

Modeling and Optimization of Specific Energy Consumption and Green House Gas Emissions During Drying of Organic Blackberry with Different Pretreatments by Response Surface Methodology

EBRAHIM TAGHINEZHAD^{1*} AND MOHAMMAD KAVEH²

Agricultural Technology Department, Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

(Received: Sep. 24, 2019- Revised: Jan. 1, 2020- Accepted: Jan. 6, 2020)

ABSTRACT

The largest share of greenhouse gases in the world is related to the use of fossil fuels in power plants for electricity generate. Production and emissions of greenhouse gas are more important for the drying process that has high specific energy consumption (*SEC*). In this study, modeling and optimization of *SEC* and greenhouse gas emissions including CO₂ and NO_x during the process of blackberry drying under infrared-hot air combined dryer (at three inlet air temperature levels 50, 60 and 70 ° C) with different pretreatments including of microwave (90, 180 and 360 w), blanching (70, 80 and 90 ° C) and ultrasound (15, 30 and 45 min) were evaluated by response surface methodology. The drying energy was provided by various steam turbines, gas turbines and combined plants using natural gas, heavy oil and gas oil as fuel. The results showed that by increasing the microwave power and ultrasound time decreased quadraticly the amount of *SEC* (from 185.55 to 55.53 kWh/kg). However, this value decreased linearly (from 208.08 to 88.56 kWh/kg) with increasing blanching temperature. Emissions amount for all greenhouse gas decreased quadraticly (from 194460.67 to 24987.97g for CO₂ and from 1074.36 to 106.06 g for NO_x) with increasing microwave power, ultrasound time and hot air temperature for all turbines with different fuels. However, this amount decreased linearly with increasing blanching temperature (from 218063.85 to 39985.54g for CO₂ and from 1204.76 to 169.72 g for NO_x). Based on modeling using RSM, optimum conditions for the minimum *SEC* were determined to be microwave power of 349.7 W and inlet air temperature of 69.8 °C for microwave pretreatment, ultrasound time of 45 min and inlet air temperature of 70 °C for ultrasound pretreatment, blanching temperature of 90 °C and inlet air temperature of 70 °C for blanching pretreatment with desirability mean of 99.8%.

Keywords: Combined dryer; Response surface; Green house gas; Modelling; Blackberry fruit

مدل سازی و بهینه سازی انرژی مصرفی ویژه و انتشار گازهای گلخانه ای طی خشک کردن توت سیاه ارگانیک با پیش تیمارهای مختلف به روش سطح پاسخ

ابراهیم تقی نژاد^{۱*} و محمد کاوه^۲

۱. گروه مهندسی فناوری کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۰/۱۶)

چکیده

بیشترین سهم گازهای گلخانه ای در جهان مربوط به مصرف سوخت های فسیلی در نیروگاه ها به منظور تولید برق می باشد. تولید و انتشار گازهای گلخانه ای برای فرایند خشک کردن که دارای مصرف انرژی بالایی است، اهمیت بیشتری دارد. در این تحقیق، مدل سازی و بهینه سازی مقادیر انرژی مصرفی ویژه و انتشار گازهای گلخانه ای شامل CO_2 و NO_x طی فرایند خشک کردن توت سیاه تحت خشک کن ترکیبی هوای گرم - مادون قرمز (در سه سطح دمای هوای ورودی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C با پیش تیمارهای مختلف شامل میکروویو (۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ W)، بلانچینگ (۷۰، ۸۰ و ۹۰ °C) و فراصوت (۱۵، ۳۰ و ۴۵ min) توسط روش سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت. انرژی خشک کن از توربین های مختلف بخار، توربین گاز و نیروگاه های ترکیبی با سوخت های گاز طبیعی، نفت سنگین و نفت گاز تأمین می گردد. نتایج نشان داد که با افزایش توان میکروویو و زمان فراصوت مقدار انرژی مصرفی ویژه طی معادله درجه دوم از ۱۸۵/۵۵ تا ۵۵/۵۳ kWh/kg کاهش یافت. همچنین این مقدار با افزایش دمای بلانچینگ طی معادله خطی روند کاهشی (از ۲۰۸/۰۸ تا ۸۸/۵۶ kWh/kg) داشت. مقدار انتشار تمامی گازهای گلخانه ای با افزایش توان میکروویو، زمان فراصوت و دمای هوای گرم برای تمامی توربین ها با سوخت های مختلف طی معادله درجه دوم روند کاهشی (از ۱۹۴۴۶۰/۶۷ تا ۲۴۹۸۷/۹۸ g برای CO_2 و از ۱۰۷۴/۳۶ تا ۱۰۶/۰۶ برای NO_x) نشان داد. در حالی که این مقادیر با افزایش دمای بلانچینگ، به طور خطی، کاهش (از ۲۱۸۰۶۳/۸۵ تا ۳۹۹۸۵/۵۴ g برای CO_2 و از ۱۲۰۴/۷۶ تا ۱۶۹/۷۲ برای NO_x) یافت. بر اساس مدل سازی به روش سطح پاسخ، شرایط بهینه جهت کمترین انرژی مصرفی ویژه، در توان میکروویو ۳۴۹/۷ W و دمای هوای ورودی ۶۹/۸۰ °C برای پیش تیمار میکروویو، زمان فراصوت ۴۵ min و دمای هوای ورودی ۷۰ °C برای پیش تیمار فراصوت، دمای بلانچینگ ۹۰ °C و دمای هوای ورودی ۷۰ °C برای پیش تیمار بلانچینگ با میانگین مطلوبیت ۹۹/۸٪ تعیین گردید.

واژه های کلیدی: خشک کن ترکیبی، سطح پاسخ، گازهای گلخانه ای، مدل سازی، میوه توت

مقدمه

کشور را تولید می کند (Tavanir company, 2008). احتراق سوخت های فسیلی باعث انتشار گازهای گلخانه ای از جمله SO_2 ، NO_x ، CO و CO_2 در اتمسفر می شود. با توجه به اقلیم و شرایط آب و هوایی در ایران تولید برق در کشور عمدتاً توسط نیروگاه های حرارتی صورت می گیرد که پایه سوخت های فسیلی دارد (Nazari *et al.*, 2010). افزایش انتشار گازهای گلخانه ای در جهان به دلیل مصرف بی رویه سوخت های فسیلی سبب پیامدهای منفی از جمله گرمایش جهانی، گسترش نواحی بیابانی، باران های سیل آسا و اسیدی و تغییرات اقلیم، ایجاد حفره در لایه ازن، افزایش سطح آب ها و غیره برای محیط زیست شده و به دنبال آن، این عوامل اثرات منفی بر زندگی بشر داشته است (Manan *et al.*, 2017). به دنبال مصرف انرژی بالا در خشک کن های محصولات کشاورزی، بحث تولید گازهای گلخانه ای و اثرات زیست محیطی

میوه توت سیاه (*Rubus spp*) منبع خوبی از آنتی اکسیدان های طبیعی از جمله آنتوسیانین ها و اسیدهای فنولیک هستند (Ferrari *et al.*, 2012). یکی از نگرانی هایی که کاربرد بالقوه توت سیاه در صنعت را محدود می کند این است که آنتوسیانین ها به شرایط محیطی نامطلوب مانند دمای نامطلوب، نور، pH، رطوبت و اکسیژن حساس هستند و این موجب کاهش زمان ذخیره سازی محصول توت می گردد (Romero and Yopez, 2015). لذا خشک کردن محصولات کشاورزی یکی از قدیمی ترین روش ها، برای جلوگیری از خرابی و تلفات محصول در مرحله پس از برداشت می باشد (Jin *et al.*, 2018).

قدرت صنعت برق ایران بر اساس سه نوع سوخت فسیلی شامل گاز، نفت گاز و نفت سنگین است، که بیش از ۹۰٪ برق

تیمار مایکروویو، موجب کاهش در مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد (Motevali *et al.*, 2018a).

پیدا کردن روابط بین پارامترهای مستقل و وابسته برای محققین بسیار ارزشمند است. هر چند برخی روش‌های عددی تا حدی توانسته‌اند در حل پیچیدگی رفتارهای غیرخطی برخی مسائل کارگشا باشند. به دلیل برخی نقاط ضعف روش‌های عددی، محققین از روش‌های دیگر آماری استفاده می‌کنند (Abbasi Suraki *et al.*, 2010). رایج‌ترین این روش‌ها را می‌توان به روش شبکه عصبی مصنوعی و روش سطح پاسخ اشاره کرد. اما معایب روش شبکه عصبی مصنوعی شامل، وابسته بودن دقت نتایج به اندازه مجموعه آموزشی، مشکل بودن آموزش شبکه و داشتن تعداد بالای داده‌های ورودی است (Khana, 1990). در حالی که روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای مدل کردن و تجزیه و تحلیل مسائلی که در آن متغیر پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر مستقل باشد بسیار مفید است و هدف از آن بهینه کردن متغیرهای پاسخ می‌باشد. در بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ، متغیرهای ورودی به‌عنوان متغیرهای مستقل تعریف می‌شوند و تأثیر این متغیرها بر متغیرهای خروجی (وابسته) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بسیاری محققان برای بهینه‌سازی متغیرهای خشک کردن محصولات کشاورزی از جمله آب‌میوه بامیه (Wang *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2012)، آب‌میوه به (Noshad *et al.*, 2013)، میوه جک فروت^۱ (Saxena *et al.*, 2015) و میوه سیب (Majdi *et al.*, 2019) روش RSM استفاده کرده‌اند. بررسی‌های تحقیق‌های قبلی نشان داد که تاکنون هیچ‌گونه گزارشی در مورد استفاده از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی و مدل‌سازی انرژی مصرفی ویژه با انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از خشک کردن توت سیاه تحت خشک‌کن هوای گرم- مادون قرمز منتشر نشده است. از این رو هدف اصلی این مطالعه مدل‌سازی و بهینه‌سازی متغیرهای مستقل (دمای خشک‌کردن، توان مایکروویو، زمان فراصوت و دمای بلانچینگ) و متغیرهای وابسته (انرژی مصرفی ویژه و گازهای گلخانه‌ای) در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز برای میوه توت سیاه به کمک روش سطح پاسخ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

مقدار ۱۵ kg توت سیاه ارگانیک (*Rubus glaucus Benth*) از دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان (دانشگاه محقق اردبیلی)

آن نیز اهمیت فراوانی پیدا می‌کند. از آنجاکه مصرف انرژی در خشک‌کن‌ها بر پایه انرژی الکتریسیته، یا سوخت‌های فسیلی می‌باشد لذا لازم است تا با بررسی روش‌های مختلف میزان انرژی مصرفی و به دنبال آن تولید گازهای گلخانه‌ای را کاهش داد. مطالعات مربوط به مصرف انرژی طی خشک‌کردن برگ‌های نعنای (Salarikia *et al.*, 2017; Nozad *et al.*, 2016)، سیب (El-Mesery and Mwithiga, 2015)، توسط خشک‌کن‌های مختلف نشان داد که خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز کمترین انرژی مصرفی را دارد. لذا در این تحقیق از خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز استفاده شد.

به‌کارگیری پیش تیمارهای گوناگون، به‌منظور کاهش زمان خشک‌کردن و بهبود خواص تغذیه‌ای، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت خشک‌کردن مواد غذایی دارد. همچنین استفاده از پیش تیمار سبب کاهش برخی از تغییرات ناخواسته مانند تغییر رنگ و بافت محصولات کشاورزی می‌شود (Sahin and Doymaz, 2017). پیش تیمارهای مختلفی در صنعت خشک‌کردن از جمله بلانچینگ، انجماد، اسمزی، فراصوت، مادون قرمز و مایکروویو (Amami *et al.*, 2017; Akonor and Tortoe, 2014; Afolabi *et al.*, 2015; Kaveh *et al.*, 2018) بر روی محصولات کشاورزی انجام شده است. این مطالعات نشان داده است که اعمال پیش تیمارها نرخ خشک‌شدن را افزایش و دوره خشک شدن را کاهش می‌دهد. Sledz و همکاران (2016)، با استفاده از پیش تیمار فراصوت و بخار بلانچینگ در یک خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- هوای گرم، فرآیند خشک شدن برگ جعفری را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کرده‌اند که پیش تیمار فراصوت و بلانچینگ می‌تواند زمان خشک شدن را کاهش دهند. همچنین نتایج نشان داده‌اند که انرژی مصرفی ویژه با افزایش دمای هوا و اعمال امواج فراصوت کاهش می‌یابد.

