بهینه سازی مصرف انرژی در خشک شدن تفاله چغندرقند به روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک

مریم نقی پور[۱]،محمد حسین آق خانی[۲]، عباس روحانی*[۳]، خلیل بهزاد[٤]

۱. دکترای مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد (naghipoor.maryam@yahoo.com)
۲. استاد گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد
۳. دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد
۴. استادیار گروه صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

خشک کردن تفاله چغندرقند یکی از مراحل پرمصرف انرژی در این صنعت است. با توجه به اهمیت میزان مصرف انرژی در صنایع و اثر آن بر هزینه تولید و اثرات منفی زیست محیطی، در این مطالعه اثر ضخامت خلال در محدوده ۳تا٦ میلی متر، زاویه برش بین ۰ تا ۹۰ درجه و زمان پیش گرمایش در زمان بین ۳ تا ۱۵ دقیقه بر مصرف انرژی طی خشک شدن بررسی شد. بدین منظور از روش سطح پاسخ در قالب طرح باکس بنکن برای طراحی آزمایشات و مدلسازی فرآیند استفاده شد. نتایج نشان داد مدل درجه دوم با بازده ۹۸درصد در پیش بینی مصرف انرژی بر اساس متغیرهای مورد مطالعه نسبت به سایر مدل ها بهتر است. نتایج نشان داد ضخامت و زاویه برش خلال بر انرژی مصرفی اثرگذار است ($P\leq0.05$). با بهینه یابی مدل با الگوریتم ژنتیک، بهترین شرایط به منظور کاهش مصرف انرژی، تهیه خلال هایی با ضخامت ۳ میلی متر با زاویه برش صفر درجه و اعمال پیش گرمایش به مدت ۳/۵ دقیقه بدست آمد که با استفاده از این روش مصرف انرژی به ۳/۹ کیلووات ساعت کاهش می یابد.

کلمات کلیدی:
انرژی، تفاله چغندرقند، خشک کردن، سطح پاسخ، مدلسازی
***عباس روحانی**

بهینه سازی مصرف انرژی در خشک شدن تفاله چغندرقند به روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک

مقدمه

با توجه به اینکه صنعت قند از صنایع پرمصرف انرژی است تلاش در جهت بهینه شدن مصرف انرژی در مراحل مختلف تولید ضروری است. خشک کردن تفاله یکی از مراحل نهایی در صنعت قند است که می تواند تا بیش از یک سوم انرژی مصرفی در فرآیند تولید قند را به خود اختصاص دهد [۱۳]. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش تقاضا برای پالپ خشک شده چغندر قند، تلاش‌هایی برای بهبود فرآیند خشک کردن و کاهش انرژی در این مرحله انجام شده است. خلال‌هایی که از آن‌ها قند استخراج می‌شود به صورت تفاله آبدار حاوی۹۳٪ آب یا بعبارت دیگر ۷٪ ماده خشک می‌باشد [۱]. بنابراین با عمل پرس، آب آن تا حد امکان گرفته شده تا برای خشک کردن آماده شود. خشک کردن تفاله باعث سهولت در حمل نقل و افزایش قابلیت نگهداری آن‌ها می‌شود. رطوبت مطلوب برای تفاله خشک ۱۰٪ است [۵]. انواع خشک کن‌ها شامل بستر سیال[1]، پنوماتیک، نواری و دوار است. فرایند خشک کردن با انتقال رطوبت از بافت داخلی یک محصول اتفاق می افتد و تفات در خشک شدن محصولات مخلف به دلیل بافت داخلی متفاوت آن هاست. چغندر قند ساختار ناهمگن دارد از آنجا که خلال‌ها در جهت مختلف برش می خورند خلال هایی با بافت متفاوت ایجاد می شود که این می تواند در خروج روطوبت اثر گذار باشد. مطالعات نشان داده است روش برش محصولات در مرحله آماده سازی برای خشک شدن، بر انتقال رطوبت اثرگذار است [٤،٦]. مطالعات متعددی در زمینه خشک کردن تفاله چغندر قند انجام شده است که به بررسی اثر تیمارها و پارامترهای مختلفی بر خشک کردن پرداخته است. در مطالعه‌ای برای خشک کردن تفاله چغندرقند بازگشت مجدد گازهای خروجی از خشک کن به داخل خشک کن پیشنهاد و بررسی شد. نتایج نشان داد استفاده از این روش مصرف سوخت را تا ٦٪ کاهش داده و باعث کاهش انرژی مصرفی در این مرحله می‌شود [۱۲]. همچنین مطالعاتی در زمینه استفاده از بخار داغ[2] برای خشک کردن تفاله به جای هوای داغ انجام شده است. در این مطالعات مزیت استفاده از این روش، کاهش مصرف انرژی و اثرات محیطی، افزایش بازده و کیفیت تفاله خشک، کاهش ریسک انفجار و آتش سوزی در زمان خشک کردن تفاله و افزایش حفظ مواد آلی تفاله نامبرده شده است [۸،۱۱]. در مطالعه‌ای خشک کردن لایه نازک تفاله به دو روش هوای داغ و بخار داغ مقایسه و اثر آن بر نرخ خشک شدن و کیفیت محصول بررسی شد. بدین منظور از بخار فوق داغ با دمای ۱۳۰تا۱۵۰ درجه سلسیوس و هوای داغ با دمای ٤٠ تا ۱۰۵ درجه سلسیوس برای خشک کردن تفاله استفاده شد. نتایج نشان داد خشک کردن لایه نازک تفاله برای ماده خشک از ۲۰٪ تا ۹۰٪ با دو روش هوای داغ و بخار داغ امکان پذیر است و زمان خشک شدن به ترتیب ٦-۲/۵ دقیقه و ۱۵-۱۰ دقیقه بدست آمد. با استفاده از هوای داغ رنگ تفاله خشک تغییر نکرد در حالی که با استفاده از بخار داغ بعد از رسیدن ماده خشک به ۸۰٪ رنگ تفاله‌ها زرد می‌شود. همچنین قابلیت نگهداری آب در تفاله خشک شده حاصل از هر دو روش یکسان بود [۷]. در مطالعه‌ای دیگر دمای مناسب برای خشک کردن تفاله چغندر به منظور حفظ کیفیت آن بررسی شد. در این مطالعه از خشک کن هوای داغ در ٦ دمای مختلف از ۵۰ تا ۱۰۰ درجه استفاده شد. نتایج نشان داد خشک شدن تفاله در دمای ۸۰ درجه سلسیوس کیفیت بالاتری از لحاظ رنگ و بو ایجاد می‌کند [۲]. در مطالعه‌ای فرآیند خشک شدن تفاله تحت پیش تیمار حرارتی و الکتریکی ضربانی بررسی و مقایسه شد. در این مطالعه خلال‌هایی که به دو روش میدان الکتریکی ضربانی قوی (۳kV، ۸μF و ۲۰ ضربه) و حرارتی در دمای ۸۰ درجه

