

بهینه سازی فرآیند خشک کردن موسیر به روش سطح پاسخ در خشک کن بستر سیال

مصیب فعله کری¹، رضا امیری چایجان² و جعفر امیری پریان²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

2- استاد یار مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(mfealehkari20@yahoo.com)

چکیده

موسیر (*Allium hiertifolium*) گیاهی چند ساله و پیازدار از خانواده الیاسه می باشد. این گیاه بومی ایران بوده و به صورت خودرو در مراتع مرتفع می روید. موسیر جزء گیاهان دارویی مهم بوده و برای کاهش فشار خون استفاده می شود. در این مطالعه سینتیک خشک کردن ورقه های موسیر در خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی با توجه به میزان ضریب پخش (انتشار) موثر، چروکیدگی و انرژی ویژه مصرفی، با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه سازی شد. آزمایش ها در سه سطح دمایی 40، 55 و 70 °C، سه سطح سرعت 1/5، 1 و 2.5 m/s و ضخامت ورقه 2، 4 و 6 میلی متر در دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینای همدان در پاییز 90 اجرا شدند. ضریب پخش و انرژی ویژه مصرفی با افزایش سرعت و دمای هوای ورودی افزایش یافتند. دما و سرعت هوای ورودی بر چروکیدگی تاثیر معنی داری نداشتند. با افزایش ضخامت، چروکیدگی افزایش یافت. با توجه به بیشترین ضریب پخش و انرژی فعال سازی و کمترین چروکیدگی، دمای 70 °C، ضخامت 3/35 mm و سرعت هوای 1/75 m/s به عنوان نقطه بهینه فرآیند پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی: انرژی ویژه مصرفی، بهینه سازی، چروکیدگی، ضریب پخش

مقدمه

موسیر (*Allium hiertifolium*) گیاهی چند ساله و پیازدار از خانواده الیاسه می باشد. این گیاه بومی ایران است و به صورت خودرو در مراتع مرتفع می روید [Mozaffarian, 1996]. قسمت های خوراکی موسیر برگ ها و پیاز های توپر آن می باشد [Brewster and Rabinowitch, 1990]. همچنین این گیاه دارای مواد مغذی همچون فسفر، کلسیم، پتاسیم، سدیم و منیزیم است و در تولید ماست موسیر و ترشی استفاده می شود. از نظر پزشکی نیز جزء گیاهان دارویی مهم بوده و برای کاهش فشار خون استفاده می شود. موسیر در بسیاری از مناطق ایران به صورت خشک استفاده می شود [Khezri, 2003]. سینتیک خشک کردن از جمله فرآیندهایی است که به علت بالا بودن گرمای نهان تبخیر آب و پایین بودن نسبی بازدهی انرژی در خشک کن های صنعتی، هنگام انجام کاربرد های عملی به انرژی ورودی بالایی نیاز دارد. خشک کردن اساساً فرآیندی است که انتقال جرم و گرما به صورت همزمان رخ می دهد. در بیشتر فرآیندهای خشک کردن آب به عنوان مایع تبخیر شده و هوا به عنوان واسطه انتقال ایفای نقش می کنند. برای تبخیر ذرات مایع یا رطوبت ماده که قرار است از سطح آن برداشته شده و به محیط انتقال داده شود، مقداری گرما باید فراهم شود [O'zbeý and So'ylemez, 2005]. علاوه بر بازدهی بالای فرآیند توجه به کیفیت محصول خشک شده نیز بسیار حائز اهمیت است. هدف اصلی در هر فرآیند خشک کردنی

