اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری
مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۹-۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵

استخراج لیکوپن از پسماند گوجه‌فرنگی با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین: تمرکز بر کاهش انرژی و بهبود بازده صنعتی

زهرا قلی‌نژاد[1*]، شادی زحمتکش[1]، سید حمیدرضا زره اقبالی[2]، مبینا زحمتکش[3]

[1] ایران، نیشابور، دانشگاه نیشابور، دانشکده فناوری‌های نوین بین‌رشته‌ای، گروه مهندسی شیمی گرایش داروسازی

[2] ایران، مشهد، دانشگاه فردوسی، دانشکده علوم پایه، گروه زیست‌شناسی

[3] ایران، تهران، دانشگاه علوم پزشکی آزاد تهران، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه زیست‌شناسی

Zahragholinezhad258@gmail.com

چکیده

پسماند حاصل از فراوری صنعتی گوجه‌فرنگی شامل: پوست و تفاله یکی از غنی‌ترین منابع طبیعی لیکوپن است؛ بااین‌حال، ساختار شیمیایی این رنگ‌دانه و اتصال محکم آن به ماتریکس پکتینی سلولزی موجب می‌شود روش‌های سنتی بازده محدودی داشته باشند. هدف این پژوهش ارائه تحلیلی مقایسه‌ای، مبتنی بر داده‌های مطالعات اخیر (۲۰۱۶-۲۰۲۴)، به‌منظور شناسایی کارآمدترین و تجاری‌پذیرترین فناوری استخراج لیکوپن است. این مطالعه کارایی فناوری‌های استخراج به کمک امواج مایکروویو [1](MAE) ، استخراج به کمک امواج فراصوت[2](UAE) ، استخراج به کمک آنزیم[3](EAE) ، دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی [4] ($SC–CO_2$) و روش‌های ترکیبی استخراج با مایعات یونی به کمک امواج مایکروویو [۵](IL–MAE) ، استخراج با حلال‌های یوتکتیک عمیق طبیعی به کمک امواج فراصوت [۶](NADES–UAE) ، استخراج با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی به کمک امواج فراصوت [7] ($SC–CO_2$ –UAE) و استخراج به کمک امواج فراصوت - آنزیم[8] (UAE–EAE) بر اساس راندمان استخراج، پایداری ایزومری لیکوپن، زیست‌فراهمی،

[1] Microwave-Assisted Extraction
[2] Ultrasound-Assisted Extraction
[3] Enzyme-Assisted Extraction
[4] Supercritical Carbon Dioxide
[5] Ionic Liquid–Microwave-Assisted Extraction
[6] Natural Deep Eutectic Solvents–Ultrasound-Assisted Extraction
[7] Supercritical Carbon Dioxide–Ultrasound-Assisted Extraction
[8] Ultrasound-Assisted Extraction–Enzyme-Assisted Extraction

مصرف نتایج نشان می‌دهد فناوری‌های وابسته به امواج به‌ویژه MAE و UAE با ایجاد شکست ساختار سلولی و تقویت انتقال جرم، تعادلی مطلوب میان بازده و مصرف انرژی ارائه می‌کنند؛ به‌طوری‌که MAE مصرف انرژی را ۴۰-۶۰٪ و UAE بازده آزادسازی را ۳۰-۴۵٪ افزایش می‌دهد. رویکرد NADES–UAE با حذف حلال‌های آلی، هزینه مدیریت پسماند را حدود ۳۰٪ کاهش می‌دهد. در استخراج با $SC–CO_2$ باوجود مصرف انرژی ۱.۵ تا ۲ برابر بیشتر، به دلیل انتخاب‌پذیری بالا و خلوص محصول، گزینه‌ای ارزشمند در صنایع غذایی دارویی محسوب می‌شود. EAE با افزایش میانگین زیست‌فراهمی حدود ۱۵-۲۰٪، روشی کم‌فشار و زیست‌سازگار است، اما برای دستیابی به راندمان فناوری‌های فیزیکی هنوز نیازمند بهینه‌سازی بیشتر است.

جمع‌بندی نشان می‌دهد که خلأ اصلی پژوهش‌ها، نبود مقایسه جامع فناوری‌های سبز در مقیاس صنعتی است، و نتایج نیز نشان می‌دهد که روش‌های NADES–UAE و IL–MAE بیشترین پتانسیل را برای تجاری‌سازی استخراج لیکوپن از پسماند گوجه‌فرنگی دارند.

کلمات کلیدی: لیکوپن، تفاله گوجه‌فرنگی، بهینه‌سازی انرژی، استخراج سبز، مدیریت انرژی در فرایندهای استخراج، فناوری‌های نوین استخراج

۱. مقدمه

گوجه‌فرنگی و فرآورده‌های آن از مهم‌ترین محصولات صنعت غذایی به شمار می‌روند و سالانه میلیون‌ها تن تفاله، پوست و دانه به‌عنوان پسماند پس از تولید رب و سس ایجاد می‌شود. این پسماندها اگرچه فاقد ارزش تجاری مستقیم‌اند، اما از دیدگاه ترکیبات زیست‌فعال بسیار غنی هستند، لیکوپن به‌عنوان اصلی‌ترین کاروتنوئید گوجه‌فرنگی بیشترین سهم را در ارزش افزوده این ضایعات دارد [۱]. مطالعات نشان داده‌اند که بین ۷۰ تا ۹۰ درصد لیکوپن موجود در گوجه‌فرنگی در پوست تجمع می‌یابد و بنابراین پوست و تفاله مهم‌ترین منبع ثانویه برای استخراج این ترکیب محسوب می‌شوند[۲, ۳].

لیکوپن به دلیل ساختار پلی‌اِن خطی با ۱۱ پیوند دوگانه کونژوگه، به‌شدت لیپوفیلیک، حساس به حرارت، نور و اکسیداسیون بوده و در ماتریکس سلولی پوست گوجه‌فرنگی به دام می‌افتد؛ عواملی که استخراج آن را با چالش مواجه می‌کند [۴]. روش‌های سنتی مانند سوکسله یا خیساندن علاوه بر مصرف حلال‌های آلی سمی، موجب تخریب ایزومری و کاهش بازده لیکوپن می‌شود؛

بنابراین، توسعه روش‌های نوین، سبز و کارآمد برای بازیابی لیکوپن از ضایعات گوجه‌فرنگی در سال‌های اخیر توجه‌ها را به خود جلب کرده است [۱, ۵].

در دهه گذشته فناوری‌های نوینی همچون MAE، UAE، EAE و $SC–CO_2$ معرفی شده‌اند که هر یک با مکانیسم‌های متفاوتی موجب تسهیل آزادسازی لیکوپن می‌شوند[۶, ۷]. برای مثال MAE با ایجاد گرمایش حجمی و تخریب دیواره سلولی در زمان بسیار کوتاه، بازده استخراج را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد و نسبت به استخراج حرارتی متداول، خواص ایزومری لیکوپن را بیشتر حفظ می‌کند[۸, ۹]. در مقابل، UAE بر پایه پدیده کاویتاسیون[1] عمل کرده و با شکستن ساختارهای پکتینی و سلولزی، نفوذ حلال و انتقال جرم را تقویت می‌کند[۱۰, ۱۱]. روش‌های آنزیمی با هدف تجزیه انتخابی دیواره سلولی و آزادسازی کاروتنوئیدها، رویکردی سازگار با محیط‌زیست ارائه می کنند[۱۲, ۱۳]. همچنین، $SC–CO_2$ به‌واسطه چگالی و انتخاب پذیری بالا، عدم استفاده از حلال‌های آلی، یکی از سبزترین فناوری‌های صنعتی در استخراج لیکوپن شناخته می‌شود[۱۴].

علاوه بر روش‌های مستقل، رویکردهای ترکیبی مانند NADES–UAE [۱۰]، IL–MAE[7, 15]، EAE–UAE[16] و $SC–CO_2$–UAE[14] را معرفی کرده‌اند که با هم‌افزایی اثرات فیزیکی و شیمیایی، بازده استخراج را افزایش و مصرف انرژی را کاهش می‌دهند. مطالعات انرژی محور اخیر نشان می‌دهند که فناوری‌هایی مانند MAE و UAE از نظر نسبت بازده به مصرف انرژی عملکرد بهینه تری دارند، درحالی‌که $SC–CO_2$ بالاترین کیفیت عصاره را فراهم می‌کند ولی انرژی خواه تر است[۳, ۱۷].

