



## آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی ایندیوسر در جداکننده گاز دوار پمپ‌های دورن چاهی الکتریکی تحت شرایط تک‌فاز و دوفاز

قاسم آباریکی<sup>۱</sup> و علیرضا ریاسی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

<sup>۲</sup> دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۶/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۳

### چکیده

ایندیوسر یک توربوماشین محوری است که در ورودی جداکننده‌های دوار پمپ‌های درون چاهی الکتریکی به منظور افزایش هد و غلبه بر افت فشار لوله‌های خروجی نصب می‌شود. در این مطالعه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و روش‌های بهینه‌سازی، به بهینه‌سازی ایندیوسر به منظور افزایش هد و بازدهی آن پرداخته شده است. بعد از طراحی اولیه، زاویه ورودی و خروجی روی شroud، موقعیت پره در لبه ورودی و خروجی شroud و ضخامت پره به عنوان پارامترهای تاثیر گذار انتخاب شده‌اند. برای کاهش محاسبات از مدل جانشینی بر پایه مدل کریجینگ به منظور پیش‌بینی تابع هدف استفاده شده است. معادلات سه بعدی ناور استوکس پایا برای آنالیز جریان تک‌فاز و دوفاز به کار گرفته شده است. جریان دوفاز غیرهمگن با استفاده از روش اویلری-اویلری و با در نظر گرفتن نیروهای بین‌فازی در نرم افزار انسیس-سی‌اف‌ایکس مدل‌سازی شده است. از الگوریتم ژنتیک مقادیر پارامترها در نقاط بهینه محاسبه و نتایج برای آنالیز حساسیت استفاده شده است. با توجه به آنالیز حساسیت، پارامترهای زاویه ورودی و ضخامت پره بیشترین تاثیر را روی هد و زاویه خروجی بیشترین تاثیر را روی بازدهی ایندیوسر دارند. نتایج نشان می‌دهد که هندسه بهینه در شرایط تک‌فاز و دوفاز، هد بیشتری را تامین می‌کند.

**کلمات کلیدی:** ایندیوسر؛ دوفاز؛ پمپ درون چاهی الکتریکی؛ بهینه‌سازی چند هدفه.

## Sensitivity Analysis and Optimization of the Inducer in a Rotary Gas Separator of Electrical Submersible Pump Under Single Phase and Two Phase Conditions

Gh. Abbariki<sup>1</sup>, A. Riasi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MSc student, School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

### Abstract

The inducer is an axial turbo-machinery installed at the inlet of Rotary Gas Separators of Electrical Submersible Pump to increase the head and overcome the pressure drop of the outlet pipes. In this study the inducer optimization in order to increase the head and the efficiency has been addressed using the computational fluid dynamics. After the initial design, the inlet angle and outlet angle on the shroud, the position of the leading edge and trailing edge on the shroud as well as the blade thickness, selected as effective parameters. To reduce the computational cost a Surrogates model based on the Kriging model is used to predict the objective function. Flow analysis of the single and two phases are conducted by solving three-dimensional steady Navier-Stokes equations. Inhomogeneous two-phase flow is modeled in the ANSYS-CFX software using the Euler-Euler approach and considering interphase forces. From the genetic algorithm, the values of the parameters in the optimal points are calculated and the results are used for sensitivity analysis. Regarding the sensitivity analysis, the input angle and the blade thickness have the greatest impact on the head and also the outlet angle has the greatest impact on the inducer efficiency. Numerical simulation results show that the optimum geometry in single-phase and two-phase conditions provide more head.

**Keywords:** Inducer; Two-Phase; Electrical Submersible Pump; Multi-Objective Optimization.

## ۱- مقدمه

یکی از روش‌های مرسوم فراآوری نفت، استفاده از پمپ‌های درون‌چاهی الکتریکی<sup>۱</sup> است که از چندین طبقه پمپ گریز از مرکز<sup>۲</sup> تشکیل شده‌اند. عملکرد این پمپ هنگامی که در شرایط دوفازی در ورودی کار می‌کند، به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد و در کسر حجمی گاز<sup>۳</sup> بالا باعث افت عملکرد و حتی قفل شدگی پمپ شود. جداکننده گاز دوار<sup>۴</sup> برای کاهش گاز ورودی به پمپ، در ورودی این پمپ نصب می‌شود، جداکننده با استفاده از نیروی گریز از مرکز فاز گاز از مایع را جدا کرده و به لوله‌های خروجی گاز هدایت می‌کند، در نتیجه مقدار گاز ورودی به بخش پمپ گریز از مرکز کاهش یابد [۱]. ایندیوسر یک توربوماشین است که در ورودی پمپ‌ها قرار می‌گیرد و با افزایش فشار، از اثرات منفی افت فشار، کاویتاسیون و ناپایداری سیال در ورودی پمپ می‌کاهد. به طور معمول ایندیوسرها تعداد کمتری پره نسبت به پمپ‌های مرسوم دارند (2 الی 5 پره) و دارای زاویه‌های حمله کوچک هستند و در ورودی پروانه اصلی قرار می‌گیرد [۲].

یکی از کاربردهای ایندیوسرها، در جداکننده‌های گریز از مرکز است. هدف از ایندیوسر در جداکننده‌ها در وهله اول، تامین هد مورد نیاز به منظور رساندن فاز گاز به پره‌های جداکننده و غلبه بر اصطکاک و افت فشارهای موجود در مسیر تا رسیدن به لوله خروجی گاز است. ایندیوسر و پمپ روی یک محور نصب می‌شوند و با سرعت یکسانی دوران می‌کنند [۳]. کاربرد ایندیوسرها با توجه به سرعت مخصوص و سرعت محیطی پره تعیین می‌شود.

## ۱-۱- پیشینه تحقیق

آلهاناتی<sup>۵</sup> برای اولین بار یک مدل تئوری بر پایه اصول فیزیکی برای پیش‌بینی بازده جداسازی در یک جداکننده را پیشنهاد داد. نمودار بازدهی بر حسب نرخ جریان ارائه شده توسط آلهاناتی شامل، سه قسمت بازدهی بالا، کم و حالت

گذار بین این دو قسمت است که حالت گذارای بین بازدهی بالا و پایین بسیار سریع است. همانطور که مشخص است، این دو محدوده یکی با بازدهی مناسب و بالا و یکی در محدوده با بازده نامناسب جداساز است. در واقع وجود منطقه‌ای با بازدهی پایین به دلیل خارج شدن ایندیوسر از محدوده عملکرد خود است. [۴]. هارون<sup>۶</sup> و همکارانش با استفاده از مدل آلهاناتی، یک مدل جدید با تمرکز بر پیش‌بینی هد تولید شده و تاثیر هندسه و ویژگی‌های سیال بر عملکرد ایندیوسر را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند و مدلی بر اساس روش حل جریان نصف‌النهاری<sup>۷</sup> و با بهره‌گیری از رویکرد دو سیالی ارائه دادند. مدل بهبود یافته هارون علاوه بر تایید صحت مدل آلهاناتی، با داده‌های تجربی هم پوشانی بهتری داشت. با استفاده از هد محاسبه شده ایندیوسر می‌توان مشخص کرد که جدا کننده در کدام منطقه بازدهی واقع شده است [۵].

