تحقیقات مهندسی صنایع غذایی/جلد ۲۵ / شماره ۸۰/ بهار و تابستان/۱۴۰۵/ ص ۴۱-۶۲

سایت مجله: https://fooder.areeo.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

پیشرفت‌ها و کاربردهای ریزپوشانی ترکیبات طبیعی با استفاده از نانوساختارهای الکتروریسی‌شده

هما بهمدی[1*]، نگار روشنی دهلقی[2]، علی اکرامی[3]

[1*]استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

[2] گروه علوم و صنایع غذایی، پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[3] گروه پرستاری، دانشگاه علوم توانبخشی و سلامت اجتماعی، تهران، ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۱۱/۰۵ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۲/۱۶

چکیده

نانوساختارهای الکتروریسی‌شده امکان ریزپوشانی ترکیبات طبیعی را در بستری با ابعاد نانومتری فراهم می‌کنند. این فرآیند با اعمال میدان الکتریکی به محلولی از پلیمر و حلال، منجر به تولید الیافی با سطح ویژهٔ بالا و ساختار قابل‌کنترل می‌شود. شرایط فرآیند الکتروریسی از تخریب ترکیبات حساس جلوگیری می‌کند. پایداری ترکیبات طبیعی در الیاف به ویژگی‌های محلول، پارامترهای الکتروریسی و نوع برهم‌کنش با ماتریس پلیمری وابسته است. یکی از کاربردهای اصلی این ساختارها، حفظ خواص ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی در محصولات غذایی است. در این حالت، ترکیبات طبیعی به‌تدریج از ماتریس الیاف رها می‌شوند و ماندگاری مواد را افزایش می‌دهند. همین ویژگی در حوزهٔ دارورسانی نیز استفاده می‌شود، جایی که تنظیم سینتیک رهایش، اثربخشی ترکیبات مؤثر را طی زمان حفظ می‌کند. ساختارهای ترکیبی از جمله هسته–پوسته، چندلایه، جهت‌یافته و بافته شده، امکان طراحی رفتارهای رهایشی متنوع را فراهم می‌آورند. در محیط‌های زیستی، شباهت نانوالیاف به ماتریس خارج سلولی، تعامل سلولی را تسهیل می‌کند و حضور ترکیبات طبیعی می‌تواند القای رشد یا تمایز سلولی را هدایت کند. این ویژگی در بازسازی بافت و همچنین در فرمولاسیون محصولات موضعی برای پوست کاربرد دارد، جایی که نفوذ ترکیبات فعال و پایداری آن‌ها همزمان بهبود می‌یابد. بر این اساس، هدف این مقالهٔ مروری بررسی تحلیلی و مقایسه‌ای پیشرفت‌های اخیر در زمینهٔ ریزپوشانی ترکیبات طبیعی با استفاده از نانوساختارهای الکتروریسی‌شده، با تمرکز بر چهار حوزه کاربردی کلیدی است: صنایع غذایی و بسته‌بندی فعال، دارورسانی و کاربردهای دارویی، مهندسی بافت و کاربردهای زیست‌پزشکی، و محصولات آرایشی و بهداشتی.

واژه‌های کلیدی: الکتروریسی، ریزپوشانی، ترکیبات طبیعی، نانوالیاف، رهایش کنترل‌شده

مقدمه

ریزپوشانی ترکیبات طبیعی در دهه‌های اخیر از روش محافظتی ساده به استراتژی ساختارمحور برای کنترل پویای رهاسازی، تعدیل برهمکنش‌های زیستی و هدایت پاسخ سلولی تبدیل شده است (Pourjavid *et al.*, 2022, Pires *et al.*, 2023)، به‌ویژه در مواجهه با ماهیت ذاتی ترکیبات طبیعی چون فنل‌ها، ترپن‌ها، فلاوونوئیدها و کاروتنوئیدها که دارای فراریت بالا، ناپایداری و حساسیت در برابر نور – اکسیژن - حرارت و انحلال پذیری محدود هستند (Zomorodi *et al.*, 2019). این ویژگی‌ها، به‌رغم فعالیت زیستی بالقوهٔ ترکیبات نامبرده، در بسیاری از موارد کارایی عملی آن‌ها را در محیط‌های پیچیدهٔ غذایی، دارویی یا پوستی محدود می‌کند، مگر آنکه در ماتریس حامل با ساختار کنترل‌شده جاسازی شوند (Shakouri *et al.*, 2023,

نگارنده مسئول: **Email** : hbehmadi@yahoo.com

http://doi: 10.22092/FOODER.2026.372378.1449

© 2026,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ekrami *et al.*, 2022b). در این راستا، الکتروریسی[1] به‌عنوان یک فناوری پایین به بالا برای تولید نانوالیاف سه‌بعدی، به دلیل قابلیت تولید ساختارهایی با سطح ویژه بالا (۱۰ تا ۱۰۰ مترمربع بر گرم)، تخلخل قابل تنظیم و ریزساختار تعریف‌شده، از جمله هسته–پوسته، چندلایه، جهت‌یافته و بافته شده، جایگاهی متمایز نسبت به روش‌های سنتی مانند خشک‌کن پاششی یا خشک‌کن انجمادی به دست آورده است. این انعطاف امکان طراحی سیستم‌هایی با رفتار پاسخگو به محرک‌های محیطی، مانند pH، دما، آنزیم یا میدان مغناطیسی را فراهم می‌آورد، به‌گونه‌ای که الیاف دیگر صرفاً حامل نیستند، بلکه خود به سیستم‌های واکنش‌پذیر نسبت به رفتار زیستی - محیطی تبدیل می‌شوند (Emam-Djomeh *et al.*, 2025).

در سیستم‌های ریزپوشانی یک‌لایه و چندلایه، لایهٔ پوسته عمدتاً به‌عنوان سد فیزیکی و لایهٔ داخلی به‌عنوان مخزن اصلی عمل می‌کند (Ekrami *et al.*, 2026)، اما در الکتروریسی، ماتریس نانوالیافی سه‌بعدی و پیوسته با قابلیت کنترل و ساختار، ظرفیت بارگذاری، و سدی را در مقیاس نانومتری همزمان و به‌صورت مستطیلی افزایش می‌دهد (Mirzakhani *et al.*, 2018, Emam-Djomeh *et al.*, 2024).

این قابلیت‌های ساختاری، مستلزم هماهنگی دقیق بین خواص رئولوژیک محلول الکتروریسی، از جمله ویسکوزیته، وزن مولکولی پلیمر، هدایت الکتریکی و کشش سطحی و پارامترهای فرآیندی مانند دما، ولتاژ، قطر سوزن، فاصله نوک سوزن تا جمع کننده و دبی تغذیه است. حتی تغییر جزئی در این پارامترها می‌تواند منجر به تغییر چند برابری در قطر فیبر، تشکیل گلوله یا حتی شکست جت در حین فرآیند شود (Sukowati *et al.*, 2024). انتخاب ماتریس پلیمری نیز تصمیمی ترکیبی است؛ پلیمرهای سنتزی مانند پلی کاپرولاکتون[2] و پلی لاکتیک اسید[3] در بسیاری از کاربردها امتیاز فرآیندی دارند (Chen and Lin, 2020)، اما در کاربردهای غذایی و آرایشی، پرسش‌هایی دربارهٔ زیست‌سازگاری و پتانسیل مهاجرت مونومرهای آن‌ها مطرح است (Akturk *et al.*, 2020). در مقابل، پلیمرهای طبیعی از جمله کیتوزان، مشتقات سلولز (Sadeghipour *et al.*, 2012)، پروتئین‌های گیاهی (Emam-Djomeh *et al.*, 2023) و صمغ‌های گیاهی (Ekrami *et al.*, 2023, Zomorodi *et al.*, 2020) اگرچه از نظر سم‌شناسی برتری دارند، اما نیازمند بهینه‌سازی دقیق برای دستیابی به ویسکوزیته و پایداری لازم هستند (Gutiérrez Rafael *et al.*, 2024, He *et al.*, 2024).

این تقابل نشان می‌دهد که کارایی هر سیستم ریزپوشانی تنها به وجود ترکیب زیست‌فعال بستگی ندارد، بلکه به هماهنگی ظریف میان رفتار رئولوژیک محلول، پویایی تشکیل جت، ریزساختار نانوالیاف و شرایط کاربردی واقعی، چه در ماتریس غذایی و چه در محیط گوارشی یا در تماس با پوست، وابسته است (Ekrami *et al.*, 2022a). با این همه، داده‌های موجود همچنان دچار ناهمگونی روش‌شناختی قابل توجهی هستند. بسیاری از مطالعات تنها بر اساس آزمایش‌های برون‌تنی[4] و بدون شبیه‌سازی شرایط پیچیدهٔ محیطی از جمله وجود آنزیم‌های گوارشی، میکروبیوم سطحی یا استرس مکانیکی ادعای بهبود عملکرد می‌کنند (Longo *et al.*, 2023, Wang and Su, 2024).

جدول ۱ خلاصه‌ای جامع از طیف گسترده‌ای از ترکیبات زیست‌فعال طبیعی، شامل پلی‌فنول‌ها، فلاوونوئیدها، ویتامین‌ها، اسانس‌ها و پپتیدهای فعال را همراه با چالش‌های ذاتی آن‌ها و الزام‌های ریزپوشانی در ماتریس‌های الکتروریسی‌شده ارائه می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که ریزپوشانی در نانوساختارهای الکتروریسی‌شده نه‌تنها می‌تواند پایداری شیمیایی و فیزیکی این ترکیبات را بهبود بخشد، بلکه با امکان رهایش کنترل‌شده و افزایش

[1] Electrospinning
[2] Polycaprolactone (PCL)
[3] Polylactic acid (PLA)
[4] In-vitro

زیست‌فراهمی، عملکرد زیستی و کاربردی آن‌ها را در صنایع دارویی، غذایی و بهداشتی تقویت می‌کند. علاوه بر این، تنوع پلیمرهای قابل استفاده و سهولت بالای فرآیند الکتروریسی، ریزپوشانی را به راهکاری هوشمند و هدفمند برای حفاظت از ترکیبات حساس طبیعی تبدیل کرده است.

با وجود گسترش مطالعات در زمینهٔ ریزپوشانی ترکیبات طبیعی با استفاده از نانوساختارهای الکتروریسی‌شده، هنوز مروری تحلیلی و مقایسه‌ای به‌صورت جامع در دسترس نیست که بتواند هم‌زمان ارتباط میان ساختار نانوالیاف، نوع پلیمر، پارامترهای فرآیندی و عملکرد نهایی را در چهار حوزهٔ اصلی کاربردی، یعنی صنایع غذایی و بسته‌بندی فعال، دارورسانی و کاربردهای دارویی، مهندسی بافت و کاربردهای زیست‌پزشکی، و محصولات آرایشی و بهداشتی بررسی کند. مرورهای پیشین عمدتاً بر یک نوع ساختار، یک گروه خاص از ترکیبات زیست‌فعال، یا یک حوزهٔ کاربردی محدود متمرکز بوده‌اند، در حالی‌که این مقاله با رویکردی یکپارچه، پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای ریزپوشانی ترکیبات طبیعی در نانوساختارهای الکتروریسی‌شده را به‌صورت مقایسه‌ای و میان‌رشته‌ای تحلیل می‌کند. بر این اساس، هدف این مرور علاوه بر گردآوری مطالعات موجود، شناسایی خلأهای پژوهشی و ارائهٔ چارچوبی روشن برای طراحی سامانه‌های رهایش کنترل‌شده مبتنی بر نانوالیاف الکتروریسی‌شده است. برای شناسایی مطالعات مرتبط، در پایگاه‌های داده علمی معتبر از جمله Scopus، Web of Science، PubMedو Google Scholar جستجو شد و کلیدواژه‌های اصلی عبارت بودند از: electrospinning، electrospun nan of ibers، microencapsulation، encapsulation، natural compounds، bioactive compounds، controlled release، core-shell fibers، woven , aligned fibers. بازه زمانی مطالعات بررسی‌شده نیز از ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ در نظر گرفته شد.

فناوری الکتروریسی و تولید نانوساختارها

فرآیند الکتروریسی بر پایهٔ کشش محلول پلیمری یا مذاب در معرض میدان الکتریکی قوی شکل می‌گیرد که منجر به تولید الیافی با ابعاد نانومتری تا میکرومتری می‌شود (Asadzadeh *et al.*, 2024). این فرآیند با تشکیل یک مخروط تیلور[1] در نوک سوزن رخ می‌دهد که تحت تأثیر نیروی کولنی و کشش سطحی قرار دارد و در نهایت به صورت جت پیوسته از مایع به سمت الکترود جمع‌کننده شتاب می‌گیرد. طی مسیر، حلال تبخیر و جت نازک‌تر می‌شود تا در نهایت به‌صورت الیاف جامد روی سطح جمع‌آوری شود (Sukowati *et al.*, 2024, Mhetre *et al.*, 2023). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ویسکوزیته، هدایت الکتریکی و کشش سطحی محلول، بیش از دیگر عوامل بر قابلیت الکتروریسی تأثیر می‌گذارند. از این رو، ویسکوزیتهٔ مناسب برای ایجاد شبکه‌ای از زنجیره‌های درهم‌تنیده، هدایت الکتریکی کافی برای القای بار مؤثر و کشش سطحی بهینه برای پایداری جت ضروری است (Cho *et al.*, 2025). در این راستا وانگ و هاشیموتو (Wang and Hashimoto, 2020) نشان دادند که میزان کشش در نوک مخروط تیلور می‌تواند به بیش از ۴۰۰۰ بر ثانیه برسد که به‌وضوح از شدت بازگشت زنجیره‌های پلیمری بیشتر است و منجر به جهت‌گیری و کشش شدید زنجیره‌ها و در نهایت تفکیک‌پذیری فازهای غنی و فقیر از پلیمر می‌شود. در بخش خمیدهٔ جت نیز نیروی کشش الکتریکی در تقابل با نیروی مقاومت هوا قرار می‌گیرد و این رقابت، نوسان‌های جانبی را القا می‌کند و شروع فرآیند ویپینگ را رقم می‌زند (Wang and Wang, 2021).

