



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

مقایسه‌ی روش‌های استخراج به کمک فراصوت، مایکروویو و ماسراسیون بر میزان ترکیبات فنولی و

فعالیت آنتی‌اکسیدانی پوست سیب و موز

حمیده شفاهی^۱، لیلا نوری^۱، علی نجفی^{۱*}، سیدمهدی جعفری^۲

۱-گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

۲-گروه مهندسی مواد غذایی و طراحی فرآیند، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۳-مرکز تحقیقات حلال جمهوری اسلامی ایران، اداره کل غذا و دارو، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

پوست میوه‌ها به عنوان یکی از محصولات جانبی صنایع فرآوری میوه، منبعی از ترکیبات زیست فعال به ویژه فنول‌های دارای خواص آنتی‌اکسیدانی هستند و می‌توانند در توسعه ترکیبات طبیعی مورد استفاده در سیستم‌های غذایی کاربرد داشته باشند. هدف این پژوهش، مقایسه کارایی سه روش استخراج شامل ماسراسیون، فراصوت و مایکروویو در بازیابی ترکیبات فنولی و ارزیابی فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌های پوست سیب و موز بود. پس از استخراج، محتوای فنول کل و فلاونوئید کل اندازه‌گیری و فعالیت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از آزمون‌های DPPH و FRAP ارزیابی شد. نتایج نشان داد عصاره‌های پوست سیب نسبت به پوست موز به طور معنی‌داری ($p < 0.05$) دارای مقادیر بالاتری از ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی بودند. بیشترین مقدار فنول کل در عصاره‌های استخراج شده به روش فراصوت مشاهده شد که برای پوست سیب و موز به ترتیب $48/16$ و $45/16$ (mg GAE/g DW) بود. همچنین بالاترین مقدار فلاونوئید کل در عصاره‌های فراصوتی پوست سیب و موز به ترتیب $28/45$ و $19/82$ (mg QE/g DW) مشاهده شد. نتایج آزمون DPPH نشان داد که عصاره‌های فراصوتی بیشترین فعالیت مهارکنندگی رادیکال آزاد را ایجاد کردند. در حالی که در آزمون FRAP، روش مایکروویو بالاترین قدرت احیاکنندگی را داشت، روش ماسراسیون در هر دو نمونه کمترین میزان ترکیبات فنولی، فلاونوئیدی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی را نشان داد. آنالیز HPLC حضور طیفی از ترکیبات فنولی، به ویژه فلاونوئیدها و مشتقات فلاوان-۳-اول را تأیید کرد و بین محتوای فنول کل، به ویژه فلاونوئید کل با فعالیت آنتی‌اکسیدانی همبستگی مثبت مشاهده شد. به طور کلی، فراصوت به عنوان کارآمدترین روش برای افزایش بازیابی ترکیبات فنولی و تقویت فعالیت مهارکنندگی رادیکال‌های آزاد بود، در حالی که مایکروویو بیشترین اثر را بر قدرت احیاکنندگی داشت. این یافته‌ها بیانگر پتانسیل قابل توجه پوست سیب و موز به عنوان منابع طبیعی آنتی‌اکسیدان برای کاربرد در سیستم‌های غذایی و توسعه ترکیبات زیست فعال است.

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۸

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

کلمات کلیدی:

محصولات جانبی میوه،

استخراج به کمک فراصوت؛

استخراج به کمک مایکروویو؛

ترکیبات فنولی؛

فعالیت آنتی‌اکسیدانی

DOI: 10.48311/fsct.2026.117140.82912

* مسئول مکاتبات:

Ali.Najafi@iaui.ac.ir

۱- مقدمه

منابع گیاهی و محصولات جانبی غذایی به خود جلب کرده‌اند [۴، ۵]. در روش استخراج فراصوت، پدیده کاویتاسیون می‌تولند تخریب ساختار بافتی و تسهیل آزادسازی ترکیبات درون سلولی شود، در حالی که در استخراج مایکروویو، گرمایش دی‌الکتریک باعث تسریع انتقال جرم و در نتیجه افزایش کارایی استخراج ترکیبات زیست‌فعال شود [۱۲، ۱۳].

با وجود گزارش‌های متعدد درباره استخراج ترکیبات زیست‌فعال از منابع گیاهی مختلف، مقایسه مستقیم و جامع کارایی روش‌های مختلف استخراج در بازیابی ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی از محصولات جانبی میوه‌ها هنوز محدود است. به‌ویژه، مطالعات لندکی به ارزیابی هم‌زمان کارایی ماسراسیون، استخراج به کمک فراصوت (UAE) و استخراج به کمک مایکروویو (MAE) در استخراج ترکیبات زیست‌فعال از پوست سیب و موز و ارتباط آن با فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌های حاصل پرداخته‌اند [۱۴، ۱۵]. از این رو، هدف این پژوهش مقایسه این سه روش استخراج در بازیابی ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی و ارزیابی فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌های حاصل از پوست سیب و موز بود. همچنین فرض شد که روش‌های استخراج کمی، به‌ویژه UAE و MAE، در مقایسه با روش متداول ماسراسیون، بازده استخراج بالاتری از ترکیبات زیست‌فعال فراهم کنند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

موز رسیده با پوست زرد واریته کاوندیش پاکوتاه^۱ و سیب واریته رد دلشز^۲ از بازار محلی تهیه شد. میوه‌ها ابتدا با آب جاری شستشو داده شدند تا آلودگی‌ها و ذرات خارجی سطحی حذف گردند. سپس پوست میوه‌ها با استفاده از چاقوی تیز جدا شده و در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در یک آون خشک شدند. پس از آن، پوست‌ها توسط آسیاب

میوه‌ها و محصولات جانبی حاصل از فرآوری آن‌ها، به‌ویژه پوست، از منابع مهم ترکیبات زیست‌فعال از جمله ترکیبات فنولی و فلاونوئیدها به شمار می‌روند که می‌توانند در توسعه آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی و مواد عملکردی استفاده شوند [۱، ۲، ۳]. با توجه به حجم بالای محصولات جانبی تولیدشده در زنجیره فرآوری و مصرف میوه، بازیابی ترکیبات با ارزش افزوده از این ماتریکس‌ها به‌عنوان راهبردی همسو با کاهش بار زیست‌محیطی و ارزش‌افزایی پسماندهای غذایی مورد توجه قرار گرفته است [۴، ۵، ۶].

در میان محصولات جانبی میوه‌ها، پوست موز و پوست سیب به دلیل دارا بودن مقادیر قابل توجهی از ترکیبات فنولی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی، به‌عنوان منابع بالقوه‌ای برای بازیابی ترکیبات زیست‌فعال مورد توجه قرار گرفته‌اند. پوست موز به‌عنوان منبعی ارزشمند از فنول‌ها شناخته شده و عصاره حاصل از آن فعالیت آنتی‌اکسیدانی قابل توجهی نشان داده است [۷، ۸]. همچنین وجود برخی ترکیبات شاخص نظیر دوپامین در موز گزارش شده است [۸]. از سوی دیگر، پوست سیب حاوی طیف متنوعی از پلی‌فنول‌ها، از جمله پروسیانیدین‌ها، کلروژنیک اسید و فلوریدزین است و به‌عنوان منبعی بالقوه برای بازیابی آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی مطرح شده است [۹، ۱۰].

کارایی استخراج و بازیابی این ترکیبات زیست‌فعال تا حد زیادی به نوع روش استخراج مورد استفاده وابسته است [۴، ۵، ۱۱-۱۳]. روش‌های متداولی مانند ماسراسیون، اگرچه ساده و کم‌هزینه هستند، معمولاً با زمان استخراج طولانی‌تر و مصرف بیشتر حلال همراه‌اند [۱۱]. در مقابل، روش‌های استخراج سبز از جمله استخراج به کمک فراصوت (UAE) و استخراج به کمک مایکروویو (MAE) به دلیل بهبود انتقال جرم، کاهش زمان فرایند و کاهش مصرف حلال، توجه زیادی در استخراج ترکیبات فنولی از

2 - Red delicious

1 - Musa acuminata 'Dwarf Cavendish'

۴-۲- استخراج عصاره‌های پوست سیب و موز به روش

مایکروویو

برای استخراج عصاره‌های پوست سیب و موز به روش مایکروویو، از پروتکل‌های استاندارد شده برای استخراج از پوست میوه‌ها الهام گرفته شد [۱۸]. بدین صورت که ابتدا یک گرم از هر کدام از پودرها در نسبت 1 mL/g با حلال اتانول ۷۰ درصد مخلوط شد و استخراج توسط دستگاه مایکروویو (LG، کره جنوبی) انجام گرفت و شرایط استخراج ترکیبات فنلی (قدرت مایکروویو با توان 550 W به مدت ۱۶۵ ثانیه) بر اساس بررسی و مطالعه گزارش‌های قبلی از مواد گیاهی انتخاب شدند [۱۸]. سپس عصاره‌ها در دمای 4°C درجه سانتی‌گراد و در $10000 \times \text{g}$ به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ (Hettick، آلمان) شده و سوپرناتانت حاصله توسط اوپراتور روتاری در دمای 45°C درجه سانتی‌گراد تغلیظ گردید. عصاره‌ها در ظرف شیشه‌ای درب‌دار پوشیده شده با فویل ریخته شده و تا استفاده بعدی در فریزر نگهداری شدند.