تولید محصول خشک شده با کیفیت بالا، هزینه پایین و بیشترین عملکرد دستگاه، به همراه بهینه سازی این عوامل به طور پایدار می باشد. اغلب کیفیت محصولات بیولوژیکی، تحت تاثیر تغییرات فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی قرار می گیرد. به لحاظ مصرف انرژی عملیات خشک کردن بیش از 15٪ انرژی مورد نیاز مصارف صنعتی را به خود اختصاص داده است. همچنین بازدهی انرژی این فرآیند اغلب پایین، بین 25-50٪ می باشد. لذا مطالعه و اقدام به منظور کاهش انرژی مصرفی مورد نیاز و زمان فرآیند، جهت افزایش بازدهی آن امری اجتناب ناپذیر است [Chua et al., 2001]. روش خشک کردن بستریال با داشتن مزایای از قبیل دامنه گرمایی و انتقال جرم بالا بین ذرات و هوای واسطه، مخلوط شدن سریع و یکنواخت مواد با هوا و کنترل دقیق دمای بستر، جایگاه خوبی در میان روش های مرسوم خشک کردن به دست آورده است [O'zbek and Soylemez, 2005].

یکی از مهمترین مراحل افزایش بازدهی فرآیندهای حرارتی بهینه سازی و مدلسازی فرآیند است. پیدا کردن روابط بین عوامل ناخواسته و محصول نهایی برای محققان بسیار ارزشمند است [Abbasi Surki, et al., 2010]. یکی از محبوب ترین روشهایی که در دو دهه ی اخیر مورد استفاده قرار گرفته، روش سطح پاسخ می باشد. روش سطح پاسخ مجموعه ای از روشهای آماری و ریاضی است که برای آنالیز و مدل سازی پاسخ های یک فرآیند استفاده می شود که در نهایت هدف آن بهینه سازی فرآیند است [Myers and Montgomery, 1995]. طی یک تحقیق، بهینه سازی خشک کردن هسته چوب درخت خرما در خشک کن میکروویو و آن را با توجه به پارامترهای کیفی با ضریب همبستگی 98٪ انجام شد [Amouzgar et al., 2011]. در تحقیق دیگری که بر روی ورقه های سیب زمینی در خشک کن بستر سیال صورت پذیرفت، نقطه بهینه فرآیند در دمای 100 °C گزارش شد [Varnalis et al., 2004]. همچنین در تحقیقی که بر روی خشک کردن ورقه های هویج در خشک کن بستر سیال انجام شد، بهینه سازی انرژی و اکسرژی با استفاده از ترکیب شبکه عصبی و RSM با ضریب همبستگی 97٪ گزارش گردید [Nazghelichi et al., 2011]. هدف از این مطالعه بهینه سازی فرآیند خشک کردن موسیر در خشک کن بستریال با توجه به متغیرهای خروجی از جمله ضریب پخش، انرژی ویژه مصرفی و چروکیدگی می باشد.

مواد و روشها

در این مطالعه تهیه نمونه های موسیر از زمین های کشاورزی استان کرمانشاه، شهرستان سنقر و کلیایی صورت گرفت. سپس نمونه ها در یخچال در دمای 4 °C قرار داده شد. میزان رطوبت اولیه نمونه ها به روش آن بر پایه خشک بدست آمد. به همین منظور نمونه های 20 گرمی در آن به مدت 24 ساعت در دمای 70±1 °C در 5 تکرار قرار گرفتند. میزان رطوبت اولیه موسیر (d.b.) 1/99 بر پایه خشک محاسبه شد. پس از خشک شدن نمونه ها، ضریب پخش، چروکیدگی و انرژی ویژه مصرفی با استفاده از معادلات مربوطه تعیین و بهینه سازی گردید. آزمایش ها در سه سطح دمایی 40، 55 و 60 °C، سه سطح سرعت 1/5، 1/5 و 2/5 m/s، سه سطح ضخامت 2، 4 و 6 mm، در سه تکرار انجام شد. قبل از شروع آزمایش ها غده ها به وسیله یک کاتر مخصوص به شکل استوانه به قطر 10mm درآمد. جهت انجام صحیح آزمایش ها، پس از رسیدن خشک کن به حالت پایدار، نمونه ها در داخل آن قرار می گرفت.