در سال 2002 لاکنر<sup>۸</sup> اثرات ویسکوزیته سیال روی راندمان جداکننده را مورد بررسی قرار داد و طیف وسیعی از داده‌های تجربی در شرایط عملیاتی مختلف از نظر فشار، سرعت جریان، نسبت گاز به مایع<sup>۹</sup> و سرعت چرخش جمع آوری کردند. همانند هارون دو منطقه یکی با بازدهی بالا (بازده جداسازی بین ۸۰ و ۱۰۰٪) و دیگری در بازدهی پایین (بازده جداسازی بین ۳۰ تا ۵۵٪) و حالت گذار بین این دو ناحیه مشاهده کردند که محل انتقال گذار به خواص فیزیکی سیال، شرایط عملیاتی و هندسه جداساز بستگی دارد. حالت گذار زمانی اتفاق می‌افتد که ایندیوسر جداکننده در شرایط پر بار قرار گیرد و هد تولیدی برای انتقال سیال به داخل محفظه جداکننده کافی نباشد [۶].

هارون در مطالعه دیگری سعی کرد، با اثر تغییر هندسه ایندیوسر روی هد ایندیوسر در حالت تک فاز و دوفاز و عملکرد جداکننده گریز از مرکز به صورت تجربی، مورد بررسی قرار داد. پارامترهای هندسی در نظر گرفته شده شامل، قطر نوک پره، طول گام پره و میزان پیش‌چسب کلی پره بودند. بیشینه هد تولیدی در کسر حجمی گاز

<sup>1</sup> Electrical Submersible Pump (ESP)

<sup>2</sup> Centrifugal

<sup>3</sup> Gas Void Fraction (GVF)

<sup>4</sup> Rotary Gas Separator (RGS)

<sup>5</sup> Alhanati

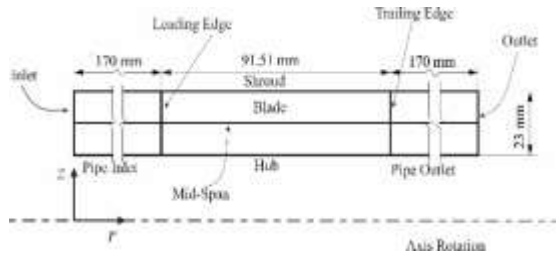
<sup>6</sup> Harun

<sup>7</sup> Meridional

<sup>8</sup> Lackner

<sup>9</sup> Gas-Liquid Ratios (GLRs)

استوانه‌ای ( $r, \theta, z$ ) توصیف کنند که در آن  $r$  فاصله شعاعی از محور دوران،  $\theta$  زاویه با محور  $r$  و  $z$  در جهت محور دوران در نظر گرفته می‌شود. با تصویر کردن پره در نمای  $r-z$  نمای نصف‌النهاری پره به دست می‌آید. برای طراحی هندسه ایندیوسر، ابتدا نمای نصف‌النهاری ایندیوسر رسم می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- نمای نصف‌النهاری ایندیوسر

اندازه پارامترهای هندسی ایندیوسر در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است که مطابق با اندازه‌های ایندیوسر جداکننده دوار از سری ۵۰۰ است [۷]. با اعمال توزیع زاویه روی خطوط کمبر<sup>۵</sup> و ضخامت پره، هندسه سه بعدی پره بدست می‌آید. لازم به ذکر است، زاویه پره  $\beta$  زاویه بین کانتور<sup>۶</sup> پره و جهت محیطی (کمان دایره‌ای حول محور دوران) است، کانتور پره از تقاطع سطح پره با سطحی که از دوران خط نصف‌النهاری به وجود می‌آید (شکل ۲). در این مطالعه زاویه پیچش<sup>۷</sup> ثابت در نظر گرفته شده است، با توجه به رابطه (۱) با داشتن توزیع زاویه روی یکی از خطوط کمر می‌توان توزیع زاویه را روی خطوط دیگر به دست آورد [۱۰].

$$\beta = \text{Arctan}\left(\left(\frac{r_i}{r}\right) \times \tan(\beta_i)\right) \quad (1)$$

که در آن  $\beta_i$  زاویه در شعاع  $r_i$  و  $\beta$  زاویه در شعاع  $r$  است. در این شبیه‌سازی برای کاهش اثرات جریان برگشتی، یک دامنه حل بدون چرخش (لوله‌های ورودی و خروجی) قبل از ورودی و بعد از خروجی ایندیوسر قرار داده شده است (شکل ۳).

صفر، بیشینه کسر حجمی گاز در هد صفر و بیشینه دبی سیال مایع در هد صفر به منظور ارزیابی عملکرد ایندیوسر نسبت به تغییر پارامترهای نام برده، مورد توجه قرار گرفته شد [۷].

سوارز<sup>۱</sup> عملکرد یک جداکننده تحت شرایط جریان دو فاز فاز را با استفاده از ابزار شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و مخلوط آب و هوا با کسر حجمی ۱۰ درصد تا ۳۰ درصد مورد بررسی قرار داد. نتایج بدست آمده نشان داد که جداکننده گاز دوار، فازها را به طور موثر جدا می‌کند، اما هد ایندیوسر برای غلبه بر تلفات اصطکاکی در لوله‌ها و ستون فشار استاتیک مایع در فضای حلقه کافی نیست؛ در نتیجه، یک ایندیوسر جدید برای ایجاد هد بیشتر برای خارج کردن گاز از جدا کننده و جلوگیری از کشیدن گاز به سمت فاز مایع ارائه داد، هندسه طراحی شده در شرایط دو فاز، دارای هد بیشتر و کافی برای جداسازی فازها بود [۸]؛ همچنین درباری<sup>۲</sup> در مطالعه دیگری خواص مختلف سیال از جمله، ویسکوزیته و کسر حجمی گاز در ورودی قسمت جداساز پمپ درون چاهی الکتریکی روی سه هندسه مختلف از جداسازها را مورد بررسی و مطالعه قرار داد [۹].

در این مطالعه با استفاده از مدل جانشینی و دینامیک سیالات محاسباتی، به طراحی بهینه‌سازی ایندیوسر در پمپ‌های درون چاهی به منظور افزایش هد و بازدهی پرداخته شده است.

## ۲- طراحی هندسه ایندیوسر

یکی از زیر مجموعه‌های نرم‌افزار انسیس<sup>۳</sup>، مدل‌ساز پره انسیس<sup>۴</sup> است که یک ابزار تخصصی برای طراحی انواع پره‌ها (توربین، کمپرسور، پمپ، ایندیوسرها و ...) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار می‌تواند تمامی پره‌ها را با پارامترهای مختلف برای یک تولید شبکه مناسب، ترسیم نماید. اولین قدم برای طراحی رسم نمای نصف‌النهاری پره است. در توربوماشین‌ها راحت‌تر است، برای بررسی جنبه‌های مختلف هندسه، سیستم مختصات را در سیستم مختصات

<sup>1</sup> Suarez

<sup>2</sup> Darbani

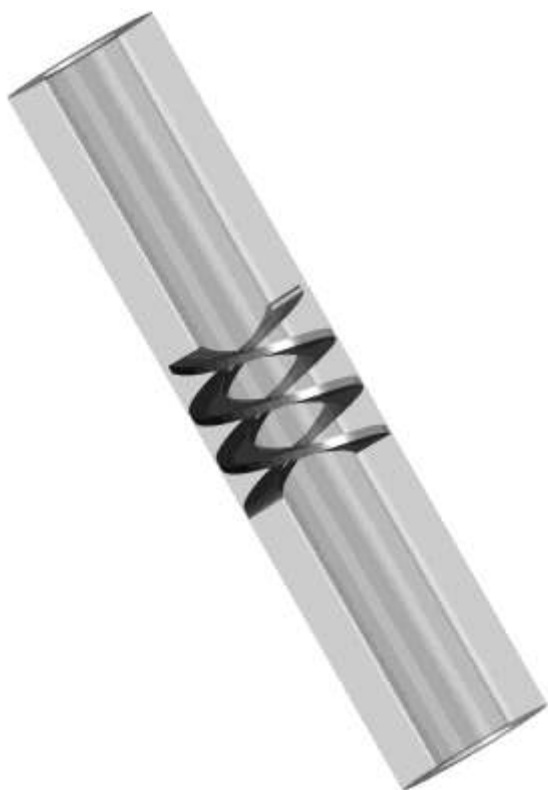
<sup>3</sup> ANSYS

<sup>4</sup> ANSYS BladeModeler

<sup>5</sup> Camber Lines

<sup>6</sup> Contour

<sup>7</sup> Wrap Angles



شکل ۳- هندسه ۳D ایندیوسر

حضور گرادیان فشار نامطلوب، با اعمال اثرات انتقال در معادله لزجت گردابه‌ای طراحی شده است [۱۲]. این مدل ترکیبی است که در نواحی دور دیواره از مدل  $k - \epsilon$  و در نواحی نزدیک دیواره از  $k - \omega$  استفاده می‌کند، روابط (۲) و (۳) معادلات این مدل را نشان می‌دهد [۱۳].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2)$$

