



DOI: 10.22069/efjpp.2020.15714.1512

نشریه فرآوری و نگهداری مواد غذایی
جلد دوازدهم، شماره اول، ۹۹
۴۹-۶۶

<http://efjpp.gau.ac.ir>



تأثیر میدان الکتریکی پالسی مجهز به امواج مادون قرمز بر محتوای اسید اسکوربیک موجود در آب گوجه فرنگی

سارا آقاچانزاده سورکی^۱، امان محمد ضیائی فر^{۲*}، مهدی کاشانی نژاد^۳، عباس رضائی اصل^۴

^۱دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۲دانشیار گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۳استاد گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۴استادیار دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰

چکیده

سابقه و هدف: گوجه فرنگی و فراورده‌های حاصل از آن دارای ارزش غذایی بالا، رنگ و عطر مطلوب، طعمی دل‌پذیر و پایداری بالا هستند. بنابراین، به منظور حفظ کیفیت محصول، انتخاب روشی مناسب جهت فرآوری این ماده غذایی مهم است. امروزه، استفاده از روش‌های نوین حرارتی و غیرحرارتی جهت تولید محصولات با کیفیت بالا مورد توجه قرار گرفته است. از این جهت، در این مطالعه با طراحی و ساخت سیستم مداوم میدان الکتریکی پالسی (PEF) مجهز به امواج مادون قرمز (IR)، به تأثیر این روش فرآوری بر محتوای اسید اسکوربیک موجود در آب گوجه فرنگی پرداخته شد. همچنین با استفاده از مدل‌های ریاضی و سینتیکی روند تغییرات محتوای این ویتامین طی فرآوری مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، موج مربعی شکل - دوقطبی به عرض ۱ میلی‌ثانیه و فرکانس ثابت ۳۲ هرتز مورد استفاده قرار گرفت. در محفظه فرآوری این دستگاه از دو الکترود از جنس استیل ضد زنگ به طول و ضخامت به ترتیب ۱۰ و ۰/۵ میلی‌متر استفاده شد. محتوای اسید اسکوربیک موجود در آب گوجه فرآوری شده با استفاده از روش یدومتری اندازه‌گیری شد. ابتدا آب گوجه فرنگی با استفاده از امواج IR از دمای اولیه ۳۰ درجه سانتی‌گراد تا دماهای ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شد. سپس، نمونه به مدت ۱۱۷۳ تا ۳۵۲۰ میکروثانیه تحت فرایند PEF مداوم با شدت ۲۲/۷۳، ۲۷/۲۷، ۳۱/۸۲ و ۳۶/۳۶ کیلوولت بر سانتی‌متر قرار گرفت.

یافته‌ها: پیش‌حرارت‌دهی نمونه با استفاده از امواج IR تا رسیدن به دماهای ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب موجب کاهش محتوای اسید اسکوربیک به میزان ۱۱/۴۱، ۱۶/۳۹ و ۱۹/۱۰ درصد شد. همچنین افزایش شدت PEF و زمان فرایند موجب کاهش چشمگیر محتوای این ویتامین شد. تأثیر شرایط فرآوری بر روند تخریب این ویتامین با استفاده از مدل‌های نیمه لگاریتمی درجه اول، Simplified Hulsheger، Fermi و Hulsheger مورد مطالعه قرار گرفت.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که به دلیل حساسیت حرارتی بالای اسید اسکوربیک، فرایند حرارتی IR موجب کاهش چشمگیر در میزان این ویتامین می‌شود. همچنین طی فرایند PEF به دلیل بروز اثر حرارت‌دهی اهمیت، نیاز به کنترل شرایط فرآوری مانند شدت میدان الکتریکی اعمال شده و زمان فرآوری می‌باشد. مدل نیمه لگاریتمی درجه اول جهت

*مسئول مکاتبات: ziaiifar@gau.ac.ir

مطالعه تاثیر زمان فراوری غیرحرارتی بر محتوای اسید اسکوربیک استفاده شد. همچنین مدل Simplified Hulsheger به دلیل بالاتر بودن ضریب تبیین و پایین تر بودن خطای استاندارد، به عنوان مناسب ترین معادله در توصیف تخریب این ویتامین تحت تاثیر شدت PEF تعیین شد. همچنین مدل Hulsheger به منظور بررسی تاثیر همزمان شدت و زمان PEF مورد استفاده قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: امواج مادون قرمز، میدان الکتریکی پالسی، آب گوجه فرنگی، اسید اسکوربیک، مدل‌های ریاضی

مقدمه

گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) به دلیل داشتن ارزش غذایی بالا و میزان پایین کالری به عنوان یکی از پر مصرف ترین محصولات کشاورزی به شمار می‌رود (۴ و ۳۱). این میوه منبع غنی از ترکیبات ضد اکسایشی^۱ مانند اسید اسکوربیک و کارتنوئیدها می‌باشد. از این رو، مصرف گوجه فرنگی و فراورده‌های آن در کاهش خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی - عروقی و انواع سرطان‌ها موثر است (۳۰). در کنار ارزش غذایی بالا، کیفیت و ظاهر محصولات تولید شده از گوجه فرنگی مانند رنگ قرمز، عطر مطلوب، اسیدیته پایین و پایداری ظاهری از مهم ترین عوامل تاثیرگذار بر پذیرش و جلب مشتری می‌باشند (۳۱). بنابراین انتخاب روش صحیح فراوری این ماده غذایی امری حائز اهمیت است.

فراوری حرارتی یکی از مرسوم ترین روش‌های مورد استفاده در تولید محصولات مختلف غذایی است. ویتامین‌ها یکی از حساس ترین ترکیبات غذایی نسبت به شرایط فرایند حرارتی می‌باشند. حرارت‌دهی ملایم از طریق واکنش میان پروتئین‌ها و قندهای احیا می‌تواند موجب بروز واکنش میلارد و در نتیجه قهوه‌ای شدن رنگ محصول و تخریب اسیدهای آمینه گردد (۵). از طرفی طی فراوری حرارتی، تخریب رنگدانه‌های موجود در محصولات غذایی مانند کلروفیل‌ها، آنتوسیانین‌ها و کارتنوئیدها در

فراورده‌های حاصل از میوه‌جات موجب تغییر رنگ محصول می‌شود (۵). از این رو، روش‌های مختلف فراوری مواد غذایی از جمله استفاده از امواج مادون قرمز^۲ (IR) و میدان الکتریکی پالسی^۳ (PEF) جهت کاهش و یا حذف محدودیت‌های روش‌های معمول تیمار حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

امواج IR که بخشی از طیف امواج الکترومغناطیس را شامل می‌شوند، دارای طول موجی بین ۰/۷۸ تا ۱۰۰۰ میکرومتر می‌باشند (۲۸). این امواج به سه دسته مادون قرمز نزدیک^۴ (۰/۷۸ تا ۱/۴ میکرومتر)، متوسط^۵ (۱/۴ تا ۳ میکرومتر) و دور^۶ (۳ تا ۱۰۰۰ میکرومتر) تقسیم می‌شوند. امواج FIR به دلیل توانایی بیش تر جذب شدن توسط ترکیبات غذایی، بیش ترین کاربرد را در صنعت غذا دارا می‌باشند (۹). در واقع، انرژی این امواج توسط پیوند میان هیدروژن - اکسیژن موجود در مولکول‌های آب جذب شده و سپس آب با بسامد مشابه با پرتو، شروع به ارتعاش می‌کند که نتیجه‌ی آن تبخیر آب است (۱۰) و (۱۳). این امر، موجب افزایش کارایی استفاده از IR با هدف حرارت‌دهی انتخابی آب بدون تاثیر بر سایر اجزای مواد غذایی می‌گردد. از مزایای استفاده از حرارت‌دهی سریع با استفاده از امواج مادون قرمز سهولت کاربرد، نفوذ مستقیم حرارت، عدم تماس

2. Infrared Radiation
3. Pulsed Electric Field
4. Near-IR Radiation (NIR)
5. Mid-IR Radiation (MIR)
6. Far-IR Radiation (FIR)

1. Antioxidant

در PEF، بر اثر وقوع پدیده الکتروپوراسیون طی زمان بسیار کوتاهی، در دامنه چند میکروثانیه تا چند میلی ثانیه، تخریب سلول‌ها و نیز تغییر در ساختار آنزیم‌ها رخ می‌دهد (۱۷ و ۲۷)؛ چرا که غشای سلولی بسته به میزان محتوای لیپیدی، دارای قدرت دی‌الکتریک متفاوتی است؛ از این جهت، اعمال میدان الکتریکی پالسی موجب افزایش قدرت دی‌الکتریک طبیعی سلول و تغییر در آرایش یون‌های اطراف دیواره‌ی سلولی می‌گردد. نتیجه‌ی این تغییرات تشکیل حفرات با اندازه‌های مختلف در غشای سلول و خروج محتویات درون سلول به محیط اطراف است (۶ و ۱۲). همچنین افزایش ناگهانی دمای محصول غذایی که به حرارت‌دهی اهمیت نسبت داده می‌شود خود به عنوان عاملی مهم در نابودسازی میکروارگانیسم‌ها و غیرفعال‌سازی آنزیم‌ها معرفی می‌شود (۲۰).

