Ministry of Science, Research and Technology
Institute for Color Science & Technology

Available online @ www.jscw.icrc.ac.ir
Journal of Studies on Color World, 13, 4(2023), 407-420
Article type: Review article
Open access

مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

A Review of the Performance and Applications of Electric Pulse in the Extraction of Natural Dye

Mahdieh Ghamary*[1, 2], Zahra Salehi[1]
1- Department of Food Industry, Basir Institute of Higher Education, P. O. Code: 3441356611, Abyek, Qazvin, Iran.
2- Agricultural mechanisation and industrial development center, Ministry of Agriculture-Jahad, P. O. Code: 1593416111, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

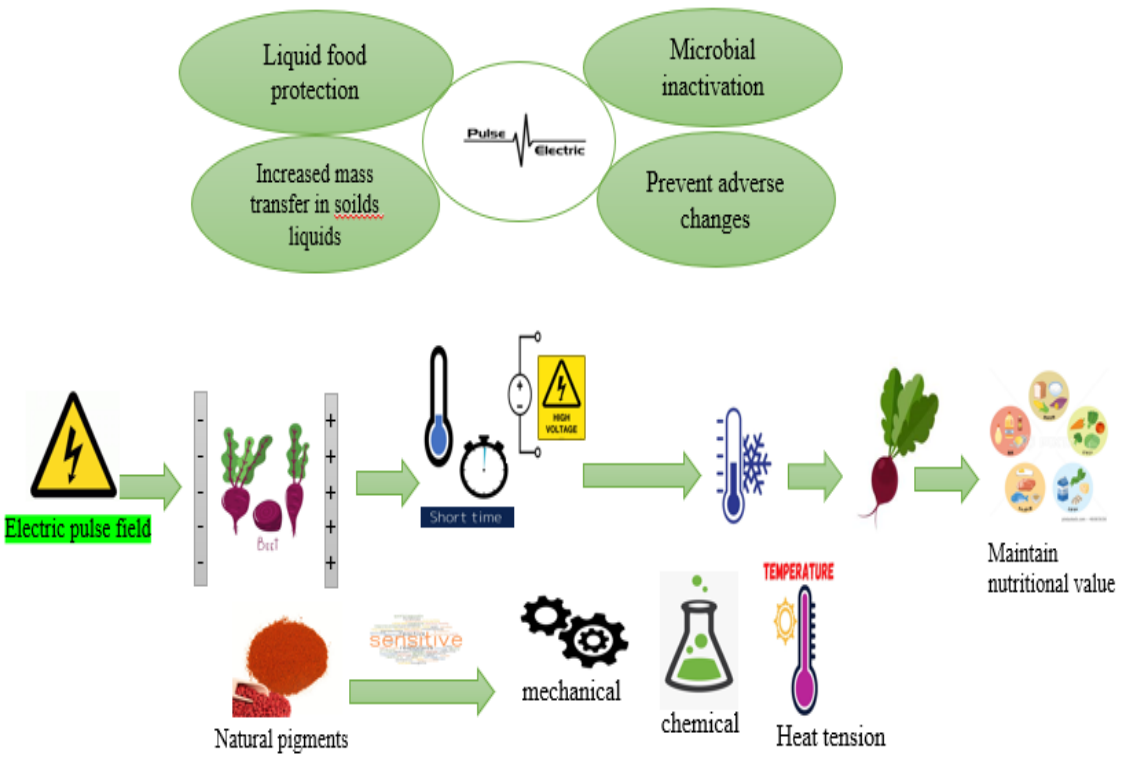
Article history:
Received: 14- 08- 2023
Accepted: 21- 10-2023
Available online: 30-12-2023
Print ISSN: 2251-7278
Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.4.2

Keywords:
Electric pulse
Extraction
Natural dye
Food industry

ABSTRACT

In recent years, the demand for good quality natural products and minimally processed products with high nutritional value has increased. One of the most important natural materials in demand is natural edible dye. Pulsed electric fields in food processing focus on two main areas: microbial inactivation and preservation of liquid foods and enhancing mass and tissue transfer in solids and liquids. The pulse process uses pulsed electric fields with high voltage, which are used quickly for the food between two electrodes. Due to the short duration of the pulses, a little heat is generated in the foodstuff. Thus, the nutrients, vitamins, texture and flavour, as well as the microstructure of the foodstuff, are better preserved than the samples that are subjected to the thermal process. Natural dyes are very sensitive to the processes applied in conventional extraction techniques, such as thermal, mechanical and chemical stresses. Pulsed electric field (PEF) technology is promising as a non-thermal alternative.



Corresponding author: **m.ghamari@basir-abyek.ac.ir**

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

نشریه علمی
مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه رنگ

دسترسی آنلاین: www.jscw.icrc.ac.ir
نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ/ ۱۳، (۱۴۰۲) ۴، ۴۲۰-۴۰۷
نوع مقاله: مروری
دسترسی آزاد

مروری برعملکرد وکاربردهای پالس الکتریکی در استخراج مواد رنگزای طبیعی

مهدیه قمری*[۱و۲]، زهرا صالحی[۳]

۱- استادیار، گروه صنایع غذایی، موسسه آموزش عالی بصیر، آبیک، قزوین، ایران، کدپستی: ۳۴۴۱۳۵۶۶۱۱.
۲- مرکز مکانیزاسیون و صنایع، وزارت جهادکشاورزی، تهران، ایران، کدپستی: ۱۵۹۳۴۱۶۱۱۱.
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی بصیر، آبیک، قزوین، ایران، کدپستی: ۳۱۴۶۷۱۳۵۵۵.

اطلاعات مقاله

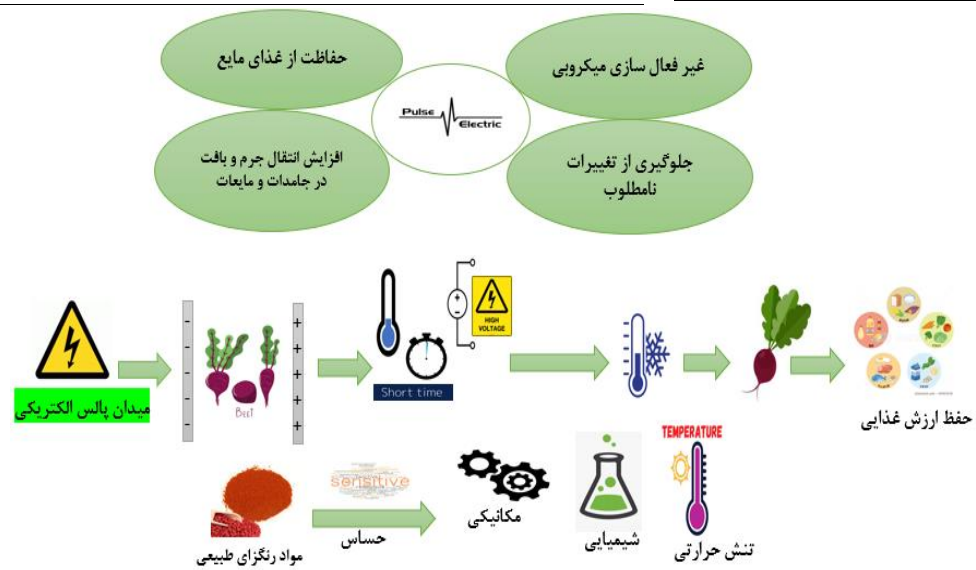
تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹
در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰
شاپا چاپی: ۷۲۷۸-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۲۲۲۳-۲۳۸۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.4.4.2

واژه‌های کلیدی:
پالس الکتریکی
استخراج
مواد رنگزای طبیعی
صنایع غذایی

چکیده

در سال‌های اخیر تقاضا برای محصولات غذایی طبیعی با کیفیت مناسب و محصولات غذایی با حداقل فرآوری و با ارزش تغذیه‌ای بالا افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین مواد طبیعی مورد تقاضا، مواد رنگزای خوراکی طبیعی می‌باشند. میدان‌های الکتریکی پالسی یک فناوری نگهداری غیرحرارتی می‌باشد که در پردازش مواد غذایی در دو حوزه‌ی اصلی یعنی غیرفعال سازی میکروبی و حفاظت از مواد غذایی مایع، و همچنین افزایش انتقال جرم و بافت در جامدات و مایعات متمرکز است و به دلیل جلوگیری از تغییرات نامطلوب مورد توجه قرار گرفته است. فرآیند پالس الکتریکی روشی است که در آن از میدان‌های الکتریکی پالس‌دار با ولتاژ بالا در زمان کوتاه برای مواد غذایی که بین دو الکترود قرار گرفته است، استفاده می‌شود. به دلیل کوتاه بودن زمان پالس‌ها، گرمای کمی در ماده غذایی ایجاد می‌شود و بدین ترتیب در مواد غذایی که تحت فرآیند پالس الکتریک قرار گرفته‌اند، مواد مغذی، ویتامین‌ها، بافت و عطر و طعم و نیز میکروساختار ماده غذایی نسبت به نمونه‌هایی که فرآیند حرارتی به آنها اعمال می‌شود بهتر حفظ می‌گردد. مواد رنگزای طبیعی به فرآیندهای اعمال شده در روش‌های استخراج مرسوم مانند تنش‌های حرارتی، مکانیکی و شیمیایی بسیار حساس هستند. در این راستا، فناوری میدان الکتریکی پالسی(PEF) به عنوان یک جایگزین غیرحرارتی می‌توان امیدوار بود.



