



## Numerical Study of Effects of Simultaneous Changes of Geometric Parameters on the Performance of Touss Power Plant Ejector and Selecting Optimal Conditions Using Taguchi Method

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Moharreri M.R.<sup>1</sup> MSc,  
Ajam H.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Moharreri M.R, Ajam H. Numerical Study of Effects of Simultaneous Changes of Geometric Parameters on the Performance of Touss Power Plant Ejector and Selecting Optimal Conditions Using Taguchi Method. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(3):621-629.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

#### \*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Postal Code: 9177948974  
Phone: +98 (51) 38805147  
Fax: +98 (51) 38807185  
h.ajam@um.ac.ir

#### Article History

Received: June 05, 2018  
Accepted: November 10, 2018  
ePublished: March 01, 2019

### ABSTRACT

Ejectors are as widely used as in food industries to refrigeration cycles and power plants. Since condensers of steam power plants are operated in vacuum conditions, there is a continuous air leakage, which results in metal corrosion and reduction in efficiency. Therefore, ejectors are used in these systems to remove the air. Over time, leakage increases, which requires more efficiency of ejector. Entrainment ratio (ER) is defined as the main criterion for ejector efficiency and leads to better performance if increased and also depends considerably on geometry of ejector. The aim of this research is to increase efficiency of ejector of Touss Power Plant by simultaneously changing nozzle exit position (NXP) and converging angle of mixing chamber. The main geometry of ejector was simulated by FLUENT and primary results were validated with experimental and computational data. Then, different geometries with simultaneous change in NXP and converging angle of mixing chamber were selected in the first step of Taguchi method and simulated by FLUENT. Geometries of the second step of Taguchi method were selected and designed based on the results of signal-to-noise ratio for the above-mentioned parameters and the values of entrainment ratio in the first step. An identical approach was followed for the third step. Final results showed 34% increase in entrainment ratio and also revealed that there is an optimum value for NXP and converging angle of the mixing chamber around which the value of entrainment ratio is maximum.

**Keywords** Ejector; Entrainment Ratio; Compressible Flow; Taguchi

### CITATION LINKS

[1] An Integrated Lumped Parameter-CFD approach for off-design ejector performance evaluation [2] Recent developments in ejector refrigeration technologies [3] Numerical study for the influences of primary nozzle on steam ejector performance [4] Numerical and experimental evidence of the Fabri-choking in a supersonic ejector [5] Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1 [6] Optimization of geometric parameters for design a high-performance ejector in the proton exchange membrane fuel cell system using artificial neural network and genetic algorithm [7] Design and numerical investigation of an adaptive nozzle exit position ejector in multi-effect distillation desalination system [8] Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors [9] Numerical investigation of the influences of mixing chamber geometries on steam ejector performance [10] Mixing layer effects on the entrainment ratio in steam ejectors through ideal gas computational simulations [11] An experimental analysis of the impact of primary nozzle geometries on the ejector performance used in R141b ejector refrigerator [12] CFD analysis of a supersonic air ejector. Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation [13] Turbulence modeling of a single-phase R134a supersonic ejector [14] More efficiency in fuel consumption using gearbox optimization based on Taguchi method [15] Reducing ice accretion using design of experiments based on Taguchi method

## مطالعه عددی اثر تغییر همزمان پارامترهای هندسی بر عملکرد اجکتور نیروگاه طوس و انتخاب شرایط بهینه با کمک روش تاگوچی

محمدرضا محرری MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

حسین عجم\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

اجکتورها کاربرد وسیعی در صنعت دارند، از صنایع غذایی گرفته تا سیکل‌های تبرید و صنایع نیروگاهی. از آنجا که کندانسور نیروگاه بخار در شرایط خلا کار می‌کند، همواره مقداری هوا به داخل آن نشت می‌کند که باعث ایجاد خوردگی فلزی و کاهش بازده کندانسور می‌شود. بنابراین از اجکتور برای تخلیه هوای درون کندانسور استفاده می‌شود. به مرور زمان، نشت هوا در کندانسور بیشتر شده که بهبود بازده اجکتور را می‌طلبد. نسبت مکش یکی از تعاریف اصلی برای بازدهی اجکتور است و افزایش آن موجب افزایش بازده اجکتور می‌شود و همچنین به‌طور چشمگیری به هندسه آن وابسته است. هدف این پژوهش بهبود بازده اجکتور نیروگاه طوس با تغییر همزمان دو پارامتر تاثیرگذار موقعیت خروجی نازل و زاویه همگرایی محفظه اختلاط است. هندسه اولیه اجکتور توسط نرم‌افزار فلوینت مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و اعتبار نتایج با مطالعات آزمایشگاهی و عددی پیشین سنجیده شد. سپس با استفاده از روش تاگوچی و در گام اول، هندسه‌های مختلفی با تغییر همزمان در موقعیت خروجی نازل و زاویه همگرایی محفظه اختلاط انتخاب و در نرم‌افزار فلوینت طراحی و شبیه‌سازی شد. انتخاب هندسه‌های گام دوم با تحلیل نمودار سیگنال به نویز برای پارامترهای مذکور و نتایج نسبت مکش در گام اول صورت گرفت و این رویکرد به‌طور مشابه در گام سوم نیز دنبال شد. نتایج نهایی علاوه بر بهبود ۳۴ درصدی در نسبت مکش نشان داد که میزان بهینه‌ای برای موقعیت خروجی نازل و زاویه همگرایی محفظه اختلاط وجود دارد که پیرامون آن، نسبت مکش بیشینه حاصل می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** اجکتور، نسبت مکش، جریان تراکم‌پذیر، تاگوچی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹

\* نویسنده مسئول: h.ajam@um.ac.ir

### ۱- مقدمه

اجکتورها کاربرد وسیعی در صنعت از سیکل‌های تبرید گرفته تا سامانه‌های بازچرخش پیل سوختی، صنایع غذایی و نیروگاه‌ها دارند [1]. وظیفه اجکتور انتقال مواد یا دهش سیال از ناحیه کم‌فشار به ناحیه پرفشار است. شکل ساختمان اجکتور از چهار بخش نازل، محفظه اختلاط، گلوگاه و دیفیوزر تشکیل شده است. نحوه کار اجکتور به این شکل است که ابتدا سیال اولیه پرفشار وارد نازل می‌شود. با رسیدن سرعت سیال به ماخ ۱ در گلوگاه و افزایش سرعت در بخش واگرایی نازل، در خروجی آن ناحیه کم‌فشاری به وجود می‌آید که موجب مکیده شدن سیال ثانویه می‌شود. سپس، دو سیال در محفظه اختلاط با هم مخلوط می‌شوند و تشکیل یک سیال فراصوت می‌دهند. در گلوگاه اجکتور، یک شوک عمودی موجب کاهش سرعت و افزایش فشار سیال می‌شود تا آنجایی که رژیم جریان به زیر صوت تغییر می‌یابد. در نهایت، فشار جریان درون دیفیوزر افزایش می‌یابد و سیال از اجکتور خارج می‌شود [2]. کندانسور نیروگاه بخار در شرایط خلأ کار می‌کند. به همین دلیل، همواره مقداری هوا به‌صورت نشتی وارد آن می‌شود. وجود هوا در سیکل نیروگاه بخار موجب خوردگی فلزات می‌شود. همچنین به‌علت پخش بخار داخل کندانسور در هوای نشت‌شده به آن، انتقال حرارت بین سیال خنک‌کننده و بخار کاهش می‌یابد که این پدیده

باعث افزایش فشار کندانسور می‌شود و عملکرد کلی چرخه را تحت تاثیر منفی قرار می‌دهد. در فصول سرد، بخار به‌دام‌افتاده در هوای نشت‌شده به کندانسور به‌طور غیرقابل کنترل سرد می‌شود تا به مرز یخ‌زدگی می‌رسد و خطر ترکیدگی لوله‌ها را به وجود می‌آورد.

