

## مدلسازی خشک کردن بستر سیال - مایکروویو دانه های مرطوب به روش دینامیک سیالات محاسباتی

محسن رنجبران<sup>1</sup>، داریوش زارع<sup>2</sup>

1. دانشجوی فارغ التحصیل کارشناسی ارشد بخش مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه شیراز

2. استادیار بخش مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه شیراز

Email (Ranjbaran): [agricmachinary@yahoo.com](mailto:agricmachinary@yahoo.com)

### چکیده

در این تحقیق خشک شدن دانه های مرطوب به روش بستر سیال - مایکروویو با استفاده از مدل دو فازي اویلری - اویلری شبیه سازی شد. در این راستا از نرم افزار Fluent استفاده شد. توانایی مدل در پیش بینی رطوبت محصول، دمای هوای خروجی و رطوبت هوای خروجی در طی زمان خشک شدن مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر انرژی مایکروویو با استفاده از یک کد برنامه به زبان C به فضای استاندارد نرم افزار مورد نظر اضافه گردید. نتایج شبیه سازی با استفاده از داده های به دست آمده از خشک کردن بستر سیال- مایکروویو دانه های سویا در شرایط یکسان اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که مدل فوق توانایی پیش بینی رطوبت محصول، دمای هوای خروجی و رطوبت هوای خروجی را، به ترتیب، با خطایی کمتر از 3، 10 و 5 درصد دارد. در این مقاله کد برنامه های مورد نیاز جهت مدل سازی خشک کردن با استفاده از نرم افزار مورد نظر ارائه می شود.

کلمات کلیدی: خشک کردن بستر سیال، انرژی مایکروویو، مدل دو فازي اویلری - اویلری، دینامیک سیالات محاسباتی

### مقدمه

بستر های سیال به طور گسترده ای جهت خشک نمودن مواد گرانوله مورد استفاده قرار می گیرند. در این سیستم ها به دلیل معلق شدن دانه ها درون جریان هوای خشک کننده، انتقال حرارت و رطوبت بین فاز جامد و گاز با نرخ بالایی نسبت به خشک کن های بستر ثابت صورت می گیرد. در این سیستم ها دانه ها به صورت یکنواخت خشک می شوند. اما زمان خشک شدن مواد طولانی است و این موجب مصرف انرژی زیاد می شود. در مقابل خشک کردن با انرژی مایکروویو در زمان کوتاه تری صورت می گیرد اما ماده به صورت غیر یکنواخت خشک می شود. بنابراین ترکیب این دو روش خشک کردن مواد دانه ای می تواند موجب خشک شدن یکنواخت و سریع مواد گردد. شبیه سازی های کامپیوتری روشی مناسب و کم هزینه در طراحی و ساخت اینگونه سیستم ها است. دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamics) ابزاری پر قدرت در راستای این هدف است. برای شبیه سازی بستر های سیال دو مدل متفاوت موجود است؛ مدل چند فازي اویلری-اویلری یا مدل دو-سیالی (Two-Fluid Model) و مدل اویلری-لاگرانژی یا مدل ذرات گسسته (Discrete Particle Model). هرچند مدل TFM کاربرد بیشتری در شبیه سازی بستر های سیال داشته است. تا کنون هیچ اطلاعاتی در مورد کاربرد CFD در شبیه سازی خشک کردن بستر سیال- مایکروویو مواد دانه ای یافت نشده است. در این تحقیق یک

خشک کن بستر سیال-مایکروویو در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از مدل TFM شبیه سازی شد و نتایج حاصل با استفاده از داده های تجربی به دست آمده از خشک کردن دانه های سویا مقایسه و ارزیابی گردید.

