مقاله

امواج فراصوتی
روشی نوین در استخراج ترکیب‌های گیاهی

محمد ابونجمی *
استادیار گروه فنی کشاورزی
پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
abonajmi@ut.ac.ir

مرضیه قربانی
دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم
پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
marzie.ghorbani@ut.ac.ir

مجید قربانی جاوید
استادیار گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات
پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
mjavid@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۱۳

چکیده

امروزه از عصاره‌های گیاهی به‌طور گسترده‌ای در صنایع دارویی، غذایی و بهداشتی استفاده می‌شود. نیاز مداوم جامعهٔ بشری به استخراج ترکیبات مؤثر گیاهی سبب انجام پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینهٔ معرفی فرایند استخراجی کارآمدتر و اقتصادی‌تر شده است. برای استخراج ترکیبات فعال گیاهی روش‌های عصاره‌گیری متنوعی وجود دارد. روش‌های سنتی استخراج نظیر روش خیساندن و سوکسله به صرف زمان طولانی و مقدار حلال زیاد نیاز دارند، همچنین از لحاظ دمایی ایمن نبوده و سبب تجزیهٔ تعدادی از ترکیبات می‌شوند. به‌همین دلیل تقاضای زیاد برای روش‌های عصاره‌گیری جدید با زمان کوتاه‌تر، میزان مصرف حلال کمتر و محافظ محیط زیست وجود دارد. در این مقاله به معرفی بیشتر فراصوت به‌عنوان یکی از روش‌های نوین در استخراج ترکیبات طبیعی گیاهان پرداخته می‌شود که نسبت به روش‌های متداول، کارایی بالاتر، کاهش زمان عصاره‌گیری و مصرف حلال را به‌دنبال داشته است.

واژگان کلیدی: فراصوت، حفره‌زایی، استخراج، عصاره، گیاه

۱. مقدمه

امواج صوتی که بسامد نوسان آنها بیش از محدودهٔ شنوایی انسان باشد، امواج فراصوت[۱] نامیده می‌شوند. فراصوت امواجی مکانیکی است که برای پراکندگی، به محیط الاستیک و صداهایی با بسامد موجی متفاوت نیاز دارد. صداها در بسامد شنوایی انسان (۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) هستند، حال آنکه فراصوت بسامدهایی بالاتر از محدودهٔ شنوایی انسان، اما پایین‌تر از بسامدهای مایکروویو[۲] (از ۲۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز) دارد. امواج فراصوتی با بسامد کمتر از ۱۰۰ کیلوهرتز و توان بیشتر از ۱ وات بر سانتی‌متر مربع به امواج فراصوتی قدرتی[۳] معروف‌اند. این امواج کاربرد وسیعی در صنایع غذایی دارند و شامل برش، گاز زدایی[۴]، فیلتراسیون[۵]، خشک‌کردن، هموژنیزاسیون، تردکردن

گوشت، تعیین کیفیت تخم مرغ، تشکیل امولسیون[۶]، تمیز کردن سطوح، استریلیزاسیون تجهیزات، کریستالیزاسیون[۷] چربی‌ها، تسریع واکنش‌های اکسیداسیون[۸]، مهار فعالیت آنزیم‌ها و میکروب‌ها و استخراج ترکیبات مولد عطر و طعم می‌باشد [۱-۲]. همچنین امروزه از فناوری‌های صوتی در ارزیابی مواد غذایی (تردی[۹]، سفتی[۱۰] و بافت)، تعیین خواص فیزیکی (اندازه، شکل، حجم و رطوبت)، درجه‌بندی و جداسازی[۱۱] مواد غذایی، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

ابونجمی و همکاران، کیفیت و تازگی تخم مرغ را با استفاده از امواج فراصوت به‌صورت غیرمخرب روی تخم مرغ سالم به‌روش تعیین سرعت موج فراصوتی در دمای یخچال و محیط آزمایشگاه بررسی کردند [۴-۵].

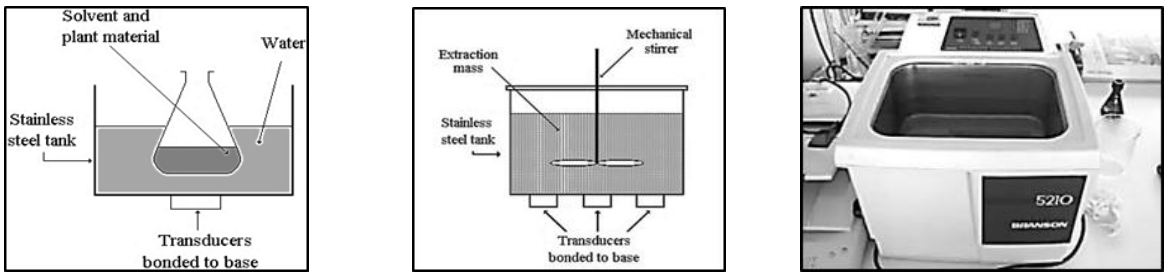
در سراسر جهان از گیاهان برای تولید عصاره‌های طبیعی، که از اهمیتی حیاتی برای بهداشت و درمان انسان در طول قرن‌ها برخوردار بوده است، استفاده می‌کنند. گیاهان، حاوی گسترهٔ وسیعی از ترکیبات مؤثر نظیر ترکیبات فنولی، مواد فیتوشیمیایی[۱۲]، رنگدانه‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها[۱۳]، ترکیبات ضد میکروبی و مواد مولد عطر و طعم هستند. از عصاره‌های گیاهی به‌طور گسترده در صنایع دارویی، غذایی، بهداشتی و آرایشی استفاده می‌شود. بین ۲۱۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰ گونه از گیاه در جهان وجود دارد. تنوع این گیاهان در کشف و توسعهٔ عوامل درمانی جدید مهم هستند و ترکیبات فعال زیستی استخراج‌شده از آنها مانند ترکیبات آنتی‌اکسیدان، ضد سرطان، ضد ایدز[۱۴]، ضد میکروب، ضد مالاریا و کاهش قند خون به اثبات رسیده است [۶]. عوامل زیادی در نوع و میزان ترکیبات تولیدشده در گیاهان نقش دارند. از جمله آنها می‌توان به تاریخ کاشت، اندازهٔ بذر، مقدار و زمان آبیاری، تنش‌های واره به گیاه در مراحل رشد، شرایط اقلیمی، نوع آب‌وهوا و تفاوت در اکوتیپ‌ها اشاره کرد.

قبادی و همکاران، تأثیر تاریخ کاشت و اندازهٔ بنه[۱۵] بر عملکرد گل و صفات فیزیولوژیک زعفران در شرایط آب‌وهوایی دشت ورامین را بررسی کردند و دریافتند که تأثیر تاریخ کاشت و اندازهٔ بنه بر تمام صفات شامل زمان آغاز گل‌دهی، عملکرد گل‌دهی (تعداد گل در واحد سطح)، وزن خشک کلاله و غلظت پرولین در برگ معنادار است. تأخیر در کاشت منجر به مواجههٔ مراحل رشد با شرایط دمایی و رطوبتی متفاوت، از جمله کاهش دما و فرصت کم برای تولید گل یا برگ می‌گردد؛ لذا شرایط متفاوت می‌تواند نوعی تنش محسوب شود که میزان غلظت پرولین را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۷]. برای تولید ترکیبات طبیعی با ارزش از گیاهان و تجاری‌سازی آنها روش‌های مختلفی بررسی شده است [۸]. دامنهٔ کاربرد استخراج گیاهان با فراصوت در استخراج روغن، پروتئین، مواد مؤثر گیاهی، ترکیبات فعال زیستی (فلاونوئیدها، اسانس‌ها، آلکالوئیدها، پلی‌ساکاریدها، استرهای اسید چرب، استروئیدها، چربی و جز این‌ها) می‌باشد [۹]. در این مقاله استفاده از روش فراصوت و مزایای آن برای استخراج ترکیبات طبیعی از گیاهان به اجمال مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲. استخراج به‌کمک امواج فراصوتی[۱۶]

