



## کاربرد فناوری‌های نوین سرخ کردن در فرآوری مواد غذایی: مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های صنعتی

بهاره معروف پور<sup>۱</sup>، امان محمد ضیائی فر<sup>۲</sup>، حسن صبأغی<sup>۳</sup>، محمد قربانی<sup>۴</sup>، سعید یلقی<sup>۵</sup>

۱- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- استاد گروه مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و دامپروری، مجتمع آموزش عالی تربت جام، استان خراسان

۴- استاد گروه شیمی مواد غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۵- استادیار گروه شیلات، مرکز تحقیقات شیلات استان گلستان، گرگان، ایران

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱

#### کلمات کلیدی:

سرخ کردن،  
روش‌های نوین فرآوری،  
جذب روغن،  
کیفیت تغذیه‌ای،  
قابلیت صنعتی‌سازی.

سرخ کردن یکی از روش‌های پرکاربرد فرآوری مواد غذایی است که توسط مصرف‌کنندگان، رستوران‌ها و صنایع غذایی برای تولید محصولاتی با ویژگی‌های حسی منحصر به فرد در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. رایج‌ترین روش آن، سرخ کردن عمیق است که علی‌رغم محبوبیت بالا، با جذب زیاد روغن و تشکیل ترکیبات سرطان‌زا مانند آکریل‌آمید همراه می‌باشد. مصرف مداوم این محصولات می‌تواند خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی-عروقی، دیابت، فشار خون، سرطان و چاقی مفرط را افزایش دهد. در سال‌های اخیر، روش‌های نوین فرآوری شامل سرخ کردن با هوای داغ، سرخ کردن تحت خلأ، سرخ کردن با مایکروویو و فناوری‌های هیبریدی توسعه یافته‌اند. این روش‌ها به‌عنوان جایگزین‌های سالم‌تر برای سرخ کردن عمیق مطرح شده‌اند و می‌توانند ضمن حفظ ویژگی‌های حسی مطلوب، میزان جذب روغن را کاهش دهند و کیفیت تغذیه‌ای و سلامت محصولات را بهبود بخشند. در نتیجه، امکان تولید نسل جدیدی از محصولات سرخ‌شده سالم‌تر فراهم شده است. در این مرور، مکانیسم عملکرد، مزایا و محدودیت‌های هر یک از این روش‌های نوین در صنعت غذا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، با ارائه یک چارچوب مقایسه‌ای شامل مصرف انرژی، کیفیت محصول، پذیرش مصرف‌کننده و قابلیت صنعتی‌سازی، شکاف‌های تحقیقاتی موجود شناسایی شده و دیدگاهی نوین در حوزه سرخ کردن مواد غذایی ارائه می‌شود.

DOI: 10.48311/fsct.2026.115543.1000

\* مسئول مکاتبات:

ziaiifar@gau.ac.ir

## ۱- مقدمه

سرخ کردن یک فرایند آب‌زدایی و پخت است که طی آن انتقال حرارت و جرم به صورت هم‌زمان رخ می‌دهد و ویژگی‌های حسی خاصی در ماده غذایی نظیر عطر، طعم و رنگ ایجاد می‌کند [۱]. این فرآیند از رایج‌ترین عملیات واحد در صنایع غذایی است که به صورت فرآوری محصول در روغن داغ در دماهای نسبتاً بالا (۱۶۰-۱۹۰ درجه سلسیوس) می‌باشد. بسیاری از ویژگی‌های مطلوب غذاهای سرخ‌شده از شکل‌گیری یک ساختار مرکب مشتق شده است که این ساختار به صورت لایه خشک و متخلخل یا پوسته<sup>۱</sup> و قسمت داخلی مرطوب و پخته یا هسته<sup>۲</sup> می‌باشد. در طی فرآیند سرخ کردن، واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی همچون ژلاتینه شدن<sup>۳</sup> نشاسته، دناتوراسیون<sup>۴</sup> پروتئین‌ها، واکنش‌های قهوه‌ای شدن، تبخیر آب، جذب روغن و در نهایت تشکیل پوسته سطحی رخ می‌دهد که در تعامل بین ماده غذایی و روغن نقش تعیین‌کننده دارند [۲]. مرحله جذب روغن، به عنوان یک فرآیند پیچیده در نظر گرفته می‌شود که مطابق شکل ۱ می‌توان آن را با پدیده‌های انتقال حرارت و جرم توضیح داد [۳]. سرخ کردن همچنین وسیله‌ای برای حفظ و ایمنی ماده غذایی نیز می‌باشد، زیرا حرارت میکروارگانیسم‌ها را از بین برده، آنزیم‌ها را غیر فعال ساخته و فعالیت آب سطحی را کاهش می‌دهد [۴]. کیفیت مواد غذایی سرخ‌کردنی تا حد زیادی تابع روغن مصرفی است. اگر روغن آسیب دیده باشد، بر روی طعم، بافت و به طور کلی ماده غذایی تاثیر می‌گذارد. هرچقدر روغن در طی فرآیند دچار اکسیداسیون و آسیب بیشتری شود، ترکیبات فعال در سطح<sup>۵</sup> بیشتری تشکیل شده و ارتباط ماده غذایی و روغن افزایش یافته و این امر موجب خشک شدن بیش از حد ماده غذایی، تیرگی محصول و از دست رفتن مواد مغذی می‌شود [۵].

در چهل سال گذشته، استفاده از سرخ کردن عمیق به دلیل آماده‌سازی سریع، به میزان زیادی افزایش یافته است که مشکلات سلامتی آن از نظر مصرف‌کننده و کاربرد تکنولوژی‌های جایگزین اهمیت دارد [۶]. مضرات اصلی مصرف مواد غذایی سرخ شده به روش سرخ کردن عمیق، عمدتاً مربوط به میزان روغن بالای آنها (تا ۴۵ درصد) می‌باشد [۷]. میزان روغن بالا باعث افزایش خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی عروقی [۸]، دیابت [۹]، افزایش فشار خون، سرطان و چاقی مفرط می‌گردد [۱۰]. عوامل متعددی بر جذب روغن در طی فرآیند سرخ کردن تأثیر می‌گذارند (شکل ۲) [۱۱]. از جمله این عوامل می‌توان به ویسکوزیته روغن [۱۲]، دما و زمان سرخ کردن [۱۳]، پیش‌تیمار قبل از سرخ کردن [۱۴]، ریزساختار مواد غذایی [۱۵] و میزان حذف روغن پس از سرخ کردن عمیق [۱۶] اشاره کرد. افزایش دمای سرخ کردن با افزایش شدت تبخیر و کاهش زمان فرآیند می‌تواند در کاهش جذب روغن محصول طی سرخ کردن مؤثر باشد [۱۷]. ویسکوزیته بالاتر معمولاً با افزایش جذب روغن بر سطح و درون بافت غذا طی مرحله سرد شدن همراه است [۱۸، ۱۹]. پس از خارج کردن ماده غذایی از محیط روغن، دمای آن به زیر ۱۰۰ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. این موضوع منجر به میعان بخار آب درون محصول و کاهش فشار داخلی می‌شود. این افت فشار یک اثر مکش ایجاد می‌کند که جذب روغن را تسهیل می‌نماید [۱۴]. فروپاشی سطحی در طول زمان سرد شدن محصول رخ می‌دهد که در نتیجه، روغن چسبیده به سطح وارد ساختار ماده غذایی می‌گردد [۲۰]. پیش‌تیمار پخت، میزان جذب روغن را کاهش می‌دهد که علت آن، تغییر ساختار درونی بافت و فشردگی ماتریس ماده غذایی می‌باشد [۲۱]. پوشش‌دهی با مواد هیدروکلوئیدی به دلیل خاصیت سدکنندگی و ظرفیت بالای پیوند با آب، منجر به کاهش از دست رفتن رطوبت و کاهش

4 - Denaturation

5- Surfactant

1 -Crust

2 -Core

3- Gelatinization

از ۳.۵ دقیقه سرخ کردن حدود ۴۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم بود [۲۸].

افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان در ارتباط با تاثیر غذا روی سلامت انسان، انگیزه‌ای برای تحقیقات بیشتر در زمینه تولید غذاهای سرخ‌شده مغذی و ایمن ایجاد کرده‌است [۲۹].

در نتیجه، صنایع غذایی به دنبال توسعه و پیشرفت روش‌ها و راه‌کارهایی جایگزین برای سرخ کردن با هدف تولید مواد غذایی سرخ‌شده با مقدار جذب روغن پایین و تولید محصولات سالم‌تر بدون تغییر در ویژگی‌های ارگانولپتیکی و حسی مشابه با روش سرخ کردن عمیق هستند [۳۰، ۳۱].

کاربرد ترکیبات پوشش‌دهی در فرمولاسیون ماده غذایی با هدف کاهش روغن تحت تاثیر عدم یکنواختی مواد اولیه ممکن است اثرات متفاوتی را نشان دهد و خواص حسی محصول را به طور نسبی در برخی موارد نامطلوب نماید [۳۲]. به همین دلیل در صنعت غذا، یافتن روش‌های نوین فرآوری یا بهبود روش‌های موجود اهمیت زیادی دارد. تغییر در نوع روش سرخ کردن و بهینه‌سازی پارامترهایی مانند زمان و دمای سرخ کردن، از مهم‌ترین تلاش‌ها برای کاهش جذب روغن و بهبود کیفیت محصول بوده‌اند. این عوامل بیشترین تاثیر را بر میزان جذب روغن و کاهش تشکیل ترکیبات سمی دارند [۳۳]. بر همین اساس، روش‌های نوین سرخ کردن، مانند سرخ کردن هوای داغ، سرخ کردن تحت خلأ، سرخ کردن با مایکروویو و روش‌های هیبریدی که جایگزین‌های سالم-تری برای سرخ کردن عمیق می‌باشند و از اهمیت استراتژیکی بالایی جهت تولید محصولات سرخ‌شده برخوردار هستند، توسعه یافته‌اند. جدول ۱ مقایسه کلی اولیه روش‌ها از دیدگاه مصرف انرژی، کیفیت محصول (جذب روغن، حفظ مواد مغذی و خواص ارگانولپتیکی)، پذیرش مصرف‌کننده و قابلیت صنعتی سازی را ارائه می‌دهد. در این مرور، چند مورد از فناوری‌های نوین سرخ کردن بررسی شد و تمرکز آن بر کاربرد صنعتی در صنایع غذایی بود. اصول عملکرد این

جذب روغن محصول طی فرآیند سرخ کردن می‌گردد [۲۲].

میزان رطوبت و ترکیب شیمیایی مواد غذایی نیز نقش مهمی در جذب روغن دارند به طوری که بین ثابت سنتتیک کاهش رطوبت و ثابت سنتتیک جذب روغن ارتباط خطی وجود دارد که تاییدکننده تاثیر رطوبت در کاهش جذب روغن است [۲۳].

در سرخ کردن عمیق بدلیل اینکه روغن در دمای بالا و در تماس با اکسیژن قرار دارد، ممکن است دچار واکنش‌های شیمیایی پیچیده مانند اکسیداسیون، پلیمریزاسیون و هیدرولیز شود که در نتیجه آن، ترکیبات مضر مانند آکریل‌آمید، ترکیبات قطبی و سایر ترکیبات زیان آور در طول فرآیند سرخ کردن تولید شوند (شکل ۳) [۲۴]. ژانگ<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند که ترکیبات قطبی شامل محصولات اکسیداتیو، محصولات هیدرولیز، تری گلیسیریدها و استرول‌های اکسیده هستند و ترکیبات غیرقطبی شامل ترکیبات حلقوی، ایزومرهای ترانس و ترکیبات حاوی اکسیژن مانند آمین‌های هتروسیلیک هستند [۲۵]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ایمنی روغن سرخ‌کردنی عمدتاً به میزان ترکیبات قطبی کل (Total Polar Compounds) موجود در روغن بستگی دارد [۲۶]. نگرانی‌ها در مورد آکریل‌آمید در غذاهای سرخ‌شده به دلیل شواهد اثرات منفی آن بر سلامت در حال افزایش است. آکریل‌آمید به‌ویژه نسبت به دمای سرخ کردن حساس است و با افزایش دما، تشکیل آن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. وقتی مواد غذایی در دماهای بالا حرارت می‌بینند، به دلیل وجود کربوهیدرات‌ها و اسیدآمینه آسپارژین، مقدار قابل توجهی از ترکیب سرطان‌زای آکریل‌آمید تولید می‌شود که برای سلامتی مضر است [۲۷].