## مواد و روشها

جهت ارزیابی توانایی مدل ریاضی در شبیه سازی خشک کن بستر سیال- مایکروویو چندین آزمایش صورت گرفت. در این راستا یک دستگاه خشک کن بستر سیال- مایکروویو طراحی و ساخته شد (شکل 1). دستگاه خشک کن شامل یک آون مایکروویو با قابلیت تولید پنج سطح توان مایکروویو، یک فن دمنده، یک واحد گرم کن هوا است. خصوصیات هر یک از واحد های دستگاه در جایی دیگر به طور کامل توضیح داده شده است [Zare and Ranjbaran, 2012]. در این تحقیق سه حالت مختلف خشک کردن شامل  $3/20 \text{ W/g}$  -  $40^\circ\text{C}$ ،  $5/30 \text{ W/g}$  -  $40^\circ\text{C}$  و  $3/20 \text{ W/g}$  -  $60^\circ\text{C}$  در نظر گرفته شد. دانسیته توان مایکروویو در سطح مواد با استفاده از روش کالریمتریک اندازه گیری شد. در هر تست حدود 55 g سویا (با رطوبت 18/32 درصد بر مبنای وزن خشک و دمای  $25^\circ\text{C}$ ) درون بستر خشک کن که یک استوانه پیرکس به شعاع 6 cm و ارتفاع 25 cm بود و درون آون قرار داشت، استفاده شد. جهت اندازه گیری رطوبت محصول در حین خشک شدن از یک ترازوی دقیق دیجیتالی با دقت  $0/001 \text{ g}$  استفاده شد. در این راستا کل بستر خشک کن در فواصل زمانی معینی از آون خارج می شد و در کمتر از ده ثانیه توزین می شد. دما و رطوبت هوای خروجی توسط دستگاه Testo 625 اندازه گیری شد. سرعت هوای عبوری از بستر که از طریق یک لوله وارد آون و بستر می شد، با استفاده از بادسنج حرارتی Testo 425  $1/20$  متر بر ثانیه اندازه گیری شد.



شکل 1. دستگاه خشک کن بستر سیال-مایکروویو

## مدل ریاضی

در این تحقیق از مدل دو-سیالی TFM استفاده شد. در این مدل فاز جامد نیز به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می شود. بنابراین برای هر یک از فاز ها معادلات پیوستگی و بقای ممنتوم نوشته می شود.

$$\frac{\partial(\varepsilon_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \vec{v}_k) = 0$$

که  $\varepsilon_k$ ،  $\rho_k$  و  $\vec{v}_k$  به ترتیب درصد حجمی، دانسیته ( $\text{kg/m}^3$ ) و سرعت (m/s) سیال فاز  $k$  است.

$$\frac{\partial(\varepsilon_k \rho_k \vec{v}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \vec{v}_k^2) = -\varepsilon_k \nabla P + \nabla \cdot \overline{\tau}_k + \varepsilon_k \rho_k \vec{g} + K_{kq}$$

که  $P$  فشار سیال ( $\text{N/m}^2$ ) و  $\overline{\tau}_k$  تانسور تنش رینولدز است که برای فاز جامد با استفاده از تئوری جنبشی جریان مواد دانه ای [Lun et al., 1984] و برای فاز گازی با استفاده از مدل اغتشاش  $k-\varepsilon$  محاسبه شد.

[Zhonghua and Mujumdar, 2008]

$K_{kq}$  نیروی مبادله شده بین فاز ها  $(N/m^3)$  است که حاصل اختلاف سرعت بین فاز ها می باشد:

$$K_{gs} = \beta_{gs} (\vec{v}_g - \vec{v}_s)$$

که  $\beta_{gs}$  ضریب تبادل ممنتوم بین فاز ها است و با استفاده از مدل دراگ گیداسپو [Gidaspow, 1994] محاسبه شد.