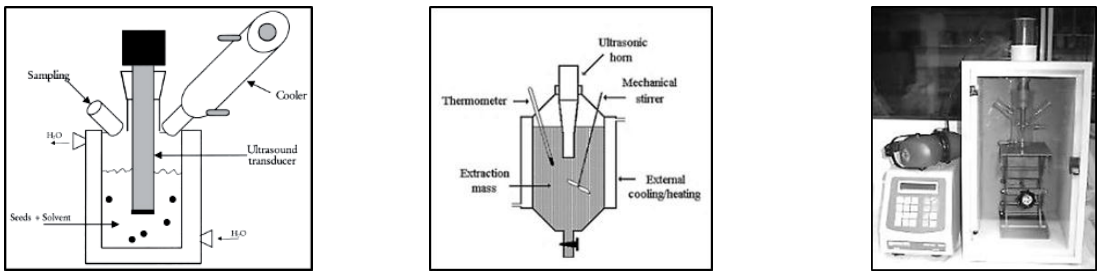
۲-۱. استخراج‌کننده‌ها

استخراج به‌کمک امواج فراصوت از جمله مهم‌ترین روش‌های استحصال ترکیبات ارزشمند از منابع گیاهی است که در مقیاس بزرگ و کوچک قابل اجراست [۹-۱۰]. سامانه‌های پروب[۱۷] و حمام[۱۸] دو روش رایج استفاده از امواج فراصوتی‌اند. حمام فراصوت می‌تواند بر طیف وسیعی از نمونه‌ها عمل کند و قابلیت تکرارپذیری بالایی دارد [۱۱]. نتایج حاصل از بررسی منابع نشان می‌دهد که روش حمام فراصوت برای استخراج از نمونه‌های خشک‌شده و پودرشده جهت به‌کارگیری در مقادیر صنعتی و بزرگ کارآمد نیست [۱۲]. در شکل ۱ نمونه‌هایی از سامانهٔ حمام فراصوت نمایش داده شده است [۹، ۱۳]. در پروب فراصوت نمونه به‌طور مداوم در تماس با پروب قرار می‌گیرد و قابلیت تکرارپذیری کمی دارد. علاوه بر این، خطر آلودگی نمونه و تولید کف بیشتر است [۱۱]. در شکل ۲ نمونه‌هایی از سامانهٔ پروب فراصوت نمایش داده شده است [۹، ۱۳، ۱۴].



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱. نمونه‌هایی از سامانهٔ حمام فراصوت [۹، ۱۳]



(ج) (ب) (الف)

شکل ۲. نمونه‌هایی از سامانهٔ پروب فراصوت [۹، ۱۳، ۱٤]

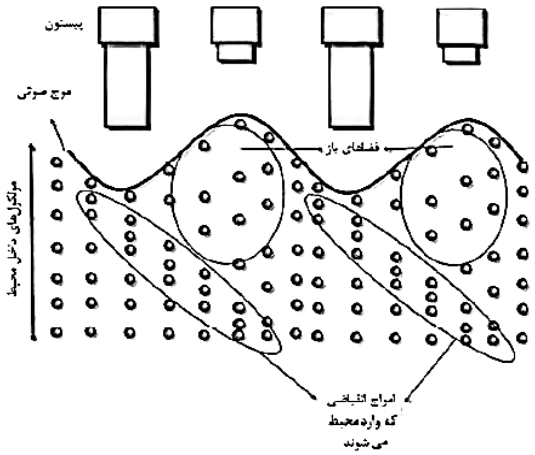
در روش پروب فراصوت نمونه‌ها به‌طور مستقیم و در روش حمام فراصوت به‌طور غیرمستقیم تحت امواج فراصوتی قرار می‌گیرند؛ لذا روش حمام در مقایسه با پروب فراصوت برای استخراج ترکیبات گیاهی به زمان طولانی‌تری نیاز دارد. نصیری‌فر و همکاران، در تحقیقی اثر شرایط عصاره‌گیری به‌کمک فراصوت بر میزان استخراج ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی از میوهٔ داغداغان را مورد بررسی قرار دادند و از دو روش (حمام و پروب فراصوت)، و سه حلال (آب، اتانول ۷۰ درصد و متانول ۸۰ درصد) استفاده کردند [۱۵]. در روش حمام از زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه و بسامد ۲۸ تا ۳۴ کیلوهرتز و در روش پروب، از دامنهٔ نوسان ۲۰ درصد و زمان ۵، ۱۰ و ۲۰ دقیقه استفاده کردند و دریافتند استخراج به‌کمک پروب و حمام فراصوت اثر متفاوتی در میزان استخراج ترکیبات زیست فعال میوهٔ داغداغان دارد. در هر روش، میزان استخراج ترکیبات زیست فعال بسته به نوع حلال متفاوت بود. در تمامی روش‌های استخراج حلال اتانول ۷۰ درصد، بهترین حلال برای استخراج ترکیبات مورد نظر بود. کمالی و همکاران، میزان استخراج ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی از میوهٔ سنجد زینتی[۱۹] به‌کمک فراصوت را مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. در روش حمام فراصوت از سه سطح زمان ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه و برای پروب فراصوت از سه سطح زمان ۵، ۱۰ و ۲۰ دقیقه استفاده کردند و دریافتند در هر دو روش با افزایش زمان درصد مهار رادیکال آزاد ۲،۲-دی‌فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل افزایش یافت و بیشترین درصد مهار در روش حمام فراصوت، زمان ۹۰ دقیقه برابر ۷۷/۶۶ درصد و در روش پروب فراصوت، زمان ۲۰ دقیقه برابر ۹۵/۴۳۲ درصد گزارش کردند.

۲-۲. اصول و سازوکار استخراج

در این روش امواج فراصوتی با بسامد بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز به درون ماده نفوذ می‌کند و سبب ایجاد کشیدگی و جمع‌شدن پی‌درپی می‌گردد که در نتیجه حفره‌هایی داخل ماده گیاهی ایجاد می‌شود. این حفره‌ها به‌صورت نامتقارن به‌هم پیوسته و موجب خروج سریع مواد از داخل سلول‌ها به خارج از آن می‌شوند. همچنین این امواج می‌توانند موجب

تخریب دیوارهٔ سلول‌های زیستی شوند و سبب تسهیل خروج مواد گردند [۱۱]. در امواج فراصوتی، افزایش شدت موج سبب افزایش تغییر مکان یا جابه‌جایی ذرات می‌گردد. بنابراین در نتیجهٔ کاربرد امواج، فاصلهٔ مولکول‌ها بیشتر از فاصلهٔ بحرانی خواهد بود که برای نگه‌داشتن مولکول‌های مایع در کنار هم ضروری است. به این ترتیب زمانی خواهد رسید که فاصلهٔ مولکول‌های جابه‌جایی در حدی می‌باشد که باعث خروج یک مولکول از دایرهٔ ارتباطی مولکول مجاورش و ایجاد حباب می‌گردد؛ به این پدیده در اصطلاح حفره‌زایی[۲۰] گفته می‌شود و در واقع معادل جوشیدن سرد است. از دیدگاه نظری عنوان می‌شود که حباب هنگامی به‌وجود می‌آید که فاصلهٔ مولکول‌ها از یکدیگر به دو برابر شعاع واندروالسی برسد. هنگامی یک مایع ایجاد حباب می‌کند که فشار مایع[۲۱] کمتر از فشار بخار مایع[۲۲] باشد. همچنین با توجه به معادلات ریاضی میزان فشار منفی لازم جهت ایجاد چنین حالتی در آب خالص ۱۰۰۰۰ اتمسفر است. اما به‌دلیل وجود گاز یا ذرات جامد، این میزان در عمل به‌مراتب کمتر است. مراحل حفره‌زایی شامل تشکیل حباب اولیه، رشد حباب و متلاشی شدن آن می‌باشد.

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، به‌طور موقت مولکول‌ها از جایگاه اصلی خود جدا شده و به‌عنوان موج صوتی عبور می‌کنند که می‌توانند با مولکول‌های اطراف برخورد کنند. سپس، در طی مرحلهٔ انبساط، اولین گروه از مولکول‌ها به عقب و سمت موقعی اصلی خود کشیده می‌شوند و انرژی جنبشی آنها را بیشتر به عقب می‌کشند. بنابراین، مناطق انبساطی در محیط ایجاد می‌شود و چون هر محیط فاصلهٔ مولکولی بحرانی دارد، هنگامی این فاصله بیش از حد شود، فعل و انفعالات مولکولی شکسته و حفره‌ها در مایع ایجاد می‌شوند. حفره‌های ایجادشده در محیط، حباب‌های حفره‌زایی ناشی از فراصوت بوده که قادر به رشد در طول مراحل انبساط و کاهش اندازه در چرخه‌های انقباض هستند. وقتی اندازهٔ این حباب‌ها به نقطهٔ بحرانی می‌رسد، در طول چرخهٔ انقباض متلاشی شده و مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود. دما و فشار در لحظهٔ متلاشی‌شدن تا ۵۰۰۰ درجهٔ کلوین و ۲۰۰۰ اتمسفر در حمام فراصوت در دمای اتاق تخمین زده می‌شود، ایجاد این نقاط داغ می‌تواند به‌طور چشمگیری واکنش‌های شیمیایی را در محیط تسریع بخشد. وقتی این حباب‌ها روی سطح مواد جامد متلاشی می‌شوند، فشار و دمای بالای آزاد شده به‌طور مستقیم میکروجت‌ها[۲۳] و امواج شوک را در سطح جامد تولید می‌کند. اصابت این میکروجت‌ها به سطح سبب سایش، شکستگی و تخریب آن می‌شود [۱۷].

