

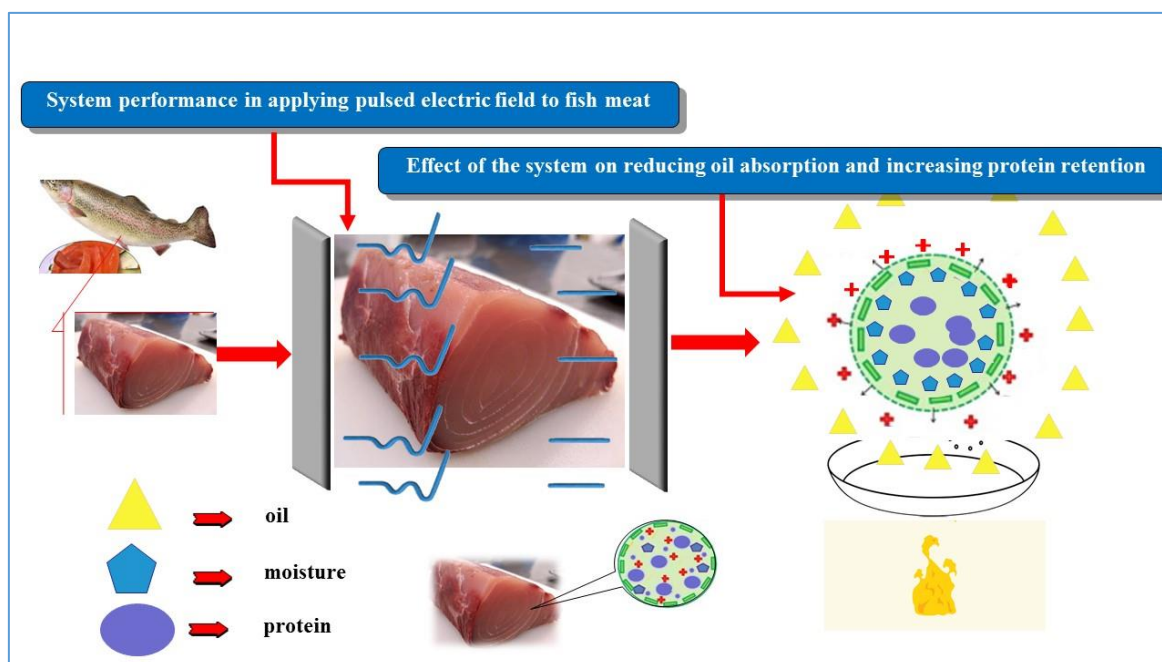
Design, Construction and Evaluation of Pulsed Electric Field System for Food Processing

Mehdi Nojavan¹, Saeid Minaei^{1*}, Shahriar Sarami²

1. Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Department of Agriculture, Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST), Tehran, Iran

(Received: March 22, 2020- Revised: Aug. 2, 2020- Accepted: Aug. 24, 2020)



Abstract: Utilizing the latest available technologies is essential for food preservation and processing. Consumers increasingly prefer products that have undergone the least change during processing and storage. Among them, pulsed electric field (PEF) is one of the non-thermal methods of food processing and storage. In this study, a Pulsed Electric Field system was designed, fabricated and then evaluated. For this purpose, a Schmidt-Trigger-based pulse generating system system and a semiconductor key (IGBT) were designed and tested using a gate driver with DC output. The input parameters for the tests included: voltage, number and frequency of pulses as well as pulse width. In order to adjust the two parameters, pulse number and excitation frequency, a touch panel and autotransformer were utilized to adjust the voltage. A constant pulse width of 2 microseconds was used. The results of the evaluation were reported in two parts. In the first part, the evaluation of the system function was performed using an oscilloscope and high voltage waves were produced. In the second part, the evaluation of the fish samples was performed in terms of the effect on the value of extracting protein. The Response-Surface method and Box-Bhenken scheme were used for data analysis and process optimization. Results of analyses showed that based on regression coefficients, the effect of the voltage factor and the second voltage factor had the highest influence on Protein extraction increase.

Keywords: Electric pulse, Protein extraction, Response surface, Optimization

طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه میدان الکتریکی ضربانی برای فرآوری مواد غذایی

مهدی نوجوان^۱، سعید مینایی^{*}، شهریار صرامی^۲

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس،

تهران، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پژوهشکده کشاورزی، سازمان پژوهشهای

علمی و صنعتی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۵/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۶/۳)

چکیده: بهره‌گیری از آخرین فناوری‌های روز دنیا برای حفظ و فرآوری مواد غذایی امری ضروری است. مصرف‌کنندگان محصولات را می‌پسندند که کمترین تغییر را در طول فرآوری و نگهداری داشته‌اند. میدان الکتریکی پالسی (PEF)، یکی از روش‌های غیر حرارتی برای فرآوری و نگهداری مواد غذایی شناخته شده است. در این پژوهش یک سامانه میدان الکتریکی ضربانی با استفاده از منبع تغذیه پیوسته با خروجی DC، یک سامانه تولید ضربان مبتنی بر اشمیت تریگر و یک کلید نیمه هادی (IGBT) با گیت درایور، طراحی و ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای ورودی برای انجام آزمایش‌ها عبارتند از: ولتاژ، تعداد پالس، بسامد و عرض ضربان. به‌منظور اعمال دو عامل تعداد پالس و بسامد تحریک، یک صفحه لمسی و اتوترانس برای تنظیم ولتاژ به کار برده شد. در ضمن عرض ضربان ثابت (۲ میکروثانیه) بود. نتایج حاصل از ارزیابی در دو بخش ارائه گردید. در بخش اول ارزیابی کارکرد سامانه بود که با استفاده از دستگاه اسیلوسکوپ انجام گرفت و موج‌هایی با ولتاژ بالا تولید گردید. در بخش دوم ارزیابی بر روی نمونه‌های ماهی از لحاظ تاثیر در افزایش میزان پروتئین استخراجی انجام گرفت. برای تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیند از روش سطح پاسخ (RSM) و طرح باکس-بنکن بهره‌گیری شد. نتایج بررسی نشان داد که با توجه به ضریب رگرسیونی، اثر فاکتور ولتاژ و توان دوم ولتاژ، بیشترین تاثیر در افزایش میزان استخراج پروتئین نمونه‌ها را داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: پالس الکتریکی، استخراج پروتئین، سطح پاسخ، بهینه‌سازی

مقدمه

امروزه مصرف کنندگان بیشتر مواد خوراکی به دنبال محصولات غذایی مناسب در ازای کیفیت بالا، طعم طبیعی و با حداقل تاثیر مخرب فرآیندهای نگهداری و فرآوری بر روی آن‌ها هستند. نگهداری و فرآوری مواد خوراکی از دیر باز دارای اهمیت خاصی برخوردار بوده است. فرآوری گرمایی مواد غذایی و نوشیدنی‌ها به عنوان وسیع‌ترین و در عین حال قدیمی‌ترین روش آماده سازی و نیز نگهداری مواد خوراکی محسوب می‌شود. چندین روش حرارتی برای فرآوری مواد غذایی وجود دارد که پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون دو مورد معمول آن‌ها است. استفاده از پیش تیمارهای گرمایی باعث تخریب رنگ، عطر، بافت و مواد مغذی ترکیبات خوراکی می‌شود (Kumar and Han, 2012). در این میان فناوری‌های غیرحرارتی گزینه اصلی برای جایگزینی روش‌های گرمایی در فرآوری و نگهداری مواد خوراکی هستند (Kumar and Han, 2012). تاریخچه بهره‌گیری از فناوری‌های غیرگرمایی به اواسط قرن بیستم بر می‌گردد که در زمینه‌های مختلف همچون مهندسی مکانیک، داروسازی، متالورژی، صنعت بنزین و غیره به کار برده شده است (Jambrak, 2019; H. Q. Zhang *et al.*, 2011). نمونه‌هایی از فرآیندهای غیرحرارتی عبارتند از: لامپ UV، پرس سرد، تابش یونیزه، کاویتاسیون هیدرودینامیکی، نوسانات میدان الکتریکی، نور پالسی، فناوری سیال فوق بحرانی، میدان الکتریکی پالسی (PEF)، فراصوت، فناوری سیال فوق بحرانی با پرس سرد که در ۱۵ سال گذشته به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Kumar and Han, 2012). از این روش‌ها می‌توان برای نگهداری آب میوه‌ها، محصولات غذایی دریایی، گوشت و غیره استفاده برد. این روش‌ها از لحاظ تاثیر بر کیفیت مواد خوراکی، ایمنی میکروبیولوژیک (Prakash, 2013)، تسریع در خشک کردن، انجماد، افزایش سرعت استخراج، غیر فعال کردن آنزیم‌ها، ویژگی‌های حسی و سایر مزایا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با این حال چنین فناوری‌هایی نیز مانند هر