[1] زمانی که ولتاژ بسیار زیاد اعمال می‌شود، قطرهٔ محلول پلیمری در سر سوزن تمایل دارد شکل مخروطی معروف به مخروط تیلور را با توجه به تنش سطحی مایع و نیروی میدان الکتریکی تشکیل دهد.

جدول ۱- ترکیبات زیست‌فعال طبیعی و الزام‌های ریزپوشانی آن‌ها در نانوساختارهای الکتروریسی‌شده

Table 1: Natural bioactive compounds and encapsulation requirements in electrospun nanostructures

Type of Natural Bioactive Compound	Key Example	Biological/Functional Applications	Intrinsic Challenges	Importance of Encapsulation	References
Polyphenolic compounds	Curcumin	Antioxidant, anti-inflammatory, anticancer	Very low water solubility, photostability, pH instability	Enhanced solubility, stability, and bioavailability	(Deng *et al.*, 2025)
	Resveratrol	Cardiovascular protection, anti-aging	Rapid oxidation, limited bioavailability	Protection against oxidation, controlled release	(Günal-Köroğlu *et al.*, 2025)
Flavonoids	Catechins	Antioxidant, cellular protection	pH and light sensitivity	Preservation of bioactivity during processing	(Ayele *et al.*, 2025)
	Quercetin	Anti-inflammatory, free radical scavenging	Thermal and photostability issues	Improved stability and bioavailability	(Nazarnezhad *et al.*, 2025)
Natural antioxidants	Vitamin E	Oxidative stress reduction, shelf-life extension	Oxidation in light and oxygen	Prevention of oxidative degradation	(Pramana *et al.*, 2025)
Carotenoids	β-Carotene	Vitamin A precursor, antioxidant	High sensitivity to light and oxygen	Enhanced stability and bioavailability	(Flores, 2025)
	Lycopene	Cardiac protection, anticancer	Thermal instability, low solubility	Structural protection, controlled release	(de Farias *et al.*, 2025)
	Lutein	Eye health, antioxidant	Photodegradation, oxidation	Improved functional stability	(Arshad *et al.*, 2025)
Fat-soluble vitamins	Vitamin A	Cell growth, immune enhancement	Light and heat sensitivity	Protection against degradation	(Sharma *et al.*, 2023)
	Vitamin D	Calcium metabolism regulation	Storage instability	Enhanced bioavailability	(Majeed and Rather, 2025)
Water-soluble vitamins	Vitamin C	Antioxidant, immune enhancement	Thermal and oxidative instability	Bioactivity preservation	(Gupta *et al.*, 2026)
Essential oils	Thyme oil	Antimicrobial, natural preservative	High volatility, rapid oxidation	Reduced evaporation, extended shelf-life	(Zhang *et al.*, 2023b)
	Cinnamon oil	Antimicrobial, antioxidant	Strong sensory effects	Release control, flavor modulation	(Zhou *et al.*, 2025)
	Clove oil	Antibacterial, antioxidant	Light and heat sensitivity	Improved functional stability	(Yeoh *et al.*, 2025)
Volatile compounds	Menthol	Flavoring, cooling effect	Rapid evaporation	Gradual release	(Topuz and Uyar, 2025)
	Thymol	Antimicrobial, antioxidant	Oxidative instability	Shelf-life extension	(Mohandoss *et al.*, 2025)
Essential fatty acids	EPA/DHA (Omega-3)	Heart and brain health	Lipid oxidation, of f-flavors	Oxidation prevention, flavor masking	(Paul *et al.*, 2025)
	Linoleic acid	Lipid metabolism regulation	Oxidative instability	Chemical stability improvement	(Kumar *et al.*, 2024)
Alkaloids	Caffeine	CNS stimulation	Rapid release, strong effects	Dose control and release	(Shavronskaya *et al.*, 2023)
	Capsaicin	Anti-obesity, anti-inflammatory	High irritancy	Controlled release	(Liu *et al.*, 2023)
Bioactive peptides	Blood pressure-regulating peptides	Targeted bioactivity	Enzymatic degradation in digestion	Biological protection, efficacy enhancement	(Chen *et al.*, 2025)
Proteins	Lact of errin	Antibacterial, immune enhancement	Thermal and pH denaturation	Structure and activity preservation	(Kumar *et al.*, 2024)
	Enzymes	Biocatalysis	Environmental sensitivity	Functional stability enhancement	(Zhang *et al.*, 2023a)
Sensitive bioactive compounds	Insulin	Blood glucose regulation	Enzymatic degradation, limited absorption	Targeted release	(Przybyła *et al.*, 2023)
Natural antimicrobials	Nisin	Spoilage bacteria inhibition	Rapid release	Shelf-life extension	(Joy *et al.*, 2025)
	Chitosan	Antimicrobial, film-forming	Limited solubility	Performance and release improvement	(Castro-Muñoz *et al.*, 2023)
Plant extracts	Green tea extract	Antioxidant, anti-inflammatory	Component instability	Active compound protection	(Yuan *et al.*, 2023)
	Aloe vera	Wound healing, anti-inflammatory	Processing degradation	Bioactivity preservation	(Liu *et al.*, 2023)
	Ginseng	Immune system enhancement	Environmental sensitivity	Stability and efficacy enhancement	(Yang *et al.*, 2023)

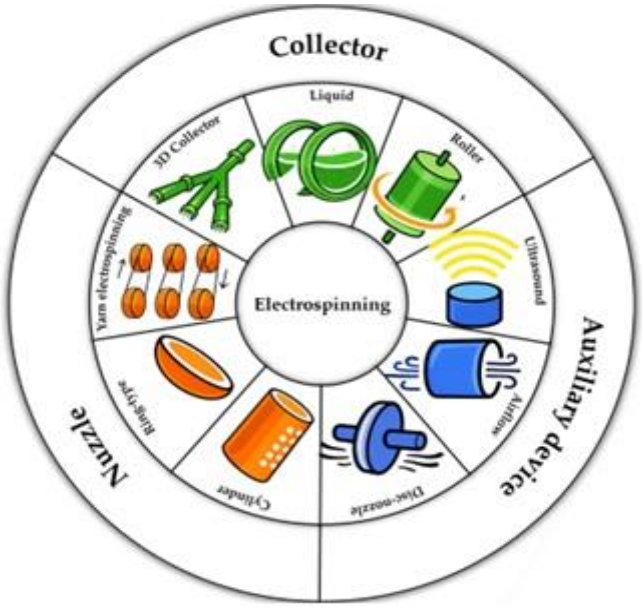
نخستین تلاش‌ها برای توصیف رفتار جت صرفاً بر اساس رئولوژی برشی بود، اما اوالدز و همکاران (Ewaldz *et al.*, 2021) با استفاده از رئولوژی کششی نشان دادند که کشش‌پذیری گسترشی محلول‌ها و زمان استراحت آن‌ها نقشی اساسی در شکل‌گیری الیاف یکنواخت دارند و به‌ویژه در حلال‌های با کشش سطحی بالا، این پارامترها حیاتی‌تر هستند. یین و همکاران (Yin *et al.*, 2022) نیز به تأثیر گشتاور دوقطبی حلال بر خواص پیزوالکتریک الیاف پلی‌وینیلیدین فلورید[1] اشاره کردند که گویای این است که انتخاب حلال تنها بر مورفولوژی اثر نمی‌گذارد بلکه می‌تواند بر خواص عملکردی الیاف نیز تأثیرگذار باشد. در کنار این عوامل بنیادی، پارامترهای فرآیندی از جمله ولتاژ اعمالی، فاصلهٔ نوک سوزن تا جمع‌کننده، دبی پمپ و قطر نوک نیز در کنترل پایداری جت و ضخامت نهایی الیاف مؤثرند. افزایش ولتاژ یا دبی معمولاً منجر به افزایش قطر الیاف می‌شود در حالی که کاهش فاصلهٔ نوک تا جمع‌کننده می‌تواند سرعت کشش جت را افزایش دهد و در نتیجه الیافی با قطر کمتر تولید کند. در مطالعات توپوز و اویار (Topuz and Uyar, 2020) نشان داده شده است که حتی در سیستم‌های بدون پلیمر و تنها با سیکلودکسترین، این روند قابل کنترل است و پارامترهای فرآیندی به طور مستقیم بر ضخامت الیاف تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، در سیستم‌های هسته–پوسته، تفاوت در غلظت، ویسکوزیته و هدایت الکتریکی محلول‌های هسته و پوسته می‌تواند الگوی حرکت جت، زاویه پیچش و طول بخش مستقیم جت را تغییر دهد و در نهایت منجر به الیافی با آرایش داخلی متفاوت شود (Li *et al.*, 2020). برخی مطالعات نیز به نقش شرایط محیطی مانند دما و رطوبت نسبی اشاره کرده‌اند. برای نمونه، کاپ و همکاران (Kopp *et al.*, 2020) نشان دادند که افزایش رطوبت نسبی و دما می‌تواند منجر به ناهمگونی در قطر الیاف و کاهش مقاومت نفوذپذیری غیربافتی شود. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در درک مکانیسم‌های بنیادی، هنوز پیچیدگی‌هایی در ارتباط بین پارامترهای محلول، شرایط فرآیند و خواص نهایی الیاف وجود دارد که نیازمند مدل‌سازی‌های پیچیده‌تر و رویکردهای ترکیبی مانند روش سطح پاسخ و یادگیری ماشین است (Mobahi *et al.*, 2025, Ekrami *et al.*, 2025b). پرواز و همکاران (Pervez *et al.*, 2023) با استفاده از مدل LW-KPLSR[2] نشان دادند که می‌توان با دقت بالایی قطر الیاف را پیش‌بینی کرد. مدل LW-KPLSR یک روش رگرسیون غیرخطی مبتنی بر کرنل و وزن‌دهی محلی است. این مدل ترکیبی از رگرسیون کرنلِ با اهمیت‌دهی به نمونه‌های نزدیک‌تر در فضای ویژگی‌ها را به‌کار می‌گیرد و به‌خوبی وابستگی‌های غیرخطی بین پارامترهای الکتروریسی و قطر الیاف را پیش‌بینی می‌کند. شکل ۱ نمایی جامع از اجزای مختلف سامانه الکتروریسی را نشان می‌دهد که در تولید نانوساختارهای الکتروریسی‌شده برای ریزپوشانی ترکیبات طبیعی استفاده می‌شود. در این سامانه‌ها، تنوع جمع کننده‌ها شامل سه‌بعدی، صفحه‌ای، سوزنی، مایع و غلتکی همراه با به‌کارگیری تجهیزات کمکی مانند امواج فراصوت، دیسک‌نازل و جریان هوا امکان کنترل دقیق ریزساختار، جهت‌گیری و یکنواختی الیاف را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، طراحی‌های مختلف نازل از جمله نازل‌های استوانه‌ای، حلقه‌ای و سامانه‌های چندنازله، نقش کلیدی در بهینه‌سازی ساختار نانوالیاف و ارتقای کارایی ریزپوشانی دارند.

کاربردهای نانوساختارهای الکتروریسی‌شده حاوی ترکیبات طبیعی

نانوساختارهای الکتروریسی‌شده حاوی ترکیبات طبیعی در سال‌های اخیر توجه فراوانی را در حوزه‌های کاربردی متنوع به خود جلب کرده‌اند، به‌ویژه در توسعهٔ بسته‌بندی‌های فعال و هوشمند مواد غذایی که ضمن تمدید عمر انبارمانی، از تخریب میکروبی و اکسایشی محصولات جلوگیری می‌کنند.

