

تحلیل انرژی و رژی حرارت دهی بستر عمیق دانه های مرطوب بر پایه دینامیک سیالات

محاسباتی

محسن رنجبران^{۱*}، باقر عمادی^۱، داریوش زارع^۲

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، کد پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، مشهد، ایران

۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز، کد پستی ۷۱۴۴۹۴۸۹۷۴، شیراز، ایران

چکیده

در این تحقیق از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) جهت شبیه سازی سه بعدی حرارت دهی شلتوک در یک خشک کن ستر عمیق استفاده شد. نتایج شبیه سازی پارامتر های خشک شدن با داده های تجربی اعتبار سنجی شدند. مقادیر انحراف نسبی میانگین برای پیش بینی رطوبت محصول، دما و رطوبت مطلق هوا به ترتیب کمتر از ۶، ۱۰ و ۹٪ بودند که نشان دهنده دقت مناسب شبیه سازی است. این نتایج جهت پیش بینی عملکرد ترمودینامیکی خشک شدن بستر عمیق دانه های شلتوک مورد استفاده قرار گرفتند. تاثیر دما و نرخ جریان جرمی هوای ورودی بر راندمان انرژی و انرژی فرایند خشک شدن مورد بررسی قرار گرفت.

کلید واژه ها: خشک کردن بستر عمیق، شلتوک، دینامیک سیالات محاسباتی، انرژی، انرژی

مقدمه

خشک کردن فرایند مهمی است که جهت نگهداری مواد غذایی و کشاورزی به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد. این فرایند می تواند مدت زمان نگهداری محصولات را افزایش دهد. از دیدگاه انرژی مصرفی، این فرایند یکی از پر مصرف ترین فرایندهای موجود می باشد. بر اساس (Dincer (2011 صنعت خشک کردن را می توان به عنوان قلب سامانه های صنعتی در نظر گرفت. از این رو فرایند خشک کردن تاکنون به طور گسترده ای مورد توجه محققان بوده است. برنج یکی از مهمترین منابع غذایی انسان است. کیفیت شلتوک در حین انبارداری بیشتر وابسته به سطح رطوبت آن است. از فناوری های مختلف خشک کردن جهت کاهش سطح رطوبت شلتوک و افزایش عمر انبارداری آن استفاده می شود. یکی از متداول ترین این روش ها، روش خشک کردن بستر عمیق شلتوک می باشد که می تواند هم بوسیله خشک کن های صنعتی و هم درون انبار ها و سیلو ها اجرا گردد.



شبیه سازی کامپیوتری روشی ارزان قیمت جهت دسترسی به اطلاعات دقیق و کاربردی از انواع فرایندهای موجود در صنعت غذا می باشد. این روش می تواند منجر به صرفه جویی های کلان در مصرف انرژی و زمان گردد. در این میان دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به عنوان ابزاری قدرتمند در مدیریت سیستم های غذایی می تواند بکار برده شود. کاربرد های دینامیک سیالات محاسباتی در سیستم ها و فرایندهای خشک کردن توسط (Jamaleddine and Ray (2010 مورد مطالعه دوره ای قرار گرفت. اگرچه نرم افزار های تجاری متعددی مانند Fluent و CFX جهت شبیه سازی های سیستم های سیال موجود هستند، محیط استاندارد این نرم افزار ها به طور کامل قابلیت رفع نیاز های مهندسان بیوسیستم را ندارند؛ بدین معنی که یک سری کد برنامه های تکمیلی جهت تجهیز این نرم افزار ها در این زمینه مورد نیاز هستند.

تحقیقات زیادی در زمینه شبیه سازی عددی خشک کردن بستر عمیق دانه های مرطوب صورت گرفته اند (Zare and Chen, 2009)، هرچند، اغلب مدل های ارائه شده یک بعدی بوده و توانایی شبیه سازی خشک کن هایی با هندسه دلخواه را ندارند. این موضوع قابلیت کاربردی بودن آن ها را کاهش می دهد. در زمینه تحلیل انرژی و انرژی فرایند های خشک کردن تحقیقات متعددی در منابع علمی به چشم می خورد (Dincer and Sahin, 2004; Aghbashlo *et al.*, 2013; Icier *et al.*, 2010). هرچند، در این میان محققان اندکی به تحلیل بر پایه شبیه سازی عددی روی آورده اند (Amantéa *et al.*, 2013; Ranjbaran and Zare, 2013).

هدف این مقاله ارائه یک مدل کاربردی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی جهت پیش بینی فرایند و عملکرد حرارت دهی دانه های مرطوب در خشک کن های بستر عمیق با هندسه دلخواه است. پارامتر های پیش بینی شده بوسیله داده های تجربی حاصل از خشک کردن بستر عمیق شلتوک (Zare, 2006) اعتبار سنجی شدند. همچنین کد برنامه های مورد نیاز جهت شبیه سازی سیستم های حرارت دهی بستر عمیق توسط نرم افزار تجاری Fluent فراهم آمده است.