کنترل فعالیت آنزیمی آب میوه‌ها به منظور افزایش کیفیت و مدت زمان ماندگاری محصول انجام می‌گیرد. آنزیم پکتین متیل استراز^۳ که به‌طور طبیعی در گیاهان عالی وجود دارد در فرایند تکامل فیزیولوژیکی گیاه مانند انبساط سلول‌ها در زمان رشد و رسیدگی میوه‌ها و سبزیجات و نیز در بروز ویژگی‌های مختلف محصول شامل حالت ابری، ویسکوزیته و پایداری آب میوه‌ها نقش دارد (۱۸). با توجه به این که مقاومت حرارتی این آنزیم بیش‌تر از مقاومت حرارتی میکروارگانیسم‌های عامل فساد در محصولات با اسیدیته بالا است (۱۸)، غیرفعال شدن آن به معنی از بین رفتن میکروارگانیسم‌های هدف موجود در این دسته از محصولات غذایی می‌باشد. با توجه به مقاومت حرارتی بالای این آنزیم نیاز به فرایند PEF با شدت بالاتر و یا ترکیب آن با یک فرایند حرارتی ملایم و سریع مانند IR به منظور افزایش میزان

مستقیم منبع حرارتی و ماده غذایی، کوتاه‌تر بودن زمان فرایند، عدم آلودگی زیست محیطی و نوین بودن این روش در فراوری آب میوه‌ها جهت حفظ بیش‌تر ترکیبات مغذی و خواص فیزیکی محصول می‌باشد (۲، ۲۸ و ۳۴). استفاده از IR در صنعت غذا جهت خشک کردن (۲۴ و ۲۵)، پخت (۷ و ۳۲)، برشته کردن (۳۳)، رفع انجماد (۱۵ و ۲۹)، آنزیم‌بری (۳۶)، غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها (۱۹ و ۲۸) و پاستوریزاسیون آب میوه‌ها (۲ و ۳۴) مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این روش در صنایع غذایی، پاستوریزاسیون محصولات لبنی و آب میوه‌ها است (۲۱). مطالعات نشان داد که افزایش سریع دمای ماده غذایی (کوتاه بودن مرحله افزایش دمای محصول^۱) طی حرارت‌دهی آب لیمو ترش و آب پرتقال با استفاده از امواج مادون قرمز موجب حفظ بیش‌تر محتوای اسید اسکوربیک در نمونه حرارت‌دهی شده با استفاده از IR نسبت به فراوری آن به روش مرسوم (حرارت‌دهی در حمام آب گرم) شد (۲ و ۳۴). بنابراین، IR به تنهایی و یا در کنار سایر روش‌های فراوری حرارتی و غیرحرارتی جهت تولید محصولی با کیفیت بالا استفاده می‌شود.

در سیستم مداوم یا غیرمداوم PEF، ماده غذایی مایع به ترتیب بین دو الکتروود قرار گرفته یا به کمک پمپ از میان آن دو عبور داده می‌شود. در این شرایط محصول، برای مدت زمان کوتاهی در معرض یک میدان الکتریکی پالسی کنترل‌شده با ولتاژ بالا (تا 70 kV/cm) قرار داده می‌شود (۸). در واقع، انتقال میدان الکتریکی پالسی از طریق دو الکتروود در تماس مستقیم با محصول غذایی انجام می‌گیرد که نتیجه‌ی آن وقوع پدیده الکتروپوراسیون^۲ و افزایش سریع دمای ماده غذایی است.

1. Come Up Time (CUT)
2. Electroporation

3. Pectin Methylestrase

غیرفعال‌سازی این آنزیم می‌باشد (۳). از این جهت، در این مطالعه با طراحی و ساخت سیستم مداوم PEF مجهز به امواج IR، به تاثیر افزایش دمای آب گوجه فرنگی حین فراوری با استفاده از PEF بر محتوای اسید اسکوربیک پرداخته شد. همچنین با استفاده از مدل‌های ریاضی و سینتیکی روند تغییر محتوای این ویتامین طی فراوری مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی آب گوجه فرنگی: پس از شست و شو، پوره گوجه فرنگی (واریته Red cloud) تهیه شده با استفاده از صافی (مش ۱۷۰) صاف گردید. سپس آب گوجه فرنگی تهیه شده، بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۱۱۱۲ (۱۳۸۶)، بلافاصله جهت انجام آزمون‌های فیزیکی و شیمیایی فراوری شد.

طراحی و ساخت دستگاه مداوم PEF مجهز به امواج IR: شکل (۱) سیستم مداوم پیش‌حرارت‌دهی ماده غذایی مایع با استفاده از امواج IR و میدان الکتریکی پالسی را نشان می‌دهد. در این دستگاه، پمپ پیستونی مجهز به چهار سرنگ (حجم ۶۰ میلی لیتر) و با قابلیت تنظیم دبی جهت انتقال آب میوه به محفظه اصلی فرایند طراحی و ساخته شد. جهت ساخت پمپ از یک موتور با توان ۱۲ وات (با توان نامی ۶۰ وات) به منظور تامین نیروی محرکه سیستم استفاده شد. انرژی الکتریکی مورد نیاز سیستم نیز توسط یک منبع تغذیه صنعتی با ولتاژ ۱۲ ولت و شدت جریان ۱۰ آمپر تامین شد. جهت افزایش دمای آب میوه از ۳۰ درجه سانتی‌گراد به دماهای ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد از لامپ مادون قرمز با قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. شدت انتقال حرارت از لامپ به نمونه معادل ۷۹۶/۱۸ کیلووات در واحد سطح تخمین زده شد. این لامپ در محفظه شیشه‌ای

دو لوله‌ای قرار داده شد. جهت کنترل دمای نمونه و دستیابی به دماهای مورد نظر از دستگاه کنترل‌کننده دما مجهز به ترموکوپل نوع k استفاده شد.

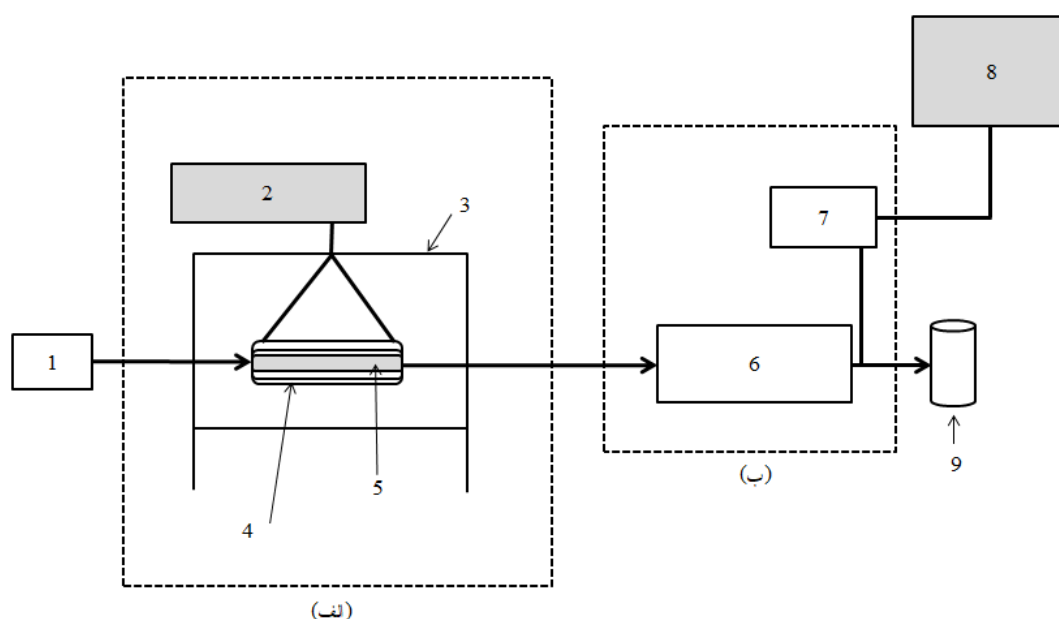
مولد پالس به گونه‌ای طراحی شد که قابلیت تولید پالس‌هایی با ولتاژ بالا را با استفاده از برق شهری (ولتاژ معمولی ۲۲۰ ولت) داشت. در این پژوهش، موج مربعی شکل - دوقطبی به عرض ۱ میلی‌ثانیه و فرکانس^۲ ثابت ۳۲ هرتز مورد استفاده قرار گرفت. در محفظه فراوری این دستگاه از دو الکتروود از جنس استیل ضد زنگ (۳۱۴) به طول و ضخامت به ترتیب ۱۰ و ۰/۵ میلی‌متر استفاده شد. دو الکتروود به صورت موازی با فاصله مشخص ۰/۵۵ میلی‌متر روبه‌روی هم قرار داده شدند. شدت میدان الکتریکی (E) به صورت نسبت اختلاف پتانسیل الکتریکی (kV) برای دو الکتروود که به فاصله (d) از هم قرار دارند، تعیین می‌گردد. از این جهت با تنظیم ولتاژ خروجی دستگاه، میدان الکتریکی پالسی با شدت‌های ۲۲/۷۳، ۲۷/۲۷، ۳۱/۸۲ و ۳۶/۳۶ کیلوولت - سانتی‌متر در بازه زمانی ۱۱۷۳ تا ۳۵۲۰ میکروثانیه به محصول اعمال شد.