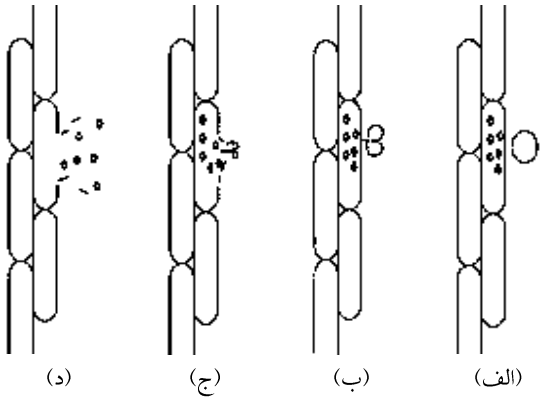


شکل ۳. چرخه‌های فشرده و باز ایجادشده با امواج صوتی [۱۷]

تغییرات ناگهانی در فشار و دما سبب تجزیهٔ بافت و متلاشی‌کردن آن، همچنین نازک‌کردن غشای سلولی می‌گردد که باعث می‌شود از این امواج در استخراج نیز استفاده شود. آستانهٔ ایجاد حفرگی در یک محیط (حداقل نوسان فشار مورد نیاز برای ایجاد حفرگی) توسط چند عامل تعیین می‌شود. این عوامل شامل مقدار گاز نامحلول، فشار هیدرواستاتیک، گرمای ویژهٔ مایع، گاز درون حباب و نیروی کششی مایع می‌باشد. عامل بسیار مهم دیگر دماست که با آستانهٔ ایجاد حفرگی رابطهٔ معکوس دارد. بسامد فراصوت استفاده شده باید زیر ۲/۵ مگاهرتز باشد؛ زیرا این پدیده در بسامد بالاتر از این حد ایجاد نمی‌شود.

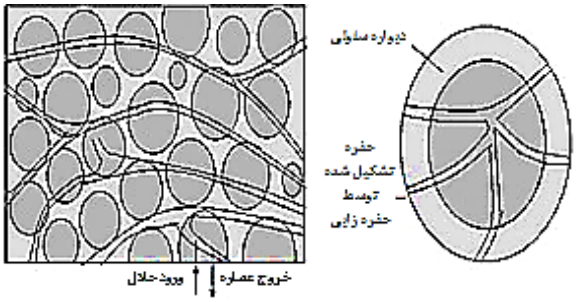
همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، حباب حفره‌زایی تولیدشده نزدیک به سطح مواد گیاهی (الف) در طول چرخهٔ

انقباض (ب) متلاشی می‌شود و میکروجت را به‌طور مستقیم به سطح وارد می‌کند (ب و ج). فشار و دمای بالای به‌کار رفته در این فرایند، دیواره‌های سلولی ماتریس[۲۴] گیاهی را پاره کرده، محتوای آنها را در محیط (د) آزاد خواهد کرد [۱۳].

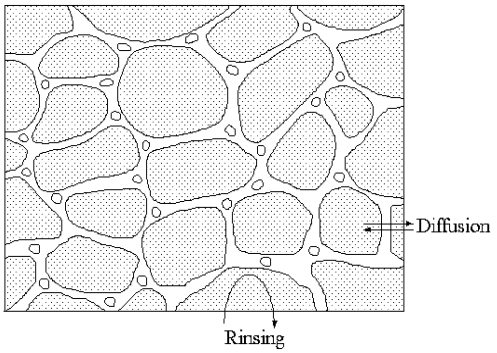


شکل ٤. فروپاشی حباب حفره‌زایی و آزادسازی مواد گیاهی [۱۳]

افزون بر این، انفجار حباب‌ها سبب ایجاد اغتشاشات شدید موضعی و تلاطم‌های گرداب‌گونه شده که از این طریق انتقال جرم را افزایش می‌دهد. مطالعات انجام‌شده توسط محققان مشخص کرده است که انفجار حباب‌ها در مجاورت ذرات جامد نامتقارن است، به‌طوری‌که موجب می‌شود جریانی از مایع با سرعت بسیار زیاد به‌سمت سطح ذرات کشیده شود. اصابت میکروجت‌ها به سطح باعث سایش، شکستگی و تخریب آن می‌شود [۱۷–۱۸]. امواج فراصوتی با ایجاد حفره، دیوارهٔ سلولی را می‌شکند و خروج ترکیبات از داخل سلول را تسهیل می‌بخشد و با کاهش زمان، بازده را افزایش می‌دهد. در شکل ۵ شکستن دیوارهٔ سلول در اثر حفره‌زایی (الف) و انتشار حلال به ساختار سلول (ب) نمایش داده شده است [۱۹]. سازوکار استخراج شامل دو مرحله است: مرحلهٔ اول انتشار حلال از طریق دیواره‌های سلول و مرحلهٔ دوم شستن محتویات داخل سلول به بیرون. شکل ۶ بافت گیاهی که توسط دیواره سلولی احاطه شده است را نمایش می‌دهد [۹]. برای دستیابی به یک استخراج مناسب باید فاکتورهای دما، زمان، فشار، بسامد، اندازهٔ ذرات، میزان تراکم، مقدار رطوبت و حلال مناسب را مورد بررسی قرار داد [۸].



شکل ۵. سازوکار شکستن دیوارهٔ سلولی در اثر حفره‌زایی [۱۹]



شکل ٦. تصویری از ساختار سلول گیاهی [۹]

کاهش اندازهٔ ذره‌ای در این روش موجب افزایش بازده می‌گردد. بسامد امواج می‌تواند در بازده تأثیرگذار باشد. در این روش محتوای رطوبت مادهٔ گیاهی اهمیت فراوانی دارد؛ زیرا حداکثر قدرت امواج در مجاورت منبع تولید بوده و با افزایش فاصله از منبع، قدرت امواج کاهش می‌یابد. به‌علاوه هرچه مادهٔ موجود در مسیر تابش جامد و متراکم‌تر باشد، میزان کاهش امواج بیشتر خواهد بود، بنابراین با به‌کار بردن مادهٔ گیاهی مرطوب از کاهش قدرت امواج جلوگیری می‌شود [۲۰]. همچنین نوع و مقدار حلال به‌کار گرفته شده در استخراج ترکیبات مورد نظر دارای اهمیت می‌باشد. آلبو و همکاران، در پژوهشی تأثیر امواج فراصوتی را بر استخراج ترکیبات آنتی‌اکسیدانی از گیاه رزماری مورد بررسی قرار دادند [۲۱]. آنها از سه حلال بوتانول، استات اتیلن و اتانول

استفاده کردند و دریافتند که امواج فراصوتی اثر حلال اتانول که در شرایط معمولی حلال ضعیفی است را به یک سطح استخراج مشابه با دو حلال دیگر رساند. ثابت شد استخراج از گیاه خشک شده با اتانول مؤثرتر از مادهٔ تازه است که احتمالاً به‌دلیل آب موجود در دومی است. ریدریگز در پژوهشی نشان داد با افزایش مدت زمان استخراج (۲۰ تا ۶۰ دقیقه) تفاوت معناداری در ترکیبات فنولی مشاهده نمی‌شود [۲۲]. او بیان کرد اشباع‌شدن حلال با ترکیبات استخراج‌شده موجب صفرشدن شیب غلظت و متوقف شدن اثر حلال می‌شود.

