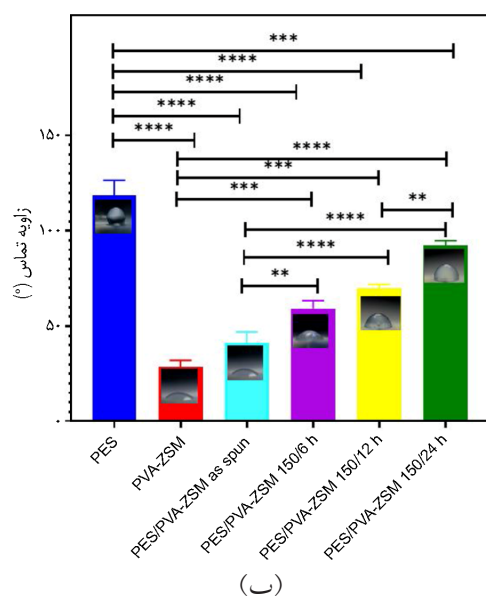
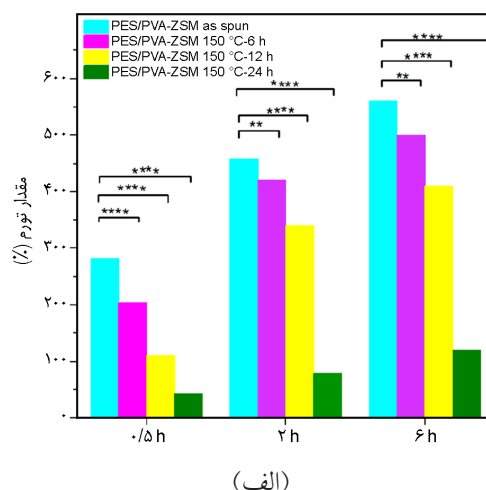


شکل ۷- (الف) منحنی تنش-کرنش غشاهای نانوالیاف و نمودارهای آماری، (ب) تنش کششی و (پ) مدول کشسانی نانوالیاف ($p < 0.001$ ، $p < 0.01$ ، $p < 0.05$).

گرفته‌اند، از لحاظ آماری ($p < 0.05$) معنی‌دار است. در نانوالیاف الکتروریسی‌شده هم‌زمان دوجزئی حاوی پلی‌وینیل الکل و ژئولیت، درصد پلیمر آب‌دوست افزایش یافته است که در نتیجه به قطره‌های آب اجازه نفوذ و عبور از میان نانوالیاف را می‌دهد. قابلیت انعطاف‌پذیری سطح نانوالیاف از جمله عواملی است که بر نفوذپذیری اثرگذار است.

Young نخستین نظریه را درباره ترشوندگی سطوح ارائه داد. همان‌طور که در این نظریه آمده است، آنچه در کنترل ترشوندگی مؤثر است، تنها منشأ شیمیایی دارد. با این حال، طبق نظریه Wenzel، افزون بر خواص شیمیایی سطح، زبری سطح مواد نیز بر خواص آب‌دوستی اثرگذار است. در نتیجه، زبری سطح می‌تواند شدت رفتار ترشوندگی را کنترل کند. به گفته Wenzel، در یک سطح آب‌گریز، افزایش زبری موجب افزایش زاویه تماس و افزایش سطح آب‌گریزتر می‌شود. همچنین در سطوح آب‌دوست، افزایش ناهمواری زاویه تماس را کاهش می‌دهد و سطح بیشتر آب‌دوست می‌شود [۳۷]. به‌طور کلی مطالعات نشان داده است، غشاهای نانوالیافی با آب‌دوستی متوسط، اثر ضدچسبندگی بهتری نسبت به غشاهای آب‌گریز یا بسیار آب‌دوست نشان می‌دهند. غشاهای آب‌دوستی متوسط برای چسبندگی سلولی و تکثیر آن نویدبخش‌تر هستند. افزون بر این، غشاهای بسیار آب‌دوست به‌آسانی به چربی‌ها می‌چسبند [۴۴]. بنابراین، غشای پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت با یک سطح با آب‌دوستی متوسط، می‌تواند غشای نانولیفی مناسبی برای چسبندگی سلولی، رشد و تکثیر در این مطالعه باشد.

شکل ۸ مقدار تورم نمونه‌های نانوالیاف را پس از غوطه‌وری در آب مقطر تا ۶ h نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است، نمونه نانوالیاف پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت تازه ریسیده‌شده هم‌زمان دوجزئی (PES/PVA-ZSM as spun) پس از ۰/۵ h مقدار تورم $28.3 \pm 0.5\%$ را نشان می‌دهند. در حالی که درصد تورم پس از ۰/۵ h نمونه‌های هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت که در دمای 150°C پیوند عرضی یافته‌اند (PES/PVA-ZSM 150°C)، در مقایسه با نمونه تازه ریسیده‌شده کمتر است. همچنین باید توجه داشت، درصد تورم با افزایش زمان پیوند گرمایی کاهش یافته است و نمونه الکتروریسی‌شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت (PES/PVA-ZSM 150°C -24 h) با تعادل ۶ h کمترین درصد تورم را نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل آماری نشان داد، تفاوت معناداری میان زمان ایجاد پیوند گرمایی و درصد تورم وجود دارد. در نمونه‌های نانولیفی، تخلخل، ویژگی‌های آب‌دوستی و سطح بر



شکل ۸- (الف) زاویه تماس و (ب) درصد تورم نمونه‌های نانوالیاف ($p < 0.001$, $****$; $p < 0.01$, $**$; $p < 0.05$, $*$).

آب‌دوست افزایش یافته است. شکل ۸ الف زاویه تماس نانوالیاف الکتروریسی هم‌زمان دوجزئی با ۲۰ wt % ژئولیت را نشان می‌دهد. تفاوت خواص آب‌دوستی میان غشاهای نانولیفی PES خالص و نانوالیاف الکتروریسی‌شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت از لحاظ آماری ($p < 0.05$) معنی‌دار است. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، زاویه تماس آب برای نانوالیاف پلی‌وینیل الکل-ژئولیت و پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت، به ترتیب ۲۷ و 46°C است. پس از عمل‌آوری گرمایی در دمای 150°C در بازه‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ h، زاویه تماس به ترتیب به ۶۰، ۷۲ و 90° افزایش یافت. تفاوت خواص آب‌دوستی بین غشاهای نانولیفی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت که تحت عمل‌آوری ایجاد اتصال عرضی گرمایی قرار

هم‌زمان دوجزئی، دو مرحله تجزیه در محدوده 250°C – 450°C و 500°C – 700°C وجود دارند که نشان می‌دهند، نانوالیاف پلی‌وینیل الکل در ابتدا تجزیه شده است. سپس، شیب دوم در محدوده 500°C تا 700°C نشانگر روند کاهش وزن پلی‌اترسولفون است. در مقایسه منحنی‌های نانوالیاف پلی‌وینیل الکل خالص و نانوالیاف الکترورسی شده هم‌زمان دوجزئی، دمای تجزیه پلی‌وینیل الکل در نانوالیاف الکترورسی شده هم‌زمان دوجزئی بیش از نانوالیاف خالص بود. این نتایج، اثر متقابل پلی‌وینیل الکل و پلی‌اترسولفون را نشان می‌دهند.

همچنین، ژئولیت پایداری گرمایی نانوالیاف الکترورسی شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت را افزایش داده است. همان‌طور که در نمودارها مشاهده شد، پایداری گرمایی نانوالیاف الکترورسی شده هم‌زمان دوجزئی در مقایسه با پلی‌وینیل الکل خالص با افزودن ژئولیت افزایش یافته است. بنابراین، مقدار باقی‌مانده از نانوالیاف پلی‌اترسولفون و پلی‌وینیل الکل در دمای 150°C ، که دمای مناسب برای ایجاد پیوند عرضی گرمایی پلی‌وینیل الکل است، به ترتیب حدود $98/38$ و $97/29$ است.

۳-۶ بررسی نتایج سمیت سلولی و کشت سلولی

نتایج آزمون MTT نمونه‌ها و ارزیابی چسبندگی سلولی سلول‌های فیبروبلاست L929 بر نانوالیاف الکترورسی شده هم‌زمان دوجزئی در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که در مطالعات پیشین گفته شد [۳۷]، درصد زنده‌مانی برای نانوالیاف پلی‌اترسولفون، $99/7\%$ بود که زیست‌سازگاری بسیار زیادی را نشان می‌دهد. درنتیجه، غشای نانوالیاف پلی‌اترسولفون غیرسمی است و سلول‌ها می‌توانند روی این بستر رشد کنند. در روش MTT، سلول‌های متابولیکی فعال با نمک تترازولیوم تحت واکنش برهم کنش کرده و یک رنگ فرمازان محلول تولید می‌کنند. شدت جذب نیز متناسب با تعداد سلول‌های زنده است [۴۵].

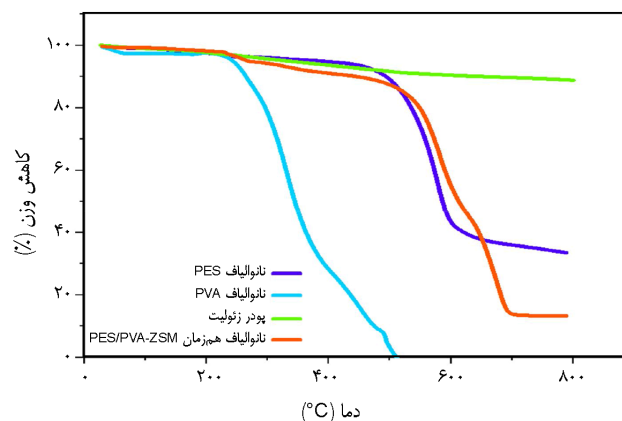
از سویی، سمیت سلولی نانوالیاف پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت به دلیل نگرانی از اثرهای منفی احتمالی ذرات ژئولیت بر سلامت انسان بررسی شد. به‌طور کلی، سمیت سلولی مواد سیلیکاتی پیچیده است و به گروه عاملی سطح، اندازه ذرات و درصد ژئولیت استفاده‌شده در غشای کامپوزیت نانوالیاف بستگی دارد [۴۶]. تصاویر میکروسکوپ نوری در شکل ۱۱ الف تا ت نشان می‌دهند، زنده‌مانی سلول‌های L929 پس از دوره نهفتگی ۲۴ h و ۴۸ h بر سطح نمونه‌های نانوالیاف در مقایسه با نمونه کنترل مناسب است. پس از ۲۴ h، زنده‌مانی سلول‌ها برای نمونه‌های نانوالیاف

جذب آب اثرگذار است که می‌توان ویژگی‌های آب‌دوستی سطح را با ایجاد پیوند عرضی کاهش داد.

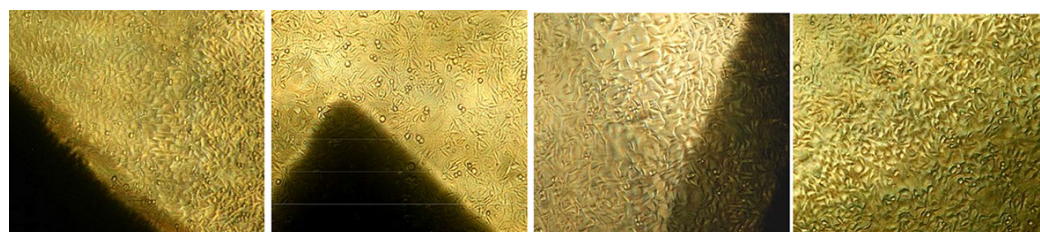
۳-۵ تجزیه گرماوزن سنجی

منحنی‌های گرماوزن‌سنجی نانوالیاف خالص پلی‌اترسولفون، پلی‌وینیل الکل، پودر ژئولیت و نانوالیاف الکترورسی شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت به‌دست‌آمده با سرعت گرمایش $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ در جو نیتروژن در شکل ۹ نشان داده شده است. پودر ژئولیت و نانوالیاف پلی‌اترسولفون، پلی‌وینیل الکل و نانوالیاف الکترورسی شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت معمولاً در دماهای مختلف تجزیه می‌شوند که ناشی از تفاوت ساختار شیمیایی آن‌هاست. کاهش وزن در دمای محیط تا 100°C می‌تواند به ازدست‌دادن حلال و رطوبت مربوط باشد. در این مرحله، کاهش وزن حدود 3% تا 10% بود که ممکن است به دلیل حلال باقی‌مانده در نانوالیاف باشد. با این حال، کاهش وزن مزبور خیلی شیب‌دار نیست که نشان می‌دهد، حلال باقی‌مانده در تمام نانوالیاف ساخته شده و نیز نانوالیاف پلی‌وینیل الکل خالص، کمتر از 2% بوده که مطلوب است. باقی‌مانده پودرهای ژئولیت، پلی‌اترسولفون، پلی‌وینیل الکل و نانوالیاف الکترورسی شده هم‌زمان دوجزئی در 100°C ، به ترتیب حدود $99/4$ ، 99 و 97 است.

در نانوالیاف پلی‌وینیل الکل، کاهش وزن از 250°C آغاز شده است. با توجه به شکل ۹ نانوالیاف پلی‌اترسولفون خالص از دمای 470°C ، شیب تجزیه شدید را نشان می‌دهد. مرحله کاهش وزن از 250°C تا 700°C با توجه به منحنی نانوالیاف الکترورسی شده



شکل ۹- نمودار گرماوزن‌سنجی نانوالیاف پلی‌اترسولفون و پلی‌وینیل الکل، پودر ژئولیت و نانوالیاف الکترورسی شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت.

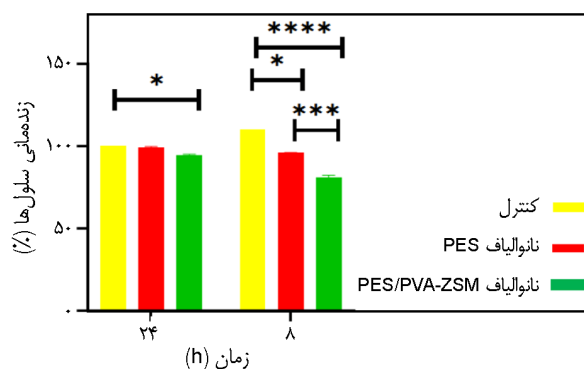


(ت)

(پ)

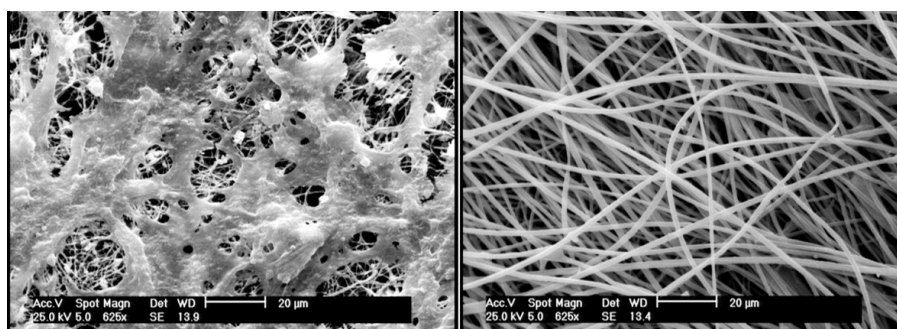
(ب)

(الف)



(h) زمان

(ث)



(ج)

(چ)

شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ها پس از آزمون MTT: (الف) نمونه کنترل، (ب) نانوالیاف پلی‌اترسولفون و نانوالیاف الکتروریسی‌شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت پس از ۲۴ h (پ) و ۴۸ h (ت)؛ (ث) مقایسه درصد زنده‌مانی نمونه‌های نانوالیاف و تصاویر SEM کشت سلول بر نمونه‌های: نانوالیاف (ج) پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل و (چ) الکتروریسی‌شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت پس از ۲۴ h.

سلول‌های سطح داربست است (شکل ۱۰). Banu و همکاران، پژوهشی را در سال ۲۰۱۲ بر مبنای نقش ژئولیت‌ها در جلوگیری از پوکی استخوان انجام دادند. در این پژوهش اشاره شد، ژئولیت‌ها از فعالیت استخوان‌کاه (osteoclast) جلوگیری می‌کنند که به تحلیل استخوان منجر می‌شود [۴۷]. به‌طور کلی، ساختار متخلخل ژئولیت‌ها قابلیت جذب سیالات زیادی را فراهم می‌کند. همچنین به دلیل بار سطحی منفی ژئولیت، قابلیت جلوگیری از خونریزی برای آن‌ها وجود دارد. در سال ۲۰۱۴، Ninan و همکاران پژوهشی درباره خاصیت زنده‌مانی سلول‌های فیبروبلاست بر داربست حاوی ژلاتین و ژئولیت انجام دادند. این

پلی‌اترسولفون و نانوالیاف الکتروریسی‌شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-ژئولیت به ترتیب به ۹۹/۷٪ و ۹۵/۵٪ و پس از ۴۸ h به ۹۳/۱۵٪ و ۸۳/۴۲٪ رسیده است.

شکل‌شناسی فیبروبلاست‌های L929 روی نانوالیاف، سلول‌های متصل به سطح نانوالیاف و سازگاری سلولی داربست‌ها را نشان می‌دهد. هنگامی که سلول‌ها با مواد در تماس قرار می‌گیرند، برای انطباق با سطح مواد سلولی دست‌خوش تغییرات شکل‌شناسی می‌شوند. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فیبروبلاست‌های L929 در داربست‌های نانوالیاف الکتروریسی‌شده هم‌زمان دوجزئی پس از ۲۴ h ساعت کشت، نشانگر گسترش خوب و محکم

شکل‌شناسی نانوالیاف حاکی از آن است، افزودن مقداری بیش از ۲۰٪ wt زئولیت به کاهش قابل مشاهده قطر و همچنین افزایش دانه در سطح نانوالیاف منجر می‌شود. غشاهای نانوالیاف الکتروریسی شده هم‌زمان دوجزئی حاوی زئولیت (۲۰٪ wt) پس از ایجاد اتصال عرضی گرمایی در دمای °C ۱۵۰ از استحکام کششی مناسبی در حدود ۳/۴۲ MPa و مدول کشسانی در حدود ۴۸/۵ MPa برخوردارند. بررسی آزمون گرماوزن‌سنجی نشان داد، زئولیت، محدوده پایداری گرمایی نانوالیاف الکتروریسی شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-زئولیت را افزایش داده است. بنابراین، مقدار باقی‌مانده از نانوالیاف پلی‌اترسولفون و پلی‌وینیل الکل در دمای °C ۱۵۰، که دمای مناسب برای ایجاد پیوند عرضی گرمایی پلی‌وینیل الکل است، به ترتیب حدود ۹۸/۳۸ و ۹۷/۲۷٪ است. نتایج آزمون MTT و کشت سلولی ۲۴ h سلول‌های فیبروبلاست L929 روی نانوالیاف پلی‌اترسولفون تنها و بارگذاری شده با ۲۰٪ wt زئولیت نشان داد، میزان زنده‌مانی سلول‌ها بسیار مناسب بوده است. همچنین، شکل‌شناسی سلول‌ها نشان می‌دهد، سلول‌ها پراکنش مناسبی را پس از گذشت ۲۴ h بر سطح نانوالیاف الکتروریسی شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-زئولیت دارند. بنابراین، براساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان تأیید کرد، نانوالیاف پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-زئولیت دارای کاربرد بالقوه در زمینه‌های زیست‌پزشکی هستند.

داربست، افزون بر زنده‌مانی زیاد سلول‌های فیبروبلاست و افزایش میزان اکسیژن‌رسانی به سلول‌ها، درصد مرگ باکتری‌های را نیز افزایش داد [۳۵، ۴۸].

همان‌طور که در شکل ۱۰ ج و چ مشاهده می‌شود، سلول‌هایی که به سطح نانوالیاف الکتروریسی هم‌زمان دوجزئی حاوی زئولیت چسبیده‌اند، در مقایسه با نانوالیاف پلی‌اترسولفون خالص دارای پراکنش مناسب هستند. نتایج نشان می‌دهد، داربست‌های نانوالیاف الکتروریسی شده هم‌زمان دوجزئی پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل-زئولیت ساخته‌شده در این مطالعه دارای زیست‌سازگاری عالی بوده و برای رشد سلول‌های فیبروبلاست L929 غیرسمی هستند.

۴ نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نانوالیاف پلی‌اترسولفون/پلی‌وینیل الکل بارگذاری شده با زئولیت با هدف کاربرد به‌عنوان غشای زیست‌سازگار با روش الکتروریسی هم‌زمان دوجزئی تهیه شد. بررسی شکل‌شناسی نانوالیاف الکتروریسی شده هم‌زمان دوجزئی حاصل نشان داد، میانگین قطر متوسط آن‌ها با افزودن زئولیت تا حدودی کاهش می‌یابد. این کاهش، به دلیل چگالی بار و رسانندگی الکتریکی بیشتر محلول با وجود ماده معدنی مزبور است. بررسی

مراجع

- [1] J. Pelipenko, P. Kocbek, B. Govedarica, R. Rošic, S. Baumgartner, and J. Kristl, "The topography of electrospun nanofibers and its impact on the growth and mobility of keratinocytes", *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, vol. 84, no. 2, pp. 401-411, 2013.
- [2] A. Barhoum, M. Bechelany Abdel, and S. Hamdy Makhoulouf, *Handbook of Nanofibers*, Springer, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53655-2>.
- [3] M. Yousefzadeh and F. Ghasemkhah, *Design of Porous, Core-Shell, and Hollow Nanofibers*, Handbook of Nanofibers, Springer, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42789-8_9-1.
- [4] E. Rynkowska, K. Fatyeyeva, S. Marais, J. Kujawa and W. Kujawski, "Chemically and thermally crosslinked PVA-based membranes: effect on swelling and transport behavior", *Polymers*, vol. 11, no. 11, pp. 1799, 2019.
- [5] T.A.W. Wijnarko, A. Kusumaatmaja, C. Roto, and K. Triyana, "Effect of heat treatment on morphology and crystallinity of electrospun poly(vinyl alcohol) nanofibers", *AIP Conf. Proc.*, vol. 1755, 2016. <https://doi.org/10.1063/1.4958583>.
- [6] E. Salimi, A. Ghaee, and A.F. Ismail, "Improving blood compatibility of polyethersulfone hollow fiber membranes via blending with sulfonated polyether ether ketone", *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 301, no. 9, pp. 1084-1095, 2016.
- [7] S. Khezli, M. Zandi, and J. Barzin, "Fabrication of electrospun nanocomposite polyethersulfone membrane for microfiltration", *Polym. Bull.*, vol. 73, no. 8, pp. 2265-2286, 2016.
- [8] M. Irfan and A. Idris, "Overview of PES biocompatible/hemodialysis membranes: PES-blood interactions and modification techniques", *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 56, pp. 574-592, 2015.
- [9] C. Cheng, S. Sun, and C. Zhao, "Progress in heparin

- and heparin-like/mimicking polymer-functionalized biomedical membranes", *J. Mater. Chem. B*, vol. 2, no. 44, pp. 7649-7672, 2014.
- [10] S. Nie, M. Tang, C. Cheng, Z. Yin, L. Wang, S. Sun, and C. Zhao, "Biologically inspired membrane design with a heparin-like interface: prolonged blood coagulation, inhibited complement activation, and bio-artificial liver related cell proliferation", *Biomater. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 98-109, 2014.
- [11] J. Barzin, S.S. Madaeni, H. Mirzadeh, and M. Mehrabzadeh, "Effect of polyvinylpyrrolidone on morphology and performance of hemodialysis membranes prepared from polyether sulfone", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 92, no. 6, pp. 3804-3813, 2004.
- [12] A.W. Jatoi, H. Ogasawara, I.S. Kim, and Q.Q. Ni, "Polyvinyl alcohol nanofiber based three phase wound dressings for sustained wound healing applications", *Mater. Lett.*, vol. 241, pp. 168-171, 2019.
- [13] S. Mirzaeei, S. Taghe, K. Asare-Addo, and A. Nokhodchi, "Polyvinyl alcohol/chitosan single-layered and polyvinyl alcohol/chitosan/eudragit RL100 multi-layered electrospun nanofibers as an ocular matrix for the controlled release of ofloxacin: an in vitro and in vivo evaluation", *AAPS Pharm. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 170, 2021.
- [14] Y.O. Kang, I.S. Yoon, S.Y. Lee, D.D. Kim, S.J. Lee, W.H. Park, and S.M. Hudson, "Chitosan-coated poly(vinyl alcohol) nanofibers for wound dressings", *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.*, vol. 92B, no. 2, pp. 568-576, 2010.
- [15] D. Nataraj, R. Reddy, and N. Reddy, "Crosslinking electrospun poly(vinyl) alcohol fibers with citric acid to impart aqueous stability for medical applications", *Eur. Polym. J.*, vol. 124, pp. 109484, 2020.
- [16] M. Mirafteb, A.N. Saifullah, and A. Çay, "Physical stabilisation of electrospun poly(vinyl alcohol) nanofibres: comparative study on methanol and heat-based crosslinking", *J. Mater. Sci.*, vol. 50, pp. 1943-1957, 2015.
- [17] K.K.H. Wong, M. Zinke-Allmang, and W. Wan, "Effect of annealing on aqueous stability and elastic modulus of electrospun poly(vinyl alcohol) fibers", *J. Mater. Sci.*, vol. 45, pp. 2456-2465, 2010.
- [18] M. Shokrollahi, S.H. Bahrami, M.H. Nazarpak, and A. Solouk, "Multilayer nanofibrous patch comprising chamomile loaded carboxyethyl chitosan/poly(vinyl alcohol) and polycaprolactone as a potential wound dressing", *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 147, pp. 547-559, 2020.
- [19] D. Panigrahi, S. Kumar, and A. Dhar, "Modulating chain conformations of polyvinyl alcohol through low cost and nontoxic glyoxal crosslinker: application in high performance organic transistors", *Org. Electron.*, vol. 65, pp. 193-200, 2019.
- [20] M. Krumova, D. López, R. Benavente, C. Mijangos, and J.M. Pereña, "Effect of crosslinking on the mechanical and thermal properties of poly(vinyl alcohol)", *Polymer*, vol. 41, pp. 9265-9272, 2000.
- [21] S. Wu, X. Chen, M. Yi, J. Ge, G. Yin, X. Li, "Improving the water resistance and mechanical properties of feather keratin/polyvinyl alcohol/tris(hydroxymethyl) aminomethane blend films by cross-linking with transglutaminase, CaCl₂, and Genipin", *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 11, pp. 2203, 2018.
- [22] J. Diani, Y. Liu, and K. Gall, "Finite strain 3D thermoviscoelastic constitutive model, for shape memory polymers", *Polym. Eng. Sci.*, vol. 46, no. 4, pp. 486-492, 2006.
- [23] M.M. Lakouraj, M. Tajbakhsh, and M. Mokhtary, "Synthesis and swelling characterization of cross-linked PVP/PVA hydrogels", *Iran. Polym. J.*, vol. 14, no. 12, pp. 1022-1030, 2005.
- [24] L. Lu, C. Samarasekera, and J.T.W. Yeow, "Creatinine adsorption capacity of electrospun polyacrylonitrile (PAN)-zeolite nanofiber membranes for potential artificial kidney applications", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 132, pp. 1-8, 2015.
- [25] K. Namekawa, M. Tokoro Schreiber, T. Aoyagi, and M. Ebara, "Fabrication of zeolite-polymer composite nanofibers for removal of uremic toxins from kidney failure patients", *Biomater. Sci.*, vol. 2, no. 5, pp. 674, 2014.
- [26] T.M. Lima, C.G.S. Lima, A.K. Rath, M.B. Gawande, J. Tucek, E.A. Urquieta-González, R. Zbořil, M.W. Paixão, and R.S. Varma, "Magnetic ZSM-5 zeolite: a selective catalyst for the valorization of furfuryl alcohol to γ -valerolactone, alkyl levulinates or levulinic acid", *Green Chem.*, vol. 18, no. 20, pp. 5586-5593, 2016.
- [27] J. Čejka, G. Centi, J. Perez-Pariente, and W.J. Roth, "Zeolite-based materials for novel catalytic applications: opportunities, perspectives and open problems", *Catal. Today*, vol. 179, no. 1, pp. 2-15, 2012.
- [28] *Zeolite Characterization and Catalysis: A Tutorial*, A. Chester and E. Derouane Eds., Springer, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9678-5>.
- [29] R. Akhamedov, M. Huysal, S. Isik, and M. Senel, "Preparation and characterization of novel chitosan/zeolite scaffolds for bone tissue engineering applications", *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.*, vol. 67, pp. 110-118, 2018.
- [30] Y. Li, H. Li, L. Xiao, L. Zhou, J. Shentu, X. Zhang, and J. Fan, "Hemostatic efficiency and wound healing properties of natural zeolite granules in a lethal rabbit model of complex groin injury", *Materials (Basel)*, vol. 5, no. 12, pp. 2586-2596, 2012.