به منظور مطالعه تاثیر دما بر خواص فیزیکوشیمیایی محصول طی فراوری با استفاده از PEF، حرارت‌دهی مقدماتی آب گوجه فرنگی با عبور نمونه از محفظه لامپ مادون قرمز انجام گرفت. با استفاده از دستگاه کنترل‌کننده دما، دمای آب گوجه فرنگی از دمای اولیه ۳۰ به ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. سپس، نمونه‌های پیش‌حرارت‌دهی شده در معرض PEF با شدت‌های مختلف قرار گرفتند. به منظور کاهش میزان ورود هوا، آب گوجه فرنگی از قسمت پایین محفظه به فضای بین دو الکتروود وارد تزریق شد. اندازه‌گیری دمای نمونه با قرار دادن ترموکوپل نوع K با ضخامت یک

ملاپمتر (دمای زیر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) جهت سالم‌سازی این محصول توصیه می‌گردد (۲۲). بنابراین در این پژوهش، شرایط فراوری این آب میوه به گونه‌ای تنظیم شد که دمای نهایی محصول به بیش از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش نیابد.

میلی‌متر در نقطه خروجی نمونه از میان الکترودها انجام گرفت. نمونه‌ها بلافاصله پس از فرایند حرارتی، در حمام آب یخ تا رسیدن به دمای محیط خنک شدند.

با توجه به این که آب گوجه فرنگی محصولی با اسیدیته بالا ($\text{pH} < 4/6$) است، اعمال فرایند حرارتی



شکل ۱- نمای شماتیک (الف) دستگاه پیش‌حرارت‌دهی با استفاده از امواج مادون قرمز و (ب) جهت فراوری آب میوه: ۱- پمپ، ۲- کنترل‌کننده دما، ۳- محفظه فلزی، ۴- لامپ مادون قرمز، ۵- محفظه شیشه‌ای، ۶- محفظه فراوری PEF، ۷- دیتالاگر، ۸- رایانه، ۹- نمونه فراوری شده

Figure 1. Schematic diagram of the continuous system of IR pre-heating (a) and PEF apparatus (b): 1. Pump, 2- thermocontroller, 3- metallic chamber, 4- IR lamp, 5- glass chamber, 6- PEF processing chamber, 7- data logger, 8- computer, 9- processed sample.

میلی‌گرم اسیداسکوربیک در ۱۰۰ میلی‌لیتر نمونه بر اساس معادله (۱) محاسبه شد:

معادله ۱.

حجم معرف مصرفی $0/88 =$ میلی‌گرم اسید اسکوربیک در ۱۰۰ میلی‌لیتر نمونه

جهت آماده‌سازی محلول ید ابتدا ۵ گرم پتاسیم یدید و $0/268$ گرم پتاسیم یدات را در بالن ۵۰۰ میلی‌لیتری با ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به‌خوبی حل شد

روش اندازه‌گیری اسید اسکوربیک: جهت اندازه‌گیری میزان اسیداسکوربیک از روش تیتراسیون ید (یدومتری) استفاده شد (۱۶). در این روش ابتدا ۲۰ میلی‌لیتر آب گوجه فرنگی را به یک بالن حجمی ۲۵۰ میلی‌لیتری انتقال داده و با ۱۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شد. پس از افزودن یک میلی‌لیتر محلول شاخص نشاسته ۱ درصد، محلول حاصل با استفاده از محلول ید تا ظهور رنگ آبی سیاه تیترا شد. میزان

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{t}{t_c}\right)^{-\left(\frac{E-E_c}{k_H}\right)}$$

معادله ۶.

در این معادله t زمان (μs) فرایند PEF، t_c (μs) و E_c (kV/cm) به ترتیب سطوح بحرانی t و E برون‌یابی شده برای A برابر 100% و k_H ثابت معادله (kV/cm) می‌باشد.

طرح آماری و روش آنالیز نتایج: در این بررسی اثر دمای آب گوجه فرنگی ورودی به محفظه PEF، شدت PEF و زمان فراوری بر اسید اسکوربیک در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی بررسی شد. جهت آنالیز نتایج به‌دست‌آمده از نرم افزار SAS نسخه ۹.۱ استفاده شد. میانگین‌های نتایج به دست آمده به روش دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد مقایسه شدند. نرم افزار Excel 2010، Curve Expert نسخه ۳.۱ و Matlab R2013b جهت آنالیز و برازش داده‌ها با مدل‌های ریاضی، رسم نمودارها و جدول‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

همچنین صحت برازش مدل‌ها بر مبنای ضریب تبیین R^2 ، خطای استاندارد SE ، فاکتور اریب B_f و فاکتور صحت A_f به ترتیب با استفاده از معادلات (۷) تا (۱۰) تعیین شد (۳۵):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{pi} - X_{ei})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{pi} - \bar{X})^2}$$

معادله ۷.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{pi} - X_{ei})^2}{N-1}}$$

معادله ۸.

$$A_f = 10^{\left(\sum \log(X_{pi}/X_{ei})/n\right)}$$

معادله ۹.

و سپس به محلول حاصل ۳۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۳ مولار افزوده و با آب مقطر به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد.

مدل‌های ریاضی و سینتیکی جهت مطالعه تغییرات محتوای اسید اسکوربیک: تاثیر مدت زمان فراوری PEF بر اسید اسکوربیک موجود در محصول با استفاده از معادله نیمه لگاریتمی درجه اول (۲) مورد مطالعه قرار گرفت:

$$\ln\left(\frac{A}{A_0}\right) = -k t$$

معادله ۲.

در این معادلات A_0 و A به ترتیب بیان‌گر میزان اولیه و باقی‌مانده (پس از فراوری) این ویتامین، k ثابت سرعت واکنش و t زمان فراوری محصول (μs) می‌باشند. به منظور مطالعه‌ی اثر شدت میدان الکتریکی بر میزان تغییرات محتوای اسید اسکوربیک از معادله‌ی نیمه لگاریتمی درجه اول (۳) Fermi، (۴) Simplified-Hulsheger و (۵) استفاده شد (۱۱ و ۱۴):

$$\ln\left(\frac{A}{A_0}\right) = -k.E$$

معادله ۳.

$$A = \frac{A_0}{1 + e^{(E-E_h)/c}}$$

معادله ۴.

$$A = -A_0 b_e.(E - E_c)$$

معادله ۵.

E شدت میدان الکتریکی (kV/cm)، E_h سطح بحرانی E جهت رسیدن به 50% میزان فعالیت A ، c نشانگر شیب منحنی اطراف E_h (kV/cm)، b_e ثابت معادله (cm/kV) و E_c سطح بحرانی E برون‌یابی شده برای A برابر 100% است.

همچنین تاثیر هم‌زمان شدت میدان الکتریکی و زمان فراوری بر میزان تخریب این ویتامین در آب گوجه فرنگی با استفاده از معادله Hulsheger (۶) مورد مطالعه قرار گرفت:

1. Coefficient of Determination
2. Standard Error
3. Bias Factor
4. Accuracy Factor

نمونه‌های فراوری شده با استفاده از امواج IR به میزان چشمگیری کاهش یافت ($P < 0.05$).

