

ارزیابی خط فرآوری چغندر قند مجهز به ترموکمپرسور بخار به منظور افزایش بهره‌وری انرژی

عادل رضوانی وند فنائی^{۱*}، علی حسن پور^۱ و علی محمد نیکبخت^۱

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۱۹

۱- گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

*مسئول مکاتبه E-mail: a.rezvanivand@urmia.ac.ir

چکیده

استفاده از ترموکمپرسور به منظور افزایش سطح آنتالپی بخار در کارخانه‌های فرآوری محصولات کشاورزی می‌تواند سبب بهبود بهره‌وری در سایه ارتقای مکانیزاسیون و هم‌چنین بالا بردن ارزش افزوده محصول نهایی گردد. ساختار ساده ترموکمپرسورها در کنار هزینه ساخت پایین و نصب آسان سبب افزایش کاربرد آن در زمینه‌های مرتبط با صنعت و هم‌چنین حوزه‌های مرتبط با مکانیزاسیون کشاورزی شده است. در این مطالعه و به‌منظور کاهش مصرف انرژی، تاثیر سطوح مختلف فشار بخار محرک بر روی عملکرد و هم‌چنین ایجاد جریان‌های گردابی، انرژی جنبشی آشفتگی و آنتالپی در داخل ترموکمپرسور مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی‌های عملکردی برای سطوح مختلف جریان ورودی استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. با توجه به پتانسیل بالای ایجاد حرکت گردابی (ورتیسیته) در خروجی نازل، بخش‌های مکش بخار مکشی و هم‌چنین در نزدیکی دیواره‌ها، این مناطق بررسی شده‌اند. هم‌چنین در سطوح مختلف فشار بخار محرک، کانتورهای مربوط به انرژی جنبشی آشفتگی استخراج و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نمودارهای فشار و دمای در راستای خط طولی ترموکمپرسور برای مشاهده افزایش آنتالپی ارائه شدند. در نهایت، با در نظر گرفتن نتایج مربوط به منحنی عملکردی، کانتورهای انرژی جنبشی و ارزیابی بردارهای سرعت، جریان محرک با فشار ۱۵ بار بهترین عملکرد را در بین سطوح مورد بررسی دارا است.

واژه‌های کلیدی: روش حجم محدود، مدل آشفتگی، منحنی عملکردی، نسبت تراکم

Evaluation of Sugar beet Processing Line Equipped with Steam Thermo-Compressor to Increase Energy Efficiency

Adel Rezvanivand Fanaei^{1*}, Ali Hassanpour¹ and Ali Mohammad Nikbakht¹

Received: 30 Jan 2021

Accepted: 7 Feb 2021

¹Department of Biosystems, Faculty of Agriculture and Natural sources, Urmia University, Urmia, Iran

*Corresponding author: E-mail: a.rezvanivand@urmia.ac.ir

Abstract

The use of thermo-compressors to increase the steam enthalpy in agricultural processing plants can improve productivity by upgrading the mechanization and also increase the value added of the final product. The simple construction, low cost, and simple mounting were enhanced using this equipment in relevant fields of industry and agriculture-mechanization. In this study, the various levels of motive steam pressure effect on the performance, vorticity development, and turbulent kinetic energy were investigated. Performance curves for various inlet flows were extracted and evaluated. Regarding the high potential of vorticity creation in the nozzle outlet, the suction section, and the wall vicinity were evaluated. In the following, the turbulent kinetic energy contours in the various motive pressures were assessed. Also, pressure and temperature diagrams along the longitudinal line of the thermo-compressor were presented to illustrate the increase in enthalpy. Finally, considering the results of the performance curve, turbulent energy contours, and vectors evaluation, P=15 bars present the best performance between the evaluated motive steams

Keywords: Compression ratio, Finite volume method, Performance curve, Turbulent model

How to cite:

Rezvanivand Fanaei, A., Hassanpour, H., and Nikbakht, A.M. 2020. Evaluation of Sugar beet Processing Line Equipped with Steam Thermo-Compressor to Increase Energy Efficiency. Journal of Agricultural Mechanization 5 (1): 61-69

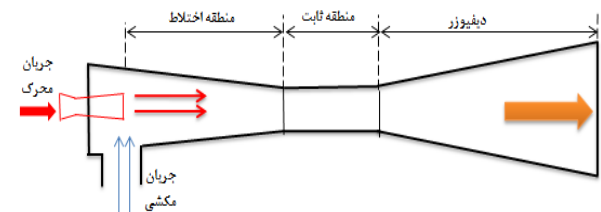
۱- مقدمه

از مطالعه انجام شده توسط (Keenan, 1942) می‌توان به‌عنوان اولین مطالعه انجام شده در زمینه ارزیابی ترموکمپرسورها براساس تئوری طراحی کلاسیک نام برد. از جمله ابتدائی‌ترین کارهای انجام شده در زمینه اجکتور ارزیابی پارامترهای عملکردی تحت شرایط کاری متغیر می‌باشد. در این مطالعات با استفاده از معادلات مربوط به دینامیک گازها، پارامترهای اساسی طراحی برای عملکرد یک اجکتور مانند قطر گلوگاه و موقعیت نازل اصلی ارزیابی شدند (Dutton & Carroll, 1986; Huang *et al.*, 1999).

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با توانمندی بالای آن در به‌تصویر کشیدن جزئیات میدان جریان، درک عمیقی از الگوهای داخل جریان‌ها ارائه می‌کند. حل عددی معادلات ناور استوکس اساس تمام تکنیک‌های CFD می‌باشد که در نتیجه پیشرفت کامپیوترها و درک عمیق‌تر از حل عددی آشفتگی امکان‌پذیر شده است (Zobeiri *et al.*, 2021). از جمله انواع کاربردهای این تکنیک می‌توان به انواع فرآیندهای اختلاط، جداسازی، فرآیندهای حرارتی مانند انواع خشک-کن‌ها و همچنین محدوده وسیعی از کاربردهای مهندسی و کشاورزی اشاره کرد (Aghaei *et al.*, 2021). معادلات بقا شامل سه معادله بقای جرم، مومنتوم و انرژی است که در جریان‌های سیال در روش‌های حل عددی معادلات دیفرانسیل استفاده می‌شوند (ANSYS Fluent, 2013).

