



مدل‌سازی جریان بخار آب در خشک‌کن استوانه‌ای با روش المان محدود جهت خشک‌کردن ژل گیاه صبرزرد (*Aloe vera*)

سیدرضی کریمی‌آکندی^۱، اکبر عرب‌حسینی^{۲*}، جواد خزائی^۲، غلامرضا چگینی^۲

۱. دانشجوی دکتری، مهندسی بیوسیستم، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۹۶/۹/۲۲، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۶/۱۱/۲۲، تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۴)

چکیده

گیاه صبرزرد *Aloe vera* از تیره *Liliaceae* در شمار گیاهان دارویی با ارزش افزوده بالا قرار دارد. یکی از روش‌های مصرف ژل این گیاه، استفاده از پودر خشک آن است. در این تحقیق برای خشک‌کردن محصول از خشک‌کن استوانه‌ای استفاده شد. بررسی انتقال حرارت در یک خشک‌کن استوانه‌ای با روش المان‌های محدود انجام شد. برای بررسی یکنواختی و حداکثر انتقال حرارت جریان بخار آب داغ به دیواره استوانه خشک‌کن، از چهار نوع مدل استوانه استفاده شد که از ترکیب دو پارامتر کنترل جریان خروجی بخار داغ از استوانه و وجود مانع جهت توزیع یکنواخت‌تر بخار به دست آمد. مدل A با خروجی باریک و مدل B با خروجی پهن و هردو بدون مانع بودند. هم‌چنین در مدل‌های C و D، در قسمت ورودی مانعی مخروطی شکل به مدل‌های A و B اضافه شد. اثر دو دبی جرمی بخار ورودی با دبی ۱ و ۲ kg/s بر روی چهار مدل استوانه نیز بررسی گردید. نتایج مدل‌سازی از نظر یکنواختی توزیع حرارت و نیز حداکثر انتقال حرارت بر روی پوسته استوانه حائز اهمیت بود. نتایج نشان داد که نصب زائده مخروطی درون استوانه خشک‌کن سبب می‌گردد تا در همان لحظه اول بخار داغ به زیر پوسته هدایت شود به طوری که دما در بیش‌ترین حالت انتقال حرارت به بالاتر از ۴۸۵ K رسید. این زائده مخروطی سبب می‌شود بخار داغ از ابتدای استوانه تا انتهای آن مسیر خود را در زیر پوسته دیواره ادامه دهد که البته در طی این مسیر دمای پوسته به‌طور یکنواخت و حدود ۱۰ K کاهش می‌یابد. هم‌چنین کم‌ترین دما به تغییرات دما به مقدار ۶ K بر روی استوانه برای مدل B و دبی جرمی ۱ kg/s در کل دما به بیش‌ترین دما به مقدار ۴۷۶ K در میانه استوانه و کم‌ترین دما به مقدار ۴۷۰ K در ابتدا و انتهای استوانه بود.

واژه‌های کلیدی: ژل، انتقال حرارت، خشک‌کن استوانه‌ای، صبرزرد، گیاهان دارویی.

۱. مقدمه

خشک کردن ژل صبرزرد و تبدیل آن به پودر استفاده شده که عمده‌ترین آن روش‌های خشک‌کن انجمادی و خشک‌کن پاششی می‌باشد.

خشک‌کن‌های پاششی بر مبنای برخورد هوای داغ با ذرات پودر شده مایع عمل می‌کند. پودر کردن سیال سبب می‌شود انتقال حرارت و جرم به حداکثر خود رسیده و نرخ انتقال رطوبت از ماده به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. خشک‌کن‌های پاششی اگرچه ممکن است مناسب‌ترین روش برای خشک کردن مایعات باشند [۱۴]، ولی به فضای بزرگی نیاز دارند تا ذرات مایع فرصت کافی برای تماس با هوای داغ و خشک شدن داشته باشد [۱۵].

خشک‌کن استوانه‌ای از روش‌های کم‌هزینه برای خشک کردن مایعات می‌باشد. در این روش، به جای به‌کارگیری هوای داغ به‌عنوان عامل خشک‌کن، از صفحات داغ استفاده می‌شود [۱۶]. مواد مایع بر روی سطح خارجی داغ استوانه در حال چرخش پاشیده شده و پس از خشک شدن توسط تیغه‌هایی از سطح آن تراشیده می‌شود. نرخ خشک کردن و بازدهی حرارتی این نوع خشک‌کن‌ها نسبت به سایر انواع خشک‌کن‌ها بیش‌تر است [۱۷]. از آن‌ها اغلب برای تولید پودر سوپ، غذای کودک و هم‌چنین محصولات نشاسته‌ای مانند سیب‌زمینی و غلات و نیز به‌صورت گسترده در صنایع غذایی و شیمیایی استفاده می‌شود. هم‌چنین استفاده از این نوع سیستم‌های خشک‌کن برای خشک کردن مایعات با ویسکوزیته بالا توصیه می‌شود [۱۸]. برخی از پارامترهای مهم موثر بر کارایی این نوع خشک‌کن‌ها عبارتند از: دمای سطح استوانه، قطر استوانه، ضخامت پوسته استوانه، جنس سطح، دبی پاشش سیال و سرعت چرخش استوانه. در این نوع خشک‌کن‌ها به‌طور معمول از بخار آب برای تامین حرارت مورد نیاز برای گرم کردن سطح استوانه استفاده می‌شود.

در خشک‌کن‌های استوانه‌ای ابتدا یک لایه نازک از محصولات غذایی با ضخامت بین نیم تا دو میلی‌متر بر روی سطح خارجی استوانه داغ پاشیده می‌شود. دمایی که در این خشک‌کن‌ها اعمال می‌شود بین ۱۲۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد. قطر استوانه-ها از نیم تا شش متر و طول آن‌ها بین یک تا شش متر تغییر می‌کند. ضخامت دیوار استوانه نیز ۱ تا ۴ سانتی‌متر می‌باشد [۱۹]. قسمت عمده رطوبت در دمای اشباع آب تبخیر می‌شود.

صبرزرد با نام علمی Aloe vera از تیره *Liliaceae* در شمار گیاهان دارویی با ارزش افزوده بالا قرار دارد. این گیاه، بومی جنوب و سواحل شرقی آفریقا می‌باشد که امروزه به‌دلیل اهمیت دارویی آن در کشورهای متعددی کشت و از آن بهره‌برداری می‌شود [۱، ۲]. از بخش میانی برگ‌ها که عمدتاً سلول‌های مزوفیل یا پارانشیم شامل فیله ژل است، در صنایع مختلف دارویی بهداشتی و غذایی استفاده می‌شود [۳، ۴]. امروزه گونه‌های وحشی صبرزرد را در بسیاری از مناطق حاشیه خلیج فارس می‌توان یافت [۵، ۶].

باتوجه به تعدد فراورده‌های به‌دست آمده از ژل آلوورا و کاربرد روز افزون آن‌ها، صنایع فراوری آن را به یکی از صنایع بزرگ در سرتاسر جهان تبدیل کرده [۷] به‌طوری که در سال ۲۰۰۴ حجم گردش نقدینگی در بازار جهانی مواد خام برگ صبرزرد برابر با ۱۲۵ میلیون دلار و برای محصولات نهایی از گیاه صبرزرد ۱۱۰ میلیارد دلار برآورد شده است [۸]. اما در ایران طبق بررسی‌های انجام گرفته این صنعت به‌صورت تجاری وجود ندارد. بنابراین نیاز به تحقیق و پژوهش و سرمایه‌گذاری در زمینه صنایع فراوری این محصول احساس می‌شود [۷].

با توجه به حجم بالای آب در بافت میوه‌ها و سبزی‌ها، از گذشته‌های دور برای افزایش ماندگاری، کاهش ضایعات و سادگی حمل و نقل از خشک کردن استفاده شده است [۹-۱۱]. هدف اصلی از فرایند خشک کردن، کاهش محتوی رطوبتی به سطح ایمن می‌باشد. با این حال خشک کردن خود عاملی برای جلوگیری از خسارت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌باشد که می‌تواند ویژگی‌های کیفی ماده از قبیل طعم، رنگ، بو و ارزش غذایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۲، ۱۳]. در حدود ۹۹٪ از ژل صبرزرد محتوی رطوبتی آن و تنها ۱٪ از آن ماده موثره می‌باشد. همین امر علاوه بر فسادپذیر کردن ژل و نیز مشکلات انبارداری و حمل و نقل، برای تولید محصولات دارویی و آرایشی و بهداشتی نیز مشکل‌زا می‌باشد، زیرا داروساز تنها با استخراج ماده موثره آن می‌تواند حجم زیادی را در قالب دارو استفاده نماید. در نتیجه یکی از مهم‌ترین روش‌های مصرف این ژل، استفاده از پودر خشک شده آن است. به‌همین دلیل خشک کردن ژل صبرزرد مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته و از روش‌های مختلفی برای

نیز جهت دهی حرکت بخار درون استوانه، در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. برای کنترل ورودی از دبی‌های مختلف استفاده شده و برای کنترل خروجی دهانه خروجی مورد بررسی واقع شد و همچنین از یک زائده مخروطی برای هدایت جریان بخار داغ به سمت دیواره استوانه استفاده گردید.

با توجه به توضیحات فوق در مورد مزایا و کاربرد گیاه دارویی صبرزد و همچنین مزیت مطرح شده در مورد خشک‌کن‌های استوانه‌ای، مطالعه بر روی طراحی استوانه خشک‌کن به‌عنوان قلب این نوع دستگاه ضروری است. هدف اصلی در این تحقیق مدل‌سازی جریان بخار آب درون استوانه خشک‌کن استوانه‌ای با روش المان محدود جهت خشک کردن گیاه صبرزد می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق مدلی از استوانه برای خشک کردن ژل صبرزد با استفاده از خشک‌کن استوانه‌ای مد نظر قرار گرفت. هدف از این مدل مناسب، دستیابی به شرایط بهینه عملیاتی دستگاه جهت داغ شدن بیش‌تر در اثر حداکثر انتقال حرارت از منبع تامین حرارت و همچنین یکنواختی دمای دیواره استوانه برای کنترل بهتر شرایط خشک کردن ژل صبرزد می‌باشد.

۱.۲. ساختار دستگاه

اجزا ساختمانی خشک‌کن مورد نظر در این تحقیق شامل استوانه‌های دوار با جنس استیل ضد زنگ، تیغه جدا کننده، موتور و گیربکس، دیگ بخار به‌عنوان منبع حرارتی، مخزن ماده اولیه، پمپ ماده اولیه، افشانک مواد و مخزن ماده خشک شده می‌باشد (شکل ۱).