فرآیندی جنبه‌های منفی دارند که باید با مزایای مثبت آن‌ها مورد مقایسه قرار بگیرند. از جنبه‌های منفی فناوری‌های غیرگرمایی و روش‌های نوین فرآوری مواد غذایی می‌توان به تشکیل رادیکال‌های آزاد، تغییر در عطر، بافت و رنگ اشاره کرد (Jambrak, 2019). میدان الکتریکی ضربانی فرآیندی غیرگرمایی است که در آن ماده خوراکی در معرض میدان ضربانی با ولتاژ بالا قرار می‌گیرد. این روش ضمن آنکه اثر کمی بر ویژگی‌های حسی و ارزش تغذیه‌ای محصولات دارد، به عنوان یک روش مدرن برای غیرفعال سازی میکروبی، آزدایی از مواد خوراکی از طریق شکست غشای سلولی، خروج آب از سلول به منظور استخراج شیره یا عصاره میوه و سبزی‌ها مورد توجه قرار گرفته است (Lebovka *et al.*, 2003). میزان تاثیر گذاری PEF بستگی به ترکیب غذا، pH، قدرت یونی، هدایت یونی، وجود حباب هوا در داخل مایع موجود در محفظه تیمار، قدرت میدان، زمان، دما و شکل پالس اعمالی بستگی دارد (Kumar and Han, 2012). فاصله‌ی بین الکترودها و ولتاژ اعمالی به محفظه، تعیین کننده‌ی قدرت میدان الکتریکی (E) است که معمولاً با واحد kV/cm گزارش می‌شود (Jia *et al.*, 1999). سامانه PEF شامل مولد ولتاژ بالا، سامانه تولید پالس و محفظه نمونه برای اعمال تیمار می‌باشد. میدان الکتریکی به صورت ضربان درون محفظه نمونه به ماده خوراکی اعمال می‌شود. این محفظه عموماً شامل دو نوع الکترود (ولتاژ بالا و اتصال زمین) و مواد عایق برای نگهداری الکترودها و نمونه است (Ravishankar *et al.*, 2008). تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه کاربرد این فرآیند در صنایع غذایی گزارش شده است که می‌توان به از بین بردن میکروارگانیسم‌ها در مواد غذایی مایع مانند آب میوه (Cserhalmi *et al.*, 2006; El Kantar *et al.*, 2018) و شیر (Sharma *et al.*, 2014) اشاره کرد. در سال ۲۰۱۰، آب پرتقال مخلوط با باکتری *Listeria innocua* تحت میدان پالسی قرار گرفت و کاهش لگاریتمی میکروب آن را ۳/۷ درصد گزارش شد که نسبت به تیمار گرمایی معمولی تاثیر بیشتری داشت

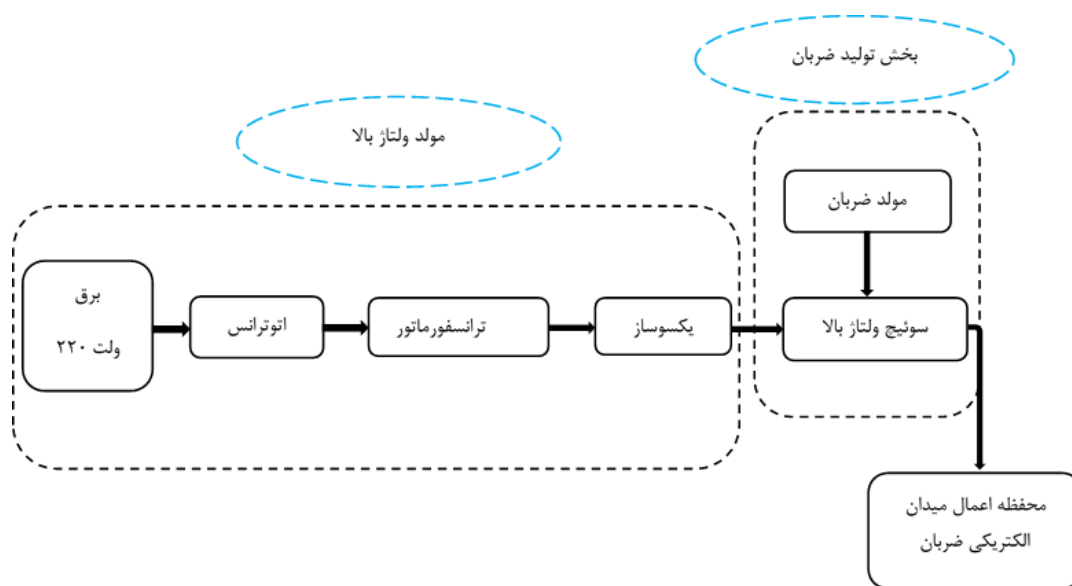
نگرانی‌هایی که در مورد این فناوری وجود دارد، ایجاد شکست الکتریکی در اثر استفاده از این روش و تاثیر مخرب بر روی مواد خوراکی می‌باشد. منظور از شکست الکتریکی افزایش اختلاف پتانسیل نسبت به آستانه تحمل سلول بافت نمونه است. شکل الکترودها، جرقه حاصل از عبور شدت جریان، طراحی محفظه اعمال تیمار، از عوامل تاثیر گذار بر ایجاد شکست الکتریکی هستند (Q. Zhang et al., 1995).

با توجه به آنچه مطرح شد، هدف این پژوهش، طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه‌ی میدان الکتریکی پالسی برای کاهش جرقه و دما در روند بهره‌گیری از این روش برای فرآوری مواد خوراکی و امکان کنترل پارامترهای تاثیر گذار (تعداد، شکل، عرض و فرکانس پالس) و میزان ولتاژ در اجرای فرآیند افزایش استخراج پروتئین می‌باشد.

مواد و روش‌ها

همان‌گونه که بیان شد، میدان الکتریکی ضربانی باید دارای اجزای اصلی به شرح زیر باشد: مولد ولتاژهای بالا، بخش تولید ضربان و محفظه اعمال میدان الکتریکی به محصول. شکل ۱ نمودار روندنمای سامانه مورد نظر را نشان می‌دهد.

