

بررسی خواص زیستی پوست پسته و کاربرد فناوری نانو در تولید محصولات آرایشی

نسترن مرزبان پناه ماکلوانی^۱، سعید کریمی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: nastaran.marzban@ut.ac.ir

۲. استادیار گروه مدیریت، برنامه‌ریزی و آموزش محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: karimis@ut.ac.ir

تاریخ تصویب: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

چکیده

رشد سریع جمعیت و فشار اقتصادی، نیاز به مدیریت بهینه منابع طبیعی و انسانی را برای دستیابی به توسعه پایدار افزایش داده است. در این راستا، پسماندهای کشاورزی به‌عنوان منابع بالقوه اقتصادی و محیط‌زیستی مطرح هستند. ایران، یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان پسته در جهان است که با حجم زیادی از پسماند پوست پسته مواجه بوده و مدیریت نادرست آن به مشکلات محیط‌زیستی و اقتصادی منجر شده است. این در حالی است که پوست پسته حاوی ترکیبات باارزش زیستی مانند پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها و آنتی‌اکسیدان‌هاست که خواص ضدالتهابی، ضدباکتریایی و آنتی‌اکسیدانی دارند و قابلیت بالایی برای کاربرد در صنایع دارویی، آرایشی و غذایی دارند. بررسی تجربیات جهانی کشورهای همچون هند و چین در بهره‌برداری از پسماندهای کشاورزی نشان می‌دهد که این پسماندها می‌توانند به منابع اقتصادی پایدار تبدیل شوند. با این حال، در ایران هنوز کاربرد صنعتی پوست پسته به‌طور گسترده بررسی نشده است. این تحقیق با مرور جامع بر مطالعات قبلی، روش‌های مدرن استخراج ترکیبات فعال از پوست پسته از جمله استفاده از سیالات فوق‌بحرانی و مایکروویو را تحلیل نموده و پتانسیل کاربرد این ترکیبات را در تولید محصولات دارویی و آرایشی بررسی می‌کند. همچنین، ایده‌ای نوین مبتنی بر فناوری نانو جهت تولید محصولات آرایشی ارگانیک و زیست‌سازگار از این پسماند ارائه می‌دهد. این رویکرد علاوه بر کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی، با بهره‌گیری از فناوری پیشرفته، امکان دستیابی به بازاری سودآور در سطح ملی و بین‌المللی را فراهم می‌کند و یک راهبرد مؤثر در جهت توسعه پایدار به شمار می‌رود.

کلیدواژه‌ها: پسته، ضایعات، پلی‌فنل‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها، فناوری نانو



سرآغاز

(Bonaccio et al., 2015; Bulló et al., 2015; Mandalari et al., 2022a).

تاکنون، مطالعات مختلفی در سطح جهانی در زمینه بهره‌برداری از پسماندهای کشاورزی انجام شده است. به‌عنوان مثال، کشورهای نظیر هند و چین به موفقیت‌هایی در زمینه استفاده از پسماندهای میوه‌ای مانند پوست انبه و پوست کیوی دست یافته‌اند. در هند، از پوست انبه برای تولید محصولات غذایی، دارویی و حتی رنگ‌های طبیعی استفاده شده است. در چین، پوست کیوی به‌عنوان یک منبع غنی از آنتی‌اکسیدان‌ها و مواد مغذی در تولید مکمل‌های غذایی و محصولات دارویی به کار گرفته شده است. این تجربه‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای پسماندهای کشاورزی در صنایع مختلف هستند و نمونه‌ای موفق از اقتصاد چرخشی و مدیریت هوشمندانه پسماندها به شمار می‌آیند (Jain & Sankaran, 2024a; Rather et al., 2023a).

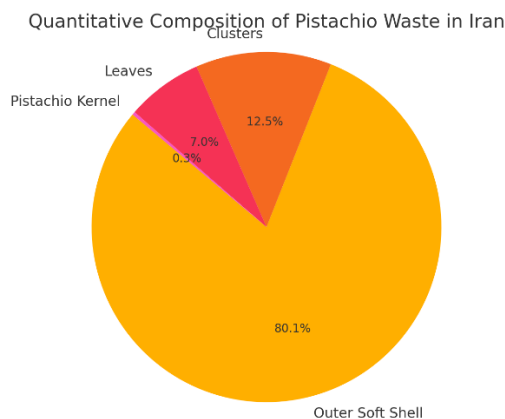
با وجود این، در ایران هنوز اقدامات گسترده‌ای برای بهره‌برداری از پسماندهای پوست پسته صورت نگرفته است. اگر چه برخی مطالعات آزمایشگاهی خواص زیستی و دارویی این پسماند را تأیید کرده‌اند، اما کاربردهای عملی و صنعتی آن به طور گسترده بررسی نشده است. این مسئله نه تنها به معنای از دست رفتن فرصت‌های اقتصادی است، بلکه به ادامه روند آلودگی محیط‌زیستی نیز منجر می‌شود؛ بنابراین، ضرورت دارد که مطالعات بیشتری در این زمینه انجام شود تا روش‌های بهینه برای استخراج و بهره‌برداری از این ترکیبات ارزشمند شناسایی و به کار گرفته شود (Jain & Sankaran, 2024b).

ایران بزرگ‌ترین تولیدکننده پسته در جهان بوده و حدود ۵۲ درصد از تولید جهانی پسته را به خود اختصاص داده است. وسعت باغات پسته در ایران به بیش از ۴۳۰ هزار هکتار می‌رسد که بخش عمده آن (بیش از ۸۷ درصد) در استان کرمان واقع شده است. طبق مطالعات صورت گرفته، از هر ۵/۲ کیلوگرم پسته تر برداشت شده، یک کیلوگرم دانه خشک پسته به همراه ۳۱۱ تا ۳۲۰ گرم بقایای خشک به دست می‌آید. این امر موجب می‌شود تا سالانه از حدود ۲۰۰ هزار تن پسته تر تولیدی کشور، بیش از ۱۳۵ هزار تن انواع پسماند حاصل گردد که بخش عمده آن (حدود ۸۳ درصد) را پوسته نرم خارجی تشکیل می‌دهد (Balist et al., 2021).

رشد سریع جمعیت و اقتصاد، فشار مضاعفی بر منابع طبیعی وارد کرده و نیاز به توسعه پایدار را، که دربردارنده استفاده بهینه از منابع انسانی و طبیعی است، برجسته‌تر می‌سازد. توجه به عملکرد پایدار و مدیریت منابع، همانند مدیریت صحیح منابع انسانی، از عوامل کلیدی در تداوم توسعه و بهره‌برداری بهینه برای رشد پایدار در جهان امروز به شمار می‌آید. (شفیعی و همکاران، ۱۴۰۲) پسماندهای کشاورزی یکی از اصلی‌ترین منابع آلودگی محیط‌زیست به شمار می‌روند که مدیریت نامناسب آن‌ها می‌تواند به مشکلات محیط‌زیستی و اقتصادی بزرگی منجر شود. در بسیاری از کشورها، از جمله ایران که یکی از قطب‌های اصلی تولید محصولات کشاورزی در جهان است، پسماندهای کشاورزی به میزان قابل توجهی تولید می‌شوند. یکی از این پسماندها، پوست پسته است که به‌عنوان ضایعاتی از فراوری محصول پسته در حجم بسیار زیادی تولید می‌شود. ایران به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان پسته در جهان، سالانه با مقادیر عظیمی از پسماند پوست پسته روبه‌روست که اغلب به‌عنوان زباله دور ریخته می‌شود. این مسئله نه تنها مشکلات محیط‌زیستی جدی مانند آلودگی آب‌و‌خاک به همراه دارد، بلکه منجر به از دست رفتن یک منبع ارزشمند می‌شود که در صورت بهره‌برداری مناسب، می‌تواند به یک منبع اقتصادی و پایدار تبدیل شود (Toghiani et al., 2023a).

منابع انسانی توانمند و خلاق به‌عنوان ارزشمندترین دارایی استراتژیک سازمان، نقش اساسی در توسعه و بهره‌برداری بهینه از سایر منابع و افزایش رشد اقتصادی ایفا می‌کنند و نیازمند مدیریت صحیح و بهینه هستند (حسینی و همکاران، ۱۴۰۳). با افزایش توجه جهانی به مدیریت پایدار منابع طبیعی و توسعه اقتصاد چرخشی، محققان و فعالان صنعت کشاورزی به دنبال راه‌حل‌های نوآورانه‌ای برای بهره‌برداری از پسماندهای کشاورزی هستند. در این میان، پسماندهای پسته به دلیل دارا بودن ترکیبات شیمیایی باارزش، از جمله پلی‌فنول‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها، و فلاونوئیدها، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این ترکیبات به دلیل خواص زیستی خود مانند اثرات ضدالتهابی، ضدباکتریایی، و آنتی‌اکسیدانی، پتانسیل بالایی برای استفاده در صنایع مختلف دارویی، آرایشی و حتی غذایی دارند. در واقع، این مواد می‌توانند به‌عنوان جایگزین‌های طبیعی برای ترکیبات شیمیایی مصنوعی در محصولات دارویی و بهداشتی مورد استفاده قرار گیرند

در این مقاله، مروری جامع بر تحقیقات انجام شده در زمینه خواص زیستی و دارویی پوست پسته صورت خواهد گرفت. این مرور به شناسایی ترکیبات فعال زیستی موجود در پوست پسته، از جمله پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها، آنتی‌اکسیدان‌ها، و سایر مواد شیمیایی مفید می‌پردازد که نقش کلیدی در اثربخشی زیستی این پسماند دارند. همچنین، مطالعات قبلی درباره اثرات ضدالتهابی، ضدباکتریایی و آنتی‌اکسیدانی این ترکیبات مرور خواهد شد تا پتانسیل‌های واقعی آن‌ها در صنایع مختلف به‌ویژه صنایع دارویی و بهداشتی مشخص شود (Ripari Garrido et al., 2024).