Corresponding author: **m.ghamari@basir-abyek.ac.ir**

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

نیازهای مصرف‌کننده برای غذا به طور مداوم در حال تغییر است و امروزه مصرف‌کنندگان خواستار غذاهایی تازه و طبیعی هستند. مراحل استفاده شده در فرآوری مواد غذایی باید برای حفظ کیفیت طبیعی آن‌ها طراحی شود. پردازش حرارتی نه تنها باعث از بین رفتن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و عوامل فساد می‌شود بلکه سبب کاهش طعم، مواد رنگزا و کیفیت غذا می‌شود. روش‌های پاستوریزه‌کردن سرد برای از بین بردن میکروارگانیسم‌ها و حفظ کیفیت بدون اعمال گرما ایجاد شده‌اند(۱). یکی از روش‌های غیرحرارتی نگهداری مواد غذایی، استفاده از میدان‌های الکتریکی پالسی (PEF)[1] می‌باشد که از آن در غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها به گونه‌ای که کمترین آسیب بر خواص کیفی مواد غذایی ایجاد گردد استفاده می‌نمایند. افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای دستیابی به محصولات با کیفیت بالاتر و با حداقل اتلاف مواد مغذی نسبت به روش‌های مرسوم حرارتی استفاده از روش‌های غیرحرارتی از جمله استفاده از میدان‌های الکتریکی پالسی را افزایش داده است (۲). پالس الکتریکی یکی از روش‌های غیرحرارتی نگهداری مواد غذایی مایع به خصوص در شیر و نوشیدنی‌های میوه‌ای می‌باشد و مانند حرارت‌دهی اهمیک بر مبنای قرار گرفتن ماده غذایی در میدان الکتریکی عمل می‌کند. برخلاف حرارت‌دهی اهمیک، فرآیند پالس الکتریکی بر مبنای حرارت‌دهی مواد توسط جریان الکتریکی نیست، در این روش از میدان الکتریکی با ولتاژ بالا ۵۰-۱۵۰ kv/cm و پالس‌های کوتاه و مقیاس زمانی بین میکروثانیه و میلی‌ثانیه جهت سالم‌سازی استفاده می‌شود. با استفاده از این روش ماده غذایی در زمانی کوتاه با صرف انرژی کم، فرآوری می‌شود. این ولتاژ بالا سبب ایجاد میدان الکتریکی می‌شود و از این طریق بر میکروارگانیسم‌ها اثر می‌گذارد. به دلیل کوتاه بودن زمان پالس‌ها، گرمای کمی در ماده غذایی ایجاد می‌شود و بدین ترتیب در مواد غذایی که تحت فرآیند پالس الکتریکی قرار گرفته‌اند، مواد مغذی، ویتامین‌ها، بافت و عطر، نسبت به نمونه‌هایی که فرآیند حرارتی به آنها اعمال می‌شود، بهتر حفظ شده و نیز میکروساختار ماده غذایی بهتر حفظ می‌شود. بنابراین برای حفظ خصوصیات کیفی ماده غذایی نسبت به روش‌های حرارتی ارجح است (۳). غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها با استفاده از این فرآیند به اوایل ۱۹۲۰ در فرآیند تولید شیر پاستوریزه بر می‌گردد. ظهور فرآیند را می‌توان به مخترع آلمانی نسبت داد که پیشگام در طراحی میدان‌های پالس الکتریکی بوده است. به دلیل اهمیت و کاربرد صنعتی میدان پالس الکتریکی، در این مقاله به بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی استخراج مواد غذایی با استفاده از میدان‌های پالس الکتریکی و حفظ مواد رنگزای طبیعی و ارزش غذایی به جای دیگر فرآیندهای حرارتی مختلف پرداخته شده است.

۲-پالس الکتریکی (PEF)

با استفاده از میدان‌های الکتریکی پالسی به علت افزایش در نفوذپذیری سلول‌ها، میزان بازده استخراج مواد رنگزای افزایش می‌یابد. قابل‌قبول‌ترین نظریه پذیرفته شده درباره نحوه عملکرد روش PEF با مدل الکترومکانیکی معرفی شده توسط زیمرمن[2] و همکارانش در سال ۱۹۷۴ تطابق دارد. این مدل توضیح می‌دهد که غشاء سلول‌ها در حالت عادی همانند خازنی با ثابت دی الکتریک پایین حاوی یون‌های مثبت و منفی است که مجتمع شدن این یون‌ها در دو سمت غشاء به ایجاد اختلاف پتانسیل در حدود ۱۰ mV در سلول منجر می‌شود. در صورت قرار گرفتن این سلول در یک میدان الکتریکی خارجی، یون‌ها در طول میدان الکتریکی حرکت می‌کنند. حرکت یون‌ها باعث افزایش اختلاف پتانسیل شده تا اینکه مقدار آن به یک حد بحرانی برسد که در سلول‌های مختلف متفاوت است. زمانی که اختلاف پتانسیل به حد بحرانی رسید، نیروی جاذبه بین بارهای با قطب‌های مخالف خود سبب غالب شدن نیروهای الکترومکانیکی و آسیب دیدن غشاء الاستیک می‌شود و به این ترتیب منافذی در غشاء به وجود می‌آید که این پدیده را نفوذپذیری الکتریکی یا الکتروپوریزه‌کردن[3] می‌گویند (۴). بسته به شدت میدان الکتریکی اعمال شده می‌تواند به طور دائم یا برگشت پذیر رخ دهد. سلول‌ها پس از برخورد با یک مقدار میدان خاص نمی‌توانند به نیمه نفوذپذیری اولیه خود برگردند. الکتروپوریزه‌کردن می‌تواند اثرات مضری را بر یکپارچگی سلول، مانند همجوشی سلولی، تجمع پروتئین در غشای پلاسمایی، وارد کردن میکرو و ماکرومولکول ها و تخریب ساختار سلولی افزایش دهد. شکل ۱ اثرات PEF را بر ساختار سلول ارائه می دهد (۵).

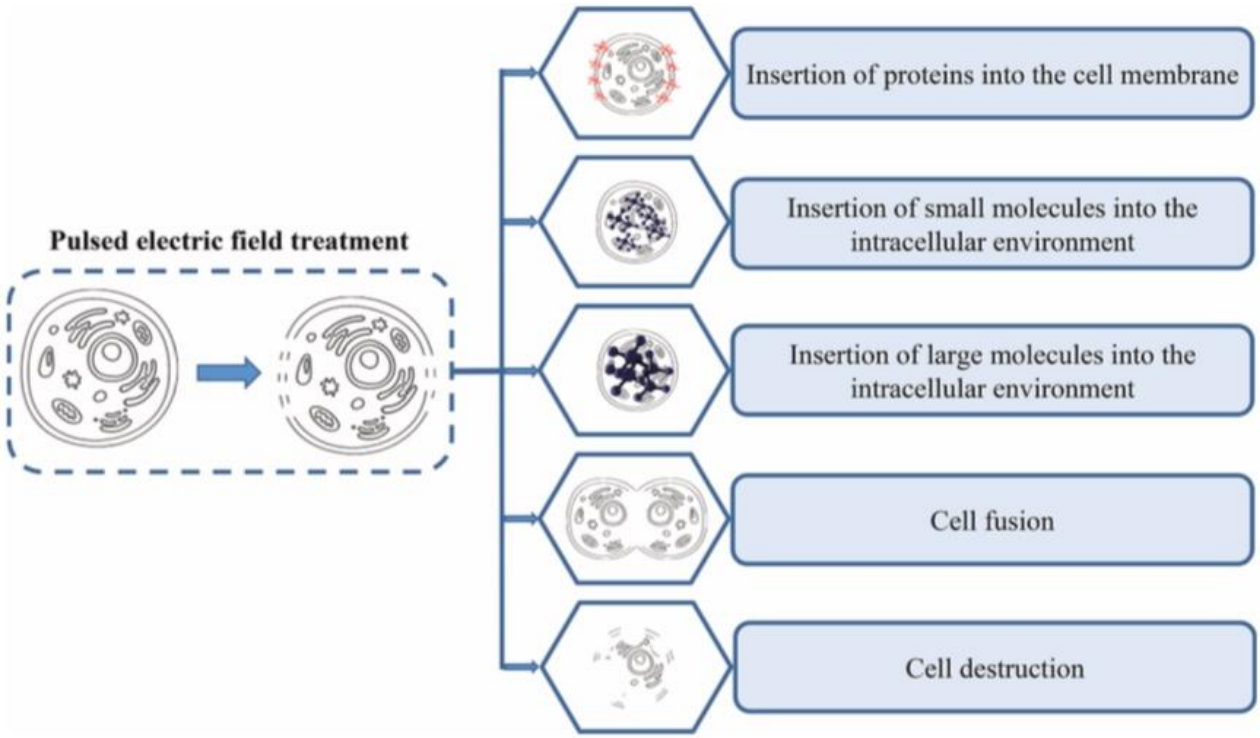
۳-کاربرد پالس الکتریکی جهت استخراج مواد در صنایع غذایی

از این فرآیند می‌توان در غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها در شیر، فراورده‌های شیری، تخم مرغ آب و مواد غذایی دیگر استفاده نمود. استفاده از فناوری میدان‌های الکتریکی پالسی با موفقیت برای پاستوریزاسیون مواد غذایی مانند آب میوه، شیر، ماست، سوپ و تخم مرغ مایع به کار گرفته شده است. کاربرد این فرآیند به محصولات غذایی عاری از حباب هوا و با هدایت الکتریکی کم محدود شده است. حداکثر اندازه ذرات نیز در مایع باید کوچکتر از فاصله منطقه تیمار در محفظه تیمار به منظور حصول اطمینان از تیمار مناسب باشد.

[1] Pulsed Electric Field

[2] Zimmerman

[3] Electroporation



شکل ۱: اثرات میدان الکتریکی پالسی بر ساختار سلول (۵).
Figure1: Effects of pulsed electric field on cell structure (5).

هرچند این رو برای مواد غذایی جامد که قابلیت پمپ‌کردن نیستند مناسب نمی‌باشد. از این فرآیند می‌توان در فرآوری آب میوه‌جات از قبیل عصاره پرتقال و عصاره سیب استفاده کرد (۲). همچنین از این فناوری در استخراج مواد از بافت گیاهی نیز استفاده شده است مانند استخراج ساکاروز، استخراج ترکیبات زیست‌فعال، استخراج روغن و استخراج مواد رنگزا.

۳-۱- استخراج ساکارز از چغندر قند

تولید شکر از چغندر از حدود ۲۵۰ سال قبل شروع شد و به عنوان یک منبع قندی می‌تواند حائز اهمیت باشد. از آنجایی که چغندر قند در بدن ایجاد حرارت و انرژی می‌نماید و جزء معدود موادی است که در طبیعت می‌توان آن را تقریباً بطور خالص تهیه نمود، لذا هرگونه روش جهت بالا بردن میزان استخراج قند از آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. فرآیند حرارتی مرسوم‌ترین روش جهت فرآوری و نگهداری مواد غذایی و نیز استخراج ترکیبات درون سلولی مانند ساکارز از چغندر قند می‌باشند که در طی آن از دماهای بالا جهت تخریب ماکرو مولکول و نیز اختلال در عملکرد غشاء استفاده می‌شود (۶).