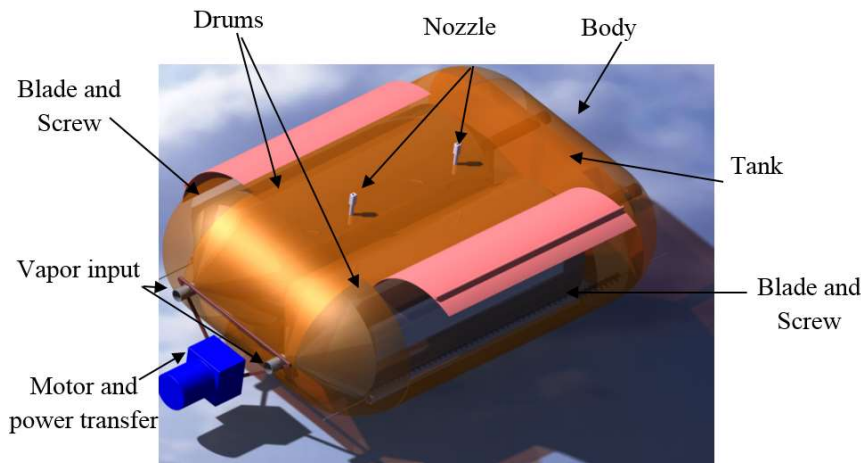
در خشک‌کن‌های استوانه‌ای به‌منظور افزایش بهره‌وری سیستم گرمایشی و همچنین استفاده مضاعف از افشانک‌ها به‌صورت مشترک، به‌طور معمول از استوانه‌های دوقلو در سیستم خشک‌کن‌های استوانه‌ای پاششی استفاده می‌شود. استوانه این نوع خشک‌کن‌ها به‌صورت یک استوانه توخالی با قطر یک و طول دو متر می‌باشد. حرارت مورد نیاز خشک‌کن با استفاده از دیگ بخار تامین و به داخل استوانه‌ها راه می‌یابد. درون این استوانه توخالی محل عبور بخار آب بوده به‌طوری که بخار آب داغ تولید شده از دیگ بخار با دمای حدود 220°C از یک طرف وارد و از طرف دیگر خارج و به دیگ بخار باز می‌گردد. دیگ بخار به‌طور معمول

مدت زمان قرارگیری محصولات روی استوانه به‌طور معمول بین ۲۰ تا ۲۰۰ ثانیه است، تا میزان رطوبت، به محتوی رطوبتی مورد نظر برسد. سرعت چرخش استوانه بین ۲ تا ۳۰ دور در دقیقه و همچنین فشار بخار بین ۲ تا ۷ بار می‌باشد [۲۰]. محصول ممکن است پیش از خشک شدن، گرم و یا تغلیظ گردد تا فشار کم‌تری به سیستم وارد شود [۲۱]. البته در صورت تغلیظ بیش از اندازه لایه محصول به خوبی شکل نمی‌گیرد و کیفیت نهایی محصول افت می‌کند. پیش از آن‌که استوانه یک دور کامل را طی کند، لایه محصول خشک شده و به‌وسیله تیغه مخصوص جدا می‌گردد سپس محصول به‌وسیله نقاله به مخزن انتقال داده می‌شود. در نهایت این لایه جدا شده توسط دستگاه آسیاب، خرد شده و تبدیل به پودر می‌شود [۲۲، ۲۳].

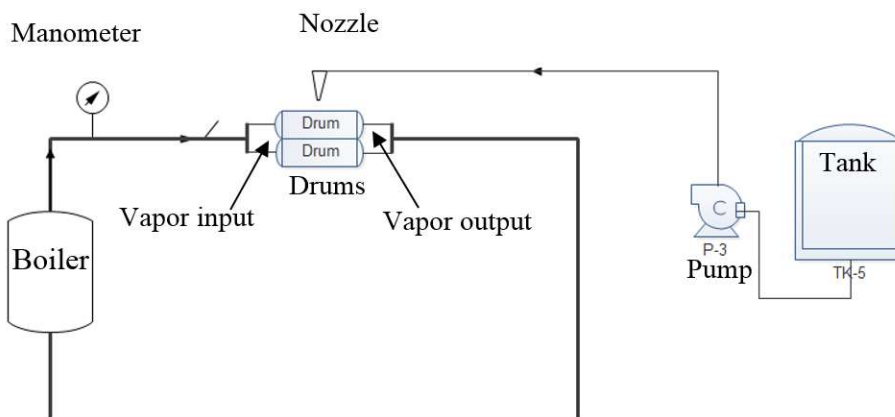
چنان‌چه استوانه خشک‌کن استوانه‌ای به‌گونه‌ای طراحی گردد که حداکثر انتقال حرارت بین منبع حرارتی و صفحه داغ رخ دهد، مصرف انرژی آن به مراتب کم‌تر از خشک‌کن‌های پاششی است [۲۴]. در نتیجه پیشنهاد مناسب‌ترین مدل برای حداکثر انتقال حرارت به‌همراه حفظ یکنواختی دما در سرتاسر خشک‌کن ضروری است. امروزه با توجه به توسعه علوم المان محدود^۱ و رشد چشم‌گیر نرم‌افزارهای مرتبط با سیالات و انتقال حرارت مانند نرم‌افزار Ansys fluent، پیش‌بینی مدل‌های سیالاتی بسیار آسان و کم‌هزینه شده است. نرم‌افزار Fluent یکی از مناسب‌ترین نرم‌افزارهای برنامه‌نویسی برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده می‌باشد که اساس کار آن، روش المان محدود است. این نرم‌افزار قابلیت شبیه‌سازی و مدل کردن جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر، تحلیل پایا^۲ یا گذرا^۳، جریان‌های لزج، آرام و متلاطم، سیال‌های نیوتنی و غیرنیوتنی، جریان‌های دو فازی و چند فازی و جریان‌های سطح آزاد^۴ با شکل‌های سطح پیچیده را دارد [۲۵].

با توجه به این‌که در خشک‌کن‌های استوانه‌ای، بخار داغ از یک سوی استوانه وارد شده و از سوی دیگر خارج می‌گردد، هدایت جریان این بخار داغ برای حداکثر انتقال حرارت و همچنین یکنواختی دمای صفحه داغ، جهت کنترل بهتر فرایند انتقال جرم دارای اهمیت بالایی است. در نتیجه سه عامل ورودی، خروجی و

1. Finite element
2. Steady state
3. Transient
4. Free surface



شکل (۱) شماتیک استوانه خشک‌کن استوانه‌ای دوقلو.
Fig. 1 Schematic diagram of the double drum dryer.



شکل (۲) نمودار مسیر جریان بخار داغ و ماده خشک شونده در خشک‌کن استوانه‌ای.
Fig. 2 The circulation of water vapor and material to be dried in drum dryer.

۲.۲. مدل‌های هندسی استوانه‌ها

در این بررسی برای تمامی مدل‌ها از استوانه‌هایی یکسان با قطر ۱ متر و طول ۲ متر استفاده شد و برای یکنواختی و حداکثر انتقال حرارت به دیواره‌های استوانه از دو مکانیسم استفاده گردید. مکانیسم اولی بسته به میزان دهانه خروجی بخار آب، سرعت خروج را کنترل و باعث افزایش و یا کاهش انتقال حرارت به بدنه شده و دومی با استفاده از یک زائده مخروطی شکل در قسمت ورودی و داخل استوانه استفاده شد که باعث انتقال مستقیم بخار آب به زیر پوسته شده و حداکثر انتقال حرارت را شامل گردد. لذا در این تحقیق از چهار مدل مختلف A، B، C و D استفاده شد (شکل ۳). با توجه به هم راستا بودن دهانه ورودی و خروجی در مدل‌های A و B، از دو پهنای خروجی بخار آب داغ استفاده شد.

با دبی جرمی ۰/۵ تا ۳ کیلوگرم بخار آب در ثانیه استفاده می‌شود [۲۶]. ژل صبرزد در مرحله نخست در مالتودکسترین جهت کاهش گرانبوی و اتمیزه‌تر شدن قطرات ژل حل شده و سپس با استفاده از نازل‌های صفحه‌ای که در محل اتصال دو استوانه قرار داده شده است به صورت لایه نازک و یکنواخت پاشیده می‌گردد. استوانه‌ها در خلاف جهت یکدیگر با سرعت ثابت دوران می‌کنند و ژل پاشیده‌شده روی استوانه بعد از یک چرخه ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه خشک و سپس از تیغه‌های تیز برای جدایش لایه ژل خشک‌شده از سطوح استوانه‌ها استفاده می‌گردد (شکل ۲). در مرحله نهایی لایه‌های جداشده به سامانه پودرسازی منتقل می‌گردد.

اشکال مورد نظر با استفاده از نرم‌افزارهای CAD، (ب) شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی برای سامانه مدنظر، (ج) حل معادلات انتقال حرارت برای هریک از المان‌های محدود و (د) نمایش گرافیکی نتایج [۲۷]. لذا نخست مدل‌های هندسی در نرم‌افزار گمبیت ترسیم شده و در مرحله بعد، شبکه‌بندی و در نهایت در این نرم‌افزار شرایط مرزی مدنظر اعمال گردید. سپس خروجی به دست آمده به نرم‌افزار Ansys Fluent 18 منتقل [۲۸] و بعد از همگرا شدن مسئله پاسخ‌ها برای ثانیه دوم (شکل ۴)، و نتایج گرافیکی برای دما و سرعت حرکت بخار داغ استخراج شد.

۴.۲. مدل‌سازی ریاضی

با توجه به این که در مدل‌های مورد نظر بخار داغ از یک سمت وارد و از سوی دیگر خارج می‌شود و در واقع تبادل جرمی وجود دارد، یک سیستم باز فرض می‌شود. سطوح کنترلی این سیستم، جداره‌های داخلی استوانه و نیز قسمت‌های ورودی و خروجی می‌باشند. این سامانه نیز به صورت حجم کنترل تحلیل می‌گردد. هم‌چنین در سامانه‌های مورد بحث دمای ثابتی به دیواره اعمال شده و انتقال گرما نیز وجود دارد، بنابراین سامانه به صورت ایزوترمال و غیر آدیاباتیک عمل می‌کند. توزیع حرارت $T(y,z)$ در درون استوانه‌های خشک‌کن از رابطه (۱) پیروی می‌کند.

