

اولین کنفرانس ملی مهندسی انرژی و نانو فناوری ایران



بهینه سازی متغیرهای مؤثر بر عملکرد خشک کن های دوار به روش سطح پاسخ

توان کیخاونی^۱، مجید ساده میری نژاد^{۲*}، مریم غیابی^۲، فائزه شه دوست فرد^۳

۱- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت و گاز، دانشگاه ایلام، ایلام

۲- دانشجوی مهندسی شیمی، دانشکده نفت و گاز، دانشگاه ایلام، ایلام

۳- دانشجوی دکتری شیمی تجزیه، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ایلام، ایلام

چکیده

خشک کردن در واحدهای صنعتی یکی از مهم ترین فرایندهای چرخه تولید فرآورده های با ارزش می باشد. به دلیل اهمیت بالای این فرایند بهینه سازی عملکرد دستگاه های خشک کن ضروری می باشد. بدین منظور تعیین اثر پارامترهای مؤثر بر خشک کردن با روش طراحی آزمایش سطح پاسخ در این تحقیق مد نظر قرار گرفته است. پارامترهای دما، دور خشک کن و شیب دستگاه بعنوان متغیر و میزان خشک کردن به عنوان تابع هدف در یک خشک کن دوار مورد بررسی شده است. مدل ریاضی برای تعیین ارتباط بین متغیرها و تابع هدف به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان دهنده مناسب بودن مدل و موقعیت آن در بهینه سازی پارامترها می باشد. نتایج نشان می دهد که میزان خشک کردن شدیداً به دما و شیب دستگاه خشک کن بستگی دارد. به طوری که با افزایش دما، کاهش دور و کاهش شیب میزان خشک کردن افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: خشک کردن، دما، شیب، روش سطح پاسخ.

۱- مقدمه

در برخی از فرایندهای شیمیایی و نیز صنایع غذایی و دارویی لازم است که رطوبت یک ماده به حد معینی کاهش یابد. لذا خشک کردن^۱ به فرایند خارج سازی رطوبت موجود در یک محلول رقیق مایع یا ماده ای جامد و رساندن رطوبت آن به

*. مجید اول مکلفات majidsadehmiri@yahoo.com

^۱. Drying

مقداری مطلوب اطلاق می‌شود. میزان خشک‌کردن بر اساس نیاز یا محدودیت‌های فیزیکی و شیمیایی ماده مزبور تعیین می‌شود. در صنایع، انواع مختلف و متعددی از خشک‌کن‌ها^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تنوع و کثرت مدل به واسطه فاکتورهای زیادی است که باید در خشک‌کردن یک جامد در نظر گرفت. یکی از انواع این خشک‌کن‌ها خشک‌کن دوار می‌باشد. خشک‌کن دوار از نوع مداوم یا پیوسته است که این نوع برای حجم‌های نسبتاً زیاد محصول مناسب می‌باشد. به دلیل پیوسته بودن ورود و خروج مواد با دیگر دستگاه‌های موجود در فرایند شیمیایی، تطابق بیشتری داشته و نیاز به ذخیره و انبار کردن مواد قبل از خشک‌کن ندارند [۱]. عملیات خشک‌کردن معمولاً در بخش‌های پایانی فرایند قرار دارد و محصول آن به طور مستقیم یا پس از دانه‌بندی وارد واحد بسته‌بندی می‌شوند. با توجه به این موضوع عملکرد بهینه دستگاه خشک‌کن باید مدنظر قرار گیرد تا علاوه بر تولید محصول باکیفیت، از لحاظ اقتصادی نیز کاهش هزینه‌ها را به دنبال داشته باشد [۲]. بنابراین در این تحقیق با بهینه کردن شرایط عملیاتی و بررسی اثرات این شرایط بر روی میزان خشک‌کردن، سعی در بهبود عملکرد این نوع خشک‌کن می‌باشد. به عبارتی لازم است که مؤثرترین عوامل موثر بر خشک‌کردن مانند دمای خشک‌کن، دور دستگاه، و شیب دستگاه به طوری تنظیم شوند که بیشترین میزان خشک شدن برای نمونه مورد نظر حاصل شود. با استفاده از روش طراحی آزمایش^۲ می‌توان تأثیر همزمان چند متغیر و برهم‌کنش بین آن‌ها را بر یک پدیده (هدف) با کمترین تعداد آزمایش و روشی کم‌هزینه بررسی نمود. پارامترهای دما، دور خشک‌کن و شیب دستگاه به عنوان متغیر و میزان خشک‌کردن به عنوان تابع هدف تعیین شده است. با استفاده از مدل به دست آمده مؤثرترین پارامترها بر میزان خشک‌کردن، برهم‌کنش بین متغیرها و میزان بهینه هر کدام از متغیرها برای به دست آوردن بالاترین میزان خشک‌کردن محاسبه شده است.