معادلات حاکم

در این تحقیق توده های مرطوب به عنوان یک محیط متخلخل در نظر گرفته شد و فرض گردید که دانه ها و هوای خشک کننده در تعادل دمایی با هم هستند. معادلات حاکم بر جریان هوا، انتقال حرارت و رطوبت درون بستر در جدول ۱ آمده است.



جدول ۱. معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت و رطوبت

شماره	توضیحات	رابطه
۱	معادله پیوستگی	$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \vec{u}) = 0$
۲	معادله ممنتوم	$\frac{\partial (\rho_a \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho_a \vec{g} + S_m$
۳	معادله انرژی	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_a \varepsilon I_a + \rho_s (1 - \varepsilon) I_s) + \nabla \cdot (\rho_a \vec{u} (I_a + w I_v)) = k_{eff} \nabla^2 T + S_h$
۴	معادله انتقال رطوبت	$\frac{\partial (\rho_a w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \vec{u} w) = \nabla \cdot (\rho_a D_{eff} \nabla w) + S_w$

جهت گسسته سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شد. در این روش دامنه حل به تعداد زیادی سلول تقسیم بندی می شود و از معادلات حاکم در حجم هر سلول انتگرال گیری می شود. جزئیات مربوط به این روش را می توان در Versteeg and Malalasekera (2007) and دنبال نمود. جهت مدل سازی افت فشار ناشی از توده دانه ها در برابر هوای خشک کننده در جهت عمود از رابطه زیر استفاده شد (Hunter, 1983):

$$\frac{dP}{dy} = -Rv - Sv^2 \quad (1)$$

که ضرایب R و S وابسته به نوع دانه هستند. مقادیر این پارامترها برای شلتوک، به ترتیب، 1952 Pa.s/m^2 و $\text{Pa.s}^2/\text{m}^3$ می باشند. با توجه به گزارش (ASABE, 2007)، افت فشار در جهت افقی را می توان به اندازه ۷۰٪ از افت فشار در جهت عمودی در نظر گرفت. این روش منجر به شبیه سازی افت فشار درون بستر به صورت غیر ایزوتروپیک می شود. دانه های مرطوب به عنوان چشمه های رطوبتی برای هوای موجود درون بستر در نظر گرفته شدند. ترم چشمه رطوبتی ناشی از تبخیر از سطح دانه های مرطوب به صورت زیر نوشته می شود (Ranjbaran and Zare, 2012):

$$S_w = -(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2)$$

به طوری که (ASABE, 2006; Zare and Chen, 2009)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \left(\frac{1}{3600} \right) (M - M_e) \left(-k n \left(\frac{t}{3600} \right)^{n-1} \right) \quad (3)$$

$$k = 0.02958 - 0.4456 RH + 0.01215 (T - 273.15)$$

$$n = 0.13365 + 1.93653 RH - 1.77431 RH^2 + 0.009468 (T - 273.15)$$

$$M_e = 0.001 \left(\frac{A}{B} \right)^c \quad (4)$$



$$A = -\ln(1 - RH) T, B = 2.667 \times 10^{-7} \left(1 - \frac{T}{641.7}\right)^{-23.438}, C = \frac{1}{4.0E5(T)^{-2.1166}}$$

جهت در نظر گیری پدیده خنک سازی ناشی از تبخیر سطحی، ترم چشمه انرژی در معادله بقای انرژی به صورت زیر تعریف

شد:

$$S_h = (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} \quad (5)$$

ویژگی های ترموفیزیکی مربوط به شلتوک، هوا، بخار و آب در منابع علمی گزارش شده اند (Meeso et al. 2007;)

(Zare and Ranjbaran, 2012).

از نتایج بدست آمده از شبیه سازی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می توان به طور موثری جهت تحلیل ترمودینامیکی فرایند استفاده نمود. اینگونه تحلیل ها به مهندسان در جهت فهم بهتر فرایند حرارت دهی بستر عمیق کمک می کند. نتایج بدست آمده از شبیه سازی عملکرد فرایند را می توان جهت طراحی، مدیریت و کنترل انواع سیستم های خشک کن بستر عمیق و سیلو های غلات مورد استفاده قرار داد.

راندمان انرژی و اگرژی خشک کردن بستر عمیق توسط به صورت زیر محاسبه شد:

$$\eta_e = \frac{\sum_{i=1}^N (S_h \delta V)_i}{\dot{m}_a (C_{pa} + w C_{pv}) (T_{a,in} - T_0)} \quad (6)$$

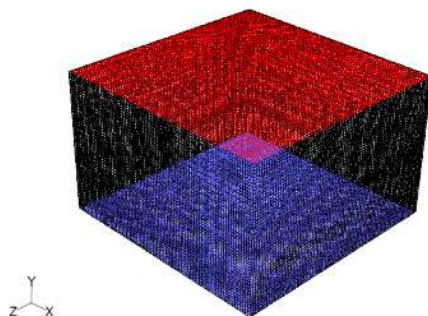
$$\eta_{ex} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) S_h \delta V \right)_i}{\dot{m} (C_{pa} + w C_{pv}) \left(T_{a,in} - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right)} \quad (7)$$

