



## ارزیابی دما و پارامترهای امواج میدان پالسی الکتریکی در استخراج قند از هویج

سامره داستانگو<sup>۱</sup>، محمدتقی حامد موسویان<sup>۲\*</sup>، سمیرا یگانه زاد<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- دانشیار، گروه فرآوری مواد غذایی، موسسه علوم و صنایع غذایی

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>غشاهای سلولی مانع اصلی استخراج ترکیبات درون سلولی هستند. متلاشی کردن مکانیکی و حرارت‌دهی جامدات بیولوژیکی از روشهای پیش‌تیمار معمول برای تخریب غشاهای سلولی و تسهیل رهاسازی حل‌شونده به حلال در طی استخراج هستند. با این حال، تخریب کلیت غشاهای نیاز به حرارت‌دهی بیش از حد جامدات دارد که منجر به تغییر بافت گیاهی و عبور مواد نامطلوب (مثل پکتین در تولید قند) به حلال مجاور دارد که خود نیازمند هزینه‌های تغلیظ بعدی است. بکارگیری میدان الکتریکی پالسی (PEF) با حرارت‌دهی کم محصول، بطور قابل توجهی انتقال جرم را در بافت بیولوژیکی گیاهان مختلف غذایی، افزایش می‌دهد که علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی باعث صرفه‌جویی زیادی در زمان می‌شود. در این مطالعه، استخراج قند از هویج با تیمارهای مختلف میدان پالسی الکتریکی (شدت میدان ۲۵۰، ۷۵۰ و ۱۲۵۰ V/cm، تعداد پالس ۱۰، ۴۵ و ۸۰) و نیز بطور همزمان تیمارهای حرارتی مختلف (در دماهای ۲۰، ۴۵ و ۷۰°C) مطالعه شد. سپس مدل ریاضی بازده استخراج بر اساس طرح فاکتوریل کامل ارائه شد. قطعات تیمار شده با PEF در آب در دمای مورد نظر و نسبت وزنی مایع به جامد = ۲ L/S غوطه‌ور شدند. افزایش قابل توجه سینتیک استخراج به علت نفوذپذیری غشای سلول بلافاصله بعد از تیمار PEF باعث جابجایی حل‌شونده بر روی سطح بافت مشاهده شد.</p>	<p>تاریخ‌های مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۹</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۳</p> <p>کلمات کلیدی:</p> <p>میدان پالسی الکتریکی، قند، استخراج، سینتیک.</p> <p>DOI: 10.52547/fsct.18.120.3</p> <p>DOR: 20.1001.1.20088787.1400.18.120.3.5</p> <p>* مسئول مکاتبات: mosavian@um.ac.ir</p>

## ۱- مقدمه

استخراج اولین مرحله هر مطالعه در خصوص بافتهای گیاهی است و نقش ویژه و مهمی روی نتایج و خروجی نهایی دارد. رایج ترین عوامل موثر بر فرآیند استخراج، خواص ماتریکس بخش گیاهی، حلال، دما، فشار و زمان است [۱]. استخراج کامل ترکیبات درون سلولی در یک فرآیند استخراج جامد-مایع نیازمند دنا تورا سیون غشاهای سلولی فاز جامد است. در این روش، دمای بالای فاز جامد باعث فروپاشی غشاهای سلولی می شود. اشکال چنین فرآیندهایی تجزیه حرارتی خواص محصول و تخریب کیفیت شربت است. بهترین رنج دما برای استخراج جامد-مایع  $74^{\circ}\text{C}$  -  $70^{\circ}\text{C}$  است. اگر دما پایین تر از رنج پایینی باشد، مقدار اتلافات در خروجی پالپ افزایش خواهد یافت. با این حال اگر درجه حرارت از رنج بالایی بالاتر رود ( $80^{\circ}\text{C} \geq$ ) مقدار مواد کلوئیدی مثل پروتئین ها، مواد پکتین و سایر مواد غیرقندی که وارد شربت خام می شوند افزایش می یابد. این امر باعث خلوص کمتر شربت خام می شود که بخصوص در واحدهای تبخیر بسیار مضر است [۲، ۳]. تیمار PEF، یک روش مناسب برای بهبود تجزیه غیرحرارتی غشاء است که اجازه نفوذ آبی سرد (گرم) مواد ارزشمند گیاهی را می دهد. طی سالهای اخیر مطالعات متعددی در ارتباط با اثر PEF روی استخراج حل شدنی از بافت گیاه خوراکی انجام شده است [۳-۹]. وقتی نمونه در معرض میدان الکتریکی به اندازه کافی با شدت بالا قرار می گیرد، غشاء سلولی می تواند بطور موقت ناپایدار شود یا بطور برگشت ناپذیر تخریب شود [۱۰]. تخریب یک سلول بیولوژیکی (گیاهی یا حیوانی) با یک میدان الکتریکی با شدت بالا در قالب پالس های بسیار کوتاه، باعث شکل گیری موقت یا دائمی منافذی روی غشاء سلول می شود. این پدیده الکتروپوریشن نامیده می شود که در واقع نفوذ پذیری سلول تحت تیمار را افزایش می دهد، سرانجام منجر به فروپاشی غشای سلولی می شود [۳]. سینتیک و بازده این فرآیندها بسته به پارامترهای PEF شامل شدت میدان [۵، ۱۱، ۱۲]، تعداد پالس ها [۱۰]، شکل پالس ها [۱۳]، فاصله بین پالس ها [۱۴]، مدت زمان پالس ها [۱۵]، پارامترهای فرایندی شامل دما [۶]، سرعت همزدن محلول [۱۶]، اندازه و نوع نمونه [۱۷]، نوع حلال [۱۸] و نسبت مایع به جامد مرتبط است.

به کارگیری جداگانه فرآوری PEF در شدت میدان الکتریکی متوسط ( $E < 100 \text{ V/cm}$ ) و دمای اتاق، یا فرآوری حرارتی در دمای میانگین ( $T < 50^{\circ}\text{C}$ ) بدون هیچ میدان الکتریکی، نیازمند زمان طولانی تیمار (PEF یا حرارتی)، و متعاقباً مصرف بالای انرژی است [۱۹، ۲۰]. به کارگیری هم زمان تیمار حرارتی، تأثیر قوی ای روی تخریب بافت دارد [۲۱، ۲۲]. این تأثیر می تواند باعث تغییرات ساختاری ای شود که در دماهای بسیار بالا در غشاهای داخلی امکان پذیر است [۲۳]. تیمار PEF هیچ اثر منفی روی خواص کیفی و حسی ماده استخراج شده نداشته [۸] و مشخصات کیفی ماده استخراج شده با تیمار PEF، مانند کدورت شربت، به مراتب بهتر از تیمار حرارتی بوده [۷، ۱۹] و ماده استخراج شده پایدارتر است [۹]. هدف این مطالعه، بررسی تأثیرات تیمار حرارتی و الکتریکی بطور همزمان بر روی بازده استخراج قند از بافت هویج با بکارگیری متدولوژی فکتوریل کامل و نیز مطالعه سینتیک استخراج می باشد.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- دستگاه میدان پالسی الکتریکی (PEF)