۲- روش کار

۲-۱- شرح دستگاه و روش انجام آزمایش

طرز عمل خشک‌کن‌های دوار به این صورت است که با چرخش مداوم، مواد مرطوب را بلند کرده و در معرض هوای گرمی که از داخل آن عبور می‌کند، قرار می‌دهد. این خشک‌کن‌ها به طور مورب قرار می‌گیرند تا مواد خشک ساده به آهستگی در طول آن در جهت شیب حرکت کنند. جریان هوای گرم به وسیله یک هیتر گرم شده و هم جهت با مواد حرکت می‌کند [۲]. هم چنین به وسیله یک اهرم شیب استوانه دوار قابل تنظیم می‌باشد. این دستگاه هم چنین قابلیت کالیبره کردن برای دورهای مختلف را دارا می‌باشد. مواد پس از خشک شدن وارد محفظه‌ی استوانه‌ای در انتهای آن می‌شود (شکل ۱) [۱].

روش انجام آزمایش به این ترتیب است که ابتدا ۲۰۰ گرم سویا وزن کرده و مقدار ۵۰ میلی‌لیتر آب به آن افزوده تا سویا به صورت کامل مرطوب شود. سپس دستگاه را روشن کرده و بعد از تنظیم شرایط عملیاتی، سویای مرطوب را وارد دستگاه کرده و منتظر مانده تا همه سویا به صورت کامل وارد محفظه مخصوص شود. سپس سویای خشک شده را وزن کرده و تفاوت وزن اولیه و وزن ثانویه سویا محاسبه می‌شود. تفاوت وزن نشان‌دهنده میزان آب خشک شده یا میزان خشک‌کردن می‌باشد.

^۱ . Dryer

^۲ . Design of Experiment (DOE)



شکل ۱- دستگاه مورد استفاده در انجام آزمایش

۲-۲- طراحی آزمایش با استفاده از روش سطح پاسخ

طراحی آزمایش خشک کردن با استفاده از روش سطح پاسخ و به وسیله نرم افزار دیزاین اکسپرت^۱ (۷/۰/۱) صورت گرفته است. این نرم افزار از پرکاربردترین نرم افزارهای طراحی آزمایش می باشد [۳].

برای بیان رابطه بین متغیرها و پاسخ از یک چندجمله‌ای درجه دو استفاده شده که از بخش‌های خطی و درجه

دوم تشکیل گردیده است:

$$Y = A_0 + \sum A_i X_i + \sum A_{ij} X_i^2 + \sum A_{ijk} X_i X_j \quad (1)$$

در رابطه فوق Y , X , A_0 , A_{ij} , A_i , به ترتیب پاسخ، متغیرهای مستقل، ضریب ثابت، ضریب خطی و ضریب برهم کنش می باشند.

آنالیز واریانس^۲ برای بررسی و تایید میزان تاثیر^۳ مدل استفاده می شود. مقدار F^4 و $P (P > F)^5$ برای تعیین میزان تاثیر مدل از نظر آماری بکار می روند. یک مدل موثر باید مقدار F بالا و P کمتر از ۰/۰۵ داشته باشد. میزان دقت مدل با R^2 و R_{adj}^2 تعیین می گردد. R^2 نشان دهنده میزان نوسان^۶ در مقدار پاسخ و R_{adj}^2 نشان دهنده کسری از نوسانات پاسخ است که توسط مدل تفسیر می شود [۴].

متغیرها بر حسب مقادیر واقعی و کد در جدول (۱) نشان داده شده اند. هفده آزمایش با شرایط نشان داده شده در جدول (۲) انجام شده و میزان خشک شدن اندازه گیری گردیده است.