روش شبیه سازی

جهت ایجاد شبکه سه بعدی حل (۲۵ × ۴۰ × ۴۰ cm)، از نرم افزار تولید شبکه GAMBIT استفاده شد. جهت دستیابی به یک حل مستقل از شبکه چندین شبکه سازمان یافته با وضوح متفاوت برای شبیه سازی جریان سیال مورد استفاده قرار گرفتند. پس از تکمیل فرایند مطالعه شبکه، درشت ترین شبکه ای (۵۰ × ۸۰ × ۸۰، شکل ۱) که منجر به حل مستقل از شبکه گردید برای اج ای شبیه سازی فرایند خشک کردن مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به گزارش (Ranjbaran and Zare (2013) مقادیر ضریب رعنایی و نرخ رشد سلولی بهتر است که به ترتیب کمتر از ۵ و ۱/۱ در نظر گرفته شود. در این شبیه سازی بیشینه مقادیر پارامتر های فوق به ترتیب ۳ و ۱ بودند. مقدار گام زمانی با توجه به مقدار مناسب عدد کورنت (Ranjbaran and Zare, 2012) برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. جهت در نظر گیری معادله انتقال رطوبت در مدل، یک معادله انتقال اسکالر جدید در فضای نرم افزار Fluent فعال شد. جهت بروز رسانی رطوبت محصول در حین حل مساله، محاسبه ویژگی های وابسته به رطوبت محصول در طول زمان،



محاسبه ترم های چشمه رطوبت و انرژی و محاسبه پارامتر های عملکرد، یک کد برنامه به زبان C نوشته و به محیط استاندارد نرم افزار اضافه گردید. ماکرو های مورد نیاز برای نوشتن اینچنین کد برنامه ای جهت شبیه سازی حرارت دهی بستر عمیق دانه های مرطوب و متن کامل کد برنامه در (Ranjbaran et al (2013) آمده است.



شکل ۱. شبکه سازمان یافته میدان حل

اعتبار سنجی تجربی

نتایج شبیه سازی تحت شرایط مختلف خشک کردن با استفاده از داده های تجربی فراهم شده توسط Zare (2006) اعتبار سنجی شد. فهرست شرایط مختلف حرارت دهی بستر عمیق شلتوک در جدول ۲ آمده است. جزئیات مربوط به روش های آزمایش، دستگاه خشک کن، ابزار های اندازه گیری در (Zare and Chen (2009) آمده است. جهت مقایسه داده های پیش بینی شده توسط مدل و داده های تجربی، مقدار انحراف نسبی میانگین (MRD) برای هر حالت خشک کردن محاسبه شد.

$$MRD = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\phi_{exp,j} - \phi_{pre,j}}{\phi_{exp,j}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \times 100 \quad (8)$$

نتایج و بحث

اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی

نتایج آزمون های اعتبار سنجی برای پیش بینی پارامتر های مختلف خشک کردن در جدول ۳ آمده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار MRD برای پیش بینی محتوی رطوبتی دانه ها، دما و رطوبت مطلق هوای خشک کننده در حین حرارت دهی به ترتیب کمتر از ۶، ۱۰ و ۹٪ است. شکل ۲ روند پیش بینی شده و تجربی این پارامتر ها را در طول زمان حرارت دهی نشان می دهد. نتایج نشان داد که این مدل توانایی خوبی در شبیه سازی فرایند خشک شدن بستر عمیق دانه های مرطوب دارد.



جدول ۲. شرایط مختلف آزمایش های خشک کردن بستر عمیق شلتوک (Zare, 2006)