نمودار (۱): ترکیب کمی ضایعات پسته در ایران



شکل (۱): نقشه پراکنش کشورهای برتر تولیدکننده پسته جهان در سال ۲۰۱۹ (Tridge, 2021)

داخلی ایران بهره برد (Pai et al., 2022a). در بخش نهایی مقاله، ایده‌ای نوین برای توسعه بیشتر این حوزه و بهبود فرایند تجاری‌سازی محصولات حاصل از پوست پسته ارائه خواهد شد. این ایده بر اساس تحلیل شکاف‌های موجود در مطالعات فعلی و بررسی چالش‌های اقتصادی و محیط‌زیستی مرتبط با فراوری و استفاده از پسماندهای کشاورزی شکل خواهد گرفت.

همچنین، استراتژی‌هایی برای بهبود زیرساخت‌های مرتبط با مدیریت پسماند، تسهیل فرایندهای استخراج و پردازش، و ایجاد بازارهای جدید برای محصولات حاصل از پوست پسته در صنایع داخلی و خارجی پیشنهاد خواهد شد (Toghiani et al., 2023b).

روش تحقیق

این تحقیق به بررسی خواص زیستی و دارویی پوست پسته و روش‌های استخراج ترکیبات فعال از آن می‌پردازد. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل مقالات علمی و بررسی مطالعات انجام شده

علاوه بر بررسی ویژگی‌های زیستی پوست پسته، روش‌های استخراج این ترکیبات از پسماند نیز بررسی می‌شود. در این بخش، فناوری‌های مدرن و نوآورانه که در استخراج مواد فعال زیستی از پوست پسته به کار رفته‌اند، مورد تحلیل قرار خواهند گرفت. این روش‌ها شامل استخراج با حلال‌های طبیعی، استخراج با فشار بالا، و روش‌های پیشرفته مانند استفاده از سیالات فوق‌بحرانی هستند که هم از نظر کارایی استخراج و هم از لحاظ کاهش آسیب‌های محیط‌زیستی، اهمیت دارند (Fraguela-Meissimilly et al., 2023a).

در ادامه، تمرکز مقاله بر این خواهد بود که چگونه این ترکیبات زیستی استخراج شده می‌توانند به طور عملی در صنایع دارویی و آرایشی به کار گرفته شوند. کاربردهای بالقوه این ترکیبات در تولید داروهای ضدالتهاب طبیعی، محصولات ضدباکتریایی، و محصولات آرایشی با خواص محافظت از پوست بررسی خواهند شد. علاوه بر این، به نمونه‌هایی از محصولات موفق که در سایر کشورها با استفاده از پسماندهای مشابه تولید شده‌اند اشاره خواهد شد تا نشان دهد چگونه می‌توان از این تجربه‌ها برای توسعه بازار

یکی دیگر از جنبه‌های مهم این تحقیق، بررسی کاربردهای عملی و صنعتی این ترکیبات است. مقالات مورد بررسی، به ما نشان می‌دهند که پوست پسته می‌تواند به‌عنوان یک منبع طبیعی و باارزش در تولید محصولات دارویی و آرایشی مورد استفاده قرار گیرد. این شامل تولید داروهای ضدالتهابی طبیعی، محصولات ضدباکتریایی و همچنین محصولات آرایشی با خواص محافظت از پوست است. این کاربردها می‌توانند به ما در توسعه بازارهای جدید و بهره‌برداری از پسماندهای کشاورزی کمک کنند. تحلیل‌های مقالات همچنین به تجارب موفق در سایر کشورها اشاره دارند که از پسماندهای مشابه برای تولید محصولات ارزشمند استفاده کرده‌اند. این تجربه‌ها می‌توانند به‌عنوان الگوهایی برای توسعه بازار داخلی ایران استفاده شوند. بررسی این تجارب به ما این امکان را می‌دهد که از درس‌های آموخته شده در دیگر کشورها بهره‌برداری کنیم و فرایندهای تجاری‌سازی محصولات حاصل از پوست پسته را تسهیل کنیم.

در نهایت، با توجه به تحلیل‌های انجام شده، این تحقیق به بررسی شکاف‌های موجود در مطالعات فعلی و چالش‌های اقتصادی و محیط‌زیستی مرتبط با فراوری و استفاده از پسماندهای کشاورزی می‌پردازد. ایده‌های نوین برای توسعه بیشتر این حوزه و بهبود فرایند تجاری‌سازی محصولات حاصل از پوست پسته ارائه خواهد شد. این ایده شامل استراتژی‌هایی برای بهبود زیرساخت‌های مدیریت پسماند، تسهیل فرایندهای استخراج و پردازش، و ایجاد بازارهای جدید برای محصولات حاصل از پوست پسته در صنایع داخلی و خارجی است. این تحقیق نه تنها به‌عنوان یک منبع اطلاعاتی برای پژوهشگران و صنعتگران در زمینه مدیریت پسماندهای کشاورزی به حساب می‌آید، بلکه به‌عنوان یک نقشه راه برای بهره‌برداری مؤثر از پسماندهای پوست پسته در راستای توسعه پایدار و حفاظت از محیط‌زیست نیز در نظر گرفته می‌شود.

نتایج و یافته‌ها

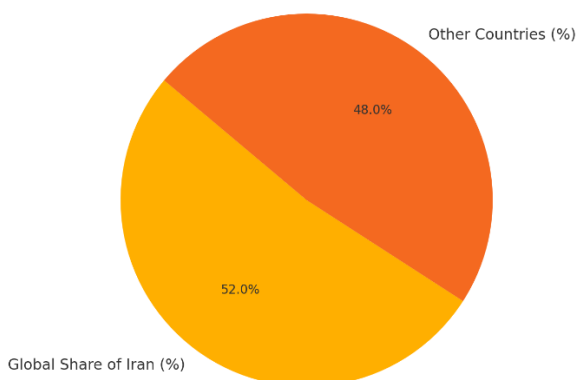
خواص زیستی پسماندهای کشاورزی به‌ویژه پوست پسته
در دهه‌های گذشته، توجه به مدیریت پسماندهای کشاورزی و بررسی پتانسیل‌های این مواد به‌عنوان منابع زیستی و اقتصادی به‌تدریج رشد یافته است. تحقیقات اولیه درباره خواص زیستی پسماندهای کشاورزی عمدتاً بر روی موادی مانند پوست میوه‌ها، ساقه‌ها، برگ‌ها و سایر بخش‌های گیاهی که پس از برداشت محصول باقی می‌ماند، متمرکز بود. این مطالعات به دنبال درک

در این حوزه است تا پتانسیل‌های موجود برای بهره‌برداری از این پسماند به‌عنوان منبعی ارزشمند مشخص شود. در این راستا، رویکرد مروری به‌عنوان روش تحقیق اصلی انتخاب شده است. این نوع رویکرد به ما این امکان را می‌دهد که با جمع‌آوری و تحلیل داده‌های موجود، به یک درک جامع از وضعیت کنونی و پیشرفت‌های علمی در این زمینه دست یابیم.

برای آغاز، جستجوی گسترده در پایگاه‌های داده علمی معتبر مانند PubMed، Google Scholar و ScienceDirect انجام شد. با استفاده از کلیدواژه‌هایی نظیر «خواص زیستی پوست پسته»، «پسماندهای کشاورزی»، «استخراج ترکیبات فعال» و «استفاده‌های دارویی و آرایشی»، مقالات مرتبط شناسایی و گردآوری شدند. این جستجو شامل مقالات تحقیقاتی، مروری سیستماتیک و گزارش‌های فنی بود که در طی چند دهه گذشته منتشر شده‌اند. پس از جمع‌آوری مقالات، فرایند تحلیل آغاز شد. این تحلیل شامل بررسی ترکیبات شیمیایی و زیستی موجود در پوست پسته بود. تحقیقات اولیه نشان داده‌اند که پوست پسته حاوی مقدار قابل‌توجهی پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها و آنتی‌اکسیدان‌هاست که این ترکیبات به دلیل خواص زیستی خود، از جمله اثرات ضدالتهابی و ضدباکتریایی، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که این ترکیبات فعال می‌توانند در صنایع مختلف، به‌ویژه در تولید داروهای طبیعی و محصولات آرایشی، مورد استفاده قرار گیرند.

