

اثر شرایط مختلف میدان‌های الکتریکی پالسی قوی بر استخراج قند از چغندر قند

عبدالمجید مسکوکي^{۱*} - محمد نقی اشتیاقی^۲

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۸۹/۵/۶

چکیده

اثر میدان‌های الکتریکی پالسی قوی بر میزان تخریب سلول‌های چغندر قند مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق اثر شرایط مختلف میدان که شامل قدرت میدان (۰/۵ تا ۶ کیلوولت بر سانتیمتر)، تعداد پالس (۱ تا ۱۰۰ پالس) و ظرفیت خازن (۰/۵ تا ۳۲ میکرو فاراد) بر درجه تخریب سلول و انرژی مصرفی چغندر بررسی گردیدند. نتایج اولیه نشان دادند که میدان‌های با قدرت ۲ و ۳ کیلوولت بر سانتیمتر، ۸ میکرو فاراد به ترتیب با ۲۰ و ۱۰ پالس قادرند در کمتر از ۱ دقیقه سبب تخریب سلول گردند. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر قابل نفوذ نمودن سلول‌های چغندر قند به ترتیب عبارتند از انرژی اعمال شده و قدرت میدان الکتریکی. در مقادیر انرژی مساوی و یا بیشتر از ۳/۲ کیلوژول بر کیلوگرم با افزایش قدرت میدان میزان تخریب سلولی نیز افزایش می‌یابد. میزان انتقال جرم پس از تخریب سلولی به وسیله میدان الکتریکی پالسی با اندازه‌گیری انتقال و نشست یونها و قند از داخل سلول در درجه حرارت معمول، حرارت متوسط و بالا (۵۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد) در مدت ۱۵ دقیقه مورد ارزیابی قرار گرفته و با روش‌های معمول و سنتی استخراج قند از چغندر (متوسط ۷۵ درجه سانتیگراد) و نیز شرایط معتدل ۵۰ درجه سانتیگراد مقایسه گردیدند. نتایج نشان دهنده خروج مقادیر قابل ملاحظه‌ای مواد قندی از سلول پس از اعمال میدان ۲ کیلوولت و ۸ میکروفاراد در حرارت معمول بود. درحالی که برای حصول همین مقدار قند اعمال حرارت ۷۵ درجه سانتیگراد و زمان طولانی نیازاست. علاوه بر این میزان انرژی مصرفی در فرآیند حرارتی تقریباً ۲۰ برابر انرژی مورد نیاز برای میدان الکتریکی پالسی است. با افزایش قدرت میدان میزان بریکس و هدایت الکتریکی در شربت افزایش می‌یابد و این مسأله در افزایش راندمان و بهره‌وری در تولید قند از چغندر قند در سطح اقتصادی اهمیت زیادی دارد. تنظیم شرایط میدان (قدرت میدان، ظرفیت خازن‌ها، تعداد پالس و تنظیم شرایط محفظه تیمار در صرفه جویی انرژی و افزایش راندمان و مورد نیاز نقش اساسی دارند.

واژه‌های کلیدی: فرآیندهای غیر حرارتی، میدان‌های الکتریکی پالسی، چغندر قند، تخریب سلولی

مقدمه

انرژی و افزایش بهره‌وری در فرآیندهای تولید مواد غذایی می‌گردد (۱). اولین تلاش‌ها در بکارگیری میدان‌های الکتریکی پالسی قوی برای غیر فعال کردن میکروارگانیسم‌ها در دمای معمول اطاق انجام شده است (۲). همچنین اثر میدان‌های الکتریکی روی غشای سلول‌های گیاهی و جانوری توسط محققان مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۳، ۴، ۸). بر اساس تحقیقات انجام شده توسط زیمرمان و همکاران وقتی غشای سلول تحت تأثیر میدان الکتریکی 40 kV/cm در یک زمان ۱۵ تا ۱۰ میکروثانیه قرار می‌گیرد

استفاده از میدان‌های الکتریکی پالسی قوی^۳ (PEF) یا به عنوان یک فرآیند غیر حرارتی در فرآوری و نگهداری مواد غذایی در طی دو دهه اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این فرآیند مانند سایر فرآیندهای غیر حرارتی سبب حفظ ویژگی‌های کیفی، تغذیه‌ای، کاهش مصرف

۱- استادیار گروه کشاورزی و صنایع غذایی پژوهشکده علوم و صنایع غذایی خراسان
(*)-نویسنده مسئول (Email: maskooki@krifst.ir)
۲- استاد گروه مهندسی شیمی دانشکده مهندسی دانشگاه ماهیدول تایلند
3- Pulsed Electric fields

و در نتیجه افزایش سرعت خشک کردن میوه ها و سبزیهای تازه می گردد (۱۳). مهم ترین ویژگیهای این روش نسبت به فرآیندهای حرارتی این است که اولاً: به دلیل اینکه تخریب دیواره و غشای سلولی تحت اثر میدان های الکتریکی بدون کمترین آسیب وارده به قسمت های دیگر انجام می شود و برخلاف روش حرارتی که تخریب کامل سلولی را به دنبال دارد، قوام و ساختمان سلول حفظ می گردد. ثانیاً: تغییر در خصوصیات بافتی به ویژه در غشای دیواره سلول به نحوی است که موارد درون سلول با سرعت سهولت از سلول خارج می شوند و لذا نابودی میکروارگانیسم ها و نیز استخراج و یا خشک کردن مواد غذایی در حداقل زمان صورت می گیرد ثالثاً: انرژی مورد نیاز برای این گونه فرایندها بسیار کمتر از فرآیندهای حرارتی است (۱۳).