تمرکز اصلی بخش عمده‌ای از مطالعات بر روی سیستم‌های خنک-سازی اجکتوری و روش‌های طراحی برای انطباق شرایط بهتر بوده است (Riffat & Omer, 2011). اثرات آشفتگی بر روی الگوی جریان به‌صورت کامل تفسیر شده است. محققان در این مطالعه از ۶ مدل آشفتگی مختلف در شبیه‌سازی‌های CFD استفاده کردند و عملکرد یک اجکتور استفاده شده برای کاربردهای خنک‌سازی را ارزیابی نمودند (Bartosiewicz *et al.*, 2006). کاربرد قوانین بقا در یک حجم کنترل با در نظر گرفتن اندازه‌های هندسی ترموکمپرسور اعمال شد و نتایج شبیه‌سازی‌های حاصل با مدل‌های تجربی مقایسه گردید (Bonanos, 2007; Rezvanivand Fanaei *et al.*, 2021a). در یک مطالعه عددی تاثیر مدل‌های آشفتگی مختلف از جمله اسپالارت آلماراس^۵، k-ε استاندارد، k-ε، RNG^۶، k-ε، تحقق‌پذیر^۷، SST^۸ و RSM^۹ بر روی ویژگی‌های یک اجکتور فراصوت مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج تجربی مقایسه گردید (Besagni & Inzili, 2017). در شبیه‌سازی یک ترموکمپرسور شامل بخار محرق با فشار ثابت، پتانسیل بالای دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان-های با عدد ماخ بالا در داخل ترموکمپرسور نشان داده شد. در این

برای بحث بهره‌وری انرژی در واحدهای فرآوری محصولات کشاورزی و همچنین مکانیزاسیون مربوطه حائز اهمیت بالایی هستند. ابزارهایی که بتوانند فشار و دمای بخار مورد استفاده در سیستم‌های فرآوری محصولات کشاورزی را افزایش دهند (افزایش آنتالپی)، می‌توانند سبب کاهش مصرف انرژی و همچنین سبب افزایش ارزش افزوده محصول تولیدی گردند. ترموکمپرسور یا اجکتور تجهیزاتی است که در آن از یک جریان محرق^۱ برای افزایش فشار جریان مکشی^۲ استفاده می‌شوند. یک نازل همگرا-واگرا^۳ وظیفه شتاب‌دهی به جریان را بر عهده دارد. جریان مکشی تحت تاثیر کاهش فشار ناشی از ورود جریان محرق به‌محفظه اختلاط، وارد ترموکمپرسور می‌شود. در ادامه اختلاط این دو جریان اتفاق می‌افتد و بخار حد واسط از نظر فشار از بخش دیفیوزر خارج می‌گردد که با توجه به‌افزایش سطح آنتالپی آن توانایی استفاده مجدد در بخش‌های مختلف کارخانه را دارد (Sharifi *et al.*, 2012). پیش‌بینی دقیق عملکرد ترموکمپرسور سبب افزایش بازده عملکردی آن خواهد شد، چرا که در این حالت، ارائه الگوهای مختلف جریان امکان‌پذیر خواهد بود (Ji *et al.*, 2010). یک ترموکمپرسور از بخش ورودی جریان محرق، بخش ورودی جریان مکشی، منطقه اختلاط، منطقه سطح ثابت و دیفیوزر تشکیل شده است. شماتیکی از یک ترموکمپرسور به‌همراه بخش‌های مهم آن در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- شماتیکی از یک ترموکمپرسور بخار

Fig 1. A schematic of thermo-compressor

بخار مورد استفاده در کارخانه‌ها پس از استفاده به علت کاهش فشار و دمای آن قابلیت خود را از دست داده و با وجود داشتن سطح نسبتاً متوسطی از انرژی (شامل فشار و دما) با صرف زمان، انرژی و هزینه، دوباره خنک‌کاری شده و به‌بویلر بازگردانده می‌شود و در ادامه با صرف سوخت (در بویلر) به‌صورت بخار زنده (بخار با دما و فشار بالا) وارد سیستم می‌گردد (Rezvanivand Fanaei *et al.*, 2021b). لذا با تغییر ساختار مکانیزه خط و استفاده از تجهیزات تقویت بخار، توانایی افزایش بازده سیستم‌های انرژی را دارا است.

⁶ Re-Normalized Group

⁷ Realizable

⁸ Shear Stress Transport

⁹ Reynolds Stress Model

¹ Motive flow

² Suction flow

³ Convergence-divergence nozzle

⁴ Computational Fluid Dynamics

⁵ Spalart Almaras

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، پارامترهای ارزیابی عملکرد ترموکمپرسور، طراحی ترموکمپرسور به همراه مش‌بندی، تبیین معادلات حاکم، موارد مربوط به انتخاب حلگر و مدل آشفتگی، شرایط مرزی در نظر گرفته شده و همچنین فرض‌های مربوط به شبیه‌سازی ارائه شده است. در ابتدا با توجه به اهمیت پارامترهای عملکردی در طراحی و عملکرد ترموکمپرسور، نسبت ورود (ER^1) و نسبت تراکم (CR^2) معرفی می‌گردد. لازم به ذکر است که در این مقاله از نرم‌افزارهای گمبیت ۲،۲،۴ و انسیس فلونت ۱۵ استفاده شده است.

۲-۱- پارامترهای عملکردی

هر ترموکمپرسور دارای یک فشار بحرانی^۳ (بیشترین فشار تخلیه) می‌باشد، که در این شرایط یک انتقال از حالت پایدار^۴ به حالت غیرپایدار^۵ انجام می‌گردد. این حالت پایدار به اسم حالت خفگی دابل شناخته می‌شود و فشار تخلیه واقعی در وضعیت مرسوم کمتر از فشار بحرانی است. بنابراین پارامترهای عملکردی مانند ER و CR در این شرایط پایدار برای منحنی‌های عملکردی ترموکمپرسور ارزیابی می‌شوند. سپس منحنی مربوط به وضعیت ER در برابر CR رسم می‌گردد.

$$ER = \frac{m_{suc}}{m_{mt}} \quad (1)$$

$$CR = \frac{P_{dis}}{P_{suc}} \quad (2)$$

که m_{suc} دبی جریان مکشی، m_{mt} دبی جریان محرک، P_{dis} فشار تخلیه و P_{suc} فشار مکش می‌باشد. منحنی عملکردی یک ترموکمپرسور برای حالت‌های عملکردی مختلف داخل ترموکمپرسور شامل حالت خفگی دابل^۶، خفگی منفرد^۷ و جریان بازگشتی^۸ است که در قالب مقادیر مختلف ER و CR ارائه می‌گردد.