پدرسچی<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۴) گزارش دادند که میزان آکریل‌آمید برای چپس سیب‌زمینی پس از ۷ دقیقه سرخ کردن در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس حدود ۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم بود، در حالیکه در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس پس

فناوری‌ها ارائه گردید و تأثیر آن‌ها بر کیفیت محصول و پتانسیل توسعه تجاری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

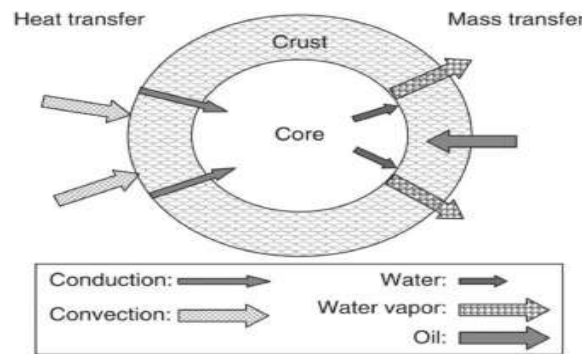


Figure 1. Schematic diagram of simultaneous heat transfer (left-hand side) and mass transfer (right-hand side) during deep-fat frying [3].



Figure 2. Factors that influence oil absorption in foods during deep-frying [11].

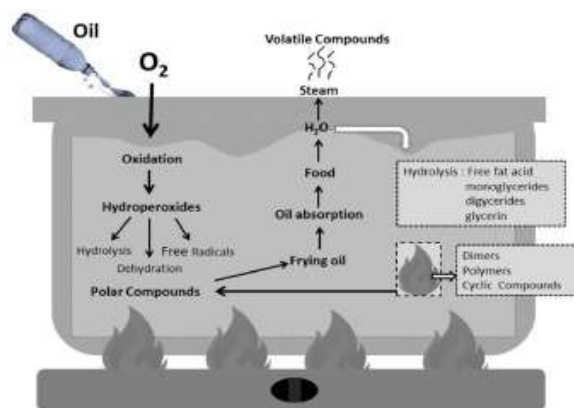


Figure 3. Diagram of changes occurring during the frying process [24].

**Table 1.** Comparison of novel frying techniques

Criteria	Air frying (AF)	Vacuum frying (VF)	Microwave-vacuum frying (MVF)	Radiant frying (RF)
Product quality	Reducing the amount of acrylamide and polar compounds, Very low in fat	Low fat content, Smooth and uniform, microstructure	Low moisture content, Reduced damage to food nutrients, Similar taste to ordinary French fries	Lighter in color, Less oil and more moisture than the oil-immersion frying products
Energy consumption	70% energy savings	Increased energy consumption due to longer frying time	Reduced energy consumption due to shorter frying time	Reduced processing time and improved energy use, leading to cost-effective operation
Consumer acceptance	Sensory evaluation shows that the color of air fried products can be similar to deep-fat-fried product, but the texture is harder and mouthfeel and appearance are drier	VF successfully enhances the textural properties at optimum process parameters which are in accordance with consumer acceptance	Sensory evaluation shows that MVF can be an attractive alternative to deep-fat frying	Sensory evaluation indicates comparable taste to oil-immersion frying
Industrialization potential	Research on home fryers is ongoing, while their industrial use and impact still require further study.	The efficiency of VF is not high; microwave-assisted frying improves process efficiency and facilitates industrial-scale production	High equipment cost and complex operation limit large-scale production	Automation and monitoring systems enhance the reliability and scalability of radiant frying
Reference	[24, 34, 35, 36]	[37, 38]	[39, 40]	[41, 42]

توجهی افزایش یافته است و انتظار می رود که این روند در سال های آینده نیز ادامه یابد.

در سرخ کن هوای داغ، به جای غوطه ور کردن ماده غذایی در روغن، محصول از طریق تماس مستقیم بین امولسیون خارجی قطرات روغن در هوای داغ و ماده غذایی در محفظه سرخ کن آزدایی شده و پوسته به تدریج روی محصول سرخ شده ظاهر می گردد [۴۳]. شکل ۴ سیستم سرخ کن هوای داغ را که شامل فن، هیتر با سیستم مقاومت الکتریکی، تولید هوای داغ و محفظه قرارگیری نمونه است، نشان می دهد [۴۴]. سرخ کن های با هوای داغ، انتقال حرارتی یکنواخت بین هوا و محصول در حال سرخ شدن را فراهم می کنند [۴۵] که در نتیجه تغییرات کیفی در سراسر محصول به صورت

### سرخ کردن هوای داغ (Hot Air Frying)

امروزه سرخ کردن با هوای داغ به عنوان یک فرآیند نوآورانه و جایگزین سرخ کردن عمیق معرفی شده است، زیرا محصولات سرخ شده با میزان روغن بسیار کم تولید می کند. پژوهش های مربوط به سرخ کردن هوای داغ در مقایسه با سایر فناوری های که طی چندین دهه مورد مطالعه قرار گرفته اند، محدود است چراکه سرخ کردن با هوای داغ، فناوری نسبتاً جدیدی محسوب می شود و تنها ۱۰ سال است که مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که از سال ۲۰۲۰ به بعد، تعداد مقالات علمی در این زمینه به طور قابل

روغن و فرآیند انتقال حرارت و رطوبت است. محصولات سرخ‌شده با هوای داغ، ظاهر پف‌کرده و خشک‌تری دارند، در حالی که محصولات سرخ‌شده عمیق، احساس چربی و روغنی در دهان ایجاد می‌کنند. ساختار میکروسکوپی در روش سرخ کردن هوای داغ، فشرده‌تر و منظم‌تر است، در حالی که در روش عمیق، حفرات بزرگ‌تر، ناهمواری، زبری و بی‌نظمی‌ها بیشتر است و بافت محصول بیشتر دچار آسیب حرارتی می‌گردد [۵۰]. تصاویر اسکن میکروسکوپ الکترونی (SEM) و کالری‌سنجی اسکن تفاضلی (DSC) نشان داده‌اند که تفاوت بین محصولات حاصل از سرخ کردن هوای داغ و سرخ کردن عمیق، میزان بیشتر ژلاتینه شدن نشاسته در سرخ کردن عمیق است. این پدیده به صورت بصری به شکل پوسته‌ای خشک و ضخیم مشاهده می‌شود. علت آن، رسیدن سریع دماهای بالا به سطح محصول است که موجب تبخیر شدید آب سطحی و در نتیجه جلوگیری از ژلاتینه شدن کامل نشاسته می‌شود. در محصولات سرخ‌شده با هوای داغ، تبخیر آب آهسته‌تر رخ داده و پوسته سطحی نازک‌تر، یکنواخت‌تر و بدون ناهمواری ایجاد می‌شود که تفاوت محسوسی در بافت محصول به وجود می‌آورد [۳۴]. همچنین، رنگ که یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کیفی در تاثیرگذاری بر پذیرش مصرف‌کننده می‌باشد، در محصولات سرخ‌شده به روش عمیق نسبت به هوای داغ تیره‌تر است که ناشی از کاهش بیشتر رطوبت و افزایش واکنش مایلارد می‌باشد [۵۱]. فرآیند سرخ کردن عمیق در دمای بالا و مدت زمان کوتاه می‌تواند در کنترل کیفیت رنگ و در نتیجه ایمنی محصول موثر باشد [۵۲]. رحمان<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که سرخ کردن با هوای داغ موجب کاهش تیرگی محصول در مقایسه با روش عمیق می‌شود و رنگ محصولات سرخ‌شده با هوای داغ نسبت به عمیق روشن‌تر است [۵۳].

یکنواخت صورت می‌گیرد [۳۴]. در سرخ کردن با هوای داغ در نهایت ماده غذایی سرخ‌شده با مقدار روغن بسیار پایین و سطح رطوبتی مشابه با سرخ کردن عمیق بدست می‌آید [۴۳]. به علاوه، سرخ کردن با هوای داغ موجب کاهش مصرف روغن و بهبود اثرات زیست محیطی می‌گردد، به طوریکه محصول سرخ شده توسط هوای داغ، ۸۰٪ روغن کمتری در مقایسه با سرخ کردن عمیق دارد [۴۶] و ذخیره ۷۰٪ انرژی و کاهش تولید پساب‌های حاصل از سرخ کردن را به دنبال دارد [۲۴]. تفاوت میزان نهایی جذب روغن بین روش هوای داغ و عمیق به محیط سرخ کردن مربوط است. در سرخ کردن عمیق، روغن داغ فراوان وجود دارد، در حالی که در سرخ کردن هوای داغ، فقط مه روغنی پراکنده در هوا وجود دارد [۳۴].

تروئل<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی بیان کردند که میزان روغن جذب شده در چپیس سبب‌زمینی سرخ‌شده با هوای داغ بین ۰.۳۷ تا ۱.۱۲ گرم بر ۱۰۰ گرم ماده خشک بدون چربی بوده است، در حالی که این مقدار برای چپیس سبب-زمینی سرخ‌شده به روش عمیق بین ۵.۶۳ تا ۱۳.۷۷ گرم بر ۱۰۰ گرم ماده خشک بدون چربی گزارش شد [۳۴].

سرخ کردن با هوای داغ در مقایسه با روش سرخ کردن عمیق، محتوی آکریل‌آمید را ۹۰ درصد کاهش می‌دهد [۴۷]. آکریل‌آمید به طور گسترده در محصولات سرخ‌شده در اثر واکنش مایلارد تولید می‌شود [۴۸] که این ماده دارای خاصیت نوروکسیسیته (سمیت عصبی) و ژنوتوکسیسیته (آسیب به DNA) و سرطان‌زایی است [۴۹] که در سرخ کردن هوای داغ به دلیل استفاده از دماهای پایین‌تر کاهش می‌یابد. در واقع، نگرانی‌ها در ارتباط با محتوی روغن و یا ترکیبات مضر غذاهای سرخ‌شده به روش عمیق به عنوان یک عامل مهم موجب کاربرد و گسترش سرخ‌کن‌های هوای داغ شده است.

از نظر بافت و ظاهر نیز تفاوت‌هایی میان محصولات سرخ-شده عمیق و هوای داغ وجود دارد که ناشی از میزان جذب

کاهش بهینه زمان فرایند و صنعتی شدن این تکنولوژی می- باشد.

بر اساس مرور مطالعات، پژوهش‌های مربوط به سرخ کردن هوای داغ در مواد غذایی هنوز محدود است و بیشترین تحقیقات بر روی محصولات نشاسته‌ای مانند سیب‌زمینی انجام شده است. در نتیجه، انجام پژوهش‌هایی بر روی مواد غذایی مختلف مانند محصولات گوشتی و آبزیان که در سطح جهانی مصرف گسترده‌ای دارند، توصیه می‌شود.

معروف‌پور<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۵ a, b) در مطالعه‌ای اخیر، فرآیند سرخ کردن هوای داغ و سرخ کردن عمیق را بر روی محصول میگو مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که محتوی روغن میگو در روش عمیق طی زمان فرآوری، به- صورت خطی زیاد شد که نشان‌دهنده جذب روغن بالای این محصول است و روش هوای داغ می‌تواند این جذب روغن را محدود نماید. از طرفی دیگر، در روش هوای داغ تغییرات دمای مرکز محصول به طور کنترل‌شده‌ای مشاهده شد که می‌تواند منجر به حفظ سلامت محصول گردد و از خطر تجزیه ترکیبات مفید و سلامت بخش میگو و در نتیجه افت تغذیه‌ای آن جلوگیری کند [۳۶, ۵۴].

