

شبیه سازی فرآیند خشک شدن شلتوک در یک خشک کن آزمایشگاهی سترسیال - فراصوت به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

داریوش زارع^{۱*}، امیر احمد طیبی خرمی^۱، عطاالله ربیعی^۲

۱. بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران dzare@shirazu.ac.ir
۲. بخش حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران rabiee@shirazu.ac.ir

چکیده

ترکیب خشک کن بستر سیال با فراصوت توان بالا می تواند بسیاری از تنش های حرارتی را روی محصول های حساس به تنش های حرارتی کاهش داده و درصد تلفات آن را در هنگام خشک شدن به حداقل برساند. در این تحقیق مدلی ریاضی برای تغییرات رطوبت دانه شلتوک جهت پیش بینی و شبیه سازی رفتار خشک کن بستر سیال فراصوت بر پایه دینامیک محاسبات سیالاتی CFD ارائه شد. مدل ارائه شده با استفاده از روش دو سیالی اویلری-اویلری TFM و در نرم افزار 18 Fluent محاسبه گردید. این مدل با استفاده از داده های آزمایشگاهی متعدد که از خشک شدن شلتوک در یک خشک کن بستر سیال فراصوت جمع آوری شده بود مورد ارزیابی قرار گرفت. برآورد اعتبار سنجی ها نشان داد که مدل ارائه شده قادر است روند تغییرات رطوبت محصول را در یک خشک کن بستر سیال فراصوت، با خطای کمتر از ۴ درصد پیش بینی کند. در این تحقیق نیز با استفاده از کدهای برنامه نویسی UDF به زبان C و اتصال آن به نرم افزار Fluent توانایی این نرم افزار در حل معادلات و پیش بینی رطوبت محصول بسط داده شد. همچنین در این پژوهش داده های حاصل از نرم افزار Fluent بخوبی نشان دهنده ی توانایی بالای این نرم افزار در پیش بینی جریانات سیال و حل معادلات آن دارد که کاربر می تواند به راحتی هیدرودینامیک خشک کن بستر سیال را مورد ارزیابی قرار دهد.

کلمات کلیدی:

دینامیک محاسبات سیالاتی، خشک کن بستر سیال فراصوت، مدل دو سیالی اویلری-اویلری

*نویسنده مسئول

شبیه سازی فرآیند خشک شدن شلتوک در یک خشک کن آزمایشگاهی بسترسیال - فراصوت به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

مقدمه

یکی از پر کاربرد ترین روش ها برای خشک کردن مواد گرانوله مرطوب استفاده از خشک کن های بستر سیال است. در این سیستم به دلیل معلق بودن مواد در هوای گرم خشک کننده و بالا بودن سطح تماس بین دانه ها و گاز، همه مواد دانه ای تقریباً به طور یکنواختی خشک می شوند. این نوع خشک کن ها نیازمند به مصرف انرژی زیادی جهت بالا بردن سرعت هوا و معلق نگه داشتن مواد درون بستر خشک کن، هستند. مهمترین عیب این سیستم ها طولانی بودن زمان خشک شدن محصول است و این موجب کاهش راندمان حرارتی آن ها می گردد. تا کنون تحقیقات بسیاری در راستای بهینه سازی این سیستم ها در جهت کاهش مصرف انرژی صورت گرفته است [10,16,12]. برای بالا بردن راندمان حرارتی این نوع خشک کن ها روش های مختلفی تا کنون به کار رفته است. بالا بردن دمای هوای خشک کننده در ابتدای فرآیند خشک کردن و کاهش تدریجی آن تا رسیدن به دمای مطلوب خشک کردن و گردش دوباره بخشی از هوای گرم خروجی به درون بستر خشک کننده از جمله روشهایی است که موجب بالا رفتن راندمان حرارتی سیستم می گردد. در سال ۲۰۱۲ رنجبران و زارع [12] نشان دادند که با مجهز کردن خشک کن های بستر سیال به تجهیزات تابش مایکروویو زمان خشک شدن کاهش می یابد. اما این روش برای محصولات حساس به گرما به دلیل افزایش دمای داخلی محصول مناسب نیست.

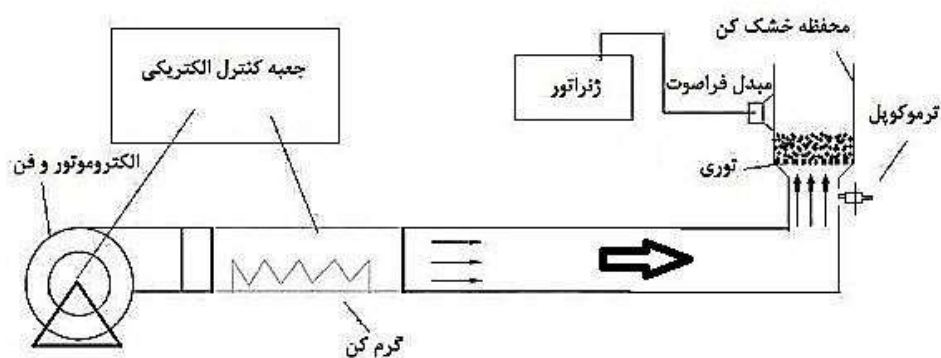
در تحقیقی دیگر با تعبیه تجهیزات فراصوت توان بالا در خشک کن بستر سیال امکان کاهش دمای داخلی محصول و افزایش راندمان خشک شدن شد. پدیده های بسیاری ممکن است از انتشار یک موج فراصوت در سیالات و بخصوص محیط های مایع ایجاد شود. دو مورد از مهمترین پدیده هایی که کمک زیادی به انتقال حرارت می کنند کاویتاسیون های صوتی و جریان های صوتی می باشند [2,11]. امواج فراصوت در محدوده متوسط ۱۰۰ کیلو هرتز تا ۱ مگاهرتز به عنوان فراصوت توان بالا تعریف می شود.

در این تحقیق مدلی ریاضی برای تعیین تغییرات رطوبت دانه شلتوک جهت پیش بینی و شبیه سازی رفتار خشک کن بستر سیال فراصوت بر پایه دینامیک محاسبات سیالاتی CFD ارائه شد. مدل ارائه شده با استفاده از روش دو سیالی اوپلری-اوپلری TFM و در نرم افزار 18 Fluent محاسبه گردید. این مدل با استفاده از داده های آزمایشگاهی متعدد که از خشک شدن شلتوک در یک خشک کن بستر سیال فراصوت جمع آوری شده بود مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش ها

محصول آزمایشی این پژوهش شلتوک رقم هاشمی است که از شمال ایران تهیه شده بود. قبل از شروع آزمایش ها ضمن تمیز کردن نوده های بذر، نمونه های پاک شده ی شلتوک در کیسه های نایلونی زیپ دار (زیپ کیپ) قرار داده می شد و سپس درون یخچال در دمای 4 ± 0.5 درجه سلسیوس درون یک یخچال به مدت ۷۲ ساعت نگه داری شد تا رطوبت کل نمونه ها به تعادل برسد [1].

خشک کن بستر سیال با محفظه ی خشک کن فراصوت توسط جعفری و زارع [5] طراحی و ساخته شد که طرح شماتیکی دستگاه در شکل (۱) مشاهده می شود. سرعت هوا به کمک فن گریز از مرکز که موتور آن توسط یک مبدل^۱ (N50-007SF -Korea) کنترل می گردید، ایجاد شده و سرعت هوای عبوری توسط یک سرعت سنج (Testo 435-2) با دقت ± 0.3 متر بر ثانیه اندازه گیری شد. برای رسیدن به دمای داخلی مورد نظر از یک مجموعه ی گرمکن برقی که از واحدهای گرمایی ۱ و ۲ کیلووات و چهار واحد گرمایی ۰.۵ کیلووات تشکیل شده بود، استفاده شد. این مجموعه توسط یک کنترل کننده ی دما (SU-105IP, Samwon Engineering, Korea) که با یک ترموکوپل نوع K (K-type) با دقت ± 1 درجه سلسیوس تجهیز شده بود، کار می کرد. لوله ی انتقال دهنده ی دما دارای قطر داخلی ۱۱ سانتی متر و طول ۳ متر بود که به یک محفظه ی خشک کن وصل شده بود. رطوبت هوای محیط و هوای خشک کننده توسط دستگاه Testo 435-2 و پروب مخصوص آن اندازه گیری می شد. به منظور موثرتر کردن اثر فراصوت با شدت بالا از محفظه ی خشک کن بستر سیال آلومینیومی (قطر داخلی ۱۳۰ میلیمتر، حداکثر ارتفاع ۲۶۰ میلیمتر و دارای ضخامت ۱۰ میلیمتر) استفاده شد.