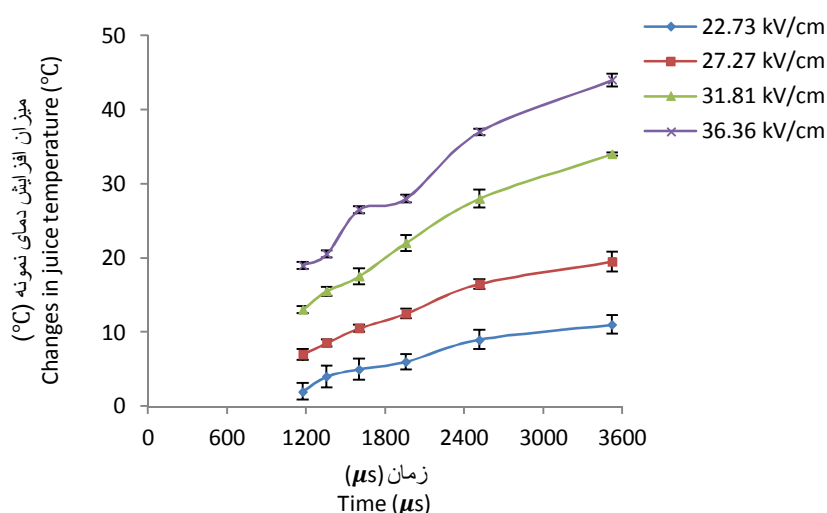
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۲ مشاهده شد که طی فراوری با PEF دمای آب گوجه فرنگی بر اثر وقوع حرارت‌دهی اهمیت، افزایش یافت. به طور کلی می‌توان بیان نمود که اعمال شدت بالاتر میدان الکتریکی پالسی طی زمان طولانی‌تر موجب افزایش بیش‌تر دمای محصول گردید ($P < 0.05$). محققین طی فراوری آب پرتقال با استفاده از PEF نیز به نتیجه‌ای مشابه دست یافتند (۱). همچنین بدون در نظر گرفتن دمای ورودی نمونه، نرخ افزایش دمای نمونه خروجی از محفظه PEF در شرایط مشخص (شدت میدان الکتریکی و زمان فراوری PEF)، مشابه و ثابت بود. برای مثال، پس از اعمال PEF با شدت kV/cm ۲۳/۷۳ به مدت ۱۱۷۳ میکروثانیه همواره دو درجه سانتی‌گراد افزایش در دمای نمونه با دماهای ورودی متفاوت (۳۰، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد.

$$B_f = 10^{(\sum \log(X_{pi}/X_{ei})/n)} \quad \text{معادله ۱۰}$$

در این معادلات X_{xi} ، X_{pi} و \bar{X} به ترتیب نشانگر مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های ریاضی، مقدار اندازه‌گیری شده هر ویژگی و فیزیکوشیمیایی طی آزمایشات، میانگین مقادیر و تعداد کل مشاهدات است.

نتایج و بحث

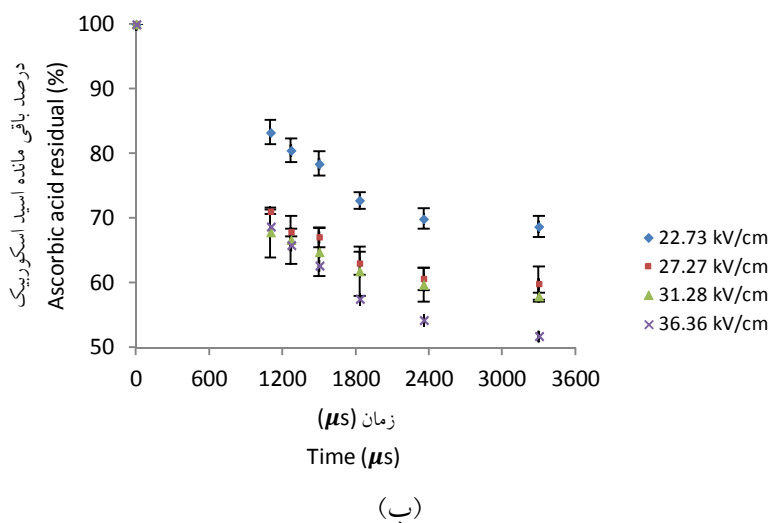
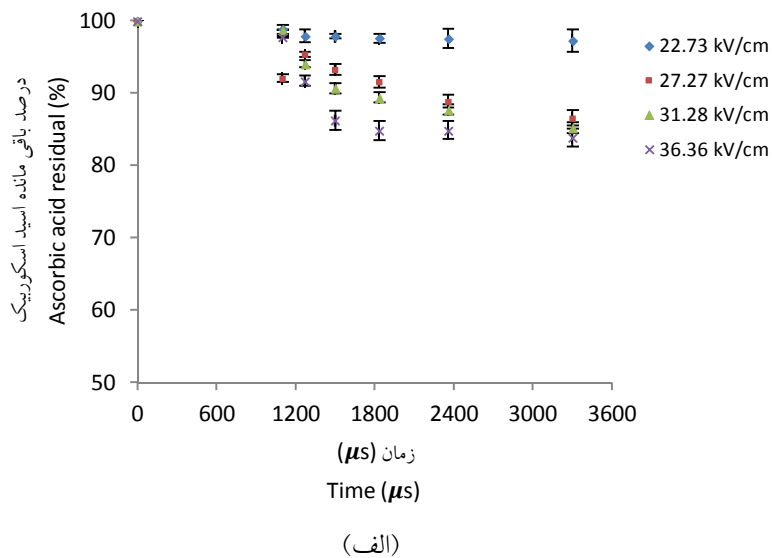
تأثیر فراوری بر محتوای اسیداسکوربیک موجود در آب گوجه فرنگی: در این بررسی میزان اسید اسکوربیک آب گوجه فرنگی تازه برابر $22/97 \pm 1/09$ میلی‌گرم در هر ۱۰۰ میلی‌لیتر عصاره بود. پیش‌حرارت‌دهی نمونه با استفاده از امواج IR تا رسیدن به دماهای ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب موجب کاهش محتوای این ویتامین به میزان $11/41 \pm 0/67$ ، $16/39 \pm 1/62$ و $19/10 \pm 0/74$ درصد شد. در مقایسه با آبمیوه تازه، محتوای این ویتامین در

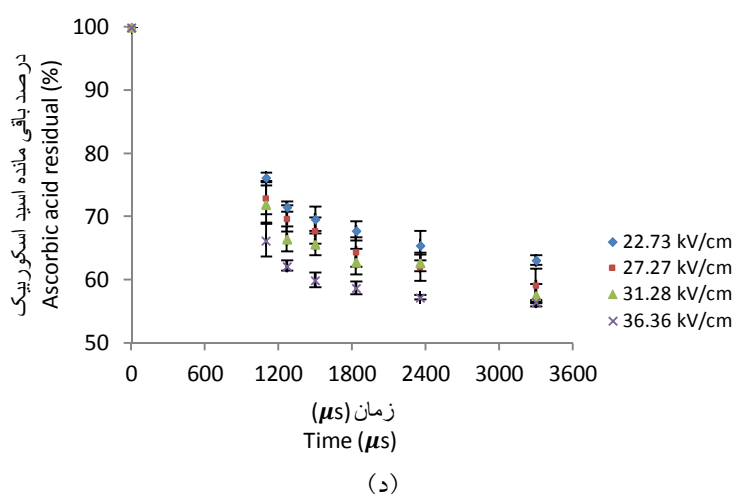
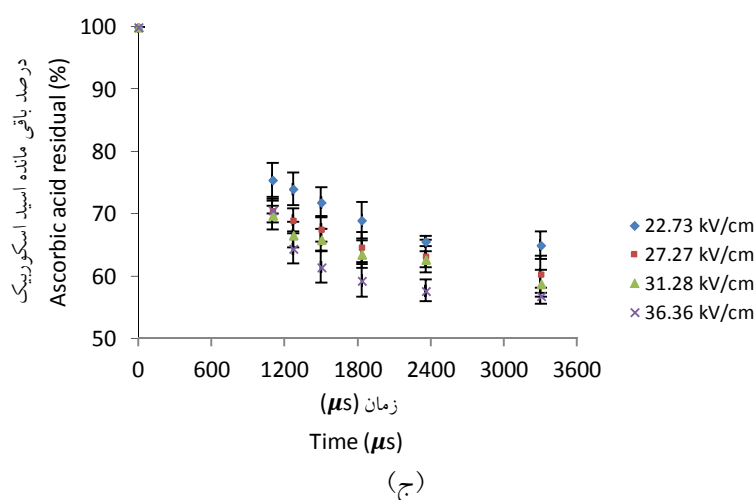


شکل ۲- تأثیر اعمال میدان الکتریکی پالسی با شدت‌های مختلف بر تغییرات دمای آب میوه فراوری شده
Figure 2. The effect of applying different PEF strength on the juice temperature

آب گوجه فرنگی تا رسیدن به دمای ۵۰ درجه سانتی گراد موجب تغییر محتوای این ویتامین در دامنه ۲۳/۸۵ تا ۴۳/۵۰ درصد شد. این موضوع حساسیت حرارتی بالای این ترکیب و اهمیت کنترل فراوری حرارتی حین تولید محصولات غذایی را نشان می‌دهد. سایر محققین نیز بیان داشتند که استفاده از PEF جهت فراوری آب میوه‌های نسبت به روش مرسوم حرارتی موجب حفظ بیشتر این ویتامین شد (۲۳ و ۲۶).