۵-۲- اندازه‌گیری محتوای فنول کل عصاره‌ها

محتوای فنول کل (TPC^3) عصاره‌ها با استفاده از روش فولین-سیوکالتیو اندازه‌گیری شد. بدین صورت که پس از مخلوط کردن ۳۰ میکرولیتر از عصاره با ۱۵۰ میکرولیتر معرف فولین-سیوکالتیو (رقیق شده توسط آب مقطر در نسبت ۱ به ۱۰) و ۱۲۰ میکرولیتر کربنات سدیم ۷/۵ درصد، جهت توسعه رنگ، مخلوط‌ها در تاریکی به مدت ۴۵ دقیقه نگهداشته شدند و پس از آن جذب نوری مخلوط در مقابل شاهد (آب مقطر) در ۷۶۵ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر UV-VIS (UV-550; Jasco، ژاپن) ثبت شد و در نهایت با استفاده از منحنی استاندارد گالیک اسید، TPC عصاره‌ها به دست آمد [۱۶].

۶-۲- اندازه‌گیری محتوای فلاونوئید کل عصاره‌ها

برقی پودر شده و توسط الک دارای مش ۸۰۰ میکرون الک گردیدند. کلیه مواد شیمیایی مصرفی برای انجام آزمون‌ها در این تحقیق از شرکت مرک (آلمان) تهیه شد.

۲-۲- استخراج عصاره‌ها به روش ماسراسیون

برای استخراج عصاره‌ها به روش ماسراسیون و با اقتباس از روش گزارش شده توسط رنجها و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد [۱۳]. بدین منظور، پودر پوست میوه با نسبت $1:20 \text{ (w/v)}$ (گرم بر میلی‌لیتر حلال اتانول-آب ۷۰ درصد مخلوط گردید [۱۳]. مخلوط حاصل به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق (25°C درجه سانتی‌گراد) بر روی شیکر با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه قرار داده شد. سپس عصاره‌ها توسط کاغذ صافی واتمن شماره ۱ فیلتر شده و باقیمانده جامد مجدداً با حلال تازه شستشو داده شد. عصاره‌های جمع‌آوری شده توسط دستگاه روتاری اوپراتور (Heidolph، آلمان) در دمای 40°C درجه سانتی‌گراد تغلیظ گردیدند و تا زمان استفاده در فریزر نگهداری شدند.

۳-۲- استخراج عصاره‌های پوست سیب و موز به روش

فراصوت

عصاره‌های پوست سیب و موز با استفاده از روش استخراج به کمک فراصوت و بر اساس پروتکل گزارش شده توسط شفاهی و همکاران (۲۰۲۵) تهیه شدند [۶]. بطور خلاصه، ۲۰ گرم از پودر خشک هر یک از نمونه‌های سیب و موز با حلال اتانول-آب ۵۰٪ (v/v) مخلوط شد. سپس مخلوط‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در حمام فراصوت (Bandelin Sonorex, Digitech، آلمان) با فرکانس ۲۰ kHz و در دمای 40°C درجه سانتی‌گراد تیمار شدند. عصاره‌های حاصل با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۱ فیلتر شده و سپس حلال آن‌ها توسط دستگاه روتاری اوپراتور (Heidolph، آلمان) در دمای 45°C درجه سانتی‌گراد تبخیر گردید. در نهایت عصاره‌های تغلیظ شده در دمای 18°C درجه سانتی‌گراد تا زمان استفاده بعدی نگهداری شدند.

مخلوط شده و عصاره (۱۰ میکرولیتر) به آن‌ها افزوده شد. مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه نگه‌داشته شده و سپس جذب آن در ۵۹۳ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر UV-VIS (Jasco; 550, 550) ثبت گردید [۱۴].

۹-۲- کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) عصاره‌ها به‌منظور شناسایی و تعیین ترکیبات فنولیک موجود در عصاره‌ها، آنالیز کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) با استفاده از دستگاه Agilent 1260 series (Wald, آلمان) انجام شد. جداسازی ترکیبات بر روی ستون معکوس فاز Eclipse C18 با ابعاد $4/6 \times 150$ میلی‌متر و اندازه ذرات $1/8 \mu\text{m}$ انجام شد. فاز متحرک شامل آب به‌عنوان حلال A و محلول ۰/۰۵ درصد اسید تری‌فلورو استیک (TFA) در استونیتریل به‌عنوان حلال B بود که با نرخ جریان ثابت ۰/۹ میلی‌لیتر بر دقیقه در سیستم پمپ شد. برنامه گرادیان فاز متحرک به‌صورت خطی طراحی گردید؛ به‌گونه‌ای که در ابتدای آنالیز (زمان صفر) نسبت حلال A برابر با ۸۲ درصد بود و طی ۵ دقیقه نخست به ۸۰ درصد کاهش یافت. سپس از دقیقه ۵ تا ۸ این مقدار به ۶۰ درصد رسید و این شرایط از دقیقه ۸ تا ۱۲ بدون تغییر حفظ شد. در مرحله بعد، از دقیقه ۱۲ تا ۱۵ سهم حلال A مجدداً به ۸۲ درصد افزایش داده شد و این نسبت از دقیقه ۱۵ تا ۱۶ ثابت باقی ماند و تا پایان زمان آنالیز (۲۰ دقیقه) ادامه یافت. آشکارسازی ترکیبات توسط آشکارساز چندطول‌موجی در طول موج ۲۸۰ نانومتر انجام شد. حجم تزریق هر نمونه ۵ میکرولیتر در نظر گرفته شد و دمای ستون در طول فرآیند جداسازی در ۴۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه‌داشته شد [۶]. شناسایی ترکیبات فنولی با مقایسه زمان بازداری پیک‌ها با استانداردهای خالص مورد نظر که تحت شرایط کروماتوگرافی مشابه تزریق شده بودند انجام گرفت. درصد نسبی هر ترکیب بر اساس نرمال‌سازی مساحت پیک‌ها در کروماتوگرام محاسبه شد و نتایج به صورت درصد مساحت نسبی پیک گزارش گردید.

۱۰-۲- آنالیز آماری داده‌ها

محتوای فلاونوئید کل (TFC) عصاره‌ها توسط روش کلرید آلومینیوم اندازه‌گیری شد. بدین صورت که ابتدا ۰/۰۱ گرم عصاره در ۵ میلی‌لیتر اتانول حل شده و سپس یک میلی‌لیتر از آن در داخل یک بالن حجمی ۱۰ میلی‌لیتری با آب مقطر (۴ میلی‌لیتر) مخلوط گردید و به آن ۰/۳ میلی‌لیتر نیتريت سدیم (۵ درصد) اضافه گردید. مخلوط به مدت ۵ دقیقه نگه‌داشته شده و سپس به آن ۰/۳ میلی‌لیتر محلول کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد اضافه گردید. پس از گذشت ۶ دقیقه به مخلوط ۲ میلی‌لیتر محلول هیدروکسید سدیم ۱ مولار افزوده شد. حجم بالن با استفاده از آب مقطر به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد و در آخر جذب آن در ۴۱۵ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر UV-VIS (Jasco; 550, UV) ثبت گردید. با استفاده از منحنی استاندارد کوئرتستین، TFC عصاره‌ها بر حسب mg QE/g DW به دست آمد [۱۳].