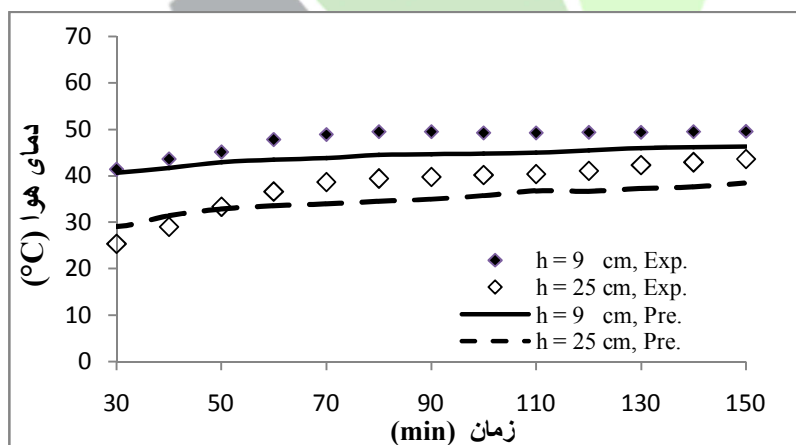
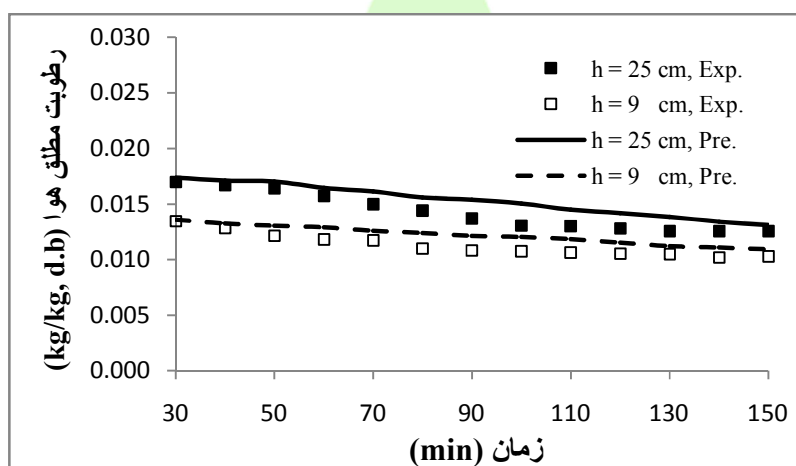
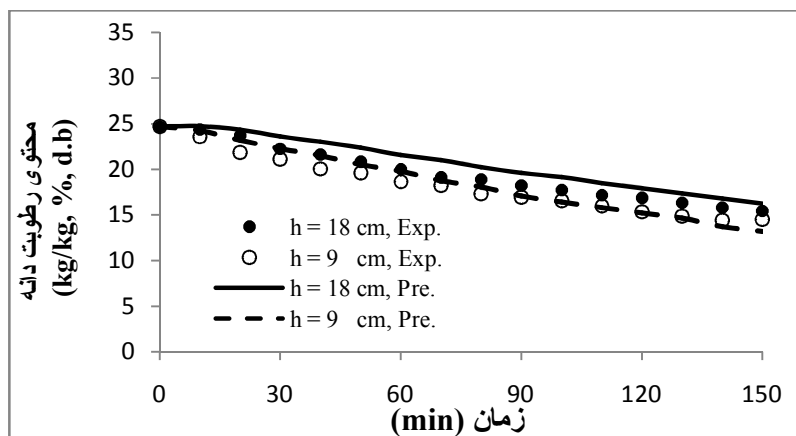
شماره	رطوبت اولیه دانه، d.b (kg/kg)	دمای هوای ورودی (°C)	نرخ جریان جرمی هوای ورودی (kg/m ² .s)	رطوبت مطلق هوای ورودی d.b (kg/kg)	دمای محیط مرجع (°C)	عمق بستر (cm)
۱	۰/۲۵۸۷	۴۵	۰/۲۲	۰/۰۱	۲۷	۲۵
۲	۰/۲۵۸۷	۵۰	۰/۲۲	۰/۰۱	۲۷	۲۵
۳	۰/۲۵۵۷	۵۰	۰/۱۰	۰/۰۱	۲۷	۲۵

جدول ۳. نتایج اعتبارسنجی شبیه سازی

شماره	MRD (%)							
	رطوبت محصول (kg/kg, d.b)			دمای هوای ورودی (K)		رطوبت مطلق هوا (kg/kg, d.b)		
	عمق ۹ cm	عمق ۱۸ cm	عمق ۹ cm	عمق ۱۸ cm	عمق ۹ cm	عمق ۱۸ cm	عمق ۹ cm	عمق ۲۵ cm
۱	۴/۴۲	۴/۲۵	۸/۱۳	۸/۶۵	۸/۲۷	۷/۴۲	۷/۲۰	۷/۶۱
۲	۳/۹۳	۵/۸۷	۷/۵۲	۸/۷۹	۸/۵۴	۸/۰۹	۸/۴۷	۷/۳۴
۳	۵/۰۳	۵/۲۱	۹/۳۲	۸/۴۵	۶/۱۵	۷/۲۳	۸/۱۱	۷/۰۱

شبیه سازی فرایند خشک شدن

کانتور تغییرات رطوبت شلتوک در حین شرایط مختلف حرارت دهی در شکل ۳ آمده است. با استفاده از این کانتور های می توان تاثیر شرایط کاری مانند سطح دما و نرخ جریان جرمی هوای ورودی را بر فرایند خشک شدن مواد بررسی نمود. نتایج پیش بینی نشان می دهند که دفع رطوبت در خشک کردن بستر عمیق دانه های مرطوب بیشتر از دمای هوا متاثر از نرخ جریان جرمی هوای خشک کننده می باشد.

