



ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون  
پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (کرج)  
۲۴ و ۲۵ شهریور ۱۳۸۹



## تحلیل پروفیل سرعت و دمای هوا در خشک کن کابینتی (هیبریدی) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

داود فدایی<sup>۱</sup>، یاسمن امانلو<sup>۲</sup>

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر- پژوهشکده انرژی fadaid@aut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد پژوهشی موسسه تحقیقاتی فناوری خورشید پژوه

### چکیده:

یکنواختی دما و سرعت هوای خشک کننده در داخل خشک کن ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. الگوی حرکت هوا و دمای ها در داخل یک خشک کن کابینتی برای میوه جات و سبزیجات با استفاده از محاسبات عددی سیالات (Computational Fluid Dynamics) یا به اختصار CFD شبیه سازی شد. با شبیه سازی جریان هوای در داخل خشک کن مشخص شد که دما و سرعت هوا در سینی های بالایی خشک کن بیشتر از سایر مناطق بوده است. از تکنیک تحلیلی حاضر می توان برای بهینه سازی و ایجاد تغییرات هندسی به نحوه مطلوبی استفاده کرد.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، مدل تلاطم  $k-\epsilon$ ، الگو جریان هوا در خشک کن.

### مقدمه:

خشک کن های کابینتی هیبریدی بصورت متداول برای خشک کردن محصولات باغی و کشاورزی استفاده می شوند. در این خشک کن ها، حلقه های برش خورده میوه بر روی سینی های فلزی، چوبی و یا توری چیده می شود. هوای گرم از طریق کلکتورهای خورشیدی<sup>۱</sup>، گرم کن های الکترکی و یا فسیلی از قسمت زیرین وارد محفظه می شود. هوا در حین عبور از سینی اول مقداری از رطوبت میوه های آن را جذب می کند. عبور هوای گرم از بین میوه های تر باعث افزایش محتوای رطوبتی هوا می شود و همچنین کاهش دمای آن می شود که هر دوی این موارد سبب می شود که

<sup>۱</sup> -Solar collector

درصد رطوبتی که هوا در آن از بخار آب اشباع می شود کاهش یابد. بعبارت دیگر توانایی هوا با عبور از میان میوه های سینی اول خشک کردن و جذب رطوبت از میوه ها کاهش میابد. این هوا سپس وارد سینی دوم می شود. در آنجا نیز مقداری دمای هوا کاهش میابد و رطوبت هوا افزوده می شود. به همین ترتیب با عبور هوا از هر سینی توانایی آن در خشک کردن میوه ها کمتر می شود. این روند تا حدی ادامه می یابد که در هنگام رسیدن هوا به سینی آخر (بالا ترین سینی) توانایی خشک کردن اندکی دارد. این موضوع سبب می شود که میوه های روی سینی اول سریع تر از سایر میوه ها خشک شود. حتی گاهی مشاهده شده است هوا با جذب رطوبت از سینی های اول بسیار تر می شود و این رطوبت باعث افزایش رطوبت میوه های سینی آخر می شود. بنابراین بزرگ ترین مشکل در استفاده از خشک کن های کابینتی خشک کردن غیر یکنواخت میوه ها است.

کنترل جریان هوا در خشک کن های کابینتی از موارد بسیار موثر بر بازده خشک کردن و یکنواختی شدت خشک شدن است. بسیاری از محققان شرایط ضعیف کنترل جریان هوا را از عوامل اصلی افت کیفیت محصول دانسته اند [۱]. زمانی که توزیع دما و سرعت هوا در داخل خشک کن یکنواخت نباشد قسمتی از محصول بیش از اندازه خشک می شود و در نقاط دیگر احتمال مرطوب تر شدن محصول و بروز مشکلاتی از قبیل کپک و قارچ بوجود می آید.

سرعت و دمای هوای خشک کننده ارتباط بسیار نزدیکی با نرخ خشک شدن محصول دارد [۲ و ۳]. همچنین بازده، یکنواختی و کیفیت خشک شدن رابطه مستقیم با یکنواختی توزیع دما و سرعت هوا در داخل خشک کن دارد [۴]. بنابراین اطلاع از شرایط توزیع دما و سرعت هوا در داخل خشک کن بهترین فاکتور برای نشان دادن نحوه کار کرد دستگاه است.

دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamics) یا به اختصار CFD شامل روش های تحلیل سیستم های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و سایر پدیده های همراه می باشد که کاربرد آن در صنایع کشاورزی اهمیت روز افزونی یافته است. تطبیق پذیری، دقت و کارآمد بودن این روش باعث افزایش کاربرد آن در مهندسی کشاورزی شده است. امروزه از CFD بصورت گسترده در حل مسائل مربوط به شرایط محیطی در گلخانه ها و دام داری ها استفاده می شود و استفاده از آن رو به افزایش است [۵].

همچنین CFD ابزار عددی قدرتمندی برای شبیه سازی بسیار گسترده فرآیند های پس از برداشت است. از CFD برای شبیه سازی فرآیند های متعددی نظیر تهویه، خشک کردن، سترون کردن<sup>۱</sup>، سرد کردن، منجمد کردن، انبار داری و برای ترکیب و توضیح دادن مدل های فیزیکی بسیار متداول در این فرآیند ها استفاده می شود.

ماتیولاکیس و همکاران [۶] حرکت هوا را در یک خشک کن توده ای صنعتی<sup>۲</sup> با استفاده از CFD شبیه سازی کردند. پروفیل فشار و سرعت هوا در داخل این نوع خشک کن بوسیله CFD بدست آمد و با استفاده از این پروفیل های محلی که در آن سرعت همگن بود مشخص شد. سپس نتایج بدست آمده با نتایج بدست آمده از آزمایش های تجربی مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که همبستگی خوبی بین خروجی مدل و نتایج آزمایش های تجربی وجود داشته است. آنها شرایط مرزی مسئله خود را با سرعت هوای ورودی ۲۵ m/s و شدت تلاطم ۴٪ تعریف کردند. آنها همچنین دو مدل مختلف تلاطم LVEL و  $k-\epsilon$  را مقایسه کردند. نتایج بدست آمده از هر دو مدل بسیار نزدیک بهم بود ولی مدل  $k-\epsilon$  بدلیل همگرایی سریع تر، توسط ایشان توصیه شد.

میراده [۴] از CFD برای پیش بینی میدان سرعت هوا در خشک کن های مدرن گوشت<sup>۳</sup> برای تحلیل دو بعدی جریان ناپایدار استفاده کرد. استفاده از چرخه های متناوب تهویه در خشک کن های صنعتی گوشت سبب افزایش کیفیت محصول نهایی می شود. میراده دو چرخه تهویه خطی و سینوسی را با استفاده از CFD شبیه سازی کرد و اطلاعات بدست آمده را با آزمایش های تجربی مقایسه کرد. نتیجه کار وی مشخص کرد که شبیه سازی با CFD روشی حرفه ای و مناسب برای تحلیل و طراحی خشک کن های مدرن است. در این تحقیق از کد fluent v.5.4.8 و شبکه بندی بی سازمان دو بعدی<sup>۴</sup> استفاده کرد. همچنین برای شبیه سازی تلاطم از Reynolds stress model یاری جست.

در تحقیق حاضر از تحلیل دینامیک سیالات برای استخراج شرایط توزیع دما و سرعت هوا در داخل خشک کن کابینتی صنعتی استفاده شده است. این دستگاه طراحی و ساخت موسسه تحقیقاتی فناوران خورشید پژوه (Net-solar) می باشد و ظرفیت خشک کردن محصولات کشاورزی را تا ۳۰۰ کیلوگرم در هر با پر شدن بشکل کابینتی را دارد.