به طور ساده تکنولوژی PEF بر پایه اعمال پالس های کوتاه میدان های الکتریکی در کسر بسیار کوچکی از ثانیه است، شدت این چنین پالس هایی در محدوده  $80-10 \text{ kV/cm}$  قرار می گیرد. نمونه تحت بررسی بین دو الکترود متحرک با قابلیت تنظیم فاصله قرار می گیرد. میدان الکتریکی اعمالی می تواند به شکل نمایی، موج مربعی، دوقطبی یا پالس نوسانی به نمونه اعمال شود. بخش مایع نمونه به واسطه حضور یون ها می تواند جریان الکتریکی را از خود عبور دهد [۲۴]. دستگاه PEF شامل اجزای زیر است:

### ۲-۱-۱- منبع تولید ولتاژ بالای پالسی

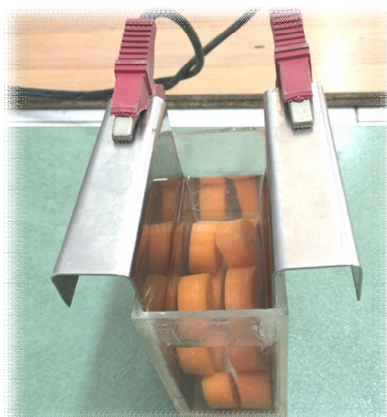
این بخش توان الکتریکی برق شهری را از ولتاژ AC کم، به میدان‌های الکتریکی پالسی با شدت ولتاژ DC بالا تبدیل می‌کند. میدان الکتریکی بین دو الکترود صفحه‌ای موازی با رابطه ۱ داده می‌شود:

$$E=U/D$$

که در آن U ولتاژ منبع تولید جریان برحسب (kV) و d فاصله بین دو الکترود (m) است. ولتاژ برای تیمار غذا معمولاً در محدوده ۶۰-۱۰۰ kV اعمال می‌شود [۲۵].

### ۲-۱-۲- محفظه تیمار

محفظه تیمار محلی است که در آن غذا در معرض میدان الکتریکی پالسی قرار می‌گیرد. این بخش شامل حداقل دو الکترود موازی، یکی متصل به ولتاژ بالا و دیگری متصل به زمین است، که به وسیله ماده‌ای عایق در مقابل جریان الکتریکی، از هم جدا شده‌اند. صفحات موازی می‌توانند به صورت تخت یا هم‌محور باشند [۲۵]. محفظه به یک حمام حرارتی متصل است تا بتوان دمای فرایند تیمار را در حین فرایند PEF ثابت نگه داشت [۲۴]. شکل ۱، محفظه تیمار مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



**Fig 1** Treatment chamber for PEF treatment- Research Institute of Food Science and Technology

### ۳-۱-۲- تجهیزات نمایشگر

شامل کلیدزن‌های الکتریکی، سنسورهای دما و میدان الکتریکی، برنامه کنترل و سیستم جمع‌آوری اطلاعات است که برنامه کاربر را به‌طور دقیق و خودکار به دستگاه داده و اطلاعات لازم را جمع‌آوری و مانیتور می‌کند [۲۴]. در این پژوهش برای انجام تیمارهای میدان الکتریکی پالسی قوی از دستگاه طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه پژوهشکده صنایع غذایی، واقع در پارک علم و فناوری خراسان استفاده شد. این دستگاه قابلیت ایجاد جریان الکتریکی تا ۲۰ کیلوولت را با ایجاد پالس‌های میرای لگاریتمی دارا است. یک منبع تغذیه AC (۲۲۰-۲۴۰ ولت ۵۰ هرتز) برق را به یک منبع تغذیه DC منتقل کرده و در آنجا یک جریان خطی، انرژی الکتریکی را به یک سری خازن منتقل کرده و انرژی ذخیره شده در خازن‌ها با یک کلید پالسی توسط دو الکترود به محفظه تیمار تخلیه می‌گردید. این فعالیت به صورت دستی انجام می‌شود. شکل ۲، تصویری از دستگاه میدان پالسی الکتریکی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.





Fig 2 Pulsed electric field system- Research Institute of Food Science and Technology

## ۲-۲- آماده سازی نمونه

نمونه‌های هویج مورد استفاده در این آزمایش از مرکز معتبر خرید میوه شهر مشهد تهیه شد و در کیسه‌های دربسته، ۲ تا ۳ روز در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  تا زمان انجام آزمون نگهداری شدند. هویج‌ها با آب کاملاً شسته شدند و کلیه مواد زائد از سطح هویج پاک شد. قسمت فوقانی و تحتانی هر هویج (حدوداً  $2\text{ cm}$ ) با استفاده از یک چاقوی استیل تیز حذف شد. سپس هویج‌ها برای انجام آزمون‌ها به قطعات استوانه‌ای به ضخامت  $1\text{ cm}$  و قطر  $3\pm 0.2\text{ cm}$  و وزن  $10\pm 0.5\text{ gr}$  برش داده شدند. برای انجام هر آزمون ۱۰ قطعه هویج با وزن کل  $100\pm 0.50$  گرم با ترازو (مدل AND.FX3000، ژاپن) وزن شد.

## ۲-۳- پیش تیمار الکتریکی

قطعات دیسکی هویج در یک اطافک تیمار از جنس پلکسی گلس با ابعاد  $4 \times 10 \times 10\text{ cm}^3$ ، بین دو الکترود استیل یک ژنراتور PEF با مساحت  $100\text{ cm}^2$  که با فاصله  $4\text{ cm}$  از هم قرار داشتند، قرار گرفتند. سپس با نسبت مایع به جامد ( $L/S = 2$ )، آب شهری به سطح قطعات هویج اضافه شد به طوری که سطح قطعات هویج کاملاً با آب پوشانده شود. پارامترهای PEF مورد استفاده عبارتند از شدت‌های مختلف میدان الکتریکی  $250$ ،  $750$  و  $1250\text{ V/cm}$ ، تعداد مختلف پالس‌های تک‌قطبی لگاریتمی ( $10$ ،  $45$  و  $80$ )، مدت زمان هر پالس  $1$  ثانیه و فاصله بین پالس‌ها نیز  $1$  ثانیه در نظر گرفته شد. میران دمای افزایش یافته شربت بعد از تیمار الکتریکی بسیار ناچیز و حدود  $1^{\circ}\text{C}$  بود. سپس بلافاصله قطعات هویج جهت آزمون اندازه‌گیری هدایت الکتریکی بافت از شربت جدا شدند.