[1] Polyvinylidene fluoride or Polyvinylidene difluoride (PVDF)

[2] Locally Weighted Kernel Partial Least Squares Regression



شکل ۱- اجزای دستگاه الکتروریسی

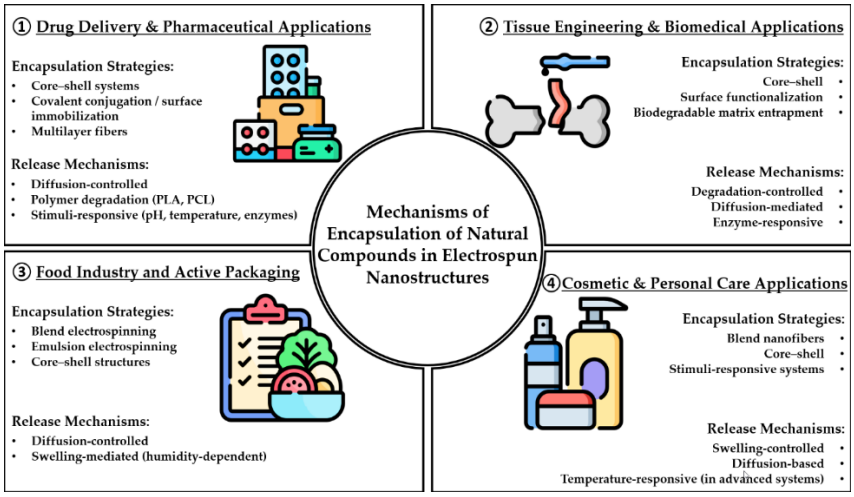
Figure 1- Parts of the electrospinning apparatus

این سامانه‌ها در صنعت داروسازی نیز به‌عنوان سامانه نوین برای رهایش هدفمند و کنترل‌شدهٔ ترکیبات دارویی گیاهی به‌کار می‌روند و امکان بهینه‌سازی زیست‌دسترسی و کاهش عوارض جانبی را فراهم می‌آورند. در مهندسی بافت نیز نانوالیاف بارگذاری‌شده با مولکول‌های زیست‌فعال نقش ساختاری و عملکردی هم‌زمان ایفا می‌کنند و محیطی مناسب برای تکثیر و تمایز سلول‌ها فراهم می‌سازند. در صنعت آرایشی و بهداشتی نیز این فناوری ظرفیت ذخیره‌سازی و رهایش تدریجی ترکیبات فعال گیاهی را در فرمولاسیون‌های موضعی افزایش داده و پایداری و اثربخشی محصولات را بهبود بخشیده است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، راهبردهای ریزپوشانی شامل ساختارهای هسته–پوسته، الکتروریسی امتزاجی و امولسیونی، عاملی‌سازی سطح و ماتریس‌های زیست‌تخریب‌پذیر هستند که متناسب با حوزهٔ کاربرد طراحی می‌شوند. این نانوساختارها در صنایع دارویی، مهندسی بافت، بسته‌بندی فعال غذایی و محصولات آرایشی–بهداشتی به‌کار می‌روند و امکان حفاظت و پایداری ترکیبات طبیعی حساس را فراهم می‌کنند. مکانیسم‌های رهایش نیز عمدتاً بر پایهٔ نفوذ، تخریب پلیمر (مانند PLA و PCL)، تورم وابسته به رطوبت یا پاسخ‌پذیری به محرک‌هایی مانند pH، دما و آنزیم‌ها تنظیم می‌شود که کنترل هدفمند آزادسازی را ممکن می‌سازد.

صنایع غذایی و بسته‌بندی فعال

استفاده از نانوساختارهای الکتروریسی‌شده در صنایع غذایی، به‌ویژه در حوزهٔ بسته‌بندی فعال، طی سال‌های اخیر به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های علوم مواد غذایی تبدیل شده است، زیرا این فناوری امکان یکپارچه‌سازی ترکیبات طبیعی فعال مانند آنتی‌اکسیدان‌ها، ترکیبات ضد میکروبی، رنگ‌دانه‌های طبیعی و ویتامین‌ها در ماتریس‌های پلیمری را با حفظ عملکرد زیستی فراهم می‌آورد (Khajavi and Abbasipour, 2026). الکتروریسی با وجود شرایط فرآیندی ملایم و نداشتن نیاز به دما یا فشار بالا، امکان تولید فیلم‌های نانوساختاری قابل تنظیم سطحی و با تخلخل مناسب را فراهم می‌سازد که این ویژگی‌ها در توسعهٔ بسته‌بندی‌های هوشمند، ضدباکتریایی، آنتی‌اکسیدانی و مقاوم در برابر رطوبت و گرما کاربرد مستقیم دارند.



شکل ۲- مکانیسم‌های ریزپوشانی ترکیبات طبیعی در نانوساختارهای الکتروریسی‌شده

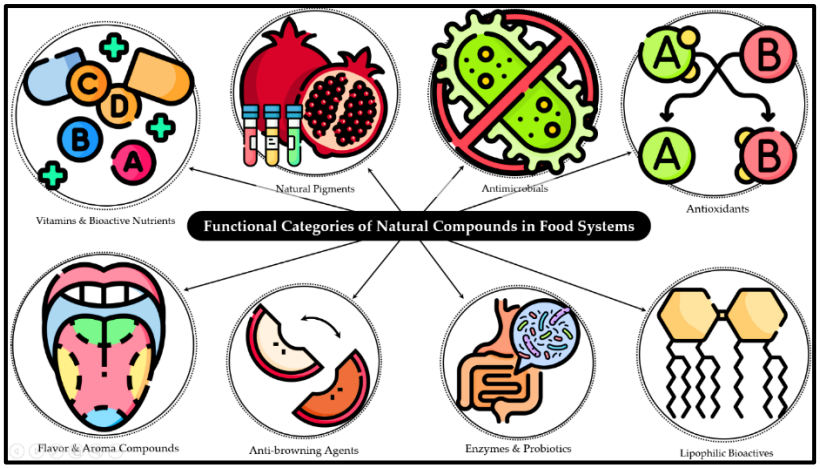
Figure 2- Mechanisms of Encapsulation of Natural Compounds in Electrospun Nanostructures

در همین راستا، هی و همکاران (He *et al.*, 2024) نشان دادند که غشای نانوالیافی حاوی پلی‌وینیل الکل، کیتوزان و تاننیک اسید، پس از اتصال عرضی با گلوتارآلدهید و پوشش‌دهی سطحی با نانوذرات اکسید روی، نه‌تنها از نظر مکانیکی بهبود چشمگیری می‌یابد، به‌طوری‌که مقاومت کششی از ۳ به ۱۸ مگاپاسکال و دمای تخریب حرارتی از ۲۲۵ به ۳۱۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد، بلکه خواص ضدباکتریایی، ضدفرابنفش و آنتی‌اکسیدانی چندگانه‌ای از خود نشان می‌دهد که در آزمایش نگهداری توت‌فرنگی عمر انبارمانی را تا ۶ روز افزایش داد (He *et al.*, 2024). این یافته‌ها تأیید می‌کنند که ترکیب پلیمرهای زیست‌سازگار با ترکیبات طبیعی، ضمن حفظ زیست‌سازگاری و نداشتن سمیت، امکان طراحی بسته‌بندی‌های چندعملکردی را فراهم می‌آورد. گلمکانی و همکاران (Golmakani *et al.*, 2024) نیز با بارگذاری فیکوسیانین و عصارهٔ اسپیرولینا در الیاف گلیادین به کارایی این سیستم در کاهش شاخص‌های اکسیداسیون چربی (مانند عدد پراکسید و تیوباربیتوریک اسید) در مغز گردو اشاره کردند و گزارش دادند که کارایی ضدباکتریایی و آنتی‌اکسیدانی عصارهٔ اسپیرولینا به‌طور معناداری بالاتر از کارایی ضدباکتریایی و آنتی‌اکسیدانی فیکوسیانین خالص است که نشان می‌دهد ترکیب‌های طبیعی چندجزئی ممکن است اثرهای سینرژیستی قابل‌توجهی داشته باشند. در حوزهٔ نظارت بر تازگی، حیدریان و شاویسی (Heydarian and Shavisi, 2023) نانوالیاف ژلاتین-گزانتان حاوی نانوالیاف کیتین و آنتوسیانین عصارهٔ زرشک سیاه را تولید کردند که علاوه بر بهبود خواص فیزیکومکانیکی، به‌صورت pH حساس رفتار کردند و رنگ خود را از سفید به بنفش تیره در طول ماندگاری میگوهای سفید تغییر دادند، تغییری که همزمان با افزایش پارامترهای شیمیایی و میکروبی رخ داد و این ویژگی را به ابزاری قابل‌اعتماد برای نظارت غیرمخرب بر کیفیت مواد غذایی تبدیل کرد. در حوزهٔ تقویت تغذیه‌ای، بالانک و همکاران (Balanč *et al.*, 2024) با استفاده از کنسانترهٔ پروتئین برگ کدو تنبل و ژلاتین، نانوالیافی حامل ویتامین B_{12} طراحی کردند که ضمن داشتن ثبات حرارتی مناسب تا ۲۲۰ درجه سلسیوس، آزادسازی پایدار این ویتامین را از طریق مکانیسم نفوذ فیکی نشان داد، این در حالی است که ثبات ذخیره‌سازی نیز با مقادیر پایین فعالیت آب (۰٫۳۳۶ تا ۰٫۳۷۶) تأیید شد. این رویکرد، استفاده از ضایعات کشاورزی را به‌عنوان منابع پروتئینی در توسعه مواد غذایی عملکردی ممکن ساخت. اینان سینکر و همکاران (İnan-Çınkır *et al.*, 2024) نیز با بهینه‌سازی فرآیند الکتروریسی، ریزامولسیون

کاروتنوئیدها را در الیاف زئین جاسازی کردند و نشان دادند که این سیستم نه‌تنها کارایی بارگذاری قابل‌قبولی (۷۷٫۷۸ درصد) دارد، بلکه رنگ مواد مدل (مانند شیر و روغن زیتون) را طی زمان به‌خوبی حفظ می‌کند و پایداری کاروتنوئیدها در الیاف بیشتر از پایداری کاروتنوئیدها در حالت آزاد در محیط‌های مختلف است. زاوالا کاستیلو و همکاران (Zavala-Castillo *et al.*, 2024). فولات را در نانوالیاف کربوکسی‌متیل‌سلولز/پلی‌اتیلن اکسید بارگذاری کردند و دریافتند که این ساختار ضمن داشتن کارایی بارگذاری بالا (۹۴٫۵ درصد)، در برابر شرایط اسیدی و تابش فرابنفش نیز از فولات محافظت می‌کند؛ تخریب تنها ۶ درصد طی ۳۰ روز در محیط اسیدی، گواهی بر پتانسیل بالای این سیستم در فرآوری مواد غذایی اسیدی مانند نوشیدنی‌هاست. با ترکیب فیبر محلول سبوس برنج بنفش و پلی‌اتیلن اکسید، سیستمی برای رهایش کنترل‌شدهٔ آلفا-توکوفرول توسعه داده شد که کارایی بارگذاری آن تا ۸۷٫۸ درصد رسید و رهایش آن در شرایط شبیه‌سازی دستگاه گوارش، پایدار و کنترل‌شده بود؛ این یافته اهمیت ویژه‌ای در مواجهه با چالش ناپایداری ویتامین E در فرآیندهای حرارتی و اکسایشی دارد (Li *et al.*, 2025a). راجونایک و همکاران (Rajunaik *et al.*, 2024) با بارگذاری کاتچین‌ها در الیاف زئین نشان دادند که این سیستم ضمن حفظ فعالیت آنتی‌اکسیدانی، طعم تلخ کاتچین‌ها را ماسک می‌کند و در غنی‌سازی شیر خواص حسی آن را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. این مسئله که اغلب در استفاده از ترکیبات فنولیک در مواد غذایی مطرح است، با استفاده از این روش به‌خوبی برطرف می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، ترکیبات طبیعی مورد استفاده در سامانه‌های غذایی در قالب دسته‌های عملکردی متنوعی طبقه‌بندی می‌شوند. این ترکیبات شامل ویتامین‌ها و ریزمغذی‌های زیست‌فعال، رنگدانه‌های طبیعی، ترکیبات ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی، زیست‌فعال‌های لیپوفیل، آنزیم‌ها و پروبیوتیک‌ها، عوامل ضدقهوه‌ای‌شدن و ترکیبات طعم و عطر هستند.

در مجموع، با وجود مزایای ریزپوشانی این گروه‌ها در نانوساختارهای الکتروریسی‌شده، با هدف افزایش پایداری، بهبود زیست‌دسترسی و کنترل رهایش آن‌ها در ماتریس‌های غذایی، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد، از جمله وابستگی شدید عملکرد به نوع پلیمر و شرایط فرآیند، چالش در مقیاس‌پذیری صنعتی، و احتمال تفاوت در نتایج به‌دلیل تنوع در ترکیب مادهٔ فعال، ماتریس پلیمری و شرایط آزمون. بنابراین، تفاوت میان مطالعات مختلف می‌تواند ناشی از همین عوامل باشد و نتایج باید با در نظر گرفتن این ناهمگونی‌ها تفسیر شود.