اثر میدان الکتریکی پالسی قوی به عنوان روشی غیرحرارتی برای استخراج قند از چغندر قند تحت شرایط مختلف قدرت میدان و تعداد پالس، توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده که بکارگیری روش PEF منجر به بهبود عملیات استخراج قند می‌گردد، بطور مثال با استفاده از این روش دما و زمان استخراج بطور قابل‌توجهی در مقایسه با روش حرارتی کاهش می‌یابد، بدین صورت که برای استخراج۲۳ درصد ساکاروز برای نمونه‌های تیمار شده حرارتی دمای حداقل ۷۰ درجه سانتی گراد و زمان ۱۵ دقیقه نیاز است اما بعد از اینکه از تیمار با PEF با ۱۵۰ پالس در قدرت kV/cm ۷ استفاده شد، بازده مشابه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در طول ۷۵ ثانیه حاصل شد. میزان انرژی مصرفی نیز هنگام تیمار با PEF به طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از روش حرارتی است به‌طوری که برای حصول مقادیر بازده استخراج مشابه میزان انرژی مصرفی در PEFتحت قدرت kV/cm ۷ با ۱۵۰ پالس ۱۳ برابر کمتر از انرژی مصرفی در تیمار حرارتی است. از طرفی ملاحظه شد که میزان انتقال جرم (آزادسازی مولکول‌های قند و یون‌ها) حاصل از هر دو روش تیمار (حرارتی و PEF) به طور معنی‌داری $P \leq ۰/۰۵$ بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. در روش حرارتی نیز به دلیل تخریب نسبتاً کامل بافت سلولی چغندر طی فرآیند استخراج، میزان انتقال جرم مقادیر بالاتری را نشان داد. این نتایج نشان دهنده قابلیت بالای فرآیند PEF نسبت به فرآیندهای معمول و سنتی برای استخراج است و بطور امید بخشی می‌تواند در صنایع با صرفه جویی در مصرف آب، انرژی و زمان تولید، به کار گرفته شود (۶).

۳-۲- استخراج ترکیبات زیست‌فعال

میوه زرشک دارای ترکیبات با ارزشی ازجمله فنل‌های کل، آنتوسیانین‌ها، اسیدسیتریک، ویتامین ث و ترکیبات دیگر می‌باشد. کاربرد روش‌هایی برای استخراج این ترکیبات باارزش که بتوان بیشترین ماده عملگر را با کمترین ناخالصی و حداقل تخریب به دست آورد از اهمیت بسزایی برخوردار است. معمولاً عصاره‌گیری از زرشک با روش‌های معمول به زمان زیاد، درجه حرارت بالا و حجم زیادی از حلال نیاز دارد. عصاره‌گیری حرارتی باعث افت آنتوسیانین‌ها شده و فعالیت‌های ضداکسیدکنندگی عصاره زرشک را کاهش می‌دهد (۷). میدان پالس الکتریکی ضمن اینکه اثر کمی روی ویژگی‌های حسی و ارزش تغذیه‌ای محصولات دارد، به عنوان یک پیش فرآیند باعث افزایش بازدهی استخراج مواد داخل سلولی و افزایش سرعت خشک شدن می‌گردد. از تحقیقات دیگر در زمینه استخراج به کمک میدان الکتریکی پالسی می‌توان به استخراج ترکیبات زیست‌فعال از بافت‌های گیاهی، استخراج ترکیبات فلاونوییدی و ضداکسیدکنندگی از کنجاله‌های دانه کتان، در استخراج کاروتنوئیدهای گوجه فرنگی اشاره نمود(۸).

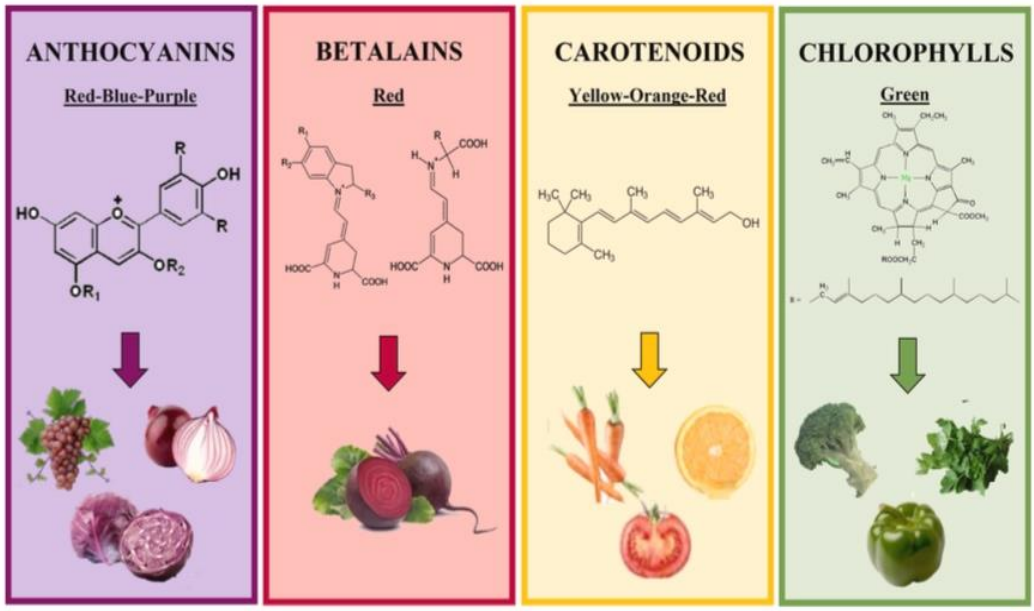
۴- استخراج مواد رنگزای طبیعی

۴-۱- مواد رنگزای خوراکی طبیعی

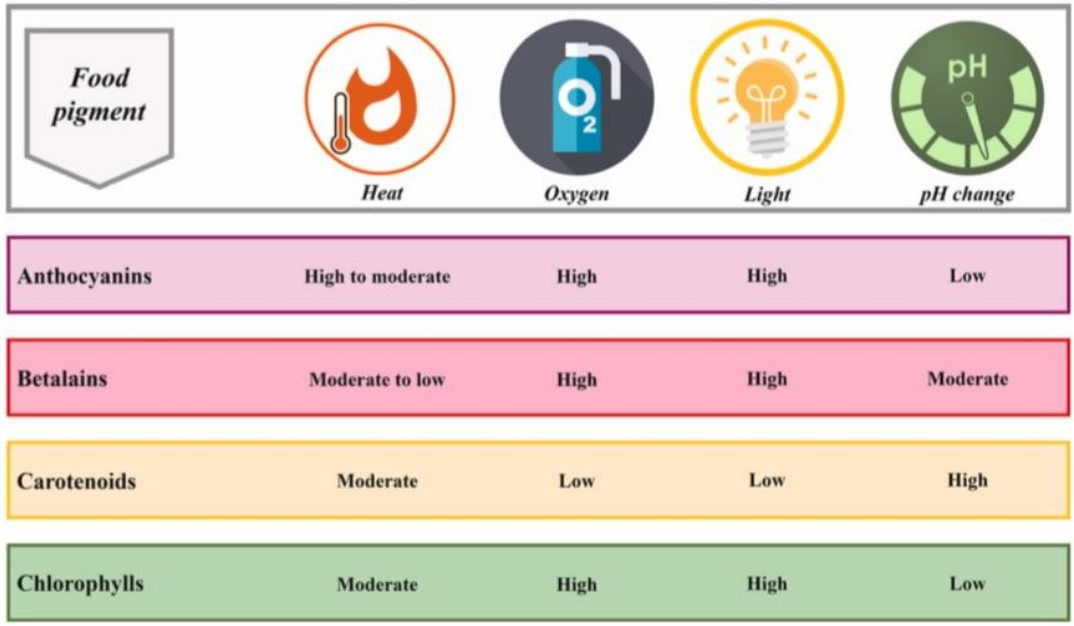
مواد رنگزای خوراکی طبیعی دسته‌ای از افزودنی‌ها را تشکیل می‌دهند که به طور گسترده در صنایع غذایی استفاده می‌شوند. عملکرد آنها با تجمع، ترمیم یا افزایش مواد رنگزای غذاها و نوشیدنی‌ها مرتبط است. بنابراین، آنها به طورگسترده‌ای برای استاندارد کردن مواد رنگزای محصولات غذایی، بهبود ظاهر و پذیرش حسی آنها استفاده می‌شوند. همچنین، افزایش تقاضا برای محصولات طبیعی، مواد رنگزای گیاهی و حیوانی را به عنوان یکی از بازارهای با رشد سریع در سطح جهانی برجسته می‌کند. در نتیجه، رشد بازار مورد انتظار برای این بخش از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴، ۱۱ درصد است (۹). در این راستا، مصرف‌کنندگان جدید از کشورهای مختلف جستجو برای محصولات طبیعی و پایدار را تشدید کرده‌اند که تأثیر مثبتی بر سلامت انسان دارد و از طول عمر و کیفیت زندگی بیشترحمایت می‌کند. علی رغم اثرات مفید مواد رنگزای غذایی طبیعی، استفاده از مواد رنگزای طبیعی در غذاها و نوشیدنی‌ها در مقایسه با مواد رنگزای مصنوعی، معایب فناوری بیشتری دارد. به عنوان مثال، مواد رنگزای طبیعی هزینه تولید بالا، قدرت رنگ دهی کمتر، یکنواختی و پایداری شیمیایی و فیزیکی پایین‌تری دارند (۱۰). علاوه بر این، ساختار شیمیایی مواد رنگزای طبیعی حساسیت قابل‌توجهی به نور، فلزات، اکسیژن و عوامل کاهنده یا اکسیدکننده دارد. علاوه بر این، مواد رنگزای طبیعی در برخی از فعالیت‌های آبی، pH و محدوده دما، ناپایداری بالایی دارند (۱۱). مواد رنگزا یکی از جنبه های اصلی توسعه محصولات غذایی است. ویژگی‌های رنگی محصول بر ظاهر دیداری آن تأثیر می‌گذارد و بر درک مصرف‌کنندگان از طعم و کیفیت آن تأثیر گذار است. مواد رنگزا افزودنی‌هایی هستند که براساس منبعشان به دو دسته تقسیم می‌شوند: طبیعی (گیاهی، حیوانی، معدنی و میکروارگانیسم) و مصنوعی. همه انواع مواد رنگزا در ساختار خود کروموفورها را دارند. این کروموفورها گروه‌های عاملی هستند که قادر به جذب انرژی از تابش هستند و الکترون‌های خود را در سطح انرژی بالاتر تحریک می‌کنند. بنابراین، هنگامی که الکترون‌های کروموفورها به حالت پایه خود باز می‌گردند، انرژی را در طول موج خاصی آزاد می‌کنند و رنگ محصول را تنظیم می‌کنند (۱۱). مواد رنگزای طبیعی در بین سه دسته مواد رنگزا به دلیل تغییرات فعلی در الگوی مصرف جهانی برجسته می‌شوند. این الگوها نشان می‌دهد که مصرف‌کنندگان نسبت به محصولاتی که مصرف می‌کنند، انتقادپذیرتر و آگاه‌تر هستند. در نتیجه، آنها به طور فزاینده‌ای به دنبال غذاهایی هستند که اثرات مفیدی بر سلامت آنها داشته باشد. مواد رنگزای طبیعی از این روند پیروی می‌کنند زیرا جذابیت تجاری مرتبط با عملکرد زیستی (فعالیت ضدمیکروبی و ضداکسیدکنندگی) و عمل در پیشگیری از بیماری های غیرواگیر دارند (۱۱). با این حال، مواد رنگزای خوراکی طبیعی هنوز محدودیت‌های فناوری دارند که ادغام آن‌ها در توسعه مواد غذایی را پیچیده و گران می‌کند. این مواد رنگزا به دما، pH، فعالیت آب، نور، عوامل کاهنده یا اکسید کننده، فلزات و اکسیژن بسیار حساس هستند. علاوه بر این، مواد رنگزای طبیعی طیف و تنوع رنگ کمتری نسبت به مواد رنگزای مصنوعی دارند. آنها همچنین به دلیل بهره‌وری انرژی پایین فرآیند های استخراج گران‌تر هستند. شکل ۲ مواد رنگزای اصلی مورد استفاده برای تولید مواد رنگزای طبیعی غذایی را ارائه می‌دهد. آنها از منابع گیاهی مشتق شده و به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند: آنتوسیانین‌ها (قرمز-آبی-بنفش)، بتالین‌ها (قرمز)، کاروتنوئیدها (زرد-نارنجی-قرمز) و کلروفیل‌ها (سبز). این ترکیبات هنگامی که در معرض شرایط محیطی مختلف قرار می گیرند، ثبات رنگ متفاوتی دارند. شکل ۳ ثبات رنگ آنتوسانین‌ها ، بتالین‌ها، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها را در برابر حرارت، اکسیژن، نور و تغییر pH نشان می‌دهد.در این راستا، انتخاب از شرایط استخراج باید ویژگی‌های هر مواد رنگزا درنظر گرفت تا تخریب اجزا به حداقل برسد (۵).

