



الگوریتم غیر تکراری برای تحلیل یک بعدی عملکرد اجکتور در حالت بحرانی

شعبان علیاری شوره‌دلی^{1*}، سید محمد حسین مصباحی²

1 - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی 16785-163، sh_alaryi@sru.ac.ir

چکیده

سیستم‌های سرمایش اجکتوری در مقایسه با سیستم‌های سرمایش متداول توان الکتریکی کمتری مصرف می‌کنند، زیرا قادر هستند با استفاده از منابع گرمایی با کیفیت پایین نیاز به توان الکتریکی را کاهش دهند. عملکرد این سیستم‌ها به طور عمده تحت تاثیر عملکرد اجکتور است. بنابراین تخمین مشخصه‌های عملکردی اجکتور با استفاده از مدل‌های ریاضی امری اجتناب ناپذیر و ضروری است. در این مطالعه برای تحلیل یک بعدی عملکرد اجکتور در حالت بحرانی الگوریتم غیر تکراری ارائه شده است. همچنین برای مدل‌سازی ضریب افت در فرآیند اختلاط ایده جدیدی پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی به جای استفاده از مشخصات هندسی و شرایط کاری اجکتور، استفاده از پارامترهای جریان پیشنهاد شده است، و بر اساس داده‌های آزمایشگاهی موجود رابطه‌ای برای آن به دست آمده است. برای بررسی صحت مدل ارائه شده داده‌های آزمایشگاهی موجود برای اجکتورهایی با هندسه‌ها، شرایط کاری و سیال‌های مختلف به کار رفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که مدل حاضر در تخمین سطح مقطع بخش سطح-ثابت و نسبت دبی‌های جرمی نسبت به مدل‌های یک بعدی موجود عملکرد بهتری دارد. همچنین دقت مدل حاضر در تعیین نسبت دبی‌های جرمی نزدیک به دقت مدل دو بعدی دایره ضربه است.

کلیدواژگان

اجکتور، تحلیل عملکرد، حالت کاری بحرانی، الگوریتم غیر تکراری

A non-iterative algorithm for one-dimensional analysis of ejector performance in critical operational regime

Shaban Alyari Shourehdeli^{1*}, Seyed Mohammad Hossein Mesbahi²

1- Department of mechanical engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16785-163 Tehran, Iran, sh_alaryi@sru.ac.ir

Abstract

Ejector refrigeration systems are less power intensive when compared to conventional refrigeration systems, mainly due to their ability to use low-grade heat sources to reduce electrical power requirements. The performance of these systems is largely dominated by the performance of the ejector. Therefore, it is essential that the performance characteristics of the ejector are predicted by using a mathematical model. In this paper, a non-iterative algorithm for the one-dimensional analysis of ejector performance in critical operational mode is proposed. Moreover, using flow parameters is proposed for estimating loss coefficient in the mixing process rather than using geometrical specifications of the ejector. In order to consider the influence of the flow parameters, an empirical relation is obtained from the existing experimental data. The effectiveness of the proposed model is validated by four experimental results that include different working fluids and ejector geometries. The results show that the proposed model has better performance in predicting the cross-sectional area of the constant-area section and entrainment ratio than other one-dimensional models. The accuracy of the present model in predicting the entrainment ratio is close to the two-dimensional shock circle model.

Keywords

Ejector, Performance analysis, Critical operation, Non-iterative algorithm

۱- مقدمه

با توجه به مشکلات ناشی از گرمایش زمین، هزینه بالای انرژی و کاهش منابع انرژی فسیلی، سیستم‌های تهویه مطبوع و سرمایش که از انرژی خورشیدی یا از انرژی‌های گرمایی اتلافی بعنوان منبع گرما استفاده می‌کنند مورد توجه قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های سرمایش تراکم بخار مزیت‌هایی از قبیل نداشتن قطعات متحرک، نگهداری کمتر، عمر طولانی و قابلیت اطمینان بالا دارند. عیب اصلی آنها ضریب عملکرد نسبتاً پایین است. یکی از روش‌های تراکم سیال عامل در این سیستم‌ها استفاده از اجکتور با فوق صوت است. در سیستم‌های سرمایش

اجکتوری عملکرد اجکتور از مهم‌ترین عوامل موثر بر عملکرد کل سیستم است.

برای شبیه‌سازی عملکرد اجکتور مدل‌های یک بعدی و مدل‌های چند بعدی مبتنی بر دینامیک سیالات عددی ایجاد شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند [1]. مدل‌های مبتنی بر دینامیک سیالات عددی برای بهینه‌سازی هندسه اجکتور، شناخت پدیده‌های موضعی در جریان و تعیین ضرایب موجود در مدل‌های یک بعدی بکار می‌روند [2]. مدل‌های یک بعدی با محاسبات کمتر و در نتیجه سرعت بالاتر عملکرد اجکتور را تعیین می‌کنند و براحتی در مدل‌های سیستم سرمایش بکار می‌روند [3].

جریان اولیه را بر حسب فشار پستی نشان می دهد. سه حالت کاری وجود دارد. در طی حالت کاری بحرانی جریان اولیه و جریان ثانویه هر دو دچار خفگی شده اند و نسبت دبی های جرمی ثابت است. برای حالت کاری مادون بحرانی فقط جریان اولیه دچار خفگی شده و نسبت دبی های جرمی با فشار پستی تغییر می کند. برای حالت جریان برگشتی جریان ثانویه معکوس است و نسبت دبی های جرمی منفی است.

در حالت کاری بحرانی در صورت معلوم نبودن سطح مقطع بخش سطح-ثابت و با معلوم بودن فشار پستی بحرانی و فشار های اولیه و ثانویه به دست آوردن نسبت دبی های جرمی و سطح مقطع بخش سطح-ثابت نیازمند استفاده از الگوریتم های تکراری است. در این مقاله الگوریتم غیر تکراری برای به دست آوردن همزمان نسبت دبی های جرمی و سطح مقطع سطح-ثابت ارائه شده است. برای این منظور مدل یک بعدی ارائه شده توسط هوانگ و همکاران [8] که نتایج حاصل از آن هم خوانی خوبی با داده های تجربی دارد مورد استفاده قرار گرفته است. ضمناً برای تعیین ضریب افت در فرآیند اختلاط ایده جدید استفاده از پارامتر های جریان ارائه شده است.

