



# WHITE PAPERS

---

ASK-RD-ENG-032

R&D Department

ARYA SEPEHR KAYHAN (ASK) | SHAHID SALIMI INDUSTRIAL CITY, TABRIZ, IRAN

شرکت آریا سپهر کیهان با نام اختصاری ASK، طراح و تولیدکننده پمپ های گریز از مرکز و روتاری و ارائه دهنده راهکارهای بهینه سازی سیستم های فرایندی و پمپاژ می باشد.

---

## توجه!

مقالات تخصصی با عنوان White Papers جهت افزایش دانش عمومی پمپ ها در بخش تحقیق و توسعه این شرکت نگارش شده است. استفاده از این مقالات رایگان می باشد و لازم است جهت استفاده از محتویات آن به موارد ذیل توجه فرمایید:

- 1- انتشار مجدد مطالب مقالات (به شکل اولیه و بدون تغییر در ساختار محتوایی و ظاهری) با ذکر منبع، بلامانع است.
- 2- استفاده تجاری از محتویات مقالات در نشریات مجاز نمی باشد.

# الگوریتم های طراحی پره

## مقدمه

هدف از این مقاله ارائه ی الگوریتمی است که به وسیله ی آن پره ی یک پمپ با عملکرد مشخص در نقطه ی بهینه، طراحی شود. به منظور درک بهتر مراحل طراحی پره، روند آن با حل یک مثال شرح داده شده است. مثال حل شده طراحی پره ای است که در نقطه ی بهترین عملکرد، نفت خام سبک را با دبی  $Q = 100 \frac{m^3}{hr}$  و هد  $H = 30m$  در دور موتور  $n = 1450 rpm$  پمپاژ کند. شایان ذکر است که چگالی نفت خام سبک  $840 \frac{kg}{m^3}$  است.

روش طراحی مبتنی بر متن کتاب لازارکوویچ

کتاب پمپ های پروانه ای در سال ۱۹۶۵ توسط لازارکوویچ نوشته شده است. این کتاب یکی از کتب مرجع در طراحی اجزای هیدرولیکی پمپ های پروانه ای می باشد و سالیان متمادی است که به عنوان مرجع طراحان و مهندسين پمپ به کار می رود. مبنای طراحی کتاب بر اساس کتاب استپانوف می باشد. شیوه ی مبتنی بر این کتاب، تاکید بر معرفی هندسه ی مناسب برای پره دارد و به همین دلیل از فرض های ساده ساز بسیاری استفاده کرده است.<sup>[1]</sup> الگوریتم مطرح شده در زیر برگرفته از پایان نامه ی کارشناسی جناب آقای مهندس رسول پایدار نوبخت با عنوان «برنامه ی کامپیوتری برای طراحی پروانه ی پمپ های سانتریفیوژ با خروجی قابل استفاده در CNC» می باشد.<sup>[2]</sup>

**گام اول) محاسبه ی سرعت مخصوص :**

رابطه ی سرعت مخصوص به صورت زیر است:

$$n_{sQ} = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

برای پره مذکور :

$$n_{sQ} = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}} = \frac{1450 \sqrt{100 \times \frac{1}{3600}}}{30^{\frac{3}{4}}} = 18.85$$

**گام دوم) تعیین بازده هیدرولیکی:**

رابطه ی تقریبی بازده هیدرولیکی به صورت زیر است:<sup>[2]</sup>

$$\eta_h = 1 - \frac{0.8}{Q^{0.25}}$$

که در رابطه ی فوق دبی بر حسب گالن در دقیقه است.

برای پره مذکور:

$$\eta_h = 1 - \frac{0.8}{Q^{0.25}} = 1 - \frac{0.8}{440.3^{0.25}} = 0.825$$

**گام سوم) تعیین بازده کل:**

با تقریب خوبی می توان بازده کل را مربع بازده هیدرولیکی دانست. یعنی:

$$\eta = \eta_h^2$$

برای پره ی مذکور:

$$\eta = \eta_h^2 = 0.825^2 = 0.68$$

**گام چهارم) تعیین بازده حجمی:**

برای محاسبه ی بازده حجمی نیاز به مقدار بازده مکانیکی است. می توان فرض کرد که بازده مکانیکی ثابت و مستقل از شرایط کارکرد پمپ است.  $\eta_m = 0.98$  مقدار ثابت مناسبی است. رابطه ی بازده حجمی برابر است با:

$$\eta_v = \frac{\eta_h}{\eta_m}$$

برای پره ی مذکور:

$$\eta_v = \frac{\eta_h}{\eta_m} = \frac{0.825}{0.98} = 0.842$$

**گام پنجم) محاسبه ی قدرت موتور:**

برای محاسبه ی قدرت موتور ابتدا باید قدرت شفت تعیین شود. قدرت شفت بر حسب اسب بخار متریک از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$P_{sh} = \frac{\gamma Q H}{750 \eta}$$

برای پره مذکور:

$$P_{sh} = \frac{\gamma Q H}{750 \eta} = \frac{8240.4 \times \frac{1}{36} \times 30}{750 \times 0.68} = 13.46 \text{ (hp – metric)}$$

حال با استفاده از رابطه ی زیر و توان شفت می توان توان موتور را تعیین کرد:

$$P_{motor} = 1.25 P_{sh}$$

برای پره مذکور:

$$P_{motor} = 1.25P_{sh} = 1.25 \times 13.46 = 16.83 \text{ (hp - metric)}$$

گام ششم) تعیین کمترین قطر شفت مجاز:

در سیستم SI قطر شفت بر اساس تئوری بیشترین تنش برشی در حالی که محور تنها تحت پیچش ثابت باشد به طریق زیر محاسبه می شود:

$$d_{sh} = \sqrt[3]{\frac{32n_d}{\pi S_y} (3T^2)^{\frac{1}{2}}}$$

از طرفی  $T = \frac{P}{\omega}$  و ضریب اطمینان ۲/۵ مناسب است. با توجه به جنس خار (ASTM A-276)  $S_y = 450 \text{ MPa}$

پس از ساده سازی های مختلف و اعمال پارامترهای مربوط به جنس شفت حداقل قطر شفت از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$(d_{sh})_{min} = 0.01 \sqrt[3]{\frac{P_{motor}}{n}}$$

که در رابطه ی فوق توان بر حسب وات است. لذا برای پره مذکور:

$$(d_{sh})_{min} = 0.01 \sqrt[3]{\frac{P_{motor}}{n}} = 0.01 \sqrt[3]{\frac{12378.4}{1450}} = 20.4 \text{ mm} \approx 21 \text{ mm}$$

گام هفتم) تعیین قطر هاب متناظر با کمترین قطر شفت مجاز:

قطر هاب ضریبی از قطر شفت است که با رابطه ی زیر به دست می آید:

$$d_{hub} = 1.35 d_{sh}$$

که برای پره مذکور:

$$d_{hub} = 1.35 d_{sh} = 1.35 \times 21 = 28.35 \text{ mm} \approx 29 \text{ mm}$$

گام هشتم) تعیین نرخ جریان پروانه:

جریان پروانه تابعی از دبی جریان و بازده حجمی است:

$$Q' = \frac{Q}{\eta_v}$$

برای پره مذکور:

$$Q' = \frac{Q}{\eta_v} = \frac{100}{0.842} = 118.7 \frac{m^3}{hr}$$

**گام نهم) تعیین ضرایب سرعت شعاعی:**

نمودار هایی برای به دست آوردن مقدار ضرایب بر حسب سرعت مخصوص ارائه شده است. در مرجع [2] جهت سهولت کار این نمودارها به صورت روابطی ارائه شده است:

$$10 < n_{sQ} < 70 \rightarrow K_{cm1} = e^{(0.4765 \ln n_{sQ} - 3.41)}, K_{cm2} = e^{(0.52 \ln n_{sQ} - 3.8121)}$$

$$70 < n_{sQ} < 290 \rightarrow K_{cm1} = e^{(0.511 \ln n_{sQ} - 3.557)}, K_{cm2} = e^{(0.752 \ln n_{sQ} - 3.8)}$$

با توجه مقدار سرعت مخصوص در پره مذکور، برای محاسبه ی ضرایب سرعت شعاعی از روابط دسته ی اول استفاده می شود:

$$n_{sQ} = 18.85 \rightarrow K_{cm1} = e^{(0.4765 \ln n_{sQ} - 3.41)} = 0.1339$$

$$n_{sQ} = 18.85 \rightarrow K_{cm2} = e^{(0.52 \ln n_{sQ} - 3.8121)} = 0.1018$$

**گام دهم) تعیین سرعت های شعاعی:**

سرعت های شعاعی در ورودی پره و خروجی آن با استفاده از ضرایب به دست آمده از گام قبلی قابل محاسبه است:

$$C_{m1} = K_{cm1} \sqrt{2gH}$$

$$C_{m2} = K_{cm2} \sqrt{2gH}$$

برای پره مذکور :

$$C_{m1} = K_{cm1} \sqrt{2gH} = 0.1339 \sqrt{2 \times 9.81 \times 30} = 3.25 \frac{m}{s}$$

$$C_{m2} = K_{cm2} \sqrt{2gH} = 0.1018 \sqrt{2 \times 9.81 \times 30} = 2.47 \frac{m}{s}$$