[1]Fluidized bed
[2]Superheated steam

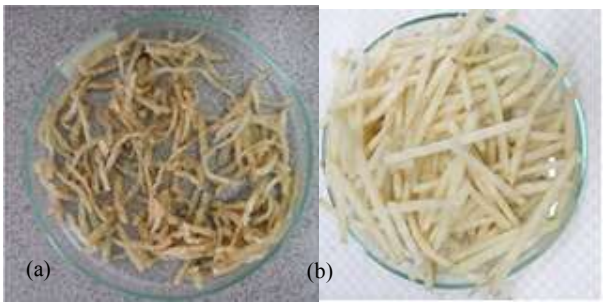
سلسیوس در مدت ۱۵ دقیقه تیمار شدند؛ پس از استخراج و پرس خشک شدند. نتایج نشان داد سرعت خشک شدن تفاله در نمونه‌های تیمار شده با میدان الکتریکی به دلیل حفظ شکل فیزیکی خلال و افزایش روزنه‌های ایجاد شده در بافت و سلول چغندر در مقایسه با نمونه‌های تیمار شده با حرارت به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است [۳]. همچنین پارامترهای فرآیند خشک شدن تفاله چغندرقند را با استفاده از دو روش بخار داغ و هوای داغ در سه دمای ۱۳۰، ۱۵۷ و۱۸۳ درجه سلسیوس در سه جریان۰/۲٤، ۰/۳۲ و ۰/۳۷ متر بر ثانیه بررسی شده است [١٤].

روش سطح پاسخ یکی از راه های بهینه یابی و بررسی فرایندهاست که میتواند با کاهش تعداد آزمایشات با دقت بالایی فرایندها را مدلسازی نماید. این روش در صنایع مختلف به ویژه صنایع غذایی که همواره تلاش می‌شود تا سیستم‌ها بهبود یافته و بازده تولید بدون افزایش هزینه‌ها افزایش یابد بسیار کاربردی است. با توجه به کارایی روش سطح پاسخ در تحلیل فرآیندهای پیچیده، این روش برای بررسی و مطالعه مصرف انرژی در مرحله خشک کردن تفاله خشک استفاده شد. الگوریتم ژنتیک یکی از ابزارهای پرقدرت در بهینه سازی فرایندهاست با توجه به توانایی این روش در مطالعاتی در زمینه تولید قند از این روش استفاده شده است. در مطالعه ای برای پیش بینی محتوای ساکارز چغندر قند از الگوریتم ژنتیک استفاده شد [۹]. همچنین مصرف انرژی در تولید چغندر قند در شهر کرمانشاه را با الگوریتم ژنتیک بهینه‌یابی شد [۱۰]..