۲- تحلیل تئوری عملکرد اجکتور و استخراج روابط مورد نیاز الگوریتم غیر تکراری

در این بخش بر اساس مدل هوانگ و همکاران [8] روابط مورد نیاز الگوریتم غیر تکراری به دست آمده است. تا قبل از اختلاط دو جریان اولیه و ثانویه روابط مشابه مدل هوانگ و همکاران است و نیازی به تغییر ندارند (بخش های ۱-۲ الی ۴-۲). پس از فرآیند اختلاط و قبل از ضربه قائم (بخش ۵-۲) الگوریتم غیر تکراری نیازمند روابط جدیدی است که از ترکیب روابط موجود به دست می آیند. در جریان مخلوط از بالا دست ضربه قائم تا خروجی پخش کننده (بخش ۶-۲) اساساً از روابط دیگری استفاده شده است. با فرض قرار گرفتن گلوگاه فرضی در داخل مقطع سطح ثابت اجکتور، اختلاط دو جریان در داخل مقطع سطح ثابت و با فشار یکنواخت رخ می دهد. شکل ۲ فرآیند اختلاط دو جریان را به صورت شماتیک نشان می دهد. با فرضیات زیر تحلیل عملکرد اجکتور صورت گرفته است [8]:

- 1- سیال عامل گاز ایده آل با خواص ثابت C_p و γ است.
- 2- جریان داخل اجکتور دائمی و یک بعدی است.
- 3- انرژی جنبشی در ورودی مجاری اولیه و مکش و نیز در خروجی پخش کننده قابل چشم پوشی است.
- 4- به منظور ساده سازی استخراج مدل یک بعدی، روابط ایزنتروپیک به عنوان یک تقریب به کار رفته اند. و فرآیند های غیر ایده آل، اثرات اصطکاکی و افت های اختلاط با استفاده از ضرائب به کار رفته در روابط ایزنتروپیک در نظر گرفته شده اند.
- 5- جریان اولیه پس از خروج از نازل بدون اختلاط با جریان ثانویه تا مقطع $\gamma-\gamma$ (گلوگاه فرضی) در داخل مقطع سطح ثابت پخش می شود.
- 6- دو جریان در مقطع $\gamma-\gamma$ (گلوگاه فرضی) و قبل از ضربه قائم که در مقطع $S-S$ است، با فشار یکنواخت $P_{\gamma\gamma}=P_{SS}$ شروع به اختلاط می کنند.
- 7- جریان ثانویه در مقطع $\gamma-\gamma$ (گلوگاه فرضی) دچار خفگی شده است.

طراحی اجکتور بر اساس موقعیت نازل به دو دسته تقسیم می گردد [4]. زمانیکه خروجی نازل در داخل مقطع سطح-ثابت اجکتور واقع شده و اختلاط جریان اولیه و ثانویه در مقطع سطح ثابت رخ می دهد، اجکتور "اجکتور با اختلاط در سطح ثابت" نامیده می شود. زمانیکه خروجی نازل در داخل محفظه مکش و قبل از مقطع سطح ثابت قرار گرفته است، اجکتور "اجکتور با اختلاط در فشار ثابت" نامیده می شود.

بر اساس تئوری دینامیک سیال یک بعدی مدل های ریاضی مختلفی برای اجکتور ارائه شده است. کینان و همکاران [5] ایده اجکتور با اختلاط در فشار ثابت را ارائه نمودند که در آن اختلاط دو جریان اولیه و ثانویه در فشار یکسان و برابر با فشار در خروجی نازل اولیه آغاز می گردد. مان دی و باگستر [6] گلوگاه فرضی یا سطح موثر را در داخل محفظه اختلاط در نظر گرفتند. آنها فرض کردند سیال های اولیه و ثانویه در مقطعی در محفظه اختلاط و در فشار ثابت شروع به اختلاط می کنند و جریان اولیه کانال همگرایی برای جریان ثانویه ایجاد می کند، و بدین ترتیب مدل اختلاط فشار ثابت را توسعه بیشتری دادند. ایمز و همکاران [7] با در نظر گرفتن برگشت ناپذیری مربوط به نازل اولیه، محفظه اختلاط و پخش کننده مدل اختلاط فشار ثابت را اصلاح نمودند. هوانگ و همکاران [8] مدلی را ارائه نمودند که در آن خفگی جریان ثانویه در نظر گرفته شده و فرض شده است که اختلاط فشار ثابت در مقطع سطح-ثابت رخ می دهد. ژو و همکاران [9] روش جدیدی برای مدل سازی اجکتور ارائه نمودند. این روش "مدل دایره ضربه" نامیده می شود. در این روش برای در نظر گرفتن غیر یکنواختی سرعت در جهت شعاعی، در ورودی بخش سطح ثابت "دایره ضربه" در نظر گرفته شده است. با فرض اینکه دایره ضربه با ضخامت صفر دو جریان را از یکدیگر جدا می سازد و نیز فرض جریان صوتی در دایره ضربه، توزیع سرعت نمائی در جهت شعاعی به دست آمده است. این توزیع سرعت جریان لزج در نزدیکی دیوار اجکتور را به صورت تقریبی ارائه می کند.

در مدل های یک بعدی افت های اصطکاکی و برگشت ناپذیرهای مربوط به نازل اولیه، مکش، اختلاط و پخش کننده با استفاده از بازده ها در نظر گرفته می شوند. این بازده ها اثر قابل توجهی بر دقت مدل ها دارند و اثر بازده اختلاط بر دقت مدل نسبت به دیگر بازده ها بیشتر است [8].