۷-۲- اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها به روش DPPH

برای بررسی فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها به روش مهار رادیکال DPPH، ابتدا عصاره (۵۰ میکرولیتر) با ۱/۹۵ میلی‌لیتر محلول DPPH با غلظت ۰/۱۳mM مخلوط شده و پس از قرارگیری محلول‌ها در دمای اتاق به مدت ۳۰ دقیقه و ثبت جذب آن‌ها در ۵۱۷ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر UV-VIS (Jasco; 550, UV) ثبت گردید. درصد مهار رادیکال DPPH از طریق رابطه (۱) محاسبه شد. در این رابطه: A_c و A_s به ترتیب جذب شاهد و جذب نمونه بودند [۱۷].

$$\text{DPPH (\%)} = \frac{A_c - A_s}{A_c} \times 100 \quad \text{رابطه ۱-}$$

۸-۲- اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها به روش FRAP

برای بررسی فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها به روش FRAP، ابتدا محلول ۰/۰۲ مولار $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ در آب، محلول ۰/۰۱ مولار TPTZ در هیدروکلریک اسید ۰/۰۴ مولار و بافر فسفات ۰/۳ مولار دارای $\text{pH}=3/6$ آماده‌سازی شد و سپس این محلول‌ها در نسبت ۱ : ۱ : ۱۰ با یکدیگر

آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار مستقل برای هر تیمار انجام شد. داده‌ها ابتدا از نظر نرمال بودن توزیع با آزمون Shapiro-Wilk و از نظر همگنی واریانس‌ها با آزمون Levene نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۲.۰، شرکت IBM، ایالات متحده آمریکا) بررسی شدند. برای تعیین اختلاف معنی‌دار بین تیمارها از تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) و مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن به عنوان آزمون تعقیبی در سطح احتمال ۰/۰۵ انجام شد ($p < 0/05$). همبستگی بین مقادیر TPC، TFC و شاخص‌های فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH و FRAP) نیز با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد. نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شدند. نمودارها توسط نرم‌افزار اکسل (نسخه ۲۰۱۹) ترسیم گردیدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محتوای فنول کل عصاره‌ها (TPC)

نتایج این مطالعه نشان داد که محتوای فنول کل (TPC) در عصاره‌های به دست آمده از پوست سیب به طور معنی‌داری بالاتر از پوست موز بود و روش استخراج نیز تأثیر معنی‌داری بر میزان بازیابی این ترکیبات داشت ($p < 0/05$). همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، میانگین TPC عصاره‌های حاصل از پوست موز و سیب استخراج شده با روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. در میان روش‌های مورد بررسی، برای هر دو منبع گیاهی بیشترین مقدار فنول کل در عصاره‌های استخراج شده به روش فراصوت مشاهده شد؛ به طوری که مقادیر TPC برای پوست موز و پوست سیب به ترتیب $45/16$ و $48/16$ میلی گرم معادل اسید گالیک بر گرم وزن خشک (mg GAE/g DW) به دست آمد. در مقابل، کمترین مقادیر TPC مربوط به عصاره‌های حاصل از روش ماسراسیون بود که برای پوست موز و پوست سیب به ترتیب $40/06$ و $41/39$ (mg GAE/g DW) گزارش شد. در روش مایکروویو نیز مقادیر قابل توجهی از ترکیبات فنولی استخراج شد؛ به طوری که

مقادیر TPC برای پوست سیب و موز به ترتیب حدود $46/23$ و $42/95$ (mg GAE/g DW) به دست آمد. این نتایج بیانگر آن است که روش‌های استخراج کمکی، به ویژه فراصوت و مایکروویو، کارایی بهتری در افزایش بازده استخراج ترکیبات فنولی نسبت به روش سنتی ماسراسیون دارند.

کارایی بالاتر استخراج فراصوت را می‌توان به پدیده کاویتاسیون نسبت داد که با ایجاد و فروپاشی حباب‌های ریز در محیط استخراج، موجب تخریب دیواره سلولی، افزایش نفوذپذیری بافت گیاهی و در نهایت بهبود انتقال جرم و رهایش ترکیبات فنولی به فاز حلال می‌شود [۲۱، ۲۰]. روش مایکروویو نیز کارایی مناسبی در استخراج ترکیبات فنولی نشان داد که احتمالاً ناشی از گرم شدن سریع و یکنواخت حلال و ماتریکس گیاهی در اثر انرژی مایکروویو و در نتیجه تسهیل انتقال ترکیبات زیست فعال به محیط استخراج است [۲۲].

برتری مشاهده شده برای روش‌های استخراج کمکی، به ویژه فراصوت، با گزارش‌های پیشین در ماتریکس‌های گیاهی مختلف هم‌خوانی دارد و تأیید می‌کند که این روش‌ها در افزایش بازده استخراج ترکیبات فنولی در مواد گیاهی مؤثرند؛ به طوری که افزایش بازده استخراج ترکیبات فنولی در مقایسه با روش‌های متداول برای نمونه‌هایی مانند سیب، پوست لیمو و بره‌موم گزارش شده است [۱۸، ۲۳، ۲۴، ۲۵]. همچنین، در مورد پوست سیب نیز نشان داده شده است که مقدار TPC به نوع حلال و روش استخراج وابسته بوده و در سامانه اتانول-آبی، فراصوت می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به ماسراسیون داشته باشد [۱۳]. این هم‌راستایی نشان می‌دهد که بهبود بازیابی ترکیبات فنولی در مطالعه حاضر احتمالاً ناشی از کارایی بیشتر روش‌های کمکی در تسهیل انتقال جرم و رهایش ترکیبات از بافت گیاهی است. با این حال، مقادیر گزارش شده برای TPC در پوست موز در مطالعات مختلف دامنه وسیعی را نشان می‌دهد که این

۳-آل‌ها و اسیدهای فنولی هستند که حضور آن‌ها می‌تواند نقش مهمی در فعالیت آنتی‌اکسیدانی این منابع گیاهی داشته باشد [۸،۲۲].

تفاوت می‌تواند ناشی از نوع حلال، شرایط استخراج، نسبت جامد به حلال و همچنین روش بیان نتایج باشد [۲۶]. افزون بر این، پوست سیب و موز حاوی طیف متنوعی از ترکیبات فنولی از جمله فلاونول‌ها، آنتوسیانین‌ها، فلاوان-

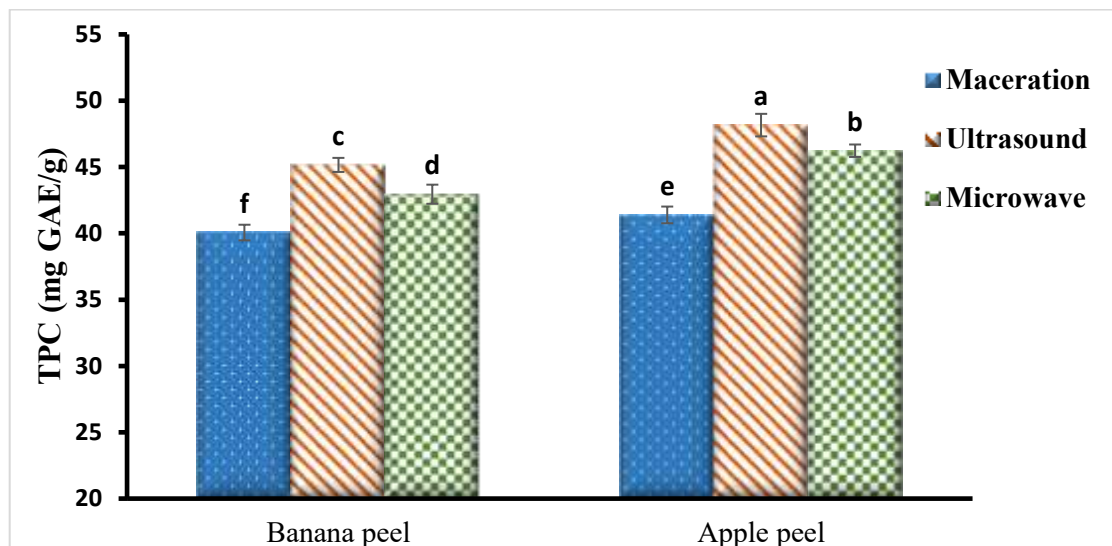


Figure 1. Total Phenolic Content (TPC) of apple and banana peel extracts obtained by maceration, ultrasound-assisted extraction (UAE) and microwave-assisted extraction (MAE). Different letters indicate statistically significant differences at the 5% level.