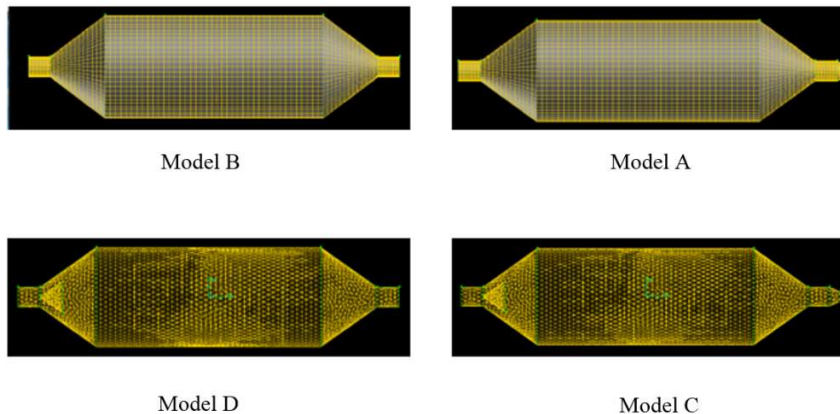
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial z} = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

که در آن y ، مختصات در طول ضخامت دیواره خشک‌کن و z

در مدل A به دلیل باریک بودن دهانه خروجی با قطر ۱۰ cm، سرعت خروج بخار آب را کاهش داده و در نتیجه بخار فرصت انتقال به طرفین و برخورد بیش‌تر با دیواره داخلی جداره را پیدا می‌کند (شکل ۳-a) ولی در مدل B با توجه به این که خروجی پهن‌تر با قطر ۲۰ cm بوده، سرعت حرکت بخار بیش‌تر می‌باشد، ولی به احتمال زیاد حجم کم‌تری از بخار فرصت پیدا می‌کند با دیواره داخلی جداره تماس حاصل کند (شکل ۳-b). با توجه به این که در این دو مدل ورودی و خروجی کاملاً هم‌راستا بوده، با استفاده از زائده‌ای مخروطی شکل در مدل‌های C و D این ضعف رفع شده و جریان ورودی بخار را به طور مستقیم به جداره داخلی دیواره هدایت می‌کند (شکل ۳-c و ۳-d). در این مدل‌ها از ابتدای مسیر بخار در تماس با جداره، کم‌کم از درجه حرارت آن کاسته شده و در نتیجه در انتهای مسیر انتقال حرارت کم‌تری را ممکن می‌سازد. شعاع و ارتفاع زائده مخروطی ۱۵ cm با زاویه قائده ۴۵ درجه در نظر گرفته شد و این زائده در فاصله طولی ۱۰ cm از دیواره ورودی استوانه نصب شد. با توجه به شرایط مطرح شده، بررسی ادغام دو مکانیسم تنظیم مقدار پهنای خروجی دهانه بخار آب و نصب یا عدم نصب زائده مخروطی شکل به طور همزمان در چهار مدل ضرورت یافت (شکل ۳).

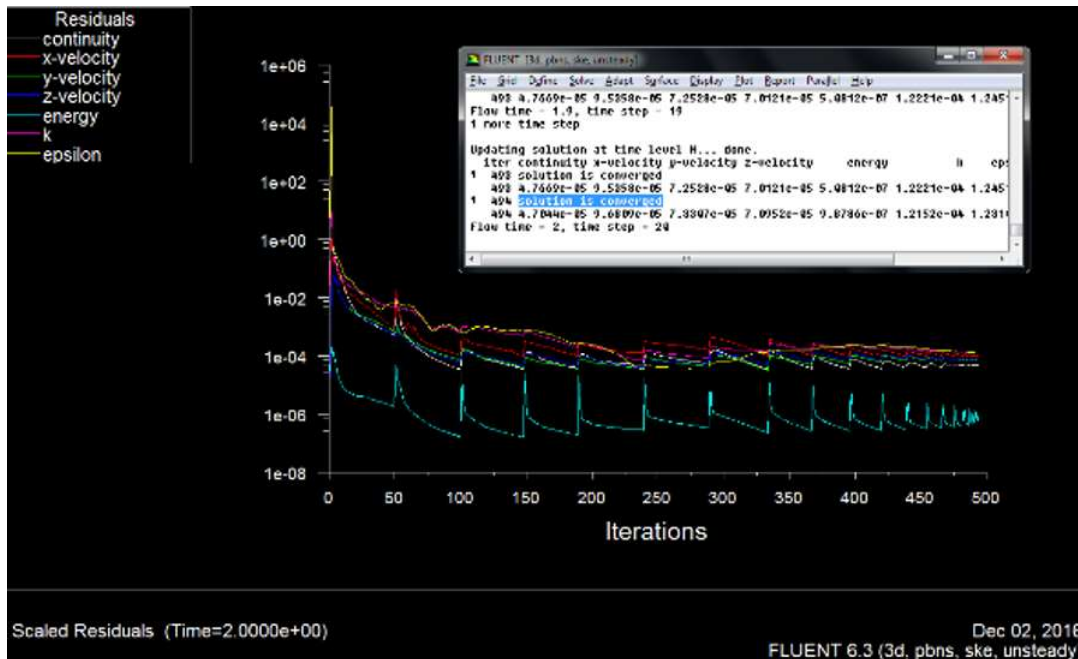
۳.۲. شبیه‌سازی

در این تحقیق برای مدل‌سازی فرایند انتقال حرارت استوانه‌های خشک‌کن از نرم‌افزار Ansys Fluent 18 استفاده شد. برای این منظور از مراحل زیر استفاده گردید: الف) ترسیم هندسی



شکل (۳) تصویر شبکه‌بندی استوانه داغ در چهار مدل استفاده شده.

Fig. 3 The networking of the hot drum in four models, used in this research.



شکل (۴) حل مسئله در Ansys Fluent 18 و همگرایی پاسخ.

Fig. 4 The problem solution in Ansys Fluent 18 and the response convergence.

هستند، در این نرم‌افزار استفاده شده‌اند. در این تحقیق معادلات حاکم بر اساس دیدگاه اولری بیان شده است [۲۵]. بیان ریاضی این معادلات به شکل تانسوری برای معادلات بقای جرم (پیوستگی) (معادله ۵) و بقای مومنتم (معادله ۶) می‌باشند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g x_i + \nu \nabla^2 u_i \quad (6)$$

که u_i مولفه سرعت در جهت محور x_i مقدار فشار در هر نقطه از سیال، ν لزجت مولکولی بخار داغ که برابر $1/34 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ و چگالی سیال که برابر مقدار ثابت 0.5542 kg/m^3 فرض گردید.

۵.۲. کنترل المان‌های اجزای محدود

ابعاد مش‌بندی و کنترل المان‌های مدل اجزای محدود از مسائل مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد تا از صحیح بودن آن (از نظر فیزیکی و عددی) اطمینان حاصل شود. با این عمل می‌توان مطمئن شد که کلیه المان‌های تولیدشده از نظر

مختصات در طول محیط یک استوانه می‌باشد به طوری که ذره در هر لحظه در آن نقطه قرار دارد. هم‌چنین k هدایت حرارتی، ρ چگالی و C_p گرمای ویژه دیواره خشک‌کن می‌باشد. u نیز به سرعت خطی حرکت ذره بر روی استوانه گفته می‌شود، به طوری که $u = dz/dt$ [۲۹].

معادله حاکم در شرایط مرزی دیواره خشک‌کن در نقطه $y=0$ (سطح داخلی استوانه) برابر است با:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_s - T) \quad (2)$$

که T_s دمای بخار و h ضریب انتقال حرارت بخار آب می‌باشد. هم‌چنین در $w=y$ (سطح بیرونی استوانه) عبارتند از:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = Q(T.X) \quad \text{for } iL < z < iL + L_1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{for } iL + L_1 < z < (i+1)L \quad (4)$$

معادله‌های اساسی پیوستگی و سه معادله مومنتم در جهت محوره‌های سه گانه مختصات که به معادلات ناویراستوکس معروفند و در واقع بیانگر بقای جرم و مومنتم به شکل ریاضی

کشیده شده و در نتیجه کاهش سرعت را در خط فرضی زیر پوسته حاصل می‌کند. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد بیش‌ترین سرعت حرکت بخار داغ در زیر پوسته استوانه، برای جریان با دبی جرمی 1 kg/s و مدل D می‌باشد. در این مدل به دلیل وجود زائده مخروطی بخار داغ با سرعت به محل زیر پوسته‌ها منتقل و با سرعت بیش از 5 m/s شروع و در نهایت بعد از طی مسیر دو متری طول استوانه، با سرعت 2 m/s خارج می‌گردد. برای مدل C به دلیل باریک بودن خروجی، فشار درون سیستم بالا رفته و در نتیجه جریان بخار داغ از همان ابتدای مسیر، حرکت خود را به سمت مرکز استوانه شروع می‌کند. به همین علت سرعت در راستای محور طولی برای مدل C کم‌تر از مدل D می‌باشد. در همین مدل سرعت در نزدیکی جداره استوانه از سرعت $2/5 \text{ m/s}$ به سرعت 1 m/s کاهش می‌یافت. برای مدل‌های A و B به دلیل عدم وجود مانع در مسیر حرکت بخار داغ، سیال از ورودی وارد شده و مستقیماً به سمت خروجی هدایت می‌گردد. بخار به مرور از محور اصلی جدا و به سمت زیر پوسته‌ها هدایت می‌گردند. هنگامی این بخارها به زیر پوسته می‌رسد که طول زیادی از مسیر حرکت را سپری کرده باشد. هنگامی که جریان به محل خط فرضی رسید به سمت عقب (راستای منفی x) حرکت می‌کند (شکل ۵). برای مدل A به دلیل عدم وجود جزء مخروطی شکل، کم‌ترین سرعت بخار آب در زیر پوسته ایجاد گردید. ولی برای مدل B سرعت در جهت عکس (منفی) و به مقدار حداکثر 2 m/s بود که علت آن هم می‌تواند به دلیل خروجی آزاد آن جریان در انتهای مسیر به زیر پوسته رسیده و از آن‌جا جریان تا ابتدای مسیر تقویت می‌گردد (شکل ۵-a).

برای دبی جرمی 2 kg/s به دلیل افزایش سرعت جریان بخار داغ ورودی، مدل‌های A و B رفتار مشابهی نزدیک به صفر را نشان دادند، به طوری که جریان با ورود به درون استوانه مستقیم از خروجی خارج می‌گردد، لذا نتایج نشان می‌دهد چنان‌چه قرار باشد استوانه‌ها بدون زائده مخروطی ساخته شوند دبی جرمی 1 kg/s و خروجی پهن بهترین سرعت جریان را در زیر پوسته حاصل می‌کند.

همان‌طور که برای دبی جرمی 1 kg/s در مدل‌های C و D ملاحظه شد، برای دبی جرمی 2 kg/s نیز زائده مخروطی سبب افزایش سرعت در ابتدای مسیر شده و به مرور تا انتهای مسیر به‌طور معناداری کاهش پیدا می‌کند. نتایج دبی جرمی 2 kg/s

تحلیل‌گر اجزای محدود قابل قبول می‌باشد. در طی این عملیات کلیه المان‌های نامطلوب مشخص شده، تصحیح می‌شوند. ابعاد مش‌بندی به مسائل زیادی ارتباط دارد، از جمله: نوع تحلیل، هندسه جسم، نوع بارگذاری، قابلیت سخت‌افزاری، زمان [۳۰].