ضریب پخش

با فرض اینکه رطوبت در داخل ماده به طور یکنواخت پخش شده است و انتقال جرم به طور متقارن از مرکز ماده

صورت می گیرد و رطوبت سطحی ماده به طور آنی به رطوبت تعادلی می رسد و با چشم پوشی از چروکیدگی برای ورقه¹ نامحدود راه حل زیر می تواند تعریف شود [Crank, 1975; Ramesh et al., 2001].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4h^2}\right) \quad (1)$$

که در آن n تعداد جملات معادله (1، 2، 3، ...)، t زمان خشک شدن (s)، h نصف ضخامت ورقه (m)، MR نسبت رطوبت، M رطوبت در یک زمان مشخص (d.b.)، M_o مقدار رطوبت اولیه (d.b.)، M_e مقدار رطوبت تعادل (d.b.)، D_{eff} ضریب پخش رطوبت موثر (m^2/s). برای دوره های طولانی آندایی، یعنی وقتی t افزایش می یابد و صرف نظر از M_e به خاطر ناچیز بودن آن در مقابل M می توان رابطه لگاریتمی زیر را نوشت.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4h^2}\right) \quad (2)$$

با رسم $\ln(MR)$ نسبت به زمان، خطی با شیب K_0 به دست می آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t در رابطه (2)، ضریب نفوذ را می توان از رابطه (3) به دست آورد.

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4h^2} \quad (3)$$

اندازه گیری چروکیدگی

درصد چروکیدگی نمونه ها به ترتیب با استفاده از کولیس با دقت 0/01 mm محاسبه شد. جهت اندازه گیری درصد چروکیدگی نمونه ها از رابطه زیر استفاده شد [Mayor and Sereno, 2004]:

$$S_b = \frac{(V_0 - V)}{V_0} \times 100 \quad (4)$$

که در آن V_0 حجم اولیه یا حجم قبل از خشک کردن، V حجم ثانویه یا حجم بعد از خشک کردن و S_b درصد چروکیدگی می باشد.

انرژی ویژه مصرفی

میزان انرژی ویژه مصرفی از رابطه زیر بدست می آید [Amiri Chayjan et al., 2011]:

$$SE = \left(\frac{t}{m_v}\right) \left[\frac{Q(C_{pa} + C_{pv} h_a)}{V_h}\right] (T_{in} - T_{am}) \quad (5)$$

که در آن:

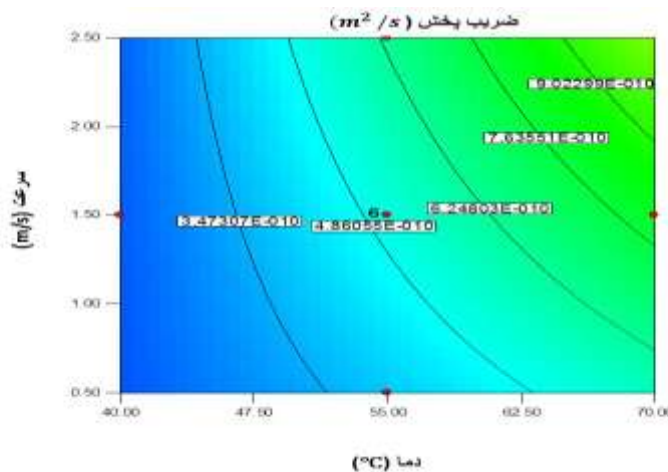
SE انرژی ویژه مصرفی (kJ/kg)، t کل زمان خشک شدن نمونه (min)، m_v جرم آب برداشته شده از محصول (kg)، C_{pv} ظرفیت گرمای ویژه بخار آب ($1004.16 J/kg \text{ } ^\circ C$)، C_{pa} ظرفیت گرمای ویژه هوا ($J/kg \text{ } ^\circ C$)، Q دبی هوای ورودی به محفظه خشک کن (m^3/s)، V_h حجم ویژه هوا (m^3/kg)، T_{am} دمای محیط ($^\circ C$)، T_{in} دمای هوای ورودی ($^\circ C$) و h_a رطوبت مطلق هوا ($kg_{vapor}/kg_{dry air}$) می باشد. در این مطالعه جهت تجزیه و تحلیل داده ها از نرم افزار آماری Excel و Design Expert 7.0.0 استفاده شد.

