

## کواهی نامه زیرش و ارائه اثر

بدینوسیله تایید می شود مقاله زیر در سیزدهمین کنگره ملی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران پذیرفته شده است. این مقاله به صورت سخنرانی ارائه گردیده و در مجموعه مقالات لنگره چاپ شده است.

عنوان اثر: بهینه سازی مصرف انرژی در خشک شدن تعاله چغندر قند به روش سطح پانچ و الگوریتم ژنتیک

فهرست نویسندگان:

مریم تقی پور -

محمد حسین آق خانی -

عباس روحانی\* -

حلیل بزراد -



دبیر اجرایی کنگره، دکتر احمد بناکار

## بهینه سازی مصرف انرژی در خشک شدن تفاله چغندر قند به روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک

مریم نقی پور<sup>۱</sup>، محمد حسین آق خانی<sup>۲</sup>، عباس روحانی<sup>۳\*</sup>، خلیل بهزاد<sup>۴</sup>

۱. دکترای مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد ([naghipoor.maryam@yahoo.com](mailto: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 چغندر قند 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 ۳ تا ۶ 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 مدل سازی فرآیند استفاده شد. نتایج نشان داد مدل درجه دوم با بازده ۹۸ درصد 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 اثر گذار است ( $P \leq 0.05$ ). 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 چغندر قند، خشک کردن، سطح پاسخ، مدل سازی

\*عباس روحانی

## بهینه سازی مصرف انرژی در خشک شدن تفاله چغندر قند 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 سال های اخیر به دلیل افزایش تقاضا برای پالپ خشک شده چغندر قند، تلاش هایی برای بهبود فرآیند خشک کردن و کاهش انرژی در این مرحله انجام شده است. خلال هایی که از آن ها قند استخراج می شود به صورت تفاله آبدار حاوی ۹۳٪ آب یا بعبارت دیگر ۷٪ ماده خشک می باشد [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 آن ها می شود. رطوبت مطلوب برای تفاله خشک ۱۰٪ است [۵]. انواع خشک کن ها شامل بستر سیال<sup>۱</sup>، پنوماتیک، نواری و دوار است. فرآیند 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 خلال ها در جهت مختلف برش می خورند خلال هایی با بافت متفاوت ایجاد می شود که این می تواند در خروج رطوبت اثر گذار باشد. مطالعات نشان داده است روش برش محصولات در مرحله آماده سازی برای خشک شدن، بر انتقال رطوبت اثر گذار است [۴،۶]. 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 مطالعه ای برای خشک کردن تفاله چغندر قند 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 ۶٪ کاهش داده و باعث کاهش انرژی مصرفی در این مرحله می شود [۱۲]. همچنین مطالعاتی در زمینه استفاده از بخار داغ<sup>۲</sup> 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 مطالعه ای 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 ۱۳۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس و هوای داغ با دمای ۴۰ 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 ۵-۶ 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 تفاله ها زرد می شود. همچنین قابلیت نگهداری آب در تفاله خشک شده حاصل از هر دو روش یکسان بود [۷]. در مطالعه ای دیگر دمای مناسب برای خشک کردن تفاله چغندر به منظور حفظ کیفیت آن بررسی شد. در این مطالعه از خشک کن هوای داغ در ۶ 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 می کند [۲]. در مطالعه ای فرآیند خشک شدن تفاله تحت پیش تیمار حرارتی و الکتریکی ضربانی بررسی و مقایسه شد. در این مطالعه خلال هایی که به دو روش میدان الکتریکی ضربانی قوی (۳kV، ۸μF، ۲۰ ضربه) و حرارتی در دمای ۸۰ درجه سلسیوس در مدت ۱۵ دقیقه تیمار شدند؛ پس از استخراج و پرس خشک شدند. نتایج نشان داد سرعت خشک شدن تفاله در نمونه های تیمار شده با میدان الکتریکی به دلیل حفظ شکل فیزیکی خلال و افزایش روزه های ایجاد شده در بافت و سلول چغندر در مقایسه با نمونه های تیمار شده با حرارت به طور قابل ملاحظه ای بیشتر است [۳]. همچنین پارامترهای فرآیند خشک شدن تفاله چغندر قند را