روش های معمول استخراج قند از چغندر قند بر پایه اعمال حرارت در زمان نسبتاً طولانی و در مرحله دیفوزیون است. ترکیبات محلول موجود در خلال چغندر قند و به ویژه ساکارز به تدریج و طی شرایط دمایی ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد و طی زمان ۴ تا ۱ ساعت وارد آب موجود در دستگاه دیفوزیون می گردند. هدف از این عمل به دست آوردن حداکثر راندمان و حصول شربت ساکارز می باشد (۴). اعمال فرایند حرارتی و شرایط pH محیط در این مرحله سبب تخریب دیواره و غشای سلولهای چغندر قند شده، مواد محلول و بعضاً نا محلول وارد شربت اطراف خلال شده، به این وسیله قند ساکاروز به صورت محلول به همراه سایر مواد به صورت شربت خام برای مراحل بعدی نظیر تصفیه و پخت از دیفوزیون خارج می شوند. هرچند روش معمول یکی از مؤثرترین روشهای استخراج قند از چغندر قند می باشد. اما اعمال حرارت به دلیل تخریب کامل دیواره سلولی سبب ورود ناخالصی های غیر قندی به داخل شربت می شود که باعث مشکل تر شدن فرآیندهای جداسازی و تصفیه شربت می گردد. به علاوه، فرآیند طولانی عمل دیفوزیون و اعمال

سبب آسیب های برگشت ناپذیر غشای سلول می گردد در حالیکه اگر شدت میدان از این مقدار ضعیف تر باشد (در حدود ۱-۰/۸ kV/cm) تخریب غشا به صورت برگشت پذیر است (۹). کنور و همکاران نشان دادند که شدت های مختلف میدان برای تخریب غشای سلولی باید به یک حد بحرانی در کمتر از ۱ μs برسد تا تخریب برگشت ناپذیر صورت گیرد. سازوکار اثر میدان های الکتریکی پالسی بر سلول های گیاهی و حیوانی بر مبنای ایجاد روزنه های بسیار ریز بر اثر جریان های الکتریکی یا فرآیندهای الکتروپوراسیون^۱ و افزایش قابلیت نفوذ در غشا می باشد. ایجاد روزنه و قابل نفوذ نمودن سلول های بیولوژیک اصطلاحاً الکتروپوراسیون نامیده می شود (۱۰). مهم ترین اثرات میدان الکتریکی پالسی تخریب دیواره و غشای سلولی و افزایش میزان انتقال جرم است که می تواند در دو فرآیند مهم صنایع غذایی مورد استفاده قرار گیرد (۱۱ و ۱۲) اول: فرآیند نابودی سلولهای زنده از جمله میکرو اورگانیسم های موجود در مواد غذایی: وقتی یک سلول زنده تحت تأثیر چنین میدانی قرار می گیرند طبیعتاً دیواره سلولی و غشای آنها دچار تخریب شده، مواد درون سلول به سهولت خارج می شود و از طرف دیگر سبب ورود مواد اطراف به درون سلول می گردد و منجر به نابودی سلول زنده می شود. دوم: با افزایش قابلیت نفوذ در سلول های گیاهی و جانوری فرآیند استخراج مواد درون سلولی با سهولت و سرعت بیشتری انجام می شود، لذا می توان از فرآیند دوم به عنوان یک مرحله پیش فرآوری در استخراج مواد با ارزش سلولی نظیر آنزیمها، قندها و سایر ترکیبات موجود در فرآیندهای تولید آنزیم و آب میوه استفاده نمود. هم چنین در تولید خشکبار اعمال این پیش فرآیند سبب سهولت خروج آب

نقاط مختلف سیلو انجام گرفت و به منظور جلوگیری از فساد با فرمالدئید ۳۰ درصد نوع مرک ضد عفونی شده و بلافاصله خشک گردید. آزمایش بر روی کلیه نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از زمان آماده سازی انجام گرفتند.

دستگاه PEF

برای انجام تیمارهای میدان الکتریکی پالسی قوی از دستگاه طراحی شده و ساخته شده در آزمایشگاه توسط شرکت Sib Food.Tech آلمان استفاده گردید این دستگاه قابلیت ایجاد جریان الکتریکی تا ۲۰ کیلوولت را با ایجاد پالسهای میرای لگاریتمی دارا بود. یک منبع تغذیه AC (۴۴۰ ولت ۵۰ هرتز) برق را به یک منبع تغذیه DC (۲۲۰ ولت ۵۰ هرتز) 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 الکتروود به محفظه تیمار تخلیه می‌گردید. میزان ولتاژ اعمال شده برای آزمایشات بین ۰/۵ تا ۶ کیلو ولت (۰/۵، ۱، ۳، ۴ و ۶ کیلو ولت) انتخاب گردیدند.

تعیین شاخص تخریب سلول (di): میزان تخریب سلول بر حسب میزان استخراج مواد و محتویات سلولی مشخص می‌گردد. اندازه گیری میزان هدایت الکتریکی نشانگر خروج یونهای موجود در سلول و وارد شدن آنها به محیط است. بنابراین با استفاده از دستگاه کندانکتیویتری متر میزان هدایت الکتریکی قبل و پس از اعمال تیمار اندازه گیری شده و برای محاسبه di از معادله ۱ استفاده گردید (۱۶-۱۸).

$$di = (I_a - I_0) / (I_t - I_0) \quad (1)$$

در این رابطه di شاخص تخریب سلولی، I_a جریان الکتریکی هدایت شده پس از تیمار، I_0 = جریان الکتریکی هدایت شده نمونه قبل از تیمار (شاهد) و I_t جریان الکتریکی هدایت شده نمونه تخریب شده کامل توسط تیمار

حرارت سبب افزایش مصرف انرژی و بروز آلودگی های میکروبی توسط باکتری های مقاوم به حرارت می‌گردد که به نوبه خود در کاهش راندمان و استحصال قند مؤثرند (۱۴). اولین تحقیقات انجام شده برای استخراج قند از چغندر قند بوسیله میدان های الکتریکی پالسی توسط بوزارا و فوورویو در سال ۲۰۰۰، اشتیاقی و کنور در سالهای ۱۹۹۹، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۳ و فینکان در سال ۲۰۰۴ صورت گرفته است (۱۳-۱۹). استخراج قند از چغندر قند با استفاده از میدان ۲/۴kV/cm - ۱/۲ و متعاقب آن پرس تفاله در دو تا سه مرحله و مقایسه میزان استخراج قند و راندمان با فرآیند حرارتی توسط اشتیاقی و کنور ۲۰۰۲ صورت گرفت. آنها نشان دادند که تیمار با PEF در ۲/۴kV/cm با ۶۰ پالس قابلیت تخریب غشای سلول چغندر نتیجه ای شبیه آنچه که در فرآیند حرارتی C ۷۵ به مدت ۱۵ دقیقه رخ می‌دهند را در بردارد (۱۸). در یک تحقیق مشابه لبوکا و همکاران میزان انتقال جرم را با اندازه گیری میزان استخراج ساکارز از خلال چغندر قند در طی فرآیند PEF نشان دادند. آنها افزایش قابلیت استخراج و راندمان تولید قند را نسبت به فرآیند حرارتی از خلال چغندر ثابت نمودند (۱۵). مهم ترین نتایج حاصل از این تحقیقات سهولت استخراج با افزایش قابلیت نفوذ و نیز بالا رفتن خلوص شربت نسبت به فرآیند حرارتی بود.