¹ slab

نتایج و بحث

ضریب پخش مؤثر

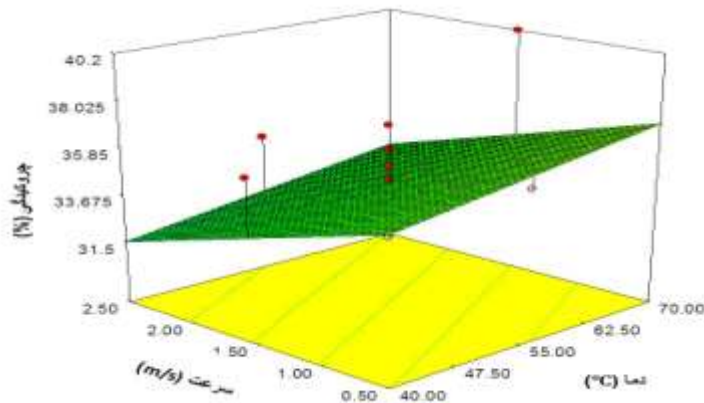
شکل (1) رابطه بین دما و سرعت هوای ورودی با ضریب پخش مؤثر را نشان می دهد. با افزایش دما و سرعت هوای ورودی ضریب پخش افزایش می یابد. دلیل این امر تاثیر بارز دما و سرعت هوا در ایجاد جنبش م و لکولی و مکش سطحی بیشتر در محصول می باشد. البته تاثیر دما بر ضریب پخش بیشتر از سرعت هوا می باشد. با افزایش ضخامت نیز ضریب پخش به خاطر حجم بیشتر محصول افزایش یافت. مقادیر ضریب پخش برای محصولات کشاورزی بین 10^{-9} و 10^{-11} m^2/s می باشد. بیشترین ضریب پخش در دمای $70^\circ C$ ، سرعت هوای $1/5$ m/s و ضخامت $6mm$ با مقدار $1/8 \times 10^{-9}$ m^2/s و کمترین آن در دمای $40^\circ C$ ، سرعت هوای $1/5$ m/s و ضخامت $2mm$ با مقدار $5/95 \times 10^{-11}$ m^2/s پیدا شد. برای گوجه فرنگی در محدوده دمایی 55 تا $70^\circ C$ ضریب انتشار رطوبت بین $5/65 \times 10^{-10}$ تا $7/53 \times 10^{-10}$ m^2/s گزارش شد [Doymaz, 2007]. تاثیرات دما و سرعت هوای ورودی و ضخامت و همچنین اثرات متقابل هر سه فاکتور بر روی میزان ضریب پخش در سطح 1 درصد معنی دار است.



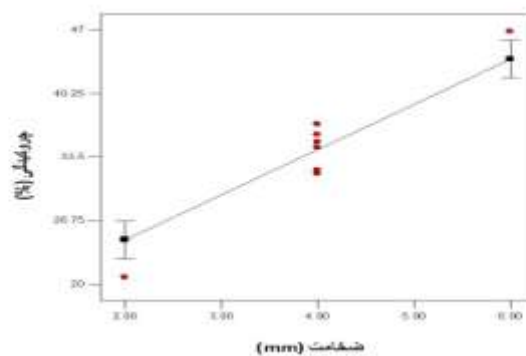
شکل 1. رابطه بین دما و سرعت هوای ورودی با ضریب پخش مؤثر