این مطالعه به تجزیه و تحلیل روش‌های مختلف استخراج ترکیبات از پوست پسته می‌پردازد. مقالات بررسی شده، رویکردهای گوناگونی را برای استخراج ترکیبات فعال زیستی مورد بحث قرار داده‌اند، از جمله روش‌های سنتی مانند استخراج با حلال‌های آبی و آلی، و روش‌های پیشرفته‌تری مانند استخراج با سیالات فوق‌بحرانی و روش‌های مبتنی بر فشار بالا. این بررسی به ما این امکان را می‌دهد که کارایی و ایمنی هر یک از این روش‌ها را ارزیابی کنیم و بهترین شیوه‌ها را برای استخراج بهینه ترکیبات فعال شناسایی نماییم. برای تجزیه و تحلیل اثرات ترکیبات استخراج شده بر سلامتی و تأثیرات محیط‌زیستی آن‌ها، مقالات مربوط به آزمایشات بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی مورد بررسی قرار گرفتند. در این مرحله، اثرات ضدباکتریایی عصاره‌های استخراج‌شده و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها بررسی شدند. نتایج این آزمایشات می‌تواند به ما در درک بهتر از پتانسیل این ترکیبات در تولید محصولات طبیعی کمک کند.

Iran's Share in Global Pistachio Production



نمودار (۲): سهم ایران از تولید جهانی پسته

در این دوره، پژوهش‌ها عمدتاً روی روش‌های آزمایشگاهی برای استخراج این ترکیبات از پوست پسته و سایر پسماندهای کشاورزی متمرکز شدند. به‌عنوان مثال، در تحقیقات اولیه، از روش‌های استخراج ساده‌ای مانند استخراج با حلال‌های آبی و آلی برای جداکردن ترکیبات فعال استفاده شد. این روش‌ها، هر چند در ابتدا کارایی بالایی نداشتند، اما پایه‌گذار بسیاری از مطالعات بعدی در این زمینه شدند. علاوه بر این، مطالعات نشان داد که عصاره‌های استخراج شده از پوست پسته می‌توانند در مقابله با باکتری‌های مضر مؤثر باشند که این کشف باعث گسترش پژوهش‌ها در زمینه استفاده از پسماندهای کشاورزی به‌عنوان مواد ضدباکتریایی طبیعی شد (Ayala Zavala et al., 2018; Özbek et al., 2018).

تحلیل مطالعات کلاسیک درباره پتانسیل محیط‌زیستی و اقتصادی پسماندهای کشاورزی

در کنار بررسی خواص زیستی پسماندهای کشاورزی، تحلیل‌های گسترده‌ای نیز درباره پتانسیل اقتصادی و محیط‌زیستی این مواد صورت گرفت. در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، وقتی که محیط‌زیست به‌عنوان یکی از اولویت‌های جهانی مورد توجه قرار گرفت، پژوهش‌ها بر روی مدیریت بهینه پسماندهای کشاورزی تمرکز کردند. بسیاری از این مطالعات به مسائلی مانند آلودگی خاک و آب ناشی از دفع غیر مناسب پسماندهای کشاورزی پرداختند. در این دوره، چالش‌های مربوط به انباشت پسماندهای گیاهی و نقش آن‌ها در افزایش گازهای گلخانه‌ای نیز برجسته شد. از آنجا که بخش بزرگی از پسماندهای کشاورزی به دلیل عدم مدیریت

بہتر از ترکیبات شیمیایی و ارزش‌های نهفته در این پسماندها بودند. در بسیاری از این پژوهش‌ها، مشخص شد که بخش‌های غیرقابل مصرف محصولات کشاورزی، از جمله پوست میوه‌ها و آجیل‌ها، دارای ترکیبات فعالی هستند که می‌توانند در صنایع مختلف به‌ویژه دارویی و بهداشتی استفاده شوند (Garavand et al., 2017; Kuppusamy et al., 2017).

یکی از نمونه‌های مهم این مطالعات، بررسی پوست پسته بود که در کشورهایی مانند ایران، آمریکا، و ترکیه به دلیل میزان بالای تولید پسته، به میزان زیادی تولید می‌شود. تحقیقات ابتدایی روی پوست پسته به طور خاص نشان داد که این ماده دارای مقدار قابل توجهی پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها و آنتی‌اکسیدان‌ها است. این ترکیبات زیستی به دلیل اثرات محافظتی در برابر استرس اکسیداتیو و خواص ضدالتهابی و ضدباکتریایی خود، به‌شدت مورد توجه قرار گرفتند. از دهه ۱۹۹۰ به بعد، مطالعات بیشتری بر روی استفاده از این ترکیبات فعال زیستی متمرکز شدند که همگی به اهمیت بالقوه پوست پسته به‌عنوان یک منبع باارزش برای صنایع دارویی و آرایشی تأکید داشتند (Kumar et al., 2017).

پسته به‌عنوان یک محصول استراتژیک کشاورزی در ایران از اهمیت اقتصادی بسیار زیادی برخوردار است و کشور ایران با داشتن بیش از ۵۲ درصد سهم تولید جهانی، بزرگ‌ترین تولیدکننده پسته در جهان محسوب می‌شود. طبق آمارها، سطح زیر کشت باغات پسته در ایران حدود ۴۳۰ هزار هکتار برآورد می‌شود که بیش از ۸۷ درصد این باغات در استان کرمان واقع شده است.

فرایند تولید پسته منجر به تولید حجم قابل‌توجهی پسماند کشاورزی می‌شود. بررسی‌ها نشان داده‌اند که از هر ۲/۵ کیلوگرم دانه تر پسته، حدود یک کیلوگرم دانه خشک و تقریباً ۳۱۱ تا ۳۲۰ گرم پسماند خشک تولید می‌شود. بنابراین سالانه از تولید حدود ۲۰۰ هزار تن پسته تر در ایران، بالغ بر ۱۳۵ هزار تن پسماند حاصل می‌گردد که ترکیب این پسماند به طور عمده شامل پوسته نرم خارجی (۸۳ درصد)، خوشه‌ها (۱۳ درصد)، برگ‌ها (۷/۳ درصد) و مغز پسته (۰/۳ درصد) است. با توجه به حجم بالای این پسماندها و مشکلات محیط‌زیستی ناشی از آن‌ها، مدیریت بهینه و استفاده اقتصادی از آن‌ها ضروری است. نمودار و جدول ارائه شده، سهم کمی هر یک از اجزای پسماند پوست پسته را به خوبی مشخص می‌کند که می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های آتی در خصوص مدیریت پسماند در این حوزه باشد (Balist et al., 2021).

مناسب به طبیعت برگردانده می‌شدند، این مطالعات به‌ضرورت یافتن راهکارهای جدید برای بهره‌برداری از این مواد به‌عنوان منابع ارزشمند اشاره کردند (Alvarez-Parrilla et al., 2018; Bordbar & Mortazavimanesh, 2018).

جدول (۱): اثرات ضد میکروبی و ضد ویروسی کاروتنوئیدها، کلروفیل‌ها، گاما توکوفرول، فیتواسترول‌ها و رسوراترول پسته

ترکیب	اثر ضد میکروبی	غلظت ضد میکروبی فعال	اثر ضد ویروسی	غلظت فعال ضد ویروسی	منبع
Beta-carotene	Klebsiella pneumonia, Escherichia coli, Staphylococcus aureus Salmonella enteritidis	100 mg/mL 3.8 log units			Abdulhadi et al. (2020) Hayashi et al. (2012)
Lutein	Enterococcus faecium, Staphylococcus saprophyticus, Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa, Klebsiella pneumoniae	8.0–256.0 µg/mL	Hepatitis B	40 µg/mL	Mitra et al. (2021) Pang et al. (2010)
Zeaxanthin			Herpes simplex virus 1	10 µg/mL	Pennisi et al. (2023)
Chlorophylls	Gram-positive and Gram-negative bacteria	Photosensitizing effect	SARS-CoV-2	> 65 nM	Bertoloni et al. (1992), Jimenez-Aleman et al. (2021)
Gamma tocopherol	Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa, Bacillus subtilis, Staphylococcus aureus, Chromobacterium violaceum Erwinia carotovora	0.25–2.0% (v/v)			Ulusoy et al., 2009
Campesterol	Staphylococcus aureus, Streptococcus mutans, Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa, Klebsiella pneumoniae	0.4–1.3 mM	Herpes simplex virus 2 SARS-CoV-2	300 µg/mL 0	Freitas da Silva et al. (2023) Alqurashi et al. (2022) Jamhour et al. (2022)
Beta-sitosterol	Vibrio species Staphylococcus aureus	10 µg/mL 10 µg/mL	Herpes simplex virus 2	2.7 µg/mL	Ravi et al. (2020) Toujani et al. (2018), Alqurashi et al. (2022)
Stigmasterol	S. typhi K.pneumoniae Candida albicans Candida krusei	100 µg/mL 12.5–50.0 µg/mL	Herpes simplex virus 2 SARS-CoV-2	Herpes simplex virus 2 36.45 µg/mL	Petrera et al., 2014 Yusuf et al. (2018) Jamhour et al. (2022) Djouonzo et al. (2023)
Resveratrol	Gram-positive and Gram-negative bacteria, Fungi	25.0–128.0 µg/mL 10.0–50.0 µg/mL	Influenza virus Rhinovirus Respiratory syncytial virus Coronavirus	10–20 µg/mL 10–50 µM 30 mg/kg body weight 62.5 µM	Abedini et al. (2021)