نسبت به روش فراصوت ($19/82 \text{ mg QE/g DW}$) کم بود. کمترین میزان استخراج در هر دو روش مربوط به روش متداول ماسراسیون بود. تفاوت در کارایی روش‌های استخراج را می‌توان به مکانیسم‌های فیزیکی مؤثر بر آزادسازی ترکیبات زیست‌فعال نسبت داد. در روش فراصوت، پدیده کاویتاسیون با ایجاد و فروپاشی حباب‌های میکروسکوپی در محیط استخراج موجب تخریب دیواره‌های سلولی و تسهیل انتقال جرم ترکیبات فلاونوئیدی به حلال می‌شود. علاوه بر این، انجام استخراج در دماهای نسبتاً پایین‌تر می‌تواند به حفظ ترکیبات حساس به حرارت کمک کرده و در نتیجه بازده استخراج را افزایش دهد [۲۸، ۲۹]. در مقابل، مکانیسم استخراج مایکروویو مبتنی بر گرمایش درونی و لحظه‌ای است که باعث افزایش فشار داخلی و شکستن سریع ماتریکس گیاهی می‌شود [۱۲]. به نظر می‌رسد ساختار فیبری و مقاوم‌تر پوست موز، در برابر این مکانیسم گرمایشی مایکروویو، پاسخ بهتری داده و رهایش فلاونوئیدها را به‌طور مؤثرتری امکان‌پذیر ساخته است [۸].

۲-۳- محتوای فلاونوئید کل عصاره‌ها (TFC)
فلاونوئیدها، یکی از مهم‌ترین زیرگروه‌های ترکیبات فنولی در گیاهان هستند که به دلیل دارا بودن فعالیت‌های زیستی متنوع از جمله خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدباکتریایی و ضدسرطانی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۷]. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر نوع ماده گیاهی، روش استخراج و اثر متقابل این دو عامل بر محتوای فلاونوئید کل عصاره‌ها معنی‌دار بود ($p < 0/05$) همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مقدار فلاونوئید کل در عصاره‌های حاصل از پوست سیب در تمامی روش‌های استخراج به‌طور معنی‌داری بیشتر از پوست موز بود ($p < 0/05$). نتایج نشان داد که کارایی روش‌های استخراج به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع ماده گیاهی قرار گرفت. به طوری که برای پوست سیب، روش فراصوت با اختلاف آماری معنی‌داری بالاترین بازده استخراج را داشت ($28/45 \text{ mg QE/g DW}$)، در حالی که برای پوست موز، روش مایکروویو توانست بطور معنی‌داری بیشترین مقدار فلاونوئید را استخراج کند ($20/39 \text{ mg QE/g DW}$)، اگرچه لین برتری از نظر عددی

علاوه بر نوع ماده گیاهی و روش استخراج، شرایط آماده‌سازی نمونه پیش از استخراج نیز می‌تواند بر بازده استخراج فلاونوئیدها اثرگذار باشد. فرایندهایی مانند خشک‌کردن و آسیاب‌کردن از طریق تغییر ساختار سلولی، دسترسی حلال به هاتریکس گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۳۷]. در پوست موز با ساختار لیگنوسلولزی متراکم، این فرایندها می‌توانند نقش مهم‌تری در آزادسازی ترکیبات زیست‌فعال نسبت به پوست سیب با ساختار متخلخل‌تر داشته باشند [۳۸]، که می‌تواند بخشی از تفاوت‌های مشاهده‌شده در محتوای فلاونوئید کل بین این دو منبع گیاهی را توضیح دهد.

نتایج این پژوهش با گزارش‌های پیشین نیز هم‌خوانی دارد. به عنوان مثال، این یافته که فراصوت برای استخراج فلاونوئیدها از منابع حساس به حرارت برتر است، با نتایج هانولا و همکاران (۲۰۲۰) روی توت آکای^۱ مطابقت دارد [۲۸]. همچنین، شناسایی ترکیباتی مانند هایپروزید، ایزوکوئرستین و کاتچین‌ها در پوست سیب [۲۲،۳۰] که همگی می‌توانند در برابر حرارت تجزیه شوند، فرضیه برتری فراصوت برای این ماده گیاهی را تقویت می‌کند. در نهایت، باید در نظر داشت که عواملی مانند واریته، درجه رسیدگی میوه، شرایط اقلیمی، روش آماده‌سازی نمونه و شرایط استخراج نیز بر مقادیر گزارش‌شده در تحقیقات مختلف تأثیرگذار هستند [۳۰].

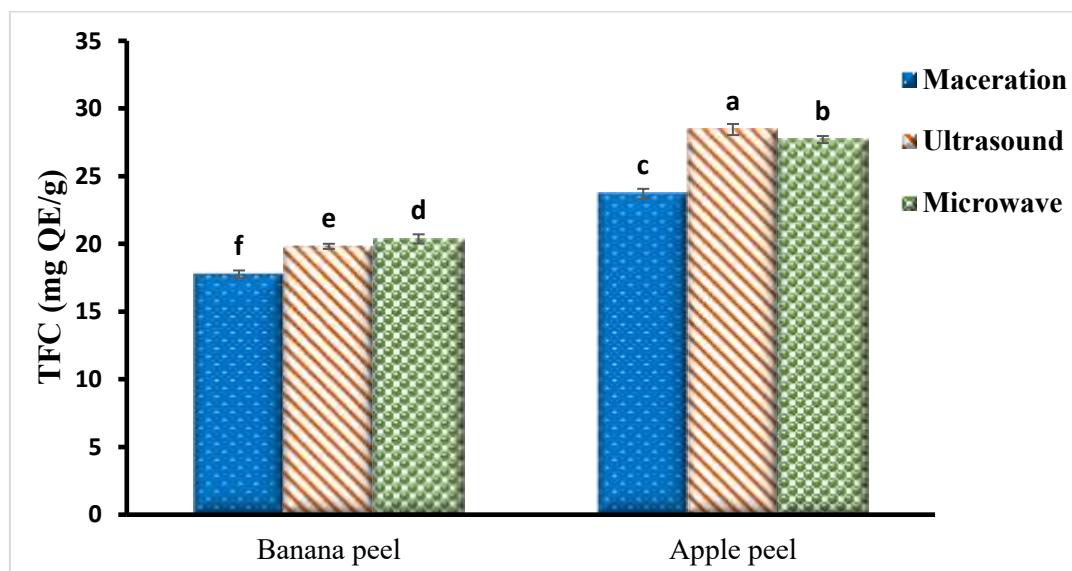


Figure 2. Total flavonoid content (TFC) of apple and banana peel extracts obtained by maceration, UAE and MAE. Different letters indicate statistically significant differences at the 5% level.

۳-۳- فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH و FRAP) عصاره‌ها داشتند ($p < 0.05$).

آزمون DPPH بر اساس توانایی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی در اهدای اتم هیدروژن یا انتقال الکترون به رادیکال پایدار DPPH[•] و خنثی‌سازی آن انجام می‌شود. در شکل ۳ میانگین مقادیر درصد فعالیت مهارکنندگی رادیکال DPPH در عصاره‌های پوست موز و سیب استخراج شده با

۳-۳- فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها

در این پژوهش، فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌های پوست سیب و موز با استفاده از دو آزمون مهار رادیکال آزاد DPPH و توان احیاکنندگی آهن (FRAP) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که نوع منبع گیاهی، روش استخراج و اثر متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر

موز تفاوت آماری معنی‌داری بین فعالیت مهارکنندگی رادیکال DPPH در روش‌های فراصوت و مایکروویو (۷۴/۲۴ درصد) مشاهده نشد ($p > 0.05$). کمترین میزان فعالیت مهارکنندگی در میان روش‌های مختلف استخراج مربوط به عصاره‌های پوست موز و پوست سیب استخراج شده به روش ماسراسیون بود که به ترتیب ۶۸/۸۳ و ۷۴/۳۵ درصد بدست آمد.