- [31] G. Dong, H. Li, and V. Chen, "Challenges and opportunities for mixed-matrix membranes for gas separation", *J. Mater. Chem. A*, vol. 1, pp. 4610-4630, 2013.
- [32] S. Chakraborty, B. Wang, and P.K. Dutta, "Tolerance of polymer-zeolite composite membranes to mechanical strain", *J. Membr. Sci.*, vol. 518, pp. 192-202, 2016.
- [33] J.J.L. Lee, B.C. Ang, A. Andriyana, M.I. Shariful, and M.A. Amalina, "Fabrication of PMMA/zeolite nanofibrous membrane through electrospinning and its adsorption behavior", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 134, pp. 1-13, 2017.
- [34] S.F. Anis, A. Khalil, G.P. Singaravel, and R. Hashaikh, "Fabrication of micro and nano-zeolites fibers through electrospinning", International conference of International symposium on zeolite and Microporous crystals, Sapporo, Japan, 2015.
- [35] B. Mohammadkhani, H. Tabesh, B. Houshmand, and B. Mohammadkhani, "Investigation on novel applications of zeolites in advanced medical sciences", *Res. Med. (Persian)*, vol. 40, pp. 96-108, 2016.
- [36] A. Ghaee, M. Karimi, M. Lotfi-Sarvestani, B. Sadatnia, and V. Hoseinpour, "Preparation of hydrophilic polycaprolactone/modified ZIF-8 nanofibers as a wound dressing using hydrophilic surface modifying macromolecules", *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 103, pp. 109767, 2019.
- [37] F. Haghdoust, S.H. Bahrami, J. Barzin, and A. Ghaee, "Preparation and characterization of electrospun polyethersulfone/polyvinylpyrrolidone-zeolite core-shell composite nanofibers for creatinine adsorption", *Sep. Purif. Technol.*, vol. 257, pp. 117881, 2021.
- [38] H.S. Mansur, C.M. Sadahira, A.N. Souza, and A.A.P. Mansur, "FTIR spectroscopy characterization of poly(vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde", *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 28, pp. 539-548, 2008.
- [39] N.N. Bui, M.L. Lind, E.M.V. Hoek, J.R. McCutcheon, "Electrospun nanofiber supported thin film composite membranes for engineered osmosis", *J. Membr. Sci.*, vol. 385-386, pp. 10-19, 2011.
- [40] A.R. do Nascimento, G.P. de Figueredo, E.M.F. Silva, M.A.F. Melo, D.M.A. Melo, and M.J.B. De Souza, "Synthesis, optimization and characterization of zeolite beta (BEA): production of ZSM-5 and NaAlSiO₄ as secondary phases", *Rev. Virtual Quim.*, vol. 9, no. 4, pp. 1570-1582, 2017.
- [41] L. Yao, T.W. Haas, A. Guiseppi-Elie, G.L. Bowlin, D.G. Simpson, and G.E. Wnek, "Electrospinning and stabilization of fully hydrolyzed poly(vinyl alcohol) fibers", *Chem. Mater.*, vol. 15, pp. 1860-1864, 2003.
- [42] M. Es-Saheb and A. Elzatahry, "Post-heat treatment and mechanical assessment of polyvinyl alcohol nanofiber sheet fabricated by electrospinning technique", *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2014, 2014.
- [43] S. Khezli, M. Zandi, and J. Barzin, "Fabrication of electrospun nanocomposite polyethersulfone membrane for microfiltration", *Polym. Bull.*, vol. 73, pp. 2265-2286, 2016.
- [44] J. Li, J. Zhu, T. He, W. Li, Y. Zhao, Z. Chen, J. Zhang, H. Wan, and R. Li, "Prevention of intra-abdominal adhesion using electrospun PEG/PLGA nanofibrous membranes", *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 78, pp. 988-997, 2017.
- [45] S.S. Shahrabi, J. Barzin, and P. Shokrollahi, "Blood cell separation by novel PET/PVP blend electrospun membranes", *Polym. Test.*, vol. 66, pp. 94-104, 2018.
- [46] R. Takai, R. Kurimoto, Y. Nakagawa, Y. Kotsuchibashi, K. Namekawa, and M. Ebara, "Towards a rational design of zeolite-polymer composite nanofibers for efficient adsorption of creatinine", *J. Nanomater.*, vol. 2016, pp. 1-7, 2016.
- [47] J. Banu, E. Varela, J.M. Guerra, G. Halade, P.J. Williams, A.N. Bahadur, K. Hanaoka, and G. Fernandes, "Dietary coral calcium and zeolite protects bone in a mouse model for postmenopausal bone loss", *Nutr. Res.*, vol. 32, no. 12, pp. 965-975, 2012.
- [48] N. Ninan, M. Muthiah, N.A. Nur, I.K. Park, A. Elain, T.W. Wong, S. Thomas, and Y. Grohens, "Antibacterial and wound healing analysis of gelatin/zeolite scaffolds", *Colloids Surf. B Biointerfaces*, vol. 115, pp. 244-252, 2014.

Effect of Woven Fabric Structure on the Water Filtration Efficiency

Farideh Hajiani^{1*}, Hssan Salimi², Ali-Asghar Asgharian Jeddi², Hassan Rahimzadeh³,
and Hooshang Nosraty²

1. Department of Textile and Clothing Design, Faculty of Applied Arts, University of Art,
P.O. Box 655-11155, Tehran, Iran

2. Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box 15875-4413, Tehran, Iran

3. Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box 15875-4413,
Tehran, Iran

Received: 29 June 2021, Accepted: 13 October 2021

Abstract

Water, as a necessary liquid for life and an essential source of industries, must be used and recycled in a regular cycle. Water filtration is a special area that is being developed by relevant experts. In many areas of activity, the most critical goal is to increase the separation and filtration efficiency. The efficiency of an effective filtration system chiefly depends on the selection of a suitable porous filter. Woven fabrics are utilized as filters in liquid filtration. In this research, a water filtration unit was carefully designed and assembled to evaluate woven polyester fabric's filtration efficiency in a standard procedure. The particle size distribution in water was between 100-140 μm . The woven polyester fabrics, that were differed in weft density and weave, were produced by a projectile weaving machine. The samples were used as filters on both sides of the back and face of the fabric. After the separation process, the filtered water turbidity and the filtration efficiency for each sample were evaluated. Statistical analysis of the results showed that there was a significant difference in filtration efficiency when using low-density fabric samples on both sides of the back and face of the fabric. The water filtration efficiency when using the backside of the samples is higher than that when using the face side. In fabric filters with different weave structures and densities, it was detected that the filtration efficiency is not significantly the same. Finally, according to the ultimate performance of fabric filters in the filtration process, the samples were classified.

Keywords: filter, woven fabric, weft density, weave structure, filtration efficiency

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: f.hajiani@art.ac.ir

اثر ساختار پارچه تارپودی بر بازده صافش آب

فریده حاجیانی^{۱*}، حسن سلیمی^۲، علی اصغر اصغریان جدی^۳، حسن رحیمزاده^۴، هوشنگ نصرتی^۵

۱- تهران، دانشگاه هنر، دانشکده هنرهای کاربردی، صندوق پستی ۶۵۵-۱۱۱۵۵

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۳- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۴۰۰/۴/۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۲۱

چکیده

مشخص شد، بازده صافش تفاوت معناداری دارد. در نهایت، نمونه‌ها با توجه به عملکرد نهایی صافی‌های پارچه‌ای در فرایند صافش، طبقه‌بندی شدند.

واژه‌های کلیدی: صافی، پارچه تارپودی، تراکم پودی، طرح بافت، بازده صافش

۱ مقدمه

با توجه به گزارش‌های سازمان بهداشت جهانی، بیش از ۸۵۰ میلیون نفر به آب سالم دسترسی ندارند [۱]. آب آلوده سالانه در مرگ و میر حدود ۱۵ میلیون کودک نقش دارد. یونسکو تخمین زده است که در سال ۲۰۵۰، ۲ میلیارد تا ۷ میلیارد نفر با کمبود آب مواجه خواهند بود [۲]. بنابراین، آب به‌عنوان اصلی‌ترین مایع حیات و منبع مورد نیاز بسیاری از صنایع، باید در چرخه منظمی استفاده و بازیابی شود. نیاز و دغدغه تأمین آب در کشورهای کم‌آب و همچنین ابتلا به بیماری‌های گوناگون در کشورهایی که بهداشت و سلامت کافی آب شرب را ندارند، همگان را به توسعه روش‌های بهینه برای بازیابی آب تشویق می‌کند [۳، ۴]. جداسازی و صافش به‌عنوان بخش ویژه‌ای است که متخصصان آب و فاضلاب و

آب به‌عنوان مایع لازم برای زندگی و منبع ضروری برای صنایع باید در چرخه منظمی استفاده و بازیابی شود. صافش آب، بخش ویژه‌ای است که متخصصان در حال توسعه آن هستند. در بسیاری از زمینه‌های صافش، مهم‌ترین هدف افزایش مقدار جداسازی و کارایی آن است. کارایی سامانه صافش موفق تا حدود زیادی به انتخاب یک صافی متخلخل مناسب مربوط است. پارچه‌های تارپودی به‌عنوان صافی در صافش مایع کاربرد دارند. در این پژوهش، سامانه صافش آب برای بررسی بازده صافش صافی‌های پارچه‌ای در یک فرایند استاندارد، طراحی و ساخته شد. توزیع اندازه ذرات در آب، $100\ \mu\text{m}$ تا $140\ \mu\text{m}$ بود. نمونه‌های پارچه تارپودی از جنس پلی‌استر، با طرح‌های بافت و تراکم متفاوت به‌وسیله ماشین بافندگی پروژکتایل تولید و در هر دو سمت پشت و روی پارچه به‌عنوان صافی استفاده شدند. پس از فرایند جداسازی، کدورت آب صاف‌شده به‌عنوان بازده صافش برای هر نمونه ارزیابی شد. تحلیل آماری نتایج نشان داد، در بازده صافش هنگام استفاده از دو سمت رو و پشت نمونه‌های پارچه با تراکم‌های کم، تفاوت معناداری وجود دارد. بازده صافش آب هنگام استفاده از سمت پشت پارچه‌ها بیش از روی آن‌هاست. در صافی‌های پارچه‌ای با ساختار بافت و تراکم‌های پودی متفاوت

بازدهی ممکن از آن‌ها به دست آید.

جداسازی ذرات در صافی تحت تأثیر پنج عامل اصلی قرار می‌گیرد:

۱- اندازه محیط صافش: اندازه صافی برای جداسازی جریان و کانال‌های عبور را تعیین می‌کند.

۲- سرعت صافش: مساحت سطح در دسترس یک صافی، هنگام فرایند صافش و عبور سیال است. نسبت سرعت جریان سیال به واحد سطح صافی بیان‌کننده سرعت صافش است.

۳- قطر مؤثر ذرات یا توزیع ابعاد ذرات: قطر مؤثر ذرات و توزیع آن بر سازوکار جداسازی ذرات، مساحت سطح در دسترس و تخلخل اثرگذار است که مدت کارایی صافی را تعیین می‌کنند.

۴- سرعت جریان: نشانگر سرعت جریان سیال عبوری از صافی در مدت زمان صافش است و

۵- مقدار ذراتی که پشت صافی باقی می‌مانند.

با جداسازی ذرات جامد به وسیله صافی، مؤلفه‌های سطحی صافی کاهش می‌یابند و کانال‌های جریان سیال تغییر می‌کنند [۱۸]. در طراحی یک سامانه صافش ایده‌آل، خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات و سیال، سرعت جریان، تنش‌های پاک‌سازی و صافش، ساختار صافی، طراحی مسیرهای عبور، نسبت زمان کار به زمان تمیزکاری، نسبت جریان سیال به مساحت صافی، فضا و هزینه‌های لازم و روش پاک‌سازی اهمیت دارند [۱۹]. محیط صافش، قلب هر واحد صافش است و هرگونه تغییری در آن، به خروجی متفاوتی منجر می‌شود.

کارایی سامانه صافش موفق تا حدود زیادی به انتخاب محیط متخلخل مناسب بازمی‌گردد. انواع صافی‌ها برحسب فیزیک محیط شامل صافی‌های لیفی، غشاهای متخلخل، مواد مومین و بسترهای دانای (مانند شن) هستند [۱۵]. صافش با صافی‌های لیفی از روش‌های اصلی برای حذف ذرات در محدوده گسترده‌ای از ابعاد است. صافی‌های لیفی نسبتاً ارزان بوده و کار با آن‌ها بسیار ساده است، بنابراین پربازده‌ترین صافی‌ها برای جمع‌آوری ذرات به‌شمار می‌آیند [۲۰]. یکی از انواع صافی‌های لیفی، صافی پارچه‌ای و در میان آن‌ها صافی پارچه‌ای تارپودی است [۴،۹،۲۱،۲۲].

صافی‌های پارچه‌ای بخش اساسی از فرایندهای بی‌شمار صنعتی هستند که به خالص‌سازی مواد و صرفه‌جویی در هزینه‌های تولید، انرژی و ایجاد محیطی تمیز کمک می‌کنند. تا اوایل سال ۱۹۵۰، منسوجات استفاده‌شده در صافش براساس پارچه‌های بافته‌شده از پنبه، پشم و الیاف شیشه بود. با توجه به پیشرفت علم پلیمر و بهبود منسوجات فنی طی سال‌ها، پارچه‌های پلیمری نیز به‌عنوان غشا

محیط زیست در حال توسعه آن هستند. مهم‌ترین هدف در بسیاری از زمینه‌های صافش و جداسازی، ایجاد تعادل مناسب میان مقدار جداسازی آلاینده‌ها و بازده صافش است [۵،۶]. درواقع در یک صافی مناسب، باید به هر دو جنبه جداسازی بهتر آلاینده‌ها و سرعت جریان مناسب در صافش توجه شود. اگر صافی آلاینده‌ها را به‌خوبی جدا کند، اما سرعت جریان در آن به‌شدت کاهش یابد و گذردهی سیال کم باشد یا برعکس سرعت جریان در آن زیاد باشد، اما جداسازی مناسب انجام نگیرد، این صافی مناسب نیست. کار اصلی محیط صافی به حداکثر رساندن قابلیت جمع‌آوری و استخراج ذرات معلق است، به‌طوری که با حداقل مقدار افت انرژی جریان سیال نیز همراه باشد [۵]. در صافش غشایی، فرایند جداسازی فیزیکی مورد توجه است و بیشتر صنایعی که با فراوری مایعات سرو کار دارند، مانند صنایع پتروشیمی، تصفیه آب، الکل‌سازی، غذایی و آشامیدنی از غشا در فرایندهای صافش استفاده می‌کنند. غشا قابلیت حذف مواد ناخواسته از مایع مدنظر یا مایع ناخواسته از مواد مدنظر را دارد. چنین فناوری به‌طور گسترده در تصفیه آب و فاضلاب، فراوری مواد غذایی و جداسازی دارو استفاده می‌شود و هیچ تغییری در مواد جداشده به‌وجود نمی‌آید [۷،۸]. در صافش غشایی، نیرویی موجب عبور سیال از صافی می‌شود که کار صافش را انجام می‌دهد. این نیروها شامل اختلاف‌های فشار، پتانسیل شیمیایی و پتانسیل الکتریکی هستند [۹،۱۰]. غشاها معمولاً از پارچه‌های تهیه‌شده از الیاف [۹]، سرامیک [۱۱] و مواد پلیمری یا فلزی [۱۲] ساخته می‌شوند. همچنین می‌توان غشاها را برای بهبود عملکرد اصلاح کرد، به‌گونه‌ای که به‌عنوان مثال رسوب روی غشا کاهش یابد [۱۳] یا حذف آلاینده‌هایی خاص به‌وسیله غشا افزایش یابد [۱۴].

در حال حاضر، پژوهش‌ها در زمینه جداسازی و صافش به چند صورت انجام می‌شود. از روند مقالات بررسی‌شده، بخشی از این پژوهش‌ها را به حوزه مهندسی مواد و مهندسی شیمی و توسعه و ساخت محیط‌های صافی بهتر به‌عنوان قلب صافش، بخشی را به طراحی و ساخت سامانه‌های صافی‌های جدید و بخش دیگری را به بهینه‌سازی سامانه‌های صافش می‌توان نسبت داد [۴،۱۵،۱۶]. با توجه به اینکه آب هر منطقه از سراسر دنیا دارای کیفیت ویژه همان منطقه بوده، تنوع در محصولات صافش بسیار زیاد است. با توجه به پیشرفت‌های سال‌های اخیر، مهم‌ترین مسئله در بخش پژوهش، افزایش بازدهی سامانه‌های صافش است [۱۷]. از آنجا که محیط‌های صافش نمی‌توانند به تنهایی کیفیت مطلوب را ایجاد کنند، باید مجموعه‌ای از فرایندها در کنار هم قرار گیرند و بهینه‌ترین

استفاده شدند. به طور کلی، انواع مختلفی از پارچه های صافی وجود دارند که در دو گروه دسته بندی می شوند. گروه اول، پارچه های نبافته و گروه دوم پارچه های بافته شده هستند [۴،۲۳].

استفاده از صافی نبافته در فرایند صافش دارای مزایایی شامل هزینه کمتر، کاربرد گسترده، بهبود مقاومت در برابر گرما، بهبود جداسازی کیک، افت فشار کمتر با بازده ثابت است [۲۴]. از سوی دیگر، صافی پارچه ای تارپودی به دلیل برآورد آسان توزیع اندازه منافذ، ساخت آسان برای دستیابی به بازده مورد انتظار صافش و تمیزکردن راحت صافی اشباع شده، در مصارف مورد توجه است [۱۶]. یک صافی پارچه ای تارپودی می تواند با اندازه خاص ذرات مدنظر برای جداسازی و بازده لازم برای فرایند صافش سازگار شود. درواقع با استفاده از تغییر پارامترهای بافت و خواص نخ یک صافی پارچه ای، می توان به راحتی با صرفه جویی در هزینه، بهترین نتایج لازم و مناسب را برای صنایع مختلف به دست آورد [۴،۹]. به دلیل ساختار پیچیده و ضخامت منسوجات، به ویژه پارچه های تارپودی، این مواد برای صافش مناسب هستند [۲۵].

مقاومت یک صافی پارچه ای ممکن است با افزایش تاب و چگالی نخ ها و همچنین تراکم تار و پودی افزایش یابد. همچنین، هندسه پارچه و نفوذپذیری پارچه نیز در صافش نقش مهمی دارند [۲۶]. سه سازوکار اصلی صافش عبارت از جداسازی های سطحی، عمقی و کیک است [۲۷]. در جداسازی سطحی، ذرات بزرگتر از حفره ها هستند و به آسانی از عبور آنها جلوگیری می شود. ذرات کوچکتر از قطر حفره ها از محیط متخلخل عبور می کنند و جدا نمی شوند. این نوع جداسازی با لایه هایی مانند پارچه های توری، پارچه های تارپودی، غشاها و صفحه های مشبک انجام می شود که حفره های یکنواخت دارند [۲۷،۲۸]. عبور سیال از یک محیط متخلخل همراه با جداسازی سطحی، در بسیاری از فرایندها مطلوب است. چنین فرایندی در سوانگاری، تبادل یون و کاربردهای مختلف مهندسی از جمله مهندسی نفت (در جداسازی محلول های فعال سطحی و مسائل ذخیره سازی) استفاده می شود. همچنین از این فرایند، برای بازیابی و پاک سازی آب به منظور تهیه آب شرب و آبیاری و تبدیل آب شور به آب شیرین استفاده می شود. در برخی از دیگر کاربردها ذراتی که صاف می شوند، می توانند نمک های محلول، یون های فلزی، شکر، ذرات کلوئیدی، ویروس ها، دوده تنباکو، رنگدانه های رنگی، باکتری، غبار زغال، خون، آرد آسیاب شده و سایر موارد باشند [۲۹،۳۰].

صافی های پارچه ای تارپودی را می توان به سه گروه پارچه با نخ های تکرشته ای، چندرشته ای و الیاف کوتاه تقسیم کرد [۴].

جنس پارچه ای که باید برای فرایند صافش انتخاب شود، به خواص گرمایی و شیمیایی ماده صاف شونده بستگی دارد. الیاف طبیعی مانند پنبه، می تواند محیط بسیار کارآمدی برای صافش ایجاد کند، اما از نظر طول عمر برای استفاده در مقایسه با الیاف مصنوعی محدود است. خواص الیاف مصنوعی مانند استحکام، دوام، هزینه و غیره باعث می شوند که این الیاف به عنوان پرمصرف ترین مواد در فرایند صافش شناخته شوند [۲۲]. الیاف مصرفی در صافش شامل نایلون، پلی استر، پلی پروپیلن، آکرلیک، آرامید و پلی تترافلوئورواتیلن، شیشه و پلی فنیلن سولفید (PPS) هستند که پلی استر پرکاربردترین آنهاست (تقریباً ۷۰٪ کل مواد) [۴،۳۱،۳۲]. پلی استر به خاطر استحکام و مقاومت گرمایی زیاد (در 150°C) و قیمت کم، کاربرد بسیار زیادی در صافش سیالات دارد. عیب پلی استر در کاربردهای صافش، مقاومت اندک آن نسبت به بازها، اسیدها و محیط بخار است. پارچه های شکل دهنده در کاغذسازی برای استخراج آب و مواد شیمیایی از محلول آبکی، پارچه های تارپودی از نخ های چندرشته ای پلی استری هستند که درصدی از الیاف نایلون برای افزایش مقاومت سایشی در آنها استفاده می شود. پلی پروپیلن نیز به علت مقاومت زیاد در برابر اسیدها، بازها و سایش در صافی های صنعتی کاربرد فراوانی دارد. همچنین، ارزانی و قابلیت فراوری آسان، از عوامل مهم استفاده از این صافی هستند [۳۲].

در مطالعه ای، با به کاربردن صافی های پارچه ای در صافش آب نشان داده شده است، پارچه پلی استر قابلیت جداسازی بیش از ۹۹٪ ناخالصی های آب، شامل باکتری ها و مواد جامد در مراحل ابتدایی صافش با جریان پایدار را دارد. در حالی که با استفاده از صافی های پارچه ای از جنس پلی پروپیلن، بیش از ۷۰٪ ناخالصی ها، پس از گذشت زمان درخور توجهی جداسازی شده است [۴].

عمده ترین طرح های بافتی که برای پارچه های تارپودی در صافش استفاده می شود، شامل بافت های تافته، پاناما، سرژه و ساتین است [۴،۵]. پارچه های حلقوی تارپودی در صافش ذرات درشت استفاده می شوند [۳۳]. همچنین در پژوهشی، از پارچه های سه بعدی در فرایند صافش آب استفاده شده است [۳۴]. در عمده پژوهش های یاد شده که از پارچه تارپودی به عنوان صافی استفاده شده است، به بررسی اثر ساختار این پارچه ها بر افزایش بازده و کیفیت آب در فرایند صافش توجه نشده و معمولاً یک یا دو نمونه پارچه با مشخصات و طرح بافت مشخص آزمایش شده است [۴،۵،۲۱،۲۲]. همچنین تاکنون در مطالعات انجام شده، اثر استفاده پارچه از دو سمت (رو و پشت) بررسی نشده است.

در این پژوهش، با هدف بررسی اثر ساختار پارچه تارپودی

نمونه‌های بافت اضافه شدند. در تمام پارچه‌ها، نخ تار و پود استفاده شده یکسان بود. هر دو نخ تار و پود، نخ‌های چندرشته‌ای ۷۵ فیلامنتی و تکسچره شده با ظرافت ۱۵۰ den هستند. در جدول ۱، ساختار بافت پارچه‌های مختلف و تصویر آن‌ها با تراکم پودی ۲۰ برای مقایسه نشان داده شده است. سمت رو و پشت بافت‌های سرژه، ساتین و ریب در جدول ۲ آمده است.

ضخامت نمونه‌های پارچه براساس استاندارد ASTM D 1777-96 (2007) به وسیله دستگاه Shirley با دقت دو رقم اندازه‌گیری شد [۳۵]. روش انجام آزمون بدین ترتیب است که پارچه روی سطح صاف دستگاه قرار می‌گیرد، سپس به وسیله صفحه فشارنده طبق استاندارد یادشده، فشاری برابر با 1 ± 0.1 kPa به آن وارد و ضخامت پارچه پس از 30 ± 5 s اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری برای هر نمونه، در ۱۰ نقطه از منسوج انجام شد و میانگین نتایج به دست آمد. همچنین پیش از صافش، نمونه‌ها وزن شدند و میانگین وزن سطحی هر پارچه به دست آمد. با استفاده از معادله (۱) چگالی جرمی نمونه نیز محاسبه شد [۳۶]:

$$\rho = \frac{M}{d} \quad (1)$$

در این معادله، ρ چگالی جرمی برحسب g/cm^3 ، M وزن نمونه برحسب g/cm^2 و d ضخامت نمونه برحسب cm است.

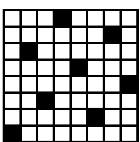
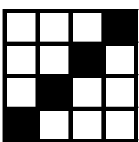
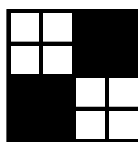
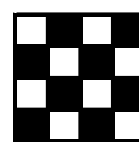
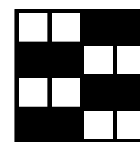
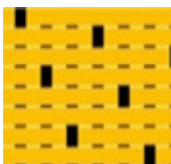
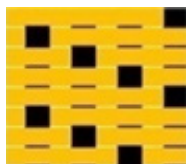
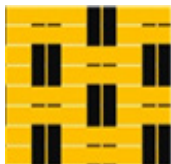
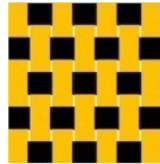
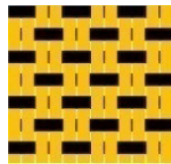
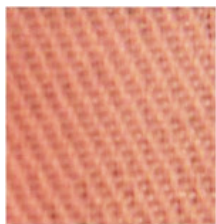
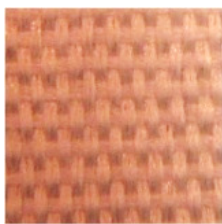
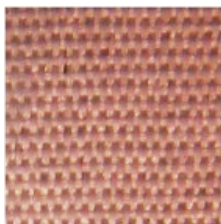
بر بازده صافش آب نمونه‌هایی از پارچه‌های تارپودی از جنس پلی‌استر با تراکم‌های پودی متفاوت و طرح‌های بافت مختلف در دو سمت پشت و رو در یک سامانه صافش آب آزمایش شده‌اند. یک سامانه صافش برای بررسی بازده صافش نمونه‌های پارچه در فرایندی استاندارد، طراحی و ساخته شده است. کیفیت آب و مقدار کدورت آن، نتایج افت فشار، سرعت جریان خروجی و مقدار گذردهی آب نمونه‌های صافی پارچه‌ای در مدت زمان صافش ارزیابی شده است. در نهایت نمونه‌های پارچه، براساس عملکرد و بازده صافش طبقه‌بندی شده‌اند.

۲ تجربی

۱-۲ بافت و مشخصات پارچه صافی

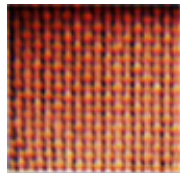
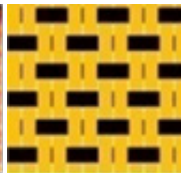
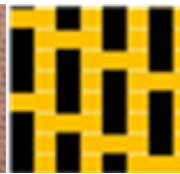
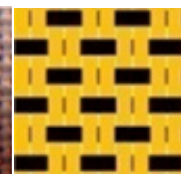
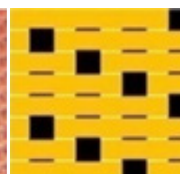
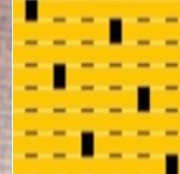
پارچه‌های تارپودی از نخ پلی‌استر، با ماشین بافندگی پروژکتایل P7300 تولید شدند. نمونه‌ها در سه نوع تراکم پودی (اسمی) مختلف ۲۰، ۲۳ و ۲۶ cm بافته شدند. تراکم تار برای تمام پارچه‌ها ثابت و به اندازه ۴۸ warps/cm بود. همچنین، طرح‌های بافت مختلف تافته، سرژه و پاناما برای صافی‌های پارچه‌ای در سه تراکم پودی مدنظر بافته شدند. دو نمونه بافت ساتین و ریب در تراکم پودی ۲۰ برای مقایسه تفاوت پشت و روی پارچه در عملکرد صافش به

جدول ۱- طرح و تصاویر پارچه‌ها در تراکم ۲۰ پودی.

				
ساتین ۸*	سرژه ۱/۳	پاناما	تافته	ریب
				
				

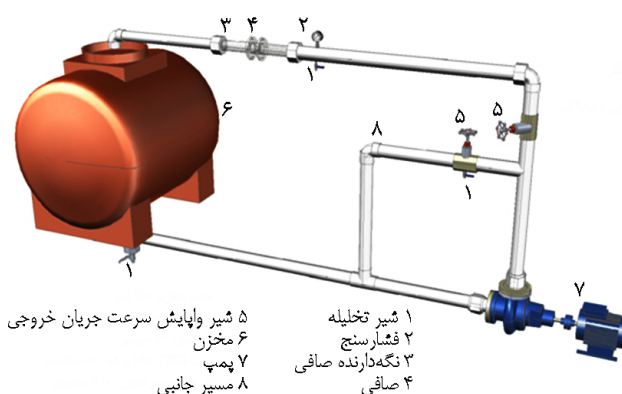
* بافت ساتین ۸، ساتین با یک نخ تار شناور بوده که از زیر ۷ پود عبور کرده است.

جدول ۲- سمت رو و پشت درباره سه پارچه ساتین، سرژ و ریب.

					
ریب پشت پارچه		سرژ ۱/۳ پشت پارچه		ساتین ۸ پشت پارچه	
					
ریب روی پارچه		سرژ ۱/۳ روی پارچه		ساتین ۸ روی پارچه	

۲-۲ طراحی و نصب دستگاه صافش

در طراحی و نصب دستگاه صافش مدنظر برای آزمون صافی‌ها (شکل ۱)، اندازه‌گیری مقدار جداسازی ذرات، افت فشار صافی و سرعت جریان خروجی از صافی، سهولت در تعویض نمونه، امکان تغییر مسیر و باز و بسته‌کردن جریان، رؤیت منطقه صافش و استقرار انواع صافی و اعمال شرایط مکانیکی همچون کشش یکسان به پارچه‌ها و دقت مناسب اندازه‌گیری مدنظر قرار گرفته است [۳۳،۳۷]. در این پژوهش، از روش استاندارد ASTM F 795-88 (1993) برای تعیین کارایی یک محیط صافش با استفاده از آزمایش تک‌مرحله‌ای با عبور مایع با سرعت ثابت، استفاده شد [۳۸]. در ساخت دستگاه صافی مدنظر برای آزمایش صافی‌ها، اندازه‌گیری مقدار جداسازی ذرات، افت فشار صافی و سرعت جریان خروجی



شکل ۱- دستگاه صافش (حجم مخزن ۱۵۰ L، قطر داخلی لوله مسیر اصلی ۴۰ mm، قطر صافی ۴۰ mm، دور پمپ ۱۴۵۰ rpm، ارتفاع مایع بالاسری ۸۰۰ cm و کل طول مسیر اصلی ۷۱۰ cm است).

از صافی، آسانی در تعویض نمونه، امکان تغییر مسیر و باز و بسته‌کردن جریان، امکان رؤیت منطقه صافش و استقرار انواع صافی، اعمال شرایط مکانیکی همچون کشش یکسان به پارچه‌ها و دقت مناسب اندازه‌گیری مدنظر قرار گرفته است.

