

ساخت و بررسی خواص مکانیکی لایه نازک کیتوزان تقویت شده با اکسید گرافن / نقره

شهاب الدین خوارزمی*، محمد پارسا شهابی نیا

گروه مهندسی خودرو، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

چکیده

این مقاله به ساخت و بررسی خواص لایه نازک کیتوزان (CS-GO/Ag) تقویت شده با نانوذرات کامپوزیتی نقره و اکسید گرافن پرداخته است. نانو کامپوزیت اکسید گرافن/نقره با روش سبز سنتز شد. از عصاره گیاهی آویشن به عنوان عامل کاهنده و تثبیت کننده در سنتز نانوذرات نقره استفاده شد. معرفی اکسید گرافن منجر به ناهمواری و بی نظمی های قابل توجهی در سطح شد که ناشی از تجمع ورق های اکسید گرافن بود. لایه های کامپوزیتی کیتوزان (CS-GO/Ag) دارای ساختار نانوحفره ای، نانوذرات نقره کروی و مکعبی و توزیع یکنواخت بودند که باعث بهبود بافت سطحی و خواص مکانیکی لایه شد. مدول یانگ، مقاومت کششی و میزان کشش در زمان شکست به ترتیب ۱۸.۷، ۴ و ۱.۴ برابر افزایش یافت. الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که کامپوزیت با موفقیت سنتز شده است.

واژه های کلیدی: کیتوزان، اکسید گرافن، عصاره، سنتز، نانو کامپوزیت

ایمیل نویسنده مسئول: kharazmi@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

نقره^۳ به دلیل خواص ضدباکتریایی و هدایت الکتریکی بسیار خوب، افزودنی های عالی برای لایه های مبتنی بر کیتوزان هستند [۲]. ترکیب کیتوزان با اکسید گرافن و نانوذرات نقره، ماده کامپوزیتی جدیدی با ویژگی های مکانیکی، الکتریکی و ساختاری استثنایی تولید می کند. به دلیل الکترون گاتیویته اکسید گرافن، کامپوزیت های ساخته شده از آن و پلیمرهای کاتیونی مانند کیتوزان ممکن است در تجزیه مواد بهتر عمل کرده و آسیب کمتری به موجودات زنده وارد کنند.

تولید مواد کامپوزیتی پیشرفته می تواند به طور قابل توجهی به حوزه هایی مانند الکترونیک، دستگاه های بیولوژیکی، حسگرها و سایر زمینه ها کمک کند که این امر در سال های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. یکی از دسته های این مواد که اخیراً برای کاربردهای دوستدار محیط زیست و با عملکرد بالا مورد توجه قرار گرفته، لایه های نازک ساخته شده از بیوپلیمرها و نانو مواد است [۱]. کیتوزان، یک بیوپلیمر طبیعی از کیتین^۱، به دلیل سازگاری زیستی، تجزیه پذیری و ویژگی های تشکیل لایه به طور گسترده ای شناخته شده است. اکسید گرافن^۲ و نانوذرات

بطور ایمن و مؤثر عمر مفید محصولات غذایی را افزایش دهد [۴].

برای بهبود خواص مکانیکی و سازگاری زیستی، الیاف کیتوزان با اکسید گرافن به اندازه میکرون و پلی دوپامین^۶ درمان شدند [۵]. اکسید گرافن استحکام کششی را از ۲۵۲.۲۲ مگاپاسکال^۷ به ۴۱۱.۶۲ مگاپاسکال و مدول یانگ را از ۱۸.۹۵ گیگاپاسکال^۸ به ۲۵.۶۷ گیگاپاسکال افزایش داد، در حالی که PDA پیوند زنی متقابل را بهبود بخشید و مشکلات پیوند هیدروژنی را کاهش داد. الیاف کامپوزیتی بیش از ۹۹.۹٪ فعالیت ضدباکتریایی و سمیت پایین فیروبلاست را نشان دادند که آن‌ها را برای کاربردهای زیست پزشکی^۹ و پزشکی ایده آل می‌سازد [۵].