در کندانسور نیروگاه طوس، هوای نشت‌شده به سیستم در فن‌های دفلگماتور از بخار جدا و توسط یک خط لوله به اجکتور متصل می‌شود و یک بخار با انرژی زیاد به‌عنوان سیال اولیه (محرک) باعث مکش و دفع آن به جو می‌شود. با گذشت زمان و فرسودگی تجهیزات، نشت هوا به کندانسور افزایش می‌یابد و در فصول سرد، خطر یخ‌زدگی بیشتر شده است. در این مواقع، از اجکتور آماده‌باش یا اجکتور راه‌انداز استفاده می‌شود که مستلزم مصرف بخار اضافی و صرف هزینه است. از این رو، لزوم بهبود عملکرد اجکتور نیروگاه مطرح می‌شود.

مهم‌ترین پارامتر توصیف‌کننده عملکرد اجکتور، نسبت مکش (ER) بوده که برابر با نسبت دبی جرمی سیال ثانویه به دبی جرمی سیال اولیه طبق رابطه ۱ است.

$$ER = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (1)$$

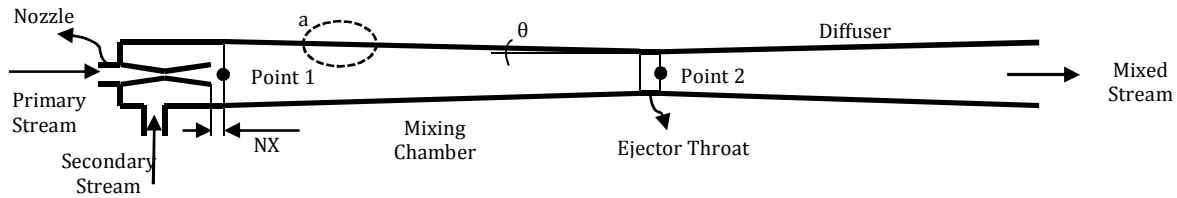
که در آن، ER نسبت مکش و  $\dot{m}_s$  و  $\dot{m}_p$  به‌ترتیب نمایانگر دبی جرمی جریان‌های ثانویه و اولیه هستند. افزایش نسبت مکش نشان‌دهنده بهبود عملکرد اجکتور است [3].

اگر چه ساختمان هندسی اجکتور نسبتاً ساده بوده، اما به‌علت وجود جریان تراکم‌پذیر و اختلاط اغتشاشی، الگوی جریان داخلی بسیار پیچیده است و به همین دلیل به‌طور قابل ملاحظه‌ای به هندسه اجکتور بستگی دارد [4]. از این رو محققان، مطالعات آزمایشگاهی و عددی بسیاری را با تغییر هندسه اجکتور برای افزایش بازده آن و پیش‌بینی رفتار جریان درون آن انجام دادند. در این میان، بعضی از محققان تمرکز مطالعات خود را روی تاثیر موقعیت خروجی نازل (NXP)؛ فاصله بین دهانه خروجی نازل تا دهانه ورودی محفظه اختلاط) قرار دادند. با انجام این مطالعات مشخص شد که موقعیت خروجی نازل تاثیر بسیار زیادی روی عملکرد اجکتور می‌گذارد و همچنین می‌توان با تغییر این فاصله به‌صورت بهینه، گستره عملکردی اجکتور را افزایش داد [5-8]. از طرفی، با تمرکز بر اختلاط دو سیال، مطالعات دیگری روی زاویه همگرایی محفظه اختلاط انجام گرفت که در نتیجه آن بهبود عملکرد اجکتور حاصل شد [6, 9]. این مطالعات عمدتاً به این گونه بوده است که همه پارامترها به‌جز یکی ثابت در نظر گرفته می‌شوند (معمولاً مناسب‌ترین مقادیر آنها طی شبیه‌سازی یا آزمایش انتخاب می‌شوند) و سپس در آن مقادیر ثابت، تغییرات پارامتری دیگر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اما رفتار اجکتور با تغییر هر پارامتر هندسی به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند و تغییر هر پارامتر هندسی ممکن است در نتیجه حاصل از تغییر پارامتری دیگر تاثیر بگذارد. بنابراین از رویکرد تغییر همزمان پارامترهای موقعیت خروجی نازل و زاویه همگرایی محفظه اختلاط در این پژوهش استفاده شده است.

نتایج مطالعات عددی انجام‌شده روی هندسه اجکتور تطبیق خوبی با مشاهدات آزمایشگاهی دارند، بنابراین می‌توان با توجه به این که تغییر ساختمان هندسی اجکتور مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است، از دینامیک سیالات محاسباتی برای بهبود عملکرد آن استفاده کرد [5, 8, 10]. با این وجود، به‌علت پیچیدگی الگوی جریان داخل اجکتور و متفاوت بودن شرایط عملکردی و سیال عامل نمی‌توان برای بهبود ساختمان هندسی اجکتور به توافق واحدی

همگرایی محفظه اختلاط به عنوان عوامل تاثیرگذار بر نسبت مکش محقق می شود. سطوح تغییر پارامترهای فوق توسط روش تاگوچی انتخاب می شود و هندسه های انتخاب شده توسط نرم افزار تجاری FLUENT مورد مطالعه عددی قرار می گیرد. شکل ۱ نمای دو بُعدی اجکتور مورد مطالعه را نشان می دهد.

رسید و بایستی هر اجکتور با توجه به شرایط کارکردی و ساختمان هندسی خود مورد مطالعه قرار گیرد [2, 4, 8, 11]. هدف این پژوهش، افزایش بازده اجکتور نیروگاه طوس به شکل افزایش دبی ثانویه و ثابت نگه داشتن دبی اولیه است. این امر با تغییر همزمان دو پارامتر هندسی موقعیت خروجی نازل و زاویه



شکل ۱ شمای دو بُعدی از اجکتور مورد مطالعه

## ۲- مدل سازی

### ۲-۱- معادلات حاکم

مدل ریاضی جریان درون اجکتور شامل معادلات پیوستگی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

مومنتموم:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

و انرژی است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \nabla \cdot \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \nabla \cdot [u_j (\tau_{ij})] \quad (4)$$

که در این معادلات:

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (5)$$

$t$  زمان،  $\rho$  چگالی،  $u$  سرعت،  $E$  انرژی کل،  $T$  دما،  $p$  فشار،  $\tau$  تنش برشی،  $\mu$  لزجت دینامیک،  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی و  $i$  و  $j$  بردارهای جهت در فضا هستند.

همچنین مدل ریاضی جریان درون اجکتور شامل مدل اغتشاشی است. مدل اغتشاشی  $k-\epsilon$  استاندارد به طور عمده در رینولدزهای بالا برای جریان های مغشوش کاملاً توسعه یافته و تراکم پذیر مورد استفاده قرار می گیرد. توانایی این مدل در پیش بینی الگوی اغتشاشی جریان در داخل اجکتور اثبات شده و خصوصاً در شرایط طراحی، بهترین نتایج را انحراف موجود در نسبت مکش پیش بینی شده توسط مدل  $k-\epsilon$  استاندارد فراهم کرده است [12]. همچنین در یک پژوهش آزمایشگاهی، میزان با نسبت مکش به دست آمده از نتیجه آزمایش کمتر از ۱٪ محاسبه شد [13]. مدل اغتشاشی  $k-\epsilon$  استاندارد متشکل از فرمول های ۶ و ۷ است که به ترتیب معادلات مربوط به انرژی جنبشی اغتشاشی ( $k$ ) و نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی ( $\epsilon$ ) هستند.

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b \quad (7)$$

در این روابط،  $C_{3\epsilon}=1$ ،  $C_{2\epsilon}=1/92$ ،  $C_{1\epsilon}=1/44$ ،  $\sigma_\epsilon=1/3$ ،  $\sigma_k=1/0$ ،

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = \frac{Sk}{\epsilon} \quad (8)$$

بوده است که  $\sigma_k$  و  $\sigma_\epsilon$  اعداد پرناتل برای  $k$  و  $\epsilon$  هستند. همچنین  $S_k$  و  $S_\epsilon$  جملات چشمه و  $G_b$ ،  $G_k$  و  $G_m$  نماینده تولید انرژی جنبشی اغتشاشی هستند.  $\mu_t$  لزجت اغتشاشی است که به شکل زیر تعریف می شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, C_\mu = 0.09 \quad (9)$$

و  $C_\mu$  ثابت مربوط به لزجت است.