(McNamee et al., 2010). پژوهش‌های زیادی روی سایر آب میوه‌ها انجام شده که در اکثریت آن‌ها عطر، طعم و ویژگی‌های تغذیه‌ای بهتر شده و این نشان دهنده تاثیر مثبت PEF در کاهش بار میکروبی و حفظ طعم و در راستای آن افزایش عمر انبارداری آب میوه است (Odriozola-Serrano et al., 2009; Oms-Oliu et al., 2009). این فناوری می‌تواند به عنوان یک پیش تیمار برای افزایش بازده استخراج روغن از دانه‌های روغنی (Guderjan et al., 2007) و بهبود آگیری در خشک کردن (Amami et al., 2008) استفاده شود. هدف هم‌هی این پژوهش‌ها کاهش دما، زمان، انرژی و سهولت استخراج نسبت به فرآیندهای گرمایی و غیرگرمایی است (Maskooki and Eshtiaghi, 2009; Salehi And Omidvari, 2017). در پژوهش‌هایی که گزارش شد، عرض، تعداد ضربان، ولتاژ و فرکانس پالس از مهم‌ترین بخش‌های سامانه‌های PEF شناخته شد (Heinz et al., 2001; Kumar and Han, 2012). در بیشتر دستگاه‌های ساخته شده امکان کنترل هر چهار پارامتر وجود ندارد و یا اگر هم امکان کنترل باشد، هزینه ساخت سامانه بیشتر شده و توجیه اقتصادی ندارد. به همین دلیل بیشتر یک یا دو پارامتر را ثابت در نظر گرفته و بقیه را متغیر می‌سازند. همچنین یکی از

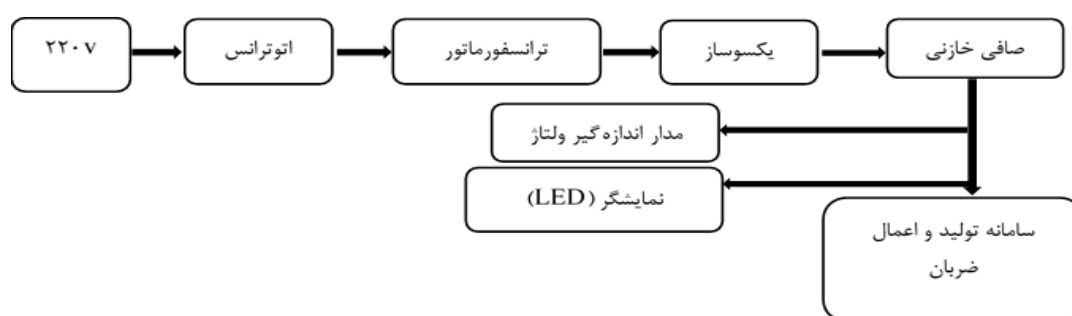


شکل ۱- نمودار روندنمای سامانه‌ی میدان الکتریکی ضربانی

مولد ولتاژ بالا

این بخش در سامانه PEF که نمودار روندنمای آن در شکل ۲ آورده شده است شامل اتوترانس، ترانسفورماتور، یکسوساز، صافی خازنی، مدار اندازه‌گیری ولتاژ و نمایشگر می‌باشد. وظیفه این بخش تولید سطوح بالای ولتاژ و انتقال آن به بخش تولید ضربان می‌باشد. در این راستا از یک ترانسفورماتور افزایش‌دهنده برای تامین انرژی الکتریکی پیوسته بهره‌گیری شد. ولتاژ برق شهری پس

از عبور از اتوترانس تک فاز که ولتاژ ورودی را قابل تنظیم می‌کند، توسط ترانسفورماتور به نسبت یک به ۱۰ افزایش می‌یابد. در گام بعدی، برای تبدیل ولتاژ AC به DC از مدار یکسوساز تمام موج ولتاژ بالا (رابطه-۱) استفاده شد. برای ساخت این مجموعه، ۱۲ عدد دیود طبق مدار پل دیود برای تامین ولتاژ خروجی متصل گردید.

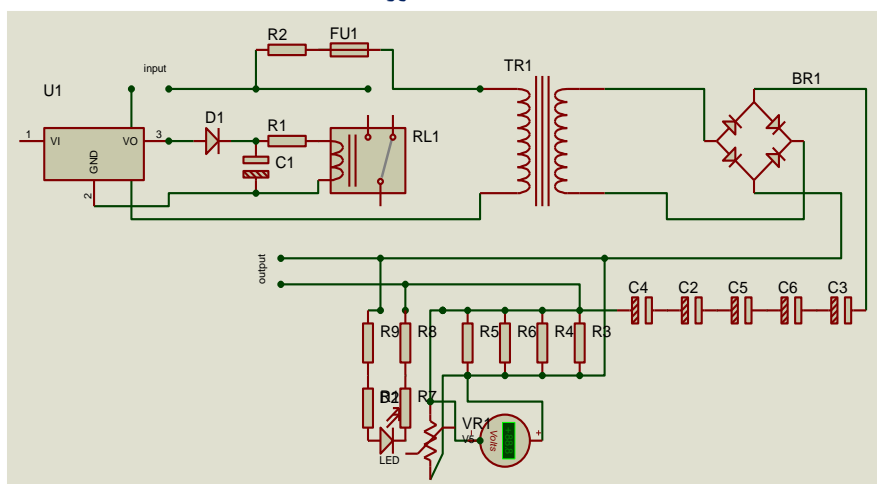


شکل ۲- نمودار روندنمای مولد ولتاژهای بالا

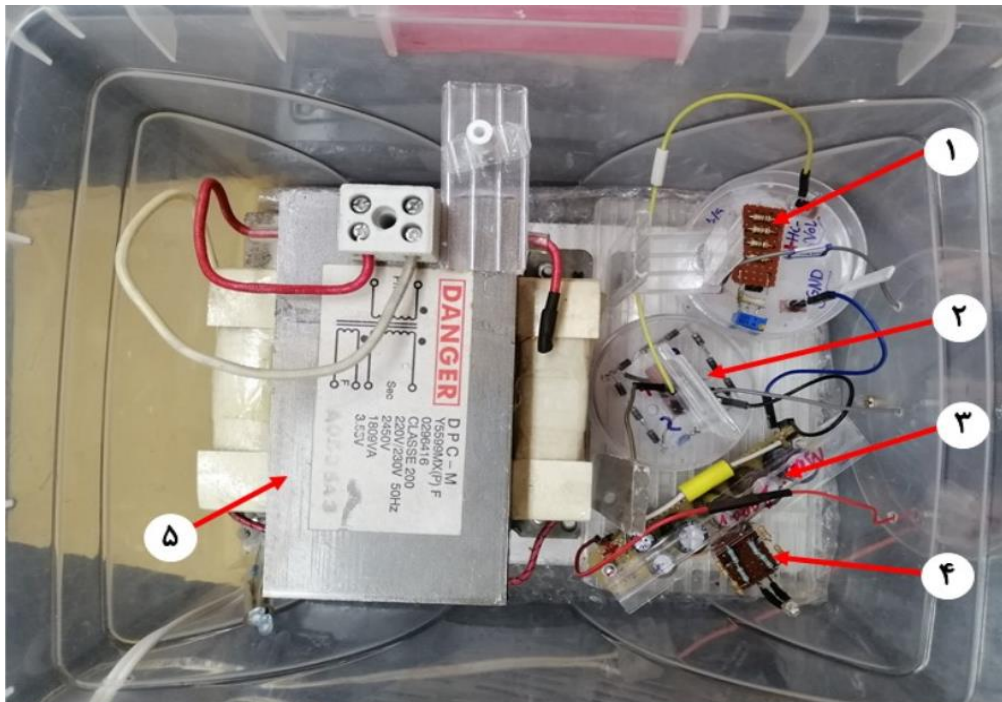
$$v_{DC} = 2 \times \frac{v_p - 2 \times v_\gamma}{\pi} \approx \frac{2V_P}{\pi} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در ادامه برای حذف یا دست‌کم کاهش تغییرات ولتاژ خروجی از یکسوکندنده ولتاژ بالا، از صافی خازنی بهره‌گیری شد. در این بخش با توجه به این که حداکثر ولتاژ کاری ۲ kV می‌باشد، از ۵ عدد خازن با تحمل ولتاژ ۴۰۰ V برای صافی خازنی استفاده شد. از آنجا که ولتاژ تولیدی از محدوده اندازه‌گیری ولت‌مترها بالاتر است، یک مدار مقسم ولتاژ برای اندازه‌گیری آن طراحی و

ساخته و به مجموعه اضافه شد. این مدار مقدار ولتاژ را بر ۱۰ تقسیم می‌کند تا به محدوده اندازه‌گیری ولت‌مترهای موجود نزدیک شود. در ضمن از مدار مقاومتی که همراه با یک LED می‌باشد، برای نمایش کارکرد کل سامانه تولید مولد ولتاژ بالا بهره‌گیری شد. برای نمایش بهتر سامانه مولد ولتاژ بالا، در شکل ۳ شماتیک مدار مولد ولتاژ بالا کل سامانه و در شکل ۴ شکل سامانه ساخته شده با نمایش قسمت‌های مختلف آورده شده است.