^۱ . Design Expert

^۲ . Analysis of Variance (ANOVA)

^۳ . Significance

^۴ . F-Value

^۵ . Probability

^۶ . Variability

جدول ۱- متغیرها و محدوده تغییرات آن ها

مقدار و کد متغیر			متغیر
-۱	۰	+۱	
۵۰	۱۱۵	۱۸۰	دما (A)
۵	۱۰	۱۵	دور (B)
۰	۳	۶	شیب (C)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل سازی و کفایت مدل

جدول ۲- شرایط انجام آزمایش ها و نتایج

خشک شدن (%)	متغیر			شماره آزمایش
	C(°)	B(rpm)	A(°C)	
۱/۶	+۱	۰	-۱	۱
۴	+۱	-۱	۰	۲
۷/۲	+۱	۰	+۱	۳
۳/۲	+۱	+۱	۰	۴
۸	-۱	+۱	۰	۵
۹/۲	-۱	۰	-۱	۶
۱۲/۸	-۱	-۱	۰	۷
۱۲/۸	-۱	۰	+۱	۸
۴/۴	۰	۰	۰	۹
۵/۶	۰	۰	۰	۱۰
۴/۴	۰	۰	۰	۱۱
۶	۰	۰	۰	۱۲
۵/۶	۰	۰	۰	۱۳
۷/۲	۰	+۱	+۱	۱۴
۹/۲	۰	-۱	+۱	۱۵
۳/۶	۰	-۱	-۱	۱۶
۴	۰	+۱	-۱	۱۷

مدل بدست آمده برای میزان کف تولیدی بر اساس متغیرهای مستقل با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$D = 13 + 5/63 A - 2/25 B - 8/38 C - 1/5 AB + 1/25 AC + 2/5 BC + 1/87 A^2 + 0/12 B^2 - 4/38 C^2 \quad (2)$$

میزان موثر بودن مدل از لحاظ آماری با ANOVA و آنالیز رگرسیون^۱ بررسی می‌شود. نتایج پردازش مدل در جدول (۳) ارائه شده است. همان گونه که نشان داده شده، میزان صحت مدل‌ها با مقادیر بالای F و مقادیر پایین P تایید می‌گردد. علاوه بر این، مقادیر R^۲ و R_{adj}^۲ به یک نزدیک می‌باشند. همچنین تفاوت کم بین این مقادیر دقت بالای مدل‌ها را اثبات می‌کنند. ضمناً، مقادیر عدم برازش^۲ نیز موثر بودن مدل را اثبات می‌کند (P < 0/05) [۵].

جدول ۳- آنالیز مدل

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	متوسط مربعات	F- Value	P-Value Prob>F
A	۱	۲۵۳/۱۳	۲۵۳/۱۳	۶۶/۲۴	۰/۰۰۰۱
B	۱	۴۰/۵	۴۰/۵	۱۰/۶	۰/۰۱۴
C	۱	۵۶۱/۱۳	۵۶۱/۱۳	۱۴۶/۸۴	< ۰/۰۰۰۱
AB	۱	۹	۹	۲/۳۶	۰/۱۶۸۷
AC	۱	۶/۲۵	۶/۲۵	۱/۶۴	۰/۲۴۱۷
BC	۱	۲۵	۲۵	۶/۵۴	۰/۰۳۷۷
A ^۲	۱	۱۴/۸	۱۴/۸	۳/۸۷/۰۲	۰/۰۸۹۷
B ^۲	۱	۰/۰۶۶	۰/۰۶۶	۰/۰۱۷	۰/۸۹۹۳
C ^۲	۱	۸۰/۵۹	۸۰/۵۹	۲۱/۰۹	۰/۰۰۲۵
مدل	۹	۹۹۵/۲۵	۱۱۰/۵۸	۲۸/۹۴	۰/۰۰۰۱ با اهمیت
عدم	۳	۱۲/۷۵	۴/۲۵	۱/۲۱	۰/۴۱۲۶ بی‌اهمیت