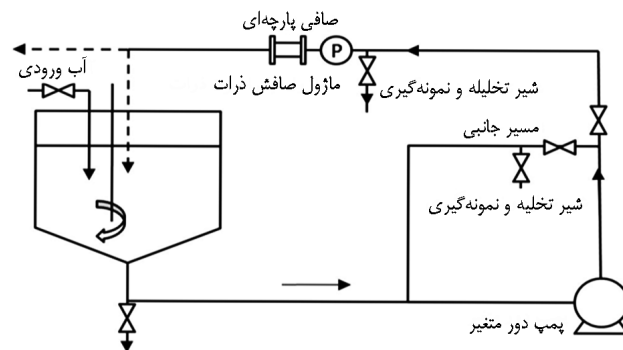
تجهیزات و ملزومات اصلی طبق استاندارد به شرح زیر است: اجزای دستگاه شامل محفظه، پمپ، محیط صافی و قالب آن، جریان‌سنج، خنک‌کن، فشارسنج، مسیر جانبی و همزن است. محلول ذرات دارای غلظت ثابت و خواص مشخصی است. همچنین، قالب صافی نباید موجب تغییر در نوع جریان و سد کردن ذرات و ته‌نشینی آن‌ها پیش از رسیدن به صافی شود. خواص مایع و ذرات و ترکیب آن‌ها باید مشخص باشد. از مهم‌ترین اجزای آزمون، مایع استفاده شده است. در این پژوهش، یک فرایند صافش معمول در تصفیه آب یا فرایندهای پیش تصفیه آب در نظر گرفته می‌شود که می‌توان ذرات مختلف معدنی یا ذرات ریز شنی با ابعاد بیش از $100\ \mu\text{m}$ را تصفیه کرد. بنابراین، ابعاد ذرات در محدوده $100\ \mu\text{m}$ تا $140\ \mu\text{m}$ انتخاب شد. برای یک صافی ثابت، تغییر مایع و ابعاد ذرات درون آن می‌تواند نتایج را کاملاً تغییر دهد [۳۷]. تغییرات دما و pH آب نیز می‌توانند بر تغییر نتایج اثرگذار باشند. طراحی دستگاه صافش مستلزم توجه به پارامترهای اثرگذار بر نتایج است. مهم‌ترین مؤلفه، ایجاد جریان ورقه‌ای در جریان عبوری است. جریان به کمک یک پمپ آب با دور ۱۴۵۰ rpm/min ایجاد می‌شود. محفظه به کاررفته در صافش باید از ظرفیت کافی برای انتقال آب در کل مسیر جریان برخوردار باشد. ورود سیال از صافی به محفظه از بالا و خروج سیال از قسمت زیرین محفظه است. در بخش زیرین محفظه، شیری برای تخلیه و تعویض آب تعبیه می‌شود. برای ایجاد

شرب، درون زمین، سطحی و شور و ضایعاتی استفاده می‌شود. این روش براساس مقایسه شدت‌های نور پخش‌شده از نمونه در شرایط تعریف‌شده و پخش‌شده از محلول استاندارد است. هرچه شدت نور پخش‌شده بیشتر باشد، کدورت بیشتر است. وقتی زاویه اندازه‌گیری تابش بازگشتی از نمونه، نسبت به نور ورودی 90° باشد، واحد ابرناکی کدورت (nephelometric turbidity unit, NTU) استفاده می‌شود. در این پژوهش، کدورت به‌عنوان یکی از ویژگی‌های کیفی آب براساس استاندارد ASTM D 1889-00 بررسی شد [۳۹]. در ابتدا مایع با غلظت 3 g/L از ذرات (کدورت 125 NTU) در محفظه وارد شد. در نمونه‌گیری‌های انجام‌گرفته از آب محتوی ذرات درون محفظه، اختلاف میان کدورت آب در زمان‌های مختلف بیش از 6% نبود. مقدار کدورت آب در محل قرارگیری صافی به‌دلیل نشست ذرات ثابت، ولی متفاوت با مقدار درون محفظه بود. ته‌نشینی ذرات در مسیر 6 m تا پیش از صافی باعث کاهش حدود 40% از مقدار کدورت شد. حین آزمون هر صافی، نمونه‌هایی از مایع پیش و پس از صافی تهیه و کیفیت آب ورودی و خروجی اندازه‌گیری شد. نمونه آب در شیشه شست‌وشویافته با آب مقطر قرار گرفت و با دستگاه کدورت‌سنج مدل HACH TL23 (NTU 0-4000) آزمایش شد. در انجام آزمون‌ها، کدورت آب در محل، پیش از صافی برابر 77 NTU و با تغییرات از میانگین کمتر از 1% مشاهده شد.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ بررسی ضخامت صافی‌های پارچه‌ای

میانگین مقادیر ضخامت نمونه‌ها با بافت‌های مختلف تافته، پاناما و سرژه $1/3$ در تراکم‌های مختلف و بافت‌های ساتین ۸ و ریب در تراکم ۲۰ در جدول ۴ نشان داده شده است. در این پژوهش با



شکل ۲- نمایی از دستگاه صافش و نمودار جریان.

تعلیق یکنواخت ذرات وجود همزن الزامی است. بدین منظور، از پمپ کوچکی استفاده شده تا با چرخش جریان درون محفظه، وظیفه همزن را انجام دهد. نمایی از دستگاه صافش و نمودار جریان در شکل ۲ نشان داده شده است. در این پژوهش، مخلوطی از مایع و ذرات به محیط صافی تغذیه شد. هنگام خروج مایع صاف‌شده از صافی، افت فشار مشخصی ایجاد شد. در طول آزمون، تغییرات افت فشار در صافی ثبت شد. زمانی که افت فشار به حد بیشینه‌ای رسید و دیگر افزایش نیافت، آزمون متوقف شد. حین آزمون، نمونه‌هایی از مایع پیش و پس از صافی تهیه و کیفیت آب ورودی و خروجی با هم مقایسه شدند. درنهایت، میانگین کدورت آب به‌عنوان سنجش بازده صافش به‌دست آمد. گذردهی صافی براساس سرعت جریان و افت فشار نیز تعیین شد. طبق استاندارد ASTM F 795-88 (1993) به نسبت $Q/\Delta P$ گذردهی سیال اطلاق می‌شود. Q سرعت حجمی و ΔP افت فشار ناشی از صافی است [۳۸]. جدول ۳ شرایط انجام آزمون‌های نمونه‌های صافی را با دستگاه نشان می‌دهد.

۳-۲ آزمون کدورت‌سنجی

آزمون کدورت‌سنجی برای تعیین کدورت انواع آب‌ها شامل آب‌های

جدول ۳- شرایط آزمون صافش.

شرایط آزمون	دمای 25°C و رطوبت نسبی 40%
تعداد نمونه‌ها و نوع صافی	۱۱۰ نمونه شامل ۲۲ گروه ۵تایی، پارچه تارپودی پلی‌استر خالص در دو سمت پشت و رو، ۶ بافت پاناما، ۶ بافت تافته، ۶ بافت سرژه $1/3$ در تراکم‌های پودی ۲۰، ۲۳، ۲۶ و ۲ بافت ریب، ۲ بافت ساتین در تراکم پودی ۲۰
نوع مایع، دما، گرانیوی و چگالی	آب شرب شهری، 20°C ، 10151 Pa.s ، 1 g/cm^3
نوع و ابعاد انتخابی ذرات و غلظت ذرات در آب	ذرات ریز معدنی با ابعاد $100 \text{ }\mu\text{m}$ تا $140 \text{ }\mu\text{m}$ و $3\% \pm 0.2\%$

جدول ۴- ضخامت نمونه‌های پارچه در تراکم‌های پودی متفاوت.

میانگین ضخامت (mm) (انحراف معیار)			
تراکم پودی ۲۰	تراکم پودی ۲۳	تراکم پودی ۲۶	طرح بافت
۰/۱۷ (۰/۰۱)	۰/۱۶ (۰/۰۱)	۰/۱۹ (۰/۰۱)	تافته
۰/۲۳ (۰/۰۱)	۰/۲۱ (۰/۰۱)	۰/۲۳ (۰/۰۱)	پاناما
۰/۲۴ (۰/۰۲)	۰/۲۴ (۰/۰۱)	۰/۲۳ (۰/۰۲)	سرژه ۱/۳
-	-	۰/۱۶ (۰/۰۱)	ریب
-	-	۰/۲۷ (۰/۰۲)	ساتین ۸

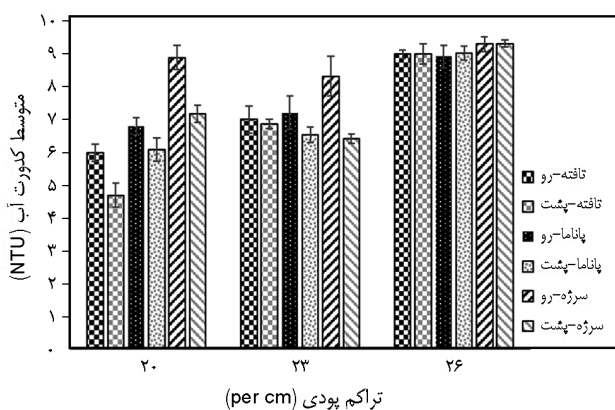
۲-۳ بررسی مقدار کدورت آب

شکل ۳ میانگین مقادیر کدورت آب را پس از صافش با استفاده از صافی‌های پارچه‌ای تارپودی در دو سمت پشت و رو، نشان می‌دهد. بررسی آماری نتایج نشان می‌دهد، با افزایش تراکم در هر سه بافت با طرح‌های تافته، پاناما و سرژه مقدار کدورت آب به‌طور معنادار افزایش یافته است. همچنین در تراکم‌های ۲۰ و ۲۳، مقادیر کدورت آب با تغییر طرح بافت به‌طور معنادار تفاوت کرده است. اما در بیشترین تراکم (۲۶) تفاوت معناداری از لحاظ آماری میان کدورت آب در طرح‌های مختلف بافت وجود ندارد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در کمترین تراکم پودی (۲۰)، صافی با بافت تافته در هر دو سمت پشت و رو نسبت به دو طرح دیگر مقادیر کدورت آب کمتری را نشان داده است. در تراکم ۲۳ نیز همین روند در سمت روی نمونه‌ها دیده می‌شود، در حالی که در سمت پشت پارچه‌ها در این تراکم صافی با بافت سرژه کمترین مقدار کدورت آب را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند، تغییر تراکم و

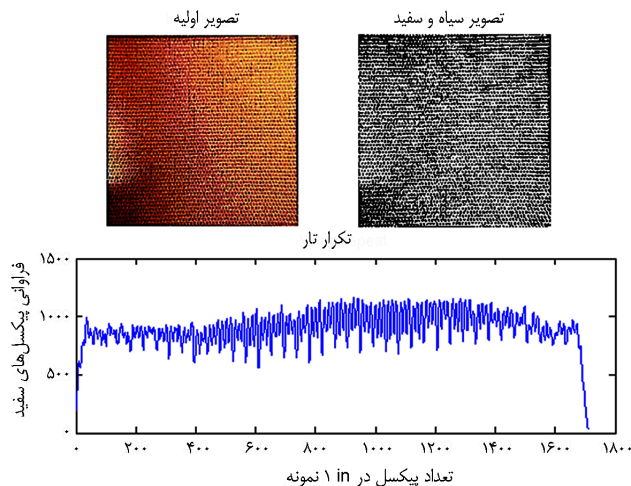
استفاده از نرم‌افزار SPSS و آزمون‌های آماری و تحلیل واریانس، میانگین نتایج در سطح اطمینان ۹۵٪ بررسی شد. مشاهده شد، با تغییر تراکم پودی، تغییرات ضخامت در هر سه نمونه بافت در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار نبوده است. اما دیده می‌شود، در تراکم ثابت تارپودی و پودی، با تغییر طرح بافت ضخامت نمونه‌ها به‌طور معنادار از لحاظ آماری تغییر کرده است. ضخامت پارچه‌های تارپودی با توجه به نوسان زیاد و کم تارها در طرح‌های مختلف، متفاوت است. یکی از ملاک‌های مورد نیاز برای انتخاب صافی با عملکرد مناسب صافش، ضخامت کم نمونه صافی است. با توجه به معادله دارسی برای توضیح انتقال مایع در پارچه، زمانی که جریان مایع تنها در یک جهت عمود بر سطح محیط متخلخل (یک لایه پارچه) فرض شود، رابطه دارسی به‌صورت معادله زیر نوشته می‌شود:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{k \Delta P}{\mu L} \quad V(m/s) \quad (2)$$

که در آن، V سرعت مایع (ms^{-1})، Q سرعت جریان مایع (m^3s^{-1})، A سطح مقطع (m^2)، k ضریب تراوایی یا نفوذپذیری (m^2)، μ گرانیوی مایع ($Pa.s$)، ΔP افت فشار یا نیروی پیشران (Pa) برای حرکت مایع و L طول لوله یا فاصله طی شده به‌وسیله مایع (m) است. در این حالت، منافذ پارچه به‌صورت لوله‌های موئین با طول L در راستای ضخامت پارچه فرض شده است. با توجه به معادله دارسی سرعت جریان Q با ضخامت پارچه ارتباط عکس دارد [۲۷، ۳۰]. در پژوهش Mncube [۴]، پارچه تارپودی با نخ پلی‌استر و بافت تافته با کمترین ضخامت در میان نمونه‌های مختلف صافی‌های پارچه‌ای تارپودی، بهترین عملکرد صافش را نشان داده است.



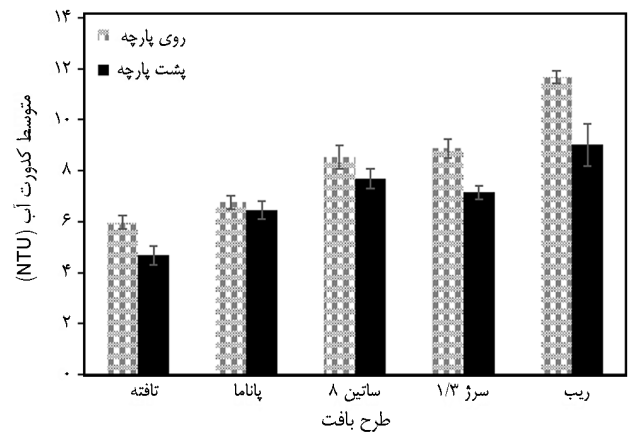
شکل ۳- میانگین مقادیر کدورت آب با استفاده از پارچه‌های تارپودی در دو سمت پشت و رو.



شکل ۵- تحلیل سطحی بافت تافته (با تراکم تار ۴۸ و تراکم پودی ۲۰) در جهت تار برای نمونه ۱ in.

روی نخ‌های تار در تراکم‌های کمتر در سمت روی پارچه بیشتر نمایان بوده و تا حدودی باعث تغییر ساختار نخ و فضای باز سطح شده است که در تصاویر بافت به‌خوبی رؤیت نمی‌شود.

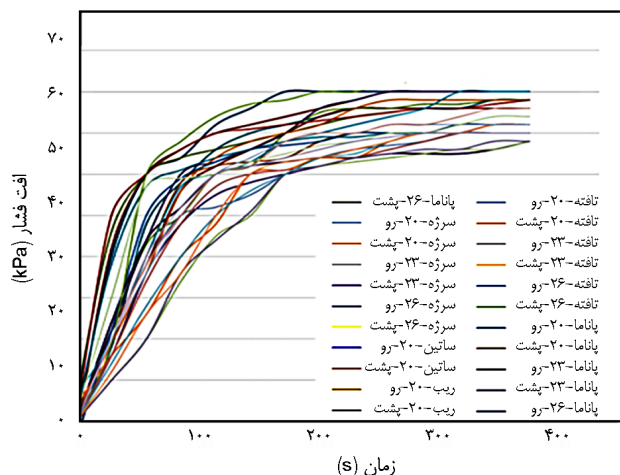
برای بررسی این موضوع، تحلیل تصاویر پارچه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Matlab R2007b انجام شد. به‌عنوان نمونه، نتایج تحلیل تصویر پارچه تافته با تراکم تار ۴۸ و تراکم پودی ۲۰ در شکل ۵ نشان داده شده است. نمودار رسم‌شده جمع مقادیر پیکسل‌های سفید است که در تصویر سیاه و سفید با مقدار یک پر شده‌اند. تعداد تکرارها در ۱ in پارچه در نظر گرفته شده است. نمودار برای تکرار تارها در ۱ in پارچه نشان می‌دهد، دو نوع پیک در نمودار مشاهده می‌شود. پیک کوچک، نشانگر تکرار نخ تار و پیک بزرگ، نمایانگر اثر شانه است که در تصویر بافت به‌خوبی رؤیت نمی‌شود. با توجه به شکل ۴، مشاهده می‌شود که با تغییر طرح و نوع بافت نمونه‌های صافی در تراکم پودی و تار یکسان، مقدار کدورت آب تغییر کرده است. با تغییر طرح بافت، بدیهی است که شکل و اندازه فضاهای باز هر ساختار تغییر کند. با در نظر گرفتن تغییرات چگالی جرمی پارچه‌ها (شکل ۶) می‌توان این تفاوت را توجیه کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارچه ریب چگالی جرمی کمتری را نسبت به سایر نمونه‌ها داراست و پارچه تافته بیشترین چگالی جرمی را در بین نمونه‌ها دارد. افزایش چگالی جرمی یک صافی پارچه‌ای با مساحت ثابت، نشان‌گر کم‌شدن فضای خالی و تخلخل نمونه بوده و در نتیجه عملکرد صافش ذرات مناسب‌تر است و کدورت آب کمتری مشاهده می‌شود. در پژوهش‌های گذشته [۴] در مقایسه بین دو پارچه تار پودی از جنس پلی‌استر با طرح بافت‌های سرژه و تافته، نتایج مشابهی به‌دست آمده و صافی



شکل ۴- میانگین مقادیر کدورت آب با استفاده از پارچه‌های تار و پودی با طرح‌های متفاوت در سمت پشت و رو.

طرح بافت، از عوامل اثرگذار بر فضاهای پر و خالی و تعیین قطر هیدرولیک بهینه هستند. با افزایش تراکم پودی پارچه‌ها، روزه‌های باز یا کانال‌های عبور تنگ‌تر شده و عدم پیوستگی مسیر عبور سیال بیشتر و سرعت جریان کمتری برای تراکم‌های بیشتر حاصل می‌شود. کیفیت آب با افزایش تراکم کمتر شده و افت فشار افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود، در تراکم‌های کمتر از ۲۰ و ۲۳ بین مقادیر کدورت آب زمان استفاده از دو سمت رو و پشت پارچه در هر ۳ نمونه بافت تفاوت معنادار وجود دارد. در حالی که پشت و روی نمونه‌ها در تراکم پیش از ۲۶ تقریباً رفتار یکسانی را در ارتباط با مقدار کدورت آب نشان داده‌اند.

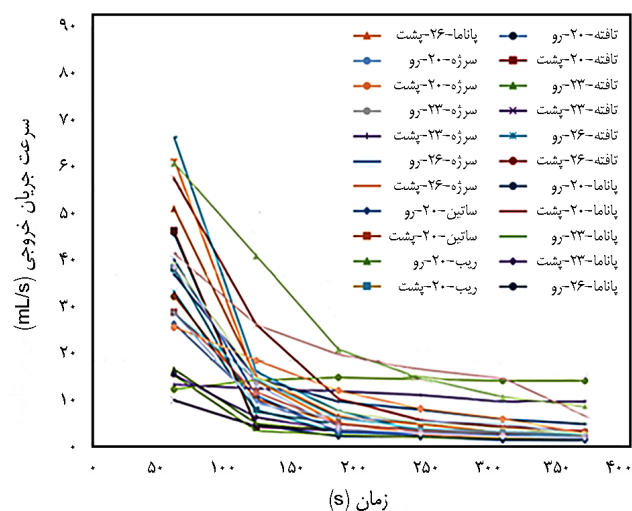
برای بررسی اثر نوع بافت و سمت رو و پشت بافت در تراکم کم، مقادیر کدورت آب دو نمونه صافی با بافت‌های ساتین ۸ و ریب با تراکم پودی ۲۰ در دو سمت رو و پشت نیز اندازه‌گیری شد. همان‌گونه که در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است، در تمام طرح‌های بافت در تراکم ۲۰ و ۲۳ سمت پشت پارچه کدورت آب کمتری را در فرایند صافش نشان داده و عملکرد بهتری داشته است. دلیل ممکن برای توجیه این موضوع می‌تواند به نوع صافش و تغییر میکروسکوپی فضاهای باز در سطح بازگردد. هرچه فضای باز سطح بیشتر باشد، موجب نفوذ و خروج راحت ذرات به ساختار پارچه می‌شود و در نتیجه کدورت افزایش می‌یابد [۴]. درباره دو بافت ساتین ۸ و سرژ ۱/۳ همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نخ‌های شناور تار در سمت پشت پارچه فضای باز سطح را کمتر می‌کنند و به‌طور کلی سطح صافی افزایش یافته و در نتیجه کدورت آب کمتر شده است. درباره نمونه‌ها با بافت تافته و پاناما و ریب پشت و روی پارچه از لحاظ ظاهری شبیه به هم هستند. اما، می‌توان دلیل آن را این‌گونه بیان کرد که اثر شانه هنگام بافندگی



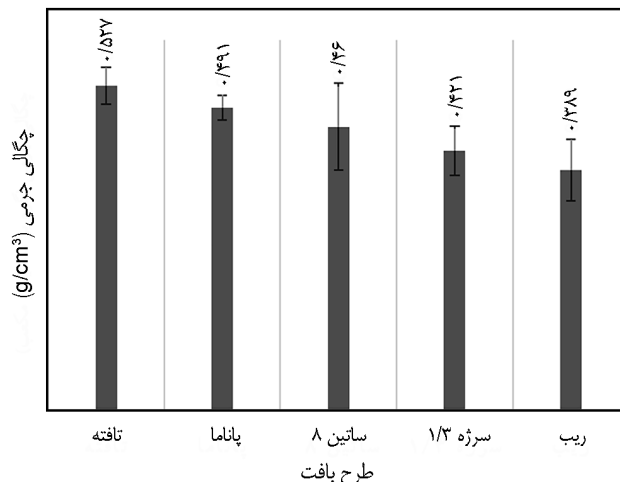
شکل ۸- نمودار افت فشار با استفاده از پشت و روی ۱۱ نوع پارچه تارپودی.

آزمون‌های پارچه‌های تارپودی همگی گویای آن است که رفتار این پارچه‌ها دارای محدوده کاری ویژه‌ای با افت فشار معین در سطح ثابت است [۴،۹،۲۲]. شکل ۸ نمودار افت فشار هنگام استفاده از پشت و روی ۱۱ نوع پارچه تارپودی را نشان می‌دهد. چنانچه دیده می‌شود، افت فشار هیچ یک از نمونه‌ها از ۶۰ kPa بیشتر نبوده است. همچنین مشاهده می‌شود، روند تغییرات افت فشار و سرعت جریان در فرایند صافش مایع، مشابه نتایج و نمودارهای پژوهش‌های پیشین (شکل ۷) [۴،۵] بوده و روند تغییرات نمودار افت فشار نمونه‌های مختلف در این پژوهش در مدت زمان حدود ۳۷۰ s تقریباً ثابت شده است.

نمودار تغییرات سرعت جریان نمونه‌های صافی پارچه‌ای در هر



شکل ۹- نمودار سرعت جریان هنگام استفاده از ۱۱ نوع پارچه در دو سمت.

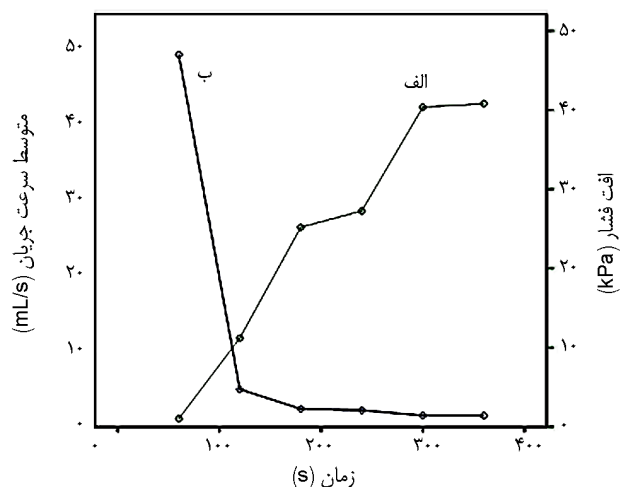


شکل ۶- متوسط چگالی جرمی پارچه‌های تارپودی با طرح‌های بافت مختلف در تراکم پودی ثابت ۲۰.

پارچه‌ای با طرح تافته با ضخامت کمتر و چگالی جرمی بیشتر، عملکرد صافش بهتری را نشان داده است.

۳-۳ بررسی مقدار گذردهی مایع

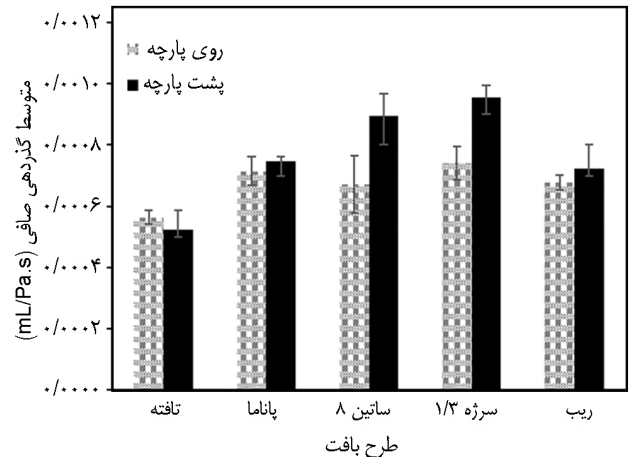
آزمون‌های انجام‌گرفته برای نمونه‌های صافی، رفتار پارچه‌های تارپودی مختلف را در بازده صافش نشان می‌دهند. قابل ذکر است، صرف‌نظر از نوع بافت و تراکم متفاوت، رفتار پارچه‌ها به شیوه‌ای نزدیک به هم تغییر می‌کنند. شکل ۷، نمایش حالت کلی نمودار افت فشار و سرعت جریان پشت و روی انواع پارچه تارپودی را نشان می‌دهد [۵]. نمودارهای ۷الف و ب به ترتیب افت فشار برحسب kPa و تغییرات سرعت جریان را برحسب mL s^{-1} نشان می‌دهند.



شکل ۷- حالت کلی نمودار: (الف) افت فشار و (ب) سرعت جریان خروجی [۵].

گذردهی صافی برای سمت پشت و روی پارچه از لحاظ آماری تفاوت معناداری ندارند، اما برای دو پارچه با بافت سرژه و ساتین این تفاوت معنادار است. درباره بافت ساتین و سرژه می‌توان گفت، روی پارچه نخ‌های شناور بود با فاصله از هم در بافت قرار گرفته‌اند، در حالی که نخ‌های تار شناور در پشت پارچه با تراکم بیشتری در کنار هم قرار دارند. در نتیجه، سطح قابل دسترس در پشت پارچه برای صافش و عبور، بیش از روی پارچه است. تعداد نخ‌های تار در یک صفحه مشترک در پشت پارچه، بیش از پودهای شناور در رو نمایان هستند و در مجموع مقدار سطح نفوذ آب در پشت پارچه بیشتر بوده و افت فشار کمتر است. در مقایسه با طرح‌های مختلف بافت مشاهده می‌شود، بافت تافته با ساختار فشرده، کمترین مقدار گذردهی را دارد و در بافت‌های ریب، پاناما، ساتین و سرژه به ترتیب مقدار گذردهی افزایش یافته است. مشخص است، نوع طرح بافت و خواص ظاهری پارچه و مقدار سطح در دسترس پارامترهای اثرگذاری بر نحوه گذردهی صافی هستند.

شکل ۱۱ متوسط گذردهی نمونه‌های مختلف پارچه‌ها را با طرح‌های مختلف در ۳ تراکم پودی نشان می‌دهد. روند تغییرات در دو تراکم ۲۰ و ۲۶ پودی در دو نمودار مربوط به پشت و روی نمونه‌ها یکسان است. در تراکم ۲۰، مقدار گذردهی صافی به ترتیب برای بافت‌های تافته، پاناما و سرژه افزایش می‌یابد. در تراکم ۲۳ سمت روی نمونه‌های بافت تافته و سمت پشت نمونه‌های بافت سرژه، بیشترین گذردهی را دارند. در تراکم ۲۶، بافت پاناما بیشترین بافت سرژه کمترین گذردهی را نشان داده‌اند. با افزایش تراکم، روند یکنواختی در گذردهی نمونه‌ها مشاهده نشد و تغییرات مقدار

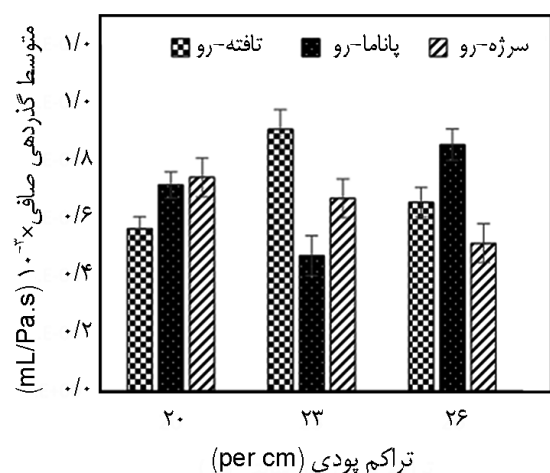
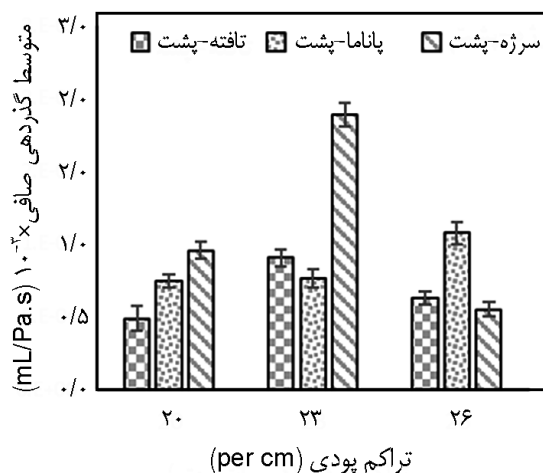


شکل ۱۰- میانگین مقادیر گذردهی نمونه‌های پارچه با طرح بافت‌های متفاوت در تراکم پودی ۲۰.

دو سمت پشت و رو نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که روند کلی آن‌ها با گذشت زمان مشابه است. مانند نتایج مطالعات پیشین [۴،۵]، متوسط سرعت جریان با گذشت زمان روند کاهشی می‌یابد و با گذشت ۳۷۰ s، سرعت جریان تقریباً برای تمام نمودارها ثابت می‌شود.

بر اساس استاندارد ASTM F 795-88 (1993)، نسبت $Q/\Delta P$ گذردهی سیال نامیده می‌شود [۳۸]. این پارامتر با توجه به مقادیر سرعت حجمی (Q) و افت فشار (ΔP) نمونه‌های صافی پارچه‌ای، محاسبه شد.

در شکل ۱۰ متوسط گذردهی آب در فرایند صافش با نمونه‌های پارچه‌ای دارای طرح‌های بافت مختلف در تراکم ثابت ۲۰ مقایسه شده است. برای پارچه‌های با طرح‌های تافته، پاناما و ریب، مقادیر



شکل ۱۱- میانگین گذردهی نمونه‌های پارچه با طرح بافت‌های مختلف در ۳ تراکم پودی و در دو سمت.