۶.۲. شرایط مرزی

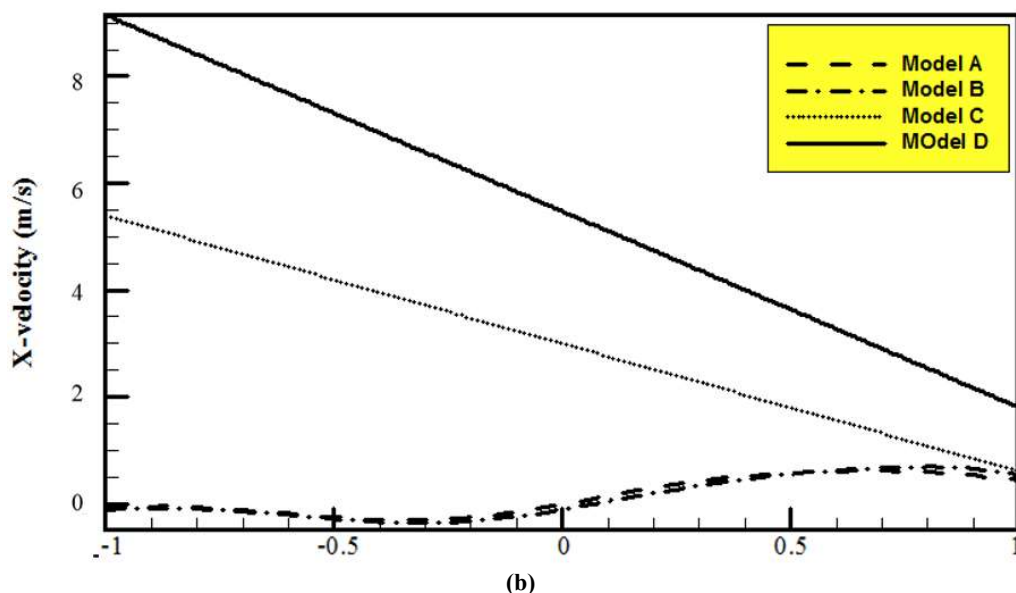
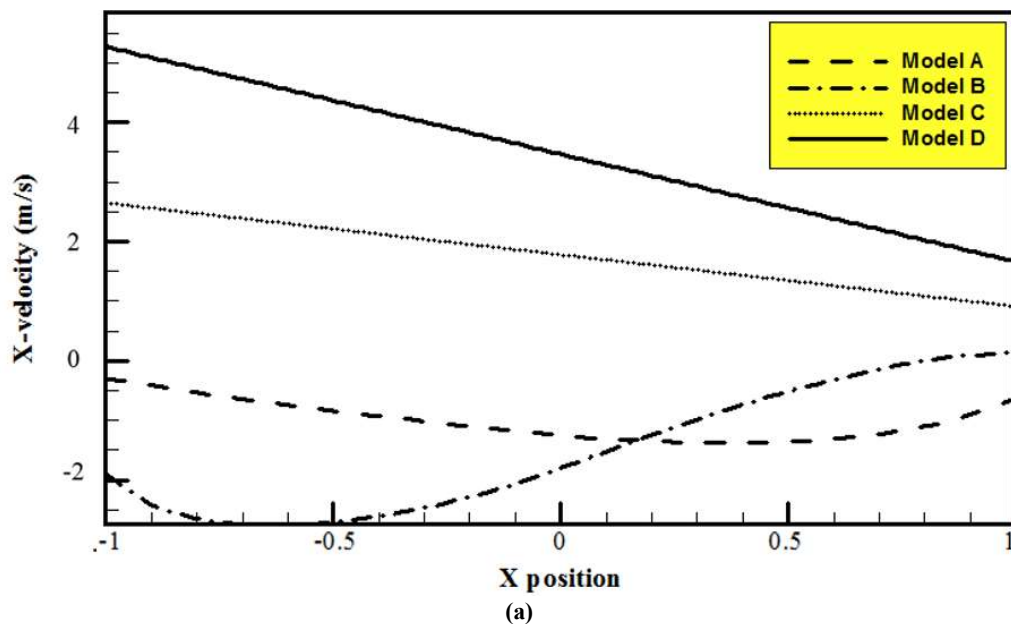
دبی جرمی بخار آب ورودی با توجه به ظرفیت دیگ بخار در دو سطح ۱ و 2 kg/s در نظر گرفته شد. ضخامت استوانه یک سانتی‌متر و دمای بخار آب ورودی با توجه به ظرفیت تولید حرارت منابع حرارتی که بین $180-260^\circ \text{C}$ می‌باشد، 220°C و دمای محیط 25°C فرض گردید. هم‌چنین فشار ورودی به سیستم 10 bar و برای فشار بخار آب در دهانه خروجی 1 bar در نظر گرفته شد. جریان گذرای داخل استوانه هم سیال بخار آب تعیین شد.

۷.۲. خروجی شبیه‌سازی

جهت استخراج نتایج چگونگی سرعت در راستای محور طولی (x) و دما در نقاط مختلف استوانه از یک خط فرضی در زیر پوسته استوانه و یک صفحه گذری از میانه طولی استوانه استفاده شد. سرعت و دما در زیر پوسته به صورت نمودار بر روی خط فرضی و به صورت شماتیک بر روی صفحه فرضی استخراج و در نهایت با انتقال به نرم‌افزار تکپلات برای نمایش و انتشار آماده گردید. راستای طولی استوانه در راستای x ترسیم شد و میانه استوانه نیز نقطه صفر فرض گردید. در نتیجه در نیمه نخست طول در راستای x منفی و در نیمه دوم به صورت مثبت می‌باشد.

۳. نتایج و بحث

بخار داغ با ورود به درون استوانه، در فضای درونی آن توزیع می‌گردد تا به زیر پوسته رسیده و حرارت موجود را منتقل نماید. مدل‌های C و D به دلیل وجود زائده مخروطی در ابتدای مسیر با سرعت مثبت اولیه بالایی برخوردار هستند و رفته رفته کاهش می‌یابد. این کاهش سرعت کاملاً طبیعی و قابل پیش‌بینی است. چون جریان بخار داغ بعد از ورود به استوانه از دهانه و عبور از زائده مخروطی، در اثر سرعت رو به جلویی که دارد (راستای محور x)، در فضای پشتی قاعده مخروط، خلاء ایجاد کرده ولی در طی مسیر این جریان کم‌کم از زیر پوسته به سمت مرکز استوانه



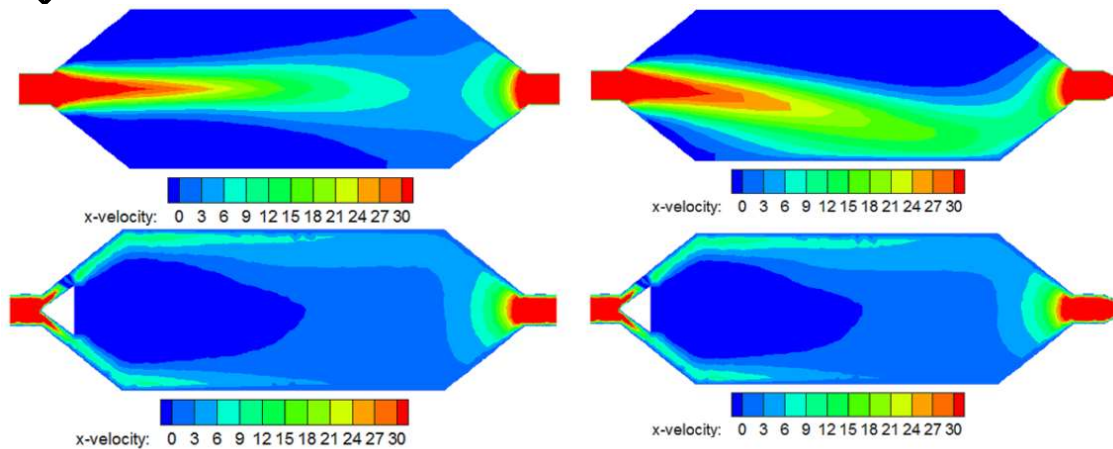
شکل (۵) سرعت بخار در داخل استوانه خشک کن در هر یک از چهار مدل A, B, C و D. (a) در دبی جرمی ۱ kg/s، (b) در دبی جرمی ۲ kg/s.

Fig. 5 Steam speed inside the drying cylinder in each of the four models A, B, C and D. a) at a mass flow rate of 1 kg/s, b) in a mass flow rate of 2 kg/s.

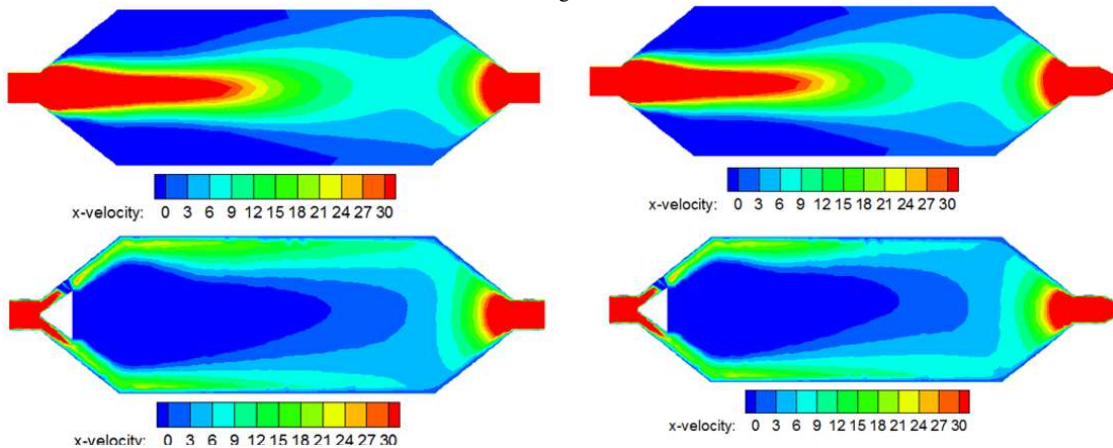
است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت وجود زائده مخروطی شکل جریان مستقیم به زیر پوسته منتقل و با سرعت بالایی تا انتهای مسیر طی می‌گردد ولی در صورت عدم وجود این زائده‌ها محور مرکزی استوانه دارای بیشترین سرعت بوده و هرچه به پوسته نزدیک‌تر شود سرعت آن کم‌تر می‌گردد. در چنین

برای مدل‌های زائده دار کاملاً مطابق با دبی جرمی ۱ kg/s با مدل - های مشابه بوده است (شکل b-۵).