در عمل دو پدیده خفگی در عملکرد اجکتور وجود دارد: یکی در جریان اولیه عبوری از نازل و دیگری در جریان ثانویه، شکل ۱ در فشار مکش و فشار جریان اولیه ثابت، تغییرات نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به دبی جرمی

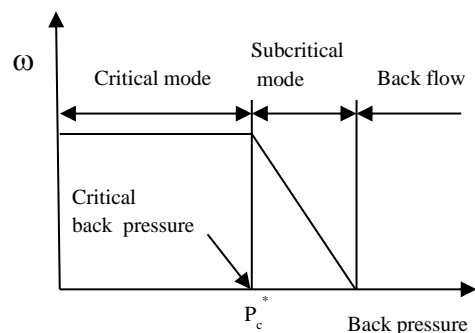


Fig. 1 Operational modes of ejector

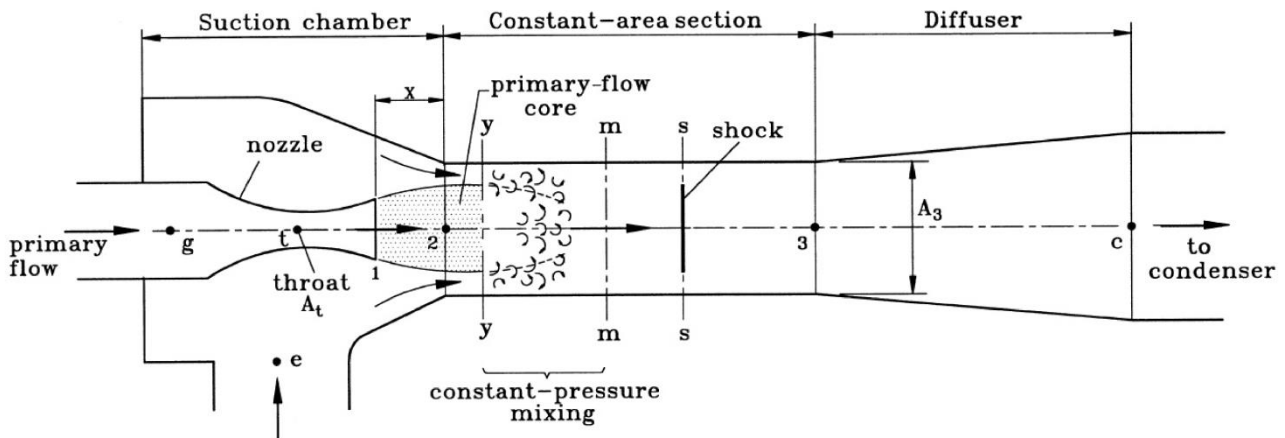


Fig. 2 Schematic diagram of ejector performance [8]

شکل ۲ نمودار شماتیک عملکرد اجکتور [8]

در حالت کاری بحرانی فرض بر این است که جریان ثانویه در مقطع $y-y$ دچار خفگی شده است یعنی $M_{sy}=1$ برای فشار سکون ورودی P_e خواهیم داشت:

$$\frac{P_e}{P_{sy}} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{sy}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (6)$$

و دبی جرمی جریان ثانویه تحت شرایط خفگی عبارت است از:

$$\dot{m}_s = \frac{P_e A_{sy}}{\sqrt{T_e}} \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \sqrt{\eta_s} \quad (7)$$

که در آن η_s ضریب مربوط به بازده ایزنتروپیک جریان ثانویه است.

۳-۲- مساحت سطح مقطع در مقطع $y-y$

مساحت مقطع $y-y$ عبارت است از A_3 که مجموع مساحت های جریان اولیه A_{py} و جریان ثانویه A_{sy} است:

$$A_{py} + A_{sy} = A_3 \quad (8)$$

۴-۲- دما و عدد ماخ در مقطع $y-y$

دما و عدد ماخ دو جریان در مقطع $y-y$ به صورت زیر به هم وابسته هستند:

$$\frac{T_g}{T_{py}} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{py}^2 \quad (9)$$

$$\frac{T_e}{T_{sy}} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{sy}^2 \quad (10)$$

۵-۲- جریان مخلوط در مقطع $m-m$ در بالا دست ضربه قائم

دو جریان بعد از مقطع $y-y$ شروع به اختلاط می کنند. با استفاده از موازنه اندازه حرکت و انرژی بین مقاطع $y-y$ و $m-m$ روابط زیر را می توان نوشت:

$$\varphi_m (\dot{m}_p V_{py} + \dot{m}_s V_{sy}) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) V_m \quad (11)$$

$$\dot{m}_p \left(C_p T_{py} + \frac{V_{py}^2}{2} \right) + \dot{m}_s \left(C_p T_{sy} + \frac{V_{sy}^2}{2} \right) =$$

$$(\dot{m}_p + \dot{m}_s) \left(C_p T_m + \frac{V_m^2}{2} \right) \quad (12)$$

۸- دیوار داخلی اجکتور آدیاباتیک است.

۱-۲- جریان اولیه در نازل و محفظه مکش

برای فشار و دمای سکون P_g و T_g معین دبی جرمی جریان نازل تحت شرایط خفگی با استفاده از رابطه جریان ایزنتروپیک به دست می آید:

$$\dot{m}_p = \frac{P_g A_t}{\sqrt{T_g}} \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \sqrt{\eta_p} \quad (1)$$

که در آن η_p ضریب بازده ایزنتروپیک برای نازل است. با فرض جریان ایزنتروپیک بین عدد ماخ در خروجی نازل M_{pl} ، سطح مقطع خروجی A_{pl} و فشار خروجی P_{pl} روابط زیر برقرار است:

$$\left(\frac{A_{pl}}{A_t}\right)^2 = \frac{1}{M_{p1}^2} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{p1}^2\right) \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \quad (2)$$

از آنجائیکه جریان اولیه بدون اختلاط با جریان ثانویه پخش می شود، جریان اولیه بین مقطع ۱-۱ و $y-y$ از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{P_{py}}{P_{p1}} = \frac{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{p1}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{py}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

$$\frac{P_g}{P_{p1}} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{p1}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4)$$

و سطح جریان اولیه در مقطع $y-y$ ، A_{py} را می توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\frac{A_{py}}{A_{p1}} = \frac{\frac{\varphi_p}{M_{py}} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{py}^2\right) \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}{\frac{1}{M_{p1}} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{p1}^2\right) \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} \quad (5)$$

که در آن ضریب φ_p برای در نظر گرفتن افت جریان اولیه از مقطع ۱-۱ تا $y-y$ به کار رفته است.

