

## کاربرد PEF در بهینه‌سازی مصرف انرژی در استخراج قند از چغندر قند

محمدعلی صالحی<sup>۱</sup>، آیدا امیدواری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی شیمی دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

*masalehi@guilan.ac.ir*

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

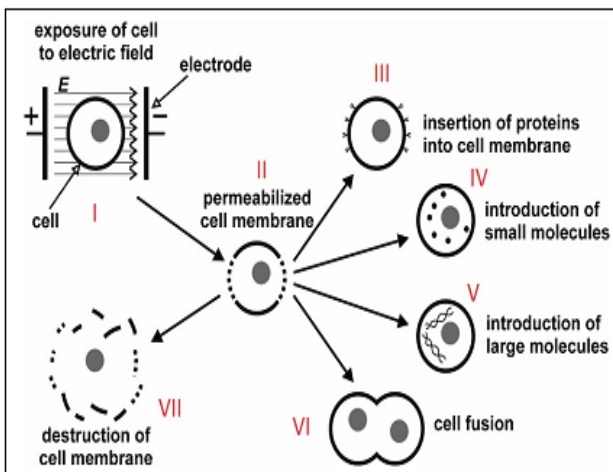
*a.omidvary@yahoo.com*

**چکیده:** افزایش روزافزون مصرف انرژی و نیز کاهش مداوم منابع آن در جهان به‌خصوص ایران، ضرورت بهینه‌سازی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی را آشکار می‌سازد. از آنجاکه به‌کارگیری روش‌های سنتی برای تولید قند و شکر در کشور با مصرف بالای آب و انرژی همراه است، استفاده از تکنولوژی میدان الکتریکی پالسی (PEF) به‌عنوان روشی غیرحرارتی و دوستدار محیط‌زیست در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، اثر میدان الکتریکی پالسی قوی (با قدرت میدان  $7\text{ kV.cm}^{-1}$  و  $100$  پالس) بر میزان انتقال جرم (هدایت الکتریکی و بریکس)، میزان انرژی مصرفی و بازده استخراج در مقایسه با تیمار حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پس از تجزیه و تحلیل آماری حاکی از کاهش قابل ملاحظه دما، زمان و انرژی مصرفی در روش میدان الکتریکی پالسی در مقایسه با تیمار حرارتی با بازده استخراج مشابه است. همچنین میزان انتقال جرم در تیمار حرارتی به‌دلیل تخریب نسبتاً کامل بافت سلولی، در مقایسه با روش پالسی مقادیر بالاتری را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** استخراج، تیمار حرارتی، میدان الکتریکی پالسی، چغندر قند، انرژی مصرفی.

## ۱. مقدمه

شدن این یونها در دو سمت غشاء به ایجاد اختلاف پتانسیل در حدود  $10\text{ mV}$  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. این مقدار بحرانی به اندازه و شکل سلول بستگی دارد. معمولاً برای سلول‌های گیاهی در محدوده  $1\text{--}2\text{ kV.cm}^{-1}$  و برای سلول‌های جانوری در محدوده  $10\text{--}14$  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 مطابق با شکل (۱) منافذی در غشاء به وجود می‌آید که این پدیده را نفوذپذیری الکتریکی یا الکتروپوراسیون<sup>۴</sup> گویند [۱۰].



شکل (۱): نحوه تشکیل منافذ الکتریکی در غشای سلولی [۱۱]

در سال ۱۹۹۵، سازمان FDA<sup>۵</sup> کاربرد PEF در صنعت غذا را بلامانع اعلام کرد. بنابراین اولین تحقیقات انجام‌شده برای استخراج قند از چغندر قند، به وسیله میدان الکتریکی پالسی قوی توسط اشتیاقی و کنور در سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۲، بوزارا و وروبیو در سال ۲۰۰۰ و فینکان در سال ۲۰۰۴ صورت گرفت [۱۲-۱۶].

در مطالعات انجام‌شده توسط اشتیاقی و کنور (۲۰۰۰) استفاده از میدان‌های  $1/2\text{--}2/5\text{ kV.cm}^{-1}$  و تعداد ۱-۲۰۰ پالس توانست به میزان قابل توجهی سلول‌های چغندر قند را تخریب کند [۱۳]. استفاده از

چغندر قند یکی از منابع تأمین قند به‌عنوان مواد غذایی مورد نیاز انسان است که در بدن ایجاد حرارت و انرژی می‌کند. از طرف دیگر جزء معدود موادی است که در طبیعت می‌توان آن را تقریباً به‌طور خالص تهیه کرد [۱].