^۱. Regression

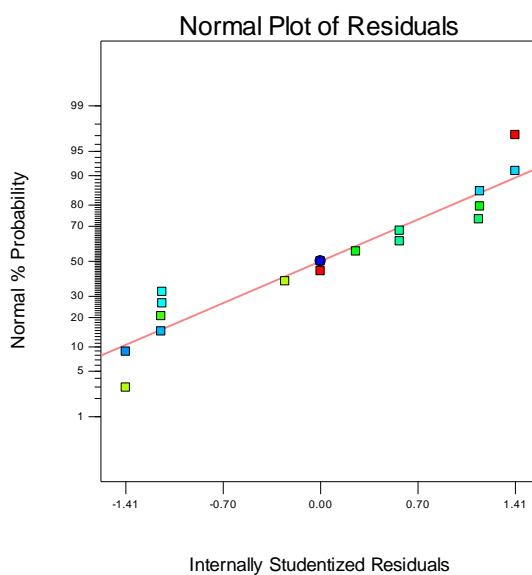
^۲. Lack of Fit

				برازش
$R^2 = 0.9738$		$R^2_{adj} = 0.9402$		

احتمال پذیری نرمال باقیمانده^۱ می تواند جهت بررسی دقت مدل بکار رود. این کمیت در شکل (۲) رسم شده است. توزیع مقادیر باقیمانده نزدیک به یک خط راست نشان دهنده صحت مدل می باشد. اگر باقیمانده ها نزدیک به یک خط راست قرار داشته باشند توزیع تصادفی خطاها موجود بوده و این مساله دقت پردازش روش حداقل مربعات را بیان می کند [۴].

Design-Expert® Software
drying

Color points by value of
drying:
12.8
1.6

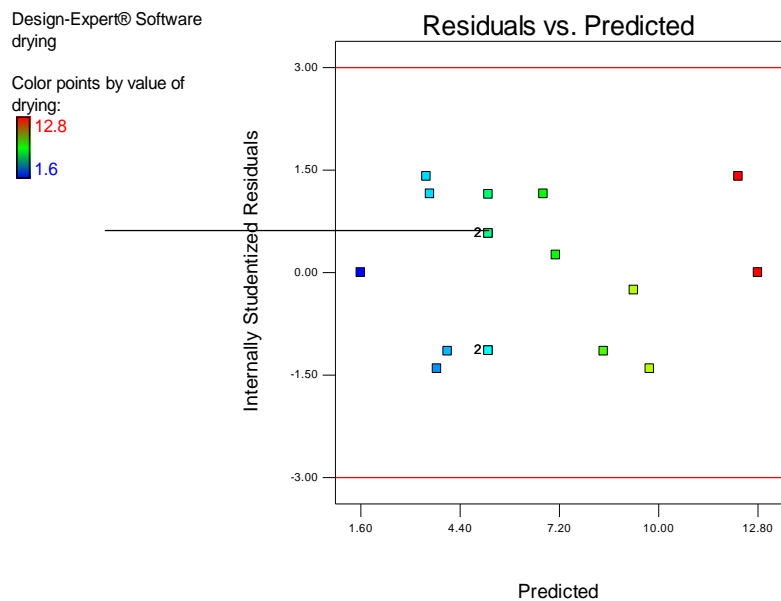


شکل ۲- نمودار باقیمانده

نمودارهای تغییرات باقیمانده بر حسب مقادیر پیش بینی شده^۲ توسط مدل در شکل (۳) نشان داده شده است. عدم وجود الگویی مشخص را در ساختار نشان داده و پراکندگی یکسان در بالا و پائین محور افقی دلالت بر کفایت مدل دارد [۶،۷]

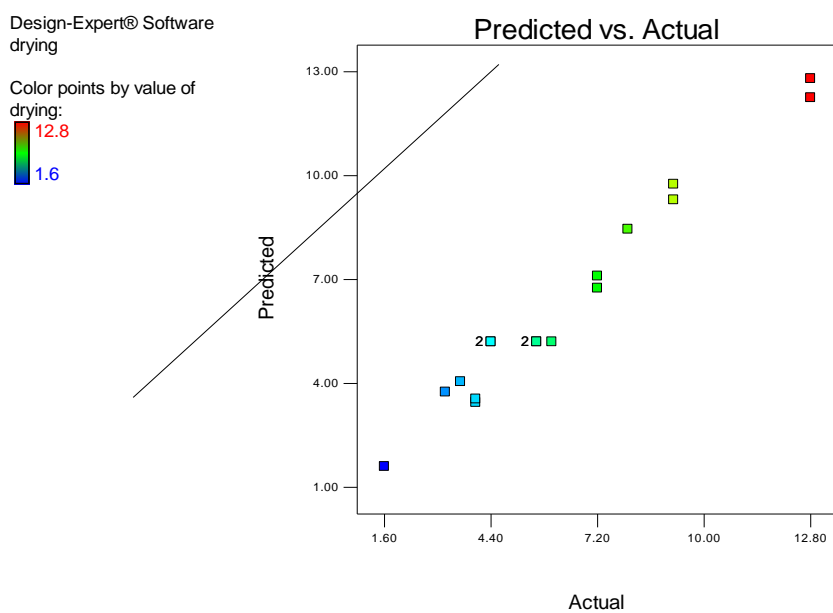
^۱ . Normal Probability of the Residual

^۲ . Studentized Residual vs. Predicted



شکل ۳- نمودار تغییرات باقیمانده بر حسب مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل

