

Effect of crosslinking agent type on the properties of PVA-Sodium Alginate-Nanocellulose pad obtained by electrospinning

Hasibeh Saeidi¹, Mohammad Reza Dehghani Firouzabadi^{*2}, Hamid Reza Rudi³,
Sahab Hedjazi⁴, Mozhdeh Mashkour⁵, Mostafa Govahi⁶

1. Ph.D. Student in Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: hasibeh.saeidi@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mdehghani@gau.ac.ir
3. Associate Prof. of Natural Resources Engineering- Wood and Paper Sciences and Industries, Dept. of Biorefining, Faculty of Modern Technologies and Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Zirab Campus, Iran. E-mail: h_rudi@sbu.ac.ir
4. Associate Prof., Dept. of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: shedjazi@gau.ac.ir
5. Assistant Prof., Dept. of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: m.mashkour@gau.ac.ir
6. Assistant Prof., Dept. of Nanobiotechnology, Faculty of Biotechnology, Specialized University of New Technologies, Amol, Iran. E-mail: m.govahi@ausmt.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 12.14.2024

Revised: 01.01.2025

Accepted: 01.03.2025

Keywords:

Cross-linking type,
Electrospinning,
Nanofibers,
Tensile strength

ABSTRACT

Background and Objectives: The utilization of electrospun pads incorporating cross-linking agents has garnered considerable interest in recent years due to their enhanced mechanical and biological characteristics. These pads hold immense potential for applications in tissue engineering and the restoration of damaged tissues. This study aimed to explore the impact of different cross-linking agents, including calcium chloride, citric acid, glutaraldehyde, and zinc chloride on the mechanical properties of electrospun pads composed of polyvinyl alcohol (PVA), sodium alginate (NaAlg), and cellulose nanofibers (CNF).

Materials and Methods: Initial optimization of process variables was conducted to prepare the electrospun pads. A solution containing a blend of PVA, NaAlg, and CNF was formulated, to which varying amounts of cross-linking agents were added at different concentrations. Electrospinning of these solutions was carried out under optimal conditions, and the Tensile Strength of the resultant pads was evaluated. Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses were performed to assess the functional groups and morphology of the pads. Response surface methodology (RSM) using central composite design (CCD) was employed to investigate the impact of experimental variables, with data analysis conducted using Design Expert 12.

Results: Analysis utilizing Response Surface Methodology (RSM) revealed a significant enhancement in the tensile strength of the electrospun pads with the addition of crosslinking agents. Pads containing calcium chloride and glutaraldehyde exhibited increases in tensile strength by 77% and 40%, respectively. Moreover, citric acid and zinc chloride boosted tensile strength by up to 29% compared to the control sample. SEM images illustrated that calcium chloride brought the fibers closer and

increased interconnections. ATR-FTIR results indicated alterations and the formation of new functional groups, particularly in the stretching vibration regions of O-H and C=O bonds. Furthermore, ATR-FTIR analysis demonstrated that the presence of calcium chloride facilitated interactions of calcium ions with hydroxyl and carboxyl groups in the polymers, leading to the establishment of hydrogen bonds and new linkages.

Conclusion: The incorporation of calcium chloride and glutaraldehyde as cross-linking agents effectively enhanced the mechanical and structural properties of the PVA-NaAlg-NFC electrospun pads. This study underscores that the judicious selection of cross-linking agents can yield electrospun pads with heightened strength, suitable for a range of research applications. Additionally, this study serves as a blueprint for the advancement of innovative materials in the realm of tissue engineering and other biological and medical applications.

Cite this article: Saeidi, Hasibeh, Dehghani Firouzabadi, Mohammad Reza, Rudi, Hamid Reza, Hedjazi, Sahab, Mashkour, Mojdeh, Govahi, Mostafa. 2024. Effect of crosslinking agent type on the properties of PVA-Sodium Alginate-Nanocellulose pad obtained by electrospinning. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (3), 117-135.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2025.23073.2085

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

اثر نوع عامل شبکه‌ساز بر ویژگی‌های پد حاصل از الکتروریسی پلی‌وینیل الکل - آلژینات سدیم - نانوالیاف سلولزی

حسیبه سعیدی^۱، محمدرضا دهقانی فیروزآبادی^{۲*}، حمیدرضا رودی^۳، سحاب حجازی^۴،
مژده مشکور^۵، مصطفی گواهی^۶

۱. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: hasibeh.saedi@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mdehghani@gau.ac.ir
۳. دانشیار مهندسی منابع طبیعی - علوم و صنایع چوب و کاغذ، گروه پالایش زیستی، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس زیراب، ایران. رایانامه: h_rudi@sbu.ac.ir
۴. دانشیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: shedjazi@gau.ac.ir
۵. استادیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: m.mashkour@gau.ac.ir
۶. استادیار گروه نانو بیوتکنولوژی، دانشکده زیست‌فناوری، دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین، آمل، ایران. رایانامه: m.govahi@ausmt.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: در سال‌های اخیر، استفاده از پدهای الکتروریسی شده با اتصال‌دهنده‌های شبکه‌ساز به دلیل خواص مکانیکی و زیستی بهبود یافته، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این پدها قابلیت زیادی برای کاربرد در مهندسی بافت و ترمیم بافت‌های آسیب‌دیده دارند. در این پژوهش، اثر نوع عامل شبکه‌ساز شامل کلرید کلسیم، اسید سیتریک، گلو تار آلدئید و کلرید روی بر ویژگی‌های مکانیکی پدهای حاصل از الکتروریسی پلی‌وینیل الکل (PVA)، آلژینات سدیم (NaAlg) و نانوالیاف سلولزی (CNF) بررسی شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴	
واژه‌های کلیدی: استحکام کششی، الکتروریسی، نانوالیاف، نوع شبکه‌ساز	مواد و روش‌ها: برای تهیه پد الکتروریسی، ابتدا متغیرهای فرآیندی بهینه‌سازی شدند. سپس ترکیبی از محلول PVA، NaAlg و CNF تهیه و مقادیر مختلفی از عوامل شبکه‌ساز در سطوح متفاوت به آن اضافه شد. عملیات الکتروریسی این محلول‌ها تحت شرایط بهینه انجام و استحکام کششی آن‌ها اندازه‌گیری شد. به منظور ارزیابی گروه‌های عاملی و مورفولوژی پد، از تحلیل طیف‌سنجی مادون‌قرمز فوری (ATR-FTIR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید. از روش سطح پاسخ (RSM) به طریق طرح مرکب مرکزی (CCD) جهت بررسی

اثر متغیرهای آزمایش استفاده شد. آنالیز داده‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار Design Expert 12 انجام گردید.

یافته‌ها: تحلیل نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن عوامل شبکه‌ساز به طور قابل توجهی استحکام کششی پدهای الکتروریسی را افزایش می‌دهد. پدهای الکتروریسی حاوی کلرید کلسیم و گلووتارآلدئید به ترتیب ۷۷ و ۴۰ درصد افزایش استحکام کششی نشان دادند. اسیدسیتریک و کلرید روی نیز استحکام کششی پدها را تا ۲۹ درصد در مقایسه با نمونه شاهد افزایش دادند. تصاویر SEM نشان دادند که عامل شبکه‌ساز کلرید کلسیم باعث نزدیک‌تر شدن الیاف و افزایش تعداد اتصالات می‌شود. نتایج ATR-FTIR تغییرات و ایجاد گروه‌های عاملی جدید را نشان می‌دهد که این تغییرات در نواحی ارتعاش کششی پیوندهای O-H و C=O مشاهده می‌شود. همچنین، تحلیل ATR-FTIR نشان داد که در حضور کلرید کلسیم، برهم‌کنش یون‌های کلسیم با گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل موجود در بسپارها منجر به تشکیل پیوندهای هیدروژنی و اتصالات جدید می‌شود.