روش‌های مختلف مقایسه شده است. نتایج نشان داد که فعالیت مهارکنندگی رادیکال در عصاره پوست سیب به طور معنی‌داری بیشتر از پوست موز بود ($p < 0.05$). در میان روش‌های مختلف استخراج، برای هر دو منبع گیاهی، بیشترین میزان فعالیت مهارکنندگی رادیکال DPPH در عصاره‌های استخراج شده با روش فراصوت مشاهده شد به طوری که این مقدار برای عصاره پوست موز و سیب به ترتیب ۷۶/۵۹ و ۸۸/۴۷ درصد بود. با این حال، مطابق نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن، در مورد عصاره پوست

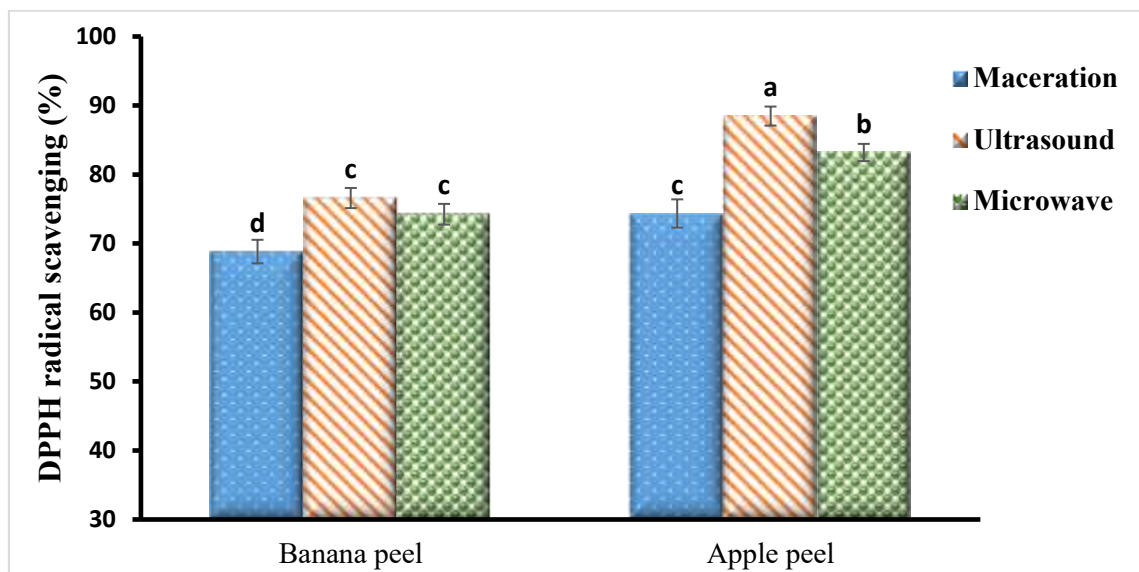


Figure 3. DPPH radical scavenging values of banana and apple peel extracts obtained by maceration, UAE and MAE. Different letters indicate statistically significant differences at the 5% level.

اختلاف معنی‌داری وجود نداشت ($p > 0.05$). کمترین میزان FRAP در بین عصاره‌های پوست سیب مربوط به عصاره استخراج شده به روش ماسراسیون بود (۳۳/۲۸ درصد).

این نتایج با مقادیر بالاتر ترکیبات فنولی کل (TPC) و فلاونوئید کل (TFC) در عصاره‌های پوست سیب که در بخش‌های قبلی گزارش شد همخوانی دارد و نشان‌دهنده نقش مهم این ترکیبات در فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها است. فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتر عصاره‌ها را می‌توان به حضور بیشتر ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی و همچنین ساختار شیمیایی و الگوی گروه‌های عاملی آن‌ها نسبت داد، زیرا این ترکیبات از طریق اهدای هیدروژن یا الکترون و نیز چلاته کردن یون‌های فلزی در مهار اکسیداسیون نقش دارند

در شکل ۴ میانگین مقادیر FRAP عصاره‌های پوست موز و سیب استخراج‌های به روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. به طور کلی میزان FRAP عصاره پوست سیب به طور معنی‌داری بالاتر از پوست موز بود ($p < 0.05$). در بین روش‌های مختلف استخراج عصاره پوست موز، بالاترین میزان FRAP در عصاره استخراج شده به روش مایکروویو مشاهده گردید (۳۲/۶۹ درصد) و کمترین میزان آن مربوط به عصاره استخراج شده به روش ماسراسیون بود (۲۷/۸۹ درصد). در بین روش‌های مختلف استخراج عصاره پوست سیب نیز بالاترین میزان FRAP در عصاره استخراج شده به روش مایکروویو مشاهده گردید (۳۵/۸۱ درصد)، ولی بین این عصاره و عصاره استخراج شده به روش فراصوت (۳۵/۵۴ درصد) از لحاظ آماری

آزمون DPPH بیشتر بر توانایی ترکیبات در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد مبتنی است، در حالی که آزمون FRAP توان احیاکنندگی آن‌ها در انتقال الکترون را ارزیابی می‌کند.

[۳۱، ۳۲]. بنابراین، برتری عصاره‌های حاصل از فراصوت در آزمون DPPH و عملکرد مناسب عصاره‌های مایکروویوی در آزمون FRAP را می‌توان به تفاوت در نوع و میزان ترکیبات استخراج‌شده توسط هر روش نسبت داد، زیرا

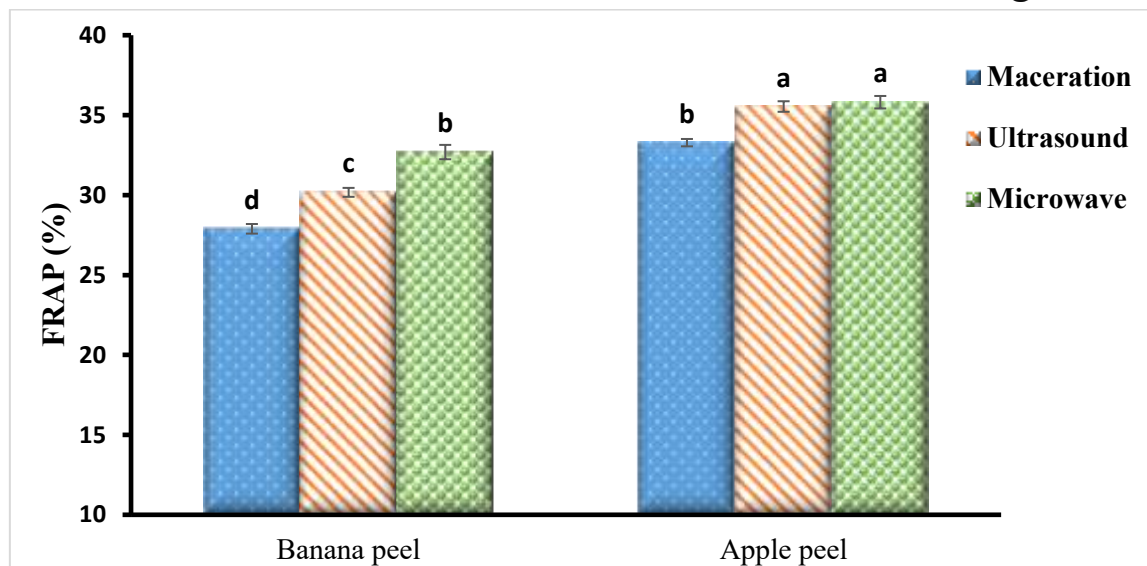


Figure 4. FRAP values of banana and apple peel extracts obtained by maceration, UAE and MAE. Different letters indicate statistically significant differences at the 5% level

۴-۳- پروفایل ترکیبات فنولی و ارتباط آن با فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها

پروفایل ترکیبات فنولی عصاره‌های حاصل از استخراج به کمک فراصوت با استفاده از آنالیز HPLC تعیین شد تا ترکیبات زیست‌فعال اصلی مسئول فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها شناسایی شوند. ترکیبات شناسایی‌شده، زمان بازداری و درصد نسبی آن‌ها در عصاره‌های پوست سیب (AE) و پوست موز (BE) در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج آنالیز کروماتوگرافی نشان داد که عصاره پوست سیب دارای ترکیب متنوعی از ترکیبات فنولی شامل اسید کلروژنیک، کاتچین، اپی‌کاتچین، پروسیانیدین، روتین، کوئرستین و فلوریدزین است. این ترکیبات از جمله پلی‌فنول‌های غالب گزارش‌شده در پوست سیب هستند و به دلیل فعالیت آنتی‌اکسیدانی قوی خود به‌خوبی شناخته شده‌اند [۳۹].

بر اساس داده‌های جدول ۱، ترکیبات فلاونوئیدی سهم غالبی از فنول‌های شناسایی‌شده در عصاره پوست سیب را

نتایج این بخش با گزارش‌های پیشین درباره فعالیت آنتی‌اکسیدانی قابل‌توجه پوست موز و سیب هم‌خوانی دارد [۸، ۹، ۲۶، ۳۴]. همچنین گزارش شده است که عصاره‌های حاصل از فراصوت در برخی ماتریکس‌های گیاهی مانند عصاره‌های پوست لیمو و همچنین عصاره‌های توت آکای به دلیل محتوای بالاتر ترکیبات فنولی، فعالیت مهار رادیکالی بیشتری داشته‌اند، در حالی که عصاره‌های مایکروویوی در برخی موارد توان احیاکنندگی بالاتری نشان داده‌اند [۱۸، ۲۸]. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده پتانسیل استفاده از این عصاره‌ها به عنوان منابع طبیعی آنتی‌اکسیدانی در فرمولاسیون فرآورده‌های غذایی است. در این راستا، مطالعات نشان داده‌اند که عصاره‌های استخراج‌شده از ماتریکس‌های گیاهی علاوه بر خواص آنتی‌اکسیدانی، کارایی قابل توجهی در افزایش ماندگاری فرآورده‌هایی همچون میوه‌ها، محصولات گوشتی و همچنین بهبود پایداری اکسیداتیو خامه زده شده دارند [۶، ۱۹، ۳۵، ۳۶].