Motevali و Tabatabaei (2017)، مقدار انرژی مصرفی و گازهای گلخانه‌ای (NO_x و SO_2 , CO_2) برای خشک کردن گل رز در هفت نوع خشک‌کن مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند (Motevali and Tabatabaei, 2017). آن‌ها بیان کرده‌اند که با افزایش دمای هوای ورودی، توان مادون قرمز و مایکروویو میزان انرژی مصرفی و انتشار گازهای گلخانه‌ای روند کاهشی دارد ولی با افزایش سرعت هوای ورودی میزان انرژی مصرفی و گازهای گلخانه‌ای افزایش یافت. (Motevali *et al.*, 2018a)، پارامترهای انرژی مصرفی و گازهای گلخانه‌ای را طی فرآیند خشک کردن لایه‌های سیب تحت خشک‌کن هوای گرم با پیش تیمارهای مختلف، مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که استفاده از پیش

۷۰ و دارای حجم ۶ L قرار گرفتند. با توجه به ثابت بودن سطح فرکانس دستگاه، نمونه‌های توت سیاه درون آب مقطر با دمای °C ۳۰ و در سه سطح زمانی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ min تحت تأثیر امواج فراصوت قرار گرفتند. به منظور یکنواختی عملیات پیش تیمار فراصوت، سطح آب مقطر در حمام فراصوت تا نقطه توصیه شده پر گردید.

خشک کن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم

به منظور انجام آزمایش‌ها از یک خشک کن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم (GC 400 model, company Grouc, Iran) استفاده گردید. خشک کن شامل دو لامپ مادون قرمز (Philips model, Flemish, Belgium) با توان هر کدام ۵۰۰ W (مجموعاً ۱۰۰۰ W) بود. کلیه آزمایش‌ها در سرعت ثابت هوا ورودی ۱ m/s انجام شد. توت‌های سیاه مورد آزمایش در وسط کانال بر روی ظرفی که از توری ساخته شده بود و بر روی ترازوی دیجیتال (-GF, AND, A&D Company Ltd, Tokyo, Japan) با دقت ۰/۰۱g که در زیر و خارج از کانال تعبیه شده بود قرار داده شدند. خشک کردن توت سیاه در سه سطح دمای هوای ورودی ۵۰، ۶۰ و °C ۷۰ انجام شد. به منظور شروع آزمایش ابتدا دستگاه به مدت ۱۵ min به حالت کار درآمده تا دما و سرعت هوای خشک کن ثابت گردد. در هر آزمایش مقدار ۵۵g توت سیاه به صورت تک لایه بر روی سینی خشک کن قرار داده شد. در طول آزمایش‌های خشک کردن، محدوده میانگین تغییرات دمای محیط °C ۴ ± ۲۰ و رطوبت نسبی هوا ۵ ± ۱۵٪ بوده است.

انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی ویژه معادل مقدار انرژی لازم برای تبخیر یک کیلوگرم آب از نمونه طی خشک کردن است. با توجه به اینکه پیش تیمار میکروویو و فراصوت و بلانچینگ دارای منبع توان می‌باشند. معادلات مربوط به محاسبه مصرف انرژی توسط پیش تیمارها و خشک کن (هوای گرم - مادون قرمز) در جدول (۱) آورده شده است.

تهیه و قبل از استفاده، نمونه‌ها در یخچال با دمای °C ۴ نگهداری شدند. قبل از شروع آزمایش‌ها، نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند. رطوبت اولیه توت سیاه، با استفاده از آن آزمایشگاهی (Memmert UNE 500 model) به مدت ۲۴ ساعت در دمای °C ۷۰ برابر با (۶۷±۵) (%w.b.) به دست آمد.

پیش تیمار

نمونه‌ها ابتدا تحت پیش تیمارهای میکروویو، فراصوت و بلانچینگ قرار گرفتند، سپس با استفاده از خشک کن هوای گرم - مادون قرمز خشک شدند.

پیش تیمار میکروویو

برای اعمال پیش تیمار میکروویو یک دستگاه میکروویو خانگی مدل (Panasonic, NN-C2002W, Japan) با فرکانس (۵۰ Hz) و ماکزیمم توان حرارتی (۱۰۰۰W) با قابلیت تنظیم توان‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. به منظور اعمال پیش تیمار میکروویو در سطوح مختلف توانی (۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۰ W) نمونه‌های توت سیاه درون محفظه میکروویو قرار داده شدند و عملیات پیش تیمار در سطح توان W ۹۰ به مدت ۱۰ min، در سطح توان W ۱۸۰ به مدت ۵ min و در سطح توان W ۳۶۰ به مدت ۲/۵ min انجام شد (Motevali and Hashemi, 2018).

پیش تیمار بلانچینگ

برای انجام عملیات بلانچینگ قبل از اعمال پیش تیمارها، از حمام آب گرم (Memmert, WNB 14 model, Germany) استفاده شد. این دستگاه دارای ماکزیمم دمای °C ۱۲۰/۱ ± ۰ بود. لذا پیش تیمار بلانچینگ در مدت زمان ۳ min با دمای °C ۷۰، ۲/۵ min با دمای °C ۸۰ و ۲ min با دمای °C ۹۰ انجام شد (Motevali and Hedayat, 2018).

پیش تیمار فراصوت

نمونه‌ها در معرض امواج فراصوت با استفاده از حمام فراصوت (Parsonic, 7500s model, Iran) با فرکانس ۲۸ kHz و توان W

جدول ۱: معادلات مصرف انرژی ویژه در خشک کن هوای گرم - مادون قرمز با پیش تیمارهای مختلف

Equation	Eq. Number	Energy consumption at Dryer	Reference
$E.U_{ter} = (A.v.\rho_a.C_a.\Delta T).3600$	(۱)	$E.U_{(HA)} = \text{Eq. ۱} + \text{Eq. ۲}$	Motevali et al., 2014
$E.U_{mec} = \Delta P.M_{air}.t$	(۲)	$E.U_{(IR)} = \text{Eq. ۳}$	Motevali et al., 2014
$E.U_{ter} = (A.v.\rho_a.C_a.\Delta T + K.t).3600$	(۳)	$E.U_{(HA-IR)} = \text{Eq. ۱} + \text{Eq. ۲} + \text{Eq. ۳}$	Motevali et al., 2014
$E.U_{ter} = P.t.3600$	(۴)	$E.U_{(MIC)} = \text{Eq. ۴}$	Motevali et al., 2014
$E.U_{blan} = m.C_a.\Delta T$	(۵)	$E.U_{(MIC+HA-IR)} = \text{Eq. ۱} + \text{Eq. ۲} + \text{Eq. ۳} + \text{Eq. ۴}$	Kaveh et al., 2018
$SEC = \frac{E.U}{M_W}$	(۶)	$E.U_{(US+HA-IR)} = \text{Eq. ۱} + \text{Eq. ۲} + \text{Eq. ۳} + \text{Eq. ۴}$	Motevali et al., 2014
		$E.U_{(Blan+HA-IR)} = \text{Eq. ۱} + \text{Eq. ۲} + \text{Eq. ۳} + \text{Eq. ۵}$	

ترکیبی (با سوخت گاز طبیعی ۲/۹۵kg/kWh و نفت سنگین ۳/۷۸ kg/kWh) می‌باشد (Nazari et al., 2010).

روش سطح پاسخ

کلیه آزمایش‌ها، در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل با ۳ تکرار انجام گرفت. در این مطالعه، متغیرهای مستقل شامل: دمای هوای خشک کردن در سه سطح (۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C)، توان مایکروویو در سه سطح (۱۸۰، ۹۰ و ۳۶۰ W)، زمان پیش تیمار فراصوت در سه سطح (۱۵، ۳۰ و ۴۵ min) و دمای هوای بلانچینگ در سه سطح (۷۰، ۸۰ و ۹۰ °C) و متغیرهای وابسته شامل: انرژی مصرفی ویژه، گازهای گلخانه‌ای (CO₂ و NO_x) در نظر گرفته شدند. تجزیه و تحلیل کلیه متغیرها برای رسم نمودارها، تحلیل آماری، مدل سازی و بهینه سازی به روش سطح پاسخ در قالب داده‌های واقعی^۱ با نرم افزار Design Expert 10 نسخه (Minnapolis, USA, Statease Inc) صورت گرفت.

در روش سطح پاسخ، سطح موردنظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار دارد و هدف عبارت از بهینه کردن پاسخ مزبور است. برای به دست آوردن مقدار بهینه (y_k)، از حل رابطه رگرسیون (۱) استفاده شد (Chayjan et al., 2017).

$$y_k = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

در رابطه بالا β_0 ، β_j ، β_{jj} و β_{ij} پارامترهای ضرایب رگرسیون می‌باشند. x_j متغیرهای کد شده ورودی می‌باشد. برازش سطوح پاسخ و بهینه سازی فرآیند خشک کردن با استفاده از نرم افزار دیزاین-اکسپرت^۲ نسخه ۱۰ با حل رابطه رگرسیون چندگانه (رابطه ۹) انجام شد و مدل‌های ریاضی برای هر پاسخ با تجزیه رگرسیون خطی چندگانه، ارزیابی شدند. معنادار بودن آماری متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ، در سطح اطمینان ۹۵٪ (P<0.05) بررسی شد و فقط از متغیرهایی که اثر آن بر متغیر پاسخ معنی دار بوده در معادله رگرسیونی پیشنهاد شده مورد استفاده قرار گرفت. در انتها، نقطه بهینه فرآیند با توجه به شرایط مرزی و توابع هدف مطابق جدول (۲) به دست آمد.

نتایج و بحث

انرژی مصرفی ویژه

جدول (۳)، تأثیر نتایج دمای هوای خشک کردن با پیش تیمارهای مختلف (فراصوت، بلانچینگ و مایکروویو) بر انرژی مصرفی ویژه توت سیاه در خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز به همراه بهترین مدل برازش شده را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است

در این جدول EU_{ter} انرژی مصرفی حرارتی (KJ)، A سطح سینی (m²)، v سرعت هوای ورودی (m/s)، c_p حرارت مخصوص (kJ/kg °C)، ρ_a چگالی هوا (kg/m³)، ΔT اختلاف دما (°C)، M_{air} دبی هوای ورودی (m³/s)، t کل زمان برای خشک شدن هر نمونه (h)، EU_{mec} انرژی مصرفی مکانیکی (KJ)، ΔP اختلاف فشار (mbar)، K توان لامپ مادون قرمز (W)، P توان خروجی مایکروویو (kW)، m جرم آب (kg)، EU_{blan} انرژی مصرفی طی بلانچینگ (KJ)، EU انرژی کل مصرفی حرارتی (KJ)، M_w مقدار کاهش وزن (kg) و SEC مقدار انرژی مصرفی ویژه (kW h/kg) است.

محاسبه میزان گازهای آلاینده و گلخانه‌ای

به منظور محاسبه میزان انرژی تولیدی الکتریسیته در نیروگاه‌های مختلف به ازای خروج هر کیلوگرم آب از محصول در فرآیند خشک شدن میوه توت سیاه ابتدا می‌بایست میزان انرژی الکتریسیته موردنیاز در تیمارهای مختلف آزمایشی را به دست آورد. به دنبال محاسبه انرژی موردنیاز در تیمارهای مختلف آزمایشی توسط سامانه خشک کردن (انرژی حرارتی و مکانیکی) و پیش تیمارهای مختلف، ضریب انتقال برق از نیروگاه‌های تولید تا محل مصرف (۱۳/۱۳٪ از کل انرژی الکتریسیته تولیدی) در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از ضریب مصرف داخلی (۳/۲٪ از کل انرژی الکتریسیته تولیدی) در نیروگاه‌ها میزان کل الکتریسیته محاسبه گردد و به دنبال آن گازهای آلاینده تولید شده به ازای هر کیلووات برق مصرفی به صورت زیر مورد محاسبه قرار گیرد (Iran, Energy Balance Sheet 2013).