هدف از انجام این تحقیق نیز تنظیم شرایط میدان نظیر شدت میدان، مقدار پالس و انرژی مورد نیاز برای حصول حداکثر تخریب سلول و سهولت انتقال جرم و در نتیجه راندمان استخراج می باشد.

مواد و روش ها

مواد خام

چغندر قند تازه از سیلوی نگهداری چغندر قند کارخانه قند آبکوه تهیه گردید. نمونه برداری به صورت تصادفی از

حرارتی (C ۸۰ در زمان ۱۵ دقیقه)

میزان انرژی (Q) برای پالس های با موج میرای لگاریتمی بر اساس معادله ۲ بدست آمده است (۱۸-۴۶).

$$Q = [(V)^2 \times C] / 2 \quad (2)$$

در اینجا V میزان پیک و ولتاژ میرا در نمونه و C ظرفیت خازن بر حسب فاراد است. میزان افزایش درجه حرارت درون محفظه PEF نیز بر اساس معادله ۳ محاسبه گردید.

$$Q_{total} = Cp \times m \times T \quad (3)$$

در اینجا Q_{total} برابر Q در تعداد پالس و کل انرژی آزاد شده در محفظه و Cp گرمای ویژه نمونه و m جرم نمونه است. (۱۶ و ۱۷). برای اعمال حرارت از یک حمام بن ماری جوش (C ۱۰۰) با ابعاد ۳۰×۳۰×۵۰ سانتی متر استفاده گردید. برای اندازه گیری میزان هدایت الکتریکی از دستگاه کندانکتیویتری متر مدل IDSC004 استفاده گردید. برای عمل پرس و استخراج شربت از پرس آزمایشگاهی استفاده شد. محفظه دستگاه پرس دارای سطح 75 cm^2 ، کیک پرس با ضخامت ۴ + ۰/۵ سانتی متر بود و فشار حداکثر ۲۰ بار اعمال گردید.

میزان بریکس شربت با رفراکتومتر بر حسب گرم درصد گرم شربت تعیین گردید. مقدار شربت بدست آمده نسبت به وزن نمونه بر حسب درصد به عنوان راندمان و با استفاده از معادله ۴ محاسبه گردید. (۱۸-۴۶)

$$\% \text{ Yield} = [\text{وزن نمونه} / \text{وزن شربت}] \times 100 \quad (4)$$

طرح آماری: کلیه آزمایش ها حداقل در سه تکرار انجام و هربار شاخص تخریب و انرژی مصرفی اندازه گیری شدند نتایج حاصل از آزمایشات تجربی در طرح آماری کامل تصادفی و با استفاده از جدول ANOVA توسط نرم افزار Sigmatat3 تجزیه و تحلیل شدند. هم چنین میانگین های به دست آمده به وسیله آزمون چند دامنه ای دانکن با یک دیگر مقایسه شدند.

همچنین برای بررسی میزان انتقال جرم و یا خروج قند از چغندر قند پس از اعمال تیمار در شرایط میدان های مختلف و مقایسه آن با فرآیند حرارتی نیز به شکل جدول ۲ استفاده گردید و میزان بریکس و هدایت الکتریکی شربت اندازه گیری شد.

نتایج و بحث

اثر میدان های مختلف الکتریکی بر شاخص تخریب غشاه

در شکل ۱ اثر میدان های مختلف مورد آزمایش بازاء تعداد پالس بر قابلیت نفوذپذیری غشای سلول مورد ارزیابی قرار گرفته اند. مقایسه شرایط میدان های مختلف نشان داد که در بهترین حالت میدان های 1 kV/cm و $32 \mu\text{F}$ و 3 kV/cm و $8 \mu\text{F}$ به ترتیب بالاترین تأثیر را بر تخریب غشای سلول و افزایش نفوذ دارند و نتایج حاصل از بکارگیری این میدان در تعداد پالس های مساوی بالاتر از بقیه شرایط است و در مقابل کمترین تأثیر مربوط به میدان های $4/5 \text{ kV/cm}$ و $0/5 \mu\text{F}$ و $0/5 \text{ kV/cm}$ و $32 \mu\text{F}$ می باشد. این اثر پس از ۵ پالس به حداکثر رسیده و تا ۴۰ پالس تقریباً ثابت می ماند و این شرایط نیز برای تمام میدان های مورد آزمایش وجود دارد. روند افزایشی شاخص تخریب به ازای افزایش تعداد پالس در تمام موارد کاملاً معنی دار است (۹ و ۱۰). به عبارت دیگر در تمام میدان های مورد آزمایش مقادیر بدست آمده از شاخص تخریب با تعداد پالس افزایش قابل ملاحظه ای دارد. اشتیاقی و کنور نیز برای اولین بار نتایج مشابهی به دست آوردند (۱۶) در بررسی کلی اثر شرایط میدان می توان گفت که هم ولتاژ مورد استفاده و هم ظرفیت خازن در تخریب غشای سلول مؤثرند و به همین سبب هرگاه ولتاژ ورودی ضعیف با ظرفیت خازن بالا استفاده شود تخریب افزایش می یابد.

جدول ۱. شرایط مختلف میدان‌های الکتریکی اعمال شده برای تخریب غشای سلول چغندر قند

شرایط میدان	ولتاژ و ظرفیت خازن	تعداد پالس در دقیقه
میدان‌های با ولتاژ قوی و خازن ضعیف	۴/۵ kV/cm و ۰/۵ μF	۰،۵،۱۰،۲۰،۴۰،۱۰۰
	۶ KV و ۰/۵ μF	۰،۵،۱۰،۲۰،۴۰،۱۰۰
	۸ kV/cm و ۸ μF	۲۰،۴۰،۱۰۰،۰،۵،۱۰
میدان‌های با ولتاژ متوسط و خازن متوسط	۲ kV/cm و ۸ μF	۰،۵،۱۰،۲۰،۴۰،۱۰۰
	۳ kV/cm و ۸ μF	۰،۵،۱۰،۲۰،۴۰،۱۰۰
	۰/۵ kV/cm و ۳۲ μF	۰،۵،۱۰،۲۰،۴۰،۱۰۰
میدان‌های با ولتاژ قوی و خازن ضعیف	۱ kV/cm و ۳۲ μF	۰،۵،۱۰،۲۰،۴۰،۱۰۰

جدول ۲. شرایط مختلف میدان‌های الکتریکی اعمال شده برای اندازه‌گیری میزان انتقال جرم در سلول چغندر

نمونه تیمار نشده (شاهد)		تیمار با میدان الکتریکی ۸ μF و ۱ kV/cm	
۰	۰	۳	۵
۳	۳	۶	۹
۶	۶	۱۲	۱۵
۹	۹	۳۰	۶۰
۱۲	۱۲	۹۰	۹۰