چندین مطالعه به بررسی ادغام نانو مواد در ماتریس‌های کیتوزان برای بهبود خواص آن‌ها پرداخته‌اند. به عنوان مثال، لیو و همکاران به بررسی خواص مکانیکی و ضد میکروبی لایه‌های کامپوزیتی کیتوزان-نانوذرات نقره پرداختند و دریافتند که این لایه‌ها به طور قابل توجهی قوی‌تر و مؤثرتر از لایه‌های خالص کیتوزان در کشتن میکروب‌ها هستند [۶]. به طور مشابه، وانگ و همکاران به بررسی کارایی هدایت الکتریکی کامپوزیت‌های کیتوزان-اکسید گرافن پرداختند و دریافتند که افزودن اکسید گرافن به طور قابل توجهی عملکرد الکتریکی لایه‌ها را بهبود می‌بخشد [۷].

یانگ^{۱۰} و همکاران از الکتروریسی برای ساخت نانو الیاف کیتوزان، پلی وینیل الکل و اکسید گرافن^{۱۱} پر شده با آنتی‌بیوتیک‌هایی مانند سیپروفلوکساسین و

این ویژگی‌ها لایه‌های نازک کیتوزان-اکسید گرافن/نقره را برای کاربردهای مختلفی از جمله الکترونیک انعطاف‌پذیر، پوشش‌های حفاظتی و کاشتنه‌های زیست پزشکی^۱ مناسب می‌سازد. با این حال، برای بهره‌برداری کامل از این مواد، درک جامع رفتار آن‌ها در مقیاس نانویی ضروری است.

لایه‌های ضد میکروبی نقره/اکسید نقره^۲/کیتوزان کاربوکسی متیل-اکسید گرافن^۳ با استفاده از یک فرآیند کاهش تحت تابش فرابنفش^۴ و سپس پیوند یونی به طور موفقیت‌آمیز سنتز شدند [۳]. پایداری حرارتی، نسبت تورم و خواص ضد میکروبی لایه‌ها ارزیابی شد و نشان داد که افزودن اکسید گرافن، پایداری حرارتی و نسبت تورم لایه‌ها را بهبود می‌بخشد [۳].

با استفاده از ساقه ذرت به عنوان کاهنده سبز و اکسید گرافن به عنوان الگو، یک لایه نانو کامپوزیتی جدید از کیتوزان-پوشش داده شده با گرافن احیاء شده پوشش داده شده با نانوذرات نقره ایجاد شد [۴]. این لایه با استفاده از یک روش خود-مونتاژ الکتروستاتیک ساده تولید شد تا آزادسازی نانوذرات نقره را تثبیت و تنظیم کند؛ پس از ۱۴ روز، لایه کیتوسان/گرافن احیاء شده پوشش داده شده با نانوذرات نقره، ۱.۹٪ نانوذرات نقره را آزاد کرد. این لایه همچنین فعالیت ضدباکتریایی قوی و پایداری در برابر اشترشیا کلی و استافیلوکوکوس اورئوس بدون آسیب به سلول‌ها را نشان داد [۴]. این نشان می‌دهد که لایه نانو کامپوزیتی کیتوسان/گرافن احیاء شده پوشش داده شده با نانوذرات نقره می‌تواند