اسیدهای فنولی نیز مقادیری از اسید پروتوکاتچونیک (۴۵٪/۹۵)، اسید کلروژنیک (۴۲٪/۱۰)، اسید گالیک (۲۱٪/۲) و اسید فرولیک (۶۶٪/۴) شناسایی شد. با وجود حضور این ترکیبات، مجموع فلاونوئیدها در عصاره پوست موز (۲۴٪/۱۶) به‌طور قابل توجهی کمتر از عصاره پوست سیب (۲۷٪/۶۳) بود (جدول ۱). این تفاوت در ترکیب فنولی می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در فعالیت آنتی‌اکسیدانی پایین‌تر مشاهده شده برای عصاره پوست موز در آزمون‌های DPPH و FRAP باشد.

علاوه بر این، ترکیباتی مانند اسید کلروژنیک، کوئرستین و اپی‌کاتچین که در عصاره پوست سیب با مقادیر قابل توجهی شناسایی شدند، به دلیل حضور گروه‌های هیدروکسیل آروماتیک قادر به اهدای الکترون و خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد هستند و به عنوان ترکیباتی با قدرت احیاکنندگی بالا شناخته می‌شوند [۳۹]؛ حضور این ترکیبات می‌تواند ظرفیت احیاکنندگی بیشتر مشاهده‌شده برای عصاره پوست سیب در آزمون FRAP را توضیح دهد. در مجموع، نتایج آنالیز HPLC نشان می‌دهد که تفاوت در نوع و فراوانی ترکیبات فنولی، به‌ویژه غلبه فلاونوئیدها در پوست سیب، نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار آنتی‌اکسیدانی عصاره‌های مورد مطالعه ایفا می‌کند.

تشکیل دادند، به‌طوری‌که کوئرستین با ۴۴/۳۵٪ بیشترین سهم را داشت و پس از آن میریستین (۲۲٪/۱۰)، کامفرول (۴۶٪/۳)، اپی‌کاتچین (۴۵٪/۲) و روتین (۹۷٪/۱) قرار گرفتند. در میان اسیدهای فنولی نیز اسید کلروژنیک با ۳۵٪/۹ یکی از ترکیبات شاخص شناسایی‌شده در این عصاره بود. همچنین حضور پروسیانیدین‌ها (۲۵٪/۱۱) نشان‌دهنده سهم قابل توجه فلاوان-۳-اول‌های الیگومری در ترکیب فنولی پوست سیب است. فلاوان-۳-اول‌ها مانند کاتچین، اپی‌کاتچین و فرم‌های الیگومری آن‌ها (پروسیانیدین‌ها) به دلیل دارا بودن چندین گروه هیدروکسیل در ساختار خود قادرند از طریق مکانیسم‌های انتقال الکترون و انتقال اتم هیدروژن در مهار مؤثر رادیکال‌های آزاد نقش ایفا کنند [۳۹]. بنابراین، فراوانی نسبتاً بالای این ترکیبات می‌تواند با مقادیر بالاتر فنول کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی قوی‌تر مشاهده‌شده برای عصاره پوست سیب در آزمون‌های DPPH و FRAP همخوانی داشته باشد.

در مقابل، پروفایل فنولی عصاره پوست موز با سهم بالاتر برخی اسیدهای فنولی و پروسیانیدین‌ها مشخص شد. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، پروسیانیدین با ۷۵٪/۴۰ یکی از ترکیبات غالب در این عصاره بود. در میان

Table 1. Phenolic profile of the extracts identified by HPLC analysis and their relative percentages (Apple and Banana peel extracts: AE and BE).

Phenolic category	Compounds	Retention time (min)	AE (%)	BE (%)
Phenolic acids				
	Protocatechuic acid	6.19	1.38	4.95
	p-Hydroxybenzoic acid	8.35	0.00	2.70
	Gallic acid	18.62	0.15	2.21
	Chlorogenic acid	15.23	9.35	1.42
	Vanillic acid	20.28	0.11	0.74
	Syringic acid	17.46	0.28	0.00
	Ferulic acid	27.36	0.63	4.66
	Ellagic acid	17.5	0.92	0.67
	Rosmarinic acid	24.45	0.00	3.48
	Subtotal		12.82	20.83
Flavonoids				

Catechin	11.25	0.82	4.45
Epicatechin	30.44	2.45	6.87
Rutin	32.57	1.97	1.88
Kaempferol	36.08	3.46	0.00
Quercetin	40.88	44.35	2.07
Myricetin	43.56	10.22	0.97
Subtotal		63.27	16.24
Proanthocyanidins			
Procyanidin	31.99	11.25	40.75
Subtotal		11.25	40.75
Other phenolics			
Phloridzin	47.29	2.11	4.85
Quinic acid	14.07	2.60	7.24
Homovanillic acid	23.19	0.05	0.20
Unknown		7.35	8.25
Subtotal		12.11	20.54
Total Phenolics		99.45	98.36

نتایج پروفایل فنولی به‌دست‌آمده از HPLC، حضور فلاونوئیدهایی مانند روتین، کوئرستین و مشتقات آن‌ها می‌تواند تا حد زیادی این همبستگی قوی بین TFC و شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی را توضیح دهد.

همچنین بین نتایج آزمون‌های DPPH و FRAP همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد ($r=0.818$, $p<0.01$)، که نشان می‌دهد هر دو آزمون توان آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها را ارزیابی می‌کنند، هرچند ممکن است حساسیت متفاوتی نسبت به انواع ترکیبات آنتی‌اکسیدانی داشته باشند. این تفاوت حساسیت می‌تواند به تفاوت در مکانیسم واکنش این آزمون‌ها و نوع ترکیبات فنولی غالب در عصاره‌ها مرتبط باشد؛ به‌عنوان مثال برخی ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی شناسایی شده در آنالیز HPLC ممکن است در واکنش‌های انتقال الکترون نقش مؤثرتری ایفا کنند.

همبستگی نسبتاً بالای ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی با شاخص‌های آنتی‌اکسیدانی نشان می‌دهد که این ترکیبات از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده فعالیت آنتی‌اکسیدانی در عصاره‌ها هستند. این نتایج با گزارش‌های پیشین درباره

۴-۴- همبستگی بین محتوای ترکیبات زیست‌فعال و فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها

ضرایب همبستگی پیرسون بین محتوای ترکیبات فنولی کل (TPC)، فلاونوئید کل (TFC) و فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی (DPPH و FRAP) عصاره‌های پوست موز و سیب در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که TPC و فعالیت مهارکنندگی رادیکال DPPH همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد ($r=0.939$, $p<0.01$). همچنین بین TPC و توان احیاکنندگی FRAP نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد ($r=0.682$, $p<0.01$)، که بیانگر نقش اصلی ترکیبات فنولی در فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها است.

علاوه بر این، فلاونوئید کل (TFC) همبستگی مثبت و معنی‌داری با فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی نشان داد، به‌طوری‌که ضرایب همبستگی بین TFC و آزمون‌های DPPH و FRAP به‌ترتیب برابر با ۰/۹۸۹ و ۰/۹۳۲ ($p<0.01$) بود. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیبات فلاونوئیدی سهم قابل توجهی در فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها دارند. مطابق با

در نوع و فراوانی ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی شناسایی شده در عصاره‌ها می‌تواند عامل اصلی تفاوت مشاهده‌شده در فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها باشد

نقش ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی در مهار رادیکال‌های آزاد و افزایش توان احیاکنندگی عصاره‌های گیاهی همخوانی دارد [۱۳، ۱۸، ۲۲، ۲۶]. در مجموع، ترکیب داده‌های همبستگی و نتایج HPLC نشان می‌دهد که تفاوت

Table 2. Pearson correlation coefficients (r) between TPC, TFC, DPPH radical scavenging activity and FRAP values of apple and banana peel extracts.