نتیجه‌گیری: استفاده از عوامل شبکه‌ساز کلرید کلسیم و گلووتارآلدئید به طور مؤثری موجب بهبود خواص مکانیکی و ساختاری پدهای حاصل از الکتروریسی PVA-آلژینات سدیم - نانوالیاف سلولز شد. به طور کلی، نتایج این بررسی نشان داد که انتخاب مناسب عامل شبکه‌ساز می‌تواند منجر به تهیه پد الکتروریسی با استحکام زیاد شود تا به عنوان بستری برای به کارگیری در کاربردهای مختلف پژوهشی استفاده گردد. همچنین، این پژوهش می‌تواند راهنمایی برای توسعه مواد پیشرفته و نوآورانه در حوزه مهندسی بافت و دیگر کاربردهای زیستی و پزشکی باشد.

استناد: سعیدی، حسینه، دهقانی فیروزآبادی، محمد رضا، رودی، حمیدرضا، حجازی، سحاب، مشکور، مؤده، گواهی، مصطفی (۱۴۰۳).

اثر نوع عامل شبکه‌ساز بر ویژگی‌های پد حاصل از الکتروریسی پلی‌وینیل الکل - آلژینات سدیم - نانوالیاف سلولزی.

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۱ (۳)، ۱۳۵-۱۱۷.

DOI: 10.22069/JWFST.2025.23073.2085



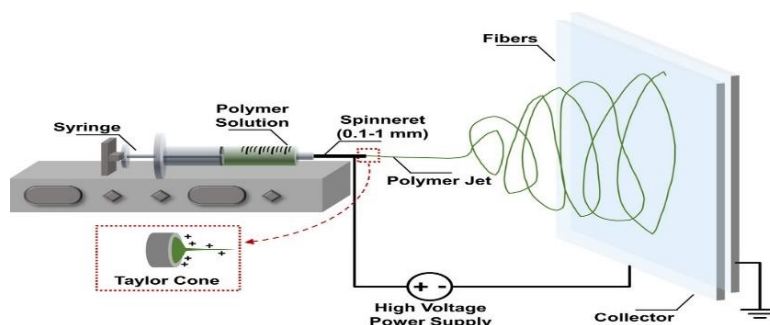
© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

در سال‌های اخیر، الکتروریسی به‌عنوان یک روش نوین و کارآمد برای تولید الیاف با ساختارهای متنوع توجه بسیاری از پژوهش‌گران و صنعت‌گران را به خود جلب کرده است. این فناوری پیشرفته، امکان تولید الیاف را از بسپارهای مختلف فراهم می‌کند (۱) و (۲). این روش، فیبرهایی با قطر در مقیاس نانو تا میکرومتر از محلول‌های بسیاری تولید می‌کند که به دلیل خواص منحصر به فرد، کاربردهای گسترده‌ای در

زمینه‌های مختلف از جمله مهندسی بافت، دارورسانی، تصفیه آب و... دارند (۳). در این روش، محلول بسپاری تحت ولتاژ زیاد قرار می‌گیرد و به الیاف با قطر در محدوده نانو تا میکرو تبدیل می‌شود (۴). با توجه به این مزایا، الکتروریسی به‌عنوان یک فناوری کلیدی در توسعه مواد پیشرفته و کاربردهای نوین آن‌ها به شمار می‌رود. طرح‌واره‌ای از دستگاه و عملیات الکتروریسی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- طرح‌واره دستگاه الکتروریسی.

Figure 1. Schematic of electrospinning machine.

محدودی دارند. با اضافه نمودن برخی مواد سازگار می‌توان این کاربردها را گسترش داد. نانوالیاف سلولزی یکی از این مواد است که به‌عنوان یک نانومواد طبیعی و پایدار، می‌تواند خواص الیاف الکتروریسی شده را از جهات مختلف بهبود بخشد. نانوالیاف سلولزی به دلیل استحکام زیاد، خاصیت جذب آب و تمایل به اتصال به مولکول‌های زیستی، می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی، زیست‌سازگاری و عملکرد الیاف الکتروریسی شده کمک کند (۸، ۹، ۱۰). از طرف دیگر، استفاده از عوامل شبکه‌ساز یا پیونددهنده‌های عرضی و اختلاط بسپارها نیز می‌تواند برای بهبود ویژگی‌های استحکامی پدهای تهیه‌شده از موادی چون پلی‌وینیل‌الکل مورد استفاده قرار گیرد (۱۱). گزارش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از عوامل شبکه‌سازی فرایند الکتروریسی الیاف، از مؤثرترین

پلی‌وینیل‌الکل^۱ و آلژینات سدیم دو بسپار زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر هستند که به‌طور گسترده در الکتروریسی نانوفیبر استفاده می‌شوند (۵). پلی‌وینیل‌الکل به دلیل حلالیت خوب در آب، خواص مکانیکی مناسب و قیمت ارزان، به‌عنوان یک بسپار پایه در الکتروریسی به کار می‌رود (۶). اگرچه پلی‌وینیل‌الکل یک بسپار مصنوعی است، اما در مقایسه با بسیاری از بسپارهای سنتزی دیگر، به‌کندی قابل تجزیه است. آلژینات سدیم نیز به دلیل زیست‌سازگاری زیاد، قابلیت تشکیل شبکه و خواص آب‌دوستی، گزینه مناسبی برای تولید نانوفیبرهای با کاربردهای پزشکی و مهندسی بافت است (۷). الیاف حاصل از این بسپارها به دلیل حلالیت زیاد، پایداری ضعیف و خواص مکانیکی نامناسب، کاربردهای

1- PVA

به‌طور گسترده در رشته‌های مختلف از جمله علوم غذایی، مهندسی و تحقیقات بیولوژیکی مورد توجه پژوهش‌گران است (۲۲). بنابراین در این پژوهش، با استفاده از RSM اثر چهار نوع عامل شبکه‌ساز (کلرید کلسیم، کلرید روی، گلو تارآلدئید و اسیدسیتریک) بر روی پد الکتروروسی حاصل از پلی‌وینیل الکل و آلزینات سدیم در حضور نانوسلولز بررسی شد.

مواد و روش‌ها

تهیه مواد اولیه: آلزینات سدیم به‌صورت پودری از شرکت سیگما آلد ریچ آلمان خریداری شد. برای انجام آزمایش ۰/۲ گرم از پودر آلزینات سدیم حل شده در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر (۲ درصد)، به مدت ۴ ساعت بر روی دستگاه هیتر - همزن با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و با اختلاط ۲۵۰ دور در دقیقه قرار گرفت. محلول آماده‌شده به مدت ۴ ساعت نیز در دمای اتاق بدون هم زدن قرار داده شد. بسپار پلی‌وینیل‌الکل (PVA) با وزن مولکولی ۷۲۰۰۰ mol/g از شرکت مرک آلمان خریداری شد. هم‌چنین، چهار نوع ماده به‌عنوان عامل شبکه‌ساز استفاده شدند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

راه‌های تقویت خواص بسپارها است (۱۲). پیونددهنده‌های عرضی، مولکول‌هایی هستند که با ایجاد پیوندهای شیمیایی بین زنجیره‌های بسپاری، ساختار نانوفیبر را تثبیت می‌کنند. شبکه‌سازها علاوه بر بهبود خواص مکانیکی می‌توانند خواص حرارتی، الکتریکی و حتی شیمیایی الیاف نانویی را نیز به‌طور قابل‌توجهی بهبود دهند. با تشکیل پیوندها در جهت‌های مختلف الیاف، استحکام و انعطاف‌پذیری آن‌ها افزایش می‌یابد (۱۳، ۱۴، ۱۵). در این میان، انتخاب نوع عامل شبکه‌ساز بر مقاومت پد الکتروروسی شده، ساختار مورفولوژی و عملکرد، تأثیر قابل‌توجهی دارد. در این پژوهش، اثر نوع شبکه‌ساز بر مقاومت پد الکتروروسی پلی‌وینیل‌الکل - آلزینات سدیم در حضور نانوالیاف سلولزی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) بر پایه طرح مرکب مرکزی (CCD) بررسی و بهینه شد. RSM در مدل‌سازی فرایندهای پیچیده به‌کار گرفته می‌شود و با ایجاد روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی بهینه‌سازی فرآیند را میسر می‌سازد. ارزیابی عوامل متعدد و تعاملات آن‌ها را ساده می‌کند و امکان توسعه مدل‌های ساده‌ای را فراهم می‌کند که می‌توانند جایگزین تحلیل‌های عددی پیچیده شوند (۲۰، ۲۱). از این‌رو

جدول ۱- مشخصات عوامل شبکه‌ساز مورد استفاده در این پژوهش.