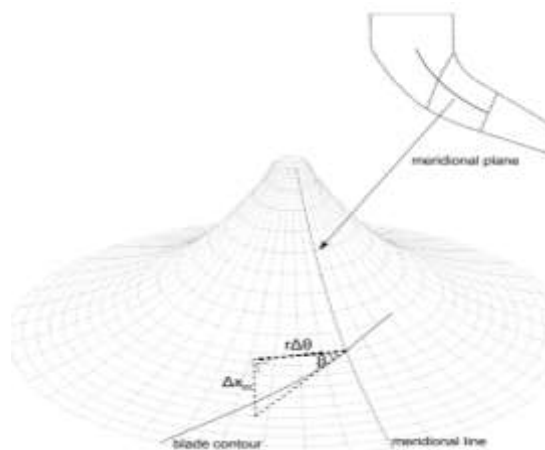
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

### ۳-۲- جریان دوفاز

برای شبیه‌سازی جریان دوفاز از آب به عنوان فاز پیوسته و از هوا به عنوان فاز پراکنده استفاده شده است. برای مدل‌سازی

جدول ۱- مقادیر پارامترهای هندسی ایندیوسر

پارامتر	اندازه
تعداد پره	۲
قطر پای پره <sup>۱</sup> (mm)	۴۶
قطر نوک پره <sup>۲</sup> (mm)	۹۲
تعداد گام کلی <sup>۳</sup>	۱/۵
زاویه ورودی پره (deg)	۱۲
زاویه خروجی پره (deg)	۱۲
ضخامت پره (mm)	۵
لغی نوک پره <sup>۴</sup> (mm)	۱



شکل ۲- تعریف زاویه پره  $\beta$  (سطح دوران یافته خط نصف النهاری با خطوط نقطه نشان داده شده است) [۱۱]

### ۳- معادلات و روابط حاکم

#### ۳-۱- جریان تک‌فاز

جریان سیال به صورت پایدار، توربولانس و برای مدل‌سازی توربولانس از مدل  $k - \omega$  SST استفاده شده است. مدل  $k - \omega$  SST برای پیش‌بینی دقیق شروع و مقدار جدایش در

<sup>1</sup> Hub Diameter

<sup>2</sup> Tip Diameter

<sup>3</sup> Total No. of Pitch

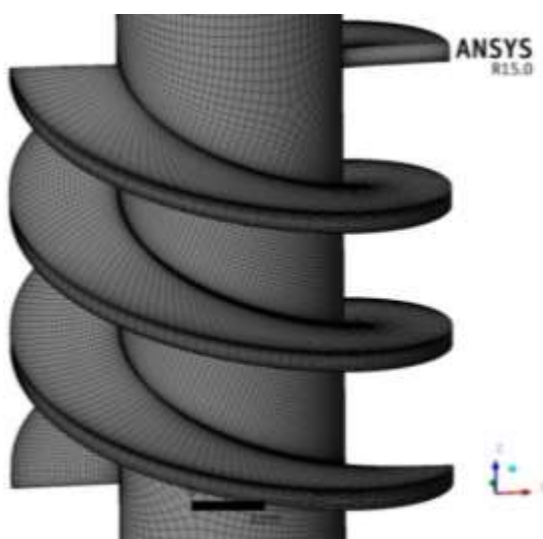
<sup>4</sup> Tip Clearance

جدول ۲- مدل‌های استفاده شده برای نیروهای بین فازی

انتقال بین فاز <sup>۸</sup>	مدل ذره‌ای <sup>۹</sup>
نیروی درگ	مدل گریس <sup>۱۰</sup>
نیروی لیفت	مدل تومیایاما <sup>۱۱</sup>
نیروی روانکاری دیوار	مدل آنتال <sup>۱۲</sup>
نیروی پراکندگی توربولانس	لوپز دی بارتودانو <sup>۱۳</sup>
انتقال توربولانس	ویسکوزیته اددی افزایشی ساتو <sup>۱۴</sup>

#### ۴- شبکه‌ی محاسباتی

برای تولید شبکه ایندیوسر از نرم افزار شبکه‌بندی توربوگرید<sup>۱۵</sup>، از زیر مجموعه‌های نرم‌افزار انسیس استفاده شده است تا بتوانیم شبکه‌ای ساختار یافته و با دقت بالاتری در لایه مرزی را ایجاد کنیم (شکل ۴).



شکل ۴- شبکه محاسباتی ایندیوسر

جریان دوفاز از روش اویلری-اویلری استفاده شده است [۱۴]. مدل چندفاز اویلری-اویلری در نرم افزار سی‌اف‌ایکس<sup>۱</sup>، به دو زیر مجموعه متفاوت مدل همگن<sup>۲</sup> و غیرهمگن<sup>۳</sup> تقسیم می‌شود. در مدل همگن، سرعت برای همه فازها برابر فرض می‌شود و فقط یک معادله مومنتوم با خواص میانگین برای همه فازها حل می‌شود، اما در مدل غیرهمگن برای هر یک از فازها، معادلات مومنتوم به صورت جداگانه حل می‌شود و میدان فشار به صورت همگن یعنی برای همه فازها یکسان در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه سرعت فازها متفاوت است و علت جدایش فازها در جداکننده در اختلاف سرعت فازها است، بنابراین از مدل غیرهمگن استفاده می‌شود. معادلات بقای جرم و مومنتوم برای جریان آشفته گذارای  $\alpha$  فاز را می‌توان مطابق رابطه (۴) و (۵) نوشت [۱۵]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c u_c) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c u_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c u_c u_c) = -\alpha_c \nabla \cdot p + \nabla \cdot (\alpha_c \mu_c (\nabla u_c + (\nabla u_c)^T)) + F_{inter.ac} \quad (5)$$

رابطه بین کسر حجمی گاز و مایع در معادله (۶) است:

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (6)$$

در معادله (۷) تمام نیروهای بین فازی نشان داده شده است که شامل، نیروی درگ ( $F_{drag}$ )، نیروی لیفت<sup>۴</sup> ( $F_{lift}$ )، نیروی روانکاری دیوار<sup>۵</sup> ( $F_{w.l}$ )، نیروی جرم مجازی<sup>۶</sup> ( $F_{v.m}$ ) و نیروی پراکندگی توربولانس<sup>۷</sup> ( $F_{t.d}$ ) است.

$$F_{inter.ac} = F_{drag} + F_{lift} + F_{w.l} + F_{v.m} + F_{t.d} \quad (7)$$

پیشنهادهای استفاده شده برای مدل‌سازی نیروهای بین فازی و ضرایب آن با توجه به مرجع [۱۵]، در جدول ۲ خلاصه شده است.