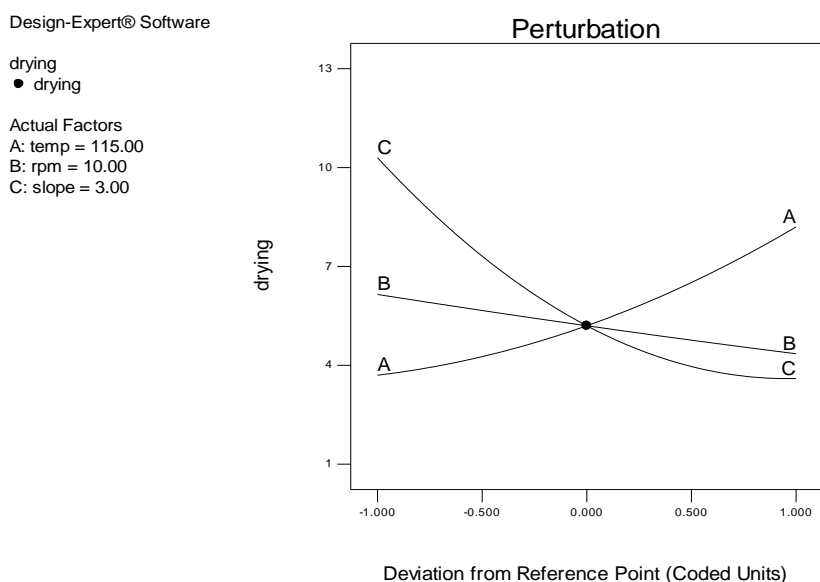
نمودار مقادیر واقعی پاسخ بر حسب مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل در شکل (۴) نشان داده شده است. قرار گرفتن نقاط نزدیک به خط قطری نشان‌دهنده هماهنگی و نزدیکی مقادیر تجربی (آزمایشگاهی) و مقادیر به دست آمده از روی مدل می‌باشد. این مساله صحت پیش‌بینی میزان خشک شدن توسط مدل را بیان می‌کند [۸].



شکل ۴- مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی

۳-۲- بررسی اثر پارامترهای مؤثر در خشک کردن

در یک دید کلی نحوه اثربخشی پارامترهای مؤثر در خشک کردن در نمودار اختلال (شکل (۵)) نشان داده می شود. منحنی اختلال اثر هر کدام از پارامترها را در نقطه مرکزی (کد صفر) نشان می دهد. شیب یا انحنای تند یک پارامتر بیانگر حساس بودن پاسخ به این پارامتر است. خط نسبتاً صاف، غیرحساس بودن پاسخ به متغیر را نشان می دهد [۳]. همان طور که مشاهده می شود میزان خشک شدن شدیداً به دو پارامتر دما و شیب دستگاه حساس است. وابستگی خشک شدن به دور دستگاه قابل توجه نمی باشد. علاوه بر این، نتایج ANOVA (جدول (۳)) بیان می کند که در بین متغیرهای درجه دوم میزان خشک شدن به طور موثر از شیب دستگاه تاثیر می پذیرد (مقدار P کمتر از ۰/۰۵).



شکل ۵- منحنی اختلال برای پارامترهای مؤثر در میزان خشک شدن

با توجه به شکل (۶) با افزایش دما و کاهش rpm، میزان خشک شدن بالا می رود.