### ۲-۲- شبکه بندی و مدل سازی عددی

به دلیل ساختار هندسی ساده و مقطع دایروی اجکتور، یک مدل دو بُعدی تقارن محوری با توجه به ابعاد اندازه گیری شده که در جدول ۱ آمده است، توسط نرم افزار GAMBIT طراحی شد [9]. به منظور حل معادلات درون اجکتور، مقاطع عبور جریان توسط سلول های چهاروجهی شبکه بندی شد. زیرا سلول های چهاروجهی به کمینه کردن احتمال واگرایی حل عددی کمک می کنند [1].

به منظور مدل سازی عددی، هندسه اجکتور وارد نرم افزار FLUENT شد. جریان یکنواخت و نوع هندسه دو بُعدی تقارن محوری برای شبیه سازی جریان داخل اجکتور انتخاب شد. چون بخار ورودی به نازل در حالت فوق گرم قرار دارد و جریان درون اجکتور زیر-انبساطی است، بنابراین از حالت گاز کامل با فرض ثابت بودن سایر پارامترهای بخار آب استفاده شد [9]. با توجه به سرعت بالای بخار در اجکتور، مدل جریان تراکم پذیر انتخاب شد و چون رژیم جریان درون اجکتور فوق صوت است، برای بررسی رفتار جریان در کنار دیواره ها از مدل تابع استاندارد دیواره در مدل اغتشاشی استفاده شد. زیرا اثبات شده که این تابع برای رژیم جریان فوق صوت مناسب است [11]. همان گونه که در بخش ۲-۱ ذکر شد، مدل  $k-\epsilon$  استاندارد برای حل معادلات اغتشاشی مورد انتخاب قرار گرفت.

طرحواره مرتبه دوم بالادست برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی و اغتشاشی انتخاب شد، در حالی که شرط مرزی ورودی نازل و جریان ثانویه، شرط فشار ورودی و شرط فشار خروجی برای دهانه خروجی اجکتور تعیین شد. شرایط مرزی و کارکردی اجکتور مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۱) ابعاد هندسی اجکتور مورد مطالعه

پارامتر هندسی اجکتور	اندازه (mm)
قطر دهانه ورودی نازل	۱۹/۴
طول بخش همگرای نازل	۴۵/۲
قطر نازل	۴/۵
طول بخش واگرایی نازل	۴۵/۲
قطر دهانه خروجی نازل	۱۹/۴
موقعیت خروجی نازل	۱۱/۷
قطر دهانه ورودی محفظه اختلاط	۶۱/۷
طول محفظه اختلاط	۴۲۲/۵
تائزانت زاویه همگرایی محفظه اختلاط	۰/۱۲۵۷
قطر گلوگاه اجکتور	۴۰
طول گلوگاه اجکتور	۲۰
طول دیفیوزر	۳۸۵
قطر دهانه خروجی اجکتور	۶۱

جدول (۲) شرایط مرزی و کارکردی اجکتور مورد مطالعه

جریان	نوع شرط مرزی	فشار (kPa)	دما (°C)
جریان اولیه (ورودی به نازل)	Pressure inlet	۲۰۲۶/۵	۴۰۰
جریان ثانویه (مکش)	Pressure inlet	۲۷/۶۶۱	۶۷
جریان خروجی	Pressure outlet	۳۵/۴۶۳	-

معیار همگرایی معادلات مورد حل به این صورت انتخاب شد که اختلاف دبی‌های ورودی با دبی خروجی کمتر از  $10^{-7}$  کیلوگرم بر ثانیه شود. بدین شکل که حل با رسیدن به معیار مذکور، متوقف و نتایج و نحوه تغییر پارامترهای اصلی جریان استخراج می‌شود.

### ۳-۲- استقلال از شبکه

از آنجایی که نتایج حل عددی به‌طور قابل ملاحظه‌ای به شبکه حل وابسته است، بایستی در هر حل عددی، استقلال نتایج از شبکه، مطالعه و بهترین آن انتخاب شود. یکی از روش‌های بررسی استقلال نتایج از شبکه، تعیین یک یا چند نقطه در مسیر جریان و رهگیری میزان تغییر پارامترهای اصلی آن مانند فشار و سرعت در این نقاط برای شبکه‌های متفاوت است [3]. به همین منظور، مقادیر فشار، سرعت و عدد ماخ در نقاط ۱ و ۲ (به ترتیب در ورودی محفظه اختلاط و روی محور و در خروجی گلوگاه اجکتور و روی محور) که در شکل ۱ نشان داده شده است و همچنین نسبت مکش برای سه شبکه مختلف، اندازه‌گیری و میزان تغییر این مقادیر به‌صورت درصد خطا محاسبه شد. مقادیر مربوط به نقاط ۱ و ۲ به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده‌اند و نسبت مکش محاسبه‌شده به‌همراه درصد خطای آن برای هر شبکه در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به اعداد جدول‌های ۳ و ۴، برای اطمینان از استقلال نتایج از شبکه و به‌منظور کاهش زمان محاسبات عددی، با توجه به درصد خطای ناچیز بین شبکه شماره ۲ و ۳ از شبکه شماره ۲ با تعداد ۹۴۲۶۰ سلول برای محاسبات بعدی استفاده شد.

جدول (۳) نتایج حاصل از بررسی استقلال از شبکه برای نقطه ۱

شماره شبکه	تعداد سلول	فشار (Pa)	خطا (%)	سرعت (m/s)	خطا (%)	عدد ماخ	خطا (%)
۱	۶۴۱۹۴	۷۲۴۴/۷۴	-	۱۳۵۳/۲۹	-	۴/۰۳۵	-
۲	۹۴۲۶۰	۷۲۴۴/۷۴	۰	۱۳۵۴/۴۴	۰	۴/۰۵۱	۰/۰۸۵
۳	۱۵۹۲۷۰	۷۲۴۴/۷۴	۰	۱۳۵۵/۱۶	۰	۴/۰۶۲	۰/۰۵۳

جدول (۴) نتایج حاصل از بررسی استقلال از شبکه برای نقطه ۲

شماره شبکه	تعداد سلول	فشار (Pa)	خطا (%)	سرعت (m/s)	خطا (%)	عدد ماخ	خطا (%)
۱	۶۴۱۹۴	۲۱۷۲۴/۰۸	-	۴۹۸/۵۸	-	۰/۹۵۰۴	-
۲	۹۴۲۶۰	۲۱۷۲۴/۰۸	۰	۴۹۹	۰	۰/۹۵۴۲	۰/۰۸۴
۳	۱۵۹۲۷۰	۲۱۷۲۴/۰۸	۰	۴۹۹/۲۷	۰	۰/۹۵۶۳	۰/۰۵۴

جدول (۵) نتایج حاصل از بررسی استقلال از شبکه برای نسبت مکش

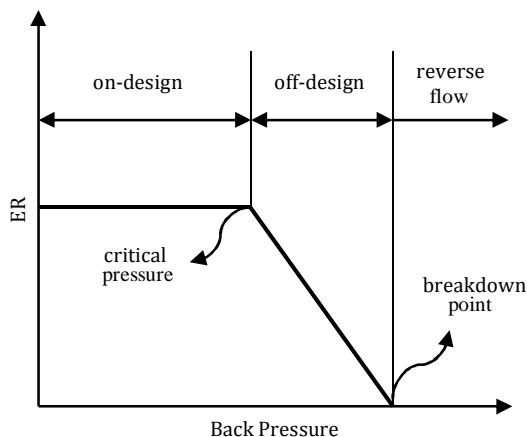
شماره شبکه	تعداد سلول	نسبت مکش محاسبه‌شده	خطا (%)
۱	۶۴۱۹۴	۱/۰۰۵	-
۲	۹۴۲۶۰	۱/۰۰۵	۰
۳	۱۵۹۲۷۰	۱/۰۰۶	۰/۰۱

### ۲-۴- اعتبارسنجی نتایج اولیه

جریان بخار اولیه با عبور از نازل به سرعت‌های فوق صوت می‌رسد و یک ناحیه کم‌فشار را در خروجی نازل پدید می‌آورد. در این حالت، با توجه به هندسه و پس‌فشار اجکتور، جریان ثانویه تحت تاثیر جریان اولیه، شتاب می‌گیرد تا به سرعت صوت برسد. در این شرایط، اصطلاحاً اجکتور در شرایط طراحی یا بحرانی کار می‌کند و این نوع بهره‌برداری از اجکتور را بهره‌برداری خفگی دوگانه می‌نامند. در صورت افزایش پس‌فشار اجکتور، سیال ثانویه در حالت خفگی باقی می‌ماند تا در نقطه‌ای که به آن فشار بحرانی می‌گویند، دبی جرمی آن شروع به افت شدید می‌کند. با افزایش بیشتر پس‌فشار اجکتور در نقطه‌ای که آن را نقطه شکست می‌نامند، جریان ثانویه به‌طور کامل قطع می‌شود.