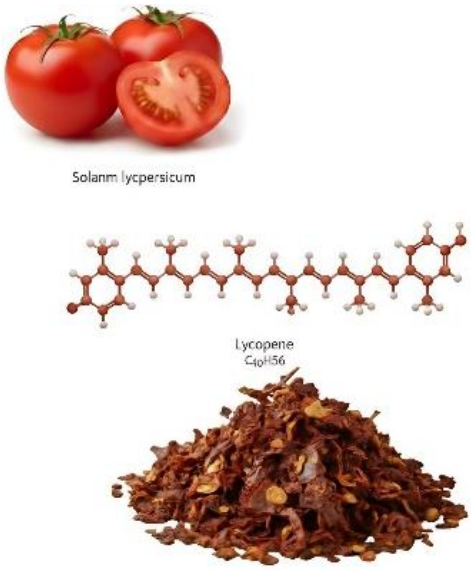
باتوجه‌به ارزش بالای لیکوپن به‌عنوان ترکیب آنتی‌اکسیدانی مؤثر، نیاز صنعتی به فناوری‌های پایدار و مدیریت پسماند گوجه‌فرنگی، بررسی روش‌های نوین استخراج مایکروویو، اولتراسوند، آنزیمی و فوق‌بحرانی اهمیت دارد. هدف این مطالعه ارزیابی بازدهی، میزان مصرف انرژی و مزیت‌های محیط زیستی و انتخاب روش بهینه صنعتی است.

۲. لیکوپن: ساختار، ایزومرها و چالش‌های استخراج

لیکوپن ($C_{40}H_{56}$) کاروتنوئیدی غیر حلقوی و خطی، دارای حدود ۱۱ پیوند دوگانه کونژوگه است. شکل ۱ این مولکول را نشان می‌دهد. پیوند کونژوگه، عامل جذب نور در ناحیه مرئی، عامل رنگ قرمز و خواص آنتی‌اکسیدانی این مولکول است [۱]. از نظر

[1] Cavitation

فیزیکی وشیمیایی، لیکوپن ذاتاً لیپوفیلیک و در ماتریکس سلولی گیاهی به‌ویژه در غشای کلروپلاست و در مجاورت ترکیبات لیپیدی محبوس می‌شود؛ این به دام‌افتادگی یکی از دلایل اصلی دشواری در بازیابی آن از گیاهان است و توضیح می‌دهد که چرا استخراج، نیازمند انتخاب دقیق حلال و پیش‌درمان‌های مکانیکی و یا فیزیکی است[۱۸].



شکل ۱ در این شکل، نام علمی گوجه فرنگی، ساختار شیمیایی مولکول لیکوپن در مرکز تصویر و تفاله گوجه فرنگی در بخش پایینی مشاهده می شود.

در ضایعات صنایع گوجه‌فرنگی، بیشترین مقدار لیکوپن معمولاً در پوست متمرکز است. مطالعات نشان می‌دهند که پوست حاوی ۷۰ تا۹۰ درصد لیکوپن موجود در پسماند است، درحالی‌که دانه‌ها سهم کمتری شامل ۱۰ تا۲۰ درصد دارند؛ به همین دلیل در فرایندهای بازیابی اقتصادی تمرکز بر تفاله و پوست گوجه‌فرنگی است[۱۹, ۲۰]. غلظت لیکوپن در پوست خشک به ۲ تا ۵ میلی‌گرم/گرم می‌رسد، درحالی‌که تفاله صنعتی شامل پوست، دانه و بخش‌های فیبری، دارای حدود ۰.۸ تا ۲.۵ میلی‌گرم/گرم لیکوپن است[۱].

همچنین ساختار کونژوگه و حساسیت مولکول به اکسیداسیون و ایزومریزاسیون باعث می‌شود که در مواجهه با گرما، نور یا اکسیژن، بخشی از فرم آل-ترانس[1] به ایزومرهای سیس[2] تبدیل گردد؛ این ایزومریزاسیون می‌تواند را لحاظ زیست فراهمی بالاتر برای

[1] all-trans

[2] cis

فرم سیس مثبت باشد و هم منجر به تجزیه لیکوپن شود. اگر شرایط استخراج بدون کنترل باشد، بنابراین طراحی پارامترهای دما و زمان در استخراج از تفاله اهمیت بالایی دارد زیرا بر عملکرد زیستی و پایداری محصول استخراج‌شده تاثیر میگذارند[۱, ۱۸]. این ناپایداری حرارتی و نوری یکی از دلایل اصلی است که روش‌های سنتی استخراج که عموماً نیازمند حرارت طولانی و تبخیر حلال‌اند بازده کمی ارائه می‌دهند و باعث تخریب رنگ‌دانه می‌شوند[۲۱, ۲۲].

ایزومر آل - ترانس پایدارترین فرم لیکوپن در مواد غذایی است، اما ایزومرهای سیس به دلیل حلالیت و زیست‌فراهمی بالاتر، برای کاربردهای دارویی و مکمل‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند؛ بنابراین تغییر ایزومری ناشی از روش‌های استخراج (مانند افزایش سیس در MAE و $SC–CO_2$) می‌تواند کیفیت عصاره را تحت‌تأثیر قرار دهد و باید در انتخاب فرایند موردتوجه قرار گیرد[۲۱, ۲۳].

از سوی دیگر، لیکوپن در آب تقریباً نامحلول است؛ بنابراین برای آزادسازی مؤثر از ماتریکس گیاهی نیازمند حلال‌های غیرقطبی یا فناوری‌هایی است که نفوذ به ساختار سلولی را افزایش دهند. ماتریکس پوست و تفاله گوجه دارای ساختاری متراکم و غنی از پکتین و فیبرهای نامحلول است که خروج مولکول‌های غیرقطبی را محدود می‌کند. به همین دلیل روش‌های فیزیکی نوین مانند امواج مایکروویو و اولتراسوند می‌توانند با ایجاد کاویتاسیون، شکستن دیواره سلولی و بهبود انتقال جرم، بر محدودیت ذاتی نفوذ، غلبه کنند و بدون نیاز به دماهای بالا بازده استخراج را افزایش دهند[۸].

استخراج لیکوپن به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن چالش‌برانگیز است. نخستین مانع اساسی، گیرافتادن لیکوپن در ماتریکس سلولی است؛ ساختمان پلی‌اِن[1] لیکوپن تمایل شدیدی به چسبندگی به دیواره سلولی و غشاهای لیپیدی دارد و این پدیده در پوست و تفاله بسیار برجسته است، زیرا این بخش‌ها دارای ساختارهای سلولزی - پکتینی فشرده‌تری هستند. همین عامل دلیل بازده پایین در روش‌های کلاسیک مانند سوکسله یا خیساندن طولانی‌مدت است، زیرا نفوذ حلال در این ماتریکس به‌سختی انجام می‌شود[۸].

چالش دوم نابودی ایزومری و اکسیداتیو لیکوپن است. پیوندهای دوگانه کونژوگه لیکوپن در برابر گرما، نور و اکسیژن حساس‌اند و حتی حرارت‌های طولانی‌مدت ۵۰ تا۶۰ درجه نیز می‌توانند موجب ایزومریزاسیون آل - ترانس به سیس و تخریب

[1] Polyene

ساختاری شود. مقالات متعدد گزارش کرده‌اند که در فرایندهای سنتی، ۱۵ تا ۳۰ درصد از لیکوپن طی عملیات حرارتی طولانی از بین می‌رود؛ بنابراین هر روش استخراجی که زمان زیاد، دمای بالا یا تبخیر حلال داشته باشد، ذاتاً بازده و کیفیت را کاهش می‌دهد[۳].

سومین چالش به مصرف انرژی بالا و میزان حلال موردنیاز برمی‌گردد. روش‌هایی مانند سوکسله نه‌تنها به ۴ تا ۶ ساعت گرمایش مداوم نیاز دارند، بلکه از هگزان یا کلروفرم استفاده می‌کنند که هم چالش‌های زیست‌محیطی دارند و هم امکان بازیافت کامل آن‌ها دشوار است. مجموع این عوامل باعث شده استخراج لیکوپن با روش‌های کلاسیک، هم از نظر بازده و هم از نظر انرژی با محدودیت‌های جدی مواجه باشد[۳].

باتوجه‌به چالش‌های فوق، حرکت به سمت فناوری‌های نوین استخراج، ضرورتی کاملاً علمی، اقتصادی و زیست‌محیطی دارد. روش‌هایی مانند MAE، UAE، $SC–CO_2$ و EAE قادرند دیواره سلولی را بدون تخریب حرارتی بشکنند؛ زمان استخراج را به چند دقیقه کاهش دهند و بازده را افزایش دهند. از سوی دیگر، انتخاب این روش‌ها به دلیل کاهش مصرف انرژی، کاهش حجم حلال‌های سمی، امکان بازیافت حلال‌ها و حفظ ایزومرهای فعال لیکوپن توجیه پذیر است[۲۴, ۲۵].