می‌گیرد: اندازه محیط صافی، سرعت صافش، افت فشار جریان، قطر مؤثر ذرات یا توزیع ابعاد آن‌ها، سرعت جریان و مقدار ذراتی که پشت صافی باقی می‌مانند. اندازه صافی، کل مساحت موجود برای جداسازی جریان و ضخامت صافی، کانال‌های عبور را تعیین می‌کنند [۱۹]. با توجه به نتایج مطالعات، در این پژوهش می‌توان برای ارزیابی بازده صافش برای هر یک از ملاک‌های مدنظر، اهمیت یکسانی در نظر گرفت. بنابراین، براساس شرایط و دارا بودن برخی ملاک‌ها، نمونه‌های پارچه تارپودی با بازده صافش بهتر نیز طبقه‌بندی شدند.

در این پژوهش برای پارچه‌های آزمون‌شده، قطر الیاف و ابعاد ذرات ثابت است. هزینه تولید مدنظر نبود، زیرا پارچه‌ها از لحاظ شرایط تولید وضعیت تقریباً یکسانی داشتند. صافی سطح نمونه‌ها، مقدار ذرات جدا شده و انعطاف پارچه‌ها نسبت به شرایط مختلف از پارامترهای مطالعه‌شده در این پژوهش نبوده‌اند. بنابراین ملاک‌های ۲ تا ۷ برای نمونه‌های پارچه، در نظر گرفته شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های نمونه‌های مختلف پارچه برای هر ملاک،

آن نسبت به تراکم غیرخطی بود. تغییر تراکم به‌همراه تغییر موقعیت نخ‌ها و فشار بر سطح مقطع نخ‌ها در اثر طرح بافت، از عوامل اثرگذار بر تعیین قطر هیدرولیک بهینه هستند. با توجه به نتایج مقادیر بهینه تراکم، بافت‌های تافته تراکم ۲۳ در سمت رو، پاناما تراکم ۲۶ در سمت رو و سرژ تراکم ۲۳ در سمت پشت، دارای گذردهی بیشتری هستند.

۳-۴ ارزیابی نهایی نمونه‌های صافی

براساس نظریات مطالعه‌شده [۳۲، ۳۳، ۳۰، ۲۸، ۵]، ملاک‌هایی در ارزیابی پارچه‌های تارپودی برای انتخاب به‌عنوان صافی در عملکرد صافش تعیین شدند (جدول ۵). در طراحی یک سامانه صافش ایده‌آل، خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات و سیال، سرعت جریان، ساختار صافی، طراحی مسیرهای عبوری، نسبت زمان کار به زمان تمیزشدن، نسبت جریان سیال به مساحت صافی، فضا و هزینه‌های مورد نیاز و روش پاک‌سازی اهمیت دارند [۱۸]. جداسازی ذرات در صافی تحت تأثیر پنج عامل اصلی قرار

جدول ۵- ملاک‌های ارزیابی پارچه در عملکرد صافش.

شماره	ملاک	توضیح
۱	قطر کم الیاف	قطر الیاف به‌طور مستقیم بر پارامترهای سطحی و حجمی اثر می‌گذارد. این پارامترها در صافی بسیار مهم هستند.
۲	ضخامت کم پارچه	هرچه ضخامت کمتر باشد، بهتر است. با توجه به معادله داری سرعت جریان Q با ضخامت پارچه ارتباط عکس دارد.
۳	کیفیت زیاد آب	هرچه کدروت آب کمتر باشد، کیفیت آن بیشتر و برای پارچه مناسب‌تر است.
۴	میانگین سرعت جریان خروجی اولیه	مقدار سرعت جریان زیاد در افت فشار یکسان، پارامتر مناسبی است.
۵	افت فشار نهایی	هرچه افت فشار نهایی کمتر باشد، بهتر است.
۶	افت فشار اولیه	هرچه افت فشار برای سرعت جریان مشخص کمتر باشد، بهتر است.
۷	ابعاد ذرات	هرچه محدوده ذرات جدا شده ریزتر باشد، صافی مناسب‌تر است.
۸	هزینه تولید	هرچه هزینه‌های تولید کمتر باشد، بهتر است.
۹	صافی با سطح زیاد	سطح صافی مؤلفه‌ای است که در امر تمیزکردن صافی و شست‌وشوی آن مهم است.
۱۰	مقدار ذرات جدا شده	هرچه ذرات جدا شده بیشتر باشد، پارچه مناسب‌تر است.
۱۱	انعطاف به pHهای مختلف	انعطاف‌پذیری و سازگاری پارچه با pH مایع در شرایط مختلف، که ممکن است pH مایع در فرایندهای مختلف صافش متفاوت باشد، مفید و مناسب است.
۱۲	انعطاف به دماهای مختلف	انعطاف‌پذیری و سازگاری پارچه با دما در شرایط مختلف، که ممکن است دمای مایع در فرایندهای مختلف صافش متفاوت باشد، مفید و مناسب است.
۱۳	انعطاف به مواد باکتریایی و مواد شیمیایی	انعطاف‌پذیری و سازگاری پارچه با مواد در شرایط مختلف، که ممکن است مواد موجود در مایع در فرایندهای مختلف صافش متفاوت باشد، مفید و مناسب است.

جدول ۶- محدوده ارزیابی هر ملاک در فرایند صافش.

محدوده ارزیابی هر ملاک				
ارزیابی	ضخامت پارچه (mm)	کیفیت آب، کدورت آب (NTU)	مقدار میانگین سرعت جریان خروجی اولیه (mL/s)	افت فشار نهایی (kPa)
ضعیف	۰/۲۵-۰/۲۸	۱۰/۰۰-۱۲/۰۹	۲۶/۰۱-۴۱/۰۰	۵۹-۶۱
متوسط	۰/۲۱-۰/۲۴	۷/۷۰-۹/۹۹	۴۱/۰۱-۵۶/۰۰	۵۷-۵۸
خوب	۰/۱۷-۰/۲۰	۵/۶۰-۷/۶۹	۵۶/۰۱-۷۱/۰۰	۵۴-۵۶
عالی	۰/۱۳-۰/۱۶	۳/۵۰-۵/۵۹	۷۱/۰۱-۸۶/۰۰	۵۱-۵۳

جدول ۷- ارزیابی نهایی نمونه‌های پارچه تار پودی با توجه به امتیاز درباره هر ملاک در فرایند صافش.

شماره	نوع پارچه و جهت-تراکم	مقدار میانگین سرعت جریان خروجی اولیه				عملکرد صافی
		امتیاز ملاک ۲	امتیاز ملاک ۳	امتیاز ملاک ۴	امتیاز ملاک ۵	
۱	بافت ساتین ۸ رو-۲۰	ضعیف (۱)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	ضعیف (۱)	۶
۲	بافت ساتین ۸ پشت-۲۰	ضعیف (۱)	خوب (۳)	متوسط (۲)	ضعیف (۱)	۷
۳	تافته رو-۲۰	خوب (۳)	خوب (۳)	ضعیف (۱)	خوب (۳)	۱۰
۴	تافته پشت-۲۰	خوب (۳)	عالی (۴)	متوسط (۲)	خوب (۳)	۱۲
۵	بافت ریب رو-۲۰	عالی (۴)	ضعیف (۱)	ضعیف (۱)	خوب (۳)	۹
۶	بافت ریب پشت-۲۰	عالی (۴)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	۱۰
۷	بافت پاناما رو-۲۰	متوسط (۲)	خوب (۳)	ضعیف (۱)	ضعیف (۱)	۷
۸	بافت پاناما پشت-۲۰	متوسط (۲)	خوب (۳)	ضعیف (۱)	ضعیف (۱)	۷
۹	بافت رو سرژه ۳/۱-۲۰	متوسط (۲)	متوسط (۲)	خوب (۳)	خوب (۳)	۱۰
۱۰	بافت پشت سرژه ۳/۱-۲۰	متوسط (۲)	خوب (۳)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	۹
۱۱	بافت پاناما رو-۲۳	متوسط (۲)	خوب (۳)	ضعیف (۱)	متوسط (۲)	۸
۱۲	بافت پاناما پشت-۲۳	متوسط (۲)	عالی (۴)	ضعیف (۱)	عالی (۴)	۱۱
۱۳	تافته رو-۲۳	عالی (۴)	خوب (۳)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	۱۱
۱۴	تافته پشت-۲۳	عالی (۴)	خوب (۳)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	۱۱
۱۵	بافت رو سرژه ۳/۱-۲۳	متوسط (۲)	متوسط (۲)	ضعیف (۱)	ضعیف (۱)	۶
۱۶	بافت پشت سرژه ۳/۱-۲۳	متوسط (۲)	عالی (۴)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	۱۰
۱۷	بافت پاناما رو-۲۶	متوسط (۲)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	خوب (۳)	۹
۱۸	بافت پاناما پشت-۲۶	متوسط (۲)	متوسط (۲)	ضعیف (۱)	متوسط (۲)	۷
۱۹	تافته رو-۲۶	خوب (۳)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	۹
۲۰	تافته پشت-۲۶	خوب (۳)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	متوسط (۲)	۹
۲۱	بافت رو سرژه ۳/۱-۲۶	متوسط (۲)	متوسط (۲)	ضعیف (۱)	متوسط (۲)	۷
۲۲	بافت پشت سرژه ۳/۱-۲۶	متوسط (۲)	متوسط (۲)	ضعیف (۱)	متوسط (۲)	۷

سال	میانگین تعداد فرزندان در خانواده
۱۳۲۰	۲.۳۰
تقدیم پست ۲۰	۲.۲۵
تقدیم پست ۲۳	۲.۲۰
تقدیم پست ۲۳	۲.۱۵
تقدیم پست ۲۳	۲.۱۰
تقدیم پست ۲۰	۲.۰۵
تقدیم پست ۲۰	۲.۰۰
تقدیم پست ۲۰	۱.۹۵
تقدیم پست ۲۰	۱.۹۰
تقدیم پست ۲۰	۱.۸۵
تقدیم پست ۲۰	۱.۸۰
تقدیم پست ۲۰	۱.۷۵
تقدیم پست ۲۰	۱.۷۰
تقدیم پست ۲۰	۱.۶۵
تقدیم پست ۲۰	۱.۶۰
تقدیم پست ۲۰	۱.۵۵
تقدیم پست ۲۰	۱.۵۰
تقدیم پست ۲۰	۱.۴۵
تقدیم پست ۲۰	۱.۴۰
تقدیم پست ۲۰	۱.۳۵
تقدیم پست ۲۰	۱.۳۰
تقدیم پست ۲۰	۱.۲۵
تقدیم پست ۲۰	۱.۲۰
تقدیم پست ۲۰	۱.۱۵
تقدیم پست ۲۰	۱.۱۰
تقدیم پست ۲۰	۱.۰۵
تقدیم پست ۲۰	۱.۰۰
تقدیم پست ۲۰	۰.۹۵
تقدیم پست ۲۰	۰.۹۰
تقدیم پست ۲۰	۰.۸۵
تقدیم پست ۲۰	۰.۸۰
تقدیم پست ۲۰	۰.۷۵
تقدیم پست ۲۰	۰.۷۰
تقدیم پست ۲۰	۰.۶۵
تقدیم پست ۲۰	۰.۶۰
تقدیم پست ۲۰	۰.۵۵
تقدیم پست ۲۰	۰.۵۰
تقدیم پست ۲۰	۰.۴۵
تقدیم پست ۲۰	۰.۴۰
تقدیم پست ۲۰	۰.۳۵
تقدیم پست ۲۰	۰.۳۰
تقدیم پست ۲۰	۰.۲۵
تقدیم پست ۲۰	۰.۲۰
تقدیم پست ۲۰	۰.۱۵
تقدیم پست ۲۰	۰.۱۰
تقدیم پست ۲۰	۰.۰۵
تقدیم پست ۲۰	۰.۰۰

شکل ۱۲- ارزیابی نهایی نمونه‌های پارچه آزمون‌شده با توجه به امتیازدهی ملاک‌های عملکرد صافش.

محدوده‌هایی برای هر یک از ارزیابی‌های ضعیف، متوسط، خوب و عالی در نظر گرفته شد (جدول ۶). برای هر ملاک به هر یک از نمونه‌ها براساس ارزیابی انجام‌شده، امتیاز اختصاص داده شد که نتایج آن در جدول ۷ نشان داده شده است. بیشترین امتیاز برای محدوده عالی، ۴ در نظر گرفته شده است. به‌عنوان مثال، در جدول ۵ برای ملاک کیفیت زیاد آب در فرایند صافش، بیشترین امتیاز ۴ برای نمونه‌ای در نظر گرفته شده است که متوسط کلورت آب اندازه‌گیری شده برای آن کم باشد و در محدوده در نظر گرفته شده (NTU ۵/۵۹-۳/۵۰) باشد.

در شکل ۱۲، نمونه‌های پارچه با توجه به تراکم، سمت رو و پشت و طرح بافت از لحاظ عملکرد نهایی صافش طبقه‌بندی شده‌اند که بهترین نمونه پارچه تافته در سمت پشت با تراکم ۲۰ بوده است. تراکم‌های بهینه در پارچه‌های با طرح بافت تافته ۲۰، طرح بافت پاناما ۲۳ و طرح بافت سرژ ۲۰ و ۲۳ بوده است.

۴ نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر ساختار تعدادی از پارچه‌های تارپودی بر بازده و عملکرد صافش بررسی شده است. نمونه‌های پارچه با طرح‌های متفاوت بافت ریب، ساتین، تافته، پاناما، سرژه $1/3$ در تراکم‌های پودی متفاوت با دستگاه پروژکتایل بافته شدند. نتایج نشان داد، ضخامت نمونه‌ها با افزایش تراکم پودی، تفاوت معناداری ندارند، اما با تغییر طرح بافت، تغییرات ضخامت معنادار می‌شوند. یک دستگاه براساس استانداردهای لازم برای صافش آب، طراحی و نصب شد. نمونه‌ها در دو سمت پشت و رو آزمایش

مراجع

- [1] J. Hoslett, T.M. Massara, S. Malamis, D. Ahmad, I. Boogaert, E. Katsou, B. Ahmad, H. Ghazal, S. Simons, L. Wrobel, and H. Jouhar, "Surface water filtration using granular media and membranes: a review", *Sci. Total Environ.*, vol. 639, pp. 1268-1282, 2018.
- [2] R. Singh, *Hybrid Membrane Systems for Water Purification: Technology, Systems Design and Operations*, Elsevier, 2006, pp. 57-130.
- [3] L.K. Onda, J. Buglio, and J. Bartram, "Global access to safe water: accounting for water quality and the resulting impact on MDG progress", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 9, no. 3, pp. 880-894, 2012.
- [4] B.T. Mncube, "Basic mathematical modelling for polymer woven fabric performance suitable for low energy filtration systems", *Ph.D dissertation*, Dept. Chem. Eng., Durban University of Technology (DUT), Durban, South Africa, 2019.
- [5] A. Rushton, A.S. Ward, and R.G. Holdich, *Solid-Liquid Filtration and Separation Technology*, Wiley-VCH, 1996, pp. 33-152.
- [6] D. Alfa, S. Rathilal, V.L. Pillay, and M.N. Chollom, "Development and evaluation of small scale disinfection system", *J. Water Sanit. Hyg. Dev.*, vol. 6, no. 3, pp. 389-400, 2016.
- [7] K.W. Böddeker, *Liquid Transport in Membrane Filtration*, 2005, pp. 67-72.
- [8] Y. Chen and H. Kim, "Monte Carlo simulation of pore blocking and cake formation by interfacial interactions during membrane filtration", *Desalination*, vol. 233, no. 1, pp. 258-266, 2008.
- [9] M.N. Chollom, K. Pikwa, S. Rathilal, and V.L. Pillay, "Fouling mitigation on a woven fibre microfiltration membrane for the treatment of rawwater", *S. Afr. J. Chem. Eng.*, vol. 23, pp. 1-9, 2017.
- [10] E.O. Ezugbe and S. Rathilal, "Membrane technology for wastewater treatment: a review", *Membranes*, vol. 10, no. 89, pp. 2-28, 2020.
- [11] M. Mouiya, A. Abourriche, A. Bouazizi, A. Benhammou, Y.E. Hafiane, Y. Abouliatim, L. Nibou, M. Oumam, M. Ouammou, A. Smith, and H. Hannache, "Flat ceramic microfiltration membrane based on natural clay and Moroccan phosphate for desalination and industrial wastewater treatment", *Desalination*, vol. 427, pp. 42-50, 2018.
- [12] M. Waszak and M. Gryta, "The ultrafiltration ceramicmembrane used for broth separation in membrane bioreactor", *Chem. Eng. J.*, vol. 305, pp. 129-135, 2016.
- [13] K. Ko, Y. Yu, M.J. Kim, J. Kweon, and H. Chung, "Improvement in fouling resistance of silver-graphene oxide coated polyvinylidene fluoride membrane prepared by pressurized filtration", *Sep. Purif. Technol.*, vol. 194, pp. 161-169, 2018.
- [14] S. Chatterjee and S. De, "Adsorptive removal of arsenic from groundwater using chemically treated iron ore slime incorporated mixed matrix hollow fiber membrane", *Sep. Purif. Technol.*, vol. 179, pp. 357-368, 2017.
- [15] J. Hoslett, T.M. Massar, S. Malamis, D. Ahmad, I. van den Boogaert, E. Katsou, B. Ahmad, H. Ghazal, S. Simons, L. Wrobel, and H. Jouhar, "Surface water filtration using granular media and membranes: a review", *Sci. Total Environ.*, vol. 639, pp. 1268-1282, 2018.
- [16] F. Meng, S.R. Chae, A. Drews, M. Kraume, H.S. Shin, and F. Yang, "Review: recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material", *Water Res.*, vol. 43, no. 6, pp. 1489-1512, 2009.
- [17] F. Bi, H. Zhao, Z. Zhou, L. Zhang, H. Chen, and C. Gao, "Optimal design of nanofiltration system for surface water treatment", *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 24, no. 12, pp. 1674-1679, 2016.
- [18] M. Manouchehri and A. Kargari, "Water recovery from laundry wastewater by the cross flow microfiltration process: a strategy for water recycling in residential buildings", *J. Clean. Prod.*, vol. 168, pp. 227-238, 2017.
- [19] L. Svarovsky, *Solid-Liquid Separation*, 4th ed., Butterworth-Heinemann, 2000, pp. 286-290.
- [20] C.B. Song and H.S. Park, "Analytic solutions for filtration of polydisperse aerosols in fibrous filter", *Powder Technol.*, vol. 170, no. 2, pp. 64-70, 2006.
- [21] W.M. Zahid and S.A. El-Shafai, "Use of cloth-media filter for membrane bioreactor treating municipal wastewater", *Bioresource Technol.*, vol. 102, no. 3, pp. 2193-2198, 2011.
- [22] Q. Yang, Z.H. Liu, and X. Sheng, "Woven fabric bioreactor (WFBR) as the filter material for wastewater treatment", *Adv. Mater. Res.*, vol. 356-360, pp. 1613-1617, 2012.
- [23] V.K. Kothari, A. Das, and S. Singh, "Filtration behaviour of woven and nonwoven fabrics", *Indian J. Fibre Text. Res.*, vol. 32, no. 2, pp. 214-220, 2007.
- [24] M.D. Víctor-Ortega and H.C. Ratnaweera, "Double filtration as an effective system for removal of arsenate and arsenite from drinking water through reverse osmosis", *Process. Saf. Environ. Prot.*, vol. 111, pp. 399-408, 2017.
- [25] P.P. Sakpal, S.M. Landage, and A.I. Wasif, "Application

- nonwovens for water filtration”, *Int. J. Adv. Res. Manage. Soc. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 28-47, 2017.
- [26] K.L. Gandhi and W.S. Sondheim, “Technical fabric structures: woven fabrics”, in *Handbook of Technical Textiles*, 2nd ed., vol. 1, A.R. Horrock and S.C. Anand Eds., Woodhead, 2016, pp. 63-106.
- [27] D.B. Purchas and K. Sutherland, *Handbook of Filter Media*, 2nd ed., Elsevier Science, 2001, pp. 1-80.
- [28] C.A. Mecha and V.L. Pillay, “Development and evaluation of woven fabric microfiltration membranes impregnated with silver nanoparticles for potable water treatment”, *J. Membr. Sci.*, vol. 458, pp. 149-156, 2014.
- [29] K.J. Hwang, C.Y. Liao, and K.L. Tung, “Effect of membrane pore size on the particle fouling in membrane filtration”, *Desalination*, vol. 234, no. 1-3, pp. 16-23, 2008.
- [30] I.M. Hutten, *Handbook of Non-Woven Filter Media*, Elsevier Science, 2007, pp. 291-324.
- [31] S. Adanur, *Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles*, CRC, 1995, pp. 144-160.
- [32] T.H. Shah and A. Rawal, “Textiles in filtration”, in *Handbook of Technical Textiles*, 2nd ed., vol. 2, A.R. Horrock and S.C. Anand Eds., Woodhead, 2016, pp. 57-110.
- [33] M. Cheryan, *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*, CRC, 1998, pp. 30-40
- [34] F. Zhao, H. Chen, G. Xue, Q. Jiang, and Y. Qiu, “Three dimensional woven fabrics as filter media in membrane bioreactor for wastewater treatment”, *J. Mater. Sci.*, vol. 48, pp. 7869-7874, 2013.
- [35] ASTM, Standard Test Method for Thickness of Textile Materials, Annual Book of ASTM D1777-96 (2007), New York, 2008.
- [36] F. Hajiani, S.M. Hosseini, N. Ansari, and A.A.A. Jeddi, “The influence of water jet pressure settings on the structure and absorbency of spunlace nonwoven”, *Fiber. Polym.*, vol. 11, no. 5, pp. 798-804, 2010.
- [37] K. Scott, *Handbook of Industrial Membranes*, Elsevier Science, 1998, pp. 521-572.
- [38] ASTM, Standard Practice for Determining the Performance of a Filter Medium Employing a Single-Pass, Constant-Rate, Liquid Test (Withdrawn 2002), Annual Book of ASTM F795-88 (1993), vol. 11.04, New York, 2000.
- [39] ASTM, Standard Test Method for Turbidity of Water (Withdrawn 2007), Annual Book of ASTM D1889-00, vol. 11.01, New York, 2000.

Investigation and Modeling the Effect of Different Filler Materials on the Sound Absorption Properties of Double Base Persian Rugs

Touba Ardekani, Aliasghar Alamdar Yazdi*, and Morteza Vadood

Textile Engineering, Yazd University, Postal Code 8915818411, Yazd, Iran

Received: 9 September 2021, Accepted: 30 November 2021

Abstract

Rug is one of the cultural and artistic symbols of Iran, which is several thousand years old and is used as an exquisite flooring or to decorate the interior of various places. Nevertheless, this art work has acoustic properties due to the high volume of fibers and thickness. Therefore, in this paper, first a new structure of the rug is introduced and then its acoustic properties are evaluated and modeled. The structure of the new Double Base Persian rug is similar to the structure of a regular rug, and the only difference is that there are two sets of warp yarns (instead of one) with a certain distance. In order to investigate the effect of double bases and also the presence of various materials with different percentages in the gap between the two bases on the sound absorption of the new rug, different samples were produced. It is worth mentioning that the effect of the presence of pile on the sound absorption of the new rug has been investigated. The sound absorption of the samples was measured using an impedance tube method and the Johnson-Champoux-Allard model was used to model the sound absorption of the samples. The obtained results showed that although the kind of filler material has a little effect on sound absorption, the sound absorption increases by filling the gap between the two bases and by increasing the filling percentage. The Johnson-Champoux-Allard model also indicated a very good agreement with the experimental data.

Keywords: rug base, double base persian rug, sound absorption coefficient, impedance tube, Johnson-Champoux-Allard model

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: aalamdar@yazd.ac.ir

می‌یابد. همچنین، وجود لایه پستی به بهبود جذب صوت، به‌ویژه در بسامدهای میانی منجر می‌شود. Küçük و همکاران [۱۰]، اثر پارامترهای طول و چگالی خاب را بر قالی‌های آکرلیک بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های آن‌ها بیانگر این بود که دو عامل مزبور بر خواص جذب صوت قالی در تمام محدوده‌های بسامدی اثرگذارند. همچنین، جذب صوت در نمونه‌ها با ازدیاد بسامد افزایش می‌یابد. اخیراً نیز Çelik [۱۱]، اثر ارتفاع خاب را آزمایش کرد و نشان داد، با افزایش ارتفاع خاب و بسامد، جذب صوت قالی نیز افزایش می‌یابد.

مجموع مطالعات در این زمینه نشان می‌دهند، در قالی‌ها با افزایش بسامد، جذب صوت نیز افزایش می‌یابد و قالی‌ها در بسامدهای متوسط و کم، جذب صوت کمتری دارند، در حالی که در بسامدهای بیشتر دارای جذب بیشتری هستند. بنابراین آنچه چالش‌برانگیز است، جذب کم صوت در بسامدهای کم و متوسط است. همچنین، اگرچه حجم زیادی از ساختار قالی را بستر آن تشکیل داده، اما در مطالعات انجام‌شده درباره جذب صوت قالی تاکنون به تأثیر بخش بستر توجه خاصی نشده است. بنابراین، در این مطالعه به‌منظور بهبود جذب صوت قالی، به‌ویژه در بسامدهای میانه، روی بخش بستر آن تمرکز شده است. بدین منظور، خواص آکوستیک قالی جدید با بستر متفاوتی که فاصله‌هایی ایجادشده در آن با مواد و درصدهای مختلف پر شده، مطالعه و بررسی شده است. همچنین، درنهایت برای پیش‌بینی خواص صوتی این قالی از مدل JCA استفاده شده است.

۲ تجربی

۲-۱ مواد و تهیه نمونه

مشخصات نخ‌های استفاده‌شده در ساختار نمونه قالی‌های این پژوهش در جدول ۱ مشخص شده است. نمونه قالی‌های جدید به پیروی از مطالعه صادقی با دو دسته‌کردن بستر قالی تولید شد [۱۲]. به عبارت دیگر، سازوکار تولید این قالی بدین شکل است که دسته نخ‌های تار به‌جای یک‌دسته به دو دسته مجزا و مساوی تقسیم و این دو دسته با فاصله ۱ mm از یکدیگر قرار داده شدند. سپس، همانند قالی ایرانی متداول، نخ‌های خاب به‌جای گره خوردن به یک دسته نخ تار، به دو دسته گره می‌خورند که یک دسته جلوتر و دسته دیگر عقب‌تر قرار گرفته‌اند. تفاوت ساختار قالی ایرانی عادی با قالی جدید در شکل ۱ قابل مشاهده است.

متحمل شدن هزینه‌های اضافی، عملی نیست. بنابراین، قالی‌ها افزون بر کاربرد آن‌ها به‌عنوان کف‌پوش می‌توانند با توجه به ضخامت درخور توجه آن‌ها در مقایسه با سایر جاذب‌ها به‌عنوان جاذب صوت مطلوب نیز استفاده شوند.

قالی‌ها به‌دلیل برخورداری از ضخامت و سطح وسیع، فضای گسترده‌ای از ترکیب مقدار زیادی الیاف و هوا را برای به‌دام‌اندازی امواج صوتی فراهم می‌آورند. پس از به‌دام‌اندازی امواج صوتی، انرژی ارتعاشی آن‌ها از طریق اصطکاک با الیاف داخل قالی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود، در نتیجه سطح انرژی صوت کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، قالی‌ها نه تنها صدای موجود در هوا و درون اتاق را جذب می‌کنند، بلکه به‌عنوان عایقی برای کاهش انتقال صدا به طبقات بالاتر یا پایین‌تر نیز عمل می‌کنند [۴]. این مطالب اهمیت فوق‌العاده قالی را در کاهش نوفه اثبات می‌کند. بدنه قالی‌ها دارای دو قسمت خاب و بستر هستند که به ترتیب معمولاً از نخ‌های پشمی یا آکرلیک با حجم زیاد و نخ‌های تار و پود تشکیل می‌شوند. هر قسمت بر ویژگی‌های قالی اثر می‌گذارد.

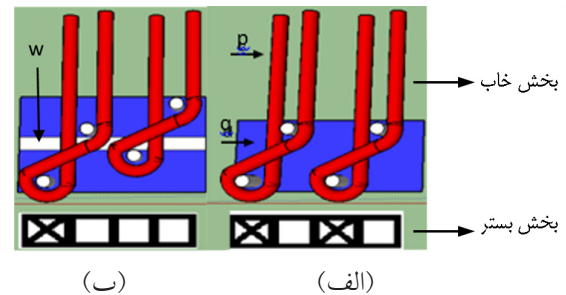
مطالعات اولیه درباره جذب صوت قالی از سال ۱۹۵۵ آغاز شده است [۵]. اکثر مطالعات به بررسی اثر پارامترهای خاب، مانند ارتفاع، تراکم و وزن به‌منظور بهبود جذب صوت قالی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال Nute و همکاران [۶]، برخی از عوامل مؤثر بر جذب صوت قالی را مطالعه کردند. آن‌ها نمونه را با استفاده از لوله امپدانس آزمایش و گزارش کردند، ضخامت خاب، نمره و ارتفاع خاب اثر اندکی بر جذب صوت قالی دارند. در حالی که تراکم خاب عملاً هیچ اثری ندارد و جذب صوت نمونه‌ها با ازدیاد بسامد افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، Shoshani و همکاران [۷،۸]، اثر پارامترهای خاب را بر جذب صوت قالی‌های تافته بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان دادند، بسته به محدوده بسامد، افزایش ارتفاع خاب می‌تواند به افزایش یا کاهش میانگین ضریب جذب صوت در بسامدهای ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ Hz یا ضریب کاهش نوفه (noise reduction coefficient, NRC) منجر شود یا ممکن است، حتی هیچ اثری نداشته باشد و افزایش تراکم خاب موجب افزایش NRC می‌شود. همچنین، وجود یک لایه پستی در پشت قالی به بهبود جذب صوت قالی، به‌ویژه در بسامدهای میانی، منجر می‌شود و به‌طور کلی جذب صوت با افزایش بسامد سیر صعودی دارد.