۴-۲- روش‌های استخراج مواد رنگزا از مواد اولیه طبیعی

به طور کلی روش های استخراج مواد رنگزا شامل دو مرحله است که در مرحله اول عصاره خام غنی شده یا همان اولئورزین یا مواد رنگزا هیدروالکلی از مواد خام از طریق فرآیند جداسازی جامد- مایع جدا شده و سپس در مرحله تخلیص مواد ناخواسته اخلال‌گر حذف می‌شوند.



شکل ۲: مواد رنگزای اصلی مورد استفاده برای تولید مواد رنگزای طبیعی غذایی: آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها (۵).
Figure 2: The main pigments used to produce natural food pigments: anthocyanins, betalins, carotenoids and chlorophylls (5).



Anthocyanins	High to moderate	High	High	Low
Betalains	Moderate to low	High	High	Moderate
Carotenoids	Moderate	Low	Low	High
Chlorophylls	Moderate	High	High	Low

شکل ۳: ثبات مواد رنگزا آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها در برابر حرارت، اکسیژن، نور و تغییرpH (۵).
Figure 3: Pigments stability of anthocyanins, betalins, carotenoids and chlorophylls against heat, oxygen, light and pH change (5).

به طور معمول در مرحله اول مواد خام خرد و آسیاب شده و با یک حلال مناسب برای استخراج مواد رنگزا مخلوط می‌شوند. امروزه این روش‌ها، پیشرفته‌تر و خلاصه‌تر شده‌اند و به منظور دستیابی به بازده استخراج بالاتر، عوامل مختلفی نظیر دما، فشار، استفاده از مایکروویو، پالس الکتریکی یا فراصوت بهینه‌سازی شده‌اند. دومین مرحله شامل تخلیص و جزءبه‌جزء کردن عصاره خام از طریق روش‌های جداسازی جامد- مایع یا جداسازی مایع-مایع است که به دنبال آن تغلیظ تحت خلاء یا استفاده از روش‌های صاف‌کردن غشایی صورت می‌گیرد (۵).

به طور معمول، مواد رنگزای طبیعی از طریق استخراج جامد-مایع (SLE)[1]استخراج می‌شوند. در این فرآیندها، ذرات جامد بافت‌های گیاهی به دلیل اختلاف گرادیان غلظت، با انتشار به فاز مایع مهاجرت می‌کنند. استخراج SLE معمولاً با حلال‌های آلی که مواد رنگزا را حل می‌کنند، مانند اتانل، متانل و هگزان انجام می‌شود. بنابراین، مراحل جداسازی و خالص‌سازی برای حذف حلال عصاره و خالص‌سازی ترکیبات استخراج شده پس ازاستخراج انجام می‌شود. استخراج سوکسله نمونه‌ای از SLE است. در این روش استخراج جامع، حلال‌های آلی به طور پیوسته در بستر گیاه چرخانده می‌شوند تا اجزای غیرقطبی را با جوشاندن و متراکم کردن حلال بازیابی کنند. با این حال، چندین اشکال را می‌توان به روش استخراج سوکسله مربوط کرد. به عنوان مثال، شرایط استخراج در نقطه جوش حلال برای مدت طولانی به تجزیه حرارتی ترکیبات هدف کمک می‌کند (۱۱).

امروزه تمایلات جهانی به سمت استخراج با حلال کمتر، روش‌های بر پایه جذب سطحی و استفاده از حلال‌های کم ضررتر برای محیط‌زیست سوق یافته است. در دهه‌های اخیر فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند استخراج با سیال فوق بحرانی، استخراج تحت فشار با مایع، استخراج به کمک مایکروویو، استخراج به کمک فراصوت، پالس الکتریکی، استخراج مداوم غیرهمسو، استخراج فاز جامد و ریزاستخراج فاز جامد جایگزین روش‌های قدیمی نظیر استخراج سوکسله و تقطیر آبی شده‌اند. نسل جدید روش‌های بهبود یافته استخراج بر استفاده از دماهای بالاتر از نقطه تقطیر آبی پایه‌گذاری شده‌اند (۵).

۴-۳- استخراج مواد رنگزا با کمک پالس الکتریکی (PEF)

با استفاده از میدان‌های الکتریکی پالسی به علت افزایش در نفوذپذیری سلول‌ها، میزان بازده استخراج مواد رنگزا افزایش می‌یابد. فناوری‌های پردازش غیرحرارتی به طور گسترده‌ای برای استخراج مواد رنگزای غذایی طبیعی مورد مطالعه قرار گرفته است. این فناوری‌ها از دماهای پایین‌تر و مقادیر کمی حلال استفاده می‌کنند که باعث افزایش پایداری شیمیایی و فیزیکی مواد رنگزا، کارایی انرژی و بازده استخراج می‌شود. علاوه بر این، با استفاده نکردن از گرما به عنوان عامل اولیه برای فرآیندهای استخراج، فناوری‌های غیرحرارتی حفاظت بهتری از اجزای حساس به حرارت مانند مواد رنگزا را ممکن می‌سازد. از جمله کاربردهای اصلی آن در سیستم‌های غذایی، بازیابی ترکیبات فیتوشیمیایی از بسترهای گیاهی، غیرفعال‌سازی میکروبی و آنزیمی، کم آبی و انجماد، غلظت ترکیبات فعال زیستی و بهبود خواص فیزیکوشیمیایی، رئولوژیکی و ساختاری محصولات غذایی است .علاوه بر افزایش بازده فرآیند استخراج، فناوری PEF حداقل تغییرات را در خواص حسی و تغذیه‌ای محصولات ایجاد می‌کند. این واقعیت به طورمستقیم با دمای پایین مورد استفاده در طول فرآیند، در حدود ۴۰-۳۰ درجه سانتی‌گراد مرتبط است. از سوی دیگر، برخی از جنبه‌های منفی نیز در کاربرد این فناوری نوظهور گزارش شده است، مانند تشکیل رادیکال‌های آزاد، شستشوی احتمالی ترکیبات فعال زیستی، و تجزیه آنزیمی مواد رنگزای بازیافتی (۱۱). علاوه بر این، بیشتر غذاهایی که با فناوری PEF تیمار می‌شوند، مایعات همگن هستند. کاربرد این فناوری در مواد جامد یا مایع ناهمگن، هوا را به محصول وارد می‌کند. ادغام هوا پدیده پارگی دی الکتریک را ترویج می‌کند. این پارگی به دلیل تخلیه الکتریکی بین دو الکترود در محفظه تصفیه رخ می‌دهد. این پدیده واکنش‌های نامطلوب را در غذا کاتالیز می‌کند و می‌تواند به دلیل تشکیل جرقه باعث انفجار در تجهیزات شود (۱۴).

فناوری PEF به دلیل اثرات مضر آن بر یکپارچگی سلول، به عنوان یک روش امیدوارکننده برای افزایش انتقال جرم در طول فرآیند استخراج ارزیابی شده است (۱۴). افزایش در انتقال جرم اثر الکتروپوزیره‌کردن است زیرا اعمال میدان‌های الکتریکی (۰/۵ تا ۵ کیلوولت بر سانتی متر) منافذی را در ساختار سلولی بافت گیاه تشکیل می‌دهد. بنابراین، الکتروپوزیره‌کردن نفوذپذیری پلاسما راتغییر می‌دهد. در جدول ۱، خلاصه‌ای تحقیقات انجام شده در مورد استخراج مواد رنگزا به کمک پالس الکتریکی مشاهده می‌شود.