معادله بقای انرژی برای فاز ها به صورت زیر است [Szafran and Kmiec, 2004]:

$$\frac{\partial(\varepsilon_k \rho_k h_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \vec{v}_k h_k) = -\varepsilon_k \frac{\partial(p_k)}{\partial t} + \overline{\tau}_k : \nabla \cdot \vec{v}_k - \nabla \cdot \vec{q}_k + S_k + Q_{kq}$$

که  $h$  انتالپی سیال  $(J/kg)$  و  $Q_{kq}$  نرخ انتقال حرارت بین فاز ها است و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q_{kq} = h_{kq} (T_k - T_q)$$

که  $T$  دمای مطلق سیال  $(K)$  و  $h_{kq}$  ضریب انتقال حرارت بین فاز های گازی و جامد است و از رابطه گان [Gunn, 1978] محاسبه شد.

به علاوه نرخ انرژی درونی خالص تولید شده درون فاز جامد در اثر امواج میکروویو از رابطه زیر محاسبه شد:

$$S_s = \varepsilon_s \rho_s \left( P_{mic} + \frac{dM}{dt} h_{fg} \right)$$

در این رابطه  $P_{mic}$  نرخ تولید انرژی درون فاز جامد توسط امواج میکروویو  $(W/kg)$ ،  $M$  رطوبت فاز جامد  $(kg/kg)$  بر مبنای وزن خشک و  $h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر آب  $(J/kg)$  است.

معادله انتقال رطوبت در فاز گازی به صورت زیر است [Szafran and Kmiec, 2004]:

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g W)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g W) = \nabla \cdot (\varepsilon_g \Gamma_{w,g} \nabla W) + S_w$$

که  $W$  رطوبت مطلق گاز  $(kg/kg)$  بر مبنای وزن خشک و  $S_w$  ترم چشمه رطوبت درون فاز گاز است:

$$S_w = -\varepsilon_s \rho_s \frac{dM}{dt}$$

ترم های چشمه رطوبت درون فاز گازی و چشمه انرژی درون فاز جامد با استفاده از روابط موجود در جداول 1 محاسبه شدند.

حد پیشینه فشردگی و زاویه اصطکاک داخلی فاز جامد به ترتیب 0/62 و 30 درجه [Shirkole et al, 2011] و دانسیته حجمی و ظرفیت گرمایی ویژه سویا به ترتیب  $641/9 \text{ kg/m}^3$  و  $1990/026 \text{ J/kg K}$  [Sun, 2006] در نظر گرفته شد. ارتفاع اولیه بستر 3 cm بود و قطر متوسط دانه سویا 5/44 mm اندازه گیری شد.

## روش حل

میدان حل مساله با استفاده از نرم افزار شبکه ساز GAMBIT 6.3.26 به سلول های چهار ضلعی و سازمان یافته تقسیم بندی شد. در این تحقیق از روش تقارن محوری دو بعدی (2D-axisymmetric) برای کاهش زمان و هزینه محاسبات استفاده شد. جهت اطمینان از به دست آوردن حل مستقل از شبکه، از روش مطالعه شبکه استفاده شد. درشت ترین شبکه ای که منجر به حل مستقل از شبکه گردید دارای وضوح  $40 \times 230$  بود. برای این شبکه پیشینه ضریب رعنائی و ضریب رشد سلول ها به ترتیب 4 و 1/03 بود. با در نظر گرفتن عدد کورنت مناسب گام زمانی 0/0001 s مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات کامل تر در کار پیشین نویسندگان [Ranjbaran and Zare, 2012] قابل دستیابی است.

جدول 1. معادلات خصوصیات مواد [Zare and Ranjbaran, 2012].