هدف از این مطالعه بررسی اثر ضخامت، جهت برش و زمان پیش گرمایش بر میزان مصرف انرژی طی خشک شدن تفاله چغندرقند است که برای این منظور طراحی آزمایشات و مدلسازی فرایند از روش سطح پاسخ می شود.

مواد و روش ها

برای آنجام آزمایشات، چغندرقند پس از انتقال از مزرعه دانشگاه فردوسی در سرخانه با دمای ٤ درجه سانتیگراد نگهداری شد. برای تهیه خلال چغندرهایی با وزن تقریبی ۵۰۰ گرم انتخاب شدند. به منظور ایجاد یکنواختی در تهیه خلال قسمت میانی چغندرها جدا و پوست گیری شد. خلال‌ها با استفاده از دستگاه برش دستی با قابلیت تنظیم ضخامت تهیه شد (شکل۱-a). با توجه به اسانداردهای موجود ضخامت خلال ۳ تا ٦ میلی متر تعیین شد [۵]. به منظور بررسی اثر بافت داخلی خلال ها بر انرژی مصرفی طی خشک شدن، زاویه تهیه خلال بین صفر(جهت طولی) و ۹۰ درجه (جهت عرضی) و زمان پیش گرمایش بین ۳ تا ۱۵ دقیقه تعیین شد. پس از ایجاد خلال ها در ضخامت و جهت مورد نظر، پیش گرمایش خلال طبق روش رایج در صنعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد انجام شد. برای این مرحله ۱۳۰ گرم خلال در ۲٦۰ گرم آب مقطر در بن ماری قرار گرفت. پس از پایان پیش گرمایش، استخراج قند با قرار دادن مجدد خلال‌ها در ۲٦۰ گرم آب مقطر و با قرار گرفتن در دستگاه بن ماری در دمای استاندارد ۷۳ درجه انجام شد [۵]. بریکس شربت طی زمان های مختلف با استفاده از دستگاه رفراکتومتر مدل (Atago-pal3) اندازه گیری شد و زمانی که بریکس ثابت شد و شربت به تعادل رسید خلال‌ها از شربت جدا شد. در فرآیند شربت‌گیری با خروج قند از سلول‌های خلال، آب وارد بافت سلولی می‌شود، به طوری که پس از استخراج قند حدود ۹۳ درصد وزن خلال را آب تشکیل می‌دهد. در چنین شرایطی برای خشک شدن سریع‌تر و جلوگیری از فساد تفاله‌ها لازم است خلال‌ها آبگیری و پرس شوند [۱]. در این پژوهش آبگیری از تفاله طبق روش رایج در صنعت با اعمال فشار ثابت انجام شد. بدین منظور یک پرس آزمایشگاهی با قابلیت اعمال فشار ۲ بار طراحی و ساخته شد. پس از پایان مرحله شربتگیری، خلال‌هایی که با سبد از شربت جدا شدند در محفظه پرس قرار گرفته و به مدت ۱۵ دقیقه تحت فشار، آبگیری شدند (شکل۱-b).



شکل۱- a: خلال چغندر قند b: تفاله پرس شده چغندر قند

برای خشک کردن نمونه‌ها از یک خشک کن آزمایشگاهی مدل Heraeus مجهز به کنترل کننده دما استفاده شد. یک ساعت قبل از قرار دادن نمونه‌ها در آون دمای آون روی ۱۰۵ درجه سلسیوس تنظیم شد [۳]. برای هر تیمار ۵ گرم تفاله توزین و روی ورق‌های آلومنیومی قرار گرفت. به منظور تعیین زمان خشک شدن هر تیمار هر ده دقیقه نمونه‌ها خارج و توزین می‌شد. زمانی که وزن نمونه ها ثابت شد به عنوان مدت زمان خشک شدن هر تیمار ثبت شد. با تعیین زمان خشک شدن (t) هر تیمار و مشخص بودن توان دستگاه خشک کن(P) انرژی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$W=P\times t \quad (1)$$

در این مطالعه به منظور تعیین تیمارهای آزمایشی از روش سطح پاسخ در قالب طرح باکس بنکن استفاده شد. برای این هدف ابتدا متغیرها کد بندی شد (جدول ۱).

جدول ۱- کدبندی و سطوح هر یک از متغیرهای مورد مطالعه

متغیر	علامت	کمترین مقدار (-۱)	نقطه مرکزی (۰)	بیشترین مقدار (+۱)
ضخامت خلال (mm)	(x_1)	۳	٤/٥	٦
جهت برش چغندر(درجه)	(x_2)	صفر	٤٥	۹۰
زمان پیش گرمایش خلال (min)	(x_3)	۳	۹	۱٥

با اعمال سه تکرار در نقطه مرکزی در نرم افزار Design-Expert 10 تعداد ۱۵ آزمایش بصورت جدول ۲طراحی شد.