## ۲-۴- تیمار حرارتی

پس از تیمار الکتریکی، نمونه‌ها جهت پیشگیری از اثرات تبخیر بلافاصله به شربت که قبلاً بر اساس طراحی آزمایش به دمای موردنظر ( $20-45-70^{\circ}\text{C}$ ) رسیده بود، اضافه شدند و در یک محفظه دربسته بر روی یک هیتر حرارتی همزن‌دار ( $310^{\circ}\text{C}$ ،  $1500\text{ rpm}$ ، RCT basic، JKA، آلمان) به مدت  $240$  دقیقه مورد تیمار حرارتی قرار گرفتند. دور همزن در کلیه تیمارها دقیقه/دور  $250$  تنظیم شد. ظرف استوانه‌ای در طی کل فرآیند استخراج برای جلوگیری از تبخیر محلول بسته بود.

## ۲-۵- اندازه‌گیری بازده استخراج

به منظور بررسی سینتیک استخراج، هر  $15$  دقیقه بریکس شربت با دستگاه رفراکتومتر دیجیتال ( $\text{Atago RX}5000\alpha$ ، ژاپن) اندازه‌گیری شد. بعد از مدت زمان  $240$  دقیقه از فرآیند استخراج، بریکس شربت نهایی برای اندازه‌گیری بازده استخراج، اندازه‌گیری شد.  $c^*$  بازده حل‌شونده به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۱۶، ۱۷]:

$$c^* = c/c_{\infty}$$

که  $c$  غلظت واقعی حل شونده در محلول و غلظت تعادلی حل شونده می باشد.

$C_0$  غلظت شربت در بافت تازه گیاهی برحسب گرم حل شونده / ۱۰۰ گرم شربت و  $n$  نسبت مایع به جامد می باشد؛  $n$  نسبت  $L/S$  است،  $L$  حجم استخراج شده برحسب  $m^3$  و  $S$  حجم جامد برحسب  $m^3$ . برای اندازه گیری  $C_0$ ، بریکس شربت تازه هویج حاصل از فشرده شدن مکانیکی، اندازه گیری شد.  $n$  نسبت حجمی مایع به جامد ( $L/S$ )، با توجه به دانسیته بالک هویج قطعه شده در اینجا عبارت است از ۱/۳۴۶.

## ۲-۶- اندازه گیری درصد خلوص شربت

خلوص نسبت مقدار ساکاروز به مقدار ماده جامد حل شده در نمونه تعریف و با نماد "%" نشان داده می شود. به منظور مقایسه کیفیت شربت به دست آمده از نمونه های قندی تحت تیمار PEF و رشته ای شدن حرارتی یک مطالعه دیگر ترتیب داده شد. خلوص نمونه های تیمار شده با PEF در نقطه مرکزی ( $750 \text{ V/cm}$  و تعداد ۴۵ پالس) و ۳ دمای مورد مطالعه  $20^\circ\text{C}$ ،  $45^\circ\text{C}$  و  $70^\circ\text{C}$  با نمونه های تیمار نشده در این دما باهم مقایسه شدند. به این ترتیب که بعد از مدت زمان ۲۴۰ دقیقه، شربت نهایی استخراج شد. شربت مذکور با حداکثر دور ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه، سانتریفیوژ شد و سپس نمونه شربت در سل ۱۰۰ میلی متری دستگاه پلاریمتر (مدل AP۳۰۰، ATAGO، ژاپن) قرار گرفت و سپس زاویه چرخش نور پلاریزه ( $\alpha$ ) قرائت شد. برای اندازه گیری درصد خلوص شربت قند، از روابط ۲ الی ۴ استفاده شد [۲۴، ۲۵]:

$$(۲) \quad \text{درصد قطبیت شربت} = \text{قرائت پلاریمتری} / \text{ضریب قطبیت}$$

$$(۳) \quad \text{فاکتور قطبیت} = (100 \times \text{دانسیته ظاهری در } 20^\circ\text{C}) / 26000$$

$$(۴) \quad \text{درصد خلوص شربت} = (\text{درصد قطبیت شربت} / \text{بریکس}) \times 100$$

همچنین اندازه گیری رنگ شربت استخراج شده از هویج، با دستگاه اسپکتروفوتومتر UNICO مدل S2100UV+، با دامنه طول موجی ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ nm و عرض شکاف ۴ nm انجام شد.

## ۲-۷- طراحی آزمایش و آنالیز آماری

در این مطالعه برای طراحی آزمایش با طرح فاکتوریل کامل، تجزیه و تحلیل واریانس و به دست آوردن مدل مناسب بین پاسخ و متغیرها و ارزیابی مدل از نرم افزار طراحی آزمایش، استفاده شد. این طراحی با سه متغیر مستقل در سه سطح انجام شده است، به طوری که تعداد کل آزمایشات ۲۷ آزمایش می باشد. متغیرهای مستقل شامل شدت میدان الکتریکی ( $250-750-1250 \text{ V/cm}$ )، تعداد پالس ها (۸۰-۴۵-۱۰) و دما ( $20-45-70^\circ\text{C}$ ) می باشد (جدول ۱).

**Table 1** Levels of independent variables in FFD.

	Range and level			Coded symbol	Independent variable
	+1	0	-1		
به منظور آنالیز سطوح و درک اختلاف معنی دار بین سطوح مختلف از نرم افزار SAS JMP استفاده شده است و با استفاده از آزمون حداقل	1250	750	250	A	Electric field intensity ( $\text{Vcm}^{-1}$ )
تفاوت معنی دار، سطوح دوه دو با یکدیگر مقایسه شده و سطوحی که دارای اختلاف معنی دار هستند با حروف مشخص می شوند.	80	45	10	B	Number of pulses
	70	45	20	C	Temperature

حروف مشخص شده توسط نرم افزار بصورت دستی روی نمودارها نشان داده شد. سطوحی که دارای حروف مشابه نیستند با سطح اطمینان ۹۵٪ دارای اختلاف معنی دار می باشند. به منظور مطالعه سینتیک انتقال جرم، در طول مدت زمان استخراج (۲۴۰ دقیقه) هر ۱۵ دقیقه بریکس شربت

اندازه گیری و بازده استخراج محاسبه و داده های بدست آمده در نرم افزار اکسل مطالعه شد. در کلیه آزمایش ها، مدت زمان هر پالس ۱ ثانیه، فاصله بین پالس ها ۱ ثانیه، ضخامت نمونه ها ۱ cm، نسبت وزنی مایع به جامد L/S برابر ۲، دور همزن ۲۵۰ دور در دقیقه و مدت زمان استخراج ۲۴۰ دقیقه ثابت در نظر گرفته شده است. این مقادیر ثابت بر اساس بررسی منابع و آزمایش های اولیه، بهینه یابی و انتخاب شده است.