۴-۳-۱-آنتوسیانین‌ها

آنتوسیانین‌ها گروهی از مواد رنگزا را تشکیل می‌دهند که به طور گسترده در صنایع غذایی به عنوان مواد رنگزای طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند که طیف رنگی آنها قرمز، بنفش و آبی است. این ترکیبات متعلق به کلاس فلاونوئیدها هستند و از گلیکوزیدهای پلی‌متوکسی و مشتقات پلی‌هیدروکسی یون فلاویلیوم یا نمک‌های ۲-فنیل بنزوپیریلیوم تشکیل شده‌اند (۲۹). علاوه بر این، آنتوسیانین‌ها در ساختار خود دارای یک پایه غیرگلیکوزید به نام آنتوسیانیدین هستند. این پایه غیرگلیکوزید، به نوبه خود، معمولاً با یک یا چند مولکول قند و سایر ترکیبات حاصل از واکنش بین قندها و اسیدهای موجود در محیط مرتبط است (۳۰). علاوه بر این، آنتوسیانیدین از پیوندهای دوگانه مزدوج بین سه حلقه کربنی تشکیل می‌شود.

این پایه مسئول فعالیت رنگ‌آمیزی آنتوسیانین‌ها است زیرا کروموفور ساختار آنها است. بنابراین، آنتوسیانین‌ها را می‌توان به عنوان مواد رنگزای طبیعی در غذاهایی که در حال حاضر در بازار تولید می‌شود، مانند شیر تخمیر شده، پنیر خامه‌ای، نوشیدنی‌های با pH پایین، پنکیک و املت استفاده کرد.

[1] Solid Phase Extraction

جدول ۱: استخراج مواد رنگزای طبیعی غذایی از بسترهای گیاهی به کمک PEF (۵).

Table1: Extraction of natural food coloring substances from plant matrices with the help of PEF (5).

Food pigments	Plant matrix	PEF process parameters	Major findings	Ref.
Anthocyanins	Purple potatoes (Solanum tuberosum)	- Electric field strength: 1 - 5 kV/cm - Specific energy input: 0.54 - 13.50 kJ/kg - Pulse width: 45 - 105 µs - Pulse number: 5 – 35 - Frequency: 1 Hz	Regardless of extraction temperature (10 - 40◦C) or solvent (water and ethanol) used for extraction of anthocyanins, PEF-treated samples had greater extraction yield compared to those untreated. PEF treatment increased the anthocyanins recovery yield and reduced the extraction temperature besides eliminating the use of organic solvents.	(16)
Anthocyanins	Blueberry (Vaccinium sect. Cyanococcus)	- Electric field strength: 10 - 35 kV/cm - Specific energy input: - - Pulse width: 2 µs - Pulse number: 2 - 14 Frequency: - -	PEF treatment increased anthocyanin extraction yield and reduced the temperature and extraction time. High electric field strength (>20 kV/cm) and pulse number (>10 pulses) reduced anthocyanin extraction yield. PEF treatments were more efficient compared to high-intensity ultrasound treatments.	(17)
Anthocyanins	Grape (Vitis vinifera L.)	- Electric field strength: 13.3 kV/cm - Specific energy input: 0 - 564 kJ/kg - Pulse width: - - Pulse number: - - - Frequency: 0.5 Hz	The PEF process intensification increased anthocyanin extraction. PEF treatment was more efficient for anthocyanin extraction than high-intensity ultrasound (up to 22%) and high voltage electrical discharges (up to 55%) treatments.	(18)
Anthocyanins	Plum peel (Prunus domestica var. Casselman) and grape peel (Vitis vinifera L.)	- Electric field strength: 25 kV/cm - Specific energy input: 3.91 and 11.5 kJ/ kg (grape peel); 1.84 and 9.05 kJ/kg (plum peel) kJ/kg - Pulse width: 6 µs - Pulse number: 9.7 and 25.2 – - Frequency: 10 Hz	The 25-mm diameter PEF chamber showed best results than the 7-mm diameter. The use of a PEF chamber of a larger diameter allowed the application of a higher residence time and a higher number of pulses, which increased the anthocyanin extraction yield. However, this treatment promoted a high degradation of ascorbic acid.	(19)
Betanins	Beetroot (Beta vulgaris L.)	- Electric field strength: 4.38 and 6.25 kV/ cm - Specific energy input: 0 - 12.5 kJ/kg - Pulse width: 10 µs - Pulse number: 10 - 30 - Frequency: -	The electric field strength of 4.38 kV/cm and specific energy input of 4.10 kJ/kg allowed the extraction of 329% more betanin than the control treatment.	(20)
Betanins	Beetroot (Beta vulgaris L.)	- Electric field strength: 0, 1, 3, 5, 7, and 9 kV/cm - Specific energy input: 0, 0.02, 0.09, 0.24, 0.50, and 0.70 kJ/kg - Pulse width: - - Pulse number: 5 - Frequency: 1 Hz	The betanin extraction yield was affected by the applied electric field strength, temperature, and pH of the liquid medium. However, the pressure and number of pulses used in the process did not significantly influence the betanin recovery. The pH 3.5 and temperatures in the range of 30 - 40 ◦C contributed to the highest yields.	(21)
Betanins	Beetroot (Beta vulgaris L.)	- Electric field strength: 0.2 - 0.6 kV/cm (range of milliseconds) and 2 - 6 kV/cm (range of microseconds) - Specific energy input: 1.6 to 57.6 kJ/kg (range of milliseconds) and 0.04 to 74.16 kJ/kg (range of microseconds). - Pulse width: 1 ms and 3 µs - Pulse number: 10 - 80 (range of milliseconds) and 5 - 100 (range of microseconds) - Frequency: 1 Hz	PEF treatments in the range of ms and µs were effective for the disintegration of red beet cells enhancing betanin aqueous extraction. However, PEF treatments in the range of µs were more efficient for improving betanin extraction in terms of total specific energy consumption.	(22)
Betanins	Red prickly pear (Opuntia stricta Haw.)	-Electric field strength: 8 - 20 kV/cm - Specific energy input: 24 - 145 kJ/kg - Pulse width: 10 µs - Pulse number: 0 – 300 - Frequency: 0.5 Hz	PEF treatment was more profitable compared to ultrasound treatment due to lower energy consumption. Furthermore, scanning electron microscopy images revealed the ability of PEF treatment to induce cell wall permeabilization without disintegrating the cell tissue facilitating the selective recovery of the valuable intracellular compounds	(23)
Carotenoids	Date fruit (Phoenix dactylifera L., Sukkari)	- Electric field strength: 1, 2, and 3 kV/cm - Specific energy input: - - Pulse width: - - Pulse number: 30 - Frequency: 10 Hz	The increase in the electric field strength promoted a positive effect on the total carotenoid content of the extracts from 2.9 ± 0.1 to 6.1 ± 0.1 µg/mL.	(24)

جدول ۱: ادامه.
Table1: Continued.

Food pigments	Plant matrix	PEF process parameters	Major findings	Ref.
Carotenoids	Tomato (Solanum Lycopersicon)	- Electric field strength: 1, 3, and 5 kV/cm - Specific energy input: 5 and 10 kJ/kg - Pulse width: 20 µs - Pulse number: 10 - 833 - Frequency: 10 Hz	PEF treatment increased the extraction yield of carotenoids, especially lycopene, using acetone or ethyl lactate in the proportion 1:40 g/mL as solvents.	(25)
Carotenoids	Canary tomato (Solanum lycopersicum) peel	- Electric field strength: 3 - 7 kV/cm - Specific energy input: 0.54 - 13.50 kJ/kg - Pulse width: 3 µs - Pulse number: 5 - 100 - Frequency: 1 Hz	The cell membrane electroporation of tomato peels increased the extraction of carotenoids. PEF treatment reduced the extraction time and the proportion of hexane applied as a solvent without affecting the lycopene, lutein, and β-carotene extraction yield.	(26)
Carotenoids	Tomato (Lycopersicon eculentum L.)	- Electric field strength: 0.25 - 0.75 kV/cm - Specific energy input: 1 kJ/kg - Pulse width: 20 µs - Pulse number:- - Frequency: 10 Hz	Previous application of a pulsed electric field treatment at 0.50 kV/cm and 1 kJ/kg before the process of steam bleaching at 60◦C significantly increased the carotenoid extraction yield.	(27)
Chlorophylls	Custard apple (Annona squamosa) leaves	- Electric field strength: 2, 4, and 6 kV/cm - Specific energy input: 45, 94, and 142 kJ/ kg - Pulse width: - - Pulse number: 100, 200, and 300 - Frequency:-	Higher energy PEF treatments were promising non-thermal treatments for improving the extraction yield of flavanols, such as rutin. However, they reduced the chlorophyll content in the extracts.	(28)
Chlorophylls	Spinach (Spinacia oleracea L.)	-Electric field strength: 0, 3.3, 6.7, 13.3, 20.0 and 26.7 kV/cm - Specific energy input: - - Pulse width: 20 µs - Pulse number: - - Frequency: -	PEF treatments inhibited the degradation of pigments, especially for the recovery of chlorophylls under different process temperatures (20, 35 and 45 ◦C).	(29)

آنتوسیانین‌ها منحصراً در منابع گیاهی مانند میوه‌ها و سبزیجات مانند شاه توت، انجیر، بادمجان، توت فرنگی، آلو، جامبولائو، جابوتیکابا، گیلاس، آسرولا، تمشک، انگور، سیب، سیب زمینی بنفش و کلم قرمز یافت می‌شوند.

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌کنید استفاده از میدان الکتریکی برای محصولات مختلف دارای عوامل مختلفی است. به طور مثال در فرآیند استخراج آنتوسیانین از کلم قرمز از قدرت میدان الکتریکی ۲/۵ kV/cm، ۵۰ پالس و ۱۵ میکروثانیه) استفاده شده که تاثیرات مثبتی داشته و باعث افزایش بازدهی شده است (۳۱).