شکل (۱). شماتیک دستگاه خشک کن بستر سیال - فراصوت

1- Inverter

از یک ژنراتور توان بالا (UCE Ultrasonic PBC) ساخت کشور چین با ولتاژ ورودی 10 ± 220 ولت، توان حداکثر ۳۰۰ وات و بازه کنترل توان صفر تا ۱۰۰ درصد به منظور ایجاد فراصوت استفاده شد. این دستگاه قابلیت تولید جریان مناسب برای راه اندازی مبدل فراصوت توان بالا در سطوح مختلف توان را دارا بوده و امپدانس را به صورت اتوماتیک تنظیم می کند. از چهار مبدل فراصوت توان بالا برای تولید فراصوت استفاده گردید. مبدل های فراصوت توان بالا (PZT- 30kHz100W, PZT-8 20kHz100W PZT-8 25kHz100W, PZT-8 28kHz100W,) در چهار فرکانس (۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰ کیلوهرتز) تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. این مبدل ها به صورت تک به تک به ژنراتور متصل شده و جریان خروجی از ژنراتور را به امواج مافوق صوت تبدیل می کنند.

آزمایش های خشک کردن شلتوک در بستر سیال فراصوت در ۳ سطح دمای هوای ورودی ۳۰، ۴۰ و ۵۰، چهار سطح فرکانس ۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰ و سه سطح توان ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ انجام پذیرفت. آزمایش ها در سرعت هوای ثابت صورت گرفت و برای آزمایش از کمترین سرعت سیال سازی ($1/9 m/s$) قبل از ایجاد حباب در سطح بستر بکار گرفته شد.

برای تعیین رطوبت محصول بر اساس رطوبت اولیه در طول آزمایش بستر محصول در فواصل زمانی مشخصی توزین می شد. تمامی آزمایشها در رطوبت نهایی 13 ± 0.4 متوقف شده و محصول نهایی در کیسه های زیپ دار نایلونی قرار داده شد [5].

شبیه سازی خشک کن بستر سیال فراصوت بر پایه CFD

جهت مدل سازی این پژوهش با توجه به پژوهش های مشابه قبلی از مدل اویلری-اویلری TFM^2 استفاده شد. در این مدل هر دو فاز گاز و جامد به عنوان محیط های پیوسته و قابل نفوذ در یکدیگر فرض می شوند. برای مدل سازی این پژوهش دو دسته معادلات بقای جرم، ممتوم و انرژی در نظر گرفته شدند. همچنین برای کاهش قابل توجه زمان و هزینه محاسبات از مدل دوبعدی محور تقارنی^۳ استفاده شد. بر اساس گزارش سویسکی [13] نتایج شبیه سازی CFD بستر های سیال گاز-جامد در فضای دوبعدی 2D و سه بعدی 3D خیلی به یکدیگر شبیه است. بنابراین این مدل سازی دوبعدی به خوبی می تواند در شبیه سازی بستر های سیال گاز-جامد، به جای مدل های سه بعدی 3D به کار رود.

معادله بقای جرم برای فاز گازی و فاز جامد به صورت زیر است :

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (2)$$

² - Two Fluid Model

³ - Axisymmetric

در این معادلات \bar{v} بردار سرعت سیال، t زمان، ρ_s دانسیته فاز جامد، ρ_g دانسیته فاز گازی و α_s سهم حجمی^۴ فاز جامد و α_g سهم حجمی فاز گازی است که با رابطه زیر بیان می شود:

$$\alpha_g + \alpha_s = 1 \quad (۳)$$

معادله بقای ممتوم برای فاز گازی و فاز جامد عبارت است از :

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g \bar{v}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \bar{v}_g^2) = -\alpha_g \nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \bar{g} + K_{gs} \quad (۴)$$

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s \bar{v}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s^2) = -\alpha_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \bar{g} - K_{gs} \quad (۵)$$

در این روابط P و P_s به ترتیب نیروی مبادله شده بین فازها، فشار سیال و فشار ناشی از نوسانات فاز جامد و تصادم ذرات فاز جامد با هم است. فشار ناشی از نوسانات فاز جامد با استفاده از تئوری جنبشی جریان مواد گرانوله^۵ [10] محاسبه می شود. $\bar{\tau}$ تانسور تنش رینولدز^۶ است که بیانگر نیروهای وارده به سیال در اثر ویسکوزیته آن می باشد و g شتاب گرانش می باشد. در این تحقیق از مدل اغتشاش^۷ $k-\varepsilon$ Standard جهت محاسبه $\bar{\tau}_g$ در شبیه سازی اغتشاش سیستم های چند فازی استفاده شد. همچنین $\bar{\tau}_s$ با استفاده از تئوری جنبشی جریان مواد گرانوله محاسبه شد. رابطه کلی تانسور تنش رینولدز برای k امین فاز به صورت زیر است [13]:

$$\bar{\tau} = \alpha_k \mu_k (\nabla \bar{v}_k + \nabla \bar{v}_k^T) + \alpha_k \left(\lambda_k - \frac{2}{3} \mu_k \right) \nabla \cdot \bar{v}_k \bar{I} \quad (۶)$$

با در نظر گرفتن فاز جامد برای معادله بالا μ_s ویسکوزیته فاز جامد و λ_s ویسکوزیته حجمی فاز جامد است که با به کارگیری تئوری جنبشی جریان مواد دانه ای محاسبه می شوند. رابطه بقای انرژی فاز گاز و جامد به ترتیب عبارتند از [12]:

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g h_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \bar{v}_g h_g) = -\alpha_g \frac{\partial(P_g)}{\partial t} + \bar{\tau}_g : \nabla \bar{v}_g - \nabla \cdot \bar{q}_g + S_g + Q_{gs} \quad (۷)$$

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s h_s) = -\alpha_s \frac{\partial(P_s)}{\partial t} + \bar{\tau}_s : \nabla \bar{v}_s - \nabla \cdot \bar{q}_s + S_s - Q_{gs} \quad (۸)$$

در این رابطه h آنتالپی سیال، S نرم چشمه^۸ انرژی درون سیال، $\nabla \cdot \bar{q}_s$ انتقال حرارت بصورت نفوذ^۹ درون سیال و Q_{gs} بیانگر تبادل انرژی گرمایی بین فازها است. همچنین $\bar{\tau} : \nabla \bar{v}$ بیان گر نرخ تولید انرژی در اثر ویسکوزیته سیال است.

تبادل ممتوم بین فازها

4 - Volume Fraction

5 - Kinetic Theory of Granular Flow

6 - Reynolds Stress Tensor

7 - Turbulence Model

8 - Source

9 - Diffusive Heat Transfer

مدل های ارائه شده درآگ جهت تعریف تبادل ممتوم بین فاز ها استفاده می شود. یکی از نیرو های موثر در معادله بقای ممتوم هر یک از فاز ها نیروی درآگ می باشد که از اختلاف سرعت بین فاز ها بدست می آید:

$$K_{gs} = \beta_{gs}(\bar{v}_g - \bar{v}_s) \quad (9)$$

که ضریب انتقال ممتوم بین فاز ها¹⁰ است.