مواد و روش ها:

---

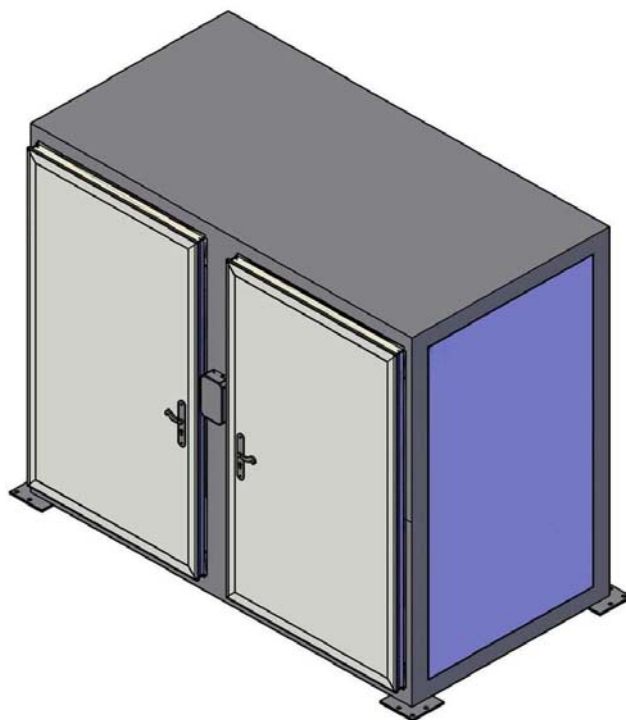
1 - Sterilization

2 - Industrial batch dryer

3 - Modern meat dryers

4 - Unstructured two-dimensional mesh

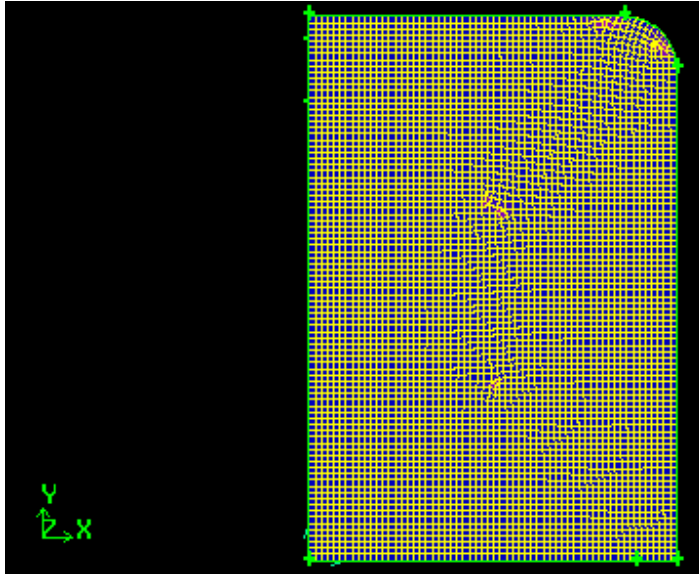
شکل ۱ نمایی از خشک کن کابینتی مورد بحث در این تحقیق را نشان می دهد. خشک کن بصورت متقارن طراحی شده و دارای دو درب می باشد که در هر کدام از درها ۲۶ سینی (مجموعاً ۵۶ سینی) جا داده می شود.



شکل ۱- نمای خشک کن کابینتی هیبرید

برای شبیه سازی و شبکه بندی خشک کن حاضر از نرم افزار Gambit 2.4 و برای حل معادلات حاکم در آن از نرم افزار fluent 6.12 استفاده شد.

بخش های حاوی سیال (هوای خشک کننده) در این طرح بصورت سه بعدی با ابعاد حقیقی ترسیم شد و شبکه بندی (مش) شد. شبکه ایجاد شده دارای ۱۸۰۰۸۰۴ سلول چهار وجهی (tetrahedral) بوده است. این حجم زیاد از سلول ها که تمام ناحیه داخل خشک کن در بر گرفته است تضمین می کند که حل عددی در داخل خشک کن با دقت زیادی انجام می شود. تصویر ۲ بخشی از شبکه ایجاد شده را در نیمه راه عمق خشک کن نشان می دهد.



شکل ۲- قسمتی از سلول های ایجاد شده در شبکه بندی محیط داخلی خشک کن هیبریدی

معادلات پایه‌ای که دینامیک سیالات را کنترل می کنند عبارتند از معادله پیوستگی (بقای جرم)، معادله ناویر-استوک (بقای ممنتوم) و معادله انرژی [۷]. علاوه بر این معادلات باید از مدل‌های دیگر برای تبیین شرایط تلاطم سیال استفاده کرد.