تعداد پالس

زمان استخراج (دقیقه)

شرایط تیمار

تیمار با میدان الکتریکی ۸ μF و ۲ kV/cm

فرآیند حرارتی ۵۰

زمان اعمال حرارت (دقیقه)

فرآیند حرارتی ۷۵

کیلوولت با ظرفیت خازن ۸ میکروفاراد در تعداد پالس‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب برابر 0.04 ± 0.029 ، 0.16 ± 0.053 و 0.1 ± 0.06 است. در حالی که برای پالس‌های ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ این میزان به ترتیب 0.03 ± 0.061 ، 0.03 ± 0.061 و 0.03 ± 0.07 افزایش داشته است و این وضعیت در تمام شرایط میدان‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود. بازال و همکاران اثر افزایش پالس را در تخریب سلول و بافت‌های گیاهی نیز مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که با افزایش شدت میدان و تعداد پالس میزان تخریب سلولی نیز افزایش می‌یابد (۳). نکته قابل توجه دیگر اثر معنی دار افزایش ظرفیت خازن نسبت به افزایش ولتاژ ورودی است. مقایسه دو میدان با ولتاژ ضعیف 0.5 kV/cm و 32 kV/cm میکروفاراد با میدان با ولتاژ قوی 6 kV/cm و $0.5 \mu\text{F}$ پس از ۱۰، ۲۰ و ۳۰ پالس نشان دهنده

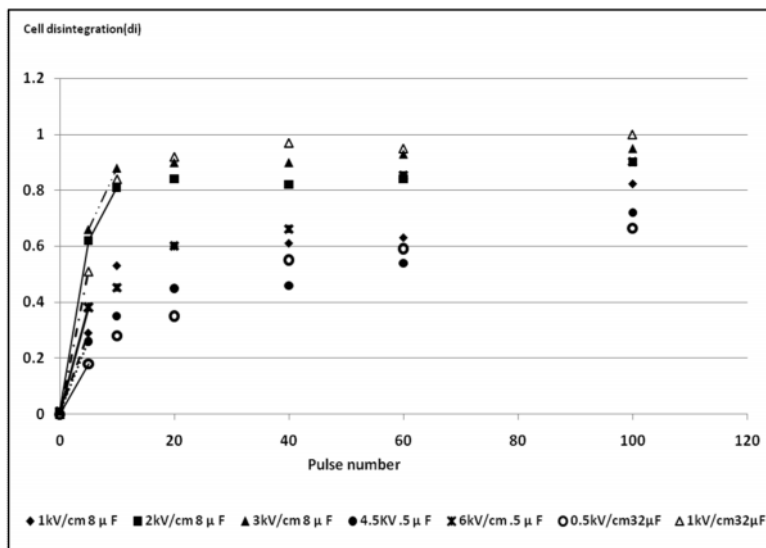
اثر این نتایج در شکل ۱ و منحنی مربوط به به استفاده از شرایط 1 kV/cm و $32 \mu\text{F}$ مشخص است. اما اگر ولتاژ ورودی از حد بحرانی مورد نیاز برای تخریب غشا برگشت ناپذیر پائین تر باشد (مانند اعمال شرایط 0.5 kV/cm و $8 \mu\text{F}$) میزان تخریب نیز کاهش می‌یابد. کنور و همکاران نشان دادند که شدت میدان باید حداقل 0.8 kV/cm باشد تا تخریب غشا صورت گیرد (۶). می‌توان گفت پس از ۲۰ پالس افزایش قابل ملاحظه‌ای در تخریب در تمام شرایط مورد آزمایش نشان داده می‌شود. روند افزایش تخریب برای تعداد پالس‌های بالاتر یعنی ۴۰، ۶۰ و حتی ۱۰۰ پالس بصورت جزئی و شیب منحنی‌های به دست آمده دارای مقادیر کمتری نسبت به میزان افزایش پس از ۱۰، ۲۰ و ۳۰ پالس است. مثلاً شاخص تخریب برای میدان‌های ۱

بقیه زیادتر و تفاوت کاملاً معنی دار آماری در افزایش انرژی مصرفی مشاهده می شود. نتایج مشابهی نیز در بررسی میزان تخریب غشا حاصل گردید و حصول این نتایج نشان دهنده این است که هردو عامل ولتاژ و ظرفیت خازن از عوامل مهم به شمار می آیند و به طور طبیعی افزایش هر کدام سبب افزایش انرژی می شود. کاهش ظرفیت خازن تا میزان $0.5 \mu\text{F}$ در میدان های با ولتاژ قوی ۶ و $4/5$ کیلوولت با ظرفیت خازن سبب مصرف انرژی معادل استفاده از خازن و ولتاژهای با ظرفیت متوسط می باشد و تفاوت معنی داری بین شرایط میدان های اعمال شده در تعداد پالس های مختلف به چشم نمی خورد. میزان مصرف انرژی در مقایسه با فرایند سنتی استخراج قند توسط دیگر محققان مورد بررسی قرار گرفته است. بوزارا و همکاران در سال ۲۰۰۰ و اشتیاقی و همکاران در سال ۱۹۹۹ ضمن مشاهده افزایش مصرف انرژی با ازای افزایش شدت میدان نشان دادند که میزان مصرف انرژی در هر شرایطی در مقایسه با روش سنتی کاهش بسیار قابل ملاحظه ای دارد (۱۳ و ۱۶).