شکل 3- طبقه‌بندی کارکردی ترکیبات طبیعی در سامانه‌های غذایی

Figure 3- Functional Categories of Natural Compounds in Food Systems

دارورسانی و کاربردهای دارویی

در حوزهٔ دارورسانی، نانوساختارهای الکتروریسی‌شده فراتر از سیستم حمل ساده عمل کرده‌اند و به‌عنوان بستری هوشمند برای کنترل زمان، مکان و میزان رهایش دارو مطرح شده‌اند، به‌طوری که حتی رفتار رهایش می‌تواند در پاسخ به محرک‌های فیزیولوژیکی مانند تغییر pH یا حضور آنزیم‌های خاص تنظیم شود (Ekrami *et al.*, 2025a). آمارجارگال و همکاران (۲۰۲۳) با طراحی نانوالیاف حساس به pH نشان دادند که رهایش توالی‌دار اُکتنیدین و کورکومین، ترکیبی از یک ضد عفونی‌کننده مصنوعی و یک فلاوونوئید طبیعی تنها در شرایط اسیدی (pH کمتر از ۶)، که معمولاً در محیط عفونی یا التهابی دیده می‌شود، به‌صورت همزمان و سینرژیستی رخ می‌دهد و این امر منجر به افزایش چشمگیر فعالیت ضدباکتریایی در برابر *اشریشیا کُلی*[1] و *استافیلوکوکوس اورئوس*[2] می‌شود؛ این رویکرد به‌وضوح بیانگر این است که الکتروریسی تنها ابزاری برای جاسازی دارو نیست، بلکه می‌تواند سیستمی ایجاد کند که تنها در شرایط بیماری فعال شود و از مواجههٔ مداوم بافت سالم با دارو جلوگیری کند (Nirwan *et al.*, 2025). اسپارتالی و همکاران (Spartali *et al.*, 2024) نیز با بارگذاری سیلیبین[3]، ترکیبی طبیعی گیاهی با طیف وسیعی از فعالیت‌های ضدسرطانی و آنتی‌اکسیدانی در الیاف پلی‌کاپرولاکتون، گزارش کردند که این ساختار ضمن ایجاد مهار وابسته به دوز در رشد سلول‌های توموری، بر سلول‌های طبیعی تأثیر مهارکننده‌ای ندارد و حتی در برابر استرس اکسایشی، محافظت سلولی ارائه می‌دهد، این دوگانگی عملکردی دقیقاً همان چیزی است که در سیستم‌های دارورسانی هوشمند مطلوب است: انتخابگری بالا بدون قربانی کردن بافت سالم. در حوزهٔ تک‌دارویی لنگو و همکاران (Longo *et al.*, 2023) به‌خوبی نشان دادند که موقعیت دارو درون الیاف که مستقل از میزان بارگذاری است می‌تواند رفتار رهایش را به‌طور بنیادین تغییر دهد؛ داکاربازین، با برقراری پیوند هیدروژنی با گروه آمیدی پلی‌کاپرولاکتون، به‌صورت یکنواخت در ماتریس توزیع شد و رهایش فیکی داشت، در حالی که کمپلکس طلایی به‌دلیل نبود تطابق شیمیایی، به‌صورت دامنه‌های نانومتری روی سطح الیاف تجمع یافت و رفتار دو مرحله‌ای با اثر انفجاری شدید از خود نشان داد که این یافته هشداری مهم است: افزایش بارگذاری یا انتخاب دارویی فقط بر اساس فعالیت ذاتی کافی نیست و تعامل دارو-پلیمر باید در مرحله طراحی مورد توجه جدی قرار گیرد. راهکارهای ساختاری نوین نیز در این زمینه گسترش یافته‌اند. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2023a) با استفاده از نازل سه‌لایهٔ هم‌مرکز، الیافی با پوسته فاقد دارو و گرادیان داخلی از استامینوفن ساختند و نشان دادند که این معماری، اثر انفجاری اولیه را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد و رهایش طولانی‌تر و یکنواخت‌تری فراهم می‌آورد، این نوع مهندسی ساختاری می‌تواند به‌ویژه در داروهای با حاشیه ایمنی باریک (مانند داروهای ضدسرطان یا ضد تشنج) اهمیت بالایی داشته باشد. یان و همکاران (Yan *et al.*, 2023) نیز با بهره‌گیری از خودآمیختگی ماکرومولکولی و الکتروریسی امولسیونی، الیاف هسته-پوسته‌ای تولید کردند که همزمان ویتامین B_{12} و D_3 را بارگذاری می‌کردند که رهایش کنترل‌شده هر دو را به‌صورت طولانی‌مدت و مستقل امکان‌پذیر ساخت. این سیستم برای درمان‌های ترکیبی مزمن، مانند نارسایی‌های متابولیک یا اختلالات مرتبط با سالمندی بسیار امیدبخش است. در حوزهٔ داروهای با پایداری پایین، بارگذاری سِفیکسیم[4] آنتی‌بیوتیکی با انحلال پذیری پایین و ناپایداری بالا در ماتریس پلی‌وینیل‌الکل/دکستران، نه‌تنها پایداری حرارتی آن را تا ۲۰۰ درجه سلسیوس افزایش می‌دهد، بلکه با تشکیل ناحیهٔ مهارکنندهٔ سه سانتی‌متری

[1] *Escherichia coli*
[2] *Staphylococcus aureus*
[3] Silybin
[4] Cefixime

برای *اشریشیا کُلی*، کارایی ضدباکتریایی را بهینه می‌سازد. این رویکرد می‌تواند به‌طور مستقیم بر کاهش مقاومت دارویی تأثیر بگذارد زیرا رهایش کنترل‌شده از غلظت‌های زیر مؤثر که زمینه‌ساز انتخاب سویه‌های مقاوم هستند جلوگیری می‌کند (Panditkar *et al.*, 2025). الیاف حاوی کاپتوپریل[1] نشان دادند که الیاف هسته-پوسته نه‌تنها رهایش اولیه را کاهش می‌دهند، بلکه بیش از ۲۴ ساعت در شرایط معده باقی می‌مانند. ی ویژگی موثر که در صورت استفاده از ترکیبات طبیعی ضدالتهاب یا ضدزخم گوارشی (مانند کورکومین یا عصارهٔ ریشه زنجبیل)، می‌تواند به سیستم‌های ترکیبی برای درمان زخم‌های گوارشی تبدیل شود (Geng and Williams, 2023). در حوزهٔ محیط‌زیست به‌عنوان بخشی از چرخه دارویی، الم و همکاران (Alam *et al.*, 2025) و وانگ و سو (Wang and Su 2024) به‌ترتیب با توسعه نانوالیاف حاوی دی اکسید تیتانیم/ دی‌اکسید قلع[2] و غشای پلی اتر بلاک آمید[3] ، کارایی بالایی در تخریب یا جذب آلاینده‌های دارویی (مانند استامینوفن[4]، ایبوپروفن[5] و تریکلوزان[6]) از آب نشان دادند این پیشرفت‌ها، هرچند مستقیماً در دارورسانی نیستند، اما برای کاهش بار محیطی داروها که خود می‌تواند منجر به مقاومت دارویی در سطح جمعیت شود، اهمیت استراتژیک دارند. موراسیس و همکاران (Morais *et al.*, 2023) و قمی و همکاران (Ghomi *et al.*, 2023)، با ترکیب عصاره پروپولیس سبز یا ε-پلی‌لیزین در الیاف پلی‌وینیل‌الکل یا پلی کاپرولاکتون/ژلاتین پانسمان‌هایی ساختند که نه‌تنها ضد عفونی‌کننده بودند، بلکه تکثیر فیبروبلاست و کراتینوسیت را تحریک می‌کردند. این امر نشان می‌دهد که مرز بین دارورسانی و پزشکی بازساختی در حال محو شدن است و سیستم‌های دارورسانی آینده احتمالاً همزمان دارو رها می‌کنند و نیز بافت را ترمیم خواهند کرد. با این همه، چالش گسترش و توسعه[7] هنوز جدی است. محققان گرچه توانستند فرآیند الکتروریسی را از مقیاس آزمایشگاهی (۱ میلی‌لیتر بر ساعت) به مقیاس نیمه‌صنعتی (۲۰ میلی‌لیتر بر ساعت) گسترش دهند (Geng and Williams, 2023)، اما پایداری ریسمان الکتریکی و یکنواختی الیاف در دبی‌های بالا همچنان نیازمند بهینه‌سازی دقیق‌تر است و این دقیقاً همان نقطه‌ای است که فناوری‌های نوین مانند الکتروریسی بدون سوزن یا سیستم‌های چندسوزنی می‌توانند وارد شوند. امروزه، موفقیت سیستم دارورسانی الکتروریسی‌شده دیگر تنها به کارایی آزمایش‌های برون‌تنی یا نتایج سلولی محدود نمی‌شود، بلکه به توانایی آن در ترکیبِ هوشمندانه عملکرد دارویی، پاسخ محیطی، سازگاری زیستی و قابلیت توسعه فرآیندی همه در یک ساختار نانومتری وابسته است. این رویکردها مزایایی مانند رهایش کنترل‌شده، افزایش پایداری ترکیبات فعال، امکان پاسخ‌گویی به محرک‌های محیطی و کاهش اثرهای ناخواسته بر بافت سالم دارند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند وابستگی شدید عملکرد به نوع پلیمر و معماری نانوالیاف، احتمال رهایش ناگهانی در برخی سامانه‌ها، چالش‌های مقیاس‌پذیری و نیاز به ارزیابی‌های درون‌تنی دقیق‌تر نیز باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شوند.

مهندسی بافت و کاربردهای زیست‌پزشکی

در حوزهٔ مهندسی بافت، تلاش‌های اخیر نشان می‌دهد که نانوساختارهای الکتروریسی‌شده دیگر به‌عنوان ساده‌ترین جایگزین برای ماتریس خارج سلولی در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه به‌عنوان سکویی فعال برای هدایت رفتار سلولی از طریق سیگنال‌های فیزیکی، شیمیایی و حتی الکتریکی طراحی می‌شوند، و این تحول درک ما از ساختار پشتیبان را از یک کارکرد صرفاً مکانیکی به یک نقش تنظیم‌کننده زیستی تغییر داده است (Li *et al.*, 2025b, Sharifi Malvajerdi *et al.*, 2023). یو و همکاران (Yu *et al.*, 2024) با توسعه

[1] Captopril
[2] TiO_2/SnO_2
[3] Polyether Block Amide (PEBA)
[4] Acetaminophen
[5] Ibuprofen
[6] Triclosan
[7] Scaling-up

ساختاری ترکیبی متشکل از تک‌رشته‌های کربنی پوشیده‌شده توسط الیاف نانومتری نشان دادند که افزودن خاصیت رسانایی الکتریکی به داربست تاندون، نه‌تنها استحکام کششی را ۲٫۴ برابر افزایش می‌دهد، بلکه با تطبیق قطر رشته‌های کربنی (۵٫۰۷ میکرومتر) با الیاف کولاژن طبیعی، اتصال سریع‌تر بافت و بازسازی مسیر سیگنال‌رسانی الکتریکی را تسهیل می‌کند. داده‌های رونویسی نیز تأیید کردند که بیان فیبروموودولین و تِنومودولین و فعال‌سازی مسیرهای مرتبط با ترکیب ماتریس خارج سلولی، به‌ویژه از طریق تنظیم TGF-β، به‌طور معناداری بهبود یافته است. این یافته‌ها به‌وضوح بیانگر آن‌اند که تکرار ساختار فیزیکی بافت کافی نیست و تقلید از ویژگی‌های عملکردی مانند رسانایی ذاتی تاندون می‌تواند کلید موفقیت بازسازی عملکردی باشد. در مقابل، ساختارهای سه‌لایه ترکیبی از چاپ سه‌بعدی و الکتروریسی، نشان دادند که تقلید از ساختار سلسله‌مراتبی پوست از لایهٔ محافظ خارجی تا لایه بازسازی‌کنندهٔ داخلی می‌تواند همزمان عفونت را کنترل و التیام را تسریع کند؛ لایهٔ بالایی نانوالیافی، نفوذ میکروب‌ها را مسدود می‌کند، لایهٔ میانی حاوی نانوذرات جذب ترشحات و فعالیت ضدباکتریایی گسترده‌ای دارد، و لایهٔ پایینی هسته–پوسته ضمن القای تکثیر سلولی فعالیت ضد عفونی را حفظ می‌کند. این طراحی چندلایه، در حالی که پیچیدگی فرآیندی بالایی دارد، اما نتایج زیستی آن به‌ویژه در میزان چسبندگی سلولی، بقا و پتانسیل آنژیوژنز برتری قاطعی نسبت به ساختارهای تک‌لایه نشان می‌دهد. این رویکرد در مطالعات پژوه و همکاران (Pajooh *et al.*, 2024) نیز با ساخت یک داربست دو لایه حاوی فاکتور رشد اندوتلیال عروقی[1] بارگذاری‌شده در دکستران (چاپ‌شده سه‌بعدی) و لایهٔ پایینی نانوالیافی ژلاتین–کراتین تأیید شد. در این ساختار، رهایش هفت‌روزه منجر به بالاترین پتانسیل آنژیوژنز و سریع‌ترین التیام زخم در مدل حیوانی شد. این موفقیت، اهمیت همزمانی بین رهایش کنترل‌شده فاکتورهای رشد و ارائهٔ ساختار فیزیکی بافت‌شبیه را به‌خوبی برجسته می‌سازد (Pajooh *et al.*, 2024). در حوزهٔ بافت‌های پیچیده‌تر، تانگ و همکاران (Tang *et al.*, 2023) با تلفیق یک سیستم پرفیوژن هیدروژلی و الکتروریسی، یک داربست مرکب رابرای ترمیم نخاع طراحی کردند که نه‌تنها سیگنال‌های ضدالتهابی (افزایش ۱۰ درصدی ماکروفاژهای M_2) را القا می‌کند، بلکه آزادسازی برنامه‌ریزی‌شدهٔ SDF-1α و BDNF، جذب سلول‌های بنیادی عصبی را ۴ برابر و تمایز نورونی آن‌ها را دو برابر افزایش می‌دهد. این مطالعه یادآور آن است که در بافت‌های با توانایی بازسازی پایین مانند سیستم عصبی مرکزی، کنترل میکرومحیط التهابی به‌اندازه خود داربست فیزیکی حیاتی است. در بخش مکانیکی، منگ و همکاران (Meng *et al.*, 2024) با استفاده از سیستم الکتروریسی هم‌زمان، داربست‌هایی از پلی‌کاپرولاکتون تولید کردند که همزمان حاوی الیاف میکرو و نانو بودند و در عین حال که تخلخل را افزایش داده بودند، مدول یانگ و تنش نهایی را نیز بهبود بخشیدند. این یافته برخلاف تصور رایج است که کاهش قطر الیاف همیشه منجر به کاهش استحکام می‌شود و نشان می‌دهد که ترکیب هوشمندانه مقیاس‌های مختلف طولی می‌تواند بهینه‌سازی چندوجهی را ممکن سازد. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2023b) نیز با طراحی یک جمع‌کننده پین–حلقه‌ای، داربست‌های پلی هیدروکسی بوتیرات والرات[2] با الگوی شعاعی تولید کردند که در مقایسه با الیاف تصادفی، نه‌تنها خواص مکانیکی و ترشوندگی بهتری داشتند، بلکه تراز سلولی و تکثیر را به‌طور چشمگیری افزایش دادند. این پیشرفت به‌ویژه برای بافت‌هایی که به تراز ساختاری وابسته‌اند (مانند عصب، عضله یا تاندون) اهمیت ویژه‌ای دارد. در حوزهٔ غضروف، امنیه و همکاران (Amnieh *et al.*, 2023) با ادغام نانوذرات کیتوزان در داربست پلی‌هیدروکسی‌بوتیرات[3] نشان دادند که حتی درصد کمی (۱