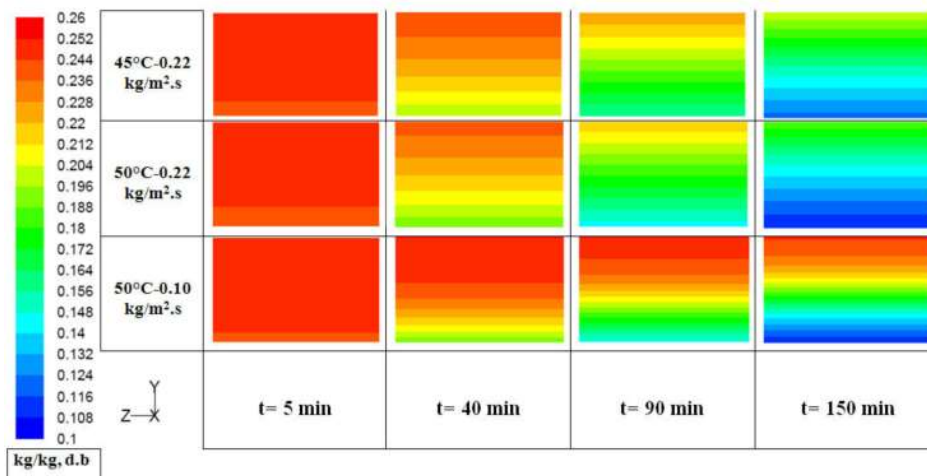


شکل ۲. روند پیش بینی شده و تجربی محتوی رطوبتی دانه ها، دما و رطوبت مطلق هوای خشک کننده در حین حرارت دهی در

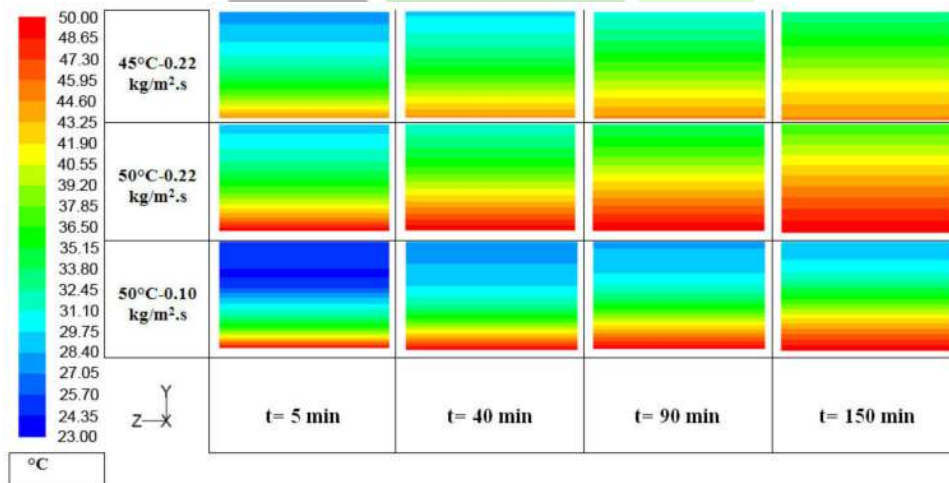
دمای 50°C و نرخ جریان جرمی $0.22 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$.



در شکل ۴ و شکل ۵ به ترتیب کانتور های دما و رطوبت مطلق هوا در حین حرارت دهی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، این مدل به خوبی پدیده خنک سازی تبخیری را شبیه سازی نموده است. نرخ تبادل رطوبت از دانه های مرطوب به هوای خشک کننده در طول عمق بستر در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رود در ابتدای فرایند خشک کردن، دانه هایی که در نواحی بالایی بستر قرار دارند ممکن است رطوبت گیرند. این پدیده به خوبی توسط مدل پیش بینی شده است.



شکل ۳. کانتور تغییرات رطوبت شلتوک در حین شرایط مختلف حرارت دهی.

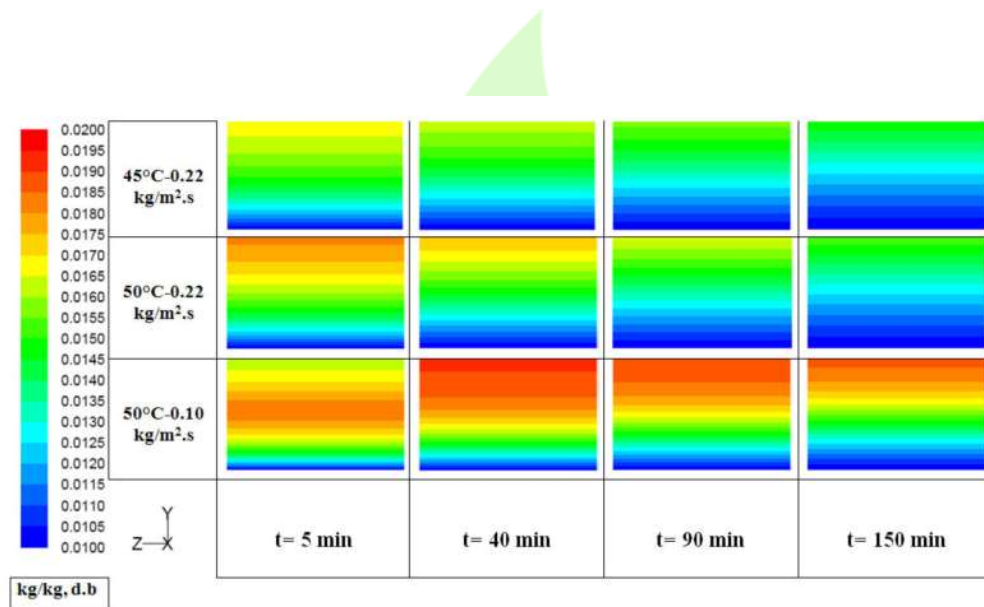


شکل ۴. کانتور تغییرات دمای هوا در حین شرایط مختلف حرارت دهی.