**گام یازدهم) تعیین سرعت در چشمی:**

سرعت در چشمی و یا به عبارت دیگر سرعت در هنگام ورودی به پروانه متناسب است با سرعت شعاعی ورودی پره:

$$C_0 = 0.9 C_{m1}$$

برای پره مذکور :

$$C_0 = 0.9 C_{m1} = 0.9 \times 3.25 = 2.925 \frac{m}{s}$$

**گام دوازدهم) تعیین سطح آزاد چشمی:**

سطح آزاد چشمی از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$A_0 = \frac{Q'}{C_0}$$

برای پره مذکور:

$$A_0 = \frac{Q'}{C_0} = \frac{118.7}{\frac{3600}{2.925}} = 0.0113 \text{ m}^2$$

**گام سیزدهم) تعیین سطح هاب:**

با در دست داشتن قطر هاب که در گام هفتم به دست آمد، تعیین سطح هاب با رابطه ی زیر صورت می پذیرد:

$$A_h = \frac{\pi d_h^2}{4}$$

برای پره مذکور:

$$A_h = \frac{\pi d_h^2}{4} = \frac{\pi(29 \times 10^{-3})^2}{4} = 6.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

**گام چهاردهم) تعیین سطح کل مقطع عرضی:**

سطح کل مقطع عرضی مجموع سطح هاب و سطح چشمه می باشد :

$$A'_0 = A_0 + A_h$$

برای پره مذکور:

$$A'_0 = A_0 + A_h = 0.0113 + 0.00066 = 0.01196 \text{ m}^2$$

**گام پانزدهم) تعیین قطر چشمی:**

در گام پیش سطح کل مقطع عرضی به دست آمد که با استفاده از آن قطر چشمی به دست می آید:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4A'_0}{\pi}}$$



برای پره مذکور:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4A_0'}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.01196}{\pi}} = 0.1234 \text{ m}$$

گام شانزدهم) تعیین قطر ورودی روتور:

اگر فرض شود که پره کمی به جلو کشیده شده باشد (یعنی *extended forward* باشد)، قطر ورودی روتور با قطر ورودی چشمی متناسب است:

$$d_1 = 0.9d_0$$

برای پره مذکور:

$$d_1 = 0.9d_0 = 0.9 \times 0.1234 = 111 \text{ mm}$$

گام هفدهم) تعیین سرعت محیطی ورودی:

سرعت محیطی ورودی، سرعتی خطی است که از دوران پره حاصل می شود و مقدار آن از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$u_1 = \frac{\pi d_1 n}{60}$$

برای پره مذکور:

$$u_1 = \frac{\pi d_1 n}{60} = \frac{\pi \times 0.111 \times 1450}{60} = 8.43 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

گام هجدهم) تعیین زاویه ورودی پره ی اولیه:

با فرض اینکه جریان ورودی به صورت محوری می باشد ( $\alpha = 90^\circ$ )، مقدار زاویه ی ورودی پره به صورت زیر به دست می آید:

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{C_{m1}}{u_1}$$

برای پره ی مذکور:

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{C_{m1}}{u_1} = \tan^{-1} \frac{3.25}{8.43} = 21.08^\circ \approx 21^\circ$$

### گام نوزدهم) تعیین زاویه ورودی پره ثانویه (تصحیح شده):

برای به دست آوردن دبی خروجی مورد نیاز باید زاویه پره  $\beta_1$  را افزایش داد. این افزایش با تنظیم زاویه ی حمله ( $\delta_1$ ) امکان پذیر است. هر قدر پره کوتاه تر باشد، زاویه ی حمله بزرگتری انتخاب می شود. همچنین با افزایش زاویه ی  $\beta_1$  دبی مکش پمپ و بازده افزایش می یابد. بنابر این زاویه ی ورودی ثانویه (تصحیح شده) از مجموع زاویه ی ورودی اولیه و زاویه ی حمله به دست می آید:

$$\beta'_1 = \beta_1 + \delta_1$$

زاویه ی حمله معمولا در بازه ی ۲ تا ۶ درجه انتخاب می شود. برای پره ی مذکور زاویه ی حمله را ۳ درجه انتخاب می کنیم. پس زاویه ی ورودی پره تصحیح شده برابر خواهد بود با:

$$\beta'_1 = \beta_1 + \delta_1 = 21 + 3 = 24^\circ$$

### گام بیستم) تعیین زاویه ی خروجی پره:

برای پمپ های سانتریفیوژ با سرعت مخصوص نه چندان زیاد، زاویه ی خروجی پره مقداری ثابت بین ۱۵ تا ۳۵ درجه انتخاب می شود. برای پره ی مذکور مقدار ثابت ۲۵ درجه انتخاب می شود.

### گام بیست و یکم) تعیین زاویه ی ورودی پره نهایی

زاویه ی ورودی پره نهایی از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\tan \beta'' = \tan(\beta_1 + \delta_1) \times \cos \varepsilon_1$$

که در آن  $\varepsilon_1$  زاویه ی بین سرعت شعاعی و مولفه ی شعاعی سرعت نسبی است و معمولا برابر با زاویه ی خروجی پره در نظر گرفته می شود. با توجه به این نکته که همواره کسینوس کوچکتر از ۱ است، زاویه ی ورودی پره نهایی همواره کوچکتر از زاویه ی ورودی پره اصلاح شده به دست می آید برای پره ی مذکور:

$$\tan \beta'' = \tan(\beta_1 + \delta_1) \times \cos \varepsilon_1 = \tan(24) \times \cos 25 = 21.97^\circ \approx 22^\circ$$

### گام بیست و دوم) تعیین تعداد پره، اندازه ی قطر خروجی روتور و سرعت محیطی خروجی

با توجه به وابستگی مقدار سه پارامتر معرفی شده، برای به دست آوردن مقدار آنها باید سه معادله ی زیر را به صورت همزمان حل کرد:

$$u_2 = \frac{c_{m2}}{2 \tan \beta_2} + \sqrt{\left(\frac{c_{m2}}{2 \tan \beta_2}\right)^2 + \frac{gH}{\eta_h} \left(1 + 1.2 \frac{(1+\frac{\beta_2}{60})}{z} \times \frac{1}{1-\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2}\right)}$$

$$z = 6.5 \left(\frac{d_1+d_2}{d_2-d_1}\right) \sin\left(\frac{\beta_2+\beta'_1}{2}\right)$$

$$d_2 = \frac{60u_2}{\pi n}$$

با توجه به غیر خطی بودن یکی از معادلات، حل دستی این دستگاه دشوار است و توصیه می شود با استفاده از روش آزمون و خطا یا با استفاده از کدهای کامپیوتری این دستگاه حل شود. همچنین باید توجه داشت که تعداد پره ها عدد صحیحی می باشد. پس تعداد پره به دست آمده از حل این دستگاه باید به نزدیک ترین عدد صحیح مجاور تبدیل شده و مقادیر ، اندازه ی قطر خروجی روتور و سرعت محیطی خروجی متناظر آن دوباره به دست آید. لازم به ذکر است تعداد پره های مناسب معمولاً بین ۵ تا ۷ عدد است.

برای پره ی مذکور بعد از حل معادلات فوق تعداد پره ها ۵/۴۵ دست می آید که با تغییر آن به ۶ پاسخ های زیر حاصل می شود:

$$z = 6, u_2 = 22 \frac{m}{s}, d_2 = 291.3 \text{ mm} \approx 292 \text{ mm}$$

### گام بیست و سوم) تعیین گام ورودی پره ها

گام پره ها فاصله ی محیطی آنها از یکدیگر است. لذا با تقسیم محیط ورودی بر تعداد پره ها گام به دست می آید:

$$t_1 = \frac{\pi d_1}{z}$$

برای پره مذکور:

$$t_1 = \frac{\pi d_1}{z} = \frac{\pi \times 111}{6} = 58.12 \text{ mm}$$

### گام بیست و چهارم) تعیین ضخامت تصویر شده ی پره ها در ورودی:

برای به دست آوردن ضخامت تصویر شده ی پره ها باید ابتدا ضخامت پره ها را مشخص کرد و سپس با استفاده از رابطه ی زیر مقدار تصویر شده ی آن را به دست آورد:

$$S_{u1} = \frac{s_1}{\sin \beta_1}$$

برای پره ی مذکور با انتخاب ضخامت ۵ میلیمتر داریم:

$$S_{u1} = \frac{s_1}{\sin \beta_1} = \frac{5}{\sin 21} = 13.8 \text{ mm}$$

### گام بیست و پنجم) تعیین ضریب فشردگی در ورودی

به نسبت گام پره ها به اختلاف گام و تصویر ضخامت پره ضریب فشردگی می گویند. یعنی :

$$\varphi_1 = \frac{t_1}{t_1 - s_{u1}}$$

برای پره ی مذکور:

$$\varphi_1 = \frac{t_1}{t_1 - s_{u1}} = \frac{58.12}{58.12 - 13.8} = 1.3$$

**گام بیست و ششم) محاسبه ی مساحت ورودی**

از قانون پیوستگی مساحت ورودی استخراج می شود:

$$A_1 = \varphi_1 \frac{Q'}{c_{m1}}$$

برای پره ی مذکور:

$$A_1 = \varphi_1 \frac{Q'}{c_{m1}} = 1.3 \times \frac{\frac{118.7}{3600}}{3.25} = 0.0133 \text{ m}^2$$

**گام بیست و هفتم) محاسبه ی پهنای روتور در ورودی**

با استفاده از مساحت ورودی به دست آمده و با دانستن قطر ورودی روتور، رابطه ی محاسبه ی پهنای روتور به شرح زیر است:

$$b_1 = \frac{A_1}{\pi d_1}$$

برای پره ی مذکور:

$$b_1 = \frac{A_1}{\pi d_1} = \frac{0.0133}{0.111\pi} = 38.1 \text{ mm} \approx 38 \text{ mm}$$

**گام بیست و هشتم) محاسبه ی ضخامت تصویر شده ی پره ها، ضریب فشردگی و ضخامت در خروجی:**

با استفاده از روابط بیان شده در گام های گذشته و تغییر اندیس نها می توان به روابطی برای محاسبه ی مقادیر مذکور دست یافت.