اقتصادی مطرح شدند. برای مثال، مطالعاتی که بر روی پوست پسته و سایر پسماندهای آجیل انجام شد، نشان داد که این پسماندها می‌توانند با هزینه‌ای نسبتاً کم به منابع زیستی باارزشی تبدیل شوند. از جمله این منابع می‌توان به عصاره‌های ضدباکتریایی، کودهای ارگانیک، و حتی بیوگاز اشاره کرد که هم

در این دوران، اقتصاد چرخشی به‌عنوان یک مفهوم نوین به‌تدریج وارد ادبیات علمی شد. این مفهوم بر پایه استفاده مجدد از منابع و تبدیل ضایعات به محصولات جدید و مفید استوار بود. در چارچوب این مدل اقتصادی، پسماندهای کشاورزی به‌جای آن که به‌عنوان یک چالش محیط‌زیستی تلقی شوند، به‌عنوان یک فرصت

برای استخراج ترکیبات فعال زیستی از پوست پسته دارد (Bodoira & Maestri, 2020; Galali et al., 2020).

در دهه ۲۰۱۰، پژوهشگران روش‌های جدیدتری برای استخراج این ترکیبات معرفی کردند. یکی از این روش‌ها استخراج با سیالات فوق‌بحرانی است که به طور خاص برای استخراج ترکیبات زیستی حساس و جلوگیری از تخریب آن‌ها به کار می‌رود. در این روش، از دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی به‌عنوان حلال استفاده می‌شود که علاوه بر سازگاری با محیط‌زیست، امکان استخراج ترکیبات زیستی با خلوص بالا و بدون استفاده از مواد شیمیایی خطرناک را فراهم می‌کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این روش می‌تواند به طور مؤثری پلی‌فنول‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها را از پوست پسته جدا کند و برای تولید محصولات دارویی و آرایشی باکیفیت بالا مورد استفاده قرار گیرد. این فناوری پیشرفته نه تنها بازدهی فرایند استخراج را افزایش داده، بلکه به کاهش هزینه‌های جانبی و اثرات منفی محیط‌زیستی نیز کمک کرده است (Bodoira et al., 2020; Özbek et al., 2020).

استخراج با میکروویو از حرارت‌دهی سریع و کنترل شده استفاده می‌کند که باعث کاهش زمان استخراج و افزایش بازدهی فرایند می‌شود. این روش به‌ویژه در استخراج ترکیبات حساس به حرارت نظیر فلاونوئیدها و آنتی‌اکسیدان‌ها از پوست پسته کاربرد دارد. از سوی دیگر، استخراج با اولتراسونیک از امواج صوتی برای شکستن دیواره‌های سلولی و آزادسازی ترکیبات زیستی فعال استفاده می‌کند که باعث افزایش کارایی استخراج و کاهش نیاز به حلال‌های شیمیایی می‌شود. این دو روش به دلیل سرعت بالا، کارایی مناسب و سازگاری با محیط‌زیست در پژوهش‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (Cardullo et al., 2021).

کاربردهای آزمایشگاهی ترکیبات فعال زیستی پوست پسته در صنایع دارویی و غذایی

پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که ترکیبات فعال زیستی استخراج‌شده از پوست پسته می‌توانند کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف به‌ویژه صنایع دارویی و غذایی داشته باشند. این ترکیبات به دلیل خواص زیستی منحصر به فرد خود، به‌عنوان موادی طبیعی و سالم برای جایگزینی با ترکیبات شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که پلی‌فنول‌ها و فلاونوئیدهای موجود در پوست پسته خواص آنتی‌اکسیدانی قوی دارند که می‌توانند در پیشگیری از بیماری‌های

از نظر اقتصادی و هم از منظر محیط‌زیستی سودآور هستند (Alvarez-Parrilla et al., 2018; Ayala Zavala et al., 2018).

تحقیقات کلاسیک همچنین به مزایای اجتماعی و اقتصادی بهره‌برداری از پسماندهای کشاورزی برای جامعه کشاورزی نیز اشاره کردند. ایجاد اشتغال، کاهش وابستگی به مواد شیمیایی صنعتی و کمک به کاهش آلودگی محیط‌زیست از جمله مزایای معرفی این فناوری‌ها در مقیاس بزرگ بود. این مطالعات نشان دادند که بهره‌برداری از پسماندهای کشاورزی می‌تواند به‌عنوان یکی از روش‌های اصلی برای توسعه صنعت پایدار و ایجاد فرصت‌های اقتصادی در جوامع روستایی و کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. این تحقیقات پایه‌گذار بسیاری از پژوهش‌های مدرن‌تر در زمینه مدیریت پسماند و بهره‌برداری از منابع زیستی بودند (Özbek et al., 2018).

روش‌های استخراج ترکیبات فعال زیستی از پوست پسته و دیگر پسماندها

در دهه‌های اخیر، پژوهشگران به دنبال توسعه روش‌های مختلف برای استخراج ترکیبات فعال زیستی از پسماندهای کشاورزی بوده‌اند، به‌ویژه پوست پسته که به دلیل غنی بودن از ترکیبات زیستی فعال همچون پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها، و آنتی‌اکسیدان‌ها، پتانسیل بالایی در صنایع مختلف دارد. روش‌های مختلفی برای استخراج این ترکیبات از پسماندهای گیاهی به کار رفته است که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. این روش‌ها به‌طور کلی بر اساس کارایی، هزینه، میزان خلوص مواد استخراج شده و سازگاری با محیط‌زیست مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند (Ghandahari Yazdi et al., 2019).

یکی از روش‌های اولیه و کلاسیک که برای استخراج ترکیبات زیستی از پسماندهای گیاهی به کار رفته است، استخراج با حلال است. در این روش، از حلال‌های مختلف نظیر آب، اتانول، متانول و سایر حلال‌های آلی برای استخراج پلی‌فنول‌ها و سایر ترکیبات فعال استفاده می‌شود. هر چند این روش به دلیل سادگی و هزینه نسبتاً پایین خود مورد توجه قرار گرفته، اما معایب آن از جمله استفاده از حلال‌های سمی و کاهش خلوص ترکیبات زیستی استخراج شده، باعث شد که روش‌های پیشرفته‌تر توسعه یابند. به‌عنوان مثال، استخراج با حلال آبی به‌عنوان یکی از روش‌های سازگارتر با محیط‌زیست معرفی شد، چرا که از آب به‌عنوان یک حلال غیرسمی استفاده می‌کند و در عین حال کارایی مناسبی

آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی که در تحقیقات متعدد تأیید شده است، به‌عنوان مواد طبیعی و ایمن در تولید محصولات نوین دارویی و آرایشی به کار رفته‌اند (Dixit et al., 2023; Singh et al., 2023).

پژوهشگران در مطالعات خود به بررسی اثرات آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی عصاره‌های استخراج شده از پوست پسته پرداختند. یافته‌های این تحقیقات نشان داد که پلی‌فنول‌های موجود در پوست پسته توانایی قابل توجهی در مقابله با رادیکال‌های آزاد دارند که این امر می‌تواند به طور مستقیم در جلوگیری از پیری زودرس پوست و حفظ سلامت سلول‌ها نقش داشته باشد. این ترکیبات همچنین به‌عنوان مواد محافظتی برای پوست در برابر عوامل مخرب محیطی نظیر آلودگی هوا و اشعه UV معرفی شده‌اند (Kesbiç, 2024).

مطالعات جدید نشان داده‌اند که مدل‌های زیست‌پایه و فرایندهای پایدار، راهکارهای مؤثری برای بهره‌برداری از پسماندهای کشاورزی، به‌ویژه پوست پسته، ارائه می‌دهند. در این مدل‌ها، تمام مراحل استخراج و فراوری با رویکردهایی که به حداقل آسیب محیط‌زیستی منجر می‌شوند، طراحی شده‌اند. در سال‌های اخیر، تحقیقاتی انجام شده که به بررسی امکان تولید محصولات دارویی و آرایشی ارگانیک با استفاده از این فرایندهای پیشرفته پرداخته‌اند. این مقالات نشان داده‌اند که استفاده از عصاره‌های طبیعی پوست پسته به‌عنوان مواد فعال در تولید کرم‌های ضد پیری، لوسیون‌های مرطوب‌کننده و ماسک‌های محافظتی، پتانسیل بالایی در بازارهای جهانی دارد (Irshad et al., 2024; Zibaei-Rad et al., 2024).