<sup>8</sup> Interphase Transfer

<sup>9</sup> Particle Model

<sup>10</sup> Grace Model

<sup>11</sup> Tomiyama Model

<sup>12</sup> Antal Model

<sup>13</sup> Lopez de Bertodano

<sup>14</sup> Sato Enhanced Eddy Viscosity

<sup>15</sup> TurboGrid

<sup>1</sup> CFX

<sup>2</sup> Homogeneous

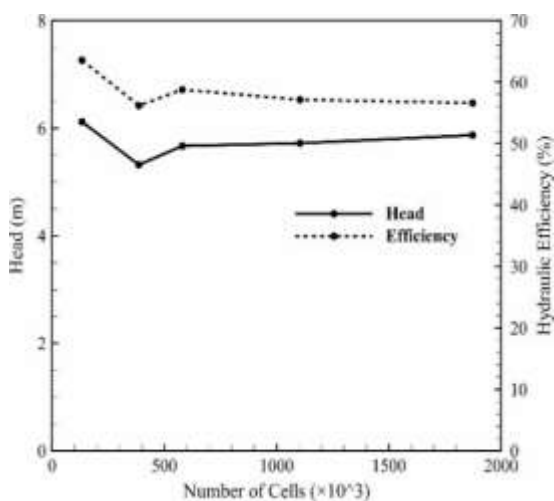
<sup>3</sup> Inhomogeneous

<sup>4</sup> Lift

<sup>5</sup> Wall Lubrication

<sup>6</sup> Virtual Mass

<sup>7</sup> Turbulence Dispersion



شکل ۶- نمودار استقلال از مش

برای اطمینان از شبکه صحیح در نزدیکی دیواره مقادیر  $\gamma^+$  روی دیواره‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است، مقدار  $\gamma^+$  در ناحیه کاملاً توربولانس بین  $60 < \gamma^+ < 30$  پیشنهادی در مرجع [۱۶] نگه داشته شده است.

### ۵- روند بهینه‌سازی و روش جانشینی<sup>۳</sup>

بهینه‌سازی به منظور یافتن بیشینه یا کمینه تابع هدف و تعیین بهترین مقدار برای پارامترهای طراحی انجام می‌شود که معمولاً نیاز به تعداد زیادی ارزیابی تابع هدف به ازای مقادیر مختلف پارامترهای مسئله دارد، در صورت استفاده از روش‌های مستقیم و در نظر گرفتن تمام حالت‌ها فضای طراحی انجام شبیه‌سازی پرهزینه و مدت زمان بسیاری طول خواهد کشید که نتایج مطلوب حاصل شود.

هدف اصلی استفاده از مدل‌سازی بر اساس روش‌های جانشینی، ساختن یک تابع است که تا حد امکان رفتار مدل شبیه‌سازی شده را با محاسبات ارزان‌تر تقلید کند که این تابع خود می‌تواند صریح یا به صورت یک جعبه سیاه باشد، به بیان ساده‌تر هدف تخمین یک تابع بر پایه تعدادی نمونه در فضای طراحی است که متغیرهای ورودی پارامترهای طراحی را به متغیرهای خروجی و یا اهداف مسئله مرتبط

### ۴-۱- شرایط مرزی

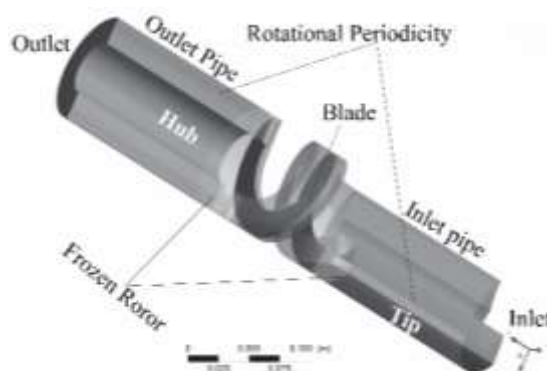
ورودی: برای حالت تک‌فاز فشار کلی ثابت و در حالت دوفاز فشار کلی ثابت و کسر حجمی گاز در ورودی مشخص (۱۰۰ kpa)

خروجی: دبی جرمی ثابت

دیواره شروع: بدون لغزش و سرعت صفر

دیواره هاب و پره: بدون لغزش و سرعت برابر با سرعت دورانی (۳۵۰۰ دور بر دقیقه).

برای کاهش محاسبات، یک پره از دامنه حل را در نظر می‌گیریم. شرایط مرزی متناوب چرخشی<sup>۱</sup> برای مرزهای جانبی کانال و در فصل مشترک لوله‌های ثابت و دامنه دوار، از شرایط مرزی روتور منجمد<sup>۲</sup> استفاده شده است. در شرایط مرزی روتور منجمد، هر دو قاب ساکن در نظر گرفته می‌شود و از یک تبدیل قاب برای نشان دادن چرخش قاب روتور استفاده می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵- شرایط مرزی

جهت اطمینان از صحت نتایج لازم است، نتایج شبیه‌سازی به شبکه وابسته نباشد؛ برای این منظور، شبکه‌هایی با تعداد المان مختلف در نظر گرفته شده است. شکل ۶ نشان دهنده تغییرات دو پارامتر هد و راندمان پره‌های ایندیوسر است، حداقل شبکه مورد نیاز برای آنکه تغییرات با افزایش تعداد شبکه قابل چشم‌پوشی باشد، برای ایندیوسر حدود ۵۲۰/۰۰۰ سلول است.

<sup>۱</sup> Rotational Periodicity

<sup>۲</sup> Frozen Rotor

<sup>۳</sup> Surrogates

ویژه‌ای به آن شده است. مدل کریجینگ در حقیقت از دو بخش شامل، یک تابع رگرسیون<sup>۴</sup> و یک تابع تصادفی گوسی<sup>۵</sup> تشکیل شده است. هر کدام از این بخش‌ها به نوعی به بهبود مدل نهایی کمک می‌کند.

$$y(x) = \sum_{k=1}^n \beta_k f_k(x) + Z(x) \quad (۸)$$

$y(x)$  تابع پاسخ،  $f(x) = [f_1(x), \dots, f_n(x)]^T$  تابع پایه رگرسیون  $n$  تعداد تابع‌های پایه،  $\beta = [\beta_1, \dots, \beta_n]^T$  ضرایب رگرسیون و  $Z(x)$  یک تابع تصادفی گوسی با میانگین صفر، واریانس<sup>۶</sup>  $\sigma^2$  و کواریانس<sup>۷</sup> مطابق رابطه (۹) است.

$$\text{Cov}[Z(\tau), Z(x)] = \sigma^2 R(\theta, \tau, x) \quad (۹)$$

در اینجا  $R(\theta, \tau, x)$  تابع همبستگی<sup>۸</sup> بین نقاط  $\tau$  و  $x$  و  $\theta$  پارامتر همبستگی و مجهول است. چندین تابع همبستگی مانند، تابع همبستگی خطی و نمایی<sup>۹</sup> می‌توان در نظر گرفت، اما تابع همبستگی گوسی رابطه (۱۰)، دارای محبوبیت بیشتری در مدل کریجینگ است.

$$R(\theta, \tau, x) = \exp\left(-\sum_{j=1}^m \theta_j (\tau_j - x_j)^2\right) \quad (۱۰)$$

مقادیر  $\tau_j$  و  $x_j$  به ترتیب اجزای نقاط نمونه  $\tau$  و  $x$  است و  $m$  بعد پارامترهای طراحی است [۱۸].