این روابط به شرح زیر است:

$$s_{u2} = \frac{s_2}{\sin \beta_2}$$

$$\varphi_2 = \frac{t_2}{t_2 - s_{u2}}$$

$$t_2 = \frac{\pi d_2}{z}$$

برای پره مذکور:

$$s_{u2} = \frac{s_2}{\sin \beta_2} = \frac{5}{\sin 25} = 11.83 \text{ mm}$$

$$t_2 = \frac{\pi d_2}{z} = \frac{292\pi}{6} = 152.9 \text{ mm}$$

$$\varphi_2 = \frac{t_2}{t_2 - s_{u2}} = \frac{152.9}{152.9 - 11.83} = 1.08$$

گام بیست و نهم) محاسبه ی مساحت خروجی

مساحت خروجی نیز مانند مساحت ورودی محاسبه می شود:

$$A_2 = \varphi_2 \frac{Q'}{c_{m2}}$$

برای پره مذکور:

$$A_2 = \varphi_2 \frac{Q'}{c_{m2}} = 1.08 \times \frac{\frac{118.7}{3600}}{2.47} = 0.0145 \text{ m}^2$$

گام سی ام) محاسبه ی پهنای خروجی

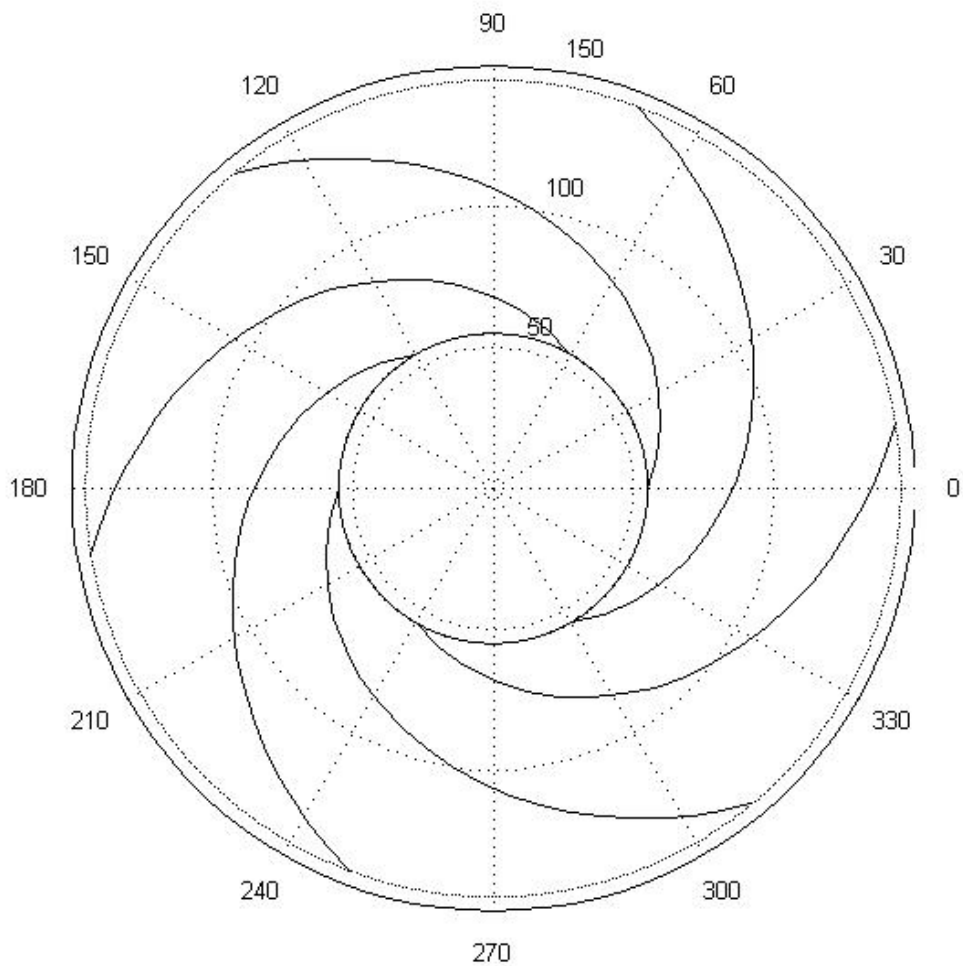
پهنای خروجی نیز مانند پهنای ورودی محاسبه می شود:

$$b_2 = \frac{A_2}{\pi d_2}$$

برای پره ی مذکور:

$$b_2 = \frac{A_2}{\pi d_2} = \frac{0.0145}{0.2913\pi} = 15.8 \text{ mm} \approx 16 \text{ mm}$$

اکنون پره ی مورد نظر طراحی شده است. در شکل ۱ تصویر پره ی طراحی شده مشاهده می شود.



شکل ۱

### روش طراحی مبتنی بر متن کتاب گولیچ

کتاب پمپ های سانتریفیوژ نوشته ی یوهان فردریش گولیچ در سال ۲۰۰۷ توسط انتشارات اشپرینگر چاپ شد. همانطور که انتظار می رود با توجه به سال انتشار این کتاب، به جزئیات هیدرولیکی بیشتری نسبت به کتب پیشین توجه شده است و طراحی بر اساس آن بار علمی بیشتری دارد. بر اساس روش توصیه شده ی این کتاب نرم افزار طراحی CFTurbo برنامه نویسی شده است که نقش مهمی در طراحی پره در دنیای پمپ ایفا می کند.

شایان ذکر است که این روش، روشی مبتنی بر آزمون و خطا می باشد. به همین دلیل در گام های مختلف طراحی مقادیر پارامترهای متعددی حدس زده می شود و در پایان پروسه ی طراحی پمپ صحت آن ارزیابی می شود.<sup>[3]</sup>

## گام اول) محاسبه ی سرعت مخصوص

رابطه ی سرعت مخصوص به صورت زیر است:

$$n_{sQ} = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

برای پره مذکور :

$$n_{sQ} = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}} = \frac{1450 \sqrt{100 \times \frac{1}{3600}}}{30^{\frac{3}{4}}} = 18.85$$

## گام دوم) محاسبه ی بازده ها

برای محاسبه ی بازده ها ابتدا باید مقدار  $m$  که عاملی توانی در محاسبات بازده است را مشخص کرد. رابطه ی  $m$  برای بازده کل و بازده تئوری قابل دستیابی برابر است با:

$$m = 0.1a \left(\frac{Q_{ref}}{Q}\right)^{0.15} \left(\frac{45}{n_q}\right)^{0.06}$$

که در آن  $a$  ثابتی است که به مقدار دبی حجمی وابسته است. همچنین در عبارت فوق  $Q_{ref}$  دبی حجمی مرجع است و برابر است با ۱ متر مکعب بر ثانیه.

برای پره ی مذکور با توجه مقدار دبی ( $Q=0.028 \frac{m^3}{s}$ ) ثابت  $a$  برابر با ۱ است. پس:

$$m = 0.1a \left(\frac{Q_{ref}}{Q}\right)^{0.15} \left(\frac{45}{n_q}\right)^{0.06} = 0.1 \left(\frac{1}{0.028}\right)^{0.15} \left(\frac{45}{18.85}\right)^{0.06} = 0.18$$

حال با معلوم بودن مقدار  $m$  و با توجه به مقدار سرعت مخصوص می توان بازده کل و بازده تئوری قابل را از روابط زیر محاسبه کرد:

$$\eta_{opt} = 1 - 0.095 \left(\frac{Q_{ref}}{Q}\right)^m - 0.3 \left[0.35 - \log \frac{n_q}{23}\right]^2 \left(\frac{Q_{ref}}{Q}\right)^{0.05}$$

$$\eta_{ther} = \eta_{opt} + 0.35 \left(\frac{Q_{ref}}{Q}\right)^{0.08} (1 - \eta_{opt})$$

برای پره ی مذکور:

$$\eta_{opt} = 1 - 0.095 \left(\frac{Q_{ref}}{Q}\right)^m - 0.3 \left[0.35 - \log \frac{n_q}{23}\right]^2 \left(\frac{Q_{ref}}{Q}\right)^{0.05} = 1 - 0.095 \left(\frac{1}{0.028}\right)^{0.18} - 0.3 \left[0.35 - \log \left(\frac{18.85}{23}\right)\right]^2 \left(\frac{1}{0.028}\right)^{0.05} = 0.75$$

$$\eta_{ther} = \eta_{opt} + 0.35 \left( \frac{Q_{ref}}{Q} \right)^{0.08} (1 - \eta_{opt}) = 0.75 + 0.35 \left( \frac{1}{0.028} \right)^{0.08} (1 - 0.75) = 0.866$$

برای محاسبه ی بازده هیدرولیکی باید  $m$  را از رابطه ی زیر محاسبه کرد:

$$m = 0.08a \left( \frac{Q_{ref}}{Q} \right)^{0.15} \left( \frac{45}{n_q} \right)^{0.06}$$

