

مقایسه روش فراصوت با دیگر روش‌های نوین در استخراج عصاره گیاهان

دارویی

اکبر عرب‌حسینی	مجید قربانی جاوید	محمد ابونجمی*	داریوش شاطرآبادی
دانشیار گروه فنی کشاورزی	استادیار گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات	دانشیار گروه فنی کشاورزی	دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک
پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران	پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران	پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران	بیوسیستم
ahosseini@ut.ac.ir	mjavid@ut.ac.ir	abonajmi@ut.ac.ir	shaterabadi.dary@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۰۴

چکیده

گیاهان دارویی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع اولیه برای تهیه مواد آرایشی، عطرسازی، ترکیبات طعم‌دهنده، رنگ‌ها و همچنین در تهیه دارو حائز اهمیت می‌باشند. نیاز مداوم جامعه بشری به استخراج ترکیبات مؤثر گیاهی سبب انجام پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی معرفی فرایند استخراجی کارآمدتر و اقتصادی‌تر شده است. برای استخراج این ترکیبات فعال گیاهی روش‌های عصاره‌گیری متنوعی وجود دارد. روش‌های سنتی دستیابی به ترکیبات طبیعی گیاهان مثل تقطیر آبی یا بخار آب و استخراج با حلال آلی معایبی مانند اتلاف ترکیبات فرّار، بازده کم، زمان استخراج طولانی، تخریب ترکیبات غیر اشباع و باقی ماندن حلال سمّی را به‌دنبال دارد. از این رو روش‌های نوینی برای استخراج عصاره از گیاهان دارویی ابداع گردیده‌اند. انتخاب یک روش مؤثر در استخراج ترکیبات فعال به شاخص‌های مختلفی از جمله نوع گیاه، حلال مورد استفاده، سازگاری با محیط زیست، محدودیت در دما، زمان، هزینه و سایر عوامل می‌تواند بستگی داشته باشد. در این مطالعه سعی شده است تا با معرفی و مقایسه مزایا و معایب چهار روش جدید شامل استخراج به کمک فراصوت^۱، استخراج به کمک ماکروویو^۲، استخراج به کمک سیال فوق بحرانی^۳ و استخراج به کمک حلال پرشتاب^۴ در زمینه استخراج ترکیبات مؤثر گیاهی به ویژه گیاهان دارویی اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری بهتر محققین در این زمینه فراهم گردد. هر روش استخراج، عملکرد متفاوتی دارد و ترکیب‌های مختلفی در عصاره حاصل می‌شود و باید در نظر داشت که عملکرد بالا در عصاره حاصله به معنای عملکرد بالای ترکیبات مورد نظر در عصاره نمی‌باشد. لذا با در نظر گرفتن مزایا و معایب مختص هر روش و شاخص‌های مذکور و همچنین در نظر

داشتن محدودیت‌هایی از جمله هزینه‌های محاسباتی، اتلاف ترکیبات فرار و احتمال از بین رفتن ترکیبات حساس به دما محقق بایستی روش بهینه را متناسب با شرایط آزمایش خود برگزیند.

واژگان کلیدی: استخراج، حلال پرشتاب، سیال فوق بحرانی، عصاره، فراصوت، گیاهان دارویی، ماکروویو

۱. مقدمه

محصولات طبیعی حاصل از گیاهان دارویی یکی از مهم‌ترین منابع اولیه برای تهیه مواد آرایشی، عطرسازی، ترکیبات طعم‌دهنده، رنگ‌ها و همچنین در تهیه دارو حائز اهمیت می‌باشند. گیاهان به‌عنوان ترکیبات طبیعی شناخته شده‌اند. امروزه اصطلاح ترکیبات طبیعی به‌صورت متداول برای اشاره به گیاهان، معجون‌های گیاهی، مکمل‌های غذایی گیاهی، داروهای سنتی و به‌طور کلی طب سنتی استفاده می‌شود. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی امروزه بیش از ۸۰ درصد مردم جهان برای درمان بیماری‌ها هنوز از داروهایی با منشأ گیاهی استفاده می‌کنند. تقریباً یک چهارم داروهای تهیه شده در دنیا دارای منشأ گیاهی هستند که یا به‌طور مستقیم از گیاهان عصاره‌گیری شده‌اند، یا براساس ترکیب‌های گیاهی ساخته شده‌اند [۱].

نیاز مداوم جامعه بشری به استخراج ترکیبات مؤثر گیاهی سبب انجام پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی معرفی فرایند استخراجی کارآمدتر و اقتصادی‌تر شده است. برای استخراج ترکیبات فعال گیاهی روش‌های عصاره‌گیری متنوعی وجود دارد [۲].

روش‌های متداول عصاره‌گیری بر پایه قرار گرفتن گیاه در حلال مناسب می‌باشد که به‌منظور افزایش سرعت فرایند از هم زدن یا حرارت دادن استفاده می‌شود. از جمله روش‌های متداول می‌توان سوکسله^۵، تقطیر، خیساندن و پرکولاسیون^۶ را نام برد [۳]. روش‌های سنتی دستیابی به ترکیبات طبیعی گیاهان مثل تقطیر آبی یا بخار آب و استخراج با حلال آلی معیابی مانند اتلاف ترکیبات فرار، بازده کم، زمان استخراج

طولانی، تخریب ترکیبات غیر اشباع و باقی ماندن حلال سمی را به دنبال دارد [۴].

رشد تقاضا برای جایگزین‌های سبزتر و مواد طبیعی که شامل ترکیبات سمی نباشند و سلامت و محیط زیست را به خطر نیاندازد به‌علاوه استفاده زیاد از حلال‌های شیمیایی توجه صنایع را به روش‌های استخراج غیر سمی و قابل اطمینان جلب کرده است [۵]، لذا به‌منظور استخراج منابع از مواد گیاهی، روش‌های استخراج برای به‌دست آوردن این محصولات با ارزش به‌صورت تجاری توسعه یافته‌اند. این روش‌ها تا حد زیادی بر روی راه‌حل‌های نوین به‌منظور کاهش و یا حتی عدم استفاده از حلال در فرایند استخراج و همچنین به‌دست آوردن محصولات خالص‌تر و نیز استفاده وسیع‌تر در کاربردهای مختلف، متمرکز شده‌اند [۶].

این مقاله‌ی مروری با هدف معرفی و بررسی مزایا و معایب برخی از روش‌های استخراج عصاره‌گیری از جمله عصاره‌گیری به کمک فراصوت و سپس مقایسه این روش با دیگر روش‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

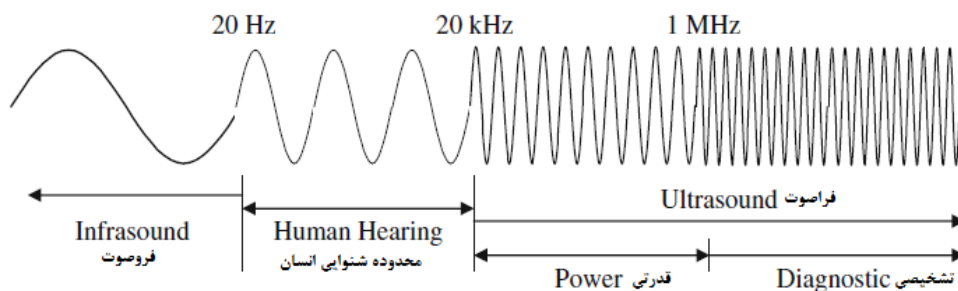
۲. روش‌های عصاره‌گیری

۲-۱. روش استخراج به کمک فراصوت (UAE)

فراصوت امواج مکانیکی است که برای پراکندگی به محیط الاستیک و صداهایی با فرکانس موجی متفاوت نیاز دارد. صداها در فرکانس شنوایی انسان (از ۱۶ هرتز تا ۱۶-۲۰ کیلوهرتز) هستند، درحالی‌که فراصوت فرکانس‌هایی بالاتر از شنوایی انسان، اما پایین‌تر از فرکانس‌های مایکروویو (از ۲۰ کیلوهرتز تا ۱۰ مگاهرتز) دارد. امواج فراصوتی با بسامد کمتر

از ۱۰۰ کیلوهرتز و توان بیشتر از یک وات بر سانتی متر مربع به امواج فراصوتی قدرتی معروفاند. این امواج کاربرد وسیعی در صنایع غذایی دارند و شامل برش، گاززدایی، فیلتراسیون، خشک کردن، همونیژاسیون، ترد کردن گوشت، تعیین کیفیت تخم مرغ، تشکیل امولسیون، تمیز کردن سطوح، استریلیزاسیون تجهیزات، کریستالیزاسیون چربی‌ها، تسریع

واکنش‌های اکسیداسیون، مهار فعالیت آنزیم‌ها و میکروب‌ها و استخراج ترکیبات مولد عطر و طعم می‌باشد. همچنین امروزه از فناوری‌های صوتی در ارزیابی مواد غذایی (تردی، سفتی و بافت)، تعیین خواص فیزیکی (اندازه، شکل، حجم و رطوبت)، درجه‌بندی و جداسازی مواد غذایی، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].