Table 1. Characteristics of cross-linking agents used in this research.

عامل شبکه‌ساز Crosslink type	نقطه ذوب Melting point (°C)	انحلال‌پذیری در آب Water Solubility (g/L)	ویژگی‌های ظاهری Appearance	دانشیه Density (g/cm ³)	اسیدیته pH
کلرید کلسیم Calcium chloride	176	1280	جامد - بلوری Solid-crystalline	1.85	4.5-8.5
اسیدسیتریک Citric acid	173.9	880	جامد- بلوری Solid-crystalline	1.54	
گلو تارآلدئید Glutaraldehyde	-33		مایع Liquid	1.13	3.1-4.5
کلرید روی Zinc chloride	293	851	پودری - جامد Solid-powder	2.93	4.6-5.5

فاصله نوک سوزن از جمع‌کننده به میزان ۱۲/۵ سانتی‌متر)، نانوالیاف سلولزی به محلول آماده پلی‌وینیل‌الکل - آلژینات سدیم در درصد وزنی ۱ (نسبت به وزن مواد استفاده‌شده) اضافه شد. کلسیم کلرید و روی کلرید به سدیم آلژینات اضافه شدند. کلسیم کلرید در سه سطح ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ گرم و روی کلرید در سه سطح ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ گرم نیز در هنگام آماده‌سازی محلول ۲۰ میلی‌لیتر آلژینات سدیم به آن اضافه شدند. به‌طور خلاصه، کلسیم کلرید و روی کلرید در ده میلی‌لیتر آب حل شدند و آماده‌سازی آلژینات سدیم نیز در ده میلی‌لیتر آب انجام گرفت و سپس با هم مخلوط شدند. هم‌چنین، گلو تار آل‌دئید و سیتریک اسید در سه سطح ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ میلی‌لیتر در هنگام آماده‌سازی پلی‌وینیل‌الکل به محلول اضافه شد و در نهایت با ترکیب محلول‌ها و هم‌زدن آن‌ها، الکتروریسی پد انجام گرفت (شکل ۲).

آماده‌سازی محلول برای عملیات الکتروریسی: برای آماده‌سازی، مقدار ۱ گرم پلی‌وینیل‌الکل در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل گردید. بشر حاوی محلول و پوشانیده شده با فویل آلومینیم بر روی دستگاه هیتر - همزن با اختلاط ملایم (۲۵۰ دور در دقیقه) و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت قرار داده شد. سپس، در دمای اتاق به مدت ۵ ساعت با سرعت بیشتر (۱۰۰۰ دور بر دقیقه) هم‌زده شد. پس از بررسی‌های مقدماتی، نهایتاً محلول پلی‌وینیل‌الکل و آلژینات سدیم با نسبت حجمی ۸۰:۲۰ انتخاب گردید و بشر حاوی آن به مدت ۲ ساعت بر روی دستگاه هیتر - همزن با اختلاط ملایم و بدون اعمال دما برای به‌دست آوردن محلولی یکنواخت قرار داده شد. محلول بسپاری آماده شده به مدت ۲ ساعت در دمای محیط قرار گرفت تا آماده الکتروریسی شود. پس از الکتروریسی و انتخاب بهترین شرایط دستگاهی (ولتاژ ۲۱ کیلوولت، سرعت تغذیه ۰/۹ میلی‌لیتر بر ساعت و



شکل ۲- فرایند الکتروریسی پلی‌وینیل‌الکل، آلژینات سدیم، نانوالیاف سلولزی و عامل شبکه‌ساز.

Figure 2. Electrolysis process of polyvinyl alcohol, sodium alginate, nanocellulose, and crosslinker.

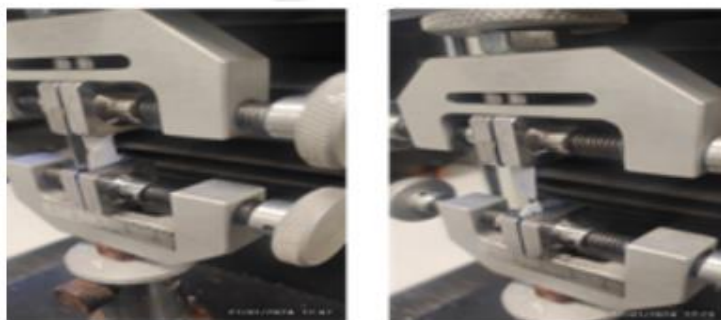
الف (A). تنظیم فاصله نازل از جمع‌کننده با خط‌کش ب (B). الیاف الکتروریسی بر روی جمع‌کننده ج (C).

پد الکتروریسی جدا شده د (D). تصویر پد با بزرگ‌نمایی ۱۰×.

A. Adjusting the distance between the nozzle and the collector B. Nanofibers assembled on the collector
C. Separated electrospinning pad D. Image of the pad with 10x magnification.

ساخت کشور امریکا انجام گرفت. سرعت کشش دستگاه ۵ میلی‌متر بر دقیقه و نمونه‌ها با نیروی ۵۰ نیوتن تحت کشش قرار گرفتند. در این آزمون، ابتدا پدهای الکترورسی شده به ابعاد ۱×۳ سانتی‌متر بریده شدند. سپس، بر روی قاب کاغذی تثبیت گردیدند و تحت نیروی کششی قرار گرفتند (شکل ۳).

پدهای حاصل به مدت نیم ساعت در گرم‌خانه با دمای ۷۰ سانتی‌گراد قرار گرفت. در تمامی مراحل وزن کردن مواد با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ انجام شد. آزمون استحکام کششی: ارزیابی خواص مکانیکی پد الکترورسی، توسط دستگاه Instron مدل ۵۵۶۶



شکل ۳- نمونه‌ای از آزمون استحکام کششی پد الکترورسی تهیه شده.

Figure 3. A sample of the tensile strength test of the prepared electrospinning pad.

درنهایت، یک مدل ریاضی به دست می‌آید که ارتباط میان عوامل مستقل و پاسخ موردنظر را نشان می‌دهد. در این پژوهش، از روش سطح پاسخ (RSM) به روش طرح مرکب مرکزی (CCD) جهت بررسی اثر متغیرهای آزمایش استفاده شد. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert 12 انجام شد. ترکیب شرایط مدل استحکام کششی بر اساس نوع عامل شبکه‌ساز و مقدار ولتاژ در جدول ۲ ارائه شده است.

روش سطح پاسخ (RSM) روش سطح پاسخ، یک روش بهینه‌سازی است که با استفاده از رگرسیون، ارتباط میان عوامل مستقل را در یک فرایند به دست می‌آورد و به صورت یک رابطه اعلام می‌کند. این رابطه می‌تواند برای پیش‌بینی حالت بهینه ترکیب عوامل استفاده شود. در این روش، ابتدا آزمایش‌های فیزیکی لازم برای تعیین تأثیر پارامترهای مستقل بر پاسخ موردنظر انجام می‌شود. سپس، نتایج آزمایش‌ها با استفاده از روش رگرسیون تحلیل می‌شوند.

جدول ۲- ترکیب شرایط مدل استحکام کششی بر اساس نوع عامل شبکه‌ساز و مقدار ولتاژ.