در کنار روش‌های مستقل، برخی روش‌های ترکیبی نیز در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند که معمولاً تنها زمانی به کار می‌روند که ماتریکس تفاله بسیار متراکم باشد و نیاز به بهبود انتقال جرم احساس شود. اگرچه همه روش‌های ترکیبی در این مقاله آورده نشده‌اند، انتخاب همین چند روش بر اساس کارایی اثبات‌شده، قابلیت مقیاس‌پذیری و سازگاری با اهداف انرژی و پایداری انجام شده است.

۳. روش‌های نوین استخراج

۱.۳. روش استخراج با کربن‌دی‌اکسید

$SC–CO_2$ یکی از کارآمدترین روش‌های سبز برای بازیابی لیکوپن است؛ چراکه کربن‌دی‌اکسید در شرایط فوق‌بحرانی، هم‌زمان چگالی مایع و نفوذپذیری گاز را دارد. این ویژگی‌ها امکان نفوذ عمیق در پوست گوجه‌فرنگی، متورم کردن دیواره سلولی و آزادسازی انتخابی لیکوپن را فراهم می‌کند، بدون نیاز به حلال‌های آلی یا مواجهه با اکسیژن، خطر اکسیداسیون یا ایزومریزاسیون به حداقل می‌رسد[۱۴, ۲۶].

در مطالعه (Niedzwiecki, et al.)در سال ۲۰۲۵ فرایند استخراج تحت شرایط بهینه ۴۱ مگاپاسکال، دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، دبی جریان دی‌اکسیدکربن بین ۵ تا ۱۰ گرم بر دقیقه و زمان استخراج ۹۰ دقیقه منجر به تولید عصاره‌ای با غلظت ۰.۶۶ میلی‌گرم بر گرم لیکوپن شد. تحلیل کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا[1] تأیید کرد که ساختار ایزومری لیکوپن حفظ شده و هیچ تخریب یا ایزومریزاسیونی رخ نداده است[14].

در مرحلهٔ دوم، برای بازیابی لیکوپن باقی‌مانده در ماتریکس سلولی، از استخراج با آب زیر بحرانی[2] در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت جامد به مایع ۱:۱۰ و زمان واکنش ۶۰ دقیقه استفاده شد که بازده فرایند را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۱۴].

تحلیل انرژی نشان داد که فشرده‌سازی کربن دی اکسید تا فشار ۴۱۰ بار و حفظ دمای فوق‌بحرانی، بیشترین مصرف انرژی را دارد. بااین‌حال، بازیافت بیش از ۹۰ درصد کربن دی اکسید مصرفی و حذف تبخیر حلال، راندمان انرژی ویژه‌ی فرایند را در حدود ۱.۲ کیلو وات/ساعت به‌ازای هر گرم لیکوپن می رساند که ۴۵ تا ۵۰ درصد کمتر ار روش سنتی حلال محور است[5, 14, 26].

از نظر زیست‌محیطی، این فناوری با اصول اقتصاد چرخشی هم‌راستا است، زیرا علاوه بر کاهش انتشار ترکیبات آلی فرّار و آلاینده‌های زیستی، از ضایعات گوجه‌فرنگی استفاده می‌کند و ارزش افزوده قابل توجهی برای محصولات جانبی ایجاد می‌کند[۱, ۱۹]. همچنین، ارزیابی‌های اولیه‌ی اقتصادی نشان داده‌اند که در مقیاس نیمه‌صنعتی، بازگشت سرمایه‌ی اولیه در حدود چهار ماه قابل دستیابی است، هرچند بررسی‌های دقیق‌تر در خصوص مرحلهٔ دوم همچنان در حال انجام است[14].

۲.۳. روش استخراج با اولتراسونیک

استخراج لیکوپن از ضایعات فراوری گوجه‌فرنگی شامل پوست و دانه از روش استخراج با امواج اولتراسونیک یکی از روش‌های مورد بررسی ما در این پژوهش می‌باشد[۱۱, ۱۸]. درمطالعه (Sharma M. et al.) و همکاران در سال 2022 نمونه ها پس از خشک کردن در دمای محیط و آسیاب، تا رطوبت نهایی حدود ۴.۹ درصد و اندازه ذرات متوسط حدود ۲۸۶ میکرومتر آماده شدند. برای

[1] HPLC
[2] Subcritical Water Extraction

جلوگیری از اکسیداسیون رنگدانه‌ها، مقدار ۰.۰۵ درصد آنتی‌اکسیدان بوتیله هیدروکسی‌تولوئن[1] به حلال افزوده شد. حلال بهینه‌شده شامل هگزان:استون:اتانول با نسبت حجمی ۲:۱:۱ بود که به دلیل قطبیت متعادل، موجب افزایش انحلال پذیری و پایداری بیشتر لیکوپن در حین فرایند شد[۱۷, ۲۴].

در مطالعه (Kuvendziev S. et.al) در سال 2024 استخراج در شرایط کنترل شده دمایی انجام شد، به طوری که نمونه‌ها در حمام آب سرد قرار گرفتند تا دما در حدود ۵ درجه سانتی‌گراد ثابت بماند و از تخریب حرارتی لیکوپن جلوگیری شود[۲۴]. مکانیسم اصلی استخراج بر پایه پدیده کاویتاسیون ناشی از امواج فراصوت استوار است، فرایندی که در آن فروپاشی سریع حباب های میکروسکوپی موجب ایجاد نیرو های برشی و ضربه ای شده و ساختار سلولی بافت گیاهی را گسسته می سازد، در نتیجه نفوذ حلال و سرعت انتقال جرم را افزایش می‌دهد[۱۰, ۲۵, ۲۷].

در بررسی توان های مختلف در توان ۵۰ وات با نسبت مایع به جامد۲۰:۱، بازده استخراج از ۵۵.۸ میلی گرم بر کیلوگرم ماده خشک در یک دقیقه به ۸۲.۸ میلی گرم بر کیلوگرم در ۳۰ دقیقه، افزایش یافت. همچنین افزایش نسبت مایع به جامد ۳۵:۱ و ۵۰:۱ به ترتیب موجب افزایش بازده تا ۸۶.۹ و۹۳.۹ میلی گرم بر کیلوگرم می گردد[۱۱, ۲۴]. توان بالاتر از ۹۰ وات باعث تخریب ساختار لیکوپن و کاهش کارایی می‌شود. این روش با کاهش ۳۰ تا ۴۰ درصدی مصرف انرژی در مقایسه با روش‌های متداول و دستیابی به بازده نهایی در محدوده ۹۰ تا ۹۵ میلی‌گرم/کیلوگرم، به عنوان یک فناوری کارآمد، کم مصرف و سازگار با محیط زیست برای بازیافت لیکوپن از پسماند صنایع گوجه‌فرنگی شناخته می‌شود[۱۰, ۱۱, ۱۸].

۳.۳. روش امواج مایکروویو

استخراج با کمک مایکروویو به‌عنوان یک فناوری نوین سبز، قادر است بازده بالا را با مصرف انرژی بسیار کمتر فراهم کند[۵]. امواج مایکروویو به‌صورت مستقیم وارد ماتریکس تفاله شده و باعث ایجاد گرمایش حجمی درونی، فشار درون سلولی را افزایش می‌دهد که منجر به تخریب ساختار دیواره و آزادسازی سریع لیکوپن می‌شود. این سازوکار باعث می‌شود فرآیندی که در روش‌های حرارتی ساعت‌ها زمان می‌برد، در MAE تنها طی ۴ تا ۷ دقیقه انجام شود و از تخریب حرارتی ترکیب جلوگیری گردد[۵, ۹].

[1] BHT

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که MAE قادر است بازدهی ۵.۲ میلی‌گرم لیکوپن در ۱۰۰ گرم تفاله خشک را فراهم کند. این مقدار ۴۰ تا ۶۰ درصد بیشتر از بازده روش‌های حرارتی مرجع مانند سوکسله است. علاوه بر این، مصرف انرژی در MAE نسبت به روش‌های کلاسیک به میزان ۵۵ تا ۷۰ درصد کاهش می‌یابد و انرژی ویژه مصرفی آن در محدوده ۳۵۰ تا ۵۰۰ وات‌ساعت/کیلوگرم قرار می‌گیرد، درحالی‌که این مقدار برای سوکسله ۱۱۰۰ تا ۱۵۰۰ وات‌ساعت/کیلوگرم است که نشان‌دهنده برتری چشمگیر در این روش است[۳, ۵].