شکل (۳) تاثیر هم‌زمان دمای ورودی آب میوه و نیز شرایط مختلف PEF را بر محتوای اسید اسکوربیک باقیمانده نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان بیان نمود که میزان این ویتامین با افزایش شدت فرایند به میزان چشمگیری تغییر یافت ($P < 0.05$). افزایش زمان و شدت میدان الکتریکی اعمال شده بر نمونه با دمای اولیه ۳۰ درجه سانتی گراد موجب ۱/۲۲ تا ۱۶/۱۷ درصد تغییر در محتوای ویتامین شد. این در حالی است که پیش‌حرارت‌دهی





شکل ۳- تاثیر دمای ورودی (الف، ب، ج و د به ترتیب دماهای ۳۰، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سانتی گراد) و شرایط متفاوت فراوری به روش PEF بر محتوای اسید اسکوربیک موجود در آب گوجه فرنگی

Figure 2. The effect of inlet temperature (a, b, c & d respectively 30, 40, 45 and 50°C) and different PEF processing conditions on ascorbic acid content in tomato juice

افزایش دمای اولیه نمونه (۳۰ درجه سانتی گراد) به دماهای ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سانتی گراد به طور کلی موجب افزایش $0.1 \pm 3/14$ برابری در ثابت سرعت واکنش تخریب این ترکیب شیمیایی شد ($P < 0.05$). این در حالی است که با ثابت در نظر گرفتن دمای اولیه آب میوه، تغییر شدت میدان الکتریکی مورد استفاده در تیمار PEF موجب تغییر قابل ملاحظه‌ای در نرخ کاهش اسید اسکوربیک نشد.

مدلسازی تخریب اسید اسکوربیک طی فراوری غیرحرارتی: مدلسازی تاثیر زمان PEF بر محتوای اسید اسکوربیک: نتایج حاصل از تخمین ثابت سرعت واکنش تخریب اسید اسکوربیک با استفاده از معادله نیمه لگاریتمی درجه اول طی فراوری آب گوجه فرنگی به روش PEF در جدول (۱) نشان داده شده است. آنالیز آماری نتایج به دست آمده نشان داد که اعمال PEF با شدت‌های مختلف موجب تغییر نرخ تخریب این ویتامین شد ($P < 0.05$). همچنین

جدول ۱- ثابت سرعت واکنش نیمه لگاریتمی تخریب اسید اسکوربیک موجود در آب گوجه فرنگی در زمان‌های مختلف فراوری PEF
 Table 1. First- order semi-logarithmic constant reaction rate of ascorbic acid degradation in tomato juice during PEF treatment at different processing time

B _f	A _f	SE	R ²	ثابت سرعت واکنش Reaction rate constant (μs ⁻¹)	شدت میدان الکتریکی Electric field strength (kV/cm)	دما Temperature (°C)
0.956	1.180	0.000	0.80	8.56×10 ⁻⁶ d	22.73	30
1.170	1.308	0.002	0.92	5.13×10 ⁻⁵ cd	27.27	
1.193	1.419	0.003	0.87	5.54×10 ⁻⁵ cd	31.81	
1.128	1.460	0.010	0.73	6.46×10 ⁻⁵ c	36.36	
0.954	1.105	0.012	0.89	1.21×10 ⁻⁴ b	22.73	40
0.930	1.114	0.040	0.79	1.53×10 ⁻⁴ ab	27.27	
0.922	1.159	0.059	0.72	1.54×10 ⁻⁴ ab	31.81	
0.931	1.103	0.039	0.87	1.97×10 ⁻⁴ a	36.36	
0.959	1.141	0.025	0.81	1.27×10 ⁻⁴ b	22.73	45
0.931	1.143	0.038	0.79	1.46×10 ⁻⁴ ab	27.27	
0.927	1.156	0.045	0.76	1.49×10 ⁻⁴ ab	31.81	
0.924	1.163	0.071	0.71	1.64×10 ⁻⁴ ab	36.36	
0.924	1.134	0.027	0.81	1.34×10 ⁻⁴ b	22.73	50
0.933	1.127	0.030	0.84	1.56×10 ⁻⁴ ab	27.27	
0.930	1.149	0.041	0.79	1.56×10 ⁻⁴ ab	31.81	
0.920	1.167	0.076	0.68	1.60×10 ⁻⁴ ab	36.36	

طی فراوری با استفاده از PEF ارائه شده است (R² = ۰/۹۴). بیش‌تر بودن ضریب دما در این معادله نسبت به ضریب شدت میدان الکتریکی را می‌توان به تاثیر بیش‌تر فرایند حرارتی بر میزان کاهش محتوای اسید اسکوربیک موجود در نمونه نسبت داد.

ضریب تبیین، خطای استاندارد، A_f و B_f محاسبه شده نیز نشان‌گر کارایی نسبی این مدل در توصیف روند تغییر محتوای این ویتامین نسبت به زمان اعمال PEF است. از این رو، معادله (۱۱) جهت بیان وابستگی میان ثابت سرعت واکنش تخریب این ویتامین، دمای اولیه نمونه و نیز شدت میدان الکتریکی

$$k = -0.001086 + (4.83 \times 10^{-5} \times T) + (7.89 \times 10^{-6} \times E) - (4 \times 10^{-7} \times T^2) - (1.12 \times 10^{-7} \times T \times E) \quad \text{معادله ۱۱}$$

تخریب اسید اسکوربیک طی فراوری آب میوه طی زمان فراوری با PEF است:

معادله (۱۲) حاصل ادغام معادله (۱۱) و معادله نیمه لگاریتمی درجه اول، جهت پیش‌بینی چگونگی

$$\ln\left(\frac{A}{A_0}\right) = -t \times [-0.001086 + (4.83 \times 10^{-5} \times T) + (7.89 \times 10^{-6} \times E) - (4 \times 10^{-7} \times T^2) - (1.12 \times 10^{-7} \times T \times E)] \quad \text{معادله ۱۲}$$

سرعت واکنش تخریب اسید اسکوربیک جدول (۲) نمایش داده شد. نتایج نشان داد که طولانی‌تر شدن

مدل‌سازی تاثیر شدت میدان الکتریکی پالسی بر محتوای اسید اسکوربیک: نتایج حاصل از تخمین ثابت

تخمین زده شده و نیز نزدیکی مقادیر A_f و B_f به یک، اثبات کننده کارایی بالای این مدل در توصیف تاثیر شدت میدان الکتریکی بر محتوای اسید اسکوربیک طی فراوری آب میوه با استفاده از PEF است.

فرایند PEF موجب افزایش معنادار ثابت سرعت واکنش گردید ($P < 0/05$). به طور کلی، افزایش دمای اولیه آب میوه موجب چهار برابر شدن نرخ تخریب این ویتامین شد ($P < 0/05$). بالا بودن ضریب همبستگی محاسبه شده و پایین بودن خطای استاندارد

جدول ۲- ضریب معادله نیمه لگاریتمی درجه اول طی تخریب اسید اسکوربیک موجود در نمونه فراوری شده در شدت های مختلف PEF
Table 2. Coefficient of first- order semi-logarithmic model during ascorbic acid degradation in the processed sample during different PEF strength

B_f	A_f	SE	R^2	ثابت سرعت واکنش Reaction rate constant (μs^{-1})	زمان فراوری Processing time (μs)	دما Temperature ($^{\circ}C$)
1.023	1.126	0.000	0.89	0.0005 ^e	1173	30
1.151	1.273	0.001	0.83	0.0023 ^e	1354	
1.292	1.488	0.004	0.74	0.0039 ^{de}	1600	
1.274	1.445	0.005	0.76	0.0044 ^{cde}	1956	
1.263	1.473	0.005	0.78	0.0047 ^{bcde}	2514	
1.257	1.501	0.007	0.77	0.0053 ^{abc}	3520	
1.002	1.044	0.002	0.99	0.0115 ^{abcd}	1173	40
1.000	1.043	0.002	0.99	0.0136 ^{abcd}	1354	
1.004	1.055	0.003	0.99	0.0136 ^{abcd}	1600	
1.014	1.096	0.005	0.97	0.0157 ^a	1956	
1.015	1.130	0.007	0.94	0.0170 ^a	2514	
1.027	1.158	0.008	0.93	0.0180 ^a	3520	
0.984	1.062	0.003	0.98	0.0112 ^a	1173	45
0.993	1.027	0.001	0.99	0.0128 ^a	1354	
0.993	1.033	0.001	0.99	0.0138 ^a	1600	
0.989	1.048	0.002	0.99	0.0150 ^{abc}	1956	
0.981	1.079	0.006	0.97	0.0154 ^{abc}	2514	
0.980	1.072	0.007	0.97	0.0164 ^{abc}	3520	
0.995	1.041	0.001	0.99	0.0113 ^a	1173	50
0.988	1.035	0.001	0.99	0.0131 ^{abcd}	1354	
0.983	1.047	0.002	0.98	0.0139 ^{abcd}	1600	
0.987	1.061	0.003	0.98	0.0149 ^{ab}	1956	
0.979	1.091	0.008	0.95	0.0154 ^{abcd}	2514	
0.975	1.087	0.011	0.94	0.0167 ^{abcd}	3520	