فرایندهای حرارتی مرسوم‌ترین روش برای فراوری و نگهداری مواد غذایی و نیز استخراج ترکیبات درون سلولی مانند ساکارز از چغندر قند هستند که در طی آن‌ها از دماهای بالا برای تخریب ماکرو مولکول و نیز اختلال در عملکرد غشاء استفاده می‌شود [۲]. به این ترتیب که چغندر قند به قسمت‌هایی برش داده شده و ساکارز به‌وسیله جریان ناهمسوی از آب در دماهای بالا حدود ۷۰ تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ تا ۱/۵ ساعت استخراج می‌شود. متأسفانه تخریب دمایی موجب آزاد شدن ترکیبات نامطلوب مانند پکتین<sup>۱</sup> به شربت شده و باعث مشکل‌تر شدن فرایندهای جداسازی و تصفیه شربت می‌شود. از طرفی به کار بردن دماهای بالا مصرف آب و انرژی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده و کیفیت محصول و بازده را کاهش می‌دهد [۳-۵]. لذا به‌نظر می‌رسد فرایند میدان الکتریکی پالسی قوی<sup>۲</sup> (PEF) به‌عنوان روشی غیرحرارتی، برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و حفظ ویژگی‌های کیفی محصول کاربرد گسترده‌ای داشته باشد.

در سال‌های اخیر، استفاده از این روش در بیوتکنولوژی (زیست‌فناوری)، دارو، ساخت لیزرهای محرک، پاک‌سازی فلز و مواد پلیمری با کاشت یونی غوطه‌وری پلاسما و تهیه و فراوری مواد غذایی نظیر عصاره میوه‌جات، شیر و تخم‌مرغ‌های مایع، دارای کاربردهایی در مقیاس صنعتی است.

تکنولوژی PEF شامل اعمال پالس‌هایی در مدت زمان کوتاه (در حد میکروثانیه) در میدان الکتریکی قوی بر ماده غذایی بین دو الکترود و در دمای اتاق است. میدان‌های الکتریکی پالسی کوتاه‌مدت با شدت زیاد، تجزیه‌شوندگی الکتریکی سلول‌ها را موجب شده و نفوذپذیری آن‌ها را افزایش می‌دهد [۶-۹]. قابل قبول‌ترین نظریه پذیرفته‌شده درباره نحوه عملکرد روش PEF با مدل الکترومکانیکی معرفی‌شده توسط زیمرمن<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۱۹۷۴ تطابق می‌کند. این مدل توضیح می‌دهد که غشاء سلول‌ها در حالت عادی همانند خازنی با ثابت دی‌الکتریک پایین حاوی یون‌های مثبت و منفی است که مجتمع

## 4. Electroporation

۵. Food and Drug Administration (سازمان غذا و داروی آمریکا یکی از آژانس‌های وزارت بهداشت، درمان و خدمات انسانی آمریکاست که مسئول حفظ و ارتقای سطح سلامت جامعه از طریق تنظیم و نظارت بر ایمنی مواد غذایی است).

1. Pectin
2. Pulsed Electric Field
3. Zimmerman

میدان  $7 \text{ kV.cm}^{-1}$  و  $100$  پالس) بر شاخص‌های انتقال جرم، بازده استخراج و به‌خصوص میزان انرژی مصرفی در مقایسه با تیمار حرارتی مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. آماده‌سازی نمونه

چغندر قند تازه از سیلوی نگهداری چغندر قند کارخانه قند همدان تهیه و پس از شست‌وشو به مدت ۴ هفته در دمای  $4^\circ\text{C}$  نگهداری شد. برای انجام آزمایش و به‌منظور افزایش سطح انتقال جرم، با استفاده از یک سوراخ‌کن چوب‌پنبه خلال‌هایی با طول ۲-۳ سانتی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر تهیه شد.

### ۲.۲. تیمار با میدان الکتریکی پالسی

برای انجام تیمار توسط میدان الکتریکی پالسی قوی از دستگاه پالس ژنراتور ساخته‌شده توسط محققان داخلی در دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد. این دستگاه قابلیت ایجاد جریان الکتریکی تا ۱۴ کیلوولت را دارا بود. نمونه‌های چغندر قند بین دو الکترود و درون محفظه تیماری که حاوی ۲۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر بود، قرار گرفت. سپس ۱۰۰ پالس با قدرت  $7 \text{ kV.cm}^{-1}$  به شکل مربعی به نمونه اعمال گردید. نکته حائز اهمیت آن است که ولتاژ ورودی دستگاه مورد استفاده در این آزمایش، ۱۲ ولت بوده و این مهم در کنار جریان بسیار کم و در سطح میلی‌آمپر، به فرایند کمک خواهد کرد تا در مقیاس صنعتی، هزینه‌ها چندان قابل توجه افزایش نیابد. بدیهی است چنانچه تغییری در اندازه خلال‌ها ایجاد نشود، ضریب تخلخل در مقیاس صنعتی با آزمایشگاهی یکسان یا بسیار نزدیک خواهد بود؛ بنابراین انتظار می‌رود همین نسبت اقتصادی مصرف برقرار بماند.