۲-۲- طراحی ترموکمپرسور بر اساس مدل هوانگ

برای طراحی ابعاد ترموکمپرسور از مدل تک‌بعدی هوانگ استفاده شده است (Huang et al., 1999). در مدل هوانگ طراحی کمپرسور و آنالیز عملکرد ترموکمپرسور یا اجکتور بر اساس روابط دینامیک گازها و در نظر گرفتن فشار و دمای ورودی و همچنین نسبت‌های جرمی برای ورودی‌های بخار محرک و مکشی محاسبه می‌شود.

مطالعه، جریان بازگشتی و اثر تغییرات فشار بخار محرک مورد بررسی قرار نگرفته است (Rezvanivandefanayi, et al., 2019).

در زمینه سایر کارهای CFD در کشاورزی تاثیر قطر ذرات خوراک بر روی اندازه سرعت و افت فشار در داخل یک سیکلون جدا کننده مورد بررسی قرار گرفت و توانمندی دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی فاز جامد معلق در فاز گاز به در داخل سیکلون‌های جدا کننده به دست آمد (Rezvanivand Fanayi & Nikbakht, 2015). در مطالعه‌ای دیگری، جداسازی گندم با استفاده از سیکلون استرماند بازده بالا به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه و در ۶ سرعت مختلف ورودی مواد و همچنین ۳ دبی جرمی مختلف مشخصات داخل سیکلون از جمله بازده جداسازی، افت فشار، میدان سرعت، پارامترهای آشفتگی و سایش مورد بررسی قرار گرفت (Naimi et al., 2019). در یک مطالعه عددی و در قالب یک مطالعه آیروداکوستیکی، نرم افزار انسیس فلونت برای تعیین نویز جریان پروانه‌ی ۶ پره موتور تراکتور ITM399 استفاده شده است. در این مطالعه، اختلاف بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده کم تر از ۱۰ درصد به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که ارزیابی عددی آکوستیکی با استفاده از نویز پهن باند عملکرد فن را با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌نماید (Sabralilou et al., 2019). در ادامه کارها، تاثیر وجود پره منحرف کننده جریان بر مشخصه‌های جریان یک محفظه جداسازی نخود به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی آشفتگی در داخل محفظه تهنشینی از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده گردید. طبق نتایج به دست آمده استفاده از تیغه منحرف کننده جریان راندمان تهنشینی را ۱۱/۴٪ افزایش داده و هم زمان باعث کاهش ۶/۶۷٪ جریان هوای مورد نیاز سیستم می‌گردد (Zobeiri et al, 2019).

در انتها با بررسی کارهای انجام شده، می‌توان به این نتیجه رسید که تاکنون اثر فشار بخار محرک بر روی شدت آشفتگی، جریان‌های بازگشتی در جهت انتخاب مقدار مناسب مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین یک ارزیابی کامل در مورد تاثیر مقدار فشار بخار محرک (شامل فشارهای ۳/۷، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار با توجه امکان ایجاد بخار با فشارهای مذکور در کارخانه قند) بر روی وجود یا عدم وجود جریان بازگشتی در سطوح مختلف فشار محرک مورد نیاز است. لذا با در نظر گرفتن موارد بیان شده، تاثیر فشار بخار محرک و مطالعه جریان‌های بازگشتی به عنوان اهداف اصلی این مطالعه انتخاب شده است. در کنار این دو هدف، منحنی عملکردی ترموکمپرسور برای حالت‌های مختلف فشار بخار محرک ارائه گردید.

⁵ Unsteady

⁶ Double-Choked

⁷ Single-Choked

⁸ Reverse flow

¹ Entrainment ratio

² Compression ratio

³ Critical pressure

⁴ Steady

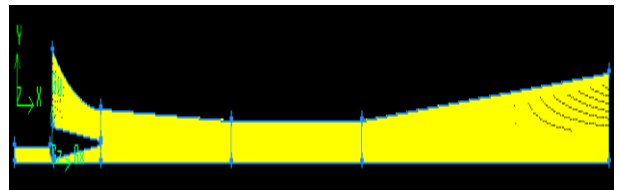
جدول ۱- ابعاد ترموکمپرسور طراحی شده بر اساس مدل هوانگ

Table 1. Thermo-compressor dimensions based on Huang model

| بخش Part | اندازه (mm) Value (mm) |
|---|---------------------------|
| قطر گلویی نازل (D_t) Nozzle throat diameter (D_t) | 36 |
| قطر ورودی منطقه اختلاط (D_m) Inlet diameter of mixing area (D_m) | 915 |
| طول منطقه اختلاط (L_m) Mixing area length (L_m) | 2140 |
| طول منطقه ثابت (L_c) Constant area length (L_c) | 1425 |
| قطر خروجی نازل (D_o) Nozzle outlet diameter (D_o) | 210 |
| قطر منطقه ثابت (D_c) Constant area diameter (D_c) | 485 |
| قطر خروجی دیفیوزر (D_d) Diffuser outlet diameter (D_d) | 710 |
| طول دیفیوزر (L_d) Diffuser length (L_d) | 2515 |
| طول کل (L) Overall length (L) | 6080 |

۲-۳- مش بندی ترموکمپرسور

هندسه ترموکمپرسور در حالت ۲ بعدی و با استفاده از مش نوع چهارضعی (quad) در نرم افزار گمبیت ۲،۴ انجام شد. مش های منظم به دلیل ایجاد شدن مش های ساختاری در راستای جریان جواب های دقیقی در شبیه سازی های عددی ارائه می دهند. با توجه به تحلیل دو بعدی متقارن محوری نصف هندسه ترموکمپرسور در حالت دو بعدی شبیه سازی شد (شکل ۲). هم چنین حصول نتایج دقیق تر در محل های با گرادیان بالاتر، از مش های ریزتر استفاده گردید.