⁶ PDA

⁷ MPa

⁸ GPa

⁹ Biomedicine

¹⁰ Yang

¹¹ CS, PVA and GO

¹ Biomedical implants

² AgO

³ CGO

⁴ UV

⁵ S. aureus and E. coli

هیدرو کلراید استفاده کردند [۸]. آن‌ها مشاهده کردند که آزادسازی کنترل شده دارو بدون انفجار رخ می‌دهد. با وجود اکسید گرافن، نسبت آزادسازی دارو به طور قابل توجهی بهبود یافت. فعالیت ضدباکتریایی در برابر باکتری‌های گرم منفی و گرم مثبت در نانو الیاف بارگذاری شده با دارو بالا بود و آن‌ها همچنین با سلول‌های ملانوما^۱ سازگار بودند [۹]. مطالعه دیگری نشان داد که غلظت‌های بالاتر اکسید گرافن در نانو الیاف ضدباکتریایی الیاف کیتوزان، پلی وینیل الکل و اکسید گرافن تولید شده با الکتروریسی پایداری حرارتی کامپوزیت‌های هیبریدی نانو الیاف را کاهش می‌دهد [۹]. بیوپلیمرها، نانوذرات سبز و ذرات فلزی خواص مواد را بهبود می‌بخشند [۱۰-۱۷]. سنتز پایدار نانوذرات با استفاده از فناوری‌های زیست محیطی قابل قبول، کامپوزیت‌های مبتنی بر بیوپلیمر را بهبود می‌بخشد. تولید نانوذرات سبز و ذرات فلزی، همچنین ادغام پلیمرهای زیستی^۲، استحکام مکانیکی، پایداری حرارتی و سازگاری زیستی را افزایش می‌دهد. این فناوری تولید مواد جدید با قابلیت‌های خاص و دوستدار محیط زیست را تسهیل می‌کند و در مهندسی زیست پزشکی، علم مواد و پایداری محیط زیست مفید است. این مطالعه بر روی سنتز و شناسایی لایه‌های نازک کیتوزان-اکسید گرافن/نقره متمرکز است. خواص ساختاری با استفاده از تکنیک‌هایی مانند پراش پرتو ایکس^۳ و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ بررسی شد که بینش‌هایی درباره بلورینگی و ریخت شناسی^۵ مورفولوژی سطح لایه‌ها ارائه می‌دهد. خواص الکتریکی با استفاده از روش

پروب چهار نقطه‌ای اندازه‌گیری شد و خواص مکانیکی از طریق آزمون کششی برای تعیین استحکام و انعطاف پذیری لایه‌ها ارزیابی شد. نتایج این مطالعه درک دقیقی از چگونگی تأثیر ادغام اکسید گرافن و نانوذرات نقره بر عملکرد کلی لایه‌های نازک مبتنی بر کیتوزان ارائه می‌دهد. کار ما با ارزیابی همزمان خواص ساختاری، الکتریکی و مکانیکی لایه‌های نازک کیتوزان-اکسید گرافن/نقره، تحلیل جامع‌تری را فراهم می‌آورد که برای برنامه‌ریزی کاربردهای آینده مفید است.

۲- روش‌ها و شناسایی

پودر اکسید گرافن به روش هامرستز شد. برگ‌های تازه آویشن از فیروزکوه، استان تهران، ایران تهیه شدند. پس از نگهداری برگ‌ها در دمای اتاق به مدت ۴۸ ساعت، آن‌ها به پودر تبدیل شدند. یک گرم از پودر در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۳۰ دقیقه جوشانده شد. سپس پودر از عصاره‌ها با کاغذ واتمن جدا گردید. ۳ سی‌سی از عصاره به محلول نقره‌نیترات ۳ میلی‌مولار در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد اضافه و محلول‌ها به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد تا نانوذرات نقره تشکیل شود. محلول سانتی‌فیوژ شده و ذرات جامد برای ۲۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و سپس در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. چهار گرم کیتوزان تولیدی در ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول ۱ درصد اسید استیک به مدت ۳ ساعت حل شد. با ترکیب نانوذرات نقره و اکسید گرافن (به نسبت ۱:۱) با محلول کیتوزان، مخلوط همگنی حاصل شد. این مخلوط به ظرف‌های پتری یا ورق‌های آلومینیومی ریخته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق خشک شد. (شکل ۱ بالا).