### ۳- بحث و نتیجه گیری

همانطور که در قسمت ۲-۵ اشاره شد برای اندازه گیری بازده استخراج مواد قندی از رابطه ۲ و برای اندازه گیری غلظت های مذکور از رفراکتومتر استفاده می شود که به عنوان یکی از پاسخ های نرم افزار طراحی آزمایش است.

#### ۳-۱- مدل بازده استخراج قند

به منظور بررسی اهمیت تأثیر پارامترهای شدت میدان الکتریکی، پالس و دما و همچنین اثرات متقابل آنها، ابتدا همه پارامترها را در مدل فاکتوریل در دو سطح انتخاب می نماییم. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس به شرح جدول ۲ می باشد:

**Table 2** Results of ANOVA for extraction yield.

Source	Sum of Squares	DF	Mean square	F-value	P-value
Model	6760.98	18	375.61	29.10	<0.0001
A	1283.90	2	641.95	49.73	<0.0001
B	31.38	2	15.69	1.21	0.3460
C	4701.85	2	2350.93	182.12	<0.0001
AB	62.72	4	15.68	1.21	0.3763
AC	671.96	4	167.99	13.01	0.0014
BC	9.18	4	2.29	0.18	0.9436
Residual	103.27	8	12.91		
Cor Total	6864.25	26			

با حذف جمله های غیرمهم، جدول تجزیه و تحلیل واریانس به صورت جدول ۳ اصلاح می شود:

**Table 3** Refined results of ANOVA for solute extraction yield.

P-value	F-value	Mean square	DF	Sum of Squares	Source
<0.0001	72.53	832.21	8	6657.71	Model
<0.0001	55.95	641.95	2	1283.90	A
<0.0001	204.88	2350.93	2	4701.85	C
<0.0001	14.64	167.99	4	671.96	AC
		11.47	18	206.54	Residual
			26	6864.25	Cor Total

صحت مدل انتخابی توسط مقادیر  $R^2$  و  $R^2_{adj}$  که به ترتیب ۰/۹۶۹۹ و ۰/۹۵۶۵ می باشد، تأیید می شود. مدل ارائه شده توسط نرم افزار با

توجه به مقادیر کد شده مطابق رابطه ۶ می باشد:

$$c^* = +54.99 - 9.75*A[1] + 5.09*A[2] - 17.97*C[1] + 4.64*C[2] - 9.56*A[1]C[1] + 2.43*A[2]C[1] + 4.40*A[1]C[2] - 0.41*A[2]C[2]$$

در استفاده از این معادلات باید توجه شود که روابط فوق تنها مربوط به محدوده آزمایش است و در بازه های متفاوت، به نتایج متفاوتی خواهد رسید.

### ۳-۲- بررسی نرمال بودن مدل

با بررسی نمودار احتمال نرمال شکل ۳، نقاط به دست آمده از توزیع نرمالی پیروی می کنند و دارای انحراف خاصی نیستند. به این ترتیب صحت مدل مجدداً تأیید می شود.

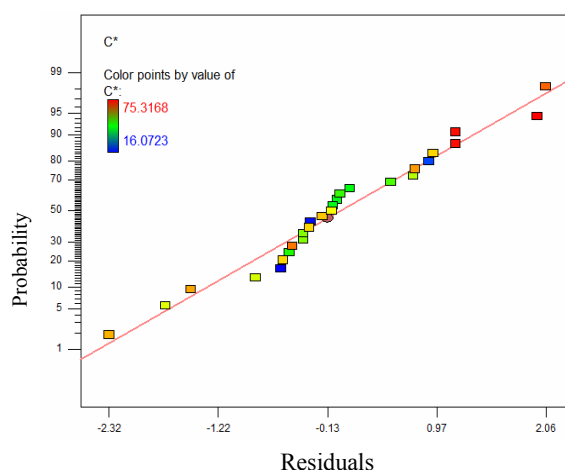


Fig 3 Normal probability plot of final sugar extraction yield from carrot.

### ۳-۳- اثر متقابل شدت میدان الکتریکی و دما بر بازده استخراج قند مایع

بر اساس جداول ۲ و ۳، با توجه به اینکه فاکتور پالس و اثر متقابل آن با فاکتورهای دما و شدت میدان الکتریکی غیرمهم است، تنها به بررسی اثر فاکتورهای دما و شدت میدان الکتریکی در تعداد پالس ثابت ۴۵ بر بازده استخراج پرداخته می شود. به منظور درک اختلاف بین سطوح مختلف شدت میدان الکتریکی و دما در شکل ۲ از آزمون مقایسه میانگین حداقل تفاوت معنی دار<sup>۱</sup> با نرم افزار SPSS و جهت علامت گذاری سطوح در شکل از آزمون t-تست با نرم افزار SAS JMP استفاده شد. نتایج حاصل از این نرم افزار به شرح جدول ۴ می باشد:

همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، اختلاف سطوح شدت میدان الکتریکی ۷۵۰ V/cm و ۱۲۵۰ V/cm و نیز اختلاف سطوح دمای ۴۵°C و ۷۰°C با سطح اطمینان ۹۵٪ معنی دار نمی باشد ( $P > 0.05$ ). شکل ۴، بازده استخراج حل شونده پس از استخراج از قطعات هویج پیش تیمار شده با PEF در تعداد پالس ۴۵ را نشان می دهد. با توجه به شکل، در دمای ۲۰°C و شدت میدان الکتریکی V/cm ۲۵۰ فقط ۱۷٪ از مواد حل شونده استخراج می شوند. با افزایش انرژی فراهم شده طی پیش تیمار PEF و افزایش شدت میدان الکتریکی از V/cm ۲۵۰ به V/cm ۱۲۵۰، تعداد سلول های نفوذپذیر افزایش یافته و متعاقباً بازده استخراج قند تا شدت میدان الکتریکی V/cm ۷۵۰ افزایش می یابد ولیکن از شدت میدان الکتریکی V/cm ۷۵۰ به بعد، با سطح اطمینان ۹۵٪، اختلاف معنی داری در بازده استخراج

1. Least Significant Difference (LSD) Method

مشاهده نمی‌شود. می‌توان انتظار داشت که این مقدار انرژی برای نفوذپذیری حداکثر سلول‌ها کافی می‌باشد. همچنین با افزایش دما در محدوده  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $70^{\circ}\text{C}$  بازده استخراج افزایش می‌یابد.

