

Research Article
Vol. 22, No. 2, May-June, 2026, p. 207-223

Production of Active Biodegradable Antioxidant and Antibacterial Films Based on Salep Powder, Turmeric Powder, and Selenium Powder: A Novel Approach to Sustainable Packaging

S. Mansouryar^{1*}, S. Pirsā¹, M.KH. Pirouzifard¹

1- Department of Food Science and Technology, Urmia University, Urmia, Iran

(* - Corresponding Author Email: st_s.mansuryar@urmia.ac.ir)

Received: 06.05.2026	How to cite this article: Mansouryar, S., Pirsā, S., & Pirouzifard, M.KH. (2026). Production of active biodegradable antioxidant and antibacterial films based on salep powder, turmeric powder, and selenium powder: A novel approach to sustainable packaging. <i>Iranian Food Science and Technology Research Journal</i> , 22(2), 207-223. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98584.1571
Revised: 23.05.2026	
Accepted: 24.05.2026	
Available Online: 31.05.2026	

Introduction

The widespread use of synthetic plastics in packaging is a major global environmental problem, contributing to greenhouse gas emissions and pollution. Most plastics are non-biodegradable, accumulated in the environment, fragmented into ecosystems, and eventually give rise to harmful microplastics. Incineration of plastics also releases toxic gases, further polluting the air. Developing biodegradable alternatives from natural sources like proteins and polysaccharides is crucial for sustainable packaging. These biopolymer films, like those made from salep and enhanced with natural additives such as turmeric and selenium, offer improved functionality including antioxidant and antibacterial properties.

Materials and Methods

Salep and turmeric powders were obtained from medicinal plant stores in Urmia, West Azerbaijan, Iran, while glycerol (99% purity) and selenium powder were purchased from Merck, Germany, and used without further purification. For film preparation, predetermined amounts of turmeric powder were dispersed in 100 mL of distilled water and stirred at 40–50°C and 500 rpm for 15 min, then filtered through a cloth filter to remove coarse particles. The required amount of selenium powder was added to the filtrate and stirred for another 15 min under the same conditions. Next, 2 g of salep powder were gradually added through a fine sieve to obtain a homogeneous mixture, followed by glycerol addition at 30% w/w relative to salep. Finally, 25 mL of the prepared solution was cast into 10-cm Petri dishes and dried at room temperature for 24 h. In total, 13 film formulations were prepared according to the statistical design.

Results and Discussion

The results demonstrated that increasing the turmeric concentration enhanced the yellowness (b^*) and decreased the lightness (L^*) of the films, while the addition of selenium shifted the color toward the green/blue spectrum (a^*). Regarding functional properties, turmeric exhibited antibacterial activity, particularly against Gram-positive bacteria, whereas selenium alone showed no effect; however, their combination revealed a strong synergistic antibacterial effect. A similar synergy was observed in antioxidant activity, where selenium stabilized and enhanced the effect driven by turmeric. Optical analysis indicated that turmeric increased light absorption and reduced transparency. Interestingly, the combination of turmeric and selenium reduced transparency less than individual components, suggesting its potential for protective packaging. FESEM imaging revealed that turmeric created a smooth, homogeneous surface, whereas selenium alone formed rough clusters; notably, their combination



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98584.1571>

resulted in a more uniform surface by counteracting selenium aggregation. Finally, the UV–Vis spectrum of the turmeric extract confirmed the presence of three main absorption peaks at 342 nm (isomers), 380 nm (curcumin tautomers), and 457 nm (curcumin), with the latter shift attributed to the polarity and hydrogen bonding effects of the water solvent.

Conclusion

This study, focusing on the development of biodegradable films based on salep powder reinforced with turmeric and selenium powders, demonstrated the potential of exploiting the synergy between them. Active biodegradable films using salep, turmeric, and selenium were developed in this study. Turmeric enhanced properties, while selenium boosted performance synergistically, improving antibacterial activity and structural stability. Tailoring film features offers protective packaging, reducing plastic waste and enabling intelligent packaging.

Keywords: Active film, Biodegradable film, Salep powder, Selenium powder, Turmeric powder

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۲، خرداد- تیر ۱۴۰۵، ص. ۲۲۳-۲۰۷

تولید فیلم‌های فعال زیست‌تخریب‌پذیر آنتی‌اکسیدان و آنتی‌باکتریال بر پایه پودر ثعلب، پودر زردچوبه و پودر سلینیوم: رویکردی نوین در بسته‌بندی پایدار

سمیه منصوریار^{۱*} - سجاد پیرسا^{۱ID} - میرخلیل پیروزی فرد^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳

چکیده

افزایش بی‌رویه تولید و مصرف پلاستیک‌های سنتزی در صنعت بسته‌بندی به یکی از معضلات کلیدی زیست‌محیطی قرن حاضر تبدیل شده است. پیامدهای این روند شامل انباشت پلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های خاکی و آبی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، آزادسازی میکرو و نانوپلاستیک‌ها، و بروز اثرات مخرب بر سلامت موجودات زنده است. در پاسخ به این چالش جهانی، پژوهش حاضر به توسعه فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پودر ثعلب به عنوان یک زیست‌پلیمر تجدیدپذیر پرداخته و با تقویت آن توسط پودر زردچوبه (*Curcuma longa*) و پودر سلینیوم، سامانه‌ای نوین برای بسته‌بندی فعال ارائه می‌دهد. فیلم‌های زیستی تهیه شده، حاوی فرمولاسیون‌های مختلف پودر زردچوبه و سلینیوم، تحت آزمون‌های جامع رنگ‌سنجی (CIELAB)، طیف‌سنجی UV-Vis، فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH)، آزمون ضدباکتری (*S. aureus* و *E. coli*) و تحلیل میکروسکوپی FESEM مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن زردچوبه منجر به افزایش شاخص b^* (زردی)، کاهش L^* (روشنایی) و بهبود یکنواختی ریزساختاری شد؛ در حالی که سلینیوم تغییرات قابل‌توجهی در شاخص a^* و ایجاد خوشه‌های نامنظم سطحی را سبب گردید. اثر همزمان دو افزودنی موجب بهبود تعادل رنگی و کاهش آگلومراسیون شد. از منظر عملکردی، فیلم‌های حاوی زردچوبه فعالیت ضد میکروبی قابل‌توجهی، به‌ویژه در برابر *S. aureus*، از خود نشان دادند؛ در حالی که سلینیوم به تنهایی فاقد اثر مهاری بود. با این حال، ترکیب زردچوبه و سلینیوم یک تعامل هم‌افزای واقعی ایجاد کرده و موجب افزایش چشمگیر بازدارندگی رشد باکتری شد. آزمون DPPH نیز حاکی از فعالیت آنتی‌اکسیدانی بسیار بالا (۹۳٪-۱۰۰٪) بود که بیشترین اثر در فرمولاسیون ترکیبی مشاهده گردید. نتایج طیف‌سنجی UV-Vis نشان داد حضور زردچوبه جذب نوری را به‌ویژه در ناحیه مرئی (حدود ۶۰۰ نانومتر) تقویت کرده و شفافیت فیلم را کاهش می‌دهد، در حالی که سلینیوم اثر مکمل و تنظیم‌کننده داشت. تصاویر FESEM نیز تأیید کردند که زردچوبه موجب بهبود همگنی سطحی و سلینیوم به تنهایی موجب آگلومراسیون می‌شود، اما ترکیب آن‌ها ساختاری پایدارتر ایجاد کرد.

واژه‌های کلیدی: پودر ثعلب، پودر زردچوبه، پودر سلینیوم، فیلم زیست‌تخریب‌پذیر، فیلم فعال

مقدمه

افزایش بی‌سابقه مصرف پلاستیک‌های سنتزی در صنعت بسته‌بندی، به‌ویژه در حوزه مواد غذایی به یکی از جدی‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است (Ncube, Ude, 2021).

Ogunmuyiwa, Zulkifli, & Beas, 2021; Kumar et al., 2021). تنها در سال ۲۰۱۹ حدود ۱/۸ میلیارد تن گازهای گلخانه‌ای ناشی از پلاستیک‌ها منتشر شد که ۳/۴٪ کل انتشار جهانی را شامل می‌شود (International Institute for Sustainable Development, 2021).

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(* نویسنده مسئول: Email: st_s.mansuryar@urmia.ac.ir)

بر تهیه فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر آنتی‌اکسیدان و ضد میکروبی با استفاده از پودر ثعلب، پودر زردچوبه و سلیوم تمرکز دارد. اهداف اصلی این مطالعه، ارتقاء خواص محافظتی فیلم‌ها با بهره‌گیری از اثرات هم‌افزای این مواد طبیعی و معدنی است. پژوهش حاضر در آزمایشگاه دانشگاه ارومیه طی سال‌های ۱۴۰۳-۱۴۰۴ انجام شده است.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی

در این پژوهش، پودر ثعلب و زردچوبه به‌عنوان منبع طبیعی و دارای ترکیبات کورکومینوئیدی، از فروشگاه‌های گیاهان دارویی شهر ارومیه (آذربایجان غربی-ایران) تهیه شد. گلیسرول با خلوص ۹۹٪ و پودر سلیوم از شرکت مرک (آلمان) خریداری گردید. کلیه مواد شیمیایی، بدون هیچ‌گونه خالص‌سازی یا فرآوری اضافی مورد استفاده قرار گرفتند.