Table 2. The composition of tensile strength model conditions based on the type of transverse connector and voltage value.

شماره تیمار	کلرید کلسیم	ولتاژ	شماره تیمار	اسیدسیتریک	ولتاژ
Treatment No.	Calcium chloride (g)	Voltage (kV)	Treatment No.	Citric acid (g)	Voltage (kV)
1	0.2	18	1	0.2	18
2	0.3	18	2	0.3	18
3	0.3	15	3	0.3	18
4	0.1	15	4	0.1	21
5	0.1	18	5	0.1	21
6	0.2	21	6	0.2	15
7	0.2	18	7	0.2	18
8	0.2	18	8	0.2	15
9	0.2	18	9	0.2	15
10	0.1	21	10	0.1	21
11	0.2	15	11	0.2	18
12	0.3	21	12	0.3	18
13	0.2	18	13	0.2	18

شماره تیمار	گلو تار آلدهید	ولتاژ	شماره تیمار	کلرید روی	ولتاژ
Treatment No.	Glutaraldehyde (g)	Voltage (kV)	Treatment No.	Zinc chloride (g)	Voltage (kV)
1	0.2	18	1	0.2	18
2	0.3	18	2	0.3	21
3	0.3	18	3	0.3	21
4	0.1	18	4	0.1	18
5	0.1	18	5	0.1	18
6	0.2	15	6	0.2	18
7	0.2	21	7	0.2	18
8	0.2	18	8	0.2	18
9	0.2	21	9	0.2	18
10	0.1	18	10	0.1	15
11	0.2	15	11	0.2	21
12	0.3	21	12	0.3	15
13	0.2	15	13	0.2	15

نتایج و بحث

اثر کلرید کلسیم و ولتاژ بر استحکام کششی پد الکتروویسی: در جدول ۳، نتایج آنالیز واریانس مدل برازش یافته حاصل از تحلیل به روش سطح پاسخ برای بررسی اثر کلرید کلسیم و ولتاژ بر استحکام کششی ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که بین مدل رگرسیونی پیشنهادی در روند پیش‌بینی استحکام کششی با متغیرهای مستقل در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) هم‌چنین نشان می‌دهد اثر هر یک از متغیرهای مستقل کلرید کلسیم (A) و ولتاژ (B) بر روی متغیر استحکام کششی تولیدی معنی‌دار است. به عبارت

بررسی ساختار و مورفولوژی الیاف (SEM): به‌منظور مشاهده ریزساختار پد الیاف تهیه‌شده و ساختار شبکه آن از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مدل VEGA3 ساخت شرکت TESCAN جمهوری چک استفاده شد.

طیف‌سنجی مادون‌قرمز با تبدیل فوریه (ATR-FTIR): مشخصه‌یابی الیاف الکتروویسی‌شده با پلی‌وینیل‌الکل / آلزینات سدیم و نانوالیاف سلولزی به‌وسیله طیف‌سنجی مادون‌قرمز با تبدیل فوریه (FTIR) با استفاده از دستگاه طیف‌سنج FT-IR Cary 630 ساخت شرکت Agilent آمریکا در محدوده طول‌موج ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ cm^{-1} برای همه نمونه‌ها انجام شد.

این متغیر بر روی استحکام کششی است. مدل اولیه رگرسیونی درجه دوم ایجاد شده برای استحکام کششی تحت شرایط فوق با در نظر گرفتن متغیرها به صورت کدبندی شده به شکل رابطه ۱ می‌باشد. علامت مثبت در پیش روی هر کدام از جملات نشان‌دهنده تأثیر افزایشی و علامت منفی نشان‌دهنده تأثیر کاهش‌ی متغیرها بر روی پاسخ می‌باشد. ضریب تبیین (R^2)، ضریب تبیین تعدیل شده ($Adjusted R^2$)، خطای استاندارد (Std. Dev.) و ضریب تغییرات (C.V.%) به ترتیب برابر ۰/۹۳۵، ۰/۸۸۹، ۰/۴۵ و ۶/۳۸ درصد می‌باشند.

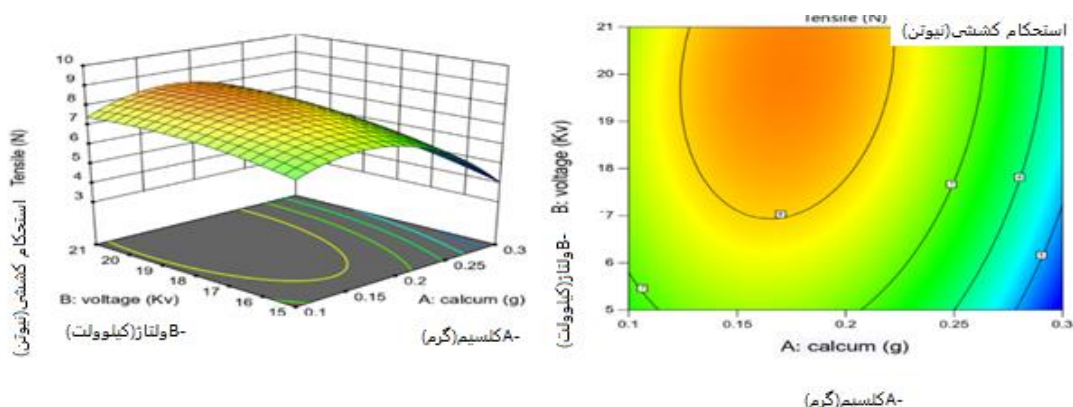
دیگر، تمامی متغیرها تأثیر معنی‌داری بر روی استحکام کششی از خود نشان دادند. هم‌چنین، در یک نگاه کلی می‌توان دریافت که متغیر ولتاژ (B) با توجه به دارا بودن مقدار مجموع مربعات بیش‌تر، تأثیر بیش‌تری را بر تغییرات متغیر وابسته استحکام کششی داشته است. با بررسی روند تغییرات منحنی سطح پاسخ استحکام کششی (شکل ۴) مشاهده می‌شود که با افزایش درصد کلرید کلسیم تا سطح ۰/۲ گرم استحکام کششی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. هم‌چنین، شیب بیش‌تر منحنی سطح پاسخ در راستای محور مربوط به متغیر کلرید کلسیم نسبت به ولتاژ بیانگر اثرگذاری بیش‌تر

$$Tensile (N) = +8.04 - 1.10A + 0.5833B + 0.2500AB - 1.71A^2 - 0.3569B^2 \quad (1)$$

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی اثر کلرید کلسیم و ولتاژ بر استحکام کششی.

Table 3. The results of analysis of variance of the regression model of the effect of calcium chloride and voltage on tensile strength.

	مقدار P P-value	مقدار F F-value	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of Squares	منبع Source
معنی‌دار Significant	0.0005	20.39	4.18	5	20.88	مدل Model
	0.0006	35.45	7.26	1	7.26	کلسیم Calcium (A)
	0.0160	9.97	2.04	1	2.04	ولتاژ Voltage (B)
	0.3058	1.22	0.2500	1	0.2500	AB
	0.0004	39.29	8.05	1	8.05	A ²
	0.2314	1.72	0.3518	1	0.3518	B ²
			0.2048	7	1.43	باقی‌مانده Residual
			0.4779	3	1.43	عدم برازش Lack of Fit
			0.0000	4	0.0000	خطای خالص Pure Error
				12	22.31	مجموع کل مربعات Cor Total



شکل ۴- اثر کلرید کلسیم و ولتاژ بر استحکام کششی پدهای تهیه‌شده.

Figure 4. The effect of calcium chloride and voltage on the tensile strength of the prepared Electrospun pad.