[1] Vascular endothelial growth factor (VEGF)
[2] Polyhydroxyalkanoate (PHBV)
[3] Polyhydroxybutyrate (PHB)

درصد وزنی) از این ترکیب طبیعی می‌تواند استحکام نهایی را دو برابر و ازدیاد طول را در نقطه شکست بیش از دو برابر کند، در حالی که بلورینگی را کاهش می‌دهد و تخریب هیدرولیتیک را تسریع میکند. این تعادل بین پایداری مکانیکی و زیست‌تخریب‌پذیری، یکی از چالش‌های اساسی در مهندسی غضروف است که این مطالعه راهکاری ساده اما مؤثر برای آن ارائه می‌دهد. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2024a) در حوزG استخوان، با بارگذاری آیکاریتین یک فلاوونوئید گیاهی با فعالیت استئوژنیک و نانوذرات اکسید آهن در داربست هسته–پوسته پلی کاپرولاکتون نشان دادند که این ترکیب نه‌تنها استحکام کششی و سختی را افزایش می‌دهد، بلکه تمایز استئوبلاستی را از طریق مسیر MEK/ERK تقویت می‌کند و در مدل حیوانی، ترمیم معناداری در نقص جمجمه ایجاد می‌کند. این مطالعه نمونه‌ای روشن از توانایی ترکیبات طبیعی در القای سیگنال‌های زیستی خاص، فراتر از اثرهای عمومی ضدالتهابی یا آنتی‌اکسیدانی است. زاسنیسکا و همکاران (Zaszczyńska *et al.*, 2024) نیز با ساخت الیاف پلی متیل متاکریلات[1]، تأیید کردند که ادغام نانوذرات هیدروکسی‌اپاتیت، اگرچه مصنوعی است، در ساختار الکتروریسی‌شده بدون نیاز به تغییر فرآیند پیچیده می‌تواند سازگاری زیستی و استئوکانداکتیویته را حفظ کند یا بهبود بخشد. کانیوک و همکاران (Kaniuk *et al.*, 2023) با ارائهٔ راهکاری نوین برای حذف انتخابی الیاف پلی‌وینیل‌الکل از داربست دو پلیمری پلی‌وینیل‌الکل /پلی لاکتیک اسید توانستند تخلخل را از ۷۸ به ۹۹ درصد افزایش و زمان جذب آب را از ۵۱۶ ثانیه به ۲ ثانیه کاهش دهند به‌طوری که سلول‌های کراتینوسیت و ماکروفاژ قادر به نفوذ عمیق در ساختار شدند.این استراتژی، که ساده از نظر شیمیایی است اما هوشمند از نظر معماری، نشان می‌دهد گاهی خلق فضای خالی، نه پر کردن آن، کلید دستیابی به عملکرد زیستی مطلوب است. در مجموع، پیشرفت‌های اخیر در این حوزه نشان می‌دهد که موفقیت داربست الکتروریسی‌شده دیگر تنها به شباهت ساختاری با ماتریس طبیعی محدود نمی‌شود، بلکه به توانایی آن در ترکیبِ همزمان و هماهنگِ ویژگی‌های فیزیکی (تراز، تخلخل، مکانیک)، شیمیایی (رهایش کنترل‌شده، تعامل ماتریس–پرکننده) و زیستی (پاسخ التهابی، القای تمایز) همه در یک سکوی یکپارچه وابسته است. در مجموع، این مطالعات نشان می‌دهند که داربست‌های الکتروریسی‌شده چندلایه و ترکیبی، با وجود مزایایی مانند تقلید بهتر از معماری و عملکرد بافت طبیعی، رهایش کنترل‌شده عوامل زیست‌فعال و بهبود همزمان خواص مکانیکی و زیستی، همچنان با محدودیت‌هایی مانند پیچیدگی ساخت، دشواری در مقیاس‌پذیری، وابستگی شدید به دقت طراحی معماری و نیاز به ارزیابی‌های درون‌تنی گسترده‌تر روبه‌رو هستند.

کاربردهای آرایشی و بهداشتی

صنعت آرایشی و بهداشتی در سال‌های اخیر در مسیری فزاینده به سمت محصولات «پاک»، زیست‌سازگار و کارآمد حرکت کرده است و در این میان، نانوساختارهای الکتروریسی‌شده به‌عنوان پلتفرمی نوین برای رهایش هدفمند ترکیبات طبیعی فعال همزمان با حذف نیاز به نگهدارنده‌ها، کاهش ضایعات پلاستیکی و ارتقای نفوذپذیری پوستی مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند، اما موفقیت این سیستم‌ها فراتر از صرفاً جایگزینی فرمولاسیون‌های سنتی است و به توانایی آن‌ها در ایجاد تعادل ظریف بین پایداری ترکیب فعال، کنترل رهایش و سازگاری با فیزیولوژی پوستی بستگی دارد. دراگالو و همکاران (Dragojlov *et al.*, 2025)، با استفاده از سریسین ابریشم پروتئینی با خاصیت آبرسانی و القای الاستیسیته و ترکیب آن با ژلاتین برای بهبود استحکام مکانیکی، پچ‌های اطراف چشمی ساختند که در آزمایش بالینی، افزایش ۳۵٫۱ درصد در الاستیسیته و کاهش

[1] Poly methyl methacrylate (PMMA)

۳۰٫۷ درصد در زبری سطحی را القا می‌کنند، اما کاهش هیدراتاسیون نشان می‌دهد که حتی ترکیبات بسیار زیست‌سازگار، در صورت عدم بهینه‌سازی ساختار فیزیکی ماتریس مانند تخلخل، تراکم سطحی یا تعادل آب‌دوستی می‌توانند عملکرد ناخواسته‌ای از خود نشان دهند. در مقابل، تاهیر و همکاران (Tahir *et al.*, 2023) با بارگذاری عصاره *Azadirachta indica* در نانوالیاف پلی‌وینیل‌الکل نشان دادند که ساختار ساده هیدروفیلیک با زاویهٔ تماس آب ۱۷٫۲۴ درجه و ظرفیت جذب ۶۶۰ برابری می‌تواند رهایش سریع (بیش از ۷۰ درصد در ۵ دقیقه)، فعالیت ضدباکتریایی ۹۹٫۹ درصد و فعالیت آنتی‌اکسیدانی ۷۹ درصد را فراهم آورد، و این موفقیت تنها به انتخاب ترکیب طبیعی نیست بلکه به طراحی هوشمند ماتریس پلیمری بستگی دارد که ضمن حفظ تنفس‌پذیری (۱۵٫۲۴ میلی‌متر بر ثانیه)، امکان اتصال مؤثر نانوذرات عصاره (۵۰ تا ۲۵۰ نانومتر) را فراهم می‌کند. این رویکرد عملکردی در مطالعات تیپدونگتا و همکاران(Tipduangta *et al.*, 2023) نیز با بارگذاری کافئین در الیاف استات سلولز/پلی‌وینیل‌پیرولیدون تأیید شد. در این سیستم، نسبت پلیمری ۷ به ۳ علاوه بر کاهش جذب رطوبت، انعطاف‌پذیری را حفظ کرد و رهایش ۸۵ درصدی کافئین را در ۲۴ ساعت ممکن ساخت در حالی که ساختارهای با بارگذاری بالاتر (۱۲٫۵ درصد)، به‌رغم افزایش استحکام مکانیکی ناشی از برهمکنش دارو–پلیمر، تمایل بیشتری به تغییر شکل نشان دادند که این یافته یادآور آن است که افزایش بارگذاری همیشه با بهبود عملکرد همراه نیست و ممکن است به قیمت کاهش پایداری فیزیکی تمام شود. رویکردهای نوین در طراحی ساختاری نیز در حال گسترش است. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2024b) با ساخت یک غشای پلی لاکتیک اسید/پلی وینیل پیرولیدون[1]/ژلاتین حاوی پلی‌ساکارید *Gastrodia elata* و ملاتونین نشان دادند که لایهٔ آبدوش خارجی می‌تواند تبخیر سریع آب را کُند و لایهٔ آبدوست داخلی، نفوذ فعال را تسهیل کند؛ این دوگانگی ساختاری که در سیستم‌های دارورسانی نیز دیده می‌شود، اکنون در حوزهٔ محصولات موضعی پوستی کاربرد پیدا کرده است و نشان می‌دهد اصول مهندسی مواد در حوزه‌های مختلف قابل انتقال هستند. آشوک چاند و همکاران (Ashok Chand *et al.*, 2024) با ارائهٔ پلتفرم کولاژنی تأکید ویژه‌ای بر افزایش نفوذ کولاژن به لایه‌های اپیدرم و درم (به‌ترتیب ۵ تا ۲۵ و ۱۶ تا ۲۰ درصد) داشتند و داده‌های بالینی آن‌ها شامل بهبود هیدراتاسیون، الاستیسیته و سلامت کلی پوست نشان داد که نانوالیاف نه‌تنها حامل فعال هستند، بلکه خود می‌توانند به‌عنوان مولکول فعال عمل کنند. این ویژگی مزیت رقابتی چشمگیری در مقابل فرمولاسیون‌های سنتی دارد که معمولاً پلیمرهای خنثی مانند پلی‌اتیلن گلیکول یا کربوپل را به‌کار می‌گیرند. یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2024) نیز با استفاده از پلی‌ساکارید *Bletilla striata* و بارگذاری سدیم فرولات، غشایی خشک ساختند که علاوه بر سرعت انتقال بخار آب بالا (۴۶۰۷ گرم بر مترمربع در روز)، فعالیت ضد تیروزینازی به میزان ۵۲٫۸۸ درصد و ضد پروپیونی‌باکتریوم اَکنِس[2] به میزان بیش از ۹۸ درصد داشت، این ترکیب چندوجهی نشان می‌دهد که ترکیبات طبیعی چگونه می‌توانند در یک ساختار، چندین نیاز را همزمان پاسخ دهند: کنترل پیگمانتاسیون، مبارزه با آکنه و محافظت از استرس اکسایشی. لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2025) با طراحی یک پچ خشک سریع‌حلال حاوی کورکومین در ماتریس پلی وینیل پیرولیدون نشان دادند که می‌توان بدون استفاده از هیچ نگهدارنده یا افزودنی، رهایش فوری و مؤثر رادیکال‌گیری (۹۰ درصد DPPH) را فراهم آورد. این پیشرفت مستقیماً به چالش‌های محیط‌زیستی ناشی از ضایعات پلاستیکی و مسائل ایمنی ناشی از نگهدارنده‌های شیمیایی پاسخ می‌دهد. رستمی و همکاران (Rostami *et*

[1] Polyvinylpyrrolidone (PVP)