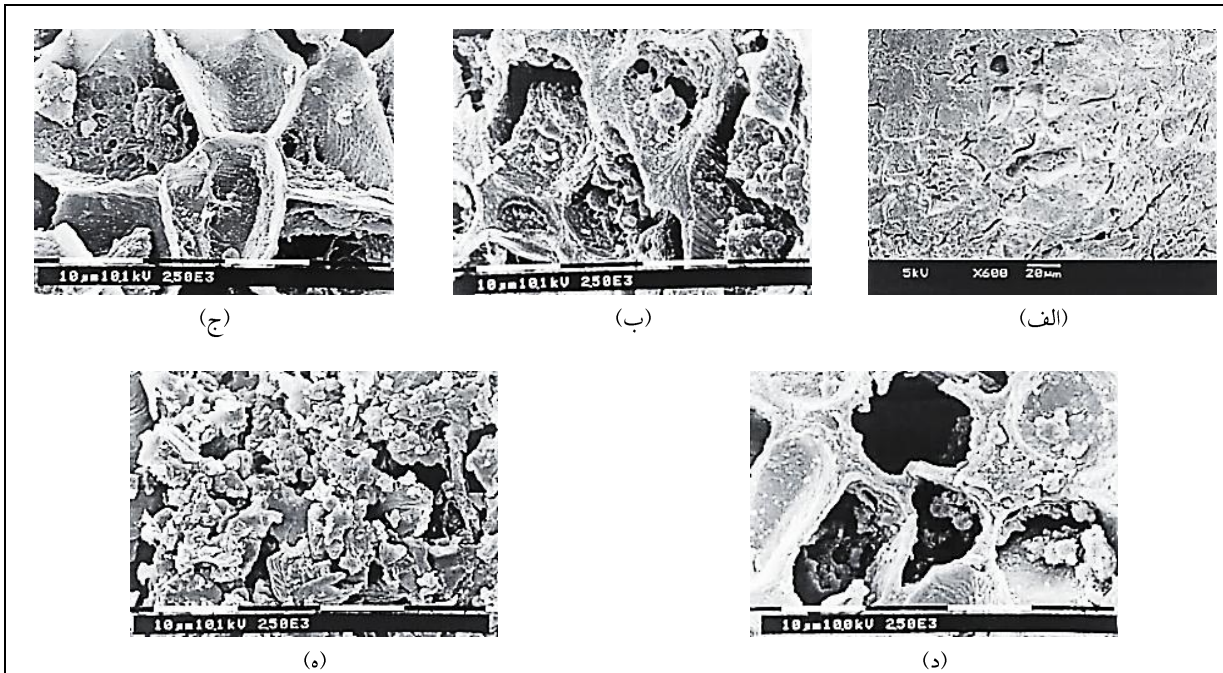
دمای عصاره‌گیری در این روش باید لحاظ و از افزایش بیهودهٔ دما جلوگیری شود. کاربرد امواج فراصوتی امکان استخراج در دماهای پایین‌تر را فراهم می‌کند. در آزمایش دیگری نتایج استخراج فلاونوئیدها نشان داد شرایط بهینهٔ استخراج به‌کمک امواج فراصوتی در دماهای بسیار پایین‌تر نسبت به استفاده از حمام آب داغ در دمای ۸۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد [۱۰]. شوتیپرک و همکاران، در تحقیقی امکان استفاده از فراصوت را برای استخراج منتول از گیاه نعناع و جایگزینی با روش سنتی استخراج مطالعه کردند [۱۷]. نتایج نشان داد که گیاهان فراصوت شده به‌مدت یک ساعت در دمای ۲۲ درجهٔ سلسیوس در یک حمام فراصوت ۴۰ کیلوهرتز، تقریباً ۱۷/۸ میکروگرم منتول در هر گرم بافت برگ آزاد کردند (۲ درصد کل محصول). مقدار منتول آزادشده با زمان تیمار افزایش یافت و به‌میزان زیادی تحت تأثیر دمای حمام آب فراصوت بود. وقتی دما از ۲۲ به ۳۹ درجهٔ سلسیوس افزایش یافت، میزان منتول استخراجی از ۲ درصد کل محصول به ۱۲ درصد افزایش یافت. بدون در نظر گرفتن تأثیرات دمایی معلوم شد که سازوکار آزادسازی محصول به‌دلیل حفره‌زایی است. دونگ‌روئی و همکاران تأثیر دماهای (۳۰ الی ۷۰ درجهٔ سلسیوس) روی دانهٔ گیلاس بررسی کردند [۲۳]. نتایج نشان داد قدرت مهار رادیکال آزاد ۲،۲-دی فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل تا دمای ۶۰ درجهٔ سلسیوس زیاد می‌شود و بعد آن به‌دلیل تجزیه‌شدن ترکیبات آنتی اکسیدان کاهش را در قدرت مهار رادیکال آزاد ۲،۲-دی فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل خواهیم داشت. طول مدت عصاره‌گیری هم در این روش اهمیت خاصی داشته و افزایش بیش از حد آن موجب تغییر در کیفیت عصارهٔ حاصل خواهد شد. استفاده از امواج فراصوتی سبب شکستن فیزیکی دیواره و غشای سلول می‌شود. این پدیده، فرایند نفوذ حلال به داخل سلول‌ها را سرعت می‌بخشد و جریان انتقال جرم بین بافت و انتقال ذرات از داخل سلول به داخل حلال را آسان می‌کند. در نتیجه فرایند استخراج در زمان کوتاه‌تری نسبت به روش‌های دیگر به انجام می‌رسد. چن و همکاران استخراج آنتوسیانین‌های تمشک با استفاده از امواج فراصوتی را در ۲۰۰ ثانیه تحت شدت فراصوتی ۴۰۰ وات تعیین کردند [۲۴]. ما و همکاران استخراج مادهٔ مؤثر هیسپریدین را از پوست مرکبات مشبک[۲۵] به کمک امواج فراصوتی بررسی کردند [۲۵]. نتایج نشان داد که بازدهٔ استخراج با افزایش زمان به‌طور معناداری افزایش یافت که این افزایش از ۲۰ تا ۶۰ دقیقه با شیب زیاد ولی از ۶۰ تا ۱۶۰ دقیقه به آرامی افزایش یافت. سرشتی و همکاران مقایسهٔ استخراج اسانس روغنی هل به‌کمک امواج فراصوتی و تقطیر بخار[۲۶] را بررسی کردند و دریافتند امواج فراصوت در استخراج اسانس دو نقش مهم را ایفا می‌کند [۲۶]. نخست به‌عنوان یک منبع انرژی کافی برای شکستن غدد حاوی اسانس و سپس به‌عنوان امولسیون‌کننده[۲۷] فاز آلی را در آب پراکنده می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بخش الف از شکل ۸ سلول‌ها باز شده‌اند و اسانس خارج شده است و در بخش ب از شکل ۸ سلول‌ها باز شده‌اند و دیوارهٔ غدد نیز به نظر می‌رسد آسیب دیده است. چمت و همکاران، استخراج ترکیبات کاروون و لیمونن از دانه‌های زیره به‌کمک فراصوت را با روش متداول سوکسله[۲۸] مورد مقایسه قرار دادند و از توان خروجی دستگاه ۱۵۰ وات، بسامد ۲۰ کیلوهرتز، سه سطح زمان (۱۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه) و سه سطح دما (۲۰، ۳۵ و ۵۵

درجه سلسیوس) استفاده کردند [۱۴] و دریافتند در زمانی مساوی، غلظت کاروون در استخراج با فراصوت در دمای ۲۰ درجهٔ سلسیوس بیشتر از غلظت کاروون در دمای ۵۵ درجهٔ سلسیوس در آزمایش سوکسله بود. به‌طور کلی نسبت به‌روش سوکسله، سرعت استخراج با استفاده از هگزان، بسته به دمای به‌کار رفته ۱/۳ تا ۲ برابر سریع‌تر، بازدهی و کیفیت کاروون بهتر، کاهش زمان استخراج حداقل به نصف و عدم تغییر در روغن‌های استخراجی مشاهده گردید.