از آنجایی که ایران بیشترین میزان گاز طبیعی، نفت سنگین و گازهای گلخانه‌ای را دارد و با توجه به این که تمام نیروگاه‌های ایران شامل نیروگاه‌های گاز، توربین، بخار و نیروگاه‌های ترکیبی با منابع سوخت متفاوت (گاز طبیعی، نفت سنگین و گازوییل) می‌باشد. میانگین انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO₂ و NO_x) برای نیروگاه‌های مختلف با سوخت‌های اولیه متفاوت برای تولید ۱ کیلووات ساعت انرژی عبارت‌اند از: مقدار CO₂ تولیدی در نیروگاه بخار (با سوخت گاز طبیعی ۶۳۶g/kWh و نفت سنگین ۷۸۲g/kWh و ۱۰۲۵)، در نیروگاه توربین (با سوخت گاز طبیعی ۴۵۰g/kWh و نفت سنگین ۱۰۴۸ g/kWh)، در نیروگاه ترکیبی (با سوخت گاز طبیعی ۶۲۲ g/kWh و نفت سنگین ۴۵۰g/kWh) در نیروگاه بخار (با سوخت گاز طبیعی ۲/۶۹g/kWh و نفت سنگین ۲/۵۲ g/kWh)، در نیروگاه توربین (با سوخت گاز طبیعی ۱/۹۱g/kWh و نفت سنگین ۵/۷۹ kg/kWh) و در نیروگاه

معنی دار ($P < 0.05$) می‌باشند. علامت مثبت ضرایب رگرسیون به مفهوم تأثیر مستقیم متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ و علامت منفی مدل به مفهوم تأثیر غیرمستقیم متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ می‌باشد (Chen *et al.*, 2008).

که در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز تحت پیش تیمارهای بلانچینگ، فراصوت و مایکروویو، تأثیر دمای هوا ورودی به خشک‌کن، توان مایکروویو، زمان پیش تیمار فراصوت و دمای بلانچینگ بر انرژی مصرفی ویژه طی معادله درجه دوم،

جدول ۲- شرایط مرزی متغیرهای مستقل و وابسته

متغیر	هدف	حد پایین	حد بالا	ضریب اهمیت
دمای هوای خشک‌کردن ($^{\circ}\text{C}$)	در محدوده آزمایش	۵۰	۷۰	۵
توان مایکروویو (W)	در محدوده آزمایش	۹۰	۳۶۰	۵
زمان پیش تیمار فراصوت (min)	در محدوده آزمایش	۱۵	۴۵	۵
دمای هوای بلانچینگ ($^{\circ}\text{C}$)	در محدوده آزمایش	۷۰	۹۰	۵
انرژی مصرفی ویژه (kWh/kg)	کمترین	۵۵/۵۳	۲۰۸/۰۸	۵
انتشار گازهای گلخانه‌ای (g)	کمترین	۱۰۶/۰۶	۳۹۹۸۵/۵۴	۵

جدول ۳: مقدار انرژی مصرفی ویژه طی خشک کردن با پیش تیمارهای مختلف

	Equation	R ²	Adj R ²	Pred R ²
SEC Microwave	$272.755 - 0.908 \times A - 1.409 \times B + 1.587 \times A^2$	0.9672	0.9475	0.8739
SEC Ultrasound	$408.49 - 3.866 \times C - 4.137 \times B + 0.0696 \times C \times B - 0.0458 \times C^2$	0.9962	0.9924	0.9811
SEC Blanching	$272.755 - 0.908 \times D - 1.409 \times B + 1.587 \times D^2$	0.9672	0.9475	0.8739

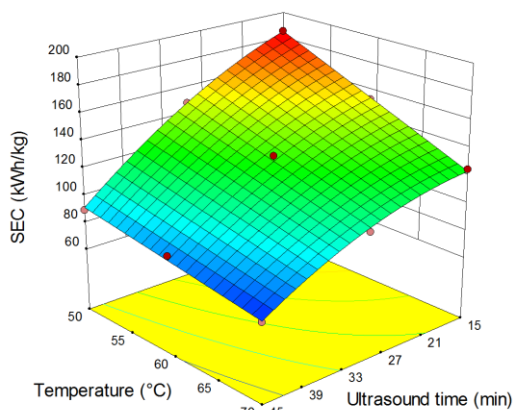
* که SEC: مقدار انرژی مصرفی ویژه (kWh/kg)، B: دمای هوا ورودی به خشک‌کن ($^{\circ}\text{C}$)، A: توان مایکروویو (W)، C: زمان پیش تیمار فراصوت (min) و D: دمای بلانچینگ ($^{\circ}\text{C}$)

محققین از جمله برای برنج (Behera and Sutar, 2018)، قارچ (Motevali and Kantrong *et al.*, 2014) و گل رز (Tabatabaei, 2017) سازگار است.

در شکل (۱-ب) اثر متقابل دمای هوای ورودی و زمان پیش تیمار فراصوت بر انرژی مصرفی ویژه نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است بیشترین و کمترین مقدار انرژی مصرفی ویژه به ترتیب ۱۸۵/۵۵ و ۷۰/۵۷ kWh/kg به دست آمد. با ثابت نگه داشتن دمای هوا و افزایش زمان پیش تیمار فراصوت، مقدار انرژی مصرفی روند کاهشی داشت. تأثیر زمان پیش تیمار فراصوت بر کاهش انرژی مصرفی در محدوده ۳۰ تا ۴۵ min نسبت به محدوده ۱۵ تا ۳۰ min بیشتر می‌باشد که این امر به دلیل این است که محصولات و مواد غذایی مانند توت سیاه که هنگام خروج رطوبت از آن‌ها لایه سخت سطحی تشکیل داده و به دنبال آن خروج رطوبت از محصول با کندی اتفاق می‌افتد. اعمال پیش تیمار فراصوت سبب عدم تشکیل این لایه سخت سطحی شده و به دنبال آن خروج رطوبت از سطح محصول بیشتر شده و زمان خشک شدن و در نهایت میزان انرژی مخصوص مصرفی کاهش می‌یابد (Motevali and Hashemi, 2017). محققان در استفاده از پیش تیمار فراصوت برای خشک کردن محصولات مختلف از جمله گلابی (Liu *et al.*,

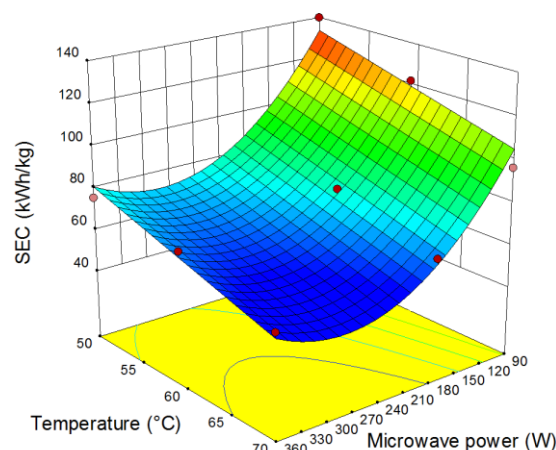
شکل (۱-الف)، اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو را بر انرژی مصرفی ویژه در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز تحت پیش تیمار مایکروویو، نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱-الف)، بیشترین و کمترین مقدار انرژی مصرفی به ترتیب مربوط به توان ۹۰ W با دمای هوای ورودی 50°C و توان ۳۶۰ W با دمای هوای ورودی 70°C برابر ۱۳۹/۷۷ و ۵۵/۵۳ kWh/kg بود. از این شکل‌ها می‌توان دریافت که با افزایش دمای هوای ورودی و توان مایکروویو انرژی مصرفی کاهش یافت. زیرا در دمای بالا، آب آزاد محصول سریع‌تر تبخیر شده و زمان خشک کردن به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Kaveh *et al.*, 2018). همچنین مایکروویو با اعمال فرآیند قطبی کردن مولکول‌های آب سبب افزایش دما درون محصول شده و با تخریب بافت محصول و تشکیل کانال‌هایی با قطر بیشتر مانع تشکیل سخت‌شدگی سطحی در طول فرآیند خشک شدن شده در نتیجه آب آزادتر محصول سریع تبخیر و شده زمان خشک شدن به‌طور قابل‌ای ملاحظه کاهش می‌یابد و در اثر کاهش زمان خشک شدن، انرژی مصرفی کل کاهش پیدا کرد (Torki-Harchegani *et al.*, 2016b). از این رو می‌توان نتیجه گرفت که دمای پایین هوای ورودی و توان‌های بالا مایکروویو به علت کاهش مصرف انرژی، مناسب است. این نتایج با گزارش‌های منتشر شده توسط سایر

در شکل (۱-ج) اثر دمای هوای ورودی و دمای هوای بلانچینگ بر انرژی مصرفی کل آورده شده است. با افزایش دمای هوای ورودی و دمای بلانچینگ، مقدار انرژی مصرفی ویژه روند کاهشی داشت. در دماهای بالای هوای و بلانچینگ، آب آزاد محصول سریع تر تبخیر شده و زمان خشک شدن به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد و در اثر کاهش زمان خشک شدن، انرژی مصرفی ویژه کل کاهش خواهد یافت (Adabi *et al.*, 2013). Motevali and Hashemi (۲۰۱۷)، در خشک کردن فیجوا با خشک کن انجمادی تحت پیش تیمار بلانچینگ دریافتند با افزایش دمای پیش تیمار بلانچینگ انرژی مصرفی کاهش می یابد (Motevali and Hashemi 2017).

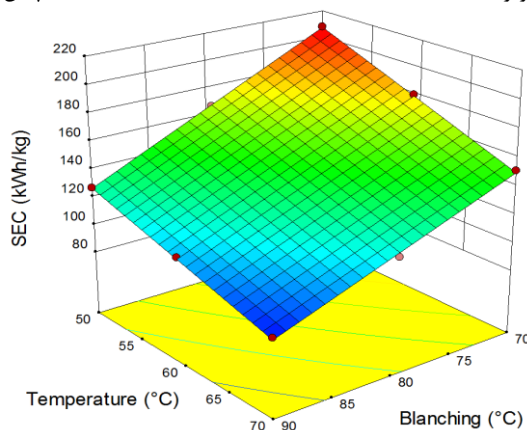


(ب) پیش تیمار فراصوت

سیب (Baeghbali *et al.*, 2018) و بادام (Kaveh *et al.*, 2019)، دریافتند که با افزایش زمان پیش تیمار فراصوت انرژی مصرفی ویژه کاهش می یابد. با افزایش متغیرهای مستقل دمای هوا و زمان پیش تیمار فراصوت مدت زمان صرف شده برای خشک کردن نمونه های توت سیاه کاهش یافت و همین امر منجر به کاهش انرژی مصرفی کل برای حذف رطوبت شد (Kaveh *et al.*, 2018). کاهش زمان خشک کردن به علت افزایش فشار داخلی و گرادیان غلظت می باشد که همین امر باعث می شود انتقال جرم افزایش یابد و در نهایت آب آزاد محصول سریع تبخیر و شده زمان خشک شدن قابل طور به ای ملاحظه کاهش می یابد (Motevali and Hedayati 2017).