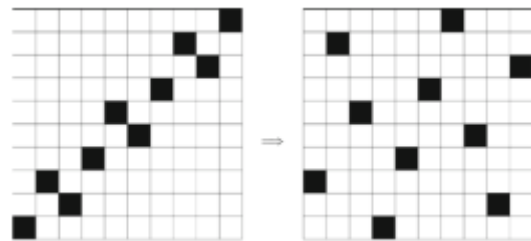
## ۶- پارامترهای طراحی

پارامترهای زیادی روی عملکرد ایندیوسر تاثیر گذار است. در این مطالعه، پارامترهای هندسی مربوط به طراحی پره مورد بررسی قرار می‌گیرد. زاویه ورودی پره، زاویه خروجی پره، موقعیت ورودی پره روی نوک، موقعیت خروجی پره روی تیپ و ضخامت پره، به عنوان پارامترهای هندسی انتخاب شده‌اند. شکل ۸ پارامترهای موقعیت ورودی پره روی تیپ و موقعیت خروجی پره روی تیپ و تغییراتی را نشان می‌دهد که روی پره به وجود می‌آورد.

می‌سازد. دقت پیش‌بینی‌های این مدل‌های جایگزین بستگی به دو عامل، روش انتخاب نمونه‌ها و روش مدل‌سازی بستگی دارد [۱۶].

## ۵-۱- انتخاب نمونه‌ها

هدف کلی از انتخاب نمونه‌ها، یافتن مجموعه‌ای از نقاط فضای طراحی به منظور فهمیدن رفتار کلی تابع است. نمونه‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که تمام ناحیه مورد بررسی پوشش داده شود تا بتواند رفتار کلی تابع را دقیق تخمین بزند، در عین حال انتخاب نمونه‌های بیش از حد نیاز می‌تواند هزینه‌های محاسباتی را افزایش دهد. روش‌های مختلفی برای انتخاب نمونه وجود دارد، در روش هایپرکیوب<sup>۱</sup> لاتین، فضای طراحی به  $N$  شبکه تقسیم می‌شود و مقادیر پارامترهای طراحی به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شوند که تنها یک بار برای کل نمونه‌ها در نظر گرفته شده باشد. با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توان با کمترین تعداد نمونه به بهترین توزیع در فضای طراحی رسید، در اصطلاح به یک طراحی بهینه فضا پرکن<sup>۲</sup> برسیم، برای مثال شکل ۷ یک طراحی اولیه به این روش را نشان می‌دهد که با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی توزیع انتخاب‌ها بهبود پیدا کرده است [۱۷].



شکل ۷- طراحی آزمایش به روش هایپرکیوب لاتین

(۱۰=تعداد نمونه‌ها، ۲=تعداد پارامترها) [۱۷]

## ۵-۲- مدل کریجینگ<sup>۳</sup>

روش کریجینگ به خاطر کاربرد وسیع آن در مسائل بهینه‌سازی به کمک مدل‌سازی بر اساس جانشینی، توجه

<sup>4</sup> Regression

<sup>5</sup> Gaussian Random

<sup>6</sup> Variance

<sup>7</sup> Covariance

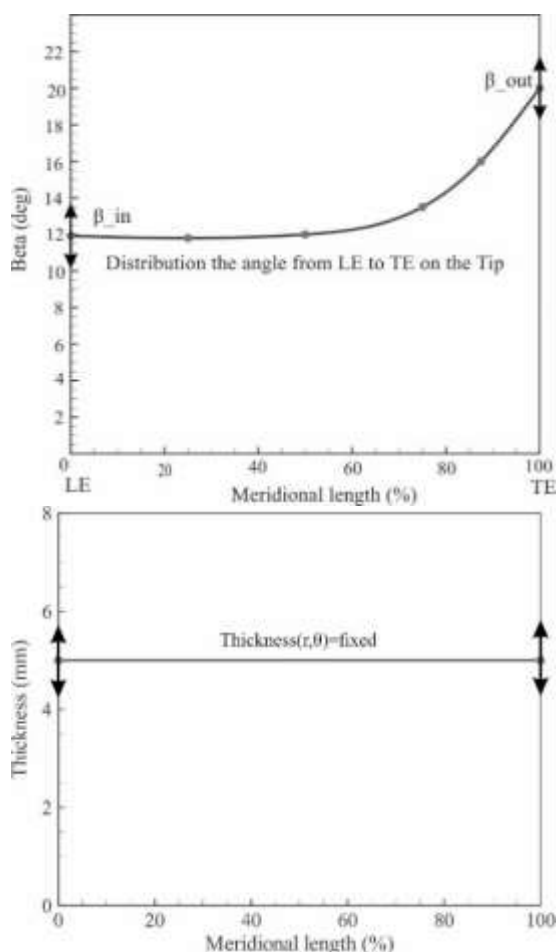
<sup>8</sup> Correlation Function

<sup>9</sup> Exponential

<sup>1</sup> Latin Hypercube

<sup>2</sup> Space Filling

<sup>3</sup> Kriging



شکل ۹- شماتیک پارامترهای زاویه ورودی، زاویه خروجی و ضخامت پره

### ۷- تابع هدف و بهینه‌سازی

بهینه‌سازی چند هدفه به منظور بهینه کردن هم زمان تمامی توابع هدف است. هنگامی که یک تابع هدف بهبود می‌یابد، ممکن است، تابع هدف دیگر کاهش یابد و بالعکس؛ بنابراین، بهبود عملکرد چندین تابع هدف به طور همزمان مشکل است. برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک چند هدفه<sup>۳</sup> بر پایه جبهه پارتو<sup>۴</sup> استفاده شده است. در الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه، تک‌هدفه، یک جمعیت از ژن‌ها در فضای حالت توزیع شده و نتایج شایستگی<sup>۵</sup> آنها ارزیابی می‌شود. سپس بهترین جمعیت

<sup>۳</sup> Multi Objective Genetic Algorithm (MOGA)

<sup>۴</sup> Pareto front

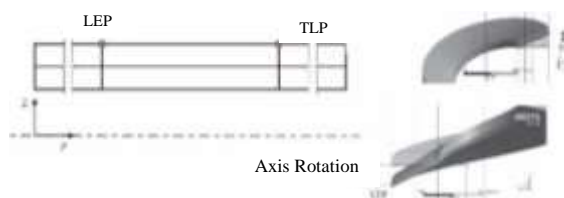
<sup>۵</sup> Fitness

شکل ۹ پارامترهای زاویه ورودی و خروجی و ضخامت پره را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه با داشتن توزیع زاویه پره  $\beta$  روی خط کمبر، می‌توان زاویه پیچش را از رابطه (۱۱) بدست آورد. لازم به ذکر است که توزیع ضخامت در طول پره ثابت فرض شده است [۱۹].

$$\theta = \int_0^{l_0} \frac{1}{\tan\beta \cdot r} \quad (11)$$

$\theta$  زاویه پیچش،  $\beta$  زاویه پره، شعاع خط کمبر و  $l_0$  طول کلی خط کمبر است.

بازه تغییرات پارامترهای طراحی با توجه به شبیه‌سازی‌های اولیه، مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است.



