

آنالیز انرژی و اکسرژی در فرایند اهمیک طی پختن: مطالعه موردی قارچ دکمه‌ای

مهدی قوانلو^۱، محسن آزادبخت^{۲*}، فریال وارسته^۳، محمد واحدی ترشیزی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۲ دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۳ استادیار گروه باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۴ دانشجوی دکتری گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه تربیت مدرس تهران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۹

چکیده

حرارت اهمیک گرمایشی سریع و یکنواخت است که محصول با کیفیت بالا را با حداقل تغییرات ویژگی‌های ساختاری، تغذیه‌ای تولید می‌کند؛ همچنین روشی است سازگار با محیط زیست که با توجه به ویژگی‌های سودمند آن مورد توجه قرار گرفته است. در این آزمایش یک سامانه گرمایش اهمیک ساخته شد و سه گرادیان ولتاژ، سه نوع الکتروود (استیل، برنج و آلومینیمی) و سه غلظت محلول اهمیک برای پختن قارچ استفاده گردید. در این فرایند بازده انرژی، بازده اکسرژی و اکسرژی تلف شده در حین فرایند پختن قارچ محاسبه شد و داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS تحلیل گردید. نتایج به دست آمده نشان داد هر سه عامل گرادیان ولتاژ، نوع الکتروود و غلظت محلول تأثیر معنی‌داری بر بازده انرژی، بازده اکسرژی و اکسرژی تلف شده دارند و بیشترین تأثیر مربوط به گرادیان ولتاژ است و بعد از آن نوع الکتروود و غلظت محلول اهمیک قرار دارند. بیشترین مقدار بازده انرژی برابر با ۷۹/۵۷ ژول و برای بازده اکسرژی ۶۱/۳۶ ژول بود که در الکتروود استیل و گرادیان ولتاژ ۱۱/۲۵ مشاهده شد و بیشترین مقدار اکسرژی تلف شده ۶/۳۹ در گرادیان ولتاژ ۷/۵ و نوع الکتروود آلومینیمی ثبت شد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که بهترین نوع الکتروود استفاده شده الکتروود استیل است و غلظت ۲ بهترین مقادیر را نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: فرایند اهمیک، انرژی، اکسرژی، گرادیان ولتاژ، الکتروود، قارچ دکمه‌ای

مقدمه

تولید قارچ در سراسر جهان در سال ۲۰۱۸ به ۱۱،۸۹۸،۳۹۹ تن رسید و چین در این زمینه تولیدکننده پیشرو بود (Barrón-García *et al.*, 2022). قارچ از زمان‌های قدیم به دلیل دارا بودن کالری کم، فیبر غذایی، کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، اسیدهای چرب اشباع نشده چندانگانه، ویتامین‌ها، مواد معدنی، طعم مطلوب، عطر و اثرهای سلامتی مرتبط با زیست فعال و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی آن، منبع تغذیه‌ای ارزشمند و محصول مصرفی مردم بوده است (Ramos *et al.*, Karimi *et al.*, 2014; 2019: Blumfield *et al.*, 2020). با این حال، جابه‌جایی و پردازش آن به دلیل رشد باکتری، کم‌آبی بافت و واکنش‌های آنزیمی قهوه‌ای شدن روی سطح پوست باعث کاهش کیفیت می‌شود (Barrón-García *et al.*, 2022). خشک کردن یکی از پرکاربردترین عملیات مهندسی در اغلب صنایع مانند کشاورزی، داروسازی و ... است که هدف آن جذب آب از ماده و کاهش رطوبت آن است. در این عملیات، پدیده‌های انتقال جرم و گرما به صورت هم‌زمان درون جامد و سیال حامل انرژی رخ می‌دهد. مکانیسم یا مکانیسم‌های خشک شدن مواد بر اساس شدت و روند خشک شدن آن ماده طبقه‌بندی می‌شود. روش‌های زیادی وجود دارد که می‌تواند با فناوری گرمایی مانند بلانچینگ، تبخیر، خشک شدن، تخمیر، استخراج، عقیم‌سازی و پاستوریزاسیون غذاها

اتفاق می‌افتند (Vahedi Torshizi *et al.*, 2020a). موارد گفته شده تحلیل اکسرژی که خود یک تحلیل ترمودینامیکی است، به‌تنهایی قادر به توضیح در مورد بهینه‌سازی سامانه نیست بلکه تنها نشان می‌دهد که چه میزان از فرایند فعلی به اتلاف انرژی منتهی می‌شود و امکان بهبود آن وجود دارد (Vahedi Torshizi *et al.*, 2020b).

بنابراین، برای تحلیل این سامانه‌ها باید تحلیل انرژی و اکسرژی به‌صورت هم‌زمان صورت گیرد. در همین راستا محققان روی خصوصیات مهندسی فرایند اهمیتک تحقیق کردند:

مختاریان و همکاران (Mokhtarian *et al.*, 2016) می‌گویند کاهش زمان فرایند حرارت‌دهی و یکنواخت کردن دما در نقاط مختلف ماده توسط این فرایند سبب شده است که کمترین میزان اکسرژی تلف‌شده و تولید آنتروپی را داشته باشیم که همین امر به معنی افزایش بازده اکسرژی سیستم است و شاید تغییرات اکسرژی به‌دلیل اختلاف دما بین مرز سیستم و محیط اطراف نیز رخ دهد و در ولتاژهای بالا به دلیل اینکه دمای محصول سریع بالا می‌رود میزان تبادل دمایی با محیط اطراف به دلیل سرعت بالایی دمایی درون نمونه کاهش می‌یابد و سبب می‌شود تا میزان اکسرژی تلف شده کاهش یابد. بوزکورت و همکاران (Bozkurt *et al.*, 2009) در بررسی انرژی مصرفی و اکسرژی سیستم گرمایش اهمیتک برای فرآوری گوشت گزارش داده‌اند که گرادیان ولتاژ اثر معنی‌داری بر میزان مصرف انرژی دارد، به‌طوری‌که افزایش گرادیان ولتاژ از ۲۰ به ۴۰ v/cm باعث افزایش بازده انرژی از ۶۹ درصد به ۹۱ درصد و افزایش بازده اکسرژی از ۶۳ درصد به ۸۲ درصد می‌شود. درویشی و همکاران (Darvishi *et al.*, 2015) با آزمایش روی انرژی و اکسرژی تولید گوجه‌فرنگی طی فرایند اهمیتک نشان دادند که بازده انرژی و انرژی تلف‌شده ویژه با افزایش میزان گرادیان ولتاژ و کوتاه‌تر کردن فرایند افزایش می‌یابد. این محققان همچنین گزارش دادند در یک ولتاژ ثابت با افزایش مدت زمان فرایند میزان بازده اکسرژی و اکسرژی تلف‌شده افزایش یافته است. زل و همکاران (Zell *et al.*, 2011) اثر نوع الکترود در فرایند گرمایش اهمیتک را بررسی و مشخص کردند که نوع الکترود