انتخاب شرایط عملیاتی مناسب نقش تعیین کننده ای در عملکرد این روش دارد. مطالعات نشان داده‌اند که توان ۷۰۰ تا ۸۰۰ وات، زمان ۵ تا ۷ دقیقه، اندازه ذرات کمتر از ۰.۵ میلی‌متر و نسبت حلال به نمونه ۱:۱۵ تا ۱:۲۰ بهترین بازده را ایجاد می‌کند[۹, ۲۴]. حلال‌های سبز مانند اتانول و اتیل‌استات نیز به دلیل جذب حرارتی مناسب و ایمنی بالا، عملکرد بهتری نسبت به حلال‌های سنتی دارند و امکان بازیافت ۸۰ تا۹۰ درصدی آن‌ها پس از فرایند MAE گزارش شده است[۹, ۱۰].

به‌طورکلی، MAE با بازده بالا، مصرف انرژی پایین، سرعت فرایند بالا، سازگاری با محیط زیست و امکان استفاده از حلال‌های قابل‌بازیافت، یکی از کارآمدترین فناوری‌های نوین برای استخراج لیکوپن از تفاله گوجه‌فرنگی است و کاملاً هم راستا با بهینه‌سازی انرژی و مدیریت پسماند است[۱, ۵, ۱۸].

۴.۳. روش آنزیمی

استخراج آنزیمی پایه تخریب هدفمند شبکه پکتینی سلولزی ماتریس گیاهی عمل می‌کند. در این روش آنزیم‌هایی مانند پکتیناز، سلولاز، اندو - زایلاناز با شکستن پیوندهای ساختاری دیواره سلول، موجب تسهیل آزادسازی کاروتنوئیدها و به‌ویژه لیکوپن می‌شوند[۱۳]. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که بازده این روش به‌شدت وابسته به نوع آنزیم، غلظت آنزیم، پی‌اچ، دما و زمان واکنش است. برای نمونه، در فرایند بهینه‌شده با پکتیناز، شرایط ۲ درصد آنزیم، پی‌اچ حدود ۵.۵، دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴ ساعت، بهترین نتیجه را ایجاد کرده است؛ اگرچه افزایش بیش از حد زمان می‌تواند به تخریب اکسیداتیو لیکوپن منجر شود.

در پیش تیمارهای آنزیمی ترکیبی، استفاده هم‌زمان از سلولاز (۱۰۰ واحد بر گرم) و اندو-زایلاناز (۴۰۰ واحد بر گرم) در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد که سبب افزایش قابل‌توجه بازده شد و مقدار ۱۵/۴۴ میلی‌گرم لیکوپن در ۱۰۰ گرم وزن

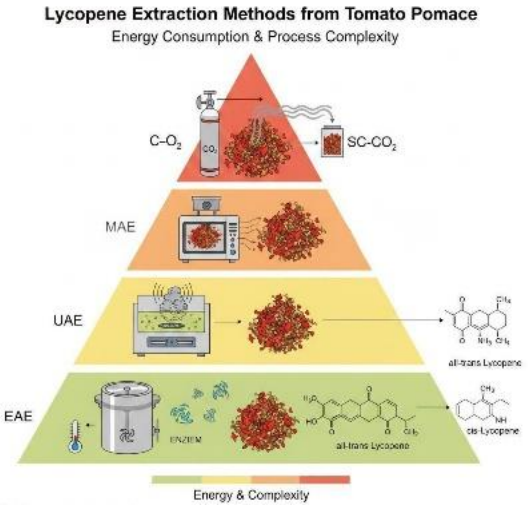
خشک به دست آمد. در مطالعه پروکوپوف و همکاران (Prokopov et al.) در سال ۲۰۱۷ با استفاده از دو آنزیم سلوکلاست[1] و پکتینکس[2] ، تحت شرایط دمایی ۴۰ درجه سانتی‌گراد، زمان واکنش ۵ ساعت و نسبت آنزیم به سوبسترا ۰.۲ میلی‌لیتر/گرم، غلظت نهایی ۱۱.۵ میلی‌گرم لیکوپن بر گرم اولئورزین گزارش شد[۱۳].

مقایسه انواع آنزیم‌ها نیز نشان داد که ترکیب آنزیمی پک‌لایو اِل‌آی[3] همراه با حلال سه‌گانه (هگزان: استون: اتانول) بیشترین بازده را ایجاد کرده و مقدار ۴۴۰ میلی‌گرم لیکوپن از هر ۱۰۰ گرم پوست خشک به‌دست‌آمده است؛ درحالی‌که درصد بازیابی در نمونه‌های بدون تیمار تنها ۳ تا ۳۰ درصد بوده و با تیمار آنزیمی به ۷۷ تا ۹۸ درصد رسیده است. همچنین در استفاده ۹۰ دقیقه‌ایی از آنزیم ویسکوزایم‌اِل[4] در شرایط ۵۰ درجه سانتی‌گراد این روش استخراج آنزیمی لیکوپن، بازدهی در حدود ۳۲۰ میلی‌گرم به‌ازای هر ۱۰۰ گرم وزن خشک داشته و به‌عنوان یک فناوری سازگار با محیط‌زیست معرفی شده است[۲۸].

به‌طورکلی، استخراج آنزیمی باوجود مزایایی همچون دمای پایین، مصرف انرژی کمتر، عدم نیاز به فشار بالا و جلوگیری از ایزومریزاسیون، همچنان فرایندی زمان‌بر است و هزینه آنزیم‌ها می‌تواند محدودکننده باشد. بر اساس جمع‌بندی مطالعات، اگرچه EAE نقش مهمی در توسعه فناوری‌های سبز دارد، اما از نظر سرعت، هزینه عملیاتی و کارایی کلّی، روش UAE همچنان گزینه اقتصادی‌تر و مؤثرتر برای استخراج لیکوپن از پوست و تفاله گوجه‌فرنگی محسوب می‌شود[۲, ۱۵].

در نهایت، چهار روش مستقل، از نظر میزان مصرف انرژی و درجه پیچیدگی فرایند در شکل شماره ۲ به‌صورت یک هرم ارائه شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که نوک هرم نشان‌دهنده پیچیده‌ترین و پرانرژی‌ترین روش استخراج و قاعده هرم بیانگر کم‌انرژی‌ترین روش استخراج است.

[1] Celluclast
[2] Pectinex
[3] Peclyve LI
[4] Viscozyme L



شکل ۲ هرم انرژی و پیچیدگی عملیاتی روش‌های مستقل استخراج لیکوپن ($SC–CO_2$، MAE، UAE، EAE)

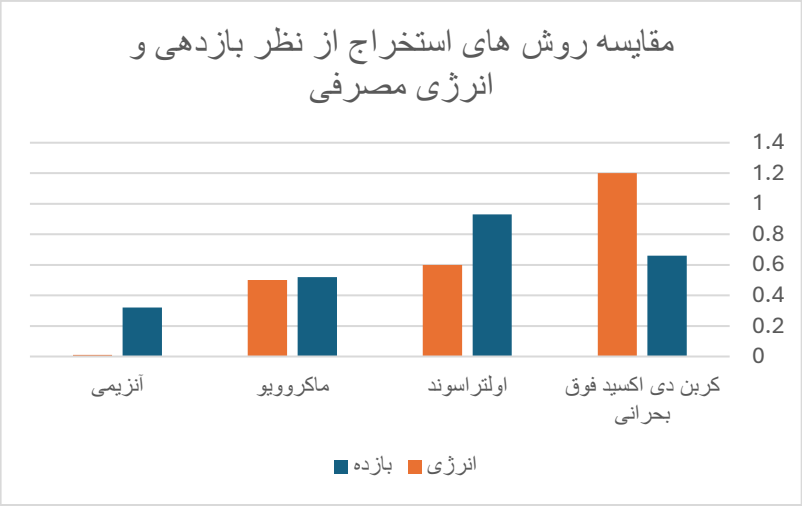
نتایج حاصل از ارزیابی روش‌های مختلف استخراج لیکوپن در نمودار ۱ نشان می‌دهد که کارایی هر فناوری، تابعی از دو عامل کلیدی بازده استخراج و انرژی مصرفی است. یافته‌ها بیانگر آن است که روش آنزیمی، اگرچه کم‌ترین انرژی مصرفی را دارد، اما به دلیل ماهیت ملایم و وابستگی به فعالیت بیولوژیکی آنزیم‌ها، پایین‌ترین بازده استخراج را ارائه می‌دهد[۲, ۱۳] و در نتیجه برای کاربردهای صنعتی با ظرفیت بالا مناسب نیست[۲۸].