شکل ۸- موقعیت پارامتر ورودی خروجی پره روی تیپ و تغییرات پره با تغییر این پارامترها

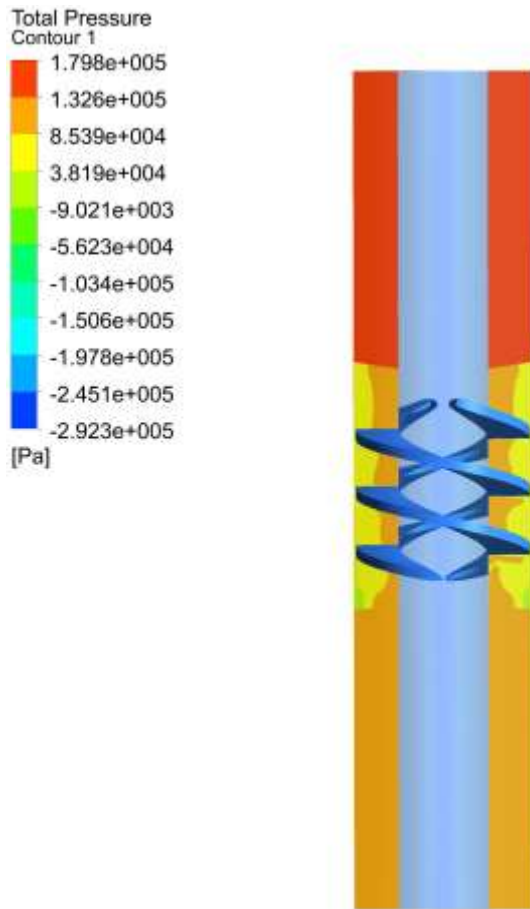
جدول ۳- بازه تغییرات پارامترهای پره

پارامتر	علامت اختصاری	بازه تغییرات
زاویه ورودی پره (deg)	$\beta_{in}$	۴-۱۶
زاویه خروجی پره (deg)	$\beta_{out}$	۱۲-۷۵
موقعیت ورودی پره در نمای نصف النهاری روی تیپ (mm)	$LEP^1$	۱۶۰-۱۷۵
موقعیت ورودی پره در نمای نصف النهاری روی تیپ (mm)	$TEP^2$	۱۶۰-۱۷۵
ضخامت پره (mm)	$Thic$	۳-۶

<sup>۱</sup> Leading Edge Position

<sup>۲</sup> Trailing Edge Position





شکل ۱۰- کانتور توزیع فشار کلی از ورودی تا خروجی ایندیوسر در شرایط تک فاز و  $Q=4000\text{BPD}$

با ایجاد یک فضای طراحی ساخته شده با پنج پارامتر هندسی، علاوه بر آنالیز حساسیت هر کدام از این پارامترها روی هد و بازدهی هیدرولیکی ایندیوسر، اقدام به جستجوی نقاط بهینه در این فضای طراحی نموده ایم و در ادامه نقاط بهینه محاسبه شده مربوط به هر پارامتر مشخص می شوند. شکل ۱۲ هندسه بهینه با استفاده مقادیر پارامترهای بهینه شده را نشان می دهد.

شکل ۱۳ حساسیت هد نسبت به پارامترها را نشان می دهد، زاویه ورودی و ضخامت پره، بیشترین تاثیر را روی هد ایندیوسر می گذارند، علامت منفی حساسیت پارامترهای  $\beta_{in}$ ،  $LEP$ ،  $TEP$  و  $Thic$  نشان می دهد که با افزایش این پارامترها مقدار هد کاهش می یابد، همچنین با افزایش مقدار  $\beta_{out}$  هد ایندیوسر افزایش می یابد.

جمعیت انتخاب می شوند و یک جمعیت جدید تکثیر می شود، با استفاده از عملگرهای جهش<sup>۱</sup> و تقاطع<sup>۲</sup> و انجام تکثیرهای متعدد جمعیت برتر فضای حالت را جستجو می کند. در الگوریتم ژنتیک چند هدفه همین کار تکرار می شود با این تفاوت که تنها یک تابع شایستگی بهینه نمی شود، بلکه چند تابع بهینه می شود. برای این منظور از راه حل بهینه پارتو استفاده می شود [۲۰ و ۲۱].

#### ۷-۱- توابع هدف

هدف از این مطالعه، بیشینه کردن هد و راندمان ایندیوسر است، هد و راندمان ایندیوسر به ترتیب از روابط (۱۲) و (۱۳) بدست می آید:

$$H = \frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho g} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho g \omega} = \frac{\rho g H Q}{T \omega} \quad (13)$$

در آن  $\rho$ ،  $H$ ،  $g$ ،  $Q$ ،  $\omega$ ،  $T$ ،  $\Delta P$ ،  $P_{in}$ ،  $P_{out}$  و  $\dot{m}$  به ترتیب چگالی سیال، شتاب جاذبه، هد، نرخ جریان حجمی، گشتاور وارد بر پره ها، سرعت زاویه ای، تغییرات فشار، فشار ورودی، فشار خروجی، نرخ جریان جرمی است. چگالی برای جریان دو فاز از رابطه (۱۴) محاسبه می شود.

$$\rho = r_1 \rho_1 + r_g \rho_g \quad (14)$$

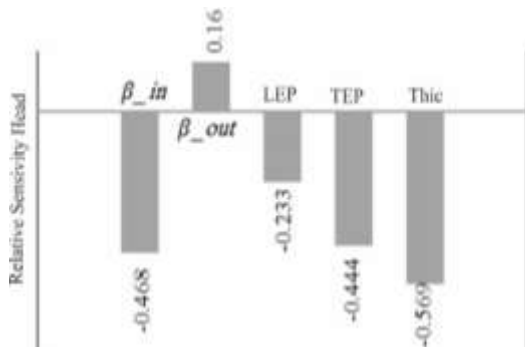
که در آن  $r_1$  کسر حجمی مایع،  $\rho_1$  چگالی مایع،  $r_g$  کسر حجمی گاز،  $\rho_g$  چگالی گاز است.

#### ۸- نتایج

شکل ۱۰ کانتور توزیع فشار کلی از ورودی تا خروجی ایندیوسر را نشان می دهد، همان طور که مشخص است، فشار از ورودی تا خروجی افزایش یافته و به مقدار ثابتی در خروجی ایندیوسر می رسد. شکل ۱۱ کانتور توزیع فاز گاز را نشان می دهد، مشاهده می شود که تجمع فاز گاز در نزدیکی شفت و محور دوران بیشتر است و تجمع فاز مایع در نقاط دور از شفت است که به دلیل اختلاف چگالی فاز مایع و گاز و در نتیجه اختلاف نیروی گریز از مرکز وارد شده به هر فاز است.

<sup>1</sup> Mutation

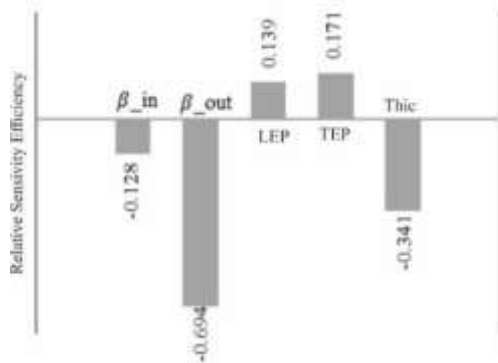
<sup>2</sup> Crossover



شکل ۱۳- آنالیز حساسیت برای پارامترهای انتخابی روی هد

با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، زاویه خروجی، بیشترین تاثیر را روی بازدهی ایندیوسر می‌گذارد، علامت منفی حساسیت پارامترهای  $\beta_{in}$ ،  $\beta_{out}$  و  $Thic$  نشان می‌دهد که با افزایش این پارامترها مقدار بازدهی کاهش و با افزایش مقدار  $LEP$  و  $TEP$  بازده ایندیوسر افزایش می‌یابد.