۴-۳-۲- بتالین

چغندر منبع اصلی بتالین است. با این حال، آنها معمولاً در چغندر سوئیس و میوه‌های کاکتوس نیز یافت می‌شوند. بتالین‌ها شامل طیف رنگی قرمز/بنفش و/یا زرد- نارنجی هستند. بنابراین، مواد رنگزای اصلی مرتبط با تولید مواد رنگزای بتالین هستند. ساختار این ترکیبات محصول کونژوگه بین اسید بتلامیک و یک آمین اولیه یا ثانویه است. این مواد رنگزا به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود: بتاسیانین ها (قرمز/بنفش) و بتازانتین‌ها (زرد نارنجی). هر دو گروه دارای اسید بتلامیک به عنوان پیش‌ساز هستند (۱۰).

بتالین‌ها به دلیل اینکه از دسته‌ی مواد رنگزا با حساسیت بالا است برای حفظ ترکیبات حساس به حرارت آن می‌توان از میدان پالس الکتریکی برای استخراج آن استفاده کرد. در تحقیقی اثرات قدرت میدان الکتریکی در فرآیند استخراج بتاولگاریس (kV/cm ۴/۳۸ و ۶/۲۵)، انرژی ورودی(kJ/kg ۰-۱۲/۵) و تعداد پالس‌ها(۱۰-۳۰) بر سرعت انتقال جرم بتالین‌ها از چغندر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد PEF (۴/۳۸ kV/cm در kJ/k ۴/۱۰) بازده بتانین را ۳۲۹٪ و ولگاگزانتین را ۲۴۴٪ نسبت به نمونه تیمار نشده افزایش داد (۵).

۴-۳-۳- کاروتنوئیدها

کاروتنوئیدها مواد رنگزایی هستند که به طور گسترده در طبیعت توزیع شده‌اند، بیش از ۶۵۰ نوع آن شناسایی شده است و تقریبا ۱۰۰ نوع آن در مواد اصلی غذایی یافت شده است. این مواد رنگزا تتراترپن‌هایی هستند که از اتحاد ۸ مولکول ایزوپرن به وجود می‌آیند که منجر به یک زنجیره طولانی از پیوندهای دوگانه می‌شود. این ساختار کروموفورکاروتنوئیدها است. طیف رنگی کاروتنوئیدها به

کمیت و توزیع پیوندهای دوگانه بستگی دارد و شامل قرمز، زرد و نارنجی است. منابع اصلی کاروتنوئیدها کدو حلوایی، هویج، اسفناج، کلم بروکلی، سیب زمینی شیرین، پاپایا و زردآلو هستند. برخلاف گیاهان، حیوانات قادر به سنتز کاروتنوئیدها نیستند. با این حال، آنها می‌توانند جذب آنها را، تغییر دهند و در بافت‌های خود رسوب کنند، مانند زردی در زرده تخم مرغ. این مواد رنگزا به دو گروه اصلی کاروتن‌ها و گزانتوفیل‌ها تقسیم می شوند. تفاوت کاروتن‌ها و گزانتوفیل‌ها در اتم‌هایی است که ساختار مولکولی آنها را تشکیل می‌دهند. کاروتن ها فقط کربن و هیدروژن را در ساختار خود دارند، در حالی که گزانتوفیل‌ها کربن، هیدروژن و اکسیژن را دارند. کاروتنوئیدها نیز بر اساس عملکردشان به کاروتنوئیدهای اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. کاروتنوئیدهای اولیه مولکول‌های حیاتی برای فتوسنتز گیاهان هستند. آنها بتا کاروتن، لوتئین و زآگزانتین هستند. ثانویه‌ها مستقیماً با سازوکارهای بقای گیاه مرتبط نیستند. آنها شامل α-کاروتن، لیکوپن و آستاگزانتین هستند (۱۴).

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌کنید اثرات فناوری غیرحرارتی (PEF) در فرآیند استخراج از گوجه فرنگی قناری مورد ارزیابی قرار گرفته است. الکتروپوریزه‌کردن غشای سلولی پوست گوجه فرنگی با قدرت میدان الکتریکی در فرآیند استخراج گوجه قناری (۷-۳ kV/cm) و انرژی (۱۳/۵ kJ/kg -۰/۵۴) و عرض پالس (۳ µs). باعث افزایش استخراج کاروتنوئیدها شده است. بنابراین این فناوری باعث افزایش انتقال جرم مواد رنگزا در طول فرآیند استخراج و کاهش شدت فرآیند (دما و مقدار حلال) شده است. علاوه بر این فناوری PEF از اصول شیمی سبز پیروی می‌کند، زیرا کاربرد آن باعث کاهش مصرف انرژی و اتلاف حلال‌های مرتبط با فرآیند می‌شود و به کاهش اثرات زیست محیطی کمک می‌کند (۵).

۴-۳-۴- کلروفیل‌ها

کلروفیل‌ها مواد رنگزایی هستند که مسئول رنگ سبز گیاهان، جلبک‌ها و باکتری‌ها هستند.آنها به طور گسترده در طبیعت پراکنده هستند و در کلروپلاست‌های گیاهی یافت می‌شوند که عموماً با کاروتنوئیدها، لیپیدها و لیپوپروتئین‌ها مرتبط می‌باشند. علاوه بر این، کلروفیل‌ها مسئول جذب انرژی برای فرآیند فتوسنتز هستند و نقش حیاتی در گیاهان ایفا می‌کنند (۱۰). کلروفیل حساسیت بالایی به تغییرات pH دارد، در محدوده ۳/۵ تا ۵ پایدار می‌ماند و نسبت به گرما حساس است (۱۴).

همان‌طور که در جدول ۱، مشاهده می‌کنید استخراج کلروفیل از سیب کاستارد با قدرت میدان الکتریکی (۴، ۲ و ۶ kV/cm) و انرژی ورودی ویژه (۱۴۲، ۹۴ و ۴۵ kJ/kg) مورد بررسی قرار گرفته است. که اثرات نامطلوب قدرت میدان الکتریکی و انرژی ویژه را بر بازده استخراج کلروفیل‌ها مشاهده کردند. محتوای کلروفیل در عصاره برگ سیب کاستارد تیمار شده با PEF نسبت به نمونه‌های تیمار نشده کمتر بود. این بازده PEF ممکن است با قطبیت حلال مورد استفاده مرتبط باشد (۱۴). حلال‌های غیرقطبی رسانایی تقریباً ناچیز دارند، بنابراین میدان الکتریکی اعمال شده در سیستم به طور یکنواخت در سراسر بستر منتقل نمی‌شود، که بر بازده فرآیند تاثیر می‌گذارد. بنابراین، این فناوری برای استخراج بتالین‌ها و آنتوسیانین‌ها مناسب‌تر است. این‌ها با حلال‌های قطبی استخراج می‌شوند، در حالی که کارتنوئیدها و کلروفیل‌ها معمولاً با حلال‌های غیرقطبی استخراج می‌شوند (۵).

۴-۳-۵- استخراج مواد رنگزای لیکوپن

این مواد رنگزا جزء دسته کاروتنوئیدها و از خانواده کاروتن‌هاست. طیف رنگی لیکوپن قرمز است و منابع آن گوجه فرنگی، هندوانه، گریپ فروت صورتی، پاپایا، خربزه درختی و گواوا می‌باشد. اما مهمترین منبع لیکوپن، گوجه فرنگی و فرآورده‌های غذایی حاصل از آن است که مقدار لیکوپن در آنها بیش از ۶۰٪ کاروتنوئیدهای موجود را تشکیل می‌دهد (۳۲).

دولت آبادی و همکارانش (۱۴۰۱) بهینه‌سازی فرآیند استخراج لیکوپن و ترکیبات فنولی از تفاله گوجه‌فرنگی با استفاده از پیش تیمار میدان الکتریکی پالسی را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق شدت‌های الکتریکی ۲، ۴ و ۶ کیلوولت بر سانتی‌متر و تعداد پالس‌های ۱۰، ۳۵ و ۶۰ مورد بررسی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش شدت میدان الکتریکی میزان لیکوپن استحصالی، ترکیبات فنولی کل، فعالیت رادیکال گیرندگی به روش DPPH[1] و میزان قدرت احیاکنندگی آهن ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. با افزایش تعداد پالس‌ها نیز ابتدا میزان لیکوپن کاهش و سپس افزایش یافت ولی میزان ترکیبات فنولی کل و فعالیت رادیکال گیرندگی به روش DPPH به صورت جزئی افزایش یافت. بهینه‌سازی فرآیند نیز نشان داد که به منظور رسیدن به عصاره‌ای با میزان لیکوپن و ترکیبات فنولی بیشتر، بایستی شدت میدان الکتریکی ۳/۷ کیلوولت بر سانتی‌متر و تعداد پالس ۶۰ باشد تا مطلوبیت ۰/۹۱۵ ایجاد گردد. در نهایت مقایسه نمونه شاهد (فاقد تیمار) با نمونه حاصل از تیمار بهینه مشخص کرد که نمونه حاصل از پیش تیمار میدان الکتریکی پالسی درصد لیکوپن، ترکیبات فنولی کل، فعالیت رادیکال گیرندگی و قدرت احیاکنندگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارد (۳۳).