به فاصله بین نقطه بحرانی تا نقطه شکست، شرایط خارج از طراحی یا بهره‌برداری زیر بحرانی می‌گویند [4]. شکل ۲ به‌صورت شماتیک نحوه رفتار نسبت مکش اجکتور را در پس‌فشارهای مختلف نشان می‌دهد که مبین رفتار سیال ثانویه است.

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج اولیه، ابتدا هندسه اجکتور مورد مطالعه در پژوهش وو و همکاران [9] بازتولید و مطابق با شرایط ذکرشده در آن پژوهش شبیه‌سازی شد. مقایسه نحوه رفتار نسبت مکش بین مطالعه وو و همکاران [9] و شبیه‌سازی مجدد بر حسب پس‌فشار در نمودار ۱ آورده شده است. می‌توان مشاهده کرد که تطابق قابل قبولی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی مجدد و نتایج ارائه‌شده توسط وو و همکاران [9] وجود دارد. بنابراین فرآیند شبیه‌سازی و انتخاب پارامترهای مورد مطالعه قابل اعتماد است.



شکل (۲) نحوه تغییرات نسبت مکش بر حسب پس‌فشار اجکتور

تعداد آزمایش‌ها و پیش‌بینی آزمایش‌های ضروری است. فرآیند تاگوچی شامل ترکیب تکنیک‌های ریاضی و آماری به شکل تعریف یک تابع زیان و نسبت سیگنال به نویز (SNR) است. روش تاگوچی داده‌های ورودی را به دو دسته عوامل کنترل و عوامل اغتشاش تقسیم می‌کند. عوامل کنترل به منظور پیدا کردن حساسیت بهینه در فرآیند طراحی شناسایی می‌شوند. عوامل اغتشاش آنهایی هستند که بر خروجی فرآیند تأثیر می‌گذارند، ولی نمی‌توانند از لحاظ اقتصادی کنترل شوند. در استفاده از روش تاگوچی بایستی هفت مرحله تعیین متغیری (هایی) که باید بهینه شود، تعیین عوامل کنترل و اغتشاش و سطوح تغییر آنها، انتخاب جدول متعامد مناسب، انجام آزمایش‌ها یا اجراها، اندازه‌گیری مقادیر خروجی، محاسبه نسبت سیگنال به نویز و انتخاب شرایط بهینه، تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی تأثیر ورودی (ها) بر خروجی (ها) طی شوند [14].

روش تاگوچی تابع زیان را بر حسب انتخاب نحوه تأثیر عوامل کنترل و اغتشاش بر خروجی آزمایش تعیین می‌کند. ممکن است هدف از انجام آزمایش، بیشتر یا کمتر شدن پارامتر خروجی یا نزدیک شدن مقدار آن به یک مقدار بهینه باشد. بر همین اساس، ابتدا تابع زیان را از طریق رابطه ۱۰ به دست می‌آورد و با استفاده از رابطه ۱۱ نسبت سیگنال به نویز را محاسبه می‌کند. برای مثال، تابع زیان در شرایطی که مقدار خروجی به شکل بیشتر- بهتر (HB) انتخاب می‌شود، به صورت زیر است:

$$L_{HB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (10)$$

که در آن  $L_{HB}$ ،  $n$  و  $y_i$  به ترتیب تابع زیان در حالت بیشتر- بهتر، تعداد آزمایش‌های انجام شده و اختلاف مقادیر خروجی‌های هر آزمایش است. بنابراین تابع سیگنال به نویز  $\eta$  به شکل زیر تعریف می‌شود:

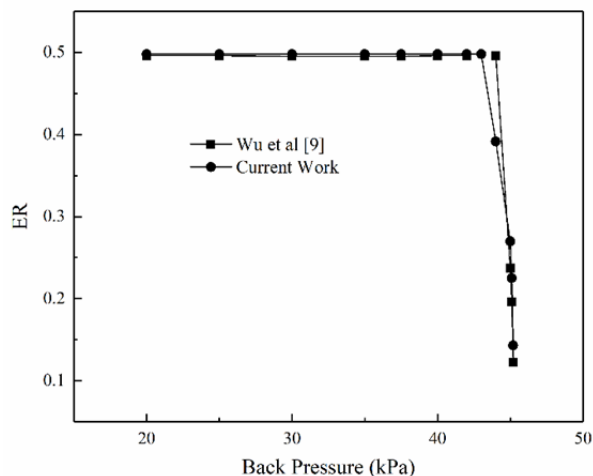
$$\eta = -10 \log L_{HB} \quad (11)$$

در تحلیل نمودار حاصل از محاسبه نسبت سیگنال به نویز برای ورودی‌ها بر خروجی‌ها، نمودار متغیری که برد بیشتری دارد نسبت به سایر متغیرها تأثیر بیشتری بر خروجی دارد [15]. از آنجایی که هدف این پژوهش افزایش نسبت مکش است، از معیار بیشتر- بهتر در تحلیل تاگوچی استفاده می‌شود.

### ۳-۲- طراحی اجراها و نتایج نهایی

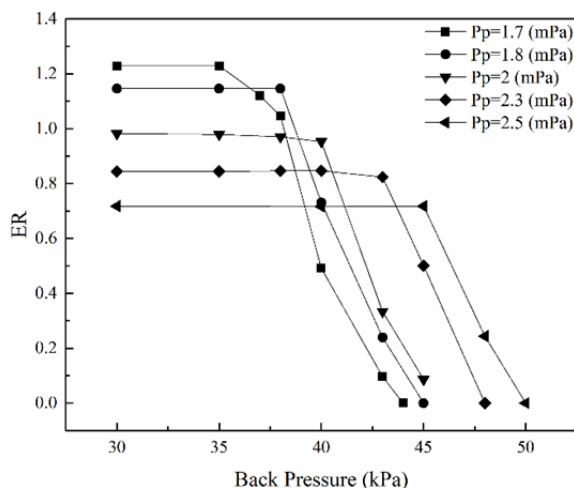
در این پژوهش، دو عامل هندسی موقعیت خروجی نازل و زاویه همگرایی محفظه اختلاط به عنوان عوامل مورد مطالعه بر نسبت مکش (عملکرد) اجکتور انتخاب شدند. برای تغییر موقعیت خروجی نازل، مجموعه نازل در امتداد محور اجکتور به دهانه ورودی محفظه اختلاط نزدیک یا از آن دور می‌شود. در این حالت، با نزدیک شدن نازل به محفظه اختلاط، مقدار موقعیت خروجی کمتر و با دور شدن از آن مقدار موقعیت خروجی بیشتر می‌شود. روش تغییر زاویه همگرایی محفظه اختلاط نیز به گونه‌ای انتخاب شد که طول و قطر دهانه خروجی آن ثابت بماند و فقط قطر ورودی آن تغییر کند، به شکلی که با افزایش زاویه همگرایی محفظه اختلاط، قطر ورودی آن نیز افزایش می‌یابد و برعکس.