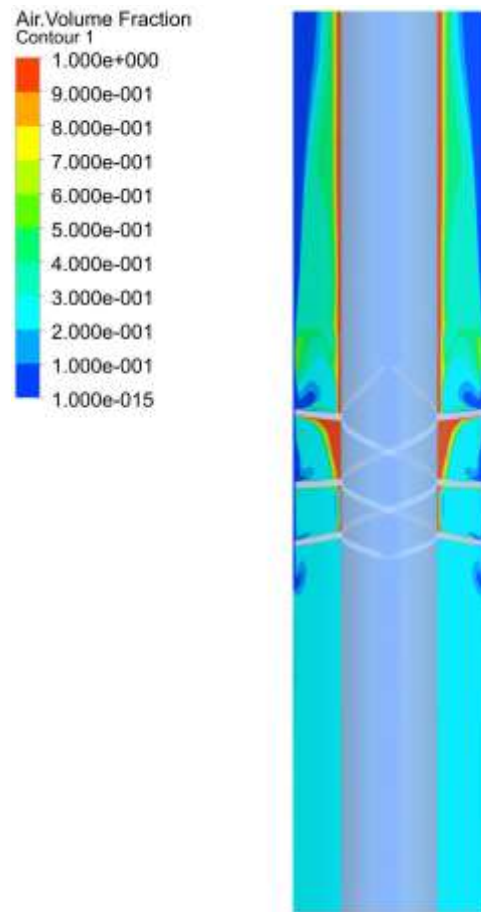
در جدول ۴ مقادیر بهینه مربوط به هر پارامتر با استفاده از روند بهینه‌سازی آورده شده است.



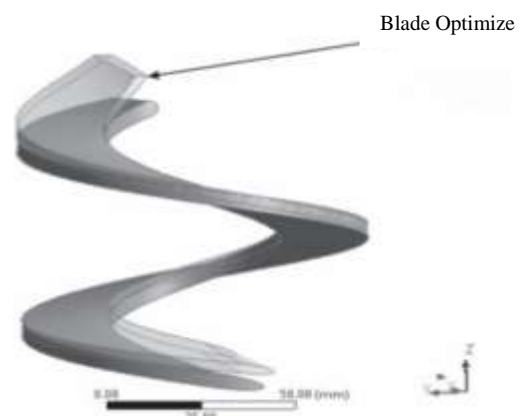
شکل ۱۴- آنالیز حساسیت برای پارامترهای انتخابی روی بازدهی

جدول ۴- مقادیر بهینه پارامترها

$Thic$ (mm)	$TEP$ (mm)	$LEP$ (mm)	$\beta_{out}$ (deg)	$\beta_{in}$ (deg)	
۵	۱۷۰	۱۷۰	۱۲	۱۲	طراحی اولیه
۳/۱	۱۶۳/۸	۱۶۵/۱	۳۷/۹	۸/۸	طراحی بهینه



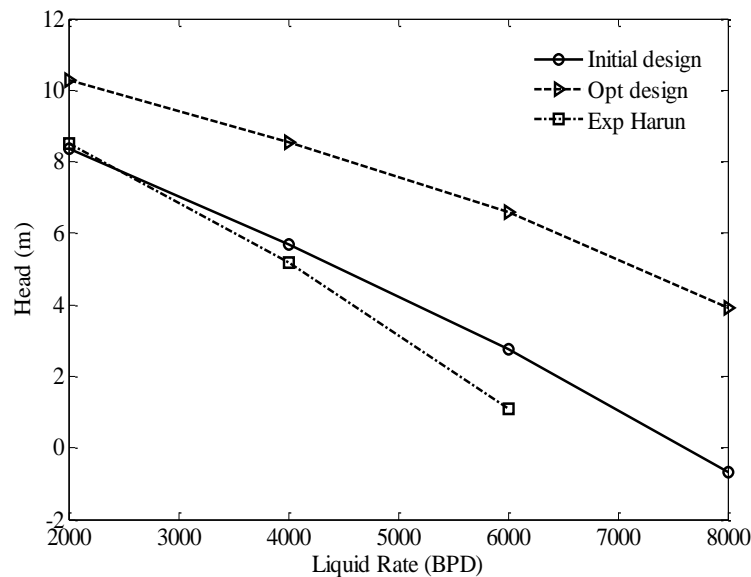
شکل ۱۱- کانتور توزیع کسر حجمی گاز در  $GVF=15\%$  و  $Q=4000\text{BPD}$



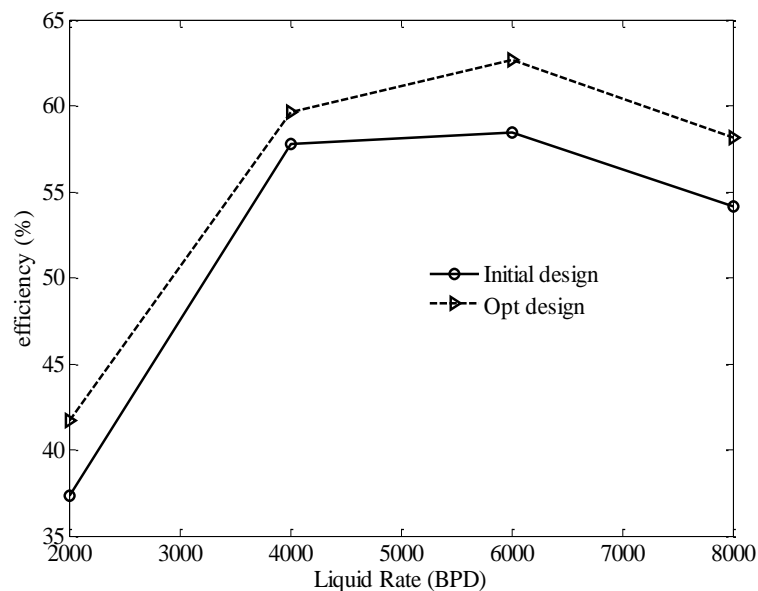
شکل ۱۲- پره بهینه شده ایندیوسر

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ هد و بازدهی ایندیوسر در شرایط تک‌فاز برای طراحی اولیه، بهینه و نتایج بدست آمده توسط هارون را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای دبی‌های بیشتر از ۳۰۰۰ بشکه در روز هر دو طراحی اولیه و بهینه، هد بیشتری نسبت به مطالعه هارون دارند. اختلاف هد هندسه اولیه با نتایج آزمایشگاهی هارون با افزایش دبی زیاد

با استفاده مقادیر بهینه به دست آمده برای هر پارامتر، هندسه را دوباره طراحی می‌کنیم و با استفاده از شبیه‌سازی عددی، مقادیر توابع هدف را محاسبه کرده و با مقادیر بدست آمده از روند بهینه‌سازی برای توابع هدف مقایسه می‌کنیم، با توجه به جدول ۵، درصد خطا برای هد ۳/۲۷ درصد و برای بازدهی ۴/۱۶- درصد است.



شکل ۱۵- هد ایندیوسر برای طراحی اولیه، طراحی بهینه و نتایج آزمایشگاهی هارون در شرایط تک‌فاز



شکل ۱۶- بازده ایندیوسر برای طراحی اولیه، طراحی بهینه در شرایط تک‌فاز

دینامیک سیالات محاسباتی مقادیر توابع هدف برای هر نمونه محاسبه شدند. با استفاده از مدل جانیشینی کریجینگ، رفتار توابع در تمام فضای طراحی پیش‌بینی شدند با به کارگیری الگوریتم ژنتیک چند هدفه نقاط بهینه برای هر پارامتر محاسبه شد.

نتایج بدست آمده از حل عددی هندسه بهینه نشان می‌دهد که روش کریجینگ به خوبی توانسته است، مقادیر توابع هدف را پیش‌بینی کند. با توجه به آنالیز حساسیت پارامتر زاویه ورودی و ضخامت پره، بیشترین تاثیر را روی هد و زاویه خروجی بیشترین تاثیر را روی بازدهی ایندیوسر دارند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که هندسه بهینه در شرایط تک‌فاز و دوفاز هد و راندمان بیشتری دارد.