زاغی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که فرآیند سرخ کردن با هوای داغ این قابلیت را دارد که محصولی با رنگ و طعم مشابه سرخ کردن عمیق تولید نماید، در حالی که محتوی روغن و ترکیبات قطبی مانند پلیمرها، دیمرها، اسیدهای چرب آزاد و آکریل‌آمید را که منجر به تغییرات متابولیک، سوء جذب چربی‌های ضروری و توسعه سرطان می‌گردند، را کاهش دهد [۲۴].

از معایب اصلی روش سرخ کردن هوای داغ نسبت به سرخ- کردن عمیق، آهسته‌بودن فرایند دهیدراسیون است [۳۴]. علت آن به سرعت بالاتر انتقال حرارت در فاز مایع (روغن) نسبت به فاز گازی (هوا) مربوط می‌شود. فانگ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی بیان کردند که رطوبت محصول در سرخ کردن عمیق طی ۶ دقیقه از حدود ۶۹ درصد به ۲ درصد رسید، در حالی که در سرخ کردن با هوای داغ ۱۰ دقیقه طول کشید [۳۷].

از جمله راهکارهایی که جهت بهینه‌سازی فرآیند سرخ کردن هوای داغ ارائه می‌گردد، افزایش دمای فرآیند یا طراحی فرآیندهای هیبریدی با هدف افزایش سرعت فرآوری و

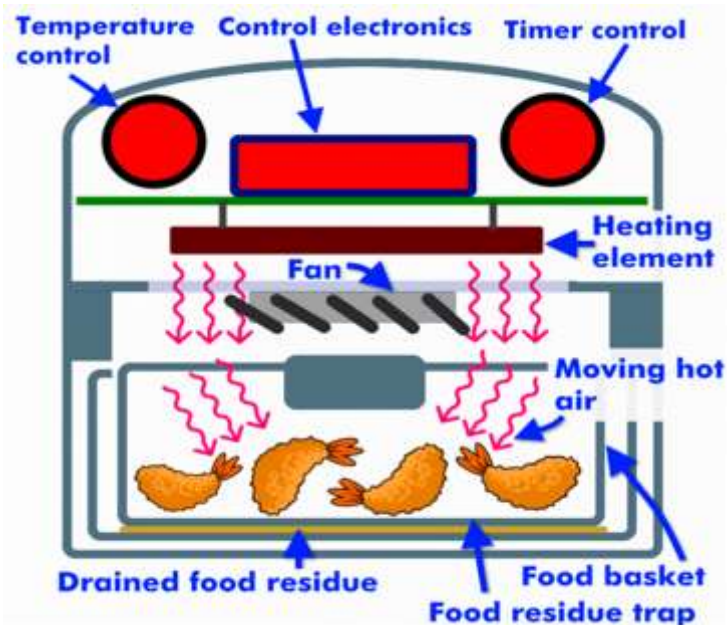


Figure 4. Schematic diagram of air-frying equipment showing its operating principle and main components [44].

الکترونیک هنگام استفاده از مایکروویو است [۵۷]. برخلاف سرخ کردن عمیق که حرارت از طریق انتقال حرارت هدایتی و جابجایی از سطح به داخل محصول منتقل می‌شود، در سرخ کردن با مایکروویو، حرارت از طریق چرخش سریع مولکول‌های قطبی در میدان‌های الکتریکی درون محصول تولید و منتقل می‌شود [۵۸]. حرکت سریع مولکول‌ها و یون-های قطبی درون محصول، حرارت ایجاد می‌کنند که باعث گرمایش سریع ماده غذایی می‌گردد [۵۹]. به دلیل فشار داخلی نسبتاً بالا که ناشی از تولید بخار آب درون ماده غذایی در معرض مایکروویو است، انتقال حرارت بسیار سریع اتفاق می‌افتد که منجر به دهیدراته شدن سریع محصول می‌شود [۴۰].

سرخ کردن با مایکروویو در مقایسه با سرخ کردن عمیق مزایای زیادی دارد که می‌توان به صرفه‌جویی در مصرف انرژی، زمان کوتاه پخت، ایجاد ویژگی‌های ریزساختاری منحصر به فرد و حفظ ارزش غذایی ماده غذایی اشاره کرد [۶۰].

یکی از چالش‌های اصلی سرخ کردن با مایکروویو علی‌رغم مزایای قابل توجه آن، عدم یکنواختی حرارت و ایجاد نقاط داغ (Hot Spot) می‌باشد. میدان‌های امواج مایکروویو به-

#### سرخ کردن در مایکروویو (Microwave Frying)

سرخ کردن با مایکروویو نوعی فرآیند حرارتی است که در آن از امواج الکترومغناطیسی غیر یونیزه‌کننده بین مادون قرمز و امواج رادیویی (طول موج یک میلی‌متر تا یک متر و فرکانس بین ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز) جهت حرارت‌دهی ماده غذایی استفاده می‌شود. این تابش معمولاً توسط یک مگنترون تولید می‌شود که مسئول تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی الکترومغناطیسی است. شکل ۵ سیستم سرخ کردن مایکروویو را نشان می‌دهد که شامل یک مبدل افزایشنده، هدایت‌کننده موج، اپلیکاتور و محفظه روغن است [۵۵]. در این سیستم، انرژی مایکروویو پس از تقویت توسط مبدل افزایشنده و انتقال از طریق هدایت‌کننده موج وارد اپلیکاتور شده و موجب گرمادهی محصول و انجام فرآیند سرخ کردن می‌گردد.

استفاده از مایکروویو در گرم کردن و فرآوری مواد غذایی برای سرعت‌بخشیدن به فرآیند و حفظ کیفیت محصول رو به افزایش است. مایکروویو از طریق تحریک ارتعاشات مولکولی با استفاده از مکانیسم چرخش دوقطبی و قطبش یونی، مواد دی‌الکتریک را گرم می‌کند [۵۶]. مکانیسم چرخش دوقطبی، اصلی‌ترین سازوکار گرمایش مواد دی-

مدت زمان کوتاه باعث جذب روغن کمتر در ماده غذایی می‌شود. پژوهش‌های مختلفی بر روی محصولاتی مانند بادمجان، مرغ و سیب‌زمینی انجام گرفته و نتایج حاکی از آن بوده که پیش‌ تیمار میکروویو موجب کاهش رطوبت و تولید محصولی با کمترین مقدار جذب روغن می‌گردد [۶۲]. به علاوه، اعمال پیش‌ تیمار میکروویو با توجه به کاهش شدید محتوی رطوبتی محصول، باعث کاهش حجم و چروکیده شدن محصول قبل از فرآیند می‌گردد [۶۳]. سانسانو<sup>۱</sup> و همکاران (2018) پارامترهای کیفی سیب‌زمینی سرخ شده با میکروویو را با سرخ کردن عمیق مقایسه کردند. نتایج نشان داد که سرخ کردن با میکروویو، سرعت دهیدراسیون را افزایش داده و زمان مورد نیاز برای رسیدن به همان سطح رطوبت را در مقایسه با سرخ کردن عمیق به طور قابل توجهی کاهش داده است و از طرفی، موجب کاهش مقدار آکریل آمید و جذب روغن در محصول گردیده است [۶۴].

صورت یکنواخت در فضای پخت توزیع نمی‌شوند و این امر باعث می‌شود که برخی نقاط مواد غذایی بیش از حد گرم شوند و سایر نقاط کمتر پخته شوند. در نتیجه، باعث ایجاد رنگ و بافت ناهمگن در مواد غذایی سرخ شده می‌گردد. به همین دلیل، میکروویو در اغلب مطالعات و کاربردهای صنعتی، به جای فرآیند اصلی سرخ کردن بیشتر به عنوان پیش تیمار استفاده می‌شود. پیش تیمار میکروویو تاثیر قابل توجهی بر کاهش رطوبت محصول و در نتیجه جذب روغن محصول دارد زیرا رطوبت از ویژگی‌های مهم تاثیرگذار بر جذب روغن است. در اثر مکانیسم جایگزینی آب، آب ماده غذایی طی فرآیند سرخ شدن به صورت بخار خارج شده و طی وقوع این پدیده، در ماده غذایی فشار ایجاد می‌گردد و به دنبال آن، نفوذ و مکش جذب روغن به داخل ماده غذایی رخ می‌دهد [۶۱]. بنابراین کاهش رطوبت غذا قبل از سرخ کردن عمیق به طور موثری جذب روغن را کاهش می‌دهد. میکروویو در مقایسه با روش سرخ کردن عمیق، در یک

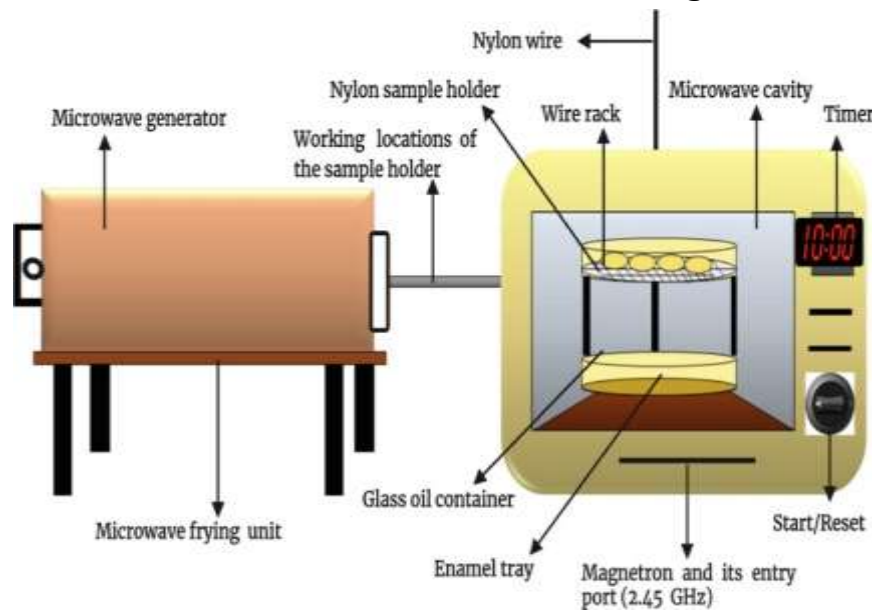


Figure 5. A schematic diagram of the microwave frying system [55].

توسط یانگ (۱۹۸۹) ثبت اختراع شد تا معایب روش سنتی سرخ کردن در فشار اتمسفری را که منجر به تولید محصولات چرب و اکسیداسیون سریع روغن سرخ کردنی می‌شد، برطرف کند [۶۵]. شکل ۶ سیستم سرخ کردن تحت خلأ را

### سرخ کردن تحت خلأ (Vacuum Frying)

سرخ کردن تحت خلأ یک روش پیشرفته و جایگزین مناسب برای فرآیند سرخ کردن عمیق در صنعت غذایی است که

1 - Sansano

بیان کردند که محتوی آکریل‌آمید در سرخ کردن عمیق ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم ثبت شد، درحالی‌که در سیب‌زمینی سرخ‌شده تحت خلأ از ۲۵۰ میکروگرم بر کیلوگرم تجاوز نکرد و منجر به تولید محصولات سالم‌تر گردید [۶۹].