تهیه فیلم

برای آماده‌سازی فیلم‌ها، در ابتدا محلولی حاوی پودر زردچوبه و پودر سلیوم تهیه شد. میزان سلیوم طبق طرح آماری و با هدف ارتقای عملکرد فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر تعیین شد. از آنجا که این ترکیب در ساختار فیلم به‌کار رفته و مصرف مستقیم ندارد، مقدار آن به‌گونه‌ای تنظیم شد که ضمن حفظ کارایی، خللی در ساختار فیلم ایجاد نکند. بدین منظور، مقادیر تعیین‌شده‌ای از پودر زردچوبه طبق طرح آماری (جدول ۱) در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه گردید و مخلوط حاصل روی هیتر مغناطیسی در دمای ۴۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۵۰۰ rpm به‌مدت ۱۵ دقیقه هم‌زده شد تا پراکنش یکنواختی ایجاد شود. محلول حاصل با استفاده از صافی پارچه‌ای صاف شد تا ذرات درشت و نامنظم حذف شوند. سپس مقدار مشخصی از پودر سلیوم (مطابق طرح آماری جدول ۱) به محلول صاف‌شده افزوده شد و ترکیب به‌مدت ۱۵ دقیقه دیگر تحت همان شرایط دما و هم‌زدن قرار گرفت تا توزیع یکنواختی از ذرات سلیوم به‌دست آید. در ادامه، برای جلوگیری از تشکیل حباب و گلوله‌شدن، مقدار ۲ گرم پودر ثعلب به‌صورت تدریجی و طی چند مرحله از طریق الک ریز به محلول اضافه گردید تا مخلوطی یکنواخت حاصل شود. پس از آن، گلیسرول با نسبت ۳۰ درصد وزنی نسبت به ماده خشک به ترکیب افزوده شد و مخلوط نهایی کاملاً همگن گردید. در مرحله پایانی، ۲۵ میلی‌لیتر از محلول آماده در پلیت‌های دایره‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر ریخته شد و در دمای محیط به‌مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. پس از خشک‌شدن کامل، فیلم‌ها به‌آرامی از قالب جدا شدند و تا زمان استفاده در کیسه‌های زیپ‌دار در یخچال نگهداری گردیدند (Ekrami & Emam-Djomeh, 2014; Lu et al., 2020; Akter et al., 2019). در مجموع ۱۳ نوع فیلم با فرمولاسیون‌های

(Development, 2023; OECD, 2023). تولید جهانی پلاستیک در همین سال به ۳۷۰ میلیون تن رسید، اما تنها ۹٪ از آن بازیافت شد و بخش عمده در محیط باقی ماند (Agarwal, Shaida, Rastogi, & Singh, 2023; Babaremu, Oladijo, & Akinlabi, 2023). انباشت این مواد، آلودگی خاک، منابع آبی و اقیانوس‌ها را تشدید کرده و به نابودی اکوسیستم‌ها منجر شده است (Kibria, Masuk, Safayet, Nguyen, & Mourshed, 2023; Dey, Veerendra, Babu, Manoj, & Nagarjuna, 2024; Krantzberg, 2019). از طریق سوزاندن نیز با تولید گازهای سمی، آلودگی هوا و افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن همراه است (Sharma, Sharma, & Chatterjee, 2023; Kumar, Vyas, Sharma, & Dehalwar, 2024). پلاستیک‌ها پس از تجزیه به میکرو و نانوذرات در بافت‌های انسانی و زنجیره غذایی شناسایی شده‌اند (Enyoh, Devi, Kadono, Wang, & Rabin, 2023; Ghosh et al., 2023). این ذرات اثرات مخربی، همچون سمیت سلولی، اختلالات سیستمیک و تهدید سلامت موجودات زنده را ایجاد می‌کنند (Tan, Yue, Xu, Zhao, & Xing, 2020; Walker & Fequet, 2023; Elliott & Truman, 2020). از این‌رو، توسعه جایگزین‌هایی مانند فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها و سایر زیست‌پلیمرها اهمیت یافته است؛ موادی که در پایان عمر خود تجزیه شده، قابل کمپوست هستند و ردپای کربنی کم‌تری بر جای می‌گذارند. افزون بر این، می‌توان ترکیبات فعال نظیر عوامل ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدان‌ها را در این بسته‌بندی‌ها گنجانده تا عملکردهایی مانند مهار رشد میکروبی، کاهش اکسیداسیون چربی‌ها و ارتقای ارزش تغذیه‌ای حاصل شود (Fakhouri, Martelli, Caon, Velasco, & Mei, 2015; Karimi Sani et al., 2023; Barbosa, Andrade, Vilarinho, Fernando, & Silva, 2021; Ribeiro, Estevinho, & Rocha, 2021; Khalid, 2022). به‌عنوان یک زیست‌پلیمر ارزشمند با محتوای بالای گلوکومانان (۱۶-۵۵٪) و خواص رئولوژیکی ویژه، قابلیت بالایی در تولید فیلم‌های خوراکی زیستی دارد و به‌عنوان عامل ژل‌کننده، غلیظ‌کننده و پایدارکننده کاربرد دارد (Ekrami & Emam-Djomeh, 2014). افزودن ترکیبات طبیعی می‌تواند عملکرد این فیلم‌ها را تقویت کند. زردچوبه (*Curcuma longa*) به‌دلیل وجود کورکومین، خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی شناخته شده است (Akter, Hossain, Takara, Islam, & Hou, 2019; Hussain et al., 2017). آن، سلیوم، به‌عنوان یک عنصر معدنی با نقش‌های کلیدی، در توسعه فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر مورد توجه قرار گرفته است. به‌کارگیری آن در ساختار فیلم‌ها موجب تقویت ویژگی‌های عملکردی و افزایش کارایی بسته‌بندی می‌شود (Lu et al., 2020). با توجه به اهمیت روزافزون فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و نیاز به بهبود خواص محافظتی آن‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی، این پژوهش

متفاوت تهیه شد. فیلم پایه فاقد پودر زردچوبه و سلنیوم بود، در حالی که سایر نمونه‌ها حاوی مقادیر مختلفی از این ترکیبات بودند (شکل ۱).



شکل ۱- فیلم‌های تهیه شده از کامپوزیت پودر ثعلب/پودر زردچوبه و سلنیوم

Fig. 1- Films prepared from the composite of safflower powder/turmeric and selenium powder

پلیت‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سلسیوس انکوبه شدند. پس از پایان انکوباسیون، قطر نواحی بازدارندگی رشد باکتری در اطراف دیسک‌ها (Halo of Inhibition) با دقت و به واحد میلی‌متر اندازه‌گیری شد. ارزیابی اثر ضد میکروبی فیلم‌ها با استفاده از کنترل منفی (فیلم پایه - ۴) و کنترل مثبت (تتراسایکلین) انجام شد. اندازه این نواحی به عنوان شاخص فعالیت ضد باکتریایی فیلم‌ها ثبت و تحلیل گردید (Osés et al., 2016).

ارزیابی خواص آنتی اکسیدانی (DPPH)

برای ارزیابی فعالیت آنتی اکسیدانی فیلم‌های زیست تخریب پذیر، از آزمون مهار رادیکال آزاد DPPH استفاده شد. بدین منظور، مقدار ۲۵ میلی گرم از هر نمونه فیلم در ۴ میلی لیتر آب مقطر با هم زدن مداوم حل شد تا عصاره یکنواختی حاصل شود. سپس ۱ میلی لیتر از عصاره تهیه شده با ۱ میلی لیتر محلول متانولی DPPH با غلظت ۱ میلی مولار مخلوط گردید. مخلوط حاصل به مدت ۵ دقیقه در دمای محیط هم زده شد و سپس به مدت ۱ ساعت در محیطی تاریک و سرد نگهداری گردید. اندازه‌گیری جذب نوری نمونه‌ها در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مرئی-فرابنفش مدل ۸۰-۲۰۹۲-۲۶ ساخت شرکت LKB Biochrom (انگلستان) انجام گرفت (Pirsa & Mohammadi, 2021).

درصد مهار رادیکال آزاد DPPH با استفاده از رابطه زیر محاسبه

شد:

آزمون‌های فیلم

ارزیابی ویژگی‌های رنگی (Lab)

برای اندازه‌گیری پارامترهای رنگی فیلم‌های زیست تخریب پذیر، از دستگاه رنگ سنج مدل CR-400 ساخت شرکت Konica Minolta Sensing Inc (ژاپن) استفاده شد. هر نمونه بر روی زمینه سفید استاندارد قرار گرفت و مقادیر L^* (روشنایی)، a^* (قرمز-سبز) و b^* (زرد-آبی) در سه نقطه مجزا از سطح فیلم اندازه‌گیری شد. میانگین این سه مقدار به عنوان نمایه نهایی رنگی نمونه ثبت و در تحلیل‌های آماری مورد استفاده قرار گرفت (Sharma, Jaiswal, Duffy, & Jaiswal, 2020).

آزمون فعالیت ضد باکتریایی

برای بررسی خاصیت ضد باکتریایی فیلم‌های زیست تخریب پذیر، از روش انتشار دیسک در محیط کشت مولر-هینتون آگار (Mueller-Hinton agar) استفاده شد. ابتدا نمونه‌های فیلم به صورت دیسک‌هایی با قطر ۶ میلی متر برش داده شدند. این دیسک‌ها به صورت استریل بر روی پلیت‌های حاوی محیط مولر-هینتون آگار که پیش‌تر با سوسپانسیون باکتری‌های *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* با غلظت تقریبی 10^7 CFU/mL تلقیح شده بودند، قرار گرفتند.

$$\text{Antioxidant activity (\%)} = \frac{A_b - A_s}{A_b} \quad (1)$$

که در آن، A_b جذب محلول شاهد و A_s جذب نمونه آزمون است.