جدول ۵- مقایسه هد و راندمان هندسه بهینه برای مدل جانیشینی و شبیه‌سازی عددی

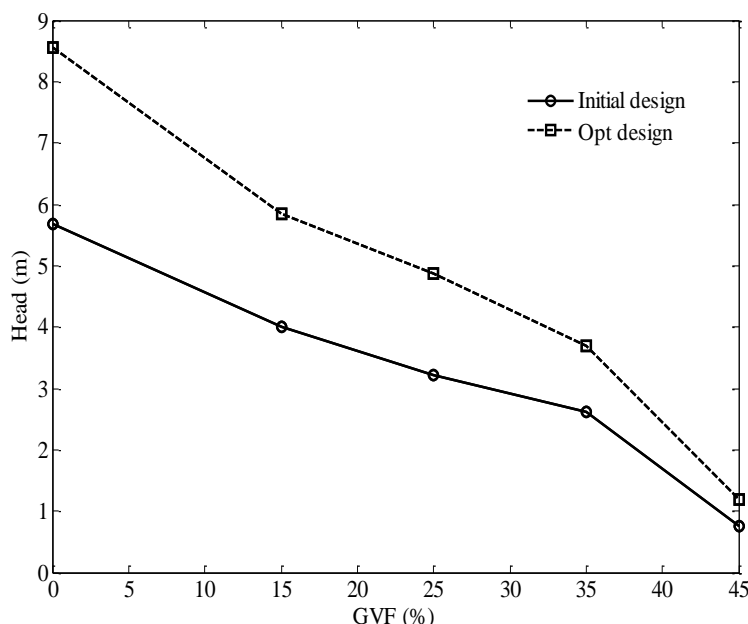
مدل جانیشینی	شبیه‌سازی عددی	خطا (%)
هد	۸/۲۸	۳/۲۷
بازده	۶۲/۲۱	۴/۳۲

می‌شود که به علت شرایط آزمایش تجربی و مجهول بودن بعضی از پارامترهای طراحی هندسه اولیه از جمله، توزیع زاویه روی پره ایندیوسر است. در نقطه طراحی  $Q=4000\text{BPD}$  هد و راندمان به ترتیب  $3/39$  متر و  $1/86$  درصد افزایش یافته است.

شکل ۱۷ هد ایندیوسر در شرایط دو فاز برای هندسه بهینه و هندسه اولیه در کسر حجمی‌های مختلف هوا را نشان می‌دهد همان طور که مشخص است، هندسه بهینه، دارای هد بیشتری در شرایط دوفاز و کسر حجمی‌های مختلف دارد.

### ۹- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بهینه‌سازی ایندیوسر در پمپ‌های دورن چاهی الکتریکی با استفاده از مدل جانیشینی پرداخته شده است. بعد از طراحی اولیه، پارامترهای زاویه ورودی و خروجی روی شroud، موقعیت پره در لبه ورودی و خروجی شroud و ضخامت پره به عنوان پارامترهای طراحی انتخاب شدند. تعداد ۲۷ نمونه اولیه با استفاده از هایپرکیوب لاتین برای فضای طراحی در نظر گرفته شد، به طوری که تمام فضای طراحی را پوشش دهد با استفاده از شبیه‌سازی



شکل ۱۷- هد ایندیوسر برای طراحی اولیه و طراحی در شرایط دوفاز

		۱۰- فهرست علایم
چگالی، $\text{kgm}^{-3}$	$\rho$	
واریانس	$\sigma$	BPD
سرعت زاویه‌ای، $\text{rads}^{-1}$	$\omega$	Cov
	بالانویس‌ها	D
ترانهاده ماتریس	T	F
	زیرنویس‌ها	g
فاز پیوسته	c	GVF
درگ	drag	H
فاز گاز	g	k
ورودی	in	l
نانو سیال	inter.ac	LEP
فاز مایع	l	m
لیفت	lift	$\dot{m}$
خروجی	out	n
پراکندگی توربولانس	t.d	P
جرم مجازی	v.m	Q
روانکاری دیوار	w.l	R
		r
		S
		SST
		t
		TEP
		Thic
		$u_j$
		x
		Y
		y +
		Z
		علایم یونانی
		$\alpha$
		$\beta$
		$\Gamma$
		$\eta$
		$\theta$

## ۱۱- مراجع

- [1] Takacs G (2009) Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance. Gulf Professional Publishing, Burlington, USA.
- [2] d'Agostino L, Vittoria M (2017) Cavitation instabilities and rotordynamic effects in turbopumps and hydroturbines. Springer 575: 65-107.
- [3] Harun AF, Prado MG, Doty DR (2016) Two-phase flow modeling of inducers. Soc Petrol Eng J 126: 140-148.
- [4] Alhanati FJS, Sambangi SR, Doty DR, Schmidt Z (1994) A simple model for the efficiency of rotary separators. Technical Conference and Exhibition held in New Orleans.
- [5] Harun AF, Prado MG, Shirazi SA (2002) An improved model for predicting separation efficiency of a rotary gas separator in ESP systems. Soc Petrol Eng J 1-4.
- [6] Lackner G, Doty DR, Shirazi SA, Schmidt Z (2002) Effect of viscosity on downhole gas separation in a rotary gas separator. Soc Petrol Eng J 28-31.
- [7] Harun AF, Prado MG, Doty DR (2003) Design Optimization of a Rotary Gas Separator in ESP Systems. Conference Production and Operations Symposium held in Oklahoma 22-25.

- [15] Suh J, Kim J, Choi Y, Kim J, Joo W, Lee K (2017) Development of numerical Eulerian-Eulerian models for simulating multiphase pumps. *J Petrol Sci Eng* 1-14.
- [16] Salim SM, Cheah SC (2009) Wall y+ strategy for Dealing with wall-bounded turbulent flows. *Conference of Eng and Computer Scientists*.
- [17] Cavazzuti M (2013) Optimization methods, from theory to design. Berlin Heidelberg, Springer.
- [18] Koziel S, Leifsson L (2013) Surrogate-based modeling and optimization applications in engineering. Springer Verlag New York.
- [19] Lei TAN, Baoshan ZHU, Shuliang CAO, Hao B, Yuming W (2014) Influence of blade wrap angle on centrifugal pump performance by numerical and experimental study. *Chin J Mech Eng* 171-177.
- [20] Zitzler E, Thiele L (1999) Multiobjective evolutionary algorithms : A comparative case study and the strength pareto approach. *IEEE T Evolut Comput* 3(4): 257-271.
- [21] Koziel S, Yang XS (2011) Computational optimization, methods and algorithm. Springer, Berlin, Germany, Vol 356.
- [8] Suarez L, Kenyery F, Asuaje M, Pena M (2005) 3D CFD simulation of rotary gas-separator performance under two-phase-flow condition. *Petroleum Eng Conference*.
- [9] Equipment E (2015) The parametric study of an electrical submersible pump rotary gas separator under two-phase flow condition. *Semi-Annually Energy Equipment And Systems* 3(1): 33-44.
- [10] Gülich JF (2010) Centrifugal pumps. Berlin Heidelberg, Springer.
- [11] Westra RW (2008) Inverse-design and optimization methods for centrifugal pump impellers. PhD Thesis, Department of Mech Eng, Uni of Twente.
- [12] [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/cfx\\_mod/i1345900.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/cfx_mod/i1345900.html).
- [13] ANSYS CFX-15.0 Theory Guide of ANSYS CFX 15.0 ANSYS Inc.
- [14] Frank T, Zwart PJ, Shi JM, Krepper E (2005) Inhomogeneous MUSIG model a population balance approach for polydispersed bubbly flow. *Conference Nuclear Energy for New Europe*.