اجرا شود (Saberian *et al.*, 2017; Azadbakht *et al.*, 2022). گرمادهی اهمیتک یا حرارت جول روش جایگزین بسیار سریع است که زمانی رخ می‌دهد که جریان متناوب الکتریکی از طریق غذا عبور می‌کند و هدف اولیه آن به دلیل مقاومت الکتریکی مواد غذایی است (Shynkaryk *et al.*, 2010). حرارت اهمیتک گرمایشی سریع و یکنواخت است و محصول باکیفیت بالا را با حداقل تغییرات خواص ساختاری و تغذیه‌ای تولید می‌کند و همچنین روشی سازگار با محیط زیست است که با توجه به خواص سودمند آن مورد توجه قرار گرفته است. درواقع، این نوع گرمایش به‌طور گسترده‌ای برای صنعت غذا در فرآیند مایعات و ترکیبات جامد-مایع استفاده شده است (Vahedi *et al.*, 2022; Cullen *et al.*, 2011). در گرمایش اهمیتک، دما بدون نیاز به انتقال گرما از سطح جامد-مایع، افزایش می‌یابد. این تکنولوژی گرمایش، به‌ویژه برای محصولات با ویسکوزیته بالا یا دارای مواد جامد انحلال‌ناپذیر مطلوب است، زیرا فازهای مایع و جامد می‌توانند سرعت گرمایش یکسان داشته باشند و بنابراین از حرارت دیدن بیش‌ازحد فاز مایع یا سطح مواد جامد اجتناب می‌شود. روش اهمیتک برای مواد غذایی حاوی قطعات جامد مانند سوپ‌ها، خورش‌ها و تکه‌های میوه در شربت مناسب است (Zareifard *et al.*, 2003). مزیت آشکار روش گرمایش اهمی نسبت به روش‌های مرسوم نبود اختلاف دما در محلول و محدودیت‌های ضریب انتقال حرارت است. از مزایای روش گرمایش اهمیتک می‌توان به حفظ رنگ و کیفیت، کاهش زمان فرآوری و عملکرد بالای آن اشاره کرد (Castro *et al.*, 2004). از آنجاکه هدف اصلی در صنعت خشک کردن رسیدن به بیشترین مقدار رطوبت‌زدایی با صرف کمترین مقدار انرژی است، می‌توان با شناسایی شرایط عملیاتی و تجزیه و تحلیل بازده انرژی، مصرف بهینه انرژی را بررسی کرد؛ اما تحلیل انرژی به‌تنهایی باعث بی‌دقتی در رسیدن به وضع دلخواه می‌شود، زیرا مقدار انرژی طبق قانون اول ثابت است و فقط قابل تبدیل است؛ بنابراین، نیاز به مؤلفه دیگری است که بتواند کیفیت انرژی را مشخص کند. قانون دوم ترمودینامیک بیان می‌کند که انرژی هم کمیت و هم کیفیت دارد و فرایندهای خود به خودی اما با کاهش کیفیت انرژی

اکسرژی بررسی شد تا بتوان بازده انرژی بالایی را برای محصول داشته باشد، زیرا علاوه بر حفظ کیفیت محصول بازده دستگاه مورد استفاده برای فرایند نیز اهمیت بالایی دارد.

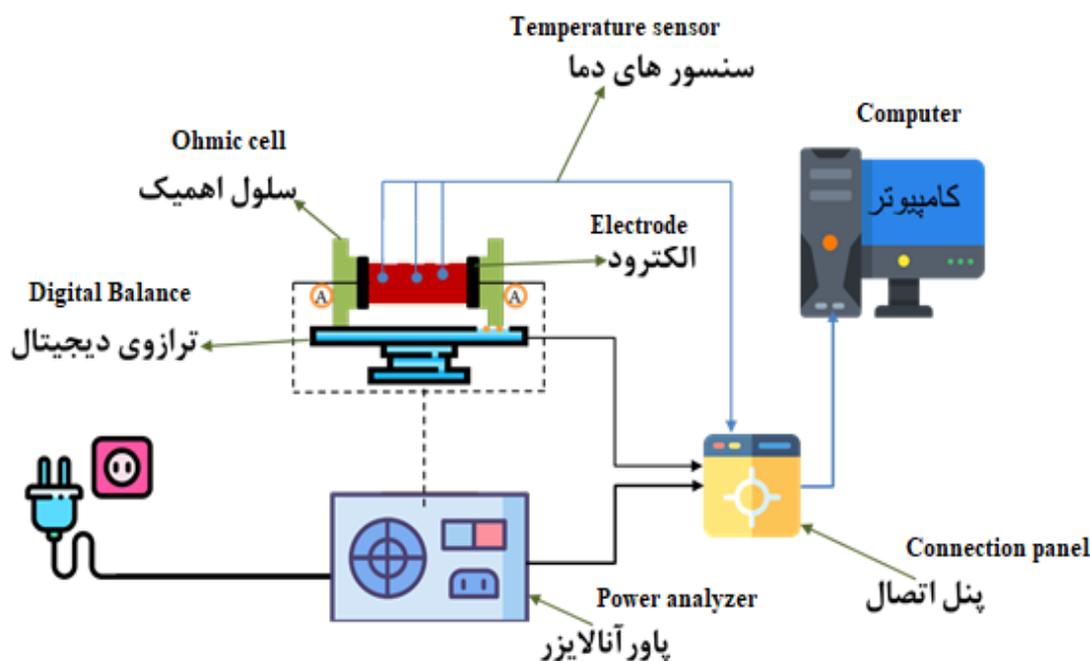
مواد و روش‌ها

آماده‌سازی و روش آزمایش

نمونه‌های قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) تهیه و ابعاد آن‌ها با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شد. نمونه‌های با ابعاد یکسان انتخاب و با استفاده از آب شسته و به مدت ۳۰ دقیقه در محیط خشک شدند. نمونه‌ها در دسته‌های مختلف به منظور اجرای آزمایش قرار گرفتند. در این تحقیق، سه گرادیان ولتاژ $7/5$ ، $9/25$ و $11/5$ ، سه نوع الکتروود استیل، برنجی و آلومینیمی و سه غلظت محلول اهمیک متشکل از ۲۰ میلی‌لیتر آب و سه مقدار نمک (۱، ۲ و ۳ گرم) برای پختن قارچ به کار گرفته شد. مشخصات دستگاه اهمیک طراحی شده در این آزمایش در جدول ۱ آورده شده است و شکل ۱ نیز شماتیک این دستگاه را نمایش می‌دهد.