**Table 4** Results of Compare Means test of electric field intensity and temperature in different levels by LSD method.

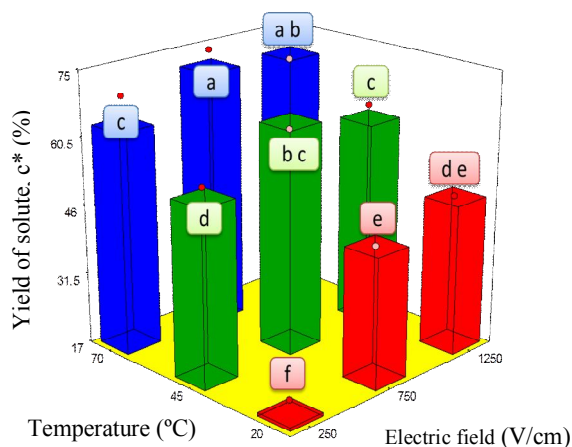
confidence level of 95%		Sig.	Standard Error	Mean Difference (I-J)	Electric field intensity (J)	Electric field intensity (I)
High level	Low level					
-0.790	-30.287	0.040	7.146	-15.538*	750	250
-0.351	-29.848	0.045	7.146	-15.099*	1250	
30.287	0.790	0.040	7.146	-15.539*	250	750
15.187	-14.309	0.952	7.146	0.439	1250	
29.848	0.351	0.045	7.146	15.099*	250	1250
14.309	-15.187	0.952	7.146	-0.439	750	

High level	Low level	Sig.	Standard Error	Mean Difference (I-J)	Temperature (J)	Temperature (I)
-21.834	-40.787	0.000	4.592	-31.310*	70	
31.393	12.439	0.000	4.592	21.916*	20	45
0.0824	-18.871	0.052	4.592	-9.394	70	
40.787	21.834	0.000	4.592	31.310*	20	70
18.871	-0.824	0.052	4.592	9.394	45	

لبوکا و همکاران (۲۰۰۷)، اثر تیمار الکتریکی و حرارتی را به‌طور همزمان بر روی بافت چغندر قند بررسی کردند. هر دو پیش تیمار الکتریکی و حرارتی، بازده استخراج و سیستیک استخراج را افزایش دادند. تیمار الکتریکی در شدت میدان الکتریکی متوسط ( $E \approx 100 \text{ V/cm}$ ) و زمان ( $t \approx 1 \text{ s}$ ) به صورت کارآمدی سلول‌های بیولوژیکی را تخریب می‌کند و دمای مورد نیاز برای نفوذ را تا حداکثر ( $40^{\circ}\text{C}$  تا  $50^{\circ}\text{C}$ ) بدون کاهش خلوص محلول، کاهش می‌دهد [۷].

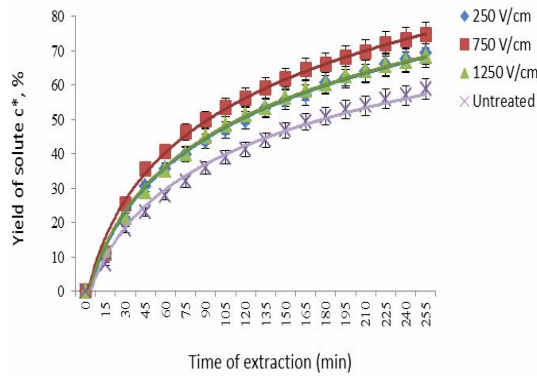
اگایو و همکاران (۲۰۱۴)، تأثیر شدت میدان الکتریکی در شدت میدان الکتریکی‌های  $0.25 \text{ kV/cm}$  تا  $1 \text{ kV/cm}$  را روی استخراج قندهای محلول پوره هویج بررسی کردند. حداقل مقدار انرژی ویژه  $6/38 \text{ j/kg}$  در شرایط تیمار  $\text{kV/cm}$   $0/5$  برای افزایش  $11\% - 53\%$  از کل غلظت قند موجود در پوره هویج تیمار نشده کافی است. هیچ افزایش معنی‌داری با افزایش شدت میدان الکتریکی و زمان تیمار به ترتیب تا بالاتر از  $1 \text{ kV/cm}$  و  $40 \text{ ms}$  مشاهده نشد [۵]. سایر نتایج به دست آمده در خصوص بررسی تأثیر شدت میدان الکتریکی در بافت هویج و چغندر قند نیز نشان می‌دهد افزایش انرژی فراهم شده با PEF تا آستانه  $9 \text{ kJ/kg}$  باعث افزایش بازده



**Fig 4** Interaction effects of electric field intensity and temperature on the solute extraction yield of carrot at  $n=45$

وقتی که عرض پالس که در محدوده چند میکروثانیه است چندین برابر بزرگ‌تر از زمان تخریب ویژه  $\tau$  باشد، پتانسیل بحرانی عبوری از غشاء که عامل اصلی تخریب غشاء است، به مدت زمان پالس و تعداد پالس وابسته نیست. (برای سلول‌های بافت سیب‌زمینی،  $\tau = 0/7 \mu\text{s}$ ؛ در بافت سیب،  $\tau = 1/4 \mu\text{s}$  و در سوسپانسیون سلول گیاهی  $\tau = 0/45 \mu\text{s}$ ) [۲۸].





**Fig 5** Yield of solute during extraction process under number of pulses  $n=45$  from carrot slices treated with different electric field intensity at temperatures (a)  $T=20^{\circ}\text{C}$ , (b)  $T=45^{\circ}\text{C}$ , (c)  $T=70^{\circ}\text{C}$ .