در اکثر موارد رژیم جریان بوسیله عدد رینولدز<sup>۱</sup> تعیین می شود. عدد رینولدز بحرانی برای جریان های داخلی ۲۰۰۰ است. قطر هیدرولیکی ( $D_H$ ) و عدد رینولدز ( $Re_{D_H}$ ) در مقطع ورودی بصورت زیر محاسبه می شود:

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (1)$$

$$Re_{D_H} = \frac{\rho V_m D_H}{\mu} \quad (2)$$

$D_H$  قطر هیدرولیکی،  $P, A$  مساحت و محیط مقطع ورودی،  $V_m$  سرعت هوای ورودی،  $\rho$  چگالی هوا و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی است [۸]. با توجه به شرایط هوا در ورودی خشک کن مشخص گردید که رژیم جریان داخل

<sup>۱</sup> - Reynolds number

خشک کن متلاطم است. از بین مدل‌های موجود از مدل  $k-\varepsilon$  برای شبیه سازی تلاطم در داخل خشک کن بهره برده است.

مدل  $k-\varepsilon$  بدلیل کاربرد آسان و راحتی استفاده آن در برنامه نویسی، معروف ترین مدل دو معادله ی می باشد. در مدل ها ادی-ویسکوزیته<sup>۱</sup>  $k-\varepsilon$ ، میدان آشفتگی بر حسب دو متغیر زیر بیان می شود [۹]:

الف- انرژی جنبشی جریانات آشفته<sup>۲</sup>  $k$

ب- نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته<sup>۳</sup>  $\varepsilon$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i'^2} \quad (۳)$$

$$\varepsilon = \nu \left[ \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \quad (۴)$$

در این معادلات

$\bar{u}_i$  متوسط زمانی مولفه سرعت (در جریان آشفته) در جهت  $i$ ام دستگاه مختصات (m/s)

$u_i'$  نوسان مولفه سرعت (در جریان آشفته) در جهت  $i$ ام دستگاه مختصات (m/s)

$\nu$  لزجت سینماتیکی می باشد.

در مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  توسط معادلات نیمه تجربی زیر بدست می آید:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_{,j} = \left[ \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_{,j} \right]_{,j} + G + B - \rho \varepsilon \quad (۵)$$

و

<sup>۱</sup> -Eddy-viscous

<sup>۲</sup> - Turbulent kinetic energy

<sup>۳</sup> - Turbulent dissipation rate of turbulent kinetic energy

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \varepsilon_{,j} = \left[ \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_{,j} \right]_{,j} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_1 \times (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} B - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

که در آن  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_3$  ضرایب تجربی بوده و  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  نیز بترتیب اعداد پراوتل و اشمیت آشفتگی می-باشند.

ترم های  $C_1 \left( \frac{\varepsilon}{k} \right) G$  و  $C_2 \rho \left( \frac{\varepsilon^2}{k} \right)$  در معادله آخر به ترتیب بیانگر فرآیند های تولید برشی<sup>۱</sup> و فرآیندهای اضمحلال ویسکوز  $\varepsilon$  می باشند. ترم  $C_1 (1 - C_3) \left( \frac{\varepsilon}{k} \right) B$  بیانگر اثرات شناوری می باشد. ترم  $G$  بیانگر میزان تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از هم کنش بین جریان متوسط و میدان جریان آشفتگی می باشد و از این رو به آن اصطلاحاً ترم تولید برشی گفته می شود. ترم  $B$  نیز بیانگر ترم تولید اتلاف شناوری ناشی از میدان چگالی نوسان کننده جریان<sup>۲</sup> می باشد.

روابط صریح برای  $G$  و  $B$  بصورت زیر هستند:

$$G = -\rho \overline{u'_i u'_j} u_{i,j} \quad (7)$$

$$B = \overline{\rho' u'_i} g_i \quad (8)$$

$u'_i$  نوسان مولفه سرعت در جریان متلاطم در جهت  $i$ ام دستگاه مختصات و  $g_i$  شدت جاذبه در جهت  $i$ ام دستگاه مختصات است.