اثر زیادی بر راندمان حرارتی، انرژی مصرفی و مدت‌زمان فرآیند گرمایش اهمی دارد. در همین زمینه، سوپک و همکاران (Cevik et al., 2021) هدایت الکتریکی و ارزیابی عملکرد فرآیند غلظت آب میوه را با استفاده از روش گرمایش اهمیک بررسی کردند و نشان دادند با ارزیابی اثرهای شرایط گرمایش اهمیک اعمال شده بر کل زمان فرآیند، مصرف انرژی کل و راندمان فرآیند، گرادیان ولتاژ ۱۹ ولت بر سانتی‌متر می‌تواند به عنوان شرایط تبخیر بهینه غلظت آب‌میوه در صورت کاهش زمان فرآیند توصیه شود. در تحقیق دیگر، سورمه و همکاران (۲۰۲۱) استفاده از گرمایش اهمیک در تبخیر شیر و ارزیابی هدایت الکتریکی و تجزیه و تحلیل عملکرد را بررسی و مشخص کردند با افزایش گرادیان ولتاژ، بازده انرژی و اکسرژی افزایش می‌یابد. کمترین مقادیر بازده انرژی و اکسرژی در روش سنتی به دست آمد. به طور کلی می‌توان از روش اهمیک به عنوان یک فرایند کارآمد روی شیر استفاده کرد.

با توجه به اهمیت انرژی و گستردگی محصولات کشاورزی، در این تحقیق پارامترهای مهندسی دستگاه، انرژی و



شکل (۱) شماتیک فرایند اهمیک این آزمایش

Fig 1. Schematic of the ohmic process of this experiment

جدول (۱) مشخصات سامانه اهمیک
Table 1- Ohmic system properties

لوله استوانه PTF	جنس سلول اهمی Type of ohmic cell
استیل_آلومینیم_برنج	جنس الکترودها The type of electrodes
۱۵۰ mm	طول سلول اهمی Ohmic cell length
۵۰ mm	قطر داخلی سلول اهمی Internal diameter of ohmic cell
۶۰ mm	قطر خارجی سلول اهمی The external diameter of the ohmic cell
۴ mm	قطر سوراخ‌های روی سلول اهمی The diameter of the holes on the ohmic cell
۴۹,۹ mm	قطر الکترودها The diameter of the electrodes
۲ mm	ضخامت الکترودها The thickness of the electrodes
۵۰ mm	فاصله بین دو الکترود The distance between the two electrodes
۲ mm	قطر میله رابط الکترود The diameter of the electrode connecting rod

آنالیز انرژی

رابطه ۱ میزان پایستگی جرم و انرژی را برای سلول اهمیک طراحی شده نشان می‌دهد که هر یک از طرفین تساوی دارای بخش‌هایی هستند که باید بررسی شوند، در واقع می‌توان گفت که این رابطه عمومی پایستگی جرم برای فرایند است.

$$\sum_{m_{in}=m_{ew}+m_p} m_{in} = \sum m_{out} \quad (1)$$

بعد از رابطه ۱، رابطه ۲ انرژی تعادل عمومی فرایند را بیان می‌کند که در واقع میزان انرژی ورودی برابر با انرژی خروجی است، انرژی ورودی در این فرایند یک بخش حرارتی دارد و بخش دیگر آن به صورت انرژی الکتریکی است که در رابطه نشان داده شده است (Darvishi *et al.*, 2015).

$$\sum E_{in} = \sum E_{out} (mC_p T)_{in} + E_{electrical} = (mC_p T)_p + m_{ew}\lambda_{wp} + E_{Loss} \quad (2)$$

برای رابطه ۲، گرمای نهان با استفاده از رابطه ۳ و ۴ (Abdelmoteleb *et al.*, 2009) محاسبه می‌شود که این روابط در ادامه نشان داده شده است

$$\frac{\lambda_{wp}}{\lambda_w} = 1 + 23 \times \exp(-40m_t) \quad M \geq 0.9 \left(\frac{\text{kg Water}}{\text{Kg dry matter}} \right) \quad (3)$$

$$\lambda_w = 3.217 \times 10^6 - 2.631 \times 10^3 T - 2.40 T^2 + 1.460 \times 10^{-2} T^3 - 2.079 \times 10^{-5} T^4 \quad (4)$$

273 ≤ T ≤ 473 K

برای محاسبه ظرفیت گرمایی از مدل Siebel's استفاده شد (2014).
که از رابطه ۵ به دست آمده است (Heldman & Moraru.,)

$$C_p = 0.71 + 3.393 \times \frac{M_t}{1 + M_t} \quad 1.86 M_t \leq 19 \left(\frac{\text{kg Water}}{\text{Kg dry matter}} \right), T > 273 \text{ K} \quad (5)$$

نشان دهنده کار انجام پذیرفته است از اهمیت بالایی برخوردار است:

$$\sum EX_{in} = \sum EX_{out} \quad (8)$$

$$m_{in} ex_{in} + E_{electrical} = m_p ex_p + m_{ew} ex_{ew} + EX_{Loss}$$

درواقع، اکسرژی تلف شده نیز برابر است با اختلاف اکسرژی ورودی و خروجی (رابطه ۹) و اکسرژی ورودی و خروجی را با توجه به رابطه ۱۰ به راحتی می توان محاسبه کرد (Azadbakht et al., 2017a).

$$ex_{loss} = EX_{in} - EX_{out} \quad (9)$$

$$ex = C_p \left[(T - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \left(\frac{T}{T_{\infty}} \right) \right] \quad (10)$$

با محاسبه اکسرژی ورودی و خروجی بازده اکسرژی با توجه به رابطه ۱۱ محاسبه شد (Azadbakht et al., 2018b).

$$\eta_{ex} = \left(\frac{m_p ex_p + m_{ew} ex_{ew}}{m_{in} ex_{in} + E_{electrical}} \right) \times 100 \quad (11)$$