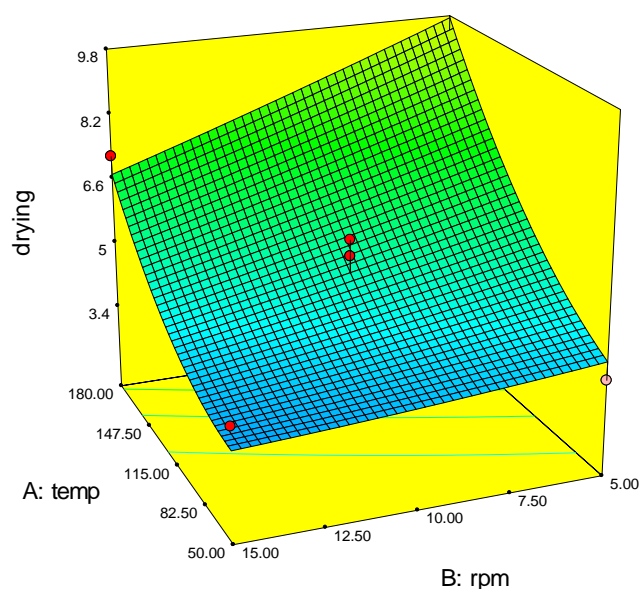
Design-Expert® Software

drying



X1 = A: temp
X2 = B: rpm

Actual Factor
C: slope = 3.00



شکل ۶- منحنی سه بعدی سطح پاسخ مربوط به تأثیر دما و rpm بر میزان خشک کردن

با توجه به شکل (۷) با افزایش دما و کاهش شیب دستگاه، میزان خشک شدن به بالاترین حد ممکن خواهد رسید. لازم به ذکر است که بالاترین میزان خشک شدن در این شکل به دست آمده که این موضوع نشان از اهمیت بالای این دو پارامتر در فرایند مورد نظر می‌باشد. (مقدار p در جدول ANOVA). کاهش شیب باعث کاهش سرعت خروج مواد از دستگاه و افزایش زمان تماس آنها با هوای گرم می‌شود. در اینحالت هر قدر دمای هوا بالاتر باشد میزان آب بیشتری از مواد جدا می‌شود.

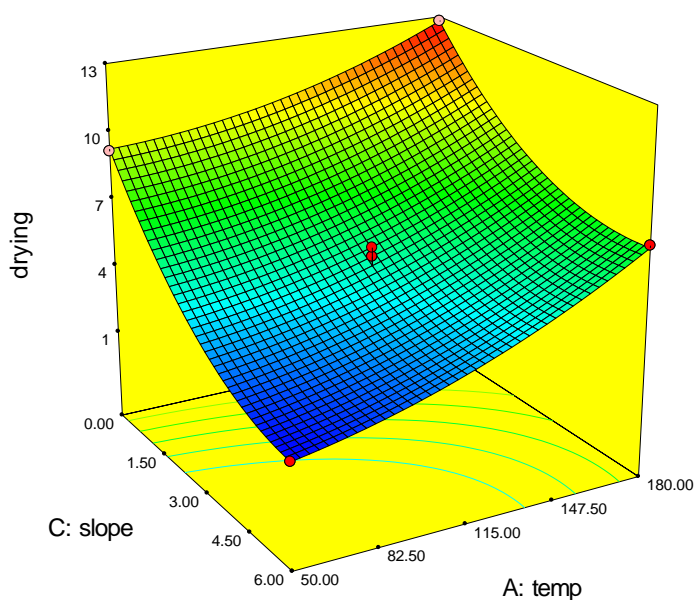
Design-Expert® Software

drying



X1 = C: slope
X2 = A: temp

Actual Factor
B: rpm = 10.00



شکل ۷- منحنی سه بعدی سطح پاسخ مربوط به تأثیر دما و شیب بر میزان خشک کردن

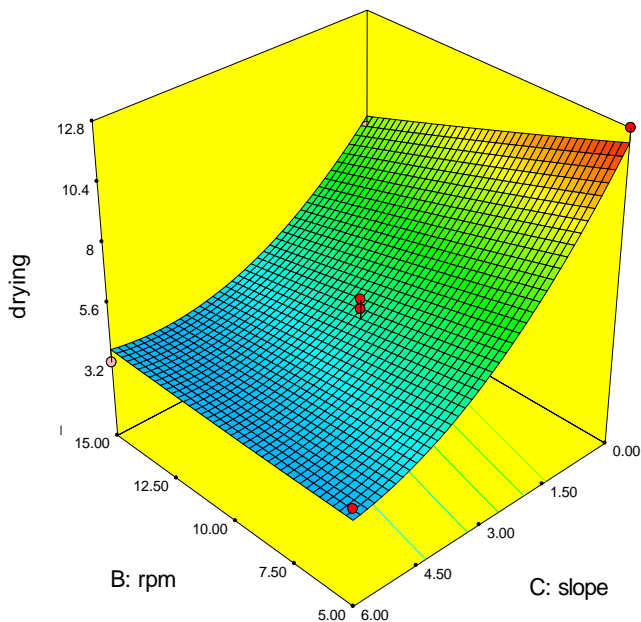
با کاهش تدریجی rpm و شیب، میزان خشک شدن افزایش می‌یابد. (شکل ۸). این مساله به این دلیل است که با کاهش دور و شیب مواد زمان بیشتری در دستگاه سپری کرده و بیشتر در معرض هوای گرم قرار می‌گیرد. در نتیجه میزان آب بیشتری خشک می‌شود.