در گام اول و برای پیش‌بینی نحوه اثر تغییر پارامترهای هندسی فوق بر عملکرد اجکتور، مقادیر موقعیت خروجی نازل و تانژانت زاویه همگرایی محفظه اختلاط در ۵ سطح به گونه‌ای انتخاب شدند که اختلاف بین سطوح، منظم و منطقی باشد. عوامل مورد مطالعه در گام اول و سطوح تغییر آنها در جدول ۶ آورده شده است. از



نمودار (۱) مقایسه نحوه تغییرات نسبت مکش بر حسب پس‌فشار بین نتایج کار وو و همکاران [9] و شبیه‌سازی مجدد

از طرفی، پژوهش‌های پیشین نشان داده است که افزایش فشار بخار اولیه، با وجود این که دبی جرمی جریان اولیه را افزایش و نسبت مکش را کاهش می‌دهد، نقطه بحرانی را عقب می‌اندازد و به اجکتور اجازه می‌دهد تا در گستره بیشتری از شرایط طراحی کار کند [7, 11]. بنابراین به منظور تأیید کامل‌تر و کسب اطمینان بیشتر از شبیه‌سازی انجام شده روی اجکتور نیروگاه طوس، نحوه تغییر نسبت مکش بر حسب پس‌فشار برای فشارهای اولیه از ۱/۷ تا ۲/۵ mPa با انجام چند شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. نمودار ۲ نشان می‌دهد که برای هر فشار اولیه، نسبت مکش در نقطه شکست شروع به افت شدید می‌کند، اما نقطه شکست با افزایش فشار بخار اولیه عقب می‌افتد و گستره کاری اجکتور افزایش می‌یابد. بنابراین شبیه‌سازی انجام شده، رفتار مورد انتظار از اجکتور را به خوبی پیش‌بینی می‌کند.



نمودار (۲) نحوه تغییرات نسبت مکش بر حسب پس‌فشار در فشارهای اولیه مختلف

### ۳- روش تاگوچی

#### ۳-۱- رویکرد تاگوچی

روش تاگوچی یک ابزار قدرتمند برای طراحی آزمایش (DOE) و بهینه‌سازی عملکرد است. روش طراحی آزمایش تاگوچی کاربردهای وسیعی دارد و هدف آن کاهش هزینه آزمایش از طریق کاهش

جدول ۷) مقادیر نسبت مکش از اجراهای گام اول

شماره	موقعیت خروجی نازل (mm)	$\tan(\theta)$	نسبت مکش
۱	۹/۲	۰/۰۰	۱/۰۳۷۴
۲	۹/۲	۰/۰۱	۱/۳۲۵۸°
۳	۹/۲	۰/۰۲۵۷	۱/۰۱۰۶
۴	۹/۲	۰/۰۴	۰/۸۳۶۸
۵	۹/۲	۰/۰۶	۰/۵۷۱۳
۶	۱۰/۷	۰/۰۰	۱/۱۲۲۴
۷	۱۰/۷	۰/۰۱	۱/۳۲۵۰
۸	۱۰/۷	۰/۰۲۵۷	۱/۰۰۷۸
۹	۱۰/۷	۰/۰۴	۰/۸۳۴۲
۱۰	۱۰/۷	۰/۰۶	۰/۵۶۱۱
۱۱	۱۱/۷	۰/۰۰	۱/۱۲۴۷۴
۱۲	۱۱/۷	۰/۰۱	۱/۳۲۳۷
۱۳	۱۱/۷	۰/۰۲۵۷	۱/۰۰۵۰
۱۴	۱۱/۷	۰/۰۴	۰/۸۳۱۶
۱۵	۱۱/۷	۰/۰۶	۰/۵۵۵۳
۱۶	۱۲/۷	۰/۰۰	۱/۱۲۲۸
۱۷	۱۲/۷	۰/۰۱	۱/۳۲۲۲
۱۸	۱۲/۷	۰/۰۲۵۷	۱/۰۰۴۷
۱۹	۱۲/۷	۰/۰۴	۰/۸۳۱۵۶
۲۰	۱۲/۷	۰/۰۶	۰/۵۴۶۶
۲۱	۱۴/۲	۰/۰۰	۱/۱۰۸۲
۲۲	۱۴/۲	۰/۰۱	۱/۳۱۸۹
۲۳	۱۴/۲	۰/۰۲۵۷	۱/۰۰۲۲
۲۴	۱۴/۲	۰/۰۴	۰/۸۲۸۷
۲۵	۱۴/۲	۰/۰۶	۰/۵۳۸۴

\* مقدار بیشینه نسبت مکش در گام اول؛ + مقدار اولیه نسبت مکش (پیش از اعمال تغییرات هندسی)

جدول ۸) عوامل کنترل مورد مطالعه در گام دوم و سطوح تغییر آنها

سطح	موقعیت خروجی نازل (mm)	$\tan(\theta)$
۱	۰/۵	۰/۰۰
۲	۳/۵	۰/۰۱
۳	۷/۲	۰/۰۲۵۷
۴	۹/۲	-
۵	۱۰/۷	-
۶	۱۱/۷	-

جدول ۹) مقادیر نسبت مکش از اجراهای گام دوم

شماره	موقعیت خروجی نازل (mm)	$\tan(\theta)$	نسبت مکش
۱	۰/۵	۰/۰۰	۰/۸۹۶۸
۲	۰/۵	۰/۰۱	۱/۳۴۸۷°
۳	۰/۵	۰/۰۲۵۷	۱/۰۲۱۲
۴	۳/۵	۰/۰۰	۰/۹۰۰۴
۵	۳/۵	۰/۰۱	۱/۳۲۶۷
۶	۳/۵	۰/۰۲۵۷	۱/۰۱۸۳
۷	۷/۲	۰/۰۰	۰/۹۶۰۳
۸	۷/۲	۰/۰۱	۱/۳۲۵۰
۹	۷/۲	۰/۰۲۵۷	۱/۰۱۳۲
۱۰	۹/۲	۰/۰۰	۱/۰۳۷۴
۱۱	۹/۲	۰/۰۱	۱/۳۲۵۸
۱۲	۹/۲	۰/۰۲۵۷	۱/۰۱۰۲
۱۳	۱۰/۷	۰/۰۰	۱/۱۲۲۴
۱۴	۱۰/۷	۰/۰۱	۱/۳۲۵۰
۱۵	۱۰/۷	۰/۰۲۵۷	۱/۰۰۷۸
۱۶	۱۱/۷	۰/۰۰	۱/۱۲۴۷
۱۷	۱۱/۷	۰/۰۱	۱/۳۲۳۷
۱۸	۱۱/۷	۰/۰۲۵۷	۱/۰۰۵۰

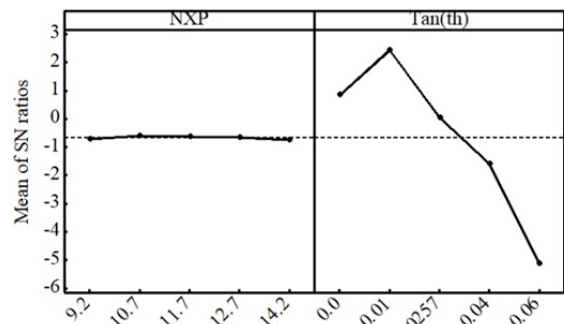
\* مقدار بیشینه نسبت مکش در گام دوم

آنچایی که تنها دو عامل مورد مطالعه هستند و هر کدام در ۵ سطح تغییر می‌کنند، یک جدول متعامد L25 با ۲۵ آزمایش (پارامترها همزمان دوبه‌دو مورد آزمایش قرار می‌گیرند) توسط نرم‌افزار تجاری MINITAB طراحی شد که یکی از ویژگی‌های آن تحلیل تاگوچی است. پس از انجام اجراها، مقادیر نسبت مکش برای هر کدام به دست آمد. سپس از تحلیل تاگوچی و رسم نمودار نسبت سیگنال به نویز در نمودار ۳ که در آن مقدار موقعیت خروجی نازل بر حسب میلی‌متر است، مشخص شد که تأثیر زاویه همگرایی بر نسبت مکش به مراتب بیشتر از تغییر موقعیت خروجی نازل است. زیرا برد نمودار مربوط به زاویه همگرایی بیشتر از برد نمودار مربوط به موقعیت خروجی نازل است. با توجه به نمودار ۳ و مقادیر نسبت مکش برای ۲۵ اجرا که در جدول ۷ آمده است، پیش‌بینی می‌شود که با نزدیک‌تر شدن نازل به محفظه اختلاط حول زاویه همگرایی  $\tan(\theta)=0/1$ ، نسبت مکش اجکتور افزایش پیدا کند. بنابراین در گام دوم یک جدول متعامد ۱۸ تایی به شکلی انتخاب شد که عامل زاویه همگرایی محفظه اختلاط در ۳ سطح و در محدوده  $\tan(\theta)=0/1$  تغییر کند.