تحلیل آماری

در این تحقیق گرادیان ولتاژ، نوع الکتروود و غلظت محلول اهمیت به عنوان متغیر مستقل و فرایند بازده انرژی، بازده اکسرژی و اکسرژی تلف شده به عنوان فاکتور وابسته مدنظر قرار گرفت که داده های به دست آمده در نرم افزار صفحه گسترده اکسل مرتب شدند. تمامی آزمایش ها در سه تکرار اجرا و نتایج با استفاده از آزمایش فاکتوریل و در قالب

در رابطه ۱ انرژی الکتریکی نیز بخشی از انرژی ورودی به سیستم است؛ این انرژی با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شده است (Darvishi et al., 2013).

$$E_{electrical} = \int_0^t (V \times I) dt \quad (6)$$

پس از محاسبه انرژی های ورودی و خروجی، میزان بازده انرژی برای فرایند اهمیت از رابطه ۷ محاسبه گردید: (Darvishi et al., 2015).

$$\eta_{en} = \frac{(mC_p T)_p + m_{ew} \lambda_{wp}}{(mC_p T)_{in} + E_{electrical}} \quad (7)$$

آنالیز اکسرژی

اکسرژی در واقع بالاترین و بیشترین کار مفیدی است که از یک مقدار انرژی مشخص که در فرایند قرار دارد یا در جریان است می توان دریافت کرد و از این رو با توجه به افزایش اهمیت و بحران انرژی، بررسی اکسرژی اهمیت بالایی دارد. بررسی و تجزیه تحلیل ترمودینامیکی نیز با اهمیت بوده و هدف اصلی تجزیه و تحلیل اکسرژی تعیین محل و مقدار تولید انرژی برگشتناپذیر طی فرایندهای مختلف چرخه ترمودینامیکی و عوامل مؤثر بر تولید این غیرقابل برگشت است (Mokhtarian et al., 2016).

در این تحقیق به بررسی آنالیز اکسرژی ورودی، خروجی، بازده اکسرژی و تلف شده پرداخته شده است که روابط اکسرژی از معادله ۸ برای بررسی شروع شده است، رابطه اکسرژی ورودی برابر با اکسرژی خروجی است که برای اکسرژی ورودی و خروجی تغییرات وزن که

شده است. تأثیر غلظت محلول نیز بر بازده انرژی این گونه بوده که بازده انرژی ۷۴/۵۴ درصد در غلظت ۳ به دست آمده است که افزایش غلظت سبب افزایش به میزان ده درصد در بازده انرژی شده است. افزایش گرادیان ولتاژ سبب می‌شود زمان فرایند کاهش پیدا کند، این کاهش زمان فرایند در فرایند حرارت‌دهی به-منظور تغلیظ کردن سبب افزایش بازده انرژی می‌شود. افزایش گرادیان ولتاژ سبب افزایش سریع‌تر دما در سطح نمونه شده است که همین امر انتقال انرژی را افزایش می‌دهد و سبب کاهش انرژی می‌گردد و کاهش انرژی مصرفی سبب افزایش بازده انرژی می‌شود. نتایج به دست آمده مشابه نتایج تحقیقات درویشی و همکاران (Darvishi et al., 2013) روی تولید رب گوجه‌فرنگی است. دلیل این امر نیز افزایش غلظت ماده مورد نظر طی فرایند حرارت‌دهی است که همین امر سبب می‌شود که میزان بازده انرژی کاهش یابد. نتایج به دست آمده مشابه نتایج تحقیقات Sastry و همکاران (۱۹۹۲) است. همچنین با توجه به بررسی مقایسه میانگین غلظت محلول اهمیک، با افزایش میزان غلظت مقدار بازده انرژی نیز افزایش پیدا کرده است که در شکل ۲-ب نشان داده شده است (Palaniappan, & sastry., 1991).

طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS تحلیل شدند.

نتایج و بحث

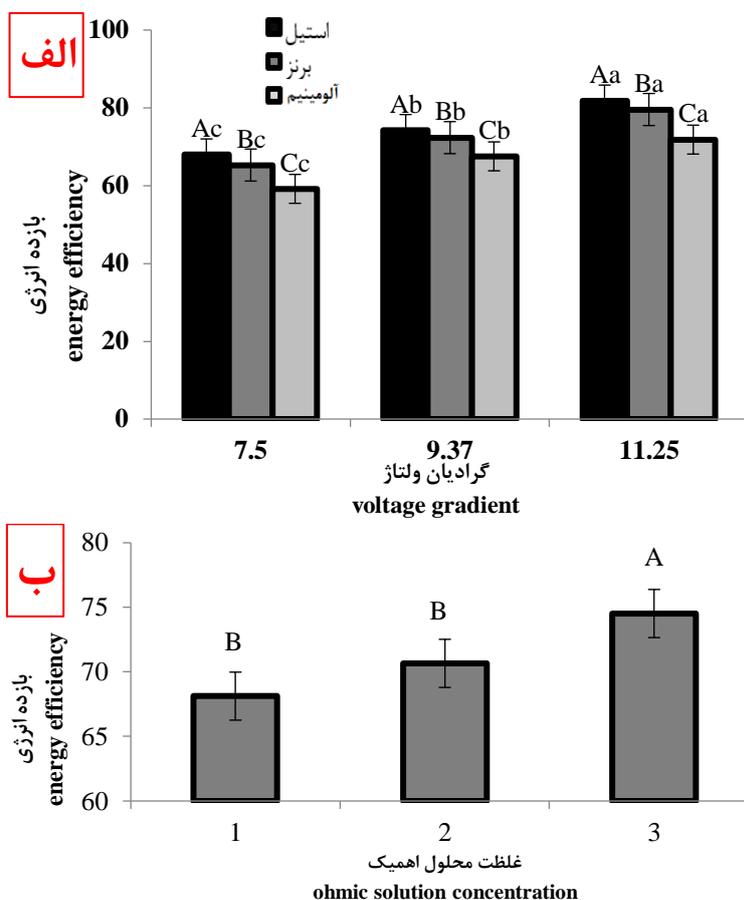
آنالیز واریانس بازده انرژی در جدول ۲ نشان داده شده است که با توجه به نتایج به دست آمده هر سه فاکتور مستقل گرادیان ولتاژ، نوع الکترود و غلظت محلول اهمیک در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار هستند و برای اثر متقابل نیز گرادیان ولتاژ و نوع الکترود معنی‌داری در سطح ۱ درصد داشته است. در شکل ۲-الف نتایج حاصل از اثر متقابل برای فاکتور گرادیان ولتاژ و نوع الکترود به دست آمده است که با توجه به شکل افزایش گرادیان ولتاژ سبب افزایش مقدار بازده انرژی شده است و بیشترین مقدار بازده انرژی بین سه الکترود در الکترود استیل به دست آمده است. در گرادیان ولتاژ ثابت برای هر سه مورد بین الکترودها تفاوت معنی‌داری وجود داشته است و در یک الکترود ثابت نیز بین گرادیان ولتاژ مختلف تفاوت معنی‌داری از نظر آماری به دست آمده است. بیشترین مقدار بازده انرژی برابر است با ۷۹/۵۷ درصد که در گرادیان ولتاژ ۱۱/۲۵ و نوع الکترود استیل به دست آمده است و کمترین مقدار نیز ۵۹/۱۸ درصد بوده که در الکترود آلومینیم و گرادیان ولتاژ ۷/۵ مشاهده