Design-Expert® Software

drying
12.8
1.6

X1 = B: rpm
X2 = C: slope

Actual Factor
A: temp = 115.00



شکل ۸- منحنی سه بعدی سطح پاسخ مربوط به تأثیر rpm و شیب بر میزان خشک کردن

۳-۳- بررسی و تعیین نقطه بهینه خشک شدن

برای انتخاب شرایط بهینه، هدف اصلی را بیشترین میزان خشک شدن قرار داده ایم. شرایط بهینه (هدف مورد نظر) با توجه به ویژگی‌ها و محدودیت‌های ماده خشک شونده تعیین می‌شود. در این آزمایش با توجه به این که محدودیتی از لحاظ دمایی و غیره برای ماده سوپا تعیین نشده است، همه پارامترهای آزمایش را در بازه تعریف شده (جدول ۱) و میزان خشک شدن را در بالاترین میزان ممکن تعیین کرده ایم. جدول (۴) شرایط بهینه انتخاب شده را نشان می‌دهد.

جدول ۴- شرایط بهینه تعیین شده

دمای (°C)	دور بر دقیقه (rpm)	شیب (°)	خشک شدن (%)
۱۴۸/۰۱	۵/۱۱	۰/۲۳	۱۳/۰۰

۴- نتیجه گیری

- مدل به دست آمده از روش RSM تطابق بسیار خوبی با نتایج حاصل از آزمایشات دارد. این روش در تحلیل جامع نتایج بسیار سودمند می‌باشد.
- از تحلیل نتایج به دست آمد که بیشترین تاثیر در عملیات خشک کردن، مربوط به پارامتر دما و سپس دور دستگاه می‌باشد.
- در بهینه‌ترین حالت (بیشترین میزان خشک کردن) مقادیر پارامترهای عملیاتی به صورت زیر است:

$$\text{دما } (^{\circ}\text{C}) = 148/01 \quad \text{دور بر دقیقه (rpm)} = 5/11 \quad \text{شیب } (^{\circ}) = 0/23$$
- در تحلیل نتایج شرایط بهینه، شرایط دیگری نیز پیشنهاد شده که در آن‌ها خشک شدن مقدار ناچیزی بالاتر به دست آمده اما دمای بهینه در آن‌ها بسیار بالاتر از مورد انتخاب شده می‌باشد که به دلیل مصرف بالای انرژی از لحاظ اقتصادی به صرفه نمی‌باشد.

۵- مراجع

۱. نصیری، م، "آشنایی با مهندسی شیمی"، انتشارات ندای مصلح، چاپ اول، ۱۳۸۴.
۲. نوعی، ح، "آشنایی با مهندسی شیمی"، انتشارات جهاد دانشگاهی، چاپ هشتم، ۱۳۹۱.
3. Montgomery D.C.(1991), "Design and Analysis of Experiments", Wiley., New York., 3th ed.
4. T. Kikhavani, S. N. Ashrafizadeh, B. Van der Bruggen.(2014), "Identification of Optimum Synthesis Conditions for a Novel Anion Exchange Membrane by Response Surface Methodology", J. Appl. Polym. Sci., Vol. 131, pp-39888-39904.
۵. Bas . D., Boyaci , I.H.,(۲۰۰۷) , "Modeling and optimization I: usability of response surface methodology", Journal of Food Engineering, ۷۸ ,۸۳۶-۸۴۵.
۶. Lizama C., Freer J., Baeza J., Mansilla H.D.(۲۰۰۲), "Optimized photodegradation of Reactive Blue ۱۹ on TiO₂ and ZnO suspensions", Catalysis Today., ۷۶, pp.۲۳۵-۲۴۶.
7. Murugesan K., Dhamija A., Nam I.H., Kim Y.M., Chang Y.S.(2007), "Decolourization of reactive black 5 by laccase:Optimization by response surface methodology", Dyes and Pigments., 75, pp.176-184.
8. Myers R.H., Montgomery D.C.(1995), "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", Wiley., New York..