شکل ۱. طیف صدا [۷]

سازوکار اصلی استخراج با امواج فراصوت به پدیده کاویتاسیون^۷ مربوط می‌شود. همان‌طور که یک موج صوتی از میان یک محیط الاستیک عبور می‌کند، باعث جابه‌جایی طولی ذرات شده، به‌عنوان یک پیستون در سطح محیط عمل کرده و در نتیجه یک توالی مراحل انقباض و انبساط صورت می‌گیرد [۴].

شده در محیط همان حباب‌های کاویتاسیون هستند که واکنش اثر فراصوتی می‌باشند. در واقع این حباب‌های کاویتاسیون قابلیت بزرگ شدن در طول فاز حجیم (انبساط) و کوچک شدن در چرخه فشرده هستند. هنگامی که اندازه این حباب‌ها به نقطه بحرانی می‌رسد در طول چرخه فشرده از هم می‌پاشند و مقدار زیادی انرژی آزاد می‌سازند.

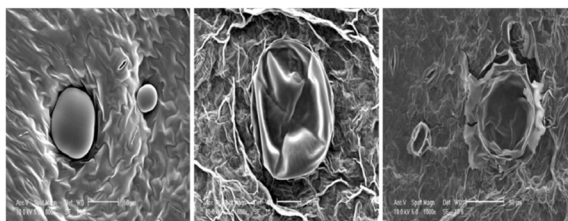
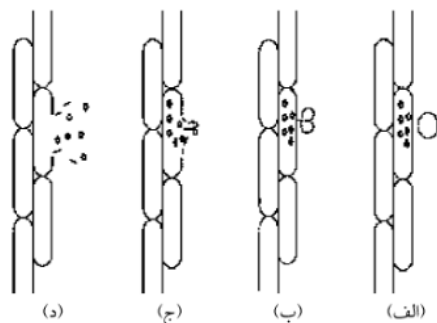
این نتایج در یک توالی از منقبض (فشرده) و منبسط (حجیم) شدن فاز درون محیط است. هنگامی که پیستون در موقعیت باز خود قرار دارد، باعث فشرده‌سازی محیط و هنگامی که در موقعیت اولیه خود قرار دارد یک فاز حجیم (انبساط) را ایجاد می‌کند. هر محیط یک فاصله مولکولی بحرانی دارد. در محدوده کمتر از این مقدار بحرانی، مایع دست نخورده باقی می‌ماند، اما بیشتر از این فاصله، مایع از هم می‌پاشد (تجزیه می‌شود) و می‌تواند حفره‌هایی به وجود آید. در شرایطی که امواج فراصوت در چرخه انبساط (حجیم شدن) به اندازه کافی قوی باشد، فاصله بین مولکول‌های مجاور می‌تواند به فاصله مولکولی بحرانی مایع و یا بیشتر از آن برسد. حفره‌های ایجاد

دما و فشار در لحظه فروپاشی حباب کاویتاسیون و در نزدیکی آن تا ۵۰۰۰ درجه کلوین و ۲۰۰۰ اتمسفر در روش حمام فراصوت برآورد شده است. این پدیده به‌طور چشمگیری باعث ایجاد نقاط داغ درون محیط می‌شود که قادر است به واکنش شیمیایی سرعت بخشد.

هنگامی که این فروپاشی حباب بر روی سطح یک ماده جامد رخ می‌دهد، دما و فشار بالای ایجاد شده، میکروجت‌هایی مستقیم به سمت سطح جامد تولید می‌کند. این میکروجت‌ها مسئول اثر پاک‌سازی چربی و مواد زائد توسط فراصوت از سطوح فلزی هستند که به‌طور گسترده برای شستشوی مواد استفاده می‌شود.

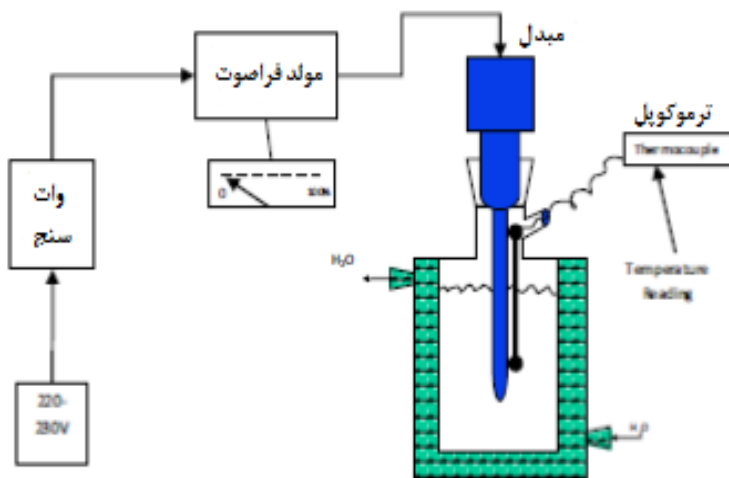
کاربرد دیگر میکروجت‌ها در صنایع غذایی استخراج ترکیبات گیاهی است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، یک حباب کاویتاسیون می‌تواند نزدیک سطح ماده گیاهی تشکیل شود، شکل ۲-الف، سپس در چرخه فشرده این حباب فرو می‌پاشد، شکل ۲-ب و یک میکروجت به سمت ماتریس گیاه ایجاد می‌شود، شکل ۲-ج و د.

فشار و دمای بالا در این فرایند دیواره سلولی ماتریس گیاه را تخریب می‌کند و محتوای آن می‌تواند در محیط رها شود، شکل ۲-د. این یک ابزار جالب برای استخراج جزئی (ذره‌ای) از محصولات طبیعی است [۸].



شکل ۲. فروپاشی حباب کاویتاسیون و آزاد سازی مواد گیاهی [۸]

شکل ۳. فروپاشی حباب کاویتاسیون و آزاد سازی مواد گیاهی در استخراج اسانس از نمونه ریحان [۸]

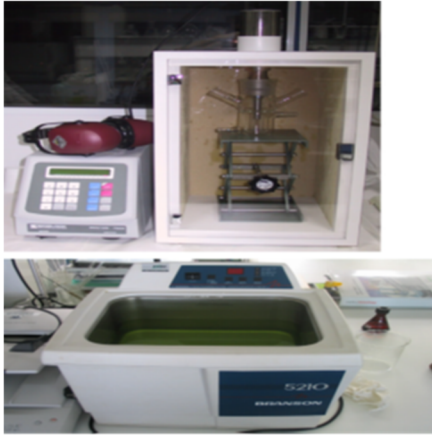


شکل ۴. سیستم عصاره‌گیری به کمک پروب فراصوت [۹]

۱-۱-۲. راکتورهای آزمایشگاهی در مقیاس صنعتی

معمولا دو نوع مختلف از تجهیزات فراصوت در آزمایشگاه استفاده می‌شود، شکل ۵. اولی (تصویر پایین) حمام فراصوت است که برای پراکندگی جامد در حلال (فراصوت به‌طور

چشمگیری اندازه ذرات جامد را کاهش می‌دهد که باعث افزایش قابلیت انحلال‌پذیری آن می‌شود)، بدین منظور روش‌های گاززدایی (محلول‌ها) و یا حتی پاک‌کنندگی مواد کوچک از ظروف شیشه‌ای در داخل حمام، استفاده می‌شود. حمام فراصوت کمتر برای واکنش‌های شیمیایی



شکل ۵. سیستم‌های معمول فراصوت (پروب و حمام)



شکل ۶. راکتور آزمایشگاهی استخراج فراصوت



شکل ۷. تجهیزات فراصوت صنعتی

استفاده می‌شود حتی اگر به کارگیری‌اش آسان و از لحاظ اقتصادی سودمند باشد. زیرا قابلیت تکرارپذیری واکنش کم است. در واقع، شدت تحویل پایین است و توسط آب داخل حمام و دیواره‌های ظروف شیشه‌ای مورد استفاده، آزمایش تضعیف می‌شود.