است ($R^2 = 0/95$). با توجه به ضرایب موجود در این معادله، تاثیر بسیار بیش تر دمای ورودی آب میوه بر

معادله (۱۳) نشان دهنده ارتباط میان دمای ورودی نمونه به محفظه PEF، زمان فراوری غیرحرارتی آب میوه و ثابت سرعت واکنش تخریب اسید اسکوربیک

کاهش محتوای اسید اسکوربیک نسبت به زمان فراوری PEF مشهود است.

$$k = -0.093 + (1.75 \times 10^{-6} \times t) + (4.63 \times 10^{-3} \times T) - (1.19 \times 10^{-8} \times t \times T) - (5.18 \times 10^{-5} \times T^2) \quad \text{معادله ۱۳.}$$

معادله (۱۴) با جایگذاری معادله (۱۳) در معادله ویتامین طی فراوری آب میوه در شدت‌های مختلف نیمه لگاریتمی درجه اول به منظور مطالعه تخریب این PEF، ارائه گردید:

$$\ln\left(\frac{A}{A_0}\right) = -E \times [-0.093 + (1.75 \times 10^{-6} \times t) + (4.63 \times 10^{-3} \times T) - (1.19 \times 10^{-8} \times t \times T) - (5.18 \times 10^{-5} \times T^2)] \quad \text{معادله ۱۴.}$$

جدول ۳- تاثیر اعمال شدت‌های مختلف PEF بر ضرایب معادله Simplified Hulsheger طی تخریب اسید اسکوربیک موجود در آب گوجه فرنگی

Table 3. The effect of application of various PEF strength on coefficients of Simplified Hulsheger during ascorbic acid degradation in tomato juice

B _f	A _f	SE	R ²	E _c (kV/cm)	b _e (cm/kV)	زمان فراوری Processing time(μs)	دما Temperature (°C)
1.002	1.003	0.003	0.89	1855.33 ^a	0.0005 ^b	1173	30
1.008	1.013	0.015	0.84	462.00 ^b	0.0022 ^b	1354	
0.994	1.024	0.034	0.75	280.94 ^{bc}	0.0036 ^b	1600	
1.009	1.027	0.036	0.77	250.78 ^{bc}	0.0041 ^b	1956	
0.992	1.021	0.037	0.79	234.59 ^{bc}	0.0043 ^b	2514	
1.009	1.034	0.043	0.77	209.19 ^{bc}	0.0049 ^b	3520	
0.966	1.001	0.038	0.94	105.38 ^c	0.0095 ^a	1173	40
1.008	0.983	0.036	0.95	98.02 ^{bc}	0.0100 ^a	1354	
0.987	1.010	0.029	0.97	91.59 ^{bc}	0.0110 ^a	1600	
1.010	0.987	0.025	0.98	81.70 ^{bc}	0.0120 ^a	1956	
0.983	1.008	0.026	0.98	76.80 ^{bc}	0.0130 ^a	2514	
1.001	0.966	0.024	0.99	73.68 ^{bc}	0.0130 ^a	3520	
1.000	1.051	0.044	0.96	105.56 ^{bc}	0.0126 ^a	1173	45
1.003	1.046	0.041	0.96	95.25 ^{bc}	0.0120 ^a	1354	
0.996	1.033	0.028	0.98	89.91 ^{bc}	0.0117 ^a	1600	
0.999	1.023	0.021	0.98	83.93 ^{bc}	0.0110 ^a	1956	
0.962	1.040	0.019	0.98	81.77 ^{bc}	0.0100 ^a	2514	
0.996	1.028	0.028	0.97	77.49 ^{bc}	0.0093 ^a	3520	
1.002	1.017	0.017	0.90	105.91 ^c	0.0094 ^a	1173	50
1.027	1.054	0.023	0.90	93.68 ^{bc}	0.0100 ^a	1354	
0.958	1.029	0.028	0.90	89.17 ^{bc}	0.0110 ^a	1600	
0.995	1.037	0.034	0.90	84.01 ^{bc}	0.0120 ^a	1956	
0.949	1.052	0.045	0.90	81.50 ^{bc}	0.0120 ^a	2514	
0.999	1.060	0.052	0.90	76.24 ^{bc}	0.0127 ^a	3520	

می باشد.

به طور کلی می توان بیان نمود که ثابت این معادله (b_e) برخلاف زمان فراوری، تحت تاثیر افزایش دمای ورودی قرار گرفت ($P < 0/05$). آنالیز آماری نتایج به دست آمده از برآزش این مدل با محتوای اسید اسکوربیک موجود در آب گوجه فرنگی نشان دهنده مطلوبیت این مدل در مطالعه روند تغییرات این ترکیب شیمیایی است.

معادله (۱۵) با ضریب تبیین بالای ۰/۹۵ جهت نمایش ارتباط میان E_c و دمای ورودی نمونه طی فراوری آب میوه در زمان های مختلف است.

$$E_c = -0.679 + (0.0034 \times T) + (2.017 \times 10^{-6} \times t) + (3.739 \times 10^{-5} \times T^2) + (1.244 \times 10^{-8} \times T \times t) \quad \text{معادله ۱۵}$$

میوه، معادله (۱۶) با ادغام معادله های Simplified-Hulsheger و (۱۵) حاصل گردید:

$$\frac{A}{A_0} = -b_e \times [-0.679 + (0.0034 \times T) + (2.017 \times 10^{-6} \times t) + (3.739 \times 10^{-5} \times T^2) + (1.244 \times 10^{-8} \times T \times t)] \quad \text{معادله ۱۶}$$

با توجه به پارامترهای آماری محاسبه شده طی برآزش داده های حاصل از اندازه گیری محتوای اسید اسکوربیک طی فراوری PEF، مدل Simplified Hulsheger به دلیل بالاتر بودن ضریب تبیین و پایین تر بودن خطای استاندارد، به عنوان مناسب ترین مدل در توصیف تخریب این ویتامین تحت تاثیر شدت PEF انتخاب شد.

مدل سازی اثر متقابل زمان و شدت PEF بر محتوای اسید اسکوربیک: اثر هم زمان شدت و زمان میدان الکتریکی پالسی بر تخریب اسید اسکوربیک با استفاده از معادله Hulsheger مورد مطالعه قرار گرفت (جدول ۵). نتایج حاصل از برآزش این مدل با داده های حاصل از اندازه گیری محتوای اسید اسکوربیک نشان داد که دمای ورودی محصول موجب کاهش معنادار ضرایب

از معادله Simplified-Hulsheger نیز جهت مطالعه تخریب اسید اسکوربیک طی فراوری آب گوجه فرنگی در شدت های مختلف PEF استفاده گردید (جدول ۳). نتایج آنالیز آماری داده های به دست آمده از برآزش این مدل با محتوای اسید اسکوربیک اندازه گیری شده نشان داد که E_c با افزایش دمای ورودی آب میوه و نیز طولانی تر شدن زمان فرایند PEF به میزان قابل توجهی کاهش یافت ($P < 0/05$). کاهش زیاد میزان این ضریب در نمونه های پیش حرارت دهی شده، در مقایسه با نمونه دارای دمای اولیه ۳۰ درجه سانتی گراد، نشانگر تاثیر نامطلوب فرایند حرارتی بر محتوای این ویتامین

با توجه به عدم امکان ارائه رابطه ای میان ثابت معادله و شرایط متفاوت اعمال شده طی فراوری آب

اثر شدت میدان الکتریکی بر روند تخریب اسید اسکوربیک با استفاده از معادله Fermi نیز مورد مطالعه قرار گرفت (جدول ۴). برخلاف زمان فراوری، دمای ورودی آب میوه به محفظه PEF تاثیر معناداری بر ضرایب a و E_h داشت ($P < 0/05$). به طوری که با افزایش دمای ورودی آب میوه و نیز طولانی تر شدن فرایند PEF به میزان قابل چشمگیری موجب کاهش E_h گردید. همچنین پیش حرارت دهی نمونه در دماهای بالاتر موجب افزایش مقادیر تخمین زده شده ضریب a معادله شد ($P < 0/05$).