۲-۲- جریان ثانویه از ورودی تا مقطع $y-y$



۷-۲- روند تحلیل عملکرد اجکتور

برای مقادیر مشخص سطح گلوگاه A_t (یا قطر گلوگاه) و سطح خروجی نازل A_{pl} (یا قطر در خروجی نازل)، عملکرد یک اجکتور به وسیله دما و فشار سکون در ورودی نازل (T_g, P_g) و در مجرای ورودی مکش (T_e, P_e) و فشار پشته بحرانی P_c^* مشخص می شود. بدین ترتیب پنج متغیر مستقل در الگوریتم های تکراری موجود دو حلقه تکرار وجود دارد [8]. یک حلقه برای مثبت نگه داشتن سطح مقطع اشغالی توسط جریان ثانویه در بخش سطح-ثابت است و حلقه دیگر برای تعیین فشار پشته می باشد. در الگوریتم غیر تکراری پیشنهاد شده دو حلقه تکرار حذف شده است و یک رابطه ضمنی (معادله 19) برای تعیین عدد ماخ جریان مخلوط قبل از ضربه قائم M_m اضافه گردیده است. خوشبختانه این معادله ضمنی همچون معادله ضمنی (2) برای تعیین M_{pl} با روش تکراری به سرعت همگرا می شود. الگوریتم غیر تکراری زیر را می توان برای تعیین دبی جرمی جریان اولیه \dot{m}_p ، دبی جرمی جریان ثانویه \dot{m}_s ، نسبت دبی های جرمی ω ، مساحت مقطع سطح ثابت A_3 و نسبت سطوح A_3/A_t به کار برد. در ساختار این الگوریتم حلقه تکراری وجود ندارد و مراحل دوازده گانه آن تنها یکبار انجام می گیرد.

- 1- محاسبه دبی جریان اولیه \dot{m}_p از معادله (1)
- 2- محاسبه فشار و عدد ماخ جریان اولیه در خروجی نازل، P_{pl} و M_{pl} از معادلات (2) و (3)
- 3- محاسبه فشار جریان ثانویه در مقطع $y-y$ ، P_{sy} با فرض $M_{sy}=1$ از معادله (6)
- 4- محاسبه سطح مقطع و عدد ماخ جریان اولیه در مقطع $y-y$ ، A_{py} و M_{py} با فرض $P_{py}=P_{sy}$ از معادلات (4) و (5)
- 5- محاسبه دما های جریان اولیه و ثانویه در مقطع $y-y$ ، T_{py} و T_{sy} از معادلات (9) و (10)
- 6- محاسبه سرعت های جریان اولیه و ثانویه در مقطع $y-y$ ، V_{py} و V_{sy} از معادلات (13) و (14)
- 7- محاسبه عدد ماخ مخلوط قبل از ضربه قائم، M_m با فرض $P_m=P_{py}$ از معادله (19)
- 8- محاسبه دمای مخلوط قبل از ضربه قائم، T_m از معادله (17)
- 9- محاسبه دبی جرمی جریان ثانویه، \dot{m}_s از معادله (16)
- 10- محاسبه سطح مقطع جریان ثانویه در مقطع $y-y$ ، A_{sy} از معادله (7)
- 11- محاسبه سطح مقطع سطح-ثابت، $A_3=A_{sy}+A_{py}$
- 12- محاسبه نسبت دبی های جرمی، $\omega = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p}$

در الگوریتم فوق الذکر ضرائب مربوط به افت در جریان اولیه در نازل، افت در جریان ثانویه قبل از اختلاط و جریان اولیه که نازل را ترک می کند به ترتیب $\eta_p = 0.9$ ، $\eta_s = 0.85$ و $\eta_p = 0.88$ در نظر گرفته شده اند [8]. تحلیل حساسیت نشان می دهد که اثر ضریب افت η_m بر نتایج در مقایسه با دیگر ضرایب بیشتر است [11]. این ضریب در تحلیل یک بعدی اجکتور به صورت های مختلفی در نظر گرفته شده است. در برخی پژوهش ها ضریب

که در آن V_m سرعت جریان مخلوط و ϕ_m ضریب در نظر گرفته شده برای افت اصطکاکی است و V_{py} و V_{sy} سرعت های جریان اولیه و ثانویه در مقطع $y-y$ می باشند:

$$V_{py} = M_{py} a_{py} ; a_{py} = \sqrt{\gamma R T_{py}} \quad (13)$$

$$V_{sy} = M_{sy} a_{sy} ; a_{sy} = \sqrt{\gamma R T_{sy}} \quad (14)$$

عدد ماخ جریان مخلوط را می توان با استفاده از روابط زیر ارزیابی کرد:

$$M_m = \frac{V_m}{a_m} ; a_m = \sqrt{\gamma R T_m} \quad (15)$$

روابط فوق معمولاً در مدل های یک بعدی بکار می روند، اما الگوریتم غیر تکراری پیشنهادی نیازمند رابطه ای برای دمای مخلوط در قبل از ضربه قائم است. برای این منظور با قرار دادن رابطه (15) در رابطه (11) می توان رابطه زیر را برای دبی جریان ثانویه \dot{m}_s به دست آورد:

$$\dot{m}_s = \dot{m}_p \frac{M_m \sqrt{\gamma R T_m} - \phi_m V_{py}}{\phi_m V_{sy} - M_m \sqrt{\gamma R T_m}} \quad (16)$$

و با جایگذاری رابطه (16) در رابطه (12) معادله درجه دوم زیر برای جذر دمای مخلوط $\sqrt{T_m}$ به دست می آید:

$$[\phi_m \dot{m}_p C_p (V_{py} - V_{sy}) + \frac{1}{2} \phi_m \dot{m}_p M_m^2 \gamma R (V_{py} - V_{sy})] T_m + [\dot{m}_p M_m \sqrt{\gamma R} (H_{sy} - H_{py})] \sqrt{T_m} + [\phi_m \dot{m}_p (V_{sy} H_{py} - V_{py} H_{sy})] = 0 \quad (17)$$

که در آن H_{sy} و H_{py} بترتیب انتالپی کل جریان اولیه و ثانویه در مقطع $y-y$ می باشند:

$$H_{py} = C_p T_{py} + \frac{V_{py}^2}{2} ; H_{sy} = C_p T_{sy} + \frac{V_{sy}^2}{2} \quad (18)$$