فناوری‌های مایکروویو و اولتراسونیک به دلیل ایجاد تخریب مؤثر در دیواره سلولی و افزایش انتقال جرم، بازده استخراج بالاتری نسبت به روش‌های متعارف ارائه می‌دهند[۹, ۱۱]. روش اولتراسونیک با اتکا بر پدیده کاویتاسیون، زمان استخراج را به طور چشمگیری کاهش داده و نسبت بازده به انرژی آن را در مقایسه با سایر روش‌ها بهینه‌تر ساخته است[۲۵, ۲۷]. این ویژگی سبب شده که این روش در فرآیندهای بازیافت کاروتنوئیدها به عنوان یک گزینه سریع، کارآمد و با انرژی مصرفی پایین موردتوجه قرار گیرد[۱۷].

روش $SFE\text{-}CO_2$ بالاترین بازده را در میان روش‌های بررسی‌شده نشان می‌دهد[۱۴, ۲۶]. مصرف انرژی بالای آن ناشی از نیاز به فشرده‌سازی کربن‌دی‌اکسید و حفظ فشار بالا است. بااین‌حال، مزایایی مانند خلوص بالای عصاره، انتخاب‌پذیری بالا، عدم

استفاده از حلال‌های آلی و قابلیت بازیافت کربن‌دی‌اکسید، این فناوری را به گزینه‌ای مطلوب برای صنایع غذایی و دارویی تبدیل کرده است[۴, ۶].

به‌طورکلی، تحلیل نمودار بیانگر آن است که روش‌های مایکروویو و اولتراسونیک بهترین توازن بین بازده و انرژی مصرفی را ارائه می‌دهند[۹, ۱۱]، درحالی‌که $SFE\text{-}CO_2$ اگرچه انرژی‌برتر است، اما بیشترین بازده و بالاترین کیفیت عصاره را فراهم می‌کند[۲۶]. بنابراین انتخاب روش، به نیاز صنعتی، محدودیت‌های انرژی و اولویت‌های زیست‌محیطی بستگی داشته و هیچ روش واحدی برای تمامی اهداف فرآیندی، گزینه مطلق به شمار نمی‌آید[۱, ۱۸].



نمودار ۱- بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، روش‌های نوین استخراج به‌ویژه اولتراسونیک و مایکروویو عملکرد بهتری از نظر بازده و انرژی داشته و روش کربن‌دی‌اکسید فوق‌بحرانی باوجود بازده نسبتاً بالا، انرژی مصرفی بیشتری دارد. روش آنزیمی کمترین بازده را نشان می‌دهد؛ اما از لحاظ مصرف انرژی کارآمدتر است. نمودار بالا بازده بر اساس درصد و انرژی بر اساس کیلووات/ساعت گزارش شده است.

۴. بیان روش‌های ترکیبی

۱.۴. روش استخراج با حلال‌های یوتکتیک عمیق طبیعی به کمک امواج فراصوت

یکی از چالش‌های اساسی در استخراج لیکوپن از پسماند گوجه‌فرنگی، ماهیت آب‌گریز این ترکیب است که باعث می‌شود در حلال‌های آبی انحلال‌پذیری نداشته باشد. از سوی دیگر، ساختار سلولی مقاوم پوست گوجه‌فرنگی مانع آزادسازی مؤثر لیکوپن می‌شود؛ بنابراین، توسعهٔ روش‌های نوین و سبز که بتوانند هر دو چالش را هم‌زمان رفع کنند، ضرورت دارد[18 ,6].

در میان رویکردهای ترکیبی مورداستفاده برای ارتقای بازیابی لیکوپن، NADES–UAE به‌عنوان یکی از نوین‌ترین و کارآمدترین فناوری‌های سبز گزارش شده است. اهمیت این روش از آنجا ناشی می‌شود که لیکوپن، به دلیل ماهیت شدیداً هیدروفوبیک و حضور در ماتریکس متراکم پکتینی سلولزی پوست گوجه‌فرنگی، در روش‌های مرسوم بسیار سخت آزاد شده و بازده استخراج معمولاً پایین است[۱۸, ۲۱].

حلال‌های یوتکتیک طبیعی که از برهم‌کنش هیدروژنی میان ترکیبات زیستی جامد مانند منتول و تیمول تشکیل می‌شوند، به دلیل هیدروفوبیک بودن، زیست‌تخریب‌پذیری بالا و توانایی انحلال مؤثر کاروتنوئیدها، به‌عنوان جایگزینی پایدار برای حلال‌های آلی فرار مطرح شده‌اند[۴, ۶, ۷].

ترکیب این حلال‌ها با امواج فراصوت سبب ایجاد هم‌افزایی قابل‌توجه‌ای می‌شود. در تیمار فراصوت، پدیده کاویتاسیون به‌طور مستقیم موجب اعمال تنش‌های برشی، تخریب دیواره سلولی و افزایش نفوذپذیری ماتریکس گیاهی می‌گردد. این مکانیسم عامل اصلی افزایش سرعت انتقال جرم و آزادسازی رنگدانه‌های محبوس در پوست گوجه‌فرنگی است[۱۱, ۲۴, ۲۷]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی[1] گزارش‌شده در مطالعات اخیر نیز گسیختگی و ترک‌های سطحی ناشی از فراصوت را تأیید می‌کنند[۱۰].

پوست خشک‌شده گوجه‌فرنگی در مخلوط حلال منتول - تیمول قرار گرفته و تحت تیمار ۲۰ دقیقه‌ای امواج فراصوت در دمای کنترل‌شده حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس محلول جداشده تحت تقطیر مستقیم با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد که موجب دستیابی به بازدهی قابل‌توجه ۴۸۴ میلی‌گرم/گرم عصاره خشک شده می‌شود. در مقابل، استفاده از تقطیر غیرمستقیم همراه با آب در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش بازده به ۳۵۹ میلی‌گرم/گرم شد [۴, ۶].

[1] SEM

از منظر انرژی نیز این رویکرد ترکیبی نسبت به روش‌های سنتی مزیت چشمگیری دارد. گزارش شده است که استفاده از NADES مرحله تبخیر گسترده حلال‌های آلی را حذف کرده و مصرف انرژی گرمایی را تا حدود ۴۰ درصد کاهش می‌دهد [۶]. افزون بر این، ویسکوزیته پایین این حلال‌ها موجب کاهش مصرف حلال و کوتاه‌شدن زمان استخراج می‌شود، درحالی‌که پایداری و سازگاری زیست‌محیطی آنها روش را برای کاربردهای صنعتی جذاب‌تر کرده است [۱, ۷].

مجموع شواهد حاصل از مطالعات اخیر نشان می‌دهد که فناوری NADES–UAE به دلیل بازده بالا، کاهش مصرف انرژی، سهولت جداسازی، جلوگیری از تخریب ایزومری و سازگاری کامل با اصول استخراج سبز، می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤثرترین رویکردهای نسل جدید در بازیافت لیکوپن از پسماندهای گوجه‌فرنگی مورداستفاده قرار گیرد[۱, ۱۰, ۱۸].

۲.۴. استخراج با دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی به کمک امواج اولتراسونیک

در سال های اخیر، ترکیب فناوری‌های سبز مانند کربن‌دی‌اکسید فوق‌بحرانی و امواج اولتراسونیک به عنوان راهکاری نوین برای بهبود بازده استخراج ترکیبات زیست فعال از ضایعات گیاهی مطرح شده است[۷, ۱۷]. هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت های خاص خود را دارند، اما هم‌افزایی میان آن ها می تواند به طور چشمگیری کارایی فرایند، بازده نهایی و مصرف انرژی را بهبود می‌بخشد[۱۴].

در این روش‌های ترکیبی، امواج اولتراسونیک با ایجاد پدیده کاویتاسیون، سبب تخریب دیواره سلولی و افزایش نفوذ پذیری ماتریس گوجه‌فرنگی می‌شود. این فرایند موجب تسریع آزادسازی لیکوپن و افزایش سطح تماس ماده جامد با حلال فوق‌بحرانی گردید[۱۰, ۱۱, ۲۵].