در بین مدل های مختلف درآگ، مدل درآگ گیداسپو جهت مدل سازی بستر های سیال و فورانی گاز-جامد، بیشترین نزدیکی را با داده های تجربی نشان داده است [8]. این مدل توسط محققان و پژوهشگران بسیاری برای مدلسازی بستر های سیال گاز-جامد توصیه شده است [3,12] از این رو با توجه به پژوهش های پیشین، در این تحقیق نیز از مدل درآگ گیداسپو جهت شبیه سازی تبادل ممتوم بین فاز ها استفاده شد. بر اساس این مدل ضریب انتقال ممتوم بین فاز ها به صورت زیر تعریف می شود:

$$\beta_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\bar{v}_s - \bar{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2.65}, \quad \alpha_g > 0.8 \quad (10)$$

$$\beta_{gs} = 150 \frac{\alpha_s^2 \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_g |\bar{v}_s - \bar{v}_g|}{d_s}, \quad \alpha_g \leq 0.8 \quad (11)$$

که C_D در این رابطه ضریب درآگ می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_s} \left[1 + 0.15 (\alpha_g Re_s)^{0.687} \right] \quad (12)$$

و Re_s در رابطه بالا عدد رینولدز نسبی¹¹ است و با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Re_s = \frac{\rho_g d_s |\bar{v}_s - \bar{v}_g|}{\mu_g} \quad (13)$$

معادله انتقال برای رطوبت هوا (به عنوان یک اسکالر دلخواه¹² UDS)

در این پژوهش برای تعریف توزیع رطوبت هوا در میدان حل از معادله زیر استفاده شد. در این معادله رطوبت هوا بعنوان یک اسکالر جدید در میدان حل تعریف شد که در هر سلول محاسباتی بصورت جداگانه محاسبه می شود. به دلیل اینکه در محیط استاندارد نرم افزار Fluent نمی توان رطوبت محصول را وارد نمود. بنابراین معادلات مربوط به رطوبت را با استفاده از یک کد برنامه C به نرم افزار معرفی شد. با این روش انتقال رطوبت در بستر و تبادل آن بین دو فاز مدل سازی شد. معادله انتقال رطوبت هوا به صورت زیر [12]:

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g W)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \bar{v}_g W) = \nabla \cdot (\alpha_g \Gamma_{w,g} \nabla W) + S_w \quad (14)$$

که $\Gamma_{w,g}$ ضریب نفوذ رطوبت در هوا و W رطوبت هوا بر مبنای وزن خشک و S_w ترم چشمه رطوبت درون هوا در اثر رطوبت دانه های فاز جامد است.

ضریب انتقال حرارت بین فاز ها

نرخ انتقال حرارت بین فاز ها به اختلاف دما بین آن ها بستگی دارد و به صورت زیر تعریف می شود [12]:

¹⁰ - Momentum Exchange Coefficient

¹¹ - Relative Reynolds Number

¹² - User-defined Scalar

$$Q_{gs} = h_{sg}(T_s - T_g) \quad (15)$$

در این رابطه h_{sg} ضریب انتقال حرارت بین دو فاز گازی و جامد است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$h_{sg} = \frac{6k_g\alpha_s Nu_s}{d_s^2} \quad (16)$$

در این رابطه k_g ضریب هدایت حرارت به صورت نفوذ برای فاز گازی است. همچنین Nu_s عدد ناسلت^{۱۳} فاز جامد است. عدد ناسلت نیز با رابطه زیر قابل بیان است که برای جریان های مواد گرانوله در محدوده تخلخل بین ۰/۳۵ تا ۱ و عدد رینولدز کمتر از ۱۰^۰ قابل کاربرد است [5]:

$$Nu_s = (7 - 10\varepsilon_g + 5\alpha_g^2) \left(1 + 0.7Re_s^{0.2} + Pr_s^{\frac{1}{3}}\right) + (1.33 - 2.4\alpha_g + 1.2\alpha_g^2)Re_s^{0.7} + Pr_s^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

در این رابطه Pr عدد پرانتل^{۱۴} فاز گازی است:

$$Pr = \frac{c_{p_g}\mu_g}{k_g} \quad (18)$$

تعاریف ترم های چشمه^{۱۵}

در محیط نرم افزار Fluent لازم است تا ترم های چشمه را با استفاده از یک کد برنامه نویسی^{۱۶} (UDF) به زبان C به نرم افزار متصل شود. در این تحقیق دو ترم چشمه برای معادله رطوبت و معادله انرژی به شرح زیر تعریف شد.

نرخ تولید رطوبت^{۱۷} (UDS) در فاز گازی

در طی فرایند خشک شدن مواد در خشک کن بستر سیال رطوبت فاز جامد به عنوان چشمه برای هوای خشک کننده خواهد بود. که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$S_w = -\alpha_s \rho_s \frac{dM}{dt} \quad (19)$$

در رابطه بالا $\frac{dM}{dt}$ نرخ خشک شدن مواد درون بستر است.

نرخ تولید انرژی گرمایی درون فاز جامد

در فرایند خشک کردن مواد در خشک کن بستر سیال خنک شدن فاز جامد در اثر تبخیر سطحی رطوبت آن به عنوان چشمه انرژی در فاز جامد در نظر گرفته شد. نرخ تولید انرژی در درون فاز جامد با توجه به صرف نظر کردن از گرادیان دما در درون هر دانه فاز جامد یا خنک شدن تمامی حجم یک دانه با یک نرخ معین، به صورت زیر تعریف می شود:

$$S_s = \alpha_s \rho_s \left(\frac{dM}{dt} h_{fg}\right) \quad (20)$$

شبکه بندی میدان سیال

شبکه بندی میدان حل با استفاده از نرم افزار GAMBIT انجام شد و با توجه به اینکه میدان حل بصورت محور تقارنی در

¹³ - Nusselt Number

¹⁴ - Prandtl Number

¹⁵ - Source Terms

¹⁶ - User-defined Functions

¹⁷ - User Defined Scalar

محاسبات لحاظ شد، میدان حل به صورت یک مستطیل به طول ۲۵ cm و عرض ۶/۵ cm بود. سه شبکه دو بعدی با سلول های چهار ضلعی و با تعداد سلول های ۱۳۵ × ۵۰، ۲۳۰ × ۸۵ و ۱۳۰ × ۵۰۰ با استفاده از این نرم افزار طراحی شد. در ابتدا از شبکه با وضوح ۱۳۵ × ۵۰ و گام زمانی ۰/۰۰۰۱ برای حل مساله سیال استفاده شد. اما به دلیل کوچک بودن گام زمانی حل مساله بسیار زمان بر و نیاز به صرف هزینه و زمان زیادی داشت. در نتیجه وضوح شبکه بیشتر و گام زمانی بزرگتر در نظر گرفته شد. در این حالت وضوح شبکه ۲۳۰ × ۸۵ و گام زمانی ۰/۰۱ بود که نتایج حل مسئله همگرا و با تقریب مناسبی قابل قبول بود. همچنین این حالت نسبت به حالت قبل نیازمند صرف هزینه و زمان کمتری بود. برای بهبود شرایط حل مسئله و صرف هزینه و زمان کمتر باز هم تعداد سلول ها بیشتر و گام زمانی بزرگتر در نظر گرفته شد. در این حالت وضوح شبکه ۱۳۰ × ۵۰۰ و گام زمانی ۰/۱ در نظر گرفته شد. نتایج حل در این حالت واگرا و غیر قابل پذیرش بود. بنابراین شبکه با وضوح ۲۳۰ × ۸۵ مناسب تر به نظر می رسد و در آخر شبکه با همین وضوح مورد استفاده قرار گرفت.

تحلیل نتایج

شبیه سازی خشک کن بستر سیال فراصوت بر پایه CFD

شبیه سازی خشک کن بستر سیال فراصوت بر پایه CFD با استفاده از نرم افزار تجاری 18 Fluent انجام پذیرفت. این شبیه سازی بر روی هشت حالت با فرکانس ۲۰ kHz، دمای ۳۰°C، توان ۱۰۰ W، فرکانس ۳۰ kHz، دمای ۳۰°C، توان ۳۰ W، فرکانس ۱۰۰ kHz، دمای ۴۰°C، توان ۵۰ W، فرکانس ۳۰ kHz، دمای ۴۰°C، توان ۱۰۰ W، فرکانس ۲۰ kHz، دمای ۵۰°C، توان ۵۰ W، فرکانس ۱۰۰ kHz، دمای ۴۰°C، توان ۱۰۰ W، فرکانس ۳۰ kHz، دمای ۴۰°C، توان ۱۰۰ W، فرکانس ۲۰ kHz، دمای ۵۰°C، توان ۱۰۰ W، فرکانس ۳۰ kHz، دمای ۵۰°C، توان ۱۰۰ W صورت گرفت. در همه این هشت حالت ارتفاع اولیه بستر برابر ۳ cm در نظر گرفته شد. پس از حل مسائل، پارامترهای مورد نیاز خشک کن بستر سیال فراصوت در تمام میدان حل از طریق یک کد برنامه نویسی استخراج شد و در یک فایل متنی ذخیره شد. پارامترهای محاسبه شده در این پژوهش مقادیر متوسط رطوبت فاز جامد، متوسط دمای فاز گازی و متوسط رطوبت فاز گازی بود. سپس مقادیر بدست آمده از نرم افزار 18 Fluent با داده های تجربی به دست آمده از آزمایش که توسط جعفری و زارع [5] بدست آمده بود مقایسه شد. جهت تعیین میزان دقت شبیه سازی از پارامترهای MRD^{18} ، SEP^{19} و MEP^{20} استفاده شد. نتایج اعتبار سنجی در جدول (۱) آمده است.