(الف) پیش تیمار مایکروویو



(ج) پیش تیمار بلانچینگ

شکل ۱: شکل سه بعدی برای اثر متقابل الف) دمای هوا و توان مایکروویو ب) دمای هوا و زمان فراصوت ج) دمای هوا و دمای بلانچینگ بر انرژی مصرفی ویژه توت سیاه در خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز

۰/۹۶ به دست آمد. این مقدار نشان دهنده این بود که مدل درجه دوم در پیش تیمار مایکروویو و فراصوت و مدل درجه اول در پیش تیمار بلانچینگ برای پیش بینی مقدار CO_2 مناسب بود. قابل ذکر است، فقط ضرایبی که اثر معنی دار ($P < 0.05$) بر مقدار CO_2 داشت، در معادله نشان داده شد.

انتشار گاز CO_2

جدول های (۴)، نتایج مدل سازی برای گاز گلخانه ای CO_2 در دماهای مختلف هوای ورودی به خشک کن، و پیش تیمارهای متفاوت فراصوت، بلانچینگ و مایکروویو در نیروگاه ها با سوخت های مختلف را نشان می دهد. مقدار R^2 به میزان بالاتر از

جدول ۴: برازش اثر سطوح مختلف دمای هوا ورودی و پیش تیمار بر مقدار CO₂ تولیدی از نیروگاه‌های مختلف با استفاده از سوخت‌های متفاوت

پیش تیمار مایکروویو (A): زمان پیش تیمار فراصوت (min) و B: دمای هوا ورودی به خشک کن (°C)

Fuel Type	(g)	Equation	R ²	Adj R ²	Pred R ²
Combine cycle- Natural Gas	CO ₂	1.227E5-408.58×A-634.155×B+0.714×A ²	0.9672	0.9475	0.8739
Combine cycle- Gas Oil	CO ₂	1.697E5-564.76×A-876.54×B++0.987×A ²	0.9672	0.9475	0.8739
Gas Turbine- Gas Oil	CO ₂	2.86E5-951.556×A-1476.87×B+1.66287×A ²	0.9602	0.9364	0.8757
Gas Turbine- Natural Gas	CO ₂	2.13E5-710.03×A-1102.02×B+1.24×A ²	0.9672	0.9475	0.8739
Steam Power- Heavy Oil	CO ₂	2.79E5- -930.67×A-1444.47×B++1.62×A ²	0.9672	0.9475	0.8739
Steam Power- Natural Gas	CO ₂	1.73E5-577.469×A-896.27×B+1.00915×A ²	0.9672	0.9475	0.8739

پیش تیمار فراصوت (A): زمان پیش تیمار فراصوت (min) و B: دمای هوا ورودی به خشک کن (°C)

Fuel Type	(g)	Equation	R ²	Adj R ²	Pred R ²
Combine cycle- Natural Gas	CO ₂	1.84E5-1740.12×A-1861.88×B-20.60×A ² +31.32×A×B	0.9962	0.9924	0.9811
Combine cycle- Gas Oil	CO ₂	2.54E5-2405.24×A-2573.54×B-28.47×A ² +43.30×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Gas Turbine- Gas Oil	CO ₂	4.28E5-4052.55×A-4336.13×B-47.97×A ² +72.96×A×B	0.9962	0.9924	0.9811
Gas Turbine- Natural Gas	CO ₂	3.19E5-3023.95×A-3235.55×B-35.799×A ² +54.44×A×B	0.9962	0.9924	0.9811
Steam Power- Heavy Oil	CO ₂	5.44E5-13808.93×A-4117.53×B+245.06×A ²	0.9962	0.9924	0.9811
Steam Power- Natural Gas	CO ₂	2.598E5-2459.37×A-2631.469×B+44.276×A×B-29.11×A ²	0.9962	0.9924	0.9811

پیش تیمار بلانچینگ (A): دمای پیش تیمار بلانچینگ (°C) و B: دمای هوا ورودی به خشک کن (°C)

Fuel Type	(g)	Equation	R ²	Adj R ²	Pred R ²
Combine cycle- Natural Gas	CO ₂	3.57E5-2835.57×A-2728.82×B+20.437×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Combine cycle- Gas Oil	CO ₂	4.93E5-3919.39×A-3771.84×B+28.25×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Gas Turbine- Gas Oil	CO ₂	8.31E5-6603.74×A-6355.13×B+47.596×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Gas Turbine- Natural Gas	CO ₂	6.20E5-4927.597×A-4742.09×B+35.51×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Steam Power- Heavy Oil	CO ₂	8.13E5-6458.80×A-6215.65×B+46.55×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Steam Power- Natural Gas	CO ₂	5.04E+5-4007.61×A-3856.74×B+28.88×A×B	0.9982	0.9972	0.9934

(Tabatabaei, 2017).

پیش تیمار مایکروویو

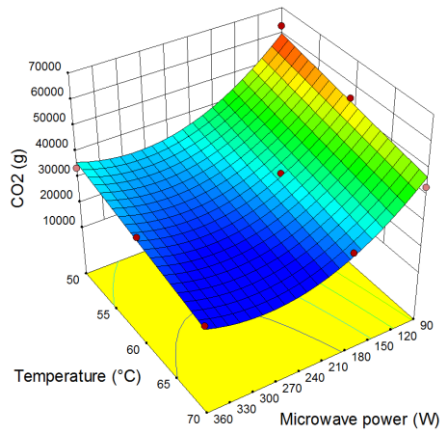
در شکل (۲)، اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو (توسط منحنی سطح پاسخ) بر روی متغیر پاسخ CO₂ از نیروگاه‌های مختلف با استفاده از سوخت‌های متفاوت نشان داده شده است. مطابق شکل (۲)، مقدار CO₂ بین ۲۴۹۸۷/۹۸ تا ۱۴۶۴۷۵/۰۹ g متغیر بود. همان‌طور که از شکل مشخص است مقدار CO₂ با افزایش دمای هوای ورودی و توان پیش تیمار مایکروویو به طور معنی‌داری (P<0.05) روند کاهشی داشت. بیشترین مقدار CO₂ (۱۴۶۴۷۵/۰۹ g) در نیروگاه Gas Turbine و با سوخت Gas Oil و کمترین مقدار CO₂ (۲۴۹۸۷/۹۸g) در نیروگاه Combine cycle و با سوخت Natural Gas به دست آمد. دلیل روند کاهشی، انتشار گازهای گلخانه‌ای را می‌توان در کاهش انرژی مصرفی ویژه طی خشک کردن در دمای و توان بالا دانست (Motevali and

پیش تیمار فراصوت

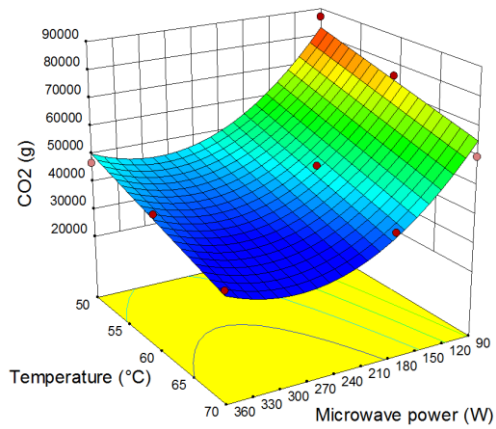
شکل (۳)، اثر دمای هوا ورودی و زمان پیش تیمار فراصوت بر مقدار CO₂ نمونه‌های توت سیاه خشک‌شده با خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز در نیروگاه‌ها و سوخت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش دمای هوا از ۵۰ °C به ۷۰ °C و زمان فراصوت از ۱۵ min به ۴۵ min مقدار CO₂ به ترتیب از ۱۹۴۴۶۰/۶۷ تا ۳۱۷۵۷/۸۱ g طی معادله درجه دوم کاهش یافت. بیشترین CO₂ در دمای هوای ۵۰ °C و زمان پیش تیمار فراصوت ۱۵ min و کمترین CO₂ در دمای هوای ۷۰ °C و زمان پیش تیمار ۴۵ min اتفاق افتاد. علت این افزایش را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با کاهش دما، مواد جامد محلول به همراه آب روی لایه سطحی

خشک کردن لازم دارد در نتیجه با افزایش انرژی مصرفی ویژه، مقدار گاز گلخانه‌ای CO₂ بیشتر می‌شود (Kaveh et al., 2018).

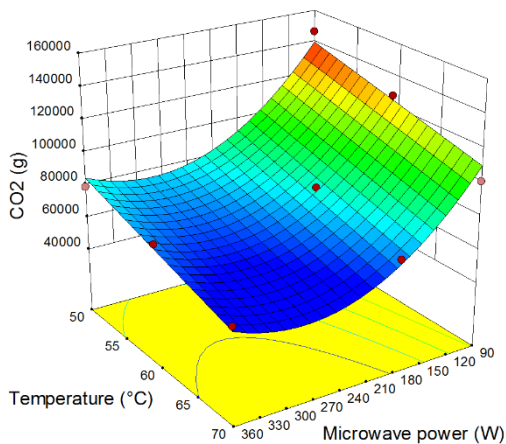
میوه قرار گرفته و پدیده سفت شدن سطحی اتفاق می‌افتد در نتیجه بافت سفت‌تر شده است و انرژی بیشتری برای



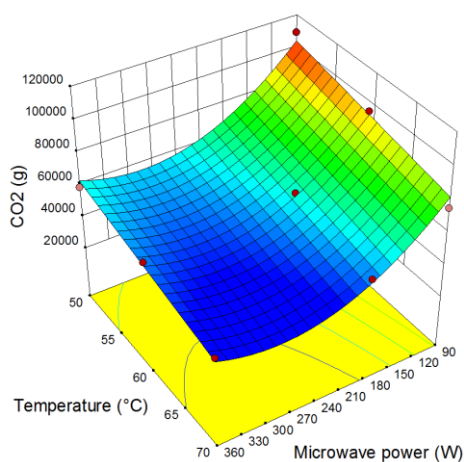
الف) Combine cycle- Natural Gas



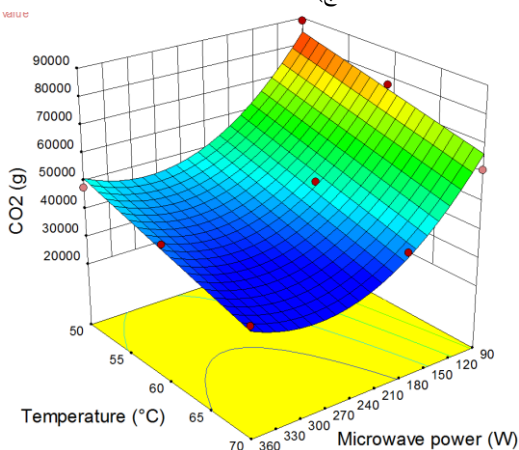
ب) Combine cycle- Gas Oil



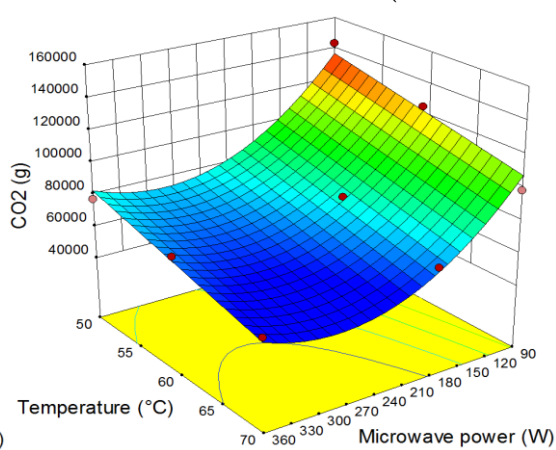
ج) Gas Turbine- Gas Oil



د) Gas Turbine- Natural Gas

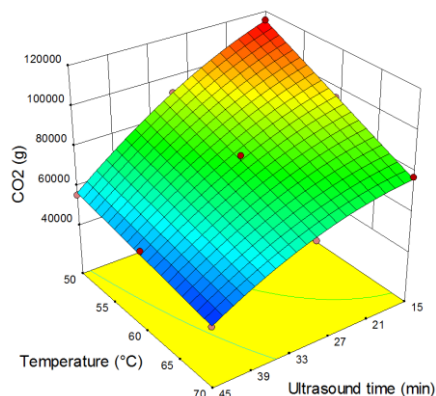


ه) Steam Power- Heavy Oil

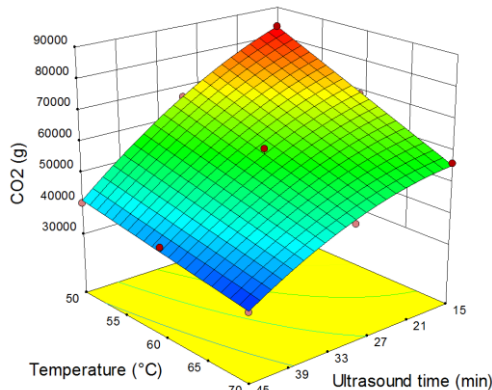


و) Steam Power- Natural Gas

شکل ۲: شکل سه‌بعدی برای اثر متقابل دمای هوا و توان پیش‌تیمار مایکروویو بر میزان تولید CO₂ نیروگاه‌های مختلف برای توت سیاه در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم - مادون‌فرمز تحت پیش‌مایکروویو