تحقیقات نشان می‌دهند که با استفاده از فناوری نانو می‌توان این ترکیبات را در اندازه‌های بسیار کوچک به محصولات آرایشی و بهداشتی اضافه کرد تا جذب بهتر و عملکرد مؤثرتری داشته باشند. نانوذرات پلی‌فنولی به‌دست‌آمده از پوست پسته، به دلیل قابلیت‌های بالای نفوذپذیری در پوست، می‌توانند به‌عنوان یک ماده مؤثر در بهبود کیفیت محصولات آرایشی به کار بروند. مقالات منتشر شده در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهند که استفاده از این فناوری‌ها نه تنها منجر به بهبود خواص زیستی محصولات می‌شود، بلکه به افزایش طول عمر و پایداری آن‌ها نیز کمک می‌کند (Fatemi et al., 2024; Mandalari et al., 2024).

به‌طور کلی، پژوهش‌های جدیدتر نشان داده‌اند که بهره‌برداری از پسماندهای پوست پسته با استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته نه تنها امکان‌پذیر است، بلکه پتانسیل بسیار زیادی برای گسترش

مزمن نظیر سرطان، دیابت، و بیماری‌های قلبی-عروقی نقش داشته باشند. این ترکیبات با کاهش استرس اکسیداتیو در بدن و افزایش قدرت دفاعی سلول‌ها، به حفظ سلامت بدن کمک می‌کنند (Alalwan et al., 2022; Mandalari et al., 2022b).

در صنعت داروسازی، این ترکیبات به‌عنوان مواد فعال در تولید داروهای ضدالتهاب و ضدباکتری به کار رفته‌اند. به‌عنوان مثال، عصاره‌های به‌دست آمده از پوست پسته می‌توانند به طور مؤثری با رشد باکتری‌های مضر مقابله کرده و از بروز عفونت‌های باکتریایی جلوگیری کنند. این ویژگی‌ها باعث شده است که بسیاری از شرکت‌های داروسازی به دنبال استفاده از این ترکیبات طبیعی در تولید محصولات دارویی جدید باشند. علاوه بر این، مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که ترکیبات زیستی پوست پسته می‌توانند در درمان التهاب‌های مزمن نظیر التهاب مفاصل و بیماری‌های التهابی روده نیز مؤثر باشند (Pai et al., 2022b; Pilafidis et al., 2022).

در صنعت غذایی نیز، از این ترکیبات به‌عنوان مواد نگهدارنده طبیعی استفاده شده است. به دلیل خواص ضدباکتریایی و ضدقارچی، پلی‌فنول‌ها می‌توانند از فساد مواد غذایی جلوگیری کرده و زمان ماندگاری محصولات غذایی را افزایش دهند. همچنین، آنتی‌اکسیدان‌های موجود در پوست پسته می‌توانند به بهبود کیفیت و سلامت محصولات غذایی کمک کنند. به همین دلیل، در سال‌های اخیر، استفاده از ترکیبات زیستی استخراج شده از پوست پسته در تولید محصولات غذایی سالم و ارگانیک بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Fraguela-Meissimilly et al., 2023b; Rather et al., 2023b; Sorrenti et al., 2023; Toghiani et al., 2023c).

استفاده از پوست پسته در تولید محصولات نوین

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی بهره‌برداری از پسماندهای کشاورزی با هدف تولید محصولات دارویی، آرایشی و بهداشتی صورت گرفته است. پوست پسته به‌عنوان یکی از پسماندهای غنی از ترکیبات زیستی فعال، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مقالات منتشر شده در دهه اخیر نشان می‌دهند که ترکیبات موجود در پوست پسته، به‌ویژه پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها، و آنتی‌اکسیدان‌ها، قابلیت‌های فراوانی برای استفاده در صنایع مختلف دارند. این ترکیبات زیستی به دلیل خواص

زمینه استخراج و استفاده از این ترکیبات در آزمایشگاه‌ها به دست آورده‌اند، اما این یافته‌ها به سطح تولید انبوه و تجاری نرسیده‌اند. یکی از دلایل اصلی این موضوع، هزینه‌های بالای تولید و فرآوری این ترکیبات در مقایسه با مواد شیمیایی مصنوعی مشابه است که در حال حاضر در صنایع دارویی و آرایشی استفاده می‌شوند. به همین دلیل، شکاف مهم دیگری که باید به آن پرداخته شود، توسعه مدل‌های اقتصادی برای کاهش هزینه‌های تولید و افزایش سودآوری این فرایندها است.

۳. نحوه سازگاری با استانداردهای جهانی و مقررات

تحقیقات موجود معمولاً به بررسی علمی ترکیبات فعال زیستی موجود در پوست پسته پرداخته‌اند، اما مطالعات کمتری بر روی چگونگی تطبیق این فرایندها و محصولات با استانداردهای جهانی و مقررات صنعتی صورت گرفته است. برای تجاری‌سازی موفق، محصولات زیست‌پایه به‌دست آمده از پسماندهای کشاورزی باید با مقررات و استانداردهای صنعتی و بهداشتی در سطح بین‌المللی سازگار باشند. این مسئله به‌ویژه در صنعت دارویی و آرایشی که استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای برای محصولات نهایی دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ بنابراین، یکی دیگر از شکاف‌های موجود، تحقیق درباره چگونگی بهبود فرایندهای تولید و بسته‌بندی به‌منظور تطبیق با این استانداردها است.

۴. اثرات طولانی‌مدت استفاده از محصولات زیست‌پایه

یکی از مسائلی که در پژوهش‌های قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته، بررسی اثرات طولانی‌مدت استفاده از محصولات زیست‌پایه حاصل از پوست پسته در محصولات دارویی و آرایشی است. اگر چه تحقیقات اولیه به خواص مثبت این ترکیبات اشاره دارند، اما مطالعات بلندمدت در زمینه اثرات جانبی احتمالی این مواد در کاربردهای صنعتی و بهداشتی، هنوز کافی نیست. برای تضمین موفقیت تجاری این محصولات، نیاز به پژوهش‌های بلندمدت‌تر برای ارزیابی ایمنی و پایداری این مواد وجود دارد.

۵. فرایندهای بهینه‌سازی و کاهش ضایعات

در مقالات پیشین، یکی دیگر از شکاف‌های اصلی، فرایند بهینه‌سازی برای کاهش ضایعات و استفاده کامل‌تر از پسماندهای کشاورزی است. اگرچه تمرکز اصلی بسیاری از مطالعات بر روی استخراج ترکیبات فعال زیستی بوده است، اما بهینه‌سازی فرایندها برای استفاده کامل‌تر از کل پسماند و کاهش ضایعات به‌خوبی بررسی نشده است. به‌عنوان مثال، پس از استخراج ترکیبات فعال، بخش‌های دیگر پسماند همچنان می‌تواند برای تولید مواد دیگر

در بازارهای جهانی دارد. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که می‌توان از پوست پسته برای تولید محصولات دارویی و آرایشی با خواص محافظتی، ضد پیری، و ضدالتهاب استفاده کرد. با وجود پیشرفت‌های قابل توجهی که در این زمینه صورت گرفته، هنوز نیاز به تحقیقات بیشتر در زمینه بهینه‌سازی فرایندهای تولید و کاهش هزینه‌ها وجود دارد تا این فناوری‌ها به طور گسترده‌تری در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرند (Ayoubi et al., 2024; Kutlu, 2024).

تحلیل و شناسایی شکاف‌ها

با وجود پیشرفت‌های قابل توجهی که در زمینه تحقیقات مربوط به استفاده از پوست پسته صورت گرفته، همچنان شکاف‌ها و محدودیت‌های مهمی در پژوهش‌های کنونی وجود دارد که نیازمند بررسی و تحقیق بیشتر هستند. یکی از مهمترین این شکاف‌ها، عدم توسعه صنعتی و تجاری گسترده برای استفاده از ترکیبات زیستی استخراج شده از پوست پسته است. اگر چه تحقیقات زیادی در زمینه استخراج ترکیبات فعال زیستی از پسماندهای کشاورزی انجام شده، اما به دلیل چالش‌های فنی و اقتصادی، هنوز فرایندهای صنعتی استاندارد برای بهره‌برداری از این مواد به طور کامل شکل نگرفته است.

۱. محدودیت‌های موجود در روش‌های استخراج

یکی از چالش‌های کلیدی که در مقالات قبلی به طور کامل بررسی نشده، محدودیت‌های مرتبط با روش‌های استخراج ترکیبات زیستی است. در حالی که روش‌های نوینی همچون استخراج با سیالات فوق‌بهرانی و استخراج با مایکروویو و اولتراسونیک معرفی شده‌اند، اما بسیاری از این روش‌ها هنوز در مقیاس آزمایشگاهی یا پایلوت اجرا می‌شوند و به سطح صنعتی گسترده نرسیده‌اند. از طرفی، روش‌های استخراج سنتی نیز معمولاً از حلال‌های شیمیایی استفاده می‌کنند که می‌توانند مشکلات محیط‌زیستی ایجاد کنند و هزینه‌های تولید را افزایش دهند؛ بنابراین، یکی از شکاف‌های اساسی در این حوزه، توسعه روش‌های استخراجی است که هم کارآمد باشند و هم با محیط‌زیست سازگارتر عمل کنند.