برای پره ی مذکور:

$$m = 0.08a \left( \frac{Q_{ref}}{Q} \right)^{0.15} \left( \frac{45}{n_q} \right)^{0.06} = 0.08 \left( \frac{1}{0.028} \right)^{0.15} \left( \frac{45}{18.85} \right)^{0.06} = 0.144$$

با در دست داشتن  $m$  مناسب توان هیدرولیکی از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\eta_h = 1 - 0.055 \left( \frac{Q_{ref}}{Q} \right)^m - 0.2 \left[ 0.26 - \log \frac{n_q}{25} \right]^2 \left( \frac{Q_{ref}}{Q} \right)^{0.1}$$

برای پره ی مذکور:

$$\eta_h = 1 - 0.055 \left( \frac{Q_{ref}}{Q} \right)^m - 0.2 \left[ 0.26 - \log \frac{n_q}{25} \right]^2 \left( \frac{Q_{ref}}{Q} \right)^{0.1} = 1 - 0.055 \left( \frac{1}{0.028} \right)^{0.144} - 0.2 \left[ 0.26 - \log \frac{18.85}{25} \right]^2 \left( \frac{1}{0.028} \right)^{0.1} = 0.866$$

بازده حجمی از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + Q_h + Q_{sp} + Q_E}$$

که در آن  $Q_h$  ناشتی از ادوات جانبی،  $Q_{sp}$  ناشتی از آب بند در ورودی پره و  $Q_E$  ناشتی از قطعه ی بالانس کننده ی نیروی تراست است.

ناشتی ادوات جانبی به دلیل ناچیز بودن قابل صرف نظر است. ناشتی از آب بند در ورودی پره از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$Q_{sp} = Q_{opt} \left( \frac{aZ_H}{n_q} \right)$$

که در آن  $a$  و  $m$  دو ثابت هستند که با توجه به سرعت مخصوص محاسبه می شوند. برای پره ی مذکور با توجه به سرعت مخصوص آن:

$$a = 4.1, m = 1.6$$

$Z_H$  ضریبی است که بسته به نوع بالانس پره (با استفاده از حفره یا غیر آن) تعریف می شود. پره ی مذکور در حالت بالانس با وجود حفره فرض می شود. لذا  $Z_H=2$ . پس برای پره ی مذکور:



$$Q_{sp} = Q_{opt} \left( \frac{aZ_H}{n_m^3} \right) = 100 \left( \frac{4.1 \times 2}{18.85^{1.6}} \right) = 7.47 \approx 7.5 \frac{m^3}{hr}$$

نشستی از قطعه ی بالانس کننده ی نیروی تراست مقداری نامعلوم دارد. به همین دلیل معمولاً مقدار آن را تقریباً برابر نشستی از آب بند در ورودی پره تخمین می زنند. لذا برای پره ی مذکور:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + Q_h + Q_{sp} + Q_E} = \frac{100}{100 + 0 + 7.5 + 7.5} = 0.87$$

### گام سوم) تعیین حداقل قطر شفت

برای تعیین قطر شفت نیاز به محاسبه ی توان و انتخاب تنش تسلیم برشی آن می باشد. توان از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$P_{sh} = \frac{\gamma Q H}{750 \eta_{opt}} \text{ (hp - metric)}$$

که برای پره مذکور:

$$P_{sh} = \frac{\gamma Q H}{750 \eta} = \frac{8142.3 \times \frac{1}{36} \times 30}{750 \times 0.75} = 12.06 \text{ (hp - metric)} = 8870 \text{ W}$$

حداقل قطر شفت از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$d_{sh_{min}} = 3.65 \sqrt[3]{\frac{P}{n \tau_{all}}}$$

با انتخاب  $ASTM A-276$ ،  $\tau_{all} = 45 MPa$  به دست می آید. برای پره مذکور:

$$d_{sh_{min}} = 3.65 \sqrt[3]{\frac{P}{n \tau_{all}}} = 3.65 \sqrt[3]{\frac{8870}{1450 \times 45 \times 10^6}} = 18.7 \text{ mm} \approx 19 \text{ mm}$$

### گام چهارم) تعیین قطر خروجی روتور

برای تعیین قطر خروجی روتور ابتدا باید ضریب هد را از رابطه ی زیر به دست آورد:

$$\Psi_{opt} = 1.21 e^{-\frac{0.77 n_q}{n_{q_{ref}}}}$$

که در آن  $n_{q_{ref}}$  سرعت مخصوص مرجع بوده و برابر است با ۱۰۰. برای پره ی مذکور:

$$\Psi_{opt} = 1.21 e^{-\frac{0.77 n_q}{n_{q_{ref}}}} = 1.21 e^{-\frac{0.77 \times 18.85}{100}} = 1.046$$

اکنون می توان با رابطه ی زیر قطر خروجی روتور را محاسبه کرد:

$$d_2 = \frac{8.46}{n} \sqrt{\frac{H_{opt}}{\Psi_{opt}}}$$

برای پره مذکور:

$$d_2 = \frac{84.6}{n} \sqrt{\frac{H_{opt}}{\Psi_{opt}}} = \frac{8.46}{1450} \sqrt{\frac{30}{1.046}} = 312.5 \text{ mm} \approx 313 \text{ mm}$$

### گام پنجم) انتخاب تعداد پره

به دلایل زیادی که بیان آن خارج از حوصله ی این متن است، برای پره هایی با سرعت مخصوص  $10 < n_q < 120$  تعداد پره های مناسب بین ۵ تا ۷ عدد است. تعداد ۶ پره برای این مسئله انتخاب می شود.

### گام ششم) محاسبه ی قطر ورودی روتور

قطر ورودی روتور با توجه به معیارهای مختلفی قابل طراحی است. مهمترین این معیارها مقدار  $NPSH_0$ ، کمینه کردن سرعت نسبی در ورودی و طراحی بر اساس سرعت مخصوص مکش مورد نظر است. در این طراحی معیار کمینه کردن سرعت در ورودی که متضمن کاهش اصطکاک و در نتیجه افزایش بازده است، مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از طی عملیات بهینه سازی از روش پایه گرادبانی، عبارت زیر برای محاسبه ی قطر ورودی روتور به دست می آید:

$$d_1 = d_2 \times f_{d1} \times \sqrt{\left(\frac{d_n}{d_2}\right)^2 + 1.5 \times 10^{-3} \times \Psi_{opt} \times \frac{n_q^{1.33}}{\delta_r^{0.67}}}$$

که در آن  $d_n$  قطر هاب،  $f_{d1}$  ضریب قطر ورودی و  $\delta_r$  عدد چرخش است. قطر هاب متناسب با قطر شفت است:

$$d_n = 1.35d_{sh}$$

ضریب  $f_{d1}$  با توجه به نوع پره و  $\delta_r$  با استفاده از رابطه ی زیر تعیین می شود:

$$\delta_r = 1 - \frac{c_{1m}}{u_{1m} \tan \alpha_1}$$

برای پره ی مورد نظر با انتخاب قطر کمینه ی شفت قطر هاب به دست می آید:

$$d_n = 1.35d_{sh} = 1.35 \times 19 = 25.65 \text{ mm} \approx 26 \text{ mm}$$

ضریب  $f_{d1}$  با توجه به پره ی نرمال و سرعت مخصوص ۱/۱۳ انتخاب می شود. همچنین با فرض کردن محوری بودن جریان ورودی عدد چرخش برابر واحد می شود. پس:

$$d_1 = d_2 \times f_{d1} \times \sqrt{\left(\frac{d_n}{d_2}\right)^2 + 1.5 \times 10^{-3} \times \Psi_{opt} \times \frac{n_q^{1.33}}{\delta_r^{0.67}}} = 313 \times 1.13 \times \sqrt{\left(\frac{26}{313}\right)^2 + 1.5 \times 10^{-3} \times 1.046 \times 18.85^{1.33}} = 103 \text{ mm}$$

## گام هفتم) محاسبه ی قطر ورودی روتور در خط جریان داخلی

با توجه به سرعت مخصوص کم پره ی مذکور قطر ورودی روتور در خط جریان داخلی تقریباً برابر با قطر ورودی روتور در نظر گرفته می شود.