شکل ۳- شماتیک طراحی مدار مولد ولتاژ بالای ساخته شده

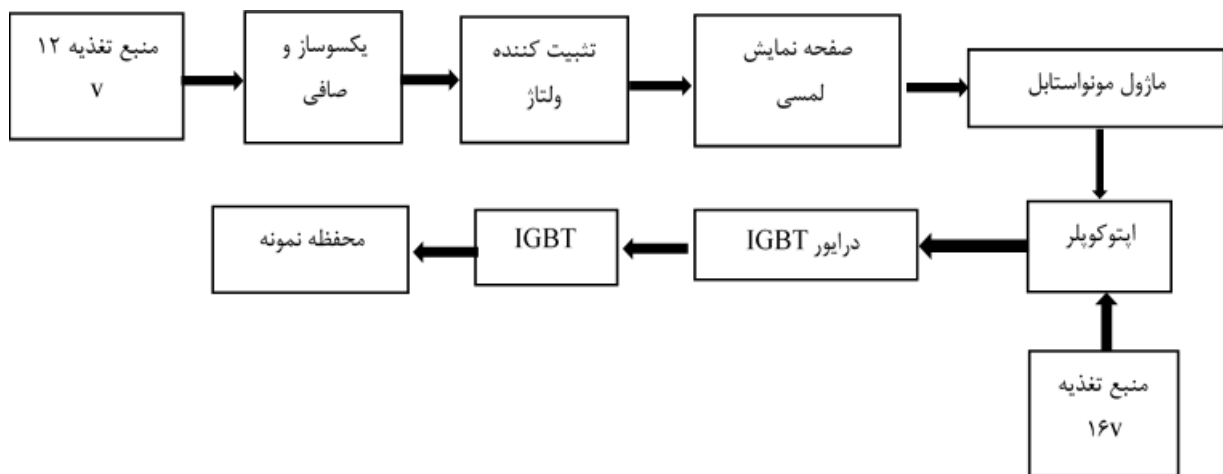


شکل ۴- طرح سامانه ساخته شده مولد ولتاژ بالا، ۱- مدار مقسم ولتاژ بالا، ۲- مدار یکسوساز، ۳- صافی خازنی، ۴- نمایشگر، ۵- ترانسفورماتور ولتاژ بالا.

سامانه تولید و اعمال ضربان

ولتاژ تولید شده توسط مولد ولتاژ بالا از طریق سامانه مولد ضربان به محفظه نمونه اعمال می‌شود. این بخش شامل اجزای زیر است: ۱- میکروکنترلر، ۲- صفحه

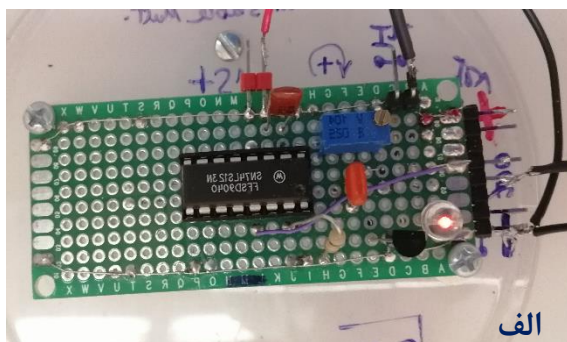
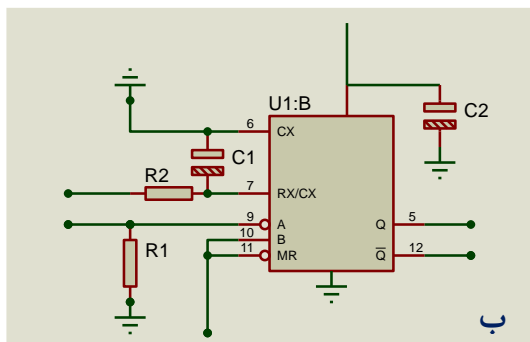
نمایش لمسی، ۳- IGBT^۱، ۴- مدار مونو استابل، ۵- درایور IGBT، ۶- منبع تغذیه ۱۶۷ و ۱۲ V، ۷- یکسوساز همراه با صافی، ۸- تثبیت کننده ولتاژ و ۹- اپتوکوپلر. نمودار روندنمای این سامانه در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵- نمودار روندنمای سامانه مولد ضربان ساخته شده.

کرده و شکل آن را تغییر می‌دهد. شکل ضربان مورد استفاده در این پژوهش از نوع مربعی تک قطبی می‌باشد. برای ساخت این مدار، یک آی سی TTL مدل 74LS123 به کار برده شد. (شکل ۶).

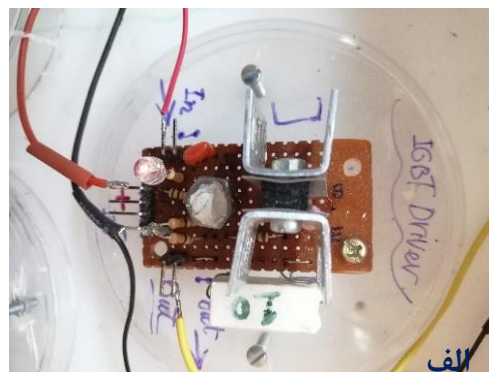
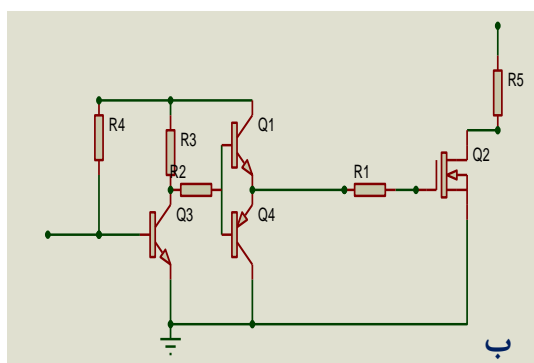
پارامترهای کنترلی سامانه مولد ضربان (فرکانس و تعداد پالس)، از طریق میکروکنترلر و نمایشگر لمسی تنظیم و به مدار منواستابل منتقل می‌شود. این مدار عرض ضربان تولیدی توسط میکروکنترلر را قابل تنظیم



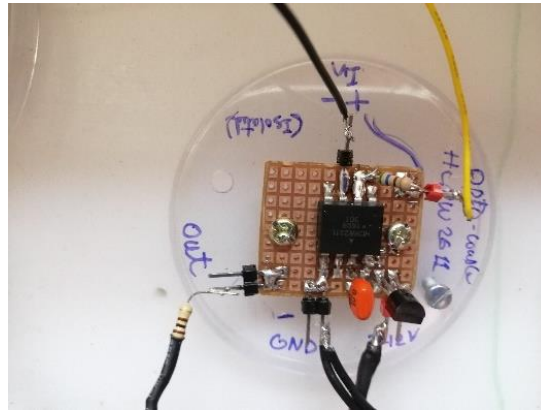
شکل ۶- الف) ماژول ساخته شده مونواستابل، ب) شماتیک مدار مونواستابل ساخته شده.

از طریق یک منبع تغذیه ۱۶V تامین می‌شود. درایور IGBT، با افزایش ولتاژ سیگنال ورودی اپتوکوپلر ۵V به ۱۲V باعث تحریک ترانزیستور IGBT می‌شود. شماتیک مدار این ماژول به همراه گیت ساخته شده آن در شکل (۷) آورده شده است. برای قطع و وصل کردن ولتاژ تولید شده توسط مولد ولتاژ، از یک IGBT استفاده شد. بعد از تولید ولتاژ با فرکانس، شکل و تعداد مورد نظر، سیگنال برای اعمال به محفظه نمونه و دو سر الکترودها منتقل می‌شود.