از سوی دیگر، دی اکسید کربن فوق‌بحرانی به دلیل چگالی بالا و نفوذ پذیری مشابه گاز، توانایی انتخاب پذیری بالایی برای کاروتئید ها دارد[۴, ۶, ۲۶]. ترکیب این دو اثر فیزیکی منجر به افزایش انتقال جرم، کاهش زمان استخراج و افزایش بازده کلی فرایند می‌شود. بر اساس داده های تجربی بهترین نتایج در فشار ۳۸۰ تا ۴۱۰ بار، دما ۷۰ تا۸۰ درجه سانتی‌گراد با توان اولتراسونیک ۵۰ وات می‌باشد. نسبت مورد نیاز مایع به جامد ۳۰:۱ و زمان استخراج ۱۲۰ دقیقه می‌باشد[۱۴, ۲۶]. در این شرایط، بازده استخراج لیکوپن به ۹۲.۸ درصد از کل محتوای موجود در پسماند می‌رسد که نسبت به روش منفرد افزایش محسوسی مشاهده میشود.

در فرایند ترکیبی، استفاده هم زمان از امواج اولتراسونیک باعث کاهش مقاومت انتقال جرم و در نتیجه کاهش زمان فرایند می شود. این امر موجب کاهش مصرف حلال کربن دی اکسید از ۳۵.۷ کیلوگرم به حدود ۲۴.۵ کیلوگرم می‌شود. این امر سبب می‌گردد که مصرف انرژی نیز کاهش یابد[۲۶].

از دید انرژی الکتریکی، هر چند استفاده از چند سیستم اولتراسونیک منجر به مصرف انرژی بالاتر می شود، اما مصرف انرژی ویژه فرایند حدود ۰.۱۵ کیلووات/ساعت شده و در مجموع انرژی تا ۲۵ درصد نسبت به حالت غیرترکیبی کاهش می‌یابد[۱۷].

تحلیل انرژی کل فرایند ترکیبی نشان می‌دهد که انرژی مصرفی به‌ازای هر گرم لیکوپن حدود ۰.۹ کیلووات‌ساعت است که در مقایسه با روش منفرد عدد بسیار قابل‌قبولی است[۴, ۱۴].

۳.۴. روش استخراج ترکیبی مایعات یونی همراه با امواج مایکروویو

ترکیب مایعات یونی با فناوری امواج مایکروویو به‌عنوان رویکردی نوین و کارآمد در بهبود استخراج ترکیبات زیست‌فعال از جمله لیکوپن از ضایعات گوجه‌فرنگی مطرح شده است. مایعات یونی مبتنی بر ایمیدازولیوم، نظیر ۱-اتیل-۳-متیل‌ایمیدازولیوم استات، از طریق برهم‌کنش‌های π–π با ساختار کونژوگه لیکوپن و افزایش نفوذپذیری دیواره سلولی، توانایی انحلال‌پذیری این رنگ‌دانه را به شکل معناداری ارتقا می‌دهند[۲۹]. در همین راستا، امواج مایکروویو با ایجاد گرمایش حجمی یکنواخت موجب تخریب ساختاری ماتریکس سلولی شده و آزادسازی سریع‌تر لیکوپن را فراهم می‌سازند؛ بنابراین، هم‌افزایی این دو فناوری منجر به افزایش چشمگیر سرعت انتقال جرم و کارایی استخراج می‌گردد[۳۰].

در مطالعه وو جی و همکاران (Wu, J., et al) استخراج تحت شرایط بهینه شامل غلظت ۰.۱۷ مولار مایع یونی، نسبت مایع به جامد ۱۵:۱، توان ۸۰۰ وات مایکروویو و زمان کمتر از ۳ دقیقه انجام شد. دمای فرایند نیز در محدوده ۴۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا از وقوع تخریب حرارتی یا ایزومریزاسیون جلوگیری شود. به‌کارگیری این شرایط منجر به دستیابی به بازدهی ۰.۱۷۷ میلی‌گرم لیکوپن در هر گرم وزن خشک گردید که نسبت به روش‌های مرسوم حرارتی، نشان‌دهنده بهبود ۳۰ تا ۴۵ درصدی است[30].

از منظر عملکردی، این رویکرد ترکیبی علاوه بر افزایش بازده، سبب کاهش قابل‌توجه زمان فرایند و بهبود پایداری ساختاری لیکوپن می‌شود. تحلیل انرژی نیز نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از و مایکروویو با حذف مرحله تبخیر حلال‌های آلی و بهره‌گیری از گرمایش مستقیم، مصرف انرژی را بین ۴۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. افزون بر این، امکان بازیافت بیش از ۸۰ درصد مایعات یونی پس از هر چرخه استخراج، این فناوری را از دیدگاه زیست‌محیطی و اقتصادی قابل‌توجه می‌سازد[25].

به‌طورکلی، این روش ترکیبی با فراهم‌سازی بازده بالا، مصرف انرژی کاهش‌یافته و زمان فرایندی کوتاه، می‌تواند به‌عنوان یکی از گزینه‌های نویدبخش در توسعه فناوری‌های سبز و کارآمد برای استخراج لیکوپن از ضایعات گوجه‌فرنگی مورداستفاده قرار گیرد[25].

۴.۴. روش استخراج ترکیبی آنزیمی به کمک اولتراسوند

در این روش علاوه بر تخریب ماتریکس، انتقال جرم را نیز افزایش می‌یابد. آنزیم به‌تنهایی نمی‌تواند حرکت یا پخش‌شدن اجزا را در محیط تسهیل کند؛ ولی امواج اولتراسوند این فرایند را تسریع می‌کنند و باعث افزایش سطح تماس آنزیم با سوبسترا رخ می‌شوند [۲۷].

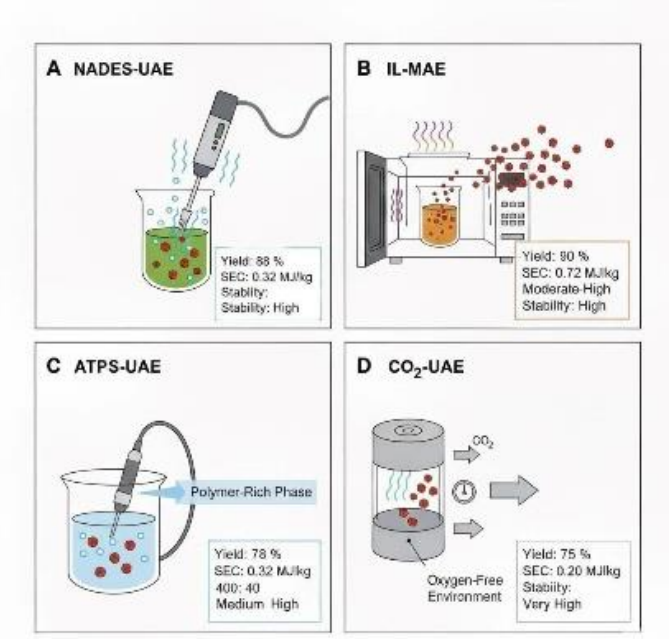
در مطالعه لادوله و همکاران (Ladole et al.)، پیش تیمار با استفاده از آنزیم‌های متصل شده به نانوذرات مغناطیسی آهن انجام شد که امکان جداسازی آسان آنزیم‌ها به کمک نیروی مغناطیسی و استفاده مجدد آن‌ها در چرخه‌های بعدی را فراهم می‌کند. شرایط بهینه برای حداکثر آزادسازی لیکوپن شامل ۳ درصد وزنی/وزنی آنزیم متصل شده به نانوذرات مغناطیسی آهن، پی‌اچ برابر ۵، دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، توان اولتراسوند ۱۰ وات و زمان انکوباسیون ۲۰ دقیقه بود. پس از اعمال آنزیم و اولتراسوند، لیکوپن با استفاده از حلال‌های سه‌گانه شامل اتانول، استون و هگزان استخراج شد که شرایط بهینه آن دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، زمان انکوباسیون ۹۰ دقیقه و سرعت هم‌زدن ۱۵۰ دور در دقیقه ارزیابی شد. بازدهی این فرایند حتی پس از ششمین چرخه استفاده از آنزیم‌های جدا شده، ۵۰ درصد باقی ماند[۳۱].

در مطالعه احمدی و همکاران در سال ۲۰۲۵، سه متغیر شامل وزن نمونه اولیه، غلظت آنزیم و زمان اعمال اولتراسوند بررسی شد. نمونه‌ها ابتدا سپس تحت اولتراسوند با فرکانس ۲۴ کیلوهرتز و توان ۴۰۰ وات در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در بافر استات

سدیم و استیک اسید قرار گرفتند، سپس در معرض آنزیم در انکوباتور شیکردار با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۴ ساعت قرار گرفتند. شرایط بهینه شامل غلظت آنزیمی ۴۰ واحد، زمان اولتراسوند ۳۰ دقیقه و وزن اولیه نمونه ۱.۵ گرم بود. همچنین تأثیر وزن نمونه اولیه بر زمان اولتراسوند از نظر آماری بسیار معنادار گزارش شد و بازدهی نهایی ۲۳.۵۷ میکروگرم لیکوپن به‌ازای هر گرم ضایعات گوجه‌فرنگی به دست آمد[۳۲].