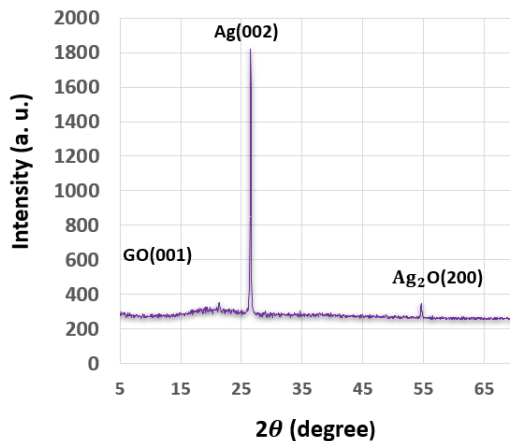
¹ Melanoma Cells

² Biopolymers

³ XRD

⁴ SEM

⁵ Morphology



شکل ۱- (بالا) نمونه تهیه شده (پایین) الگوهای پراش پرتو ایکس لایه Ag/GO-CS

ریخت شناسی سطح لایه کامپوزیت کیتوزان-اکسید گرافن/نقره با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۲ نشان دهنده سطحی صاف و همگن است که نشان دهنده ماتریس کیتوزان به خوبی شکل گرفته با ناهنجاری‌های سطحی حداقلی است. این صافی نشان می‌دهد که مولکول‌های کیتوزان به طور یکنواخت توزیع شده و در طول فرآیند تشکیل لایه به خوبی هم‌راستا شده‌اند که منجر به ساختاری یکنواخت و بدون نقص می‌شود. این یافته‌ها می‌توانند با مطالعه‌ای که توسط یانگ^۳ و همکاران (۲۰۱۸) انجام شده است

الگوهای پراش پرتوی ایکس لایه نازک تهیه شده با استفاده از دستگاه PAN analytical PW3050/60 بررسی شد و شکل و اندازه مواد با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی با میدان استفاده از FESEM-Zeiss Sigma 300-HV Stable پارامترهای مکانیکی با استفاده از آنالیزور بافت Micro Systems Ltd., UK بر اساس استانداردهای صنعتی-ASTM^۱ D-882-۹۷ اندازه‌گیری شدند.

۳- نتایج و بحث

الگوهای پراش پرتو ایکس لایه کیتوزان-نقره/اکسید گرافن در شکل ۱ نمایش داده شده است. قله پراش متمایز اکسید گرافن خالص در زاویه ۱۰.۱ درجه مشاهده می‌شود که به فاصله بین لایه‌ای ۸.۷ مربوط می‌شود، همان‌طور که در الگوی پراش پرتو ایکس نانوصفحات اکسید گرافن نشان داده شده است در شکل ۱ این قله همچنین در الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های اکسید گرافن-کیتوزان و کیتوزان-نقره/اکسید گرافن وجود دارد که نشان‌دهنده حضور اکسید گرافن در این ترکیبات است.

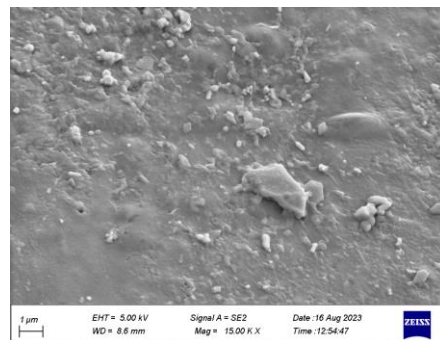
الگوی پراش پرتو ایکس لایه قله‌های مشخصی در حدود ۱۳.۲ درجه نشان می‌دهد که به مشخصه کیتوزان مربوط می‌شود [18]. در لایه کامپوزیتی نقره/اکسید گرافن، قله اضافی در حدود ۳۸ درجه مشاهده می‌شود که به صفحه (۱۱۱) نقره مکعبی مرکزوجه^۲ مربوط است و وجود نانوذرات نقره را تأیید می‌کند [19]. قله در ۵۵ درجه ممکن است به نانو ذرات نقره مربوط باشد که نشان‌دهنده اکسیداسیون جزئی نقره در کامپوزیت است.