<sup>1</sup>Fluidized bed

<sup>2</sup>Superheated steam

با استفاده از دو روش بخار داغ و هوای داغ در سه دمای ۱۳۰، ۱۵۷ و ۱۸۳ درجه سلسیوس در سه جریان ۰/۲۴، ۰/۳۲ و ۰/۳۷ متر بر ثانیه بررسی شده است [۱۴].

روش سطح پاسخ یکی از راه های بهینه یابی و بررسی فرایندهاست که میتواند با کاهش تعداد آزمایشات با دقت بالایی فرایندها را مدل سازی نماید. این روش در صنایع مختلف به ویژه صنایع غذایی که همواره تلاش می شود تا سیستم ها بهبود یافته و بازده تولید بدون افزایش هزینه ها 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 پر قدرت 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 بهینه یابی شد [۱۰].

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

## مواد و روش ها

برای انجام آزمایشات، چغندر قند پس از انتقال از مزرعه دانشگاه فردوسی در سرخانه با دمای ۴ 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. خلال ها با استفاده از دستگاه برش دستی با قابلیت تنظیم ضخامت تهیه شد (شکل ۱-ا). با توجه به استانداردهای موجود ضخامت خلال ۳ تا ۶ 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 ۲۶۰ گرم آب مقطر در بن ماری قرار گرفت. پس از پایان پیش گرمایش، استخراج قند با قرار دادن مجدد خلال ها در ۲۶۰ 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 خلال ها از شربت جدا شد. در فرآیند شربت گیری با خروج قند از سلول های خلال، آب وارد بافت سلولی می شود، به طوری که پس از استخراج قند حدود ۹۳ درصد وزن خلال را آب تشکیل می دهد. در چنین شرایطی برای خشک شدن سریع تر و جلوگیری از فساد تفاله ها لازم است خلال ها 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، خلال هایی که با سبذ از شربت جدا شدند در محفظه پرس قرار گرفته و به مدت ۱۵ دقیقه تحت فشار، آبگیری شدند (شکل ۱-ب).



شکل ۱- 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 آلومینیومی قرار گرفت. به منظور تعیین زمان خشک شدن هر تیمار هر ده دقیقه نمونه‌ها خارج و توزین می‌شد. زمانی که وزن نمونه‌ها 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 <sub>1</sub> )	۳	۴/۵	۶
جهت برش چغندر (درجه)	(X <sub>2</sub> )	صفر	۴۵	۹۰
زمان پیش گرمایش خلال (min)	(X <sub>3</sub> )	۳	۹	۱۵

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

جدول ۲- آزمایشات طراحی شده با روش سطح پاسخ

شماره آزمایش	ضخامت خلال (mm)			جهت برش (درجه)	زمان پیش گرم کن (min)	انرژی (kWh)
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>			
۱	۴/۵	۴۵	۹	۰	۱/۵۲	
۲	۴/۵	۴۵	۹	۹۰	۱/۵۷	
۳	۴/۵	۰	۱۵	۰	۱/۴۵	
۴	۶	۹۰	۹	۹۰	۲/۵۶	
۵	۴/۵	۹۰	۱۵	۹۰	۱/۹۷	
۶	۳	۹۰	۹	۹۰	۱/۶۹	
۷	۴/۵	۹۰	۳	۹۰	۱/۹۱	
۸	۶	۴۵	۱۵	۹۰	۲/۰۶	
۹	۴/۵	۰	۳	۹۰	۱/۴۹	
۱۰	۳	۴۵	۱۵	۹۰	۱/۵۳	
۱۱	۴/۵	۴۵	۹	۹۰	۱/۵۴	
۱۲	۶	۴۵	۳	۹۰	۲/۰۴	
۱۳	۶	۰	۹	۹۰	۲/۱۲	
۱۴	۳	۴۵	۳	۹۰	۱/۲۶	
۱۵	۳	۰	۹	۹۰	۱/۱۵	