چروکیدگی

در شکل (2) با افزایش دما، میزان چروکیدگی به طور ملایمی افزایش می یابد. همچنین با کاهش سرعت هوای ورودی، چروکیدگی افزایش می یابد. البته دما و سرعت هوای ورودی تاثیر معنی داری بر روی چروکیدگی نداشتند. Hatamipour and Mowla [2002] با بررسی سینتیک خشک کردن هویج در خشک کن بستر سیال به نتایج مشابه رسیدند. چروکیدگی بیشتر تحت تاثیر ضخامت نمونه ها بود و اثر آن در سطح 1 درصد معنی دار بود. با افزایش ضخامت نمونه ها، چروکیدگی نیز افزایش پیدا کرد (شکل 3). بیشترین چروکیدگی در دمای $55^\circ C$ ، سرعت هوای $1/5$ m/s و ضخامت $6mm$ با مقدار $46/84$ درصد و کمترین آن در دمای $55^\circ C$ ، سرعت هوای $1/5m/s$ و ضخامت $2mm$ با مقدار $20/7$ درصد گزارش شد.



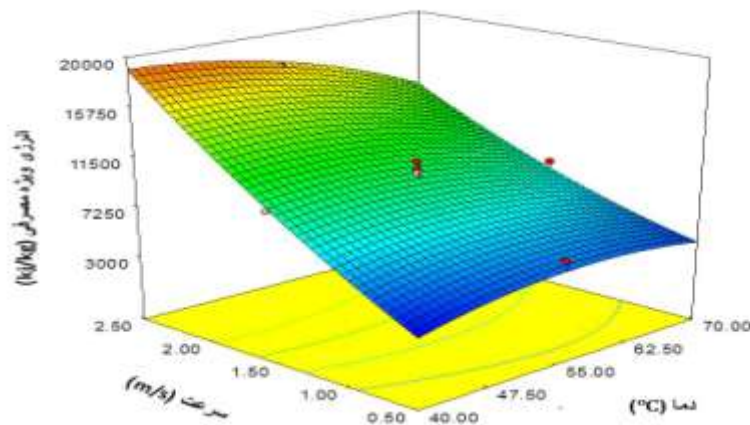
شکل 2. رابطه بین درصد تغییرات چروکیدگی با دما و سرعت هوای ورودی



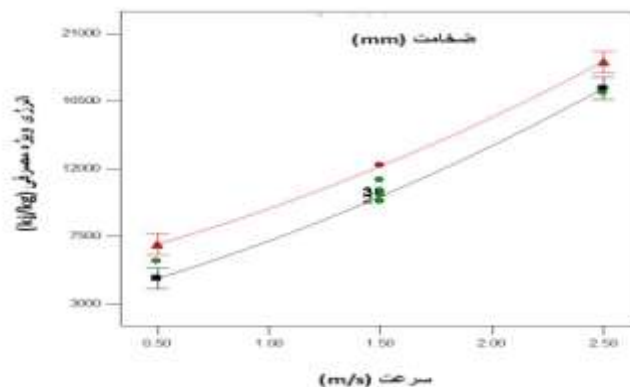
شکل 3. رابطه بین ضخامت و چروکیدگی در دماها و سرعت های مختلف