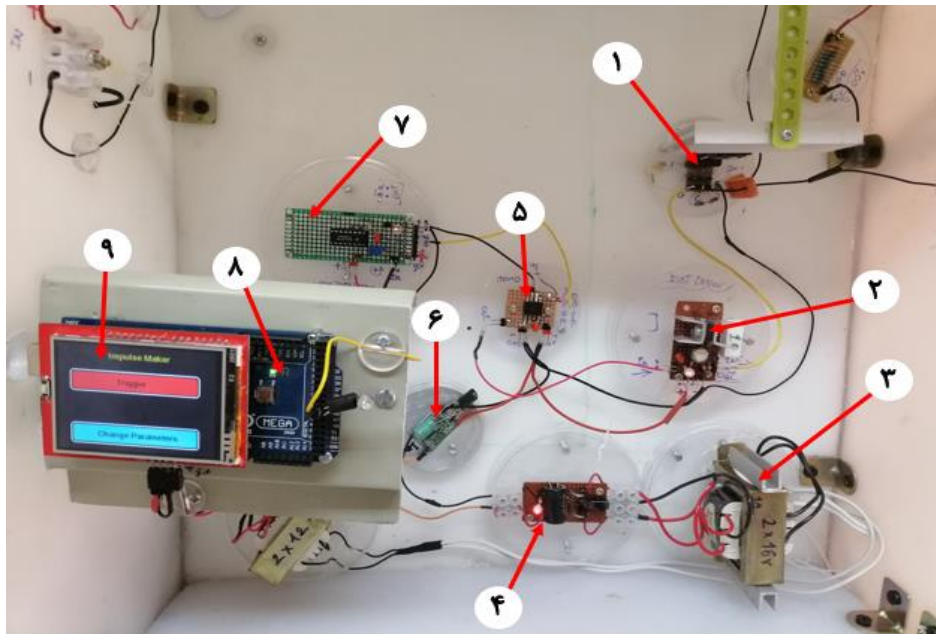
ولتاژ مصرفی مدار مونواستابل و میکروکنترلر از یک منبع تغذیه ۱۲V تامین می‌شود. با توجه به این که ولتاژ مصرفی مدارات الکترونیک DC می‌باشد، برای تبدیل ولتاژ AC منبع تغذیه، از یکسوساز و برای حذف نوسانات از یک صافی و تثبیت کننده ولتاژ بهره‌گیری شد. در گام بعدی برای جدا کردن بخش‌های دیجیتال و قدرت سامانه، یک ماژول اپتوکوپلر ساخته شد (شکل ۸). تراشه استفاده شده در مدار، آی سی HCNW2611 است که یک اپتوکوپلر سریع نوع SMD^۱ می‌باشد. ولتاژ مصرفی این مدار و ماژول IGBT



شکل ۷- الف) ماژول ساخته شده درایور IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor). ب) شماتیک مدار درایور IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) ساخته شده



شکل ۸- ماژول ساخته شده اپتوکوپلر.

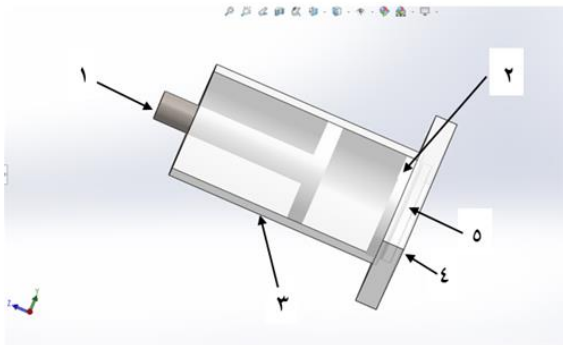


شکل ۹- سامانه تولید و اعمال ضربان ساخته شده شامل: ۱- IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) ۲- درایور IGBT، ۳- منبع تغذیه ۱۶ ولت، ۴- صافی و یکسوساز، ۵- اپتوکوپلر، ۶- تثبیت کننده ولتاژ، ۷- مونواستابل، ۸- میکروکنترلر، ۹- نمایشگر.

تصویر کلی سامانه تولید و اعمال ضربان با مشخص کردن تمام بخش‌های آن، در شکل ۹ آورده شده است.

محفظه نمونه

طرح‌واره‌ای کلی از محفظه اصلی دستگاه در شکل ۱۰ دیده می‌شود. قسمت‌هایی که روی شکل شماره گذاری شده‌اند، اجزای این محفظه را تشکیل می‌دهند که به ترتیب عبارتند از: ۱- الکتروود متحرک ۲- الکتروود ثابت ۳- محفظه نگهداری الکتروود بالایی ۴- قطعه پلی اتیلن ۵- محل اتصال سیم ولتاژ بالا با الکتروود.



شکل ۱۰- طرح‌واره کلی از محفظه نمونه برای اعمال میدان الکتریکی ضربانی

به یک پایه از همان جنس و مشخصات از طریق جوشکاری متصل گردید تا از این پایه برای برداشتن الکتروود از داخل محفظه استفاده گردد. و همچنین برای ثابت نگهداشتن الکتروود و ایجاد میدانی یکنواخت در نمونه، مطابق شکل-۱۱ محفظه‌ای از جنس پلکسی گلاس به کار برده شد (Dunn and Pearlman, 1987).

در محفظه نمونه دو نوع الکتروود با جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶، برای اعمال تیمار به نمونه‌های مورد آزمایش استفاده شد. الکتروودها به دو صورت، متحرک (الکتروود بالایی) و ثابت (الکتروود پایینی) به کار برده شد. الکتروود بالایی به جهت جایگذاری نمونه در هر بار آزمایش و اعمال تیمار، متحرک بوده و به همین دلیل



شکل ۱۱- تصاویر الکتروودهای متحرک و ثابت مورد استفاده در محفظه نمونه

$$-4E = \frac{V}{d} \quad (\text{رابطه ۴})$$

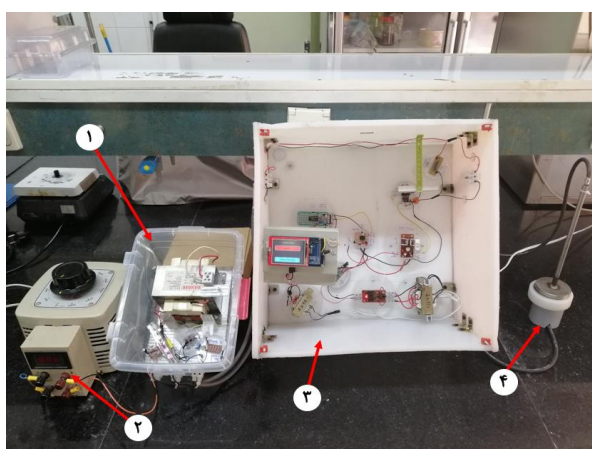
در این رابطه، E میدان الکتریکی (kV/cm)، V ولتاژ (kV) و d فاصله بین دو الکتروود (cm) می‌باشد. شایان ذکر است که در شکل ۱۲، تصویر کلی سامانه میدان الکتریکی ضربانی با مشخص کردن بخش‌های اصلی آن، آورده شده است.

وظیفه این بخش، اعمال ولتاژ ضربانی تولید شده از طریق دو الکتروود به نمونه مورد نظر است. در این پژوهش محفظه نمونه مخصوص محصولات جامد می‌باشد. یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در طراحی محفظه نمونه‌ها، فاصله دو الکتروود موازی یکدیگر است. طبق قانون اول فیک، ضریب نفوذ (رابطه-۲) و قانون کولن (رابطه-۳)، شار به شدت تحت تاثیر مسافت بین الکتروودها می‌باشد. همان‌گونه که در رابطه‌ها دیده می‌شود، هر چه این مسافت کمتر باشد، میزان تاثیرگذاری بیشتر است و در مدت زمان کمتری فرایند انجام می‌شود (Bard et al., 2001).

$$D = \frac{\delta C_{(x,t)}}{\delta x} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$F = Kq_1q_2/r^2 \quad (\text{رابطه ۳})$$

در روابط بالا به ترتیب D ضریب نفوذ (m^2/s)، $C_{(x,t)}$ غلظت ماده در موقعیت x و در زمان t، K ثابت کولن (Nm^2/c^2)، r فاصله الکتروودها (m)، q_1 و q_2 بارهای الکتریکی (C) می‌باشد. فاصله میان الکتروودها از رابطه ۴ به دست می‌آید:



شکل ۱۲- سامانه میدان الکتریکی ضربانی، ۱- سامانه مولد ولتاژ بالا، ۲- اتوترانس، ۳- سامانه تولید و اعمال ضربان، ۴- محفظه نمونه.