### ۳.۲. تیمار حرارتی

برای انجام تیمار حرارتی از یک حمام بن‌ماری ( $100^\circ\text{C}$ ) استفاده شد. در این آزمایش، نمونه‌های خلالی چغندر قند به مدت ۱۵ دقیقه در ۲۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر با دمای  $70^\circ\text{C}$  قرار گرفتند.

### ۴.۲. انتقال جرم (بریکس و هدایت الکتریکی)

بریکس و هدایت الکتریکی شربت، تعیین‌کننده میزان انتقال مواد از داخل سلول به شربت است. هدایت الکتریکی نمونه‌های تیمار شده توسط هدایت سنج و بریکس شربت حاصل از استخراج نیز با استفاده از رفاکتومتر برحسب گرم در صد گرم شربت تعیین شدند.

میدان‌های الکتریکی پالسی برای استخراج ترکیبات درون سلولی به مطالعه شدت آن مربوط می‌شود. مشاهده شده است که پیش‌تیمار کردن با میدان‌هایی با قدرت کمتر از  $10 \text{ kV}$  بازدهی استخراج از سیب، نارگیل یا هویج را بهبود بخشیده و استخراج نشاسته، پلی‌فنول و پیگمنت‌ها را به خوبی استخراج ساکارز افزایش داده است [۱۷]. بوزارا و همکاران در سال ۲۰۰۳ نشان دادند کارایی پیش‌فراوری با PEF به تعداد و اندازه منافذ بستگی دارد که این دو پارامتر نیز خود وابسته به شدت میدان اعمالی، تعداد پالس و مدت زمان پالس‌هاست [۱۸]. جمایی و وروبیو (۲۰۰۳) افزایش استخراج شربت از خلال چغندر قند با استفاده از PEF با قدرت متوسط ( $160-780 \text{ V.cm}^{-1}$ ) به‌وسیله یک سیستم استخراج مایع در مقیاس آزمایشگاهی را مورد تأیید قرار دادند. براساس مقادیر به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری قبل و بعد از تیمار حداقل ولتاژ لازم  $150 \text{ V.cm}^{-1}$  است تا بتوان افزایش قابل ملاحظه‌ای در میزان استخراج مشاهده کرد و قابلیت استخراج همبستگی نسبتاً کاملی با افزایش شدت میدان دارد [۱۹]. اثر به‌کارگیری سانتریفیوژ در استخراج آبی قند از چغندر قند پس از تیمار با PEF توسط البلقاتی و همکاران در سال ۲۰۰۵ مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق استخراج قند از چغندر قند تیمار شده با PEF در درجه حرارت معمول به‌وسیله نیروی سانتریفیوژ به‌طور قابل ملاحظه‌ای سیستمیک استخراج را از چغندرهای تیمار شده افزایش داد [۳]. سلول‌های زنده به‌منظور تبادل مواد درون سلولی از جریان سیتوپلاسمی کمک می‌گیرند. این جنبش‌های سیتوپلاسمی نتیجه ناهنجاری یا جابجایی پروتئین‌های ساختمانی هستند. سوالات و همکاران در سال ۲۰۱۲، ارتباط بین تداوم جریان سیتوپلاسمی و آسیب کلی بافت را به‌عنوان تابعی از فرکانس گزارش کردند. نتایج نشان داد اثر PEF در فرکانس‌های پایین ( $f < 1 \text{ Hz}$ ) بر آسیب یافتن بافت، چه با حضور جریان سیتوپلاسمی و چه در غیاب آن، بیشتر از این اثر در فرکانس‌های بالاست، اما وجود این جریان این اثر بخشی را در فرکانس‌های پایین بهبود بخشیده و میزان نفوذپذیر شدن سلول را در فرایندهای خشک کردن و استخراج افزایش می‌دهد [۲۰].

به‌طور کلی، مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیقات، تنظیم شرایط تیمار نظیر شدت میدان و تعداد پالس برای حصول حداکثر درجه تخریب، تسریع در عمل استخراج و افزایش بازده با حفظ ویژگی‌های کیفی مواد است. اما اثر تیمار با PEF بر فرایند انتقال جرم از نمونه چغندر قند در مقایسه با تیمار حرارتی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. لذا در این تحقیق، اثر میدان الکتریکی پالسی قوی (با قدرت

## ۵.۲. طرح آماری

در این آزمایش، بریکس شربت حاصل از استخراج در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و پس از ۱۲۰ دقیقه بیشترین میزان را داشت [۲۳].