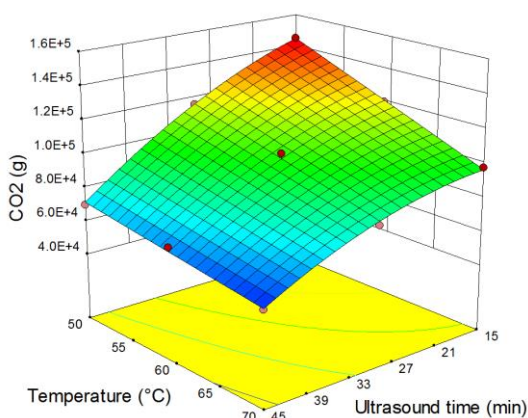


Combine cycle- Gas Oil (الف)

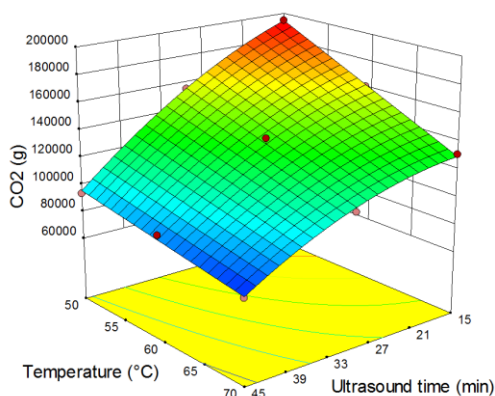


Combine cycle- Natural (ب)

Gas

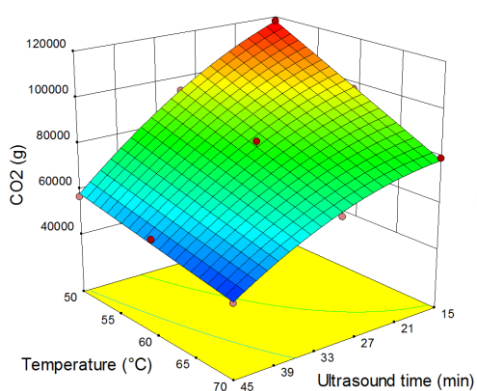


Gas Turbine - Gas Oil (ج)

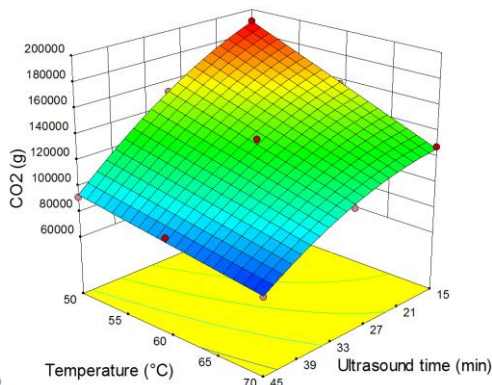


Gas Turbine - Natural (د)

Gas



Steam Power - Heavy Oil (و)



Steam Power - Natural (ز)

Gas

شکل ۳: شکل سه بعدی برای اثر متقابل دمای هوا و زمان توان فراصوت بر میزان تولید CO₂ در نیروگاه‌های مختلف برای خشک کردن توت سیاه در خشک کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز تحت پیش تیمار فراصوت

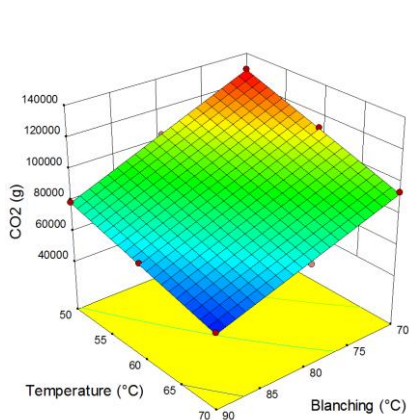
کمترین مقدار CO₂ در دمای هوای ورودی ۷۰ °C دمای بلانچینگ ۹۰ °C به ترتیب در نیروگاه Combine cycle و سوخت Natural Gas اتفاق افتاد. با افزایش دمای هوا و دمای بلانچینگ، مقدار انرژی مصرفی ویژه کاهش می‌یابد که این امر به علت وابسته بودن انرژی مصرفی ویژه به زمان خشک کردن و رطوبت می‌باشد، به طوری که با افزایش دما، توت سیاه رطوبت

پیش تیمار بلانچینگ

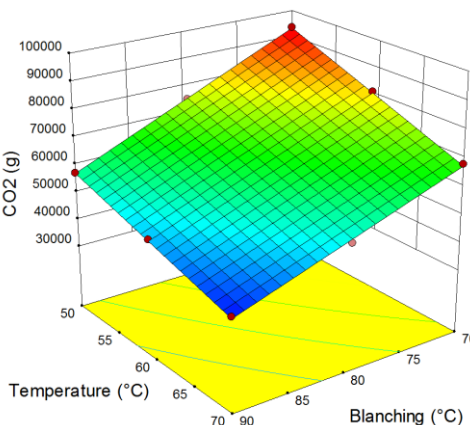
مطابق شکل (۴)، با افزایش دمای هوای ورودی و دمای بلانچینگ مقدار CO₂ روند کاهشی داشت. کمترین و بیشترین مقدار CO₂ به ترتیب ۳۹۹۸۵/۵۴ و ۲۱۸۰۶۳/۸۵ g به دست آمد. بیشترین مقدار CO₂ در دمای هوای ۴۰ °C و دمای بلانچینگ ۷۰ °C در نیروگاه Gas Turbine با سوخت Gas Oil ثبت شد در حالی که

ویژه محصول می شود در نتیجه مقدار گاز CO₂ کاهش می یابد.
(Motevali and Hashemi, 2018).

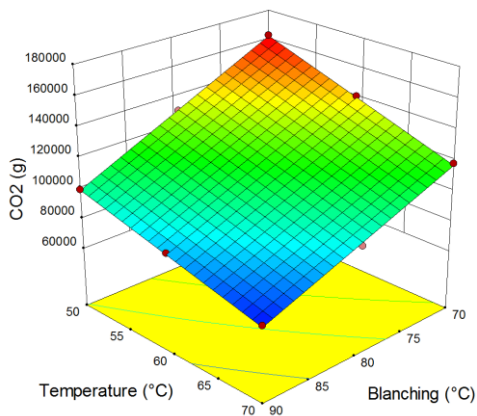
خود را سریع تر از دست می دهد و زمان کمتری برای خشک کردن لازم دارد که تبخیر سریع رطوبت موجب کاهش انرژی مصرفی



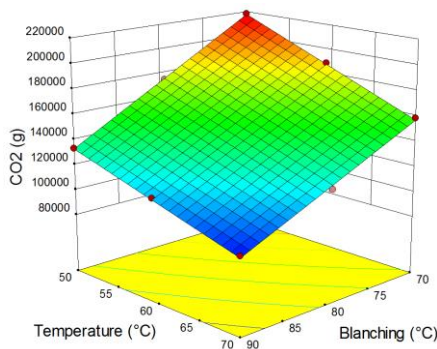
الف) Combine cycle- Gas Oil



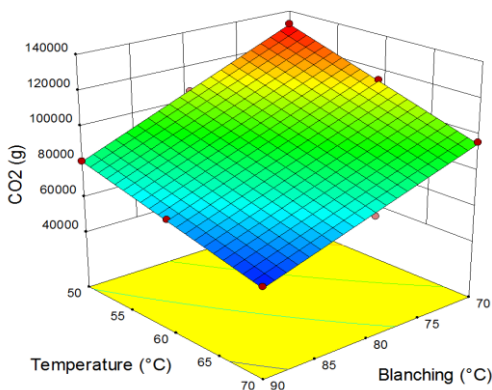
ب) Steam Combine cycle- Natural Gas



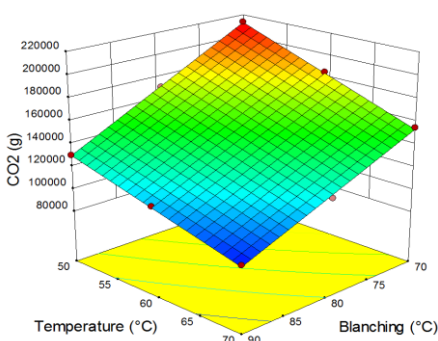
ج) Gas Turbine- Gas Oil



د) Gas Turbine- Natural Gas



ه) Steam Power- Heavy Oil



و) Steam Power- Natural Gas

شکل ۴. شکل سه بعدی برای اثر متقابل دمای هوا و دمای بلانچینگ بر میزان تولید CO₂ در نیروگاه های مختلف برای خشک کردن توت سیاه در خشک کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز تحت پیش تیمار بلانچینگ

نشان داده شده است. مقدار R² بزرگ تر از ۰/۹۴ به دست آمد. این مقدار نشان دهنده این بود که مدل های نشان داده شده، به عنوان بهترین مدل برای پیش بینی مقدار NO_x می باشد. مطابق

انتشار گاز NO_x

نتایج مدل سازی برای گاز گلخانه ای NO_x با پیش تیمارهای مختلف در هر سه نیروگاه و برای همه سوخت ها در جدول (۵)،

انرژی پایین تر و به نوبه‌ی آن انتشار گازهای گلخانه‌ای NOx کمتر خواهد شد (Torki-Harchegani et al., 2016; Motevali and Tabatabaei, 2017).

پیش تیمار فراصوت

شکل (۶)، تغییرات NOx برای نمونه‌های توت سیاه تازه در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز تحت پیش تیمار فراصوت را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار گاز گلخانه‌ای NOx تحت پیش تیمار فراصوت به میزان (۱۰۷۴/۳۵g) در دمای هوای ۵۰ °C و زمان پیش تیمار ۱۵ min در نیروگاه Gas Turbine و تحت سوخت Gas Oil به دست آمد. کمترین مقدار گاز گلخانه‌ای NOx (۱۳۴/۷۹g) در دمای هوای ۷۰ °C و زمان امواج فراصوت ۴۵ min در نیروگاه Gas Turbine با سوخت Natural Gas ثبت شد.

جدول (۵)، مقادیر NOx در پیش تیمارهای مایکروویو و فراصوت طی معادله‌ی درجه دوم و در پیش تیمار بلانچینگ به طور خطی و معنی‌دار (P<0.05) تغییر یافت.