نمونه‌گیری

برای ارزیابی سامانه در بخش دوم ۴ قطعه پرورشی ماهی قزل‌آلا ماهی‌ها با آب شستشو و پس از آماده سازی اولیه شامل سر و دم زنی، تخلیه شکم و شستشوی مجدد، عملیات تهیه نمونه‌های مکعبی با اندازه ۴ سانتی متر مکعب (۲*۲*۱) تهیه گردید. نمونه‌ها تحت سه متغیر مستقل و هر یک در سه سطح و هر سطح در سه تکرار به طور تصادفی تقسیم بندی شد. نمونه‌ها تحت سه متغیر مستقل و هر یک در سه سطح و هر سطح در سه تکرار به طور تصادفی تقسیم بندی شد. شایان ذکر است که متغیر وابسته میزان پروتئین استخراجی بود. تیمار و سطوح مورد آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. برای تحلیل نتایج از نرم افزار 7 Design Expert استفاده شد. همچنین روش تحلیلی و بهینه‌سازی مورد استفاده در این آزمایش، روش سطح پاسخ (RSM) و طرح باکس-بنکن^۱ با پنج نقطه مرکزی بود. برای اندازه‌گیری پروتئین از روش کلدال (Kjeldahl) استفاده شد. اصول عمل در این روش تعیین مقدار ازت کل در نمونه آزمایش است و با در نظر گرفتن ضریب پروتئین، مقدار پروتئین موجود در ماده خوراکی برآورد میشود.

جدول ۱- سطوح کدبندی متغیرهای مستقل انتخاب شده در روش سطح

پاسخ		
سطوح انتخابی		
متغیر مستقل	۰	-۱
فرکانس (Hz)	۷۰	۵۰
ولتاژ اعمالی (kV)	۱/۲۳	۱/۱۶
تعداد پالس	۳۰	۲۰

نتایج و بحث

به دلیل استفاده از سیستم میکروکنترلی، سیگنال‌های پالس با دقت بسیار خوب ایجاد می‌شوند که توسط کاربر قابل تنظیم هستند. در این بخش از سامانه، با صفحه نمایشگر لمسی دو پارامتر توسط کاربر قابل تنظیم و بازخوانی هست که باعث کنترل بهتر و دقیق‌تر کل

سامانه اعمال ضربان می‌شود. علاوه بر پارمترهای فوق، عرض پالس و میزان ولتاژ اعمالی نیز از طریق ماژول مونو استابل و اتوترانس توسط کاربر قابل تنظیم است. ارزیابی سامانه در دو بخش ۱- ارزیابی فنی سامانه میدان الکتریکی ضربانی ۲- عملکرد سامانه در فرآوری مواد خوراکی ارائه می‌شود.

۳-۱- نتایج ارزیابی فنی سامانه میدان الکتریکی ضربانی

برای تبدیل سیگنال تولیدی توسط میکروکنترلر به سیگنال مربعی با زمان صعود و نزول کمتر، از یک مدار منواستابل استفاده شد. این مدار سیگنال ورودی را اصلاح و با یک مقاومت مولتی‌ترن عرض پالس آن به طور دقیق تنظیم می‌کند. پس از ساخت مدار مونو خروجی در اسیلوسکوپ طبق جدول (۲)، مقادیر اولیه توسط نمایشگر لمسی تنظیم و سامانه راه‌اندازی شد.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ورودی برای ارزیابی سامانه در بخش اول

شماره آزمایش	W	F (Hz)	N	V (V)
۱	۱۰	۱۰	۱۰	۱۵۰
۲	۶	۵۵	۶۰	۳۰۰
۳	۲	۱۰۰	۱۱۰	۴۵۰

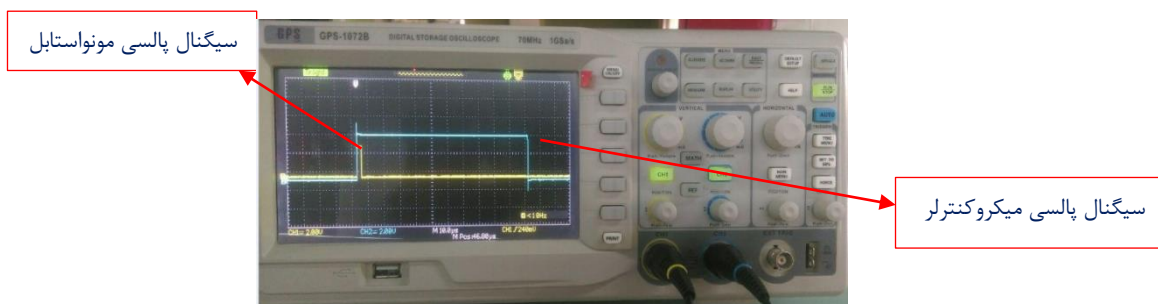
W = عرض پالس، F = فرکانس، N = تعداد پالس، V = ولتاژ

نتایج حاصل از اسیلوسکوپ (شکل ۱۳) نشان داد که ماژول ساخته شده به خوبی به تغییرات ورودی واکنش داده و سیگنال پالسی با زمان صعود و نزول کوتاه‌تر را تولید می‌کند. در ضمن، سیگنال خروجی از میکروکنترلر دارای سطح پاسخ عریض‌تر می‌باشد که با تنظیم مقاومت مولتی‌ترن عرض آن کاهش یافت.

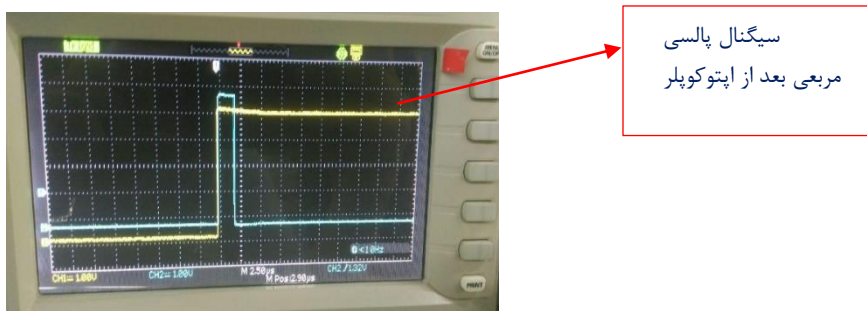
با استفاده از فرستنده نوری اپتوکوپلر بخش زمین مدارات دیجیتال و قدرت جدا شد و نویزهای حاصل از کوپلاژ هدایتی و از طریق امپدانس مشترک از بین رفت. پس از اضافه کردن ماژول اپتوکوپلر، به دلیل اطمینان از

در اسیلوسکوپ (شکل ۱۴) نشان داد، تغییرات مخربی در پارامترهای کیفی سیگنال خروجی وجود نداشته و استفاده از ماژول اپتوکوپلر بلا مانع هست.