۲. عدم تجاری‌سازی گسترده

یکی دیگر از مسائلی مهمی که در مقالات پیشین کمتر به آن پرداخته شده، عدم تجاری‌سازی ترکیبات زیستی استخراج شده از پوست پسته است. اگر چه بسیاری از تحقیقات نتایج مثبتی در

کرم‌های ضد پیری، ضدلک و مرطوب‌کننده‌های طبیعی بهبود می‌بخشد. محصولات تولیدی به دلیل عدم نیاز به مواد شیمیایی مضر، زیست‌سازگار و ایمن برای مصرف‌کننده هستند که این ویژگی، آن‌ها را به یکی از گزینه‌های برتر در بازار محصولات آرایشی تبدیل می‌کند. علاوه بر این، به دلیل خواص طبیعی و ارگانیک، این محصولات می‌توانند به سرعت در بازارهای بین‌المللی مورد توجه قرار گیرند و تقاضای گسترده‌ای برای آن‌ها ایجاد شود.

مراحل اجرای ایده

۱. تحقیق و توسعه: (R & D)
آزمایش‌های اولیه برای تأیید اثربخشی ترکیبات در محصولات نظیر کرم ضد پیری و لوسیون‌های محافظتی.
۲. تولید صنعتی:
راه‌اندازی خط تولید نانو تکنولوژی برای تولید محصولات آرایشی با استفاده از نانو ذرات پوست پسته.
بسته‌بندی محصولات با استانداردهای بین‌المللی و توسعه برچسب‌های زیست‌سازگار و ارگانیک.
۳. توسعه بازار و برندسازی:
تبلیغات بر پایه مزیت طبیعی و نانو، با تمرکز بر استفاده از مواد ارگانیک و خواص ضد پیری.
بازاریابی در سطح داخلی و بین‌المللی، به‌ویژه در کشورهای اروپایی و آسیایی که تقاضای زیادی برای محصولات طبیعی و نانو تکنولوژی دارند.
با توجه به قیمت پایین مواد اولیه، یعنی پوست پسته، و حاشیه سود بالای محصولات آرایشی، پیش‌بینی می‌شود که سرمایه‌گذاری در این حوزه به بازگشت مالی سریع و بالایی منجر شود. به علاوه، محصولات نانو تکنولوژی به دلیل کارایی بالاتر، قادر به ارائه قیمت‌های بالاتر هستند که می‌تواند سود بیشتری را به همراه داشته باشد. استفاده از فناوری نانو در محصولات طبیعی، یک مزیت رقابتی پایدار ایجاد می‌کند. این مزیت به محصولات کمک می‌کند تا در بازارهای بین‌المللی با سایر محصولات رقابت کنند و سهم بیشتری از بازار را به دست آورند. علاوه بر این، این ایده به حفاظت از محیط‌زیست نیز کمک می‌کند. با استفاده از پسماندهای کشاورزی مانند پوست پسته، نه تنها محصولاتی سودآور تولید می‌شود، بلکه به کاهش ضایعات و حمایت از حفاظت محیط‌زیست

مثل کودهای آلی یا بیوگاز استفاده شود، اما این جنبه در تحقیقات گذشته به طور کامل پوشش داده نشده است.

تولید محصولات آرایشی و بهداشتی از عصاره‌های پوست پسته با فناوری نانو

پسته یکی از محصولات استراتژیک ایران و سایر کشورهای تولیدکننده است، و پوست پسته که به طور معمول به‌عنوان پسماند دور ریخته می‌شود، حاوی مقادیر زیادی از ترکیبات زیستی فعال مثل پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها، و آنتی‌اکسیدان‌ها است. هدف این ایده تبدیل این پسماند به یک منبع ارزشمند و پول‌ساز در قالب محصولات آرایشی و بهداشتی با استفاده از فناوری نانو است. این محصولات با توجه به بازار رو به رشد محصولات طبیعی و ارگانیک، هم پتانسیل سودآوری بالا دارند و هم به دلیل استفاده از منابع داخلی، هزینه‌های تولیدی نسبتاً پایینی خواهند داشت. یکی از نقاط قوت این ایده، بازار رو به رشد محصولات طبیعی است. مصرف‌کنندگان در سراسر جهان به دنبال محصولات طبیعی و ارگانیک هستند که عاری از مواد شیمیایی مضر باشند. پوست پسته با دارا بودن ترکیبات زیستی قوی، قابلیت ارائه محصولاتی طبیعی و مؤثر را دارد که می‌تواند به طور مستقیم با محصولات صنعتی رقابت کند.

استفاده از فناوری نانو نیز به افزایش کارایی محصولات کمک می‌کند. این فناوری امکان تبدیل عصاره‌های زیستی پوست پسته به نانو ذرات را فراهم می‌آورد که موجب جذب بهتر و عملکرد قوی‌تری در محصولات آرایشی می‌شود. با استفاده از این فناوری، می‌توان اثربخشی محصولات را چند برابر کرد و مزیت رقابتی مهمی در بازار به دست آورد. همچنین، این ایده دارای پتانسیل صادراتی بالایی است. بازار جهانی محصولات آرایشی و بهداشتی طبیعی و نانو تکنولوژی در حال رشد است. این محصول نه تنها در بازار داخلی ایران مورد استقبال قرار می‌گیرد، بلکه قابلیت صادرات به کشورهای مختلف با استانداردهای بین‌المللی را نیز دارد. از نقاط قوت اصلی این ایده، استفاده از پسماند کشاورزی ارزان است. پوست پسته به‌عنوان ماده اولیه به‌وفور و با هزینه پایین در دسترس قرار دارد که این موضوع منجر به کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. همچنین، بهره‌گیری از فناوری نانو در این فرایند باعث افزایش کارایی ترکیبات فعال زیستی می‌شود. نانو ذرات موجب جذب بهتر این ترکیبات شده و عملکرد آن‌ها را در محصولات آرایشی مانند

کسب‌وکار نه تنها به حفظ منابع طبیعی و کاهش ضایعات کشاورزی کمک می‌کند، بلکه از نظر تجاری نیز دارای پتانسیل بالایی برای رشد و توسعه است.

پیشنهادات برای تحقیقات آینده

با توجه به پتانسیل بالای پوست پسته و پیشرفت‌های تکنولوژیکی در بهره‌برداری از آن، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آینده به چند حوزه کلیدی متمرکز شود. نخست، بهینه‌سازی فرایندهای استخراج ترکیبات زیستی می‌تواند بسیار موثر باشد. هر چند که روش‌های نوین مانند استخراج با سیالات فوق‌بحرانی و امواج مایکروویو مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما هنوز تحقیقات بیشتری برای بهینه‌سازی این فرایندها لازم است تا هزینه‌ها کاهش یابد و بازدهی در مقیاس صنعتی افزایش یابد. توسعه محصولات جدید نیز از دیگر زمینه‌های جذاب برای تحقیقات است. علاوه بر تولید کرم‌های ضد پیری و لوسیون‌های مرطوب‌کننده، ترکیبات زیستی موجود در پوست پسته می‌توانند در تولید محصولات جدیدی نظیر ماسک‌های صورت، شامپوهای ضد ریزش مو و سرم‌های تقویت‌کننده پوست مورد بهره‌برداری قرار گیرند. تحقیقات بیشتر در این حوزه می‌تواند به گسترش دامنه محصولات و افزایش بازار هدف کمک کند. یکی از بخش‌های حیاتی که نیازمند توجه ویژه است، مطالعات کلینیکی و آزمایشات بالینی است. برای اطمینان از ایمنی و اثربخشی محصولات تولید شده، انجام تحقیقات کلینیکی بر روی انسان‌ها ضروری به نظر می‌رسد. این مطالعات می‌توانند ادعاهای علمی را تقویت کرده و اعتماد مصرف‌کنندگان نسبت به محصولات را افزایش دهند.

بررسی پتانسیل صادراتی نیز اهمیت بسیاری دارد. با توجه به رشد تقاضا برای محصولات آرایشی طبیعی در بازارهای جهانی، تحقیقات بیشتری درباره نیازهای خاص بازارهای هدف، مانند اروپا، آسیا و آمریکا، و همچنین مقررات صادراتی این کشورها لازم است تا ورود به این بازارها تسهیل شود. در نهایت، مدل‌های کسب‌وکار پایدار نیز باید مورد توجه قرار گیرند. هم‌زمان با تحقیقات فنی، توسعه مدل‌های کسب‌وکاری که به حفظ محیط‌زیست و سودآوری اقتصادی توجه دارند، می‌تواند نه تنها به موفقیت در بازار کمک کند، بلکه الگویی برای سایر صنایع و کشورها باشد. این مدل‌های کسب‌وکار پایدار می‌توانند نقش مهمی در حفظ تعادل میان توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست ایفا کنند.