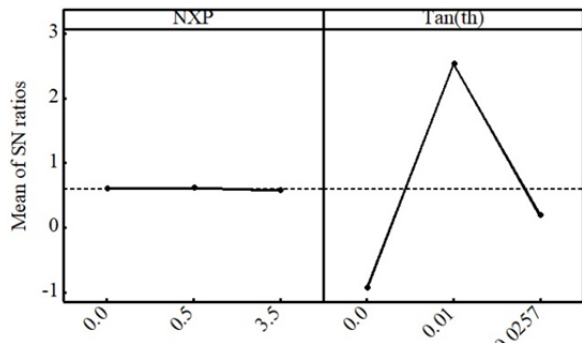
همچنین موقعیت خروجی نازل در ۶ سطح انتخاب شد، به گونه‌ای که بتوان تأثیر احتمالی نزدیک شدن نازل به دهانه ورودی محفظه اختلاط را پیش‌بینی کرد. سطوح مورد مطالعه در گام دوم در جدول ۸ نشان داده شده است. پس از انجام اجراها برای جدول متعامد L18 و تحلیل تاگوچی، نمودارهای نسبت سیگنال به نویز برای گام دوم به دست آمد (نمودار ۴). مشابه آنچه که از جدول L25 به دست آمده بود، زاویه همگرایی محفظه اختلاط تأثیر قابل توجهی بر نسبت مکش دارد. از طرفی، این بار با تحلیل نسبت سیگنال به نویز برای موقعیت خروجی نازل مشاهده می‌شود که نزدیک شدن نازل به محفظه اختلاط باعث افزایش برد نمودار شده که نشان می‌دهد در گام دوم، تأثیر این پارامتر روی خروجی بیشتر است. این امر در جدول ۹ که مقادیر نسبت مکش را در ۱۸ اجرای گام دوم در خود جای داده، قابل مشاهده است. لذا می‌توان پیش‌بینی کرد که نزدیک‌تر کردن نازل به محفظه اختلاط می‌تواند نسبت مکش را افزایش دهد.

جدول ۶ عوامل کنترل مورد مطالعه در گام اول و سطوح تغییر آنها

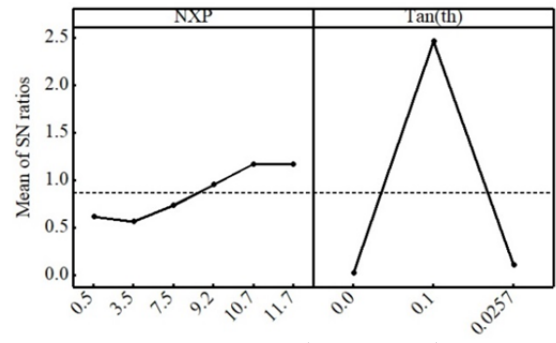
سطح	موقعیت خروجی نازل (mm)	$\tan(\theta)$
۱	۹/۲	۰/۰۰
۲	۱۰/۷	۰/۰۱
۳	۱۱/۷	۰/۰۲۵۷
۴	۱۲/۷	۰/۰۴
۵	۱۴/۲	۰/۰۶



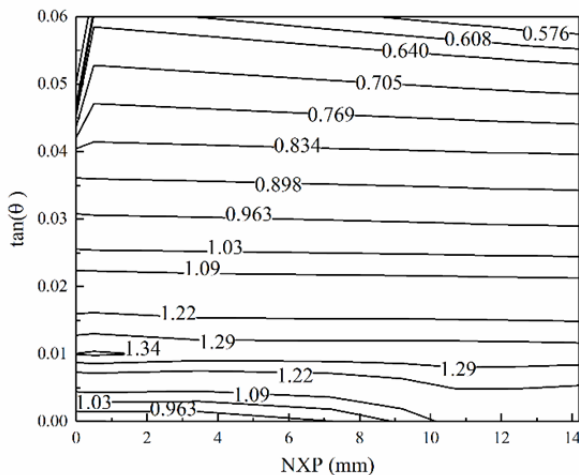
نمودار ۳) نسبت سیگنال به نویز برای گام اول



نمودار ۵) نسبت سیگنال به نویز برای گام سوم



نمودار ۶) نسبت سیگنال به نویز برای گام دوم



نمودار ۷) مقادیر نسبت مکش برای تمام سطوح مورد مطالعه موقعیت خروجی نازل و زاویه همگرایی محفظه اختلاط

### ۳-۳- تحلیل نتایج

همان گونه که در نمودار ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه همگرایی محفظه اختلاط از مقدار اولیه که به معنی افزایش قطر دهانه ورودی آن است، مقدار نسبت مکش کاهش می‌یابد. زیرا افزایش سطح مقطع عبور جریان ثانویه، کاهش سرعت و ایجاد جریان‌های گردابه‌ای در مجاورت دیواره را به دنبال دارد. جریان‌های گردابه‌ای، انرژی سیال ثانویه را کاهش می‌دهد. به علاوه، انرژی جنبشی جریان خروجی از نازل به اندازه کافی به سیال ثانویه منتقل نمی‌شود و بنابراین، سیال ثانویه به قدر کافی شتاب نمی‌گیرد و به تبع آن نسبت مکش افت می‌کند. شکل ۳، جریان‌های گردابه‌ای شکل گرفته در مجاورت دیواره محفظه اختلاط را در نمای بزرگ شده از ناحیه a که در شکل ۱ مشخص شده است، برای زوایای همگرایی مختلف و در  $NXP=11/7\text{mm}$  نشان می‌دهد. در شکل ۳ مشخص است که در  $\tan(\theta)=0/1$  جریان گردابه‌ای تشکیل نمی‌شود، اما بزرگی گردابه‌ها با افزایش زاویه همگرایی افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر، کاهش زاویه همگرایی محفظه اختلاط تا  $\tan(\theta)=0/1$  به معنی کاهش قطر دهانه ورودی محفظه اختلاط است که به سرعت گرفتن سیال ثانویه و کسب انرژی جنبشی بیشتر از جریان خروجی از نازل کمک می‌کند. به همین دلیل، نسبت مکش در این محدوده افزایش می‌یابد. اما کاهش نسبت مکش اجکتور برای مقادیر کمتر از  $\tan(\theta)=0/1$  به دلیل آن است که همگرایی کم محفظه اختلاط به سیال ثانویه فرصتی برای سرعت گرفتن نمی‌دهد و نیز بخشی از انرژی سیال ثانویه به شکل تلفات اصطکاکی از بین می‌رود.

با توجه به نتایج حاصل از گام دوم، در گام سوم، یک جدول L9 طراحی شد که در آن، موقعیت خروجی نازل در ۳ سطح و تانژانت زاویه همگرایی محفظه اختلاط نیز در ۳ سطح که در اجراهای قبلی بیشترین تاثیر را در افزایش نسبت مکش داشت، تغییر کنند. سطوح مورد مطالعه در گام سوم در جدول ۱۰ نشان داده شده است. در این گام، مقدار موقعیت خروجی نازل نسبت به دهانه ورودی محفظه اختلاط در سطح اول، ۰/۰ میلی‌متر انتخاب شد، بدین معنی که جریان خروجی از نازل بلافاصله وارد محفظه اختلاط شود. پس از انجام اجراهای گام سوم و رسم نمودار نسبت سیگنال به نویز (نمودار ۵) معلوم شد که مانند گام‌های اول و دوم، زاویه همگرایی محفظه اختلاط تاثیر زیادی روی خروجی دارد، در حالی که در این گام، تغییر موقعیت خروجی نازل تاثیر چندانی بر بیشتر شدن نسبت مکش ندارد. بیشترین مقدار نسبت مکش که در جدول ۱۱ قابل مشاهده است، در  $\tan(\theta)=0/1$  و فاصله نیم‌میلی‌متری نازل از دهانه ورودی محفظه اختلاط اتفاق می‌افتد.