استحکام کششی داشته است. با بررسی روند تغییرات منحنی سطح پاسخ استحکام کششی مشاهده می‌شود که با افزایش درصد اسیدسیتریک، استحکام کششی افزایش می‌یابد. همچنین، شیب بیش‌تر منحنی سطح پاسخ در راستای محور مربوط به متغیر اسیدسیتریک نسبت به ولتاژ بیانگر اثرگذاری بیش‌تر این متغیر بر روی استحکام کششی می‌باشد (شکل ۵). مدل اولیه رگرسیونی درجه دوم ایجاد شده برای استحکام کششی تحت شرایط فوق با در نظر گرفتن متغیرها به صورت کدبندی‌شده به شکل رابطه ۲ می‌باشد. ضریب تبیین (R^2)، ضریب تبیین تعدیل‌شده (Adjusted R^2)، خطای استاندارد (Std. Dev.) و ضریب تغییرات (C.V.%) به ترتیب برابر ۰/۹۵۵، ۰/۰۸ و ۱/۶۱ درصد می‌باشند.

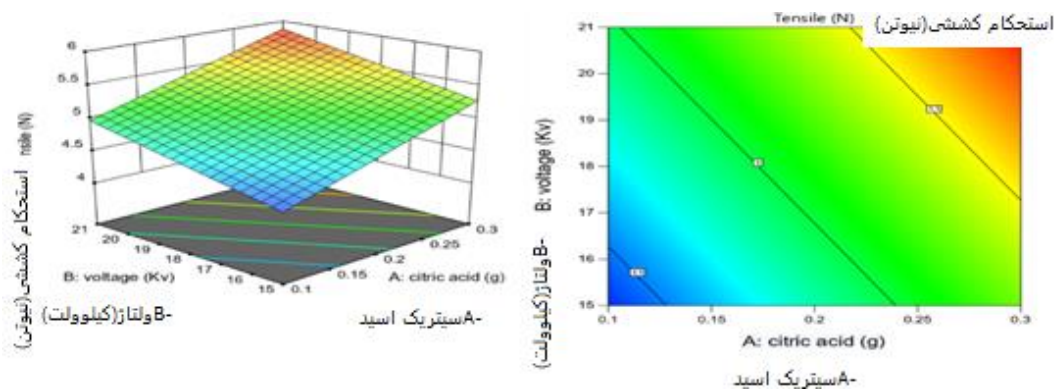
اثر اسیدسیتریک و ولتاژ بر استحکام کششی پد الکترورسی: در جدول ۴، نتایج آنالیز واریانس مدل برازش‌یافته حاصل از تحلیل به‌روش سطح پاسخ برای بررسی اثر اسیدسیتریک و ولتاژ بر استحکام کششی ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که بین مدل رگرسیونی پیشنهادی در روند پیش‌بینی استحکام کششی با متغیرهای مستقل در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) هم‌چنین نشان می‌دهد اثر هر یک از متغیرهای مستقل اسیدسیتریک (A) و ولتاژ (B) بر روی متغیر استحکام کششی تولیدی معنی‌دار است. به‌عبارت‌دیگر، تمامی متغیرها اثر معنی‌داری بر روی استحکام کششی از خود نشان دادند. به‌طورکلی می‌توان دریافت که متغیر ولتاژ (B) با توجه به دارا بودن مقدار مجموع مربعات بیش‌تر، تأثیر بیش‌تری را بر تغییرات متغیر وابسته

$$Tensile (N) = +5.12 + 0.4500A + 0.3000B \quad (2)$$

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی اثر اسیدسیتریک و ولتاژ بر استحکام کششی.

Table 4. The results of analysis of variance of the regression model of the effect of citric acid and voltage on tensile strength.

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F مقدار	P مقدار	معنی دار
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value	Significant
مدل	1.76	2	0.8775	128.90	< 0.0001	معنی دار
سیتریک اسید	1.21	1	1.21	178.47	< 0.0001	Significant
ولتاژ	0.5400	1	0.5400	79.32	< 0.0001	
باقی مانده	0.0681	10	0.0068			
عدم برازش	0.0681	6	0.0113			
خطای خالص	0.0000	4	0.0000			
مجموع کل مربعات	1.82	12				
Cor Total						



شکل ۵- اثر اسیدسیتریک و ولتاژ بر استحکام کششی پدهای تهیه شده.

Figure 5. The effect of citric acid and voltage on the tensile strength of the prepared Electrospun pad.

استحکام کششی با متغیرهای مستقل در سطح ۱ درصد معنی دار می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۵) هم‌چنین نشان می‌دهد اثر هر یک از متغیرهای مستقل گلو تار آلدئید (A) و ولتاژ (B) بر روی متغیر استحکام کششی تولیدی معنی دار است. به عبارت دیگر، تمامی متغیرها تأثیر معنی داری بر روی استحکام

اثر گلو تار آلدئید و ولتاژ بر استحکام کششی پد الکترورسی: در جدول ۵، نتایج آنالیز واریانس مدل برازش یافته حاصل از تحلیل به روش سطح پاسخ برای بررسی اثر گلو تار آلدئید و ولتاژ بر استحکام کششی ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که بین مدل رگرسیونی پیشنهادی در روند پیش‌بینی

ولتاژ بیانگر اثرگذاری بیش‌تر این متغیر بر روی استحکام کششی می‌باشد (شکل ۶). مدل اولیه رگرسیونی درجه دوم ایجاد شده برای استحکام کششی تحت شرایط فوق با در نظر گرفتن متغیرها به صورت کدبندی شده به شکل رابطه ۳ می‌باشد. ضریب تبیین (R^2)، ضریب تبیین تعدیل شده ($Adjusted R^2$)، خطای استاندارد (Std. Dev.) و ضریب تغییرات (C.V.%) به ترتیب برابر ۰/۹۵۳، ۰/۹۲۰، ۰/۱۳۵ و ۲/۳۵ درصد هستند.

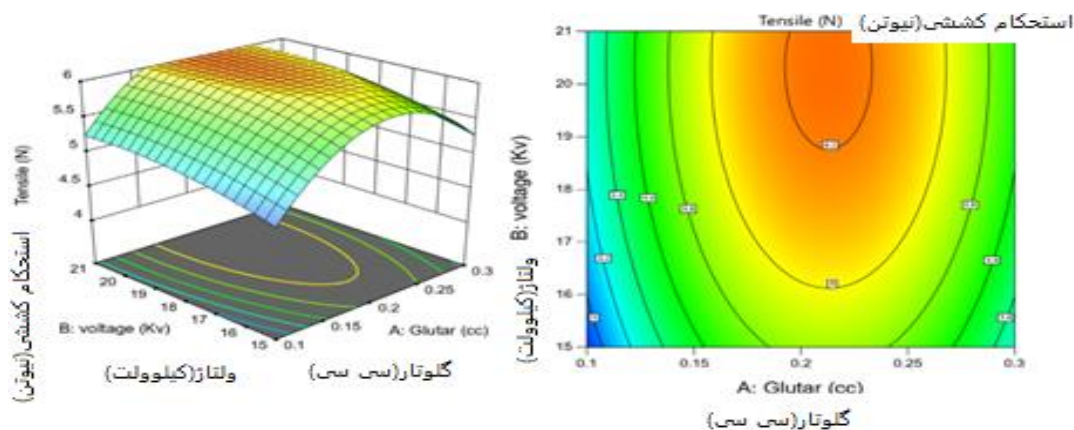
کششی از خود نشان دادند. هم‌چنین، در یک روند و نگاه کلی می‌توان دریافت که متغیر گلو تارآلدئید (A) با توجه به دارا بودن مقدار مجموع مربعات بیش‌تر، تأثیر بیش‌تری را بر تغییرات متغیر وابسته استحکام کششی داشته است. با بررسی روند تغییرات منحنی سطح پاسخ استحکام کششی مشاهده می‌شود که با افزایش درصد گلو تارآلدئید تا سطح ۰/۲۵ میلی‌لیتر، استحکام کششی افزایش و سپس روند کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین، شیب بیش‌تر منحنی سطح پاسخ در راستای محور مربوط به متغیر اسید سیتریک نسبت به

$$Tensile (N) = +6.15 + 0.2000A + 0.1833B + 0.0000AB - 0.7690A^2 - 0.1190B^2 \quad (3)$$

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی اثر گلو تارآلدئید و ولتاژ بر استحکام کششی.