	TPC	TFC	DPPH	FRAP
TPC	1			
TFC	0.754**	1		
DPPH	0.939**	0.989**	1	
FRAP	0.682**	0.932**	0.818**	1

**Correlation is significant at the 0.01 level

معنی‌داری دارند که بیانگر نقش تعیین‌کننده این ترکیبات در فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها است. این یافته‌ها با نتایج حاصل از پروفایل ترکیبات فنولی نیز همخوانی داشته و نشان می‌دهد که حضور ترکیباتی مانند کاتچین‌ها، پروسیانیدین‌ها و فلاونوئیدهای مشتق از کوئرستین می‌تواند سهم قابل توجهی در فعالیت آنتی‌اکسیدانی مشاهده‌شده داشته باشد.

در مجموع، نتایج این مطالعه پتانسیل قابل توجه پوست سیب و موز را به‌عنوان منابع طبیعی ارزشمند ترکیبات آنتی‌اکسیدانی نشان می‌دهد و بیانگر آن است که این ضایعات میوه‌ای می‌توانند به‌عنوان منابع امیدوارکننده برای بازیابی ترکیبات زیست‌فعال مورد توجه قرار گیرند. علاوه بر این، کارایی بالای استخراج به کمک فراصوت در بازیابی ترکیبات فنولی نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد کارآمد، سریع و نسبتاً پایدار برای استخراج ترکیبات زیست‌فعال از ضایعات پوست میوه در کاربردهای بالقوه غذایی و دارویی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، دامنه این مطالعه به پوست دو نوع میوه و مجموعه محدودی از آزمون‌های سنجش فعالیت آنتی‌اکسیدانی محدود بود. بنابراین، انجام مطالعات آینده با تمرکز بر شناسایی دقیق‌تر ترکیبات زیست‌فعال، بررسی پایداری و زیست‌فراهمی آن‌ها، و ارزیابی عملکرد این عصاره‌ها در ماتریکس‌های واقعی غذایی یا سامانه‌های نگهدارنده طبیعی و بسته‌بندی

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که پوست سیب و موز به‌عنوان محصولات جانبی فراوری میوه، منابع قابل توجهی از ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی با فعالیت آنتی‌اکسیدانی هستند و بازده استخراج این ترکیبات به طور معنی‌داری تحت تأثیر روش استخراج قرار دارد. در میان روش‌های بررسی‌شده، استخراج به کمک فراصوت بیشترین بازده را در بازیابی ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی نشان داد، در حالی که استخراج به کمک مایکروویو بالاترین فعالیت احیاکنندگی را در آزمون FRAP ایجاد کرد. همچنین، عصاره پوست سیب در مقایسه با پوست موز از محتوای بالاتر ترکیبات زیست‌فعال و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بیشتری برخوردار بود. نتایج آنالیز HPLC نیز نشان داد که عصاره پوست سیب دارای تنوع و غلظت بالاتری از ترکیبات فنولی، به‌ویژه فلاوان-۳-اول‌ها و فلاونوئیدهایی مانند کاتچین، اپی‌کاتچین، پروسیانیدین‌ها، روتین و کوئرستین است، در حالی که در پوست موز غالب ترکیبات شناسایی‌شده را اسیدهای فنولی تشکیل می‌دهند. این تفاوت در ترکیب فنولی می‌تواند تا حد زیادی فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتر مشاهده‌شده در عصاره پوست سیب را توضیح دهد. علاوه بر این، نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که محتوای فنول کل و به‌ویژه فلاونوئید کل با شاخص‌های فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH و FRAP) همبستگی مثبت و

بیانیه تامین مالی

نویسنده اعلام می کند که هیچ بودجه ای دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمام فعالیت ها توسط نویسنده انجام شده است.

۵-منابع

- [1] Munekata, P. E. S., Pateiro, M., Tomasevic, I., Domínguez, R., Lorenzo, J. M., & Barba, F. J. (2023). Bioactive compounds from fruits as preservatives. *Foods*, 12(2), 343. <https://doi.org/10.3390/foods12020343>
- [2] Mugerloo, Z., A. H. A. R., & Najafi, A. (2016). Study of antioxidant effect of ethanolic extract of olive oil on oxidative stability of soybean oil in comparison with some chemical antioxidants. *Journal of Innovation in Food Science and Technology*, 8(3), 9–18.
- [3] Selahvarzi, A., Bahrami, A., & Ahmadi, A. (2021). Investigation of antimicrobial activity of orange and pomegranate peels extracts and their use as a natural preservative in a functional beverage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(6), 5683–5694. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01065-4>
- [4] Martins, R., Teixeira, J. A., Mussatto, S. I., & Rodrigues, L. R. (2023). Green extraction techniques of bioactive compounds: A state-of-the-art review. *Processes*, 11(8), 2255. <https://doi.org/10.3390/pr11082255>
- [5] Diwathe, M. C., Mazumdar, B., & Jayapal, A. (2024). Valorization of vegetable waste to valuable bioactive compounds by using various extraction methods. In *From waste to wealth* (pp. 1139–1177). Springer Nature Singapore.
- [6] Shafahi, H., Nouri L., Jafari S.M. & Najafi, A. (2025). The impact of free and nanoencapsulated banana and apple peel extracts on the physicochemical, oxidative stability, microbial and sensory properties of whipped cream. *Food Science & Nutrition*, 13(7), e70652. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70652>
- [7] Ansari, N. A. I. M., Yusof, Y. A., Rahman, N. A., & Hashim, N. (2023). Nutritional content and bioactive compounds of banana peel and its potential utilization: A review. *Malaysian Journal of Science Health & Technology*, 9(1), 74–86.
- [8] Vu, H. T., Scarlett, C. J., & Vuong, Q. V. (2018). Phenolic compounds within banana peel and their potential uses: A review. *Journal of Functional Foods*, 40, 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.11.006>
- [9] Brahmi, F., Mechri, B., Dabbou, S., Dhibi, M., & Hammami, M. (2021). Optimization of some extraction parameters of phenolic content from apple peels and grape seeds and enrichment of yogurt by their powders: A comparative study. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(2), e15126. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15126>
- [10] Radenkova, V., Püssa, T., Juhnevica-Radenkova, K., Anton, D., & Segliņa, D. (2020). Wild apple (*Malus* spp.) by-products as a source of phenolic compounds and vitamin C for food applications. *Food Bioscience*, 38, 100744. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100744>
- [11] Zaky, A. A., Simal-Gandara, J., Barba, F. J., & Lorenzo, J. M. (2024). Bioactive compounds from plants and by-products: Novel extraction methods, applications, and limitations. *AIMS Molecular Science*, 11(2), 150–188. <https://doi.org/10.3934/molsci.2024010>
- [12] Lozano Pérez, A. S., Lozada Castro, J. J., & Guerrero Fajardo, C. A. (2024). Application of microwave energy to biomass: A comprehensive review of microwave-assisted technologies, optimization parameters, and the strengths and weaknesses. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(3), 121. <https://doi.org/10.3390/jmmp8030121>
- [13] Ranjha, M. M. A. N., rfan, S., Nadeem, M., & Mahmood, S. (2020). Extraction of polyphenols from apple and pomegranate peels employing different extraction techniques for the development of functional date bars. *International Journal of Fruit Science*, 20(3), 1201–1221. <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1833830>
- [14] Safarpour, B., Kenari, R. E., & Farmani, J. (2023). Evaluation of antioxidant

فعال می تواند در جهت توسعه کاربردهای صنعتی این منابع طبیعی مفید باشد.

دسترسی به داده ها

بنا به درخواست در دسترس قرار خواهند گرفت.