شماتیک توزیع سرعت جریان بخار در صفحه فرضی میانی استوانه برای مدل‌های A, B, C و D در دبی جرمی ۱ kg/s (شکل ۶) و برای جریان دبی جرمی ۲ kg/s (شکل ۷) نمایش داده شده



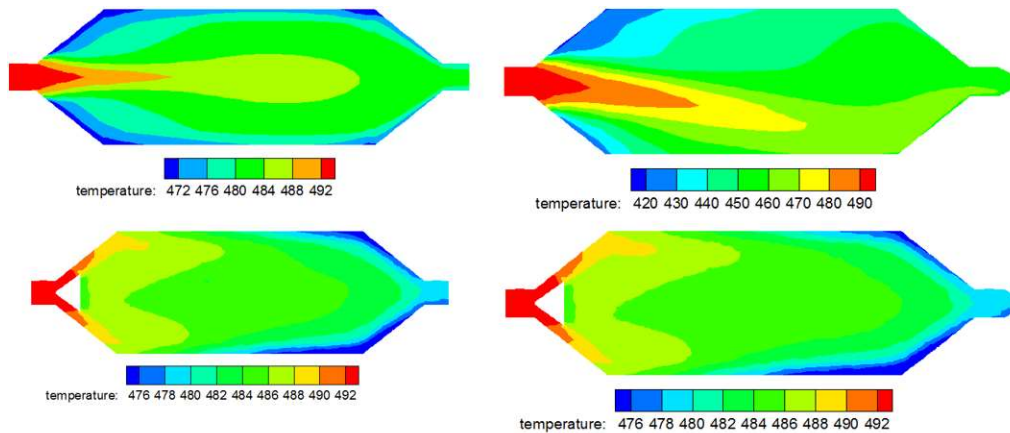
شکل (۶) شماتیک توزیع سرعت جریان بخار در صفحه فرضی میانی استوانه برای مدل‌های A، B، C و D در جریان دبی جرمی ۱ kg/s.
Fig. 6 schematic of the distribution of the vapor flow velocity on a cylindrical hypothetical plate for models A, B, C, and D in a mass flow rate of 1 kg/s.



شکل (۷) شماتیک توزیع سرعت جریان بخار در صفحه فرضی میانی استوانه برای مدل‌های A، B، C و D در جریان دبی جرمی ۲ kg/s.
Fig. 7 schematic of the distribution of the vapor flow velocity on a cylindrical hypothetical plate for models A, B, C, and D in a mass flow rate of 2 kg/s.

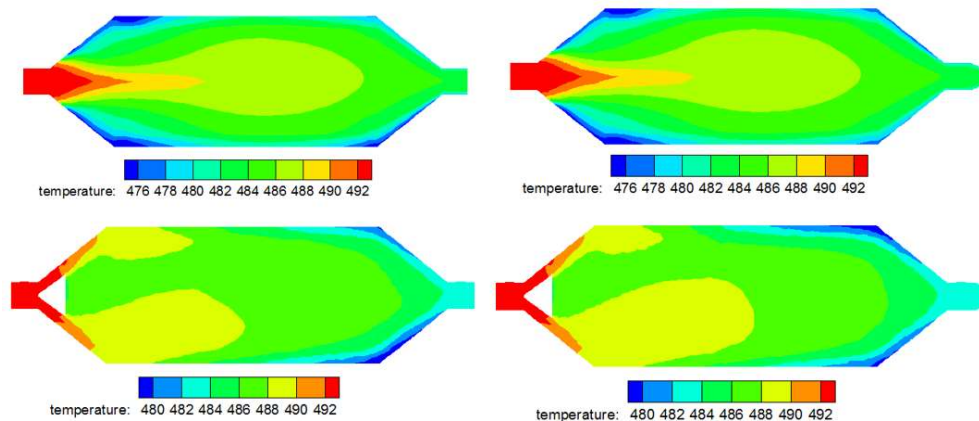
وضعیتی کاملاً طبیعی است که گرمای کم‌تری به پوسته منتقل گردد (شکل ۶). با توجه به این که دیواره مخروط کاملاً موازی با دیواره استوانه در نظر گرفته شده و همین امر سبب یکسانی فاصله طولی در کل طول دیواره مخروط با دیواره استوانه می‌باشد. این یکسانی طولی سبب می‌شود که جریان از روی سطح دایره‌ای به شعاع ۱۰ cm در نقطه ورود، به سطوح حلقوی رسیده که اختلاف شعاع دو دایره ۱۰ cm حفظ می‌شود. هرچه جریان بخار داغ طی هدایت مخروط به جلوتر هدایت می‌شود با افزایش ارتفاع زائده مخروطی شکل روبرو و در نتیجه شعاع دایره‌های حلقه نیز افزایش می‌یابد. این افزایش شعاع، سطح بیش‌تری از حلقه را می‌سازد که همین امر موجب کاهش ناگهانی سرعت از ۳۰ به ۸ m/s می‌گردد. مشابه جریان دبی جرمی ۱ kg/s برای جریان دبی جرمی ۲ kg/s نیز دیده می‌شود. به طوری که با افزایش دو برابری دبی جرمی، سرعت نیز تقریباً دو برابر می‌گردند (شکل ۷). شماتیک توزیع حرارتی در صفحه فرضی میانی استوانه برای مدل‌های A، B، C و D برای جریان دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. در مدل‌های بدون زائده مخروطی شکل مرکز استوانه در داغ‌ترین حالت بوده و هرچه به کناره‌ها نزدیک‌تر می‌شود گرمای انتقال یافته نیز کاهش می‌یابد. هم‌چنین در این مدل‌ها میانه طول پوسته نسبت به ابتدا و انتهای پوسته گرم‌تر بوده ولی در مدل‌هایی که درون آن‌ها زائده مخروطی نصب گردید. در همان ابتدای مسیر پوسته

۸ m/s می‌گردد. مشابه جریان دبی جرمی ۱ kg/s برای جریان دبی جرمی ۲ kg/s نیز دیده می‌شود. به طوری که با افزایش دو برابری دبی جرمی، سرعت نیز تقریباً دو برابر می‌گردند (شکل ۷). شماتیک توزیع حرارتی در صفحه فرضی میانی استوانه برای مدل‌های A، B، C و D برای جریان دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. در مدل‌های بدون زائده مخروطی شکل مرکز استوانه در داغ‌ترین حالت بوده و هرچه به کناره‌ها نزدیک‌تر می‌شود گرمای انتقال یافته نیز کاهش می‌یابد. هم‌چنین در این مدل‌ها میانه طول پوسته نسبت به ابتدا و انتهای پوسته گرم‌تر بوده ولی در مدل‌هایی که درون آن‌ها زائده مخروطی نصب گردید. در همان ابتدای مسیر پوسته



شکل (۸) شماتیک توزیع حرارتی در صفحه فرضی میانی استوانه برای مدل‌های A, B, C و D در جریان دبی جرمی ۱ kg/s.

Fig. 8 Schematic of thermal distribution on a cylindrical hypothetical plate for models A, B, C and D in a mass flow rate of 1 kg/s.



شکل (۹) شماتیک توزیع حرارتی در صفحه فرضی میانی استوانه برای مدل‌های A, B, C و D در جریان دبی جرمی ۲ kg/s.

Fig. 9 Schematic of thermal distribution on a cylindrical hypothetical plate for models A, B, C and D in a mass flow rate of 2 kg/s.

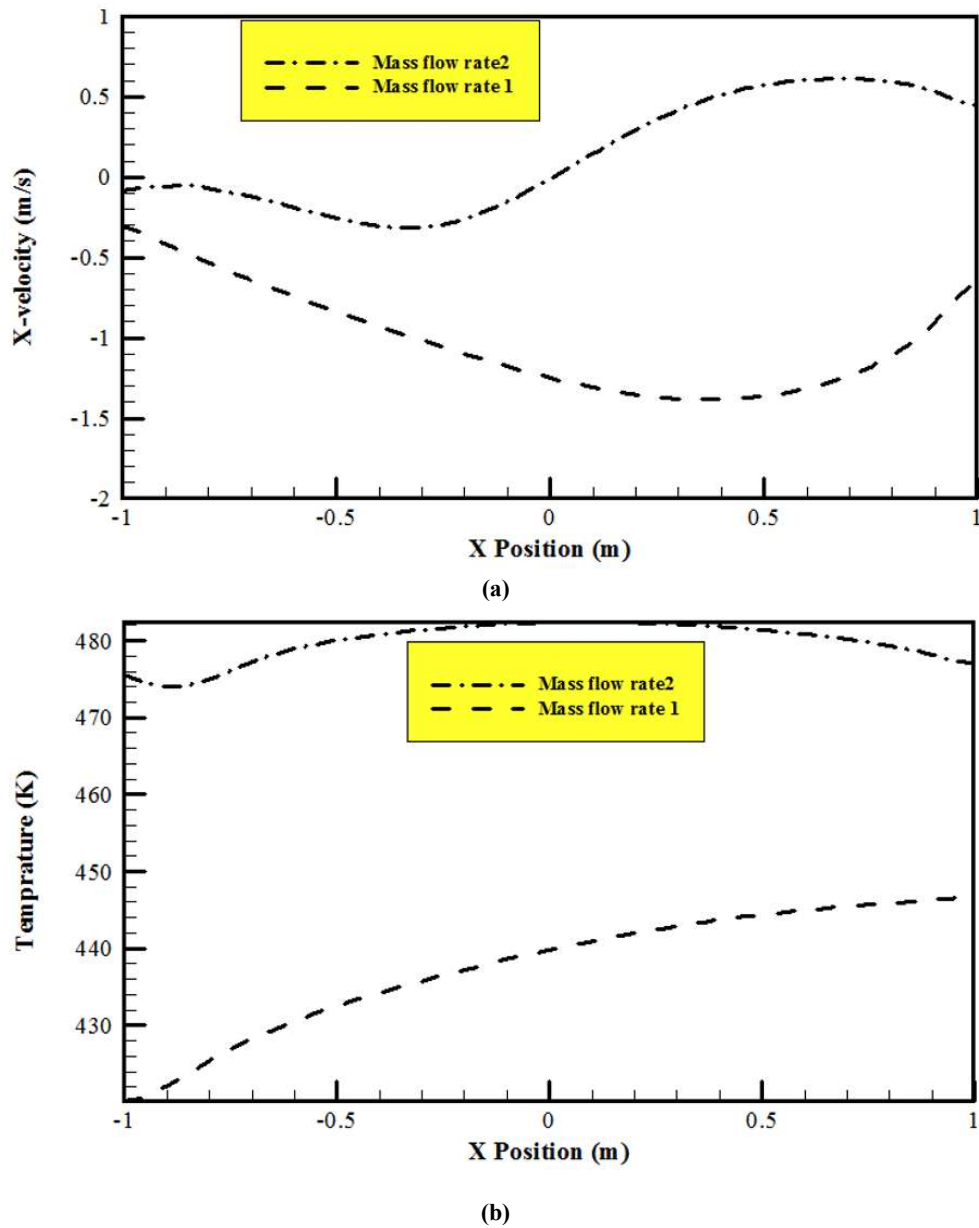
می‌تواند به دلیل وجود سرعت منفی و در واقع طی شدن مسیر اصلی و در نهایت وقتی که به پوسته می‌رسد ضمن کم شدن سرعت، دمای انتقال یافته نیز کاهش یابد.