$$MRD = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\varphi_{exp,j} - \varphi_{pre,j}}{\varphi_{exp,j}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \times 100 \quad (21)$$

$$SEP = \frac{\left(\sum_{j=1}^n (\varphi_{exp,j} - \varphi_{pre,j})^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{n-1} \quad (22)$$

¹⁸ - Mean Relative Deviation

¹⁹ - Standard Error of Prediction

²⁰ - Maximum Error of Predictions

$$MEP = \max_{1 \leq j \leq n} |\varphi_{exp,j} - \varphi_{pre,j}| \quad (23)$$

جدول (۱). نتایج اعتبار سنجی مدل ریاضی خشک کن بستر سیال فراصوت بر پایه CFD

دمای هوای ورودی (°C)	توان امواج فراصوت (W)	فرکانس امواج فراصوت (kHz)	MRD (%)	SEP	MEP
۳۰	۱۰۰	۲۰	۳/۰۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۱۲
۳۰	۱۰۰	۳۰	۱/۵۴	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۶
۴۰	۵۰	۲۰	۱/۸۵	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۲
۴۰	۵۰	۳۰	۱/۰۳	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۰
۴۰	۱۰۰	۲۰	۱/۸۸	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۷
۴۰	۱۰۰	۳۰	۱/۹۹	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۹
۵۰	۱۰۰	۲۰	۴/۰۱	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۱
۵۰	۱۰۰	۳۰	۲/۷۵	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰

بیشترین میزان خطای شبیه سازی در حالت، فرکانس ۲۰ kHz، دمای ۳۰°C، توان ۱۰۰ W مربوط به ثانیه ۱۲۰۰ بوده و برابر ۵/۵ می باشد. با توجه به نتایج حاصله در جدول (۱) می توان نتیجه گرفت که مدل شبیه سازی CFD ارائه شده در این تحقیق که با استفاده از نرم افزار Fluent 18 صورت گرفته است توانایی بسیار بالایی در پیش بینی پارامترهای مورد نیاز در خشک کن های بستر سیال فراصوت می باشد.

پیش بینی رطوبت محصول

مدل های بسیاری جهت بیان رابطه ای بین نسبت رطوبت و زمان خشک شدن محصول ارائه شده است. در این تحقیق نیز معادله ای برای بستر خشک شدن شلتوک در خشک کن بستر سیال فراصوت محاسبه شد. با توجه به سرعت بالای هوای ورودی و عمق بستر دانه ها معادله بستر و معادله ی لایه نازک آن با تقریب بسیار خوبی با هم برابر بود. نسبت رطوبت دانه های شلتوک در طول خشک شدن با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [7]

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3-33)$$

به طوری که در رابطه بالا MR ، M ، $M(t)$ و M_e به ترتیب نسبت رطوبت، رطوبت اولیه محصول، رطوبت

محصول در زمان t و رطوبت تعادلی محصول می باشند.

در این تحقیق برای محاسبه ی رطوبت تعادلی از رابطه زیر که توسط زوریتز و سینگ [16] برای محاسبه رطوبت تعادلی شلتوک بیان شده است استفاده شد.

$$M_e = 0.001 \left(\frac{A}{B}\right)^C \quad (3-34)$$

$$A = -\ln(1 - RH) T \quad (3-35)$$

$$B = 2.667 \times 10^{-7} \left(1 - \frac{T}{641.7}\right)^{-23.438} \quad (3-36)$$

$$C = \frac{1}{4 \times 10^5 T^{-2.1166}} \quad (3-37)$$

تغییرات رطوبت شلتوک در خشک کن بستر سیال فراصوت که در این تحقیق با توجه به داده های آزمایشگاهی محاسبه شد که به صورت زیر می باشد.

$$MR = a \exp\left(-k_0 \frac{t}{60}\right) + b \exp\left(-k \frac{t}{60}\right) \quad (3-38)$$

$$a = 0.2474992 - 0.0010283 T - 0.000731 F + 0.0000303 P \quad (3-39)$$

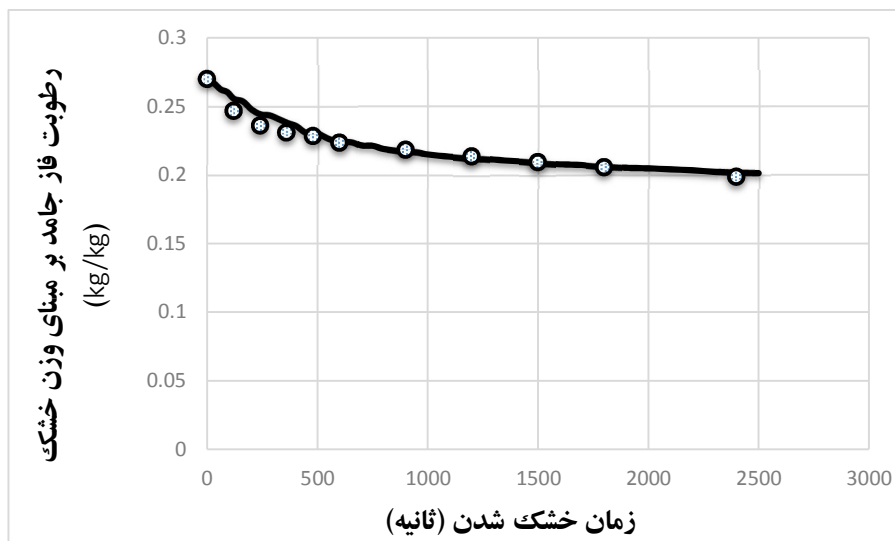
$$k_0 = -0.1133200 + 0.0057719 T - 0.0035928 F - 0.0000749 P \quad (3-40)$$

$$b = 0.721189 + 0.0011864 T + 0.0012687 F - 0.0000082 P \quad (3-41)$$

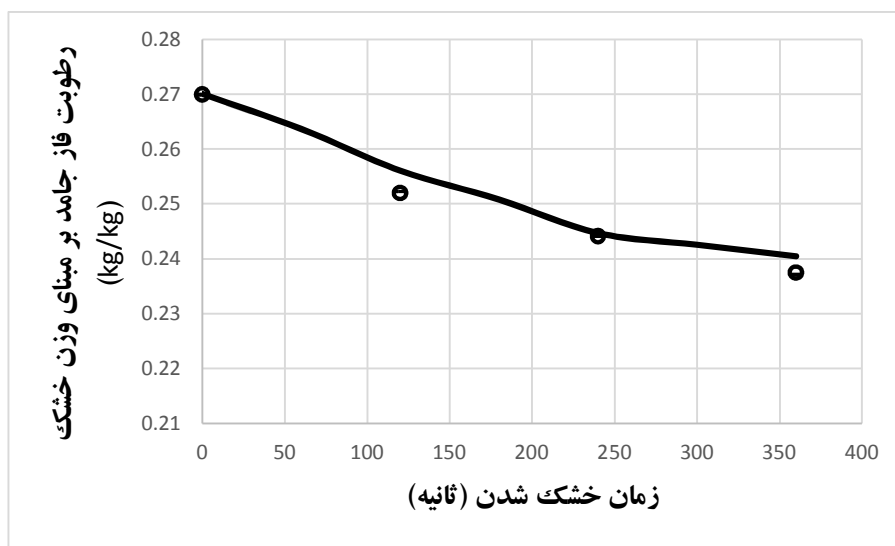
$$k = -0.0037736 + 0.0001976 T + 0.000000746 F - 0.000000134 P \quad (3-42)$$

بطوری که در معادله بالا T دمای هوای ورودی خشک کن، F فرکانس و P توان اموج فراصوت تولید شده توسط دستگاه می باشد.