## گام هشتم) تعیین زوایای ورودی پره

برای به دست آوردن زوایای ورودی پره، ابتدا باید سرعت های ورودی را تعیین کرد. روابط سرعت ورودی برابرند با:

سرعت جانبی:

$$u_1 = \frac{\pi d_1 n}{60}$$

مولفه ی مریدیونالی سرعت مطلق:

$$c_{1m} = \frac{QLa}{\frac{\pi}{4}(d_1^2 - d_n^2)}$$

مولفه ی جانبی سرعت مطلق:

$$c_{1u} = \frac{c_{1m}}{\tan \alpha_1}$$

سرعت نسبی:

$$w_1 = \sqrt{c_{1m}^2 + (u_1 - c_{1u})^2}$$

برای پره مذکور:

$$u_1 = \frac{\pi d_1 n}{60} = \frac{\pi \times 103 \times 10^{-3} \times 1450}{60} = 7.82 \frac{m}{s}$$

$$c_{1m} = \frac{QLa}{\frac{\pi}{4}(d_1^2 - d_n^2)} = \frac{\frac{115}{3600}}{\frac{\pi}{4}(103^2 - 26^2) \times 10^{-6}} = 4.09 \frac{m}{s}$$

$$c_{1u} = \frac{c_{1m}}{\tan \alpha_1} = 0$$

$$w_1 = \sqrt{c_{1m}^2 + (u_1 - c_{1u})^2} = \sqrt{4.09^2 + 7.82^2} = 8.82 \frac{m}{s}$$

حال با مقادیر سرعت به دست آمده به محاسبه ی مقادیر زاویه ای می پردازیم. روابط زیر به همین منظور معرفی می شوند:

ضریب جریان:

$$\varphi_1 = \frac{c_{1m}}{u_1}$$

زاویه جریان ورودی بی انسداد:

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{c_{1m}}{u_1 - c_{1u}}$$

انسداد پروانه:

$$\tau_1 = \left( 1 - \frac{Z_{1a} e_1}{\pi d_1 \sin \beta_{1B} \sin \lambda_{La}} \right)^{-1}$$

زاویه ی جریان ورودی با انسداد:

$$\beta'_1 = \tan^{-1} \frac{c_{1m} \tau_1}{u_1 - c_{1u}}$$

زاویه ی ورودی پره با زاویه ی حمله  $i'$ :

$$\beta_{1B} = \beta'_1 + i'$$

همانطور که از روابط فوق مشخص است برای محاسبه ی انسداد پروانه نیاز به مقدار زاویه ی ورودی پره و در نتیجه زاویه ی جریان ورودی با انسداد است و بالعکس. لذا تنها راه محاسبه ی مقادیر فوق روش آزمون و خطا می باشد. پیش از هر چیز دو مقدار اول که بی نیاز به آزمون و خطاست محاسبه می شود:

$$\varphi_1 = \frac{c_{1m}}{u_1} = \frac{4.09}{7.82} = 0.52$$

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{c_{1m}}{u_1 - c_{1u}} = \tan^{-1} \frac{4.09}{7.82} = 27.55^\circ$$

که مقداری نسبتاً زیاد است. برای کاهش این زاویه باید قطر ورودی پره را کمی زیاد کنیم مقدار قطر داخلی را ۱۱۰ میلیمتر انتخاب می کنیم:

$$d_1 = 110 \text{ mm} \rightarrow u_1 = 8.35 \frac{m}{s} \rightarrow c_{1m} = 3.55 \frac{m}{s} \rightarrow \varphi_1 = 0.42 \rightarrow \beta_1 = 23^\circ$$

حال مقدار به دست آمده مناسب می باشد. باید سه رابطه ی زیر را به صورت همزمان حل نمود:

$$\tau_1 = \left( 1 - \frac{Z_{La} e_1}{\pi d_1 \sin \beta_{1B} \sin \lambda_{La}} \right)^{-1}$$

$$\beta'_1 = \tan^{-1} \frac{c_{1m} \tau_1}{u_1 - c_{1u}}$$

$$\beta_{1B} = \beta'_1 + i'$$

در روابط فوق  $e_1$  ضخامت پره در ورودی است و مقداری آن باید از رابطه ی زیر پیروی کند:

$$0.016 < \frac{e_1}{d_2} < 0.22 \text{ \& } \min(e) = 5 \text{ mm}$$

برای پره ی مذکور:

$$5 < e_1 < 68.75 \text{ mm}$$

با توجه به عبارت فوق ضخامت پره در ورودی را ۵ میلیمتر انتخاب می کنیم.

$\lambda L a$  زاویه ی پره با شروود است و مقدار آن ۹۰ درجه انتخاب می شود.  $i'$  زاویه ی حمله است و در بازه ی ۰ تا ۴ درجه باید انتخاب شود. با این توضیحات فرآیند آزمون و خطا را آغاز می کنیم:

حدس اول)

$$\beta_{1B} = 32^\circ \rightarrow \tau_1 = \left(1 - \frac{6 \times 0.005}{\pi \times 0.11 \times \sin 32^\circ \times \sin 90^\circ}\right)^{-1} = 1.19 \rightarrow \beta'_1 = \tan^{-1} \frac{3.55 \times 1.19}{8.35} = 26.8^\circ$$

$$\rightarrow i' = \beta_{1B} - \beta'_1 = 5.2^\circ \text{ غیرقابل قبول}$$

حدس دوم)

$$\beta_{1B} = 30^\circ \rightarrow \tau_1 = \left(1 - \frac{6 \times 0.005}{\pi \times 0.11 \times \sin 30^\circ \times \sin 90^\circ}\right)^{-1} = 1.21 \rightarrow \beta'_1 = \tan^{-1} \frac{3.55 \times 1.25}{8.35} = 27.2^\circ$$

$$\rightarrow i' = \beta_{1B} - \beta'_1 = 2.8^\circ \checkmark$$

### گام نهم) تعیین پهنای خروجی

تعداد پره ها، قطر خروجی روتور و پهنای خروجی پارامترهایی هستند که نمی توان آنها را جداگانه محاسبه کرد. وابستگی های بسیاری بین این سه پارامتر وجود دارد که از حوصله ی این مقاله خارج است. در عمل نمی توان تمامی این وابستگی ها را لحاظ کرد و به همین دلیل پهنای خروجی از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$b_2 = d_2 \left( 0.017 + 0.262 \frac{n_q}{n_{qref}} - 0.08 \left( \frac{n_q}{n_{qref}} \right)^2 + 0.0093 \left( \frac{n_q}{n_{qref}} \right)^3 \right)$$

که در این رابطه سرعت مخصوص مرجع ۱۰۰ می باشد. برای پره ی مذکور:

$$b_2 = d_2 \left( 0.017 + 0.262 \frac{n_q}{n_{qref}} - 0.08 \left( \frac{n_q}{n_{qref}} \right)^2 + 0.0093 \left( \frac{n_q}{n_{qref}} \right)^3 \right) = 313 \left( 0.017 + 0.262 \frac{18.85}{100} - 0.08 \left( \frac{18.85}{100} \right)^2 + 0.0093 \left( \frac{18.85}{100} \right)^3 \right) = 19.9 \text{ mm} \approx 20 \text{ mm}$$

### گام دهم) تعیین زوایای خروجی

زاویه خروجی پروانه های شعاعی با ۵ تا ۷ پره، معمولا در محدوده بین ۱۵ تا ۴۵ درجه میباشند. در بسیاری از موارد، زوایای بین ۲۰ تا ۲۷ درجه انتخاب میشوند تنظیم زوایای خروجی و پهنای خروجی، یک عمل بهینه سازی است که در خلال رعایت ملزومات کرائی و پایداری نمودار Q-H باید مد نظر قرار گیرد. یک معیار ممکن، کمینه کردن زاویه انحراف است که بیشتر از ۱۰ تا ۱۴ درجه نباید باشد. این عمل جهت جلوگیری و محدود ساختن افت های اغتشاشی ناشی از توزیع غیر یکنواخت جریان می باشد.

قبل از هر چیز باید سرعت ها در خروجی پره مشخص شوند. روابط زیر به همین منظور معرفی می شوند:

سرعت جانبی:

$$u_2 = \frac{\pi d_2 n}{60}$$

مولفه مریدیونالی سرعت مطلق:

$$c_{2m} = \frac{Q_{LA}}{\pi d_2 b_2}$$

مولفه جانبی سرعت مطلق:

$$c_{2u} = u_2 \left( \gamma - \frac{c_{2m} \tau_2}{u_2 \tan \beta_{2B}} \right)$$

مولفه جانبی سرعت مطلق:

$$w_{2u} = u_2 - c_{2u}$$

که در آن  $\gamma$  ضریب خطا بوده و از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\gamma = 0.98 \left( 1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_{2B}}}{Z_{La}^{0.7}} \right) k_w$$

$k_w$  ضریب اثر قطر ورودی پروانه بر ضریب خطا است و طبق رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$k_w = 1 - \left( \frac{d_1 - \varepsilon_{lim}}{1 - \varepsilon_{lim}} \right)^3$$

$\varepsilon_{lim}$  برابر است با:

$$\varepsilon_{lim} = \exp\left(\frac{-8.16 \sin \beta_{1B}}{Z_{La}}\right)$$

شایان ذکر است که اگر  $\frac{d_1}{d_2} > \varepsilon_{lim}$  آنگاه  $k_w = 1$ .