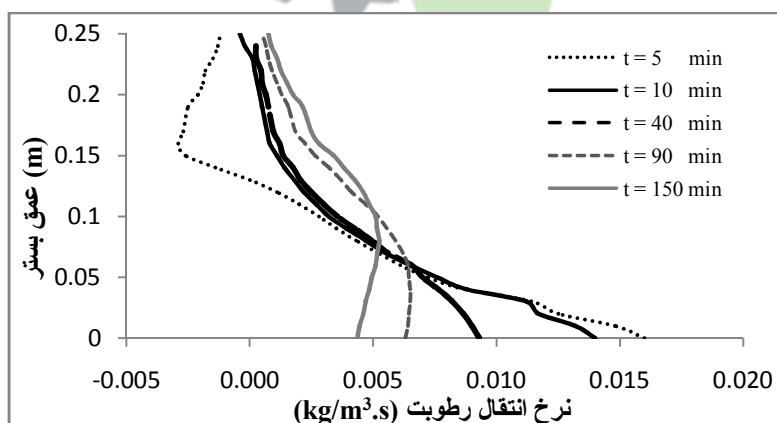


تحلیل عملکرد

از نتایج شبیه سازی محتوی رطوبتی دانه ها، دما و رطوبت مطلق هوای خشک کننده می توان جهت محاسبه پارامترها عملکرد فرایند خشک کردن استفاده نمود. شکل ۷ تغییرات راندمان انرژی و انرژی را برای دو سطح مختلف از دمای هوای ورودی نشان می دهد. چون دمای محصول در شروع فرایند خشک کردن کمتر از دمای هوای محیط مرجع بود، مقدار راندمان انرژی منفی محاسبه شده است.



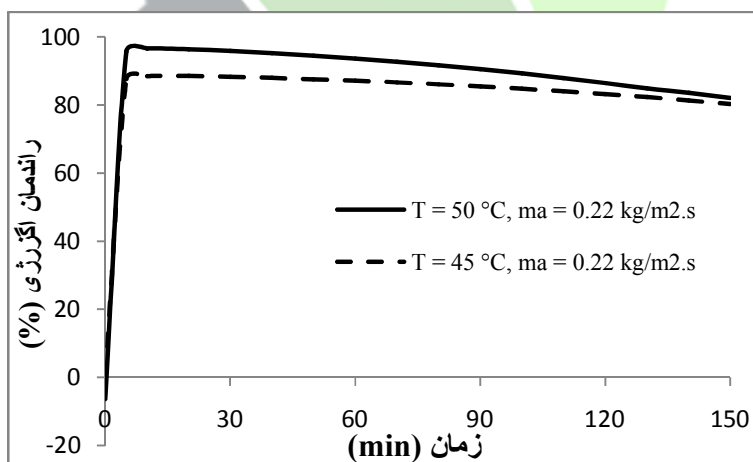
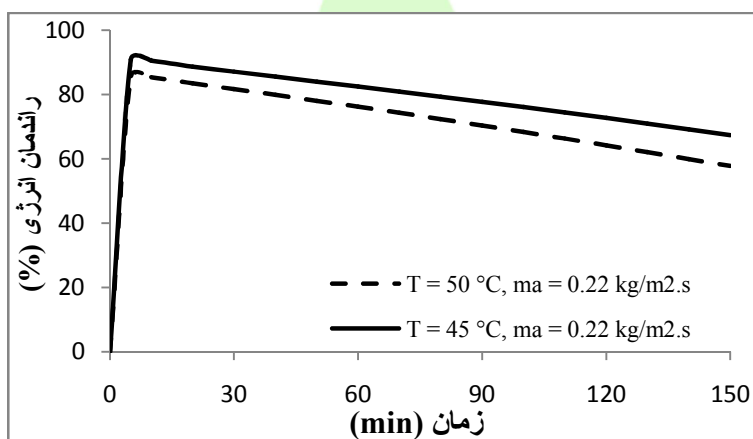
شکل ۵. کانتور تغییرات رطوبت مطلق هوا در حین شرایط مختلف حرارت دهی.



شکل ۶. نرخ تبادل رطوبت از دانه های مرطوب به هوای خشک کننده.