نمودار ۶، مجموع نتایج نسبت مکش از گام‌های اول، دوم و سوم را در تمام سطوح مورد مطالعه برای موقعیت‌های خروجی نازل و زوایای همگرایی محفظه اختلاط نشان می‌دهد. در نمودار ۶ می‌توان مشاهده کرد که در محدوده  $\tan(\theta)=0/1$ ، نسبت مکش بیشترین مقادیر خود را دارد. همچنین مشخص است که نزدیک شدن نازل به محفظه اختلاط (کمتر شدن مقدار موقعیت خروجی نازل)، خصوصاً در زمانی که تانژانت زاویه همگرایی زیاد است، روی افزایش نسبت مکش تاثیر دارد. در نهایت، نسبت مکش بیشینه، مقدار  $1/3487$  به دست آمد که در مقایسه با نسبت مکش اولیه که  $1/005$  محاسبه شده بود، حدود ۳۴٪ افزایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰) عوامل کنترل مورد مطالعه در گام سوم و سطوح تغییر آنها

سطح	موقعیت خروجی نازل (mm)	$\tan(\theta)$
۱	۰/۰	۰/۰۰
۲	۰/۵	۰/۰۱
۳	۳/۵	۰/۰۲۵۷

جدول ۱۱) مقادیر نسبت مکش از اجراهای گام سوم

شماره	موقعیت خروجی نازل (mm)	$\tan(\theta)$	نسبت مکش
۱	۰/۰	۰/۰۰	۰/۸۹۴۸
۲	۰/۰	۰/۰۱	۱/۳۴۱۶
۳	۰/۰	۰/۰۲۵۷	۱/۰۲۴۵
۴	۰/۵	۰/۰۰	۰/۸۹۶۸
۵	۰/۵	۰/۰۱	۱/۳۴۸۷
۶	۰/۵	۰/۰۲۵۷	۱/۰۲۱۲
۷	۳/۵	۰/۰۰	۰/۹۰۰۴
۸	۳/۵	۰/۰۱	۱/۳۲۶۷
۹	۳/۵	۰/۰۲۵۷	۱/۰۱۸۳

+ مقدار بیشینه نسبت مکش در گام سوم

این مساله است که کاهش زاویه همگرایی و به تبع آن کاهش قطر دهانه ورودی محفظه اختلاط می‌تواند در افزایش توزیع عدد ماخ موثر در دهانه ورودی و افزایش سرعت سیال ثانویه و نسبت مکش تاثیرگذار باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی رفتار جریان درون اجکتور پیچیده و به‌شدت به هندسه اجکتور و شرایط کارکردی آن وابسته است. هر گونه تغییر در هندسه اجکتور می‌تواند بر عملکرد آن تاثیر قابل توجهی بگذارد. بنابراین با توجه به این که توانایی دینامیک سیالات محاسباتی در پیش‌بینی رفتار جریان درون اجکتور ثابت شده است، بایستی به‌طور مناسبی از آن برای بهبود عملکرد اجکتور استفاده نمود و این امر مستلزم آن است که هر اجکتور با توجه به خصوصیات هندسی و عملکردی خود مورد مطالعه قرار گیرد.

زمانی که نتایج آزمایشگاهی یا انجام آزمایش برای تایید نتایج حاصل از شبیه‌سازی وجود نداشته باشد، می‌توان از شبیه‌سازی یک یا چند پدیده که قبلاً در آزمایشگاه رویت شده است و تطبیق آنها با نتایج شبیه‌سازی استفاده کرد. در این پژوهش، رفتار اجکتور با تغییر فشار اولیه و پس‌فشار به‌طور عددی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج حاصل توانست رفتار مشاهده‌شده در آزمایشگاه را پیش‌بینی نماید. روش صحت‌سنجی استفاده‌شده در این پژوهش می‌تواند در آینده مورد استفاده محققان قرار گیرد.

از آنجایی که تعیین اثر پارامترهای هندسی موقعیت خروجی نازل و زاویه همگرایی محفظه اختلاط روی نسبت مکش اجکتور نیروگاه طوس که شرایط هندسی و کارکردی خاص خود را دارد، مستلزم اجراهای زیادی بود، رویکرد گام‌به‌گام انجام شده با کمک روش تاگوچی و تحلیل نمودار نسبت سیگنال به نویز توانست دید خوبی برای پیش‌برد اجراها به دست دهد و اجراهای لازم را هدفمند نماید. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، روش تاگوچی به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش می‌تواند توسط سایر محققان در انجام پژوهش‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

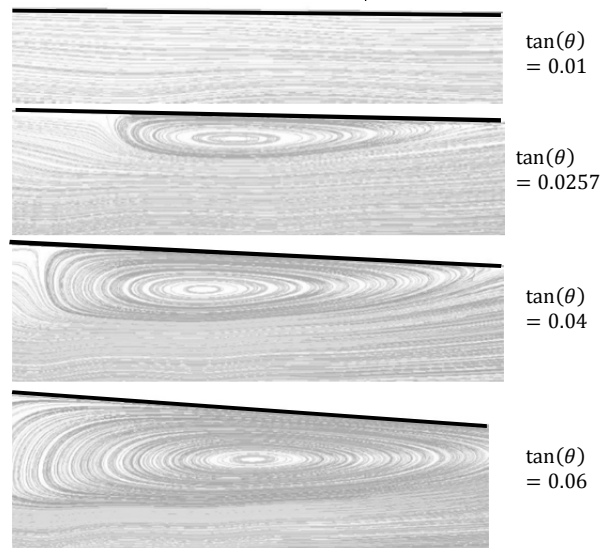
با توجه به تحلیل صورت‌گرفته از نتایج ارایه‌شده در نمودارهای ۶ و ۷ می‌توان دریافت که برای هر دو پارامتر موقعیت خروجی نازل و زاویه همگرایی محفظه اختلاط، مقدار بهینه‌ای وجود دارد که حول آن مقدار، بازده اجکتور بیشینه است و دور شدن از این مقدار، بهینه نسبت مکش را کاهش می‌دهد. در اجکتور مورد مطالعه، بزرگ‌بودن دهانه ورودی محفظه اختلاط و دور بودن نازل از آن باعث عدم انتقال انرژی جنبشی سیال اولیه به‌اندازه کافی به سیال ثانویه می‌شد که با انجام اجراهای هدفمند، مقادیر بهینه این دو پارامتر به دست آید و نسبت مکش به‌اندازه ۳۴٪ افزایش یافت.

#### ۵- پیشنهادها

۱- از لحاظ تکنیکی، تغییر زاویه همگرایی محفظه اختلاط مستلزم تعویض کل بدنه اجکتور بوده که امری زمان‌بر و پرهزینه است، در حالی که می‌توان به‌سادگی، موقعیت محوری نازل را تغییر داد. لذا پیشنهاد می‌شود در صورت نیاز به افزایش بازده اجکتور، ابتدا نازل در طول محور جابه‌جا شود.

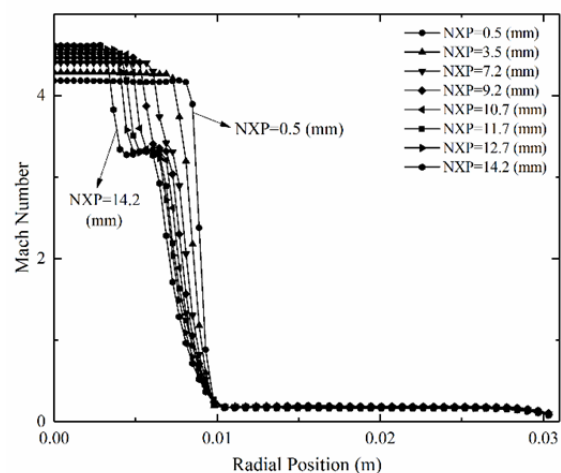
۲- نتایج این پژوهش، در شرایط کارکردی ثابت به دست آمد. بنابراین پیشنهاد می‌شود اثر همزمان پارامترهای مورد مطالعه در شرایط کارکردی مختلف بررسی شود.