جدول (۲) آنالیز واریانس بازده انرژی طی فرایند اهمیک

Table 2- Analysis of variance of energy efficiency during ohmic process

F value	میانگین مربعات average of squares	DF	
354.52**	1248.97	2	گرادیان ولتاژ Voltage gradient
140.83**	496.12	2	نوع الکترود Electrode type
79.42**	279.78	2	غلظت مایع اهمیک Concentration of ohmic liquid
6.25**	22.11	4	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود Voltage gradient × electrode type
0.22ns	0.78	4	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود Voltage gradient × electrode type
0.05ns	0.183	4	نوع الکترود × غلظت مایع اهمیک electrode type × Concentration of ohmic liquid
3.52		18	خطا Error
CV=13.63		R=0.949	

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، و ns معنی‌دار نبودن ** Significance at 1% level and ns not significant



شکل (۲) الف: اثر متقابل فاکتور گرادیان ولتاژ و نوع الکترود بر میزان بازده انرژی ب: مقایسه میانگین اثر غلظت محلول اهمیک بر بازده انرژی

حروف مشابه در بالای ستون‌های هر شکل نشان دهنده معنی دار نبودن و حروف غیرمشابه نشان دهنده معنی دار بودن است
Fig 2. A: Interaction of voltage gradient factor and electrode type on energy efficiency
B: Comparison of the average effect of ohmic solution concentration on energy efficiency
Similar letters indicate non-significance and dissimilar letters indicate significance

مقدار در الکترود نوع آلومینیمی مشاهده شده است. در گرادیان ولتاژها نیز این مقادیر در گرادیان ولتاژ ۷/۵ و ۱۱/۲۵ بوده است. بیشترین مقدار بازده اکسرژی برابر است با ۶۱/۳۶ درصد که در گرادیان ولتاژ ۱۱/۲۵ و نوع الکترود استیل به دست آمده است و کمترین مقدار نیز ۳۳/۱ درصد بوده که در الکترود آلومینیم و گرادیان ولتاژ ۷/۵ مشاهده شده است. تأثیر غلظت محلول نیز بر بازده اکسرژی این گونه بوده که بازده انرژی ۵۴/۷۲ درصد در غلظت ۳ به دست آمده است که افزایش غلظت سبب افزایش ۱۸ درصد در بازده اکسرژی شده است. افزایش بازده اکسرژی با افزایش میزان ولتاژ می‌تواند به دلیل کاهش تبادل دمایی بین مرز سیستم با محیط

نتایج حاصل از آنالیز آماری برای بازده اکسرژی در جدول ۳ نشان داده شده است و طبق جدول فاکتورهای گرادیان ولتاژ، نوع الکترود، غلظت محلول اهمیک و همچنین اثر متقابل آنها برای بازده اکسرژی در سطح آماری ۱ درصد معنی دار شده است و برای بقیه فاکتورهای اثر متقابل معنی داری به دست نیامده است. با توجه به شکل اثر متقابل که در شکل ۳-الف نشان داده شده، بازده اکسرژی نیز با افزایش گرادیان ولتاژ افزایش پیدا کرده و بین تمام الکترودها در تمامی گرادیان‌های ولتاژ تفاوت معنی داری وجود داشته است و در یک گرادیان ولتاژ ثابت به ترتیب بیشترین مقدار بازده اکسرژی در الکترود استیل و کمترین

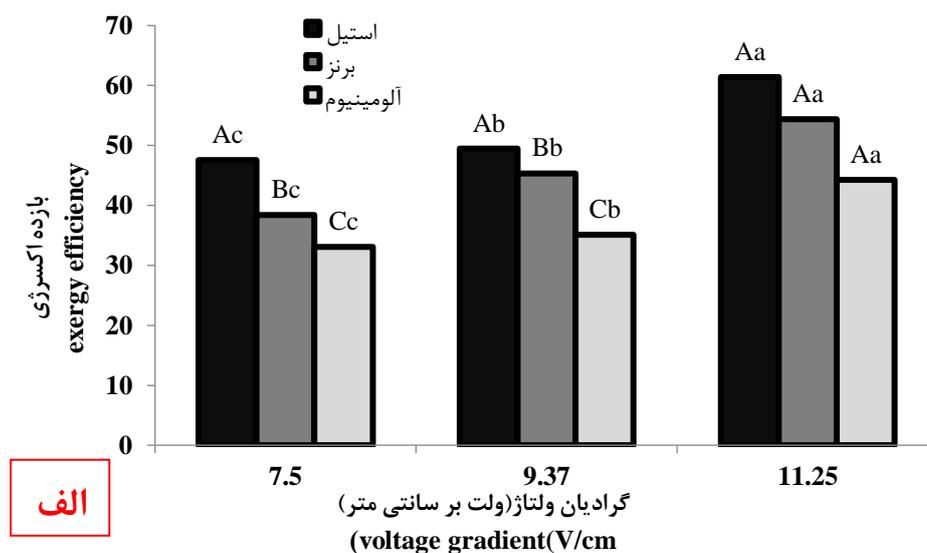
اطراف باشد و همین امر سبب افزایش میزان بازده اکسرژی دست‌گام می‌گردد. بوزکورت و همکاران (Bozkurt *et al.*, 2010) روی فرایند پختن با استفاده از فرایند حرارت‌دهی اهمیک به نتایج مشابهی دست یافتند و درویشی و همکاران (Darvishi, *et al.* 2015) روی رب گوجه‌فرنگی طی فرایند حرارت‌دهی اهمیک نتایج مشابهی را گزارش کردند. با توجه به بررسی مقایسه میانگین غلظت محلول اهمیک، با افزایش میزان غلظت مقدار بازده اکسرژی نیز افزایش پیدا کرده که در شکل ۳-ب نشان داده شده است.