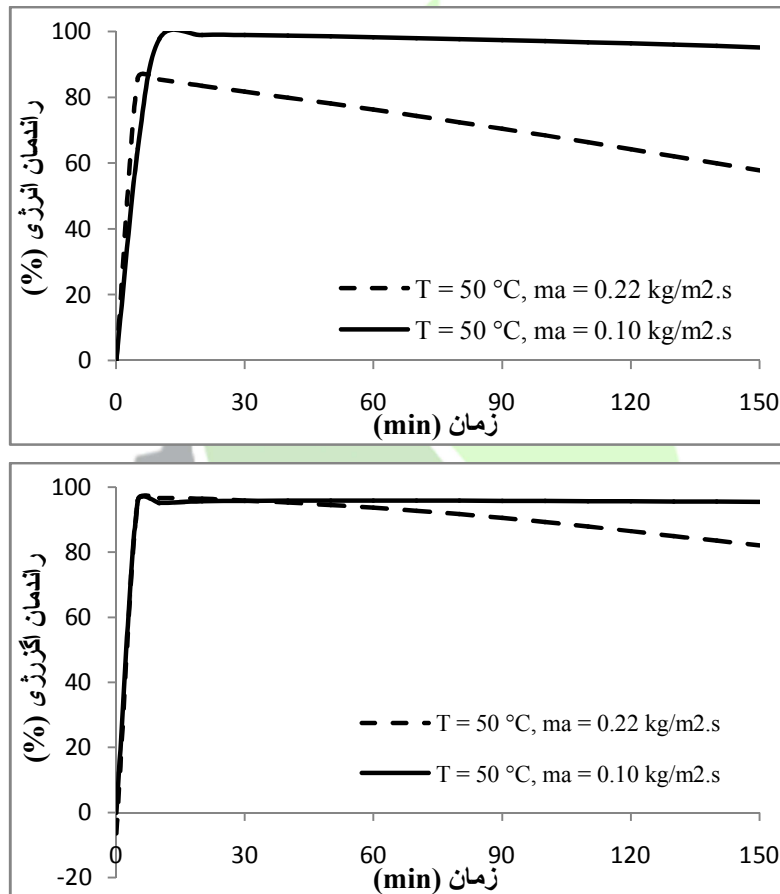
بر اساس گزارش Ranjbaran and Zare (2013) بکارگیری قوانین اول و دوم ترمودینامیک جهت تعیین عملکرد فرایند های خشک کردن ممکن است به نتایج متفاوتی منجر گردد. نتایج نشان داد که بر اساس قانون اول ترمودینامیک، بکارگیری سطح بالاتر دمای هوای ورودی منجر به راندمان انرژی کمتری شد. در حالی که راندمان انرژی برای سطوح بالاتر دمای هوای ورودی دارای مقدار بیشتری است. اینچنین نتایجی توسط Amantéa et al (2013) نیز گزارش شده است. تغییرات راندمان انرژی و انرژی خشک کردن بستر عمیق شلتوک برای دو سطح مختلف نرخ جریان جرمی هوای ورودی در شکل ۸ نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می شود بکارگیری سطوح پایین تر نرخ جریان جرمی موجب دستیابی به راندمان های بالاتر می گردد.



شکل ۷. تغییرات راندمان انرژی و انرژی خشک کردن در نرخ جریان جرمی $0.22 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$.



هرچند، بکارگیری سطوح پایین نرخ جریان جرمی هوای ورودی در خشک کن‌های صنعتی بستر عمیق و انبارهای غلات ممکن است منجر به افزایش بی‌رویه رطوبت مطلق هوای بین دانه‌ها گردد. این موضوع می‌تواند خطر رشد کپک و باکتری‌های تنزل‌دهنده کیفیت دانه‌ها را افزایش دهد. بنابراین در هنگام تعیین شرایط حرارت دهی بهینه، علاوه بر مسائل مربوط به مصرف انرژی، کیفیت نهایی محصول نیز باید مد نظر قرار گیرد.



شکل ۸. تغییرات راندمان انرژی و انرژی در نرخ جریان جرمی $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

نتیجه گیری

در این تحقیق توانایی نرم افزار تجاری Fluent جهت بکارگیری در زمینه شبیه سازی فرایند و عملکرد حرارت دهی بستر عمیق دانه های مرطوب ارتقاء داده شد. در این راستا یک کد برنامه به زبان C جهت معرفی و بروز رسانی رطوبت محصول و محاسبه پارامترهای وابسته به رطوبت نوشته شد. نتایج اعتبار سنجی مدل ارائه شده نشان داد که این مدل دارای توانایی بالایی در شبیه سازی



رطوبت محصول، دما و رطوبت مطلق هوای خشک کننده در طول زمان حرارت دهی به ترتیب با خطایی کمتر از ۶، ۱۰ و ۹٪ نسبت به داده های تجربی بود. مهندسان بیوسیستم می توانند این مدل را به طور موثری برای شبیه سازی فرایند و تحلیل انرژی و انرژی و انرژی در حرارت دهی بستر عمیق دانه های مرطوب (دستگاه های خشک کن صنعتی و انبار های غلات) بکار برند.