پیش تیمار مایکروویو

مطابق شکل (۵)، دما و توان مایکروویو، تأثیر معنی‌داری بر مقدار NOx داشت. بالاترین مقدار تغییرات NOx به میزان ۸۰۹/۲۴ در نیروگاه Gas Turbine با سوخت نوع Gas Oil در دمای ۵۰ °C و توان مایکروویو ۹۰ W و کمترین مقدار تغییرات NOx به میزان ۱۰۶/۰۶ در نیروگاه Gas Turbine با سوخت نوع Natural Gas در دمای ۷۰ °C و توان مایکروویو ۳۶۰ W به دست آمد. این می‌تواند به علت تأثیر توان مایکروویو بالا بر افزایش دمای محصول باشد که آن منجر به تبخیر بیشتر خواهد شد. تبخیر بیشتر باعث کاهش زمان خشک شدن و در نتیجه مصرف

جدول ۵: برازش اثر سطوح مختلف دمای هوا ورودی و پیش تیمار بر مقدار NOx تولیدی از نیروگاه‌های مختلف با استفاده از سوخت‌های متفاوت

پیش تیمار مایکروویو (A: توان مایکروویو (W) و B: دمای هوا ورودی به خشک‌کن (°C))

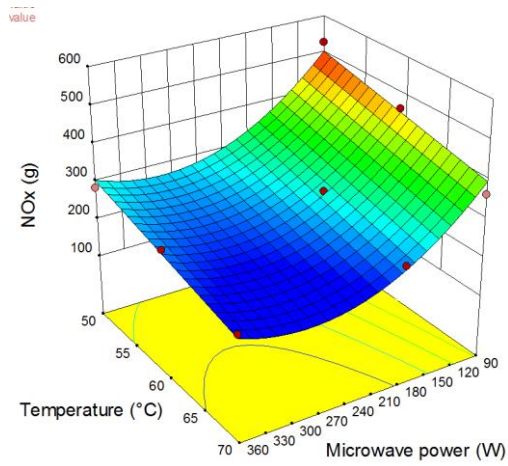
Fuel Type	(g)	Equation	R ²	Adj R ²	Pred R ²
Combine cycle- Natural Gas	NO _x	804.62831-2.679×A-4.157×B+4.68×A ²	0.9672	0.9475	0.8739
Combine cycle- Gas Oil	NO _x	1031.02-3.43×A-5.33×B+5.997×A ²	0.9672	0.9475	0.8739
Gas Turbine- Gas Oil	NO _x	1579.25-5.257×A-8.159×B+9.187E-3×A ²	0.9672	0.9475	0.8739
Gas Turbine- Natural Gas	NO _x	520.96-1.734×A-2.69×B+3.03E-3×A ²	0.9672	0.9475	0.8739
Steam Power- Heavy Oil	NO _x	687.34-2.288×A-3.55×B+3.999E-3×A ²	0.9672	0.9475	0.8739
Steam Power- Natural Gas	NO _x	807.36-2.688×A-4.18×B+4.69E-3×A ²	0.9672	0.9475	0.8739

پیش تیمار فراصوت (A: زمان پیش تیمار فراصوت (min) و B: دمای هوا ورودی به خشک‌کن (°C))

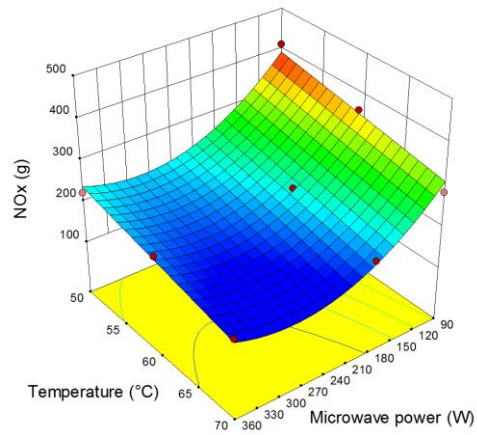
Fuel Type	(g)	Equation	R ²	Adj R ²	Pred R ²
Combine cycle- Natural Gas	NO _x	1205.05-11.41×A-12.21×B-0.135×A ² +0.205×A×B	0.9962	0.9924	0.9811
Combine cycle- Gas Oil	NO _x	1544.099-14.617×A-15.64×B-0.173×A ² +0.263×A×B	0.9962	0.9924	0.9811
Gas Turbine- Gas Oil	NO _x	2365.17-22.39×A-23.956×B-0.26506×A ² +0.403×A×B	0.9962	0.9924	0.9811
Gas Turbine- Natural Gas	NO _x	780.21-7.385×A-7.90×B-0.0871×A ² +0.132×A×B	0.9962	0.9924	0.9811
Steam Power- Heavy Oil	NO _x	1029.399-10.43×A-10.12×B-0.115×A ² +0.175×A×B	0.9962	0.9924	0.9811
Steam Power- Natural Gas	NO _x	1209.14-11.45×A-12.247×B-0.13551×A ² +0.206×A×B	0.9962	0.9924	0.9811

پیش تیمار بلانچینگ (A: دمای پیش تیمار بلانچینگ (°C) و B: دمای هوا ورودی به خشک‌کن (°C))

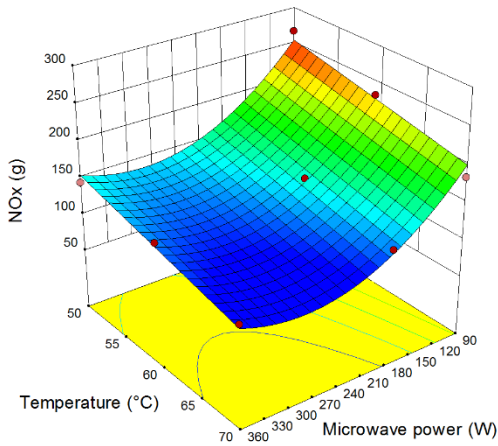
Fuel Type	(g)	Equation	R ²	Adj R ²	Pred R ²
Combine cycle- Natural Gas	NO _x	2339.28-18.589×A-17.889×B+0.134×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Combine cycle- Gas Oil	NO _x	2997.45-23.819×A-22.92×B+0.1716×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Gas Turbine- Gas Oil	NO _x	4591.33-36.48×A-35.11×B+0.26296×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Gas Turbine- Natural Gas	NO _x	1514.58-12.035×A-11.58×B+0.0867×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Steam Power- Heavy Oil	NO _x	1998.3-15.879×A-15.28×B+0.1145×A×B	0.9982	0.9972	0.9934
Steam Power- Natural Gas	NO _x	2347.2-18.65×A-17.949×B+0.134×A×B	0.9982	0.9972	0.9934



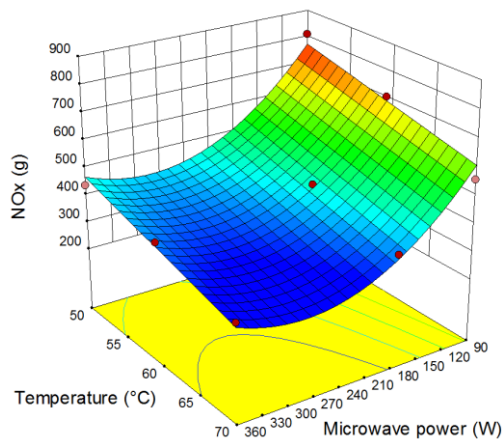
Combine cycle- Gas Oil (الف)



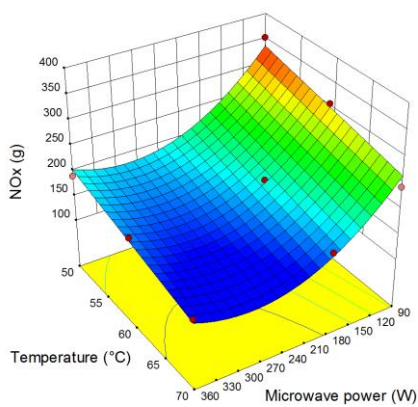
Combine cycle- Natural Gas (ب)



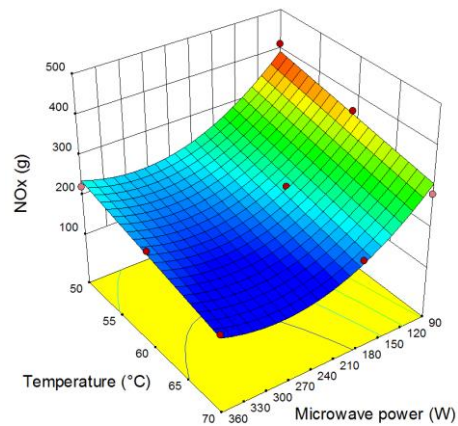
Gas Turbine- Gas Oil (ج)



Gas Turbine- Natural Gas (د)

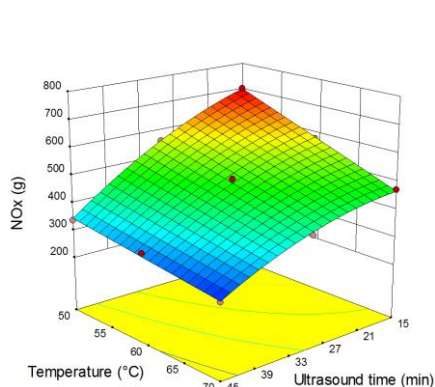


Steam Power- Heavy Oil (و)

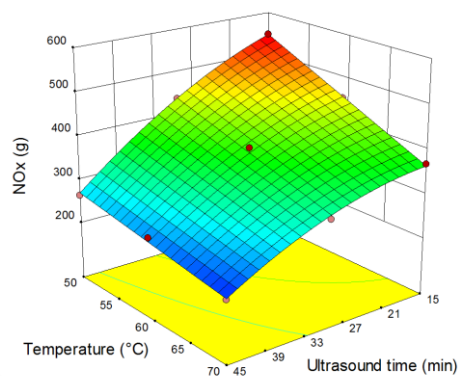


Steam Power- Natural Gas (ز)

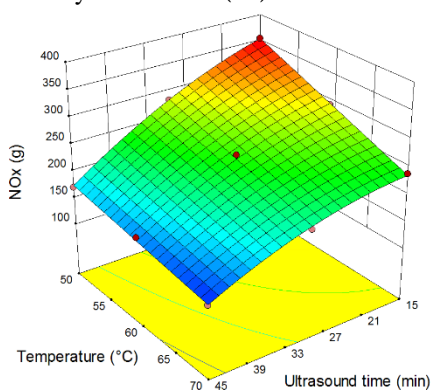
شکل ۵: شکل سه بعدی برای اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو بر میزان تولید NOx در نیروگاه های مختلف برای خشک کردن توت سیاه در خشک کن ترکیبی هوای گرم - مادون قرمز تحت پیش تیمار مایکروویو



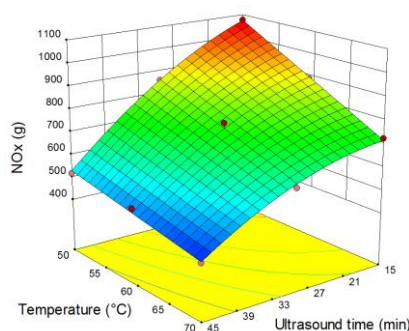
Combine cycle- Gas Oil (الف)



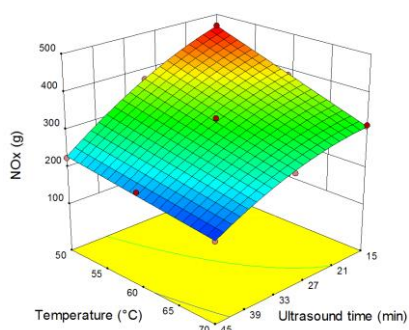
Combine cycle- Natural Gas (ب)



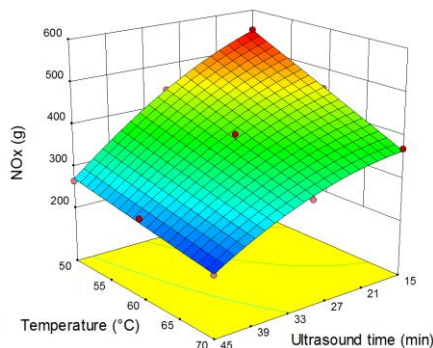
Gas Turbine- Natural Gas (ج)



Gas Turbine- Gas Oil (د)



Steam Power- Heavy Oil (ه)



Steam Power- Natural Gas (و)

شکل ۶: شکل سه بعدی برای اثر متقابل دمای هوا و زمان اعمال فراصوت بر میزان تولید NOx در نیروگاه‌های مختلف برای خشک کردن توت سیاه در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز تحت پیش تیمار فراصوت