Table 5. The results of analysis of variance of the regression model of the effect of glutaraldehyde and voltage on tensile strength.

	P مقدار P-value	F مقدار F-value	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of Squares	منبع Source
معنی دار Significant	0.0002	28.73	0.5246	5	2.62	مدل Model
	0.0084	13.14	0.2400	1	0.2400	گلو تارآلدئید Glutar (A)
	0.0127	11.04	0.2017	1	0.2017	ولتاژ Voltage (B)
	1.0000	0.0000	0.0000	1	0.0000	AB
	< 0.0001	89.44	1.63	1	1.63	A ²
	0.1868	2.14	0.0391	1	0.0391	B ²
			0.0183	7	0.1278	باقی مانده Residual
			0.0426	3	0.1278	عدم برازش Lack of Fit
			0.0000	4	0.0000	خطای خالص Pure Error
				12	2.75	مجموع کل مربعات Cor Total



شکل ۶- اثر گلو تار آلدئید و ولتاژ بر استحکام کششی پدهای تهیه شده.

Figure 6. The effect of glutaraldehyde and voltage on the tensile strength of the prepared Electrospinning pad.

داشته است. با بررسی روند تغییرات منحنی سطح پاسخ استحکام کششی مشاهده می‌شود که با افزایش درصد کلرید روی، استحکام کششی افزایش می‌یابد. همچنین، شیب بیش‌تر منحنی سطح پاسخ در راستای محور مربوط به متغیر کلرید روی نسبت به ولتاژ بیانگر اثرگذاری بیش‌تر این متغیر بر روی استحکام کششی است (شکل ۷). مدل اولیه رگرسیون درجه دوم ایجاد شده برای استحکام کششی تحت شرایط فوق با در نظر گرفتن متغیرها به صورت کدبندی شده به شکل رابطه ۴ می‌باشد. ضریب تبیین (R^2)، ضریب تبیین تعدیل شده ($Adjusted R^2$)، خطای استاندارد (Std. Dev.) و ضریب تغییرات (C.V.%) به ترتیب برابر ۰/۹۷۶، ۰/۹۷۱، ۰/۱۳۷ و ۲/۸۴ درصد هستند.

اثر کلرید روی و ولتاژ بر استحکام کششی پد الکترورسی: در جدول ۶، نتایج آنالیز واریانس مدل برازش یافته حاصل از تحلیل به روش سطح پاسخ برای بررسی اثر کلرید روی و ولتاژ بر استحکام کششی ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که بین مدل رگرسیونی پیشنهادی در روند پیش‌بینی استحکام کششی با متغیرهای مستقل در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۶) همچنین نشان می‌دهد اثر هر یک از متغیرهای مستقل کلرید روی (A) و ولتاژ (B) بر روی متغیر استحکام کششی تولیدی معنی‌دار است. همچنین، در یک روند و نگاه کلی می‌توان دریافت که متغیر ولتاژ (B) با توجه به دارا بودن مقدار مجموع مربعات بیش‌تر، تأثیر بیش‌تری را بر تغییرات متغیر وابسته استحکام کششی

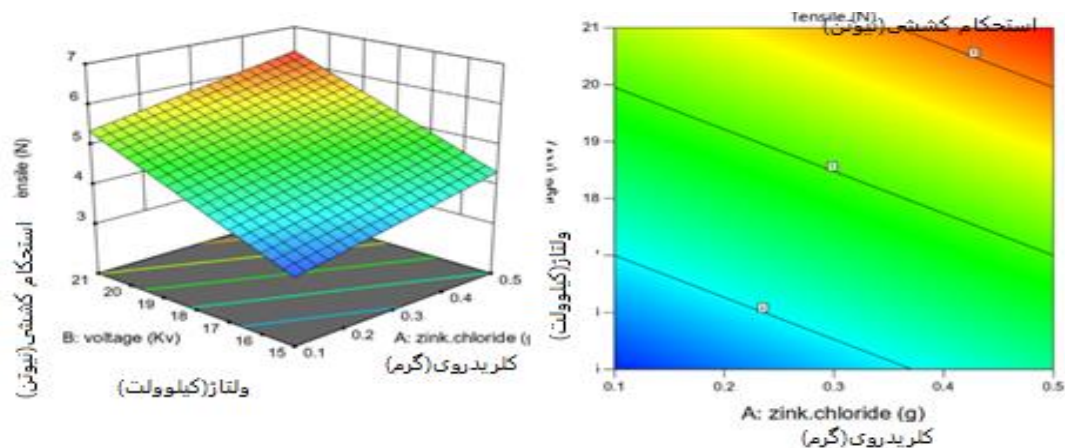
$$Tensile (N) = +4.84 + 0.5000A + 1.02B$$

(۴)

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی اثر کلرید روی و ولتاژ بر استحکام کششی.

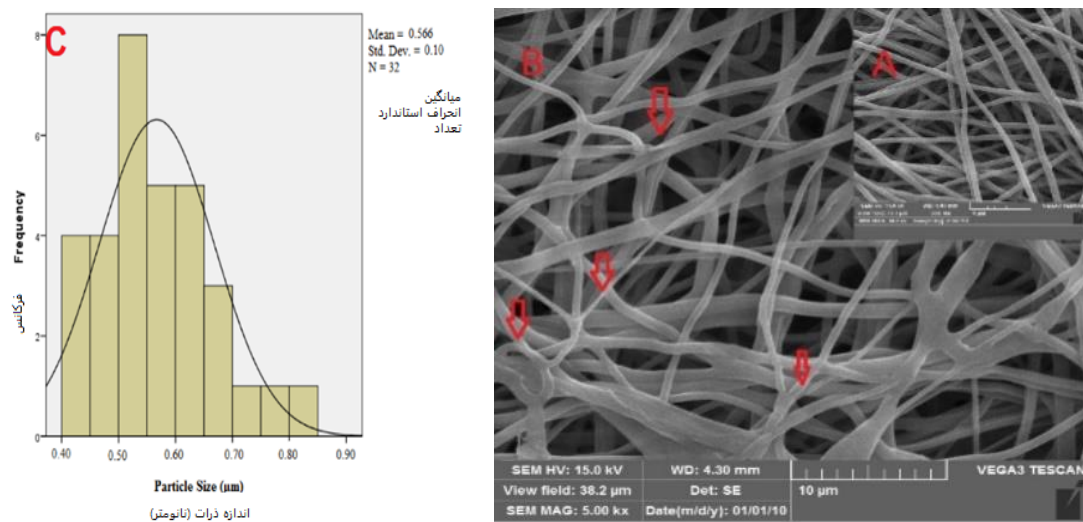
Table 6. The results of analysis of variance of the regression model of the effect of zinc chloride and voltage on tensile strength.

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value	
مدل	7.70	2	3.85	203.64	< 0.0001	معنی‌دار Significant
کلریدروی Zink chloride (A)	1.50	1	1.50	79.32	< 0.0001	
ولتاژ Voltage (B)	6.20	1	6.20	327.95	< 0.0001	
باقی‌مانده Residual	0.1891	10	0.0189			
عدم برازش Lack of Fit	0.1891	6	0.0315			
خطای خالص Pure Error	0.0000	4	0.0000			
مجموع کل مربعات Cor Total	7.89	12				



شکل ۷- اثر کلرید روی و ولتاژ بر استحکام کششی پدهای تهیه‌شده.

Figure 7. The effect of zinc chloride and voltage on the tensile strength of the prepared Electrospun pad.



شکل ۸- تصاویر SEM نانو الیاف.