فهرست علائم اختصاری

زمان، S	t	ظرفیت گرمایی ویژه هوا، J/kg.K	C_{pa}
دما، K	T	ظرفیت گرمایی ویژه بخار، J/kg.K	C_{pv}
دمای محیط مرجع، K	T_0	ضریب نفوذ موثر رطوبت، m^2/s	D_{eff}
بردار سرعت هوا، m/s	\vec{u}	گرمای نهان تبخیر آب، J/kg	h_{fg}
مولفه بردار سرعت در راستای عمود، m/s	v	انتالپی هوا، J/kg	I_a
رطوبت، kg/kg, d.b	w	انتالپی بخار، J/kg	I_v
حجم هر سلول حل، m^3	δV	هدایت پذیری گرمایی موثر، W/m.K	k_{eff}
تخلخل بستر	ε	رطوبت دانه، kg/kg, d.b	M
دانسیته هوا، kg/m^3	ρ_a	رطوبت تعادلی دانه، kg/kg, d.b	M_e
دانسیته دانه، kg/m^3	ρ_s	نرخ جریان جرمی هوا، kg/s	\dot{m}
تانسور تنش رینولدز	$\bar{\tau}$	فشار، Pa	P

منابع

- 1- Aghbashlo, M., M.H. Kianmehr, and A. Arabhosseini. 2008. Energy and exergy analyses of thin-layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer. Drying Technology 26, 1501-1508.
- 2- Amantéa, R.P., M. Fortes, J.H. Martins, and W.R. Ferreira. 2013. Numerical Simulation Techniques for Optimizing Thermodynamic Efficiencies of Cereal Grain Dryers. Drying Technology 31, 672-683.

- 3- American Society of Agricultural and Biological Engineers. Resistance to Airflow of Grains, Seeds, Other Agricultural Products, and Perforated Metal Sheets. D272.3, St Joseph, MI: ASABE; 2007.
- 4- American Society of Agricultural and Biological Engineers. Thin-layer drying of agricultural crops. S448.1, St Joseph, MI: ASABE; 2006.
- 5- Dincer, I. 2011. Exergy as a potential tool for sustainable drying systems. Sustain Cities Soc, 1, 91-96.
- 6- Dincer, I., and A.Z. Sahin. 2004. A new model of thermodynamic analysis of a drying process. International Journal of Heat and Mass Transfer 47, 645-652.
- 7- Hunter, A.J. 1983. Pressure Difference across an Aerated Seed Bulk for some Common Duct and Store Cross-sections. Journal of Agricultural Engineering Research 28, 437-450.
- 8- Icier, F., N. Colak, Z. Erbay, E.H. Kuzgunkaya, and A., Hepbasli. 2010. A comparative study on exergetic performance assessment for drying of broccoli florets in three different drying systems. Drying Technology 28, 193-204.
- 9- Jamaledine, T.J., and M.B., Ray. 2010. Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes: A review. Drying Technology 28, 120-154.
- 10- Meeso, N., A. Nathakaranakule, T. Madhiyanon, S. Soponronnarit. 2007. Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process. Journal of Food Engineering 78, 1248-1258.
- 11- Ranjbaran, M., and D. Zare. 2012. CFD modeling of microwave-assisted fluidized bed drying of moist particles using two-fluid model. Drying Technology 30 (4), 362-376.
- 12- Ranjbaran, M., B. Emadi, and D., Zare. 2014. CFD simulation of deep-bed paddy drying process and performance. Drying Technology. In Press.
- 13- Ranjbaran, M., and D. Zare. 2013. Simulation of energetic- and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. Energy 59, 484-493.
- 14- Versteeg, H.K., W. Malalasekera. 2007. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2th Ed. Pearson Education Limited. England.
- 15- Zare D. 2006. Computer simulation of rough rice drying in a deep bed batch dryer. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.



16- Zare, D., and G. Chen. 2009. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. *International Journal of Computers and Electronics in Agriculture* 68, 78-87.

17- Zare, D., and M. Ranjbaran. 2012. Simulation and validation of microwave-assisted fluidized bed drying of soybean. *Drying Technology* 30 (3), 236-247.





CFD-based energy and exergy analysis in hot-air heating of deep-bed of moist grains

Mohsen Ranjbaran^{1*}, Bagher Emadi¹, Dariush Zare²

1. Biosystems Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Biosystems Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Abstract

In the present study the Computational Fluid Dynamics (CFD) was applied to simulate three-dimensionally hot-air heating process of paddy in a deep-bed grain dryer. The simulation results were validated against experimental data. The values of Mean Relative Deviations for the prediction of grain moisture content, air temperature and absolute humidity were less than 6, 10 and 9 %, respectively, which reflect a reasonable accuracy. These results were used to simulate the thermodynamic performance parameters of deep-bed paddy drying. The effects of inlet air temperature and absolute humidity on the energy and exergy efficiencies were investigated.

Keywords: Deep-bed drying, paddy, Computational Fluid Dynamics, energy, exergy.