جدول۲- ازمایشات طراحی شده با روش سطح پاسخ

شماره آزمایش	ضخامت خلال (mm)	جهت برش (درجه)	زمان پیش گرم کن (min)	انرژی (kWh)
	x_1	x_2	x_3	
۱	٤/٥	٤٥	۹	۱/٥۲
۲	٤/٥	٤٥	۹	۱/٥۷
۳	٤/٥	۰	۱٥	۱/٤٥
٤	٦	۹۰	۹	۲/٥٦
٥	٤/٥	۹۰	۱٥	۱/۹۷
٦	۳	۹۰	۹	۱/٦۹
۷	٤/٥	۹۰	۳	۱/۹۱
۸	٦	٤٥	۱٥	۲/۰٦

۹	٤/٥	۰	۳	۱/٤۹
۱۰	۳	٤٥	۱٥	۱/٥۳
۱۱	٤/٥	٤٥	۹	۱/٥٤
۱۲	٦	٤٥	۳	۲/۰٤
۱۳	٦	۰	۹	۲/۱۲
۱٤	۳	٤٥	۳	۱/۲٦
۱٥	۳	۰	۹	۱/۱٥

بعد از انجام آزمایشات نتایج با استفاده از روش سطح پاسخ مدلسازی و تجزیه و تحلیل شد. داده ها در چهار مدل، خطی، درجه دوم، درجه دو کاهش یافته و دو جمله ای برازش شدند و بهترین مدل با توجه به کمترین مقادیر RSME، MAPE **و بیشترین مقادیر** Bias **و** EF **انتخاب شد(رابطه ۲، ۳ و ٤).**

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2 \Big/ n} \quad (۲)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \times 100 \quad (۳)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{\hat{y}}\right)^2} \quad (٤)$$

$$Bias = real\left(\exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\log\left(\frac{y_i}{\hat{y}_i}\right)\right)\right) \quad (٥)$$

در روابط فوق، y_i **و** $\hat{y}_i$ **به ترتیب مقادیر پاسخ آزمایشگاهی و پیش بینی شده توسط مدل و** n **و تعداد داده‌ها است. در این پژوهش برای بهینه‌یابی با الگوریتم ژنتیک ابتدا یک جمعیت اولیه به تعداد۵۰ کروموزوم در نظر گرفته شد که هر کروموزوم شامل ۳ ژن بود. در مرحله بعد راه حل‌های بهتر انتخاب می‌شود و به نسل آینده منتقل می‌شود. در این پژوهش از روش نخبه گرایی با نرخ ۰/۰۵ اندازه جمعیت و روش رتبه بندی و سپس از عملگر ترکیب برای ایجاد نسل تازه استفاده شد. همچنین نرخ ترکیب ۰/۸ در نظر گرفته شد و برای ایجاد عضوهای جدید نرخ عملگر جهش ۰/۲، تعداد تکرار الگوریتم ۱۰۰ برابر تعداد متغیرها به میزان ۳۰۰ مرتبه شرط توقف در نظر گرفته شد. در این پژوهش تمامی مراحل تجزیه و تحلیل نتایج و رسم نمودارها و بهینه یابی درمحیط نرم افزار** Matlab 2015a **و** 17 Minitab **انجام شد.**

نتایج و بحث

به منظور انتخاب مدل مناسب جهت پیش‌بینی انرژی مصرفی طی خشک شدن تفاله چغندر قند، مقادیر انرژی مصرفی در مدل‌های مورد مطالعه برازش شد و معیارهای خطای هر یک از مدل‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. در جدول ۳ مقادیر خطای هر یک از مدل‌ها برای هر تیغه ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل دو جمله‌ای دارای کمترین مقادیر معیارهای خطا RMSE , MAPE **و بیشترین مقادیر** Bias **و** EF **می‌باشد و این مدل در سطح ۵٪ معنی‌دار است.**

جدول ۳- ارزیابی مدل‌های مختلف برای پیش بینی مصرف انرژی در خشک شدن تفاله چغندرقند

مدل	RMSE	TSSE	MAPE (%)	Bias	EF (%)	P-value
خطي	۰/۱۲	۰/۲	٥/۲۹	۰/۹۹	۰/۸۷	۰/۰۰
عامل هاي متقابل	۰/۱	۰/۱٤	٤/۸	۰/۹۹	۰/۹۱	۰/۰۰
درجه دوم	**۰/۰٤**	**۰/۰۳**	**۱/۷۳**	**۰/۹۹**	**۰/۹۸**	**۰/۰۰**
درجه دوم کاهش یافته	۰/۰۸	۰/۰۸	۳/٦۱	۰/۹۹	۰/۹٥	۰/۰۰