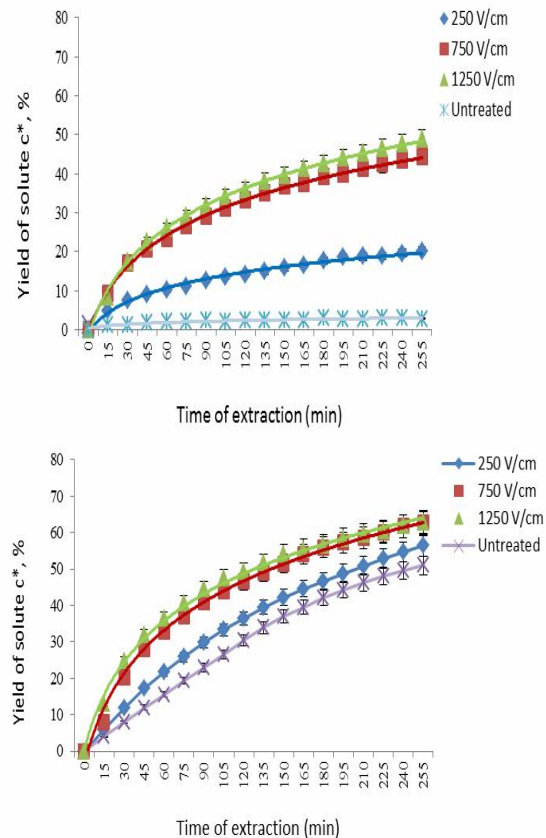
با مقایسه نتایج نمونه‌های تیمار نشده در غیاب PEF و نمونه‌های پیش‌تیمار شده می‌توان نتیجه گرفت که در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  (شکل 5-a)، پس از گذشت زمان ۲۵۵ دقیقه در نمونه تیمار نشده الکتریکی، استخراج قابل توجهی اتفاق نیفتاده است و درصد استخراج ناچیز ۳٪ به علت تخریب مکانیکی سلول‌های بافت هویج است. با افزایش شدت میدان الکتریکی، بازده حل‌شونده به علت اثر تخریب غشاء سلولی، به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. در دماهای  $45^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$ ، با سطح اطمینان ۹۵٪ بین نمونه‌های تیمار نشده و تیمار شده، اختلاف معنی‌دار وجود دارد ( $P < 0.05$ ). در دمای  $45^{\circ}\text{C}$  (شکل 5-b)، با افزایش شدت میدان الکتریکی و افزایش اثر تخریب بافت، بازده استخراج به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد هرچند اختلاف در شدت‌های بالاتر میدان الکتریکی کمتر است. در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  (شکل 5-c)، با افزایش شدت میدان الکتریکی از  $750\text{ V/cm}$  به  $1250\text{ V/cm}$ ، بازده استخراج کاهش یافته است. این اثر را می‌توان به تجمع مواد حل‌شدنی در درون سلول‌های بزرگ متشکله در بافت تخریب‌شده در نتیجه شدت میدان الکتریکی بالا و دمای بالا نسبت داد. این نتایج در انطباق با مطالعات انجام‌شده در خصوص بررسی اثر هم‌افزایی تیمارهای الکتریکی و حرارتی انجام‌شده بر روی بافت چغندر قند می‌باشد [۷، ۱۰، ۲۷].

نمودار سطح پاسخ بازده استخراج بر اساس طرح مرکب مرکزی (CCD) که با سه تکرار در نقطه مرکزی انجام‌شده است نیز در شکل ۶ آورده شده است که مؤید مطالب

استخراج قند گردیده و پس‌از آن هیچ افزایش معنی‌داری مشاهده نشد. این میزان انرژی در شدت میدان الکتریکی  $800\text{ V/cm}$  و در تعداد پالس  $N=300$  قابل‌دسترسی است [۱۶، ۱۷].

### ۳-۴- اثر دما و شدت میدان الکتریکی بر سینتیک استخراج حل‌شونده

شکل ۵ (a-c)، اثر شدت میدان الکتریکی در تعداد ۴۵ پالس، بر سینتیک استخراج حل‌شونده را در دماهای  $20^{\circ}\text{C}$ ،  $45^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد. افزایش دما و پیش‌تیمار PEF، هر دو باعث افزایش سینتیک استخراج می‌شوند. با مطالعه این نمودار، تأثیر دما بر سینتیک استخراج حل‌شونده مشخص می‌شود. به‌عنوان مثال برای رسیدن به بازده استخراج ۴۰٪، در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  و در شدت میدان الکتریکی  $750\text{ V/cm}$ ، ۲۱۰ دقیقه زمان موردنیاز است در حالی که برای رسیدن به همین میزان بازده در دمای  $45^{\circ}\text{C}$ ، ۹۰ دقیقه زمان و در دمای  $70^{\circ}\text{C}$ ، ۷۵ دقیقه زمان موردنیاز است.

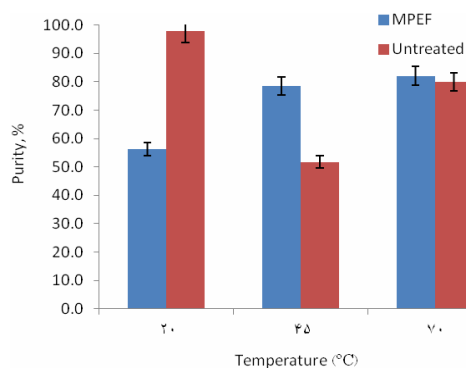


فوق‌الذکر می‌باشد.

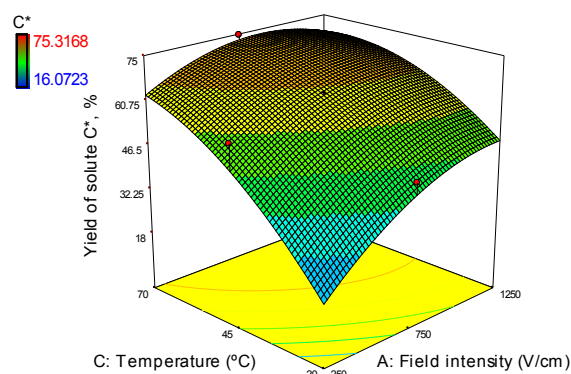
MPEF, moderate pulsed electric field  
(750 V/cm, n=45)

شکل ۸، مقایسه درصد خلوص شربت‌های تیمار نشده و پیش‌تیمار شده با PEF را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. در دمای ۲۰°C، شربت پیش‌تیمار شده با PEF در شدت میدان الکتریکی ۷۵۰ V/cm و تعداد ۴۵ پالس، دارای درصد خلوص قابل توجه کمتری نسبت به شربت تیمار نشده می‌باشد. این اختلاف به علت درصد بریکس ناچیز شربت تیمار نشده (۰،۱۲) در دمای محیط می‌باشد. اگرچه در یک مورد مطالعه انجام شده بر روی بافت چغندر قند، درصد خلوص ۹۵٪ در شربت تیمار شده با PEF در دمای محیط مشاهده شده است [۷].

در دمای متوسط ۴۵°C، خلوص شربت پیش‌تیمار شده با PEF در شدت میدان الکتریکی ۷۵۰ V/cm و تعداد ۴۵ پالس، با بریکس تقریباً برابر (۲،۳±۰،۳) بیشتر از شربت تیمار نشده است. به نظر می‌رسد تیمار PEF هیچ تأثیر قابل توجهی روی درصد خلوص در دمای ۷۰°C ندارد. به طور کلی دما بر روی درصد خلوص نمونه‌های تیمار شده با PEF، تأثیر کمتری دارد و به این ترتیب شربت یکنواخت‌تری تولید می‌شود. مقایسه درصد خلوص نمونه‌های مختلف پیش‌تیمار شده با PEF (شکل ۹)، نشان می‌دهد بالاترین درصد خلوص شربت، در تیمار بهینه به دست آمده است. به طور کلی به نظر می‌رسد نمونه‌های پیش‌تیمار شده تحت شرایط متوسط شدت میدان الکتریکی و یا مدت زمان تیمار و همچنین شرایط دمایی متوسط، دارای بالاترین درصد خلوص می‌باشند. در تیمارهای با شدت میدان الکتریکی، زمان تیمار و دمای افزایش یافته، تجزیه ساختار سلولی و ترکیبات درون‌سولی مشهودتر است و درصد خلوص کاهش می‌یابد.