۴-۴- بهینه‌سازی شرایط فرآیند استخراج به کمک PEF

بهینه‌سازی فرآیندهای استخراج با کمک PEF نیازمند اجرای روش‌ها و

[1] 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl

استراتژی‌های ساختاریافته برای افزایش بازیابی مواد رنگزای طبیعی از بسترهای گیاهی است. در این راستا، عوامل اصلی فرآیند مربوط به عملکرد PEF در فرآیند استخراج عبارتند از: قدرت میدان الکتریکی، انرژی ورودی ویژه، تعداد پالس، زمان تصفیه و دما است (۳۴). این عوامل فرآیند پدیده الکتروپوریزه‌کردن را در سلول‌های گیاهی تعدیل می‌کنند که بر انتشار محتوای ترکیبات فیتوشیمیایی آن‌ها در محیط یا حلال مایع تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، با تشدید عوامل فرآیند PEF ذکر شده، الکتروپوریزه‌کردن تشدید می‌شود و استخراج ترکیبات هدف را افزایش می‌دهد. با این حال، بسته به ویژگی‌های بستر گیاه، مانند توزیع اندازه سلول بین پوست و خمیر، ساختار و پایداری شیمیایی و فیزیکی مواد رنگزا طبیعی و همچنین موقعیت نسبی آن در سلول گیاهی و توانایی اتصال به بستر، تشدید عوامل فرآیند استخراجPEF ممکن است عملکرد استخراج را کاهش دهد. در واقع، قدرت میدان الکتریکی مورد نیاز برای ترویج الکتروپوریزه‌کردن در غشای سلولی ممکن است برای هر بستر گیاهی متفاوت باشد. تقاضای کم انرژی تیمارهای PEF یکی از مزایای اصلی کاربرد این فناوری در صنایع غذایی است. این عامل منجر به هزینه کمتری برای پردازش به کمک PEFمی‌شود و سرمایه گذاری اولیه بالایی که مورد نیاز این فناوری نوآورانه است را جبران می‌کند. با این حال، عوامل فرآیند باید برای هر ماده خام گیاهی ارزیابی شود تا روش‌ها و پروتکل های مناسب برای تعیین قدرت میدان الکتریکی و مدت زمان پالس بهینه برای دستیابی به بازده انرژی بالادر فرآیند استخراج مواد رنگزای طبیعی ایجاد شود (۵).

ژو و همکارانش[1] (۲۰۱۵) اثرات تغییر قدرت میدان (۵ تا ۳۰ کیلوولت بر سانتی‌متر) بر استخراج آنتوسیانین از زغال اخته را ارزیابی کرد. بهترین شرایط استخراج ۲۰ کیلوولت بر سانتی متر۱۰، پالس و اتانل ۶۰ درصد بود، همچنین با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی فرآیند علاوه بر این، شرایط دمای استخراج و زمان پردازش را کاهش داد (۳۴).

میدان الکتریکی پالسی می‌تواند شدت شرایط استخراج (دما و مقدار حلال) را کاهش داده و با تغییر نفوذپذیری سلول‌ها، انتقال جرم مواد رنگزا را افزایش دهد. بنابراین، فناوری PEF به سیستم تولید مواد رنگزا پایدارتر کمک می‌کند.

ادغام روش‌های استخراج می‌تواند انرژی مورد نیاز برای استخراج مواد رنگزای طبیعی را کاهش دهد. شرایط استخراج انرژی کم به نوبه خود می‌تواند مواد رنگزای حساس به گرما، pH و نور را بهتر حفظ کند. بنابراین، روش‌های یکپارچه ممکن است افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش تخریب ترکیبات قابل‌انعطاف را افزایش دهند. ادغام فناوری PEF در فرآیند استخراج آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها به دلیل سازوکار عمل آن بر روی بسترهای گیاهی برجسته است. فناوری PEF انتقال جرم مواد رنگزای را از طریق پدیده الکتروپوریزه‌کردن افزایش می‌دهد و از تخریب حرارتی آنها جلوگیری می‌کند. بنابراین، یک فرآیند به کمک PEF بازده استخراج بالاتر، بازده انرژی بیشتر با استفاده از زمان‌های استخراج کوتاه‌تر، مقدار کمتر حلال و شرایط دمایی پایین‌تر را فراهم می‌کند. بااین حال، مطالعات کمی اثرات PEF را بر استخراج کلروفیل گزارش می‌کنند، بنابراین تحقیقات بیشتری برای تأیید اثرات آن بر استخراج این مواد رنگزا مورد نیاز است. همچنین مطالعات بیشتری برای بهینه‌سازی عوامل فرآیندی که PEF را اعمال می‌کنند، مورد نیاز است. این بهینه‌سازی‌ها می‌توانند بهره‌وری انرژی را برای کاربردهای بعدی در مقیاس صنعتی به بیشترین مقدار برسانند (۳۵).

۵- کاربرد اجزای طبیعی در صنایع غذایی

مواد رنگزای خوراکی اغلب در صنایع غذایی استفاده می شوند تا مواد رنگزای طبیعی محصولات را زمانی که در طول تولید و نگهداری محو می شوند، حفظ کنند. قوام میوه هایی که در اثر تغییرات آب و هوایی تخریب می شوند را می توان با افزودن مواد رنگزای طبیعی حفظ کرد که باعث افزایش کیفیت و طعم محصول نیز می شود. علاوه برصنایع دیگر از جمله داروسازی، مواد مغذی و بسیاری دیگر، مواد رنگزای طبیعی در صنایع غذایی به عنوان نگهدارنده مواد غذایی، شاخص‌های کیفیت و عوامل رنگ دهنده استفاده می‌شوند. بحث در مورد هر یک از این کاربردها در زیر ارائه شده است (۳۶).

۵-۱- نگهدارنده های غذایی

مواد رنگزای طبیعی به دست آمده از گیاهان حاوی مواد شیمیایی گیاهی هستند .فعالیت‌های ضدباکتریایی و ضداکسیدکنندگی فیتوکمیکال‌ها رشد میکروبی را متوقف می کند. مواد رنگزای طبیعی دیگر زردچوبه که به رنگ زردروشن است به دلیل خواص ضدباکتری و ضداکسیدکنندگی به عنوان نگهدارنده در ترشی‌ها و سایر محصولات غذایی استفاده می شود. زردچوبه دارای مقادیر بیشتری فنل وفلاونوئید است. جزء اصلی فنولی زردچوبه، کورکومین در از بین بردن رادیکال‌های پراکسیل بسیار کارآمد است (۳۶).

۵-۲- شاخص کیفیت

کیفیت یک محصول مستقیماً تحت تأثیر رنگ غذا است، که بر نحوه درک مشتریان ازجنبه های دیگر مانند طعم، شیرینی و تازگی نیز تأثیر می‌گذارد. مشخصات آنتوسیانین تشخیص اینکه آیا مربا با توت‌های واقعی تهیه شده است یا نه، بسیار ساده است. رنگ قرمز مایل به آبی عصاره کلم قرمز، تولید شده توسط بتانین، که به ویژه در سطوح pH بالا پایدار است، می تواند به عنوان یک شاخص کیفیت استفاده شود (۳۶).

[1] Zhou, Zhao & Huang

۵-۳- خواص دارویی

مواد رنگزا ممکن است برای سلامت انسان مفید باشند زیرا حاوی مواد فعال فیزیولوژیکی با ویژگی های دارویی مانند ضداکسیدکنندگی قوی ضدجهش‌زا، قابلیت‌های ضدالتهابی و اثرات ضدآرتریت هستند. یکی دیگر از زانتوفیل‌های طبیعی با اثرات ضداکسیدکنندگی قوی آستاگزانتین کاروتنوئیدها همچنین به عنوان ضداکسیدکنندگی زیستی قوی عمل می کنند، از سلول‌ها، بافت‌ها و اندام‌ها در برابر آسیب های ناشی از اکسیدان ها و رادیکال های آزاد محافظت می‌کنند. آنها منبع فوق‌العاده‌ای از داروهای ضدتومور هستند. بتاسیانین، یک ضداکسیدکننده، همچنین یک ضدرادیکال موثر است. طبق مطالعات جمعیت شناختی، مصرف کلروفیل با کاهش بروز سرطان روده بزرگ مرتبط است. رنگدانه‌های میکروبی متعددی مانند ویولاسین، کاروتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها کشف شده‌اند که دارای خواص ضداکسیدکنندگی هستند (۳۶).

۵-۴- مکمل‌های غذایی

اجزای زیست فعال گیاهی، که مواد ساخته شده توسط سلول‌های گیاهی هستند، دررنگ‌ها یافت می‌شوند. کاروتنوئیدها گروه مهمی از مواد رنگزای طبیعی هستند. مواد رنگزایی که به صورت زرد، نارنجی و قرمز محلول درچربی به نام کاروتنوئیدها در همه گیاهان عالی و برخی از حیوانات وجود دارند. مواد رنگزای زیستی در صنایع غذایی مهم هستند زیرا جایگزین طبیعی تری برای مواد رنگزای مصنوعی خوراکی هستند. مواد رنگزای زیستی از منابع طبیعی مانند میوه‌ها، سبزیجات، جلبک‌ها و دیگر منابع طبیعی ساخته می‌شوند، بنابراین می‌توانند به ارائه ظاهر و طعم طبیعی تر به غذا کمک کنند. آنها همچنین خطرات بالقوه کمتری برای سلامتی دارند، زیرا از منابع طبیعی تولید می‌شوند. علاوه بر این، مواد رنگزای زیستی حاوی مواد نگهدارنده مصنوعی نیستند که می‌تواند منجر به بهبود ایمنی و کیفیت مواد غذایی شود. در نهایت، مواد رنگزای زیستی اغلب مقرون به صرفه‌تر از مواد رنگزای خوراکی مصنوعی هستند و آنها را به گزینه‌ای جذاب برای تولیدکنندگان مواد غذایی تبدیل می‌کند (۳۶).

۶- نتیجه‌گیری

ادغام روش‌های استخراج می‌تواند انرژی مورد نیاز برای استخراج مواد رنگزای طبیعی را کاهش دهد. شرایط استخراج انرژی کم به نوبه خود می‌تواند مواد رنگزای حساس به گرما، pH و نور را بهتر حفظ کند. بنابراین، روش‌های یکپارچه ممکن است افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش تخریب ترکیبات قابل انعطاف را افزایش دهند. فناوری PEF در فرآیند استخراج آنتوسیانین‌ها، بتالین‌ها، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها به دلیل سازوکار عمل آن بر روی بسترهای گیاهی برجسته است. همان‌طورکه اشاره شد، فناوری PEF انتقال جرم مواد رنگزا را از طریق پدیده الکتروپوریزه‌کردن افزایش می‌دهد و از تخریب حرارتی آنها جلوگیری می‌کند. بنابراین، یک فرآیند به کمک PEF بازده استخراج بالاتر، بازده انرژی بیشتر با استفاده از زمان‌های استخراج کوتاه‌تر، مقدار کمتر حلال و شرایط دمایی پایین‌تر را فراهم می‌کند. میدان‌های الکتریکی پالسی تمایل دارند پروتئین‌های غذایی را به اسیدهای آمینه آزاد تبدیل کنند، اما حداقل تأثیر آن بر روی چربی‌ها است و حتی باعث افزایش مقادیر پلی‌فنول و کاروتنوئیدها در غذاهای مایع می‌شود. در نتیجه، اجرای فرآیند PEF در مقیاس صنعتی ممکن است گزینه‌ای برای بهبود کیفیت فیزیکی و شیمیایی و تغذیه‌ای باشد. علاوه بر این، بالا بودن هزینه راه اندازی اولیه سیستم PEF اصلی‌ترین مانع استفاده از این سیستم درمقیاس صنعتی است. بنابراین استفاده از این تیمار همچنان در سطح آزمایشگاهی است. با این وجود این سیستم‌های PEF به دلیل پایین بودن هزینه‌های جاری و تولید محصولات با کیفیت بالا و فرآیند کم بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است.