با تعیین مدل سطح پاسخ مصرف انرژی در خشک شدن تفاله، تجزیه واریانس مدل‌ها انجام شد. معنی داری مدل و عدم معنی داری عامل ضعف برازش در سطح ٥٪ و همچنین ضریب تبیین۹۸/۳۸٪، بر قابلیت خوب مدل و متغیرها در پیش‌بینی انرژی مصرفی خشک شدن تفاله دلالت دارد (جدول ٤). تجزیه واریانس نشان می‌دهد که زاویه تهیه خلال و ضخامت خلال به صورت درجه دوم و متقابل بر مصرف انرژی اثر گذار است و زمان پیش‌گرم کن اثری بر انرژی مصرفی طی خشک شدن تفاله ندارد ($p<0.1$) **(جدول ٤).**

جدول ٤- تجزیه واریانس مدل درجه دوم مصرف انرژی

منبع	df	SS	MS	p-value
مدل	**۹**	**۱/٥۲**	**۰/۱٦**	**۰/۰۰**
ضخامت (x_1)	**۱**	**۰/۰۰**	**۰/۰۰**	**۰/۲٦**
زاویه برش (x_2)	**۱**	**۰/۰۱**	**۰/۰۱**	**۰/۱٥**
زمان پیش گرم کن (x_3)	**۱**	**۰/۰۰**	**۰/۰۰**	**۰/٦۷**
x_1^2	**۱**	**۰/۰۷**	**۰/۰۷**	**۰/۰۱**
x_2^2	**۱**	**۰/۰٥**	**۰/۰٥**	**۰/۰۲**
x_3^2	**۱**	**۰/۰۰**	**۰/۰۰**	**۰/۳**
x_1x_2	**۱**	**۰/۰٤**	**۰/۰٤**	**۰/۰۳**
x_1x_3	**۱**	**۰/۰۱**	**۰/۰۱**	**۰/۱٤**
x_2x_3	**۱**	**۰/۰۰**	**۰/۰۰**	**۰/٥**
خطا	**٥**	**۰/۰۲**	**۰/۰۰**	–
ضعف برازش	**۳**	**۰/۰۲**	**۰/۰۰**	**۰/۱**
خطای کاهش یافته	**۲**	**۰/۰۰**	**۰/۰۰**	–
کل	**۱٤**	**۱/٥٤**	–	–
R^2			**۹۸/۳۸**	
R^2_{adj}			**۹٥/٤٦**	

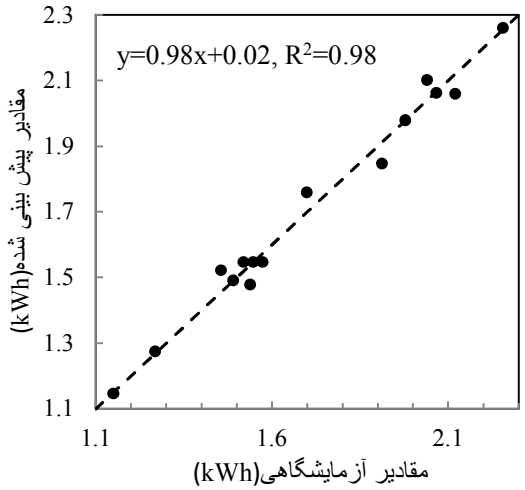
انرژی مصرفی طی فرآیند خشک شدن به زمان خشک شدن تفاله بستگی دارد. ضخامت یکی از عوامل اثر گذار بر مدت زمان خشک شدن محصول است. بنابراین اثر این عامل بر مصرف انرژی قابل پیش‌بینی است. همچنین نتایج نشان داد زاویه تهیه خلال در مصرف انرژی خشک شدن تفاله‌هایی که خلال آن‌ها با تیغه صاف تهیه شده است اثر گذار است. با توجه به اینکه خلال تا قبل از رسیدن به مرحله خشک شدن تفاله، در دو مرحله

تحت حرارت و سپس پرس قرار می‌گیرد بافت داخلی کاملاً تخریب می‌شود. عامل جهت برش را می‌توان به عنوان عاملی که بر تخریب بافت سلولی و در نتیجه انتقال حرارت در مرحله پیش‌گرمایش و انتقال رطوبت طی خشک شدن اثر گذار است؛ بررسی کرد. هر چه بافت یک محصول از حالت طبیعی خارج شده و تخریب شود به دلیل بسته شدن منافذ انتقال رطوبت کندتر انجام می‌شود [۳].

با توجه به عمال های اثرگذار مدل دو جمله‌ای مصرف انرژی طبق رابطه ٦ بدست آمد.