برای حل عددی مسئله حاضر ضروری است که شرایط مرزی برای نرم افزار تعریف شود. شرایط حل بصورت زیر دسته بندی شده است:

<sup>1</sup> - Shear generation processes

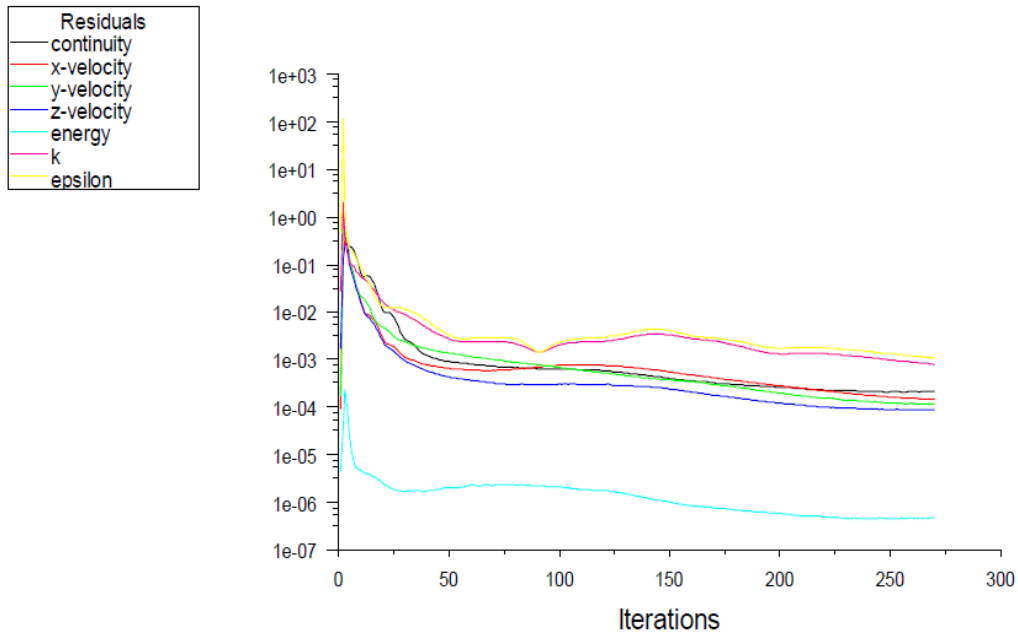
<sup>2</sup> - Fluctuating density field

- شرط ورودی هوا: در ورودی این خشک کن از یک فن سانتریفوژ با ابعاد توان هوادهی ۱۲۰۰ متر مکعب در ساعت استفاده می شود. خشک کن حاضر هیبریدی بوده و هنگامی که نور جذب شده در کلکتورهای خورشیدی نمی تواند هوا را در حد مطلوب گرم نگه دارد از یک مبدل حرارتی گاز سوز استفاده می شود تا با استفاده از یک ترموستات در ورودی هوا دما را در حد مورد نظر کنترل کند. بنابراین دمای هوای ورودی مقدار ثابت در نظر گرفته شد.
- شرط خروج هوا: در خروجی دستگاه از یک فن مکند با حجم ۳۰۰ متر مکعب در ساعت استفاده شد که اختلاف فشار را ایجاد کرده
- شرط تقارن: بدلیل وجود تقارن طولی در دستگاه و تشابه کامل دو طرف آن با یکدیگر، بمنظور کاهش تعداد محاسبات نیمه سمت راست دستگاه شبیه سازی شد و از شرط تقارن برای تعمیم حل برای کل دستگاه استفاده شد.
- شرط دیواره ها: دیواره های دستگاه از پانل های ساندویچی با ضریب هدایت گرمای  $0.45 (W/m^2k)$  با ضخامت ۴ سانتی متر و دانسیته  $40 \pm 3 (kg/m^3)$  ساخته شد که شرایط فوق در حل و معادلات ملحوظ شد.
- شرایط کاری: دمای محیط  $20^\circ C$  فشار محیط  $10132 Pa$  و شتاب گرانشی  $9.81 (m/s^2)$  در محل کارکرد دستگاه می باشد که همین شرایط در حل معادلات نیز در نظر گرفته شد.