در روش دیگری که ترکیبی از دو رویکرد پیشین بود، ابتدا تیمار آنزیمی با آنزیم لکزایم اکس - وی[1] انجام شد و سپس استخراج با اولتراسوند فرکانس ۴۰ کیلوهرتز صورت گرفت. شرایط بهینه زمان استخراج با اولتراسوند ۱۵ دقیقه، دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد و زمان درمان آنزیمی ۱۸۰ دقیقه بود که منجر به بازدهی ۱۱۲۰ میلی‌گرم لیکوپن به‌ازای هر کیلوگرم ماده اولیه شد[۸].

به‌منظور نمایش ساختار فرایندی، طرح مقایسه‌ای این روش‌ها در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- شماتیک مقایسه‌ای فناورهای ترکیبی در استخراج لیکوپن IL–MAE، NADES–UAE، $SC–CO_2$ –UAE و UAE_EAE

۵. بحث

[1] Lallzyme EX-V

استفاده از پسماندهای صنعتی گوجه‌فرنگی به‌عنوان منبع غنی لیکوپن، علاوه بر ارزش اقتصادی با سیاست‌های پایداری و کاهش مصرف انرژی نیز همسو است. هدف این مقاله، مقایسه کارایی و بهره‌وری انرژی فناوری‌های نوین استخراج لیکوپن از تفاله گوجه‌فرنگی و ارزیابی مزیت‌های زیست‌محیطی و صنعتی آن‌ها نسبت به روش‌های سنتی است. باتوجه‌به لیپوفیلیک بودن لیکوپن و گیرافتادگی آن در ماتریکس فشرده پوست گوجه‌فرنگی، روش‌های سنتی عملکرد مطلوبی ندارند؛ بنابراین، توسعه روش‌های نوین با بازده بیشتر، انرژی کمتر و حفظ کیفیت زیستی ترکیب، محور اصلی تحقیقات اخیر بوده است[۱۸, ۱۹].

مقایسه فناوری‌های نوین نشان می‌دهد MAE با تخریب ساختار سلولی و انتقال جرم سریع، موجب افزایش معنی‌دار بازیابی اُل-ترنس لیکوپن می‌شود. گزارش شده‌است که MAE با توان ۴۰۰ وات قادر به دستیابی به ۱۳.۵۹ میلی‌گرم/۱۰۰گرم محصول استخراجی است[۹]، درحالی‌که روش‌های مرسوم درصد بیشتری از ایزومرهای سیس را تولید می‌کنند. همچنین مدل‌سازی‌ها نشان داده‌اند که مصرف انرژی در MAE به دلیل زمان بسیار کوتاه، به‌طور قابل توجهی کمتر است[۲۴].

در روش UAE، اثر کاویتاسیون موجب گسست سلولی هدفمند و استخراج مناسب در دماهای پایین می‌شود، که UAE نسبت به روش‌های حرارتی نه‌تنها کیفیت ایزومری بهتری ایجاد، بلکه زمان و انرژی مصرفی نیز کاهش می‌یابد[۸, ۱۱]. هنگامی‌که استخراج اولتراسوند با افزودن آنزیم‌های تجزیه کننده دیواره ترکیب می‌شود، بازده به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد[۲۸, ۳۲].

روش‌های سبز مبتنی بر NADES و ILs نیز به دلیل حذف حلال‌های سمی و قابلیت بازیافت، موردتوجه ویژه قرار گرفته‌اند. در مطالعه مارتینز نشان‌داده‌شده است که حلال‌های عمیق یوتکتیک می‌توانند کارایی استخراج کاروتنوئیدها را در شرایط انرژی پایین حفظ کنند. همچنین به توان بالای مایعات یونی در نفوذ به ماتریکس گیاهی اشاره شده است[29].

به‌طورکلی، MAE و UAE باتوجه‌به زمان کوتاه، کاهش مصرف حلال، و جلوگیری از تخریب حرارتی، بهترین تطابق را با محور بهره‌وری انرژی و توسعه پایدار دارند. درحالی‌که ترکیب این روش‌ها با روش آنزیمی یا حلال‌های سبز می‌تواند به‌عنوان مسیر آینده‌پژوهی برای مقیاس‌پذیری صنعتی معرفی شود[۳, ۵].

حفظ کیفیت لیکوپن به اندازه افزایش بازده اهمیت دارد؛ زیرا ساختار پلی‌اِن آن نه‌تنها در برابر حرارت و نور حساس بوده و بسیاری از روش‌های حرارتی موجب افزایش ایزومر های سیس می‌شوند[۹]؛ در مقابل MAE و UAE دارای زمان کوتاه تر و بازدهی بالا تری هستند و منجر به کمتر تخریب شدن مولکول لیکوپن میشوند [۳].

یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌های سال‌های اخیر، به‌کارگیری روش‌های ترکیبی بوده که هدف آن‌ها برقراری تعادل میان بازده، انرژی و کیفیت است[۳۲]. برای مثال، UAE-EAE منجر به تخریب کنترل‌شده ماتریکس پکتینی و آزادسازی مؤثرتر رنگ‌دانه‌های لیپوفیلیک شده و بازده را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. همچنین IL-MAE و NADES-MAE ضمن کاهش مصرف حلال‌های سمی، استخراج را تسریع کرده و از نظر انرژی کارآمدتر هستند[۲۸]. این انتخاب رویکردهای ترکیبی نه بر اساس تنوع‌طلبی، بلکه مبتنی بر شواهدی است که نشان می‌دهند تنها برخی سینرژی‌ها از نظر مقیاس‌پذیری صنعتی و سازگاری زیست‌محیطی قابل‌دفاع هستند.

تمرکز بر تفاله و پوست گوجه‌فرنگی از نظر علمی و اقتصادی توجیه پذیر است، زیرا این پسماند ارزان قیمت بخش عمده لیکوپن را در خود حفظ می‌کند و در صورت بی استفاده ماندن به ضایعات تبدیل می‌شود. بازیابی لیکوپن از این منبع کم‌هزینه با اصول اقتصاد چرخشی، کاهش اثرات زیست‌محیطی و پایداری در صنایع غذایی هم‌راستا است[۱۸, ۱۹]. افزون بر آن، کاربرد مستقیم عصاره‌های غنی از لیکوپن در نوشیدنی‌ها و محصولات تقویتی، اثربخشی صنعتی این فرایند را حمایت می‌کند[۳].

باوجود پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچنان باقی است. کنترل ایزومریزاسیون و اکسیداسیون در مقیاس‌های بزرگ دشوار است و بهینه‌سازی حلال های سبز با بازده بالا لازم می‌باشد. فناوری‌هایی مانند $SC\text{-}CO_2$ و IL ها هزینه اولیه بالایی دارند و مدل‌سازی دقیق سینتیک استخراج و توسعه راهکارهای پیوسته[1] در مسیر انتقال فناوری از آزمایشگاه به صنعت اهمیت کلیدی دارد[۵, ۲۴].

[1] Continuous-flow

در مجموع، شواهد موجود تأیید می‌کنند که بهره‌گیری از روش‌های نوین به‌ویژه MAE، UAE، و فناوری‌های ترکیبی سبز، ضمن بهبود بازیابی و کیفیت لیکوپن، دستیابی به هدف افزایش بهره‌وری انرژی و پایداری را کاملاً ممکن ساخته و آینده‌ای اقتصادی‌تر و سازگارتر برای صنایع فراوری گوجه‌فرنگی ترسیم می‌کند.

۶. جمع‌بندی

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از فناوری‌های نوین در استخراج لیکوپن از تفاله گوجه‌فرنگی، مصرف انرژی را کاهش و کارایی را افزایش می‌دهد. MAE و UAE با تسریع انتقال جرم، کاهش دمای فرایند و کوتاه‌کردن زمان استخراج، مصرف انرژی را ۴۰ تا ۶۰ درصد کمتر از روش‌های حرارتی مرسوم نگه می‌دارد. همچنین در این روش‌ها ساختار آل - ترانس لیکوپن و ایزومریزاسیون آن حفظ شده و کیفیت زیستی، پایداری اکسیداتیو و زیست دسترسی ایزومرهای سیس را ارتقا می‌دهند.