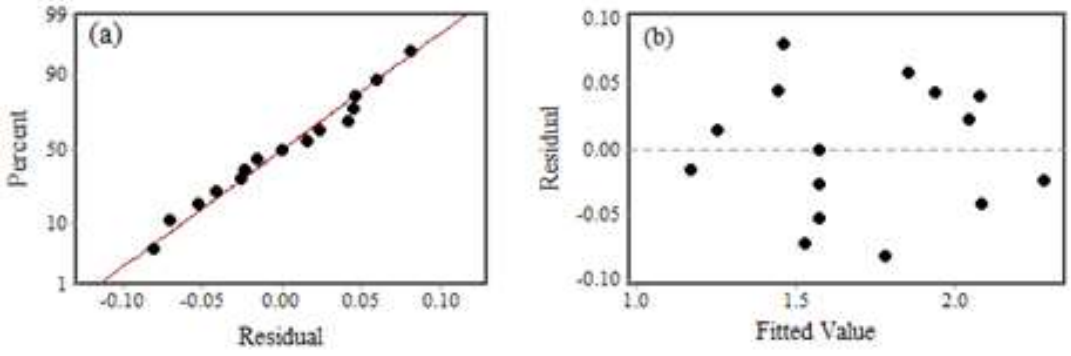
$$E_{dp} = 1.14 + 0.06x_1^2 - 0.00005x_2^2 - 0.001x_1x_2 \quad (٦)$$

با انتخاب مدل رگرسیونی درجه برای پیش بینی مصرف انرژی، توانایی مدل در پیش بینی و تفسیر فرآیند با مقایسه مقادیر پیش بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی انجام شد که نتایج این مقایسه نشان می دهد مقادیر پیش بینی شده با مدل، ۹۸ درصد با با مقادیر واقعی همخوانی دارد و این مبین توانایی مدل در پیش بینی میزان مصرف انرژی است (شکل ۲) .



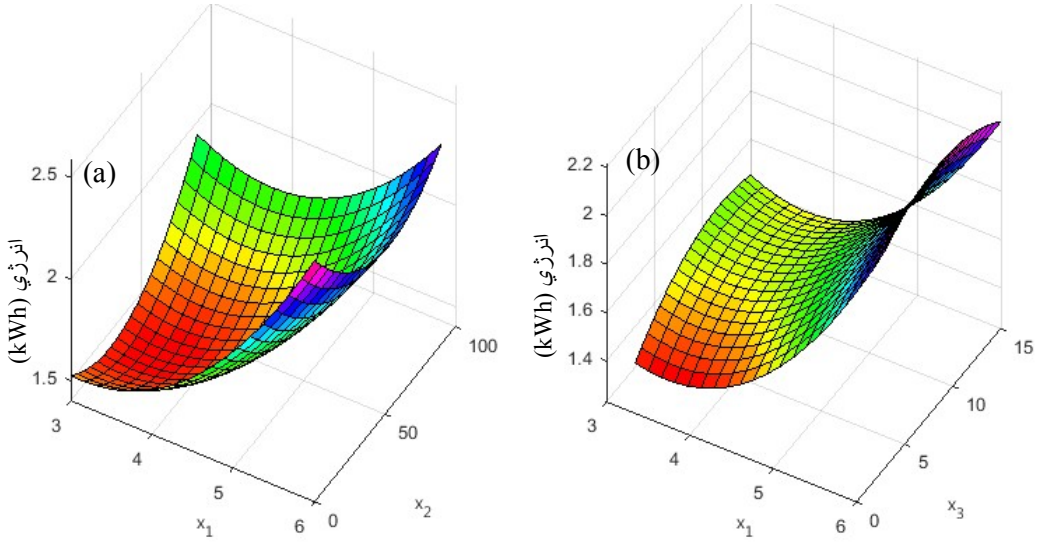
شکل۲- مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر پیش بینی شده مصرف انرژی در خشک شدن تفاله

در ادامه از تحلیل خطای باقی‌مانده‌ها و نرمال بودن باقیمانده‌ی حاصل از خطای تصادفی برای عیب شناسی مدل استفاده شد. نتایج نشان می دهد باقیمانده‌ی حاصل از خطای تصادفی به صورت نرمال توزیع شده است (شکل ۳-a). همچنین بررسی توزیع باقی‌مانده خطاهای استاندارد نشان می‌دهد که خطاها در آزمایش‌های انجام شده با یکدیگر همبستگی نداشته و مستقل هستند که این امر مبین معتبر بودن مدل است (شکل ۳-b).



شکل۳- a: پراکنش باقیمانده‌ی حاصل از خطای تصادفی b: پراکنش مقادیر خطاهای استاندارد شده

به منظور بررسی اثر هر یک از متغیرها بر میزان مصرف انرژی طی فرآیند خشک شدن تفاله نمودارهای سه بعدی مصرف انرژی بررسی شد. کمترین میزان انرژی طی خشک شدن تفاله در خلال‌های نازک که در جهت طولی تهیه شده اند؛ مصرف می‌شود و با افزایش ضخامت و زاویه تهیه خلال انرژی بیشتری طی خشک شدن تفاله مصرف می‌شود (شکل٤-a). نمودار سه بعدی، روند تغییرات افزایش مصرف انرژی را با افزایش ضخامت و زاویه تهیه خلال به خوبی نشان می‌دهد (شکل٤-a).