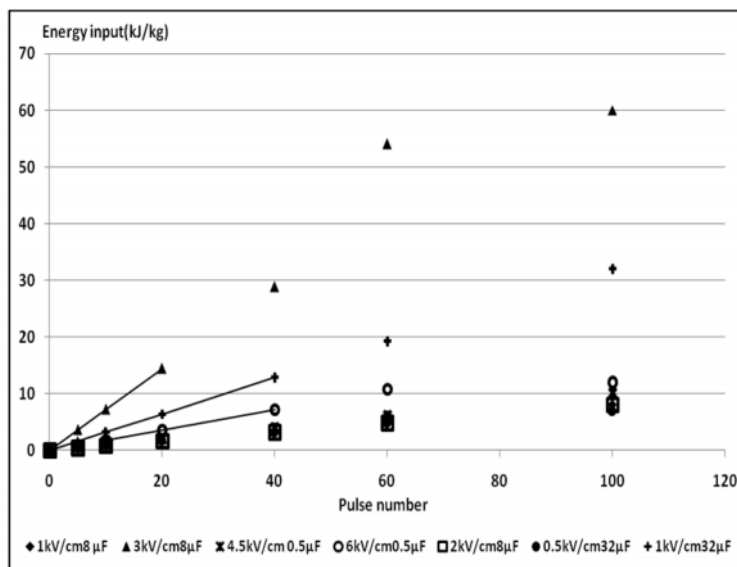
تأثیر شدیدتر ظرفیت خازن نسبت به ولتاژ بر شاخص تخریب است و علت آن تخلیه زیاد بار الکتریکی ذخیره شده در خازن های با ظرفیت زیاد بازا تعداد پالس در اطراف غشاء است مقایسه عددی شاخص تخریب پس از ۲۰ پالس برای میدان $4/5 \text{ kV/cm}$ و $0.5 \mu\text{F}$ برابر 0.45 ± 0.02 و برای میدان 0.5 kV/cm و $32 \mu\text{F}$ برابر 0.11 ± 0.09 است و شاخص تخریب تقریباً به میزان دو برابر افزایش یافته است. تفاوت شاخص تخریب در میدان های مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. مک لان و همکاران در سال ۱۹۹۹ با بررسی اثر تخریبی میدان های الکتریکی پالسی قوی بر بافت سیب به منظور حصول آب میوه نشان دادند که راندمان استحصال با افزایش شدت تخلیه بار الکتریکی به محفظه تیمار افزایش می یابد بدون اینکه نیاز پرس اضافی باشد (۴).

انرژی مصرفی

میزان انرژی مصرفی نیز بازا افزایش تعداد پالس افزایش می یابد و این افزایش در تمام شرایط میدان های اعمال شده در شکل ۲ به چشم می خورد. افزایش انرژی با اعمال میدانهای 3 kV/cm و $8 \mu\text{F}$ و 1 kV/cm و $32 \mu\text{F}$ به ترتیب از



شکل ۱. اثر شرایط مختلف میدان به ازاء تعداد پالس اعمال شده بر شاخص تخریب سلول



شکل ۲. اثر شرایط مختلف میدان به ازاء تعداد پالس اعمال شده بر میزان انرژی مصرفی

پالس با فرآیند حرارتی در شکل ۳ نشان داده شده است و به طوری که ملاحظه می‌شود برای تیمار با PEF و اعمال حرارت 70°C پس از ۱۵ دقیقه شاخص تخریب (di) به ترتیب معادل $0/82$ و $0/88$ و انرژی مصرفی برابر ۸ و ۱۵۶ کیلوکالری بر کیلوژول به دست آمده است. به عبارت دیگر مقدار انرژی مصرفی در فرآیند حرارتی حدود ۲۰ برابر بیشتر از اعمال میدان الکتریکی با شاخص تخریب مشابه است (۱۹ و ۲۰).

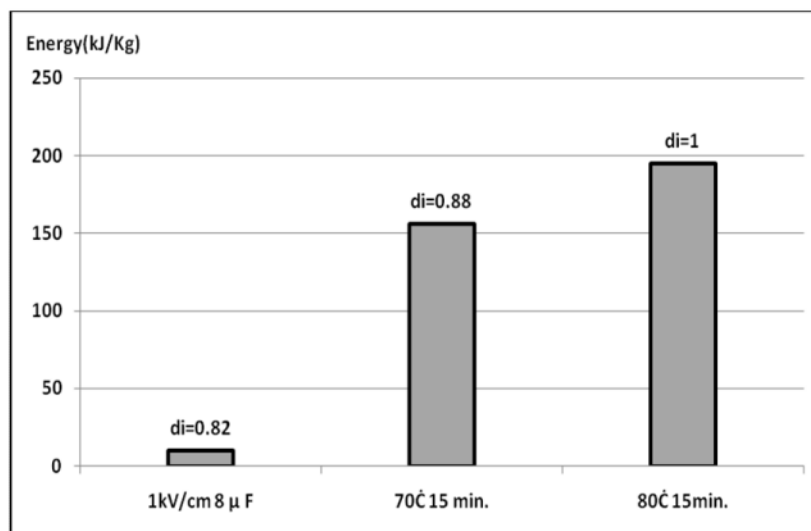
جدول ۳. مقایسه شاخص تخریب و انرژی مصرفی در فرآیند حرارتی چغندر قند

حرارت	زمان اعمال حرارت	شاخص تخریب (di)
70°C	۰	0 ± 0
	۵	$0/25 \pm 0/06$
	۱۰	$0/82 \pm 0/06$
80°C	۱۵	$0/9 \pm 0/16$
	۰	0 ± 0
	۵	$0/77 \pm 0/2$
80°C	۱۰	$0/91 \pm 0/15$
	۱۵	$1 \pm 0/07$

مقایسه شاخص تخریب سلول در اعمال میدان‌های مختلف با تیمار حرارتی

به طوری که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود میزان شاخص تخریب در کلیه زمانهای اعمال حرارت در 80°C بطور معنی‌داری بیشتر از اعمال حرارت در 70°C است و این وضعیت به دلیل تخریب بیشتر غشاء و دیواره سلولی چغندر در حرارت‌های بالاتر است. در جدول ۳ نیز مقادیر بدست آمده برای شاخص تخریب در دو سطح مختلف اعمال حرارت و زمانهای مختلف دیده می‌شود. نکته قابل توجه رسیدن به شاخص تخریب ۱ (حداکثر مقدار) پس از ۱۵ دقیقه اعمال حرارت 80°C است. همچنین با اعمال حرارت در 80°C از ۵ تا ۱۰ دقیقه افزایش قابل ملاحظه‌ای در شاخص تخریب مشاهده می‌شود. در حالی که در تیمار 70°C افزایش تخریب در غشا تدریجی است (۱۳ و ۱۸).