(الف) (ب)

شکل ۸ اسکن میکروگراف الکترونی از آثار فراصوت در هل

الف) حمام فراصوت (۳۲ درجهٔ سانتی‌گراد بعد از ۱۰ دقیقه)؛ ب) تقطیر با آب (۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد بعد از ۴ ساعت) [۲۶]



(الف) (ب) (ج) (د) (ه)

شکل ۷. مقایسه تغییرات ساختاری زیره سیاه پس از استخراج [۱٤]؛ الف) دانه بدون هیچ‌گونه عملیات

ب) آزمایش کنترل (٦٩ درجهٔ سانتی‌گراد بعد از ۳۰ دقیقه)، ج) آزمایش کنترل (٦٩ درجهٔ سانتی‌گراد بعد از ٦٠ دقیقه)

د) استخراج با فراصوت (۲۰ تا ۳۸ درجهٔ سانتی‌گراد بعد از ۳۰ دقیقه)، ه) استخراج با فراصوت (۲۰ تا ۳۸ درجهٔ سانتی‌گراد بعد از ٦٠ دقیقه)

همان‌طور که مشاهده می‌شود در بخش الف از شکل ۷، سلول بسته و سطوح بسیار ناهموار می‌باشد. در بخش ب از شکل ۷ برخی سلول‌ها بازند، بعضی محتویات آزاد شده است و غدد دیگر دست‌نخورده باقی مانده است. در بخش

ج از شکل ۷، تمام سلول‌ها باز شده‌اند و محتویات آنها به محیط اطراف منتشر شده است. سلول و دیوارهٔ سلولی به‌شکل یکنواخت ضخیم و دست‌نخورده به‌نظر می‌رسد. در بخش د از شکل ۷، برخی از سلول‌ها باز شده و محتوای خود را آزاد کرده‌اند. برخی دیگر هنوز دست نخورده‌اند. دیواره‌های سلول به‌نظر می‌رسد به‌طور ناگهانی شوکه شده‌اند و در بخش ه از شکل ۷، تمامی سلول‌ها شکسته و محتویات آنها آزاد شده‌اند و شکل سلول‌ها قابل شناسایی نیست.

۲-۳. مزایا و معایب

مزایای امواج فراصوتی عبارت‌اند از:

افزایش سرعت: هوی و همکاران دریافتند که استخراج ساپونین‌های جین‌سینگ با فراصوت تقریباً سه برابر سریع‌تر از روش سنتی استخراج انجام گرفت [۲۷].

افزایش بازدهی: شارما و گاپتا گزارش کردند که فراصوت یک پیش تیمار[۲۹] حیاتی بوده و سبب افزایش بازدهی استخراج روغن‌ها از بادام، زردآلو و سبوس برنج گردیده است [۲۸]. ویناتورا، افزایش بازدهی استخراج با روش فراصوت در مقایسه با روش‌های کلاسیک در آب و اتانول را برای رازیانه، رازک‌ها، گل‌جعفری و نعناع به‌ترتیب ۳۴، ۱۲، ۳ و ۷ درصد بیان کردند [۹]. وجود تغییرات در درصد بازدهی استخراج عمدتاً به‌دلیل ساختار ویژه محصول است. مصرف کم حلال و قابلیت انجام با هر حلال: رستاقنو و همکاران استخراج ایزوفلاوون‌ها را از سویا با فراصوت ارزیابی کردند که ضریب استخراج تا ۱۵ درصد بهبود یافته بود [۲۹]. مخصوصاً ۴۰ تا ۶۰ درصد آب برای بهبود ضریب استخراج لازم بود که به‌دلیل قطبیت نسبی ایزوفلاوون‌ها بود. بنابراین عمل استفاده از فراصوت ممکن است وابستگی به یک حلال را کاهش داده و قابلیت استفاده از حلال‌های جایگزین را که از نظر اقتصادی، محیطی، سلامتی و ایمنی مناسب‌اند، فراهم سازد.

بهبود کیفیت: قربانی و همکاران، تأثیر شرایط عصاره‌گیری با روش فراصوت بر میزان استخراج ترکیبات فنولی از رازیانه[۳۰] را مورد بررسی قرار دادند [۳۰]. آنها بیشترین میزان ترکیبات فنولی کل را در زمان ۴۵ دقیقه، دما ۶۰ درجهٔ سلسیوس و توان ۲۰۰ وات معادل ۳/۱۵ میلی‌گرم در میلی‌لیتر عصارهٔ دانهٔ رازیانه گزارش کردند که با روش سوکسله اختلاف معناداری داشت و باعث افزایش ۱/۶ میلی‌گرم در میلی‌لیتر ترکیبات فنولی کل بیشتری در عصاره نسبت به روش سوکسله با مدت زمان ۲۴۰ دقیقه و دمای ۸۵ درجه سلسیوس گردید. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که فناوری‌های فرایند غیرحرارتی از جمله فراصوت سطح بالاتری از آسکوربیک اسید را نسبت به فرآیند حرارتی حفظ کرده است [۳۱-۳۳]. ما و همکاران ضمن استخراج ترکیبات فنولیک از نارنگی بیان داشتند که استفاده از فراصوت سبب افزایش ترکیبات فنولیک نسبت به روش غرقابی (مخلوط مادهٔ گیاهی و حلال در یک دکانتور) شده است [۳۴]. روسانگلا و همکاران ترکیب شیمیایی عصاره‌های چای مت (برگ‌های ایلکس پاراگارنسیس) را تحقیق کردند [۳۵]. تأثیر تیمار فراصوت منجر به افزایش میزان کافئین و اسید پالمیتیک در حلال متانول شد.

کاهش دما و امکان استخراج ترکیبات حساس به حرارت: در کل انرژی فعال‌سازی فراصوت پایین‌تر بوده و به‌همین دلیل سبب افزایش استخراج در دماهای پایین می‌شود [۳۶].

از سوی دیگر معایب امواج فراصوتی عبارت است از:

۱. تضعیف امواج در حضور یک فاز پخش‌شده
۲. نیاز به فیلتراسیون و جداکردن عصاره از مادهٔ گیاهی
۳. محدودشدن بخش فعال فراصوت درون استخراج‌کننده به ناحیه پیرامون پروب [۸]
۴. خوردگی پروب به مرور زمان

۵. تخریب برخی از ترکیبات در اثر اعمال فراصوت به‌خصوص در شدت‌های بالا، دماهای زیاد و زمان‌های طولانی

در پژوهشی گزارش شده است با استفاده از فراصوت در ترکیبات فنولی توت فرنگی نزدیک به ۱۰۰ درصد تخریب رخ داده است [۳۷]. با این‌حال عملکرد سیناپیک و اسید وانیلیک در دمای ۴۰ درجهٔ سلسیوس با افزایش زمان استخراج کاهش نیافته است. از جمله دلائل ممکن برای این پدیده آن است که پایداری ترکیبات نسبت به درجه حرارت متفاوت است و ممکن است تا حدی به تفاوت ساختار شیمیایی مواد مربوط باشد. زانگ و همکاران، از پروب فراصوت در استخراج اپیمدین استفاده کردند [۳۸]. نتایج بررسی نشان داد افزایش زمان فراصوت تا ۲۰ دقیقه منجر به افزایش بازده استخراج شده، اما به‌کارگیری زمان‌های بیشتر از ۴۰ دقیقه منجر به ظهور روند کاهشی در فرایند استخراج گردید. تخریب آسکوربیک اسید عمدتاً به‌علت واکنش‌های شیمیایی و شرایط فیزیکی که در طول فراصوت رخ می‌دهد مربوط می‌باشد. تشکیل یون‌های هیدروژن، رادیکال‌های آزاد و پراکسید هیدروژن از مولکول‌های آب موجود در نمونه در طول فراصوت مشخص شده است [۳۹–۴۰]. تخریب آسکوربیک اسید در طول فراصوت می‌تواند به واکنش‌های اکسیداسیون و برهم‌کنش با رادیکال‌های آزاد تشکیل شده در طول فراصوت مربوط شود [۴۱].