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 ۴).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (3)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

$$Bias = \text{real} \left( \exp \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log \left( \frac{y_i}{\hat{y}_i} \right) \right) \right) \quad (5)$$

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 تعداد ۵۰ 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 نخبه‌گرایی 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 بهینه‌یابی در محیط نرم افزار Matlab 2015a و Minitab 17 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 خطای MAPE، RMSE و بیشترین مقادیر Bias و EF می‌باشد و این مدل در سطح ۵٪ معنی‌دار است.

جدول ۳- ارزیابی مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی مصرف انرژی در خشک شدن تفاله چغندر قند

مدل	RMSE	TSSE	MAPE (%)	Bias	EF (%)	P-value
خطی	۰/۱۲	۰/۲	۵/۲۹	۰/۹۹	۰/۸۷	۰/۰۰
عامل‌های متقابل	۰/۱	۰/۱۴	۴/۸	۰/۹۹	۰/۹۱	۰/۰۰
درجه دوم	۰/۰۴	۰/۰۳	۱/۷۳	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۰۰
درجه دوم کاهش یافته	۰/۰۸	۰/۰۸	۳/۶۱	۰/۹۹	۰/۹۵	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 برآزش در سطح ۵٪ و همچنین ضریب تبیین ۹۸/۳۸٪، بر قابلیت خوب مدل و متغیرها در پیش‌بینی انرژی مصرفی خشک شدن تفاله دلالت دارد (جدول ۴). 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 پیش گرم کن اثری بر انرژی مصرفی طی خشک شدن تفاله ندارد ( $p < 0.1$ ) (جدول ۴).

جدول ۴- تجزیه واریانس مدل درجه دوم مصرف انرژی

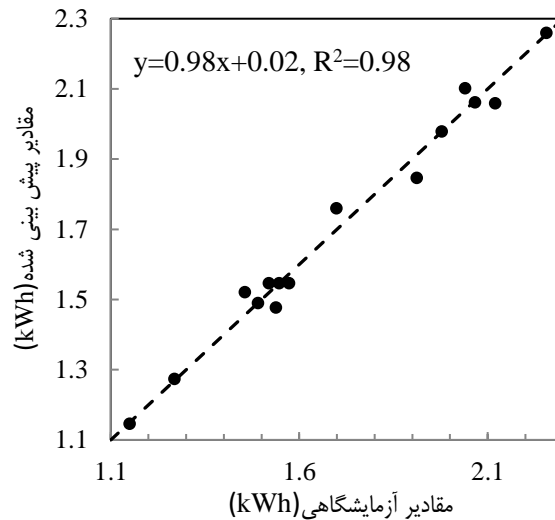
منبع	df	SS	MS	p-value
مدل	۹	۱/۵۲	۰/۱۶	۰/۰۰
ضخامت ( $x_1$ )	۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۶
زاویه برش ( $x_2$ )	۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۵
زمان پیش گرم کن ( $x_3$ )	۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۶۷
$x_1^2$	۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۱
$x_2^2$	۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲
$x_3^2$	۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳
$x_1x_2$	۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳
$x_1x_3$	۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۴
$x_2x_3$	۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۵
خطا	۵	۰/۰۲	۰/۰۰	-
ضعف برآزش	۳	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۱
خطای کاهش یافته	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	-
کل	۱۴	۱/۵۴	-	-
		۹۸/۳۸		$R^2$
		۹۵/۴۶		$R_{adj}^2$

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 پیش گرمایش 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 اثر گذار مدل دو جمله ای مصرف انرژی طبق رابطه ۶ بدست آمد.