مورد دوم، سیستم پروب فراصوت می‌باشد که بسیار قوی‌تر است. زیرا شدت فراصوت در مقایسه با حمام فراصوت در یک سطح کوچک (تنها در نوک پروب) انتشار می‌یابد.

تغییر دیگر در این است که پروب به‌طور مستقیم در فلاسک (ظرف) واکنش غوطه‌ور است، بنابراین تضعیف کمتر اتفاق می‌افتد. این سیستم پروب به‌طور گسترده برای فراصوت‌دهی نمونه‌ها با حجم کم استفاده می‌شود اما بایستی به‌طور ویژه مراقب بود زیرا افزایش سریع دما در نمونه اتفاق می‌افتد.

یک راکتور استخراج سونو (فراصوت) ویژه (از ۰/۵ تا ۳ لیتر) توسط (www.etsreus.com, FRANCE) REUS توسعه یافته است، شکل ۶ شدت فراصوت در حدود ۲۱ W/cm با فرکانس ۲۵ kHz است.

به‌منظور حفظ درجه حرارت ثابت، راکتور از یک پوشش دو لایه که در آن می‌تواند آب خنک‌کاری در گردش باشد، ساخته شده است.

مزیت اصلی این نوع دستگاه این است که محصولات طبیعی و حلال استخراج می‌تواند در یک ظرف مخلوط و فراصوت به‌صورت مستقیم به مخلوط به کار گرفته شود.

برای اجرای صنعتی و یا آزمایش‌های آزمایشگاهی در مقیاس بالا، REUS همچنین راکتورهایی از ۳۰ تا ۱۰۰۰ لیتر شکل ۷ را توسعه داده است.

سیستم‌های پمپ کردن به حمام فراصوت جهت پرکردن حمام فراصوت، بهم زدن مخلوط و خالی کردن آن در پایان آزمایش اضافه شده است.

۲-۱-۲. مزایا و معایب

از مزایای این روش می‌توان افزایش سرعت عصاره‌گیری و کاهش زمان، افزایش عملکرد، مصرف کم حلال و قابلیت استفاده از انواع حلال، بهبود کیفیت عصاره (از لحاظ خواص آنتی‌اکسیدانی و ...)، کاهش دما و امکان استخراج ترکیبات حساس به حرارت را نام برد.

معایب این روش، تضعیف امواج در حضور یک فاز پخش شده، نیاز به فیلتراسیون و جدا کردن عصاره از ماده گیاهی، محدود شدن بخش فعال فراصوت درون استخراج کننده به ناحیه پیرامون پروب، خوردگی پروب در اثر مرور زمان و تخریب برخی از ترکیبات در اثر اعمال فراصوت به خصوص در شدت‌های بالا و زمان‌های زیاد است.

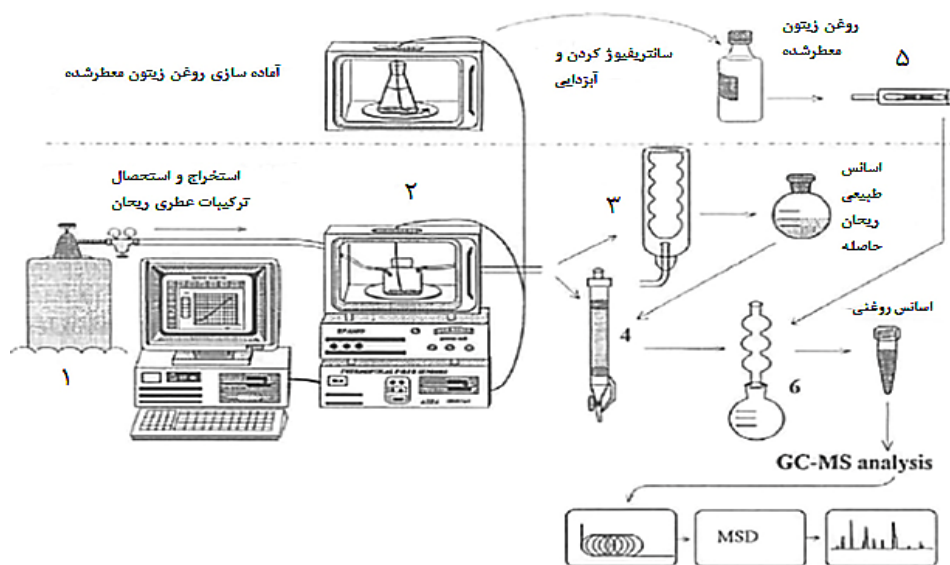
۲-۲. روش استخراج به کمک ماکروویو (MAE)

ماکروویو امواج الکترومغناطیسی با فرکانس بالا بین فرکانس رادیویی و ناحیه مادون قرمز از طیف الکترومغناطیسی (فرکانس از ۰/۳ تا ۳۰۰ گیگاهرتز) می‌باشد. اخیراً این امواج علاوه بر پختن غذا، کاربردهای دیگری در صنعت از قبیل

پردازش مواد، اصلاح خاک و ساخت مواد آلی نیز دارد. برخلاف حرارت معمولی که در آن گرما به آرامی از خارج به داخل یک شیء نفوذ می‌کند، انرژی ماکروویو سرد است که گرما تولید می‌کند (حرارت‌دهی با افت دی‌الکتریک جایگزین می‌شود).

بنابراین، حرارت‌دهی به‌طور دقیق در مرکز جسم اتفاق می‌افتد و گرما از داخل به خارج جسم منتشر می‌شود. انرژی ماکروویو بر روی مولکول‌ها با انتقال یونی و چرخش دو قطبی اثر می‌گذارد. در انتقال یونی، یون‌های داخل محلول زمانی که میدان الکترومغناطیسی برقرار می‌شود، مهاجرت می‌کنند. مقاومت محلول در برابر این جریان منجر به اصطکاک و در نتیجه گرمادهی محلول می‌شود.

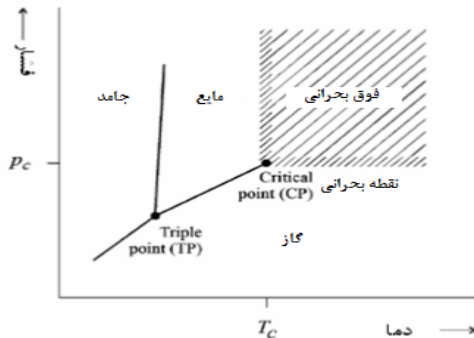
چرخش دو قطبی به معنای جهت‌گیری دو قطبی‌ها با میدان به‌کار گرفته شده، می‌باشد که در ۲۴۵۰ مگاهرتز، دو قطبی‌ها $4/9 \times 10^9$ بار در ثانیه به خط و تصادفی درمی‌آیند. این جابه‌جایی اجباری مولکولی باعث اصطکاک مولکولی و در نتیجه گرمادهی محلول می‌شود [۱۰].