**Fig 8** Purity of the final diffusion solutions at different temperatures for the untreated and MPEF-pretreated slices.

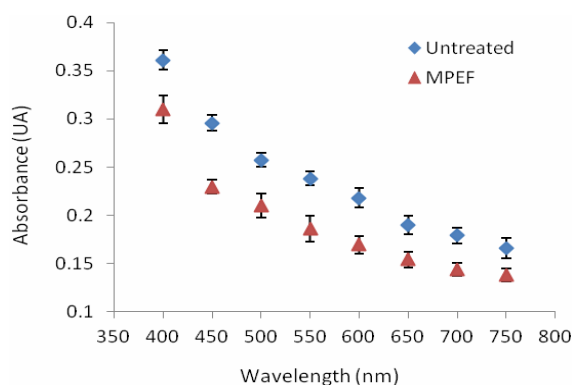


**Fig 6** The interaction effect of electric field intensity and temperature on the final solute extraction yield based on CCD. (t = 255 min, n = 45)

## ۳-۵- اثر PEF بر خلوص و مشخصات کیفی

## ماده استخراج شده

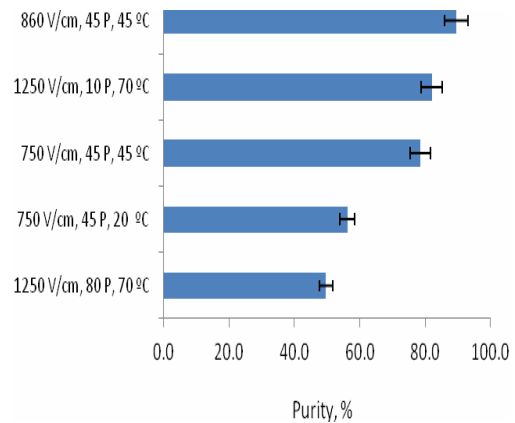
رنگ و خلوص شربت استخراج شده بعد از تیمار PEF (۷۵۰ V/cm، تعداد ۴۵ پالس، دمای ۷۰°C) با شربت تیمار نشده در دمای ۷۰°C مقایسه شد. جذب شربت در طول موج‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. با وجود آنکه بازده ماده حل‌شدنی استخراج شده طی تیمار حرارتی در دمای ۷۰°C، ۵۹٪ و بازده تیمار PEF، ۷۴/۶٪ است ولیکن شربت حاصل از تیمار PEF در طول موج‌های مختلف کم‌رنگ‌تر است و بنابراین دارای کیفیت بالاتری نسبت به شربت حاصل از تیمار حرارتی است. مطالعات مشابه انجام شده بر روی بافت چغندر قند، رازیانه و قارچ نیز نشان داده است که استخراج شونده‌های به دست آمده با PEF عموماً خالص‌تر (زلال‌تر) و کم‌رنگ‌تر از مواد تیمار نشده هستند [۹، ۱۰، ۱۹].



**Fig 7** Extract absorbance at the end of extraction for the untreated and MPEF-pretreated slices.

Technology Beet and Cane Sugar Manufacture PW van der Poel, H. Schiweck, T. Schwartz," *Berlin Verlag Dr. Bartens KG*, pp. 479–563.

- [3] A. K. Mandal, Subhash C.; Mandal, Vivekananda; Das, 2015, "Classification of Extraction Methods," in *Essentials of Botanical Extraction*, Elsevier, pp. 83–136.
- [4] M. Corrales, S. Toepfl, P. Butz, D. Knorr, and B. Tauscher, 2008, "Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics, high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: a comparison," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 85–91.
- [5] I. Aguiló-Aguayo, M. B. Hossain, N. Brunton, J. Lyng, J. Valverde, and D. K. Rai, 2014, "Pulsed electric fields pre-treatment of carrot purees to enhance their polyacetylene and sugar contents," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 23, pp. 79–86.
- [6] K. V. Loginova, E. Vorobiev, O. Bals, and N. I. Lebovka, 2011, "Pilot study of countercurrent cold and mild heat extraction of sugar from sugar beets, assisted by pulsed electric fields," *J. Food Eng.*, vol. 102, no. 4, pp. 340–347.
- [7] N. I. Lebovka, M. V. Shynkaryk, K. El-Belghiti, H. Benjelloun, and E. Vorobiev, 2007, "Plasmolysis of sugarbeet: pulsed electric fields and thermal treatment," *J. Food Eng.*, vol. 80, no. 2, pp. 639–644.
- [8] E. Puértolas and I. Martínez de Marañón, 2015, "Olive oil pilot-production assisted by pulsed electric field: Impact on extraction yield, chemical parameters and sensory properties," *Food Chem.*, vol. 167, pp. 497–502.
- [9] O. Parniakov, N. Lebovka, E. Van Hecke, and E. Vorobiev, 2013, "Pulsed Electric Field Assisted Pressure Extraction and Solvent Extraction from Mushroom (*Agaricus Bisporus*)," *Food and Bioprocess Technology.*, vol. xx, pp. 1–10.
- [10] K. El-Belghiti, Z. Rabhi, and E. Vorobiev, 2005, "Kinetic model of sugar diffusion from sugar beet tissue treated by pulsed electric field," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 85, no. 2, pp. 213–218.
- [11] A. J. H. Sale and W. A. Hamilton, 1967, "Effects of high electric fields on microorganisms: I. Killing of bacteria and yeasts," *Biochim. Biophys. Acta (BBA)-General Subj.*, vol. 148, no. 3, pp. 781–788.
- [12] P. J. Canatella, J. F. Karr, J. A. Petros,



**Fig 9** Purity of the final PEF-pretreated solutions in different conditions of field intensity and temperature.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، از روش استخراج با امواج میدان‌های پالسی الکتریکی قوی برای استخراج قند از هویج استفاده شده است. برای به دست آوردن اثر متقابل فاکتورها (شدت میدان الکتریکی، تعداد پالس و دما) از نرم‌افزار طراحی آزمایش و طرح فاکتوریل کامل استفاده شده است. بازده استخراج قند از هویج، به‌عنوان پاسخ بررسی شده است. دما و شدت میدان الکتریکی دارای اهمیت تقریباً یکسان هستند. بنابراین می‌توان در یک دمای متوسط و با اعمال میدان الکتریکی متوسط روی بافت، به همان بازده استخراجی رسید که در دماهای بالا بدون پیش‌تیمار الکتریکی به دست می‌آید. همچنین کیفیت شربت به دست آمده با پیش‌تیمار الکتریکی با شربت تیمار نشده با اندازه‌گیری جذب و نیز درصد خلوص شربت در دماهای مختلف مقایسه شد. شربت پیش‌تیمار شده با PEF دارای درصد خلوص بالاتر و رنگ کمتری در مقایسه با شربت تیمار نشده می‌باشد که به علت تجزیه ساختار سلولی و ترکیبات درون‌سلولی در دماهای بالا در شربت تیمار نشده می‌باشد.