[2] Propionibacterium acnes

(*al.*, 2023) نیز با بارگذاری کوآنزیم Q_{10} در الیاف پلی وینیل پیرولیدون/ژلاتین، رهایش ۹۴ درصد را در ۳۵ دقیقه و اثربخشی ضدپیری تأییدشده با رنگ‌آمیزی ایکس گال[1] را نشان دادند که این سرعت رهایش، برای محصولات اطراف چشم که نیاز به اثر سریع دارند، ضروری است، در عین حال نیازمند ارزیابی دقیق‌تری از پایداری بلندمدت ترکیب فعال در سطح پوست است. تورن و مزاری (Tören and Mazari, 2024) با استفاده از فناوری الکتروریسی بدون سوزن، نانوالیاف کولاژن /هیالورونیک اسید را تولید کردند که علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، چسبندگی و تکثیر سلولی را افزایش دادند، این مطالعه تأکید می‌کند که انتخاب فناوری تولید، و نه فقط مواد اولیه، می‌تواند بر عملکرد نهایی تأثیر بگذارد، زیرا الکتروریسی بدون سوزن، یکنواختی القایی بار الکتریکی و کاهش احتمال انسداد سوزن را به‌دنبال دارد و برای مقیاس‌سازی صنعتی اهمیت ویژه‌ای دارد. دیاس و استیوینهو (Dias and Estevinho, 2025)، با میکروریزپوشانی ویتامین E در ساختارهای زئینی نشان دادند که غلظت بیوپلیمر نه‌تنها بر مورفولوژی (ذرات در غلظت پایین، الیاف در غلظت بالا)، بلکه بر الگوی رهایش (فوری در غلظت پایین، طولانی‌مدت در غلظت بالا) تأثیر می‌گذارد، این یافته، امکان طراحی محصولات با سینتیک رهایش قابل‌برنامه‌ریزی را فراهم می‌آورد. اما باید توجه داشت که انتقال یک پلتفرم از حوزهٔ دارورسانی به حوزهٔ آرایشی، بدون بازنگری در معیارهای عملکردی (مانند زمان ماندگاری روی پوست یا تأثیر بر میکروبیوم سطحی)، می‌تواند به نتایج گمراه‌کننده‌ای منجر شود. در مجموع، پیشرفت‌های اخیر در این حوزه نشان می‌دهد که نانوساختارهای الکتروریسی‌شده دیگر صرفاً به‌عنوان پانسمان هوشمند یا پچ انتقال در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه به‌عنوان سکوهایی یکپارچه برای همزمانی بین سه معیار کلیدی، پایداری محیط‌زیستی، اثربخشی بالینی و ایمنی موضعی طراحی می‌شوند. این تحول، نیازمند بازنگری در معیارهای ارزیابی محصولات آرایشی است: از آزمون‌های سنتی پایداری فیزیکی به سمت ارزیابی‌های سیستمی که تعامل ساختار–فعال–پوست–محیط را در نظر می‌گیرند. در مجموع، این مطالعات نشان می‌دهند که نانوساختارهای الکتروریسی‌شده در کاربردهای آرایشی و بهداشتی می‌توانند هم‌زمان پایداری ترکیبات فعال، نفوذ پوستی، و اثربخشی موضعی را بهبود بخشند و در عین حال امکان طراحی محصولات پاک‌تر و کم‌نگهدارنده‌تر را فراهم کنند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند وابستگی شدید عملکرد به ساختار ماتریس، تغییرپذیری نتایج در اثر تفاوت فرمولاسیون‌ها، احتمال کاهش هیدراتاسیون یا پایداری فیزیکی در برخی سامانه‌ها، و نیاز به ارزیابی‌های بالینی و ایمنی بلندمدت همچنان باقی است.

محدودیت‌ها و چالش‌ها

با وجود مزایای فراوان نانوساختارهای الکتروریسی‌شده، این فناوری همچنان با چالش‌های مهمی روبه‌رو است. یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌ها، مقیاس‌پذیری صنعتی است زیرا بسیاری از سامانه‌های الکتروریسی در مقیاس آزمایشگاهی عملکرد مناسبی دارند، اما انتقال آن‌ها به تولید انبوه با دشواری‌هایی مانند یکنواختی الیاف، پایداری جت، و کنترل دقیق پارامترهای فرایندی همراه است. علاوه بر این، پایداری ترکیبات فعال طی فرایند و در حین نگهداری نیز مسئله‌ای است کلیدی زیرا برخی ترکیبات طبیعی نسبت به نور، اکسیژن، رطوبت و حرارت حساس‌اند و ممکن است بخشی از فعالیت زیستی خود را از دست بدهند. از سوی دیگر، محدودیت‌های مربوط به انتخاب حلال، ویسکوزیته محلول، هدایت الکتریکی، و سازگاری پلیمر با ترکیب فعال می‌تواند دامنهٔ کاربرد این فناوری را محدود کند. در برخی موارد نیز رهایش ناگهانی اولیه، تغییرات ناخواسته در مورفولوژی الیاف، و دشواری در تکرارپذیری نتایج بین مطالعات مختلف مشاهده می‌شود. بنابراین برای استفادهٔ گسترده‌تر از این

[1] X-gal

سامانه‌ها، بهینه‌سازی همزمان ساختار، فرایند و ترکیب مواد ضروری است.

چشم‌اندازهای آینده

با وجود این چالش‌ها، چشم‌انداز آینده نانوساختارهای الکتروریسی‌شده بسیار امیدوارکننده است. در آینده، توسعه سامانه‌های چندکاره و پاسخ‌گو به محرک می‌تواند نسلی جدید از نانوالیاف ایجاد کند که علاوه بر رهایش کنترل‌شده، توانایی پاسخ دادن به تغییرات pH ، دما، آنزیم یا شرایط اکسیداتیو را نیز داشته باشند. ترکیب الکتروریسی با فناوری‌هایی مانند چاپ سه‌بعدی، الکتروریسی بدون سوزن، و طراحی ساختارهای هسته–پوسته و چندلایه می‌تواند به تولید سامانه‌هایی با عملکرد بالاتر و قابلیت سفارشی‌سازی بیشتر منجر شود. از منظر صنعتی نیز توسعهٔ فرایندهای پیوسته، افزایش سرعت تولید، و استفاده از پلیمرهای زیست‌پایه و پایدار می‌تواند مسیر تجاری‌سازی این فناوری را هموارتر کند. در حوزه‌های غذایی، دارویی، زیست‌پزشکی و آرایشی انتظار می‌رود تمرکز آینده بر طراحی سامانه‌هایی باشد که هم‌زمان ایمنی، کارایی، پایداری و سازگاری زیستی را تأمین کنند. در نتیجه، پژوهش‌های آینده باید از سطح توصیف ساختار و عملکرد فراتر رود و به سمت طراحی مبتنی بر نیاز کاربردی و ارزیابی جامع در شرایط واقعی حرکت کنند.

نتیجه‌گیری

الکتروریسی به‌عنوان یک فناوری با قابلیت کنترل دقیق بر پارامترهای فرآیندی و رئولوژیکی، امکان مهندسی ساختارهای نانومتری را فراهم کرده است که در آن‌ها ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی به‌صورت هدفمند تنظیم می‌شوند. این ظرفیت، ریزپوشانی ترکیبات طبیعی را از سطح حفاظت مکانیکی و شیمیایی ساده به مرحله‌ای از عملکرد هوشمند ارتقا داده است، به‌گونه‌ای که پایداری یک ترکیب زیست‌فعال دیگر تنها به معنای جلوگیری از تخریب آن نیست، بلکه به توانایی حفظ فعالیت آن تا زمان و شرایط مناسب اشاره دارد. یافته‌های اخیر نشان می‌دهند که کارایی این سامانه‌ها عمدتاً به نحوهٔ توزیع ترکیب در ماتریس پلیمری، نوع برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی و هندسه درونی الیاف وابسته است.

این طراحی‌های پیشرفته، امکان توسعه سامانه‌هایی را فراهم کرده‌اند که ضمن تحمل شرایط فیزیکی سخت، قادر به پاسخگویی به تغییرات محیطی و ارائه عملکردی منسجم هستند، چه در حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری مواد غذایی، چه در تنظیم رهایش داروهای گیاهی، چه در القای بازسازی بافت‌های آسیب‌دیده و چه در بهبود اثربخشی محصولات موضعی برای پوست. این پیشرفت‌ها نشان‌دهندهٔ تغییری اساسی در نگرش به ترکیبات طبیعی است و دیگر این ترکیبات به‌عنوان مؤلفه‌هایی انفعالی در فرمولاسیون‌ها به کار نمی‌روند، بلکه به بخشی فعال و یکپارچه از سامانهٔ هوشمند تبدیل شده‌اند. موفقیت این سامانه‌ها مستلزم درک توأمان از مکانیسم‌های فرآیند، رفتار ترکیبات در سطح مولکولی و پاسخ‌های زیستی محیط هدف است که این انسجام را در سطوح مختلف، گستره و جهت‌گیری کاربردی این فناوری در سال‌های آینده تعیین خواهد کرد.

تعارض منافع

نویسندگان تعارض منافع نداشته‌اند.

منابع

Akturk, A., Erol Taygun, M. & Goller, G. 2020. Optimization of the Electrospinning Process Variables For Gelatin/Silver Nanoparticles/Bioactive Glass Nanocomposites For Bone Tissue Engineering. *Polymer Composites*, 41**,** 2411–2425.

Amnieh, Y. A., Ghadirian, S., Mohammadi, N., Shadkhast, M. & Karbasi, S. 2023. Evaluation of the Effects of Chitosan Nanoparticles on Polyhydroxy Butyrate Electrospun Scaffolds For Cartilage Tissue Engineering Applications. *International Journal of Biological Macromolecules,* 249**,** 126064.

Arshad, M. T., Maqsood, S., Ikram, A., Khan, A. A., Raza, A., Ahmad, A. & Gnedeka, K. T. 2025. Encapsulation Techniques of Carotenoids and Their Multifunctional Applications In Food and Health: An Overview. *Food Science & Nutrition,* 13**,** E70310.

Asadzadeh, R., Askari, G., Emam-Djomeh, Z. & Ekrami, M. 2024. Optimization of the Electrospinning Process of Hybrid Nanocarrier Based on Mung Bean (Vigna Radiate L.) Protein/Poly (Vinyl Alcohol). *Food Engineering Research,* 23**,** 165–182.

Ashok Chand, N., Duarah, S., Ah Yuk-Winters, B. & Fomra, D. 2024. Clinical Investigation of Collagen-Based Electrospun Nan of ibers For Enhanced Delivery of Skincare Ingredients. *Cosmetics,* 11**,** 18.

Ayele, G., Admassu, H., Mosisa, G., Desalegn, A. & Abeje, M. 2025. Emerging Techniques For Catechin Extraction From Green Tea (Camellia Sinensis): Extraction Technologies, Functional Potential, Toxicology, and Food-Industry Applications: A Systematic Review. *Cogent Food & Agriculture,* 11**,** 2598723.

Balanč, B., Salević-Jelić, A., Đorđević, V., Bugarski, B., Nedović, V., Petrović, P. & Knežević-Jugović, Z. 2024. TheApplication of Protein Concentrate Obtained From Green Leaf Biomass In Structuring Nan of ibers For Delivery of Vitamin B12. *Foods,* 13**,** 1576.

Castro-Muñoz, R., Kharazmi, M. S. & Jafari, S. M. 2023. Chitosan-Based Electrospun Nan of ibers For Encapsulating Food Bioactive Ingredients: A Review. *International Journal of Biological Macromolecules,* 245**,** 125424.

Chen, C., Yu, W., Kou, X., Niu, Y., Ji, J., Shao, Y., Wu, S., Liu, M. & Xue, Z. 2025. Recent Advances In the Effect of Simulated Gastrointestinal Digestion and Encapsulation on Peptide Bioactivity and Stability. *Food & Function*.

Chen, H.-W. & Lin, M.-F. 2020. Characterization, Biocompatibility, and Optimization of Electrospun Sf/Pcl/Cs Composite Nan of ibers. *Polymers,* 12**,** 1439.

Cho, Y., Baek, J. W., Sagong, M., Ahn, S., Nam, J. S. & Kim, I. D. 2025. Electrospinning and Nan of iber Technology: Fundamentals, Innovations, and Applications. *Advanced Materials,* 37**,** 2500162.

De Farias, B. S., Christ Ribeiro, A., Jaeschke, D. P., Ribeiro, E. S., Gonçalves, J. O., Vergara, R. F., Fernandes, S. S., Dias, D., Cadaval Jr, T. R. S. A. & De Almeida Pinto, L. A. 2025. Recent Trends In Gelatin Electrospun Nan of ibers: Advances In Fabrication, Functionalization, and Applications. *Coatings,* 15**,** 1110.

Deng, X., Ratnayake, J. & Ali, A. 2025. Curcumin-Loaded Drug Delivery Systems For Acute and Chronic Wound Management: A Review. *Bioengineering,* 12**,** 860.

Dias, D. & Estevinho, B. N. 2025. Vitamin E Microencapsulation Via Electrohydrodynamic Techniques For Potential Use In Skin Care and Dermatological Applications. *Molecules,* 30**,** 2306.

Dragojlov, I., Aad, R., Ami, D., Mangiagalli, M., Natalello, A. & Vesentini, S. 2025. Silk Sericin-Based Electrospun Nan of ibers Forming Films For Cosmetic Applications: Preparation, Characterization, and Efficacy Evaluation. *Molecules,* 30**,** 715.

Ekrami, M., Ekrami, A., Esmaeily, R. & Emam-Djomeh, Z. 2022a. Nanotechnology-Based Formulation For Alternative Medicines and Natural Products: An Introduction With Clinical Studies. *Biopolymers In Nutraceuticals and Functional Foods.* Royal Society of Chemistry (Rsc).

Ekrami, M., Ekrami, A., Moghadam, R. H., Joolaei-Ahranjani, P. & Emam-Djomeh, Z. 2022b. Food-Based Polymers For Encapsulation and Delivery of Bioactive Compounds.

Ekrami, M., Ekrami, A., Roshani-Dehlaghi, N., Mobahi, N., Emam-Djomeh, Z., Salehi, M., Ovissipour, R. & Kalbasi-Ashtari, A. 2025a. Anti-Bi of ilm Efficacy of A Salep Mucilage–Based Pad Containing Nanoethosomal Allium Jesdianum Essential Oil Boiss. For Controlling Healthcare-Associated Infections. *Bionanoscience,* 15**,** 1–23.