روش سرخ کردن تحت خلأ به دلیل کاهش دمای سرخ کردن و کاهش تماس مواد غذایی با اکسیژن، موجب حفظ مواد مغذی، رنگ، طعم، بافت و بهبود کیفیت محصول نهایی می‌گردد. به دلیل نبود اکسیژن در فرآیند سرخ کردن تحت خلأ، واکنش‌های شیمیایی مخرب مانند اکسیداسیون و قهوه‌ای شده آنزیمی مهار می‌شوند. در نتیجه، مواد مغذی و رنگ محصولات تا حد زیادی حفظ شده و طعم طبیعی بیشتری را نسبت به محصولات سرخ‌شده به روش عمیق خواهند داشت [۷۰]. محصولات سرخ‌شده با روش سرخ کردن تحت خلأ می‌توانند به سطح لازم از دهیدراسیون برسند بدون آنکه دچار سوختگی یا تیرگی بیش از حد شوند.

بافت یکی از جنبه‌های مهم پذیرش محصولات سرخ‌شده از سوی مصرف‌کنندگان به‌شمار می‌رود و در روش سرخ کردن تحت خلأ، حس ذوب‌شدن در دهان مشابه سرخ‌شدن عمیق جاصل می‌شود با این مزیت که در چهارچوب یک رژیم غذایی سالم‌تر قرار می‌گیرد [۷۱].

گارایو<sup>۳</sup> و موریرا<sup>۴</sup> (۲۰۰۲) بیان کردند که سرخ‌کن‌های تحت خلأ قادر هستند که محصولات سرخ‌شده با ۳۰ درصد روغن کمتر اما با همان ویژگی‌های بافت و رنگ سرخ کردن عمیق تولید کنند [۷].

مطالعات نشان داده‌اند که کاهش دمای سرخ کردن تحت خلأ باعث کاهش اکسیداسیون روغن و کاهش جذب آن می‌گردد که منجر به تولید محصولی سالم‌تر می‌شود. در سرخ کردن تحت خلأ به دلیل استفاده از دما و فشار کمتر، زمان سردشدن محصول کاهش می‌یابد، در نتیجه فرصت کمتری برای ورود روغن و جایگزینی با آب وجود دارد که این موضوع به طور قابل توجهی در کاهش مجتوی روغن موثر است، در نتیجه

که از سه بخش اصلی محفظه سرخ کردن در خلأ، کندانسور و پمپ خلأ با قدرت بالا تشکیل شده‌است، نشان می‌دهد [۶۶]. در این سیستم، پیش از آغاز سرخ کردن، فشار پایین موردنیاز برای فرآیند توسط پمپ خلأ تامین می‌شود تا سیستم کاملاً در حالت خلأ باقی بماند. سپس، ماده غذایی در طول فرآیند سرخ کردن حرارت می‌بیند و آب آن تبخیر می‌شود و بخار حاصل از آب از طریق لوله خلاء به واحد جمع‌آوری بخار متراکم‌شده هدایت می‌گردد. یکی از مزایای برجسته سرخ کردن تحت خلأ، مرحله زدودن روغن است که استفاده از سیستم زدودن روغن حدود ۸۷ درصد روغن سطحی مواد غذایی سرخ‌شده را کاهش داده و موجب تولید محصولات سرخ‌شده با کیفیت بالا نسبت به سرخ کردن عمیق می‌گردد [۶۷]. دوئیک<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰) عملکرد سرخ کردن تحت خلأ را روی برش‌های هویج سرخ‌شده بررسی کردند تا مزایای این روش را مشخص کنند. نتایج نشان داد که درصد جذب روغن در برش‌های هویج سرخ‌شده تحت خلأ ۵۰.۵ درصد نسبت به سرخ کردن عمیق کمتر بود و حدود ۹۰ درصد از کاروتن‌ها حفظ شدند که منجر به حفظ رنگ هویج شدند [۶۸].

در سرخ کردن تحت خلأ، ماده‌غذایی در دمای پایین و در شرایط خلأ (فشار کمتر از اتمسفر معادل ۶.۶۵ کیلوپاسکال) و حضور کمتر اکسیژن سرخ می‌شود. این روش به دلیل کاهش نقطه جوش روغن و رطوبت محصول، امکان سرخ کردن ماده غذایی در دمای پایین‌تر نسبت به روش سرخ کردن عمیق را فراهم می‌سازد. کاهش دما و سطح اکسیژن در شرایط خلأ، از طریق جلوگیری از اکسیداسیون روغن، مانع تشکیل ترکیبات مضر نظیر آکریل‌آمید و فوران می‌گردد [۶۹]. فرآورده‌های سرخ‌شده تحت خلأ به نسبت فرآورده‌های سرخ‌شده عمیق، به دلیل عدم تشکیل آکریل‌آمید یا آکریل‌آمید بسیار کم، ایمن‌تر هستند و می‌توانند قابلیت نگهداری طولانی‌تری داشته باشند [۳۱]. بلکوا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۸)

3 -Garayo

4 -Moreira

1 -Dueik

2 -Belkova

روش عمیق دارد. در مقابل، سرخ کردن عمیق به دلیل حرارت بالا و انتقال جرم سریع، ریزساختار ناهمگون، نانظم و متخلخل ایجاد می‌کند و واکنش قهوه‌ای شدن نیز در این روش قابل توجه می‌باشد [۳۷].

آکینپلو<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی که بر روی بهینه‌سازی فرآیند سرخ کردن تحت خلأ با ویژگی‌های کیفی مطلوب انجام دادند، شرایط بهینه برای سرخ کردن در خلأ را دمای ۱۳۳ درجه سلسیوس، فشار خلأ ۹.۹۱ سانتی‌متر جیوه و زمان سرخ کردن ۶ دقیقه اعلام کردند [۷۵].

نقطه ضعف اصلی روش سرخ کردن تحت خلأ این است که به دلیل دمای پایین‌تر فرآیند، زمان رسیدن به تردی مطلوب ممکن است طولانی شود. همچنین، تجهیزات خلأ و سیستم‌های کنترل فشار نیازمند هزینه بالا و طراحی دقیق جهت کنترل فشار، دما و زمان می‌باشند [۳۸]. به همین دلیل، پتانسیل سرخ کردن تحت خلأ می‌تواند از طریق ترکیب با سایر فناوری‌ها بیشتر شود و هم در تولیدات کوچک و هم در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

محصولات سرخ‌شده تحت خلأ میزان کمتری روغن جذب می‌کنند [۷۲].

مطالعه بدویا<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، نشان داد که سرخ‌کن تحت خلأ نسبت به سرخ کردن عمیق باعث کاهش عدد پراکسید روغن می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که سرخ‌کن تحت خلأ می‌تواند اکسیداسیون روغن را در طی سرخ کردن کاهش دهد و به بهبود کیفیت محصول و طول عمر نگهداری آن کمک کند [۷۳].

یام سنگ سانگ<sup>۶</sup> و رانگسی<sup>۷</sup> (۲۰۰۳) بیان کردند که سرخ کردن تحت خلأ اثر قابل توجهی بر میزان جذب روغن محصول دارد. همچنین، محصولات سرخ‌شده در شرایط خلأ نسبت به محصولات سرخ‌شده در فشار اتمسفری، چروکیدگی بیشتری داشته و دارای رنگ روشن‌تر و طبیعی‌تر می‌باشند [۷۴]. فانگ و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی که بر روی ماهی سرخ‌شده به روش عمیق، هوای داغ و تحت خلأ انجام دادند، نتیجه گرفتند که ماهی سرخ‌شده به روش هوای داغ و تحت خلأ میزان جذب روغن کمتر (به ترتیب ۹.۸ و ۲۷.۷ درصد) و ریزساختار یکنواخت و صاف‌تری نسبت به

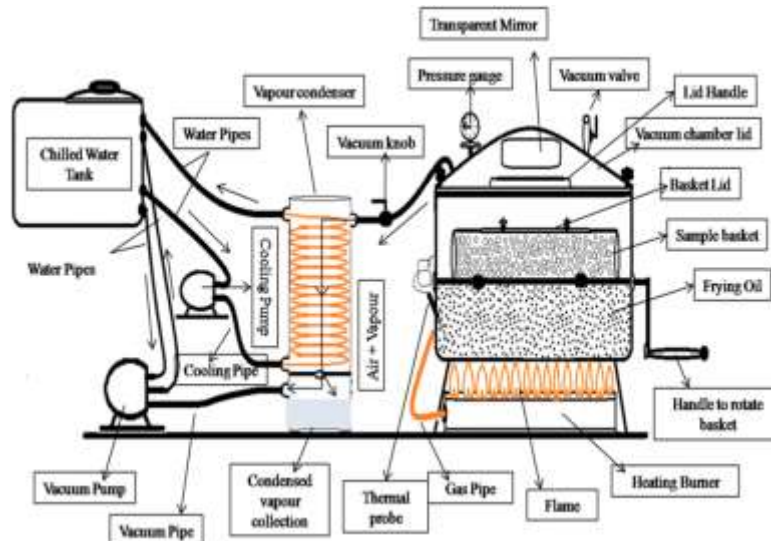


Figure 6. A schematic diagram of the vacuum frying system for industrial production [66].

ترکیب ویژگی‌های مثبت هر فناوری در صنعت سرخ کردن موجب بهبود یکنواختی محصول، کاهش زمان فرآیند،

### روش‌های هیبریدی (Hybrid Methods)

7- Rungsee

5 -Bedoya

8- Akinpelu

6 -Yamsaengsung

محصولات سرخ شده با محتوی روغن کمتر، بافت و طعم بهتر، آکریل آمید کمتر و کیفیت بالاتر شود [۸۰]. این مزایا عمدتاً ناشی از زمان گرمایش کوتاه‌تر در مقایسه با سرخ کردن عمیق است. روش MVF باعث کاهش نقطه جوش آب می‌شود، به این معنا که برای دهیدراسیون به دمای پایین‌تر و زمان کوتاه‌تری نیاز است. این امر منجر به کاهش نرخ واکنش‌های مایلارد و اکسیداسیون چربی‌ها و قهوه‌ای شدن آنزیمی می‌شود.

شکل ۸ تصاویر اسکن میکروسکوپ الکترونی یا مرفولوژی میکروسکوپی سطح مقطع را به ترتیب برای چیپس قارچ سرخ شده با روش تحت خلأ (شکل ۸-a) و چیپس سرخ شده با روش MVF (شکل ۸-b) نشان می‌دهد [۸۱]. تصاویر نشان می‌دهد که استفاده از فناوری MVF می‌تواند به تولید محصولاتی با سلامت بیشتر، بافت یکنواخت‌تر، رنگ بهتر و چربی کمتر کمک کند در نتیجه موجب حفظ خواص حسی و تغذیه‌ای آنها شود.

کوان<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۴) روش سرخ کردن MVF را با روش سرخ کردن تحت خلأ چیپس سیب‌زمینی مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که روش سرخ کردن MVF در مقایسه با روش سرخ کردن تحت خلأ، میزان جذب روغن را به طور چشمگیری کاهش داده و تردی و رنگ محصولات سرخ شده را بهبود بخشیده و موجب کاهش زمان سرخ کردن شده است [۸۰].

براساس گزارش سو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، کیفیت محصولات سرخ شده با MVF به طور معنی‌داری از کیفیت محصولات سرخ شده تحت خلأ بهتر است. در واقع، افزایش تخلخل ناشی از مایکروویو باعث افزایش تردی و بهبود ویژگی‌های بافتی محصول می‌شود. همچنین، میزان جذب روغن در محصولات سرخ شده با روش MVF به طور قابل توجهی کمتر می‌باشد. با این حال، تجهیزات مورد نیاز برای

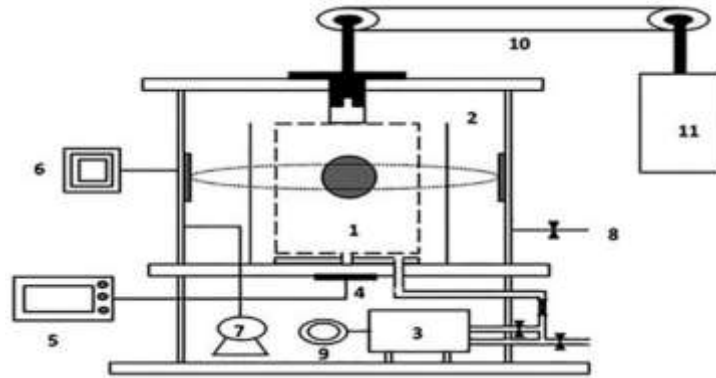
افزایش راندمان حرارتی، کاهش جذب روغن، کاهش تشکیل ترکیبات مضر نظیر آکریل آمید و کاهش مصرف انرژی می‌گردد. از طرفی، پیچیدگی‌های طراحی و کنترل فرآیند و هزینه‌های بالاتر تجهیزات صنعتی را به دنبال دارد.