معادلات خصوصیات مواد	
The equilibrium moisture content equation for soybean	The drying rate of solids $\left(\frac{dM}{dt}\right) = \left(\frac{dMR}{dt}\right) (M_0 - M_e)$
$1 - RH = \exp(-0.000032 (491.67 + 1.8 T_g) M_e^{1.52})$	The single kernel drying equation for soybean $MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} =$
Thermal conductivity of soybean $k_g = 0.003544(100 M) + 0.86799$	$a \exp\left(-k_0 \frac{t}{60}\right) + b \exp\left(-k \frac{t}{60}\right) + c$ $a = -0.014 T_g + 0.202 p_{mic} + 0.457$
Latent heat of vaporization of water $h_{fg} = 2503000 - 2386 T_g \quad 0 \leq T_g \leq 260$	$b = 0.021 T_g - 0.145 p_{mic} - 0.166$ $c = -0.006 T_g - 0.050 p_{mic} + 0.665$
Dielectric loss factor at 2450 MHz for soybean $\epsilon'' = \frac{y(M) \rho_s \lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{8.688 \pi}$	$k_0 = -0.007 T_g + 0.076 p_{mic} + 0.248$ $k = -0.002 T_g + 0.159 p_{mic} + 0.079$ $p_{mic} = 0.001 P_{mic}$
$y(M) = -0.001 \left(\frac{100 M}{1+M}\right)^2 + 0.064 \left(\frac{100 M}{1+M}\right) - 0.182$	The rate of heat generation inside solids $P_{mic}(M) = P_{mic}(M_0) \frac{\epsilon''(M) \rho_s(M_0)}{\epsilon''(M_0) \rho_s(M)} F_v \left(1 - \frac{1}{e}\right)$
Dielectric constant at 2450 MHz for soybean $\epsilon' = \left[1 + 0.001 (0.172 + 0.0265 \log_{10}(f) + 0.0626 \left(\frac{100 M}{1+M}\right) - 0.0112 \left(\frac{100 M}{1+M}\right) \log_{10}(f)) \rho_s\right]^3$	$F_v = \frac{v_{monolayer}}{v_{bulk}} = \frac{d_{eff}}{H}$

شبیه سازی با استفاده از نرم افزار تجاری Fluent 6.3.26 اجرا شد. جهت به روز رسانی رطوبت فاز جامد، خصوصیات فاز جامد و محاسبه ترم های چشمه رطوبت فاز گازی و چشمه انرژی دورنی تولید شده در فاز جامد، در طول زمان خشک شدن، یک کد برنامه (User-defined Function) به زبان C نوشته شد و به نرم افزار Fluent متصل گردید. ماکرو های مورد استفاده جهت نوشتن این کد برنامه به شرح زیر است:

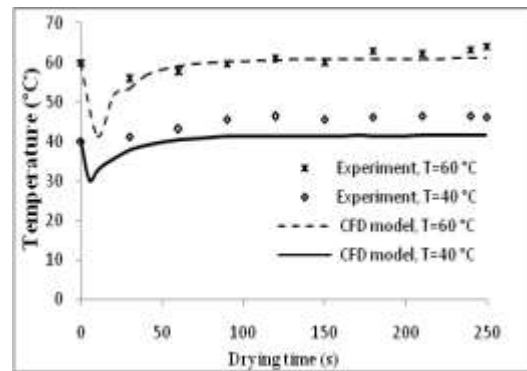
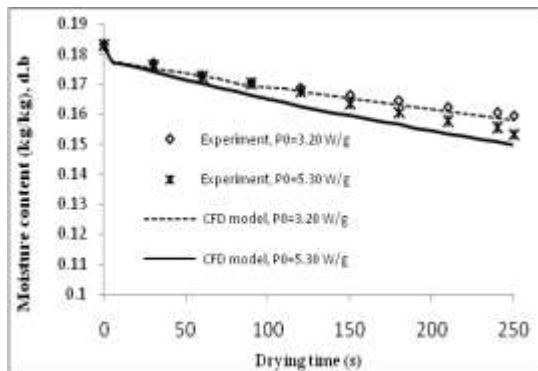
1. ورود مقادیر اولیه متغیر ها جهت شروع حل ← DEFINE\_INIT
2. به روز رسانی متغیر ها در هر گام زمانی ← DEFINE\_ADJUST
3. تعریف ترم های چشمه رطوبت فاز گازی و انرژی دورنی تولید شده در فاز جامد در اثر امواج میکروویو ← DEFINE\_SOURCE
4. محاسبه ضریب هدایت گرمایی فاز جامد ← DEFINE\_PROPERTY