مقدار انرژی مصرفی برای تخریب غشای سلول چغندر در فرآیند حرارتی به میزان قابل ملاحظه‌ای نسبت به فرآیند استخراج توسط PEF بالاتر است و این میزان بین ۱۰ تا ۲۰ برابر انرژی دریافتی در شرایط تیمار با میدان الکتریکی می‌باشد (۱۸). مقایسه میزان انرژی مصرفی پس از اعمال تیمار با میدان الکتریکی 1 kV/cm و $8\mu\text{F}$ پس از ۱۰۰



شکل ۲. مقایسه انرژی در میدان الکتریکی ۸ kV/cm و ۸ μF پس از ۱۰۰ پالس و دو سطح تیمار حرارتی پس از ۱۵ دقیقه

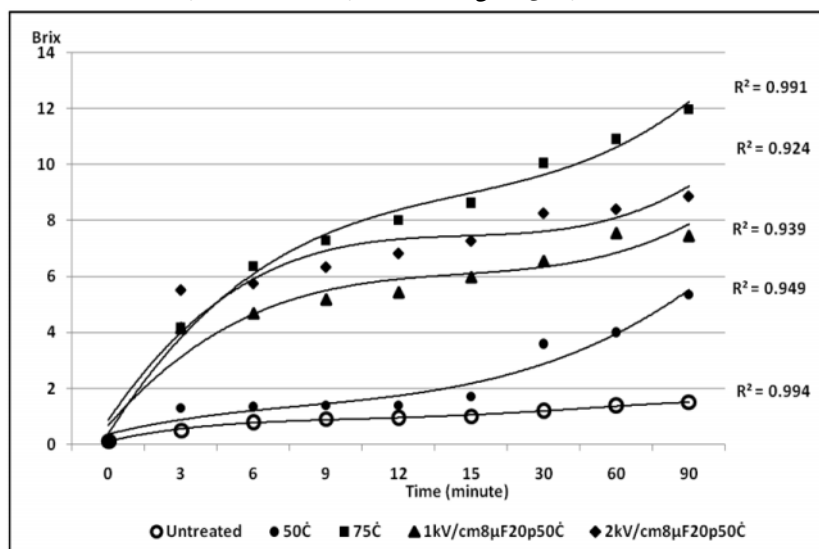
حرارت 50°C نسبت به شاهد به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. آده آمویا و همکاران در سال ۲۰۰۱ اثر میدان های الکتریکی را بر روی مواد غذایی مختلف نظیر نارگیل و فلفل سبز در فرآیند خشک کردن مورد مطالعه قرار داده و با دیگر روشهای معمول و نوین از جمله فشار بالا مقایسه نمودند. آنها دریافتند که بازای افزایش تعداد پالس و شدت میدان میزان تخریب سلول و در نتیجه انتقال جرم افزایش می یابد و در مقایسه با اعمال حرارت یا استفاده از فشار بالا انرژی کمتری نیازمند است (۲۱ و ۲۲).

میزان هدایت الکتریکی (انتقال جرم) در شرایط دو میدان $20, 8 \mu\text{F}$ ، $20, 8 \mu\text{F}$ پالس و مقایسه با فرآیند حرارتی شاخص دیگر انتقال جرم بر اثر افزایش قابلیت نفوذ و تخریب غشامیزان هدایت الکتریکی شربت طی فرآیند استخراج می باشد. نتایج مشابه آن چه در مورد بریکس به دست آمده بود نیز در اندازه گیری میزان هدایت الکتریکی نیز به دست آمد که در شکل ۵ به وضوح مشاهده می شود. میزان هدایت الکتریکی شربت در فرآیند حرارتی 75°C نسبت به بقیه تیمارها بالاتر بود و پس از آن اعمال تیمار با

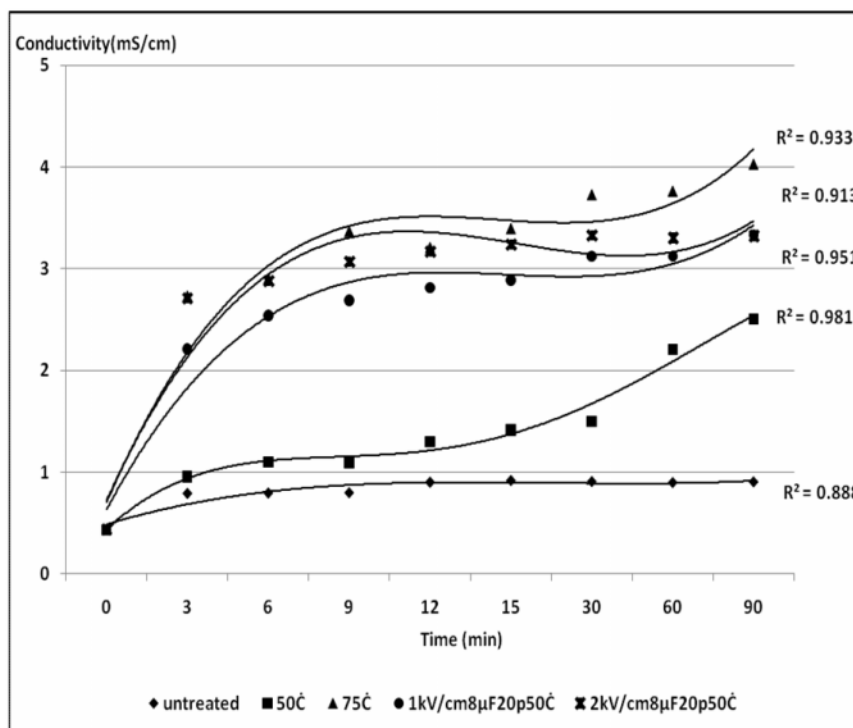
میزان بریکس یا مواد جامد محلول (انتقال جرم) در شرایط دو میدان $20, 8 \mu\text{F}$ و $8 \mu\text{F}$ و مقایسه با فرآیند حرارتی همانطور که قبلاً ذکر گردید نمونه های خلال چغندر پس از اعمال فرآیند حرارتی در 50°C و 75°C از نظر از نظر میزان انتقال جرم در طول زمان مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۴ مقادیر بریکس شربت در نمونه های شاهد، تیمار با PEF و تیمار حرارتی 50°C و 75°C مشاهده می گردند. میزان انتقال جرم یا به عبارت دیگر میزان مواد جامد محلول در شربت در تیمار با حرارت بویژه در 75°C به دلیل تخریب نسبتاً کامل سلولهای چغندر طی فرآیند استخراج نسبت به تیمارهای دیگر مقدار بالاتری را نشان می دهند. میزان بریکس شربت نیز پس از تیمار با PEF در میدان $8 \mu\text{F}$ و $20, 8 \mu\text{F}$ پس از ۲۰ پالس قابل ملاحظه است. کمترین میزان انتقال جرم مربوط به نمونه تیمار نشده است و بعد از آن تیمار با حرارت 50°C . بنابراین حرارت دادن به میزان 50°C در قابلیت نفوذپذیری و در نتیجه انتقال جرم سلول چغندر تأثیر قابل ملاحظه ای ندارد. هرچند پس از ۹۰ دقیقه استخراج و تعقیب روند انتقال جرم میزان بریکس در تیمار با

ملاحظه ای نشان داد. می‌توان پیش بینی نمود که اعمال توأم حرارت به میزان ۵۰ C و PEF ممکن است نتیجه مطلوبی از نظر انتقال مواد در برداشته باشد.