از نظر صنعتی، تبدیل تفاله پرحجم صنایع رب و سس به منبع ارزش افزوده، افزون بر کاهش هزینه‌های دفع، فرصت ورود به بازار محصولات عملکردی را فراهم کرده و با اقتصاد چرخشی همسو است. به‌کارگیری این فناوری‌ها می‌تواند هزینه مدیریت پسماند را حداقل ۳۰ درصد کاهش دهد و ارزش اقتصادی فرآورده را افزایش دهد. در این میان، UAE–EAE با هزینه عملیاتی پایین و قابلیت ادغام با خطوط موجود، مناسب‌ترین گزینه برای مقیاس‌پذیری صنعتی است.

کنترل دقیق ایزومریزاسیون، بهینه‌سازی انرژی و کاهش هزینه سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته در مقیاس بزرگ همچنان چالش‌برانگیز است. فناوری $SC\text{-}CO_2$ به دلیل نیاز به فشارهای بسیار بالا (۲۵ تا ۴۰ مگاپاسکال) و تجهیزات گران‌قیمت، و همچنین مایعات یونی به سبب هزینه بالای سنتز، عمدتاً به مقیاس پایلوت محدود هستند؛ بنابراین، تحلیل چرخه عمر انرژی[1] جهت تصمیم‌گیری نهایی ضروری است. در مجموع، فناوری‌های نوین، مسیری عملی و اقتصادی برای تولید پایدار عصاره‌های لیکوپن فراهم کرده و آینده رقابتی‌تری برای صنعت فراوری گوجه‌فرنگی رقم می‌زنند.

[1] LCA

۷. منابع

۱. Madia, V.N., et al., *Recent advances in recovery of lycopene from tomato waste: A potent antioxidant with endless benefits*. Molecules, 2021. **26**(15): p. 4495.

۲. Zuorro, A., M. Fidaleo, and R. Lavecchia, *Enzyme-assisted extraction of lycopene from tomato processing waste*. Enzyme and microbial technology, 2011. **49**(6-7): p. 567-573.

۳. Kumar, S., et al., *Lycopene extraction from industrial tomato processing waste using emerging technologies, and its application in enriched beverage development*. International Journal of Food Science & Technology, 2023. **58**(4): p. 2141-2150.

۴. Garofalo, S.F., V. Mallen, and D. Fino, *Extraction of carotenoids from tomato pomace using deep eutectic solvents composed of short and medium-chain fatty acids and menthol*. Food Chemistry, 2025. **484**: p. 144342.

۵. Lozano Pérez, A.S., J.J. Lozada Castro, and C.A. Guerrero Fajardo, *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, 2024. **8**(3): p. 121.

۶. Silva, Y.P., et al., *Sustainable approach for lycopene extraction from tomato processing by-product using hydrophobic eutectic solvents*. Journal of food science and technology :(۳)۵۶ .۲۰۱۹ ,p. 1649-1654.

۷. Molnar, M., et al., *Potential of deep eutectic solvents in the extraction of organic compounds from food industry by-products and agro-industrial waste*. Separations, 2024. **11**(1): p. 35.

۸. Kuvendziev, S., et al., *Valorization of tomato processing by-products: predictive modeling and optimization for ultrasound-assisted lycopene extraction*. Ultrasonics Sonochemistry, 2024. **110**: p. 107055.

۹. Ho, K.K.H.Y., et al., *Microwave-assisted extraction of lycopene in tomato peels: Effect of extraction conditions on all-trans and cis-isomer yields*. LWT - Food Science and Technology, 2015. **62**(1, Part 1): p. 160-168.

۱۰. Marinaccio, L., et al., *Ultrasound assisted lycopene extraction from tomato skin waste by volatile natural deep eutectic solvent*. Food Chemistry Advances, 2024. **4**: p. 100656.

۱۱. Kumcuoglu, S., T. Yilmaz, and S. Tavman, *Ultrasound assisted extraction of lycopene from tomato processing wastes*. Journal of food science and technology, 2014. **51**(12): p. 4102-4107.

۱۲. Nguyen ,T.M. and H.V. Nguyen, *Enzymatic assisted treatments of lycopene extraction from tomato (Lycopersicon Esculentum) peels using rice bran oil*. Applied Science and Engineering Progress, 2024. **17**(1): p. 6916-6916.

۱۳. Prokopov, T., et al., *Enzyme-assisted extraction of carotenoids from Bulgarian tomato peels*. Acta Alimentaria, 2017. **46**(1): p. 84-91.

۱۴. Niedzwiecki, L., et al., *Novel Cascade Process for Recovery of Valuable Compounds from Tomato Processing Waste, using Supercritical CO2 and Subcritical Water as Sequential Solvents*. Chemical Engineering Transactions, 2025. **118**: p. 115-120.

۱۵. Lavecchia, R. and A. Zuorro, *Improved lycopene extraction from tomato peels using cell-wall degrading enzymes*. European Food Research and Technology, 2008. **228**(1): p. ۱۵۸-۱۵۳.

۱۶. Munde, P.J., et al., *Optimization of pectinase-assisted and tri-solvent-mediated extraction and recovery of lycopene from waste tomato peels*. 3 Biotech, 2017. **7**(3): p. 206.

۱۷. Sharma, M., et al., *Valorization of seabuckthorn pomace to obtain bioactive carotenoids: An innovative approach of using green extraction techniques (ultrasonic and microwave-assisted extractions) synergized with green solvents (edible oils)*. Industrial Crops and Products, 2022. **175**: p. 114257.

۱۸. Eslami, E., et al., *A comprehensive overview of tomato processing by-product valorization by conventional methods versus emerging technologies*. Foods, 2022. **12**(1): p. 166.

۱۹. Chabi, I.B., et al., *Tomato pomace as a source of valuable functional ingredients for improving physicochemical and sensory properties and extending the shelf life of foods: A review*. Heliyon, 2024. **10**.(۳)

۲۰. Tran, D.T., et al., *Optimization of lycopene extraction from tomato pomace and effect of extract on oxidative stability of peanut oil*. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2023. **73**(3): p. 205.

۲۱. Shi, J. and M.L. Maguer, *Lycopene in tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing*. Critical reviews in food science and nutrition, 2000. **40**(1): p. 1-42.

۲۲. Ho, K.K., et al., *Microwave-assisted extraction of lycopene in tomato peels: Effect of extraction conditions on all-trans and cis-isomer yields*. LWT-Food Science and Technology, 2015. **62**(1): p. 160-168.

۲۳. Takeoka, G.R., et al., *Processing effects on lycopene content and antioxidant activity of tomatoes*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001. **49**(8): p. 3713-3717.

۲۴. Kuvendziev, S., et al., *Modeling of Microwave-Assisted Extraction of Lycopene from Tomato Peels*. Quality of Life: A Multi-Disciplinary Journal of Food Science, Environmental Science & Public Health, 2024. **15**.

۲۵. Ferreira, L.M.d.M.C., et al., *Green extraction by ultrasound, microencapsulation by spray drying and antioxidant activity of the tucuma coproduct (Astrocaryum vulgare mart.) almonds* .Biomolecules, 2021. **11**(4): p. 545.

۲۶. Squillace, P., F. Adani, and B. Scaglia, *Supercritical CO2 extraction of tomato pomace: Evaluation of the solubility of lycopene in tomato oil as limiting factor of the process performance*. Food Chemistry, 2020. **31** :۵p. 126224.

۲۷. Singla, M. and N. Sit, *Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review.* Ultrasonics Sonochemistry, 2021. **73**: p. 105506.

۲۸. Catalkaya, G. and D. Kahveci, *Optimization of enzyme assisted extraction of lycopene from industrial tomato waste.* Separation and Purification Technology, 2019. **219**: p. 55-63.

۲۹. Martins, P.L. and V.V. De Rosso. *Carotenoids achieving from tomatoes discarded using ionic liquids as extracting for application in food industry*. in *XIV Safety, health and environment world Congress conference, Cubatäo, Brazil*. 2014.

۳۰. Wu, J., et al., *Optimization of Ionic Liquid Microwave-Assisted Extraction Protocol of Lycopene from Tomato.* Natural Product Communications, 2025. **20**(4): p. ۱۹۳۴۵۷۸X251330953.

۳۱. Ladole, M.R., et al., *Synergistic effect of ultrasonication and co-immobilized enzymes on tomato peels for lycopene extraction.* Ultrasonics Sonochemistry, 2018. **48**: p. 453-462.

۳۲. Ahmadi, M., O. Heidari, and A.R. Mohammadi Nafchi, *Optimization of lycopene extraction from tomato waste with the integration of ultrasonic-enzymatic processes by response surface methodology.* Journal of Industrial Engineering Research, 2015. **1**(2): p. 29-34.