#### ۵- منابع

- [1] J. Azmir, I. S. M. Zaidul, M. M. Rahman, K. M. Sharif, A. Mohamed, F. Sahena, M. H. A. Jahurul, K. Ghafoor, N. A. N. Norulaini, and A. K. M. Omar, 2013, "Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: a review," *J. Food Eng.*, vol. 117, no. 4, pp. 426–436.
- [2] P. W. Van der Poel, 1998, "Sugar

- pp. 377–384.
- [21] N. I. Lebovka, I. Praporscic, S. Ghnimi, and E. Vorobiev, 2005, “Temperature enhanced electroporation under the pulsed electric field treatment of food tissue,” *J. Food Eng.*, vol. 69, no. 2, pp. 177–184.
- [22] P. R. Postma, G. Pataro, M. Capitoli, M. J. Barbosa, R. H. Wijffels, M. H. M. Eppink, G. Olivieri, and G. Ferrari, 2016, “Selective extraction of intracellular components from the microalga *Chlorella vulgaris* by combined pulsed electric field–temperature treatment,” *Bioresour. Technol.*, vol. 203, pp. 80–88.
- [23] U. Zimmermann, 1986, *Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion*. Springer.
- [24] M. E. A. Mohamed, H. Ayman, and A. Eissa, 2012, *Pulsed electric fields for food processing technology*. INTECH Open Access Publisher.
- [25] S. Toepfl, V. Heinz, and D. Knorr, 2005, “Overview of pulsed electric field processing for food,” *Emerg. Technol. food Process.*, pp. 69–97.
- [26] J. Masse, L. Shu, V. Jegatheesan, J.-B. Gros, and D. D. Phong, 2013, “Variations in the physical and biochemical properties of sugarcane juice before and after microfiltration,” *Solut. to Environ. challenges through Innov. Res.*, pp. 121–142.
- [27] F. J. B. Polarimetry, 1942, “Saccharimetry and the Sugars,” *C440*, pp. 442–450.
- [28] A. Angersbach, V. Heinz, and D. Knorr, 2000, “Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 135–149.
- [29] A. Maskooki and M. N. Eshtiaghi, 2012, “Impact of pulsed electric field on cell disintegration and mass transfer in sugar beet,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 90, no. 3, pp. 377–384.
- and M. R. Prausnitz, 2001, “Quantitative study of electroporation-mediated molecular uptake and cell viability,” *Biophys. J.*, vol. 80, no. 2, pp. 755–764.
- [13] K. Aronsson, M. Lindgren, B. R. Johansson, and U. Rönner, 2001, “Inactivation of microorganisms using pulsed electric fields: the influence of process parameters on *Escherichia coli*, *Listeria innocua*, *Leuconostoc mesenteroides* and *Saccharomyces cerevisiae*,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 41–54.
- [14] N. I. Lebovka, M. I. Bazhal, and E. Vorobiev, 2001, “Pulsed electric field breakage of cellular tissues: visualisation of percolative properties,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 113–125.
- [15] F. De Vito, G. Ferrari, N. I. Lebovka, N. V. Shynkaryk, and E. Vorobiev, 2008, “Pulse duration and efficiency of soft cellular tissue disintegration by pulsed electric fields,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 307–313.
- [16] K. El Belghiti and E. Vorobiev, 2004, “Mass transfer of sugar from beets enhanced by pulsed electric field,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 82, no. 3, pp. 226–230.
- [17] K. El-Belghiti and E. Vorobiev, 2005, “Modelling of solute aqueous extraction from carrots subjected to a pulsed electric field pre-treatment,” *Biosyst. Eng.*, vol. 90, no. 3, pp. 289–294.
- [18] E. Puértolas, O. Cregenzán, E. Luengo, I. Álvarez, and J. Raso, 2013, “Pulsed-electric-field-assisted extraction of anthocyanins from purple-fleshed potato,” *Food Chem.*, vol. 136, no. 3, pp. 1330–1336.
- [19] K. EL-BELGHITI, A. Moubarik, and E. Vorobiev, 2008, “Aqueous extraction of solutes from fennel (*Foeniculum vulgare*) assisted by pulsed electric field,” *J. Food Process Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 548–563.
- [20] A. Maskooki and M. N. Eshtiaghi, 2012, “Impact of pulsed electric field on cell disintegration and mass transfer in sugar beet,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 90, no. 3,



## Evaluation of temperature and pulsed electric field conditions on sugar extraction from carrots

Dastangoo, S.<sup>1</sup>, HamedMosavian, M. T.<sup>2\*</sup>, Yeganehzad, S.<sup>3</sup>

1. MSc student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Associate Professor, Food Processing Department, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST)

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 2019/ 05/ 09  
Accepted 2019/ 06/ 24

#### Keywords:

Pulsed electric field,  
Sugar,  
Extraction,  
Kinetic.

**DOI:** 10.52547/fsct.18.120.3

**DOR:** 20.1001.1.20088787.1400.18.120.3.5

\*Corresponding Author E-Mail:  
[mosavian@um.ac.ir](mailto:mosavian@um.ac.ir)

### ABSTRACT

Cell membranes are the main preventive of intracellular solute extraction. Mechanical destruction and thermal treatment are pre-treatment methods commonly used to destroy cell membranes and facilitate the release of solute into the solvent during the extraction. However, the overall rupture of membranes requires excessive heating that leads to altering plant tissue, passing solid materials through membranes (such as pectin in sugar production) to the adjacent solvent which itself requires further purification cost. Applying a pulsed electric field (PEF) with low heat treatment of products significantly enhances mass transfer into the biological tissues of food crops, which leads to saving much time and energy. In this study, extraction of sugar from carrots under both different pulsed electric field conditions (including field strengths of 250, 750, and 1250 V/cm and number of 10, 45, and 80 pulses) and thermal treatments (20, 45, and 70°C) was investigated based on full factorial design experiments. Carrot slices treated with PEF were suspended in water at the desired temperature and liquid to solid (L/S) weight ratio of 2. Immediately after the PEF treatment, a significant increase in the solute extraction was observed because of the cell membrane permeability, which led to the enhancement of solute convection on the surface of the tissue.