آزمون طیف‌سنجی UV-VIS (جذب و عبور نور)

برای ارزیابی ویژگی‌های نوری فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر، از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis مدل ۲۶-۲۰۹۲-۸۰ ساخت شرکت LKB Biochrom (انگلستان) استفاده شد. نمونه‌ها به صورت نوارهایی با ابعاد یکنواخت (10×40 میلی‌متر) و ضخامت ثابت، آماده‌سازی شده و درون سل کوارتز قرار داده شدند، در حالی که سل خالی به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری‌ها در طول موج ثابت ۶۰۰ نانومتر و در دمای محیط (25 ± 1 درجه سانتی‌گراد) انجام گرفت. انتخاب این طول موج به دلیل قرارگیری در ناحیه مرئی طیف الکترومغناطیسی و مناسب بودن آن برای بررسی هم‌زمان تغییرات در عبور نور و ارزیابی میزان کدورت فیلم‌ها صورت گرفت. این طول موج امکان یکنواخت‌سازی مقایسه‌ها و سنجش دقیق اثر افزودنی‌های طبیعی بر خواص اپتیکی فیلم را فراهم می‌آورد. برای هر نمونه سه بار تکرار صورت پذیرفت و میانگین نتایج به عنوان مقدار نهایی جذب و عبور نوری ثبت گردید. این روش با الهام از دستورالعمل یو و همکاران (Yu et al., 2017) و با اصلاحات جزئی مورد استفاده قرار گرفت.

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)

برای بررسی دقیق مورفولوژی سطحی فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر و تحلیل نحوه توزیع ترکیبات فعال در بستر پلیمری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA III ساخت شرکت TESCAN (جمهوری چک) استفاده گردید. نمونه‌های فیلم پس از برش در ابعاد منظم و مناسب، پیش از تصویربرداری به منظور افزایش رسانایی سطحی و جلوگیری از تجمع بار، با یک لایه نازک طلا به روش sputter coating پوشش داده شدند. عملیات پوشش‌دهی در شرایط خلأ و با جریان کنترل شده انجام شد تا لایه‌ای یکنواخت بر سطح فیلم ایجاد شود. سپس نمونه‌ها بر روی پایه‌های رسانا (stubs) توسط نوار کربنی نصب و داخل محفظه دستگاه قرار گرفتند. تصویربرداری در بزرگ‌نمایی‌های مختلف، تحت خلأ بالا و با ولتاژ شتاب‌دهنده ثابت ۲۰ کیلوولت انجام شد. تصاویر حاصل برای ارزیابی ویژگی‌های سطحی شامل یکنواختی ساختار، نحوه توزیع ترکیبات، وجود تخلخل یا نواقص و همچنین تعامل میان اجزای ماتریس پلیمری مورد استفاده قرار گرفت (Pirsa & Mohammadi, 2021).

ویژگی‌یابی طیف جذبی UV-Vis عصاره آبی زردچوبه

و شناسایی پیک‌های کورکومینوئیدها

برای تهیه عصاره آبی زردچوبه، مقدار ۰.۴ گرم پودر زردچوبه (*Curcuma longa* L.) در ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر توزین و سوسپانسیون حاصل در دمای ثابت ۴۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه بر روی هیتر حرارت داده شد. پس از تکمیل فرآیند استخراج، محلول از صافی کاغذی عبور داده شد تا ذرات نامحلول و ناخالصی‌ها حذف گردد. آب مقطر به عنوان بلانک در تمامی مراحل اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گرفت.

طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis) توسط اسپکتروفتومتر با استفاده از کووت کوارتز در محدوده طول موج ۲۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر انجام گرفت. جذب نوری نمونه در برابر طول موج رسم گردید و پیک‌های اصلی طیف به صورت کمی و کیفی مورد تحلیل قرار گرفتند (Ghosh & Sarkar, 2024).

آنالیز آماری

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر مقادیر مختلف پودر زردچوبه و پودر سلنیوم بر ویژگی‌های فیلم زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پودر ثعلب و مدل‌سازی ارتباط میان متغیرهای مستقل و وابسته، از طرح آماری مرکب مرکزی (جدول ۱-الف) استفاده شد. بر اساس این طرح، در مجموع ۱۳ فرمولاسیون مختلف فیلم تهیه گردید. از میان آن‌ها، چهار فیلم منتخب (جدول ۱-ب) جهت ارزیابی خصوصیات عملکردی و زیست‌فعال مورد بررسی قرار گرفتند. برای تحلیل داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها از سطح احتمال ۹۵ درصد استفاده شد. مدل‌سازی و برآورد ضرایب رگرسیونی با کمک نرم‌افزار Design-Expert (ورژن ۱۰) انجام گرفت. همچنین برای ترسیم نمودارهای کالیبراسیون و تحلیل نتایج آزمون‌ها از نرم‌افزار Microsoft Excel (نسخه ۲۰۱۸) استفاده گردید.

نتایج و بحث

ارزیابی ویژگی‌های رنگی (Lab)

ویژگی‌های رنگی فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه صمغ ثعلب اصلاح‌شده با پودر زردچوبه (TP) و پودر سلنیوم (SP)، با استفاده از سیستم رنگ‌سنجی CIELAB مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش غلظت زردچوبه موجب افزایش معنی‌دار در شاخص b^* (زردی) و کاهش در مقدار L^* (روشنایی) شد؛ پدیده‌ای که مستقیماً به حضور ترکیبات رنگ‌زای کورکومینوئیدی، به ویژه کورکومین، نسبت داده می‌شود. این رنگدانه‌ها با افزایش غلظت، شدت رنگ را تشدید و شفافیت فیلم را کاهش می‌دهند؛ یافته‌ای که با گزارش

پیشین بر روی افزودنی‌های معدنی نظیر نانوذرات سلنیوم در ماتریس‌های پلیمری، از جمله نتایج لو و همکاران (Lu et al., 2020) در سیستم‌های PLA/SeMP مطابقت دارد.

واکنه و همکاران (Wakte et al., 2011) در فیلم‌های تقویت شده با زردچوبه هم‌راستا است. افزایش غلظت پودر سلنیوم نیز تغییراتی مشخص در شاخص a^* به همراه داشت، به گونه‌ای که جابه‌جایی رنگی به سمت تهرنگ‌های سبزتر یا آبی‌تر مشاهده شد. این رفتار، با مطالعات

جدول ۱-الف- لیست فیلم‌های تهیه شده بر اساس طرح مرکب مرکزی
Table 1-a- List of films prepared based on the central composite design

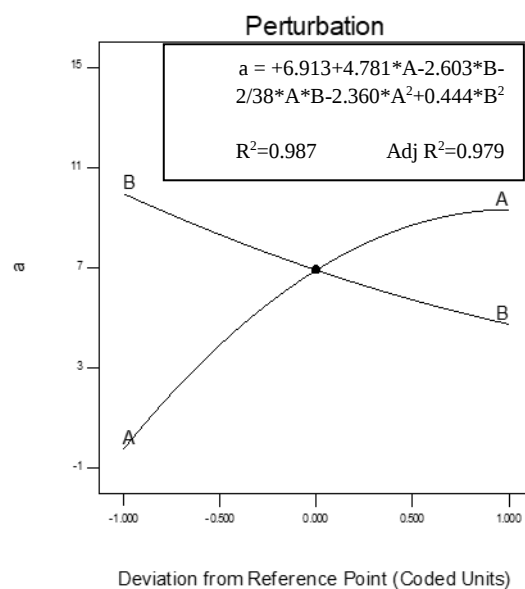
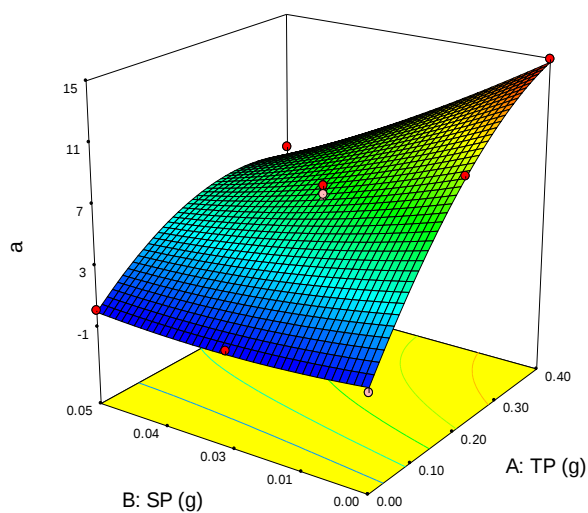
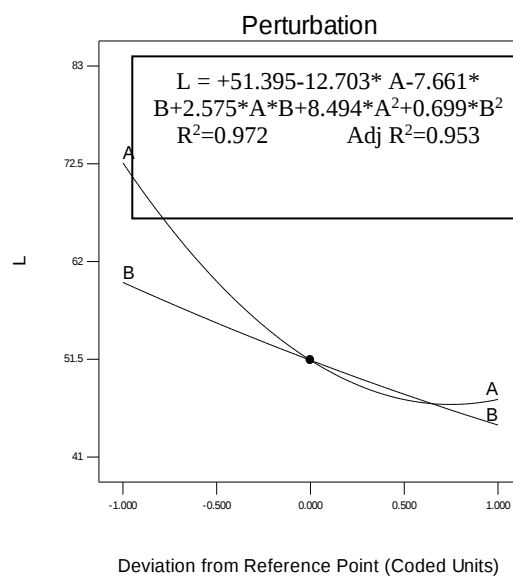
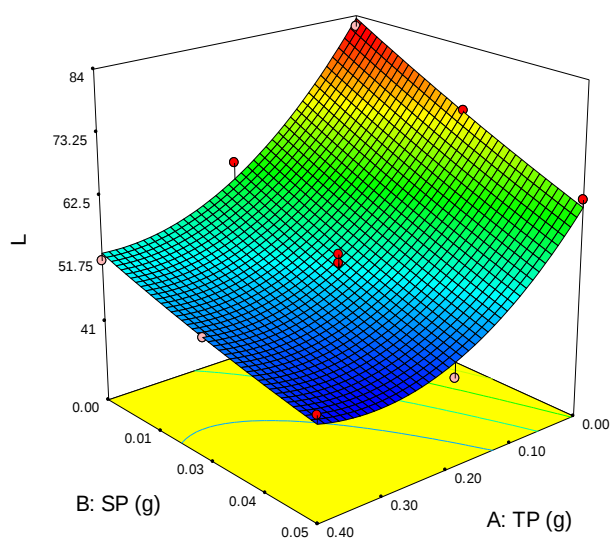
مرحله Run	زردچوبه TP (g)	سلنیوم SP (g)	کد کیت Kit Code
1	0.2	0	K _{0,2-0}
2	0.2	0.05	K _{0,2-0.05}
3	0.4	0	K _{0,4-0}
4	0	0	K ₀₋₀
5	0	0.025	K _{0-0.025}
6	0.2	0.025	K _{0,2-0.025}
7	0.4	0.025	K _{0,4-0.025}
8	0.2	0.025	K _{0,2-0.025}
9	0.2	0.025	K _{0,2-0.025}
10	0	0.05	K _{0-0.05}
11	0.2	0.025	K _{0,2-0.025}
12	0.2	0.025	K _{0,2-.0025}
13	0.4	0.05	K _{0,4-0.05}