۲-۴. مروری بر پژوهش‌های پیشین

هدایتی و همکاران تأثیر امواج فراصوتی بر استخراج قند و خواص مکانیکی چغندرقند را بررسی کردند [۴۲]. آنها از بسامد (بدون موج‌دهی، ۲۵ و ۴۵ کیلوهرتز)، دما (۲۵، ۵۰ و ۷۰ درجهٔ سلسیوس) و زمان (۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه) استفاده و با نمونهٔ شاهد مقایسه کردند و دریافتند بین فاکتورها تأثیر معناداری وجود داشت و بیشترین بازده استخراج تحت بسامد ۲۵ کیلوهرتز دما ۷۰ درجهٔ سلسیوس و ۳۰ دقیقه مدت استخراج معادل ۸/۶۶ درصد حاصل گردید که نسبت به شاهد ۵۶ درصد بهبود داشته است. پورفرزاد و همکاران کارایی امواج فراصوتی در استخراج فروکتان از غدهٔ سریش را بررسی کردند و از زمان (۵ تا ۴۰ دقیقه)، دما (۳۰ تا ۷۰ درجهٔ سلسیوس) و شدت صوت (۲۰ تا ۱۰۰ درصد) استفاده نموده و دریافتند در زمان ۲۹/۳۱ دقیقه، دمای ۶۰ درجه سلسیوس و شدت صوت ۸۰/۰۴ بیشترین بازده استخراج حاصل می‌گردد [۴۳]. کمالی و همکاران استخراج ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی از میوهٔ سنجد زینتی را به‌کمک فراصوت مورد بررسی قرار دادند و از دو روش (حمام و پروب فراصوت) و سه حلال (آب، متانول ۸۰ درصد و اتانول ۷۰ درصد) و زمان (۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه) برای حمام فراصوت و (۵، ۱۰ و ۲۰ دقیقه) برای پروب فراصوت استفاده کردند و دریافتند در استخراج با پروب فراصوت، حلال اتانول ۷۰ درصد و زمان ۲۰ دقیقه و در استخراج با حمام فراصوت، حلال اتانول ۷۰ درصد و زمان ۹۰ دقیقه بیشترین میزان ترکیبات فنولی و قدرت مهارکنندگی رادیکال آزاد ۲،۲–دی فنیل–۱–پیکریل هیدرازیل را به‌دنبال داشته است [۴۴]. مارتینو، در پژوهشی که روی گیاه شبدر، زمان‌های مختلف (۱۰ تا ۱۸۰ دقیقه) و حلال‌های مختلف (اتانول ۵۰ درصد، متانول ۵۰ درصد و آب جوش) را روی استخراج ترکیبات با استفاده از حمام فراصوت مورد بررسی قرار داد [۴۵]. بهترین حالت برای زمان ۶۰ دقیقه و با حلال اتانول آبی ۵۰ درصد بود که در مقایسه با روش سوکسله، بازدهی استخراج بالاتری داشت. در مطالعهٔ تأثیر استفاده امواج فراصوتی با قدرت بالا بر استخراج روغن از دانه‌های آسیاب شده زیتون مشخص شد که در حضور این امواج دیواره سلول‌ها و بافت‌های گیاهی تخریب شده و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی (پلی‌فنل‌ها و توکوفرول‌ها) و رنگدانه‌های (کلروفیل و کاروتنوئید) بیشتری به داخل روغن راه یافتند و باعث افزایش ارزش تغذیه‌ای گردیدند [۴۶]. در استخراج آفت‌کش‌های آلکالوئید دایدهیدروستموفولاین از عصارهٔ ریشهٔ ستمونا کولینسای به

پنج روش مختلف استخراج (فراصوت، برگشت حلال[۳۱]، سوکسله، خیساندن[۳۲] و نفوذ) با اتانول ۷۰ درصد، نتایج نشان داد که فراصوت و برگشت حلال بالاترین مقدار بازده را در استخراج دایدهیدروستموفولاین دارند [۴۷]. افزایش گرما یا انرژی فراصوت در طول فرایند استخراج می‌تواند زمان استخراج را کاهش داده و به افزایش بازده کمک کند. رجو و همکاران استخراج ترکیبات آنتی‌اکسیدان گیاه رزماری را بررسی و از حلال (آب و اتانول ۹۶ درصد) و سه روش استخراج (معمولی، مایکروویو و فراصوت) استفاده کردند [۴۸]. روش معمولی ۴ ساعت طول کشید، در هر دو روش مایکروویو و فراصوت از شدت ۲۵۰ وات و مدت ۷ دقیقه (به‌صورت ۳۰ ثانیه خاموش و روشن) استفاده کردند و نشان دادند به‌کمک امواج مایکروویو و فراصوت در مدت زمان کوتاه‌تر و با صرف انرژی کمتر بازده استخراج افزایش یافته است. چارپ و راتد استخراج گلیسیریزیک اسید از ریشه شیرین‌بیان را به‌کمک حمام فراصوت به‌کار گرفتند و شرایط بهینهٔ استخراج را زمان ۱۰ دقیقه، نسبت حلال به حل‌شونده ۳۰:۱، دما ۴۰ درجهٔ سلسیوس و بسامد ۲۵ کیلوهرتز تعیین کردند و موفق به استخراج ۳۶/۴ میلی‌گرم بر گرم گلیسیریزیک اسید از ریشه شیرین‌بیان شدند [۴۸]. همچنین آنها استخراج با کمک امواج فراصوتی را با استخراج با آب داغ و استخراج سوکسله مقایسه نمودند که با استفاده از روش فراصوت میزان ۳۷/۳۰ میلی‌گرم بر گرم گلیسیریزیک اسید را به‌دست آوردند که در مقایسه با میزان ۲۸/۷۷ میلی‌گرم بر گرم گلیسیریزیک اسید به‌دست آمده از طریق استخراج با آب داغ، مقدار بسیار بیشتری است. آنها همچنین موفق به استخراج ۳۷/۶۳ میلی‌گرم بر گرم گلیسیریزیک اسید با روش سوکسله در مدت زمان ۵ ساعت شدند که در مقایسه با استخراج با کمک امواج فراصوتی که در مدت زمان ۱۰ دقیقه میزان ۳۶/۴ میلی‌گرم بر گرم گلیسیریزیک اسید را استخراج نمودند، به‌مدت زمان استخراج بسیار بیشتری نیاز دارد. وگی و همکاران استخراج پلی‌فنول از پوست درخت جاتوبا را مورد بررسی قرار دادند و شرایط بهینهٔ استخراج را زمان ۴۰ دقیقه، دما ۵۰ درجهٔ سلسیوس، توان ۶۰ وات، بسامد ۲۵ کیلوهرتز و نسبت حلال به حل شونده ۲۰:۱ بیان کردند و دریافتند نسبت به روش متداول ۱۵ درصد افزایش در کل محتوای ترکیبات فنولی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالا مشاهده گردید [۵۰]. کوالسکی و همکاران اثر خیساندن اولیه به‌کمک فراصوت در بهره‌وری از تقطیر اسانس را مورد بررسی قرار دادند و از سه ماده گیاهی شامل برگ نعناع، مرزنجوش و گل بابونه استفاده کردند و دریافتند خیساندن مواد اولیه با آب و تقویت با فراصوت افزایش معناداری در مقدار اسانس را به‌دنبال داشته است [۵۱]. این افزایش در برگ نعنا از ۱/۳۲ به ۱/۴۶ درصد، در گیاه مرزنجوش از ۱/۱۳ به ۱/۲۷ درصد و در گل بابونه تأثیر قابل توجهی مشاهده نشد. والدرامیدیس و همکاران (۲۰۱۰) آسکوربیک اسید موجود در آب پرتغال را که با امواج فراصوتی فراوری شده بود مورد بررسی قرار دادند و از سطوح مختلف شدت (۲۴/۴ الی ۶۱ میکرومتر)، دما (۵ الی ۳۰ درجهٔ سلسیوس) و زمان (صفر الی ۱۰ دقیقه) استفاده کردند و دریافتند که در فراوری با فراصوت کمترین میزان آسکوربیک اسید را در بالاترین دامنه (۶۱ میکرومتر) و دما (۳۰ درجهٔ سلسیوس) گزارش کردند [۵۲] و دریافتند با افزایش دما و دامنه فراصوت میزان کاهش آسکوربیک اسید، افزایش یافت. که دلیل این پدیده را این‌گونه بیان کردند که با افزایش دما تعداد حباب‌ها در اثر کاویتاسیون افزایش و فعالیت حفره‌ها کاهش می‌یابد و حباب‌ها به‌عنوان یک مانع عمل کرده و انرژی فراصوت را تعدیل می‌کنند. کو و همکاران بهینه‌سازی استخراج با فراصوت از ترکیبات فنولی ریشهٔ گیاه پلیگانوم کاسپداتوم را مورد بررسی قرار دادند و از دما ۳۰ تا ۷۰ درجهٔ سلسیوس، غلظت اتانول (۴۰ تا ۸۰) درصد، شدت (۹۰ تا ۱۵۰) وات و زمان ۲۰ دقیقه استفاده کردند و دریافتند فراصوت روش مفیدی در استخراج ترکیبات فنولی ریشه گیاه بوده است و در شرایط بهینهٔ بازده استخراج پیکید ۱۰/۷۷ میلی‌گرم بر گرم و رسوراترول ۳/۸۲ میلی‌گرم بر گرم و امودین۱۱/۷۲

میلی‌گرم بر گرم گزارش کردند [۵۳]. مُرسی فراصوت را به‌عنوان پیش تیمار فرایند تقطیر آبی برای استخراج اسانس گیاه هل مورد بررسی قرار داد و دریافت ترکیبات عمدهٔ اسانس روغنی هل بسته به شرایط استخراج بین ۲۶/۵۹ و ۳۹/۳۴ درصد برای ۱،۸–سینئول و بین ۲۲/۹۴ و ۴۰/۵۶ درصد برای آلفا–ترپنیل استات متغیر بود و کوتاه‌شدن مدت استخراج، بهبود بازده استخراج و تولید اسانس روغنی هل با کیفیت بالا را به دنبال داشته است [۵۴].