شکل ۲- مش بندی ترموکمپرسور در نرم افزار گمبیت

Fig 2. Thermo-compressor meshing in Gambit software

۲-۴- معادلات حاکم در ترموکمپرسور

حالت کلی معادلات بقا برای شبیه سازی الگوی داخلی در جریان سیال تراکم پذیر استفاده شده است. با در نظر گرفتن جریان سه بعدی برای بخار، معادلات بقای جرم (پیوستگی)، بقای مومنتوم و بقای انرژی در دستگاه مختصات دکارتی در قالب روابط ۳ تا ۵ بیان می شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i E + p u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \tau_{ij}) \quad (5)$$

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

که ρ چگالی، u اجزای سرعت، τ تانسور تنش، E انرژی کل، k انرژی جنبشی آشفته، T دما و P فشار استاتیکی هستند.

۲-۵- انتخاب حلگر و مدل سازی آشفته گی

معیار انتخاب حلگر در نرم افزار انسیس فلونت، مقدار عدد بی بعد ماخ^۱ است. عدد ماخ به صورت سرعت یک جسم در یک سیال به سرعت صوت در همان سیال تعریف می شود. در شرایطی که این عدد بیشتر از مقدار ۰/۳ باشد، آن محیط تراکم پذیر در نظر گرفته شده و در صورتی که کمتر از ۰/۳ باشد، می توان محیط را تراکم ناپذیر در نظر گرفت. با توجه به شرایط حل، در نرم افزار انسیس فلونت برای محیط های تراکم پذیر از حلگر بر پایه چگالی^۲ و برای محیط های تراکم ناپذیر از حلگر بر پایه فشار^۳ استفاده می گردد. با توجه به توضیحات ارائه شده و با در نظر گرفتن سرعت داخل ترموکمپرسور و عدد ماخ بالای ۰/۳ از حلگر بر پایه چگالی استفاده شده است.

در ترموکمپرسور پدیده اختلاط دو جریان در شرایط آشفته اتفاق می افتد و از این رو، به صورت چشم گیری الگوی جریان را تحت تأثیر قرار می دهد. با مطالعه منابع مختلف و مقالات پیرامون این موضوع از حالت تحقق پذیر مدل $k-\epsilon$ استفاده شده است (Gagan et al., 2018; Aidoun et al., 2019). علت عمده استفاده از این مدل، پیش بینی صحیح ویژگی های جت ظاهر شده در رژیم های جریان هم جهت متقارن محوری است. دو معادله حاکم اساسی این مدل به صورت روابط (۶) و (۷) بیان می گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

³ Pressure-based solver

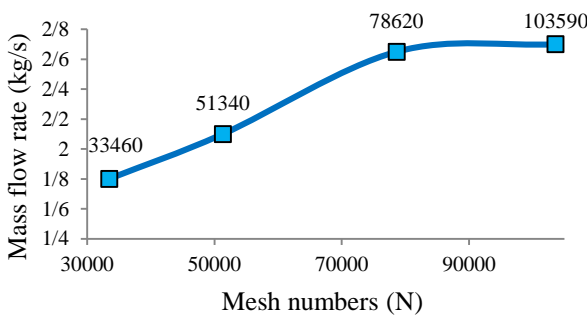
¹ Mach number

² Density-based solver

ملاحظات زمانی و سیستم پردازش، از حالت دو بعدی متقارن برای تحلیل‌های عددی استفاده شده است. در ادامه کانتورهای مربوط به انرژی جنبشی آشفتگی برای سطوح مختلف جریان ورودی با همدیگر مقایسه می‌گردد. همچنین بردارهای سرعت برای بررسی جریان‌های گردابی در تمام سطوح مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و منحنی‌های عملگری استخراج شده است.

۳-۱- آزمون استقلال از شبکه

به منظور بررسی مستقل بودن نتایج از تعداد مش، شبکه محاسباتی در سطوح مختلف مورد بررسی قرار گرفت. این سطوح به ترتیب شامل ۳۳۴۶۰، ۵۱۳۴۰، ۷۸۶۲۰ و ۱۰۳۵۹۰ عدد مش بودند. با توجه به اختلاف کم (کمتر از ۵ درصد) برای دبی جرمی سیال محرک برای سطح سوم و چهارم، که نشان دهنده مستقل بودن نتایج از اندازه مش است (شکل ۳) و هم‌چنین در نظر گرفتن ملاحظات زمانی از سطح سوم با تعداد ۷۸۶۲۰ عدد مش برای شبیه‌سازی‌ها استفاده گردید.



شکل ۳- آزمون استقلال از شبکه

Fig 3. Mesh independence test

۳-۲- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی به دلیل حصول اطمینان از نتایج عددی انجام گردید. بدین منظور و برای اعتبارسنجی تحقیق فوق، از نتایج مربوط به داده‌های تجربی مورد استفاده در (Sriveerakul *et al.*, (2007) استفاده شده است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان می‌دهد که نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی از تطابق خوبی با داده‌های تجربی برخوردار هستند (شکل ۴). بر این اساس می‌توان به سایر نتایج استخراج شده از شبیه‌سازی اعتماد نمود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (7)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

که G_k نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی آشفتگی با توجه به-گرداب‌های سرعت میانگین، G_b تولید انرژی جنبشی با توجه به-شناوری، Y_M نشان‌دهنده سهم نوسان در آشفتگی قابل تراکم به نرخ اتلاف (اضمحلال)، C_1 و C_2 مقادیر ثابت هستند. σ_ε و σ_k به ترتیب عدد پرنتل آشفته برای k و ε می‌باشند. S_k و S_ε عبارت‌های منبع یا چشمه با توجه به انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ تلفات (ε) هستند. این مدل آشفته با رفتارهای نزدیک به دیواره مانند "تابع دیواره استاندارد" سازگار است. به منظور داشتن رفتار سازگار با فرض تابع دیواره استاندارد، مش‌های نزدیک به دیواره‌ها حائز اهمیت می‌باشند (ANSYS Fluent, 2013).

۲-۶- اعمال شرایط مرزی

در این مطالعه دو جریان ورودی متمایز در کنار یک جریان خروجی منفرد وجود دارد. از این رو نوع "فشار ورودی" برای هر دو جریان اولیه (محرک) و ثانویه (مکشی) اعمال شد. شرایط ترمودینامیکی در این مرزها نیز در نظر گرفته شد. دیواره‌های نازل و ترموکمپرسور به صورت سطوح غیرقابل نفوذ و بی‌دررو و بدون ویسکوزیته تعریف شدند. همچنین از شرط مرزی تقارن برای تعریف محور استفاده شد.