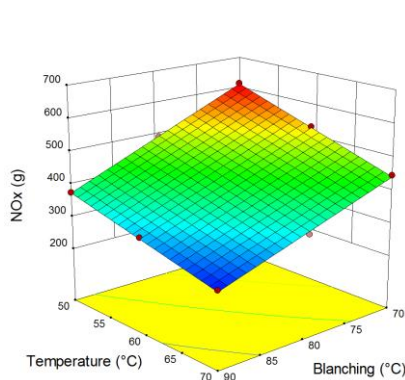
پیش تیمار بلانچینگ

شکل (۷)، تأثیر دمای هوا ورودی به خشک‌کن و دمای بلانچینگ بر میزان تغییرات کلی مقدار گاز گلخانه‌ای NOx، طی فرآیند خشک شدن، در خشک‌کن هوای گرم- مادون قرمز با پیش تیمار بلانچینگ را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که افزایش دمای هوای ورودی و افزایش دمای بلانچینگ باعث کاهش میزان NOx در نمونه‌ها شد. بالاترین مقدار گاز گلخانه‌های NOx تحت پیش تیمار بلانچینگ به میزان (۱۲۰۴/۷۶g) در دمای هوای ۵۰ °C و دمای بلانچینگ ۷۰ °C در نیروگاه Gas Turbine و تحت سوخت

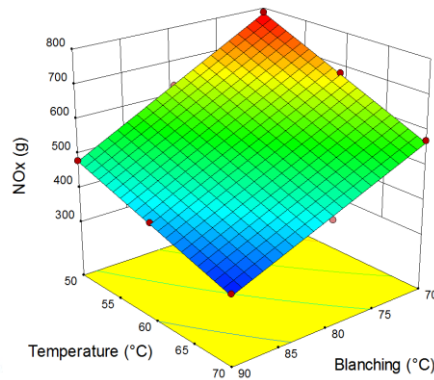
Gas Oil به دست آمد. کمترین مقدار گاز گلخانه‌ای NOx در دمای هوای ۷۰ °C و دمای بلانچینگ ۹۰ °C در نیروگاه Gas Turbine و با سوخت Natural Gas ثبت شد. نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های سایر محققین در بکارگیری پیش تیمارهای مختلف در خشک کردن سیب (Motevali et al., 2018a) مشابهت دارد. آن‌ها بیان کرده‌اند که استفاده از پیش تیمارهای مختلف می‌تواند مانع تشکیل لایه سخت در هنگام خشک شدن لایه‌های سیب طی فرآیند خشک کردن گردد که این امر منجر به خروج سریعتر رطوبت از محصول خواهد شد. به دنبال

یافته و میزان گازهای گلخانه‌ای تولیدی در اثر سوختن انرژی فسیلی در نیروگاه‌ها کاهش خواهد یافت.

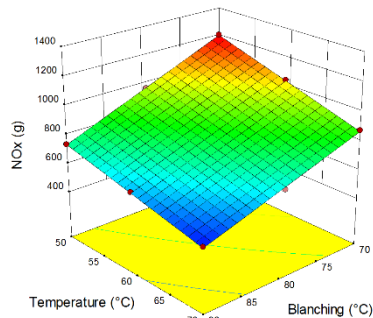
این امر میزان انرژی مصرفی و انرژی مخصوص مورد نیاز در طول فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد. به دنبال کاهش مصرف انرژی در بخش خشک کردن، میزان مصرف سوخت در نیروگاه کاهش



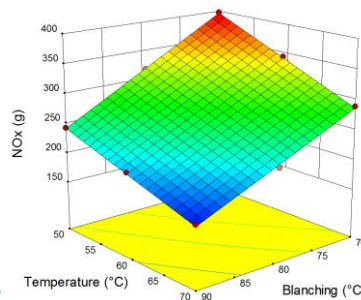
Combine cycle- Gas Oil (الف)



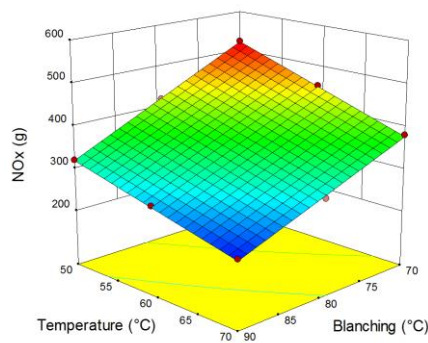
Steam Combine cycle- Natural Gas (ب)



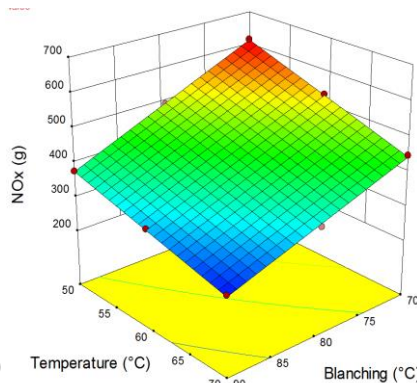
Gas Turbine- Gas Oil (ج)



Gas Turbine- Natural Gas (د)



Steam Power- Heavy Oil (و)



Steam Power- Natural Gas (ز)

شکل ۷: شکل سه بعدی برای اثر متقابل دمای هوا و دمای بلانچینگ بر میزان تولید NOx در نیروگاه‌های مختلف برای خشک کردن توت سیاه در خشک کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز تحت پیش تیمار بلانچینگ

گلخانه‌ای حاصله از خشک کن ترکیبی هوای گرم- مادون قرمز با پیش تیمار مختلف توسط تابع مطلوبیت با دقت بالای ۰/۹۹۲ به دست آمد. در این پژوهش، شرایط بهینه‌ای بر اساس کمینه مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای برای پیش تیمار میکروویو در نیروگاه Steam با سوخت Natural Gas (توان میکروویو ۲۵۵/۰۳W و دمای هوای ورودی ۶۴/۳۳ °C)، در نیروگاه Steam با سوخت Heavy Oil (توان میکروویو ۲۵۷/۴۰W و دمای هوای ورودی °C

بهینه‌سازی

با به کارگیری تابع مطلوبیت، توان میکروویو ۳۴۹/۷۰ W (با دمای هوای ۶۹/۸۰ °C)، زمان فراصوت ۴۵ min (با دمای هوای °C ۷۰) و دمای بلانچینگ ۹۰ °C (با دمای هوای °C ۷۰) به عنوان شرایط بهینه برای حداقل انرژی مصرفی ویژه با دقت بالای ۰/۹۹ به دست آمد.

مطابق جدول (۷)، شرایط بهینه برای حداقل انتشار گازهای

نیروگاه ۴۳/۵۸min و دمای هوای ورودی °C ۵۲/۶۵)، نیروگاه Combined-cycle با سوخت Gas oil (زمان فراصوت ۴۵min و دمای هوای ورودی °C ۷۰) به دست آمدند. همچنین شرایط بهینه‌ای بر اساس کمینه مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای برای پیش تیمار بلانچینگ در نیروگاه Steam با سوخت Natural Gas (دمای بلانچینگ °C ۸۹/۹۴ و دمای هوای ورودی °C ۶۹/۸۷)، در نیروگاه Steam با سوخت Heavy Oil (دمای بلانچینگ °C ۸۹/۹۳ و دمای هوای ورودی °C ۶۹/۸۴)، نیروگاه Gas-turbine با سوخت Natural Gas (دمای بلانچینگ °C ۸۹/۹۴ و دمای هوای ورودی °C ۶۹/۸۷)، نیروگاه Gas-turbine با سوخت Gas oil (دمای بلانچینگ °C ۸۹/۹۱ و دمای هوای ورودی °C ۶۹/۵۶)، نیروگاه Combined-cycle با سوخت Natural Gas (دمای بلانچینگ °C ۵۱/۱۱)، نیروگاه Combined-cycle با سوخت Gas oil (دمای بلانچینگ °C ۸۹/۸۹ و دمای هوای ورودی °C ۶۹/۶۵) به دست آمدند.

نیروگاه Gas-turbine با سوخت Natural Gas (توان مایکروویو ۲۹۸/۵۵W و دمای هوای ورودی °C ۶۷/۳۴)، نیروگاه Gas-turbine با سوخت Gas oil (توان مایکروویو ۲۸۶/۴۷W و دمای هوای ورودی °C ۶۵/۱۱)، نیروگاه Combined-cycle با سوخت Natural Gas (توان مایکروویو ۳۱۹/۰۶W و دمای هوای ورودی °C ۶۶/۴۶)، نیروگاه Combined-cycle با سوخت Gas oil (توان مایکروویو ۲۹۶/۹۶W و دمای هوای ورودی °C ۶۳/۸۴) به دست آمدند. شرایط بهینه‌ای بر اساس کمینه مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای برای پیش تیمار فراصوت در نیروگاه Steam با سوخت Natural Gas (زمان فراصوت ۴۵min و دمای هوای ورودی °C ۷۰)، در نیروگاه Steam با سوخت Heavy Oil (زمان فراصوت ۲۷/۱۹min و دمای هوای ورودی °C ۶۸/۳۸)، نیروگاه Gas-turbine با سوخت Natural Gas (زمان فراصوت ۴۵min و دمای هوای ورودی °C ۷۰)، نیروگاه Gas-turbine با سوخت Gas oil (زمان فراصوت ۴۵min و دمای هوای ورودی °C ۷۰)، نیروگاه Combined-cycle با سوخت Natural Gas (زمان فراصوت

جدول ۶. نقطه بهینه پیشنهادی برای انرژی مصرفی ویژه خشک کردن توت سیاه با استفاده از پیش تیمارهای مختلف

Microwave Pretreatment				Ultrasound Pretreatment				Blanching Pretreatment			
Power (W)	Temp. (°C)	SEC (kWh/kg)	Desirability	Time (min)	Temp. (°C)	SEC (kWh/kg)	Desirability	Temp. (°C)	Temp. (°C)	SEC (kWh/kg)	Desirability
۳۴۹/۷۰	۶۹/۸۰	۵۰/۹۰	۱	۴۵	۷۰	۷۱/۴۴	۰/۹۹۶	۹۰	۷۰	۸۷/۴۹	۰/۹۹۹

جدول ۷. نقطه بهینه پیشنهادی برای انتشار گازهای گلخانه‌ای طی خشک کردن توت سیاه با استفاده از پیش تیمارهای مختلف

Pretreatment	Power House Type	Fuel Type	Microwave power (W)	Temperature (°C)	CO2 (g)	NOx (g)	Desirability
Microwave	Steam	Natural Gas	۲۵۵/۰۳	۶۴/۳۳	۳۴۱۷۶/۴۲	۱۵۹/۰۶	۱
		Heavy Oil	۲۵۷/۴۰	۶۶/۶۴	۵۱۵۱۷/۱۲	۱۲۶/۶۶	۱
	Gas-turbine	Natural Gas	۲۹۸/۵۵	۶۷/۳۴	۳۷۶۹۷/۸۷	۹۲/۰۸	۱
		Gas oil	۲۸۶/۴۷	۶۵/۱۱	۵۳۵۶۸/۱۲	۲۹۵/۹۵	۱
	Combined-cycle	Natural Gas	۳۱۹/۰۶	۶۶/۴۶	۲۲۹۱۵/۶۴	۱۵۰/۲۳	۱
		Gas oil	۲۹۶/۹۶	۶۳/۸۴	۳۳۰۱۴/۰۴	۲۰۰/۶۳	۱
Ultrasound	Power House Type	Fuel Type	Ultrasound time (min)	Temperature (°C)	CO2 (g)	NOx (g)	Desirability
	Heavy Oil	۲۷/۱۹	۶۸/۳۹	۶۷۷۶۰/۰۱	۱۶۶/۵۹	۱	
	Gas-turbine	Natural Gas	۴۵	۷۰	۵۵۸۶۷/۴۵	۱۳۶/۴۵	۰/۹۹۲
		Gas oil	۴۵	۷۰	۷۴۸۷۰/۹۵	۴۱۳/۶۵	۰/۹۹۲
	Combined-cycle	Natural Gas	۴۳/۵۸	۵۲/۶۵	۴۲۷۱۳/۶۰	۲۸۰/۰۱	۱
		Gas oil	۴۵	۷۰	۴۴۴۳۶/۷۷	۲۷۰/۰۵	۰/۹۹۲
	Blanching	Power House Type	Fuel Type	Blanching (°C)	Temperature (°C)	CO2 (g)	NOx (g)
Steam							
		Heavy Oil	۸۹/۹۳	۶۹/۸۴	۹۰۲۲۱/۴۹	۲۲۱/۸۱	۱
Gas-turbine		Natural Gas	۸۹/۹۴	۶۹/۸۷	۶۸۷۶۵/۳۹	۱۶۷/۹۶	۱
		Gas oil	۸۹/۹۱	۶۹/۵۶	۹۲۹۱۰/۹۲	۵۱۳/۳۲	۱
Combined-cycle		Natural Gas	۷۴/۸۵	۵۱/۱۱	۸۳۳۱۳/۷۳	۵۴۶/۱۷	۱
		Gas oil	۸۹/۸۹	۶۹/۶۵	۵۵۰۶۴/۶۵	۳۳۴/۶۴	۱

(g ۱۰۶/۰۶) است، درحالی که بالاترین مقدار گازهای گلخانه‌ای CO_2 (۲۱۸۰۶۳/۸۵g) و NO_x (۱۲۰۴/۷۶g) متعلق به پیش تیمار بلانچینگ بود.