در شکل (۱۱-a) نمودار سرعت بخار آب در مدل B برای جریان دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s نمایش داده شده است. در این مدل به دلیل پهن بودن خروجی با افزایش سرعت ورودی، جریان بخار داغ مستقیماً از مرکز استوانه به خروجی منتقل می‌گردد ولی بخشی جزئی به کناره‌ها انتقال می‌یابد و با کاهش سرعت ورودی به نظر می‌رسد که سرعت از انتهای مسیر شروع و تا ابتدای مسیر این سرعت تقویت می‌گردد. به همین دلیل دمای انتقال یافته نیز در جریان با دبی جرمی ۱ kg/s پایین‌تری در مقایسه با جریان با دبی ۲ kg/s را نشان می‌دهد (شکل ۱۱-b). هم‌چنین در این نمودار دیده می‌شود در میانه مسیر حالت

حداکثر انتقال حرارت اتفاق افتاده و تا انتهای مسیر این انتقال حرارت تقلیل می‌یابد.

با مقایسه کم‌ترین دما در جریان دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s نشان می‌دهد که همواره با افزایش جریان انتقال حرارت به پوسته دمای استوانه‌ها نیز افزایش می‌یابد (شکل‌های ۸ و ۹).

در شکل (۱۰-a) نمودار سرعت بخار آب در مدل A برای جریان دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s نمایش داده شده است. برای جریان دبی ۱ kg/s در بخش اعظمی از مسیر سرعت منفی بوده یعنی جریان بخار آب بعد از طی مسیر در مرکز استوانه به پوسته رسیده ولی برای جریان با دبی ۲ kg/s سرعت در انتهای مسیر خودش مثبت شده ولی در ابتدای مسیر منفی می‌باشد. گرمای انتقال یافته به پوسته برای جریان با دبی ۲ kg/s حدود ۴۵ K بیشتر از جریان با دبی ۱ kg/s می‌باشد (شکل ۱۰-b). این امر

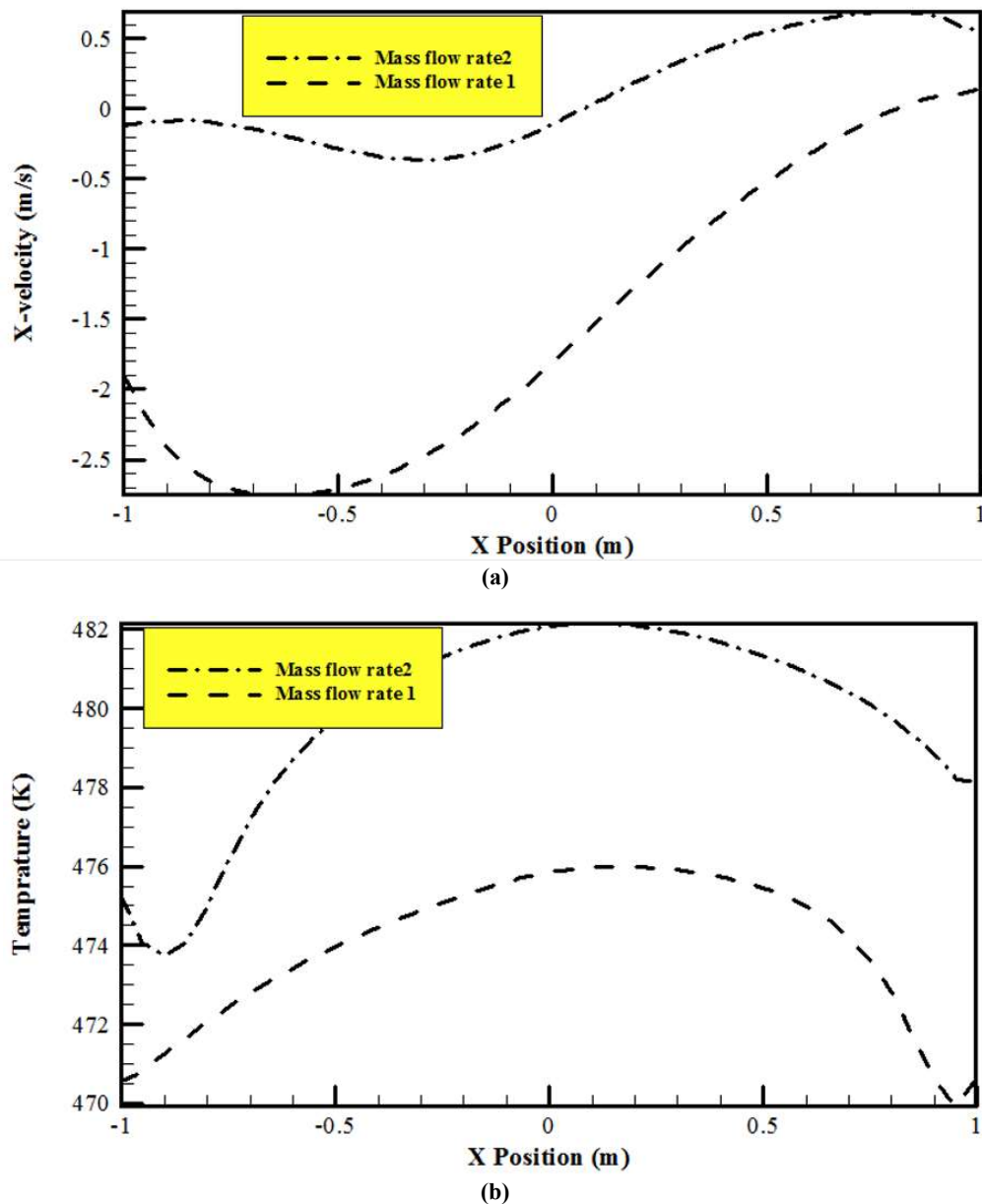


شکل (۱۰) نمودار سرعت بخار آب در مدل A. a) سرعت بخار آب برای جریان دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s. b) توزیع حرارتی در دیواره استوانه برای جریان با دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s

Fig. 10 Water vapor velocity in model A. a) Water vapor velocity for mass flow rate of 1 and 2 kg/s. b) Heat distribution in cylinder wall for mass flow rate of 1 and 2 kg/s.

همان تناسب افزایش می یابد (a-۱۲). در این مکانیسم در ابتدای مسیر بیشترین سرعت و انتهای مسیر کمترین سرعت جریان بخار داغ وجود دارد. در شکل (b-۱۲) نمودار توزیع حرارتی در دیواره استوانه برای مدل C برای جریان دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود متناسب با سرعت جریان، دما نیز در ابتدای مسیر بیشترین و در پایان

بیشترین و در ابتدا و انتهای مسیر کمترین دما را دارد. با اضافه شدن زائده مخروطی در مسیر ورود جریان بخار داغ به درون استوانه، جریان با سرعت بالایی در ابتدای مسیر پوسته شروع به حرکت می کند و در طی مسیر این سرعت جابجایی به صورت خطی کاهش می یابد. نتایج نشان می دهد که سرعت حرکت جریان بخار آب داغ در مدل C، با افزایش دبی جرمی به



شکل (۱۱) نمودار سرعت بخار آب در مدل B. (a) سرعت بخار آب برای جریان دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s. (b) توزیع حرارتی در دیواره استوانه برای جریان با دبی ۱ و ۲ kg/s.

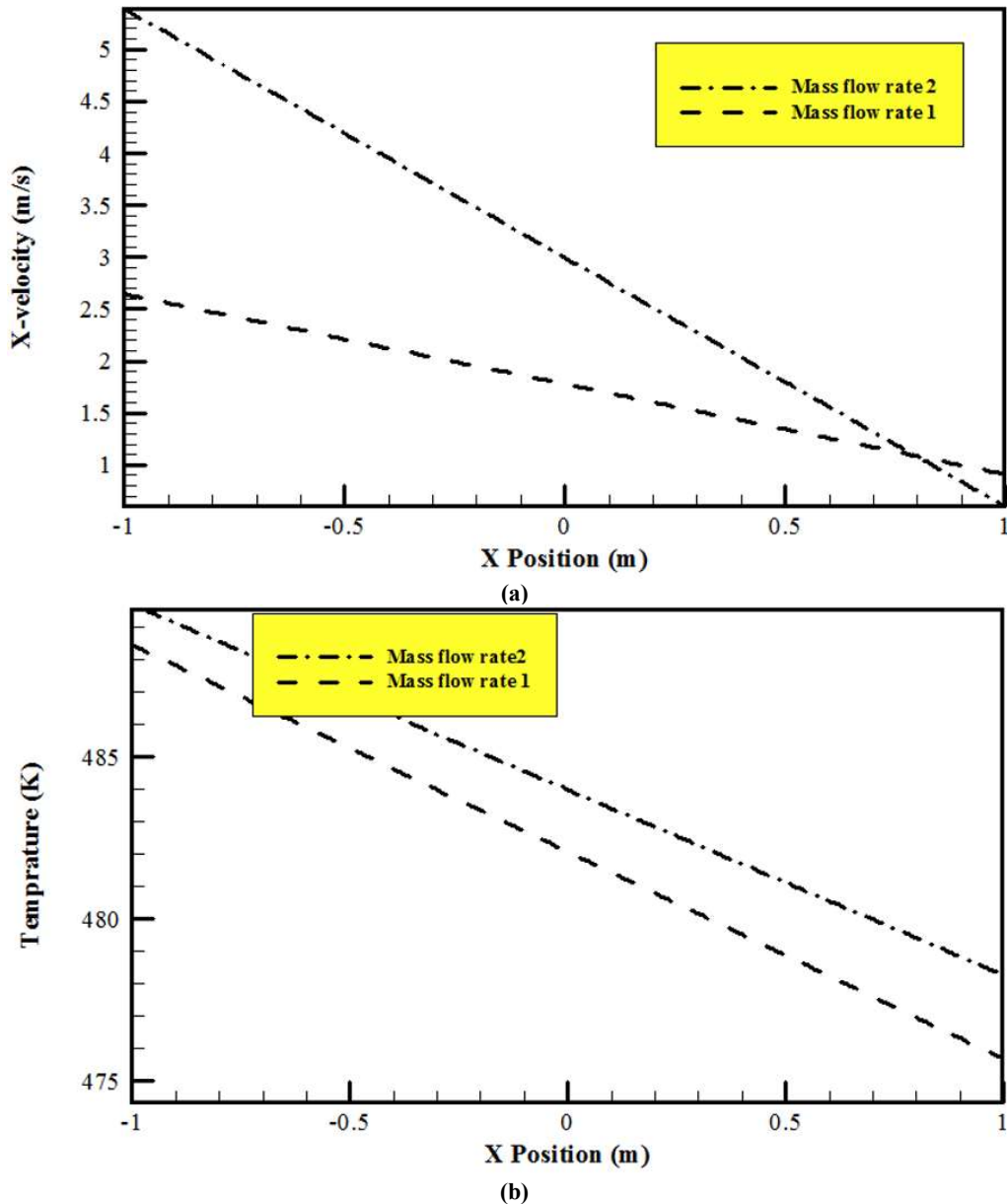
Fig. 11 Water vapor velocity in model B. a) Water vapor velocity for mass flow rate of 1 and 2 kg/s. b) Heat distribution in cylinder wall for mass flow rate of 1 and 2 kg/s.