عدم تاثیر منفی این واحد در خروجی سیگنال پالسی تولید شده از مونواستابل، دوباره با اسیلوسکوپ سیگنال خروجی ارزیابی شد که نتایج حاصل از نمودار رسم شده



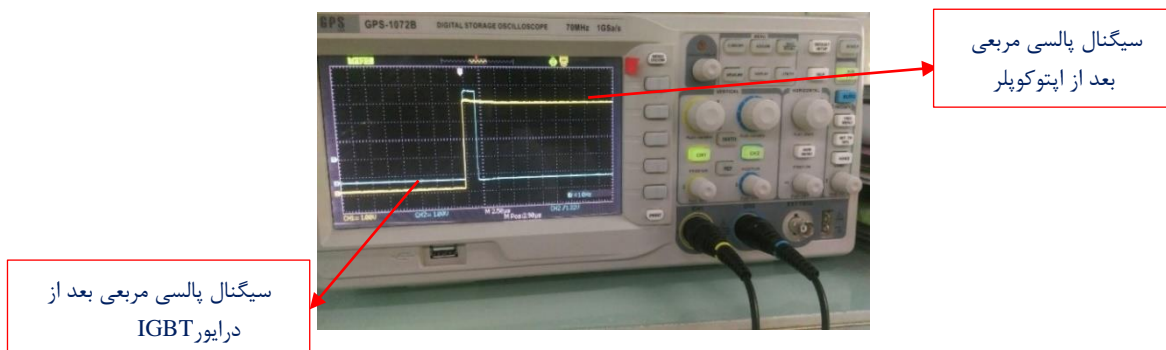
شکل ۱۳- مقایسه سیگنال خروجی از اپتوکوپلر با سیگنال خروجی از مونواستابل



شکل ۱۴- مقایسه سیگنال خروجی از اپتوکوپلر با سیگنال خروجی از مونواستابل

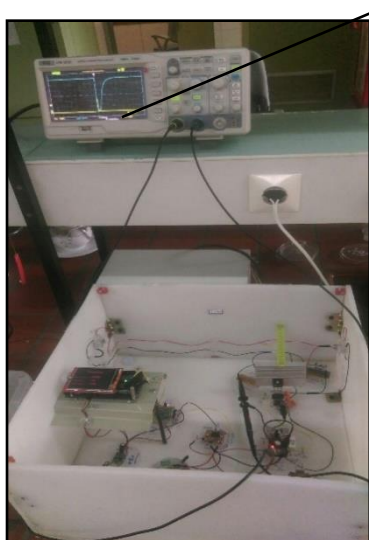
مختلف، به نوعی می‌توان گفت که عرض پالس رابطه غیر مستقیم با میزان مقاومت دارد. در گام بعدی، با مقادیر مختلف پارامترهای ورودی، سیگنال پالسی خروجی از درایور در اسیلوسکوپ (شکل ۱۵) مشاهده شد. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که درایور IGBT تاثیر کمتری بر عرض سیگنال خروجی و زمان‌های صعود و نزول پالس دارد که این را می‌توان در مدار مونواستابل با تنظیم دقیق مقاومت مولتی‌ترن، کم تاثیر کرد.

ولتاژ خروجی حاصل از مونواستابل و اپتوکوپلر در حدود ۵ ولت بوده و قدرت تحریک IGBT را ندارد. پس از به کار بردن ماژول درایور، به دلیل افزایش شدت جریان مصرفی، دمای تراشه اپتوکوپلر افزایش یافته و باعث تخلخل در موج خروجی از درایور شد. به طوری که امکان مشاهده آن در اسیلوسکوپ وجود نداشت. برای بر طرف کردن تاثیر مخرب، از یک مقاومت ۱۰۰ کیلو اهمی که تاثیر کمتری در عرض پالس خروجی دارد، استفاده شد. براساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های



شکل ۱۵- مقایسه سیگنال‌های خروجی اپتوکوپلر و درایور IGBT

(شکل ۱۶). دلیل اختلاف دامنه موجود در دو نمودار شکل ۱۸، وجود اختلاف در ولتاژ خروجی آن‌ها می‌باشد. این پالس حاصل ورودی $V = 450$ ، تعداد پالس ۱۱۰، با فرکانس 100 Hz و عرض پالس ۲ میکروثانیه بود.



سیگنال پالسی بعد از IGBT

سیگنال پالسی قبل از IGBT

شکل ۱۶- مقایسه سیگنال ورودی و خروجی از IGBT

۱٪ و تعداد پالس در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار هستند. در میان اثرات متقابل متغیرها فقط اثر متقابل فرکانس و تعداد پالس در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شد. اثر درجه دوم تمامی عامل‌ها در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شدند. اثرات متقابل ولتاژ اعمالی با فرکانس و تعداد پالس معنی‌دار نشدند. با توجه به مقدار مجموع مربعات، فاکتور ولتاژ اعمالی، بیشترین تاثیرات بر میزان پروتئین استخراجی را دارد و باعث افزایش پروتئین در دسترس می‌شود (جدول ۳).

پژوهشگران نشان دادند که اعمال میدان الکتریکی ضربانی (کمتر از 2 kV/cm ، ۲۰-۴۰ پالس) باعث تغییراتی معنی‌دار در پروتئین ماهی قزل‌آلا و مرغ می‌شود و حساسیت ماهی قزل‌آلا به اعمال PEF بیشتر از حساسیت گوشت مرغ است (Gudmundsson & Hafsteinsson, 2001). در پژوهشی دیگر از PEF برای استحصال استخراج پروتئین از صدف دریایی

سیگنال پالسی خروجی درایور، به تراشه IGBT اعمال شد. نوع پالس خروجی حاصل از پارامترهای ورودی، از IGBT با استفاده از اسیلوسکوپ مشاهده شد. بر اساس نمودار سیگنال خروجی در اسیلوسکوپ، پالس اعمالی ولتاژ بالای حاصل از IGBT مشاهده گردید

عملکرد سامانه در فرآوری مواد خوراکی به منظور ارزیابی سامانه میدان الکتریکی ضربانی، ابتدا نمونه گوشت ماهی که برای برش راحت‌تر، قبلاً یخ‌زده شده بود، در ابعاد $1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ برش داده شد. در گام نخست، نمونه مورد نیاز روی الکتروود ثابت قرار گرفته و سپس الکتروود متحرک روی نمونه گذاشته شد. پس از قرار دادن نمونه گوشت ماهی در محفظه اصلی، تعداد پالس و فرکانس اعمالی پالس از طریق صفحه لمسی تنظیم شد. سپس از طریق اتوترانس (واریاک) ولتاژ اعمالی مورد نظر تنظیم و با زدن کلید آغاز، دستگاه شروع به اعمال ولتاژ با مشخصات مورد نظر به نمونه کرد. در تمامی آزمایش‌ها، پارامتر عرض پالس ثابت و به مقدار ۲ میکروثانیه بود.

نتایج آزمون میزان پروتئین استخراجی توسط سامانه نشان داد که اثر فاکتورهای ولتاژ اعمالی و فرکانس بر میزان پروتئین استخراجی در سطح احتمال

$$\% \text{Protein} = -515.43156 + 914.52747(X_1) + 0.46250(X_2) + 1.08281(X_3) + 0.0090625 (X_3 X_2) - 375.21626 (X_1^2) - 0.0365234 (X_2^2) - 0.021641 (X_3^2)$$

در این معادله، %Protein میزان پروتئین استخراجی، ولتاژ اعمالی (X_1)، فرکانس (X_2) و تعداد پالس (X_3) می‌باشد. با توجه به مدل فوق، ضرایب رگرسیونی ولتاژ اعمالی، فرکانس و تعداد پالس دارای اثر مثبت در افزایش میزان استخراج پروتئین بودند. با در نظر گرفتن محدوده‌های ذکر شده در جدول (۲) (پارامترهای ورودی) و حل مساله توسط نرم‌افزار Design Expert 7.0.0، ترکیب بهینه‌ای با ولتاژ اعمالی ۱/۲۵kV/cm، فرکانس ۷۰ و تعداد پالس ۳۱ به دست آمد که برای متغیر وابسته، درصد پروتئین استخراجی ۷۷/۳ حاصل شد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش یک سامانه میدان الکتریکی پالسی طراحی و ساخته شد که برای نخستین بار از یک منبع انرژی پیوسته و سوئیچ نیمه هادی برای تولید و اعمال ولتاژهای پالسی استفاده شده است. با تحلیل سیگنال‌های پالسی تولید شده در اسیلوسکوپ حاصل از مدارهای ساخته شده، نشان داده شد که با اعمال چهار پارامتر ورودی و کنترل آن‌ها به طور همزمان، تولید پالس‌های مرتب با زمان صعود و نزول کمتر مسیر می‌باشد. در مرحله دوم، میزان تاثیرگذاری متغیرهای دستگاه (ولتاژ، تعداد پالس و فرکانس) بر نمونه ماهی قزل‌آلا بررسی شد. در این راستا درصد پروتئین استخراجی ماهی به عنوان متغیر وابسته اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج آزمایش کلدال، دو عامل کنترل‌کننده و تاثیرگذار سامانه میدان الکتریکی ضربانی، ولتاژ اعمالی و فرکانس بود که تاثیر معنی‌داری بر میزان پروتئین استخراجی نمونه‌های ماهی داشتند.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