نتایج مطالعات Elkhateeb [۹]، درباره جذب صوت قالی استفاده‌شده در مسجد با استفاده از روش اتاقک طنین نشان داد، هرچه تراکم خاب بیشتر باشد، ضریب جذب صوت نیز افزایش

نوع نخ	مواد	سامانه ریسندگی	سامانه نمre گذاری	نمre نخ و تاب
تار	پنبه	رینگ	Ne (yds/lb)	1.33/3Z250
پود کلفت	پنبه	رینگ	Ne (yds/lb)	0.83/3Z150
پود نازک	پنبه	رینگ	Ne (yds/lb)	6/5S140
خاب	پشم	ورستد	Nm (m/g)	2.33/6S100

$$\sigma = \frac{\Delta P}{V \times d} \quad (1)$$

۲-۲-۲ تخلخل باز

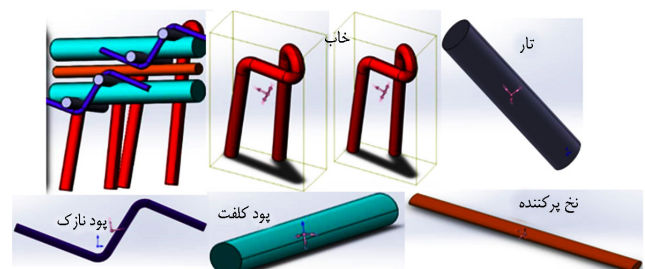
$$\varphi = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (2)$$


به منظور بررسی اثر وجود مواد پرکننده میان فضای خالی بین دو بستر و اثر جنس آن‌ها، ۴ نمونه از قالبی بستر دوگانه ایرانی یا DBP (double base persian) با فاصله بین دو بستر ۱ و تراکم warp/cm ۴ طوری تهیه شدند که فاصله بین دو بستر با ۳ مواد مختلف پنبه، پشم و آکرلیک (قطر نخ‌ها ۱ mm) پر شد و این فضا در یک نمونه خالی ماند. در نهایت به منظور تمرکز بر بخش بستر، افزون بر آزمودن نمونه‌ها، با تراشیدن تمام خاب‌ها از روی آن‌ها مجدداً آزمایش شدند. شکل ۲ ساختار قالبی جدید را با وجود نخ به عنوان پرکننده در فضای میان دو بستر نشان می‌دهد.

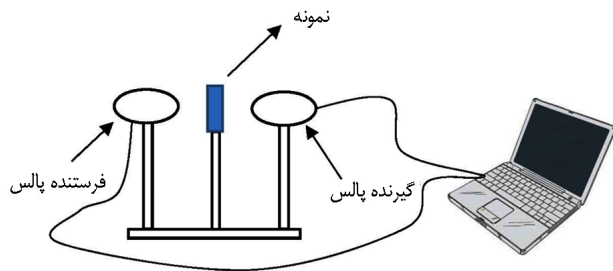
۲-۲ روش‌ها

۲-۲-۱ مقاومت در برابر جریان هوا

مقاومت به جریان هوا، σ (Ns/m⁴)، از مهم‌ترین عوامل ساختاری



شکل ۲- ساختار نمونه قالبی DBP.



شکل ۵- نمایش از اندازه گیری پیچ خوردگی.

اندازه گیری دستگاه در حالت با و بدون نمونه، می توان مقدار این تغییرات و در نتیجه مقدار پیچ خوردگی را محاسبه کرد.

۲-۲-۴ طول مشخصه گرانو و گرمایی

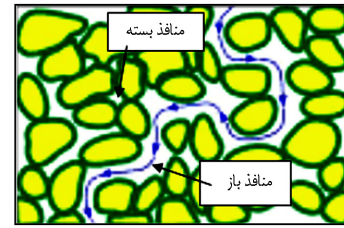
طول های مشخصه گرانو و گرمایی، Λ و Λ' (μm)، نیروهای گرانو و تبادل های گرمایی قاب جامد و سیال اشباع موجود در آن را در بسامدهای زیاد توصیف می کنند. اندازه گیری این دو عامل برای نمونه هایی با پیچیدگی ساختاری زیاد، کار آسانی نیست و از روی منحنی برازش داده های تجربی و مدل نظری (با استفاده از روش معکوس)، براساس الگوریتم حداقل مربع ارزیابی می شود [۱۸، ۱۹]. در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم ژنتیک با نرم افزار MATLAB، در محدوده مشخص شده برای ۵ عامل مدل که در ادامه توضیح داده شده اند، این دو عامل طوری محاسبه شدند که نمودار داده های تجربی بهترین انطباق را با مقادیر پیش بینی شده با مدل داشته باشند.

۲-۲-۵ ضریب جذب صوت

در این مطالعه، ضریب جذب صوت با استفاده از روش ماتریس انتقال در لوله امپدانس مطابق استانداردهای ISO 10534-2 و ASTM E 1050-10 [۲۰] با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه آکوستیک بلونیای ایتالیا، مطابق شکل ۶، اندازه گیری شد. نمونه هایی با قطر ۱۰۰ و ۴۰ mm برای اندازه گیری مقدار جذب صوت به ترتیب در محدوده ۲۰۰-۱۰۰ و ۴۴۰۰-۷۰۰ Hz استفاده شدند. سپس، اندازه گیری های لوله بزرگ و کوچک را می توان ترکیب کرد تا جذب صوت را در محدوده بسامد بین ۱۰۰ و ۴۴۰۰ Hz به دست آورد. قابل ذکر است، ضخامت قالی ها با فشار ۵ g/cm² اندازه گیری شد.

۲-۲-۶ پیش بینی جذب صوت با مدل JCA

مدل JCA، شامل ۵ پارامتر فیزیکی (تخلخل (ϕ)، مقاومت جریان هوا



شکل ۴- انواع تخلخل ها (باز و بسته).

در این معادله، ρ_s چگالی قالی و ρ_f چگالی الیاف درون ساختار قالی است [۱۵]. تفاوت تخلخل باز با تخلخل بسته در شکل ۴ قابل مشاهده است. تخلخل بسته مربوط به تخلخلی است که راهی به بیرون ندارد و محبوس است. تخلخل باز به حفره هایی گفته می شود که راه ارتباطی با بیرون و سایر منافذ را داشته باشند. حفره های بسته اثر چندانی بر جذب صوت ندارند [۱۶].

چگالی قالی با استفاده از وزن و حجم قالی محاسبه شد. برای محاسبه چگالی متوسط الیاف، از آنجا که نمونه قالی از نوع الیاف مختلف با درصدهای متفاوت ساخته شده است، یک نمونه تجزیه و هر نوع به طور جداگانه توزین شد تا نسبت وزن هر لیف به دست آید. با توجه به چگالی مخصوص هر لیف، متوسط چگالی الیاف با معادله زیر به دست می آید:

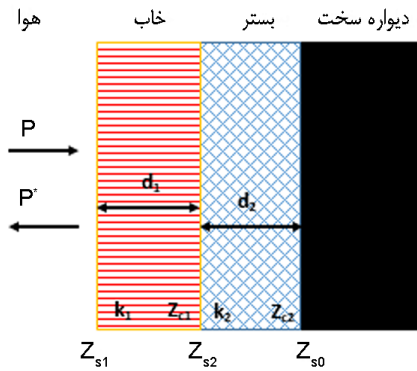
$$\rho_f = \sum_{i=1}^4 \rho_i \times \frac{w_i}{w_t} \quad (3)$$

که ρ_i چگالی هر لیف، w_i/w_t نسبت وزن هر لیف بر وزن واحد قالی و $w_t = \sum_{i=1}^4 w_i$ است.

۲-۲-۳ پیچ خوردگی

پیچ خوردگی (tortuosity)، α_m ، پارامتر بدون بعدی است که پیچیدگی مسیر منافذ را نشان می دهد. این پارامتر نشانگر نسبت مسیر طی شده یک موج صوتی در جاذب نسبت به مسیر مستقیم (ضخامت نمونه) است [۱۷].

در این پژوهش، مقدار پیچ خوردگی نمونه ها با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی فراصوت دهی در آزمایشگاه آکوستیک دانشگاه فرارای ایتالیا اندازه گیری شد (شکل ۵). طبق اصل فراصوت دهی، پالس الکتریکی ایجاد شده به وسیله پالس فراصوت به فرستنده ارسال و به یک موج فراصوت تبدیل می شود. این موج به وسیله فرستنده در هوا پخش می شود و گیرنده پس از عبور موج از نمونه، آن را دریافت می کند. وجود نمونه بین فرستنده و گیرنده در دستگاه، باعث تغییر در اندازه و جهت سرعت میکروسکوپی سیال می شود. با مقایسه نتایج



شکل ۷- نمایی از قالی به عنوان یک جاذب دولایه.

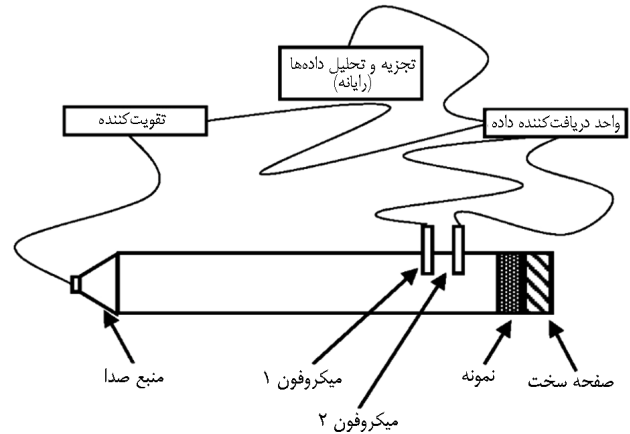
در ساختار چندلایه، نیاز به ارزیابی لایه‌های مختلف به‌طور جداگانه برای مدل‌سازی امپدانس سطح است. از آنجا که در قالی، ساختار بستر و منطقه خاب متفاوت است، فرض می‌شود که قالی یک جاذب دولایه باشد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، ابتدا باید امپدانس سطح لایه بستر (Z_s^2) نمونه بدون خاب محاسبه شود تا امپدانس کل سطح با توجه به معادله زیر ارزیابی و در نهایت جذب صوت کل قالی با توجه به $Z_{s, total}$ در معادله (۱۰) محاسبه شود [۲۲]:

$$Z_{s, total} = \frac{-iZ_{s2}Z_{cl} \cot(k_1 d_1) + Z_{cl}^2}{Z_{s2} - iZ_{cl} \cot(k_1 d_1)} \quad (10)$$

در شکل ۷، p و p' به ترتیب بیانگر موج صوت برخوردی به سطح قالی و موج بازتابی آن است. d_1 و d_2 نیز به ترتیب ضخامت خاب و بستر نمونه قالی است. k معرف عدد موجی و Z_c امپدانس مشخصه بوده که زیروند ۱ معرف بخش خاب و ۲ معرف بخش بستر است. Z_{s1} امپدانس سطح قالی، Z_{s2} سطح بستر و Z_{s0} سطح دیواره سخت پشت نمونه است.

۳ نتایج و بحث

در این پژوهش، مقادیر جذب صوت نمونه‌ها با فاصله‌های مختلف بین دو لایه بستر، ضخامت شکاف هواست که این فاصله‌ها با مواد مختلف و با درصدهای متفاوت پر شده‌اند. این مقادیر، با استفاده از سامانه لوله امپدانس در دو حالت با و بدون خاب محاسبه شد. افزون بر این، براساس پارامترهای فیزیکی پیش‌گفته، جذب صوت نمونه‌ها با استفاده از مدل JCA پیش‌بینی و با داده‌های تجربی در بسامدهای مختلف مقایسه شد.



شکل ۶- نمای لوله امپدانس.

(σ)، پیچ‌خوردگی (α_∞)، طول مشخصه گرانی و گرمایی (Λ' و Λ)، به عنوان ۵ ورودی برای مدل‌سازی جذب صوت است. با توجه به این مدل، می‌توان چگالی مؤثر ($\rho(\omega)$) و مدول توده ($k(\omega)$) را با معادله‌های (۴) و (۵) محاسبه کرد [۲۱]:

$$\rho(\omega) = \alpha_\infty \rho_0 \left[1 + \frac{\sigma \varphi}{j\omega \alpha_\infty \rho_0} \left(1 + \frac{4i\alpha_\infty^2 \eta \omega \rho_0}{(\sigma \Lambda \varphi)^2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$K(\omega) = kP_0 \left[k - (k-1) \left[1 + \frac{8\eta \alpha_\infty \varphi}{\Lambda^2 \varphi i \omega \rho_0 \alpha_\infty N_{pr}} \left(1 + \frac{4i\alpha_\infty^2 \eta N_{pr} \omega \rho_0}{(\sigma \Lambda' \varphi)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \right]^{-1} \quad (5)$$

در این معادله، ρ_0 چگالی هوا، η گرانیوی هوا و N_{pr} عدد پراثر بوده و P_0 فشار جو، k نسبت ظرفیت گرمایی ویژه و ω بیانگر بسامد زاویه‌ای (s^{-1}) است.

امپدانس صوتی سطح (Z_s) را می‌توان با استفاده از معادله (۸) با استفاده از امپدانس مشخصه ($Z_c(\omega)$) و عدد موجی ($K_c(\omega)$) تخمین زد [۲۱]:

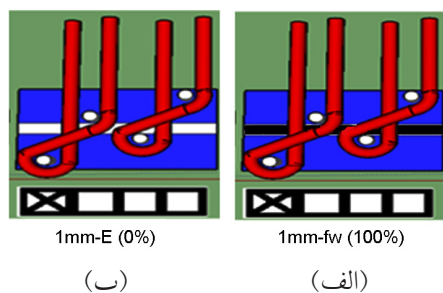
$$Z_c(\omega) = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\rho(\omega) K(\omega)} \quad (6)$$

$$K_c = \omega \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}} \quad (7)$$

$$Z_s = Z_c(\omega) \cot(K_c(\omega) \times d) \quad (8)$$

که d ضخامت نمونه است. سپس، ضریب جذب صوت با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

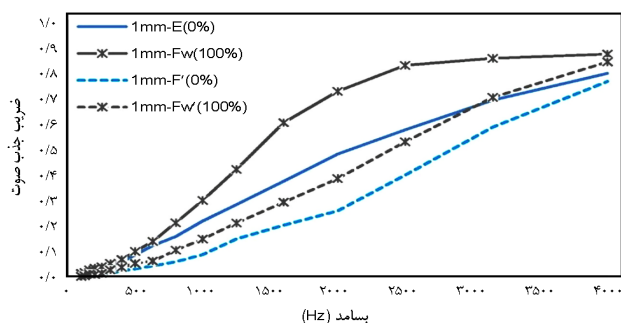
$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (9)$$



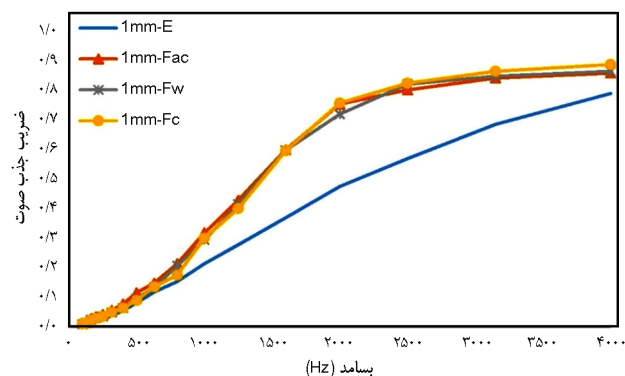
شکل ۱۰- نمونه با فضای بین دو بستر: (الف) ۱۰۰٪ پر شده و (ب) خالی.

این هستند که تمام خاب این نمونه‌ها تراشیده شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۸ و ۹ مشهود است، اولاً ضریب جذب صوت در تمام نمونه‌ها با بسامد به‌صورت غیرخطی افزایش یافته و ثانیاً با وجود مواد پرکننده جذب صوت نیز افزایش می‌یابد، اما جنس مواد تأثیر چندانی بر جذب صوت ندارد. همچنین مطابق با شکل ۸، وجود مواد پرکننده به بهبود جذب صوت، به‌ویژه در بسامدهای میانه، منجر شده است.

در ادامه به‌منظور بررسی اثر درصد پرشدگی فاصله بین دو بستر، نمونه قالی DBP با تراکم ۴ بار و فاصله بین دو بستر ۲ mm طوری تهیه شدند که فضای ۲ mm یک‌بار با یک نخ پشمی با قطر ۱ mm و بار دیگر با دو نخ پشمی ۱ mm پر شدند. به‌عبارت دیگر، یک بار ۵۰٪ و بار دیگر ۱۰۰٪ فضای میان دو بستر پر شده و برای نمونه آخر این فضا، خالی نگه داشته شد. همچنین، ۳ mm قالی DBP دیگر با تراکم ۴ بار و فاصله بین دو بستر ۳ mm طوری تهیه شدند که این فاصله هوایی یک‌بار با ۱ نخ پشمی ۱ mm (۶۷٪) پر شدند. و بار دیگر با دو نخ پشمی ۱ mm (۳۳٪) پر شدند. فضای ۳ mm بین دو بستر برای نمونه آخر خالی نگه داشته شد که نتایج آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ قابل مشاهده است. شکل ۱۰



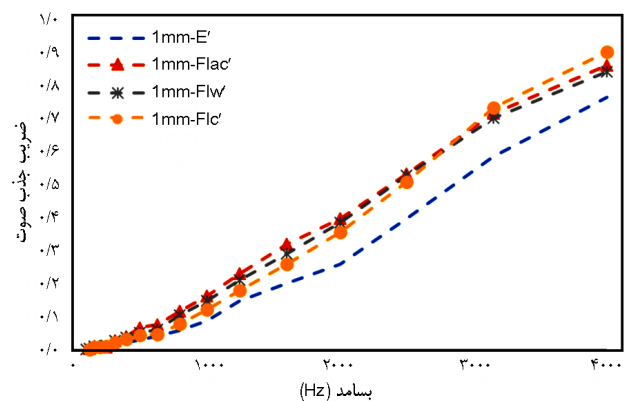
شکل ۱۱- اثر درصد مواد پرکننده بر فضای بین دو بستر در جذب صوت قالی DBP برای نمونه با فاصله بین دو بستر ۱ mm (— با وجود خاب و --- بدون خاب).



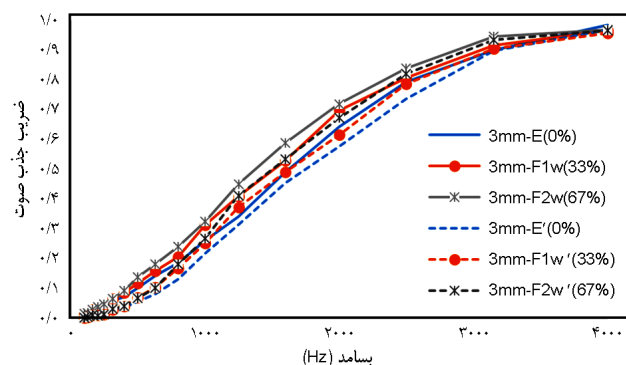
شکل ۸- اثر جنس مواد پرکننده در فضای ۱ mm میان دو بستر در جذب صوت قالی DBP (با وجود خاب).

۱-۳ اثر وجود مواد پرکننده و جنس و درصد آن‌ها بر فضای بین دو بستر قالی DBP

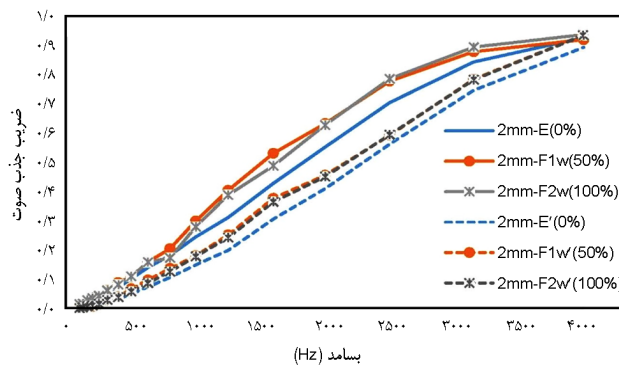
بدین منظور، ۴ نمونه قالی DBP با تراکم ۴ warp/cm و فاصله بین دو بستر ۱ mm طوری تهیه شدند که فضای میان دو بستر با یک نخ به قطر ۱ mm با ۳ جنس مختلف پنبه، پشم و آکرلیک پر شدند و در نمونه باقی‌مانده فضای میان دو بستر خالی نگه داشته شد. ابتدا جذب صوت این نمونه‌ها آزمایش شد. به‌منظور مطالعه بهتر و تمرکز روی بخش بستر، خاب روی تمام نمونه‌ها تراشیده و جذب صوت نمونه‌ها در حالت بدون خاب نیز دوباره آزمایش شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ مشهود است. باید توجه داشت که در نام‌گذاری نمونه‌ها، رقم اول کد از سمت چپ به‌معنای فاصله بین دو بستر است. به‌عنوان مثال، در نمونه 1mm-E، فاصله بین دو بستر ۱ mm است و حروف بعدی نشانگر ماده پرکننده فضای بین دو بستر مانند آکرلیک (ac)، پشم (w) یا پنبه (c) هستند. همچنین، این فضا می‌تواند خالی (E) بماند. کدهای دارای نشانه (') نمایانگر



شکل ۹- اثر جنس مواد پرکننده در فضای ۱ mm بین دو بستر در جذب صوت قالی DBP (بدون خاب).



شکل ۱۳- اثر درصد مواد پرکننده بر فضای بین دو بستر در جذب صوت قالی DBP برای نمونه با فاصله بین دو بستر ۳ mm (— با وجود خاب و --- بدون خاب).



شکل ۱۲- اثر درصد مواد پرکننده بر فضای بین دو بستر در جذب صوت قالی DBP برای نمونه با فاصله بین دو بستر ۲ mm (— با وجود خاب و --- بدون خاب).

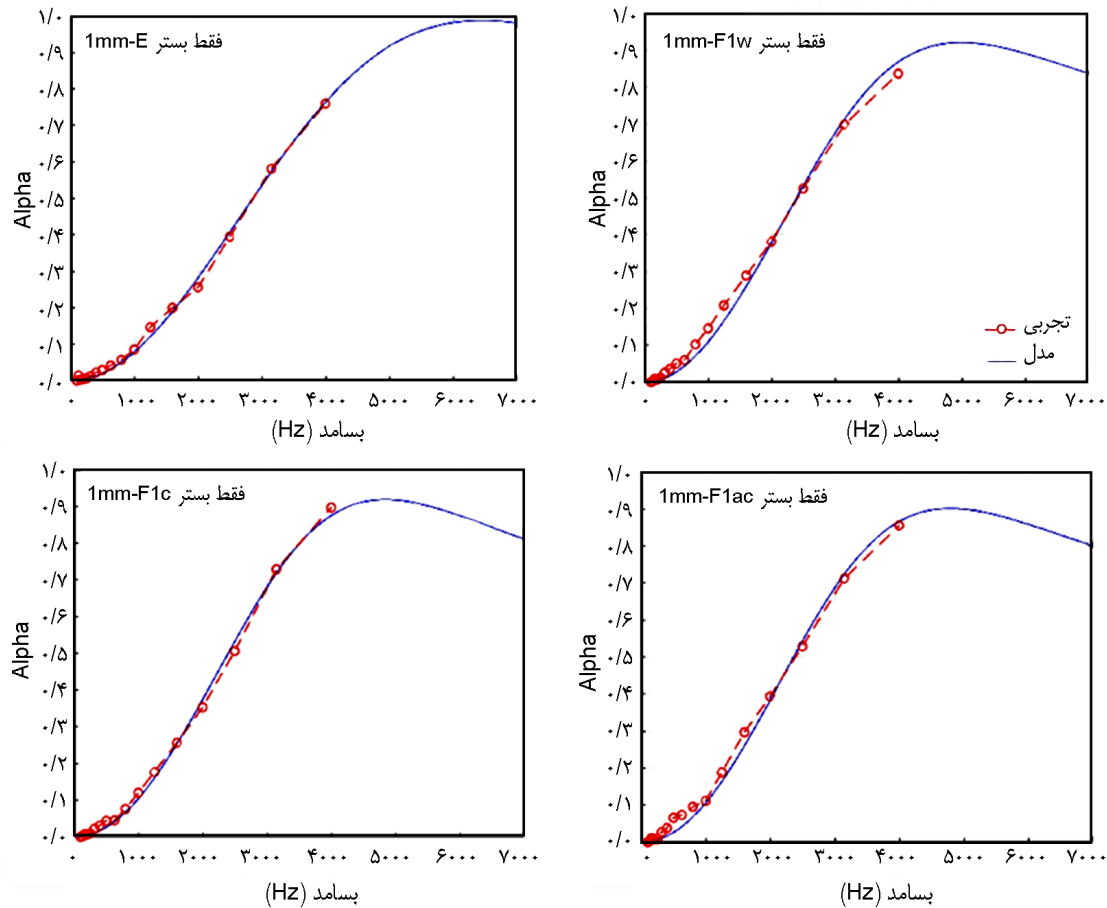
برکردن کامل فضای بین دو بستر (نمونه 1mm-F1w) در مقایسه با نمونه‌ای که فضای میان دو بستر خالی است (نمونه 1mm-E)، جذب صوت افزایش می‌یابد. برای نمونه با فاصله بین دو بستر ۳ mm، همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد پرشدن فاصله بین دو بستر، جذب صوت از ۰٪ (نمونه 3mm-E) و ۳۳٪ (نمونه 3mm-F1w) به ۶۷٪ (نمونه 3mm-F2w) افزایش می‌یابد. اما در نمونه‌های با فاصله بین دو بستر ۲ mm با افزایش درصد پرشدگی از ۵۰٪ (نمونه 2mm-f1w) به ۱۰۰٪ (نمونه 2mm-f2w) افزایش چشمگیری در جذب صوت مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۲). علت را می‌توان در این دانست که با پرشدن کامل فاصله میان دو بستر، مقاومت در برابر جریان آنقدر زیاد شده (جدول ۲) که ورود موج صوت به درون ساختار مشکل می‌شود و

نیز به‌منظور سهولت در فهم درصد پرشدن فضای میان دو بستر رسم شده است. جذب صوت نمونه‌ها یک بار با وجود خاب انجام شد. برای تمرکز بیشتر روی بخش بستر، بار دیگر تمام خاب‌ها از روی نمونه‌های تراشیده و جذب صوت نمونه‌ها بدون وجود خاب نیز مجدداً اندازه‌گیری شد. شکل ۱۱ افزون بر مقایسه نتایج این آزمایش‌ها، نتایج آزمون نمونه قالی با فاصله ۱ mm را که فضای میان دو بستر بدون وجود نخ پشمی (۰٪) و با وجود یک نخ پشمی ۱ mm (۱۰۰٪) پر شده را نیز نمایش می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ دیده می‌شود، با وجود مواد پرکننده جذب صوت قالی DBP افزایش می‌یابد. افزایش درصد مواد پرکننده بر افزایش جذب صوت مؤثر است. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در نمونه قالی با فاصله ۱ mm با

جدول ۲- پارامترهای آکوستیک نمونه‌های بدون خاب (منطقه بستر).

کد نمونه	ضخامت (mm)	σ (Ns/m ²)	ϕ	α_0	Λ (μ m)	Λ' (μ m)	درصد خطا	NRC	$\bar{\sigma}$
1mm-E	۸	۶۴۳۲۸	۰/۷۵	۱/۰۳	۱۸/۶۰	۸۵/۰۰	۰/۰۱۰	۰/۰۹	۰/۱۵
1mm-F1ac	۸	۷۴۸۸۴	۰/۷۲	۱/۰۴	۸/۶۳	۱۳۴/۳۱	۰/۰۱۴	۰/۱۴	۰/۲۰
1mm-F1c	۸	۷۴۰۰۱	۰/۷۲	۱/۰۶	۸/۴۷	۱۴۲/۹۷	۰/۰۱۳	۰/۱۳	۰/۱۹
1mm-F1w	۸	۷۴۹۸۸	۰/۷۲	۱/۰۸	۹/۷۳	۱۱۱/۸۳	۰/۰۱۶	۰/۱۵	۰/۲۰
2mm-E	۹	۵۸۶۴۹	۰/۸۰	۱/۰۳	۱۳/۲۱	۱۰۸/۳۹	۰/۰۱۶	۰/۱۶	۰/۲۱
2mm-F1w	۹	۷۱۷۵۳	۰/۷۸	۱/۰۳	۹/۶	۱۳۹/۶۰	۰/۰۲۱	۰/۱۸	۰/۲۳
2mm-F2w	۹	۷۳۹۹۶	۰/۷۵	۱/۰۹	۱۰/۷۳	۱۲۵/۰۱	۰/۰۲۰	۰/۱۸	۰/۲۳
3mm-E	۱۰	۵۳۳۸۳	۰/۸۵	۱/۰۳	۱۰/۵۸	۱۲۳/۶۵	۰/۰۱۴	۰/۲۲	۰/۲۷
3mm-F1w	۱۰	۶۹۹۵۹	۰/۸۲	۱/۰۳	۱۱/۳۲	۹۷/۱۸	۰/۰۴	۰/۲۴	۰/۲۸
3mm-F2w	۱۰	۷۲۰۷۹	۰/۷۸	۱/۰۴	۸/۱۷	۱۰۲/۰۳	۰/۰۴۷	۰/۲۵	۰/۳۰



شکل ۱۴- مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی‌شده با مدل JCA برای نمونه‌های بدون خاب (نمونه‌های با فاصله بین دو بستر ۱ mm).

به‌دست آمدند. بدین منظور، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی با نرم‌افزار MATLAB این دو مقدار محاسبه شدند که نتایج آن در جدول ۲ موجود است.

همان‌طور که از جدول ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد مواد پرکننده بین دو لایه بستر، مقاومت جریان هوا افزایش و تخلخل کاهش می‌یابد. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مقایسه بین نتایج تجربی آزمون جذب صوت نمونه‌های بدون خاب با مقادیر پیش‌بینی‌شده با مدل JCA را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل کاملاً متناسب با داده‌های تجربی در کل دامنه بسامد مقادیر اندازه‌گیری شده است. بنابراین، Z_{S2} امپدانس صوتی سطح برای نمونه‌های بدون خاب، می‌تواند برای بستر به‌تنهایی (نمونه بدون خاب) با استفاده از معادلات (۴) تا (۸) محاسبه شود.