³ Yang

¹ American Society for Testing and Materials

² FCC

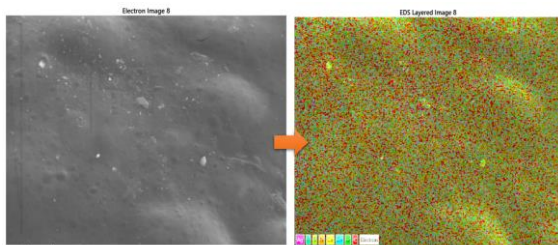
مقایسه شوند، جایی که لایه های نانوکامپوزیت کیتوزان، اکسید گرافن و نقره نیز برای خواص ساختاری آنها بررسی شده‌اند. در مطالعه آنها، ادغام اکسید گرافن در ماتریس کیتوزان به‌طور مشابه منجر به افزایش زبری سطح و تشکیل تجمعات شد که به تعامل بین ورق‌های اکسید گرافن و مولکول‌های کیتوزان نسبت داده شد. افزودن نانوذرات نقره زبری سطح را بیشتر افزایش داد و ذرات نقره کروی مشاهده شد که با یافته‌های ما قابل مقایسه است.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه کیتوزان-اکسید گرافن/نقره

شکل ۳ نقشه عنصری لایه نازک کیتوزان-نقره/اکسید گرافن را نشان می‌دهد و توزیع عناصر مختلف شامل نقره^۱، کربن^۲، اکسیژن^۳، گوگرد^۴، کلسیم^۵، فسفر^۶ و نیتروژن^۷ را آشکار می‌سازد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که این عناصر به‌طور یکنواخت در سرتاسر لایه توزیع شده‌اند. وجود نقره در لایه ناشی از فرآیند سنتز سبز است که در آن نانوذرات نقره به ماتریس کیتوزان-اکسید گرافن معرفی شدند. توزیع همگن نقره نشان‌دهنده سنتز و ادغام مؤثر در کامپوزیت است که به خواص ضدباکتریایی بهبود یافته لایه و پتانسیل

کاربردهای کنترل‌شده در آزادسازی کمک می‌کند. عناصر کربن و اکسیژن عمدتاً از اجزای اکسید گرافن و کیتوزان لایه ناشی می‌شوند. کربن یک جزء اصلی هر دو اکسید گرافن و پلیمر کیتوزان است، در حالی که اکسیژن در گروه‌های عاملی موجود در اکسید گرافن و زنجیره پلی‌ساکاریدی کیتوزان فراوان است. توزیع یکنواخت این عناصر از یکپارچگی ساختاری و تشکیل یک کامپوزیت پایدار حمایت می‌کند. محتوای نیتروژن به گروه‌های آمینی موجود در کیتوزان نسبت داده می‌شود. این توزیع همچنین تأییدکننده ادغام کیتوزان در لایه و تعامل آن با اکسید گرافن و نانوذرات نقره است. عناصر گوگرد، کلسیم و فسفر احتمالاً به‌عنوان نتیجه فرآیند سنتز سبز وارد شده‌اند، ممکن است از عصاره‌های طبیعی یا واکنش‌دهنده‌های مورد استفاده در کاهش و تثبیت نانوذرات نقره ناشی شده باشند. وجود آنها، هرچند در مقادیر کمتر، ممکن است به خواص کلی لایه، مانند بهبود پایداری حرارتی یا سازگاری زیستی کمک کند. توزیع یکنواخت این عناصر برای حفظ خواص مکانیکی و عملکردی لایه بسیار حیاتی است و پتانسیل کاربرد آن را در زمینه‌های زیست پزشکی و محیط زیست تضمین می‌کند.