شکل ۸. استفاده از ماکروویو برای آماده‌سازی ریحان معطر شده با روغن زیتون و اسانس ریحان طبیعی (۱) سیلندر N_2 (۲) آون ماکروویو (۳)

سیفون انگشتی سرد (۴) ستون صمغ (۵) کارتریج زغال چوب (۶) اوپراتور Kuderma-Danish [۱۱]

کروماتوگرافی^۹ استفاده می‌شوند. کاربردهای خاص آن در صنایع غذایی نیز شامل استخراج کافئین از دانه‌های قهوه سبز، تولید عصاره آجگو، بهبود بو و مزه‌ی گیاهان و ادویجات، استخراج و تفکیک جزء به جزء روغن‌های خوراکی و حذف مواد آلاینده و موارد دیگر می‌شود [۱۳].



شکل ۹. محدوده حالت فوق بحرانی برای یک ماده خالص [۱۳]

حالت فوق بحرانی^{۱۰} برای یک سیال زمانی به دست می‌آید که دما و فشار آن بیشتر از نقطه بحرانی سیال بوده و سیال به واسطه افزایش فشار و دما به ترتیب به مایع و گاز تبدیل نشود در شرایط پایین‌تر از نقطه بحرانی، تعادلات مایع - بخار به گونه‌ای است که بخار در سطح جداکننده دو فاز می‌شود و مایع در سطح پایین آن قرار می‌گیرد. با افزایش دما و فشار به تدریج چگالی^{۱۱} مایع کاهش و جرم حجمی گاز افزایش می‌یابد. در نقطه بحرانی، چگالی دو حالت مایع و گاز با هم برابر می‌شود و تشخیص سطح جداکننده دو فاز امکان‌پذیر نیست. نقطه بحرانی بالاترین دما و فشاری است که سیال می‌تواند در یک زمان در دو فاز مایع و گاز وجود داشته باشد و در بالاتر از این نقطه، سیال به شکل گاز یا مایع وجود ندارد. این فاز از نظر قدرت حلالیت و چگالی مشابه مایعات و از نظر خصوصیات انتقالی شبیه گازها است به طوری که گرانیوی^{۱۲} پایین سیال فوق بحرانی و قدرت نفوذ بالای آن، سبب بروز خصوصیات انتقال جرم بهتر این سیال در مقایسه با حلال‌های رایج می‌شود. در نتیجه، سرعت استخراج و جداسازی به طور قابل ملاحظه سریع‌تر از حالتی است که فرایند استخراج به طور معمول صورت می‌گیرد.

انتخاب حلال مناسب کلید موفقیت در استخراج است. در انتخاب حلال مناسب می‌بایست خاصیت جذب ماکروویو حلال، تعامل حلال با ماتریس گیاهی، و حلالیت آنالیت (ماده تجزیه شده) در حلال در نظر گرفته شود. هر چه دو قطبی لحظه‌ای حلال بزرگ‌تر باشد، تابش ماکروویو زودتر گرم می‌شود.

به عنوان مثال، هگزان (دو قطبی لحظه‌ای کوچک‌تر از ۰/۱ دبای^۸) تا زمانی که استون با دو قطبی لحظه‌ای ۲/۶۹ دبای در کسری از ثانیه گرم می‌شود، گرم نخواهد شد. بنابراین ترکیب هگزان استون یک حلال ایده‌آل برای ترکیبات مهم زیستی همراه کاربردهای فراوان دیگر است [۱۰].

۲-۱- مزایا و معایب

از مزایای این روش می‌توان کاهش زمان استخراج، کاهش میزان حلال مصرفی، بهبود عملکرد استخراج، سادگی و هزینه نسبتاً پایین را نام برد.

از معایب این روش آسیب به ترکیبات حساس به حرارت، نیاز به یک فیلتر یا قوه‌گریز از مرکز برای حذف کردن جامد باقی مانده در طول فرایند و ضعیف بودن عملکرد برای استخراج ترکیبات غیر قطبی، با قطبیت پایین و یا فرار می‌باشد [۱۲].

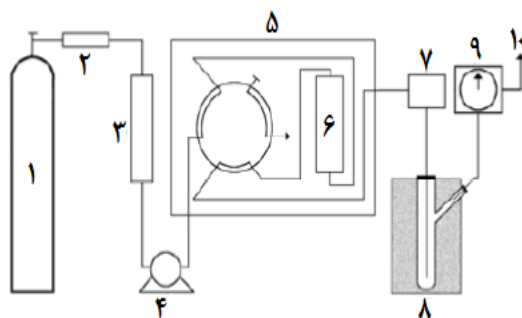
۲-۳. روش استخراج با سیال فوق بحرانی (SFE)

سیالات فوق بحرانی موادی هستند که در فشار و دمای بالاتر از حالت بحرانی خود قرار دارند که موجب می‌شود تا خصوصیات این سیالات در محدوده وسیعی تغییر کند. قدرت حلالیت آنها برای مواد غیر قطبی یا با قطبیت کم، بسیار بالاست که با افزایش جرم مولکولی کاهش می‌یابد.

سیالات فوق بحرانی برای استخراج جامدات به صورت ناپیوسته، برای جداسازی مایعات به صورت چند مرحله‌ای ناهمسو، برای جذب سطحی و همچنین برای فرایند

انتخاب حلال مهم‌ترین موضوع در طراحی یک فرایند استخراج فوق بحرانی است. حلال‌هایی که برای روش سیال فوق بحرانی به کار می‌روند باید دارای ویژگی‌هایی نظیر حلالیت خوب، بی اثر بودن بر فرآورده‌ها، جداسازی آسان از نمونه، ارزان بودن و فشار بحرانی پایین باشند. علاوه بر شرایط یاد شده، سازگاری با محیط زیست از نکات مورد توجه در انتخاب یک سیال فوق بحرانی به شمار می‌آید که در این میان دی‌اکسیدکربن بسیار مورد توجه است، زیرا این ماده دارای نقطه بحرانی پایین (دمای ۳۱/۱ درجه سلسیوس و فشار ۷۳/۸ بار)، ارزان قیمت، پایدار، غیر قابل اشتعال بوده و از نظر زیست‌محیطی نیز قابل پذیرش است و می‌تواند به آسانی به سیستم برگردانده شود. برای استخراج ترکیبات غیر

قطبی می‌توان از دی‌اکسیدکربن و برای ترکیبات قطبی از حلال‌های کمکی مانند متانول استفاده کرد. تحقیقات نشان می‌دهند نقش اصلی حلال کمکی در فرایند استخراج فوق بحرانی، افزایش قطبیت سیال فوق بحرانی نظیر دی‌اکسیدکربن است و معمولاً هنگامی که جزء حل شونده قطبی باشد و قدرت انحلال سیال فوق بحرانی غیر قطبی با تغییر دما و فشار افزایش پیدا نکند مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این حلال‌های کمکی با ایجاد میان کش‌های^{۱۳} خاص بر روی ترکیبات مورد نظر قدرت انتخاب‌پذیری حلال و سرعت استخراج را افزایش می‌دهند [۱۴].