۶-۲- جریان مخلوط از بالا دست ضربه قائم مقطع $m-m$ تا خروجی پخش کننده

الگوریتم غیر تکراری پیشنهادی نیازمند رابطه ای برای فشار مخلوط قبل از ضربه قائم P_m بر حسب عدد ماخ مخلوط قبل از ضربه قائم M_m و فشار در خروجی پخش کننده P_c است. با فرض اینکه جریان مخلوط بعد از ضربه قائم فرآیند ایزنتروپیک را طی کند، و با توجه به فرض چشم پوشی از انرژی جنبشی جریان در خروجی پخش کننده، بین کمیت های فشار مخلوط قبل از ضربه قائم P_m ، عدد ماخ مخلوط قبل از ضربه قائم M_m و فشار در خروجی پخش کننده P_c رابطه زیر را می توان نوشت [10]:

$$\frac{P_c}{P_m} = \left[1 + \frac{1}{2} (\gamma - 1) M_m^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left[\frac{\gamma + 1}{2\gamma M_m^2 - (\gamma - 1)} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \left[\frac{(\gamma + 1) M_m^2}{2 + (\gamma - 1) M_m^2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (19)$$

۳-۱- مقایسه با داده های هوآنگ و همکاران [8]

یازده اجکتور مختلف به وسیله هوآنگ و همکاران آزمایش شده و 39 داده آزمایشگاهی به دست آمده است. همه اجکتور ها در حالت بحرانی کار می کنند و سیال عامل $R141b$ است. ضمناً نتایج مربوط به نسبت سطوح A_3/A_1 با نتایج مدل تئوری هوآنگ و همکاران [8] و نتایج مربوط به نسبت دبی های جرمی با نتایج مدل های هوآنگ و همکاران و مدل دایره ضربه ژو و همکاران [9] مقایسه شده است. همانطور که در شکل 4 نشان داده شده است در مقایسه با نتایج تجربی حداکثر خطا در تعیین نسبت سطوح A_3/A_1 حدود 5% است. شکل 5 خطای نسبی در تعیین نسبت سطوح A_3/A_1 را در

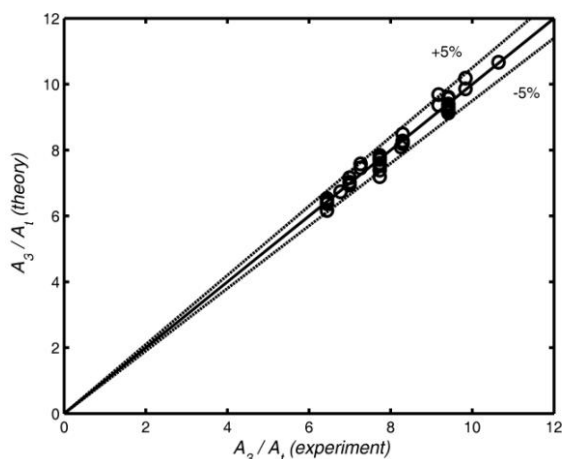


Fig. 4 Comparison between the present model prediction and the experimental data of Huang et al.[6] for the ejector area ratio

شکل ۴ مقایسه نسبت سطوح A_3/A_1 مدل حاضر با داده های تجربی هوآنگ و همکاران [8]

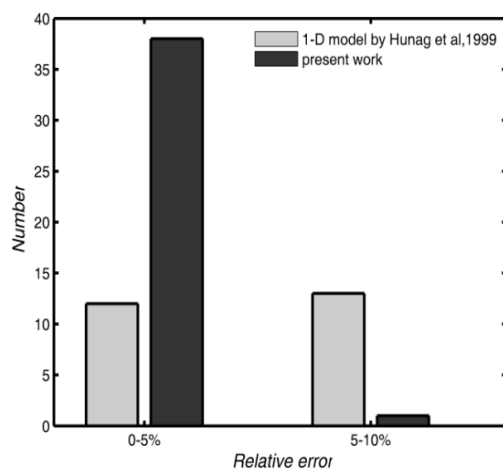


Fig. 5 Comparison of the present model and Huang's model for the relative error of the ejector area ratio

شکل ۵ مقایسه توزیع خطای تعیین نسبت سطوح A_3/A_1 در مدل حاضر با مدل هوآنگ و همکاران [8]

افت ثابت در نظر گرفته شده است و در پژوهش هایی بر حسب فشار های اولیه و ثانویه، مشخصات هندسی و نسبت دبی های جرمی و در مواردی تنها بر حسب مشخصات هندسی روابطی بر اساس نتایج تجربی برای آن به دست آمده است [12]. در گروه دیگری از پژوهش ها بر اساس نتایج حاصل از تحلیل مبتنی بر دینامیک سیالات عددی روابطی برای ضریب افت ارائه شده است [2]. در مطالعه حاضر ایده جدید استفاده از پارامتر های جریان پیشنهاد شده است. با استفاده از پارامتر های جریان همزمان اثر مشخصات هندسی، شرایط کاری مانند فشار در ورودی نازل، فشار در مجرای ورودی مکش و فشار پشته و نیز اثر نوع سیال عامل در نظر گرفته می شود. با استفاده از داده های تجربی هوآنگ و همکاران [8] پارامتر های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته اند. در میان پارامتر های مختلف، همبستگی خوبی بین ضریب افت ϕ_m و نسبت M_{py}/M_m مشاهده گردیده است. تغییرات ϕ_m بر حسب M_{py}/M_m و خط برازش شده در شکل 3 نشان داده شده است. به کمک رگرسیون غیر خطی و بر اساس نتایج تجربی مربوط به نسبت سطوح و نسبت دبی های جرمی رابطه خطی بین ϕ_m و M_{py}/M_m به صورت زیر به دست آمده است:

$$\phi_m = 1.1764 - 0.1924 \frac{M_{py}}{M_m} \quad (20)$$

در کلیه محاسبات آتی از رابطه فوق برای تخمین ϕ_m استفاده شده است.

۳- مطالعات مقایسه ای

به منظور بررسی صحت روند ارائه شده در تعیین سطح مقطع سطح-ثابت و نسبت دبی های جرمی اجکتور در حالت بحرانی از داده های تجربی متعدد با سیال های عامل مختلف استفاده شده است.