انرژی ویژه مصرفی

مطابق شکل (4)، با افزایش سرعت هوای ورودی، انرژی ویژه مصرفی افزایش پیدا کرد. همچنین با افزایش دمای ورودی نیز انرژی ویژه مصرفی با شیب کم افزایش پیدا کرد. [Prasad and Sharma 2006] دریافتند که با افزایش سرعت هوای ورودی، انرژی ویژه مصرفی افزایش پیدا می کند. تاثیرات هر سه پارامتر ورودی بر میزان انرژی ویژه مصرفی و همچنین اثرات متقابل سرعت و دمای هوای ورودی معنی دار است. حداکثر میزان انرژی ویژه مصرفی در دمای 70°C ، سرعت هوای 1.5 m/s و ضخامت 4 mm و کمترین مقدار آن $(3124/3\text{ MJ/kg})$ در همین دما و سرعت و در ضخامت 2 mm محاسبه شد. شکل (5) تاثیر سرعت و ضخامت را بر انرژی ویژه مصرفی نشان می دهد. پس از تجزیه و تحلیل کلیه متغیرهای مستقل، نتایج نشان داد که تغییرات چروکیدگی با ضخامت رابطه مستقیم داشته و دما و سرعت هوای ورودی ارتباط معنی داری با تغییرات چروکیدگی نداشتند. همچنین با افزایش سرعت و دمای هوای ورودی ضریب پخش و انرژی ویژه مصرفی افزایش پیدا کرد. با در نظر گرفتن کمترین چروکیدگی و انرژی ویژه مصرفی و همچنین بیشترین ضریب پخش، نقطه بهینه فرآیند با دمای 70°C ، ضخامت $3/35\text{ mm}$ و سرعت هوای $1/75\text{ m/s}$ پیشنهاد گردید.



شکل 2. رابطه بین دما و سرعت هوای ورودی با انرژی ویژه مصرفی



شکل 2. اثرات همسوی بین ضخامت و سرعت با انرژی ویژه مصرفی

منابع

- Abbasi Surki, 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. J Agr Sci Tech, 12: 409-423.
- Amiri Chayjan, R., Peyman, M.H., Esna-Ashari, M., Salari, K., (2011). Influence of drying conditions on diffusivity, energy and color of seedless grape after dipping process. Australian journal of crop science. AJCS5(1):96-103
- Amouzgar, P., Abdul Khalil, H.P.S., Salamatinia, B., Abdullah, A. Z., Issam, A.M., (2010). Optimization of bioresource material from oil palm trunk core drying using microwave radiation; a response surface methodology application. Bioresource technology, 101:8396-8401
- Brewster, J.L., Rabinowitch, H.D., (1990). Onion and Allied Crops. CRC press. Florida, U.S.A.
- Chua, K. J., Mujumdar, A. S., Hawlader, M. N. A., Chou, S. K., Ho, J. C., (2001). Effect of

- continuous and stepwise change in drying temperature on drying characteristics and product quality. *Food Research International*, 34:721–731.
- Crank, J., (1975). *Mathematics of Diffusion*, (2nd Edn). Oxford University Press, London.
 - Doymaz, I., (2007). Air drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78: 1291- 1297.
 - Hatamipour, M.S., Mowla, D., (2002). Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, 55: 247–252.
 - Khezri, S.Sh., 2003. *Encyclopedia of Medicinal Plants*. Rostamkhani Publication, Tehran, Iran.
 - Mayor, L.A., Sereno, M., (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61: 373–386
 - Mozaffarian, V., 1996., *A dictionary of Iranian plant names* Tehran., Farhange Moaser Publications, Tehran, Iran.
 - Myers, R.H., Montgomery, D.C., (1995). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.
 - Nazghelichi, T., Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., (2011). Optimization of an artificial neural network topology using coupled response surface methodology and genetic algorithm for fluidized bed drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75:84–91
 - O'zbey, M., So'ylemez, M.S., (2005). Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains. *Energy Conversion and Management*, 46:1495 –1512
 - Ramesh, M.N., Wolf, W., Tevini, D., Jung, G., (2001). Influence of processing parameters on the drying of spice paprika. *Journal of Food Engineering*, 49(1): 63–72
 - Sharma, G.P., Prasad, S., (2006). Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. *Journal of Energy*, 31:1921–1926
 - Varnalis, A.I., Brennan, J.G. , MacDougall, D.B., Gilmour, S.G., (2004). Optimisation of high temperature puffing of potato cubes using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 61:153–163.