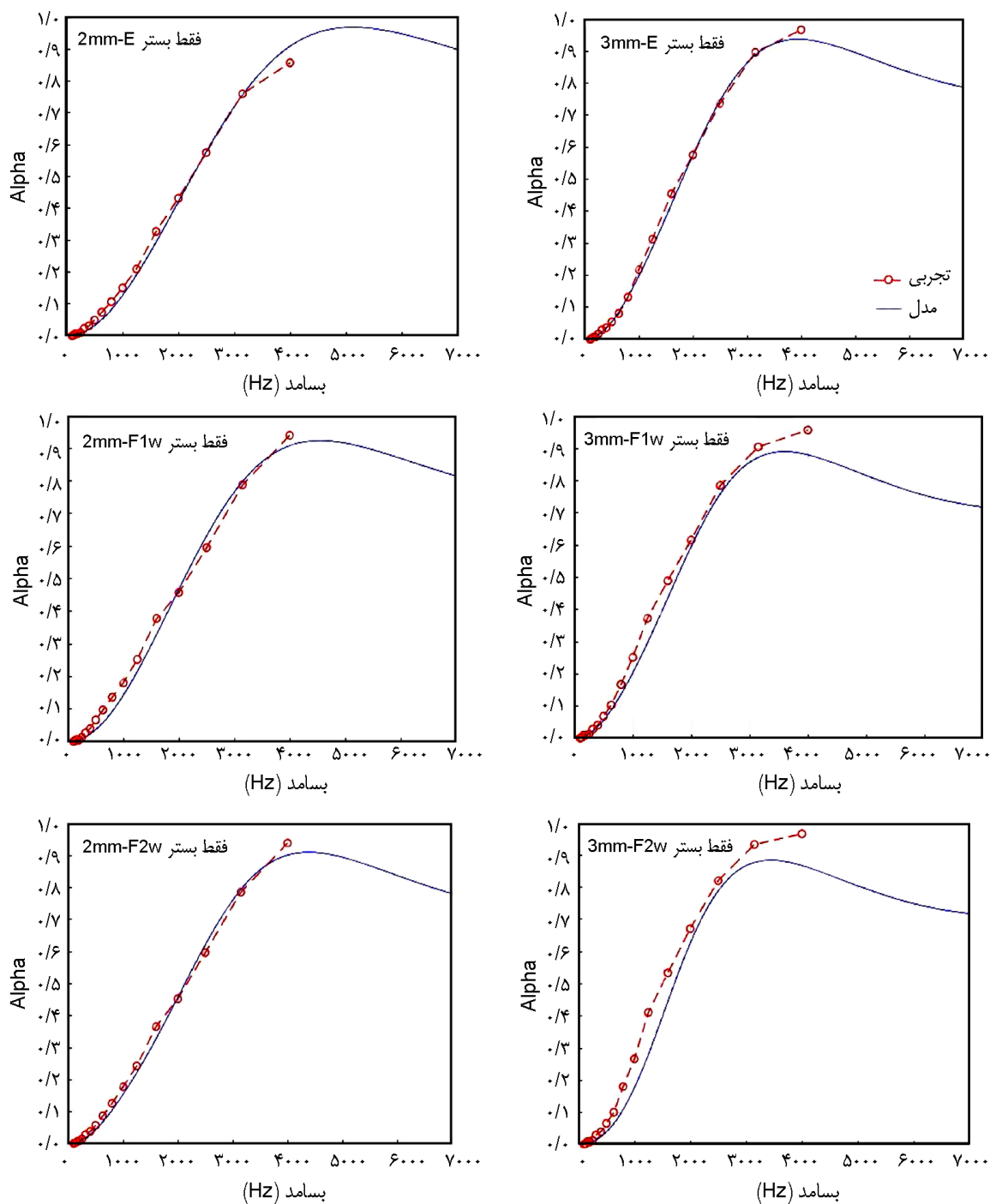
همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، مدل JCA به‌خوبی با داده‌های تجربی برای تمام محدوده بسامد آزمایش‌شده سازگار است. تنها اختلاف جزئی در نمونه‌های با فاصله بین دو بستر ۳ mm

انعکاس صوتی بستر افزایش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود تا بخشی از موج صوت به‌جای جذب، بازتاب یابد.

۳-۲ مدل‌سازی جذب صوت بستر قالی DBP

در مرحله آخر، به‌منظور پیش‌بینی خواص صوتی، مدل‌سازی جذب صوت نمونه‌ها بررسی شدند. در این راستا، با توجه به اینکه ساختار قالی از دو بخش با ساختارهای مختلف تشکیل شده است، برای مدل‌سازی، می‌توان آن را یک جاذب دولایه فرض کرد و بنا بر مطالعه Cox و d'Antonio لازم است که هر بخش از قالی به‌طور مجزا مدل‌سازی شود [۲۲]. بنابراین، در این بخش به مدل‌سازی بخش بستر قالی با استفاده از مدل JCA پرداخته شده است. این مدل دارای ۵ پارامتر ورودی بوده و از دقت زیادی برخوردار است. بدین دلیل در این مطالعه از مدل یادشده استفاده شده است.

به‌منظور محاسبه پارامترهای ورودی، پارامترهای α ، σ_{∞} و ϕ از نمونه‌های بدون خاب با آزمایش و Λ و Λ' نیز با روش معکوس



شکل ۱۵- مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل JCA برای نمونه‌های بدون خاب (نمونه‌های با فاصله بین دو بستر ۲ و ۳ mm).

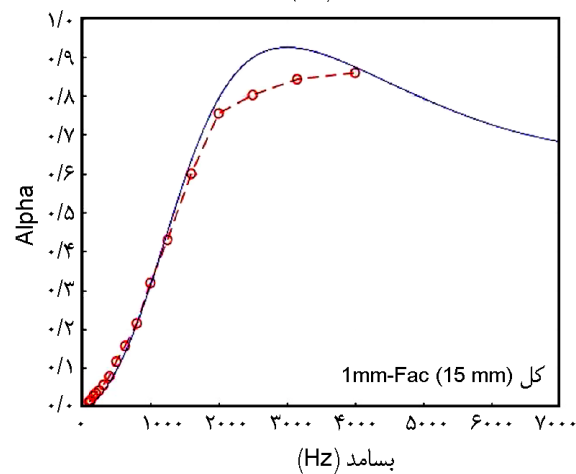
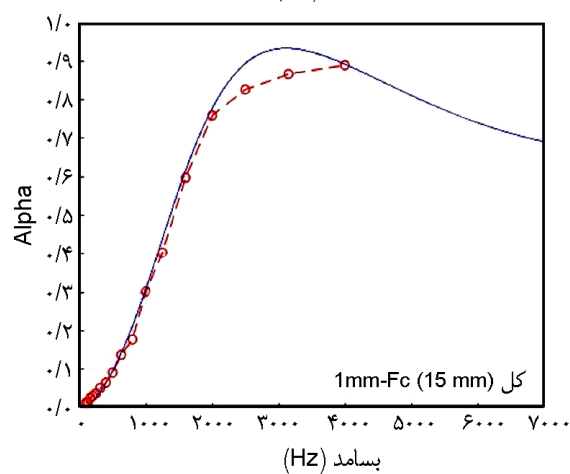
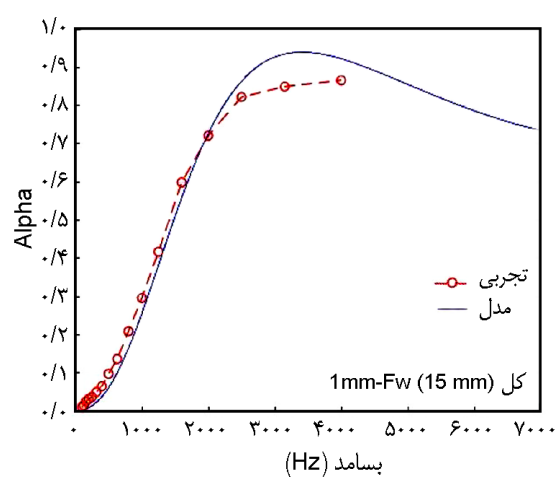
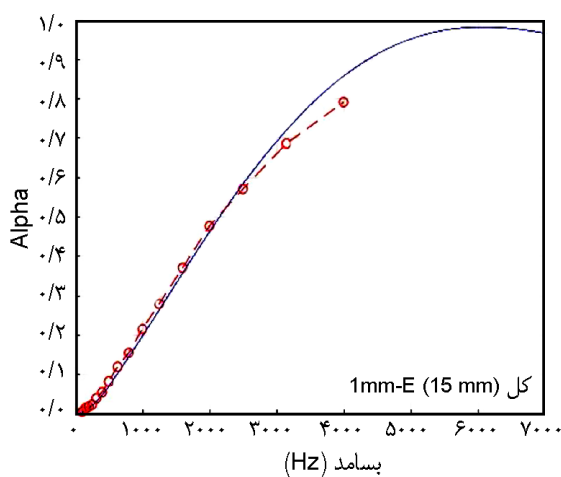
ژنتیک محاسبه شده است. مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای صوتی بخش خاب در جدول ۳ گزارش شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود، مدل با داده‌های تجربی در کل دامنه بسامد منطبق است. به‌جز در مواردی که تداخل نمونه کم است، کمی انحراف در بسامدهای زیاد میان مقادیر تجربی و

مشاهده می‌شود که در بسامدهای زیاد مقادیر پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر تجربی هستند.

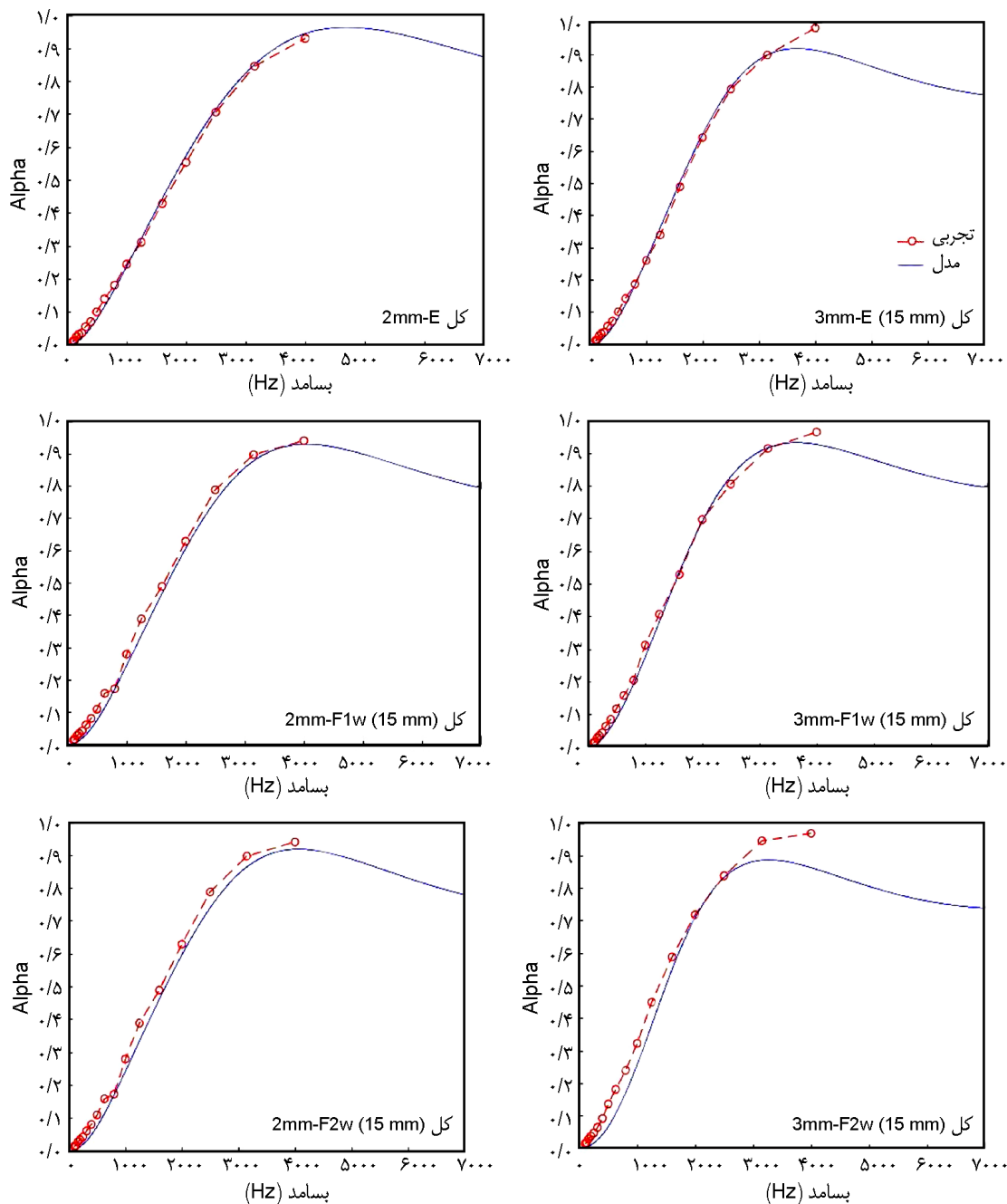
برای لایه خاب (لایه اول در سمت چپ در شکل ۷)، جذب صوت نمونه‌های قالی کامل (بستر+خاب) مدل‌سازی شده و ۵ پارامتر JCA منطقه خاب با استفاده از روش معکوس با الگوریتم

جدول ۳- پارامترهای آکوستیک نمونه‌های دارای خاب (ضخامت نمونه ۱۵ mm).

شماره	کد نمونه	ضخامت خاب (mm)	σ (Ns/m ²)	φ	α_0	Λ (μ m)	Λ' (μ m)	درصد خطا	NRC	$\bar{\alpha}$
۱	1mm-E	۷	۲۵۰۵۷	۰/۹۹	۱/۰۱	۸۹/۸	۱۶۷/۲۰	۰/۰۱۵	۰/۲۰	۰/۲۳
۲	1mm-F1ac	۷	۲۵۴۷۵	۰/۹۹	۱/۰۱	۱۰/۱۹	۱۹۴/۹۲	۰/۰۲۹	۰/۳۱	۰/۳۲
۳	1mm-F1c	۷	۲۵۴۲۵	۰/۹۹	۱/۰۱	۱۰/۲۹	۱۹۳/۹۸	۰/۰۲۴	۰/۳۰	۰/۳۱
۴	1mm-F1w	۷	۲۵۶۷۷	۰/۹۹	۱/۰۰	۱۰/۰۰	۱۵۴/۶۸	۰/۰۴۰	۰/۲۹	۰/۳۱
۵	2mm-E	۶	۲۴۰۸۴	۰/۹۹	۱/۰۱	۶۹/۳۸	۱۹۹/۹۰	۰/۰۱۱	۰/۲۳	۰/۲۸
۶	2mm-F1w	۶	۲۴۰۹۸	۰/۹۹	۱/۰۱	۲۶/۴۵	۱۷۳/۹۸	۰/۰۲۱	۰/۲۷	۰/۳۱
۷	2mm-F2w	۶	۲۴۰۷۰	۰/۹۹	۱/۰۱	۲۵/۷۷	۱۹۹/۲۸	۰/۰۱۷	۰/۲۷	۰/۳۰
۸	3mm-E	۵	۲۳۰۰۰	۰/۹۹	۱/۰۱	۷۰/۰۰	۱۹۹/۹۹	۰/۰۲۳	۰/۲۶	۰/۳۰
۹	3mm-F1w	۵	۲۳۰۸۳	۰/۹۹	۱/۰۱	۴۲/۵۷	۱۸۷/۶۰	۰/۰۲۲	۰/۲۹	۰/۳۲
۱۰	3mm-F2w	۵	۲۳۰۲۷	۰/۹۹	۱/۰۱	۳۸/۴۹	۱۶۴/۰۶	۰/۰۴۰	۰/۳۱	۰/۳۴



شکل ۱۶- مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل JCA برای نمونه‌های بدون خاب با فاصله بین دو بستر ۱ mm.



شکل ۱۷- مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل JCA برای نمونه‌های با وجود خاب با فاصله بین دو بستر ۲ و ۳ mm.

صرف‌نظر از بخش خاب در این نمونه‌ها، جذب صوت آن‌ها در حالت با و بدون خاب آزمایش شد تا بتوان اثر این دو عامل را به‌تنهایی بر جذب صوت بخش بستر قالی سنجید. همچنین، امکان پیش‌بینی جذب صوت قالی DBP با استفاده از مدل ریاضی بررسی شد که نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- ضریب جذب صوت تمام نمونه‌ها با افزایش بسامد به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد.

پیش‌بینی شده وجود دارد.

۴ نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اثر وجود مواد پرکننده در فضای خالی ایجادشده بین دو بستر در قالی‌های جدید DBP بررسی شده است. به‌منظور

نشود.

- توافق خوبی میان مدل JCA و داده‌های تجربی جذب صوت نمونه‌های قالی DBP با و بدون وجود مواد پرکننده در فضای میان دو بستر نمونه قالی‌های DBP با درصد‌های مختلف وجود دارد.
- به‌منظور مدل‌سازی جذب صوت قالی DBP، می‌توان آن را یک جاذب دولایه (لایه‌های خاب و بستر) فرض کرد.

- وجود مواد پرکننده در فضای خالی میان دو بستر به افزایش جذب صوت در نمونه‌های با و بدون خاب منجر می‌شود، اما جنس مواد پرکننده اثر چندانی بر جذب صوت ندارد.
- وجود مواد پرکننده موجب بهبود جذب صوت قالی DBP، به‌ویژه در بسامدهای میانی می‌شود.
- با افزایش درصد پرکردن فضای بین دو بستر، ضریب جذب صوت قالی تا زمانی افزایش می‌یابد که مقاومت جریان خیلی زیاد

مراجع

- [1] Y. Liu and H. Hu, "Sound absorption behavior of knitted spacer fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 80, no. 18, pp. 1949-1957, 2010.
- [2] H. Memon, Z.A. Abro, A. Ahmed, and N.A. Khoso., "Considerations while designing acoustic home textiles: a review", *J. Text. Apparel, Technol. Manage.*, vol. 9, no. 3, pp. 1-29, 2015.
- [3] R. Pieren, B. Schäffer, S. Schoenwald, and K. Eggenschwiler, "Sound absorption of textile curtains—theoretical models and validations by experiments and simulations", *Text. Res. J.*, vol. 88, no. 1, pp. 36-48, 2018.
- [4] D. Whitefoot, "1-Carpet types and requirements", *Adv. Carpet Manuf.*, pp. 1-16, 2009.
- [5] C.M. Harris, "Acoustical properties of carpet", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 27, no. 6, pp. 1077-1082, 1955.
- [6] M.E. Nute and K. Slater, "62—a study of some factors affecting sound reduction by carpeting", *J. Text. Inst.*, vol. 64, no. 11, pp. 645-651, 1973.
- [7] Y. Shoshani and M. Wilding, "Effect of pile parameters on the noise absorption capacity of tufted carpets", *Text. Res. J.*, vol. 61, no. 12, pp. 736-742, 1991.
- [8] Y.Z. Shoshani, "Effect of nonwoven backings on the noise absorption capacity of tufted carpets", *Text. Res. J.*, vol. 60, no. 8, pp. 452-456, 1990.
- [9] A. Elkhateeb, A. Adas, M. Attia, and Y. Balila, "Absorption characteristics of masjid carpets", *Appl. Acoust.*, vol. 105, pp. 143-55, 2016.
- [10] M. Küçük and Y. Korkmaz, "Sound absorption properties of acrylic carpets", *J. Text. Inst.*, vol. 108, no. 8, pp. 1398-405, 2017.
- [11] H.İ. Çelik and H.K. Kaynak, "Effect of pile yarn filament fineness and pile height on sound absorption characteristics of carpets", *Conference: Autex*, 2016.
- [12] M. Sadeghi-Sadeghabad, A. Alamdar-Yazdi, M.R. Fazel, and H. Mashroteh, "Subjective evaluation of the rug feet feeling comfort", *J. Text. Inst.*, vol. 111, no. 8, pp. 1089-96, 2020.
- [13] M. Asadi, A. Ohadi, and R. Keshavarz, "Effect of non-acoustic properties on the sound absorption of polyurethane foams", *J. Theor. Appl. Vib. Acoust.*, vol. 1, no. 2, pp. 122-132, 2015.
- [14] M. Garai and F. Pompoli, "A european inter-laboratory test of airflow resistivity measurements", *Acta Acust. United Acust.*, vol. 89, no. 3, pp. 471-478, 2003.
- [15] P. Soltani, E. Taban, M. Faridan, S.E. Samaei, and S. Amininasab, "Experimental and computational investigation of sound absorption performance of sustainable porous material: Yucca Gloriosa fiber", *Appl. Acoust.*, vol. 157, pp. 106999, 2020.
- [16] S.G. Mosanenzadeh, Design, Characterization and Modeling of Biobased Acoustic Foams, *Ph.D Dissertation*, University of Toronto, Canada, 2014.
- [17] J. Allard and N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2009.
- [18] D.L. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media", *J. Fluid Mech.*, vol. 176, pp. 379-402, 1987.
- [19] F. Mechel, "Extension to low frequencies of the formulae of delany and bazley for a bsorbing materials", *Acta Acust. United Acust.*, vol. 35, no. 3, pp. 210-213, 1976.
- [20] ISO E. 10534-1. Acoustics—Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part.1, 2001.
- [21] E. Taban, P. Soltani, U. Berardi, A. Putra, S.M. Mousavi, M. Faridan, S.E. Samaei, and A. Khavanin, "Measurement, modeling, and optimization of sound absorption performance of Kenaf fibers for building applications", *Build. Environ.*, vol. 180, pp. 107087, 2020.
- [22] T. Cox and P. d'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*, CRC, 2016.

The Effect of Weave Structure and Wadded Weft Yarn Fineness on the Physical Properties of Three-Layer Woven Fabrics

Yasaman Ekbia, Nazanin Ezazshahabi*, and Houshang Nosraty

Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box 15875-4413, Tehran, Iran

Received: 14 August 2021, Accepted: 14 December 2021

Abstract

Three-layer woven fabrics with two warp and three weft systems are considered as thick fabrics, in which the third wadded weft yarn group is used to increase the thickness, to color separate two layers, and to stitch the top and bottom layers. The purpose of this study was to investigate the effect of changing the weave pattern and the count of wadded weft yarn in the fabric structure on the physical properties of the fabric including air permeability, thickness and compression energy, thermal resistance and water vapor permeability. In this research, weft wadded yarns with the fineness of 24/2, 36/2, and 48/2 Nm and weave structures of “plain-plain”, “twill 2/2- twill 2/2” and “twill 2/2- plain”, in the top and bottom layers, were used for fabric production. After the production of fabrics, experiments were performed to investigate the effect of the wadded yarn fineness and the weave structure on the physical properties of the fabrics. Analysis of the results showed that in comparison of various weave structures, the “plain-plain” had the highest air permeability and water vapor permeability and the least thickness and heat resistance. “Twill-twill” showed the maximum thickness and heat resistance and the lowest amount of air permeability and water vapor permeability. In view of the effect of wadded yarn count, it was found that the 24/2 Nm yarn had the highest air and water vapor permeability, and the lowest thickness and thermal resistance. The 48/2 Nm yarn had the maximum thickness and thermal resistance and at the same time exhibited the minimum air and water vapor permeability.

Keywords: three-layer woven fabric, wadded weft count, weave structure, physical properties

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ezazshahabi@aut.ac.ir

به کاررفته در لایه‌های مختلف دارد. Yu و همکاران [۷]، رفتار کششی پارچه‌های چندلایه تارپودی را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود، پارچه‌های با تعداد لایه‌های بیشتر دارای مدول کششی بیشتری هستند.

بسیاری از پژوهشگران بر ویژگی‌های انتقال گرما در پارچه‌های چندلایه با تغییر پارامترهای پارچه یا تحت شرایط مختلف آزمایش، متمرکز شده‌اند. Das و همکاران [۸] در یکی از این پژوهش‌ها نشان دادند، مقاومت گرمایی پارچه‌های چندلایه با افزایش وزن واحد سطح، افزایش می‌یابد. Babus و همکاران [۹] دریافتند، خاصیت گرماعایقی با ازدیاد تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد که علت آن افزایش هوای محبوس میان لایه‌هاست. همچنین، با افزایش سرعت وزش باد، در مجموع خاصیت گرماعایقی منسوجات تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه کاهش می‌یابد.

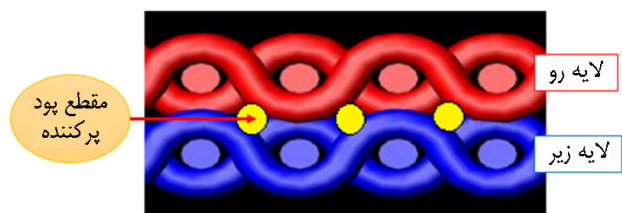
نتایج به دست آمده از پژوهش Shabaridharan و Das [۱۰] درباره مقاومت گرمایی پارچه‌های چندلایه حاکی از آن است، وزن واحد سطح لایه زیر اثرهای درخور توجهی بر مقاومت گرمایی و تبخیری پارچه ندارد. در حالی که وزن واحد سطح لایه میانی و همچنین اندازه منافذ لایه خارجی، اثر شایان ملاحظه‌ای بر مقاومت گرمایی و تبخیری سازه‌های چندلایه دارند. Wilk و همکاران [۱۱]، پژوهشی به منظور مقایسه مقاومت گرمایی سه پارچه با ساختارهای متفاوت شامل تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه با وزن واحد سطح برابر، انجام دادند. بدین منظور، مقدار توزیع دما در سطح سه ساختار را به وسیله دوربین گرمایی بررسی کردند. نتایج نشان داد، پارچه دارای ساختار سه‌لایه، دولایه و تک‌لایه به ترتیب دارای بیشترین مقدار مقاومت گرمایی هستند.

Yoneda و همکاران [۱۲] درباره نفوذپذیری بخار آب در پارچه‌های چندلایه دریافتند، حداکثر مقدار نفوذپذیری بخار آب متناسب با تعداد لایه‌ها کاهش می‌یابد. Huang و همکاران [۱۳]، به بررسی انتقال بخار آب از پارچه‌های چندلایه پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد، چگالی خطی و جرم در واحد سطح زیاد و تعداد کم منافذ به ایجاد مقاومت زیادی در برابر عبور بخار آب از پارچه‌های چندلایه منجر می‌شود. Biggi و همکاران [۱۴]، اثر طرح بافت و ساختار پارچه‌های دولایه تارپودی را بر مقدار نفوذپذیری بخار آب از پارچه بررسی کردند. طبق نتایج به دست آمده، در طرح بافت‌هایی که دارای نقاط اتصال کمتری هستند، طول نخ‌های شناور در ساختار آن‌ها بیشتر بوده و همین موضوع سبب افزایش نفوذپذیری بخار آب و هوا به داخل ساختار پارچه می‌شود. یوسفی و همکاران [۱۵]، اثر قطر الیاف موجود در نخ‌های تشکیل دهنده

ارتباط با پارچه‌های چندلایه، کیفیت و نحوه قرارگیری لایه‌های مختلف، خواص فیزیکی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سال‌های گذشته، اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل خواص فیزیکی پارچه‌های با ساختار چندلایه مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است.

Sundaramoorthy و همکاران [۱] به بررسی ارتباط بین تعداد لایه‌های تشکیل دهنده پارچه و عامل پوششی با نفوذپذیری هوا پرداختند. نتایج حاکی از آن است که نفوذپذیری هوا، با افزایش تعداد لایه‌ها به طور توانی کاهش می‌یابد و مقدار آن به طور مستقیم با عامل پوششی پارچه متناسب است. Elnashar [۲]، اثر مقدار تخلخل موجود در بافت پارچه و عوامل اثرگذار بر آن را بر نفوذپذیری هوای پارچه، بررسی کرد. کاهش موج‌داری نخ‌های تار و پود لایه رو و زیر، کاهش ضخامت لایه‌ها و کاهش عامل یکپارچه‌سازی ساختاری (integration factor construction) سبب افزایش تخلخل در پارچه‌های دولایه و در نتیجه افزایش نفوذپذیری هوا می‌شود. در بررسی ارتباط تراکم پارچه دولایه و نفوذپذیری هوا، Unal و همکاران [۳] دریافتند، با افزایش تراکم اتصالات، پارچه بافته شده دولایه پرتز و حجیم‌تر شده که به نفوذپذیری کمتر هوا منجر می‌شود. در حالی که با کاهش تراکم اتصالات، پارچه دولایه، نازک‌تر می‌شود و تراکم آن کاهش می‌یابد که نتیجه آن نفوذپذیری بیشتر هواست. Rajan و Das [۴]، رفتار نفوذپذیری هوا در پارچه‌های سه‌بعدی اسپیسر را بررسی کردند. نتایج پژوهش بیانگر آن بود که مقدار تخلخل موجود در بافت پارچه، رابطه مستقیمی با مقدار نفوذپذیری هوا دارد. همچنین، افزایش ظرفیت نخ‌های میانی که نقش اتصال دولایه بیرونی را دارند، سبب افزایش مقدار تخلخل و در نهایت افزایش نفوذپذیری هوا می‌شوند. Kumar [۵]، در پژوهشی درباره نفوذپذیری هوا از پارچه‌های دولایه حلقوی دریافت که طول حلقه‌های تشکیل دهنده پارچه اثر بسزایی بر خواص فیزیکی آن از جمله نفوذپذیری هوا دارد. به طوری که نفوذپذیری هوا در پارچه متشکل از حلقه‌های با طول کمتر، بیش از حلقه‌های با طول بیشتر است. زیرا در پارچه‌های دولایه، کاهش ضخامت پارچه سبب افزایش نفوذپذیری هوا می‌شود.

بررسی خواص مکانیکی پارچه‌های چندلایه از دیگر موضوعاتی است که پژوهشگران درباره آن پژوهش‌هایی انجام داده‌اند. Elnashar [۶] به بررسی اثر نوع بافت پارچه‌های دولایه ۱۰۰٪ پنبه‌ای بر استحکام تا پارگی پارچه‌ها پرداخت. وی دریافت، روند استحکام تا پارگی این پارچه‌ها ارتباط نزدیکی با نوع طرح بافت



شکل ۲- برش پودی پارچه‌های سه‌لایه برای نمایش موقعیت قرارگیری نخ پود پرکننده.

به‌همراه کارت ضربه و نخ‌کشی نشان داده شده‌اند. رنگ‌های قرمز، آبی و زرد به‌ترتیب نشانگر تار و پود لایه رو، تار و پود لایه زیر و پود پرکننده هستند. رنگ سبز نمایانگر نقاطی است که تار لایه زیر جهت اتصال دولایه رو و زیر روی پود لایه رو قرار می‌گیرد. خطوط مورب قرمز نشانگر قرارگیری تار لایه رو بر پود لایه زیر و پود پرکننده است.

برای نمایش بهتر چگونگی قرارگیری نخ پود پرکننده در ساختار پارچه‌های تولیدی، برش پودی آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در این پژوهش، تمام نخ‌های استفاده‌شده در تولید پارچه‌های سه‌لایه از جنس آکرلیک هستند. از نخ با نمره $24/2 \text{ Nm}$ به‌عنوان نخ تار و پود لایه رو و زیر و از نخ با نمره $24/2$ ، $36/2$ و $48/2 \text{ Nm}$ به‌عنوان نخ پود پرکننده استفاده شده است. تمام پارچه‌های تولیدشده با دستگاه نمونه‌بافی دستی ۸ ورد با ابعاد $80 \times 70 \times 60 \text{ cm}^3$ با تشکیل‌دهنده دستی بافته شده‌اند. تصویر این دستگاه در شکل ۳ قابل مشاهده است. همچنین، تراکم تار در تمام پارچه‌ها ثابت و برابر $5/5 \text{ cm}^{-1}$ است.

به‌دلیل عدم امکان واپایش دقیق تراکم پودی روی دستگاه نمونه‌بافی دستی، کلیه پارچه‌ها با حداکثر تراکم پودی ممکن بافته

پارچه‌های دولایه را بر مقدار نفوذپذیری بخار آب پارچه بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بودند که کاهش قطر الیاف، مقدار عبور بخار آب از پارچه را به‌مقدار درخور توجهی کاهش می‌دهد.