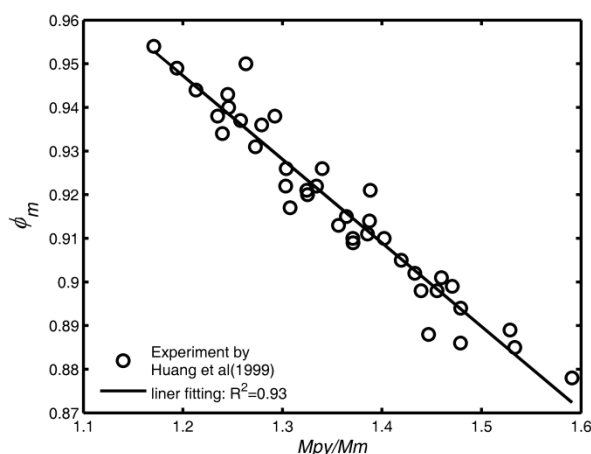


Fig. 3 The correlation between loss coefficient in the mixing process and Mach numbers ratio based on the experimental data of Huang et al [8]

شکل ۳ همبستگی بین ضریب افت در فرآیند اختلاط با نسبت اعداد ماخ بر اساس داده های تجربی هوآنگ و همکاران [8]

۳-۲- مقایسه با داده های آفرن راتانا و همکاران [13]

نتایج آزمایشگاهی آفرن راتانا و همکاران با مبرد $R11$ نیز برای بررسی صحت مدل حاضر به کار رفته است. از دو محفظه اختلاط به کار رفته در آزمایش های آفرن راتانا و همکاران فقط نتایج مربوط به محفظه اختلاط نرمال که تحت شرایط کاری بحرانی بوده اند مورد استفاده قرار گرفته است. ضمناً نتایج مدل حاضر با نتایج مدل دایره ضربه [9] نیز مقایسه شده است.

در دمای بویلر 110 درجه سانتی گراد و در سه فشار مختلف کندانسور تغییرات ظرفیت حرارتی و ضریب عملکرد سیستم بر حسب فشار اواپراتور به ترتیب در اشکال 8 و 9 نشان داده شده است. نتایج مدل حاضر نزدیک نتایج آزمایشگاهی است و حداکثر خطای نسبی بین مقادیر تئوری و متوسط مقادیر آزمایشگاهی کمتر از 26% است. در دمای بویلر 105 درجه سانتی گراد و در فشار کندانسور 150 کیلو پاسکال تغییرات ظرفیت حرارتی و ضریب عملکرد سیستم بر حسب فشار اواپراتور به ترتیب در اشکال 10 و 11 نشان داده شده است. نتایج نزدیک نتایج آزمایشگاهی است و حداکثر خطای نسبی 16% است. همچنین نتایج مدل حاضر و مدل دایره ضربه قائم بسیار نزدیک به یکدیگر هستند.

۳-۳- مقایسه با داده های همی دی و همکاران [14]

نتایج آزمایشگاهی همی دی و همکاران با اجکتور هوا زمانی که اجکتور در حالت بحرانی کار می کند، برای بررسی صحت مدل حاضر به کار رفته است. فشار بحرانی با توجه به نتایج آزمایشگاهی تعیین شده است. برای فشار اولیه

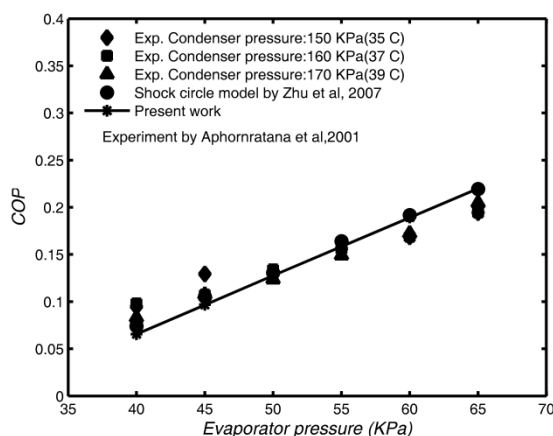


Fig. 8 Comparison between the present model, the experimental data of Aphornratana et al. [9], and shock circle model [7] for cooling capacity at boiler temperature 110 oC

شکل ۸ مقایسه ظرفیت حرارتی مدل حاضر با نتایج تجربی آفرن راتانا و همکاران [13] و مدل دایره ضربه [9] در دمای بویلر 110 درجه سانتی گراد

مقایسه با مدل هوآنگ و همکاران نشان می دهد. این شکل به وضوح نشان می دهد که مدل حاضر در تخمین نسبت سطوح A_3/A_1 نسبت به مدل هوآنگ و همکاران عملکرد بهتری دارد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است در مقایسه با نتایج تجربی عمده خطاها در تعیین نسبت دبی جرمی ها در حدود 14% است و تنها یک مورد خطای حدود 19% وجود دارد. بنابراین مدل حاضر با دقت خوبی عملکرد اجکتور را در حالت بحرانی پیش بینی می کند.

شکل 7 خطای نسبی در تعیین دبی های جرمی را در مقایسه با مدل های هوآنگ و همکاران [8] و مدل دایره ضربه [9] نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که مدل حاضر در تخمین نسبت دبی های جرمی نسبت به مدل هوآنگ و همکاران نتایج بهتری ارائه می کند.

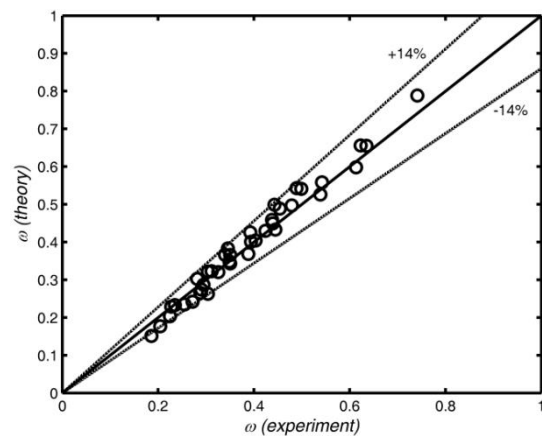


Fig. 6 Comparison between the present model prediction and the experimental data of Huang et al. [6] for the ejector entrainment ratio

شکل ۶ مقایسه نسبت دبی های جرمی □ مدل حاضر با داده های تجربی هوآنگ و همکاران [8]