میدان 2 kV/cm ، $8\text{ }\mu\text{F}$ و ۲۰ پالس در مرتبه بعدی قرار داشت. اعمال حرارت ۵۰ C نیز در دقایق اولیه استخراج ناچیز ولی با گذشت زمان نسبت به شاهد افزایش قابل



شکل ۴. میزان افزایش بریکس در طی زمان استخراج و پس از اعمال تیمار در میدان 2 kV/cm و $8\text{ }\mu\text{F}$



شکل ۵. میزان افزایش بریکس در طی زمان استخراج و پس از اعمال تیمار در میدان 2 kV/cm و $8\text{ }\mu\text{F}$

انرژی با استفاده PEF ۲۰ برابر کمتر از مصرف انرژی در فرآیند حرارتی است (۱۱). به علاوه برای رسیدن به حداکثر تخریب غشای سلول در شرایط PEF فقط یک دقیقه زمان لازم است در حالی که این زمان برای تیمار حرارتی معادل ۱۵ دقیقه می باشد. اشتیاقی و همکاران در سال ۲۰۰۲ کاهش قابل ملاحظه مصرف انرژی را در مقایسه با فرآیند سنتی اعمال حرارت در چغندر قند نشان دادند (۱۸).

نتیجه گیری

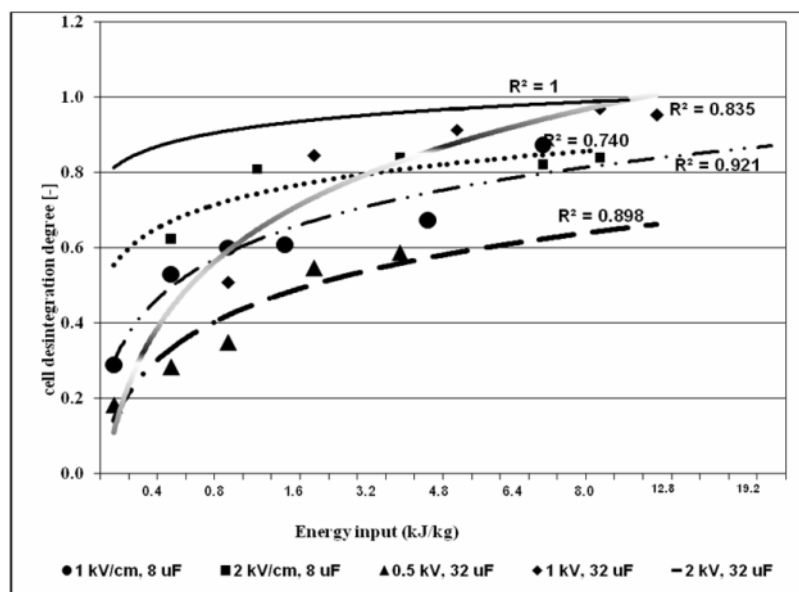
این مقاله اهمیت شرایط میدان از قبیل قدرت، ظرفیت خازن و تعداد پالس را برای حداکثر صرفه جویی در مصرف انرژی و حصول راندمان بیان می کند. مقالات کمی در خصوص تنظیم شرایط میدان انتشار یافته اند اما حصول شرایط بهینه برای تخریب سلول، استخراج قند و بالاخره مصرف انرژی به عنوان مهم ترین نتایج این تحقیق به شمار می آید. به طور کلی فرآیند PEF سبب تخریب سلولهای چغندر قند می گردد و اثر تخریبی غشای سلول چغندر به قدرت میدان، ظرفیت خازن و تعداد پالس بستگی دارد. بیشترین اثر تخریبی تیمار توسط PEF در شرایط میدان 2kV/cm ، $8\mu\text{F}$ و ۲۰ پالس بدست آمد که با شاخص تخریب 80°C به مدت ۱۰ دقیقه برابر است. هم چنین برای حصول مقادیر مساوی مواد قندی از سلول میزان انرژی مصرفی در PEF بطور قابل ملاحظه ای (تقریباً ۲۰ برابر) کمتر از انرژی مصرفی در تیمار حرارتی است. زمان استخراج نیز در تیمار با PEF به طور قابل ملاحظه ای نیز کمتر از زمان فرآیند با تیمار حرارتی است. انتقال جرم (آزاد سازی ملکولهای قند و یونها) در حرارت معمول با PEF با افزایش قدرت میدان نیز افزایش می یابد.

مقایسه مصرف انرژی و تخریب سلولی تحت شرایط میدان های مختلف

در شکل ۶ میزان مصرف انرژی برای تخریب غشای سلول در شرایط میدان های مختلف مشخص شده است. میزان انرژی مصرفی برای میدان 1kV/cm و $32\mu\text{F}$ مشابه انرژی مصرفی در میدان 2kV/cm و $8\mu\text{F}$ است اما تخریب غشای سلول به میزان بیشتری انجام شده است و بر عکس در قدرت های پایین تر میدان یعنی 0.5kV/cm و $32\mu\text{F}$ عکس این حالت مشاهده می شود بنابراین استفاده از قدرت میدان بالاتر نسبت به افزایش ظرفیت خازن ترجیح دارد (۱۵ و ۱۶).

در بررسی انرژی برای هر تیمار PEF مشخص گردید که فاکتور انرژی مصرفی یکی از عوامل مهم به شمار می آید و مشاهدات در این تحقیق دلالت بر این نکته دارد که با افزایش انرژی مصرفی تخریب غشای سلولی بیشتر صورت می گیرد (شکل ۶). همچنین برای تخریب مؤثر غشا حداقل سطحی از قدرت میدان مورد نیاز است و پیدا کردن شرایط بهینه برای حداقل انرژی مصرفی و تخریب مؤثر غشا اهمیت زیادی دارد (۲۳).