REFERENCES

Amami, E., Khezami, L., Vorobiev, E. and Kechaou, N. (2008). Effect of pulsed

بهره‌گیری شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه سازی و بهترین نقطه انتخاب شد. فاکتورهای اعمالی به ترتیب ولتاژ، تعداد پالس بود. در میان مدل‌های پیشنهادی، مدل دوجمله‌ای معنی‌دار و بهترین نقطه (ولتاژ ۲۰ kV/cm و تعداد پالس ۸ به عنوان بهترین تیمار) انتخاب شد (Zhou et al., 2017).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) میزان پروتئین استخراجی

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	p-value
مدل	۷	۱۰۸/۷۵	۳۲/۷۵	۰/۰۰۰۱**
X_1	۱	۲۲/۵۷	۴۷/۵۸	**۰/۰۰۰۱
X_2	۱	۱۴/۹۵	۳۱/۵۲	**۰/۰۰۰۳
X_3	۱	۲/۶۷	۹/۲۸	*۰/۰۴۱۶
$X_2 X_3$	۱	۲/۴۴	۵/۶۴	*۰/۰۴۹۵
X_1^2	۱	۳۰/۹۴	۶۵/۲۳	**۰/۰۰۰۱
X_2^2	۱	۸/۹۹	۱۸/۹۴	**۰/۰۰۱۸
X_3^2	۱	۱۹/۷۲	۴۱/۵۷	**۰/۰۰۰۱
باقی‌مانده	۹	۴/۲۷		
عدم برازش	۵	۴/۲۷		
خطا	۴	۰		
کل	۱۶	۱۱۳/۰۲		

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns عدم معنی‌داری بودن، X_1 (ولتاژ اعمالی)، X_2 (فرکانس)، X_3 (تعداد پالس)

در این پژوهش، برای متغیر وابسته میزان استخراج پروتئین در اثر اعمال تیمارها با استفاده از سامانه میدان الکتریکی ضربانی، روش سطح پاسخ، مدل درجه دوم با ضریب تبیین ۰/۹۶ را پیشنهاد داده است. با توجه به جدول (۳)، آنالیز واریانس، مدل درجه دوم برای میزان پروتئین استخراجی در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود که نشان دهنده‌ی عملکرد خوب این مدل است. شاخص عدم برازش نیز معنی‌دار نشد که نشان می‌دهد پاسخ‌ها با احتمال قوی توسط مدل پیشنهادی پیش‌بینی می‌شوند. مدل درجه دوم کامل بر اساس فاکتورهای واقعی پس از حذف ضرایب غیر معنی‌دار به‌صورت زیر به‌دست آمد.

electric field and osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of

- carrot tissue. *Drying Technology*, 26(2): 231-238.
- Bard, A. J., and Faulkner, L. R. (2001). Fundamentals and applications. *Electrochemical Methods*, 2(482), 580-632.
- Cserhalmi, Z., Sass-Kiss, A., Tóth-Markus, M. and Lechner, N. (2006). Study of pulsed electric field treated citrus juices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 7(1-2), 49-54.
- Dunn, J. E., and Pearlman, J. S. (1987). *U.S. Patent No. 4,695,472*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- El Kantar, S., Boussetta, N., Lebovka, N., Foucart, F., Rajha, H.N., Maroun, R.G., Louka, N. and Vorobiev, E. (2018). Pulsed electric field treatment of citrus fruits: Improvement of juice and polyphenols extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 46, 153-161.
- Guderjan, M., Elez-Martínez, P. and Knorr, D. (2007). Application of pulsed electric fields at oil yield and content of functional food ingredients at the production of rapeseed oil. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 8(1), 55-62.
- Gudmundsson, M. and Hafsteinsson, H. (2001). Effect of electric field pulses on microstructure of muscle foods and roes. *Trends in Food Science and Technology*, 12(3-4), 122-128.
- Heinz, V., Álvarez, I., Angersbach, A. and Knorr, D. (2001). Preservation of liquid foods by high intensity pulsed electric fields—basic concepts for process design. *Trends in Food Science and Technology*, 12(3-4), 103-111.
- Jambrak, A.R. (2019). Non-thermal and Innovative Processing Technologies. *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*, (vol.1). (pp. 477-433). Elsevier Science and Technology
- Jia, M., Zhang, Q.H. and Min, D.B. 1999. Pulsed electric field processing effects on flavor compounds and microorganisms of orange juice. *Food Chemistry*, 65(4): 445-451.
- Kumar, P., and Han, J. H. (2012). Packaging materials for non-thermal processing of food and beverages. *In Emerging Food Packaging Technologies* (vol.1). (pp. 323-334). Woodhead Publishing.
- Lebovka, N.I., Praporscic, I. and Vorobiev, E. (2003). Enhanced expression of juice from soft vegetable tissues by pulsed electric fields: consolidation stages analysis. *Journal of Food Engineering*, 59(2-3): 309-317.
- Maskooki, A. and Eshtiaghi, M. (2009). Effect of various pulsed electric fields conditions on extraction of sugar from sugar beet. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 5(2): 151-162. (in Farsi)
- McNamee, C., Noci, F., Cronin, D., Lyng, J., Morgan, D. and Scannell, A. (2010). PEF based hurdle strategy to control *Pichia fermentans*, *Listeria innocua* and *Escherichia coli* k12 in orange juice. *International Journal of Food Microbiology*, 138(1): 13-18.
- Odrizola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., Hernández-Jover, T. and Martín-Belloso, O. (2009). Carotenoid and phenolic profile of tomato juices processed by high intensity pulsed electric fields compared with conventional thermal treatments. *Food Chemistry*, 112(1), 258-266.
- Oms-Oliu, G., Odrizola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R. and Martín-Belloso, O. (2009). Effects of high-intensity pulsed electric field processing conditions on lycopene, vitamin C and antioxidant capacity of watermelon juice. *Food Chemistry*, 115(4), 1312-1319.
- Prakash, A. (2013). Non-thermal processing technologies to improve the safety of nuts. *In Improving the Safety and Quality of Nuts* (vol.1). (pp. 35-55). Woodhead Publishing.
- Ravishankar, S., Zhang, H. and Kempkes, M. (2008). Pulsed electric fields. *Food Science and Technology International*, 14(5): 429-432.
- Salehi, M. And Omidvari, A. (2017). Improvement the Process of Extracting Sucrose from Sugar Beet by Strong Pulsed Electric Fields Method and

- Compare It with The Thermal Process. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 14(69), 43-52. (in Farsi)
- Sharma, P., Bremer, P., Oey, I. and Everett, D. (2014). Bacterial inactivation in whole milk using pulsed electric field processing. *International Dairy Journal*, 35(1): 49-56.
- Zhang, H.Q., Barbosa-Cánovas, G.V., Balasubramaniam, V.B., Dunne, C.P., Farkas, D.F. and Yuan, J.T. (2011). Nonthermal processing technologies for food (eds.). New York: Wiley
- Zhang, Q., Barbosa-Cánovas, G.V. and Swanson, B.G. (1995). Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *Journal of Food Engineering*, 25(2): 261-281.
- Zhou, Y., He, Q. and Zhou, D. (2017). Optimization extraction of protein from mussel by high-Intensity pulsed electric fields. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12962.