شکل ۳- تصویر نقشه عنصری از لایه نازک کیتوزان-اکسید گرافن/نقره

- ¹ Ag
- ² C
- ³ O
- ⁴ S
- ⁵ Ca
- ⁶ P
- ⁷ N

مگاپاسکال) نشان می‌دهد، قابل مقایسه است [۲۱]. ژانگ و همکاران^۱ نیز گزارش کردند که کامپوزیت‌های کیتوزان-نانوذرات نقره بهبود استحکام کششی (تا ۱۰ مگاپاسکال) و مدول یانگ را در مقایسه با کیتوزان خالص نشان می‌دهند. یافته‌های آن‌ها با لایه کامپوزیت کیتوزان - اکسید گرافن/نقره ما که استحکام کششی بالاتری (۱۱ مگاپاسکال) و مدول یانگ^۲ متوسطی (۲۷.۵۷ مگاپاسکال) دارد، مطابقت دارد [۲۲]. لی و همکاران^۳ به بررسی کامپوزیت‌های پلیمری با نانوذرات فلزی و اکسید فلزی پرداختند و بهبودهای قابل توجهی در خواص مکانیکی در مقایسه با پلیمرهای خالص گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده بهبود در استحکام کششی و مدول یانگ مشابه با آنچه در لایه کامپوزیت کیتوزان-اکسید گرافن/نقره ما مشاهده شد، است [۲۳]. به‌طور خلاصه، نتایج ما نشان می‌دهد که ادغام اکسید گرافن و نانوذرات نقره در لایه‌های کیتوزان به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی آن‌ها را در مقایسه با لایه‌های کیتوزان خالص بهبود می‌بخشد. این با یافته‌های مطالعات مشابه مطابقت دارد و پتانسیل این نانوکامپوزیت‌ها را برای بهبود عملکرد در کاربردهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱: خواص مکانیکی به دست آمده از لایه‌های

تهیه شده

لایه آماده شده	مدول یانگ (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	کشیدگی در زمان شکست (%)
لایه کیتوزان خالص	۶.۴۰	۳.۲۷	۸.۰۰
لایه کیتوزان - اکسید گرافن	۸.۶۵	۲.۳۴	۶.۰۰
لایه کامپوزیت کیتوزان - اکسید گرافن/نقره	۱۱۹.۸۲	۱۳.۱۸	۱۱.۰۰

استحکام کششی و کشش در نقطه شکست برای لایه خالص کیتوزان، لایه کیتوزان-اکسید گرافن و لایه کامپوزیت کیتوزان-اکسید گرافن/نقره را ارائه می‌دهد. اندازه گیری خواص مکانیکی براساس استاندارد ASTM D882 انجام شده است. داده‌ها نشان می‌دهند که ادغام اکسید گرافن و نانوذرات نقره چگونه بر عملکرد مکانیکی لایه‌های کیتوزان تأثیر می‌گذارد و تغییراتی در سفتی، استحکام و انعطاف‌پذیری را نشان می‌دهد. لایه کامپوزیت کیتوزان - اکسید گرافن/نقره بهترین خواص مکانیکی کلی را با مدول یانگ بالا و استحکام کششی خوب، همراه با انعطاف‌پذیری مناسب نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که بهبود عملکرد مکانیکی کامپوزیت ناشی از اثرات هم‌افزایی اکسید گرافن و نانوذرات نقره است. لایه کیتوزان - اکسید گرافن افزایش مدول یانگ را نشان می‌دهد، اما در مقایسه با کیتوزان خالص، کاهش استحکام کششی و کشش را تجربه می‌کند. این ممکن است به ماهیت اکسید گرافن مربوط باشد که بر خواص کششی کلی لایه تأثیر می‌گذارد. لایه خالص کیتوزان به‌عنوان پایه‌ای با کمترین سفتی اما انعطاف‌پذیری خوب عمل می‌کند. این نتایج بهبودهای قابل توجهی را که از طریق ادغام اکسید گرافن و نانوذرات نقره در ماتریس کیتوزان به‌دست آمده است، برجسته می‌کند و لایه کامپوزیت کیتوزان - اکسید گرافن/نقره را برای کاربردهایی که به خواص مکانیکی بهبود یافته نیاز دارند، بسیار مناسب می‌سازد. یانگ و همکارانش به بررسی کامپوزیت‌های کیتوزان-اکسید گرافن پرداختند و مدول یانگ تقریبی ۸ مگاپاسکال و استحکام کششی حدود ۵ مگاپاسکال برای کامپوزیت‌های خود گزارش کردند. این نتایج با لایه کیتوزان-اکسید گرافن ما که مدول یانگ مشابهی (۶.۰۴ مگاپاسکال) و استحکام کششی کمی بالاتر (۶)