نیز کمک می‌شود. این رویکرد نه تنها به لحاظ اقتصادی سودآور است، بلکه از نظر محیط‌زیستی نیز پایدار و مطلوب به شمار می‌آید. این ایده، ترکیبی از نوآوری فناوری نانو و استفاده از پسماندهای کشاورزی است که نه تنها یک راهکار عملی برای بهره‌برداری از پوست پسته ارائه می‌دهد، بلکه بازار بزرگ و در حال رشدی را هدف قرار می‌دهد که سودآوری بالایی به همراه دارد. این مدل کسب‌وکار می‌تواند در ایران و سایر کشورهای تولیدکننده پوسته پیاده‌سازی شود و با تمرکز بر تولید محصولات طبیعی، ارگانیک و نانوتکنولوژی، موفقیت تجاری بالایی به دست آورد. با اجرای درست این ایده، نه تنها می‌توان پسماندهای کشاورزی را به فرصت‌های اقتصادی تبدیل کرد، بلکه نقش مهمی در ارتقای سلامت و زیبایی مصرف‌کنندگان و حفاظت از محیط‌زیست نیز ایفا کرد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، با مروری جامع بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه استفاده از پسماندهای کشاورزی، به‌ویژه پوست پسته، نشان داده شد که این ماده که به طور معمول به‌عنوان پسماند دور ریخته می‌شود، می‌تواند منبع ارزشمندی برای تولید محصولات آرایشی و بهداشتی با استفاده از فناوری‌های نوین، مانند نانوتکنولوژی، باشد. پوست پسته به دلیل دارا بودن ترکیبات زیستی فعال همچون پلی‌فنول‌ها و فلاونوئیدها، پتانسیل بالایی برای تبدیل به محصولاتی با خواص ضدالتهابی، ضدباکتریایی و آنتی‌اکسیدانی دارد.

استفاده از فناوری نانو در فراوری و بهره‌برداری از این پسماند کشاورزی، امکان بهبود کارایی و اثربخشی محصولات آرایشی و بهداشتی را فراهم کرده و در عین حال مزیت‌هایی چون کاهش مصرف مواد شیمیایی و کاهش ضایعات محیط‌زیستی را به همراه دارد. از طرفی، با رشد بازار جهانی محصولات طبیعی و ارگانیک، این محصولات می‌توانند با موفقیت در بازارهای داخلی و بین‌المللی به فروش برسند و زمینه‌ساز سودآوری قابل توجهی باشند (Kutlu, 2024; Zibaei-Rad et al., 2024).

در نتیجه، ایده تولید محصولات آرایشی و بهداشتی از پوست پسته با استفاده از فناوری نانو، یک فرصت واقعی و عملیاتی است که با در نظر گرفتن عوامل محیط‌زیستی و اقتصادی، می‌تواند به یکی از پیش‌گامان بازار محصولات طبیعی تبدیل شود. این مدل

منابع

- Alvarez-Parrilla, E., Urrea-López, R., & Rosa, L. A. de la. (2018). Bioactive components and health effects of pecan nuts and their byproducts: a review. *Journal of Food Bioactives*, 1. <https://doi.org/10.31665/jfb.2018.1127>
- Ayala Zavala, J. Fernando., González-Aguilar, G. A. ., & Siddiqui, M. Wasim. (2018). *Plant food by-products: industrial relevance for food additives and nutraceuticals*. Apple Academic Press.
- Ayoubi, A., Balvardi, +;, Damghani, M. ;, & Tavakoli, N. ; (2024). Feasibility of Functional Mayonnaise Production and Increase Its Oxidative Stability by Adding Pistachio atlantica Fruit Powder Extract. In *J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE) Research Article* (Vol. 43, Issue 5).
- Balist, J., Nahavandchi, M., & Bidar, G. S. (2021). Landfill site selection using fuzzy logic, AHP, and WLC: Case study: Razan city - Iran. *Journal of Civil Engineering Frontiers*, 2(1), 1–7. <https://doi.org/10.38094/jocef20129>
- Bodoira, R., & Maestri, D. (2020). Phenolic Compounds from Nuts: Extraction, Chemical Profiles, and Bioactivity. In *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (Vol. 68, Issue 4, pp. 927–942). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07160>
- Bodoira, R., Velez, A., Maestri, D., & Herrera, J. (2020). Bioactive Compounds Obtained from Oilseed By-Products with Subcritical Fluids: Effects on *Fusarium verticillioides* Growth. *Waste and Biomass Valorization*, 11(11), 5913–5924. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00839-y>
- Bonaccio, M., Di Castelnuovo, A., De Curtis, A., Costanzo, S., Bracone, F., Persichillo, M., Donati, M. B., De Gaetano, G., & Iacoviello, L. (2015). Nut consumption is inversely associated with both cancer and total mortality in a Mediterranean population: Prospective results from the Moli-sani study. *British Journal of Nutrition*, 114(5), 804–811. <https://doi.org/10.1017/S0007114515002378>
- Bordbar, M., & Mortazavimanesh, N. (2018). Biosynthesis of waste pistachio shell supported silver nanoparticles for the catalytic reduction processes. *IET Nanobiotechnology*, 12(7), 939–945. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2017.0266>
- Bulló, M., Juanola-Falgarona, M., Hernández-Alonso, P., & Salas-Salvadó, J. (2015). Nutrition attributes and health effects of pistachio nuts. *British Journal of Nutrition*, 113(S2), S79–S93. <https://doi.org/10.1017/S0007114514003250>
- Cardullo, N., Leanza, M., Muccilli, V., & Tringali, C. (2021). Valorization of agri-food waste from pistachio hard shells: Extraction of polyphenols as natural antioxidants. *Resources*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/resources10050045>
- Dixit, V., Joseph Kamal, S. W., Bajrang Chole, P., Dayal, D., Chaubey, K. K., Pal, A. K., Xavier, J., Manjunath, B. T., & Bachheti, R. K. (2023). Functional Foods: Exploring the Health Benefits of Bioactive Compounds from Plant and Animal Sources. In *Journal of Food Quality* (Vol. 2023). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2023/5546753>
- Fatemi, A., Najafi, A., Razavi, R., & Jafarzadeh, S. (2024). Characterizing the antioxidant and antifungal properties of nano-encapsulated pistachio hull extract in fenugreek seed gum to maintain the quality and safety of fresh pistachio. *Food Science and Nutrition*, 12(8), 5561–5571. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4209>
- Fraguela-Meissimilly, H., Bastías-Monte, J. M., Vergara, C., Ortiz-Viedma, J., Lemus-Mondaca, R., Flores, M., Toledo-Merma, P., Alcázar-Alay, S., & Gallón-Bedoya, M. (2023a). New Trends in Supercritical Fluid Technology and Pressurized Liquids for the Extraction and Recovery of Bioactive Compounds from Agro-Industrial and Marine Food Waste. In *Molecules* (Vol. 28, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules28114421>
- Fraguela-Meissimilly, H., Bastías-Monte, J. M., Vergara, C., Ortiz-Viedma, J., Lemus-Mondaca, R., Flores, M., Toledo-Merma, P., Alcázar-Alay, S., & Gallón-Bedoya, M. (2023b). New Trends in Supercritical Fluid Technology and Pressurized Liquids for the Extraction and Recovery of Bioactive Compounds from Agro-Industrial and Marine Food Waste. In *Molecules* (Vol. 28, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules28114421>
- Galali, Y., Omar, Z. A., & Sajadi, S. M. (2020). Biologically active components in by-products of food processing. In *Food Science and Nutrition* (Vol. 8, Issue 7, pp. 3004–3022). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1665>