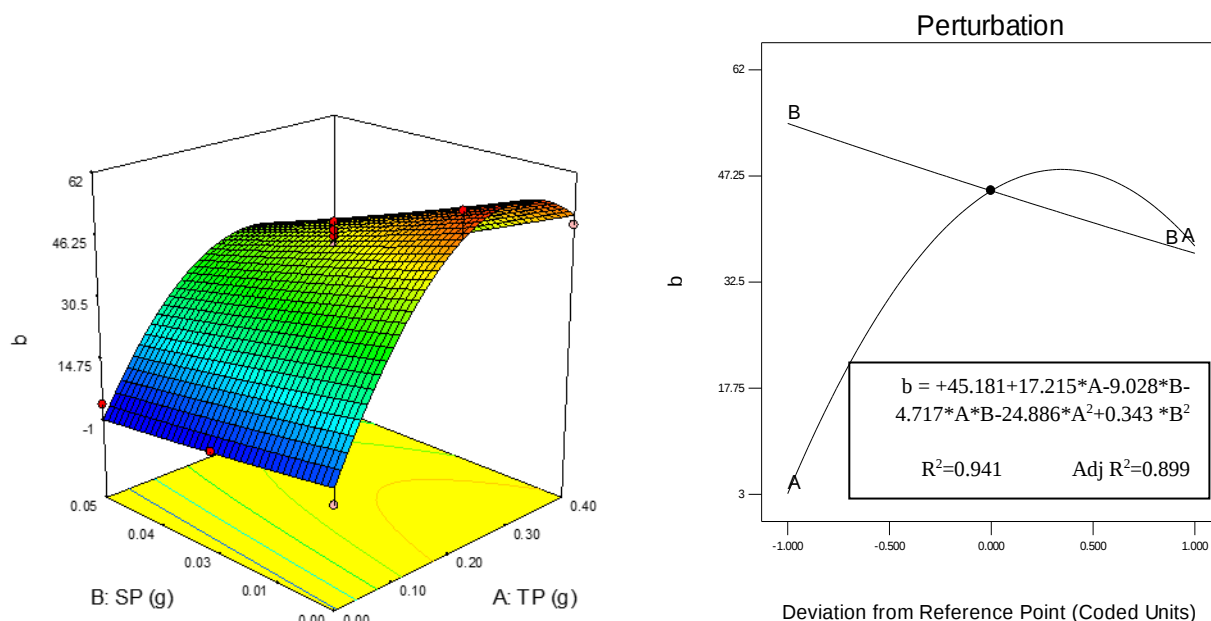
جدول ۱-ب- لیست فیلم‌های منتخب برای بررسی ویژگی‌های عملکردی و زیست فعال
Table 1-b- List of selected films for evaluation of functional and bioactive properties

مرحله Run	زردچوبه TP (g)	سلنیوم SP (g)	کد کیت Kit Code
3	0.4	0	K _{0,4-0}
4	0	0	K ₀₋₀
6	0.2	0.025	K _{0,2-0.025}
13	0.4	0.05	K _{0,4-0.05}

فراهم می‌سازد (شکل ۲). این قابلیت برای کاربردهای بسته‌بندی فعال و هدفمند محصولات غذایی حساس به نور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا فاکتورهای رنگی نقش اساسی در پذیرش حسی محصول نهایی ایفا می‌کنند (Ramos et al., 2013; Rachtanapun et al., 2021).

بر اساس مدل‌های ریاضی حاصل از طراحی آماری و نمودارهای تغییرات (perturbation)، تعامل میان TP و SP منجر به الگوی پاسخ غیرخطی در شاخص‌های a^* و b^* گردید. به‌طور مشخص، افزایش TP باعث تشدید مؤلفه قرمزی (a^*) و افزایش SP موجب کاهش آن شد. مجموع این داده‌ها نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از TP و SP امکان مهندسی دقیق ویژگی‌های نوری و بصری فیلم‌های زیستی را





شکل ۲- منحنی‌های سه‌بعدی، perturbation و مدل ریاضی ارتباط بین میزان پودر زردچوبه و سلینیوم با فاکتورهای رنگی (Lab) فیلم‌های کامپوزیتی

Fig. 2- Three-dimensional curves, perturbation plots, and the mathematical model illustrating the relationship between the amounts of turmeric and selenium powder with the color factors (Lab) of the composite films

(Ndwandwe, Malinga, Kayitesi, & Dlamini, 2022). در این

مطالعه، استفاده از پودر سلینیوم، فاقد ساختار نانویی یا پوشش‌دهی مؤثر (encapsulation) موجب کاهش دسترسی زیستی آن در محیط‌کشت شده و غلظت مهاری لازم حاصل نشده است.

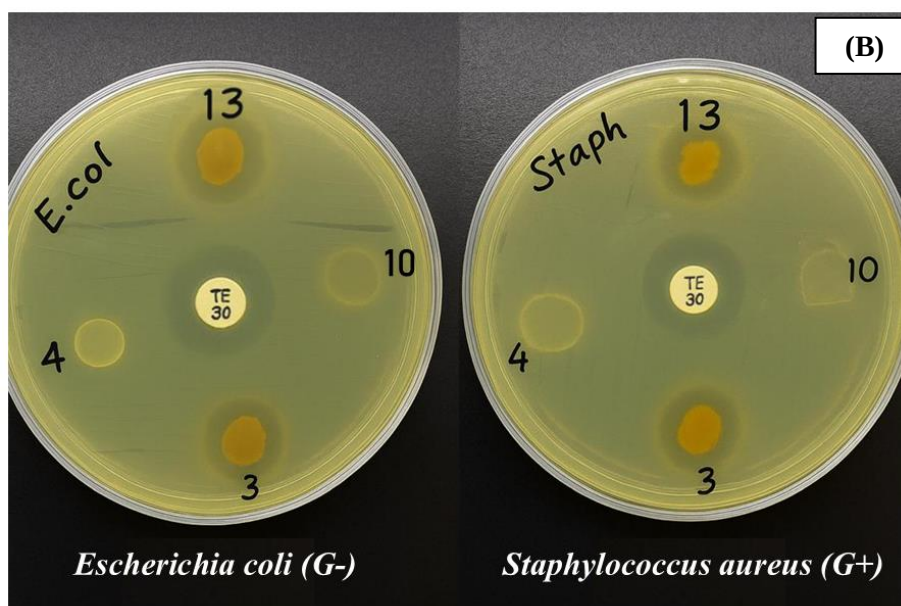
بیشترین اثر مهاری در فیلم ترکیبی مشاهده شد، که در آن، ترکیب زردچوبه و سلینیوم منجر به تقویت قابل‌توجه عملکرد ضدباکتریایی نسبت به فیلم‌های تک‌جزئی شد. این اثر افزایشی صرفاً جمع‌جبری اثرات دو جزء نبوده، بلکه نشانگر یک تعامل هم‌افزای واقعی است (شکل ۳). این پدیده با مطالعه‌ای بر فیلم‌های کامپوزیتی حاوی ZnO و عصاره EEP قابل‌مقایسه است؛ که در آن، ترکیب یک عامل طبیعی و یک ترکیب معدنی، باعث افزایش نفوذپذیری غشای سلولی، القای استرس اکسیداتیو و مهار فعالیت‌های آنزیمی گردید. در سازوکار پیشنهادشده، کورکومین با تضعیف ساختار غشا، ورود سلینیوم را تسهیل می‌کند و، سلینیوم با تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و مهار آنزیم‌های کلیدی، اثربخشی کورکومین را تشدید می‌نماید. در جمع‌بندی، زردچوبه به‌تنهایی اثر مهاری قابل‌توجهی دارد؛ اما، ترکیب آن با سلینیوم، منجر به افزایش معنی‌دار بازدارندگی فیلم شد. این یافته، نقش تعیین‌کننده طراحی هدفمند و مکمل اجزای زیست‌فعال را در توسعه فیلم‌های کارکردی، برای کاربردهای غذایی و پزشکی، برجسته می‌سازد (Mocanu et al., 2019).

آزمون فعالیت ضدباکتریایی

فعالیت ضدباکتریایی فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر تهیه‌شده بر پایه ثعلب در برابر دو گونه شاخص باکتریایی، *Escherichia coli* (گرم‌منفی) و *Staphylococcus aureus* (گرم‌مثبت)، از طریق آزمون دیسک دیفیوژن مورد ارزیابی قرار گرفت. فیلم پایه فاقد هر گونه ترکیب زیست‌فعال بود و مطابق انتظار، هیچ ناحیه مهاری در اطراف دیسک ایجاد نکرد. در مقابل، فیلم حاوی زردچوبه نواحی واضحی از عدم رشد را، به‌ویژه علیه *S. aureus*، ایجاد نمود. این تفاوت به ساختار دیواره سلولی ساده‌تر باکتری‌های گرم‌مثبت نسبت داده می‌شود؛ ساختاری که در آن، فقدان غشای خارجی منجر به نفوذپذیری بالاتر نسبت به ترکیبات فعال، مانند کورکومین، می‌شود. یافته حاضر با مطالعه‌ای بر فیلم‌های خوراکی کاراگینان-پکتین حاوی کورکومین هم‌راستا است؛ جایی که افزایش غلظت کورکومین منجر به گسترش معنی‌دار ناحیه مهاری و اثربخشی بیشتر در برابر باکتری‌های گرم‌مثبت شد (Sultan, Rahman, Dirpan, & Syarifuddin, 2023).