می‌باشد. با این تفاوت که در صورت وجود خروجی پهن، سرعت روی خط فرضی زیر پوسته حدود ۲ برابر نسبت به خروجی باریک می‌باشد (۱۳-a)، در نتیجه دمای پوسته نیز داغ‌تر می‌شود (۱۳-b).

شکل (۱۴-a) نمودار توزیع حرارتی در دیوار استوانه برای همه مدل‌های A، B، C و D برای جریان ۱ kg/s بخار آب را نشان

مسیر کم‌ترین مقدار را دارد به طوری که حدود ۱۰ K کاهش می‌یابد. این در صورتی است که در صورت عدم وجود این زائده در میانه مسیر بیش‌ترین و در ابتدا و انتهای مسیر کم‌ترین میزان بوده است.

نتایج سرعت جریان و مقدار انتقال حرارت برای مدل D با وجود زائده مخروطی شکل کاملاً منطبق با نتایج خروجی از مدل C

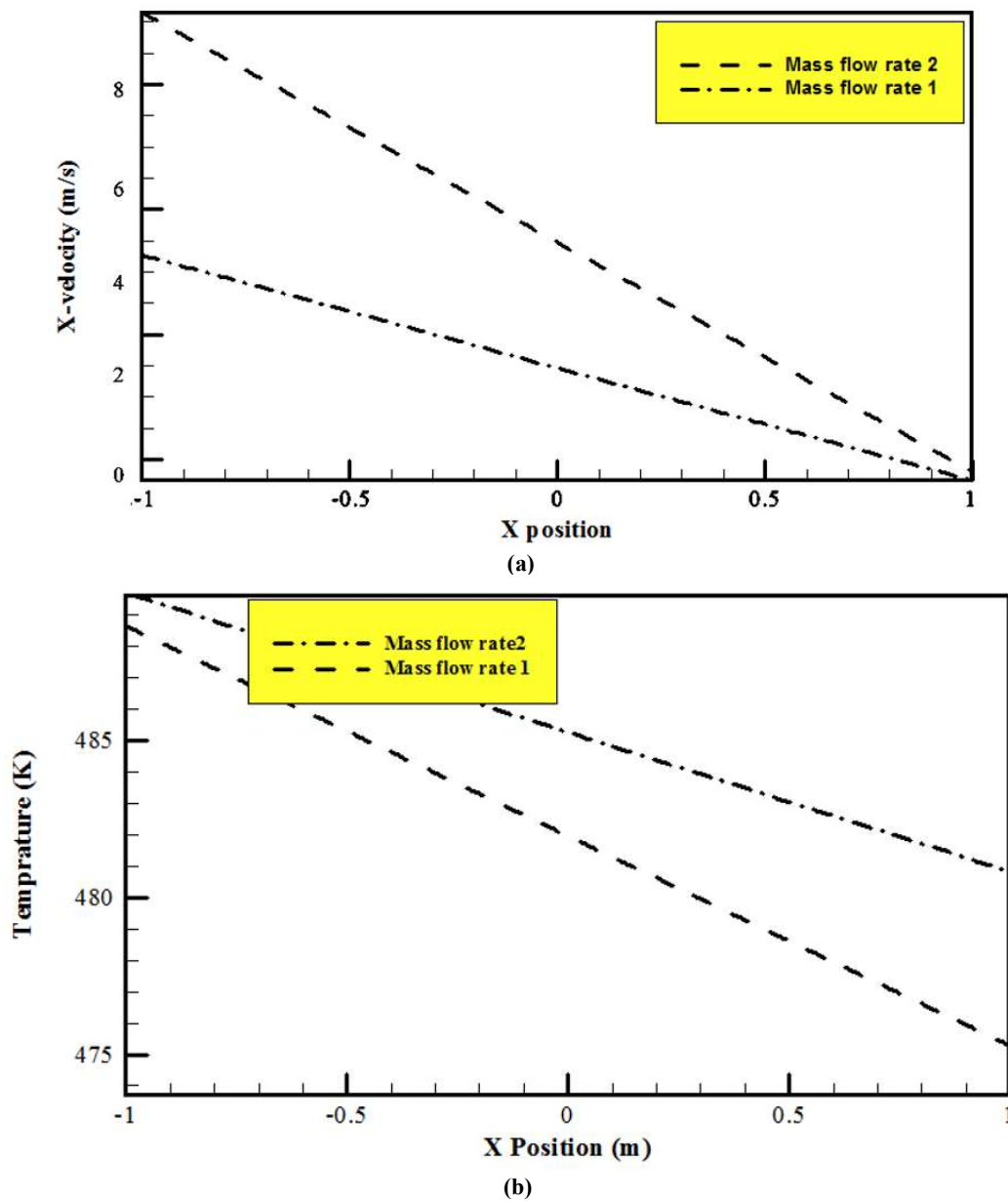


شکل (۱۲) نمودار سرعت بخار آب در مدل C. (a) سرعت بخار آب برای جریان دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s و (b) توزیع حرارتی در دیواره استوانه برای جریان با دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s.

Fig. 12 Water vapor velocity in model C. a) Water vapor velocity for mass flow rate of 1 and 2 kg/s. b) Heat distribution in cylinder wall for mass flow rate of 1 and 2 kg/s.

داغ‌تر بودن دیواره استوانه سیکل کم‌تری را نسبت به پاشش در انتهای مسیر طی نماید. نمودار توزیع حرارتی در دیواره استوانه برای مدل‌های A، B، C و D برای جریان ۲ kg/s در شکل (۱۴-b) نمایش داده شده است. نتایج به‌دست آمده برای جریان با ۲ kg/s کاملاً منطبق بر جریان ۱ kg/s می‌باشد. در نهایت دمای توزیع حرارت در بدنه استوانه در تمامی حالات

می‌دهد. طبق شکل، با نصب زائده مخروطی دمای پوسته افزایش قابل توجه می‌یابد. ولی در محدوده بیش‌تری تغییر دما را نشان می‌دهد. در این حالت پیشنهاد می‌شود تیغه نصب شده بر روی استوانه جهت جداسازی مواد خشک شده، با توجه به یکنواختی کاهش دما، به همان صورت در سیکل‌های متفاوتی نصب گردد به‌طوری‌که موادی که در ابتدای مسیر پاشیده می‌گردد به‌دلیل



شکل (۱۳) نمودار سرعت بخار آب در مدل D. a) سرعت بخار آب برای جریان دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s. b) توزیع حرارتی در دیواره استوانه برای جریان با دبی جرمی ۱ و ۲ kg/s.

Fig. 13 Water vapor velocity in model D. a) Water vapor velocity for mass flow rate of 1 and 2 kg/s. b) Heat distribution in cylinder wall for mass flow rate of 1 and 2 kg/s.

جرمی بین ۱ و ۲ kg/s و نیز از زائده مخروطی کوچک‌تری استفاده گردد.

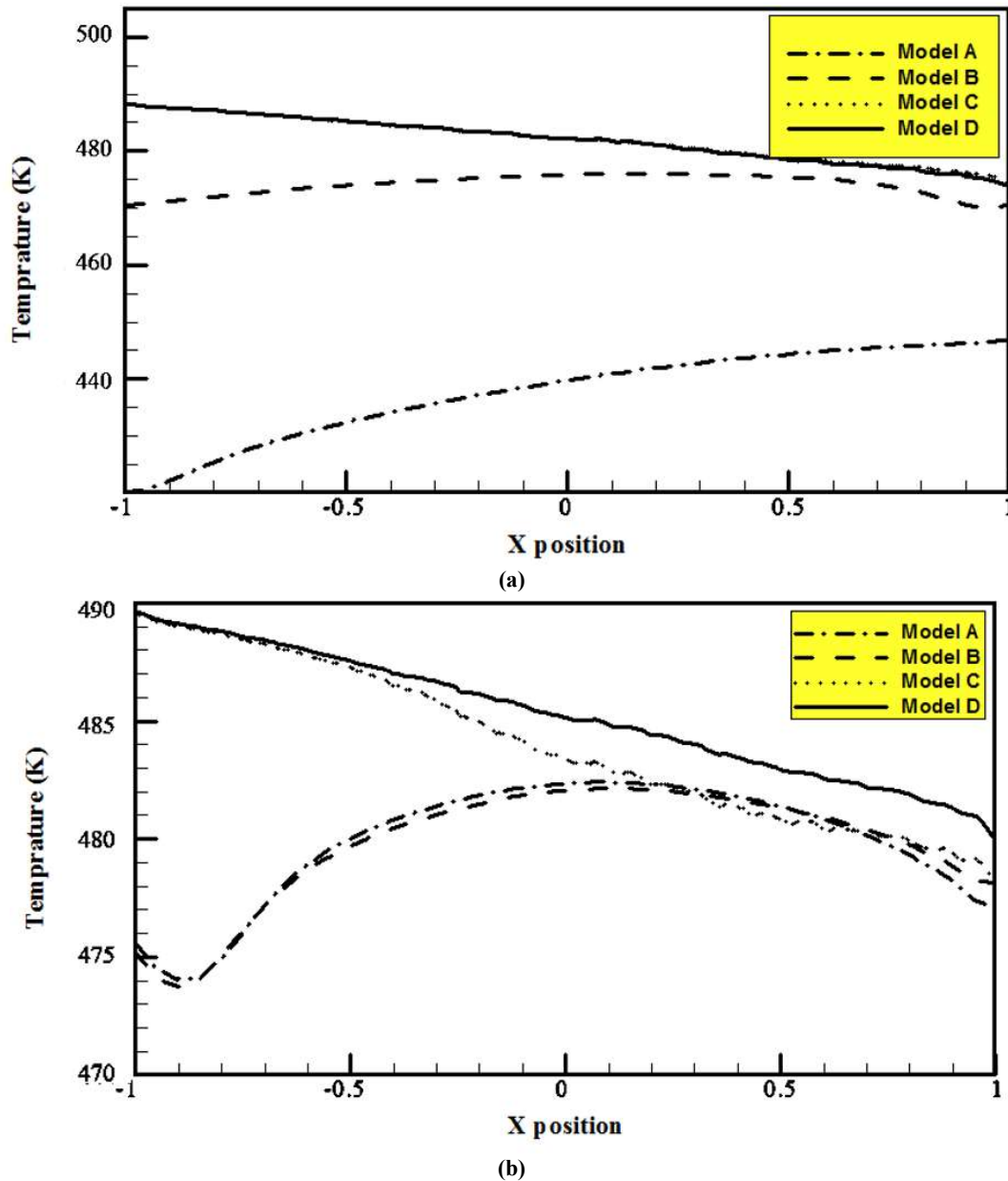
۴. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، نصب زائده مخروطی شکل درون استوانه توخالی خشک‌کن‌های استوانه‌ای