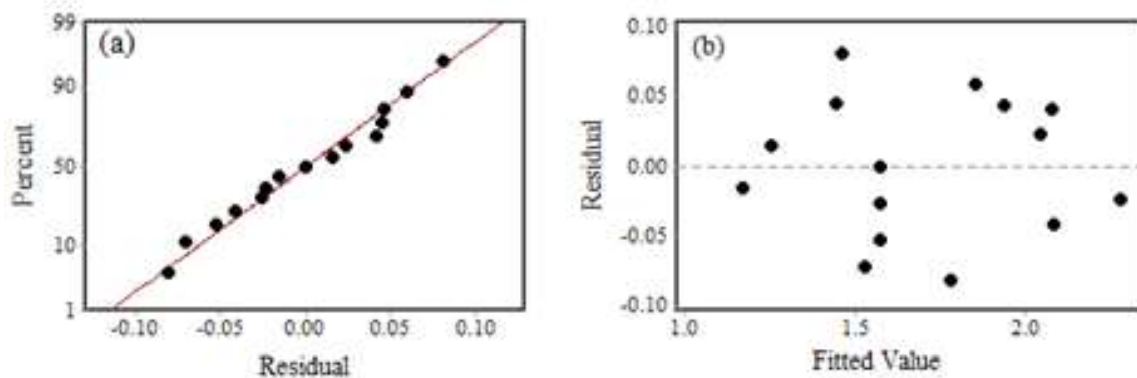
$$E_{dp} = 1.14 + 0.06x_1^2 - 0.00005x_2^2 - 0.001x_1x_2 \quad (6)$$

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 می‌دهد مقادیر پیش بینی شده با مدل، ۹۸ درصد با مقادیر واقعی همخوانی دارد و این مبین توانایی مدل در پیش بینی میزان مصرف انرژی است (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر پیش بینی شده مصرف انرژی در خشک شدن تفاله

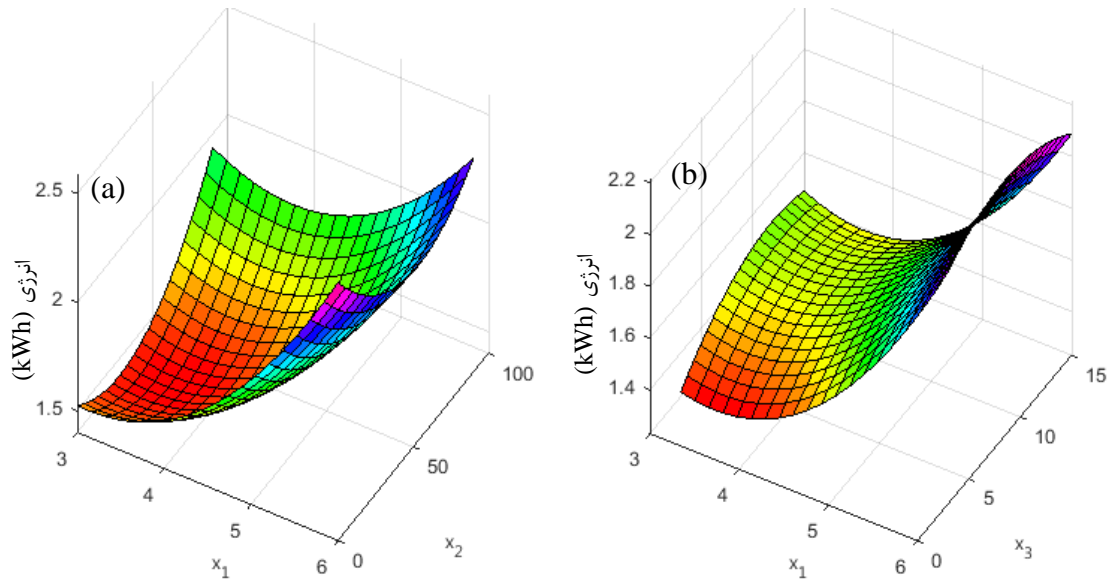
در ادامه از تحلیل خطای باقی مانده‌ها و نرمال بودن باقیمانده‌ی حاصل از خطای تصادفی برای عیب شناسی مدل استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد باقیمانده‌ی حاصل از خطای تصادفی به صورت نرمال توزیع شده است (شکل ۳-ا). همچنین بررسی توزیع باقی مانده خطاهای استاندارد نشان می‌دهد که خطاها در آزمایش‌های انجام شده با یکدیگر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