فیلمی که تنها حاوی پودر سلینیوم بود، فاقد هرگونه اثر مهاری بود. این یافته با نتایج حاصل از نانوفیلم‌های نشاسته سیب‌زمینی حاوی نانوذرات سلینیوم مطابقت دارد که نشان دادند اثربخشی ضدباکتریایی سلینیوم وابسته به فرم نانو و نرخ رهایش آن در محیط است

فیلم Film	فعالیت ضد باکتریایی: قطر هاله عدم رشد (میلی متر) Antibacterial activity: Inhibition zone diameter (mm)		فعالیت نسبی در مقایسه با تتراسایکلین Relative activity compared to TE (%)
	اشیریشیا کلی (گرم منفی) <i>Escherichia coli</i> (G-)	استافیلوکوکوس اورئوس (گرم مثبت) <i>Staphylococcus aureus</i> (G+)	
تتراسایکلین TE	15±0.000	14±0.000	100
فیلم ۱۳ K0.4-0.05	12.9±0.36	12.6±1.02	G-: 86.0 G+: 90.0
فیلم ۱۰ 05.K0-0	0±0.00	0±0.00	.
فیلم ۳ K0.4-0	10.5±0.50	10.8±0.72	G-: 70.0 G+: 77.2
فیلم پایه - ۴ K0-0	0±0.00	0±0.00	0



شکل ۳- (A) فعالیت آنتی باکتریال فیلم‌های کامپوزیتی بر پایه پودر ثعلب/زردچوبه و پودر سلنیوم: (B) نواحی بازدارندگی روی پلیت‌های آگار برای نمونه‌های انتخاب شده فیلم

Fig. 3-(A) Antibacterial activity of composite films based on salep powder/turmeric and selenium powder; (B) inhibition zones on agar plates for selected film samples.

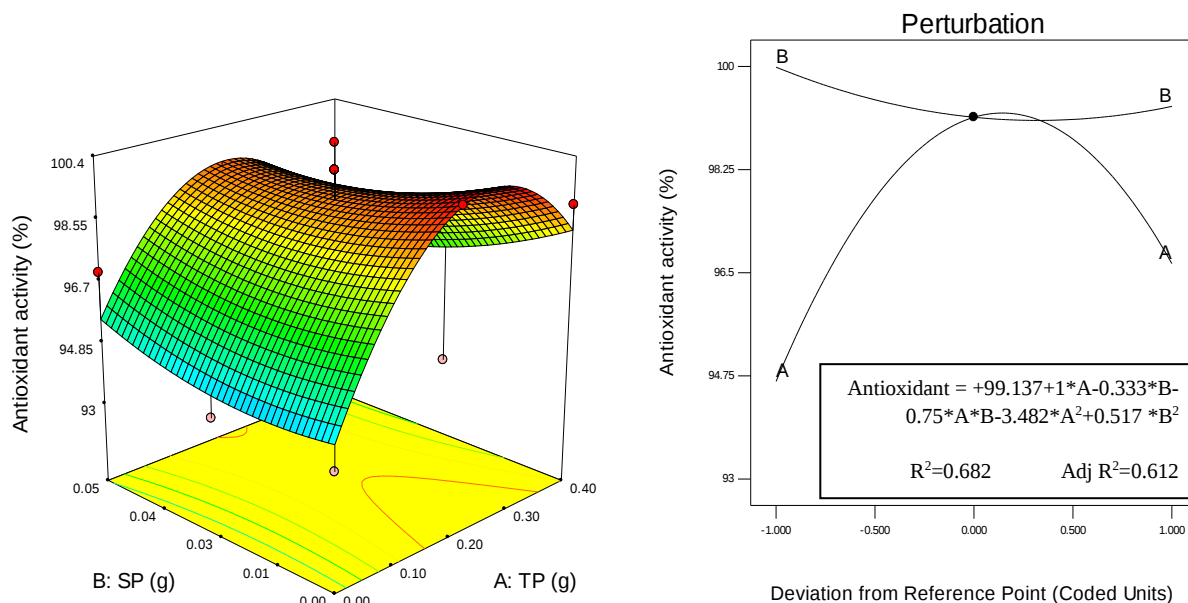
بالا، این روند افزایشی متوقف می‌شود و حتی تا حدی کاهش می‌یابد. چنین رفتاری می‌تواند ناشی از اشیاع ظرفیت آنتی‌اکسیدانی یا بروز آثار منفی در دوزهای زیاد باشد. در خصوص سلنیوم (SP)، هرچند نقش آن در سطوح پایین چندان محسوس نبود، اما با افزایش مقدار، اثر تقویتی و پایدارکننده آن در ترکیب با TP آشکار شد (شکل ۴). این نتیجه با مطالعه لو و همکاران (Lu et al., 2020) نیز هم‌راستا بود که بیشترین مهار رادیکال را در غلظت ۲٪ گزارش کرده است. بر اساس مدل‌سازی و نمودارهای سه‌بعدی، ترکیب بهینه در مقادیر $TP = 0/2$ گرم و

ارزیابی خواص آنتی‌اکسیدانی (DPPH)

آزمون DPPH نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالایی هستند (۹۳ تا ۱۰۰٪). در این میان، پودر زردچوبه (TP) مؤثرترین عامل در افزایش مهار رادیکال‌های آزاد بود و با افزایش مقدار آن، کارایی آنتی‌اکسیدانی نیز به‌وضوح افزایش یافت. این روند مثبت، که با حضور ترکیبات فنولی فعال مانند کورکومین مرتبط است، با گزارش مطالعه جامیان و سوزی‌هاکیو (Suzihaque & Jamian, 2019) نیز مطابقت دارد. با این حال، نتایج مدل نشان داد که در مقادیر

متعادل کننده و تنظیم کننده‌ای در ساختار پاسخ دارد (Suzihaque & Jamian, 2019).

$TP = 0/03$ گرم به دست آمد؛ که بیانگر هم افزایی مؤثر میان ترکیب گیاهی و معدنی است. همچنین نمودار perturbation نیز نشان داد که سیستم به تغییرات TP بسیار حساس تر است، در حالی که SP نقش



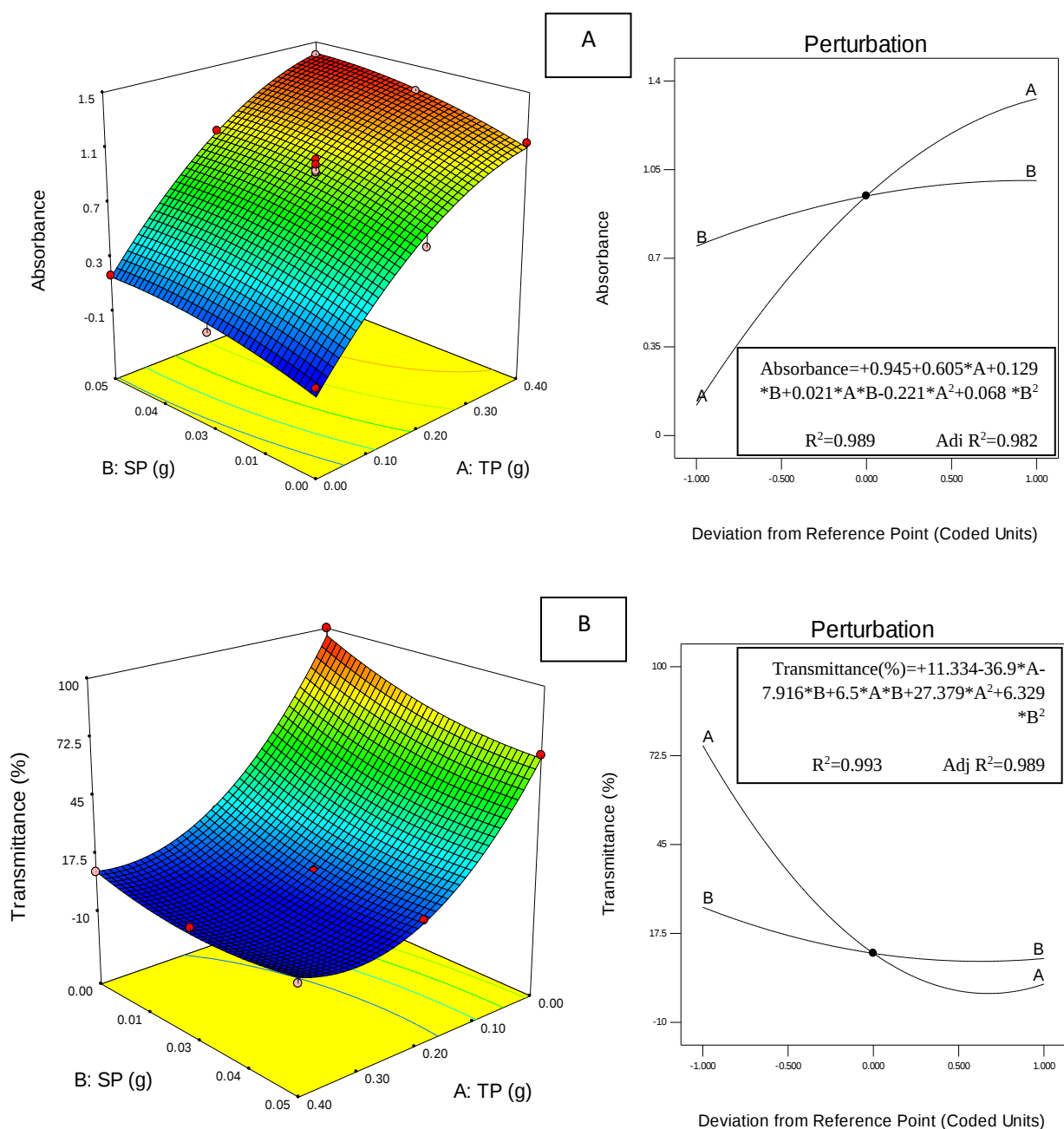
شکل ۴ - نمودارهای سطح پاسخ سه بعدی، منحنی‌های perturbation و مدل ریاضی که رابطه بین غلظت‌های پودر زردچوبه (TP) و پودر سلنیوم (SP) با فعالیت آنتی اکسیدانی DPPH در فیلم‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد