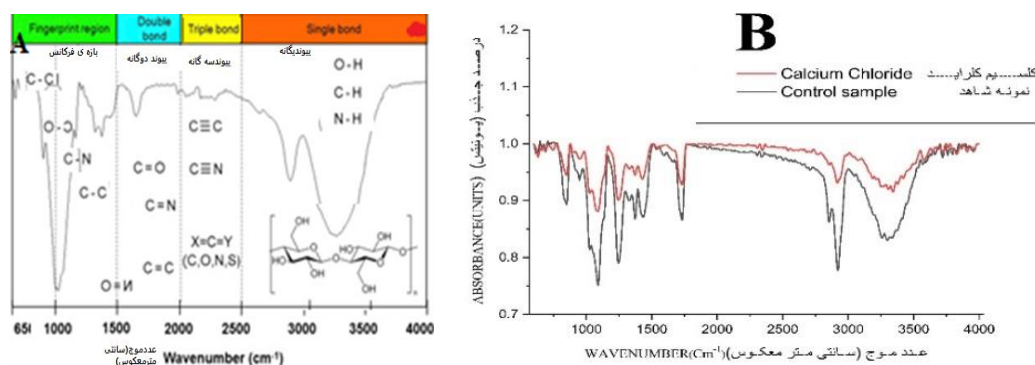
الف (A). پد بدون عامل شبکه‌ساز (نمونه شاهد) ب (B). عامل شبکه‌ساز کلسیم کلرید ج (C). هیستوگرام توزیع اندازه قطر الیاف تهیه شده با استفاده از نرم‌افزار Image pro plus

Figure 8. SEM images of nanofibers (The most tensile).

A. Pad without crosslinker (control sample) B. calcium chloride cross-linking. C. histogram of fiber diameter distribution using Image Pro Plus software.

آرایش یافته‌اند (این موضوع در شکل ۸-ب به وضوح ملاحظه می‌شود)؛ بنابراین، طبیعی است که این پدیده منجر به توسعه اتصال بین الیاف و افزایش مقاومت پدها گردد. شکل ۸-ج، هیستوگرام یا نمودار فراوانی است که توزیع اندازه قطر الیاف را نشان می‌دهد. در این نمودار، اندازه ذرات روی محور افقی و فراوانی روی محور عمودی نمایش داده شده است. شکل کلی نمودار نشان می‌دهد که توزیع اندازه ذرات تقریباً نرمال یا گاوسی است. مقدار میانگین اندازه ذرات برابر با ۰/۵۶۶ میکرومتر است. تعداد کل نمونه‌های اندازه‌گیری شده ۳۲ عدد و انحراف استاندارد برابر با ۰/۱ است.

ارزیابی تصاویر SEM از پد الکترورسی تهیه شده از محلول حاوی پلی‌وینیل الکل، آلژینات سدیم و نانوالیاف سلولزی بدون عامل شبکه‌ساز به عنوان نمونه شاهد (شکل ۸-الف) نشان می‌دهد که ریشه‌های الیاف الکترورسی شده در مقایسه با پد الیاف حاصل از این مواد و عامل شبکه‌ساز ارتباط‌های کم‌تری دارند. حضور عامل شبکه‌ساز مانند کلسیم کلرید (شکل ۸-ب) سبب پیوند الیاف شده و نقاط اتصال را بیش‌تر کرده است (با پیکان نمایش داده شده‌اند). با دقت بیش‌تر در ارزیابی مورفولوژی و ساختار پد، به نظر می‌رسد الیاف در حضور عامل شبکه‌ساز انعطاف بیش‌تری دارند؛ به طوری که در جهات مختلف



شکل ۹- الف. طیف‌های استاندارد پیوندها (۲۵) ب. مقایسه طیف‌های مادون‌قرمز.

مقایسه نمودار شاهد نمونه پد الکترورسی شده (پلی‌وینیل‌الکل/آلژینات/نانوالیاف سلولزی) و نمودار نمونه پد الکترورسی شده (پلی‌وینیل‌الکل/آلژینات/نانوالیاف سلولزی حاوی اتصال‌دهنده کلسیم کلرید).

Figure 9. A. Standard spectra of links B. Comparison of infrared spectra. Comparison of control chart (electrospun pad sample (polyvinyl alcohol/alginate/nanocellulose)) and electrospun pad sample (polyvinyl alcohol/alginate/nanocellulose containing calcium chloride crosslinker).

کربوکسیل آلژینات است. محدوده عدد موج کم‌تر از 1500 cm^{-1} ؛ این ناحیه به ارتعاشات پیچیده‌تر مولکول مربوط می‌شود و تغییرات در این ناحیه نشان‌دهنده تغییرات در ساختار کلی بسیار یا تشکیل پیوندهای جدید می‌باشد.

بررسی اثر کلرید کلسیم و ولتاژ بر استحکام کششی پدها نشان می‌دهد که هر دو عامل به‌طور معنی‌داری بر استحکام کششی تأثیر دارند. مدل رگرسیونی درجه دوم ارائه شده برای استحکام کششی، به‌خوبی متغیرهای مستقل کلرید کلسیم و ولتاژ را در سطح معنی‌داری ۱ درصد پیش‌بینی می‌کند. در این مدل، مقدار مجموع مربعات ولتاژ بیش‌تر از کلرید کلسیم است؛ بنابراین ولتاژ تأثیر بیش‌تری بر تغییرات استحکام کششی دارد. روابط رگرسیونی نشان می‌دهند که افزایش ولتاژ به افزایش استحکام کششی منجر می‌شود. درحالی‌که افزایش مقدار کلرید کلسیم کاهش استحکام را به همراه دارد. در هر چهار عامل شبکه‌ساز، اثرات هر یک از متغیرهای مستقل و ولتاژ بر استحکام کششی تأیید شده است و این نشان می‌دهد که تنظیم مناسب این پارامترها می‌تواند به

پد الکترورسی بدون عامل شبکه‌ساز و پد الکترورسی‌شده حاوی عامل شبکه‌ساز کلسیم کلرید مورد آزمون FT-IR قرار گرفتند. هدف از این آزمون، حصول اطمینان از تشکیل پیوند بین کلسیم کلرید و نانوالیاف بوده است. با مقایسه دو طیف، می‌توان تغییراتی را در طیف نمونه حاوی کلسیم کلرید نسبت به نمونه شاهد مشاهده کرد. این تغییرات نشان‌دهنده تشکیل پیوندهای جدید یا تغییر در محیط پیوندهای موجود در حضور یون‌های کلسیم است. محدوده عدد موج $3200-3500 \text{ cm}^{-1}$ ؛ این ناحیه به ارتعاش کششی پیوند O-H مربوط می‌شود (۱۶). در حضور کلسیم کلرید، تغییراتی در این ناحیه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده برهم‌کنش یون‌های کلسیم با گروه‌های هیدروکسیل بسپارها است. این برهم‌کنش به تشکیل پیوند هیدروژنی بین یون‌های کلسیم و گروه‌های هیدروکسیل منجر می‌شود. منطقه عدد موج $1650-1550 \text{ cm}^{-1}$ ؛ این ناحیه به ارتعاش کششی پیوند C=O مربوط می‌شود. با توجه به وجود آلژینات سدیم در نمونه، تغییراتی در این ناحیه مشاهده شود که نشان‌دهنده برهم‌کنش یون‌های کلسیم با گروه‌های

کنند و منجر به تولید الیاف با قطر یکنواخت‌تر و ساختاری مؤثر گردند.