خشک شدن فاز جامد برای هر یک از شرایط خشک کردن تا 250 s شبیه سازی شد. جهت ارزیابی نتایج شبیه سازی با استفاده از داده های تجربی، مقادیر متوسط رطوبت فاز جامد و دما و رطوبت مطلق فاز گازی پیش بینی شده توسط حل مدل ریاضی محاسبه شدند. توانایی مدل ریاضی در پیش بینی پارامتر های مختلف ( $\Phi$ ) توسط معیار MRD (Mean Relative Deviation) ارزیابی شد.

$$MRD = \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \frac{\Phi_{exp,j} - \Phi_{pre,j}}{\Phi_{exp,j}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \times 100$$

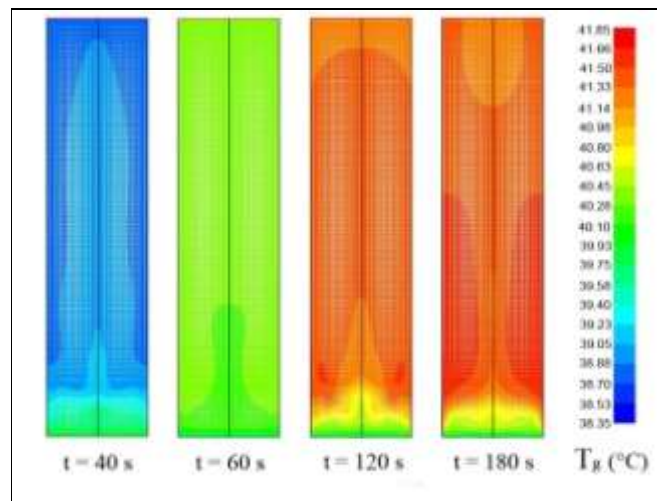
### نتایج و بحث

مدل ریاضی ارائه شده بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی توانست رطوبت فاز جامد، دمای فاز گازی و رطوبت مطلق فاز گازی را با خطای به ترتیب کمتر از 3٪، 10٪ و 5٪ پیش بینی کند. نتایج نشان داد که مدل ریاضی بر پایه CFD توانایی بالایی جهت شبیه سازی خشک کردن بسترسیال-مایکروویو دانه های مرطوب دارد. تغییرات رطوبت فاز جامد در طول زمان خشک شدن در شکل 2 نشان داده شده است. مدل ریاضی بر پایه CFD توانایی در نظر گرفتن تاثیر سطح دانسیته توان مایکروویو و دمای هوای ورودی (که در اینجا نشان داده نشده است) بر تغییرات رطوبت محصول را دارد.



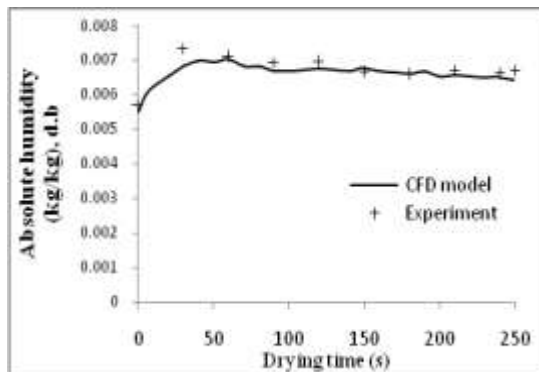
شکل 3. تغییرات دمای گاز در طول زمان خشک شدن در دانسیته توان مایکروویو 3/20 W/g. شکل 2. تغییرات رطوبت فاز جامد در طول زمان خشک شدن در دمای 40 °C.