شکل ۳- ا: 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 (شکل ۴-ا). نمودار سه بعدی، روند تغییرات افزایش مصرف انرژی را با افزایش ضخامت و زاویه تهیه خلال به خوبی نشان می‌دهد (شکل ۴-ا).



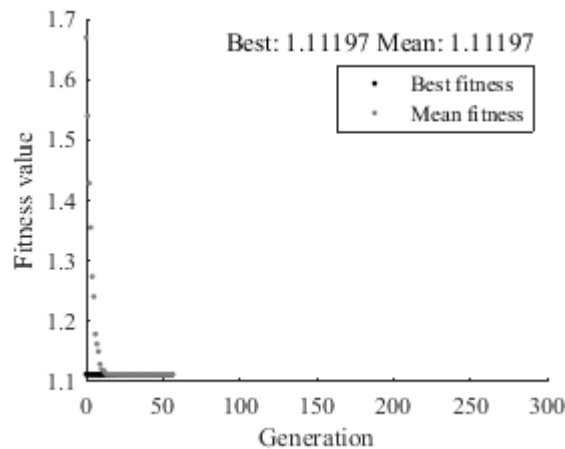


شکل ۴- مصرف انرژی طی خشک کردن تفاله چغندر قند a: اثر ضخامت و جهت برش b: اثر ضخامت و زمان پیش گرمایش

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 می‌دهد که بافت این خلال‌ها طی استخراج و عمل پرس کمتر آسیب دیده و عمل انتقال رطوبت و خشک شدن آنها بهتر انجام می‌شود. نتایج مطالعات نشان داده است تخریب بیشتر بافت سلولی خلال باعث افزایش زمان خشک شدن آنها می‌شود [۳].

به منظور کمی‌سازی مصرف انرژی در فرآیند خشک شدن تفاله چغندر قند، بهینه‌یابی متغیرهای مستقل مورد مطالعه با الگوریتم ژنتیک انجام شد و پس از ۱۷ مرتبه تولید نسل، مقادیر بهینه متغیرهای مستقل تعیین شد (شکل ۵).



شکل ۵- 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

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

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 می‌دهد نحوه تهیه خلال چغندر قند 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 ۹۸ درصد به عنوان بهترین مدل برای پیش بینی تغییرات مصرف انرژی انتخاب شد. مصرف انرژی با افزایش ضخامت خلال و زاویه برش افزایش می‌یابد. روش بهینه تهیه خلال برای کاهش مصرف انرژی طی خشک شدن تفاله، تولید خلال‌هایی با ضخامت ۳ میلی‌متر 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 جامع‌تری 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 چغندر قند بررسی و خشک کردن. شریف، ۲ (۲۴): ۹ تا ۱۲.
۳. مسکوک، ع. و اشتیاقی، م. ۱۳۹۰. مقایسه اثر میدان الکتریکی پالسی و فرآیند حرارتی بر انتقال جرم در استخراج قند از چغندر قند. پژوهش‌ها علوم و صنایع غذایی ایران، ۷ (۲): ۱۵۵ تا ۱۴۵.
۴. نقی پورزاده ماهانی، م. و آق‌خانی، م. ۱۳۹۵. بررسی اثر نوع برش، بر سینتیک خشک شدن و کیفیت هویج خشک. ماشین‌های کشاورزی، ۶ (۱): ۲۲۴ 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 naghypour<sup>1</sup>, Mohammad Hosein Aghkhani<sup>2</sup>, abbas rohani<sup>3\*</sup> and Khalil Behzad<sup>4</sup>

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