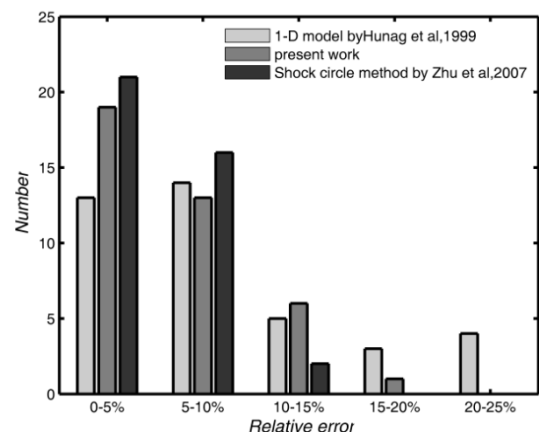


Fig. 7 Comparison between the present model, the Huang's model [8], and shock circle model [9] for the relative error of the ejector entrainment ratio

شکل ۷ مقایسه توزیع خطای تعیین نسب دبی های جرمی ω در مدل حاضر با مدل هوآنگ و همکاران [8] و مدل دایره ضربه ژو و همکاران [9]

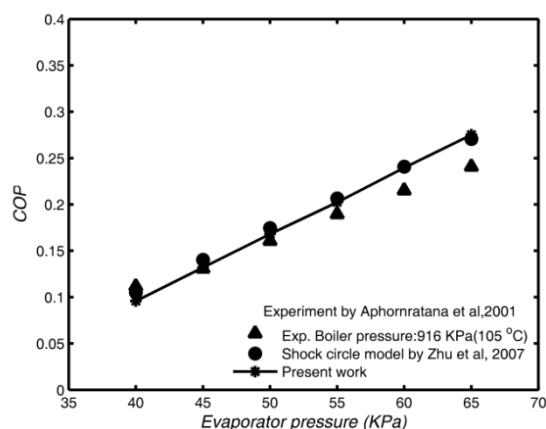


Fig. 11 Comparison between the present model, the experimental data of Aphornratana et al [9], and shock circle model [7] for coefficient of performance at condenser pressure of 150 kPa

شکل ۱۱ مقایسه ضریب عملکرد مدل حاضر با نتایج تجربی آفرن راتانا و همکاران [۹] و مدل دایره ضربه [۷] در فشار کندانسور ۱۵۰ کیلو پاسکال

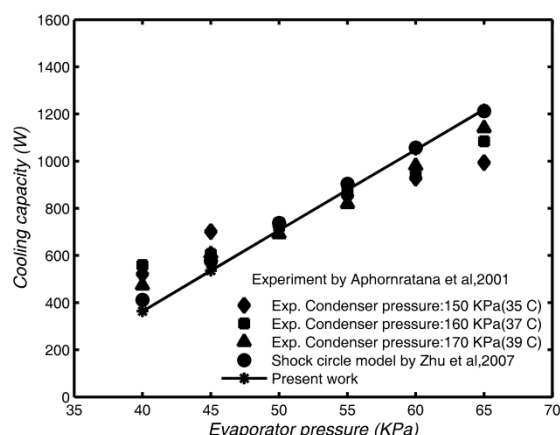


Fig. 9 Comparison between the present model, the experimental data of Aphornratana et al. [9], and shock circle model [7] for coefficient of performance at boiler temperature 110 °C

شکل ۹ مقایسه ضریب عملکرد مدل حاضر با نتایج تجربی آفرن راتانا و همکاران [۹] و مدل دایره ضربه [۷] در دمای بویلر ۱۱۰ درجه سانتی گراد

۴-۶ بار مقادیر نسبت سطوح A_3/A_1 و نسبت دبی های جرمی ω و خطا های آنها در جدول ۱ ارائه شده است. ضمناً به منظور مقایسه نتایج مدل چن و همکاران [۳] برای نسبت دبی های جرمی ω ارائه شده است. همانطور که در جدول ۱ دیده می شود خطای تخمین نسبت سطوح A_3/A_1 و خطای تخمین نسبت دبی های جرمی کمتر از ۱۰٪ است. همچنین نتایج مدل حاضر نسبت به مدل چن و همکاران به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر است.

۴-۳- مقایسه با داده های چن و همکاران [۳]

نتایج آزمایشگاهی چن و همکاران با اجکتور هوا مقیاس- بزرگ با مقطع مستطیلی که در حالت بحرانی کار می کند نیز برای بررسی صحت مدل حاضر به کار رفته است. فشار بحرانی با توجه به نتایج آزمایشگاهی تعیین شده است. برای فشار اولیه ۳-۵ بار مقادیر نسبت سطوح A_3/A_1 و نسبت دبی های جرمی ω و خطا های آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

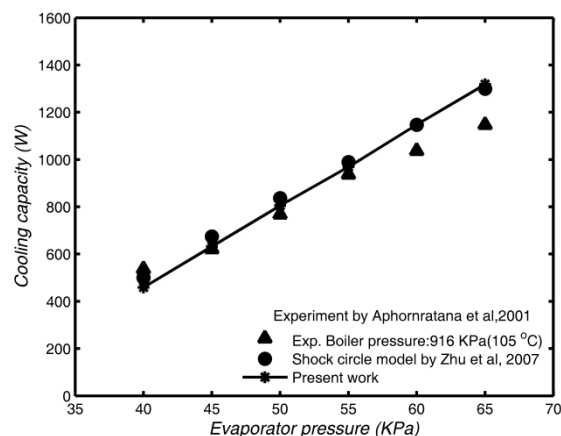


Fig. 10 Comparison between the present model, the experimental data of Aphornratana et al. [10], and shock circle model [7] for the cooling capacity at condenser pressure of 150 kPa

شکل ۱۰ مقایسه ظرفیت حرارتی مدل حاضر با نتایج تجربی آفرن راتانا و همکاران [۱۰] و مدل دایره ضربه [۷] در فشار کندانسور ۱۵۰ کیلو پاسکال

جدول ۱ مقایسه عملکرد مدل های تئوری و داده های تجربی همی دی و همکاران [۱۴]

تجربی/(تئوری - تجربی) = ER

Table 1 Comparison of performance between theoretical models and experimental data of Hemidi et al. [14]