ضریب جریان خروجی پره برابر است با:

$$\varphi_{2La} = \frac{c_{2m}}{u_2}$$

زاویه ی خروجی بدون انسداد از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \frac{c_{2m}}{c_{2u}}$$

زاویه ی خروجی نسبی بی انسداد از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{c_{2m}}{w_{2u}}$$

زاویه ی خروجی نسبی با انسداد از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\beta'_2 = \tan^{-1} \frac{c_{2m} \tau_2}{w_{2u}}$$

که در آن انسداد پروانه از رابطه ی زیر قابل محاسبه است:

$$\tau_2 = \left( 1 - \frac{Z_{1a} e_2}{\pi d_2 \sin \beta_{2B} \sin \lambda_{La}} \right)^{-1}$$

در نتیجه زوایای انحراف عبارتند از:

$$\delta' = \beta_{2B} - \beta'_2$$

$$\delta = \beta_{2B} - \beta_2$$

بعد از محاسبه ی زوایای خروجی، هد محاسبه می شود تا تعیین شود هد مورن نظر تامین می شود یا خیر. هد از رابطه ی زیر قابل محاسبه است:

$$H = \frac{\eta_h u_2^2}{g} \left( \gamma - \frac{Q_{LA}}{\pi b_2 d_2 u_2 \tan \beta_{2B}} \left( \tau_2 + \frac{\pi b_2 d_1 \tan \beta_{2B}}{A_1 \tan \alpha_1} \right) \right)$$

برای پره ی مذکور فرض می کنیم ضخامت در خروجی پره ۶ میلیمتر باشد. همچنین:

$$u_2 = \frac{\pi d_2 n}{60} = \frac{\pi \times 0.313 \times 1450}{60} = 23.7 \frac{m}{s}$$

$$c_{2m} = \frac{Q_{LA}}{\pi d_2 b_2} = \frac{\frac{115}{3600}}{\pi \times 0.313 \times 0.02} = 1.62 \frac{m}{s}$$

$$\varphi_{2La} = \frac{c_{2m}}{u_2} = \frac{1.62}{23.7} = 0.068$$

فرآیند آزمون و خطا به شرح زیر است:

حدس اول)

$$\beta_{2B} = 35^\circ \rightarrow \tau_2 = 1.06 \rightarrow \varepsilon_{lim} = 0.46 \rightarrow \frac{d_1}{d_2} < \varepsilon_{lim} \rightarrow k_w = 1 \rightarrow \gamma = 0.768 \rightarrow$$

$$c_{2u} = u_2 \left( \gamma - \frac{c_{2m}\tau_2}{u_2 \tan \beta_{2B}} \right) = 23.7 \times \left( 0.768 - \frac{1.62 \times 1.06}{23.7 \times \tan 35} \right) = 15.7 \frac{m}{s}$$

$$w_{2u} = u_2 - c_{2u} = 23.7 - 15.7 = 8 \frac{m}{s}$$

$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{c_{2m}}{w_{2u}} = \tan^{-1} \frac{1.62}{8} = 11.4^\circ$$

$$\beta'_2 = \tan^{-1} \frac{c_{2m}\tau_2}{w_{2u}} = \tan^{-1} \frac{1.62 \times 1.06}{8.2} = 11.8^\circ$$

$$\delta' = \beta_{2B} - \beta'_2 = 35 - 11.8 = 23.2^\circ \text{ غیرقابل قبول}$$

$$\delta = \beta_{2B} - \beta_2 = 35 - 11.4 = 23.6^\circ \text{ غیرقابل قبول}$$

حدس دوم)

$$\beta_{2B} = 25^\circ \rightarrow \tau_2 = 1.09 \rightarrow \varepsilon_{lim} = 0.56 \rightarrow \frac{d_1}{d_2} < \varepsilon_{lim} \rightarrow k_w = 1 \rightarrow \gamma = 0.8 \rightarrow$$

$$c_{2u} = u_2 \left( \gamma - \frac{c_{2m}\tau_2}{u_2 \tan \beta_{2B}} \right) = 23.7 \times \left( 0.8 - \frac{1.62 \times 1.09}{23.7 \times \tan 25} \right) = 15.1 \frac{m}{s}$$

$$w_{2u} = u_2 - c_{2u} = 23.7 - 15.1 = 8.6 \frac{m}{s}$$

$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{c_{2m}}{w_{2u}} = \tan^{-1} \frac{1.62}{8.6} = 10.6^\circ$$

$$\beta'_2 = \tan^{-1} \frac{c_{2m}\tau_2}{w_{2u}} = \tan^{-1} \frac{1.62 \times 1.09}{8.6} = 12.2^\circ$$

$$\delta' = \beta_{2B} - \beta'_2 = 25 - 12.2 = 12.8^\circ$$

$$\delta = \beta_{2B} - \beta_2 = 25 - 10.6 = 14.4^\circ \text{ غفقی}$$

حدس سوم)

$$\beta_{2B} = 23^\circ \rightarrow \tau_2 = 1.1 \rightarrow \varepsilon_{lim} = 0.59 \rightarrow \frac{d_1}{d_2} < \varepsilon_{lim} \rightarrow k_w = 1 \rightarrow \gamma = 0.8 \rightarrow$$

$$c_{2u} = u_2 \left( \gamma - \frac{c_{2m}\tau_2}{u_2 \tan \beta_{2B}} \right) = 23.7 \times \left( 0.8 - \frac{1.62 \times 1.12}{23.7 \times \tan 23} \right) = 14.7 \frac{m}{s}$$

$$w_{2u} = u_2 - c_{2u} = 23.7 - 14.7 = 9 \frac{m}{s}$$

$$w_2 = \sqrt{c_{2m}^2 + w_{2u}^2} = 9.14 \frac{m}{s}$$



$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{c_{2m}}{w_{2u}} = \tan^{-1} \frac{1.62}{9} = 10.2^\circ$$

$$\beta'_2 = \tan^{-1} \frac{c_{2m}\tau_2}{w_{2u}} = \tan^{-1} \frac{1.62 \times 1.1}{9.6} = 11.3^\circ$$

$$\delta' = \beta_{2B} - \beta'_2 = 23 - 11.3 = 11.7^\circ$$

$$\delta = \beta_{2B} - \beta_2 = 23 - 10.2 = 12.8^\circ$$

حال هد قابل دستیابی محاسبه می شود:

$$H = \frac{\eta_h u_2^2}{g} \left( \gamma - \frac{Q_{LA}}{\pi b_2 d_2 u_2 \tan \beta_{2B}} \left( \tau_2 + \frac{\pi b_2 d_1 \tan \beta_{2B}}{A_1 \tan \alpha_1} \right) \right) = \frac{0.866 \times 23.7^2}{9.81} \left( 0.8 - \frac{0.032 \times 1.12}{\pi \times 0.02 \times 0.313 \times 23.7 \times \tan 23^\circ} \right) = 30.7 \text{ m}$$

### گام یازدهم) تعیین ضخامت پره

با توجه به محاسبات فوق ضخامت پره در ورودی ۵ و در خروجی ۶ میلیمتر تعیین می شود.

### گام دوازدهم) تعیین پروفیل لبه ی حمله ی پره

پروفیل لبه ی حمله ی نامناسب سبب تولید سرعت بیش از اندازه و متناسب با آن پیک های کم فشار بسیار قوی می شوند که سبب آسیب رسانی در پدیده کاویتاسیون شده و حتی میتواند بر روی کارایی نیز تاثیر بگذارد. طراحی لبه حمله به صورت نیم دایره ای تنها برای پمپهای بسیار کوچک کاربرد دارد و در دیگر پمپها نامطلوب می باشد. پروفیل ورودی بیضوی، شکل توزیع فشار مناسبی را فراهم می آورد. در صورتی که پروفیل بیضوی در یک مسیر کوتاه گسترده شود، حساسیت پره ها به زاویه حمله بالا، کمتر می شود.

در مقابل، پروفیلهای گوه شکل بلند، تنها در ورودی های بدون شوک خوب عمل می کنند زیرا که سرعتهای بالا در جریانهای حمله ای تولید می شوند. پروفیلهای بلند و نازک گوه ای شکل، با توجه به کیفیت ریخته گری (شکسته شدن پره به دلیل سرد شدن سریع پروفیلهای نازک) و در پارامترهایی مثل مقاومت و ریسک شکستن پره نامناسب می باشند.

با توجه به توضیحات فوق پروفیل لبه ی حمله، بیضوی انتخاب می شود.

### گام سیزدهم) تعیین پروفیل لبه ی فرار پره

ضخامت پره تا انتهای لبه ی فرار به صورت کامل شکل داده شود تا امکان کاهش هد از بین برود. همچنین از پروفیل خارجی به دلیل کاهش هزینه ها چشم پوشی شود.

### گام چهاردهم) تعیین بار پره ها و طول آن

بار هیدرودینامیکی وارد بر هر پره از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\xi_{eff} = \frac{2\pi \Psi_{opt} d_2 u_2}{\eta_h Z_{La} L_{sch} (w_1 + w_2)}$$

که در آن  $L_{sch}$  طول پره می باشد. برای پره ی مذکور:

$$\xi_{eff} = \frac{2\pi \Psi_{opt} d_2 u_2}{\eta_h Z_{La} L_{sch} (w_1 + w_2)} = \frac{2\pi \times 1.046 \times 0.313 \times 23.7}{0.866 \times 6 \times L_{sch} \times (7.88 + 9.14)} = \frac{0.55}{L_{sch}}$$

محدوده ی بار مجاز روی هر پره با توجه به سرعت مخصوص و سرعت مخصوص مرجع (برابر با ۴۰) از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\xi_{all} = \left( \frac{n_{qref}}{n_q} \right)^{0.77}$$

که برای پره ی مذکور:

$$\xi_{all} = \left( \frac{n_{qref}}{n_q} \right)^{0.77} = \left( \frac{40}{18.85} \right)^{0.77} = 1.785$$

جهت کاهش نوسانات فشار و نیروهای محرک هیدرولیکی (تحریک کننده)، پیشنهاد می شود که بار پره ها معمولا ۱۰ درصد کمتر از میزان بار مجاز انتخاب شود. برای پره ی مذکور:

$$\frac{0.55}{L_{sch}} = 0.9 \times 1.785 = 1.6065 \rightarrow L_{sch} = 342.3 \text{ mm} \approx 343 \text{ mm}$$

### گام پانزدهم) تعیین مساحت گلوگاه

با توجه به مباحث ذکر شده، زوایای پره و سطح مقطع کانال جهت جریان خواسته شده باید با یکدیگر مطابقت داشته باشند. در نقطه ی طراحی کاهش نسبت بردار سرعت نسبی  $w_1$  به سرعت جریان میانگین  $w_{1q}$  در مساحت گلوگاه، نباید زیاد بزرگ باشد. همچنین با توجه به کاویتاسیون در دبی های بالا، مواردی چون شتاب نیز باید تحت کنترل باشد. با توجه به ارزیابی پمپهای در حال کارکرد، مساحت گلوگاه باید طوری انتخاب شود که نسبت  $\frac{w_{1q}}{w_1}$  در نقطه ی بهترین کارایی با جریان ورودی محوری در محدوده بین ۰/۷۵ تا ۰/۸۵ باشد.