جدول ۲- شرایط مرزی

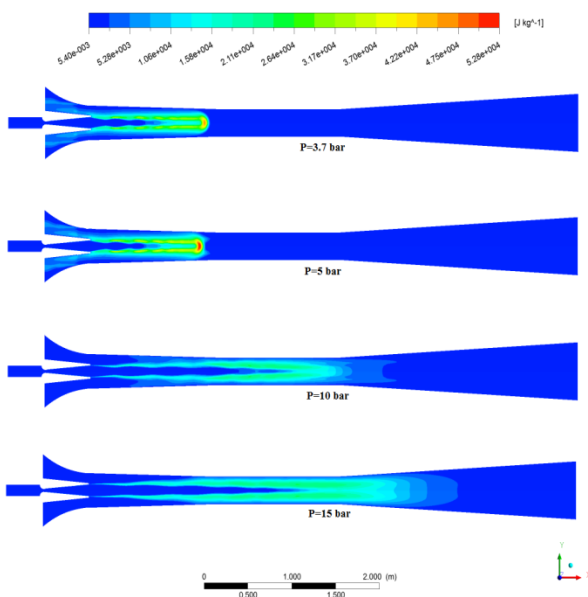
| پارامتر | شرط مرزی استفاده شده |
|--|---|
| فشار در ورودی‌های جریان‌های محرک و مکشی | شرایط مرزی ورودی Inlet Boundary condition |
| Pressure in inlets of motive and suction flows | |
| فشار خروجی در دیفیوزر | شرایط مرزی خروجی Outlet Boundary condition |
| Pressure outlet in diffuser | |
| تقارن محوری | محور Axis |
| Axisymmetric | |
| شرایط بدون لغزش | دیواره Wall |
| No-slip condition | |

۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا آزمون استقلال شبکه مورد بررسی قرار گرفت، سپس در ادامه اعتبارسنجی کار عددی به منظور مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی انجام شد. لازم به ذکر است، با در نظر گرفتن

۳-۴- مقایسه کانتور انرژی جنبشی آشفتگی برای ورودی‌های مختلف

این انرژی جنبشی آشفتگی به صورت میانگین انرژی جنبشی بر واحد جرم، تعریف می‌گردد که در ارتباط با ادی‌ها (جریان‌های چرخشی کوچک در داخل جریان) در جریان آشفته ایجاد می‌گردد. از نظر فیزیکی، انرژی جنبشی آشفتگی به وسیله ریشه میانگین مربعات نوسانات سرعت اندازه‌گیری شده، مشخص می‌گردد. منشأ ایجاد انرژی جنبشی آشفتگی می‌تواند برش سیال، اصطکاک یا نیروهای شناوری در سیال و یا از طریق نیروهای خارجی در مقیاس ادی‌های با فرکانس کوچک باشد. همان‌طوری که در شکل ۶ نشان داده شده است، مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در بخش خارجی مکان‌های با سرعت بالا، به مقدار بیشینه رسیده است که می‌تواند به دلیل ایجاد لایه برشی در بخش‌های با سرعت بالا و هم‌چنین ایجاد اصطکاک در این مناطق باشد. همچنین در نزدیکی ورودی‌های جریان مکش نیز انرژی جنبشی ایجاد شده که این مقدار، احتمالاً به دلیل ایجاد اصطکاک بین لایه‌های سیال ایجاد شده است. در مقایسه کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی برای سطح فشار محرک، بخار محرک با فشار ۱۵ بار بهترین شرایط را در بین سایر سطوح فشار محرک دارا است. در این سطح جریان به خوبی در داخل ترموکمپرسور توسعه یافته است.

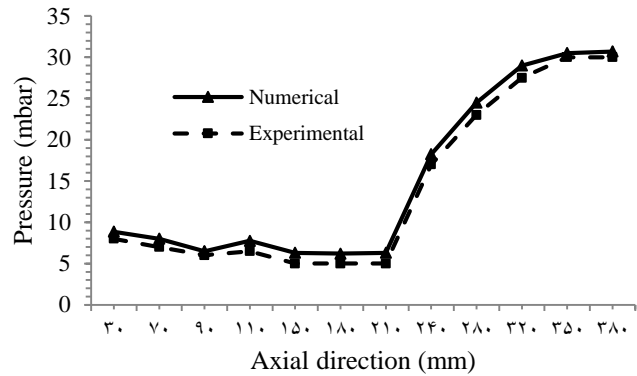


شکل ۶- کانتور انرژی جنبشی آشفتگی در فشارهای مختلف بخار محرک

Fig 6. Turbulent energy contour in various pressure of motive steam

۳-۵- بردارهای سرعت برای ورودی‌های مختلف

استنباط جریان‌یابی صحیح سیال در داخل ترموکمپرسور از بردار سرعت امکان‌پذیر است و بردار سرعت وجود هر نوع جریان گردابی در