Fig. 4- Three-dimensional response surface plots, perturbation curves and the mathematical model illustrating the relationship between turmeric powder (TP) and selenium powder (SP) concentrations with the DPPH antioxidant activity of the composite films

بررسی عبور نور، نتایج نشان داد که حضور TP موجب کاهش معنادار شفافیت و افزایش تیرگی فیلم‌ها شد. این افت شفافیت ناشی از وجود کورکومین و ساختار آروماتیک مزدوج آن است که جذب بالایی در محدوده مرئی دارد. در حالی که افزودن SP نیز سبب کاهش عبور نور گردید، شدت اثر آن نسبت به TP کمتر بود. ترکیب هم‌زمان TP و SP باعث کاهش عبور نور شد، اما شدت این افت کمتر از حالتی بود که هر یک از اجزا به تنهایی حضور داشتند. این رفتار احتمالاً ناشی از پراکنش متفاوت ذرات و برهم‌کنش‌های فیزیکی میان ترکیبات فعال در ماتریس فیلم است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که TP نقش اصلی را در تقویت جذب نوری و کاهش شفافیت ایفا می‌کند، در حالی که SP به عنوان عامل مکمل، اثر محدود اما قابل توجهی در تغییر ویژگی‌های اپتیکی دارد (شکل ۵). این هم‌افزایی می‌تواند در طراحی فیلم‌های بسته‌بندی فعال با عملکرد محافظتی در برابر نور و پیشگیری از تخریب نوری محصولات غذایی ارزشمند باشد (Van Nong et al., 2016).

آزمون طیف‌سنجی UV-VIS (جذب و عبور نور)

آنالیز طیف‌سنجی UV-Vis و بررسی ویژگی‌های عبور نور فیلم‌های زیست تخریب پذیر نشان داد که افزودن پودر زردچوبه (TP) و سلنیوم (SP) به ماتریس پایه، تغییرات چشمگیری در رفتار نوری نمونه‌ها ایجاد می‌کند. افزایش غلظت TP منجر به افزایش محسوس جذب نوری، به ویژه در ناحیه مرئی و طول موج حدود ۶۰۰ نانومتر شد؛ پدیده‌ای که به حضور کورکومین، به عنوان ترکیب غالب رنگ‌زا با ساختار مزدوج و قابلیت جذب $\pi-\pi^*$ نسبت داده می‌شود. این نتایج با باندهای جذبی گزارش شده برای کورکومین خالص در محدوده ۲۵۰ و ۴۲۷ نانومتر کاملاً هم‌خوانی دارد (Van Nong et al., 2016). بیشترین مقدار جذب در فرمولاسیون حاوی $TP = 0/4$ گرم و $SP = 0/05$ گرم به دست آمد؛ اما با افزایش بیشتر TP، روند افزایش جذب کاهش یافت. این موضوع می‌تواند ناشی از اشباع نوری و تجمع رنگ‌دانه در شبکه پلیمری و در نتیجه کاهش شفافیت فیلم باشد. در



شکل ۵- منحنی‌های سه‌بعدی، perturbation و مدل ریاضی نشان‌دهنده اثر غلظت پودر زردچوبه و پودر سلیوم بر میزان جذب (A) و عبور نوری (B) است

Fig. 5- The three-dimensional curves, perturbation curves, and the mathematical model showing the effect of turmeric powder and selenium powder concentrations on the absorbance (A) and optical transmittance (B)

تصاویر FESEM آشکار ساخت که افزودن زردچوبه و سلیوم تغییرات بارزی در ریزساختار سطحی فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)

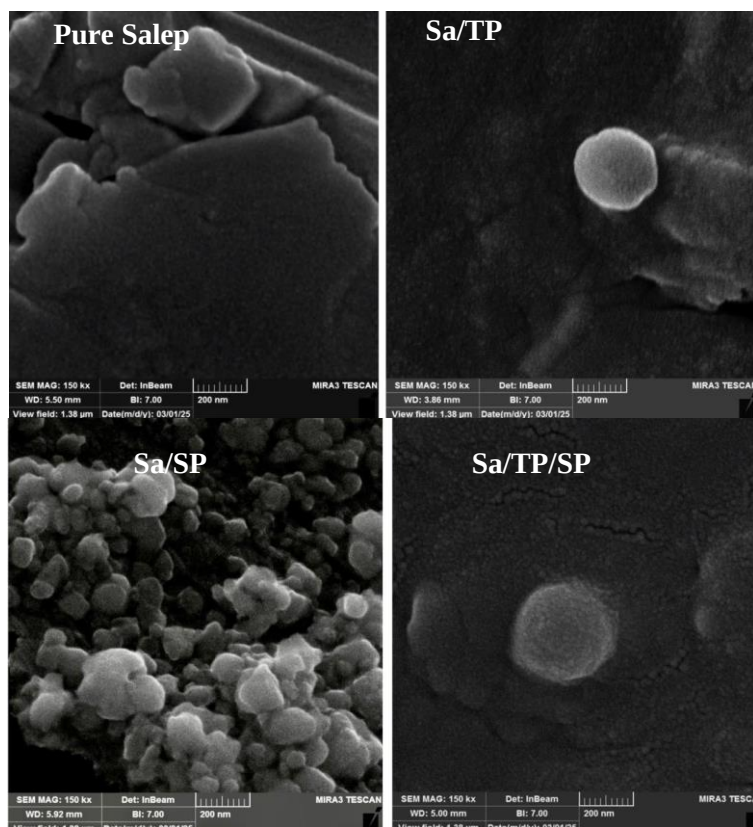
ویژگی‌یابی طیف جذبی UV-Vis عصاره آبی زردچوبه

و شناسایی پیک‌های کورکومینوئیدها

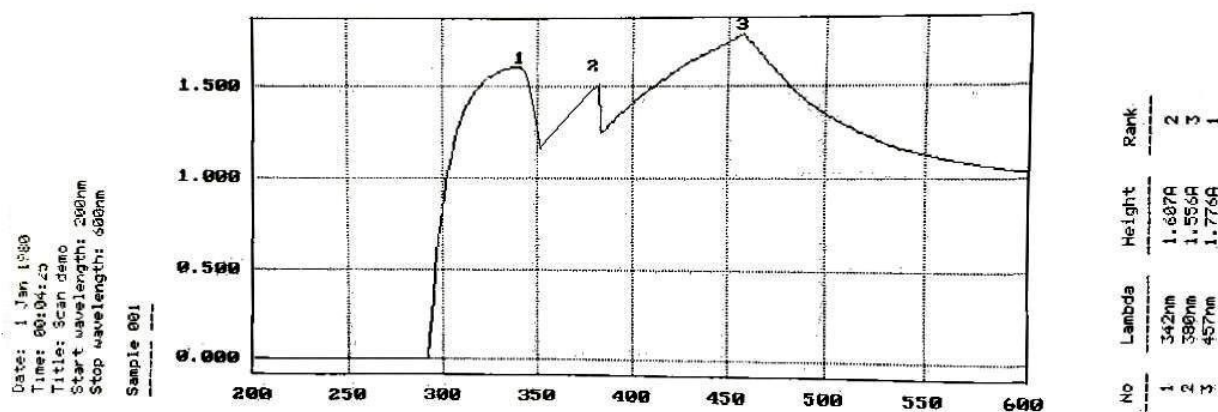
طیف جذبی عصاره آبی زردچوبه سه قله مشخص در طول موج‌های ۳۴۲، ۳۸۰ و ۴۵۷ نانومتر نشان داد. قله نخست در ۳۴۲ نانومتر به حضور ایزومرهای فرعی زردچوبه شامل دمتوکسی کورکومین (DMC) و بیس دمتوکسی کورکومین (BDMC) نسبت داده می‌شود. این جذب در محدوده فرابنفش نزدیک قرار داشته و به انتقال‌های $n-\pi^*$ گروه‌های کربونیل مربوط است. در گزارش‌های پیشین نیز پیک‌های مشابه برای این ایزومرها در بازه ۳۳۰-۳۴۵ نانومتر ذکر شده است (Ghosh & Sarkar, 2024). قله دوم در ۳۸۰ نانومتر به تغییرات تاتومری کورکومین در محیط آبی مربوط است. در این حالت، تعادل بین فرم کتو-انول و دی‌کتو باعث ایجاد جذب میانی در محدوده ۳۷۰-۳۹۰ نانومتر می‌شود که پیش‌تر نیز برای کورکومین در محیط‌های قطبی گزارش شده است. چنین برهم‌کنش‌هایی ناشی از تشکیل پیوند هیدروژنی میان گروه‌های عاملی کورکومین و مولکول‌های آب است که موجب پایداری بیشتر فرم دی‌کتو در محلول‌های آبی می‌گردد (Ghosh & Sarkar, 2024).

قله سوم و اصلی در ۴۵۷ نانومتر مشاهده شد که به کورکومین (Curcumin) نسبت داده می‌شود. این پیک ناشی از انتقال‌های $\pi-\pi^*$ در سیستم کونژوگه گسترده کورکومین است و عامل اصلی رنگ زرد-نارنجی مشخص زردچوبه محسوب می‌شود. بیشینه جذب کورکومین در مطالعات قبلی معمولاً در بازه ۴۲۰-۴۳۵ نانومتر در حلال‌های آلی گزارش شده است. بنابراین، جابه‌جایی این قله به ۴۵۷ نانومتر در محیط آبی را می‌توان به اثر قطبیت بالای آب و تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی با گروه‌های کربونیل و هیدروکسیل کورکومین نسبت داد (شکل ۷). مقایسه نتایج حاضر با داده‌های پیشین نشان می‌دهد که هر سه قله شناسایی شده (۳۴۲، ۳۸۰ و ۴۵۷ نانومتر) بیانگر حضور همزمان کورکومین و ایزومرهای اصلی آن در عصاره آبی زردچوبه هستند (Safie et al., 2015; Kazantzis et al., 2020).