همه آزمایش‌ها در دو تکرار انجام شد و داده‌های به‌دست‌آمده در طرح آماری کامل تصادفی توسط جدول ANOVA تجزیه و تحلیل شد و میانگین‌های به‌دست‌آمده با تعیین حداقل اختلاف معنی‌دار آماری در سطوح  $P \leq 0.05$  به وسیله آزمون چنددامنه‌ای دانکن<sup>۱</sup> با یکدیگر مقایسه شدند.

## ۵. انرژی مصرفی

به‌طور کلی برای انرژی، بسته به نوع بافت، یک حد آستانه وجود دارد که اگر میزان انرژی ورودی در فرایند استخراج بیش از این مقدار باشد، نه تنها تأثیری بر بهبود فرایند استخراج ندارد بلکه بازده را نیز کاهش می‌دهد [۲۴].

## ۳. شاخص تخریب

میزان انرژی مصرفی در فرایند PEF به‌ازای  $n$  پالس از طریق فرمول (۳) محاسبه می‌شود:

میزان تخریب سلول برحسب میزان استخراج مواد و محتویات درون سلولی مشخص می‌شود. اندازه‌گیری میزان هدایت الکتریکی نشانگر خروج یون‌های موجود در سلول و وارد شدن آن‌ها به محیط است. بنابراین با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج میزان هدایت الکتریکی قبل و پس از اعمال تیمار اندازه‌گیری می‌شود. برای محاسبه شاخص تخریب از فرمول (۱) استفاده می‌شود.

$$Q_{PEF} = \frac{U \cdot I \cdot t}{m_s} \quad (3)$$

در اینجا  $U$  میزان ولتاژ در نمونه،  $I$  شدت جریان (آمپر) و  $t$  زمان تیمار (ثانیه) است که مطابق فرمول (۴) از حاصل ضرب تعداد پالس در پهنای پالس به‌دست می‌آید.

$$Z = \frac{\sigma - \sigma_i}{\sigma_d - \sigma_i} \quad (1)$$

$$t = n \times t_i \quad (4)$$

با توجه به رابطه (۳)، اگرچه با افزایش میزان ولتاژ، شدت جریان و زمان، میزان انرژی مصرفی افزایش می‌یابد اما این میزان در مقایسه با روش حرارتی بسیار ناچیز است، به‌طوری‌که اشتیاقی و همکاران در سال ۱۹۹۹ و بوزارا و همکاران در سال ۲۰۰۰ نشان دادند که میزان انرژی مصرفی در هر شرایطی بسیار پایین‌تر از روش سنتی و حرارتی است. علاوه بر آن، شدت جریان لازم برای این روش بسیار پایین و در حد میلی‌آمپر بوده و ولتاژ برابر ولتاژ آزمایشگاهی است [۱۲ و ۱۳]. میزان انرژی مصرفی در فرایند حرارتی نیز از طریق فرمول (۵) محاسبه می‌شود:

که در آن  $\sigma$  (Siemens.cm<sup>-1</sup>) هدایت الکتریکی نمونه پس از اعمال تیمار PEF و زیروندهای  $i$  و  $d$  به ترتیب مربوط به هدایت بافت سالم (نمونه شاهد) و بافت کاملاً از هم گسیخته توسط تیمار حرارتی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۵ دقیقه است. طبق این رابطه،  $Z=0$  مربوط به بافت سالم (نمونه شاهد، بدون اعمال PEF) و  $Z=1$  مربوط به بافت کاملاً از هم گسیخته است [۲۱ و ۲۲].

$$Q_{Preheating} = \frac{m_t C_p (T - T_0)}{m_s} \quad (5)$$

$m_t$  (کیلوگرم) وزن شربت حاصل از استخراج،  $m_s$  (کیلوگرم) وزن نمونه و  $C_p$  گرمای ویژه نمونه برحسب (kJ.(kg. K)<sup>-1</sup>) است [۲۵ و ۲۶].