Ekrami, M., Shakouri, M., Nikkhou, S. & Emam-Djomeh, Z. 2023. Extraction and Physicochemical Characterization of Gum. *Handbook of Natural Polymers, Volume 1*. Elsevier.

Ekrami, M., Yancheshmeh, B. S., Mobahi, N., Roshani-Dehlaghi, N., Ekrami, A., Emam-Djomeh, Z., Salehi, M. & Mohammadifar, M. 2026. Nanophytosomal Encapsulation of Nepeta Pogonosperma L. Essential Oils For Sustained Release In Electrospun Nan of ibers. *Innovative Food Science & Emerging Technologies***,** 104550.

Ekrami, M., Yancheshmeh, B. S., Roshani-Dehlaghi, N., Mobahi, N., Emam-Djomeh, Z. & Mohammadifar, M. 2025b. Next-Generation Smart and Safe Foods: Artificial Intelligence-Driven Strategies For 4d Food Pre-Printing Challenges. *Trends In Food Science & Technology***,** 105317.

Emam-Djomeh, Z., Ekrami, M. & Mobahi, N. 2025. Confocal Raman Spectroscopy of Bionanocomposites. *Characterization Techniques In Bionanocomposites.* Elsevier.

Emam-Djomeh, Z., Mobahi, N., Ekrami, M. & Pourmohammad, E. 2024. Role of Nanotechnology In Food Industries. *Nanotechnology In the Food Industry.* Crc Press.

Emam-Djomeh, Z., Ekrami, M., Ekrami & Ali 2023. Overview of Types of Materials Used For Food Component Encapsulation. *Materials Science and Engineering In Food Product Development.* John Wiley & Sons.

Ewaldz, E., Randrup, J. & Brettmann, B. 2021. Solvent Effects on the Elasticity of Electrospinnable Polymer Solutions. *Acs Polymers Au,* 2**,** 108–117.

Flores, F. P. 2025. Advances In Microencapsulation of B-Carotene: Innovating Traditional and Emerging Materials and Techniques For Enhanced Functional Properties. *Food Materials Research,* 5.

Geng, Y. & Williams, G. R. 2023. Developing and Scaling Up Captopril-Loaded Electrospun Ethyl Cellulose Fibers For Sustained-Release Floating Drug Delivery. *International Journal of Pharmaceutics,* 648**,** 123557.

Ghomi, E. R., Lakshminarayanan, R., Chellappan, V., Verma, N. K., Chinnappan, A., Neisiany, R. E., Amuthavalli, K., Poh, Z. S., Wong, B. H. S. & Dubey, N. 2023. Electrospun Aligned Pcl/Gelatin Scaffolds Mimicking the Skin Ecm For Effective Antimicrobial Wound Dressings. *Advanced Fiber Materials,* 5**,** 235–251.

Golmakani, M.-T., Hajjari, M. M., Kiani, F., Sharif, N. & Hosseini, S. M. H. 2024. Application of Electrospinning To Fabricate Phycocyanin-And Spirulina Extract-Loaded Gliadin Fibers For Active Food Packaging. *Food Chemistry: X,* 22**,** 101275.

Günal-Köroğlu, D., Karabulut, G., Catalkaya, G. & Capanoglu, E. 2025. TheEffect of Polyphenol-Loaded Electrospun Fibers In Food Systems. *Food and Bioprocess Technology***,** 1–23.

Gupta, R. K., Ali, E. A., Areekal, N. N., Patel, J., Pipliya, S., Srivastav, P. P., Wang, C.-K. & Castro-Muñoz, R. 2026. Vitamin C-Infused Biopolymer Films: A Multifunctional Approach For Active Food Packaging and Preservation. *Sustainable Food Technology*.

Gutiérrez Rafael, B. J., Zaca Moran, O., Delgado Macuil, R. J., Martínez Gutiérrez, H., García Juárez, M. & Lopez Gayou, V. 2024. Study of the Incorporation of Gel and Aloe Vera Peel Extract In A Polymer Matrix Based on Polyvinylpyrrolidone. *Polymers,* 16**,** 1998.

He, Y., Zhong, T., Liu, Y., Wan, M., Sun, L., Zhao, Y. & Wang, Z. 2024. Development of A Multifunctional Active Food Packaging Membrane Based on Electrospun Polyvinyl Alcohol/Chitosan For Preservation of Fruits. *International Journal of Biological Macromolecules,* 277**,** 134636.

Heydarian, A. & Shavisi, N. 2023. Multifunctional Food Packaging Materials: Electrospun Mats Based on Gelatin-Xanthan Gum Containing Chitin Nan of ibers and Black Barberry Anthocyanins For Freshness Monitoring and Enhancing the Shelf-Life Quality of Pacific White Shrimps. *Food Packaging and Shelf Life,* 40**,** 101219.

İnan-Çınkır, N., Ağçam, E., Altay, F. & Akyıldız, A. 2024. Emulsion Electrospinning of Zein Nan of ibers With Carotenoid Microemulsion: Optimization, Characterization and Fortification. *Food Chemistry,* 430**,** 137005.

Joy, A., Jerome, N., Ramakrishnan, S. U., Jeyaraman, S., Vijayakumar, D., Vidjeyamannane, C., Prakash, K., Sharma, R. P., Ganessin, A. & Saravanakumar, R. 2025. Nano Delivery Platforms For Nisin, A Potent Cyclic Peptide: A Comprehensive Review of Biological Applications. *Polymer Bulletin***,** 1–26.

Kaniuk, E., Lechowska-Liszka, A., Gajek, M., Nikodem, A., Ścisłowska-Czarnecka, A., Rapacz-Kmita, A. & Stodolak-Zych, E. 2023. Correlation Between Porosity and Physicochemical and Biological Properties of Electrospinning Pla/Pva Membranes For Skin Regeneration. *Biomaterials Advances,* 152**,** 213506.

Khajavi, R. & Abbasipour, M. 2026. Controlling Nan of ibre Morphology By the Electrospinning Process. *Electrospun Nan of ibers*. Elsevier.

Kopp, A., Smeets, R., Gosau, M., Kröger, N., Fuest, S., Köpf, M., Kruse, M., Krieger, J., Rutkowski, R. & Henningsen, A. 2020. Effect of Process Parameters on Additive-Free Electrospinning of Regenerated Silk Fibroin Nonwovens. *Bioactive Materials,* 5**,** 241–252.

Kumar, A., Singh, U., Jaiswal, S. G., Dave, J., Wei, S. & Hailu, G. G. 2024. Recent Trends In the Encapsulation of Functional Lipids: Comprehensive Review. *Sustainable Food Technology*.

Li, J., Chotiko, A., Chouljenko, A., Durage, T. T. D. & Sathivel, S. 2025a. Electrospun Nan of ibers of Purple Rice Bran-Derived Soluble Dietary Fiber and Polyethylene Oxide For Enhanced Alpha-Tocopherol Encapsulation and Controlled Release. *Food and Bioprocess Technology,* 18**,** 4758–4774.

Li, M., Zheng, Y., Xin, B. & Xu, Y. 2020. Coaxial Electrospinning: Jet Motion, Core–Shell Fiber Morphology, and Structure As A Function of Material Parameters. *Industrial & Engineering Chemistry Research,* 59**,** 6301–6308.

Li, Y., Li, X., Liu, Z., Wang, Y. & Jiao, T. 2025b. Recent Progress In the Strategies and Applications of Electrospinning Electroactive Tissue Engineering Scaffolds. *Acs Biomaterials Science & Engineering*.

Liu, G., Li, J., Wang, L., Zhang, L., Yang, T., Guo, Y., Zhang, G., Ni, S., Qiao, L. & Nie, H. 2025. Fast-Dissolving Nan of ibrous Facial Masks For Delivering Skincare Ingredients. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces***,** 114770.

Liu, H., Bai, Y., Huang, C., Wang, Y., Ji, Y., Du, Y., Xu, L., Yu, D.-G. & Bligh, S. W. A. 2023. Recent Progress of Electrospun Herbal Medicine Nan of ibers. *Biomolecules,* 13**,** 184.

Longo, R., Raimondo, M., Vertuccio, L., Ciardulli, M. C., Sirignano, M., Mariconda, A., Della Porta, G. & Guadagno, L. 2023. Bottom-Up Strategy To Forecast the Drug Location and Release Kinetics In Antitumoral Electrospun Drug Delivery Systems. *International Journal of Molecular Sciences,* 24**,** 1507.

Majeed, M. & Rather, M. A. 2025. Enhancing Shelf Life and Bioavailability of Vitamin D Through Encapsulation: A Comprehensive Review. *Food Biophysics,* 20**,** 15.

Meng, Q., Xu, H., Li, Y., Liu, F., Shao, H., Ling, P. & Wu, S. 2024. Conjugated Electrospinning Toward A Polycaprolactone Scaffold Simultaneously Containing Micro-/Nano-Fibers For Potential Biomedical Application. *Journal of Polymer Research,* 31**,** 301.

Mhetre, H. V., Krishnarao, K. Y. & Naik, N. 2023. Optimization of Electrospinning Process Parameters To Develop the Smallest Zno+ Pvp Nan of ibres Using Taguchi Experimental Design and Anova. *Journal of Materials Science: Materials In Electronics,* 34**,** 1555.

Mirzakhani, M., Ekrami, M. & Moini, S. 2018. Chemical Composition, Total Phenolic Content and Antimicrobial Activities of Zhumeria Majdae. *Journal of Food and Bioprocess Engineering,* 1**,** 47–52.

Mobahi, N., Razavi, M. A., Ekrami, M., Emam-Djomeh, Z. & Razavi, S. H. 2025. Fai-Integrated Bio-Nanocomposite Food Packaging: Sustainable, Functional, and Intelligent Solutions. *Trends In Food Science & Technology***,** 105336.

Mohandoss, S., Roy, P., Ahmad, N., Gomez, L. A. M., Velu, K. S., Somu, P. & Haldar, D. 2025. A Comprehensive Review of Cyclodextrin-Modified Electrospun Nan of ibers For Drug Delivery and Food Packaging Applications. *Journal of Natural Fibers,* 22**,** 2583850.

Morais, M. S., Bonfim, D. P., Aguiar, M. L. & Oliveira, W. P. 2023. Electrospun Poly (Vinyl Alcohol) Nan of ibrous Mat Loaded With Green Propolis Extract, Chitosan and Nystatin As An Innovative Wound Dressing Material. *Journal of Pharmaceutical Innovation,* 18**,** 704–718.

Nazarnezhad, S., Nasiri, S. N., Gorgani, S., Aghajanloo, B. & Seyedasli, N. 2025. Quercetin-Loaded Biocomposites For Wound Healing Applications: From Therapeutic Efficacy To Delivery Platforms. *Phytochemistry Reviews*, 1–35.

Nirwan, V. P., Amarjargal, A., Hengsbach, R. & Fahmi, A. 2025. Electrospun Smart Hybrid Nan of ibers For Multifaceted Applications. *Macromolecular Rapid Communications*, 46, 2400617.

Pajooh, A. M. D., Tavakoli, M., Al-Musawi, M. H., Karimi, A., Salehi, E., Nasiri-Harchegani, S., Sharifianjazi, F., Tavamaishvili, K., Mehrjoo, M. & Najafinezhad, A. 2024. Biomimetic Vegf-Loaded Bilayer Scaffold Fabricated By 3d Printing and Electrospinning Techniques For Skin Regeneration. *Materials & Design*, 238, 112714.

Panditkar, S. S., Shekhawat, A., Saravanan, D., Waghe, P. U. & Gurnule, W. B. 2025. Cefixime-Loaded Fibrous Composite of Polyvinyl Alcohol and Dextran For Pharmaceutical Applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 142, E57572.

Paul, M., Lee, W., Song, W. J. & Im, J. 2025. Electrospun Polycaprolactone Fibers Encapsulating Omega-3 and Montelukast Sodium To Prevent Capsular Contracture In Breast Implant Surgery. *International Journal of Pharmaceutics*, 125744.

Pervez, M. N., Yeo, W. S., Mishu, M. M. R., Talukder, M. E., Roy, H., Islam, M. S., Zhao, Y., Cai, Y., Stylios, G. K. & Naddeo, V. 2023. Electrospun Nan of iber Membrane Diameter Prediction Using A Combined Response Surface Methodology and Machine Learning Approach. *Scientific Reports*, 13, 9679.

Pires, J. B., Dos Santos, F. N., De Lima Costa, I. H., Kringel, D. H., Da Rosa Zavareze, E. & Dias, A. R. G. 2023. Essential Oil Encapsulation By Electrospinning and Electrospraying Using Food Proteins: A Review. *Food Research International*, 170, 112970.

Pourjavid, H., Ataei, M., Pourahmad, R., Anvar, A. A. & Behmadi, H. 2022. Improvement of the Quality Parameters of A Novel Synbiotic Yogurt Sauce Using Microencapsulated Lactobacillus Paracasei and Natural Prebiotics. *Food Science and Technology*, 42, E40322.

Pramana, A., Kurnia, D., Firmanda, A., Rossi, E., Ar, N. H. & Putri, V. J. 2025. Using Palm Oil Residue For Food Nutrition and Quality: From Palm Fatty Acid Distillate To Vitamin E Toward Sustainability. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 105, 4728–4740.

Przybyła, M., Dolińska, B. & Ostróżka-Cieślik, A. 2023. Research Progress on Insulin Dressings To Promote Wound Healing. *Engineering Proceedings*, 56, 21.