تضاد منافع

نویسنده تأیید می کند که هیچ گونه تضاد منافع مالی یا منافع رقابتی در این مطالعه ندارد

- properties of nanoencapsulated sage (*Salvia officinalis* L.) extract in biopolymer coating based on whey protein isolate and Qodumeh Shahri (*Lepidium perfoliatum*) seed gum to increase the oxidative stability of sunflower oil. *Food Science & Nutrition*, 11(3), 1394–1402. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3759>
- [15] Da Silva, L. C., Souza, A. B., Tomé, A. C., & Souza, F. M. (2021). Recent advances and trends in extraction techniques to recover polyphenols compounds from apple by-products. *Food Chemistry: X*, 12, 100133. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100133>
- [16] Trujillo-Mayol, I., Céspedes-Acuña, C., Silva, F. L., & Alarcón-Enos, J. (2019). Improvement of the polyphenol extraction from avocado peel by assisted ultrasound and microwaves. *Journal of Food Process Engineering*, 42(6), e13197. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13197>
- [17] Esmacili, F., Khodaiyan, F., Hosseini, S. S., & Jafari, S. M. (2024). Active coating based on carboxymethyl cellulose and flaxseed mucilage, containing burdock extract, for fresh-cut and fried potatoes. *LWT*, 192, Article 115726. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115726>
- [18] Rodsamran, P., & Sothornvit, R. (2019). Extraction of phenolic compounds from lime peel waste using ultrasonic-assisted and microwave-assisted extractions. *Food Bioscience*, 28, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.12.002>
- [19] Hassani, B., Ebrahimi, F., Najafi, A., & Ziaolhagh, S. H. R. M. (2025). Investigation of the effect of aloe vera gel coating combined with free and encapsulated savory essential oil on the shelf life of strawberries. *Applied Food Research*, 5, 101269. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101269>
- [20] Al Khawli, F., Ferrer, E., Berrada, H., & Barba, F. J. (2019). Innovative green technologies of intensification for valorization of seafood and their by-products. *Marine Drugs*, 17(12), 689. <https://doi.org/10.3390/md17120689>
- [21] Roustazad, M., Gharibzahedi, S. M. T., & Jafari, S. M. (2025). Encapsulation of millet oil using millet protein concentrate: Stability and bioaccessibility of omega-6 fatty acids. *Applied Food Research*, 5(1), 100891. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100891>
- [22] Asma, U., Kausar, T., Nadeem, M., Anjum, F. M., & Hussain, S. (2023). Apples and apple by-products: Antioxidant properties and food applications. *Antioxidants*, 12(7), 1456. <https://doi.org/10.3390/antiox12071456>
- [23] Aadil, R. M., Khalid, A., Ahmed, I., Hayat, I., & Qureshi, T. M. (2023). Green extraction of bioactive compounds from apple pomace by ultrasound-assisted natural deep eutectic solvent extraction: Optimisation, comparison and bioactivity. *Food Chemistry*, 398, 133870. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133870>
- [24] Bai, X. L., Yue, T. L., & Yuan, Y. H. (2010). Optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from apple pomace using response surface methodology and HPLC analysis. *Journal of Separation Science*, 33(23–24), 3751–3758. <https://doi.org/10.1002/jssc.201000261>
- [25] Oroian, M., Dranca, F., & Ursachi, F. (2020). Comparative evaluation of maceration, microwave and ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds from propolis. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 70–78. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04037-1>
- [26] Aboul-Enein, A. M., et al. (2016). Identification of phenolic compounds from banana peel (*Musa paradisiaca* L.) as antioxidant and antimicrobial agents. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 8(4), 46–55.
- [27] Karasawa, M. M. G., & Mohan, C. (2018). Fruits as prospective reserves of bioactive compounds: A review. *Natural Products and Bioprospecting*, 8, 335–346. <https://doi.org/10.1007/s13659-018-0186-6>
- [28] Hanula, M., Wróblewska, B., & Karamać, M. (2020). Optimization of microwave and ultrasound extraction methods of açai berries in terms of highest content of phenolic compounds and antioxidant activity. *Applied Sciences*, 10(23), 8325. <https://doi.org/10.3390/app10238325>
- [29] Azmir, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M. H. A., Ghafoor, K., Norulaini, N. A. N., & Omar, A. K. M. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426–436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>
- [30] Park, N., Kim, Y. M., & Chun, J. (2022). Optimization of the ultrasound-assisted extraction of flavonoids

- and the antioxidant activity of Ruby S apple peel using the response surface method. *Food Science and Biotechnology*, 31(13), 1667–1678. <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01118-5>
- [31] Foss, K., Przybyłowicz, K. E., & Sawicki, T. (2022). Antioxidant activity and profile of phenolic compounds in selected herbal plants. *Plant Foods for Human Nutrition*, 77(3), 383–389. <https://doi.org/10.1007/s11130-022-00973-0>
- [32] Hadidi, M., Pouramin, S., Adinepour, F., Haghani, S., & Jafari, S. M. (2022). Plant by-product antioxidants: Control of protein-lipid oxidation in meat and meat products. *LWT*, 169, 114003. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114003>
- [33] Taweechat, C., Wongsooka, T., & Rawdkuen, S. (2021). Properties of banana (Cavendish spp.) starch film incorporated with banana peel extract and its application. *Molecules*, 26(5), 1406. <https://doi.org/10.3390/molecules26051406>
- [34] Vasile, M., Enachi, E., Stănciuc, N., & Aprodu, I. (2021). Phytochemical content and antioxidant activity of *Malus domestica* Borkh peel extracts. *Molecules*, 26(24), 7636. <https://doi.org/10.3390/molecules26247636>
- [35] Shiryanpour, S., Nouri, L., Azizi, M., Najaf, A., & Mohammadi Nafchi, A. (2025). Active chitosan film containing single and double nanoemulsions of Oliveira decumbens Vent essential oil/anthocyanin of eggplant for chicken preservation. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 19(10), 7381–7403. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03477-2>
- [36] Khalili, M., Najafi, A., & Razavi, R. (2025). Preservative activity of free and nano-encapsulated pomegranate peel extract obtained using cold plasma and ultrasound-assisted method in increasing the shelf life of thigh mutton mince. *Applied Food Research*, 5(1), 100668. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100668>
- [37] Jaiswal, A. K., Gupta, S., & Abu-Ghannam, N. (2020). Drying of fruit and vegetable peels: Impact on phenolic compounds and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 316, 126–138.
- [38] Emaga, T. H., Andrianaivo, R. H., Wathelet, B., Tchango, J. T., & Paquot, M. (2007). Dietary fibre components and pectin chemical features of peels during ripening in banana and plantain varieties. *Bioresource Technology*, 98(1), 58–68
- [39] Shehzadi, K., Rubab, Q., Asad, L., et al. (2020). A critical review on presence of polyphenols in commercial varieties of apple peel, their extraction and health benefits. *Open Access Journal of Biogeography Science and Research*, 6, 18.



Scientific Research

Comariosn of Maceration, Ultrasound- and Microwave-Assisted Extraction Methods for Phenolic Recovery and Antioxidant Activity from Apple and Banana Peels

Hamideh Shafahi¹, Leila Nouri¹, Ali Najafi^{*1}, Seid Mahdi Jafari^{2,3}

1-Department of Food Science and Technology, Da.C., Islamic Azad University, Damghan, Iran.

2- Department of Food Materials and Process, Design Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran – 3- Halal Research Center of IRI, Iran
Food and Drug Administration, Ministry of Health and Medical Education, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2025/10/30

Review: 2026/05/22

Accepted: 2026/05/26

Keywords:

Fruit by products;

Ultrasound assisted extraction;

Microwave assisted extraction;

Maceration;

Phenolic compounds;

Antioxidant activity.

DOI: 10.48311/fsct.2026.117140.82912

*Corresponding Author E-

Ali.Najafi@iau.ac.ir

Fruit peels, as by-products of the fruit processing industry, are rich sources of bioactive compounds, particularly phenolic compounds with antioxidant properties, and can be utilized in developing natural ingredients for food systems. The aim of this study was to compare the efficiency of three extraction methods maceration, ultrasound-assisted extraction, and microwave-assisted extraction in recovering phenolic compounds and evaluating the antioxidant activity of extracts from apple and banana peels. After extraction, total phenolic content (TPC) and total flavonoid content (TFC) were measured, and antioxidant activity was evaluated using DPPH radical-scavenging and ferric reducing antioxidant power (FRAP) assays. The results showed that apple peel extracts contained significantly higher levels of phenolic and flavonoid compounds than banana peel extracts ($p < 0.05$). The highest total phenolic content was observed in ultrasound extracts, reaching 48.16 and 45.16 mg GAE/g DW for apple and banana peels, respectively. Similarly, the highest total flavonoid content was found in ultrasound extracts of apple and banana peels, with values of 28.45 and 19.82 mg QE/g DW, respectively. The DPPH assay indicated that ultrasound extracts exhibited the strongest radical-scavenging activity, whereas microwave extraction showed the highest reducing power in the FRAP assay. Maceration resulted in the lowest levels of phenolic and flavonoid compounds and antioxidant activity in both samples. HPLC analysis confirmed the presence of a range of phenolic compounds, particularly flavonoids and flavan-3-ol derivatives, and a positive correlation was observed between total phenolic content, especially flavonoids, and antioxidant activity. Overall, ultrasound extraction was the most efficient method for enhancing phenolic recovery and radical-scavenging activity, whereas microwave extraction showed the greatest effect on reducing power. These findings highlight the potential of apple and banana peels as natural antioxidant sources for food applications and development of bioactive compounds.