### روش سرخ کردن مایکروویو - خلأ (MVF<sup>۱</sup>)

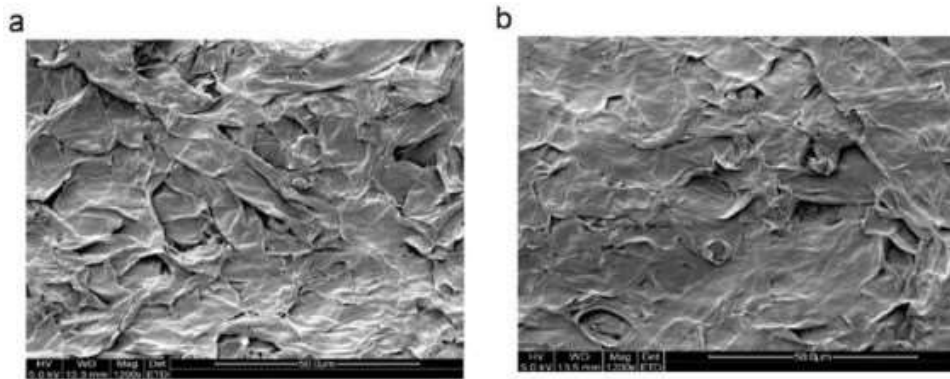
طراحی فرآیندهای هیبریدی با هدف افزایش سرعت فرآوری و کاهش بهینه زمان فرایند جهت بهینه‌سازی فرآیند سرخ کردن انجام می‌گیرد. حرارت‌دهی غیریکنواخت، کاهش رنگ و از دست دادن زیاد رطوبت از مشکلات رایج فرآیند سرخ کردن با مایکروویو هستند [۷۶]. بنابراین جهت ارتقای بیشتر کیفیت محصولات سرخ شده و افزایش بهره‌وری فرآیند سرخ کردن، روش مایکروویو را با سرخ کردن تحت خلأ (MVF) ترکیب کرده‌اند. ترکیب فناوری سرخ کردن با مایکروویو و سرخ کردن تحت خلأ که در شکل ۷ نشان داده شده است [۷۷]، منجر به توسعه یک تکنیک سرخ کردن جدید شده است که سرعت حرارت‌دهی بالاتر و زمان سرخ کردن کوتاه‌تری را فراهم می‌کند و در نتیجه مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. همچنین، زمان دهیدراسیون را به حداقل می‌رساند و میزان روغن جذب شده توسط محصول را کاهش می‌دهد [۷۸]. این مزایا در مطالعات مختلف مشاهده شده‌اند. به همین دلیل، سرخ کردن مایکروویو تحت خلأ، به عنوان روشی نویدبخش برای بهبود فرآیند سرخ کردن و افزایش کیفیت محصولات سرخ شده مطرح شده است [۷۷]. در سال‌های اخیر، این روش به دلیل دستیابی به سرعت حرارت‌دهی بالا، حرارت‌دهی یکنواخت‌تر، عملکرد ساده و هزینه کمتر محبوبیت زیادی یافته است. در روش MVF، از مایکروویو برای حرارت دادن ماده غذایی در محیط خلأ استفاده می‌شود تا نقاط ضعف سرخ کردن عمیق برطرف شود [۷۹].

مزیت اصلی روش MVF در مقایسه با سایر روش‌های سرخ کردن، سرعت بالای دهیدراسیون است که به دلیل تابش مایکروویو، انتقال حرارت سریع می‌تواند منجر به تولید

این فناوری گران قیمت بوده و راه اندازی آن پیچیده می باشد [۳۹].



**Figure 7.** Schematic diagram of the microwave-vacuum frying equipment: (1) Frying chamber; (2) vacuum chamber; (3) oil tank; (4) temperature sensor; (5) controller; (6) microwave source; (7) vacuum pump; (8) valve for breaking vacuum; (9) circulation pump; (10) conveyor; and (11) electric motor [78].



**Figure 8.** SEM images ( $\times 1200$  magnification) of mushroom chips (8a: VF, 8b) [81].

تابش مادون قرمز بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است که طول موج آن (۰.۷۸ و ۱۰۰۰ میکرومتر) مابین طول موج مرئی و امواج رادیویی قرار دارد که بر اساس طیف الکترومغناطیسی به سه ناحیه مادون قرمز نزدیک ( $NIR^1$ )، مادون قرمز میانی ( $MIR^2$ ) و مادون قرمز دور ( $FIR^3$ ) تقسیم می شود [۸۲]. هر یک از این نواحی دارای ویژگی های منحصر به فردی هستند که برای کاربردهای حرارتی مختلف مناسب اند. تابش مادون قرمز نزدیک با انرژی بالا به عمق مواد نفوذ می کند، تابش مادون قرمز دور با انرژی پایین، حرارت سطحی را برای فرآیندهای ملایم فراهم می کند و تابش مادون قرمز میانی، تعادلی میان گرمایش سطحی و عمقی ایجاد می کند. اگرچه در سرخ کردن مایکروویو نیز از امواج

### روش سرخ کردن با تابش مادون قرمز ( Infrared Frying)

در فرآیندهای هیبریدی می توان از مادون قرمز به عنوان یک منبع حرارتی ارزان، کنترل پذیر و صنعتی بهره برد. در سیستم سرخ کردن با کمک مادون قرمز (IR-assisted)، تابش مادون-قرمز با روش های تکمیلی سرخ کردن ترکیب می گردد تا هم کارایی و هم کیفیت محصول ارتقا پیدا کند. تابش مادون قرمز موجب گرمایش سریع سطحی می گردد در حالی که روش های ثانویه به حذف رطوبت داخلی محصول کمک می کنند. این ترکیب باعث تسریع فرآیند سرخ کردن و حفظ خواص حسی و تغذیه ای محصول می گردد.

3 -Far Infrared Radiation

1 -Near Infrared Radiation

2- Mid Infrared Radiation

توسعه در حال انجام است و نیاز به تحقیقات و ارزیابی‌های بیشتر وجود دارد.

پیشرفت‌های فناوریانه، از جمله سیستم‌های ترکیبی که تابش مادون قرمز را با روش‌هایی مانند سرخ کردن تحت خلأ، هوای داغ یا مایکروویو (شکل ۹) [۸۷] تلفیق می‌کنند، راندمان فرآیند را بهبود داده و دامنه کاربردهای آن را گسترش داده است. این نوآوری‌ها، پتانسیل تحول‌آفرین فرآیند سرخ کردن را برای صنایع غذایی برجسته می‌کند [۸۸].

روش سرخ کردن هوای داغ به دلیل سرعت انتقال حرارت پایین فاز گازی (هوا)، موجب طولانی شدن زمان فرآیند سرخ کردن می‌شود که تابش مادون قرمز با انتقال مستقیم و هدفمند انرژی به سطح ماده غذایی و ایجاد گرمایش یکنواخت موجب کوتاه شدن زمان فرآیند می‌گردد [۸۹].

در روش سرخ کردن با مایکروویو، حرارت از طریق امواج الکترومغناطیسی در ماده غذایی تولید می‌شود و زمان فرآیند را نسبت به روش هوای داغ کاهش می‌دهد ولی باعث ایجاد نقاط داغ و توزیع غیریکنواخت رطوبت می‌شود. تابش مادون قرمز با اعمال یکنواخت حرارت، رطوبت را به طور یکنواخت حذف کرده و یکپارچگی ساختاری محصول را حفظ می‌نماید [۹۰].

روش سرخ کردن تحت خلأ، تحت فشار کاهش یافته انجام می‌شود و برای محصولات حساس به حرارت، روش مناسبی می‌باشد، زیرا تخریب ترکیبات حساس به حرارت و از دست رفتن ویژگی‌های تغذیه‌ای محصول را به حداقل می‌رساند. با این حال، این روش به زمان فرآیند طولانی‌تر و مصرف انرژی بیشتر نیاز دارد. ترکیب سرخ کردن مادون قرمز با سیستم خلأ، به عنوان یک روش هیبریدی، این محدودیت‌ها را تا حد زیادی کاهش داده و سرعت فرآیند سرخ کردن و بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهد [۹۱]. در این سیستم، تابش مادون قرمز باعث انتقال سریع انرژی و تشکیل پوسته سطحی مناسب می‌شود، در حالی که شرایط خلأ با کاهش نقطه جوش آب، خروج رطوبت را در دماهای پایین‌تر تسهیل کرده

الکترومغناطیس استفاده می‌شود، اما حرارت‌دهی مادون قرمز مؤثرتر و سریع‌تر است.

مکانیسم سرخ کردن با تابش مادون قرمز شامل جذب مستقیم انرژی مادون قرمز توسط سطح ماده غذایی است. انرژی مادون قرمز، مولکول‌های آب را برانگیخته کرده و باعث ارتعاش آنها می‌شود که این ارتعاشات، تبخیر سریع رطوبت از سطح را تسهیل کرده و فرآیند سرخ کردن را کارآمد می‌سازد. راندمان فرآیند سرخ کردن با تابش مادون قرمز تحت تاثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده غذایی از جمله رطوبت، تخلخل و خواص حرارتی قرار دارد. مواد غذایی با رطوبت بالا، انرژی مادون قرمز را بهتر جذب کرده و منجر به افزایش سرعت فرآیند سرخ کردن می‌شوند. ساختارهای متخلخل نیز با بهبود انتشار بخار، فرآیند حذف رطوبت را تسهیل می‌کنند [۸۳].

سرخ کردن با تابش مادون قرمز به دلیل دقت بالا، روشی متمایز است که جهت بهینه‌سازی فرآیند و طراحی سیستم‌های ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فناوری با استفاده از تابش الکترومغناطیسی، انتقال سریع و یکنواخت را فراهم کرده و با حفظ ویژگی‌های حسی و تغذیه‌ای مانند رنگ، طعم و ویتامین‌ها و همچنین تضمین ایمنی میکروبی، به ویژه برای محصولات ارزشمند موثر است [۸۴]. علاوه بر این، هم‌سویی آن با اهداف کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی (کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای)، جایگاه آن را در فرآوری نوین مواد غذایی تقویت می‌کند و محدودیت‌های روش‌های سنتی را برطرف می‌سازد [۸۵].

[۸۶]. صباغی<sup>۴</sup> و نگون<sup>۵</sup> (۲۰۲۵) بیان کردند که فناوری مادون قرمز با کاهش زمان فرآوری و بهبود بهره‌وری انرژی، عملیات اقتصادی‌تری را بدون افت کیفیت محصول نهایی فراهم می‌آورد [۴۲]. با این حال، داده‌های مربوط به پذیرش مصرف‌کننده در روش سرخ کردن با تابش مادون قرمز نسبتاً محدود است و بیشتر مطالعات در مقیاس‌های آزمایشگاهی یا نیمه‌صنعتی انجام شده‌اند. در مقیاس صنعتی، تحقیقات و

پارامترهای فرآیندی، پتانسیل بالایی برای تولید محصولات کم روغن با کیفیت حسی مطلوب و حفظ ویژگی‌های تغذیه‌ای دارد و به‌عنوان جایگزینی مناسب برای روش سرخ کردن عمیق مطرح می‌شود.