۳. نتیجه‌گیری

امروزه نیاز مداوم جامعهٔ بشری به استخراج ترکیبات مؤثر گیاهی سبب انجام پژوهش‌های زیادی در زمینهٔ معرفی یک فرایند استخراج کارآمدتر و اقتصادی‌تر شده است. استفاده از منابع عظیم گیاهی کشور با روش‌های اقتصادی همواره مورد نظر بوده و می‌باشد. امروزه برای جایگزینی این روش‌ها، شیوه‌های استخراجی نوینی معرفی شده‌اند که باعث کاهش مقدار حلال مصرفی، کوتاه‌تر شدن زمان فرایند، افزایش بازدهی و بهبود کیفیت ترکیبات استخراج شده نسبت به روش‌های متداول مانند سوکسله و خیساندن می‌شوند. البته در تمامی روش‌های استخراج عصاره از جمله روش فراصوت، میزان راندمان بالا دلالتی بر افزایش میزان ترکیبات مورد نظر و کیفیت عصاره ندارد و متناسب با بافت گیاه مورد استفاده، نوع مادهٔ جداشدنی و مقاومت مادهٔ جداشده که به دمای به‌کار رفته بستگی دارد می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین شرایط استخراج ترکیبات مختلف در گیاهان با یکدیگر متفاوت بوده و باید به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار بگیرند. استخراج با کمک فراصوت به‌عنوان روشی اثبات شده و به‌صورت جایگزینی مناسب برای شیوه‌های استخراج قدیمی برای بسیاری از گیاهان می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد، اما باید توجه داشت که اکثر این روش‌ها هنوز در مرحلهٔ آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی بوده و برای داشتن درک بیشتر از سازوکار و بهبود طراحی و صنعتی کردن آنها نیازمند انجام پژوهش‌های بیشتر و کامل‌تری می‌باشد.

٤. مآخذ

[1] Aboonajmi, M., M. Jahangiri, S. R. Hassan-Beygi. "A review on application of acoustic analysis in quality evaluation of agro-food products." *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015.

[2] Mason, T. J., E. Riera. "Application of Ultrasound. In: Da-Wen S, editor.'' *Emerging Technologies for Food Processing*, London: Academic Press, 2005, pp. 323-351.

[3] Aboonajmi, M., A. Akram, T. Nishizu, N. Kondo, S. K. Setarehdan, A. Rajabipour. "An ultrasound based technique for the determination of poultry egg quality." *Research in Agricultural Engeneering*, vol. 56, no. 1, 2010, pp. 26-32.

[4] Aboonajmi, M., S. K. Setarehdan, A. Akram, T. Nishizu, N. Kondo. "Prediction of Poultry Egg Freshness Using Ultrasound." *International Journal of Food Properties*, 2014.

[5] Aboonajmi, M., A. Akram, S. K. Setarehdan, A. Rajabipour. "Freshness Assessment of poultry egg by ultrasound signal processing." *Iranian Journal of Biomedical Engineering*, vol. 3, No. 1, 2009, pp. 55-56 (in Persian).

[6] Veggi, P. C., D. T. Santos, A. S. Fabiano-Tixier, C. Le Bourvellec, M. A. A. Meireles, F. Chemat. "ultrasound-assisted Extraction of Polyphenols from Jatoba (Hymenaea courbaril L.var stilbocarpa) Bark." *Food and Public Health*, Vol. 3, No. 3, 2013, pp. 119-129.

[7] Ghobadi, F., M. Ghorbani Javid, A. Sorooshzadeh. “Effects of planting date and corm size on flower yield and physiological traits of saffron (Crocus sativus L.) Under Varamin plain climatic conditions.” *Saffron Agronomy & Technology*, Vol. 2, No. 4, 2015, pp. 265-276.

[8] Wang, L., C. L. Weller. “Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants.” *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 17, No. 6, 2006, pp. 300-312.

[9] Vinatoru, M. “An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs.” *Ultrasonics Sonochemistry*, No. 8, 2001, pp. 303-313.

[10] Vilkhu, K., R. Mawsona, L. Simons, D. Bates. “Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry-A review.” I*nnovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 9, No. 2, 2008, pp. 161-169.

[11] Luque-Garcia, J. L., M. D. Luque de Castro. “Ultrasound: A powerful tool for leaching.” *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 22, 2003, pp. 41-47.

[12] Wu, Y., W. C. Steve, J. Tang, X. Gu. “Optimization of extraction process of crude polysaccharides from boat-fruited sterculia seeds by response surface methodology.” *Food Chemistry*, Vol. 105, No. 4, 2007, pp. 599-1605.

[13] Chemat, F., Z. E. Huma, M. Kamran Khan. “Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction.” *Ultrasonics Sonochemistry*, No. 18, 2011, pp. 813-835.

[14] Chemat, S., A. Lagha, H. AitAmar, P. V. Bartels, F. Chemat. “Comparison of conventional and ultrasound-assisted extraction of carvone and limonene from caraway seeds.” *Flavour and Fragrance Journal*, Vol.19, No. 3, 2004, pp. 188-195.

[15] Nasirifara, Z., A. R. Sadeghi, F. Kamalia. “Effect of extraction condition with two ultrasonic methods on phenolic, flavonoids and DPPH free radical scavenging of Celtis australis extract.” *Electronic Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 5, No. 2, 2013, pp. 115-130 (in Persian).

[16] Kamali, F., A. Sadeghi-Mahunak, Z. Nasiri-far. “The Effect of Ultrasound-Assisted Conditions on the Extraction of Phenolic Compounds and Flavonoids from Autumn Olive Fruits (Elaeagnus umbellate).” *Food Technology & Nutrition*, Vol. 12, No. 2, 2015, pp. 23-32 (in Persian).

[17] Shotipruk, A., B. Kaufman, Y. Wang. “Feasibility study of repeated harvesting of menthol from biologically viable Mentha xpiperata using ultrasonic extraction.” *Biotechnol Progress*, Vol. 17, No. 5, 2001, pp. 924-928.

[18] Povey, M. J. W., T. J. Mason. "Ultrasound in Food Processing, London, Blackie Academic & Professional." 1998, pp. 105-125.

[19] Romdhane, M., C. Gourdon. “Investigation in solid–liquid extraction: influence of ultrasound.” *Chemical Engineering Journal*, Vol. 87, No. 1, 2002, pp. 11-19.

[20] Romdhane, M., C. Gourdon, G. Casamatta. “Local investigation of some ultrasonic devices by means of a thermal sensor.” *Ultrasonics*, Vol. 33, No. 3, 1995, pp. 221-227.

[21] Albu, S., E. Joyce, L. Paniwnyk, J. P. Lorimer, T. J. Mason. “Potential for the use of ultrasound in the extraction of antioxidants from Rosmarinus officinalis for the food and pharmaceutical industry.” *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 11, No. 3-4, 2004, pp. 261-265.

[22] Rodrigues, S., G. A. S. Pinto, F. A. N. Fernandes. "Optimization of ultrasound extraction of phenoliccompounds from coconut (Cocosnucifera) shellpowder by response surface methodology." *Journal Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 15, No. 1, 2008, pp. 95-100.

[23] Dong-rui, Y., G. Leil, W. Shu-jun, X. Fu-quanl. "Response surface optimization of Extraction process for DPPH Free Radical scavenging components from cherry seed." *Food Science*, Vol. 32, No. 22, 2011, pp. 46-50.

[24] Chen, F., Y. sun, G. Zhao, X. Liao, X. Hu, J. Wu, Z. Wang. "Optimization of ultrasound-assisted extraction of anthocyanins in red raspberries and identification of anthocyanins in extract using high-performance liquid chromatography-mass spectrometry." *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 14, No. 6, 2007, pp. 767-778.