ثعلب ایجاد می‌کند. در نمونه شاهد، سطح فیلم بافتی صاف، متراکم و یکنواخت داشت. این رفتار با گزارش‌های مربوط به فیلم‌های خالص تراگانانت مشابه است که به دلیل نظم مولکولی زنجیره‌های پلی‌ساکاریدی و توانایی بالای آن‌ها در تشکیل فیلم‌های پایدار رخ می‌دهد (Dobrucka et al., 2025). در فیلم حاوی زردچوبه، ریزساختار سطحی حالت لایه‌ای و پیوسته پیدا کرد که بیانگر پراکندگی یکنواخت کورکومین در ماتریس ثعلب است. این الگو با یافته‌های و همکاران (Liu et al., 2022) و ژو و همکاران (Xu et al., 2021) مطابقت دارد؛ آن‌ها گزارش کردند توزیع یکنواخت کورکومین در پلیمرهای زیستی منجر به افزایش همگنی سطحی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی می‌شود. همچنین این محققان نشان دادند که در شرایط غلظتی کنترل شده، کورکومین قادر است ساختاری پایدار با زبری حداقلی ایجاد نماید (Liu et al., 2022; Xu et al., 2021). نمونه غنی شده با سلیوم، برخلاف دو مورد قبل، دارای خوشه‌های متراکم با اشکال نامنظم و ابعاد بزرگ بود. این پدیده نشان‌دهنده وقوع آگلومراسیون و ناسازگاری بین ذرات سلیوم و ماتریس پلیمری است؛ الگویی مشابه گزارش لو و همکاران (Lu et al., 2020) در فیلم‌های PLA/SeMP که در آن با افزایش غلظت SeMP، زبری سطح افزایش یافته و خوشه‌های نامنظم شکل گرفتند. این امر می‌تواند سبب تجمعات درشت و توزیع ناهمگن شود. در فیلم ترکیبی حاوی هر دو افزودنی، سطحی متشکل از نواحی دانه‌ای و لایه‌ای مشاهده شد که خوشه‌های کوچک‌تری نسبت به نمونه سلیوم خالص داشت. این تغییر نشان‌دهنده تعاملات بین‌فازی مطلوب میان کورکومین و سلیوم است که مانع تجمع بیش‌ازحد ذرات می‌شود و ساختاری یکنواخت‌تر و پایدارتر را فراهم می‌آورد. به‌طور کلی، زردچوبه موجب بهبود یکنواختی و کاهش زبری سطح گردید، در حالی که سلیوم به‌تنهایی ساختاری خشن و توده‌ای ایجاد کرد. با این حال، ترکیب همزمان آن‌ها اثرات منفی ناشی از آگلومراسیون سلیوم را خنثی کرده و سطحی همگن‌تر به وجود آورد (شکل ۶). چنین نتایجی نشان می‌دهد که اصلاح مورفولوژی سطحی از طریق کنترل دقیق نوع و ترکیب افزودنی‌ها می‌تواند نقش کلیدی در ارتقای خواص عملکردی فیلم‌ها داشته باشد؛ ویژگی‌ای که اهمیت ویژه‌ای برای توسعه سامانه‌های نوین بسته‌بندی زیست تخریب‌پذیر به همراه دارد (Lu et al., 2020).



شکل ۶- تصاویر FESEM سطح فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پودر ثعلب و کامپوزیت‌های مختلف آن
Fig. 6- FESEM images of the surface of biodegradable films based on salep powder and their various composites



شکل ۷- طیف UV-Vis عصاره آبی زردچوبه که دارای سه قله متمایز در طول موج‌های ۳۴۲، ۳۸۰ و ۴۵۷ نانومتر است
این قله‌ها به ترتیب با ایزومرهای جزئی DMC و BDMC، تعادل تائومری کورکومین در محیط آبی، و قله اصلی کورکومین مرتبط‌اند.

Fig. 7-UV-Vis spectrum of the aqueous turmeric extract with three distinct peaks at 342, 380, and 457 nm
Corresponding to minor isomers (DMC and BDMC), tautomeric equilibrium of curcumin in aqueous medium, and the main curcumin peak, respectively.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با تمرکز بر توسعه فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پودر ثعلب و تقویت آن با پودر زردچوبه و سلیوم نشان داد که

می‌توان از هم‌افزایی میان ترکیبات گیاهی و معدنی برای ایجاد بسته‌بندی‌های فعال و سازگار با محیط‌زیست بهره برد. نتایج حاکی از آن بود که زردچوبه به‌واسطه حضور کورکومین نقش اصلی را در بهبود

ردپای کربنی و مدیریت بهتر پسماندهای پلاستیکی خواهد شد، بلکه نقشی کلیدی در تحقق اهداف توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی ایفا می‌نماید. پژوهش‌های آتی می‌توانند با تمرکز بر بهینه‌سازی فرایندها، بررسی پایداری در شرایط واقعی و توسعه فناوری‌های مقیاس‌پذیر، مسیر تجاری‌سازی این بسته‌بندی‌های نوین را تسهیل کنند.

مشارکت نویسندگان

سمیه منصوریار: تحقیق و بررسی، نوشتن-پیش‌نویس اصلی، مفهوم‌سازی، تحلیل رسمی. **سجاد پیرسا:** مدیریت داده‌ها، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، نرم‌افزار، نوشتن-بررسی و ویرایش. **میرخلیل پیروزی فرد:** نظارت.

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرد.

سپاسگزاری

از تمام افرادی که به نحوی در انجام این پژوهش نقشی داشته‌اند سپاسگزارم.

ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی، ضدباکتریایی و بصری ایفا می‌کند؛ در حالی که سلیوم اگرچه به‌تنهایی اثربخشی محدودی داشت، اما در ترکیب با زردچوبه موجب افزایش قابل‌توجه کارایی فیلم شد. این هم‌افزایی به‌ویژه در ارتقای فعالیت ضدباکتریایی و پایداری ساختاری آشکار بود. یافته‌های این پژوهش نشان داد که اصلاح ویژگی‌های نوری و ریزساختاری فیلم‌های زیستی از طریق انتخاب دقیق افزودنی‌ها امکان‌پذیر است و می‌تواند منجر به طراحی بسته‌بندی‌هایی شود که همزمان خواص محافظتی، عملکردی و زیباشناختی را فراهم کنند. به‌طور خاص، کاهش شفافیت و افزایش جذب نوری در حضور زردچوبه و سلیوم، قابلیت این فیلم‌ها را برای محافظت از مواد غذایی حساس به نور افزایش داد. از دیدگاه زیست‌محیطی، این رویکرد می‌تواند جایگزین مؤثری برای پلاستیک‌های سنتزی در صنایع غذایی باشد و با کاهش تولید زباله‌های غیرقابل‌تجزیه و اثرات مخرب میکروپلاستیک‌ها، به حفظ سلامت اکوسیستم‌ها کمک کند. افزون بر این، امکان افزودن ترکیبات زیست‌فعال به فیلم‌ها نه تنها ارزش افزوده عملکردی ایجاد می‌کند، بلکه مسیر توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند و عملکردی در صنایع غذایی و دارویی را نیز هموار می‌سازد. در نهایت، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بهره‌گیری از پلیمرهای طبیعی نظیر ثعلب همراه با افزودنی‌های گیاهی و معدنی می‌تواند پایه‌گذار نسل جدیدی از سامانه‌های بسته‌بندی پایدار و سازگار با محیط‌زیست باشد. گسترش این رویکرد در مقیاس صنعتی نه تنها موجب کاهش

References

- Agarwal, A., Shaida, B., Rastogi, M., & Singh, N.B. (2023). Food packaging materials with special reference to biopolymers-Properties and applications. *Chemistry Africa*, 6, 117–144. <https://doi.org/10.1007/s42250-022-00446-w>
- Akter, J., Hossain, M.A., Takara, K., Islam, M.Z., & Hou, D.X. (2019). Antioxidant activity of different species and varieties of turmeric (*Curcuma* spp.): Isolation of active compounds. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 215, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2018.09.002>
- Babaremu, K., Oladijo, O.P., & Akinlabi, E. (2023). Biopolymers: A suitable replacement for plastics in product packaging. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6, 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.01.001>
- Barbosa, C.H., Andrade, M.A., Vilarinho, F., Fernando, A.L., & Silva, A.S. (2021). Active edible packaging. *Encyclopedia*, 1, 360–370. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1020030>
- Dey, S., Veerendra, G.T.N., Babu, P.S.S.A., Manoj, A.V.P., & Nagarjuna, K. (2024). Degradation of plastics waste and its effects on biological ecosystems: A scientific analysis and comprehensive review. *Biomedical Materials and Devices*, 2, 70–112. <https://doi.org/10.1007/s44174-023-00085-w>
- Dobrucka, R., Vapenka, L., Szymański, M., Pawlik, M., Lasik-Kurdyś, M., & Gumienna, M. (2025). Bio-packaging based on pectin/tragacanth gum with added extracts of cherry waste from the wine industry as a new generation of active films for the food industry. *Foods*, 14, 2203. <https://doi.org/10.3390/foods14132203>
- Ekrami, M., & Emam-Djomeh, Z. (2014). Water vapor permeability, optical and mechanical properties of salep-based edible film. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38, 1812–1820. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12152>
- Elliott, C., & Truman, E. (2020). The power of packaging: A scoping review and assessment of child-targeted food packaging. *Nutrients*, 12(4), 958. <https://doi.org/10.3390/nu12040958>
- Enyoh, C.E., Devi, A., Kadono, H., Wang, Q., & Rabin, M.H. (2023). The plastic within: Microplastics invading human organs and bodily fluids systems. *Environments*, 10, 194. <https://doi.org/10.3390/environments10110194>