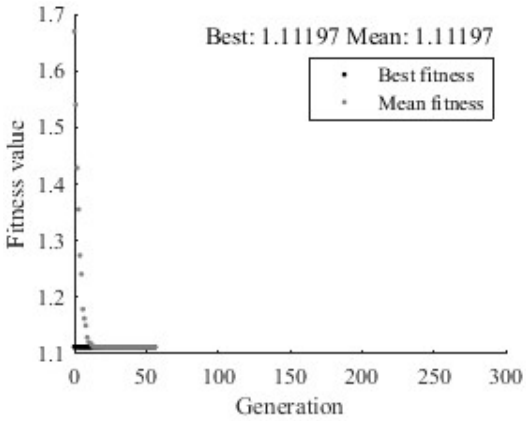


شکل٤- مصرف انرژی طی خشک کردن تفاله چغندرقند a: اثر ضخامت و جهت برش b: اثر ضخامت و زمان پیش گرمایش

کاهش میزان مصرف انرژی در خلال‌های نازک به دلیل کاهش زمان خشک شدن آن‌ها است. در وزن ثابت تفاله، در توده تفاله‌های حاصل از خلال‌های نازک، سطح بیشتری در مجاورت هوا قرار دارد و این امر باعث افزایش انتقال رطوبت سطحی می‌شود. همچنین کوتاه بودن مسیر خروج رطوبت به دلیل ضخامت کم تفاله باعث تسریع در انتقال رطوبت داخلی از بافت تفاله می‌شود که در نتیجه انرژی مصرفی کاهش می‌یابد.

بررسی اثر جهت تهیه خلال نشان می‌دهد خشک شدن تفاله‌هایی که خلال آن‌ها بصورت طولی (زاویه صفر درجه) تهیه شده به انرژی کمتری نیاز دارد. این امر نشان می دهد که بافت این خلال‌ها طی استخراج و عمل پرس کمتر آسیب دیده و عمل انتقال رطوبت و خشک شدن آن‌ها بهتر انجام می شود. نتایج مطالعات نشان داده است تخریب بیشتر بافت سلولی خلال باعث افزایش زمان خشک شدن آن می‌شود [۳].

به منظور کمینه‌سازی مصرف انرژی در فرآیند خشک شدن تفاله چغندرقند، بهینه‌یابی متغیرهای مستقل مورد مطالعه با الگوریتم ژنتیک انجام شد و پس از ۱۷ مرتبه تولید نسل، مقادیر بهینه متغیرهای مستقل تعیین شد (شکل ٥).



شکل۵- روند همگرایی در تعیین مقادیر بهینه عامل‌های مستقل برای کاهش مصرف انرژی خشک شدن تفاله

پس از اجرای الگوریتم، مقادیر بهینه هر متغیر بدست آمد که در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- مقادیر بهینه متغیرهای مستقل برای کاهش مصرف انرژی در خشک شدن تفاله

زمان پیش گرمایش (min)	زاویه برش (درجه)	ضخامت خلال (mm)	مصرف انرژی (kWh)
۳/۵	۰	۳	۳/۹

نتایج نشان می‌دهد در خلال‌های ۳ میلی‌متری در جهت طولی با کمترین زمان پیش گرمایش کمترین انرژی به میزان ۳/۹ کیلووات ساعت مصرف می‌شود. مشاهده می‌شود که کمترین میزان انرژی طی خشک شدن تفاله، در شرایطی مصرف می‌شود که خلال‌ها تحت کمترین زمان پیش گرمایش بوده‌اند. علت این امر سالم‌تر بودن ساختار بافت داخلی خلال است. همانطور که اشاره شد هر چه زمان پیش گرمایش بیشتر باشد تخریب سلولی و ساختار بافت خلال بیشتر می‌شود که این امر باعث کند شدن انتقال رطوبت و حرارت در فرآیند خشک شدن و افزایش مصرف انرژی طی این مرحله خواهد شد.

نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان می دهد نحوه تهیه خلال چغندرقند که شامل ضخامت و جهت برش است بر میزان مصرف انرژی طی خشک شدن تفاله چغندر قند اثر گذار است ($p<0.05$). مدل درجه دوم با ضریب تبیین ۹۸درصد به عنوان بهترین مدل برای پیش بینی تغییرات مصرف انرژی انتخاب شد. مصرف انرژی با افزایش ضخامت خلال و زاویه برش افزایش می یابد. روش بهینه تهیه خلال برای کاهش مصرف انرژی طی خشک شدن تفاله، تولید خلال‌هایی با ضخامت ۳میلی متر در جهت طولی با پیش گرمایش به مدت ۳/۵ دقیقه بدست آمد. به طور کلی از یافته‌های حاصل در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت به منظور کاهش انرژی مصرفی طی خشک شدن تفاله باید از روش‌هایی استفاده شود که بافت خلال آسیب کمتری ببیند. با توجه به دستاوردهای این مطالعه، با بررسی اثرات روش تهیه خلال بر سایر مراحل تولید قند می‌توان به نتایج جامع تری در نحوه تهیه خلال دست یافت.