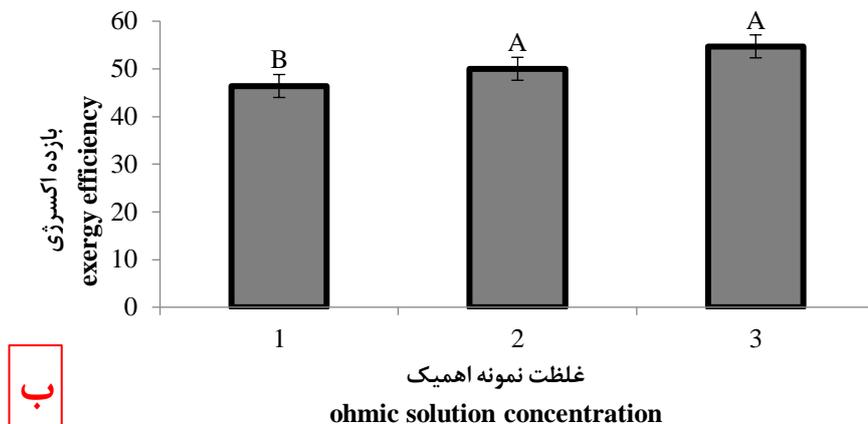
جدول (۳) آنالیز واریانس بازده اکسرژی طی فرایند اهمیک

Table 3- Analysis of variance of exergy efficiency during Ohmic process

F value	میانگین مربعات average of squares	DF	
1081.3**	6358.78	2	گرادیان ولتاژ Voltage gradient
516.92**	303.80	2	نوع الکترود Electrode type
798.59**	469.35	2	غلظت مایع اهمیک Concentration of ohmic liquid
678.74**	398.91	4	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود Voltage gradient × electrode type
1.70ns	1.32	4	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود Voltage gradient × electrode type
0.658ns	0.731	4	نوع الکترود × غلظت مایع اهمیک electrode type × Concentration of ohmic liquid
	۰/۵۸	18	خطا
	CV=12.53	R=0.841	

** Significance at 1% level and ns not significant ** معنی‌دار در سطح ۱ درصد و ns معنی‌دار نبودن





ب

شکل (۳) A: اثر متقابل فاکتور گرادیان ولتاژ و نوع الکتروود بر روی میزان بازده اکسرژی

B: مقایسه میانگین اثر غلظت محلول اهمیک بر روی میزان بازده اکسرژی

Fig 3.A: Interaction of voltage gradient factor and electrode type on exergy efficiency
B: Comparison of the mean effect of ohmic solution concentration on exergy efficiency

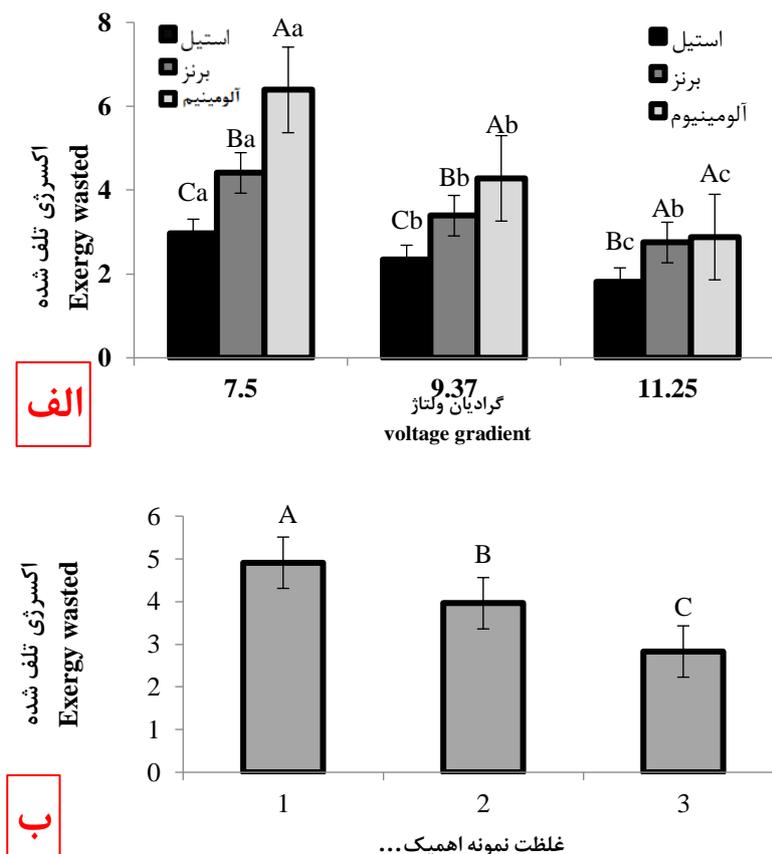
ممکن است آن باشد که بالا رفتن گرادیان ولتاژ باعث می‌شود زمان فرایند حرارت‌دهی کاهش پیدا کند و همین‌طور زمان یکنواخت شدن دما در مناطق مختلف کاهش یابد که همین امر باعث کاهش اکسرژی تلف‌شده و ایجاد آنتروپی می‌گردد؛ بالا رفتن بازده اکسرژی سبب کاهش اکسرژی تلف‌شده نیز شده است. از طرفی، تغییرات اکسرژی به دلیل اختلاف دما بین مرز سیستم و محیط اطراف نیز رخ می‌دهد و در ولتاژهای بالا به دلیل این‌که دمای محصول به‌سرعت بالا می‌رود میزان تبادل دمایی با محیط اطراف به دلیل سرعت بالایی دمایی درون نمونه کاهش می‌یابد و همین امر سبب می‌شود که میزان اکسرژی تلف شده کاهش یابد. این نتیجه‌گیری مشابه نتایج تحقیقات واحدی و همکاران (Vahedi Torshizi *et al.*, 2021) روی انرژی و اکسرژی آب نارنج و بوزکورت و همکاران (Bozkurt *et al.*, 2009) در روش اهمیک است. با توجه به بررسی مقایسه میانگین غلظت محلول اهمیک، با افزایش میزان غلظت مقدار اکسرژی تلف‌شده کاهش یافته که در شکل ۴-ب نشان داده شده است.