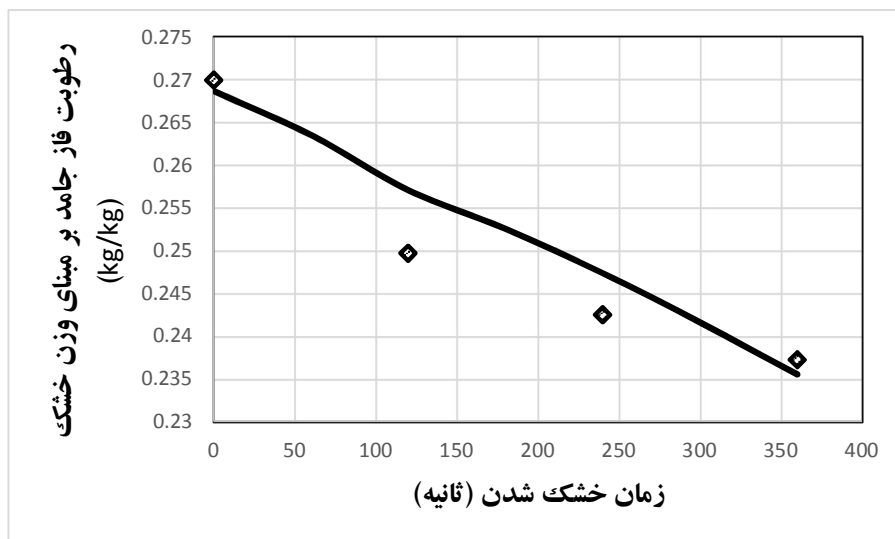
در شکل های ۲ الی ۹ روند تغییرات متوسط رطوبت در هشت حالت شبیه سازی شده که در بخش های قبل اشاره شد نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی نشان دهنده ی خطای بسیار کم و توانایی بالای نرم افزار می باشد.



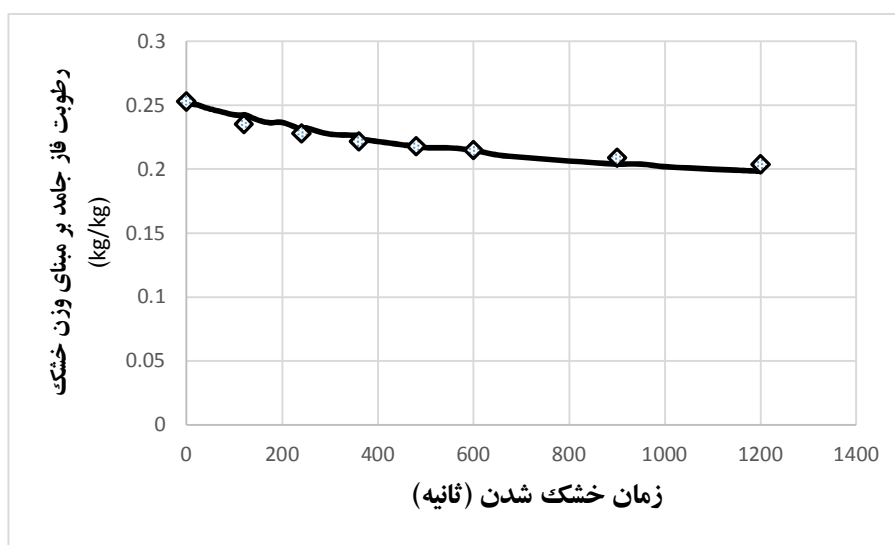
شکل (۲). نمودار تغییرات رطوبت شلتوک در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 40°C ، توان 100 W و فرکانس 1 kHz (۳۰). داده های آزمایشگاهی، (—) پیش بینی مدل CFD



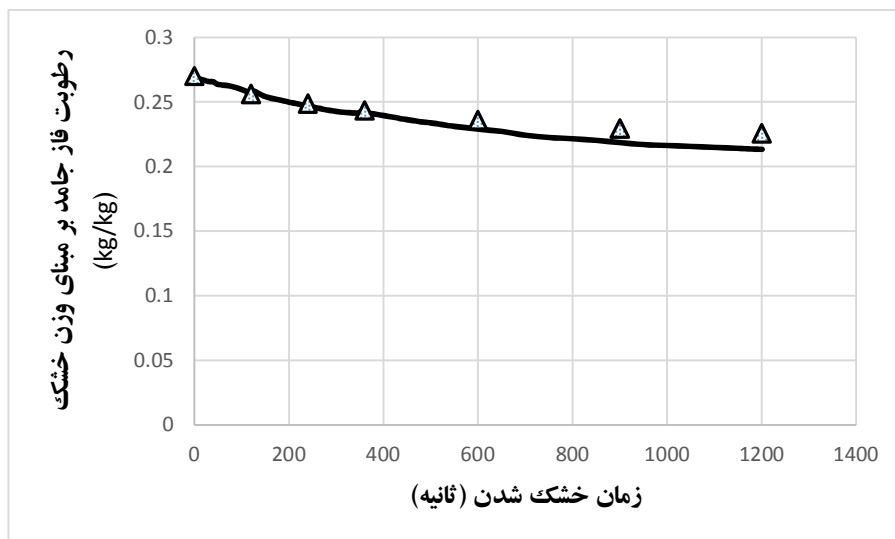
شکل (۳). نمودار تغییرات رطوبت شلتوک در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 40°C ، توان 50 W و فرکانس 1 kHz (۳۰). داده های آزمایشگاهی، (—) پیش بینی مدل CFD



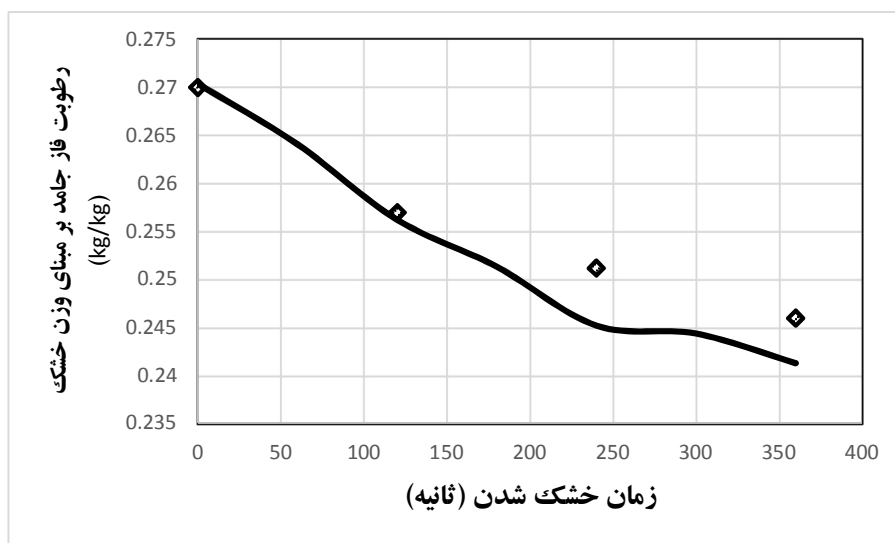
شکل (۴). نمودار تغییرات رطوبت شلتوک در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 40°C ، توان 50 W و فرکانس kHz ۲۰. (○) داده های آزمایشگاهی، (—) پیش بینی مدل CFD



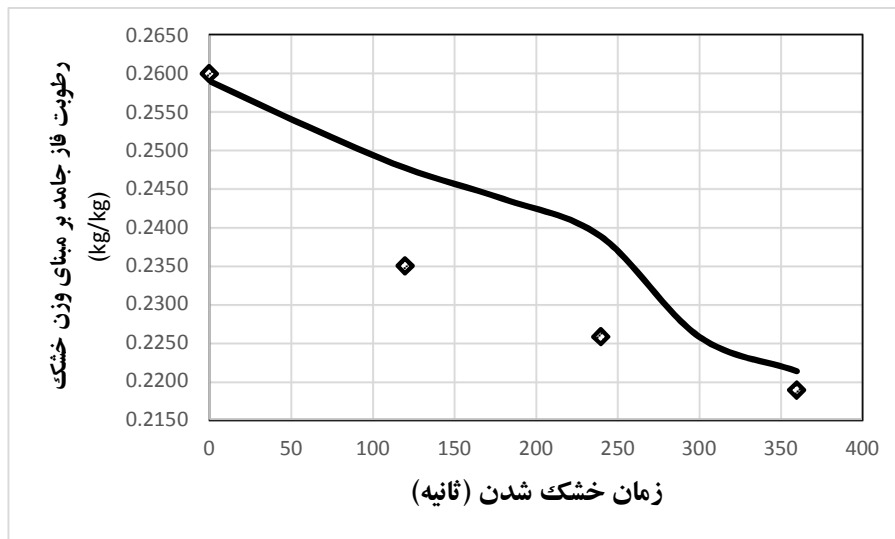
شکل (۵). نمودار تغییرات رطوبت شلتوک در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 40°C ، توان 100 W و فرکانس kHz ۲۰. (○) داده های آزمایشگاهی، (—) پیش بینی مدل CFD