منابع

۱. **شیخ الاسلامی، ر. ۱۳۸۲. تکنولوژی قند. مولف، تهران**
۲. **عالم زاده، ا.، گالشی، س.، حسینی، م. و تربتی نژاد، ن. ۱۳۸۷، تفاله چغندرقند بررسی و خشک کردن. شریف، ۲ (۲٤): ۹ تا ۱۲.**
۳. **مسکوکی، ع. و اشتیاقی، م. ۱۳۹۰. مقایسه اثر میدان الکتریکی پالسی و فرآیند حرارتی بر انتقال جرم در استخراج قند از چغندرقند. پژوهش‌ها علوم و صنایع غذایی ایران، ۷ (۲): ۱۵۵ تا ۱٤۵.**
٤. **نقی پورزاده ماهانی، م. و آق خانی، م. ۱۳۹۵. بررسی اثر نوع برش، بر سینتیک خشک شدن و کیفیت هویج خشک. ماشین های کشاورزی, ٦ (۱): ۲۲٤ تا ۲۳۵.**

5. Asadi, M. 2007. *Beet-sugar handbook*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.
6. Barry-Ryan, C., and O'Beirne, D. 2007. Quality and shelf-life of fresh cut carrot slices as affected by slicing method. *Journal of Food Science*, *63(5): 851-856*
7. Bernardo, A. M., Dumoulin, E. D., Lebert, A. M., Bimbenet, J. J. 1990. Drying of sugar beet fiber with hot air or superheated steam. *Drying technology*, *8(4): 767-779.*
8. Bond, J. F. 1992. Drying paper by impinging jets of superheated steam: Drying rates and thermodynamic cycles. *Drying Technol, 10(4): 1131-1134.*
9. Devos, O., and Duponchel, L. 2011. Parallel genetic algorithm co-optimization of spectral pre-processing and wavelength selection for PLS regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *107(1): 50-58.*
10. Hematian, A., Bakhtiari, A. A., Yaghubi, O., and Zarei-Shahamat, E. 2013. Optimization of energy consumption in sugar-beet production using genetic algorithm "A case study in Kermanshah province, Iran". *Int J Agron Plant Prod*, *4(6): 1351-1356*.
11. Jensen, A. S. 1992. Pressurized drying in a fluid bed with steam. In *Drying '92,* ed. A. S. Mujumdar, 1593-1602. New York, N.Y.:Hemisphere Publishing Co.
12. Tang, Z., Cenkowski, S., Muir, W. E. 2000. Dehydration of sugar-beet pulp in superheated steam and hot air. *Transactions of the ASAE*, *43*(3), 685-689.
13. Urbaniec, K., and Malczewski, j. 1997. Experimental investigations of beet pulp drying in superheated steam under pressure. *Drying technology 15:6-8.*
14. Van der Poel, P. W., Schiweck, H., and Schwartz, T. 1998. *Sugar technology. Beet and cane sugar manufacture*. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG.

Optimization of energy consumption in drying of sugar beet pulp by response surface methodology and genetic algorithm

Maryam naghipour[1], Mohammad Hosein Aghkhani[2], abbas rohani[3*] and Khalil Behzad[4]

1,2,3. Biosystems Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
4. Department of Food Sciences and Technology, , Ferdowsi University, Mashhad, Iran

Abstract

Drying sugar beet pulp is one of the most energy consuming steps in the industry. Due to the importance of energy consumption in industry and its effect on production costs and negative environmental effects, in this study the effect of slice thickness in the range of 3 to 6 mm, cutting angle between 0 to 90 degrees and preheating time between 3 to 15 was investigated on the energy consumption during drying pulp. For this purpose, the response surface method in the form of Box-Behnken design was used to design experiments and modeling the process. The results showed that the quadratic model with 98% efficiency in predicting energy consumption based on the studied variables is better than other models. The results showed that the effect of thickness and cutting angle are significant on energy consumption ($P \leq 0.05$). Optimization of the quadratic model by GA showed, the best conditions for reducing energy consumption was

obtained preparing slices at 3 mm thickness and zero degrees direction with applying preheating at 3.5 minutes. Using this method, energy consumption is reduced to 3.9 kWh.

Key words*: Drying*, **Energy, Modelling, Response surface methodology, Sugar beet pulp

*Corresponding author
E-mail: arohani@um.ac.ir