۴- با توجه به نتایج به دست آمده با افزایش توان مایکروویو، زمان اعمال توان فراصوت، دمای بلانچینگ و درنهایت دمای خشک کن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (NO_x و CO_2) کاهش پیدا می‌کند. بنابراین کمترین مقدار انتشار گاز گلخانه‌ای در بالاترین توان مایکروویو، زمان فراصوت، دمای بلانچینگ و دمای هوای ورودی به خشک کن به دست آمد.

۵- شرایط بهینه جهت کمترین انرژی مصرفی ویژه، در توان مایکروویو ۳۴۹/۷ W و دمای هوای ورودی $69/80^{\circ}C$ برای پیش تیمار مایکروویو، زمان فراصوت ۴۵ min و دمای هوای ورودی $70^{\circ}C$ برای پیش تیمار فراصوت، دمای بلانچینگ $90^{\circ}C$ و دمای هوای ورودی $70^{\circ}C$ برای پیش تیمار بلانچینگ با میانگین مطلوبیت ۹۹/۸٪ بدست آمد.

نتیجه گیری

در این پژوهش، مقدار انرژی مصرفی ویژه و انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز با سه پیش تیمار (مایکروویو، بلانچینگ و فراصوت) برای توت سیاه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر گزارش شد:

۱- در خشک کردن توت سیاه، کمترین مقدار انرژی مصرفی به میزان ۵۵/۵۳ kWh/kg در پیش تیمار مایکروویو اتفاق افتاد.

۲- در خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز، با افزایش زمان توان فراصوت، توان مایکروویو و دمای بلانچینگ میزان انرژی مصرفی ویژه کاهش یافت. همچنین افزایش دمای هوای ورودی از $40^{\circ}C$ تا $70^{\circ}C$ ، منجر به کاهش قابل توجهی در انرژی مصرفی ویژه گردید.

۳- نتایج نشان داد که پیش تیمار مایکروویو دارای کمترین مقدار گازهای گلخانه‌ای CO_2 (۲۴۹۸۷/۹۷g) و NO_x

REFERENCES

- Abbasi Suraki, A., Sharifzade, F., Tavakkol Afshari, R., Majnoun Hosseini, N. and Gazor, H.R. (2010). Optimization of processing parameters of soybean seeds dried in a constant-bed dryer using Response Surface Methodology. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12: 409-423
- Adabi, M.E., Motevali, A., Nikbakht, A.M., Khoshtaghaza, M.H. (2013). Investigation of some pretreatments on energy and specific energy consumption drying of black mulberry. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 19(1): 89-105.
- Afolabi, T.J., Tunde-Akintunde, T.Y., Adeyanju, J.A. (2015). Mathematical modeling of drying kinetics of untreated and pretreated cocoyam slices. *Journal of Food Science and Technology*, 52 (5): 2731–2740.
- Agarry, S.E. (2016). Modelling the Thin-Layer Drying Kinetics of Untreated and Blanch-Osmotic Pretreated Tomato Slices. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 4(10): 850-858.
- Akonor, P.T., Tortoe, C. (2014). Effect of blanching and osmotic pretreatment on drying kinetics, shrinkage and rehydration of chayote (sechium edule) during convective drying. *British Journal of Applied Science and Technology*, 4(8): 1215-1229.
- Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L.S., Bejar, A.K., Perez, C.T., Kechaou, N. (2017). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36: 286-300.
- Baeghali, V., Niakousari M., Ngadi MO, Eskandari M.H. (2018) Combined ultrasound and infrared assisted conductive hydro-drying of apple slices. *Drying Technology*. DOI: 10.1080/07373937.2018.1539745. (In Press).
- Behera, G., Sutar, P.P. (2018). Effect of convective, infrared and microwave heating on drying rates, mass transfer characteristics, milling quality and microstructure of steam gelatinized Paddy. *Journal of Food Process Engineering*, 41(8); e12900.
- Chayjan, R.A., Kaveh, M., Dibagar, N., Nejad, M.Z. (2107). Optimization of pistachio nut drying in a fluidized bed dryer with microwave pretreatment applying response surface methodology. *Chemical Product and Process Modeling*. 12(3): DOI: 10.1515/cppm-2016-0048
- Chen, X, Du, W., Liu. D. (2008). Response surface optimization of biocatalytic biodiesel production with acid oil. *Biochemical Engineering Journal*, 40: 423-429.
- El-Mesery, H.S., Mwithiga, G. (2015). Performance of a convective, infrared and combined infrared-convective heated conveyor-belt dryer. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5): 2721–2730.
- Ferrari, C.C., Germer, S.P.M., Aguirre, J.M. (2012). Effects of spray-drying conditions on the physicochemical properties of blackberry powder. *Drying Technology*, 30: 154–163.
- Iran Energy Balance-Sheet., 2013. Available from: URL: <http://pep.moe.gov.ir/>
- Jin, W., Mujumdar, A.S., Zhang, M., Shi, W. (2018). Novel drying techniques for spices and herbs: a Review. *Food Engineering Reviews* 10(1): 34–45
- Kantrong, H., Tansakul, A., Mittal, G.S. (2014) Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *Journal of Food Science and Technology*,

- 51(12): 3594-608.
- Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., Moghimi, M.B.F. (2018). The effect of ultrasound pre-treatment on quality, drying, and thermodynamic attributes of almond kernel under convective dryer using ANNs and ANFIS network. *Journal of Food Process Engineering*, 41(7): e12868.
- Khana, T. (1990). Encyclopedia of Medicinal Plants. Rostamkhani Publication, Tehran, Iran.
- Kumar, D., Prasad, S., Murthy, G.S. (2012). Optimization of microwave-assisted hot air drying conditions of okra using response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, 51(2): 221-32
- Liu, Y., Sun, C., Lei, Y., Yu, H., Xi, H., Duan, X. (2019). Contact ultrasound strengthened far-infrared radiation drying on pear slices: Effects on drying characteristics, microstructure, and quality attributes. *Drying Technology*, 37(6): 745-758.
- Majdi, H., Esfahani, J. A., Mohebbi, M (2019). Optimization of convective drying by response surface methodology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156: 574-584
- Manan, Z.A., Nawi, W.N.R.M., Alwi, S.R.W., Kleme, J.J. (2017). Advances in Process Integration research for CO2 emission reduction e A review. *Journal of Cleaner Production*, 167: 1-13.
- Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M. H. (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conversion and Management*. 87: 711-725.
- Motevali, A., Taghinezhad, E, Hashemi, S.J. (2018a) Investigation of energy parameters, environment and social costs for drying process. *Agriculture Mechanization and System Research*, DOI: 10.22092/ERAMS.2018.109656.1180 (In Farsi)
- Motevali, A., Hashemi, S. J. (2018). Investigating the drying parameters of Fijou fruit in a freeze dryer. *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology*. 5 (4): 699-713 (In Farsi).
- Motevali, A., Tabatabaei, S.R. (2017). A comparison between pollutants and greenhouse gas emissions from operation of different dryers based on energy consumption of power plants. *Journal of Cleaner Production*. 154: 455-461.
- Motevali, A., Hedayati, F. (2018). Investigation of change Drying Rate Constant coefficient in simulations models with various pretreatments on drying apple. *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology*, 4(3): 39-51.
- Nazari, S., Shahhoseini, O., Sohrabi-Kashani, A., Davari, S., Paydar, R., Delavar-Moghadam, Z., 2010. Experimental determination and analysis of CO₂, SO₂ and NO_x emission factors in Iran's thermal power plants. *Energy*, 35: 2992-2998.
- Noshad, M., Mohebbi, M., Shahidi, F., Mortazavi, S.A. (2013). Multi-objective optimization of osmotic-ultrasonic pretreatments and hot-air drying of quince using response surface methodology. *Food Bioprocess and Technology*, 5: 2098-2110.
- Nozad, M., Khojastehpour, M., Tabasizadeh, M., Azizi, M., Ashtiani, S-H.M., Salarikia, A. (2016). Characterization of hot-air drying and infrared drying of spearmint (*Mentha spicata* L.) leaves. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(3): 466-473.
- Pandey, O.P., Mishra, BK., Misra, A. (2018). Comparative study of green peas using with blanching & without blanching techniques. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.10.002>
- Romero, C.A. J., Byron, D., Yépez. V. (2015). Ultrasound as pretreatment to convective drying of Andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth). *Ultrasonics Sonochemistry*, 22: 205-210.
- Sahin, M., Doymaz, I. (2017). Estimation of cauliflower mass transfer parameters during convective drying. *Heat and Mass Transfer*, 53(2): 507-517.
- Salarikia, A., Ashtiani, S.H.M., Golzarian, M.R. (2017). Comparison of drying characteristics and quality of peppermint leaves using different drying methods. *Journal of Food Processing and Preservation*. 41(3): e12930.
- Saxena A., Maity, T., Raju, P.S., Bawa, A.S. (2015). Optimization of pretreatment and evaluation of quality of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) bulb crisps developed using combination drying. *Food and Bioprocess Processing*, 95: 106-117
- Shi, Q., Zheng, Y., Zhao, Y. (2014). Optimization of combined heat pump and microwave drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38: 2090-2098
- Silva, E.S.D., Brandão, S.C.R., Silva, A.L.D., Silva, J.H.F.D., Coêlho, A.C.D., Azoubel, P.M. (2019). Ultrasound-assisted vacuum drying of nectarine. *Journal of Food Engineering*, 246: 119-124.
- Sledz, M., Wiktor, A., Rybak, K., Nowacka, M., Witrowa-Rajchert, D. (2016). The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves. *Applied Acoustics*, 103: 148-156.
- Tavanir Company. Statistical reports of electric power industry in Iran for 1968- 2008. Tehran: Information and Statistical Department. See also <http://www.Tavanir.org.ir/latin/Iran'spowerIndustryannualreports/statisticalpublications>.
- Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Pirbalouti, A.G., Sadeghi, M. (2016). Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58: 407-418.
- Wang, G., Deng, Y., Xu, X., He, X., Zhao, Y., Zou, Y.,

Liu, Z., Yue, J. (2016). Optimization of air jet impingement drying of okara using response surface methodology. *Food Control*, 59: 743-749.

Yang, Z.H., Huang, J., Zeng, G.M., Ruan, M., Zhou, C.S., Li, L., Rong, Z.G. (2009). Optimization of

flocculation conditions for kaolin suspension using the composite flocculant of MBFGA1 and PAC by response surface methodology. *Bioresource Technology*, 100: 4233-4239.