نلسون<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۳) کارایی سرخ‌کن مادون‌قرمز را بررسی کرده و گزارش دادند که محصولات سرخ‌شده با این روش دارای رنگ روشن‌تر بوده و به طور متوسط ۱۶ درصد روغن کمتر و ۱۹ درصد رطوبت بیشتر نسبت به محصولات سرخ‌شده به روش عمیق داشته‌اند [۴۱].

و باعث حفظ ترکیبات حساس به حرارت و بهبود ویژگی‌های حسی محصول می‌شود. از طرفی، افزایش توان تابش مادون‌قرمز و کاهش فشار آون موجب افزایش سرعت و کاهش مدت زمان فرآیند می‌گردد [۹۲]. تعامل میان توان تابش مادون‌قرمز، میزان خلأ و زمان فرآیند، تعیین‌کننده کیفیت نهایی محصول و میزان جذب روغن است. انتخاب و بهینه‌سازی دقیق این پارامترها، امکان تولید محصولاتی با کیفیت حسی بالا و میزان روغن پایین را فراهم می‌سازد. به طور کلی، سرخ کردن مادون‌قرمز تحت خلأ با ترکیب چندین مکانیسم حرارتی، کاهش فشار و کنترل دقیق

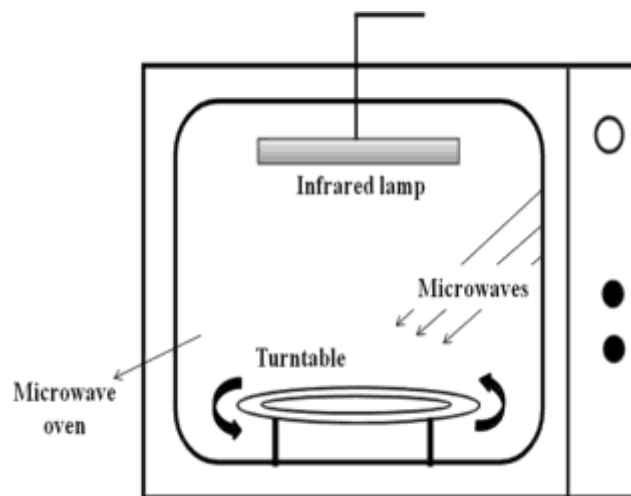


Fig. 9. A schematic diagram of the the microwave infrared frying system [87].

توجه جذب روغن محصول، کیفیت حسی قابل قبولی ایجاد کنند که با ترجیحات مصرف‌کننده هم‌راستا باشد.

بر اساس ارزیابی‌های حسی انجام‌شده، رنگ محصولات سرخ‌شده با هوای داغ تفاوت معنی‌داری با نمونه‌های سرخ‌شده به روش عمیق ندارد که این یافته با نتایج رنگ-سنجی نیز همخوانی دارد. با این حال، از نظر بافت و حس دهانی، نمونه‌های سرخ‌شده با هوای داغ دارای بافت سخت‌تر، ظاهر خشک‌تر و حس دهانی کم‌چرب‌تری نسبت به نمونه‌های سرخ‌شده عمیق می‌باشند [۳۵]. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از تغییرات در ساختار پوسته و ریزساختار محصول است، به‌طوری که پوسته محصولات هوای داغ

### چالش‌های ارزیابی حسی در محصولات تولیدشده با روش‌های نوین سرخ کردن

ارزیابی حسی یکی از مهم‌ترین معیارها در تعیین موفقیت روش‌های نوین سرخ کردن محسوب می‌شود، زیرا کاهش جذب روغن و بهبود شاخص‌های تغذیه‌ای تنها در صورتی منجر به پذیرش بازار می‌شود که کیفیت حسی محصول حفظ یا ارتقا یابد. ویژگی‌های حسی نظیر رنگ، بافت، تردی، طعم و پذیرش کلی نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت تجاری محصولات سرخ‌شده دارند [۷]. ارزیابی‌های حسی نشان می‌دهد که روش‌های نوین می‌توانند در عین کاهش قابل-

پذیرش مصرف‌کننده ایفا کند و از طریق بهینه‌سازی شرایط فرآیندی تحقق یابد.

### چالش‌های صنعتی در روش‌های نوین سرخ کردن

در میان فناوری‌های جایگزین سرخ کردن، تنها سرخ کردن تحت خلأ مورد پذیرش و استفاده تجاری صنایع غذایی قرار گرفته است. مهم‌ترین چالش روش سرخ کردن تحت خلأ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا و عدم دسترس‌پذیری برای ظرفیت‌های کوچک می‌باشد که این موضوع برای کارآفرینان و صنایع کوچک مانع بزرگی در استفاده از این فناوری به شمار می‌آید [۹۳]. سرخ کردن هوای داغ و سرخ کردن با تابش مادون قرمز نیز پتانسیل امیدوارکننده‌ای نشان داده‌اند، اما در حال حاضر، تحقیقات عمدتاً بر روی سرخ‌کن‌های خانگی صورت گرفته‌است و بررسی کاربرد و تاثیر این فناوری‌ها در مقیاس صنعتی، حوزه‌ای در حال توسعه است که نیازمند پژوهش‌های بیشتری خواهد بود تا مکانیزم و تعامل این فناوری‌ها با ماتریکس‌های مختلف غذایی بهتر درک شود [۸۲]. از اصلی‌ترین چالش‌های سرخ کردن با مایکروویو، حرارت‌دهی غیر یکنواخت و اکسیداسیون روغن در دماهای بالا، می‌باشد [۸۲]. با این حال، این چالش‌ها با استفاده از تجهیزات مناسب و شرایط عملیاتی صحیح قابل رفع هستند. فرآیندهای سرخ کردن هیبریدی به‌عنوان جایگزین‌های نوین برای روش عمیق مورد توجه قرار گرفته‌اند. این فناوری‌ها موجب بهبود کارایی انرژی و فرآیند سرخ کردن شده و با کاهش جذب روغن و کاهش تشکیل آکریل‌آمید، بافت، رنگ و کیفیت غذا را ارتقا می‌دهند. با این حال، توجه به هزینه، بازده انرژی و بهینه‌سازی این فناوری‌ها قبل از پذیرش گسترده آن‌ها اهمیت دارد. علاوه بر این، تحقیقات بیشتری برای ارزیابی حسی غذاهای تهیه شده با روش‌های جایگزین سرخ کردن لازم است. بیشتر مطالعات در زمینه فناوری سرخ کردن بر جنبه‌های فنی فرآیند متمرکز بوده و داده‌های محدودی در مورد پذیرش مصرف‌کننده از محصولات سرخ‌شده وجود دارد. این یک خلأ مهم است، زیرا پذیرش مصرف‌کننده برای تجاری‌سازی هر فناوری غذایی جدید

دارای فضاهای خالی بیشتر و سلول‌های کوچک‌تر بوده، در حالی که در سرخ کردن عمیق، این فضاها عمدتاً توسط روغن پر می‌شوند [۳۴، ۳۵]. با وجود این تفاوت‌ها، روش سرخ-کردن هوای داغ از نظر طعم و پذیرش کلی، در صورت بهینه‌سازی شرایط فرآیندی، می‌تواند رضایت مصرف‌کننده را تأمین کند و به‌عنوان روش جایگزین سالم‌تر همراه با کاهش جذب روغن مطرح شود. روش سرخ کردن تحت خلأ و مایکروویو تحت خلأ نیز مزایای مشابهی دارند؛ این روش‌ها به دلیل استفاده از دماهای پایین‌تر و کاهش جذب روغن، ترکیبات حساس به حرارت را حفظ کرده و ویژگی‌های بافتی مانند رنگ و بافت محصول را بهبود می‌بخشند [۳۸]. علاوه بر این، سرخ کردن مایکروویو تحت خلأ می‌تواند ضمن کاهش زمان فرآیند و کاهش جذب روغن محصول، کیفیت حسی مطلوبی ایجاد کند که آن را به جایگزینی جذاب برای سرخ کردن عمیق تبدیل می‌کند [۳۵]. با وجود این مزایا، داده‌های مربوط به ارزیابی حسی و پذیرش مصرف‌کننده هنوز محدود بوده و نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد. در مطالعات اخیر گزارش شده‌است که روش‌های نوین سرخ-کردن، اگرچه در کاهش جذب روغن عملکرد خوبی دارند، اما همچنان با چالش‌هایی در ارزیابی حسی محصول سرخ-شده مواجه هستند. کاهش تردی، تغییر در طعم و عدم یکنواختی تغییرات رنگ محصول از جمله محدودیت‌های رایج در روش‌های نوین هستند که ناشی از تفاوت در مکانیسم انتقال حرارت و جرم نسبت به سرخ کردن عمیق است [۵۵]. روش‌های هیبریدی با بهبود فرآیند انتقال حرارت و جرم و تسریع تشکیل پوسته سطحی، پتانسیل بالایی جهت رفع این محدودیت‌ها و بهبود پذیرش حسی محصول نشان داده‌اند. با این وجود، یافته‌های پژوهشی نشان می‌دهند که موفقیت روش‌های نوین سرخ کردن از دیدگاه حسی، وابسته به بهینه‌سازی دقیق پارامترهای فرآیندی و تلفیق ارزیابی‌های حسی با تحلیل‌های فیزیکوشیمیایی است. توسعه روش‌های هیبریدی همراه با تمرکز هم‌زمان بر سلامت محوری و حفظ کیفیت حسی محصول، می‌تواند نقش مهمی در افزایش

با این وجود، تولید محصولات سرخ‌شده با مقدار روغن پایین و در عین حال کیفیت تغذیه‌ای و ارگانولپتیکی بالا، همچنان یک چالش اساسی در فرآیند سرخ‌کردن محسوب می‌شود و در آینده لازم است که انواع مختلف فناوری‌های نوین سرخ‌کردن بیشتر بهینه‌سازی شده و مزایا و معایب آنها برای کاربردهای تجاری در مقیاس وسیع مقایسه شوند و با پیشرفت در طراحی تجهیزات و کنترل دقیق فرآیندها، به طور گسترده در صنایع غذایی به کار گرفته شوند. این اقدامات ممکن است به توسعه نسل جدیدی از محصولات سرخ‌شده با کیفیت بالا و سالم‌تر منجر شود که می‌تواند در کاهش روند روبه‌رشد بیماری‌های مزمن مرتبط با رژیم غذایی موثر باشد.

### تضاد منافع

هیچ موردی برای اعلام وجود ندارد.

### بیانیه تامین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خاصی از نهادهای دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

### مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در طراحی، تحلیل، نگارش و تایید نسخه نهایی به این ترتیب مشارکت داشته‌اند. بهاره معروف‌پور: جمع‌آوری مطالب، نگارش متن اولیه مقاله، اصلاح متن مقاله؛ امان محمد ضیائی‌فر: استاد راهنمای پروژه، اصلاح متن مقاله؛ حسن صباغی: ساختار مقاله، اصلاح متن مقاله و نهایی‌سازی مطالب.

### منابع

- [1] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., and Maroulis, Z.B. (2000b). Water Loss and Oil Uptake as a Function of Frying Time, *Journal of Food Engineering*, 44: 39-46.
- [2] Frakolaki, G., Kekes, T., Bizymis, A.-P., Giannou, V., & Tzia, C. (2023). Fundamentals of food frying processes. In *High-temperature processing of food products* (pp. 227–291).
- [3] Bouchon, P. (2009). Understanding oil absorption during deep-fat frying. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 57, pp. 209–234). Academic Press.
- [4] Dehghannya, J., & Ngadi, M. (2021). Recent advances in microstructure characterization of fried foods: Different frying techniques and process modeling. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 786–801.
- [5] Mesias, M., Delgado-Andrade, C., Holgado, F., González-Mulero, L., & Morales, F. J. (2021). Effect of consumer's decisions on acrylamide exposure during the preparation of French fries. Part

ضروری است. ارزیابی حسی محصولات سرخ‌شده مبتنی بر نظر مصرف‌کننده می‌تواند دیدگاه‌های ارزشمندی در مورد عوامل مؤثر بر پذیرش این محصولات ارائه دهد و از آن طریق فرآیند سرخ‌کردن بهینه شده و محصولاتی جذاب‌تر برای مصرف‌کنندگان توسعه یابد.