#### نتایج و بحث

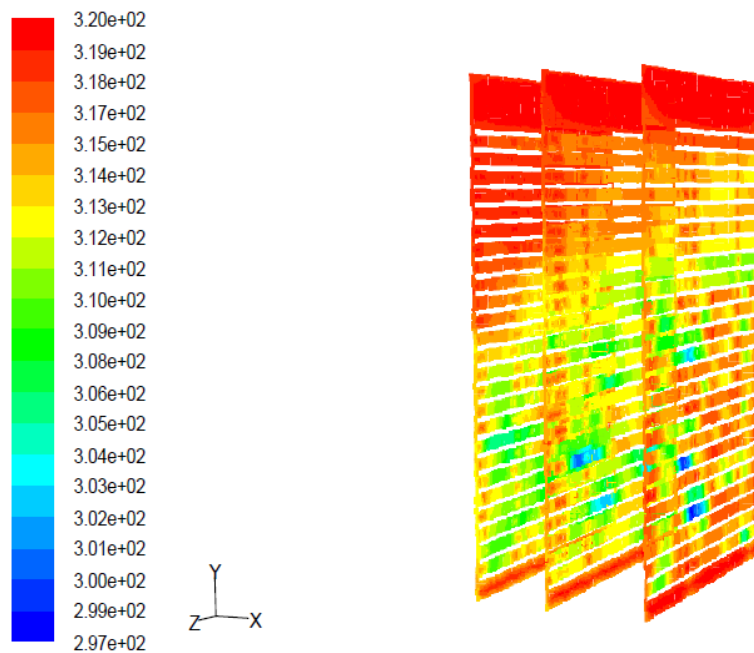
نمودار مربوط به باقی مانده ها حل عددی معادلات در داخل خشک کن در شکل ۳ آورده شده است. گرچه یک توافق جهانی برای قضاوت همگرایی وجود ندارد ولی برای اغلب مسایل معیار همگرایی این است که باقی مانده ها قیاس برای تمام معادلات به مقدار  $10^{-3}$  و برای معادله انرژی به  $10^{-6}$  تقلیل یابد (ادیب زاده، ۱۳۸۲). همانطور که مشاهده می شود حل مربوط به خشک کن کابینتی پس از ۲۶۰ تکرار همگرا شده است. این نمودار مشخص می کند که به طور مثال در اختلاف عدد بدست آمده در دو تکرار آخر برای معادله انرژی کمتر از  $10^{-6}$  بوده است.





شکل ۳- نمودار باقی مانده های قیاس شده حل عددی

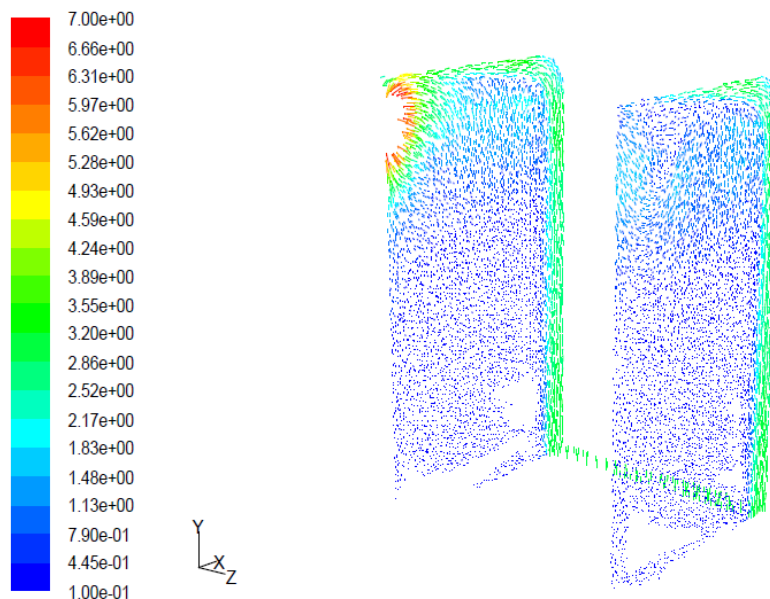
کانتورهای دما در شکل ۴ نمایش داده شده است. در تصویر مشاهده می شود که سینی های میانی دمای کمتر دارند. تمرکز گرما بیشتر در ناحیه نزدیک به ورودی هوا به داخل خشک کن و همچنین سینی های بالایی است. کمتر بودن سرعت فن خروجی از سرعت ورودی هوا خشک کن موجب شده است که در ناحیه نزدیک به خروجی توده هوای گرم ایجاد شده است. در سینی های پایینی دمای هوا حدود ۱۵ درجه سلسیوس کمتر از دما هوای ورودی است.