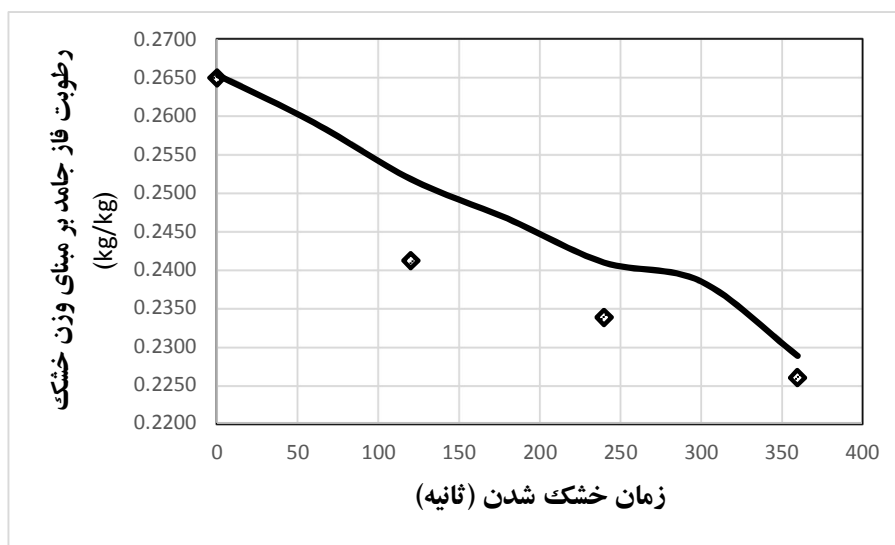
شکل (۶). نمودار تغییرات رطوبت شلتوک در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 30°C ، توان 100 W و فرکانس 1 kHz 20° . داده های آزمایشگاهی، (—) پیش بینی مدل CFD



شکل (۷). نمودار تغییرات رطوبت شلتوک در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 30°C ، توان 100 W و فرکانس 1 kHz 30° . داده های آزمایشگاهی، (—) پیش بینی مدل CFD



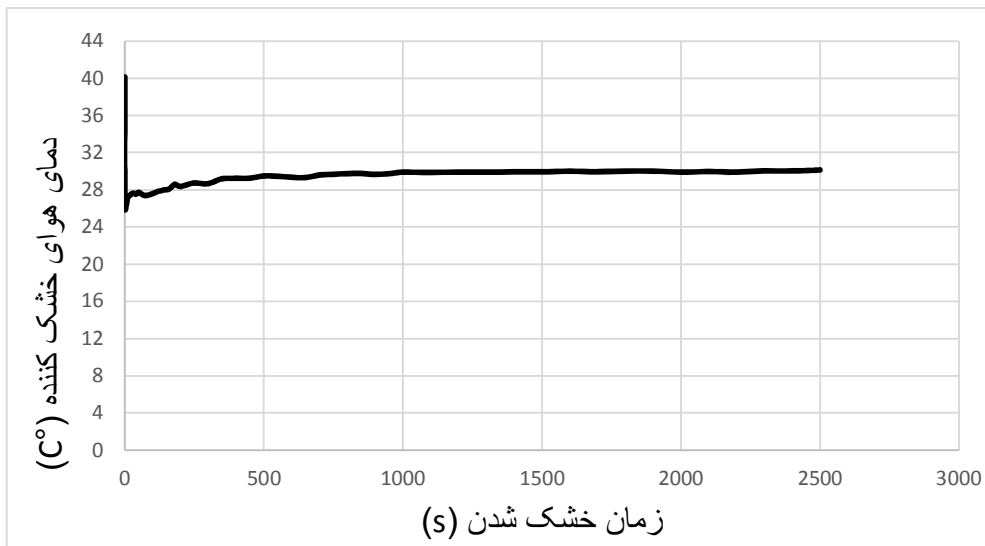
شکل (۸). نمودار تغییرات رطوبت شلتوک در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 50°C ، توان 100 W و فرکانس 10 kHz ، داده های آزمایشگاهی، (—) پیش بینی مدل CFD.



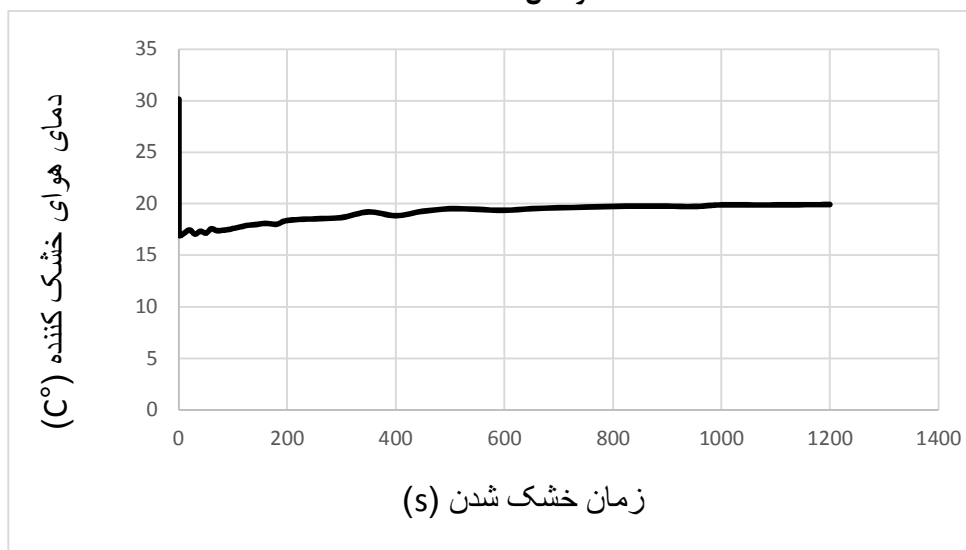
شکل (۹). نمودار تغییرات رطوبت شلتوک در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 50°C ، توان 100 W و فرکانس 10 kHz ، داده های آزمایشگاهی، (—) پیش بینی مدل CFD.

پیش بینی دما و رطوبت هوای خشک کننده

در شکل (۱۰) و (۱۱) پیش بینی روند تغییرات دمای هوای عبوری از بستر توسط نرم افزار قابل مشاهده است. در ابتدای فرایند خشک شدن دمای هوای ورودی خشک کن به دلیل تبادل حرارت با مواد درون بستر با سرعت بالایی افت می کند. در ادامه به دلیل کاهش رطوبت محصول درون خشک کن دمای هوای درون بستر به کندی افزایش می یابد.

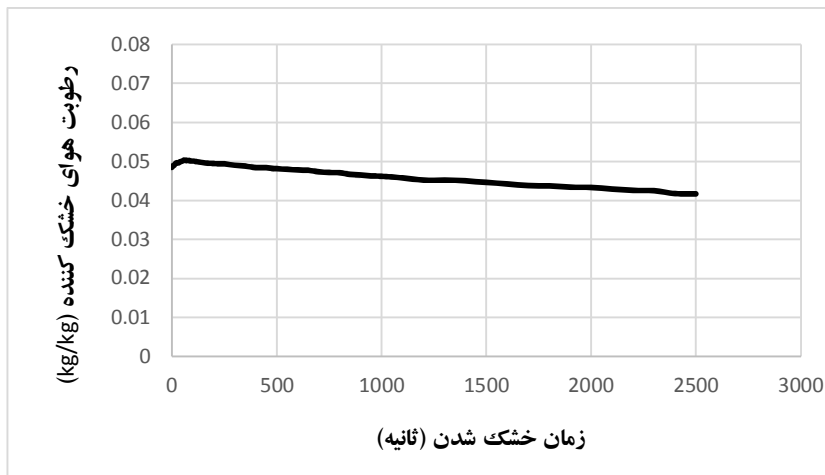


شکل (۱۰). نمودار تغییرات دمای هوای خشک کننده در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 40°C ، توان 100 W و فرکانس 30 kHz