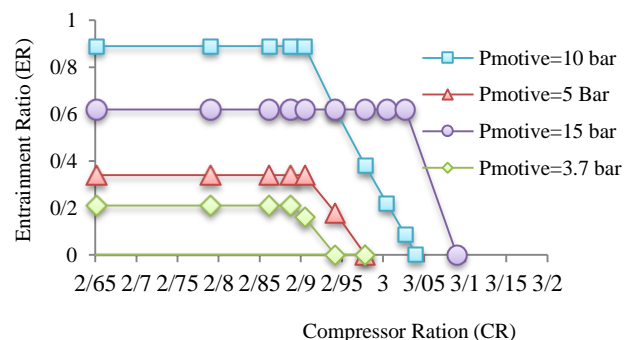


شکل ۴- اعتبارسنجی بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی

Fig 4. Validation of experimental data and simulation results

۳-۳- منحنی‌های عملکردی

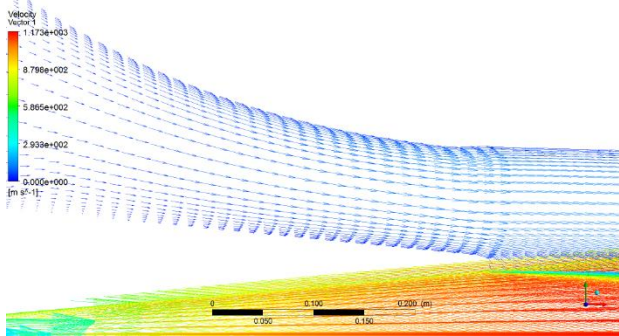
با توجه به اهمیت موضوع جریان‌های ورودی به ترموکمپرسور که شامل جریان‌های محرک و مکشی است، منحنی‌های عملکردی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. یکی از عوامل بسیار مهم در ارزیابی منحنی‌های عملکردی محدوده کاری پایدار است که با توجه به نتایج به دست آمده بخار محرک با فشار ۱۵ بار بیشترین محدوده کار در حالت خفه شده دوپل (بهترین حالت کاری) را دارا می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، بعد از نسبت تراکم ۳/۰۲ نمودار روند کاهش به خود گرفته و تا نسبت تراکم ۳/۰۹ در حالت نیمه پایدار (خفه شده منفرد) قرار دارد. همچنین نسبت ورود ترموکمپرسور بعد از مقدار نسبت تراکم ۳/۰۹ در حالت بازگشتی کامل قرار گرفته و میزان نسبت ورود صفر می‌گردد. برای بخارهای محرک با فشار ۳/۷ و ۵ بار نسبت‌های تراکم پایین به همراه نسبت‌های ورود پایین جریان‌های بازگشتی عمده در داخل ترموکمپرسور را توجیه می‌کنند و برای بخار محرک با فشار ۱۰ بار در نسبت تراکم کمتری روند نزولی ضریب ورود آغاز می‌گردد. لذا با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای، از نظر منحنی‌های عملکردی فشار ۱۵ بار بهترین کارکرد را دارد.



شکل ۵- منحنی عملکردی ترموکمپرسور

Fig 5. Operational curve of thermo-compressor

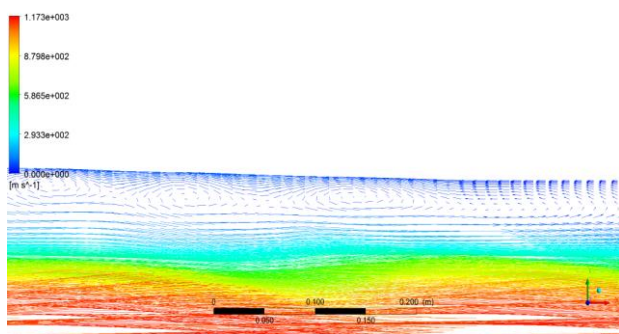
مشاهده می‌گردد، جریان به‌خوبی از بخش مکشی وارد ترموکمپرسور می‌گردد و هیچ‌گونه جریان گردابی در این بخش ایجاد نشده است.



شکل ۹- بردار جهت‌دار سرعت در بخش مربوط به مکش جریان مکشی برای بخار محرک با فشار ۱۰ بار

Fig 9. Vector in suction vapor section in $P_{motive}=10$ bar

همان‌طوری که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در نزدیکی دیواره جریان‌های گردابی به‌وجود آمده‌اند که با وجود کوچک بودن نظر اندازه، می‌توانند در کار صحیح ترموکمپرسور اختلال ایجاد کنند. پدیدار شدن این جریان‌های گردابی به‌نوعی نشان‌دهنده کافی نبودن فشار بخار محرک از نظر مقدار است. برای رفع این مشکل بایستی فشار محرک بالاتری از نظر مقدار به‌کار برده شود.

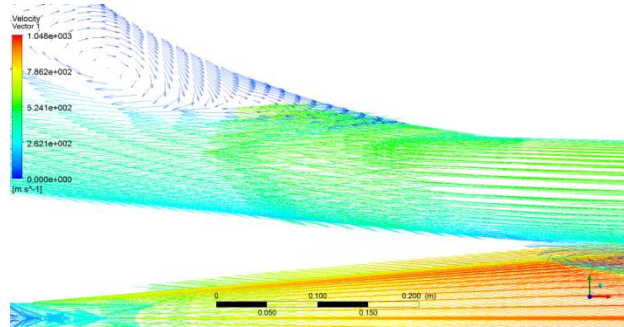


شکل ۱۰- بردار جهت‌دار سرعت در بخش سطح ثابت برای بخار محرک با فشار ۱۰ بار

Fig 10. Velocity vector in constant area section in $P_{motive}=10$ bar

در ادامه و در قالب شکل ۱۱ در بخش‌های مختلف که مستعد ایجاد جریان‌های گردابی یا گردابه‌ها هستند بردارهای برای فشار ۱۵ بار مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به بحرانی بودن این فشار وجود یا عدم وجود جریان‌های مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۱ بردار سرعت مربوط به بخش مکش و خروجی گلوئی نازل را نشان می‌دهد که هیچ‌نوع جریان بازگشتی در این بخش مشاهده نمی‌گردد.

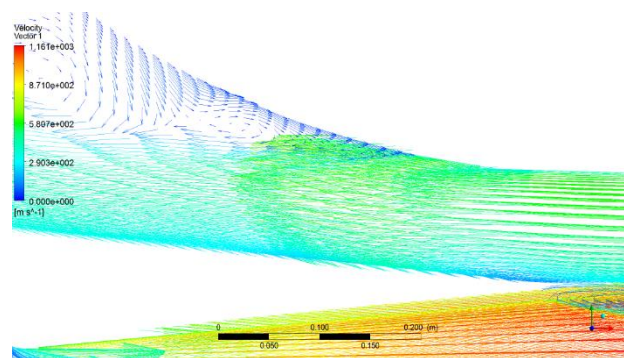
داخل هر کدام از بخش‌های ترموکمپرسور را به خوبی نشان می‌دهد. بر این اساس در سطوح مختلف فشار بخار محرک و در بخش‌های مستعد وجود جریان‌های گردابی بررسی شده است. در شکل ۷ در بخش ورودی بخار مکشی وجود جریان‌های گردابی مشهود است، بر این اساس چون جریان مکشی عملاً به خوبی وارد ترموکمپرسور نمی‌شود، لذا سایر بخش‌های مستعد بررسی نمی‌گردد.