## ۴. بازده استخراج

برای بررسی میزان بازده استخراج، نمونه‌های تیمار شده (۲۲ گرم) توسط میدان الکتریکی پالسی در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر در دماهای ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و هر بار بریکس<sup>۲</sup> شربت حاصل در زمان‌های مختلف (۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه) توسط رفاکتومتر اندازه‌گیری شد. بازده استخراج توسط فرمول (۲) محاسبه می‌شود:

$$y_t = \frac{C_t}{MES} \times 100 \quad (2)$$

## ۶. نتایج و بحث

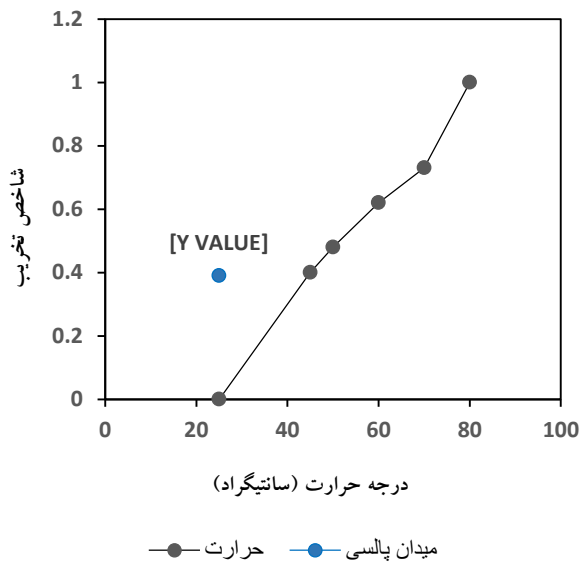
### ۱.۶. میزان انتقال جرم در تیمار با PEF در مقایسه با فرایند حرارتی

براساس فرمول (۲)  $C_t$  بریکس نمونه در هر لحظه و MES حداکثر بریکس حاصل شده از شربت در طول فرایند استخراج است.

در شکل (۲) میزان هدایت الکتریکی و بریکس (به‌عنوان شاخص‌های انتقال جرم) شربت به‌دست‌آمده از اثر تیمار با میدان

1. Duncan  
2. Brix

رسیدن به همین میزان تخریب در روش حرارتی، دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۵ دقیقه نیاز است.



شکل (۳): اثر دما بر شاخص تخریب

### ۳.۶. اثر تعداد پالس‌های اعمالی بر بازده استخراج

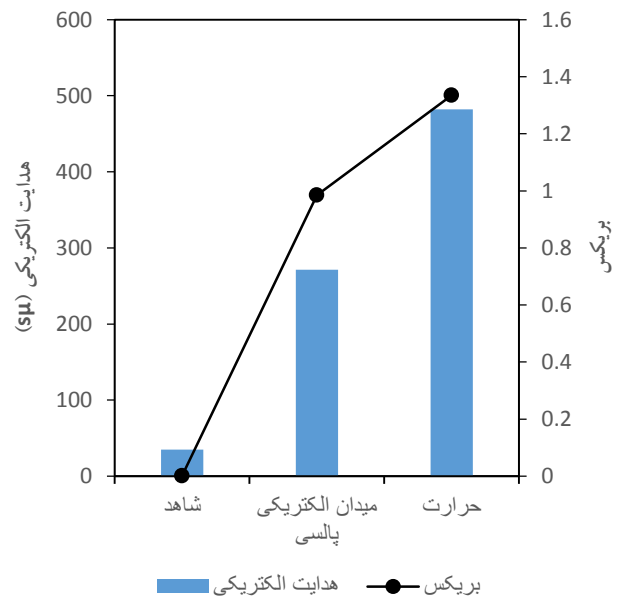
در این آزمایش تعداد پالس‌ها را تغییر داده و اثر آن بر میزان بازده محلول بررسی شد. تعداد پالس‌های اعمال‌شده مطابق جدول (۱) به ترتیب ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ می‌باشند.

جدول (۱): اثر تعداد پالس اعمالی بر بازده استخراج

تعداد پالس	بازده استخراج %
۴۰	۸.۳٪
۵۰	۱۳.۱٪
۶۰	۱۴.۳٪
۸۰	۱۴.۷٪
۱۰۰	۱۴.۹٪
۱۲۰	۱۶.۵٪
۱۵۰	۲۱.۰۶٪

با توجه به جدول (۱) ملاحظه می‌شود که بازده استخراج با تعداد پالس‌های اعمالی نسبت مستقیم داشته و با افزایش آن به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد.

الکتریکی پالسی (میدان با قدرت  $7 \text{ kV.cm}^{-1}$  با ۱۰۰ پالس) و نیز تیمار حرارتی ۷۰ درجه سانتی‌گراد و نمونه شاهد با یکدیگر مقایسه شدند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان بریکس و هدایت الکتریکی حاصل از هر دو روش تیمار (حرارت و PEF) به‌طور معنی‌داری ( $P \leq 0.05$ ) بیشتر از نمونه شاهد است. در روش حرارتی به دلیل تخریب نسبتاً کامل بافت سلولی چغندر قند طی فرایند استخراج، میزان انتقال جرم، مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد.