۳- پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی، اثر همزمان پارامترهای هندسی دیگر مانند طول محفظه اختلاط، قطر و طول گلوگاه



شکل ۳) جریان‌های گردابه‌ای تشکیل‌شده در مجاورت دیواره محفظه اختلاط برای زوایای همگرایی مختلف (NXP=11/7mm)

با رسم نمودار تغییرات عدد ماخ در طول شعاع دهانه ورودی محفظه اختلاط برای موقعیت‌های خروجی مختلف نازل در مقدار اولیه زاویه همگرایی  $(\tan(\theta)=0/0257)$  می‌توان به این نکته پی برد که با نزدیک شدن نازل به محفظه اختلاط، مقدار متوسط عدد ماخ در دهانه ورودی آن بیشتر می‌شود (نمودار ۷) که به معنی افزایش سرعت متوسط جریان در ورودی محفظه اختلاط است. به همین دلیل، سرعت جریان ثانویه و به تبع آن نسبت مکش افزایش می‌یابد. همچنین با نزدیک شدن نازل به محفظه اختلاط افت انرژی سیال خروجی از نازل، کمتر و انتقال انرژی جنبشی به سیال ثانویه بیشتر می‌شود. البته مقدار بیشینه نسبت مکش (همان گونه که در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود)، در موقعیت خروجی نازل برابر با نیم‌میلی‌متر قرار دارد و نزدیک‌تر کردن بیش از حد نازل به محفظه اختلاط، کاهش نسبت مکش را به دنبال دارد. زیرا سیال خروجی از نازل، فرصت کافی برای انتقال انرژی جنبشی خود به سیال ثانویه ندارد.



نمودار ۷) تغییرات عدد ماخ در طول شعاع دهانه ورودی محفظه اختلاط برای موقعیت‌های خروجی نازل مختلف

از طرفی، در نمودار ۷ مشخص است که عدد ماخ در دوسوم از شعاع دهانه ورودی محفظه اختلاط بسیار کم بوده که این امر تاییدکننده



### منابع

- 1- Besagni G, Mereu R, Chiesa P, Inzoli F. An Integrated Lumped Parameter-CFD approach for off-design ejector performance evaluation. *Energy Conversion and Management*. 2015;105:697-715.
- 2- Chen X, Omer S, Worall M, Riffat S. Recent developments in ejector refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;19:629-651.
- 3- Fu W, Li Y, Liu Z, Wu H, Wu T. Numerical study for the influences of primary nozzle on steam ejector performance. *Applied Thermal Engineering*. 2016;106:1148-1156.
- 4- Lamberts O, Chatelain P, Bartosiewicz Y. Numerical and experimental evidence of the Fabri-choking in a supersonic ejector. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2018;69:194-209.
- 5- Sriveerakul T, Aphornratana S, Chunnanond K. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1, Validation of the CFD results. *International Journal of Thermal Sciences*. 2007;46(8):812-822.
- 6- Maghsoodi A, Afshari E, Ahmadikia H. Optimization of geometric parameters for design a high-performance ejector in the proton exchange membrane fuel cell system using artificial neural network and genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*. 2014;71(1):410-418.
- 7- Wang C, Wang L, Wang X, Zhao H. Design and numerical investigation of an adaptive nozzle exit position ejector in multi-effect distillation desalination system. *Energy*. 2017;140(Part 1):673-681.
- 8- Zhu Y, Cai W, Wen Ch, Li Y. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(5-6):898-905.
- 9- Wu H, Liu Z, Han B, Li Y. Numerical investigation of the influences of mixing chamber geometries on steam ejector performance. *Desalination*. 2014;353:15-20.
- 10- Ariaifar K, Buttsworth D, Al-Doori Gh, Sharifi N. Mixing layer effects on the entrainment ratio in steam ejectors through ideal gas computational simulations. *Energy*. 2016;95:380-392.
- 11- Thongtip T, Aphornratana S. An experimental analysis of the impact of primary nozzle geometries on the ejector performance used in R141b ejector refrigerator. *Applied Thermal Engineering*. 2017;110:89-101.
- 12- Hemidi A, Henry F, Leclaire S, Seynhaeve JM, Bartosiewicz Y. CFD analysis of a supersonic air ejector. Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(8-9):1523-1531.
- 13- Croquer S, Poncet S, Aidoun Z. Turbulence modeling of a single-phase R134a supersonic ejector. Part 1: Numerical benchmark. *International Journal of Refrigeration*. 2016;61:140-152.
- 14- Goharimanesh M, Akbari A, Akbarzadeh Tootoonchi A. More efficiency in fuel consumption using gearbox optimization based on Taguchi method. *Journal of Industrial Engineering International*. 2014;10(2):61-68.
- 15- Goharimanesh M, Javid SM, Bazaz SR, Rostami H. Reducing ice accretion using design of experiments based on Taguchi method. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2017;20(2):165-172.

اجکتور، قطر گلوگاه نازل، قطر دهانه خروجی نازل و غیره مورد مطالعه قرار بگیرد.

۴- پیشنهاد می‌شود در یک تحقیق جامع، مطالعه روی اجکتور با تغییر همزمان پارامترهای هندسی و شرایط کارکردی توسط روش‌های بهینه‌سازی مانند روش تاگوچی، روش شبکه عصبی یا الگوریتم ژنتیک (یا هر کدام از الگوریتم‌های مشتق شده از آن) با داده‌های عظیم انجام شود. نتایج چنین پژوهشی می‌تواند نقطه کاری بهینه را در هر زمان برای بهره‌بردار مشخص نماید. همچنین از آنجایی که این گونه از مطالعات خیلی گسترده نشده‌اند، می‌توانند نتایج خوبی برای مطالعات بعدی به دنبال داشته باشند.

**تشکر و قدردانی:** از جناب آقای مهندس نعمتی، مدیر عامل پیشین و جناب آقای مهندس افخمی، مدیر عامل محترم شرکت مدیریت تولید برق طوس به دلیل مساعدت‌های صورت گرفته برای انجام این پژوهش تشکر می‌نمایم.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله در زمان ارسال به نشریه مهندسی مکانیک مدرس، در هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی دیگری در حال بررسی نبوده‌است.

**تعارض منافع:** تعارضی بین عوامل تولیدکننده این مقاله وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** محمدرضا محرری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ حسین عجم (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)

**منابع مالی:** هزینه پژوهش از اعتبار پژوهشی مربوط به پایان‌نامه کارشناسی ارشد تامین شده‌است.

### ۶- پی‌نوشت

علایم	rn
دبی جرمی ( $m.s^{-1}$ )	E
انرژی کل (j)	ER
نسبت مکش	i, j
بردارهای فضا	k
انرژی جنبشی اغتشاشی	$L_{HB}$
تابع زبان در روش تاگوچی	n
تعداد آزمایش در روش تاگوچی	NXP
موقعیت خروجی نازل (mm)	p
فشار ( $kg.m^{-1}s^{-2}$ )	S, Y, G
جمله چشمه	SNR
تابع سیگنال به نویز در روش تاگوچی	T
دما ( $^{\circ}C$ )	u
سرعت ( $m.s^{-1}$ )	$y_i$
خروجی آزمایش در روش تاگوچی	علایم یونانی
نرخ اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی	$\epsilon$
تابع زبان در روش تاگوچی	$\eta$
زاویه همگرایی محفظه اختلاط	$\theta$
ضریب هدایت حرارتی ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	$\lambda$
لزجت دینامیک ( $kg.m^{-1}s^{-1}$ )	$\mu$
لزجت سینماتیک ( $kg.m^{-1}s^{-1}$ )	$\mu_t$
چگالی ( $kg.m^{-3}$ )	$\rho$
عدد پرناتل	$\sigma$
تنش برشی (atm)	$\tau$
مربوط به پس فشار	زیرنویس‌ها
موثر	b
بیشتر- بهتر در روش تاگوچی	eff
اولیه (Primary)	HB
ثانویه (Secondary)	p
	s