نتایج حاصل از آنالیز آماری برای اکسرژی تلف‌شده در جدول ۴ نشان داده شده است. طبق این جدول، فاکتورهای گرادیان ولتاژ، نوع الکتروود، غلظت محلول اهمیک و اثر متقابل آنها برای اکسرژی تلف‌شده در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار است و برای بقیه فاکتورها اثر متقابل معنی‌داری به دست نیامده است. با توجه به شکل ۴-الف که در آن نتایج اثر متقابل نشان داده شده است، با افزایش گرادیان ولتاژ میزان اکسرژی تلف‌شده کاهش پیدا کرده است و در بین الکتروودها نیز بیشترین مقدار اکسرژی تلف‌شده برای الکتروود نوع آلومینیمی و کمترین مقدار در الکتروود نوع استیل به‌دست آمده است. بیشترین مقدار اکسرژی تلف شده برابر است با ۶/۳۹ که در گرادیان ولتاژ ۷/۵ و نوع الکتروود آلومینیم به‌دست آمده است و کمترین مقدار نیز ۱/۸۱ است که در الکتروود استیل و گرادیان ولتاژ ۱۱/۲۵ مشاهده می‌شود. تاثیر غلظت محلول نیز بر اکسرژی تلف شده اینگونه بوده که بازده انرژی ۴/۹۱ در غلظت ۱ به‌دست آمده است که افزایش غلظت سبب کاهش ۷۰ درصد اکسرژی تلف شده گردیده است. دلیل این مسئله

جدول (۴) آنالیز واریانس اکسرژی تلف‌شده طی فرایند اهمیک
Table 4- Analysis of variance of exergy lost during ohmic process

F value	میانگین مربعات average of squares	DF	
967.36**	30.34	2	گرادیان ولتاژ Voltage gradient
987.30**	30.97	2	نوع الکترود Electrode type
317.67**	9.96	2	غلظت مایع اهمیک Concentration of ohmic liquid
113**	3.54	4	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود Voltage gradient × electrode type
0.86	0.05	4	گرادیان ولتاژ × نوع الکترود Voltage gradient × electrode type
0.71	0.12	4	نوع الکترود × غلظت مایع اهمیک electrode type × Concentration of ohmic liquid
	0.031	18	18
	CV=15.37	R=0.98	

** معنی‌داری در سطح ۱ درصد و ns معنی‌دار نبودن
** Significance at 1% level and ns not significant



شکل ۴- الف: اثر متقابل فاکتور گرادیان ولتاژ و نوع الکترود بر میزان اکسرژی تلف‌شده

ب: مقایسه میانگین اثر غلظت محلول اهمیک بر اکسرژی تلف‌شده

حروف مشابه نشان‌دهنده معنی‌دار نبودن و حروف غیرمشابه نشان‌دهنده معنی‌دار بودن است

Fig4. Interaction of voltage gradient factor and electrode type on the amount of wasted exergy
B. Comparison of the mean effect of ohmic solution concentration on wasted exergy
Similar letters indicate non-significance and dissimilar letters indicate significance

نتیجه گیری

آمده است. برای اکسرژی تلف شده نیز استفاده از الکتروود نوع آلومینیومی سبب افزایش آن شده است که تأثیر منفی بر سیستم داشته است. در مجموع می توان گفت که افزایش غلظت توانسته سبب بهبود پارامترهای مهندسی سیستم شود و این مقدار با استفاده از الکتروود استیل نیز مشاهده شده است. برای بازده انرژی و اکسرژی به ترتیب استفاده از الکتروود آلومینیومی ۱۲ و ۲۵ درصد مقادیر آن ها را کاهش داده است و بیشترین مقدار نیز در الکتروود نوع استیل بوده است. این نتایج برای بازده انرژی و اکسرژی با افزایش ولتاژ نیز به دست

تشکر و قدردانی

نویسندگان از مسئولان آزمایشگاه گروه های باغبانی و مکانیک بیوسیستم دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان برای همکاری در اجرای دقیق آزمایش ها سپاسگزاری می کنند.

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده اند و منافی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Abdelmoteleb, A., El-Kholy, M.M., Abou-El-Hana, H. and Younis, M.A. 2009. Thin layer drying of garlic slices using convection and combined (convection - infrared) heating modes. *Misir Journal of Agricultural Engineering*. 26, 251–281.
- Ariç Sürme, S. and Sabancı, S., 2021. The usage of Ohmic heating in milk evaporation and evaluation of electrical conductivity and performance analysis. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(9), p.e15522.
- Azadbakht, M., Aghili, H., Ziaratban, A., and Vahedi Torshizi, M. 2017a. Application of artificial neural network method to exergy and energy analyses of fluidized bed dryer for potato cubes. *Energy*. 120, 1–12.
- Azadbakht, M., Mahmoodi, M.J., Ghazagh Jahed, R. and Vahedi Torshizi, M., 2022. Mathematical modeling of the biochemical properties of carrots by microwave drying with different pretreatments using response surface methodology. *Food Engineering Research*, 21(1), pp.35-56.
- Azadbakht, M., Vahedi Torshizi, M., Noshad, F., and Rokhbin, A., 2018. Application of artificial neural network method for prediction of osmotic pretreatment based on the energy and exergy analyses in microwave drying of orange slices. *Energy*. 165, 836-845.
- Barrón-García, O. Y., Nava-Álvarez, B., Gaytán-Martínez, M., Gonzalez-Jasso, E. and Morales-Sánchez, E., 2022. Ohmic heating blanching of *Agaricus bisporus* mushroom: Effects on polyphenoloxidase inactivation kinetics, color, and texture. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 80, p.103105
- Blumfield, Michelle, *et al.* "Examining the health effects and bioactive components in *Agaricus bisporus* mushrooms: A scoping review." *The Journal of Nutritional Biochemistry* 84 (2020): 108453.
- Bozkurt, H. and Icier, F. 2009. Optimization of ohmic cooking of grounded beef-fat blends: exergy approach. *Bio and Electrotechnologies*. 21–23.
- Bozkurt, H. and Icier, F. 2010. Exergetic performance analysis of ohmic cooking process. *Journal of Food Engineering*, 100(4): 688–695.
- Castro, I., Teixeira, J.A., Salengke, S., Sastry, S.K. and Vicente, A.A., 2004. Ohmic heating of strawberry products: Electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 5(1): 27-36.