شکل (۲): مقایسه انتقال جرم در دو روش تیمار حرارتی و PEF

### ۲.۶. مقایسه شاخص تخریب سلول در روش PEF با

#### تیمار حرارتی

در شکل (۳)، اثر درجه حرارت بر میزان شاخص تخریب بافت سلولی چغندر قند مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به منحنی رسم شده ملاحظه می‌شود که میزان شاخص تخریب با افزایش درجه حرارت به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است، به‌طوری‌که این شاخص از ۰/۴ در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد به ۱ (حداکثر مقدار) در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است.

مقایسه میزان شاخص تخریب شربت حاصل از اعمال تیمار حرارتی و تیمار با PEF نیز در شکل (۳) نشان داده شده است. با پیش‌فراوری به روش PEF (میدان با قدرت  $7 \text{ kV.cm}^{-1}$  با ۱۰۰ پالس) می‌توان در دمایی پایین‌تر و مدت زمان کوتاه‌تر به شاخص تخریب مناسب رسید، به‌طوری‌که مطابق با شکل (۳) تیمار به روش PEF در دمای محیط شاخص تخریب به ۰/۳۹ رسیده است، درحالی‌که برای

بررسی قرار گرفت. انتقال جرم (آزادسازی مولکول‌های قند و یون‌ها) حاصل از هر دو روش تیمار (حرارت و PEF) به‌طور معنی‌داری ( $P \leq 0.05$ ) بیشتر از نمونه شاهد است. در روش حرارتی نیز به‌دلیل تخریب نسبتاً کامل بافت سلولی چغندر قند طی فرایند استخراج، میزان انتقال جرم مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه دما و زمان دو عامل مهم و تأثیرگذار بر بازده استخراج هستند، ملاحظه شد که به‌کارگیری پیش‌فراوری PEF به‌طور قابل توجهی دما و زمان استخراج را کاهش می‌دهد. بدین صورت که برای استخراج ۲۳٪ ساکارز (راندمان بلافاصله پس از عملیات استخراج اندازه‌گیری شده است) برای نمونه‌های تیمار شده حرارتی دمای حداقل ۷۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۵ دقیقه نیاز است، اما بعد از اینکه از تیمار با PEF با ۱۵۰ پالس در قدرت  $7 \text{ kV.cm}^{-1}$  استفاده شد، بازده مشابه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و تنها در طول ۷۵ ثانیه حاصل شد. میزان انرژی مصرفی نیز هنگام تیمار با PEF به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از روش حرارتی است، به‌طوری‌که برای حصول مقادیر تقریباً مشابه مواد قندی (راندمان استخراج) میزان انرژی مصرفی در PEF تحت قدرت  $7 \text{ kV.cm}^{-1}$  با ۱۵۰ پالس ۱۳ برابر کمتر از انرژی مصرفی در تیمار حرارتی است.

این نتایج نشان‌دهنده قابلیت بالای فرایند PEF به‌عنوان روشی غیرحرارتی، نسبت به فرایندهای معمول و سنتی برای استخراج است و به‌طور امیدبخشی می‌تواند در صنایع با صرفه‌جویی در مصرف آب، انرژی و زمان تولید به‌کار گرفته شود. هرچند برای استفاده از این روش در مقیاس صنعتی مشکلاتی نظیر هزینه اولیه بالا برای تهیه و طراحی سیستم PEF وجود دارد، با توجه به مزایای این روش نسبت به روش سنتی، استفاده از آن در مقیاس صنعتی مقرون به صرفه است. بنابراین برای افزایش کارایی این سیستم و توسعه صنعتی آن می‌توان از ترکیب این روش با روش حرارتی در محدوده دمایی پایین استفاده کرد، به‌طوری‌که در صنعت لبنیات و پاستوریزاسیون شیر، این روش همراه با روش حرارتی و قبل از آن به‌عنوان یک پیش‌فراوری استفاده می‌شود.

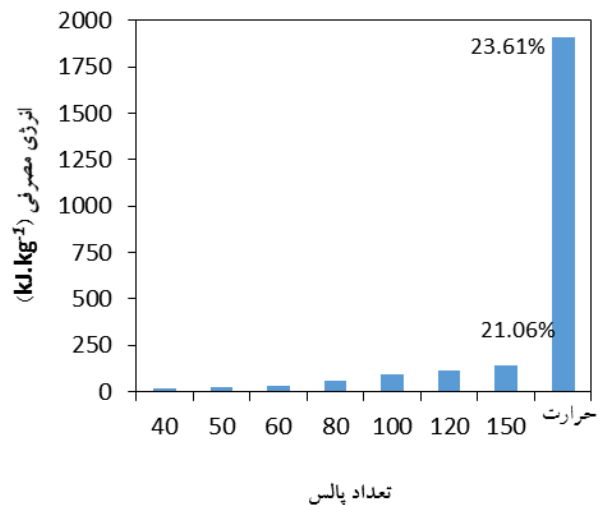
### سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های مالی و خدماتی دانشکده فنی دانشگاه گیلان برای انجام این پروژه قدردانی می‌شود.