برای پره ی مذکور:

$$\frac{w_{1q}}{w_1} = 0.8 \rightarrow w_{1q} = 0.8 \times 7.88 = 6.3 \frac{m}{s}$$

$$w_{1q} = \frac{Q_{La}}{A_{1q} \times Z_{La}} \rightarrow A_{1q} = \frac{0.032}{6.3 \times 6} = 0.00085 \text{ m}^2$$

### گام شانزدهم) تعیین فاصله ی پره ها در خروجی

برای به دست آوردن فاصله ی پره ها در خروجی باید ابتدا گام پره ها را از رابطه ی زیر محاسبه کرد:

$$t_2 = \frac{\pi d_2}{Z_{La}}$$

سپس با استفاده از مقدار به دست آمده زاویه  $\beta_{a2}$  را محاسبه نموده و مقدار آن را در نامساوی زیر به گذاشت تا محدوده ی مجاز فاصله ی پره ها در خروجی به دست آید:

$$0.7 < \frac{\sin \beta_{a2}}{\sin \beta_{2B}} < 0.9$$

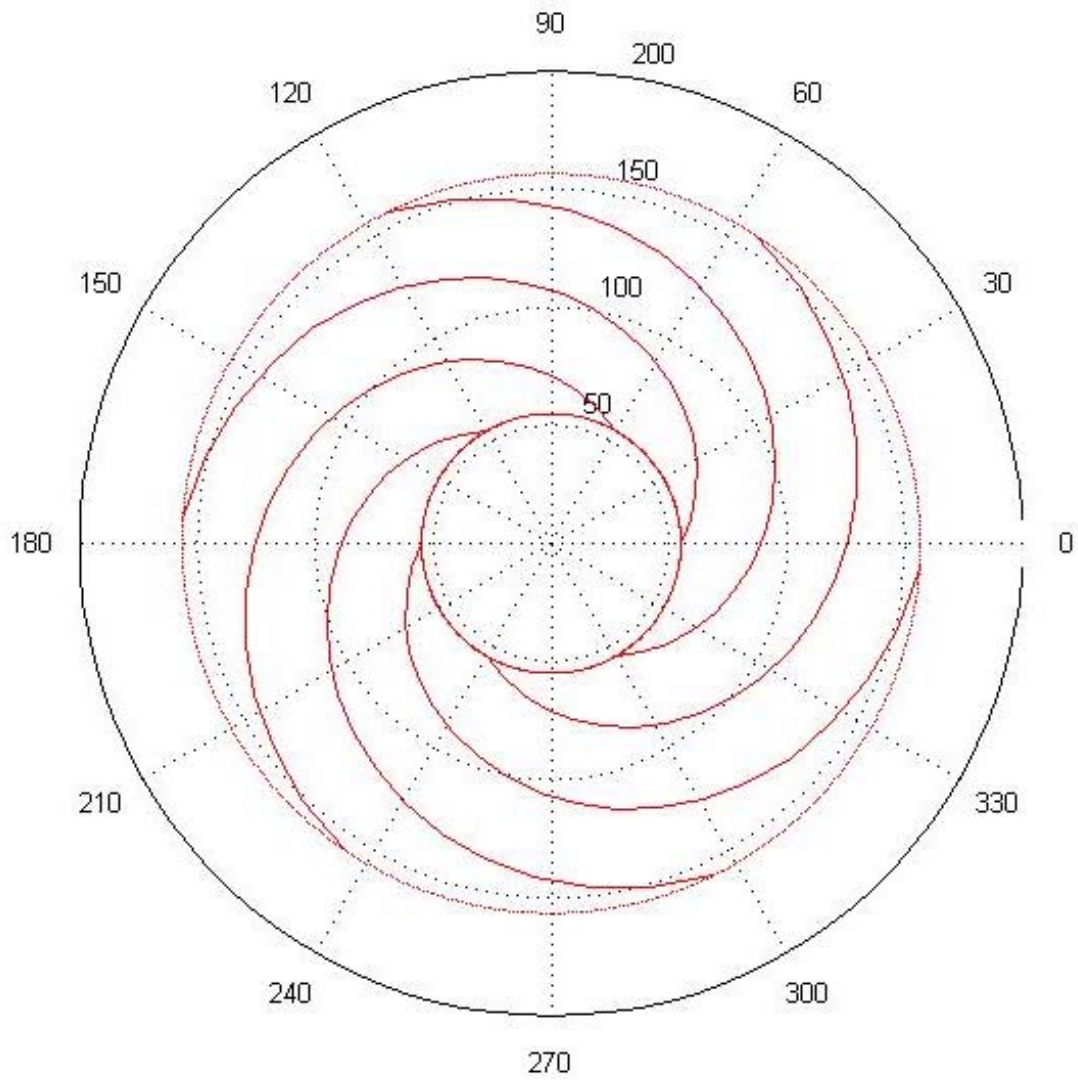
برای پره ی مذکور:

$$t_2 = \frac{\pi d_2}{Z_{La}} = \frac{\pi \times 0.313}{6} = 0.1639 \text{ m}$$

$$\sin \beta_{a2} = \frac{a_2}{t_2} = \frac{a_2}{0.1639}$$

$$0.7 < \frac{\sin \beta_{a2}}{\sin \beta_{2B}} < 0.9 \rightarrow 0.7 < \frac{a_2}{\frac{0.1639}{\sin 24}} < 0.9 \rightarrow 0.0466 < a_2 < 0.06 \xrightarrow{\text{اختیاری}} a_2 = 53 \text{ mm}$$

اکنون پره ی مورد نظر طراحی شده است. در شکل ۲ تصویر پره ی طراحی شده مشاهده می شود.



شکل ۲

## مقایسه ی دو پره ی طراحی شده از دو روش

جدول ۱

پارامتر	پره لازارکویچ	پره گولیچ
قطر داخلی روتور (mm)	111	110
قطر خارجی روتور (mm)	292	313
نسبت قطرها	2.63	2.84
زاویه ی ورودی پره	22	23
زاویه ی خروجی پره	25	23
تعداد پره	6	6
گام پره در ورودی (mm)	58.12	57.57
گام پره در خروجی (mm)	152.55	163.9
پهنای پره در خروجی (mm)	16	20
بازده هیدرولیکی	82.5%	86.6%
بازده حجمی	84.2%	87%
بازده کل	68%	75%

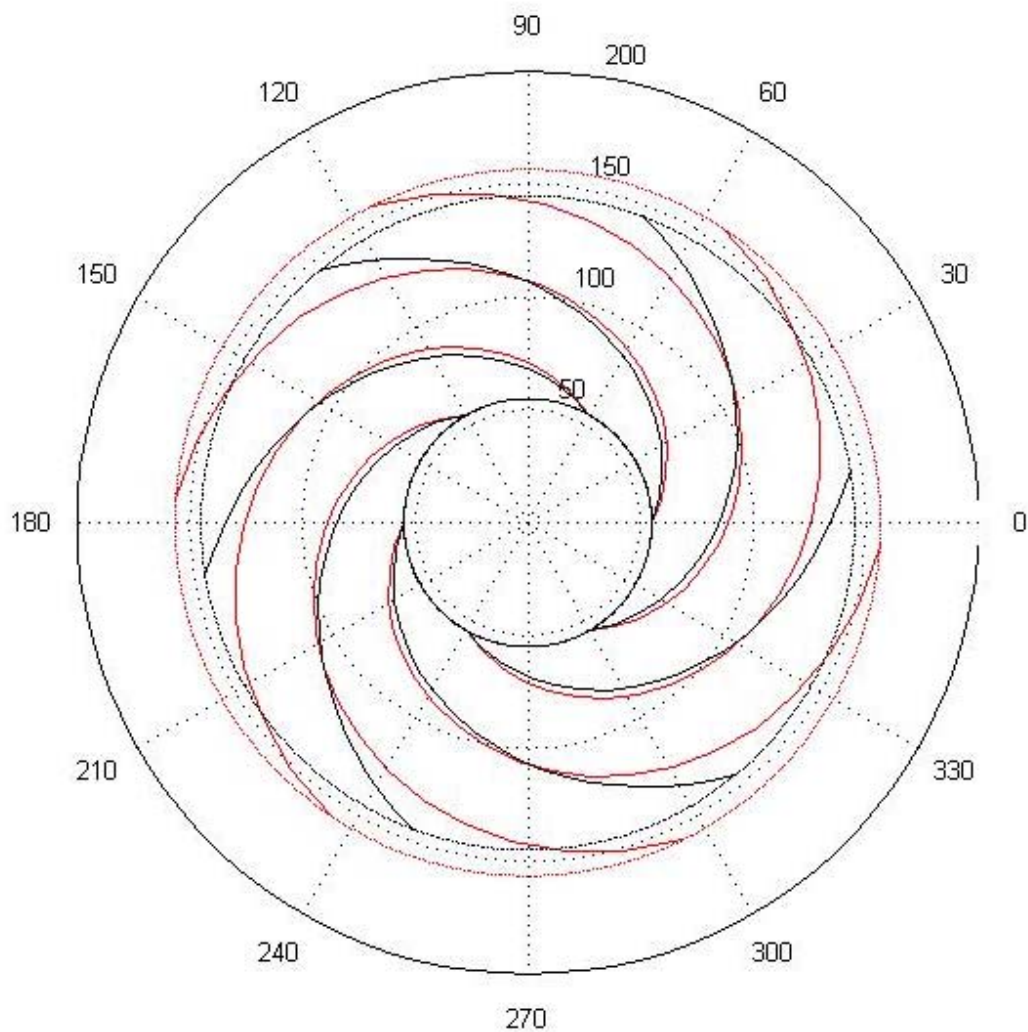
در شکل ۳ پره ی طراحی شده از روش لازارکویچ با رنگ مشکی و پره ی طراحی شده از روش گولیچ با رنگ قرمز نشان داده شده است.