توانایی بالای این مدل در توصیف تخریب اسید اسکوربیک موجود در آب گوجه فرنگی طی فراوری PEF با شدت های مختلف با توجه به ضرایب آماری قابل قبول محاسبه شده مشهود است.

موجود در این معادله شد ($P < 0.05$). با توجه به بهترین مدل جهت پیش‌بینی تخریب اسید اسکوربیک مفادیر مطلوب A_f و B_f مدل Hulsheger به‌عنوان طی فرایند پیش‌حرارت‌دهی-PEF انتخاب شد.

جدول ۴- ضرایب معادله Fermi طی مطالعه تاثیر اعمال شدت‌های مختلف PEF بر محتوای اسید اسکوربیک

Table 4. Coefficients of Fermi model during studying the effect of application of different PEF strength on ascorbic acid degradation

B_f	A_f	SE	R^2	A	E_h (kV/cm)	زمان فراوری Processing time (s)	دما Temperature (°C)
0.028	1.002	0.006	0.88	16.99 ^a	101.30 ^a	1173	30
0.019	1.004	0.003	0.98	11.23 ^a	62.67 ^{ab}	1354	
0.010	1.007	0.001	0.98	8.82 ^a	51.70 ^{abc}	1600	
0.007	1.010	0.000	0.96	9.51 ^a	51.82 ^{abc}	1956	
0.004	1.019	0.000	0.88	11.86 ^a	55.37 ^{abc}	2514	
0.028	1.028	0.000	0.83	13.35 ^a	56.30 ^{abc}	3520	
0.968	1.048	0.030	0.94	18.02 ^a	48.32 ^{bc}	1173	40
0.970	1.047	0.030	0.93	18.84 ^a	46.59 ^{bc}	1354	
0.974	1.047	0.030	0.92	18.93 ^a	44.03 ^{bc}	1600	
0.975	1.051	0.025	0.90	18.75 ^a	40.58 ^{bc}	1956	
0.978	1.057	0.030	0.86	19.64 ^a	38.51 ^{bc}	2514	
0.966	1.057	0.027	0.84	19.08 ^a	36.92 ^c	3520	
0.964	1.045	0.020	0.87	22.25 ^a	50.39 ^{abc}	1173	45
0.975	1.041	0.017	0.92	20.12 ^a	45.80 ^{bc}	1354	
0.975	1.042	0.020	0.93	19.45 ^a	43.59 ^{bc}	1600	
0.973	1.050	0.027	0.91	20.15 ^a	41.75 ^{bc}	1956	
0.969	1.063	0.042	0.88	21.76 ^a	41.75 ^{bc}	2514	
0.963	1.068	0.053	0.86	22.51 ^a	39.81 ^{bc}	3520	
0.993	1.078	0.012	0.92	19.41 ^a	48.30 ^c	1173	50
0.978	1.068	0.018	0.91	20.31 ^a	45.29 ^{bc}	1354	
0.974	1.055	0.023	0.91	20.25 ^a	43.66 ^{bc}	1600	
0.971	1.046	0.030	0.89	21.40 ^a	42.29 ^{bc}	1956	
0.966	1.040	0.047	0.86	22.36 ^a	41.49 ^{bc}	2514	
0.961	1.036	0.070	0.83	23.76 ^a	39.74 ^{bc}	3520	

معادله (۲۰) حاصل تلفیق معادلات فوق و معادله Hulsheger است:

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{t}{(3 \times 10^8 \times T)^{-3.88}} \right)^{-\frac{E - (-8.5 \times \ln(T) + 32.17)}{0.5 \times (T)^2 + 43 \times T + 1093.3}}$$

معادله ۲۰.

وابستگی دمایی ضرایب t_c ($R^2=0.91$)، E_c

($R^2=0.72$) و k_H ($R^2=0.72$) به‌ترتیب در معادلات

(۱۷)، (۱۸) و (۱۹) را نشان داده شد:

$$t_c = (3 \times 10^8 \times T)^{-3.88} \quad \text{معادله ۱۷}$$

$$E_c = -8.5 \times \ln(T) + 32.17 \quad \text{معادله ۱۸}$$

$$k_H = 0.5 \times (T)^2 + 43 \times T + 1093.3 \quad \text{معادله ۱۹}$$

جدول ۵- ضرایب مدل **Hulsheger** جهت توصیف تاثیر دمای ورودی آب میوه و شدت PEF بر میزان تخریب اسید اسکوربیک
Table 5- Coefficients of Hulsheger model in describing the effect of juice inlet temperature and PEF strength on ascorbic acid degradation

B _f	A _f	SE	R ²	k _H (cm/kV)	E _c (kV/cm)	t _c (μs)	دما Temperature (°C)
0.001	1.023	0.024	0.97	255.8 ^a	3.603 ^a	742.8 ^a	30
0.004	1.027	0.016	0.98	151.2 ^b	0.1229 ^b	192.3 ^b	40
0.007	1.022	0.010	0.99	197.4 ^b	-0.4293 ^c	101.8 ^c	45
0.006	1.025	0.0125	0.98	181.5 ^b	-0.5137 ^c	124.4 ^c	50

حرارتی بالای اسید اسکوربیک، استفاده از امواج IR و اعمال PEF با شدت بالاتر طی فراوری طولانی تر موجب افزایش دمای آب میوه و در نتیجه کاهش میزان این ویتامین گردید. بنابراین، با افزایش سریع دمای آب گوجه فرنگی با استفاده از IR و نیز کاهش شدت فرایند PEF می توان دمای آب میوه نهایی را کاهش داد که نتیجه ی این امر کاهش و کنترل میزان تخریب اسید اسکوربیک ضمن غیرفعال سازی آنزیم PME است. مدل های مختلفی به منظور پیش بینی تاثیر شرایط فراوری PEF بر میزان تخریب این ویتامین مورد استفاده قرار گرفت. از مدل نیمه لگاریتمی درجه اول جهت مطالعه تاثیر زمان فراوری بر محتوای اسید اسکوربیک استفاده شد. مناسب ترین مدل در توصیف تخریب این ویتامین تحت تاثیر شدت PEF، مدل Simplified Hulsheger (به دلیل بالاتر بودن ضریب تبیین و پایین تر بودن خطای استاندارد) بود. همچنین مدل Hulsheger به منظور بررسی تاثیر هم زمان شدت و زمان PEF مورد استفاده قرار گرفت.

نتیجه گیری

امروزه فرایند PEF به منظور سالم سازی و افزایش مدت زمان ماندگاری محصولات متنوع غذایی مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به زمان بسیار کوتاه فراوری محصولات به این روش، اغلب از تاثیر افزایش دمای ناشی از حرارت دهی اهمیت کمتری برخوردار می شود. اما با توجه به ساختار پروتئینی آنزیم PME، شاخص فراوری محصولات غذایی با اسیدیته بالا، افزایش دما می تواند موجب غیرفعال سازی بیشتر آن و در نتیجه افزایش راندمان و کارایی تولید آب میوه هایی مانند آب گوجه فرنگی طی فراوری PEF گردد. از طرف دیگر، افزایش دمای محصول می تواند موجب تخریب اسید اسکوربیک و در نتیجه افت ارزش غذایی ماده غذایی گردد. بنابراین در این پژوهش به تاثیر همزمان دو فرایند حرارتی و غیرحرارتی بر محتوای اسید اسکوربیک موجود آب گوجه فرنگی پرداخته شد. با توجه به حساسیت

منابع

1. Agcam, E., Akyıldız, A. and Evrendilek, G. A. 2014. Effects of PEF and heat pasteurization on PME activity in orange juice with regard to a new inactivation kinetic model. *Food Chemistry*, 165, 70-76.
2. Aghajanzadeh, S., Kashaninejad, M. and Ziaifar, A.M. 2016. Effect of infrared heating on degradation kinetics

of key lime juice physicochemical properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 38: 139-148.