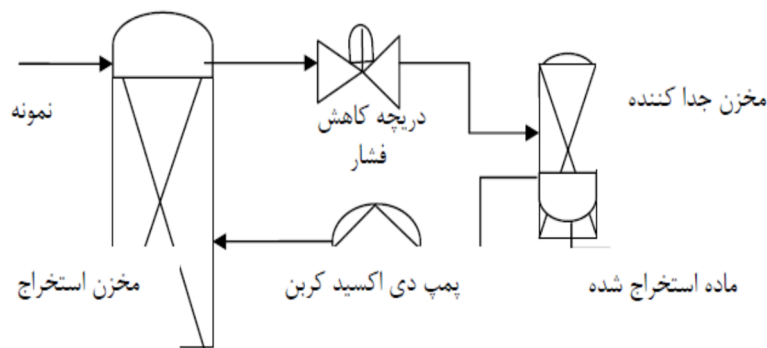


شکل ۱۰. دیاگرام دستگاه SFE (سیال فوق بحرانی): (۱) کپسول CO₂ (۲) رطوبت‌گیر (۳) میرد (۴) پمپ HPLC (۵) آون (۶) سلول استخراج (۷) رگولاتور کنترل فشار (۸) ظرف جمع‌کننده نمونه مستقر در حمام یخ (۹) گازومتر (۱۰) خروج گاز CO₂ [۱۵]

۲-۳-۱. روش عملیاتی فرایند

در روش عملیاتی فرایند، نمونه، در مرحله بارگیری^{۱۴} تماس مستقیم با جریان حلال فوق بحرانی قرار می‌گیرد و مواد قابل حل شدن وارد جریان حلال می‌شوند (شکل ۱۱). شرایط (نوع حلال، فشار و دما) را می‌توان طوری تنظیم کرد که تنها ترکیبات خاصی جدا شوند، پس از استخراج ترکیبات مورد نظر، حلال و ماده استخراج شده از یکدیگر تفکیک می‌گردند. در این مرحله با تغییر جزئی دما یا فشار و یا هر دو که سبب کاهش قدرت حلالیت حلال می‌شود، جزء حل شونده از

حلال جدا می‌شود. ترکیبات استخراج شده به صورت قطرات مایع و یا ذرات جامد، متراکم^{۱۵} می‌گردند، که نوع تراکم به دما و فشار در مرحله جداسازی^{۱۶} بستگی دارد. سپس حلال دوباره به شرایط فوق بحرانی می‌رسد و دوباره وارد چرخه می‌شود. مقدار حلال از دست رفته را می‌توان با اضافه کردن حلال تازه جبران کرد. شایان ذکر است فرایند استخراج، می‌تواند به دو صورت غیر مداوم^{۱۷} و مداوم^{۱۸} انجام شود که در هر دو حالت، حلال فوق بحرانی در تماس با نمونه قرار می‌گیرد و می‌تواند ماده مورد نظر را جدا نماید [۱۴].



شکل ۱۱. مراحل استخراج با سیال فوق بحرانی [۱۴]

۲-۳-۲. مزایا و معایب

از مزایای این روش قدرت حلالیت سیال فوق بحرانی می‌باشد که تحت تأثیر دما و فشار تغییر یافته، احتمال استخراج ترکیبات خاص را فراهم می‌کند و در پایان کار حلال به راحتی قابل بازیابی می‌باشد. به دلیل استفاده از حلال‌های ایمن در این روش، از آلودگی محیط پیشگیری می‌شود، افزایش عملکرد و کیفیت روغن‌های فرآور و مواد معطر از دیگر محاسن این روش می‌باشند.

از معایب این روش استفاده از فشارهای بالا بوده که مستلزم مصرف هزینه‌های بالا می‌باشد و به‌علاوه برای استخراج مواد با قطبیت بالا دارای محدودیت می‌باشد [۱۶].

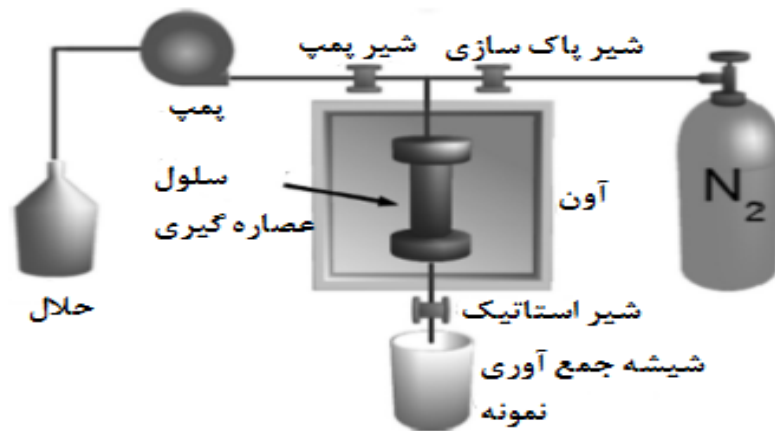
۲-۴. روش استخراج با حلال پرشتاب (ASE)

استخراج با حلال پرشتاب که همچنین با عنوان استخراج سیال تحت فشار و یا استخراج مایع تحت فشار^{۱۹} شناخته شده است، برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ شرح داده شد. استخراج با حلال پرشتاب از حلال‌های آلی و یا آبی که در دما و فشار بالا برای به‌دست آوردن استخراج کامل آنالیت‌ها از نمونه‌های جامد و نیمه جامد در دوره‌های زمانی کوتاه و با مقادیر کمی از حلال‌ها، در مقایسه با روش‌های متداول استخراج استفاده می‌کند [۱۷].

استخراج با حلال پرشتاب در بسیاری از کاربردها مانند استخراج از آفت کش‌ها و ترکیبات فعال زیستی / مغذی استفاده می‌شود. این روش از دما و فشار بالاتر در طول فرایند استخراج بهره‌گیری می‌کند. فشار بالا ($1000 \text{ psi} <$) به حلال اجازه می‌دهد در دمای بالاتر از نقطه جوش خود که نرخ نفوذ را افزایش می‌دهد، اثرات قوی ماتریس محلول مختل و گرانروی حلال مایع را کاسته، اجازه نفوذ بهتر به ماتریس و پس از آن بهبود استخراج، گرم شود.

آب و اتانول قادر به استخراج طبقات مختلف از ترکیبات مانند پلی فنول‌ها بسته به درجه حرارت مورد استفاده در استخراج با حلال پرشتاب می‌باشند. علاوه بر این، استفاده از آب و اتانول استخراج پایدار زیست‌محیطی که با اصول دوازده‌گانه شیمی سبز مطابقت دارد، را ممکن می‌سازد.

سطح بالایی از آنتی‌اکسیدان از پوست صنوبر زمانی به‌دست آمد که آب و اتانول در یک سیستم استخراج تحت فشار و دمای بالا استفاده شد. دیگر ترکیبات فعال زیستی مانند آنتوسیانین^{۲۰} و تانن^{۲۱} از میوه‌ها با استفاده از استخراج با حلال پرشتاب استخراج شده است. این موضوع نشانگر آن است که استخراج سریع آنتوسیانین‌ها، تانن‌ها و دیگر ترکیبات فنولی از میوه با استفاده از استخراج با حلال پرشتاب، ممکن است [۱۸].



شکل ۱۲. طرح واره استخراج به کمک حلال پرشتاب [۱۹]

تولید بیشتر و حذف مراحل از پروسه می‌باشد. استخراج به کمک ماکروویو، با توجه به امکان استفاده بهینه از انرژی ماکروویو برای استخراج ترکیبات با ارزش از نمونه‌های جامد، توجه را به خود جلب کرده است. پن و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۰۳ دریافتند که استخراج به کمک ماکروویو بازده استخراج پلی‌فنول‌ها و کافئین را از برگ‌های چای سبز افزایش می‌دهد، ولی میزان رطوبت نمونه‌ها یک شاخص مؤثر برای بهبود عملکرد است.

هنگامی که از نمونه‌های خشک استفاده شود، مقدار عملکرد به‌طور چشمگیری کاهش داشت. علاوه بر این، مالینز و همکاران [۲۲] در سال ۱۹۹۷ گزارش دادند که استفاده از هگزان به عنوان حلال در حضور یک نمونه کاملاً خشک رضایت‌بخش نبود. در واقع، بازده (عملکرد) استخراج به کمک ماکروویو معمولاً درحالی‌که فاقد یک حلال دو قطبی به‌منظور جذب انرژی ماکروویو باشد، بسیار پایین است، بنابراین این روش در بخش حلال و ماهیت مواد جامد محدود است.

استخراج به روش سیال فوق بحرانی یک روش ابتکاری با پس‌زمینه سبز به‌منظور استخراج مواد جامد با استفاده از سیال فوق بحرانی می‌باشد. دی‌اکسید کربن پر استفاده‌ترین حلال در استخراج با سیال فوق بحرانی به خاطر مرسوم بودن، غیر قابل اشتعال بودن، ارزان قیمت بودن، از بین بردن آسان پس

۲-۴-۱. مزایا و معایب

از فواید این روش سرعت بالا، قیمت ارزان، عملکرد بالا و همچنین پرهیز از باقی مانده‌های آلی سمی در مواد استخراج شده می‌باشد. عیوب این روش نیاز به مقدار زیاد آب و دمای نسبتاً بالاست [۲۰].