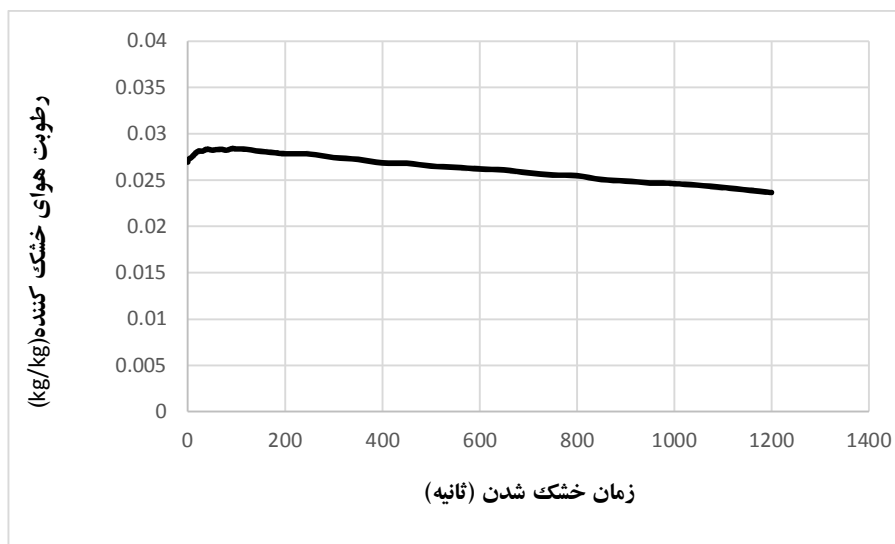


شکل (۱۱). نمودار تغییرات دمای هوای خشک کننده در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 30°C ، توان 100 W و فرکانس 20 kHz

همچنین نمودار تغییرات رطوبت هوای خشک کن در طول زمان خشک شدن در دو حالت در شکل های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. رطوبت هوای خشک کننده در ابتدای فرایند خشک کردن محصول به دلیل رطوبت بالای اولیه دانه ها و تبخیر رطوبت های سطحی دانه های درون بستر بالایی رود و در ادامه با کاهش محتوای رطوبتی محصول رطوبت هوای خروجی تدریجاً کاهش می یابد.



شکل (۱۲). نمودار تغییرات رطوبت هوای خشک کننده در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 40°C ، توان 100 W و فرکانس 30 kHz



شکل (۱۳). نمودار تغییرات رطوبت هوای خشک کننده در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 30°C ، توان 100 W و فرکانس 20 kHz

پیش بینی توزیع پارامترهای خشک کردن در میدان حل

با توجه به توانایی های بالای نرم افزار Fluent 18 پس از حل مساله بسیاری از پارامترهای خشک کردن محصول در میدان حل مساله قابل دستیابی و مشاهده است. که می توان نتایج را از طریق رسم بردارها، کانتورها، نمودارهای دو یا سه بعدی، ردیابی ذرات و غیره تحلیل و بررسی کرد. کاربر یا محقق می تواند با استفاده از این نتایج دید خوبی نسبت به سیستم پیدا کرده و در طراحی و بهینه کردن آن از این نتایج استفاده کند. که در زیر به بخشی از آنها می پردازیم.

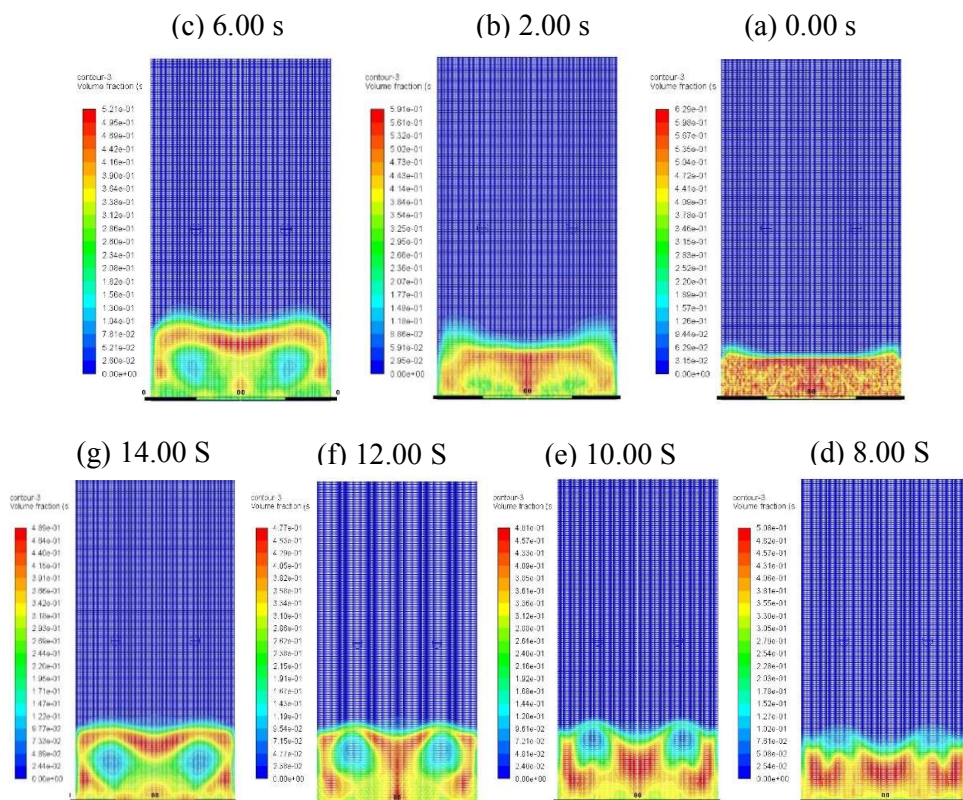
توزیع کسر حجمی محصول در طی فرآیند خشک شدن

شکل (۱۴) بخوبی نشان دهنده توزیع کسر حجمی مواد درون بستر در زمان های مختلف خشک شدن، در خشک

کن بستر سیال فراصوت است. که معلق بودن مواد درون بستر و حرکت هوا بین مواد درون بستر را می توان به راحتی در آن مشاهده کرد.

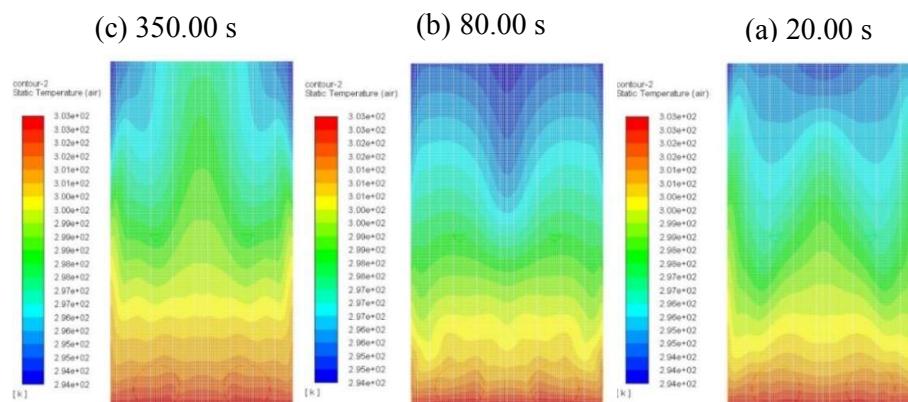
توزیع دمای هوای درون بستر

شکل (۱۵) نشان دهنده توزیع دمای هوای درون بستر در طول زمان خشک شدن محصول در خشک کن بستر سیال فراصوت می باشد. همان طور که مشاهده می شود در ابتدای فرآیند خشک شدن محصول دمای هوای ورودی از دمای هوای درون بستر بیشتر می باشد. این روند با کمی تغییر در دمای هوای درون بستر و کمی افزایش در آن ادامه می یابد. این اختلاف دما بین هوای ورودی و هوای درون بستر به دلیل عبور هوای ورودی از بین دانه های مرطوب می باشد. که با گذشت زمان و کاهش رطوبت محصول این اختلاف نیز کمتر می شود.