## ۴.۶. مقایسه میزان انرژی مصرفی در روش PEF با تیمار حرارتی

در شکل (۴) ضمن مشاهده افزایش مصرف انرژی به‌ازای افزایش تعداد پالس‌های اعمالی، مشخص می‌شود که میزان مصرف انرژی در هر شرایطی، در مقایسه با روش حرارتی کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد به‌طوری‌که میزان انرژی مصرفی هنگام استفاده از تیمار حرارتی ( $70^\circ\text{C}$ ) به مدت ۱۵ دقیقه) برای رسیدن به راندمان ۲۳٪ برابر  $1908 \text{ kJ.kg}^{-1}$  است. درحالی‌که هنگام استفاده از تیمار PEF (با میدان  $7 \text{ kV.cm}^{-1}$  پس از اعمال ۱۰۰ پالس) میزان انرژی مصرفی برابر  $142/92 \text{ kJ.kg}^{-1}$  با راندمان مشابه است. به عبارت دیگر، مقدار انرژی مصرفی در فرایند حرارتی حدود ۱۳ برابر بیشتر از اعمال میدان الکتریکی با بازده مشابه است.

علاوه بر آن با توجه به شکل (۴)، اگرچه بازده استخراج در روش حرارتی بیشتر از روش PEF است، این بازده در دمای بالاتر و با صرف زمان بیشتری حاصل شده است و همان‌طور که قبلاً ذکر شد، استفاده از دمای بالا اثرات منفی بر مواد مؤثر استخراجی دارد. درحالی‌که با استفاده از روش PEF این معایب برطرف می‌شود.



شکل (۴): اثر تعداد پالس بر انرژی مصرفی در روش PEF و مقایسه با تیمار حرارتی

## ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر میدان الکتریکی پالسی قوی تحت شرایط (با شدت میدان  $7 \text{ kV.cm}^{-1}$  و ۱۰۰ پالس) بر شاخص‌های انتقال جرم، میزان انرژی مصرفی و راندمان استخراج در مقایسه با تیمار حرارتی مورد