۳. مقایسه روش فراصوت با روش‌های استخراج

غیر معمول

با استفاده از ماکروویو، می‌توان استخراج و تقطیر را در چند دقیقه به جای چند ساعت، با بهره‌وری بالا، استفاده از حلال کمتر، استفاده و کارکرد آسان، درجه خلوص بیشتر محصول نهایی، حذف پسماند آبی و مصرف تنها کسری از انرژی که به‌صورت عادی برای یک روش جداسازی مانند تقطیر یا استخراج با حلال، می‌توان انجام داد.

چندین گروه از ترکیبات مانند اسانس‌های روغنی، رایحه‌ها، رنگ‌دانه‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و ترکیبات آلی دیگر به‌طور مؤثر استخراج شده‌اند. مزایای استفاده از انرژی ماکروویو، که یک منبع غیر تماسی حرارت به حساب می‌آید، شامل مواردی از قبیل حرارت‌دهی مؤثرتر، انتقال انرژی سریع‌تر، کاهش گرادیان حرارتی، حرارت‌دهی انتخابی، تجهیزات کوچک‌تر، پاسخ کنترلی سریع‌تر به پروسه حرارت، راه‌اندازی سریع‌تر،

از استخراج و ظرفیت بالای حل کردن مولکول‌های غیر قطبی می‌باشد. حلال‌های موجود دیگر شامل فرون، آمونیاک و برخی حلال‌های آلی دیگر می‌باشد.

در روش معمول استخراج با سیال فوق بحرانی، سیال فوق بحرانی به صورت مداوم وارد ماتریس جامد شده و مواد مورد نظر را حل می‌کند. استخراج می‌تواند با تنظیم ظرفیت حلالیت سیال فوق بحرانی توسط تغییر دما یا فشار، به طور قابل ملاحظه‌ای انتخابی باشد.

مزایای عمده استخراج با سیال فوق بحرانی شامل اثر پیش غلظت، تمیز بودن، ایمنی و سادگی می‌باشد. استخراج با سیال فوق بحرانی با دی‌اکسید کربن، یک تکنیک غیر معمول است که می‌تواند عملکرد خوبی را ارائه دهد. این روش مناسب استخراج عطر، تولید اسانس با کیفیت تر و با عملکرد بهتر می‌باشد. معایب استخراج با سیال فوق بحرانی نیاز به تجهیزات گران‌قیمت و سختی استخراج مولکول‌های قطبی بدون اضافه کردن تعدیل‌کننده^{۲۲} به دی‌اکسید کربن می‌باشد.

استخراج با حلال پرشتاب از حلال‌هایی که در روش‌های سنتی استخراج کاربرد دارد، استفاده می‌کند ولی در دماها و فشارهای بالا کار می‌کند. استخراج با حلال پرشتاب، تعمیم یافته به استخراج به کمک سیال تحت فشار، به عنوان یک روش جایگزین پذیرفته شده است. نمونه شامل یک کارتریج استخراج در یک اجاق (آون) معمولی حرارت‌دهی می‌شود و از حلال استخراج عبور داده می‌شود. استخراج به صورت استاتیک برای مدت کوتاهی انجام می‌شود.

هنگامی که استخراج به اتمام رسید، گاز فشرده، حلال را از کارتریج به مجراهای (لوله‌های) جمع‌آوری انتقال می‌دهد. استخراج با حلال پرشتاب امکان استخراج سریع به همراه مصرف کم حلال با استفاده از دمای بالا (حداکثر ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) که موجب افزایش نفوذپذیری حلال و فشار بالا (۲۰۰MPa) به منظور حفظ فاز مایع حلال، را می‌دهد. استخراج با حلال پرشتاب، طیف گسترده‌ای از کاربردها را

شامل می‌شود، اما دمای بالای استخراج می‌تواند باعث تخریب ترکیبات حساس به حرارت (دما) شود.

فیشر و همکاران [۲۳]، در سال ۱۹۹۷ اشاره کردند که معایب اصلی استخراج با حلال پرشتاب، تداخل پس‌زمینه‌ای قوی و حد تشخیص بالا می‌باشد. علاوه بر این، تجهیزات هم بسیار گران هستند.

استخراج به کمک فراصوت یک فناوری در حال ظهور است که می‌تواند انتقال جرم و حرارت را سرعت بخشد و در زمینه استخراج به طور موفق استفاده شود. امواج فراصوت پس از تعامل با مواد گیاهی در معرض، خواص شیمیایی و فیزیکی آن را تغییر می‌دهد و اثر کاویتاسیونی آن، رهاسازی ترکیبات قابل استخراج را تسهیل کرده و انتقال جرم را توسط تخریب دیواره سلولی افزایش می‌دهد. فراصوت یک روش پاک است که از استفاده زیاد از حلال جلوگیری می‌کند در حالی که زمان کارکرد را کاهش می‌دهد. فراصوت به طور موفق در زمینه استخراج گیاهان به کار برده می‌شود.

در استخراج محصولات طبیعی که به طور عمومی در روش‌های معمول به چندین ساعت زمان و یا حتی چندین روز جهت اتمام نیاز است به کاربرد فراصوت توجه زیادی شده است. با استفاده از فراصوت، استخراج کامل مواد مؤثر گیاهی در چندین دقیقه با عملکرد بالا صورت می‌پذیرد. کاهش مصرف حلال، استفاده و کاربرد آسان، درجه خلوص بالاتر در محصول نهایی، حذف آب هدر رفته و مصرف تنها کسری از انرژی در مقایسه با روش‌های استخراج مرسوم مانند سوکسله، خیساندن یا بخار تقطیر، از ویژگی‌های منحصربه‌فرد این روش می‌باشد.

با استفاده از روش فراصوت چندین گروه از ترکیبات غذایی مانند رایحه‌ها، رنگ‌دانه‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها، و دیگر ترکیبات آلی و معدنی را می‌توان استخراج و به صورت کارآمد از انواع ماتریس‌ها (به طور عمده بافت‌های حیوانی، مواد غذایی و گیاهی) آنالیز کرد.

جدول ۱. مقایسه روش‌های مختلف استخراج

روش	استخراج به کمک فراصوت	استخراج به کمک ماکروویو	استخراج به کمک سیال فوق بحرانی	استخراج حلال پرشتاب
توضیح کوتاه	نمونه در حلال غوطه‌ور شده و سپس با استفاده از پروب یا حمام فراصوت‌دهی می‌شود	نمونه در حلال غوطه‌ور و سپس انرژی امواج ماکروویو به آن تابیده می‌شود	نمونه در یک فشار بالا قرار می‌گیرد و سیال فوق بحرانی به‌صورت مداوم از آن عبور داده می‌شود	نمونه توسط یک آون معمولی حرارت‌دهی می‌شود و حلال استخراج تحت فشار از آن عبور داده می‌شود
زمان استخراج	۱۰ تا ۶۰ دقیقه	۳ تا ۳۰ دقیقه	۱۰ تا ۶۰ دقیقه	۱۰ تا ۲۰ دقیقه
مقدار نمونه	۱ تا ۳۰ گرم	۱ تا ۱۰ گرم	۱ تا ۵ گرم	۱ تا ۳۰ گرم
مقدار حلال	۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌لیتر	۱۰ تا ۴۰ میلی‌لیتر	۲ تا ۵ میلی‌لیتر (جامد) ۳۰ تا ۶۰ میلی‌لیتر (مایع)	۱۵ تا ۶۰ میلی‌لیتر
هزینه	کم	متوسط	زیاد	زیاد
مزایا	استفاده آسان	سریع، استفاده آسان، مصرف متوسط حلال	سریع، مصرف کم حلال، تغلیظ عصاره، عدم نیاز به تصفیه کردن، امکان بالای انتخاب	سریع، عدم نیاز به تصفیه کردن، مصرف کم حلال
معایب	استفاده نسبی زیاد حلال، نیاز به تصفیه کردن	حلال انتخابی باید توانایی جذب انرژی ماکروویو را داشته باشد، نیاز به تصفیه کردن	وجود پارامترهای زیاد جهت بهینه‌سازی	احتمال تخریب آنالیت‌های حساس به حرارت