### نتیجه‌گیری

در این مرور، چندین روش جایگزین سالم و کارآمد برای سرخ‌کردن عمیق نظیر سرخ‌کردن هوای داغ، سرخ‌کردن با مایکروویو، سرخ‌کردن تحت خلأ و روش‌های هیبریدی سرخ‌کردن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این روش‌های نوین سرخ‌کردن توانسته‌اند نیاز صنایع غذایی به کاهش جذب روغن، افزایش سلامت و حفظ ویژگی‌های حسی را تا حد زیادی برآورده سازند. با این حال، پژوهش‌های مربوط به سرخ‌کردن هوای داغ در مواد غذایی هنوز محدود است. در نتیجه، انجام پژوهش‌هایی بر روی مواد غذایی مختلف توصیه می‌شود. در مورد سرخ‌کردن با مایکروویو، مشکل عدم یکنواختی حرارت و ایجاد نقاط داغ که باعث کاهش کیفیت حسی و پذیرش مصرف‌کننده می‌شود، با ترکیب فناوری مایکروویو و سرخ‌کردن تحت خلأ برطرف می‌گردد و حرارت‌دهی یکنواخت و سریع‌تری فراهم می‌کند. همچنین، پتانسیل سرخ‌کردن تحت خلأ نیز می‌تواند از طریق ترکیب با سایر فناوری‌ها بیشتر شود و هم در تولیدات کوچک و هم در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. در واقع، فناوری‌های ترکیبی، چشم‌انداز گسترده‌ای برای آینده صنایع غذایی دارند و می‌توانند کارایی روش‌های جایگزین سرخ‌کردن عمیق را افزایش دهند.

- 1: Frying conditions. *Food and Chemical Toxicology*, 147, 111857.
- [6] Amany, M. M. B., & Hala, H. A. O. (2016). Effect of a novel technology (air and vacuum frying) on sensory evaluation and acrylamide generation in fried potato chips. *Banat's Journal of Biotechnology*, 7(14), 101.
- [7] Garayo, J., and Moreira, R. (2002). Vacuum frying of potatoes chips. *Journal of Food Engineering*, 55: 181-191.
- [8] Cai, L., Wang, Z., Ji, A., Meyer, J. M., & van der Westhuyzen, D. R. (2012). Scavenger receptor CD36 expression contributes to adipose tissue inflammation and cell death in diet-induced obesity. *PLoS one*, 7(5), e36785.
- [9] Cahill, L. E., Pan, A., Chiuvè, S. E., Sun, Q., Willett, W. C., Hu, F. B., & Rimm, E. B. (2014). Fried-food consumption and risk of type 2 diabetes and coronary artery disease: a prospective study in 2 cohorts of US women and men. *The American journal of clinical nutrition*, 100(2), 667-675.
- [10] Saguy, I.S., and Dana, D. (2003). Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects, *Journal of Food Engineering*, 56: 143-152.
- [11] Valle, C., Echeverría, F., Chávez, V., Valenzuela, R., & Bustamante, A. (2024). Deep-frying impact on food and oil chemical composition: Strategies to reduce oil absorption in the final product. *Food Safety and Health*, 2(4), 414-428.
- [12] Yu, K., Cho, H., & Hwang, K. (2018). Physicochemical properties and oxidative stability of frying oils during repeated frying of potato chips. *Food Science and Biotechnology*, 27(3), 651-659.
- [13] Millin, T. M., Medina-Meza, I. G., Walters, B. C., Huber, K. C., Rasco, B. A., & Ganjyal, G. M. (2016). Frying oil temperature: Impact on physical and structural properties of French fries during the par and finish frying processes. *Food and Bioprocess Technology*, 9(12), 2080-2091.
- [14] Ziaifar, A. M., Achir, N., Courtois, F., Trezzani, I., & Trystram, G. (2008). Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(8), 1410-1423.
- [15] Alam, T., & Takhar, P. (2016). Microstructural characterization of fried potato disks using X-ray micro computed tomography. *Journal of Food Science*, 81(3).
- [16] Devi, S., Zhang, M., Ju, R., & Bhandari, B. (2021). Recent development of innovative methods for efficient frying technology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(22), 1-16.
- [17] Sabbaghi, Ziaifar, Amanmohammad, Sadeghi Mahoonak, Kashaninejad, & Mirzaei. (2015). Evaluation of mathematical models in describing the effect of temperature on oil absorption during the frying process. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 46(2), 135-145.
- [18] Mahmud, N., Islam, J., Oyom, W., Adrah, K., Adegoke, S., & Tahergorabi, R. (2023). A review of different frying oils and oleogels as alternative frying media for fat-uptake reduction in deep-fat fried foods. *Heliyon*, 9(11), e21500.
- [19] Wiege, B., Fehling, E., Matthäus, B., & Schmidt, M. (2020). Changes in physical and chemical properties of thermally and oxidatively degraded sunflower oil and palm fat. *Foods*, 9(9), 1273.
- [20] Ziaifar, A. M., Courtois, F., & Trystram, G. (2010). Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering*, 33(2), 191-212.
- [21] Khalilijan, S., Ziaifar, A. M., Asghari, A., & Mohebi, M. (2017). Effect of cooking pretreatment on frying process of eggplant and evaluation of kinetic of oil absorption and moisture changes of eggplant during deep fat frying and cooling period. *Journal of food science and technology (Iran)*, 14(62), 154-147.
- [22] Taghavi, N., Ziaifar, A. M., Mirzaee, H., Sadeghi Mahoonak, A., Ghorbani, M. and Sabbaghi, H. (2018). Investigation on effect of coating on the oil uptake during deep fat frying process of traditional sweet Pishmeh. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 14(4), 561-571.
- [23] Sabbaghi, H., Ziaifar, A. M. and Kashaninejad, M. (2017). Analysis of heat and mass transfer during frying process of potato strips. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 13(2), 379-392.
- [24] Zaghi, A. N., Barbalho, S. M., Guiguer, E. L., & Otoboni, A. M. (2019). Frying Process: From Conventional to Air Frying Technology. *Food Reviews International*, 35(8), 763-777.
- [25] Zhang, Q., Saleh, A. S., & Shen, Q. (2016). Monitoring of changes in composition of soybean oil during deep-fat frying with different food types. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 93(1), 69-81.
- [26] Yaghmur, A., Aserin, A., Mizrahi, Y., Nerd, A., & Garti, N. (2001). Evaluation of argan oil for deep-fat frying. *LWT – Food Science and Technology*, 34(3), 124-130.
- [27] Dourado, C., Pinto, C. A., Cunha, S. C., Casal, S., & Saraiva, J. A. (2020). A novel strategy of acrylamide mitigation in fried potatoes using asparaginase and high pressure technology. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102310.
- [28] Pedreschi, F., Kaack, K., & Granby, K. (2004). Reduction of acrylamide formation in potato slices during frying. *LWT – Food Science and Technology*, 37(6), 679-685.
- [29] Ngobese, N. Z., Workneh, T. S., & Siwela, M. (2017). Effect of low-temperature long-time and high-temperature short-time blanching and frying

- treatments on the French fry quality of six Irish potato cultivars. *Journal of food science and technology*, 54(2), 507-517.
- [30] Fan, L., Zhang, M., and Mujumdar, A.S. (2005a). Vacuum frying of carrots chips. *Drying Technology*, 23: 645-656.
- [31] Da Silva, P. F., & Moreira, R. G. (2008). Vacuum frying of high-quality fruit and vegetable-based snacks. *LWT-Food Science and Technology*, 41(10), 1758-1767.
- [32] Sabbaghi, H. (2021). Application of hydrocolloid compounds (xanthan and carboxymethylcellulose) in doughnut formulation for reducing oil uptake. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 17(5), 919-940.
- [33] Hosseini, H., Ghorbani, M., Meshginfar, N., & Mahoonak, A. (2016). A review on frying: Procedure, fat, deterioration progress and health hazards. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 93(4), 445-466.
- [34] Teruel, M. D. R., Gordon, M., Linares, M. B., Garrido, M. D., Ahromrit, A., & Niranjana, K. (2015). A comparative study of the characteristics of french fries produced by deep fat frying and air frying. *Journal of Food Science*, 80(2), E349-E358.
- [35] Giovanelli, G., Torri, L., Sinelli, N., & Buratti, S. (2017). Comparative study of physico-chemical and sensory characteristics of French fries prepared from frozen potatoes using different cooking systems. *European Food Research and Technology*, 243(9), 1619-1631.
- [36] Maroufipour, B., Ziaifar, A. M., Ghorbani, M., Sabbaghi, H., & Yalghi, S. (2025a). Hot Air Frying as a Healthier Alternative to Deep Fat Frying for Shrimp: Comparative Analysis of Physicochemical and Sensory Properties. *Applied Food Research*, 101425.
- [37] Fang, M., Huang, G. J., & Sung, W. C. (2021). Mass transfer and texture characteristics of fish skin during deep-fat frying, electrostatic frying, air frying and vacuum frying. *Lwt*, 137, 110494.
- [38] Patra, A., Prasath, V. A., Sutar, P. P., Pandian, N. K. S., & Pandiselvam, R. (2022). Evaluation of effect of vacuum frying on textural properties of food products. *Food Research International*, 162, 112074.
- [39] Su, Y., Zhang, M., Zhang, W., Adhikari, B., & Yang, Z. (2016). Application of novel microwave-assisted vacuum frying to reduce the oil uptake and improve the quality of potato chips. *LWT - Food Science and Technology*, 73, 490-497.
- [40] Parikh, A., & Takhar, P. S. (2016). Comparison of microwave and conventional frying on quality attributes and fat content of potatoes. *Journal of Food Science*, 81(10), E2743-E2755.
- [41] Nelson, L. V., Keener, K. M., Kaczay, K. R., Banerjee, P., Jensen, J. L., & Liceaga, A. (2013). Comparison of the Fry Less 100 K radiant fryer to oil immersion frying. *LWT – Food Science and Technology*, 53(1), 473-479.
- [42] Sabbaghi, H., & Nguyen, N. P. (2025). Infrared drying in food technology: Principles and practical insights. In *Drying technologies in Food*. IntechOpen.
- [43] Andrés, A., Arguelles, Á., Castelló, M. L., & Heredia, A. (2013). Mass transfer and volume changes in French fries during air frying. *Food and Bioprocess Technology*, 6(8), 1917-1924.
- [44] Grant, W. (2019, November 23). 4 of the best air fryers under \$100—Get the best for your money! Afresherhome. Retrieved November 23, 2019, from <https://afresherhome.com/best-air-fryers-under-100-affordable/>
- [45] Santos, C. S., Cunha, S. C., & Casal, S. (2017). Deep or air frying? A comparative study with different vegetable oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(6), 1600375.
- [46] Heredia, A., Castelló, M. L., Argüelles, A., & Andrés, A. (2014). Evolution of mechanical and optical properties of French fries obtained by hot air-frying. *LWT-Food Science and Technology*, 57(2), 755-760.
- [47] Sansano, M., Juan-Borrás, M., Escriche, I., Andrés, A., & Heredia, A. (2015). Effect of pretreatments and air-frying, a novel technology, on acrylamide generation in fried potatoes. *Journal of food science*, 80(5), T1120-T1128.
- [48] Farber, J. M. (1991). Microbiological aspects of modified-atmosphere packaging technology—A review. *Journal of Food Protection*, 54(1), 58-70.
- [49] Keramat, J., LeBail, A., Prost, C., & Soltanizadeh, N. (2011). Acrylamide in foods: Chemistry and analysis. A review. *Food and Bioprocess Technology*, 4(2), 340-363.
- [50] Tian, J., Chen, S., Shi, J., Chen, J., Liu, D., Cai, Y., ... & Ye, X. (2017). Microstructure and digestibility of potato strips produced by conventional frying and air-frying: An in vitro study. *Food structure*, 14, 30-35.
- [51] Yu, X., Li, L., Xue, J., Wang, J., Song, G., Zhang, Y., & Shen, Q. (2020). Effect of air-frying conditions on the quality attributes and lipidomic characteristics of surimi during processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102305.
- [52] Sabbaghi, H., Ziaifar, A. M., Sadeghi, A. R., Kashaninejad, M., and Mirzaei, H. (2017). Kinetic modeling of color changes in french fries during frying process. *Journal of Food Technology and Nutrition*, 14(1), 65-76.
- [53] Abd Rahman, N. A., Abdul Razak, S. Z., Lokmanalhakim, L. A., Taip, F. S., & Mustapa Kamal, S. M. (2017). Response surface optimization for hot air-frying technique and its effects on the quality of sweet potato snack. *Journal of Food Process Engineering*, 40(4), e12507.