Rajunaik, B., Franklin, M. E. E., Seethu, B., Pushpadass, H. A., Battula, S. N. & Naik, N. L. 2024. Fabrication and Characterization of Electrospun Catechins-Loaded Nan of ibres For Fortification of Milk. *Journal of Food Science and Technology*, 61, 798–811.

Rostami, F., Yekrang, J., Gholamshahbazi, N., Ramyar, M. & Dehghanniri, P. 2023. Under-Eye Patch Based on Pva-Gelatin Nanocomposite Nan of iber As A Potential Skin Care Product For Fast Delivery of the Coenzyme Q10 Anti-Aging Agent: In Vitro and In Vivo Studies. *Emergent Materials*, 6, 1903–1921.

Sadeghipour, M., Badii, F., Behmadi, H. & Bazyar, B. 2012. TheEffect of Methyl Cellulose Based Active Edible Coatings on the Storage Life of Tomato.

Shakouri, M., Salami, M., Lim, L.-T., Ekrami, M., Mohammadian, M., Askari, G., Emam-Djomeh, Z. & Mcclements, D. J. 2023. Development of Active and Intelligent Colorimetric Biopolymer Indicator: Anthocyanin-Loaded Gelatin-Basil Seed Gum Films. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17, 472–484.

Sharifi Malvajerdi, S., Aboutorabi, S., Shahnazi, A., Gholamhosseini, S., Taheri Ghahrizjani, R., Yahyaee Targhi, F., Erfanimanesh, S., Beigverdi, R., Imani, A. & Sari, A. H. 2023. Hvhc-Esd-Induced Oxygen Vacancies: An Insight Into the Phenomena of Interfacial Interactions of Nanostructure Oxygen Vacancy Sites With Oxygen Ion-Containing Organic Compounds. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 15, 48785–48799.

Sharma, D., Srivastava, S., Kumar, S., Sharma, P. K., Hassani, R., Dailah, H. G., Khalid, A. & Mohan, S. 2023. Biodegradable Electrospun Scaffolds As An Emerging Tool For Skin Wound Regeneration: A Comprehensive Review. *Pharmaceuticals,* 16**,** 325.

Shavronskaya, D. O., Noskova, A. O., Skvortsova, N. N., Adadi, P. & Nazarova, E. A. 2023. Encapsulation of Hydrophobic Bioactive Substances For Food Applications: Carriers, Techniques, and Biosafety. *Journal of Food Processing and Preservation,* 2023**,** 5578382.

Spartali, C., Psarra, A.-M. G., Marras, S. I., Tsioptsias, C., Georgantopoulos, A., Kalousi, F. D., Tsakal of , A. & Tsivintzelis, I. 2024. Silybin-Functionalized Pcl Electrospun Fibrous Membranes For Potential Pharmaceutical and Biomedical Applications. *Polymers,* 16**,** 2346.

Sukowati, R., Agung, B. H., Rohman, Y. M., Sabandar, M. G., Waresindo, W. X., Hapidin, D. A., Edikresnha, D. & Khairurrijal, K. 2024. Optimization of Electrospinning Process Parameters Using Box-Behnken Design For Nylon-6 Nan of ibers Fabrication. *Materials Today: Proceedings*.

Tahir, R., Albargi, H. B., Ahmad, A., Qadir, M. B., Khaliq, Z., Nazir, A., Khalid, T., Batool, M., Arshad, S. N. & Jalalah, M. 2023. Development of Sustainable Hydrophilic Azadirachta Indica Loaded Pva Nanomembranes For Cosmetic Facemask Applications. *Membranes,* 13**,** 156.

Tang, Y., Xu, Z., Tang, J., Xu, Y., Li, Z., Wang, W., Wu, L., Xi, K., Gu, Y. & Chen, L. 2023. Architecture-Engineered Electrospinning Cascade Regulates Spinal Microenvironment To Promote Nerve Regeneration. *Advanced Healthcare Materials,* 12**,** 2202658.

Tipduangta, P., Watcharathirawongs, W., Waritdecha, P., Sirithunyalug, B., Leelapornpisid, P., Chaiyana, W. & Goh, C. F. 2023. Electrospun Cellulose Acetate/Polyvinylpyrrolidone Fiber Mats As Potential Cosmetic Under-Eye Masks For Caffeine Delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology,* 86**,** 104732.

Topuz, F. & Uyar, T. 2020. Electrospinning of Cyclodextrin Nan of ibers: the Effect of Process Parameters. *Journal of Nanomaterials,* 2020**,** 7529306.

Topuz, F. & Uyar, T. 2025. Recent Developments In Nan of iber-Based Fast-Disintegrating Drug Delivery Systems. *Expert Opinion on Drug Delivery***,** 1–13.

Tören, E. & Mazari, A. A. 2024. Needless Electrospun Collagen/Hyaluronic Acid Nan of ibers For Skin Moisturization. *Polymers For Advanced Technologies,* 35**,** E6434.

Wang, C. & Hashimoto, T. 2020. A Scenario of A Fiber Formation Mechanism In Electrospinning: Jet Evolves Assemblies of Phase-Separated Strings That Eventually Split Into As-Spun Fibers Observed on the Grounded Collector. *Macromolecules,* 53**,** 9584–9600.

Wang, M., Ge, R.-L., Zhang, F., Yu, D.-G., Liu, Z.-P., Li, X., Shen, H. & Williams, G. R. 2023a. Electrospun Fibers With Blank Surface and Inner Drug Gradient For Improving Sustained Release. *Biomaterials Advances,* 150**,** 213404.

Wang, P., Wang, Q., Wu, D., Zhang, Y., Kang, S., Wang, X., Gu, J., Wu, H., Xu, Z. & Jiang, Q. 2024a. Enhancing Osteogenic Bioactivities of Coaxial Electrospinning Nano-Scaffolds Through Incorporating Iron Oxide Nanoparticles and Icaritin For Bone Regeneration. *Nano Research,* 17**,** 6430–6442.

Wang, Q., Ma, J., Chen, S. & Wu, S. 2023b. Designing An Innovative Electrospinning Strategy To Generate Phbv Nan of iber Scaffolds With A Radially Oriented Fibrous Pattern. *Nanomaterials,* 13**,** 1150.

Wang, T. & Su, E. 2024. Electrospinning Meets Food Packaging: A Promising Pathway Towards Novel Opportunities In Food Preservation. *Food Packaging and Shelf Life,* 41**,** 101234.

Wang, Y. & Wang, C. 2021. Extension Rate and Bending Behavior of Electrospinning Jet: the Role of Solution Conductivity. *Polymer,* 222**,** 123672.

Wang, Y., Wang, N., Liu, W., Cheng, Z., Li, W., Zhao, Y. & Zhu, H. 2024b. Preparation and Evaluation of Gastrodia Elata Polysaccharide Loaded Electrospinning Nan of iber Facial Mask. *Journal of Applied Polymer Science,* 141**,** E56199.

Yan, X., Xu, B., Xia, C., Xu, M., Zeng, B., Zhang, R., Zhu, L. & Zhang, C. 2023. Dual Drug-Loaded Core-Shell Nan of ibers Membranes Via Emulsion Electrospinning and Their Controllable Sustained Release Property. *Journal of Drug Delivery Science and Technology,* 88**,** 104909.

Yang, J., Zhang, L., Peng, X., Zhang, S., Sun, S., Ding, Q., Ding, C. & Liu, W. 2023. Polymer-Based Wound Dressings Loaded With Ginsenoside Rg3. *Molecules*, 28**,** 5066.

Yang, Q., Tian, Y., Liu, Y., Shi, W., Guo, P., Lei, P., Yang, Q., Zhu, C., Zeng, R. & Zhang, C. 2024. A Novel Multi-Functional Skin-Care Dry Mask Based on Bletilla Striata Polysaccharide Electrospun Nan of ibers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282**,** 136780.

Yeoh, S. G., Liew, Y. K., Low, M. L., Lim, W. M., Rahman, N. A., Wong, L. C. & Then, Y. Y. 2025. Electrospun Metal–Organic Framework-Based Nan of ibers With Natural Therapeutic Agents For Enhanced Diabetic Wound Healing. *Discover Materials*, 5**,** 66.

Yin, J.-Y., Boaretti, C., Lorenzetti, A., Martucci, A., Roso, M. & Modesti, M. 2022. Effects of Solvent and Electrospinning Parameters on the Morphology and Piezoelectric Properties of Pvdf Nan of ibrous Membrane. *Nanomaterials*, 12**,** 962.

Yu, X., Wu, G., Cai, P., Ding, Y., Cui, J., Wu, J., Shen, Y., Song, J., Yuan, Z. & El-Newehy, M. 2024. Carbon Fiber-Mediated Electrospinning Scaffolds Can Conduct Electricity For Repairing Defective Tendon. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 16**,** 52104–52115.

Yuan, Y., Ma, M., Zhang, S. & Wang, D. 2023. Efficient Utilization of Tea Resources Through Encapsulation: Dual Perspectives From Core Material To Wall Material. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71**,** 1310–1324.

Zaszczyńska, A., Kołbuk, D., Gradys, A. & Sajkiewicz, P. 2024. Development of Poly (Methyl Methacrylate)/Nano-Hydroxyapatite (Pmma/Nha) Nan of ibers For Tissue Engineering Regeneration Using An Electrospinning Technique. *Polymers*, 16**,** 531.

Zavala-Castillo, K. A., Flores-Ramírez, N., Vásquez-García, S. R., Martínez-Flores, H. E. & Fernández-Quiroz, D. 2024. Folic Acid In Carboxymethylcellulose/Polyethylene Oxide Electrospun Nan of ibers: Preparation, Release and Stability. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104**,** 9014–9022.

Zhang, H., Feng, M., Fang, Y., Wu, Y., Liu, Y., Zhao, Y. & Xu, J. 2023a. Recent Advancements In Encapsulation of Chitosan-Based Enzymes and Their Applications In Food Industry. *Critical Reviews In Food Science and Nutrition*, 63**,** 11044–11062.

Zhang, M., Ahmed, A. & Xu, L. 2023b. Electrospun Nan of ibers For Functional Food Packaging Application. *Materials*, 16**,** 5937.

Zhou, L., Cai, Y., Li, Y., Zhou, Y. & Xiao, Z. 2025. Cinnamon Essential Oil Delivery Systems: Preparation Processes, Packaging Forms, and Industrialization Potentials. *Food Science & Nutrition*, 13**,** E70814.

Zomorodi, S., Azarpazhooh, E. & Behmadi, H. 2019. Comparison of the Effect of Linseed and Basil Seed Mucilages With Gum Tragacanth and Xanthan Gum on Textural and Rheological Properties of Iranian White Cheese Produced By Ultrafiltration Technique Effect of Some Gums on Properties of Ultrafiltrated Cheese. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 2**,** 13–18.

Zomorodi, S., Azarpazhooh, E. & Behmadi, H. 2020. Influence of Some Hydrocolloids on Textural Properties of Uf Cheese. *Journal of Food Biosciences and Technology*, 10**,** 1–10.

Food Engineering Research/Vol.25/No. 80/ Spring& Summer 2026/P:41-62

Journal Home page: https://fooder.areeo.ac.ir/

Original Research

Advances and Applications of Electrospun Nanostructure-Based Encapsulation of Natural Compounds

Homa Behmadi[1*], Negar Roshani-Dehlaghi[2], Ali Ekrami[3]

***Corresponding Author:** Associate Professor, Department of Agricultural Engineering, Agricultural and Natural Resources Research Center, Mashhad, Khorasan, Iran.
[2].Department of Food Science and Industry, Ares International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran
[3].Department of Nursing, University of Social Welfare and Rehabilitation Sciences, Tehran, Iran
Email: hbehmadi@yahoo.com
Received:25 Januar 2026 **Accepted**: 6 May 2026
http://doi: 10.22092/FOODER.2026.372378.1449

Extended Abstract

Abstract

Electrospun nanostructures of fer a nanoscale matrix for encapsulating natural compounds. This process uses an electric field applied to a polymer-solvent solution to produce fibers with high specific surface area and controllable morphology. Electrospinning conditions help prevent degradation of sensitive compounds. Thestability of natural compounds within fibers depends on solution properties, process parameters, and interactions with the polymer matrix. A primary application is preserving antimicrobial and antioxidant properties in food products, where compounds are gradually released from the fiber matrix to extend shelf life. Thesame controlled release principle is used in drug delivery systems, maintaining active agent efficacy over time. Composite structures such as core-shell, multilayer, aligned, and woven designs enable diverse release pr of iles. In biological environments, the nan of iber's resemblance to the extracellular matrix facilitates cell interactions, while incorporated natural compounds guide cell growth or differentiation. This supports tissue regeneration and topical skin formulations, enhancing both active compound penetration and stability. Accordingly, this review presents an analytical and comparative examination of recent advances in electrospun nanostructure-based encapsulation of natural compounds, focusing on four key application areas: the food industry and active packaging, drug delivery and pharmaceutical applications, tissue engineering and biomedical uses, and cosmetics and personal care products.

Keywords: Electrospinning, Encapsulation, Natural Compounds, Nan of ibers, Controlled Release

http://doi: 10.22092/FOODER.2026.372378.1449 **Email** : hbehmadi@yahoo.com نگارنده مسئول:

© 2026,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.