نتیجه‌گیری

استفاده از عوامل شبکه‌ساز کلرید کلسیم، اسید سیتریک، گلووتارآلدئید و کلرید روی به‌طور مؤثری موجب بهبود استحکام کششی پدهای الکترورسی حاصل از پلی‌وینیل الکل، آلزینات سدیم و نانوالیاف سلولزی تهیه‌شده از فرایند الکترورسی گردید. نتایج نشان داد که کلرید کلسیم و گلووتارآلدئید به ترتیب با ۸/۱ و ۶/۴ (GPa) بیش‌ترین استحکام کششی را ایجاد کردند. درحالی‌که اسیدسیتریک و کلرید روی نیز با ۵/۹ (GPa) بهبود قابل‌توجهی در استحکام کششی ایجاد نمودند. این مطالعه تأکید می‌کند که انتخاب مناسب عامل شبکه‌ساز می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد نانوالیاف برای کاربردهای مختلف داشته باشد. در این میان، کلرید کلسیم و گلووتارآلدئید به‌عنوان مؤثرترین عوامل شبکه‌ساز در این پژوهش شناسایی شدند، اگرچه هر چهار عامل قابلیت بهبود خواص نانوالیاف را داشتند.

بهبود خواص مکانیکی پدهای تهیه‌شده منجر شده از آن‌جایی‌که اتصال‌دهنده‌های شبکه‌ساز یونی در مقایسه با مواد شیمیایی زیست‌سازگارتر هستند؛ کلرید کلسیم به‌عنوان یک عامل شبکه‌ساز یونی برای جایگزینی اتصال‌دهنده‌های شیمیایی پیشنهاد شده است (۱۷). کلرید کلسیم به‌عنوان یک عامل پیوند عرضی، با گروه‌های عاملی موجود در بسپارها واکنش داده و شبکه‌های سه‌بعدی مستحکمی را تشکیل می‌دهد. کلرید کلسیم به‌محض تماس با محلول بسپاری آبی، یون‌های Ca_2 تولید می‌کند که منجر به شبکه‌سازی سریع یونی می‌شود (۱۸)؛ بنابراین، افزودن کلرید کلسیم به‌عنوان یک عامل شبکه‌ساز می‌تواند به‌طورکلی باعث افزایش پیوندهای عرضی، افزایش چسبندگی و تغییرات مطلوب در ریزساختار بسپار شود (۱۹). اسیدسیتریک با ایجاد پیوندهای استری و کربوکسیلی، گلووتارآلدئید با ایجاد پیوندهای کووالانسی قوی و کلرید روی با تشکیل پیوندهای یونی، هر کدام به‌نوعی موجب افزایش تعداد و استحکام پیوندهای عرضی می‌شوند. علاوه بر این، این عوامل می‌توانند به بهبود فرایند الکترورسی کمک

منابع

1. Keirouz, A., Wang, Z., Reddy, V. S., Nagy, Z. K., Vass, P., Buzgo, M., Ramakrishna, S., & Radacsi, N. (2023). The history of electrospinning: past, present, and future developments. *Advanced Materials Technologies*, 8 (11), 2201723.
2. Ji, D., Lin, Y., Guo, X., Ramasubramanian, B., Wang, R., Radacsi, N., & Ramakrishna, S. (2024). Electrospinning of nanofibres. *Nature Reviews Methods Primers*, 4 (1), 1.
3. Borban, B., Gohain, M.B., Yadav, D., Karki, S., & Ingole, P.G. (2023). Nano-Electrospun Membranes: Green Solutions for Diverse Industrial Needs. *J. of Hazardous Materials Advances*, 100373.
4. Mhetre, H., Kanse, Y., & Chendake, Y. (2023). Influence of Electrospinning Voltage on the Diameter and Properties of 1-dimensional Zinc Oxide Nanofiber. *ES Materials & Manufacturing*, 20, 838.
5. Aneem, T. H., Firdous, S. O., Anjum, A., Wong, S. Y., Li, X., & Arafat, M. T. (2024). Enhanced wound healing of ciprofloxacin incorporated PVA/alginate/PAA electrospun nanofibers with antibacterial effects and controlled drug release. *Materials Today Communications*, 38, 107950.
6. Rufato, K. B., Veregue, F. R., de Paula Medeiro, R., Francisco, C. B., Souza, P. R., Popat, K. C., & Martins, A. F. (2023). Electrospinning of poly (vinyl

- alcohol) and poly (vinyl alcohol)/tannin solutions: A critical viewpoint about cross-linking. *Materials Today Communications*. 35, 106271.
7. Sharma, R., Malviya, R., Singh, S., & Prajapati, B. (2023). A critical review on classified excipient sodium-alginate-based hydrogels: Modification, characterization, and application in soft tissue engineering. *Gels*. 9 (5), pp. 430.
 8. Wang, H., Kong, L., & Ziegler, G. R. (2019). Fabrication of starch-nanocellulose composite fibers by electrospinning. *Food Hydrocolloids*, 90, 90-98.
 9. Pasaoglu, M. E., & Koyuncu, I. (2021). Substitution of petroleum-based polymeric materials used in the electrospinning process with nanocellulose: A review and future outlook. *Chemosphere*. 269, 128710.
 10. Yan, J., Bai, T., Yue, Y., Cheng, W., Bai, L., Wang, D., ... & Han, G. (2022). Nanostructured superior oil-adsorbent nanofiber composites using one-step electrospinning of polyvinylidene fluoride/ nanocellulose. *Composites Science and Technology*. 224, 109490.
 11. Afra, S., Samadi, A., Asadi, P., Bordbar, M., Iloukhani, M., Rai, A., & Aghajanzpour, M. (2024). Chitosan crosslinkers and their functionality in 3D bioprinting to produce chitosan-based bioinks. *Inorganic Chemistry Communications*. 112842.
 12. Lim, D.J. (2022). Cross-linking agents for electrospinning-based bone tissue engineering. *International J. of Molecular Sciences*. 23 (10), 5444.
 13. Ehrmann, A. (2021). Non-toxic crosslinking of electrospun gelatin nanofibers for tissue engineering and biomedicine-a review. *Polymers*. 13, 1973. 22p.
 14. Nataraj, D., Reddy, R., & Reddy, N. (2020). Crosslinking electrospun poly (vinyl) alcohol fibers with citric acid to impart aqueous stability for medical applications. *European Polymer J*. 124, 109484.
 15. Zhan, F., Yan, X., Li, J., Sheng, F., & Li, B. (2021). Encapsulation of tangeretin in PVA/PAA crosslinking electrospun fibers by emulsion-electrospinning: Morphology characterization, slow-release, and antioxidant activity assessment. *Food Chemistry*. 337, 127763.
 16. Ge, H., & Wang, M. (2023). Raman Spectrum of the $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-MgSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ System: Excess Spectrum and Hydration Shell Spectrum. *Molecules*. 28, 7356. 13p.
 17. Sarker, M., Izadifar, M., Schreyer, D., & Chen, X. (2018). Influence of ionic crosslinkers ($\text{Ca}^{2+}/\text{Ba}^{2+}/\text{Zn}^{2+}$) on the mechanical and biological properties of 3D Bioplotting Hydrogel Pads. *J. of Biomaterials Science, Polymer Edition*. 29 (10), 1126-1154.
 18. Kumar, A., Lee, Y., Kim, D., Rao, K. M., Kim, J., Park, S., ... & Han, S. S. (2017). Effect of crosslinking functionality on microstructure, mechanical properties, and in vitro cytocompatibility of cellulose nanocrystals reinforced poly (vinyl alcohol)/sodium alginate hybrid pads. *International J. of Biological Macromolecules*. 95, 962-973.
 19. Doustdar, F., Olad, A., & Ghorbani, M. (2022). Effect of glutaraldehyde and calcium chloride as different crosslinking agents on the characteristics of chitosan/cellulose nanocrystals scaffold. *International J. of Biological Macromolecules*. 208, 912-924.
 20. Kidane, S. W. (2021). Application of response surface methodology in food process modeling and optimization. In *Response surface methodology in engineering science*. IntechOpen.
 21. Zangeneh, N., Azizian, A., Lye, L., & Popescu, R. (2002). Application of response surface methodology in numerical geotechnical analysis. In *Proc. 55th Canadian Society for Geotechnical Conference, Hamilton*. 8p.