- [54] Maroufpour, B., Ziaifar, A. M., Ghorbani, M., Sabbaghi, H., & Yalghi, S. (2025b). Analysis of heat and mass transfer during hot air frying and deep frying of shrimp. *Journal of Food Science & Technology* (2008-8787), 22(161).
- [55] Rani, L., Kumar, M., Kaushik, D., Kaur, J., Kumar, A., Oz, F., Proestos, C., & Oz, E. (2023). A review on the frying process: Methods, models and their mechanism and application in the food industry. *Food Research International*, 172, 113176.
- [56] Azam, S. M. R., Zhang, M., Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (2018). Effects of drying methods on quality attributes of peach (*Prunus persica*) leather. *Drying Technology*, 37(3), 341–351.
- [57] Sun, J., Wang, W., & Yue, Q. (2016). Review on microwave-matter interaction fundamentals and efficient microwave-associated heating strategies. *Materials*, 9(3), 231.
- [58] Al Faruq, A., Zhang, M., & Fan, D. (2018). Modeling the dehydration and analysis of dielectric properties of ultrasound and microwave combined vacuum frying apple slices. *Drying Technology*, 37(4), 409–423.
- [59] Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A., & Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), 524–534.
- [60] Mohebbi, M., & Hasanpour, N. (2014). Evaluation of microwave pretreatment and frying temperature on physicochemical properties of deep fat fried zucchini. *Journal of Food Science & Technology* (2008-8787), 12(47).
- [61] Motamedzadegan, A., & Mirarab Razi, S. (2021). The effect of basil gum and crees seed gum coating on oil uptake and qualitative characteristics of fried carrot. *Journal of Food Researches*, 31(3).
- [62] Karazhian, H., & Daliri, N. (2016). Effect of microwave pretreatment on mass transfer kinetics of eggplant (*Solanum melongena* L.) during deep frying process [In Persian]. *Journal of Innovation in Food Science and Technology*, 103–111.
- [63] Dehghannya, J., Gorbani, R., & Ghanbarzadeh, B. (2015). Shrinkage of Mirabelle plum during hot air drying as influenced by ultrasound-assisted osmotic dehydration. *International Journal of Food Properties*, 19(5), 1093–1103.
- [64] Sansano, M., De los Reyes, R., Andrés, A., & Heredia, A. (2018). Effect of microwave frying on acrylamide generation, mass transfer, color, and texture in french fries. *Food and Bioprocess Technology*, 11(10), 1934–1939.
- [65] Yang, C. S. (1989). *Vacuum frying and oil separating device* (U.S. Patent No. 4,873,920). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.Chicago.
- [66] Pandey, A. K., Ravi, N., & Chauhan, O. P. (2020). Quality attributes of vacuum fried fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(4), 1543–1556.
- [67] Yagua, C. V., & Rosana, G. M. (2011). Physical and thermal properties of potato chips during vacuum frying. *Journal of Food Engineering*, 104(2), 272–283.
- [68] Dueik, V., Robert, P., & Bouchon, P. (2010). Vacuum frying reduces oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps. *Food Chemistry*, 119(3), 1143–1149.
- [69] Belkova, B., Hradecký, J., Hurkova, K., Forstova, V., Vaclavik, L., & Hajslova, J. (2018). Impact of vacuum frying on quality of potato crisps and frying oil. *Food Chemistry*, 241, 51–59.
- [70] Mariotti-Celis, M. S., Cortés, P., Dueik, V., Bouchon, P., & Pedreschi, F. (2017). Application of vacuum frying as a furan and acrylamide mitigation technology in potato chips. *Food and Bioprocess Technology*, 10(11), 2092–2099.
- [71] Ayustaningwarno, F., Fogliano, V., Verkerk, R., & Dekker, M. (2021). Surface color distribution analysis by computer vision compared to sensory testing: Vacuum fried fruits as a case study. *Food Research International*, 143, 110230.
- [72] Mir-Bel, J., Oria, R., Salvador, M. L., & Solano, M. L. S. (2012). Influence of temperature on heat transfer coefficient during moderate vacuum deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, 113(2), 167–176.
- [73] Bedoya, M. G., Rodriguez, M. C., & Cotes Torres, J. M. (2018). Influence of vacuum deep fat frying process on quality of potato variety Primavera snacks: A functional food with antioxidant properties. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(51), 2537–2549.
- [74] Yamsaengsung, R., & Rungsee, S. (2003). Vacuum frying of fruits and vegetables. Manuscript e #1-2003. Hat Yai, Songkhla 90112: Department of Chemical Engineering, Prince of Songkla University.
- [75] Akinpelu, O. R., Idowu, M. A., Sobukola, O. P., Henshaw, F., Sanni, S. A., Bodunde, G., ... & Munoz, L. (2014). Optimization of processing conditions for vacuum frying of high quality fried plantain chips using response surface methodology (RSM). *Food Science and Biotechnology*, 23(4), 1121–1128.
- [76] Sumnu, G., & Sahin, S. (2005). Recent developments in microwave heating. *Emerging technologies for food processing*, 419–444.
- [77] Su, Y., Zhang, M., Zhang, W., Liu, C., & Bhandari, B. (2017). Low oil content potato chips produced by infrared vacuum pre-drying and microwave-assisted vacuum frying. *Drying Technology*, 36(3), 294–306.
- [78] Yildiz, A. Y., Echeagaray, N., Öztekin, S., & Lorenzo, J. M. (2024). Quality and stability of frying oils and fried foods in ultrasound and microwave-assisted frying processes and hybrid

- technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(4), e13405.
- [79] Su, Y., Zhang, M., & Zhang, W. (2015). Effect of low temperature on the microwave-assisted vacuum frying of potato chips. *Drying Technology*, 34(2), 227–234.
- [80] Quan, X., Zhang, M., Zhang, W., & Adhikari, B. (2014). Effect of microwave-assisted vacuum frying on the quality of potato chips. *Drying Technology*, 32(16), 1812–1819.
- [81] Devi, S., Zhang, M., & Law, C. L. (2018). Effect of ultrasound and microwave assisted vacuum frying on mushroom (*Agaricus bisporus*) chips quality. *Food Bioscience*, 25, 111–117.
- [82] Pankaj, S. K., & Keener, K. M. (2017). A review and research trends in alternate frying technologies. *Current Opinion in Food Science*, 16, 74–79.
- [83] Riadh, M. H., Ahmad, S. A., Marhaban, M. H., & Soh, A. C. (2015). Infrared heating in food drying: An overview. *Drying Technology*, 33(3), 322–335.
- [84] Anumudu, C. K., Onyeaka, H., Ekwueme, C. T., Hart, A., Isaac-Bamgboye, F., & Miri, T. (2024). Advances in the application of infrared in food processing for improved food quality and microbial inactivation. *Foods*, 13(24), 4001.
- [85] Radhi, S. S., Al-Khafaji, Z. S., & Falah, M. W. (2022). Sustainable heating system by infrared radiators. *Heritage and Sustainable Development*, 4(1), 42–52.
- [86] Nowacka, M., Matys, A., & Witrowa-Rajchert, D. (2024). Innovative technologies for improving the sustainability of the food drying industry. *Current Food Science and Technology Reports*, 2(2), 1–9.
- [87] Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R., & Sharma, S. C. (2020). Infrared drying of food materials: Recent advances. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 381–398.
- [88] Da Silva Ferreira, M. V., Ahmed, M. W., Oliveira, M., Sarang, S., Ramsay, S., Liu, X., et al. (2024). AI-enabled optical sensing for smart and precision food drying: Techniques, applications and future directions. *Food Engineering Reviews*, 1–29.
- [89] Wang, Q., Li, S., Han, X., Ni, Y., Zhao, D., & Hao, J. (2019). Quality evaluation and drying kinetics of shiitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave-assisted drying methods. *LWT - Food Science and Technology*, 107, 236–242.
- [90] Wang, J., & Sheng, K. (2006). Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT - Food Science and Technology*, 39(3), 247–255.
- [91] Parikh, D. M. (2015). Vacuum drying: Basics and application. *Chemical Engineering*, 122(4), 48–54.
- [92] Salehi, F., & Kashaninejad, M. (2018). Thin layer drying of tomato slices using a combined infrared-vacuum dryer. *Food Science and Technology (Iran)*, 15(82), 119–127.
- [93] Tagalpallewar, G., Shrigod, N., & Sardar, N. (2015). Vacuum frying technology-new technique for healthy fried foods. In *Abstracts, National Seminar on Indian Dairy Industry-Opportunities and Challenges* (pp. 5-6).



Scientific Research

**Applications of Novel Frying Technologies in Food Processing: Advantages, Limitations, and Industrial Challenges**

Bahareh Maroufipour<sup>1</sup>, Aman Mohammad Ziaiiifar<sup>2\*</sup>, Hassan Sabbaghi<sup>3</sup>, Mohammad Ghorbani<sup>4</sup>, Saeed Yalghi<sup>5</sup>

1-Ph.D. Graduate in food industry science and engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2 -Professor, Department of Food Industry Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3-Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture and Animal Science, University of Torbat-e Jam, Razavi Khorasan Province, Iran

4 -Professor, Department of Food Chemistry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

5- Assistant Professor of Fisheries Department, Golestan Province Fisheries Research Center, Gorgan, Iran

**ARTICLE INFO**

**ABSTRACT**

**Article History:**

Received: 2025/09/21

Review: 2026/01/26

Accepted: 2026/01/31

**Keywords:**

Frying;  
Novel processing methods;  
Oil absorption;  
Nutritional quality;  
Industrial scalability.

**DOI: 10.48311/fsct.2026.115543.1000**

\*Corresponding Author E-

ziaiiifar@gau.ac.ir

Frying is one of the most widely used food processing methods employed by consumers, restaurants, and the food industry worldwide to produce products with distinctive sensory characteristics. The most common approach is deep frying, which, despite its high popularity, is associated with high oil absorption and the formation of carcinogenic compounds such as acrylamide. Regular consumption of deep-fried foods may increase the risk of cardiovascular diseases, diabetes, hypertension, cancer, and obesity. In recent years, novel processing methods including hot air frying, vacuum frying, microwave frying, and hybrid technologies have been developed. These approaches have been introduced as healthier alternatives to deep frying and are capable of reducing oil uptake while maintaining desirable sensory properties. Moreover, they contribute to improving the nutritional quality and overall health attributes of fried products. Consequently, the production of a new generation of healthier fried foods has become feasible. In this review, the operating mechanisms, advantages, and limitations of these novel frying methods in the food industry are discussed. Finally, a comparative framework based on energy consumption, product quality, consumer acceptance, and industrial scalability is presented to identify existing research gaps and provide new insights into food frying technologies.