مقایسه بین انرژی مصرفی برای تخریب سلول با استفاده از PEF و میزان انرژی مصرفی در فرآیند حرارتی یا روش های معمول و سنتی نشان داد که روش استفاده از PEF بطور چشمگیری سبب کاهش مصرف انرژی نسبت به روش حرارتی می گردد (8kJ/kg در مقابل 156kJ/kg). همچنین فرآیند حرارتی 50°C قادر به تخریب سلول نمی باشد. در درجه حرارت 70°C و بالاتر با افزایش درجه حرارت شاخص تخریب نیز افزایش می یابد و مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتن چغندر قند در 75°C برای رسیدن به حداکثر تخریب ($di=1$) کافی است. مقایسه بین انرژی مصرفی برای فرآیند حرارتی نسبت به PEF دلالت بر این نکته دارد که مصرف



شکل ۶. میزان مصرف انرژی برای تخریب غشای سلول در شرایط های مختلف

تحقیقات بیشتری نیاز است تا در مقیاس صنعتی مسایل مربوط به افزایش ظرفیت تولید مورد بررسی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از مشاوره و نظارت های علمی و فنی اساتید بزرگوار دکتر محمد رضا شکرانی و دکتر رسول کدخدایی، دکتر سید علی مرتضوی و مهندس محمد باقر باقرزاده و حمایت های مالی، فنی و خدماتی صندوق حمایت از پژوهشگران ریاست جمهوری، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی خراسان رضوی، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه ماییدول تایلند و مرکز بررسی، آموزش و تحقیقات قند و چغندر قند برای اجرای این پروژه قدردانی می گردد.

هر چند به همان نسبت نیز انرژی مصرفی بالاتر است اما هرگز به میزان مصرف انرژی در فرآیندهای حرارتی نمی رسد و به مراتب کمتر از آن است. امروزه در دنیا صرفه جویی در مصرف انرژی و افزایش بهره وری و کیفیت مهم ترین مسأله در تولید محصولات و رقابت پذیری آنها در بازار است. در حال حاضر بزرگترین مشکلات صنایع قند کشور فرسوده بودن دستگاهها، بالا بودن مصرف انرژی، راندمان بسیار پایین نسبت به شرایط تولید شکر در صنایع مشابه در دنیا و به طور کلی کاهش بهره وری می باشد. این نتایج نشان دهنده قابلیت بسیار بالای استفاده از میدان های الکتریکی پالسی قوی (PEF) را نسبت به فرآیندهای معمول و سنتی برای استخراج قند می باشد و بطور امید بخشی می تواند در صنعت تولید قند با صرفه جویی در مصرف انرژی و زمان تولید قند از چغندر بکار گرفته شود. هر چند

منابع

- 1) Hülshager, H. and E. G. Nieman. 1980. Lethal effect of high-voltage pulses on *E. coli* K12, Radiat. Environ. Biophys.;18,4,:281-8

- 2) Quass, D. W. 1997. Pulsed electric field processing in the food industry, A status report on PEF. Palo Alto, CA. Electric Power Research Institute.;CR-109742
- 3) Bazhal, M.I., N.I., Lebovka, and V., Vorobie. 2001. E. Pulsed electric field treatment as a complementary operation in pressing of food materials .Journal of Food Engineering, 50: 2-129-139.
- 4) McLellan, M.R., R. L., Kime, and L. R., Lind. 1991. Electropasmolysis and other treatments to improve apple juice yield. Journal of Science Food Agriculture,; 57: 303–306.
- 5) Bazhal, M. I., and E.I. Vorobiev. 2000. Electric treatment of apple slices for intensifying juice pressing. Journal of the Science of Food and Agriculture, 80: 1668–1678.
- 6) Mastwijk, H.C., P.V. Bartels, M. B., Fox, D. C., Esveld, and A., Valero. 2006. Luttge, R., Van den Berg, A. and Boom, R.M. Electroporation of cell in micro fluidic devices: a review. Analytical and Bioanalytical Chemistry; 385: 474- 485.
- 7) Angersbach, A., V., Heinz, and D., Knorr. 2000. Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 1:2- 135-149.
- 8) Castro, A.J., G.V. Barbosa-Ca´novas and B.G. Swanson. 1993. Microbial inactivation of foods by pulsed electric fields, J Food Proc Pres, 17:1- 47–73.
- 9) Zimmerman, U., F. Riemann, and G. Pilwat. 1976. Enzyme loading of electrically homogeneous human red blood cell ghosts prepared by dielectric breakdown. Biochem . Biophys. Acta; 436: 460-474.
- 10) Knorr, D., A., Angersbach, M., Eshtiaghi, V., Heinz, and D. U., Lee. 2001. Processing concept based on high intensity electric field pulses. Trends in Food Science and Technology, 12:129-135.
- 11) Sale, A. J. H. and Hamilton, W. A. 1967. Effects of high electric fields on microorganisms I. killing of bacteria and yeast. Biochem, Biophys Acta.;148:781-788
- 12) Sek, W. H., 1993. Effect of pulse length and strength on electroperation efficiency. Method in molecular biology, 55:29-41
- 13) Bouzrara, H., and E., Vorobiev. 2000. “Beet Juice Extraction by pressing and pulsed electric fields.” International Sugar Journal, 102-1216: 194–200.
- 14) Schneider, F. 1968. Technologie des Zucker. Hannover. Verlag, M.& H. Schaper,
- 15) N.I., Lebovka, M.P, Kupchik, K., Sereda, and E. Vorobiev. 2008. Electrostimulated thermal permeabilisation of potato tissues. Biosystem Eng. 99:76 – 80
- 16) Eshtiaghi, M. N., and D. Knorr. 1999. Process for treatment of sugar beet.,European Patent, WO 99/6434.
- 17) Eshtiaghi, M. and N., Knorr. 2002. High electric field pulse pretreatment: Potential for sugar beet processing. J. Food Engineering, 52- pp578–583.
- 18) . Eshtiaghi M.N and D. Knorr. 2000. Application of high electrical pulsed field for cell disintegration and sucrose extraction from sugar beet. International patent No: WO, 0996434
- 19) Fincan, M., F., DeVito, and P., Dejmek. 2004. “Pulsed electric field treatment for solid-liquid extraction of red beetroot pigment.” Journal of Food Engineering,; 64:381–388.
- 20) Bouzrara, H., and E. Vorobiev. 2003. Solid–liquid expression of cellular materials enhanced by pulsed electric field. Chemical Engineering and Processing,; 42: 249–257.
- 21) Ade-Omowaye, B.I.O., A., M.N., Angersbach, Eshtiaghi, and D., Knorr. 2001a. Impact of high intensity electric field pulses on cell permeabilisation and as pre-processing step in coconut pressing.”Innovative Food Science and Emerging Technologies, 1:203-209.
- 22) Ade-Omowaye, B. I. O., N. K., Rastogi, A., Angersbach, and D., Knorr. 2001b. Effects of high hydrostatic pressure or high intensity electrical field pulse pre-treatment on dehydration characteristics of red paprika. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2: 1–7.
- 23) Sale, A. J. H. and W. A., Hamilton. 1967. Effects of high electric fields on microorganisms I. killing of bacteria and yeast. Biochem. Biophys Acta.;148:781-788