شکل ۴- کانتورهای دما در مقیاس کلوین در سه برش عرضی در داخل خشک کن

بردارهای سرعت در داخل خشک کن در شکل ۵ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که جریان هوای ورودی بیشتر تمایل دارد که از ناحیه عبور کند که مقاومت کمتری برای در برابر آن است. حرکت هوا از میان سینی‌ها به دلیل مقاومت آن‌ها در برابر عبور جریان هوا<sup>۱</sup> به سختی انجام می‌شود و به همین دلیل هوا مسیر کم مقاومت که خارج از محدوده سینی‌هاست عبور کرده و به خروجی می‌رسد. به دلیل تلاطمی که فن خروجی ایجاد می‌کند سرعت هوا در ناحیه سینی‌های بالایی افزایش یافته است. با توجه به اندازه‌گیری‌های تجربی از داخل خشک‌کن در حین کار مشخص شد که تطابق خوبی بین نتایج مدل و داده‌های تجربی وجود دارد. بنابراین دینامیک سیالات محاسباتی از توانایی بالایی برای شبیه‌سازی محیط داخلی خشک کن برخوردار بوده است.

<sup>۱</sup>- Air flow resistance



شکل ۵- توزیع بردارهای سرعت هوا در دو پرش عرض از خشک کن (m/s)

نتایج کلی و پیشنهادها:

با تحلیل پروفیل های سرعت و دمای هوا مشخص شد که برای افزایش یکنواختی توزیع هوای خشک کننده در داخل خشک کن باید از تغییراتی در هندسه دستگاه و محل قرار گیری فن ها بهره جست. به نظر می رسد که افزایش قطر دهانه ورودی هوا و جابجا کردن محل خروجی می تواند نتایج خوبی را در بر داشته باشد. دینامیک سیالات محاسباتی ابزاری توانمند در شبیه سازی محیط داخلی خشک کن بوده و می توان به صورت قابل اعتمادی در تحلیل جریان هوا بکار گرفته شود.

منابع:

1. Adams, R. L., Thompson, J. F., 1985. Improving drying uniformity in concurrent flow tunnel dehydrators. Transactions of ASAE, 28(3), 890-892
2. Mulet, A., Berna, A., Borrás, M., Pinaga, F., 1987. Effect of air flow rate on carrot drying. Drying Technology, 5(2), 245-258.

3. Karathanos, V. T., Belessiotis, V. G., 1997. Sun and artificial air drying kinetics of some agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 31(l), 35-46.
4. Mirade, P. S. 2003. Prediction of the air velocity field in modern meat dryers using unsteady computational fluid dynamics (CFD) models. *Journal of Food Engineering*, 60, 41-48.
5. Norton, T., and D.W. Sun. 2006. Computational fluid dynamics (CFD) - an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 17 (2006) 600-620.
6. Mathioulakis, E., V. T. Karathanos, and V. G. Belessiotis. 1998. Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: application for the drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 36, 183-200.
7. Deissler, R. G. 1998. *Turbulent Fluid Motion*. USA. Taylor & Francis.

۸. ادیب زاده، و. ۱۳۸۲. بررسی وضعیت آلودگی و تهویه زیر گذر زند شیراز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شیراز.

۹. مرتضوی، ح. ۱۳۸۶. آنالیز سه بعدی عملکرد حرارتی و سیالی شبکه فلزی بافته شده به منظور استفاده در بازیاب های حرارتی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شیراز.