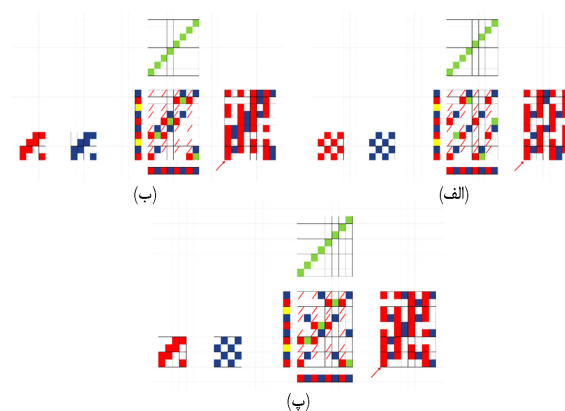
با توجه به پژوهش‌ها و بررسی‌های انجام‌شده درباره خواص فیزیکی پارچه‌های ضخیم شامل نفوذپذیری هوا، ضخامت، خواص گرمایی، نفوذپذیری بخار آب و نوع اتصالات و نیز اثر عوامل مختلف بر این خواص به‌طور مجزا در مقالات، هدف از انجام این مطالعه تولید گروهی از پارچه‌های سه‌لایه تار پودی و اندازه‌گیری و بررسی خواص فیزیکی آن‌ها از قبیل نفوذپذیری هوا و بخار آب، ضخامت و تراکم‌پذیری و غیره به‌طور جامع است. لازم به ذکر است، در این پارچه‌ها، طرح بافت لایه‌های رو و زیر و همچنین ظرافت نخ پود پرکننده متغیر بوده و در نهایت چگونگی تأثیرپذیری خواص پارچه از طرح بافت لایه‌های مختلف و همچنین ظرافت نخ پود پرکننده، تجزیه و تحلیل می‌شود.

۲ تجربی

۱-۲ روش‌ها

۱-۱-۲ مشخصات مواد

طرح بافت، نحوه قرارگیری نخ‌های تار و پود نسبت به یکدیگر است. طرح بافت‌های استفاده‌شده در این پژوهش، تافته و سرژه $2/2$ بوده که از قرارگیری هر یک از آن‌ها در لایه‌های رو و زیر، سه دسته پارچه شامل تافته-تافته، سرژه $2/2$ -سرژه $2/2$ و سرژه $2/2$ -تافته تولید شده است که به‌ترتیب در شکل‌های الف تا پ



شکل ۱- طرح بافت‌های استفاده‌شده در بافت نمونه‌ها: (الف) تافته در لایه رو و زیر، (ب) سرژه در لایه رو و زیر و (پ) سرژه در لایه رو و تافته در لایه زیر.



شکل ۳- دستگاه نمونه‌بافی دستی.

جدول ۱- تراکم پودی پارچه‌ها.

کد نمونه	طرح بافت	ظرافت نخ پود پرکننده (Nm)	تراکم نخ پود پرکننده (cm ⁻¹)	تراکم نخ پود پارچه رو (cm ⁻¹)	تراکم نخ پود پارچه زیر (cm ⁻¹)	مجموع تراکم پودی سه لایه (cm ⁻¹)	ضریب تغییرات (%)
F1	تافته- تافته	۲۴/۲	۳	۸	۸	۱۹	۳/۳۹
F2	سرژه- سرژه	۲۴/۲	۵	۱۱	۱۱	۲۷	۲/۸۵
F3	سرژه- تافته	۲۴/۲	۴	۹	۱۰	۲۳	۵/۴۴
F4	تافته- تافته	۳۶/۲	۴/۵	۱۰	۱۰	۲۴/۵	۲/۲۲
F5	سرژه- سرژه	۳۶/۲	۶	۱۲	۱۲	۳۰	۳/۸۷
F6	سرژه- تافته	۳۶/۲	۵	۱۱	۱۲/۵	۲۸/۵	۴/۵۰
F7	تافته- تافته	۴۸/۲	۵	۱۲	۱۲	۲۹	۳/۳۰
F8	سرژه- سرژه	۴۸/۲	۷	۱۴/۵	۱۴/۵	۳۶	۳/۷۲
F9	سرژه- تافته	۴۸/۲	۷	۱۳	۱۴/۵	۵/۳۴	۳/۹۲

شدند. از آنجا که طرح بافت پارچه‌ها و نمره نخ پود پرکننده بر حداکثر تعداد نخ‌های که در پارچه می‌تواند قرار گیرد، اثرگذار بوده و تراکم پودی پارچه‌ها در حالت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تراکم پودی پارچه‌ها در بازه ۱۹-۳۶ cm⁻¹ قرار دارد.

شدند. از آنجا که طرح بافت پارچه‌ها و نمره نخ پود پرکننده بر حداکثر تعداد نخ‌های که در پارچه می‌تواند قرار گیرد، اثرگذار بوده و تراکم پودی پارچه‌ها در حالت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تراکم پودی پارچه‌ها در بازه ۱۹-۳۶ cm⁻¹ قرار دارد.

۲-۱-۲ آزمون‌های انجام‌شده روی پارچه‌ها

آزمون‌های انجام‌شده، تجهیزات استفاده‌شده و روش انجام کار برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی پارچه‌های تولیدی به شرح زیر هستند: - آزمایش نفوذپذیری هوا با دستگاه سنجش نفوذ هوا مدل MO215 ساخت شرکت Shirley طبق استاندارد BS 5636 انجام شد. تصویر این دستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است. در فشارهای ۲۵ و ۵۰ Pa تحت هر فشار، مقدار نفوذپذیری هوا از نمونه‌ها در پنج نقطه اندازه‌گیری و میانگین مقادیر به‌دست‌آمده گزارش شد.

- ضخامت پارچه، فاصله میان دو سطح صاف است که پارچه تحت فشار معین بین آن دو سطح قرار می‌گیرد. برای تعیین

$$wc = \int_{P_0}^{P_m} T(p) dp \quad (1)$$

که در آن، wc انرژی فشردگی برحسب g/cm³، P_m فشار بیشینه



شکل ۵- دستگاه ضخامت‌سنج Shirley.



شکل ۴- دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری هوا.



شکل ۸- اندازه‌گیری نفوذپذیری بخار آب به‌روش فنجان‌ی.

که در آن، R_{air} ، R_{sample} و R_{stand} به ترتیب مقاومت‌های گرمایی هوا، نمونه آزمون‌شده و نمونه استاندارد برحسب $m^2 \cdot ^\circ C/W$ و T_2 ، T_1 و T_3 به ترتیب دمای گرم‌کن، دمای بین نمونه‌های استاندارد و تحت آزمون و دمای بین نمونه‌های تحت آزمون و صفحه بالایی برحسب $^\circ C$ است.

– نفوذپذیری بخار آب (WVP) عبارت از سرعت انتقال بخار آب از واحد سطح مواد مسطح با ضخامت یکسان در اثر اختلاف فشار بخار میان دو طرف سطح بررسی‌شده است که تحت دما و رطوبت مشخص ایجاد می‌شود. نفوذپذیری بخار آب از معادله‌های (۴) و (۵) محاسبه می‌شود:

$$WVP = \frac{24M}{At} \quad (4)$$

$$A = \frac{\pi d^2 \times 10^{-6}}{4} \quad (5)$$

که در آن، M کاهش وزن آب (جرم آب بخار شده از فنجان) برحسب g ، t فاصله‌های زمانی اندازه‌گیری‌ها برحسب h ، A مساحت داخلی ظرف برحسب m^2 ، d قطر داخلی ظرف برحسب m و WVP نفوذپذیری بخار آب برحسب $g/m^2 \cdot day$ است.

در این پژوهش، طبق استاندارد BS 7209 با استفاده از روش فنجان‌ی نشان‌داده‌شده در شکل ۸ به‌ازای هر گروه از پارچه‌های تولیدی، سه بار آزمون تکرار و میانگین مقادیر به‌دست‌آمده گزارش شده است.

۳ نتایج و بحث

در این بخش، نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های متفاوت که روی پارچه‌های تولیدی در این پژوهش به‌منظور بررسی خواص فیزیکی



شکل ۶- دستگاه تاگ‌متر.

برحسب g/cm^2 ، P_0 فشار اولیه برحسب g/cm^2 و $T(p)$ معرف تابع تغییرات ضخامت برحسب فشار است.

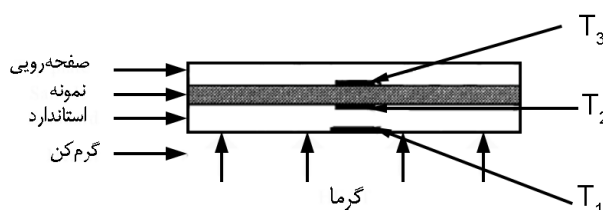
– مقدار خاصیت گرماعایقی یک منسوج، با اندازه‌گیری مقاومت آن در برابر رسانش گرما تعیین می‌شود. مقدار خاصیت گرماعایقی منسوج عبارت از نسبت اختلاف دما میان دو سمت منسوج به سرعت جریان گرما در واحد سطح آن است. از روش‌های تعیین این خاصیت، استفاده از دستگاه تاگ‌متر بوده که تصویر این دستگاه در شکل ۶ دیده می‌شود.

برای اندازه‌گیری خاصیت گرماعایقی پارچه‌های تولیدی طبق استاندارد BS 4745 از دستگاه تاگ‌متر به روش دوصفحه‌ای استفاده شده است. با توجه به شکل ۷، نمونه تحت آزمایش بین صفحه گرم زیری و صفحه عایق‌بندی‌شده بالایی قرار می‌گیرد.

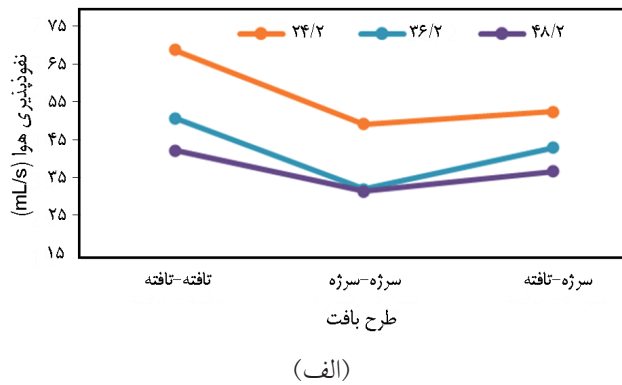
مقدار مقاومت گرمایی هوا و نمونه آزمون‌شده به ترتیب با استفاده از معادلات (۲) و (۳) محاسبه می‌شود. در این پژوهش، به‌ازای هر نمونه، آزمون سه مرتبه تکرار شده و میانگین مقادیر به‌دست‌آمده گزارش شده است:

$$R_{air} = R_{stand} \times \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2} \quad (2)$$

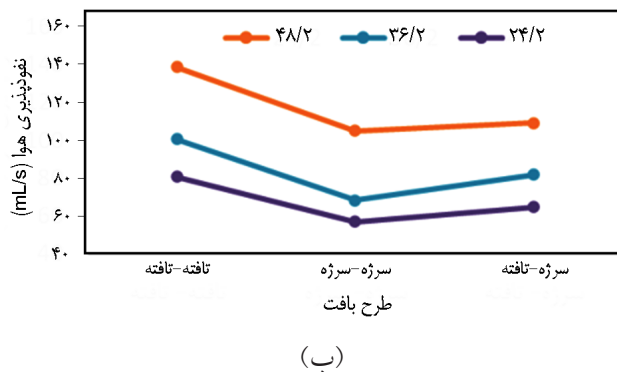
$$R_{sample} = R_{stand} \times \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2} - R_{air} \quad (3)$$



شکل ۷- تاگ‌متر با روش دوصفحه‌ای.



(الف)

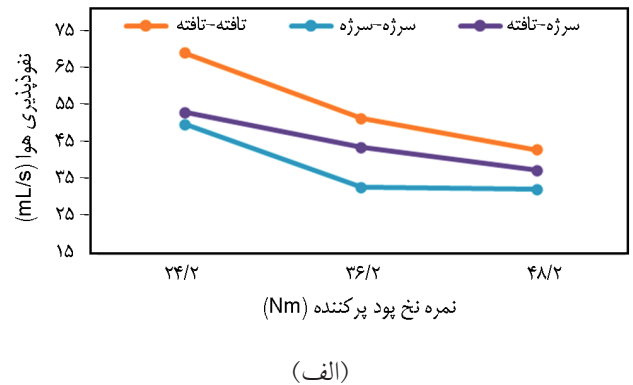


(ب)

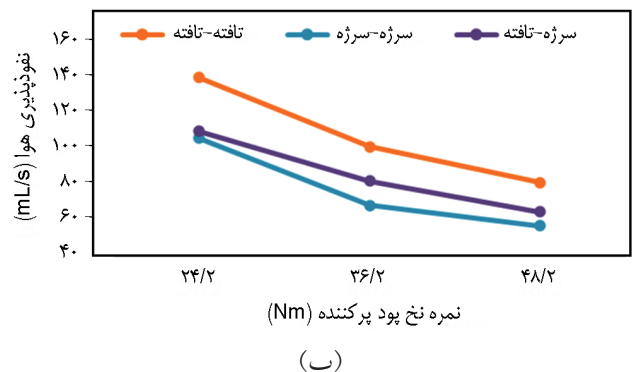
شکل ۱۱- نفوذپذیری هوا به ازای طرح بافت‌های مختلف تحت فشارهای: (الف) ۲۵ Pa و (ب) ۵۰ Pa.

عبوری از پارچه کاهش می‌یابد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، با افزایش نمره متریک، ظرافت نخ بیشتر شده که در این صورت نخ پرکننده با نمره ۲۴/۲ دارای کمترین ظرافت و نخ پرکننده با نمره ۴۸/۲ دارای بیشترین ظرافت است. با توجه به رابطه موجود میان نمره نخ پرکننده و تراکم، در پارچه‌های با تراکم بیشتر به دلیل عدم وجود منافذ زیاد و کاهش تخلخل پارچه، امکان عبور هوا کمتر است. در مقابل در پارچه‌های با تراکم کمتر، به علت وجود منافذ افزون‌تر امکان عبور هوای بیشتر وجود دارد و به بیان دیگر نفوذپذیری هوا بیشتر است. رابطه میان نفوذپذیری هوا و تراکم تحت فشار ۵۰ Pa نیز در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

در ادامه با توجه به جدول ۲ و شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار حجم هوای عبوری به ترتیب مربوط به پارچه‌های با طرح بافت تافته-تافته، سرژه-تافته و سرژه-سرژه است. پارچه با طرح بافت تافته-تافته بیشترین نفوذپذیری هوا را دارد که به دلیل نوع بافت نخ‌ها در آن است. کم‌بودن تراکم پودی پارچه در این طرح بافت و به دنبال آن افزایش خلل و فرج به عبور راحت‌تر هوا از پارچه منجر می‌شود. در صورتی که وجود فلوت‌های تاری و پودی بلند در بافت سرژه، امکان قرارگیری تعداد نخ بیشتری در واحد طول پارچه را فراهم می‌کند، در نتیجه در یک سطح مشخص،



(الف)



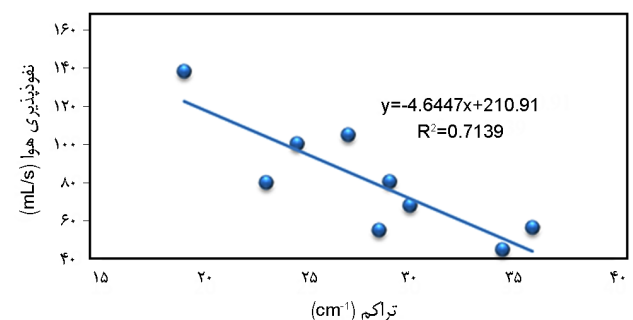
(ب)

شکل ۹- نفوذپذیری هوا برحسب نمره نخ پود پرکننده تحت فشارهای: (الف) ۲۵ Pa و (ب) ۵۰ Pa.

آن‌ها انجام شده است، گزارش و تجزیه و تحلیل می‌شوند.

۳-۱ نفوذپذیری هوا

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نفوذپذیری هوا در پارچه‌های تولیدی در فشارهای ۲۵ Pa و ۵۰ Pa ارزیابی شدند که نتایج آن‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود. شکل‌های ۹ تا ۱۱ به ترتیب نشانگر رابطه میان نفوذپذیری هوا با نمره نخ پود پرکننده، تراکم و طرح بافت است. در بررسی ارتباط نفوذپذیری هوا و نمره نخ پود پرکننده و با توجه به جدول ۲ و شکل ۹ مشاهده می‌شود، در هر دو فشار ۲۵ و ۵۰ Pa با افزایش نمره متریک نخ پود پرکننده، مقدار حجم هوای



شکل ۱۰- ارتباط نفوذپذیری هوا و تراکم پودی.

جدول ۲- نفوذپذیری هوا.

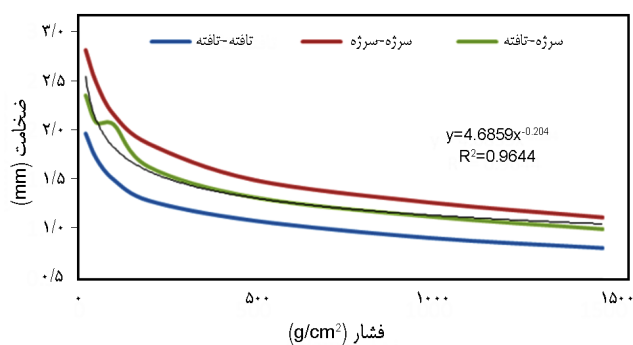
کد نمونه	طرح بافت	ظرافت نخ پود پرکننده (Nm)	حجم هوای عبوری تحت فشار ۲۵ Pa		حجم هوای عبوری تحت فشار ۵۰ Pa	
			میانگین (mL/s)	ضریب تغییرات (%)	میانگین (mL/s)	ضریب تغییرات (%)
F1	تافته- تافته	۲۴/۲	۶۹	۶/۰۶	۱۳۸/۶	۱۱/۱۷
F2	سرژه- سرژه	۲۴/۲	۴۹/۸	۱۴/۳۰	۱۰۵	۷/۵۳
F3	سرژه- تافته	۲۴/۲	۵۳	۸/۴۴	۱۰۹	۹/۴۰
F4	تافته- تافته	۳۶/۲	۵۱/۴	۱۱/۰۶	۱۰۰/۴	۱۰/۹۵
F5	سرژه- سرژه	۳۶/۲	۳۳	۱۳/۵۵	۶۸/۲	۳/۰۰
F6	سرژه- تافته	۳۶/۲	۴۳/۶	۸/۰۴	۸۱/۶	۸/۶۹
F7	تافته- تافته	۴۸/۲	۴۳	۶/۳۷	۸۰/۶	۹/۳۵
F8	سرژه- سرژه	۴۸/۲	۳۲/۴	۱۰/۱۴	۵۶/۸	۷/۱۹
F9	سرژه- تافته	۴۸/۲	۳۷/۵	۲/۶۷	۶۴/۴	۷/۰۶

رو و زیر و همچنین ظرافت نخ پود پرکننده بر قابلیت نفوذ هوا معنادار است.

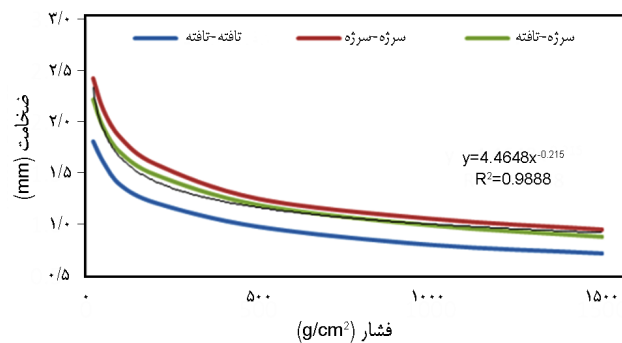
۳-۲ ضخامت و انرژی فشردگی

ضخامت نمونه‌های بافته‌شده در فشارهای 20 g/cm^2 تا 1500 g/cm^2 اندازه‌گیری شد. ضخامت نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D 1777

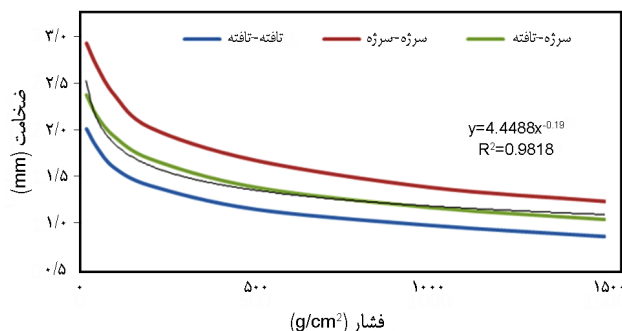
فضای خالی کمتری درون ساختار پارچه وجود دارد و پارچه همانند سدی در برابر عبور هوا عمل می‌کند. بدین دلیل، مقدار نفوذپذیری هوا کاهش می‌یابد. از آنجا که طرح بافت سرژه-تافته تلفیقی از دو طرح بافت یادشده است، حجم هوای عبوری از آن بین دو بافت قرار می‌گیرد. تحلیل آماری نتایج در سطح اطمینان ۹۵٪ با استفاده از آزمون ANOVA نشان داد، اثر طرح بافت دولایه



(ب)

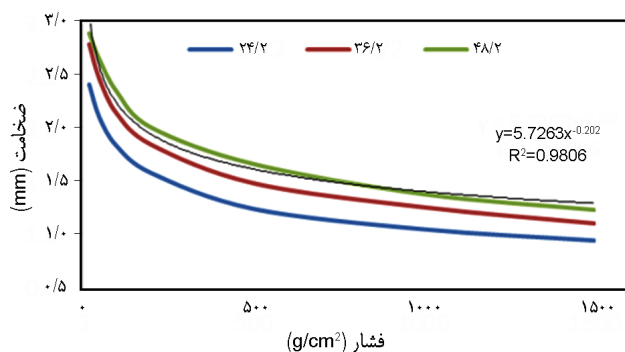


(الف)

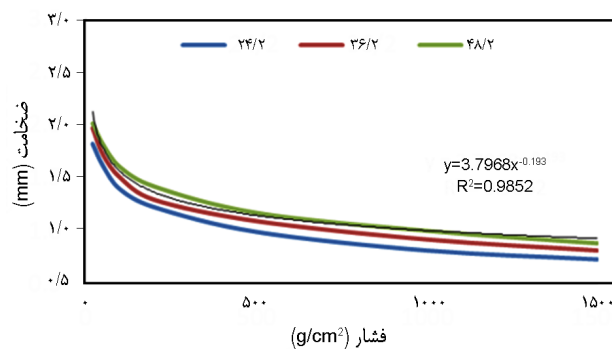


(پ)

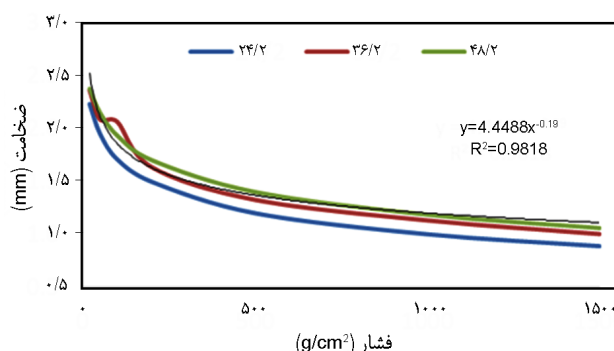
شکل ۱۲- اثر تغییر طرح بافت بر ضخامت نمونه با نخ پود پرکننده با نمره: (الف) ۲۴/۲، (ب) ۳۶/۲ و (پ) ۴۸/۲ متریک.



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۱۳- اثر تغییر ظرافت نخ پود پرکننده بر ضخامت نمونه پارچه‌های با طرح بافت: (الف) تافته-تافته، (ب) سرژه-سرژه و (پ) سرژه-تافته.

با توجه به جدول ۳ و شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، ضخامت به‌ترتیب در پارچه با طرح بافت‌های تافته-تافته، سرژه-تافته و سرژه-سرژه روند افزایشی دارد. دلیل آن به وجود فضاهای خالی بیشتر در بافت سرژه بازمی‌گردد که به پارچه حالت پفکی می‌دهد و در نهایت سبب افزایش ضخامت می‌شود. بافت تافته به دلیل وجود بافت‌رفتگی منسجم در ساختار پارچه، دارای ضخامت کمتری

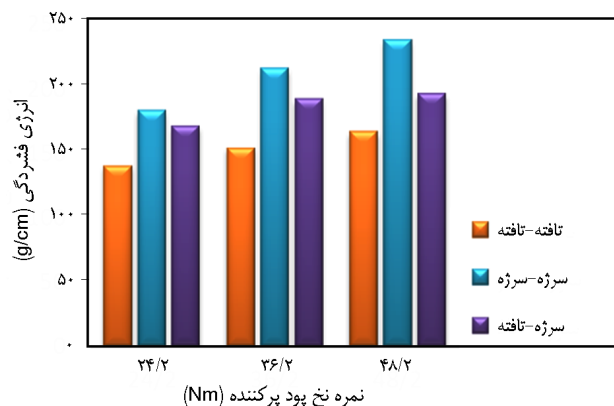
جدول ۳- ضخامت و انرژی فشردگی.

کد نمونه	ضخامت تحت فشار ۵۰ g/cm ² (mm)	انرژی فشردگی (g.cm ⁻¹)
F1	۱/۶۱	۱۴۰/۱۰
F2	۲/۱۲	۱۸۳/۰۹
F3	۱/۹۵	۱۷۱/۰۸
F4	۱/۷۲	۱۵۴/۲۶
F5	۲/۴۹	۲۱۵/۸۳
F6	۲/۰۸	۱۹۲/۲۲
F7	۱/۸۲	۱۶۶/۷۴
F8	۲/۶۷	۲۳۷/۸۳
F9	۲/۱۵	۱۹۶/۳۸

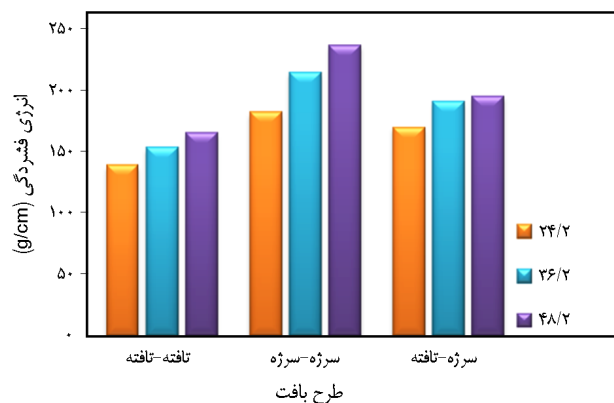
در فشار ۵۰ g/cm² در جدول ۳ آورده شده است. افزون بر این، در راستای مطالعه تراکم‌پذیری پارچه‌ها، انرژی فشردگی محاسبه شده و مقادیر آن به‌ازای گروه‌های نمونه‌های مختلف در جدول ۳ قابل مشاهده است. اثر ظرافت نخ پود پرکننده و طرح بافت بر ضخامت و انرژی فشردگی به‌ترتیب در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده‌اند.

با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش فشار، ضخامت نمونه‌ها کاهش می‌یابد. هر یک از نمودارهای ضخامت را با در نظر گرفتن روند فشرده‌شدن پارچه‌ها می‌توان به سه ناحیه تقسیم‌بندی کرد. همان‌گونه که دیده می‌شود، در ناحیه اول به‌ازای اعمال فشار کم تغییرات زیادی در ضخامت مشاهده می‌شود. در واقع با اعمال مقدار کمی فشار، ضخامت با شیب تندی کاهش می‌یابد که به علت وجود الیاف سطحی و کرک‌ها روی سطح پارچه است. در ناحیه دوم نمودارها، پارچه دارای ساختار منسجم‌تری نسبت به ناحیه اول است که سبب کاهش ضخامت با شیب ملایم‌تر می‌شود. چرا که در این مرحله، الیاف داخل نخ‌ها و همچنین نخ‌ها فشرده شده و فضای خالی بین آن‌ها درون ساختار پارچه پر می‌شود. در ناحیه سوم که به آن ناحیه غیرقابل فشردن گفته می‌شود، با افزایش فشار تغییر درخور توجهی در ضخامت نمونه روی نمی‌دهد.

دو بافت قرار می‌گیرد. در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش ظرافت نخ پود پرکننده ضخامت نمونه افزایش می‌یابد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، با افزایش ظرافت نخ پرکننده، بافت متراکم‌تر می‌شود و در نتیجه با افزایش تراکم ضخامت پارچه افزایش می‌یابد. نتایج مربوط به محاسبات انرژی فشردگی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با افزایش نمره نخ پود پرکننده، انرژی فشردگی افزایش می‌یابد. علت روند افزایشی این است که با افزایش نمره نخ، ظرافت آن افزایش می‌یابد و از آنجا که نیروی دفتین‌زنی در طول فرایند بافندگی ثابت است و پارچه‌ها با حداکثر تراکم پودی بافته شده‌اند، تراکم افزایش پیدا می‌کند. در نهایت با افزایش تراکم، مقدار انرژی مورد نیاز برای فشردگی افزایش می‌یابد. برای بررسی اثر طرح بافت بر انرژی فشردگی با توجه به شکل ۱۴ ب مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین مقدار انرژی فشردگی به ترتیب متعلق به طرح بافت سرژه-سرژه و تافته-تافته است. با توجه به مقادیر یادشده در جدول ۱، مجموع تراکم سه‌لایه در طرح بافت سرژه-سرژه، به‌ازای تمام ظرافت‌های نخ پود پرکننده، بیش از مجموع تراکم سه‌لایه در طرح بافت تافته-تافته است. بدین دلیل در واحد طول بافت سرژه، تعداد نخ بیشتری وجود داشته و همچنین ضخامت بیشتری نسبت به طرح بافت تافته-تافته دارد، در نتیجه انرژی بیشتری برای فشردگی لازم است. یادآور می‌شود، تحلیل آماری نتایج در سطح اطمینان ۹۵٪ نیز گویای اثرگذاری معنادار ظرافت نخ پود پرکننده و طرح بافت بر ضخامت و تراکم‌پذیری پارچه‌های بررسی شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۴- اثر: (الف) ظرافت نخ پود پرکننده و (ب) طرح بافت بر انرژی فشردگی.

است. از آنجا که بافت سرژه-تافته این پارچه ترکیب دو طرح بافت یادشده است، ضخامت آن نیز تحت فشارهای مختلف، بین این

۳-۳- خاصیت گرماعایقی

برای ارزیابی خاصیت گرماعایقی پارچه‌های بافته‌شده، مقاومت

جدول ۴- مقاومت گرمایی نمونه‌ها.