شکل (۱۴). پیش بینی توزیع کسر حجمی محصول در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی ۳۰ °C، توان ۱۰۰ W و

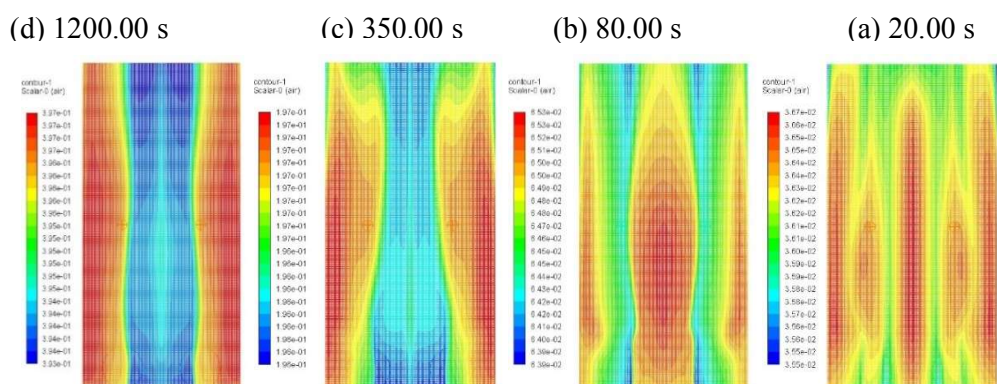
فرکانس ۲۰ kHz



شکل (۱۵). پیش بینی توزیع دمای هوای درون بستر در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 30°C ، توان 100 W و فرکانس 20 kHz

توزیع رطوبت هوای خشک کن

در شکل (۱۶) نحوه توزیع رطوبت هوای خشک کننده در طی زمان خشک کردن نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است با شروع خشک کردن محصول، رطوبت هوای خروجی به دلیل تبخیر سطحی آب درون محصول افزایش می یابد. در ناحیه مرکزی استوانه خشک کن که هوا راحتتر از درون مواد عبور می کند و سرعت عبوری هوا نیز بیشتر از نزدیکی دیواره ها است، رطوبت مواد بیشتر دچار باد بردگی می شود و در درون بستر باقی نمی ماند. همچنین با گذشت زمان رطوبت محصول کاهش یافته و از غلظت رطوبت هوای درون بستر نیز کاسته می شود.



شکل (۱۶). پیش بینی توزیع رطوبت هوای درون بستر در خشک کن بستر سیال فراصوت با دمای هوای ورودی 30°C ، توان 100 W و فرکانس 20 kHz

نتیجه گیری

به طور کلی پیشگویی یک پدیده فیزیکی تنها از دو روش تجربی یا تئوری ممکن می باشد. در روشهای تئوری، ابتدا می بایست پدیده فیزیکی را مشاهده و به معادلات دیفرانسیل مربوطه و پس از آن به معادلات جبری حاکم بر مسئله پرداخت. مشکلی که در این بین وجود دارد این است که بر خلاف پدیده هایی نظیر جریان های آرام که برای

آنها مدل ریاضی مناسبی ارائه شده اند، پدیده هایی همچون جریانات دوفازی نیز وجود دارند که هنوز مدل ریاضی مناسبی برای آنها یافت نشده است. در این موارد است که استفاده از روشهای عددی بعنوان یک راه سوم برای حل مسائل جریان سیال جای خود را باز می کند. بنابراین می توان دینامیک سیالات را به سه بخش تجربی، تئوری و محاسباتی تقسیم بندی کرد.

در این تحقیق مدلی شبیه سازی شده از یک خشک کن بستر سیال فراصوت بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی CFD و با استفاده از نرم افزار 18 Fluent ارائه شد. مدل های ارائه شده با مدل های دیگری در شرایط نسبتا مساوی که توسط دیگر محققان ارائه شده بود مقایسه و نیز با داده های آزمایشگاهی اعتبار سنجی شدند. که نتایج حاصل از این مدل ها روند تغییرات رطوبت محصول را با خطای کمتر از ۴ درصد پیش بینی کردند. همچنین این تحقیق نشان داد که اگرچه مدل ارائه شده بر پایه CFD مدلی پیچیده و دقیق و نیازمند زمان و هزینه جهت انجام محاسبات است ولی نسبت به تحقیقات آزمایشگاهی نیاز به صرف زمان و هزینه کمتری می باشد و قادر به پیش بینی همه پارامترهای خشک شدن محصول در تمامی نقاط بستر خشک کن با تقریب بسیار خوبی است.

منابع

1. ASAE. 1984. Moisture measurements, Grain and seeds. Agricultural Engineer Yearbook, American Society of Agriculture Engineers, ASAE Standard S352.1; ASAE: St. Joseph, MI.
2. Cheeke, J. D. N. (2017). *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC press.
3. Dincer, I., and Sahin, A. Z. 2004. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(4), 645–652.
4. Du, W., Bao, X., Xu, J., and Wei, W. 2006. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations. *Chemical Engineering Science*, 61(5), 1401–1420.
5. Jafari, A., and Zare, D. 2017. Ultrasound-assisted fluidized bed drying of paddy: Energy consumption and rice quality aspects. *Drying Technology*, 35(7), 893–902.
6. Gunn, D. J. 1978. Transfer of heat or mass to particles in fixed and fluidized beds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21(4), 467–476.
7. Kouchakzadeh, A., & Shafeei, S. (2010). Modeling of microwave-convective drying of pistachios.

Energy Conversion and Management, 51(10), 2012–2015.

8. Icier, F., Colak, N., Erbay, Z., Kuzgunkaya, E. H., and Hepbasli, A. 2010. A comparative study on exergetic performance assessment for drying of broccoli florets in three different drying systems. *Drying Technology*, 28(2), 193–204.
9. Launder, B. E., and Spalding, D. B. 1972. *Mathematical models of turbulence*. Academic press.
10. Lun, C. K. K., Savage, S. B., Jeffrey, D. J., and Chepuriniy, N. 1984. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field. *Journal of Fluid Mechanics*, 140, 223–256.
11. Mason, T. J., & Peters, D. (2002). *Practical sonochemistry: Power ultrasound uses and applications*. Woodhead Publishing.
12. Ranjbaran, M., and Zare, D. 2012. CFD modeling of microwave-assisted fluidized bed drying of moist particles using two-fluid model. *Drying Technology*, 30(4), 362–376.
13. Sobieski, W. 2009. Momentum exchange in solid–fluid system modeling with the Eulerian multiphase model. *Drying Technology*, 27(5), 653–671.
14. Syahrul, S., Hamdullahpur, F., and Dincer, I. 2002. Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Applied Thermal Engineering*, 22(15), 1763–1775.
15. Szafran, R. G., and Kmiec, A. 2004. CFD modeling of heat and mass transfer in a spouted bed dryer. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(4), 1113–1124.
16. Zuritz, C. A., & Paul Slngh, R. (1985). An equation to compute the heat of evaporation of water for rough rice during drying. *Drying Technology*, 3(3), 421–435.

Simulation of Rough Rice Drying in a Laboratory-Scale Ultrasound-assisted Fluidized Bed Dryer Using CFD Method

Dariush Zare^{1*}, Amir Ahmad Tayebi¹, Ataollah Rabiee²

1. Biosystems Engineering Department, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.
2. Department of Fluid and Thermal Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Abstract

The combination of fluidized bed dryers with high power ultrasound equipment can reduce thermal stresses on products that are sensitive to thermal stress and minimize the percentage of losses when drying. In this research, a mathematical model for changing grain moisture content of paddy was proposed to predict and simulate the behavior of ultrasonic fluid bed dryer based on the computational fluid dynamics (CFD). The proposed model was calculated using the Eulerian-Eulerian two-fluidity TFM method in the Fluent 18 software. This model was evaluated using multiple laboratory data collected from paddy drying in an ultrasonic fluidized bed dryer. Assessment of validations showed that the model was capable of predicting the variations of grains moisture content in an ultrasonic fluidized bed dryer with the deviations less than 4 % in comparison with the experimental results. C source user defined function (UDF) was used and connected to Fluent to extend its ability of solving equations and predicting the grains moisture content. High ability of Fluent was demonstrated in predicting the fluid flow and solving its equations such that the user can easily observe inside the system and have

a good view of the multi-physics.

Key words: Computational Fluid Dynamics, Ultrasound-assisted Fluidized Bed Dryer, Eulerian-Eulerian Two Fluidity Method

*Corresponding author
E-mail: dzare@shirazu.ac.ir