- Cevik, M., 2021. Electrical conductivity and performance evaluation of verjuice concentration process using ohmic heating method. *Journal of Food Process Engineering*, 44(5), p.e13672.
- Cullen, P.J., Tiwari, B.K. and Valdramidis, V. 2011. *Novel thermal and non-thermal technologies for fluid foods*. Academic Press..
- Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F. and Fadavi, A. 2015. Exergy and energy analyses of liquid food in an Ohmic heating process: A case study of tomato production. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 31, 72-83.
- Darvishi, H., Khostaghaza, M.H. and Najafi, G. 2013. Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 12, 101–108.
- Heldman, D.R. and Moraru, C.I. 2014. *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*. Crc Press.
- Jindarat, W., Rattanadecho, P. and Vongpradubchai, S. 2011. Analysis of energy consumption in microwave and convective drying process of multi-layered porous material inside a rectangular wave guide. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 35, 728–737
- Mokhtarian, M., Tavakolipour, H. and Kalbasi-Ashtari, A. 2016. Energy and exergy analysis in solar drying of pistachio with air recycling system. *Drying Technology*. 34, 1484–1500.
- N.karimi., Moshref, L., Malek, S. 2014. Effect of Packaging Film and Moisture Absorbent Materials on the Shelf Life of Button Mushrooms. *Food Engineering Research*, 15(3), 1-12. doi: 10.22092/jaer.2014.100205
- Palaniappan, s. and sastry, s. K. 1991. Electrical conductivity of selected juices: influences of temperature, solids content, applied voltage, and particle size. *Journal of Food Process Engineering*, 14(4): 247–260.
- Ramos, M., Burgos, N., Barnard, A., Evans, G., Preece, J., Graz, M., Ruthes, A.C., Jiménez-Quero, A., Martínez-Abad, A., Vilaplana, F. and Ngoc, L.P., 2019. Agaricus bisporus and its by-products as a source of valuable extracts and bioactive compounds. *Food chemistry*, 292, pp.176-187.
- Saberian, H., Hamidi-Esfahani, Z., Ahmadi Gavlighi, H. and Barzegar, M. 2017. Optimization of pectin extraction from orange juice waste assisted by ohmic heating. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 117, 154–161.
- Sastry SK, Palaniappan S. 1992. Mathematical modeling and experimental studies on ohmic heating of liquid-particle mixtures in a static heater. *J Food Process Eng*;15:241–61.
- Shynkaryk, M. V., Ji, T., Alvarez, V.B. and Sastry, S.K. 2010. Ohmic Heating of Peaches in the Wide Range of Frequencies (50 Hz to 1 MHz). *Journal of Food Science*. 75, 493–500
- Vahedi Torshizi, M., Azadbakht, M. and Kashaninejad, M. 2020b. Application of response surface method to energy and exergy analyses of the ohmic heating dryer for sour orange juice. *Fuel*. 278, 250-261.
- Vahedi Torshizi, M., Azadbakht, M. and Kashaninejad, M. 2020a. A study on the energy and exergy of Ohmic heating (OH) process of sour orange juice using an artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM). *Food Science & Nutrition*. 8(8): 4432-4445.
- Vahedi Torshizi, M., Azadbakht, M. and Kashaninejad, M. 2021. Investigation of some energy and exergy factors during ohmic heating processing of sour orange. *Journal of Agricultural Machinery*. 11(2): 435-445.
- Vahedi Torshizi, M. and Kashaninejad, M., 2022. Investigation of Changes in the Qualitative Properties of Sour Orange Juice during the Ohmic Heating Process. *Food Engineering Research*, 21(2), pp.1-14.
- Zareifard, M.R., Ramaswamy, H.S., Trigui, M. and Marcotte, M. 2003. Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 4, 45–55.
- Zell, M., Lyng, J.G., Morgan, D.J. and Cronin, D.A. 2011. Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid food. *Food and Bioproducts Processing*. 89, 128–134.

نام‌گذاری		اشتراک‌ها	
C_p	ظرفیت گرمایی (J/kg K)	t	زمان (s)
$E_{\text{electrical}}$	انرژی الکتریکی (J)	V	ولتاژ (V)
E	انرژی (J)	η_{en}	(%) بهره‌وری انرژی
E_{loss}	از دست دادن انرژی (J)	η_{ex}	(%) بازده انرژی
EX	اکسرژی (J)	λ_w	گرمای نهان آب خالص (J/kg)
EX_{loss}	از دست دادن اکسرژی (J)	λ_{wp}	گرمای نهان نمونه (J/kg)
I	شدت جریان (A)	Subscripts	
IP	پتانسیل بهبود (J)	0	initial
m	جرم (کیلوگرم)	in	inlet
M	میزان رطوبت (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)	Out	Outlet
M_t	میزان رطوبت (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)	p	
T	دما (K)	∞	ambient



Original Research

Analysis of energy and exergy in the ohmic process during cooking: a case study of button mushroom

Mehdi Qavanloo, Mohsen Azad Bakht*, Feryal Varasteh, Mohammad Vahedi Torshizi

* **Corresponding Author:** Associate Professor of Department of Bio-System Mechanical Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Email: azadbakht@gau.ac.ir

Received: 31 May 2022 **Accepted:** 2 August 2022

http://doi: 10.22092/FOODER.2023.360992.1355

Abstract

Ohmic heating is a fast and uniform heating and produces a high-quality product with minimal changes in structural and nutritional properties, and it is also an environmentally friendly method that has been considered due to its beneficial properties. In this study, an ohmic processing system was developed that used three independent factors such as voltage gradients, electrode type (steel, brass and aluminum) and concentration of ohmic solution for mushroom cooking. Some factors for device had calculated such as energy efficiency, exergy efficiency and exergy loss during the cooking and all data analyzed by SAS statistical program. The results showed that all independent factors had significant meaning on mushroom cooking. The highest significant was for voltage gradient and after this factor, electrode type and concentration of ohmic solution had the high amount for energy efficiency, exergy efficiency and exergy loss. The highest energy efficiency was equal to 79.57 joules, and the exergy efficiency was 61.36 joules, observed in the steel electrode and at a voltage gradient of 11.25. The highest amount of exergy loss was 39.6 at a voltage gradient of 5.7 and with the aluminum electrode. Based on results, it can be stated that the best type of electrode used was steel electrode and concentration 2 showed the best values.

Keywords: Ohmic process, energy and exergy analysis, statistical analysis, button mushroom.