## مراجع

- [۱] پورزکی، عباس، میرزائی، حسین، «بررسی اثر انواع ولتاژ ثابت و پالسی بر استخراج قند از چغندر قند»، همایش ملی علوم و صنایع غذایی، دوره دوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان، ۱۳۹۲.
- [۲] فتحی آچاچلوئی، بهرام، «تأثیر میدان الکتریکی پالسی روی میکرو ارگانسیم‌های مواد غذایی به منظور فراوری و تغذیه سالم»، کنگره ملی کشاورزی ارگانیک و مرسوم، دوره دوم، دانشگاه محقق اردبیلی، ۱۳۹۲.
- [3] El-Belghiti, K., Rabhi, Z., and Vorobiev, E., "Effect of Centrifugal Force on the Aqueous Extraction of Solute From Sugar Beet Tissue Pretreated by Pulsed Electric Field", *Journal of Food Process Engineering*, Vol. 28, pp. 346-358, 2005.
- [4] Maskooki, A., Eshtiaghi, M.N., "Impact of Pulsed Electric Field on Cell Disintegration and Mass Transfer in Sugar Beet", *Journal of Food and Bioproduct Processing*, Vol. 90, pp. 377-384, 2012.
- [5] Mhmedi, H., Almohammed, F., Bals, O., Grimi, N., Vorobiev, E., "Impact of Pulsed Electric Field And Preheating on the Lime Purification of Raw Sugar Beet Expressed Juice", *Journal of Food and Bioproduct Processing*, 2014.
- [6] Pourzaki, A., Mirzaee, H., "Pulsed Electric Field Generators in food processing", National Congress on Food Technology, 18<sup>th</sup>, Mashhad-Iran, 15-16, Oct 2008.
- [7] Pourzaki, A., Mirzaee, H., "New High Voltage Pulse Generators", *Recent Patents on Electric Engineering*, Bentham Science Publishers Ltd, Vol. 2, No. 1, pp. 65-76, Jan 2009.
- [8] Schroeder, S., Buckow, R., Knoerzer, K., "Numerical Simulation of Pulsed Electric Field (PEF) Processing for Chamber Design and Optimization", International Conference on CFD in the Minerads and Process Industries CSIRO, 17<sup>th</sup>, Australia, 2009.
- [9] Asavasanti, S., Ristenpart, W., Stroeve, P., Barrett, D.M., "Permeabilization of Plant Tissue by Monopolar Pulsed Electric Field: Effect of Frequency", *Journal of Food Science*, Vol. 76, No. 1, 2011.
- [۱۰] تیموری، شهلا، عباسی، سلیمان و مومنی، سعید، «اثر پالس الکتریکی در افزایش نگهداری مواد غذایی مایع، شیر و آب میوه‌ها»، کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران، دوره بیست و یکم، دانشگاه شیراز، آبان ۱۳۹۲.
- [11] Warindi, B., Hamza, B., Suharyanto, Sasongko Pramono, H., "Modeling and Simulation of Electroporation System with Measured Bioimpedance: Determining Parameters," *International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology and Biomedical Engineering (IcIc-BME)*, Bandung, 3<sup>rd</sup>, 2013.
- [12] Eshtiaghi, M.N., Knorr, N "Process for Treatment Sugar Beet", European patent, No. Wo 99/6434, 1999.
- [13] Eshtiaghi, M.N., and Knorr, D., "Application of High Electric Pulsed Field for Cell Disintegration and Sucrose Extraction from Sugar Beet", International patent, No. WO 0996434, 2000.
- [14] Bouzrara, H., Vorobiev, E., "Beet Juice Extraction by Pressing and Pulsed Electric Fields ", *International Sugar Journal*, Vol. 102, No. 1216, pp. 194-200, 2000.
- [15] Eshtiaghi, M.N., Knorr, N "High Electric Field Pulse Pretreatment: Potential for Sugar Beet Processing", *Journal of Food Engineering*, Vol. 52, pp. 578-583, 2002.
- [16] Fincan, M., Devito, F., Dejmek, P., "Pulsed Electric Field Treatment for Solid-Liquid Extraction of Red Beetroot Pigment", *Journal of Food Engineering*, Vol. 64, pp. 381-388, 2004.
- [17] Bazhal, M.I., Lebvokal, N.I., Vorobiev, E., "Pulsed Electric Field Treatment of Apple Tissue during Compression for Juice Extraction", *Journal of Food Engineering*, Vol. 50, No. 3, pp. 129-139, 2001.
- [18] Bouzrara, H., Vorobiev, E., "Solid-Liquid Extraction of Cellular Materials Enhanced by Pulsed Electric Field", *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 42, pp. 249-257, 2003.
- [19] Jemai, A.B., and Vorobiev, E., "Enhanced Leaching from Sugar Beet Cossettes by Pulsed Electric Field", *Journal of Food Engineering*, pp 405-412, 59, 2003.
- [20] Salengke, S., Sastry, S.K., Zhang, H.Q., "Pulsed Electric Field Technology: Modeling of Electric Field and Temperature Distribution within Continuous Flow PEF Treatment Chamber", *International Food Research Journal*, Vol 19, No. 3, pp. 1137-1144, 2012.
- [21] Asavasanti, S., Ersus, S., Ristenpart, W., Stroeve, P., Barrett, D.M., "Critical Electric Field Strength of Onion Tissue Treated by Pulsed Electric Fields," *International Journal of Food Science*, Vol. 75, 2010.
- [22] Boussetta, N., Grimi, N., Vorobiev, E., "Pulsed Electrical Technologies Assisted Polyphenols Extraction from Agricultural Plants and Bioresources: A review", *International Journal of Food Processing Technology*, Vol. 2, No. 1, 2015.
- [23] Lopez, N., Puertolas, E., Candon, S., Raso, J., Alvarez, I., "Enhancement of the Solid-Liquid Extraction of Sucrose from Sugar Beet (*Beta Vulgaris*) by Pulsed Electric Field", *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 42, pp. 1674-1680, 2009.
- [24] Ngadi, M.O., Bazhal, M.I., Raghavan, G.D.V., Stroeve, P., Barrett, D.M., "Engineering Aspect of Pulsed Electroporation of Vegetable Tissue", *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Invited Overview Paper, Vol. 5, 2003.
- [25] Grimi, N., Praporscic, I., Lebvoka, N., Vorobiev, E., "Selective Extraction from Carrot Slices by Pressing and Washing Enhanced by Pulsed Electric Fields", *Separation and Purification Technology*, Vol. 58, pp. 267-273, 2007.

- [26] Mhmedi, H., Almohammed, F., Bals, O., Grimi, N., Vorobiev, E., "Alternative Pressing/Ultrafiltration Process for Sugar Beet Volarization: Impact of Pulsed Electric Field and Cossettes Preheating on the Qualitative Characteristic of Juice", Journal of Food and Bioproduct Processing, Vol. 7, pp. 795-805, 2014.