تقدیر و تشکر

این مقاله حاصل تحقیق در گروه صنایع غذایی موسسه آموزش عالی بصیر توسط استاد و دانشجو است.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۷- مراجع

1. Joyandeh H, Nosrati Gh, The effect of pulsed electric fields on microorganisms, enzymes and food compounds, The 11th national conference on sustainable agriculture and natural resources,1400 [In Persian].
2. Barbosa-Canovas GV, Howard Zhang Q. In Pulsed Electric Fields in Food Processing. Washington, DC: Technomic. 2001, 289.
3. Sadeghi R, Emamjomeh Z, Karimi M, The effect of electric pulse processes on the synthesis of bioactive compounds in food, Regional conference of Food and Biotechnology, Kermanshah, 1388 [In Persian].
4. Asavasanti S, Ristenpart W, Stroeve P. Barrett DM. Permeabilization of Plant Tissue by Monopolar Pulsed Electric Field: Effect of Frequency. J. Food Sci.

2011;28(2):445-53.
http://dio.org/10.1111/j.1750-3841. 2010. 01940.x.
5. Bocker R, Keven Silva E, Pulsed electric field assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices, School of Food Engineering, University of Campinas, Rua Monteiro Lobato, 80, Campinas, SP CEP, Brazil:13083-862. 2022.
6. Vorobiev E., Lebovka N., Processing of sugar beets assisted by pulsed electric fields. Res Agr. Eng. 2022, 68: 63–79. https://doi.org/10.17221/91/2021-RAE.
7. de L. Castro, M. D. and Garcia-Ayuso, L. E. Soxhlet extraction of solid materials: An outdated technique with a promising innovative future. Analytica Chimica Acta. 1998;369:1–10. https://doi.org/10.1016/S0003-2670 (98) 00233-5.
8. Shorstkii I, Stuehmeier-Niehe C, Sosnin M, Hossein Ali E, Comiotto-Alles M, Siemer C, et al, Pulsed Electric Field Treatment Application to Improve Product Yield and Efficiency of Bioactive Compounds through Extraction from Peels in Kiwifruit Processing. 2023. https://doi.org/10.1155/2023/8172255.
9. Wood L. $5 Billion Natural Dyes Market - Global Outlook and Forecasts 2019- 2024. Retrieved from. 2019. https://www.prnewswire.com/news-releases/5-billion-na tural-dyes-market global-outlook-and-forecasts-2019-2024-300797306.html. Accessed 20/10/2021 2021.
10. Delgado-Vargas F, Jim´enez AR, Paredes-Lopez O. Natural pigments: Carotenoids, anthocyanins, and betalains ¨Characteristics, biosynthesis, processing, and stability. CRC Crit Rev Food Sci Nutr. 2000;40(3),173–289. https://doi.org/10.1080/10408690091189257.
11. Aadil R. M., Zeng X.-A, Han Z. Sahar A, Khalil A. A. Rahman U. U, et al. Combined effects of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and microbial quality of grapefruit juice. J Food Process Preserv, 2018;42(2), 13507. https://doi.org/10.1111/jfpp.13507.
12. Barba F. J. Zhu Z. Koubaa M. Sant'Ana A. S. Orlien V. Green alternative methods for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by products. Trends Food Sci Technol. 2016;49,96–109. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.006.
13. Liang Gong Y, Lang H, Jun X, High intensity pulsed electric field as an innovative technique for extraction of bioactive compounds-A review, Crit Rev Food Sci Nutr, 2017, 2877-2888, https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1077193.
14. Ngamwonglumlert L, Devahastin S, Chiewchan N. Natural colorants: Pigment stability and extraction yield enhancement via utilization of appropriate pretreatment and extraction methods. Crit Rev Food Sci Nutr. 2017; 57(15), 3243–3259. https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1109498.
15. Pu´ertolas E. Cregenz´ an O. Luengo, E. ´ Alvarez I. Raso J. Pulsed-electricfield-assisted extraction of anthocyanins from purple-fleshed potato, Food Chem Adv. 2013;136(3), 1330–1336. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.080.
16. Zhou Y. Zhao X. Huang H. Effects of pulsed electric fields on anthocyanin extraction yield of blueberry processing by-products. J Food Process Preserv. 2015;39(6), 1898–1904. https://doi.org/10.1111/jfpp.12427.
17. Barba F. J. Parniakov O. Pereira S. A. Wiktor A. Grimi N. Boussetta N, et al. Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. Food Sci Technol Res, 2015;77, 773–798. https://doi.org/10.1007/s11947-015-1482-3.
18. Medina-Meza I. G. Boioli P. Barbosa-Canovas´ G. V, Assessment of the effects of ultrasonics and pulsed electric fields on nutritional and rheological properties of raspberry and blueberry purees, Food Bioproc Tech 2016;9(3), 520–531. https://doi.org/10.1007/s11947-015-1642-5.
19. Nowacka M. Tappi S. Wiktor A, Rybak K. Miszczykowska A. Czyzewski J. et al. The impact of pulsed electric field on the extraction of bioactive compounds from beetroot. Foods, 2019;8(7). https://doi.org/10.3390/foods8070244.
20. Lopez, ´ N. Pu´ertolas, E. Condon, ´ S. Raso, J. Alvarez, I. Enhancement of the extraction of betanine from red beetroot by pulsed electric fields. J Food Sci Eng, 2009; 90(1), 60–66. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.002.
21. Luengo E. Martínez, J. M. Alvarez, ´ I. Raso J. Effects of millisecond and microsecond pulsed electric fields on red beet cell disintegration and extraction of betanines. Ind Crops Prod. 2016;. 28–33. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.01.016.
22. Koubaa M, Barba F. J. Grimi N. Mhemdi, H. Koubaa W. Boussetta N, et al. Recovery of colorants from red prickly pear peels and pulps enhanced by pulsed electric field and ultrasound. Innov Food Sci Emerg Technol , 2016, 336–344.. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.015.
23. Siddeeg A. Faisal Manzoor M. Haseeb Ahmad M. Ahmad N. Ahmed Z. Khan K. I. M. Ammar A. F, Pulsed electric field-assisted ethanolic extraction of date palm fruits: Bioactive compounds, antioxidant activity and physicochemical properties. Processes, 7(9). 2019. https://doi.org/10.3390/pr7090585.
24. Pataro G. Carullo D. Falcone M. Ferrari G. Recovery of lycopene from industrially derived tomato processing by-products by pulsed electric fields-assisted extraction. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 63, Article 102369. 2020. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102369.
25. Luengo E. Alvarez I. Raso J. Improving carotenoid extraction from tomato waste by pulsed electric fields. Frontiers in Nutrition, 1, 12. 2014. https://doi.org/10.3389/fnut.2014.00012.
26. Pataro G. Carullo D. Siddique A. Falcone M. Donsì F. Ferrari G. Improved extractability of carotenoids from tomato peels as side benefits of PEF treatment of tomato fruit for more energy-efficient steam-assisted peeling, J Food Sci Eng; 2018. 233. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.029.
27. Shiekh K. A. Olatunde O. O. Zhang B. Huda N. Benjakul S. Pulsed electric field assisted process for extraction of bioactive compounds from custard apple (Annona squamosa)leaves. Environ Res Health. 2021;359, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129976.
28. Zhang Z.-H. Wang L.-H. Zeng X.-A. Han, Z. Wang M.-S. Effect of pulsed electric fields (PEFs) on the pigments extracted from spinach (Spinacia oleracea L.). Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2017; 43, 26–34. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.06.014.
29. Pascual-Teresa S. Molecular mechanisms involved in the cardiovascular and neuroprotective effects of anthocyanins. Arch Biochem Biophys. 2014; 559, 68-74. https://doi.org/10.1016/j.abb.2014.04.012.
30. Ribeiro JS, Veloso CM, "Microencapsulation of natural dyes with biopolymers for application in food: A review".

Food Hydrocoll Health, 2021; 112. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106374.
31. Cortez R, Luna-Vital D, Margulis DE A, Gonzalez de M. "Natural Pigments: Stabilization Methods of Anthocyanins for Food Applications". Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017;16(1), 180–198. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12244.
32. Ghamari M, Zareei H, Yazdankhah S, A review of new methods in lycopene extraction, The 4th national congress of development and promotion of agricultural engineering and soil sciences of Iran, 1401 [In Persian].
33.Dolatabadi Z, Elhamirad A M, Akhlaghi Feyzabadi S H, Farzaneh V, Bakhshabadi H, Optimizing the extraction process of lycopene and phenolic compounds from tomato pomace using pulsed electric field pretreatment, Iranian journal of food science anad industry, 19(125):109-119.1401.https://doi.org/20.1001.1.20088787.1401.19.125.11.0.[In Persian].
34. Zhou Y, Zhao X, Huang H. Effects of pulsed electric fields on anthocyanin extraction yield of blueberry processing by-products. J Food Process Preserv, 2015, 39(6), 1898–1904. https://doi.org/10.1111/jfpp.12427.
35. Arshad R. N. Abdul-Malek Z. Munir A. Buntat Z. Ahmad M. H. Jusoh Y. et al. Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. Trends in Food Science & Technology, 2020, 104, 1–13.. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.008.
36. Singh T, Kumar Pandey V, Kumar Dash K, Zanwar S , Singh R, Natural bio-colorant and pigments: Sources and applications in food processing, CABI Agric Biosci, 2023, 100628, https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100628.

How to cite this article:

Ghamary M, Salehi Z. A Review of the Performance and Applications of Electric Pulse in the Extraction of Natural Dye. J Stud color world. 2023;13(4):407-420. https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.4.4.2 [In Persian].