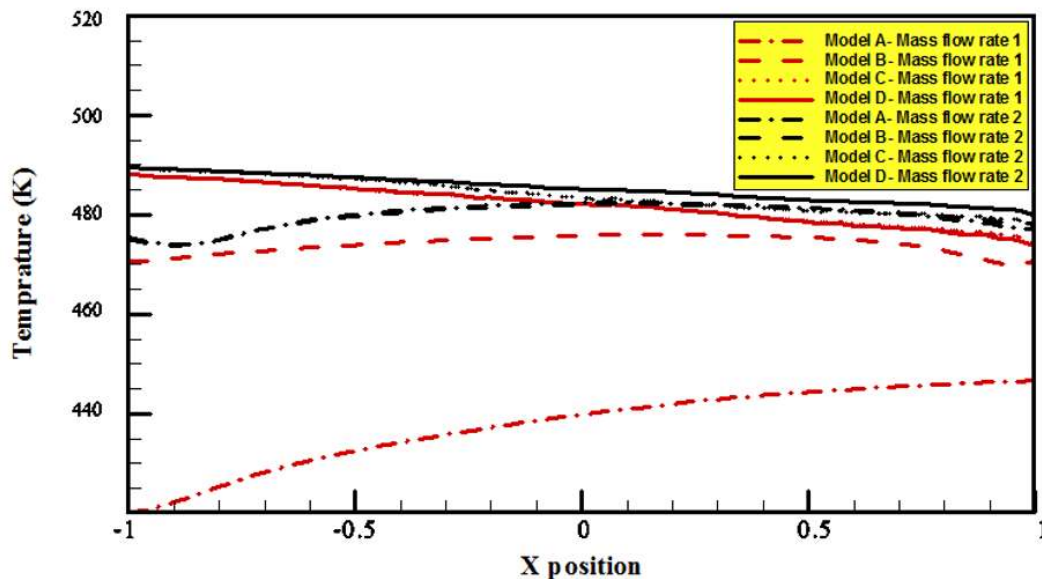
در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل بیش‌ترین دمای ممکن برای مدل D و دبی جرمی ۲ kg/s اتفاق افتاده و بهترین یکنواختی نیز در مدل B و دبی جرمی ۱ kg/s از خود نشان داده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده برای هر دو هدف حداکثر انتقال حرارت و یکنواختی پوشش، بایستی از خروجی پهن استفاده نمود. همچنین پیشنهاد می‌شود از دبی

افزایش دما و هم‌چنین یکنواختی دما در طول استوانه می‌باشد. بهترین یکنواختی برای مدل D و جریان دبی جرمی 1 kg/s با اختلاف درجه حرارت 8 K در طول مسیر به دست آمد. برای دستیابی به بهترین یکنواختی انتقال حرارت و بیش‌ترین دما، پیشنهاد می‌شود که ضمن استفاده از مقدار دبی جرمی بین 1 و 2 kg/s از مخروط با قطر سطح مقطع کم‌تر استفاده گردد تا تمرکز جریان بخار داغ از ابتدای مسیر برداشته شده و به کل پوسته پوشش دهی داشته باشد.

سبب می‌گردد تا بخار داغ وارد شده به این فضا نتواند به‌طور مستقیم از خروجی استوانه خارج گردد، و لذا در همان لحظه اول به زیر پوسته رسیده و بیش‌ترین انتقال حرارت را ایجاد می‌کند به‌طوری که دما را به بالاتر از 485 K می‌رساند. البته رفته رفته هم از سرعت حرکت این سیال داغ و هم از انتقال گرمای آن کاسته می‌گردد، به‌طوری که اختلاف دما در ابتدا و انتهای مسیر حدود 10 K می‌باشد. با توجه به دو حالت باریک و پهن در محل خروجی، نتایج حاصله بیانگر تاثیر مثبت خروجی پهن بر روی



شکل (۱۴) نمودار توزیع حرارتی در دیوار استوانه برای مدل‌های A، B، C و D. a) برای جریان 1 kg/s. b) برای جریان 2 kg/s.
 Fig. 14 Thermal distribution for cylindrical wall for models A, B, C and D. a) for mass flow rate of 1 kg/s. b) for mass flow rate of 2 kg/s.



شکل (۱۵) نمودار توزیع حرارتی در دیوار استوانه برای مدل‌های A، B، C و D برای جریان ۱ kg/s و ۲ بخار آب
 Fig. 15 Thermal distribution for cylindrical wall for models A, B, C and D for mass flow rate of 1 and 2 kg/s.

منابع

- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی.
- [8] Boudreau, M.D., Beland, F.A. (2006). An evaluation of the biological and toxicological properties of *Aloe barbadensis* (miller), *Aloe vera*. *J. Environ. Sci. Health. C.*, 24(1), 103-54.
- [9] Simal, S., Femenia, A., Llull, P., Rossello, C., (2000). Dehydration of *Aloe Vera*: simulation of drying curves and evaluation of functional properties. *J. Food Eng.*, 43, 109-114.
- [10] Kwok, B.H.L., Hu, C., Durance, T., Kitts, D.D. (2004). Dehydration techniques affect phytochemical contents and free radical scavenging activities of Saskatoon berries (*Amelanchier alnifolia* Nutt). *J. Food Sci.*, 69, 122-125.
- [11] Zielinskaa, M., Markowski, M. (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chem. Eng. Process.*, 49, 212-218.
- [12] Chang, C., Lin, H., Chang, C., Liu, Y. (2006). Comparisons on the antioxidant properties of fresh, freeze-dried and hot-air-dried tomatoes. *J. Food Eng.*, 77, 478-485.
- [13] Vega-Galvez, A., Di Scala, K., Rodriguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., Lopez, J., Perez-Won, M. (2009). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*) [1] Tom, R. (2004). *Aloes the genus Aloe. Medicinal and aromatic Plants-Industrial profiles; CRC Press. V.35.*
- [2] Mirza, M., Kamal, U., Khalequzzaman, K.M., Kamrun, N. (2008). Plant characteristics, growth and leaf yield of *Aloe vera* as affected by organic manure in pot culture. *Australian J. Crop Sci.*, 2(3), 158-163.
- [3] Antonio, V., Elsa, U., Roberto, L., Margarita, M. (2007). Hot-air drying characteristics of *Aloe vera* (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT-Food Sci. Technol.*, 40, 1698-1707.
- [4] Rodriguez, R., Jasso de Rodriguez, D., Gil Marin, G.A., Angulo, J.L., Lira Saldivar, R.H. (2006). Growth, stomata resistance, and transpiration of *Aloe vera* under different soil water potentials. *Industrial Crops Products.*, 25, 123 - 128.
- [۵] یزدانی، د.؛ رضایی، م.؛ کیانیخت، س.؛ خسروانی، س. (۱۳۸۵)، مروری بر جنبه‌های مختلف گیاه دارویی صبرزرده. فصلنامه گیاهان دارویی، سال پنجم، شماره ۱۹.
- [۶] خلج، م. (۱۳۸۷) معرفی و توسعه گیاه صبرزرده (*Aloe vera*) در مناطق خشک ایران. صنایع غذایی و تغذیه‌ای، شماره ۱۷۳، ص ۱۸-۱۹.
- [۷] کریمی‌آکندی، س.ر. (۱۳۹۰) طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه استحصال ژل برگ صبرزرده (*Aloe vera*). پایان‌نامه



- [28] Anonymous. (2000). ANSYS User's Manual. Swanson Analysis Sys. Inc.
- [29] M. Kostoglou, M., Karapantsios T.D. (2003). On the thermal inertia of the wall of a drum dryer under a cyclic steady state operation. *J. Food Eng.*, 60, 453-462.
- [30] Akin, J.E., (2005). Finite Element Analysis with Error Estimators. Elsevier, UK. Oxford. 440 P.
- L. var. Hungarian). *Food Chem.*, 117, 647-653.
- [۱۴] ذاکری، س. (۱۳۹۰). خشک‌کردن ژل صبرزد با خشک‌کن پاششی و هوای گرم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی.
- [15] Chegini G.R., Ghobadian B. (2007). Spray Dryer Parameters for Fruit Juice Drying. *World J. Agri. Sci.*, 3 (2), 230-236.
- [16] Supprung, P., Noomhorm, A. (2003). Optimization of drum drying for low amylase rice (KDML105) starch and flour. *Drying Technol.*, 21(9), 1781-1795.
- [17] Pua, C.K., Hamid, N., Tan, C.P., Mirhosseini, H., Rahman, R.B., Rusul, G. (2010). Optimization of drum drying processing parameters for production of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder using response surface methodology. *LWT - Food Sci. Technol.*, 43, 343-349.
- [18] Pua, C.K., Hamid, N.S.A., Rusul, G., Rahman, R.A. (2007). Production of drum-dried jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder with different concentration of soy lecithin and gum arabic. *J. Food Eng.*, 78, 630-636.
- [19] Kakade, R., Shaukat Ali, H.D. (2011). Performance evaluation of a double drum dryer for potato flake production. *J. Food Sci. Technol.*, 48(4), 432-439.
- [20] Tang, J., Feng, H., Shen, G.Q. (2003). Drum drying. Encyclopedia of agricultural food and biological engineering. CRC press. 532 pages.
- [21] Ramli, W., and Daud, W. (2006). 9 Drum dryers. *Handbook of industrial drying*. 835 pages.
- [22] Orsat, V., and Raghavan, G.V. (2007). Dehydration technologies to retain bioactive component. Functional food ingredients and nutraceuticals. *Process. Technol.*, 173-191.
- [23] Vega-Mercado, H., Marcela Gongora-Nieto, M., Barbosa-Canovas, G.V. (2001). Advances in dehydration of food. *J. Food Eng.*, 49(4), 271-289.
- [۲۴] حمیدی سپهر، ع. (۱۳۹۳). طراحی و ساخت خشک‌کن پاششی صفحه داغ. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران، دانشکده کشاورزی.
- [۲۵] حسن‌زاده، ی.؛ حکیم‌زاده، ح.؛ عیاری، ش. (۱۳۹۰). بررسی اثر اشکال مختلف پایه پل بر الگوی جریان اطراف آن با استفاده از نرم‌افزار Fluent. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۷(۴)، ص. ۹۵-۱۰۵.
- [26] Henriquez, C., Cordova, A., Sergio Almonacid, S., Saavedra, J. (2014). Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of apple peel by-products. *J. Food Eng.*, 143, 146-153.
- [27] Romero, V.M., Cerezo, E., Garcia, M.I., Sanchez, M.H. (2014). Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program. *Energy Procedia.*, 57, 1651 - 1658