شکل ۷- بردار جهت‌دار سرعت در بخش مربوط به مکش جریان مکشی برای بخار محرک با فشار ۳/۷ بار

Fig 7. Thermo-compressor meshing in Gambit software

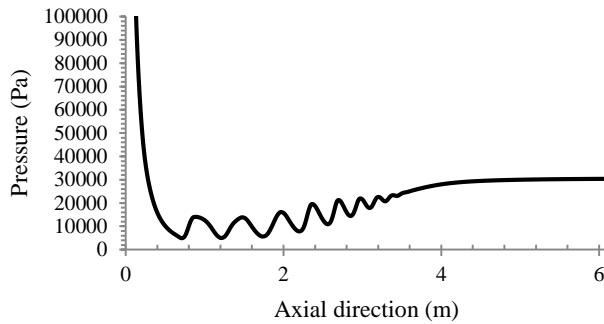
در سطح فشار ۵ بار آن چیزی که از بخش ورودی سیال مکشی مشخص است، غالب بودن جریان بازگشتی در این منطقه است که عملکرد ترموکمپرسور را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. منشأ این جریان‌های بازگشتی ایجاد جریان‌های گردابی در بخش بالا و پایین منطقه سطح ثابت و در نزدیکی دیواره است که به دلیل عدم تعریف صحیح شرایط کاری از نظر فشار بخار محرک برای ترموکمپرسور پدید می‌آیند (شکل ۸). برای این سطح نیز عدم ایجاد مکش صحیح از بخش مکشی کاملاً مشهود است.



شکل ۸- بردار جهت‌دار سرعت در بخش مربوط به مکش جریان مکشی برای بخار محرک با فشار ۵ بار

Fig 8. Velocity vector in suction vapor section in $P_{motive}=5$ bar

بردار سرعت برای فشار محرک ۱۰ بار برای بخش ورودی سیال مکشی در شکل ۹ آورده شده است. همان‌طوری که از کانتور مربوطه



شکل ۱۳- نمودار فشار در راستای محور ترموکمپرسور

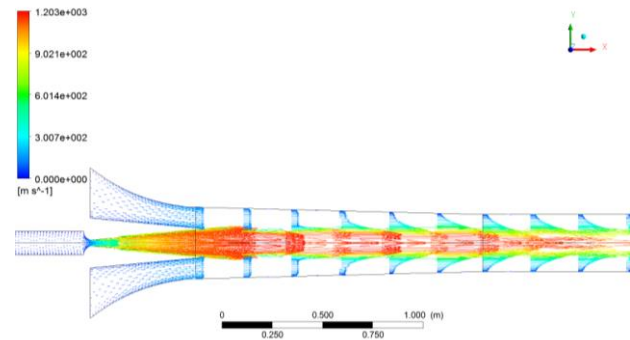
Fig 13. Pressure plot in axis direction of thermo-compressor

همانطوری که از شکل ۱۳ قابل مشاهده است، روند تغییرات دما نیز در ابتدا حالت کاهشی به خود می‌گیرد و حتی در بخش‌هایی به زیر ۱۵۰ درجه کلوین می‌رسد که به واسطه مومنوم بالای جریان همچنان در فاز گاز باقی می‌ماند. سپس با شروع مرحله اختلاط افزایش دما شروع شده و بعد از بخش اختلاط به مقدار پایداری می‌رسد. مقدار دمای بخار خروجی از دیفیوزر نیز نسبت به دمای بخار مکشی حالت افزایشی دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، منحنی‌های عملکردی ترموکمپرسور در قالب منحنی-های عملکردی برای حالت‌های مختلف ارائه شد. در ادامه تاثیر پارامترهای ورودی بر روی انرژی جنبشی آشفتنگی و جریان‌های گردابی داخل ترموکمپرسور که نقش زیادی بر عملکرد صحیح ترموکمپرسور ایفا می‌کنند، در حالت‌های مختلف فشار بخار محرک بررسی گردید. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از تحلیل نتایج به‌صورت ذیل ارائه می‌گردد:

- نتایج حاصل از تحلیل ترموکمپرسور به‌دو صورت دو بعدی متقارن با در نظر گرفتن ملاحظات زمانی و همچنین محاسباتی، انطباق خوبی با نتایج تجربی داشت. از این رو می‌توان از حالت دو بعدی متقارن در شرایط هندسی خاص به‌جای حالت سه بعدی استفاده نمود.
- تاثیر سطوح مختلف فشار برای جریان بخار ورودی بر روی عملکرد، انرژی جنبشی و همچنین ایجاد جریان‌های گردابی در داخل ترموکمپرسور برای دستیابی به‌عملکرد بهتر ترموکمپرسور، مورد بررسی قرار گرفت و بهترین شرایط برای بخار محرک با فشار ۱۵ بار حاصل شد.
- برای بخارهای محرک با فشار ۳/۷ و ۵ بار نسبت‌های تراکم پایین به‌همراه نسبت‌های ورود پایین جریان‌های بازگشتی عمده در داخل ترموکمپرسور را توجیه می‌کنند و برای بخار محرک با

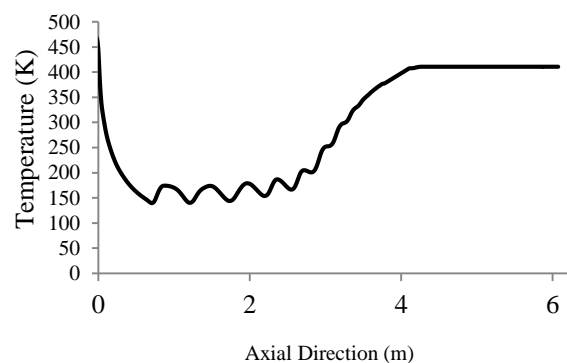


شکل ۱۱- بردار جهت‌دار سرعت و توزیع آن در راستای طول برای بخار محرک با فشار ۱۵ بار

Fig 11. Velocity vector and its distribution in longitude direction in $P_{motive}=15$ bar

۳-۶- منحنی‌های فشار و دما برای بخار محرک با فشار ۱۵ بار

بعد از اینکه بخار با فشار ۱۵ بار با توجه به ارزیابی منحنی‌های عملکردی و جریان‌های گردابی به عنوان مقدار فشار ایده‌آل برای استفاده به عنوان بخار محرک انتخاب گردید، نمودارهای دو بعدی فشار و دما در موقعیت محوری ترموکمپرسور به‌ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. روند تغییرات فشار به‌صورت کاهشی آغار می‌گردد که فشار بخار محرک خروجی از نازل و در ادامه افت آن را نشان می‌دهد. همین افت فشار سبب ایجاد حالت مکش برای مکش بخار مرده (بخار با سطح فشار و دمای پایین) به‌داخل ترموکمپرسور است. سپس با حرکت در راستای محوری ترموکمپرسور مقدار فشار افزایش یافته و در نزدیکی خروجی دیفیوزر به‌مقدار نسبتاً پایداری می‌رسد. مقدار فشار بخار خروجی از دیفیوزر، نسبت به‌مقدار فشار بخار مکشی، مقدار متوسطی را به‌خود اختصاص داده است.