10. Fakhouri, F.M., Martelli, S.M., Caon, T., Velasco, J.I., & Mei, L.H. (2015). Edible films and coatings based on starch/gelatin: Films properties and effect of coatings on quality of refrigerated Red Crissom grapes. *Postharvest Biology Technology*, 109, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.05.015>
11. Ghosh, M., & Sarkar, N. (2024). Exploring the world of curcumin: Photophysics, photochemistry, and applications in nanoscience and biology. *ChemBioChem*, 25(13), e202400335. <https://doi.org/10.1002/cbic.202400335>
12. Ghosh, S., Sinha, J.K., Ghosh, S., Vashisth, K., Han, S., & Bhaskar, R. (2023). Microplastics as an emerging threat to the global environment and human health. *Sustainability*, 15, 10821. <https://doi.org/10.3390/su151410821>
13. Hussain, Z., Thu, H.E., Amjad, M.W., Hussain, F., Ahmed, T.A., & Khan, S. (2017). Exploring recent developments to improve antioxidant, anti-inflammatory and antimicrobial efficacy of curcumin: A review of new trends and future perspectives. *Materials Science and Engineering: C*, 77, 1316–1326. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.226>
14. International Institute for Sustainable Development. (2023, January 12). Global plastic outlook calls for more circularity, national roadmaps. IISD SDG Knowledge Hub. <https://sdg.iisd.org/news/global-plastic-outlook-calls-for-more-circularity-national-roadmaps>
15. Karimi Sani, I., Masoudpour-Behabadi, M., Alizadeh Sani, M., Motalebinejad, H., Juma, A.S.M., Asdaghi, A., Eghbaljoo, H., Khodaei, S.M., Rhim, J.-W., & Mohammadi, F. (2023). Value-added utilization of fruit and vegetable processing by-products for the manufacture of biodegradable food packaging films. *Food Chemistry*, 405, 134964. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134964>
16. Kazantzis, K.T., Koutsonikoli, K., Mavroidi, B., Zachariadis, M., Alexiou, P., Pelecanou, M., Politopoulos, K., Alexandratou, E., & Sagnou, M. (2020). Curcumin derivatives as photosensitizers in photodynamic therapy: Photophysical properties and in vitro studies with prostate cancer cells. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 19(2), 193–206. <https://doi.org/10.1039/c9pp00375d>
17. Khalid, M.Y., & Arif, Z.U. (2022). Novel biopolymer-based sustainable composites for food packaging applications: A narrative review. *Food Packag. Shelf Life*, 33, 100892. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100892>
18. Kibria, M.G., Masuk, N.I., Safayet, R., Nguyen, H.Q., & Mourshed, M. (2023). Plastic waste: Challenges and opportunities to mitigate pollution and effective management. *International Journal of Environmental Research*, 17, 20. <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00507-z>
19. Krantzberg, G. (2019). Plastic pollution in the Great Lakes and marine waters: Sources, effects and policy responses. *Journal of Waste Resources and Recycling*, 1(1), 107.
20. Kumar, R., Verma, A., Shome, A., Sinha, R., Sinha, S., Jha, P.K., Kumar, R., Kumar, P., Shubham, Das, S., & et al. (2021). Impacts of plastic pollution on ecosystem services, sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions. *Sustainability*, 13(18), 9963. <https://doi.org/10.3390/su13179963>
21. Kumar, G., Vyas, S., Sharma, S.N., & Dehalwar, K. (2024). Challenges of environmental health in waste management for peri-urban areas. In M. Nasr & A. Negm (Eds.), *Solid waste management* (pp. 149–168). Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland. ISBN 978-3-031-60683-0. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60684-7_9
22. Liu, Y., Ma, Y., Liu, Y., Zhang, J., Hossen, M.A., Sameen, D.E., Dai, J., Li, S., & Qin, W. (2022). Fabrication and characterization of pH-responsive intelligent films based on carboxymethyl cellulose and gelatin/curcumin/chitosan hybrid microcapsules for pork quality monitoring. *Food Hydrocolloids*, 124, 107224. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107224>
23. Lu, R., Sameen, D.E., Qin, W., Wu, D., Dai, J., Li, S., & Liu, Y. (2020). Development of polylactic acid films with selenium microparticles and its application for food packaging. Published March 18, 2020. <https://doi.org/10.3390/coatings10030280>
24. Mocanu, A., Isopencu, G., Busuioc, C., Popa, O.-M., Dietrich, P., & Socaciu-Siebert, L. (2019). Bacterial cellulose films with ZnO nanoparticles and propolis extracts: Synergistic antimicrobial effect. *Scientific Reports*, 9(1), 17687. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54118-w>
25. Ncube, L. K., Ude, A.U., Ogunmuyiwa, E.N., Zulkifli, R., & Beas, I.N. (2021). An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries. *Recycling*, 6(1), 12. <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>
26. Ndwandwe, B.K., Malinga, S.P., Kayitesi, E., & Dlamini, B.C. (2022). Selenium nanoparticles-enhanced potato starch film for active food packaging application. *International Journal of Food Science & Technology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15990>
27. OECD. (2023). Plastic leakage and greenhouse gas emissions are increasing. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org/environment/plastics/increased-plastic-leakage-and-greenhouse-gas-emissions>. <https://doi.org/10.1787/d125c929-en>

28. Osés, S.M., Pascual-Maté, A., de la Fuente, D., de Pablo, A., Fernández-Muiño, M.A., & Sancho, M.T. (2016). Comparison of methods to determine antibacterial activity of honeys against *Staphylococcus aureus*. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*, 78, 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2015.12.005>
29. Pirsá, S., & Mohammadi, B. (2021). Conducting/biodegradable chitosan–polyaniline film; antioxidant, color, solubility and water vapor permeability properties. *Main Group Chemistry*, 20(2), 133–147. <https://doi.org/10.3233/mgc-210007>
30. Rachtanapun, P., Klunklin, W., Jantrawut, P., Jantanasakulwong, K., Phimolsiripol, Y., Seesuriyachan, P., Leksawasdi, N., Chaiyaso, T., Ruksiriwanich, W., Phongthai, S., et al. (2021). Characterization of chitosan film incorporated with curcumin extract. *Polymers*, 13, 963. <https://doi.org/10.3390/polym13060963>
31. Ramos, Ó.L., Reinas, I., Silva, S.I., Fernandes, J.C., Cerqueira, M.A., Pereira, R.N., & Malcata, F.X. (2013). Effect of whey protein purity and glycerol content upon physical properties of edible films manufactured therefrom. *Food Hydrocolloids*, 30, 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.001>
32. Ribeiro, A.M., Estevinho, B.N., & Rocha, F. (2021). Preparation and incorporation of functional ingredients in edible films and coatings. *Food Bioprocess Technology*, 14, 209–231. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02528-4>
33. Safie, N.E., Ludin, N.A., Su'ait, M.S., Hamid, N.H., Sepeai, S., Ibrahim, M.A., & Teridi, M.A.M. (2015). Preliminary study of natural pigments photochemical properties of *Curcuma longa* L. and *Lawsonia inermis* L. as TiO₂ photoelectrode sensitizer. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 19(6), 1243–1249.
34. Sharma, S., Jaiswal, A.K., Duffy, B., & Jaiswal, S. (2020). Ferulic acid incorporated active films based on poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100491>
35. Sharma, S., Sharma, V., & Chatterjee, S. (2023). Contribution of plastic and microplastic to global climate change and their conjoining impacts on the environment—A review. *Science Total Environment*, 875, 162627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162627>
36. Sultan, R.A., Rahman, A.N.F., Dirpan, A., & Syarifuddin, A. (2023). Physical, mechanical barrier, antibacterial properties, and functional group of carrageenan-based edible film as influenced by pectin from *Dillenia serrata* fruit peel and curcumin. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 11(3), 1308–1321. <https://doi.org/10.12944/crnfsj.11.3.32>
37. Suzihaque, M., & Jamian, A.S. (2019). Development of intelligent food packaging from turmeric (*Curcuma longa*). *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. <https://doi.org/10.35940/ijeat.a3037.109119>
38. Tan, H., Yue, T., Xu, Y., Zhao, J., & Xing, B. (2020). Microplastics reduce lipid digestion in simulated human gastrointestinal system. *Environment Science Technology*, 54, 12285–12294. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02608>
39. Van Nong, H., Hung, L.X., Thang, P. N., Chinh, V.D., Vu, L.V., Dung, P.T., Van Trung, T., & Nga, P.T. (2016). Fabrication and vibration characterization of curcumin extracted from turmeric (*Curcuma longa*) rhizomes of the northern Vietnam. *SpringerPlus*, 5, 1147. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2812-2>
40. Walker, T.R., & Fequet, L. (2023). Current trends of unsustainable plastic production and micro(nano)plastic pollution. *TrAC Trends Anal. Chemistry*, 160, 116984. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116984>
41. Wakte, P.S., Sachin, B., Patil, A., Mohato, D., Band, T., & Shinde, D. (2011). Optimization of microwave, ultrasonic and supercritical carbon dioxide assisted extraction techniques for curcumin from *Curcuma longa*. *Separation and Purification Technology*, 79, 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.03.010>
42. Xu, Y., Liu, X., Jiang, Q., Yu, D., Xu, Y., Wang, B., & Xia, W. (2021). Development and properties of bacterial cellulose, curcumin, and chitosan composite biodegradable films for active packaging materials. *Carbohydrate Polymers*, 260, 117778. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117778>
43. Yu, Z., Alsammarraie, F.K., Nayigiziki, F.X., Wang, W., Vardhanabhuti, B., Mustapha, A., & Lin, M. (2017). Effect and mechanism of cellulose nanofibrils on the active functions of biopolymer-based nanocomposite films. *Food Research International*, 99, 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.05.009>