- Garavand, F., Madadlou, A., & Moini, S. (2017). Determination of phenolic profile and antioxidant activity of pistachio hull using high-performance liquid chromatography–diode array detector–electro-spray ionization–mass spectrometry as affected by ultrasound and microwave. *International Journal of Food Properties*, 20(1), 19–29. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1099045>
- Ghandahari Yazdi, A. P., Barzegar, M., Sahari, M. A., & Ahmadi Gavlighi, H. (2019). Optimization of the enzyme-assisted aqueous extraction of phenolic compounds from pistachio green hull. *Food Science and Nutrition*, 7(1), 356–366. <https://doi.org/10.1002/fsn3.900>
- Hosseini, Ruhollah, Malah Mir Chagini, Shahriyar. "Identification and presentation of the criteria and indicators for evaluating employee empowerment strategies for sustainability and business development: Entrepreneurial strategies in agriculture." *Entrepreneurial Strategies in Agriculture*, 2025; 11(1): 27-17. DOI: 10.61186/jea.11.1.17
- Irshad, S., Iftikhar, S., Riaz, M., Mahmood, A., Mushtaq, A., Saleem, Y., Shamim, R., & Akter, Q. S. (2024). Chemical fingerprinting, antimicrobial, antioxidant, anti-inflammatory, and anticancer potential of greenly synthesized silver nanoparticles from pistachio (*Pistacia vera*) nuts and senna (*Cassia angustifolia* Vahl.) leaves. *Food Science and Nutrition*, 12(7), 4989–5006. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4148>
- Jain, S., & Sankaran, M. (2024a). Mango Peel: An Eminent Food Source. *J. Nutrition and Food Processing Copy Rights@ Sinchana Jain N R, Auctores Publishing LLC*, 7(3). <https://doi.org/10.31579/2637>
- Jain, S., & Sankaran, M. (2024b). Mango Peel: An Eminent Food Source. *J. Nutrition and Food Processing Copy Rights@ Sinchana Jain N R, Auctores Publishing LLC*, 7(3). <https://doi.org/10.31579/2637>
- Kumar, K., Yadav, A. N., Kumar, V., Vyas, P., & Dhaliwal, H. S. (2017). Food waste: a potential bioresource for extraction of nutraceuticals and bioactive compounds. In *Bioresources and Bioprocessing* (Vol. 4, Issue 1). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0148-6>
- Kuppusamy, S., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2017). Evaluation of nineteen food wastes for essential and toxic elements. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6(4), 367–373. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0178-2>
- Kutlu, G. (2024). Valorization of various nut residues grown in Turkiye: Antioxidant, anticholinesterase, antidiabetic, and cytotoxic activities. *Food Science and Nutrition*, 12(6), 4362–4371. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4103>
- Mandalari, G., Barreca, D., Gervasi, T., Roussel, M. A., Klein, B., Feeney, M. J., & Carughi, A. (2022a). Pistachio nuts (*Pistacia vera* L.): Production, nutrients, bioactives and novel health effects. In *Plants* (Vol. 11, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants11010018>
- Mandalari, G., Barreca, D., Gervasi, T., Roussel, M. A., Klein, B., Feeney, M. J., & Carughi, A. (2022b). Pistachio nuts (*Pistacia vera* L.): Production, nutrients, bioactives and novel health effects. In *Plants* (Vol. 11, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants11010018>
- Mandalari, G., Pennisi, R., Gervasi, T., & Sciortino, M. T. (2024). *Pistacia vera* L. as natural source against antimicrobial and antiviral resistance. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 15). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1396514>
- Özbek, H. N., Halahlih, F., Göğüş, F., Koçak Yanık, D., & Azaizeh, H. (2020). Pistachio (*Pistacia vera* L.) Hull as a Potential Source of Phenolic Compounds: Evaluation of Ethanol–Water Binary Solvent Extraction on Antioxidant Activity and Phenolic Content of Pistachio Hull Extracts. *Waste and Biomass Valorization*, 11(5), 2101–2110. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0512-6>
- Özbek, H. N., Koçak Yanık, D., Fadiloğlu, S., Keskin Çavdar, H., & Göğüş, F. (2018). Microwave-assisted extraction of non-polar compounds from pistachio hull and characterization of extracts. *Grasas y Aceites*, 69(3). <https://doi.org/10.3989/gya.0217181>
- Pai, S., Hebbar, A., & Selvaraj, S. (2022a). A critical look at challenges and future scopes of bioactive compounds and their incorporations in the food, energy, and pharmaceutical sector. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 29, Issue 24, pp. 35518–35541). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19423-4>
- Pai, S., Hebbar, A., & Selvaraj, S. (2022b). A critical look at challenges and future scopes of bioactive compounds and their incorporations in the food, energy, and pharmaceutical sector. In *Environmental*

- Science and Pollution Research (Vol. 29, Issue 24, pp. 35518–35541). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19423-4>
- Pilafidis, S., Diamantopoulou, P., Gkatzionis, K., & Sarris, D. (2022). Valorization of Agro-Industrial Wastes and Residues through the Production of Bioactive Compounds by Macrofungi in Liquid State Cultures: Growing Circular Economy. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app122211426>
- Rather, J. A., Akhter, N., Ayaz, Q., Mir, S. A., Singh, A., Goksen, G., Majid, D., Makroo, H. A., & Dar, B. N. (2023a). Fruit Peel Valorization, Phytochemical Profile, Biological Activity, and Applications in Food and Packaging Industries: Comprehensive Review. *Current Food Science and Technology Reports*, 1(2), 63–79. <https://doi.org/10.1007/s43555-023-00007-3>
- Rather, J. A., Akhter, N., Ayaz, Q., Mir, S. A., Singh, A., Goksen, G., Majid, D., Makroo, H. A., & Dar, B. N. (2023b). Fruit Peel Valorization, Phytochemical Profile, Biological Activity, and Applications in Food and Packaging Industries: Comprehensive Review. *Current Food Science and Technology Reports*, 1(2), 63–79. <https://doi.org/10.1007/s43555-023-00007-3>
- Shafiei Pour, Davood, Aslani, Farshid, Bahmani, Akbar. "Investigating the impact of green entrepreneurial orientation and dynamic capabilities on business sustainable performance, with the mediating role of green innovation performance." *Entrepreneurial Strategies in Agriculture*, 2024; 10(2): 30-15. DOI: 10.61186/jea.10.20.14
- Alalwan, T. A., Mohammed, D., Hasan, M., Sergi, D., Ferraris, C., Gasparri, C., Rondanelli, M., & Perna, S. (2022). Almond, Hazelnut, and Pistachio Skin: An Opportunity for Nutraceuticals. *Nutraceuticals*, 2(4), 300–310. <https://doi.org/10.3390/nutraceuticals2040023>
- Singh, J., Rasane, P., Kaur, R., Kaur, H., Garg, R., Kaur, S., Ercisli, S., Choudhary, R., Skrovankova, S., & Mlcek, J. (2023). Valorization of grape (*Vitis vinifera*) leaves for bioactive compounds: novel green extraction technologies and food-pharma applications. In *Frontiers in Chemistry* (Vol. 11). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1290619>
- Sorrenti, V., Burò, I., Consoli, V., & Vanella, L. (2023). Recent Advances in Health Benefits of Bioactive Compounds from Food Wastes and By-Products: Biochemical Aspects. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 24, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijms24032019>
- Toghiani, J., Fallah, N., Nasernejad, B., Mahboubi, A., Taherzadeh, M. J., & Afsham, N. (2023a). Sustainable Pistachio Dehulling Waste Management and Its Valorization Approaches: A Review. In *Current Pollution Reports* (Vol. 9, Issue 1, pp. 60–72). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40726-022-00240-9>
- Toghiani, J., Fallah, N., Nasernejad, B., Mahboubi, A., Taherzadeh, M. J., & Afsham, N. (2023b). Sustainable Pistachio Dehulling Waste Management and Its Valorization Approaches: A Review. In *Current Pollution Reports* (Vol. 9, Issue 1, pp. 60–72). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40726-022-00240-9>
- Toghiani, J., Fallah, N., Nasernejad, B., Mahboubi, A., Taherzadeh, M. J., & Afsham, N. (2023c). Sustainable Pistachio Dehulling Waste Management and Its Valorization Approaches: A Review. In *Current Pollution Reports* (Vol. 9, Issue 1, pp. 60–72). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40726-022-00240-9>
- Zibaei-Rad, A., Rahmati-Joneidabad, M., Alizadeh Behbahani, B., & Taki, M. (2024). Probiotic-loaded seed mucilage-based edible coatings for fresh pistachio fruit preservation: an experimental and modeling study. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-51129-6>

Review of Biological Properties of Pistachio Shell and Nanotechnology Applications in Cosmetics

Nastaran Marzban Panah Maklavani¹, Saeed Karimi^{2*}

1. PhD Student in Environmental Planning, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: nastaran.marzban@ut.ac.ir
2. Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: karimis@ut.ac.ir

(Received: 2025/05/28

Accepted: 2025/10/25)

Abstract

Rapid population growth and economic pressures have intensified demands on natural resources, highlighting the importance of sustainable development and optimal management of natural and human resources. Agricultural waste, particularly pistachio shells, represents a significant environmental and economic challenge, especially in Iran, a major global producer of pistachios. Mismanagement of this abundant waste not only leads to severe environmental issues like soil and water contamination but also results in the loss of potentially valuable resources. Pistachio shells contain significant amounts of bioactive compounds, including polyphenols, flavonoids, and antioxidants, known for their anti-inflammatory, antibacterial, and antioxidant properties. Global experiences, such as the successful use of fruit waste in India and China, highlight the potential of agricultural byproducts as sustainable economic resources. However, despite laboratory studies confirming the biological potential of pistachio shells, extensive industrial application remains limited in Iran. This review comprehensively examines past studies focusing on the extraction methods of bioactive compounds from pistachio shells, emphasizing innovative technologies like supercritical fluid extraction, microwave-assisted extraction, and nanotechnology-based processes. Additionally, it proposes the novel idea of utilizing nanotechnology to develop organic and eco-friendly cosmetic products from pistachio waste. By leveraging these modern techniques, the initiative aims not only to mitigate environmental pollution but also to introduce sustainable, profitable, and internationally competitive cosmetic products. Ultimately, this approach presents an opportunity to enhance environmental sustainability and foster economic growth, demonstrating the high potential of agricultural waste in the circular economy model.

Keywords: Pistachio, Waste, Polyphenols, Antioxidants, Nanotechnology