جدول ۱ به وضوح مزایای استخراج به کمک فراصوت را در مقایسه با روش‌های استخراج جدید نشان می‌دهد. در مقایسه با استخراج به کمک ماکروویو، استخراج به کمک فراصوت شاید ساده‌تر و سریع‌تر نباشد ولی استخراج به کمک فراصوت محدودیت حلال و نوع ماتریس استفاده شده و یا میزان رطوبت را ندارد. استفاده از فراصوت قدرتی، یک راه بالقوه کارآمد به‌منظور افزایش فراوری انتقال جرم را ارائه می‌دهد. علاوه‌براین می‌تواند یک راه عملی منحصر به فرد برای ایجاد آشفستگی (تلاطم) در استخراج با سیال فوق بحرانی باشد، زیرا استفاده از همزن مکانیکی در این روش امکان‌پذیر نیست. ریرا و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۰۴ اثر فراصوت (۲۰kHz و ۵۰W) بر سینتیک

استخراج روغن بادام با استفاده از دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی را آزمایش کردند. به‌عنوان یک نتیجه از آزمایش (در ۲۸۰ bar و ۵۵°C) در انتهای استخراج (۸ ساعت و ۳۰ دقیقه) هنگامی که استخراج با سیال فوق بحرانی با فراصوت همراه شد، مقدار روغن به‌طور قابل توجهی (۲۰٪) افزایش داشت. در ادامه، هنگامی که فراصوت به کار برده شد انتقال جرم به حدی افزایش یافت که مقدار به‌دست آمده از استخراج با سیال فوق بحرانی به‌تنهایی می‌توانست در ۳۰٪ زمان کمتری به‌دست آید. همچنین در مقایسه با استخراج با حلال پرشتاب، استخراج به کمک فراصوت امکان کاهش چشمگیر زمان استخراج، حجم حلال و نمونه استفاده شده را نشان می‌دهد [۸].

۴. کاربرد استخراج به کمک فراصوت در تحقیقات مواد غذایی و صنایع غذایی

استفاده از روش فراصوت می‌تواند فرایند استخراج را با افزایش انتقال جرم بین حلال و مواد گیاهی بهبود بخشد. فروپاشی حباب‌های کایتاسیون منجر به شکست بهتر سلول از طریق تشکیل میکروجت‌ها به دلیل نامتقارن بودن فروپاشی حباب نزدیک سطح جامد می‌باشد که این موضوع باعث نفوذ بهتر حلال به داخل بدنه خود گیاه شده و می‌تواند دیواره‌های سلولی را بشکند [۲۴]. به‌عنوان یک نتیجه، به‌کارگیری فراصوت در استفاده از استخراج گیاه در افزایش انتقال جرم، نفوذ بهتر حلال، وابستگی کمتر به حلال مورد استفاده، استخراج در دمای پایین‌تر، نرخ استخراج سریع‌تر و بازده بیشتر محصول مزیت دارد [۲۵].

طعم و رایحه مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات فرار هستند که معمولاً در غلظت‌های پایین وجود دارند. آنها در گونه‌های مختلفی از گیاهان، حتی در ریشه‌ها، ساقه‌ها، دانه‌ها، برگ‌ها، گل‌ها و یا میوه‌ها وجود دارند. مولکول‌های مسئول طعم در گیاهان معطر قابل استخراج و استفاده در صنعت غذا، دارو و یا عطرسازی می‌باشند. استخراج دقیق رایحه از ابتدا تا به امروز مشکل بوده است. مدارک قدیمی این نتیجه را نشان می‌دهد که هندوها با استفاده از دستگاه‌های تقطیر ابتدایی تخمیر را کنترل کرده و روغن بودار را به‌دست می‌آوردند. در حال حاضر، این فرایند تقطیر با همراه شدن با فراصوت و یا حتی توسعه استخراج به کمک فراصوت جدید بهبود یافته است.

استخراج به کمک فراصوت همچنین به‌منظور اسانس‌های روغنی از گیاهان معطر مانند برگ‌های نعنا، درمنه و اسطوخودوس، و یا دیگر ماتریس‌های گیاهی مانند سیر و گل‌های مرکبات توسعه یافته است. استخراج به کمک فراصوت علاوه بر اینکه روشی سریع و قابل اجرا در دمای پایین بوده و بازده را بهبود می‌بخشد، در محصول نهایی نیز

تخریب حرارتی کمتری را به نسبت روش‌های سنتی نشان می‌دهد.

مطالعات بسیاری بر استخراج ترکیبات اصلی رایحه از گونه‌های مختلف انجام شده است. به‌طور مثال وانیلین از غلاف وانیل استخراج شده، کاروون^{۲۳} از دانه‌های زیره و سافرانال^{۲۴} از زعفران یونانی. میزان وانیلین بعد از یک ساعت توسط استخراج به کمک فراصوت قابل مقایسه با ۸ ساعت استخراج معمولی بود. مقاله دیگری نشان داد که ۸۰٪ وانیلین خالص تنها بعد از ۱۲۰ ثانیه با فراصوت (پروپ فراصوت) به‌دست آمد درحالی‌که در روش معمول برای به‌دست آوردن ۱۰۰٪، ۲۴ ساعت زمان می‌برد. برای استخراج کاروون، روش استخراج به کمک فراصوت با سوکسله مقایسه شد. مواد چرب ناخواسته در استخراج با سوکسله استخراج شد، درحالی‌که عصاره در استخراج به کمک فراصوت کیفیت بهتر و حاوی مقدار بیشتری کاروون نسبت به لیمونن^{۲۵} بود [۸].

هررا و همکاران نشان دادند که مقادیر مشابهی از ترکیبات فنولیک می‌تواند از توت فرنگی در ۲ دقیقه استخراج شود، درحالی‌که با روش مرسوم ۲۰۰ ساعت و با استفاده از سیال بحرانی ۳ ساعت زمان لازم است [۲۶]. نمونه دیگر استخراج آنتوسیانین از تمشک، توسعه یافته توسط چن و همکاران می‌باشد [۲۷]. همچنین در استخراج سریع کاپسایسینید^{۲۶} از فلفل توسط باربرو و همکاران مشخص شد که روش استخراج فراصوت تکرارپذیر (تجدیدپذیر) را با استفاده از متانول به‌عنوان حلال نسبت به روش‌های دیگر مزیت عمده دارد [۲۸].

در صنایع غذایی استفاده از فراصوت در حال تبدیل شدن به یک امر فزاینده مهم است. ماتریس‌های اصلی استخراج به کمک فراصوت سبزیجات (دانه‌ها و گیاهان) هستند. از ترکیبات استخراج شده به‌صورت فوری (نوشیدنی) یا به‌عنوان مواد غذایی و مواد افزودنی (اسانس روغنی، مولکول با فعالیت خاص) استفاده خواهد شد.

۵. نتیجه گیری

هرچند روش عصاره‌گیری به کمک فراصوت توانسته است تاکنون به‌عنوان روشی آسان، کم هزینه، سریع، سازگار با محیط زیست و با عملکرد بالا خود را به اثبات برساند و گزینه مناسبی برای استخراج عصاره به حساب می‌آید، اما برای به‌دست آوردن بهترین و مؤثرترین عصاره، توجه به مواردی از جمله خصوصیات ماده گیاهی، مدت زمان و دمای استخراج، حلال مناسب، نوع روش استخراج و دقت در مراحل عصاره‌گیری ضروری می‌باشد. هر روش استخراج،

عملکرد متفاوتی دارد و ترکیب‌های مختلفی در عصاره حاصل می‌شود و باید در نظر داشت که عملکرد بالا در عصاره حاصله به معنای عملکرد بالای ترکیبات مورد نظر در عصاره نمی‌باشد. لذا با در نظر گرفتن مزایا و معایب مختص هر روش و شاخص‌های مذکور و همچنین در نظر داشتن محدودیت‌هایی از جمله هزینه‌های محاسباتی، اتلاف ترکیبات فرار و احتمال از بین رفتن ترکیبات حساس به دما محقق بایستی روش بهینه را متناسب با شرایط آزمایش خود برگزیند.