3. Aghajanzadeh, S. and Ziaifar, A.M. 2017. A review of pectin methylesterase inactivation in citrus juice during pasteurization. *Trends in Food Science & Technology*.
4. Ágoston, J., Tóth-Horgosi, P., Kiss, T. and Taskovics, Z. T. 2017. Assessment of nutrient content of tomato hybrids for

- processing. *Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment*, 9(1): 63-69.
5. Awuah, G., Ramaswamy, H. and Economides, A. 2007. Thermal processing and quality: principles and overview. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(6): 584-602.
 6. Bazhal, M., Lebovka, N. and Vorobiev, E. 2003. Optimisation of pulsed electric field strength for electroporation of vegetable tissues. *Biosystems Engineering*, 86(3): 339-345.
 7. Braeckman, L., Ronsse, F., Hidalgo, P. C. and Pieters, J. 2009. Influence of combined IR-grilling and hot air cooking conditions on moisture and fat content, texture and colour attributes of meat patties. *Journal of Food Engineering*, 93(4): 437-443.
 8. Buckow, R., Baumann, P., Schroeder, S. and Knoerzer, K. 2011. Effect of dimensions and geometry of co-field and co-linear pulsed electric field treatment chambers on electric field strength and energy utilisation. *Journal of Food Engineering*, 105(3): 545-556.
 9. Cullen, P.J., Tiwari, B.K. and Valdramidis, V. P. 2011. *Novel thermal and non-thermal technologies for fluid foods*: Academic Press is an imprint of Elsevier.
 10. Decareau, R.V. 1985. *Microwaves in the food processing industry*: Academic Press.
 11. Elez-Martinez, P., Suarez-Recio, M. and Martin-Belloso, O. 2007. Modeling the reduction of pectin methyl esterase activity in orange juice by high intensity pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 78(1): 184-193.
 12. Evrendilek, G.A., Baysal, T., Icier, F., Yildiz, H., Demirdoven, A. and Bozkurt, H. 2012. Processing of fruits and fruit juices by novel electrotechnologies. *Food Engineering Reviews*, 4(1): 68-87.
 13. Fu, W.-R. and Lien, W. R. 1998. Optimization of far infrared heat dehydration of shrimp using RSM. *Journal of Food Science*, 63(1): 80-83.
 14. Giner, J. n., Gimeno, V., Espachs, A., Elez, P., Barbosa-Cánovas, G. V. and Martín, O. 2000. Inhibition of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) pectin methylesterase by pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 1(1): 57-67.
 15. Hong, G.-P., Shim, K.-B., Choi, M.-J. and Min, S.-G. 2009. Effects of air blast thawing combined with infrared radiation on physical properties of pork. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 29(3): 302-309.
 16. Kashyap, G. and Gautam, M. 2012. Analysis of vitamin c in commercial and natural substances by iodometric titration found in nimar and malwa region. *Journal of Scientific Research in Pharmacy*, 1(2): 77-78.
 17. Kaur, G. and Aggarwal, P. 2015. Effect of chemical preservation over thermal processing on storage stability of tomato juice. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 34(1): 49-53.
 18. Kimball, D. A. 1991. *Citrus processing-quality control and technology*. New York: Van Nostrand Reinhold. 117-243.
 19. Krishnamurthy, K., Jun, S., Irudayaraj, J. and Demirci, A. 2008. Efficacy of infrared heat treatment for inactivation of staphylococcus aureus in milk. *Journal of food process engineering*, 31(6): 798-816.
 20. Kulshrestha, S.A. and Sastry, S.K. 2006. Low-frequency dielectric changes in cellular food material from ohmic heating: effect of end point temperature. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 7(4): 257-262.
 21. Mastwijk, H. and Bartels, P. 2005. Pulsed electric Field (PEF) processing in the fruit juice and dairy industry. *The International Review of Food Science and Technology*, 2004: 106-108.
 22. McGlynn, W. G. 2003. *The importance of food pH in commercial canning operations*. Oklahoma Cooperative Extension Service. Division of Agricultural Sciences and Natural Resources. Oklahoma State University.
 23. Min, S., Jin, Z. T. and Zhang, Q. H. 2003. Commercial scale pulsed electric field processing of tomato juice. *Journal*

- of Agricultural and Food Chemistry*, 51(11): 3338-3344.
24. Mongpraneet, S., Abe, T. and Tsurusaki, T. 2002. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. *Journal of Food Engineering*, 55(2): 147-156.
 25. Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T. and Soponronnarit, S. 2007. Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. *Journal of Food Engineering*, 81(3): 624-633.
 26. Odriozola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., Gimeno-Añó, V. and Martín-Belloso, O. 2008. Modeling changes in health-related compounds of tomato juice treated by high-intensity pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 89(2): 210-216.
 27. Raso, J., Frey, W., Ferrari, G., Pataro, G., Knorr, D., Teissie, J. and Miklavčič, D. 2016. Recommendations guidelines on the key information to be reported in studies of application of PEF technology in food and biotechnological processes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37: 312-321.
 28. Rastogi, N. K. 2012. Recent trends and developments in infrared heating in food processing. *Critical reviews in food science and nutrition*, 52(9): 737-760.
 29. Seyhun, N., Ramaswamy, H., Sumnu, G., Sahin, S. and Ahmed, J. 2009. Comparison and modeling of microwave tempering and infrared assisted microwave tempering of frozen potato puree. *Journal of Food Engineering*, 92(3): 339-344.
 30. Stratakos, A. C., Delgado-Pando, G., Linton, M., Patterson, M. F. and Koidis, A. 2016. Industrial scale microwave processing of tomato juice using a novel continuous microwave system. *Food Chemistry*, 190: 622-628.
 31. Thakur, B., Singh, R. and Nelson, P. 1996. Quality attributes of processed tomato products: a review. *Food Reviews International*, 12(3): 375-401.
 32. Turabi, E., Sumnu, G. and Sahin, S. 2008. Optimization of baking of rice cakes in infrared-microwave combination oven by response surface methodology. *Food and bioprocess technology*, 1(1): 64-73.
 33. Uysal, N., Sumnu, G. and Sahin, S. 2009. Optimization of microwave-infrared roasting of hazelnut. *Journal of Food Engineering*, 90(2): 255-261.
 34. Vikram, V., Ramesh, M. and Prapulla, S. 2005. Thermal degradation kinetics of nutrients in orange juice heated by electromagnetic and conventional methods. *Journal of Food Engineering*, 69(1): 31-40.
 35. Zhong, K., Chen, F., Wu, J., Wang, Z., Liao, X., Hu, X. and Zhang, Z. 2005. Kinetics of inactivation of Escherichia coli in carrot juice by pulsed electric field. *Journal of food process engineering*, 28(6): 595-609.
 36. Zhu, Y. and Pan, Z. 2009. Processing and quality characteristics of apple slices under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with continuous heating. *Journal of Food Engineering*, 90(4): 441-452.

The Effect of pulsed electric field equipped with infrared radiation on ascorbic acid content in tomato juice

S. Aghajanzadeh¹, A.M. Ziaifar^{2*}, M. Kashaninejad³, A. Rezaie Asl⁴

¹Ph.D. Graduate, Department of Food Process Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

²Associate professor, Department of Food Process Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

³Professor, Department of Food Process Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

⁴Assistant Professor, Department of Biosystem, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 2018/10/13; Accepted: 2018/12/31

Abstract

Background and objectives: Tomato based products have high nutritional value, amazing color, desirable flavor and high stability. Application of an appropriate processing method is needed to preserve the quality of these kinds of products. Today, to produce the high-quality food products, novel thermal and non-thermal treatments are applied. In this study, a continuous pulsed electric field (PEF) system equipped with infrared irradiation (IR) was designed and constructed. Effect of this novel tomato juice processing method on ascorbic acid (AA) content was investigated. Some mathematical and kinetic models were also used to describe the AA degradation.

Materials and methods: The square-bipolar wave with 1 ms width at a constant frequency (32 Hz) was applied during PEF treatment. Two stainless steel electrodes, 10 mm in length and 0.5 mm in width were used in the PEF chamber. At first, tomato juice (30°C) was preheated up to 40, 45 and 50°C; the sample was then PEF processed at 22.73, 27.27, 31.82 and 36.36 kV/cm for 1173 to 3520 μ s. AA content was measured using the iodine titration method.

Results: IR-preheating up to 40, 45 and 50°C resulted in 11.41%, 16.39% and 19.01% decrease in AA content. Higher vitamin degradation was observed when higher PEF strength and longer processing time. Models such as first-order semi-logarithmic, simplified Hulsheger, Fermi and Hulsheger were applied to study the effect of process conditions on AA degradation.

Conclusion: AA content significantly reduced during IR pre-heating. First-order semi-logarithmic model was useful in studying the effect of PEF treatment time on AA degradation. Considering the high correlation coefficient and low standard error, simplified Hulsheger was selected as the best one in describing the reduction in this vitamin content in relation to changes in PEF strength. Hulsheger model was also effective in predicting the vitamin degradation at different PEF strength and process time. It can be concluded that the applied PEF strength and processing time should be controlled to prevent from more heating up the juice by considering the ohmic heating effect.

Keywords: Infrared Irradiation, Pulsed Electric Field, Tomato Juice, Ascorbic Acid, Mathematical models

Corresponding author; ziaifar@gau.ac.ir