¹ Zhang

² Young's modulus

³ Lee

<https://doi.org/10.1007/s10853-022-06656-3>

3. Gu, B., Jiang, Q., Luo, B., Liu, C., Ren, J., Wang, X., & Wang, X. (2021). A sandwich-like chitosan-based antibacterial nanocomposite film with reduced graphene oxide immobilized silver nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 260, 117835. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117835>
4. Rasoulzadehzali, M., & Namazi, H. (2018). Facile preparation of antibacterial chitosan/graphene oxide-Ag bio-nanocomposite hydrogel beads for controlled release of doxorubicin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.026>
5. Jin, L., Chen, Q., Hu, X., & Zhang, H. (2022). Enhanced mechanical strength and antibacterial properties of chitosan/graphene oxide composite fibres. *Cellulose*, 29, 3889-3900. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04523-8>
6. Liu, Y., Zhang, X., Zhao, H., & Li, J. (2018). Mechanical and antimicrobial properties of chitosan-silver nanoparticle composite films. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(9), 45875. <https://doi.org/10.1002/app.45875>
7. Wang, J., Xu, W., Zhang, Q., & Liu, Y. (2020). Electrical conductivity and biocompatibility of chitosan-graphene oxide composite films. *Materials Science and Engineering: C*, 110, 110696. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110696>
8. Yang, S., Zhang, X., & Zhang, D. (2019). Electrospun chitosan/poly(vinylalcohol)/graphene oxide nanofib

۴- نتیجه گیری

این مطالعه نشان داد که ادغام اکسید گرافن و نانوذرات نقره در لایه‌های کیتوزان موجب بهبود قابل توجهی در ویژگی‌های مکانیکی لایه‌ها می‌شود. نتایج پراش پرتو ایکس نشان‌دهنده تعامل موفق این نانوذرات با ماتریس کیتوزان است. تغییرات مورفولوژیکی سطحی و بهبود قابل توجه در استحکام کششی به‌ویژه به دلیل خواص نانوذرات نقره مشاهده شد. این کامپوزیت‌ها می‌توانند برای کاربردهایی که نیاز به مواد با خواص مکانیکی و الکتریکی بالا دارند، مانند الکترونیک انعطاف‌پذیر و حسگرها، مناسب باشند. همچنین این مواد می‌توانند بعنوان زخم پوشی نوین در سوختگی‌ها استفاده شود. این مطالعه پتانسیل چنین نانو کامپوزیت‌هایی را در توسعه مواد پیشرفته برای کاربردهای مختلف فناوری، از جمله الکترونیک‌های انعطاف‌پذیر، حسگرها و سایر دستگاه‌هایی که در آنها عملکرد مکانیکی و الکتریکی بهبود یافته حیاتی است، تأکید می‌کند.

۵- منابع

1. Chen, L., Wang, K., Li, F., & Xie, D. (2024). Green fabrication, characterization and antimicrobial activities of AgO/Ag/carboxymethyl chitosan-graphene oxide films. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(1), 105380. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2023.105380>
2. Zhang, Y., Li, W., & Yang, Y. (2023). Enhanced electrical and mechanical properties of chitosan-based films via graphene oxide incorporation. *Journal of Materials Science*, 58(4), 3122-3134.