۶. مأخذ

- [۱] وطن دوست، ر.، "بررسی مواد تلف شده در روش‌های عصاره‌گیری مختلف مدرن و سنتی گیاه مرزنجوش"، فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست، ۱۳۹۱، سال سوم، شماره ۱۲، صفحه ۹-۱۶.
- [۲] قربانی، م.، ابونجمی، م.، قربانی جاوید، م.، "امواج فراصوتی روشی نوین در استخراج ترکیب‌های گیاهی"، نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاش، ۱۳۹۴، سال چهارم، شماره ۸.
- [۳] قربانی، م.، ابونجمی، م.، قربانی جاوید، م. و عرب ح سینی، ا.، "تأثیر شرایط عصاره‌گیری با امواج فرا صوت بر عملکرد و خواص آنتی‌اکسیدانی عصاره گیاه رازیانه"، علوم و صنایع غذایی، ۱۳۹۵، شماره ۶۷، دوره ۱۴، صفحه ۸۵-۹۹.
- [۴] خواجه نوری، م.، حقیقی اصل، ع.، "بررسی استخراج ترکیبات طبیعی گیاهان با کمک امواج میکروویو و فرا صوت"، فصلنامه علوم و فناوری های نوین غذایی، ۱۳۹۳، سال اول، شماره ۳، صفحه ۸۱-۹۱.
- [5] Tiwari, B. K., "Ultrasound: A clean, green extraction technology". *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2015, vol.71, pp.100-109.
- [6] Chemat, S., Lagha, A., AitAmar, H., Bartels, P. V., and Chemat, F., "Comparison of conventional and ultrasound-assisted extraction of carvone and limonene from caraway seeds", *Flavour and Fragrance Journal*, 2004, vol.19, pp.188-195
- [7] Kentish, S., and Ashokkumar, M., The Physical and Chemical Effects of Ultrasound. "Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing" (H. Feng, G. Barbosa-Canovas and J. Weiss, eds.), Springer New York, New York, 2011, pp.1-12.
- [8] Chemat, F., Zill e, H., and Khan, M. K., "Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction", *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, vol.18, pp.813-835.
- [9] Chemat, S., Aissa, A., Boumechhour, A., Arous, O., and Ait-Amar, H., "Extraction mechanism of ultrasound assisted extraction and its effect on higher yielding and purity of artemisinin crystals from *Artemisia annua* L. leaves". *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol.34, pp.310-316.
- [10] Lopez-Avila, V., "Applications of microwave-assisted extraction in environmental analysis", *Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry*, 2000, vol. 21, pp.115-153.
- [11] Di Cesare, L. F., Riva, M., and Schiraldi, A., "Microwave extraction of basil aroma compounds" *Developments in Food Science*, 1995, vol.37, pp.857-868.
- [۱۲] شاددل، ر.، "بهینه‌یابی فرایند استخراج مواد زیست فعال از پوست بنه به روش مادون بحرانی آب با استفاده از روش سطح پاسخ و بررسی فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن"، ۱۳۹۰، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.

- [۱۳] موسوی، س.ا. و شبانی، ن.، "استخراج روغن کنجد به وسیله سیال فوق بحرانی دی اکسیدکربن"، فصلنامه کاربرد شیمی در محیط زیست، ۱۳۹۱، سال سوم، شماره ۱۳، صفحه ۴۱-۵۵.
- [۱۴] نعمت‌الهی، ا. و مشایخ، م.، "کاربرد دی اکسیدکربن فوق بحرانی در استخراج و تصفیه‌ی روغن‌های گیاهی"، مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران، ۱۳۹۱، سال هفتم، صفحه ۳۵-۴۴.
- [۱۵] جناب، ا. و رضایی، ک.، "استخراج روغن از دانه‌های کانولا با استفاده از دی اکسید کربن فوق بحرانی"، آرشیو پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی، ۱۳۸۵.
- [۱۶] قربانی، م.، "تأثیر فراصوت قدرتی در استخراج عصاره دانه رازیانه و ارزیابی خصوصیات آنتی اکسیدانی آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

- [17] Richter, B. E., "Extraction of hydrocarbon contamination from soils using accelerated solvent extraction", *Journal of Chromatography A*, 2000, vol.874, pp.217-224.
- [18] Barros, F., Dykes, L., Awika, J. M., and Rooney, L. W., "Accelerated solvent extraction of phenolic compounds from sorghum brans", *Journal of Cereal Science*, 2013, vol.58, pp.305-312.
- [19] Fines-Neuschild, S., Boucher, É., Vernal, A. d., Gélinas, Y., and Leclerc, P., "Accelerated solvent extraction—An efficient tool to remove extractives from tree-rings", *Dendrochronologia*, 2015, vol.36, pp.45-48.
- [20] Pan, X., Niu, G., and Liu, H., "Microwave-assisted extraction of tea polyphenols and tea caffeine from green tea leaves", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2003, vol.42, pp.129-133.
- [21] Molins, C., Hogendoorn, E. A., Heusinkveld, H. A. G., Zoonen, P. V., and Baumann, R. A., "Microwave Assisted Solvent Extraction (Mase) of Organochlorine Pesticides from Soil Samples", *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1997, vol.68, pp.155-169.
- [22] Fisher, J. A., Scarlett, M. J., and Stott, A. D., "Accelerated Solvent Extraction: An Evaluation for Screening of Soils for Selected U.S. EPA Semivolatile Organic Priority Pollutants" *Environmental Science & Technology*, 1997, vol.31, pp.1120-1127.
- [23] Riera, E., Golás, Y., Blanco, A., Gallego, J. A., Blasco, M., and Mulet, A., "Mass transfer enhancement in supercritical fluids extraction by means of power ultrasound", *Ultrasonics Sonochemistry*, 2004, vol.11, pp.241-244.
- [24] Toma, M., Vinatoru, M., Paniwnyk, L., and Mason, T. J., "Investigation of the effects of ultrasound on vegetal tissues during solvent extraction", *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, vol.8, pp.137-142.
- [25] Vinatoru, M., "An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs", *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, vol.8, pp.303-313.
- [26] Herrera, M. C., and Luque de Castro, M. D., "Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from strawberries prior to liquid chromatographic separation and photodiode array ultraviolet detection", *Journal of Chromatography A*, 2005, vol.1100, no.1, pp.1-7.
- [27] Chen, F., Sun, Y., Zhao, G., Liao, X., Hu, X., Wu, J., and Wang, Z., "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*, 2007, vol.14, pp.767-778.
- [28] Barbero, G. F., Liaqid, A., Palma, M., and Barroso, C. G., "Ultrasound-assisted extraction of capsaicinoids from peppers", *Talanta*, 2008, vol.75, pp.1332-1337.

1. Ultrasound Assisted Extraction (UAE)
2. Microwave Assisted Extraction (MAE)
3. Supercritical Fluid Extraction (SFE)
4. Accelerated Solvent Extraction (ASE)
5. Soxhlet
6. Percolation
7. Cavitation

۸.. واحد گشتاور دوقطبی برابر با $۱۰^{-۳۰} \times ۳/۳۴$ کولن متر (C.m)

9. Chromatography
10. Critical point
11. Density
12. Viscosity
13. Interaction
14. Loading
15. Condense
16. Separation
17. Batch
18. Continuous
19. Pressurized liquid extraction (PLE)
20. Anthocyanin
21. Tannin
22. Modifier
23. Carvone
24. Safranal
25. Limonene
26. Capsaicinoid