کد نمونه	طرح بافت	ظرافت نخ پود پرکننده (Nm)	مقاومت گرمایی	
			ضریب تغییرات (%)	میانگین (m ² .°C/W)
F1	تافته-تافته	۲۴/۲	۳۱/۵	۰/۰۵۵
F2	سرژه-سرژه	۲۴/۲	۲۷/۵	۰/۰۷۵
F3	سرژه-تافته	۲۴/۲	۱۶/۴	۰/۰۶۳
F4	تافته-تافته	۳۶/۲	۲۸/۶	۰/۰۶۳
F5	سرژه-سرژه	۳۶/۲	۹/۳۰	۰/۰۹۷
F6	سرژه-تافته	۳۶/۲	۱۴/۷	۰/۰۸۵
F7	تافته-تافته	۴۸/۲	۲۹/۰	۰/۰۷۶
F8	سرژه-سرژه	۴۸/۲	۲۳/۸	۰/۱۰۸
F9	سرژه-تافته	۴۸/۲	۱۹/۷	۰/۰۹۳

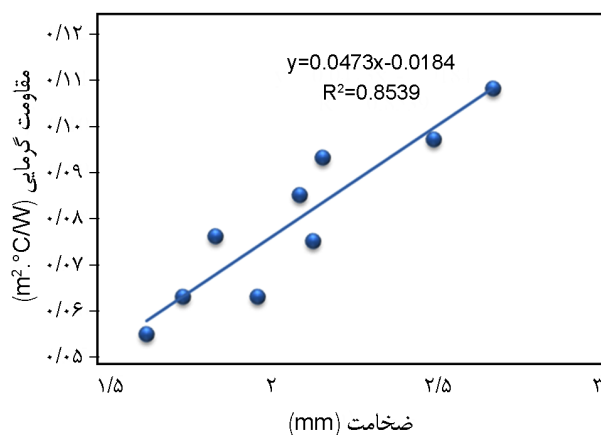
مقاومت گرمایی بیشتری دارد. افزون بر این، ساختار پفکی این طرح بافت باعث محبوس شدن حجم هوای بیشتری درون ساختار پارچه می‌شود. از آنجا که هوا به عنوان عایق گرما عمل می‌کند، این موضوع باعث افزایش مقدار مقاومت گرمایی می‌شود. در صورتی که طرح بافت تافته-تافته تراکم کمتری دارد و در ساختار این پارچه فضای خالی کمتری برای حبس هوا وجود دارد، در نتیجه این پارچه مقاومت گرمایی کمتری دارد. در حالتی که بافت لایه رو تافته و بافت لایه زیر سرژه باشد، به دلیل اثر ترکیبی این دو طرح بافت، خاصیت گرماعایقی این پارچه میان دو ساختار تافته-تافته و تافته-سرژه واقع می‌شود.

رابطه میان ضخامت و مقاومت گرمایی در شکل ۱۶ قابل مشاهده است. با توجه به معادله مقاومت گرمایی که به صورت $R=d/k$ است، این پارامتر به طور مستقیم با ضخامت (d) و به طور عکس با رسانندگی گرمایی (K) در ارتباط است. با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، در نمونه‌های با ضخامت بیشتر، مقاومت گرمایی بیشتر است. مقدار مقاومت گرمایی پارچه‌ها با ضریب انطباق خوبی تحت تأثیر ضخامت پارچه قرار می‌گیرد. ($R^2=0.8539$)

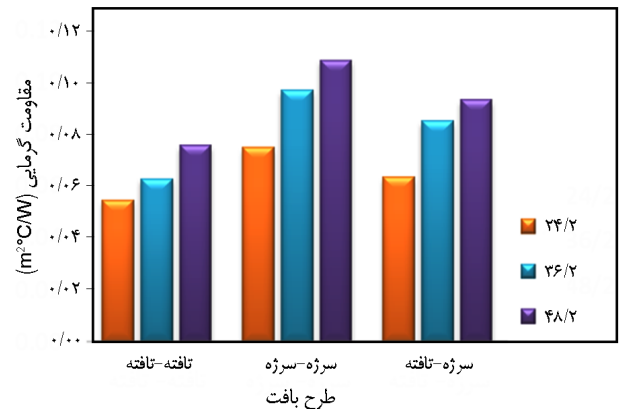
شکل ۱۷ نشانگر رابطه میان تراکم و ضخامت پارچه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ضخامت پارچه‌ها تحت تأثیر تراکم پارچه ناشی از ظرافت نخ پود پرکننده قرار می‌گیرد و نمونه‌های با تراکم بیشتر، ضخامت بیشتری دارند. همچنین براساس نتایج آزمون‌های آماری ANOVA در سطح اطمینان ۹۵٪، مقدار مقاومت گرمایی پارچه‌های سه‌لایه تولیدی به طور معناداری تحت تأثیر ظرافت نخ پود پرکننده و طرح بافت قرار گرفته است.

۳-۴ نفوذپذیری بخار آب

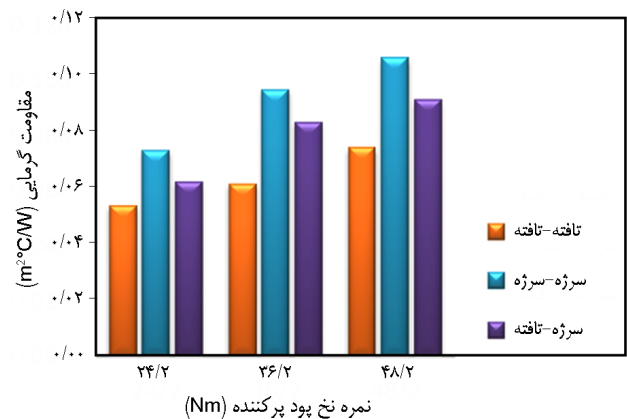
به منظور اندازه‌گیری نفوذپذیری بخار آب، سه نمونه از هر بافت



شکل ۱۶- رابطه میان ضخامت و مقاومت گرمایی.



(الف)

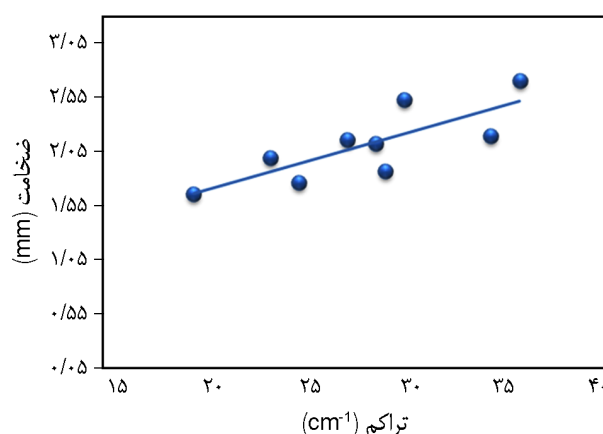
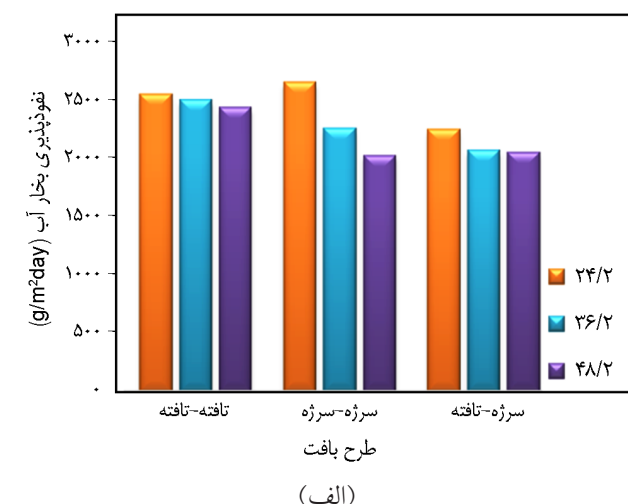


(ب)

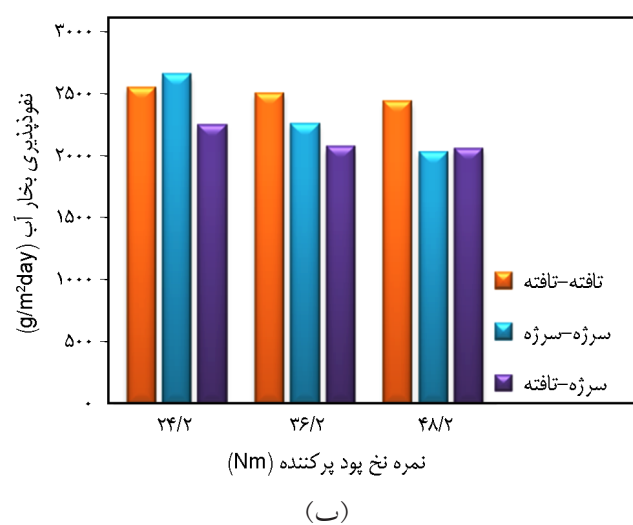
شکل ۱۵- اثر: (الف) ظرافت نخ پود پرکننده و (ب) طرح بافت بر مقاومت گرمایی.

گرمایی سه نمونه از هر بافت اندازه‌گیری شد. جدول ۴ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت گرمایی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. اثر ظرافت نخ پود پرکننده و طرح بافت بر مقدار مقاومت گرمایی نمونه‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۵ الف مشاهده می‌شود، در یک طرح بافت مشخص، مقاومت گرمایی با افزایش ظرافت نخ پود پرکننده افزایش می‌یابد. زیرا، به دنبال افزایش ظرافت نخ پود پرکننده تراکم پارچه افزایش می‌یابد که نتیجه آن کاهش تعداد منافذ باز در پارچه است. از این رو، پارچه نفوذپذیری هوا را ندارد که سبب افزایش مقاومت گرمایی در پارچه می‌شود. همچنین، در بررسی رابطه میان طرح بافت و مقاومت گرمایی با توجه به جدول ۴ و شکل ۱۵ ب مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین مقدار مقاومت گرمایی به ترتیب متعلق به طرح بافت‌های سرژه-سرژه و تافته-تافته است. طرح بافت سرژه-سرژه به دلیل داشتن ساختار متراکم‌تر و کاهش امکان جریان‌یابی هوا از یک سمت به سمت دیگر پارچه،



شکل ۱۷- رابطه میان تراکم و ضخامت.



شکل ۱۸- اثر: (الف) ظرافت نخ پود پرکننده و (ب) طرح بافت بر نفوذپذیری بخار آب.

برای عبور بخار آب از پارچه می‌شود. در طرح بافت سرژه-تافته

آزمون شد. نتایج آزمون‌ها در جدول ۵ و رابطه ظرافت نخ پود پرکننده و طرح بافت در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۵ و شکل ۱۸ الف مشاهده می‌شود، با افزایش نمره نخ پود پرکننده نفوذپذیری بخار آب کاهش می‌یابد. زیرا، افزایش نمره متریک پود پرکننده به معنای افزایش ظرافت نخ است که به افزایش تراکم منجر می‌شود. این موضوع، سبب کاهش تعداد منافذ و تخلخل پارچه می‌شود و در نتیجه مقدار بخار آب عبوری از پارچه کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۵ و شکل ۱۸ ب می‌توان تا حدودی اظهار کرد، پارچه‌های به ترتیب با طرح بافت تافته-تافته، سرژه-تافته و سرژه-سرژه دارای بیشترین مقدار عبور بخار آب هستند. در یک ظرافت مشخص نخ پود پرکننده، علت نفوذپذیری بخار آب زیاد طرح بافت تافته-تافته، کم بودن تراکم پودی پارچه و مقدار زیاد خلل و فرج در پارچه است. در طرح بافت سرژه-سرژه، به دلیل وجود فلوت‌های تار و پودی بلند در ساختار بافت، امکان قرارگیری تعداد نخ بیشتری در طول پارچه وجود دارد که مانعی

جدول ۵- نفوذپذیری بخار آب.

کد نمونه	طرح بافت	ظرافت نخ پود پرکننده (Nm)	نفوذپذیری بخار آب (g/m².day)
F1	تافته-تافته	۲۴/۲	۲۵۵۱
F2	سرژه-سرژه	۲۴/۲	۲۶۵۵
F3	سرژه-تافته	۲۴/۲	۲۲۴۹
F4	تافته-تافته	۳۶/۲	۲۵۰۷
F5	سرژه-سرژه	۳۶/۲	۲۲۶۲
F6	سرژه-تافته	۳۶/۲	۲۰۷۱
F7	تافته-تافته	۴۸/۲	۲۴۴۰
F8	سرژه-سرژه	۴۸/۲	۲۰۳۰
F9	سرژه-تافته	۴۸/۲	۲۰۵۸

مربوط به پارچه با طرح بافت‌های سرژه-سرژه، سرژه-تافته و تافته-تافته است. افزایش ضخامت پارچه به علت افزایش تراکم در طرح بافت‌های یادشده است، زیرا، تعداد نخ بیشتری در واحد طول پارچه قرار دارند و درواقع باعث فشردگی در ساختار بافت می‌شود. همچنین، با افزایش تراکم و ضخامت مقدار انرژی بیشتری برای فشردگی پارچه نیاز است.

- مقدار خاصیت گرماعایقی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تاگ‌متر به دست آمد. این خاصیت از پارچه‌های سه‌لایه با افزایش ظرافت نخ پود پرکننده حداقل به مقدار ۳۸٪ افزایش پیدا می‌کند. زیرا، تراکم پارچه افزایش می‌یابد که نتیجه آن کاهش تعداد منافذ باز در پارچه است، در نتیجه امکان جریان هوا و گرما وجود ندارد. با توجه به نتایج به دست آمده، پارچه با طرح بافت‌های سرژه-سرژه، سرژه-تافته و تافته-تافته به ترتیب دارای بیشترین مقدار خاصیت عایق گرمایی هستند. در بافت سرژه به دلیل وجود فلوت‌های بلند و ساختار پفکی امکان حبس هوا و جلوگیری از اتلاف گرمای پارچه به واسطه خاصیت عایق هوا وجود دارد.

- با افزایش ظرافت نخ پود پرکننده، قابلیت گذردهی بخار آب در پارچه‌های تولیدی دارای روند کاهشی با نسبت حداقل ۴٪ و حداکثر ۲۳٪ به ازای طرح بافت‌های مختلف است. زیرا، افزایش نمره پود پرکننده به افزایش تراکم منجر شده که این مسئله سبب کاهش تعداد منافذ باز در پارچه می‌شود و در نتیجه مقدار بخار آب عبوری از پارچه کاهش پیدا می‌کند. به طور کلی، درباره رابطه موجود میان طرح بافت و نفوذپذیری بخار آب می‌توان گفت که به ترتیب پارچه‌های با طرح بافت تافته-تافته، سرژه-تافته و سرژه-سرژه دارای بیشترین نفوذپذیری بخار آب هستند. در طرح بافت تافته-تافته، به دلیل وجود تراکم کم و مقدار خلل و فرج زیاد در پارچه امکان عبور بخار آب بیشتری وجود دارد. در طرح بافت سرژه-سرژه به علت وجود فلوت‌های بلند تاری و پودی زیاد در ساختار پارچه و تراکم زیاد، پارچه به عنوان مانعی در برابر عبور بخار آب عمل می‌کند.

مراجع

- [1] S. Sundaramoorthy, P.K. Nallampalayam, and S. Jayaraman, "Air permeability of multilayer woven fabric systems", *J. Text. Inst.*, vol. 102, no. 3, pp. 189-202, 2011.
- [2] E.A. Elnashar, "Volume porosity and permeability in

که پارچه از دو بافت یادشده ایجاد شده است، نفوذپذیری بخار آب آن در محدوده‌ای بین این دو بافت قرار می‌گیرد.

تحلیل آماری نتایج نیز نشان داد که اثر طرح بافت و ظرافت نخ پود پرکننده بر نفوذپذیری بخار آب از پارچه‌های تولیدی معنادار است ($\alpha=0/05$).

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پارچه‌های تاری‌پودی با دو سامانه تاری و سه سامانه پودی تولید شده‌اند که یک دسته از نخ‌های پود نقش پرکننده را ایفا می‌کنند. این پژوهش به منظور بررسی اثر ظرافت نخ پود پرکننده و طرح بافت پارچه‌های رو و زیر بر خواص فیزیکی پارچه انجام شده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

- حجم هوای عبوری از پارچه‌ها تحت فشارهای ۲۵ و ۵۰ Pa اندازه‌گیری شده است. براساس نتایج به دست آمده، مقدار نفوذپذیری هوا با افزایش ظرافت نخ پود پرکننده به مقدار حدود ۴۰٪ کاهش می‌یابد. این کاهش، به دلیل افزایش تراکم پارچه‌ها و کاهش منافذ در ساختار پارچه به دنبال افزایش ظرافت نخ پود پرکننده است. در بررسی اثر طرح بافت، بیشترین مقدار نفوذپذیری هوا مربوط به پارچه با طرح بافت تافته-تافته است که علت آن نبود فضای خالی برای حبس هوای عبوری بوده و کمترین مقدار متعلق به طرح بافت سرژه-سرژه است.

- در بررسی ضخامت، ضخامت نمونه‌ها در فشارهای $1500-2000 \text{ g/cm}^2$ نتایج نشانگر روند افزایشی ضخامت و انرژی فشردگی به ترتیب به مقادیر حداقل ۱۳ و ۱۹٪ به دنبال افزایش ظرافت نخ پود پرکننده است. این روند را می‌توان به افزایش تراکم در پارچه‌های با نخ پود پرکننده ظریف‌تر نسبت داد. در بررسی ارتباط بین طرح بافت با ضخامت و انرژی فشردگی نتایج نشان می‌دهد، بیشترین ضخامت و انرژی فشردگی به ترتیب

double-layer woven fabrics", *AUTEX Res. J.*, vol. 5, no. 4, pp. 207-218, 2005.

- [3] P.G. Unal, G.O. Kayseri, and Z.E. Kanat, "The effect of different connections in double layered woven fabrics on comfort properties", *Fiber. Polym.*, vol. 13,

- no. 2, pp. 258-263, 2012.
- [4] T.P. Rajan and S. Das, "Evaluation of air permeability behavior of warp knitted spacer fabrics", *Indian J. Fibre Text. Res.*, vol. 45, pp. 32-39, 2020.
- [5] S.T. Kumar, R.M. Kumar, and S.B. Kumar, "The effect of raw material combination, yarn count, fabric structure and loop length on the thermal properties of Eri silk bi-layer knitted fabrics", *Ind. Text.*, vol. 72, no. 3, 2021.
- [6] E.A. Elnashar, "The influence of the weave and the method of stitching on selected mechanical properties of woven double fabrics", *AUTEX Res. J.*, vol. 8, no. 2, pp. 41-43, 2008.
- [7] S. Yu, M. Dong, G. Jiang, and P. Ma, "Compressive characteristics of warp-knitted spacer fabrics with multi-layers", *Compos. Struct.*, vol. 256, pp. 113016, 2020.
- [8] A. Das, K. Shabaridharan, and B. Biswas, "Study on heat and moisture vapour transmission characteristics through multilayered fabric ensembles", *AUTEX Res. J.*, vol. 36, no. 4, pp. 410-414, 2011.
- [9] R.F. Babus'Haq, M.A.A. Hiasat, and S.D. Probert, "Thermally insulating behavior of single and multiple layers of textiles under wind assault", *Appl. Energy*, vol. 54, no. 4, pp. 375-391, 1996.
- [10] K. Shabaridharan and A. Das, "Analysis of thermal properties of multilayered fabrics by full factorial and taguchi method", *J. Text. Inst.*, vol. 105, no. 1, pp. 29-41, 2014.
- [11] E. Wilk, P. Swaczyna, E. Witczak, and M. Lao, "Studying the impact of multilayer fabric on the characteristic of temperature distribution under the influence of fire", *Text. Res. Inst.*, vol. 5, no. 15, pp. 92-103, 2021.
- [12] M. Yoneda, Y. Mizuno, and J. Yoneda, "Measurement of water absorption perpendicular to fabric plane in two-and multi-layered fabric systems", *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 2/3, pp. 57-64, 1994.
- [13] J. Huang, "Review of heat and water vapor transfer through multilayer fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 86, no. 3, pp. 1-12, 2016.
- [14] A.B. Biggi, W.L.F. Santos, and A.M.M.F. Rocha, "The effect of structural characteristics on thermal and moisture management properties of 3D fabrics designed for pressure relief applications", *J. Text. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 2, 2018.
- [15] B. Yousefi, M.H. Varkiani, S. Saharkhiz, and Z.K. Toussi, "The effect of inner layer fiber diameter and fabric structure on transplanar water absorption and transfer of double-layered knitted fabrics", *Fiber. Polym.*, vol. 22, pp. 578-586, 2021.

راهنمای نگارش مقالات

نشریه نساجی و پلیمر از انتشارات انجمن علوم و فناوری نساجی بوده که هدف از انتشار آن، کمک به ارتقای سطح فعالیت‌های علمی و پژوهشی و فراهم آوردن محیطی علمی برای تبادل ایده‌ها و یافته‌های پژوهشی میان‌رشته‌ای در زمینه‌های پلیمرها، الیاف و ساختارهای نساجی است.

۱- زمینه‌های مورد پذیرش

در این نشریه، مقالات پژوهشی در زمینه‌های علوم الیاف، شیمی و فیزیک الیاف، پلیمرها و آمیخته‌های تشکیل‌دهنده الیاف، فرایندها و فناوری‌های نوین نساجی، مذاب‌ریسی، ترریسی، خشک‌ریسی، علوم و مهندسی نفاخته‌ها، خواص و تولید نانوالیاف (شامل الکتروریسی)، رنگ‌دهنده‌ها و جنبه‌های فیزیکی-شیمیایی رنگرزی، تجزیه و شناسایی پلیمرهای تشکیل‌دهنده الیاف، تخریب، منسوجات فنی و پزشکی، زمین‌منسوج‌ها، تقویت‌کننده‌ها و کامپوزیت‌ها در نساجی، صافی‌ها و غشاهای الیافی، زیست‌مواد، منسوجات هوشمند، مدیریت آلودگی و پسماندها، پلیمرهای عامل‌دار و علوم و فناوری منسوجات و پوشاک پذیرفته می‌شوند.

دفتر نشریه در پذیرش، رد، چاپ و اصلاح مقالات آزاد است. مقالات به‌طور برخط در پایگاه نشریه به نشانی <http://www.itast.ir> پذیرش می‌شوند.

۲- تعهدات نویسندگان

- الف- مسئولیت مطالب مقاله بر عهده نویسنده(گان) آن است و نشریه نساجی و پلیمر هیچ مسئولیتی در برابر مقالات چاپ‌شده ندارد.
- ب- مقاله ارسالی به این نشریه نباید قبلاً در نشریه دیگری اعم از نشریات بین‌المللی یا داخلی به‌چاپ رسیده باشد، مگر آنکه خلاصه‌ای از آن در سمینارها یا گردهمایی‌ها ارائه شده باشد. در این صورت، باید آن بخش از مقاله به گردهمایی مربوط ارجاع شود.
- پ- مقاله در مدت بررسی در این نشریه و اعلام نتیجه نهایی، نباید به‌طور هم‌زمان به نشریه دیگری برای بررسی و چاپ ارسال شود.
- ت- افزودن، حذف یا تغییر ترتیب نویسندگان و نیز تغییر نویسنده مسئول مکاتبات پس از طی مراحل داوری مجاز نیست.
- ث- نویسنده(گان) متعهد می‌شوند، آن بخش از مقاله که بدون ارجاع به منبع بوده، از نوشتار دیگری اخذ نشده است. در صورت احراز چنین مسئله‌ای، مسئولیت هرگونه ادعا و پاسخگویی به آن برعهده ایشان خواهد بود.
- ج- مقاله باید طبق راهنمای نگارش مقالات تنظیم و همراه با نامه مؤلف عهده‌دار مکاتبات خطاب به سردبیر با ذکر عنوان مقاله به‌طور برخط به پایگاه نشریه ارسال شود.
- چ- مقالات پذیرفته‌شده برای چاپ، پس از ویرایش، صفحه‌آرایی و تصحیح برای تأیید نهایی به مؤلف مسئول ارسال می‌شود. پس از طی بازه زمانی تعیین‌شده، هیچ ادعایی از سوی نویسنده(گان) قابل پذیرش نخواهد بود.

۳- ساختار مقاله

- مقاله باید در برنامه Word به صورت یک‌ستونی تایپ و با فرمت Word 97-2003 Document ذخیره شود. حاشیه‌ها از هر طرف ۲/۵ cm و از قلم BZar 13 برای تایپ متن استفاده شود. نکات زیر در تنظیم مقاله باید مدنظر قرار گیرند:
- شماره مراجع استفاده‌شده باید به ترتیب در متن درون کروه آورده شود.
- تا حد امکان از درج واژه‌های انگلیسی با رسم‌الخط فارسی خودداری شود.
- از واحدهای بین‌المللی SI در سراسر مقاله استفاده شود. واحدها باید به زبان انگلیسی در کنار کمیت‌های آن‌ها آورده شود.
- کلیه نمادها و علامت‌های اختصاری به‌کاررفته برای نشان‌دادن متغیرها، ثابت‌ها، مقادیر و خواص، باید در نخستین مورد کاربرد توضیح داده شوند.
- واژگان لاتین باید در پراکنش پس از اولین معادل فارسی آن‌ها درج شوند.

۱-۳ مقاله پژوهشی

- الف- عنوان مقاله: به دو زبان فارسی (قلم BZar Bold 16) و انگلیسی (قلم Times New Roman Bold 14) و حداکثر در ۱۵ واژه گویا
- ب- نام نویسنده یا نویسندگان و محل کار آن‌ها: نام و نشانی کامل نویسندگان به دو زبان فارسی (قلم BZar 13) و انگلیسی (قلم Times New Roman 11)

همراه با پیام‌نگار نویسنده عهده‌دار مکاتبات. محل کارهای مختلف نویسندگان با شماره‌گذاری و نام نویسنده با علامت ستاره مشخص شوند.

پ- چکیده: به دو زبان فارسی (قلم BZar 12) و انگلیسی (قلم Times New Roman 10) در ۲۵۰-۲۰۰ واژه و کاملاً مطابق با هم. چکیده باید دربرگیرنده هدف از انجام پژوهش، روش انجام آن، نتایج به دست آمده و نتیجه‌گیری باشد.

ت- واژه‌های کلیدی: ۵ واژه به دو زبان فارسی و انگلیسی (با همان قلم‌های چکیده).

ث- بخش‌های اصلی مقاله: متن مقاله پژوهشی باید شامل به ترتیب مقدمه، تجربی، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و مراجع باشد. بخش تجربی شامل زیربخش‌های مواد، دستگاه‌ها و روش‌هاست.

یادآوری: در برخی از مقالات درج فهرست اختصارها و نمادها و نیز قدردانی لازم است که در این صورت باید پیش از مراجع آورده شوند.

۳-۲ مقاله مروری

الف- مقالات مروری فاقد بخش‌های تجربی و نتایج و بحث هستند.

ب- مقالات مروری باید دارای حداقل ده هزار و حداکثر سیزده هزار واژه باشند.

پ- تعداد مراجع حداقل ۹۰ مرجع باشد و به مقالات خود نویسندگان (حدود ۸ تا ۱۰ مقاله) در زمینه مرتبط با موضوع مقاله ارجاع داده شود.

۳-۳ جدول‌ها

الف- تمام جدول‌ها به ترتیب آمدن در متن شماره‌گذاری شوند. از همان قلم متن برای بالانویس و متن جدول استفاده شود.

ب- مقادیر درج شده در جدول باید دارای واحد باشند. موارد نیازمند توضیح باید نشانه‌گذاری شده و نشانه‌ها در پانویس زیر جدول توضیح داده شوند.

پ- اعداد جدول فارسی باشند و از درج اعداد لاتین خوددای شود.

ث- در صورتی که جدول کار خود نویسنده نباشد، درج مرجع در انتهای بالانویس جدول الزامی است.

۳-۴ شکل‌ها و عکس‌ها

الف- تمام شکل‌ها به ترتیب آمدن در متن شماره‌گذاری شوند. از همان قلم متن برای زیرنویس شکل استفاده شود.

ب- مقادیر در کنارنویس شکل باید دارای واحد باشند و توضیح نمودارها در شکل آورده شود.

پ- در صورتی که شکل کار خود نویسنده نباشد، درج مرجع در انتهای زیرنویس شکل الزامی است.

ت- عکس‌ها باید سیاه و سفید با عرض ۸/۵ cm یا ۱۸ cm، وضوح تقریبی ۳۰۰ dpi، به شیوه TIF یا JPEG و با ذکر بزرگ‌نمایی آورده شوند.

ث- اعداد شکل فارسی باشند و از درج اعداد لاتین خوددای شود.

۳-۵ معادلات ریاضی و واکنش‌های شیمیایی

الف- تمام معادلات ریاضی و واکنش‌های شیمیایی به ترتیب آمدن در متن شماره‌گذاری شوند.

ب- سازوکارهای شامل چند واکنش شیمیایی، با عنوان طرح آورده شوند و در صورت تعدد شماره‌گذاری شوند.

۳-۶ مراجع

الف- مراجع باید به ترتیب آمدن در متن شماره‌گذاری و درون کروشه درج شوند.

ب- از مراجع روزآمد استفاده شود.

پ- در صورت آوردن doi، شماره آن باید در انتهای مشخصات مرجع درج شود.

پ- مشخصات کامل به زبان انگلیسی (قلم Times New Roman Bold 11) در بخش مراجع مطابق دستور کار زیر آورده شوند:

کتاب انگلیسی:

- [1] M.K. Singh and A. Singh, *Characterization of Polymers and Fibres*, 1st ed., Cambridge: Woodhead, 2021, pp. 30-45.
 [2] Engineered Polymeric Fibrous Materials, 1st ed., M. Latifi Ed. Cambridge: Woodhead, 2021, pp. 152-167.

کتاب فارسی:

- [1] M. Feiz and M. Sobhanifar, *Chemistry and Application of Colorants on Textile Fibers (Persian)*, Isfahan: Arkan Danesh, 2018, pp. 65-78.

مقاله انگلیسی:

- [1] D. Rogale, S.F. Rogale, G. Majstorović, and G. Čubrić, "Thermal properties of thermal insulation chambers", *Text. Res. J.*, vol. 91, no. 9-10, pp. 953-961, 2021.

مقاله فارسی:

- [1] R. Semnani Rahbar and R. Ghasemi, "Effect of polymer structure and processing parameters on the artificial turf pile fiber properties", *Polymerization (Persian)*, vol. 8, no. 27, pp. 63-73, 2018.

پایان نامه:

- [1] F. Zamani, "Engineering of structural properties of PLGA nanofibrous scaffold for neural cell cultur", *Ph.D dissertation*, Dept. Text. Eng., Amikabir University of Technology, Tehran, Iran, 2013.

کنفرانس:

- [1] J. Pakarinen and M. Karjalainen, "An apparatus for measuring string vibration using electric field sensing", in *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference*, pp. 739-742, 2003.