- <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.237>
14. Alamdari, S., Mirzaee, O., Nasiri Jahroodi, F., Tafreshi, M. J., Sasani Ghamsari, M., Shik, S. S., Ara, M. H., Lee, K., & Park, H. H. (2022). Green synthesis of multifunctional ZnO/chitosan nanocomposite film using wild *Mentha pulegium* extract for packaging applications. *Surfaces and Interfaces*, 34, 102349. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102349>
 15. Alamdari, S., Sasani Ghamsari, M., Lee, C., Han, W., Park, H. H., Tafreshi, M. J., Afarideh, H., & Ara, M. H. M. (2020). Preparation and characterization of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of *Sambucus ebulus*. *Applied Sciences*, 10(10), 3620. <https://doi.org/10.3390/app10103620>
 16. Valinezhad, N., Talebi, A. F., & Alamdari, S. (2023). Biosynthesis, physicochemical characterization and biological investigations of chitosan-Ferula gummosa essential oil (CS-FEO) nanocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 241, 124503. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124503>
 17. Alamdari, S., Mirzaee, O., Tafreshi, M. J., & Riedel, R. (2023). Immobilization of ZnO nanocrystals in a polystyrene/cellulose matrix: A novel hybrid nanocomposite photocatalyst for future photo energy application. *Composites Part B: Engineering*, 265, 110934. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110934>
 18. Das, B., Dash, S. K., Mandal, D., Ghosh, T., Chattopadhyay, S., Tripathy, S., & Roy, S. (2017). Green synthesized silver rous membrane with ciprofloxacin antibiotic drug for potential wound dressing application. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(17), 4395. <https://doi.org/10.3390/ijms20174395>
 9. Yang, S., Lei, P., Shan, Y., & Zhang, D. (2018). Preparation and characterization of antibacterial electrospun chitosan/poly(vinyl alcohol)/graphene oxide composite nanofibrous membrane. *Applied Surface Science*, 435, 832-840. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.156>
 10. Hajiebrahimi, M., Alamdari, S., & Mirzaee, O. (2022). Luminescence investigation of Ce doped ZnO/CdWO₄ nanocomposite. *Advanced Ceramics Progress*, 8(3), 8-12. <https://doi.org/10.30501/acp.2022.363264.1102>
 11. Alamdari, S., Hemmati, M., Tafreshi, M. J., & Ehsani, M. (2023). Erbium doped barium tungstate-chitosan nanocomposite: Luminescent properties. *Progress in Physics of Applied Materials*, 3(2), 119-123. <https://doi.org/10.22075/ppam.2023.31808.1065>
 12. Alamdari, S., Ghamsari, M. S., & Afarideh, H. (2019). Preparation and characterization of GO-ZnO nanocomposite for UV detection application. *Optical Materials*, 92, 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.04.009>
 13. Hemmati, M., Tafreshi, M. J., Ehsani, M. H., & Alamdari, S. (2022). Highly sensitive and wide-range flexible sensor based on hybrid BaWO₄@CS nanocomposite. *Ceramics International*, 48(18), 26508-26518.



- 40(7), 2489-2500.
<https://doi.org/10.1002/pc.24890>
24. Lee, J., Lee, J. H., & Koo, C. M. (2019). Enhanced electrical conductivity of chitosan/graphene oxide composites. *Carbon*, 145, 259-268.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.01.025>
25. Zhang, L., Liu, X., & Wang, Y. (2021). Electrical and mechanical properties of chitosan/graphene oxide composite films. *Journal of Materials Science*, 56(18), 10523-10534.
<https://doi.org/10.1007/s10853-021-05722-8>
26. Liu, L., Wang, J., & Yang, H. (2020). High conductivity and antibacterial properties of silver nanoparticles/chitosan composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(29), 48916.
<https://doi.org/10.1002/app.48916>
- nanoparticles destroy multidrug resistant bacteria via reactive oxygen species mediated membrane damage. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(6), 862-876.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.06.010>
19. Sahin, F., Akgol, M. K., & Korkmaz, M. (2022). Machine learning-assisted pesticide detection on a flexible surface-enhanced Raman scattering substrate prepared by silver nanoparticles. *ACS Applied Nano Materials*, 5(9), 13112-13122.
<https://doi.org/10.1021/acsnm.2c02897>
20. Yang, X., Tu, Y., Li, L., Shang, S., & Tao, X. M. (2018). Well-dispersed chitosan/graphene oxide/silver nanoparticle hybrids for high-performance electrochemical electrodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(17), 6073-6081.
<https://doi.org/10.1021/am4011996>
21. Yang, Y., Liu, Y., Jiang, Z., & Zhang, J. (2021). Mechanical properties and bioactivity of chitosan-graphene oxide composites for biomedical applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(45), 50587.
<https://doi.org/10.1002/app.50587>
22. Zhang, Q., Liu, Y., Li, J., & Chen, X. (2020). Synthesis and mechanical properties of chitosan-silver nanoparticle composites for antibacterial applications. *Materials Science and Engineering C*, 110, 110723.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110723>
23. Lee, K., Kim, H., & Park, J. (2019). Enhancement of mechanical properties of polymer composites with metal and metal oxide nanoparticles. *Polymer Composites*,