تغییرات دمای هوای خشک کننده در طول زمان خشک شدن مواد در شکل 3 و 4 نشان داده شده است. دمای گاز در ابتدای زمان خشک شدن مواد در اثر تماس با دانه های س و یا که دارای دمای اولیه 25 °C هستند، کاهش می یابد. سپس به دلیل تولید انرژی گرمایی درون دانه ها در اثر تابش امواج مایکروویو دمای هوای خروجی بالا تر از دمای هوای ورودی به بستر می شود.

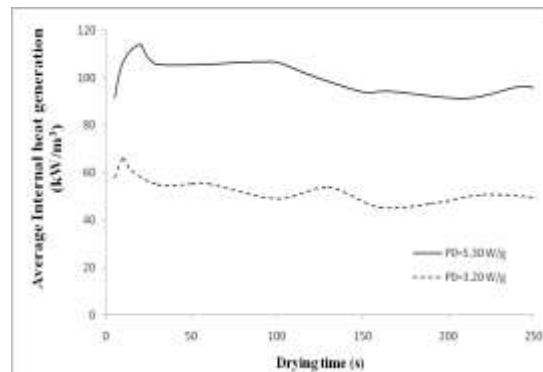


شکل 4. کارتور تغییرات دمای گاز در طول زمان خشک شدن در دانسیته توان مایکروویو 3/20 W/g.

تغییرات رطوبت مطلق گاز خشک کننده در طول زمان خشک کردن در شکل 5 نشان داده شده است. رطوبت مطلق گاز خروجی در ابتدا در اثر تبخیر رطوبت فاز جامد، افزایش می یابد.



شکل 5. تغییرات رطوبت مطلق گاز در طول زمان خشک شدن در شرایط ،  $40^{\circ}\text{C}$ -5/30 W/g



شکل 6. تغییرات انرژی درونی تولید شده درون فاز جامد در  $40^{\circ}\text{C}$

در شکل 6 تغییرات متوسط انرژی درونی تولید شده درون فاز جامد در اثر تابش امواج مایکروویو، پیش بینی شده توسط مدل، نشان داده شده است. انرژی درونی تولید شده درون فاز جامد با کاهش رطوبت آن در طول زمان خشک شدن، کاهش می یابد. با توجه به قابلیت های این مدل می توان گفت که از آن می توان برای طراحی خشک کن های بستر سیال-مایکروویو در مقیاس های بزرگتر استفاده نمود.

## منابع

- Gidaspow, D. *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions*. Academic Press, San Diego (1994).
- Gunn, D.J. "Transfer of heat and mass to particles in fixed and fluidized beds." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 21, 467-476 (1978).
- Lun, C.K.K., Savage, S.B., Jeffrey, D.J. and Chepur, N. Theories for granular flow: inelastic particles in coquette flow and slightly inelastic particles in a general flow field. *Journal of Fluid Mechanics*. 140, 223-256 (1984).
- Ranjbaran M, Zare D. CFD modeling of microwave-assisted fluidized bed drying of moist particles using two-fluid model. *Drying Technology* 30 (4): 362-376, (2012).
- Shirkole, S.S., Kenghe, R.N. and Nimkar, P.M. Moisture dependent physical properties of soybean. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 3 (5), 3807-3815 (2011).
- Sun, D.W. *Thermal Food Processing New Technologies and Quality Issues*, Tylor and Franics, Boca Raton, (2006).
- Szafran, R.G. and Kmiec, A. CFD modeling of heat and mass transfer in a spouted bed dryer. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 43, 1113-1124 (2004).
- Zare D, Ranjbaran M. Simulation and validation of microwave-assisted fluidized bed drying of soybean. *Drying Technology* 30 (3): 236-247 (2012)
- Zhonghua W. and Mujumdar, A.S. CFD modeling of gas-particle flow behavior in spouted beds. *Powder Technology*. 183, 260-272 (2008).