[25] Ma, Y., X. Ye, Y. Hao, G. Xu, G. Xu, D. Liu. "Ultrasound assisted extraction of hesperidin from Penggan (Citrus reticulata) peel." *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 15, No. 3, 2008, pp. 227-232.

[26] Sereshti, H., A. Rohanifar, S. Bakhtiari, S. Samadi. "Bifunctional ultrasound assisted extraction and determination of Elettaria cardamomum Maton essential oil." *Journal of Chromatography A*, Vol. 123, pp. 46-53.

[27] Hui, L., O. Etsuzo, I. Masao. "Effects of ultrasound on the extraction of saponin from ginseng." *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 33, No. 5, 1994, pp. 3085-3087.

[28] Sharma, A., M. N. Gupta. "Oil extraction from almond, apricot and rice bran by three-phase partitioning after ultrasonication." *European Journal of Lipid Science and Technology*, Vol. 106, No. 3, 2004, pp. 183-186.

[29] Rostagno, A., M. Palma, C. Barroso. "Ultrasound assisted extraction of soy isoflavones." *Journal of Chromatography A*, Vol. 1012, No. 2, 2003, pp. 119-128.

[30] Ghorbani, M., M. Abonajmi, M. Ghorbani-Javid, A. Arabhosseini. "Effect of extraction conditions with ultrasonic method on phenolic compounds extracted of fennel (Foeniculum vulgare)." *2nd Agriculture & Development Conference*, Tehran, 2015 (In Persian).

[31] Torregrosa, F., M. J. Esteve, A. Frigola, C. Cortes. "Ascorbic acid stability during refrigerated storage of orange-carrot juice treated by high pulsed electric field and comparison with pasteurized juice." *Journal of Food Engineering*, Vol. 73, No. 4, 2006, pp. 339-345.

[32] Cheng, L. H., C. Y. Soh, S. C. Liew, F. F. Teh. "Effects of sonication and carbonation on guava juice quality." *Food Chemistry*, Vol. 104, No. 4, 2007, pp. 1396-1401.

[33] Tiwari, B. K., C. P. O. Donnell, K. Muthukumarappan, P. J. Cullen. "Ascorbic acid degradation kinetics of sonicated orange juice during storage and comparison with thermally pasteurised juice." *LWT - Food Science and Technology*, Vol. 42, No. 3, 2009, pp. 700-704.

[34] Ma, Y., X. Ye, Y. Hao, G. Xu, G. Xu, D. Liu. "Ultrasound assisted extraction of hesperidin from Penggan (Citrus reticulata) peel." *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 15, No. 3, 2008, pp. 227-232.

[35] Rosângela, J., F. Lisiane, P. Valéria, D. Cláudio, O. Ana Paula, O. José. "The use of ultrasound in the extraction of Ilex paraguariensis leaves: a comparison with maceration." *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 14, No. 1, 2007, pp. 6-12.

[36] Zolfaghari, B., A. Yegdaneh. “Recent advances in the field of plant extract combination.” *Journal of Herbal Drugs*, No. 1, 2010, pp. 51-55 (in Persian).

[37] Herrera, M. C., M. D. Luque de Castro. “Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from strawberries prior to liquid chromatographic separation and photodiode array ultraviolet detection.” *Journal of Chromatography A*, Vol. 1100, No. 1, 2005, pp. 1-7.

[38] Zhang, J. S., J. Guan, F. Q. Yang, H. G. Liu, X. J. Cheng, S. P. Li. “Qualitative and quantitative analysis of four species of Curcuma rhizomes using twice development thin layer chromatography.” *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, Vol. 48, 2008, pp. 1024-1028.

[39] Feril, L. B., T. Kondo. “Biological effects of low intensity ultrasound: The mechanism involved and its implications on therapy and on biosafety of ultrasound.” *Journal of Radiation Research*, Vol. 45, 2004, pp. 479-489.

[40] Pétrier, C., E. Combet, T. J. Mason. “Oxygen-induced concurrent ultrasonic degradation of volatile and non-volatile aromatic compounds.” *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 14, 2007, pp. 117-121.

[41] Hart, E. J., A. Henglein. “Free radical and free atom reactions in the sonolysis of aqueous iodide and formate solutions.” *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 89, 1985, pp. 4342-4347.

[42] Hedayati, Kobra. “The effect of ultrasound on the mechanical properties and the extraction of sugar beet.” *Journal of Agricultural Machinery*, Vol. 3, No. 2, 2013, pp.144-153 (in Persian).

[43] Pourfarzad, A., M. H. Hadad Khodaparast, M. B. Habibi Nagafi, M. Hassanzadeh-Khayat. “Efficacy of ultrasound in the extraction of fructan from tubers of Eremurus spectabilis using Box-Behnken design.” *Journal Research Institute of Food Science and Technology*, Vol. 2, No. 3, 2013, 219-228 (in Persian).

[44] Kamali F., A. Sadeghi Mahunak, Z. Nasirifar. “The impact of the extraction of phenolic and flavonoids compounds extracted with the help of ultrasound on the Elaeagnus umbellate.” Food Technology & Nutrition, Vol. 12, No. 2, 2015, pp. 23-39 (in Persian).

[45] Martino E., I. Ramaiola, M. Urbano, F. Bracco, S. Collina. “Microwave assisted extraction of coumarin and related compounds from Melilotus officinalis (L.) Pallas Alternative to Soxhlet and ultrasound-assisted extraction.” *Journal of Chromatography A*, Vol. 1125, No. 2, 2006, pp. 147-151.

[46] Jiménez, A., G. Beltran, M. Uceda. “Highpower ultrasound in olive paste pretreatment. Effect on process yield and virgin olive oil characteristics.” Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 14, No. 6, 2007, pp. 725-731.

[47] Kongkiatpaiboon, S., W. Gritsanapan. “Optimized extraction for high yield of insecticidal didehydrostemofoline alkaloid in Stemona collinsiae root extracts.” *Industrial Crops and Products*, Vol. 41, 2013, pp. 371-374.

[48] Rodríguez, Rojo S., A. Visentin, D. Maestri, M. J. Cocero. “Assisted extraction of rosemary antioxidants with green solvents.” *Journal of Food Engineering*, Vol. 109, 2012, pp. 98-103.

[49] Charpe, T. W., V. K. Rathod. “Extraction of glycyrrhizic acid from licorice root using ultrasound: process intensification studies.” *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 54, 2012, pp. 37-41.

[50] Veggi, C. P., D. T. Santos, A. S. Fabiano Tixier, C. Le Bourvellec, M. A. A. Meireles, F. Chemat. “Ultrasound-assisted Extraction of Polyphenols from Jatoba (Hymenaea courbaril L.var stilbocarpa) Bark.” *Food and Public Health*, Vol. 3, No. 3, 2013, pp. 119-129.

[51] Kowalski, R., G. Kowalska, J. Jamroz, A. Nawrocka, D. Metyk. “Effect of the ultrasound-assisted preliminary maceration on the efficiency of the essential oil distillation from selected herbal raw materials.” *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 24, 2015, pp. 214-220.

[52] Valdramidis, V. P., P. J. Cullen, B. K. Tiwari, C. P. O’Donnell. “Quantitative modelling approaches for ascorbic acid degradation and non-enzymatic browning of orange juice during ultrasound processing.” *Journal of Food Engineering*, Vol. 96, 2010, pp. 449-454.

[53] Kue, C. H., B. Y. Chen, Y. C. Liu, C. M. J. Chang, T. S. Deng, J. H. Chen, C.h. Shieh. “Optimized Ultrasound-Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Polygonum cuspidatum.” *Journal Molecules*, Vol. 19, No. 1, 2014, pp. 67-77.

[54] Morsy, N. F. S. “A short extraction time of high quality hydrodistilled cardamom (Elettaria cardamomum L. Maton) essential oil using ultrasoundas a pretreatment.” *Industrial Crops and Products*, Vol. 65, 2015, pp. 287-292.

پی‌نوشت

1. ultrasonic
2. microwave
3. power ultrasonic
4. degassing
5. filtration
6. emulsification
7. crystallization
8. oxidation
9. crispiness
10. firmness
11. sorting
12. phytochemical
13. antioxidants
14. HIV
15. corm
16. ultrasonic-assisted extraction
17. probes
18. bath
19. elaeagnus umbellate
20. cavitation
21. pressure liquid
22. pressure vapor
23. micro-jet
24. matrix
25. citrus reticulate
26. steam distillation
27. emulsifier
28. soxhlet
29. pretreatment
30 foeniculum vulgare
31. reflux
32. maceration