ER = (theory-experiment)/experiment

کار	مدل چن و	کار	مدل چن و	مقدار	کار	کار	مقدار	P_c^*	P_g
حاضر	همکاران	حاضر	همکاران	تجربی	حاضر	حاضر	تجربی	(bar)	(bar)
(%)ER	(%)ER	ω	ω	ω	(%)ER	A_3/A_1	A_3/A_1		
2.36	-17.11	0.7779	0.89	0.76	6.79	4.75	5.30	1.28	4
-11.89	-9.68	0.5463	0.68	0.62	11.13	4.54	5.30	1.5	5
4.82	-8.0	0.5241	0.54	0.50	3.96	5.15	5.30	1.54	6



جدول ۲ مقایسه عملکرد مدل های تئوری و داده های تجربی چن و همکاران [3]

ER=(تئوری- تجربی)/تجربی

Table 2 Comparison of performance between theoretical models and experimental data of Chen et al. [3]

ER = (theory-experiment)/experiment

کار حاضر (%)ER	مدل چن و همکاران (%)ER	کار حاضر ω	مدل چن و همکاران ω	مقدار تجربی ω	کار حاضر (%)ER	کار حاضر A_3/A_t	مقدار تجربی A_3/A_t	P_c^* (bar)	P_g (bar)
3.01	12.5	0.9065	0.99	0.88	-7.40	4.13	4.46	1.2	3.0
-11.53	-9.33	0.6635	0.82	0.75	-4.35	3.82	4.46	1.35	3.5
-9.94	-11.11	0.5674	0.70	0.63	-13.45	3.86	4.46	1.45	4.0
-15.54	-11.11	0.4561	0.60	0.54	-16.59	3.72	4.46	1.60	4.5
-13.74	-10.64	0.4054	0.52	0.47	-15.02	3.79	4.46	1.70	5.0

critical operational regime, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 36, No.6, pp. 1750-1761, 2013.

- [4] D. W. Sun, I W Eames, Recent developments in the design theories and applications of ejectors-a review, *Journal of the Institute of Energy*, Vol. 66, No. 475, pp. 65-79, 1995.
- [5] J. H. Keenan, E. P. Neumann, F. Lustwerk, An investigation of ejector design by analysis and experiment, *Journal of Applied Mechanics, Trans ASME*, Vol. 17, No. 3, pp. 299-309, 1950.
- [6] J. T. Munday, D. F. Bagster, A new ejector theory applied to steam jet refrigeration, *Industrial and Engineering Chemistry Design and Development*, Vol. 16, No.4, pp. 442-449, 1977.
- [7] I. Eames, S. Aphornratana, H. Haider, A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator, *International Journal of Refrigeration*, Vol.18, No.6, pp. 378-386, 1995.
- [8] B. J. Huang, J. M. Chang, V. A. Petrenko, A 1-d analysis of ejector performance, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 22, No. 5, pp. 354-364, 1999.
- [9] Zhu Y., Cai W., Wen C., Li Y., "Shock Circle Model for Ejector Performance Evaluation", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No.9, pp. 2533-2541, 2007.
- [10] F. M. White, *Fluid Mechanics*, Fourth Edition, pp. 590-592, McGraw-Hill, 2003.
- [11] G. Besagni, R. Mereu, G. D. Leo, F. Inzoli, A study of working fluids for heat driven ejector Refrigeration using lumped parameter models, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 58, No. 1, pp. 154-171, 2015.
- [12] F. Liu, Review on ejector efficiencies in various ejector, *Proceedings of The 15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue, USA, 2014.
- [13] S. Aphornratana, S. Chungpaibulpatana, P. Sriksirin, Experimental investigation of an ejector refrigeration: effect of mixing chamber geometry on system performance, *International Journal of Energy Research*, Vol. 25, No. 5, pp. 397-411, 2001.
- [14] A. Hemidi, F. Henry, S. Leclaire, J. M. Seynhaeve, Y. Bartosiewicz, CFD analysis of a supersonic air ejector. part I: experimental validation of single-phase and two phase operation, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 8, pp. 1523-1531, 2009.

ضمنا نتایج مدل چن و همکاران برای نسبت دبی های جرمی ω به منظور مقایسه ارائه شده است. همانطور که در جدول دیده می شود خطای تخمین نسبت سطوح A_3/A_t کمتر از 16.6% و خطای تخمین نسبت دبی های جرمی کمتر از 15.5% می باشد. همچنین نتایج مدل حاضر قابل مقایسه با نتایج مدل چن و همکاران است. شایان ذکر است که در مدل حاضر دو کمیت سطح مقطع بخش سطح-ثابت و نسبت دبی های جرمی به طور همزمان تعیین می شوند در حالیکه در مدل چن و همکاران و در مدل دایره ضربه با معلوم بودن سطح مقطع بخش سطح- ثابت تنها نسبت دبی های جرمی تعیین می گردد.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه الگوریتم غیر تکراری برای تحلیل یک بعدی عملکرد اجکتور در حالت بحرانی ارائه شده است. همچنین برای تخمین ضریب افت در فرآیند اختلاط از پارامترهای جریان استفاده شده است، و با ایجاد هم خوانی بین داده های آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی رابطه ای برای آن به دست آمده است. عملکرد اجکتور هایی با هندسه های مختلف و مقیاس های گوناگون (کوچک و بزرگ) و سیال های متفاوت (*Air, R11, R141b*) در حالت بحرانی به کمک این مدل تخمین زده شده است و با نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل های تئوری دیگر مقایسه شده است. این مقایسه ها هم خوانی خوبی بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی نشان می دهند. دقت مدل حاضر در تعیین نسبت دبی های جرمی نزدیک به دقت مدل دو بعدی دایره ضربه است و در مقایسه با دیگر مدل های یک بعدی از دقت بالاتری برخوردار می- باشد.

۵- مراجع

- [1] S. He, Y. Li, R. Z. Wang, Progress of mathematical modeling on ejectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 8, pp. 1760-1780, 2009.
- [2] G. Besagni, R. Mereu, P. Chiesa, F. Inzoli, An integrated lumped parameter-cfd approach for off-design ejector performance evaluation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, No. 15, pp. 697-715, 2015.
- [3] W. Chen, M. Liu, D. Chong, J. Yan, A. B. Little, Y. Bartosiewicz, A 1d model to predict ejector performance at critical and sub-