شکل ۱۲- نمودار دما در راستای محور ترموکمپرسور

Fig 12. Temperature plot in axis direction of thermo-compressor

دوبل (۳/۰۲) ارائه می‌نماید. بنابراین برای استفاده عملی به‌عنوان فشار بخار محرک، فشار ۱۵ بار گزینه مناسب‌تری است.

- در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که فشار بخار محرک ۱۵ بار بهترین انتخاب در بین حالت‌های مورد بررسی با در نظر گرفتن نتایج مربوط به منحنی‌های عملکردی، کاتوره‌های انرژی جنبشی آشفتنگی و بردارهای جهت دار سرعت بوده و دینامیک سیالات محاسباتی دارای پتانسیل بالایی برای شبیه‌سازی جریان‌های تراکم‌پذیر مانند جریان‌های داخل ترموکمپرسورها را دارا است.

۵- منابع

- Aghaei, E., Rostampour, V., Rezvanivand Fanaei, A., and Nikbakht, A.M. (2021). *Investigating the Effect of Output Flow Regulator Plate on the Performance of Flour Cyclone: Experimental Studies and Numerical Simulations*. Journal of Agricultural Machinery. (In Persian).
- Aidoun, Z., Ameer, K., Falsafioon, M., and Badache, M. (2019). *Current advances in ejector modeling, experimentation and applications for refrigeration and heat pumps. Part 1: Single-phase ejectors*. *Inventions*. 4: 1-73
- Bartosiewicz, Y., Aidoun, Z., and Mercadier, Y. (2006). *Numerical assessment of ejector operation for refrigeration applications based on CFD*. *Applied Thermal Engineering*. 26: 604-612.
- Besagni, G., and Inzoli, F. (2017). *Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches*. *Applied Thermal Engineering*. 117: 122-144.
- Bonanos, A. M. (2017). *Physical modeling of thermo-compressor for desalination applications*. *Desalination*. 412. 13-19.
- Dutton, J. C., and Carroll, B. F. (2009). *Optimal Supersonic Ejector Designs*. *Journal of Fluids Engineering*. 108. 414-420.
- Gagan, J., Smierciew, K., Butrymowicz, D., and Karwacki, J. (2014). *Comparative study of turbulence models in application to gas ejectors*. *International Journal of Thermal Sciences*. 78. 9-15.
- Huang, B. J., Chang, J. M., Wang, C. P., and Petrenko, V. A. (1999). *A 1-D analysis of ejector performance*. *International Journal of Refrigeration*. 22: 354-364.
- ANSYS Fluent. (2013). *ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 182*. 15317. 373-464.
- Ji, M., Utomo, T., Woo, J., Lee, Y., Jeong, H., Chung, H. (2010). *CFD investigation on the flow structure inside thermo vapor compressor*. *Energy*. 35. 2694-2702.
- Keenan, J. H., (1942). *A simple air ejector*. *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*. 64. 75-81.
- Naimi, S., Shahgholi, G., Rezvanivand Fanaie, A., and Rostampour, V. 2019. *Numerical Study of Wheat Conveying in Separator Cyclone Using Computational Fluid Dynamics*. *Journal of Agricultural Machinery* 11(2): 231-246. (In Persian).
- Rezvanivand Fanayi, A., and Nikbakht, A. M. (2015). *A CFD study of the effects of feed diameter on the pressure drop in acyclone separator*. *International Journal of Food Engineering*. 11. 71-77.
- Rezvanivandfanayi, A., Hasanpour, A., and Nikbakht, A. M. (2019). *Study of the vapor thermo-compressor to reduce energy consumption in the sugar production line using Computational Fluid Dynamics*. *Journal of Agricultural Machinery*. 10(2). (In Persian).
- Rezvanivand Fanaei, A., Nikbakht, A. M., and Hassanpour, A. (2021a). *A Computational-Experimental Investigation of Thermal Vapor Compressor as an Energy Saving Tool for the Crystallization of Sugar in a Sugar Processing Plant*. *Journal of Food Process Engineering*.
- Rezvanivand Fanaei, A., A. Hassanpour., and Nikbakht, A. M. (2021b). *Investigation of the motive steam pressure effect on performance and reverse flows in sugar factory thermo-compressor: Validation and numerical study*. *Journal of Agricultural Machinery*. (In Persian).
- Riffat, S. B., Omer, S. A. (2001). *CFD modeling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid*. *International Journal of Energy Research*. 25: 115-128.
- Sabralilou, B., Mohebbi, A., Akbarian, E., and Rezvanivand fanaei, A. (2019). *Aero-acoustical study of axial fan using computational fluid dynamics*. *Journal of Agricultural Machinery*. 10: 255-264. (In Persian).
- Sharifi, N., Boroomand, M., and Kouhikamali, R. (2012). *Wet steam flow energy analysis within thermo-compressors*. *Energy*. 47. 609-619.
- Sriveerakul, T., Aphornratana, S., Chunnanond, K., (2007). *Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results* 46, 812-822
- Zobeiri, M., Rostampour, V., Fanaei, A.R., and Nikbakht, A. M. (2019). *Experimental and Numerical investigation of deviation blade effect on sedimentation chamber performance in chickpea harvesting machine*. *Iran Biosystems Engineering*. 52. (In Persian).
- Zobeiri, M., Rostampour, V., Rezvanivand Fanaei, A., and Nikbakht, A. M. (2021). *Comparative performance analysis of innovative separation chamber configurations: Numerical and experimental investigations*. *Spanish Journal of agricultural Research*. 19(2).