طراحی پره توسط نرم افزار CFTurbo

دو روش برای طراحی پره با استفاده از نرم افزار CFTurbo وجود دارد:

۱. طراحی اتوماتیک: در این روش، مشخصات مورد نیاز را پمپ مانند هد، دبی، دور موتور و ... را به نرم افزار داده می شود. بعد از مشخص کردن مقادیر فوق، دیگر لازم به انجام هیچ کاری نیست و خود نرم افزار با توجه به مفروضات خود پره ای را معرفی می کند.
۲. طراحی مرحله به مرحله: در این روش، باید در هر مرحله پارامترهای مختلف پره محاسبه و به نرم افزار داده شود. پروفیل پره ی ارائه شده در نرم افزار نتیجه ی پارامترهای معرفی شده ی کاربر است. با استفاده از روش اتوماتیک، نرم افزار CFTurbo پره ای با مشخصات مندرج در جدول ۲ را ارائه می کند. همچنین پروفیل پره مطابق شکل ۴ خواهد بود.

همچنین در شکل ۵ منحنی های عملکردی پمپ نشان داده شده است.

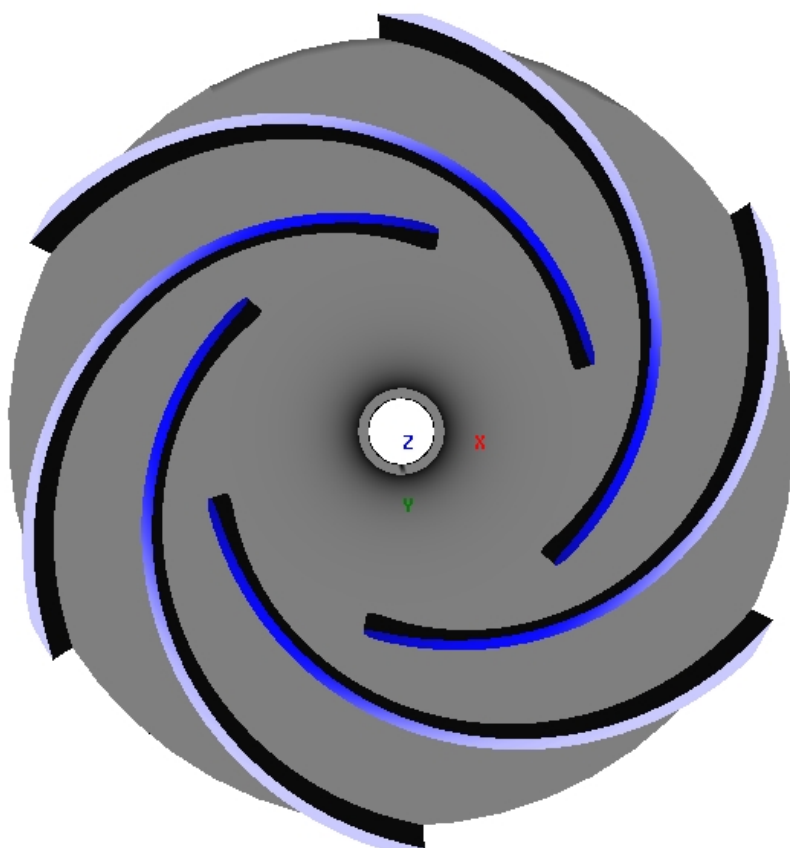


شکل ۳

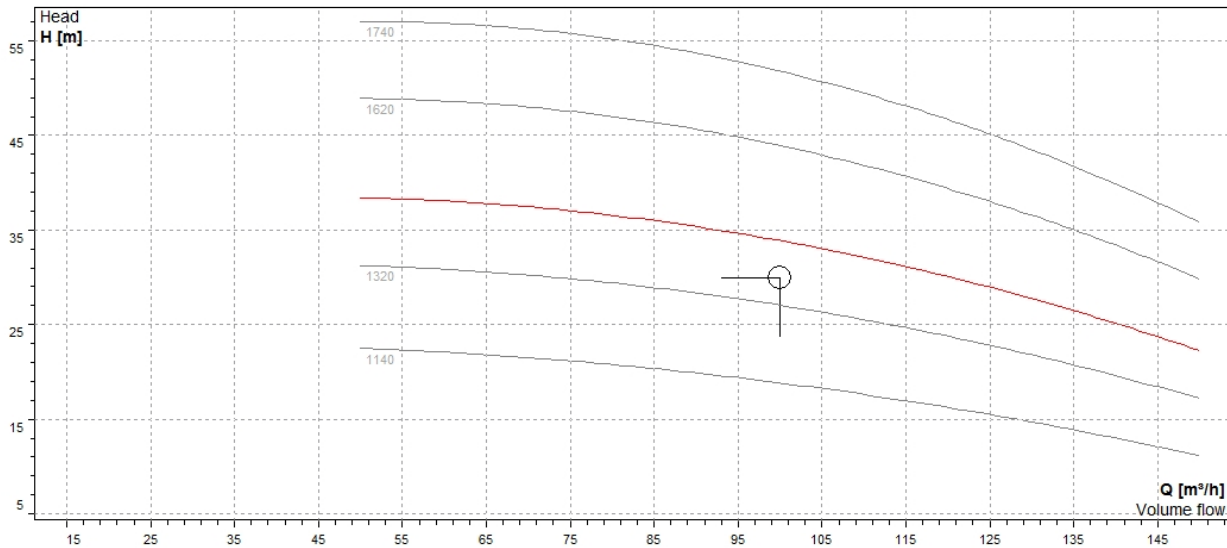
با استفاده از روش مرحله به مرحله و تخصیص پارامترها مطابق با آنچه گولچ تخمین زده است، پره ای با مشخصات مندرج در جدول ۳ و با پروفیلی مطابق شکل ۶ به دست می آید. همچنین در شکل ۷ منحنی های عملکردی پمپ نشان داده شده است.

جدول ۲

پارامتر	پره اتوماتیک CFTurbo
قطر داخلی روتور (mm)	138
قطر خارجی روتور (mm)	317
نسبت قطرها	2.29
زاویه ی ورودی پره	12.6
زاویه ی خروجی پره	13.7
تعداد پره	6
گام پره در ورودی (mm)	72.25
گام پره در خروجی (mm)	165.9
پهنای پره در خروجی (mm)	21
بازده هیدرولیکی	87%
بازده حجمی	96%
بازده کل	76%



شکل ۴



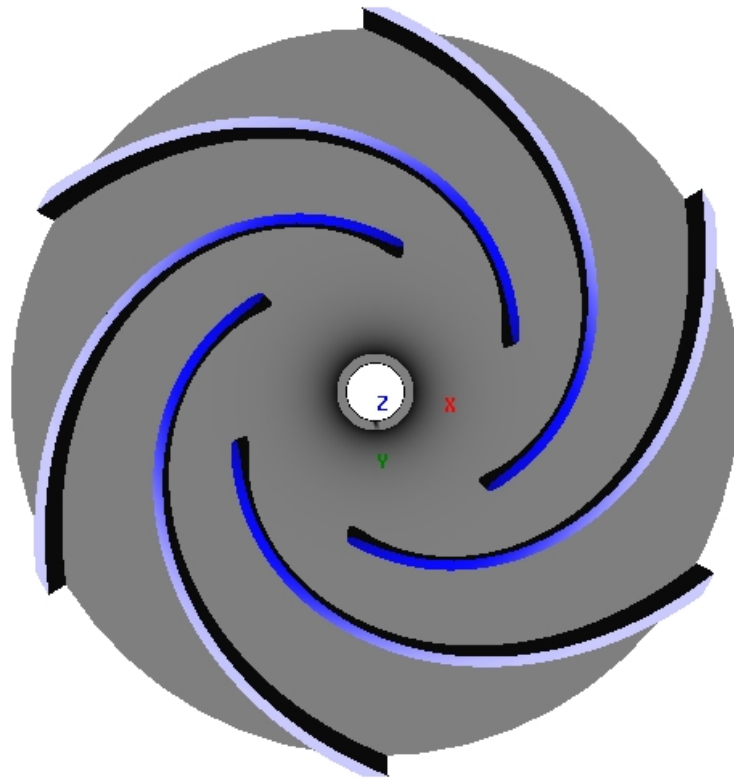
شکل ۵

جدول ۳

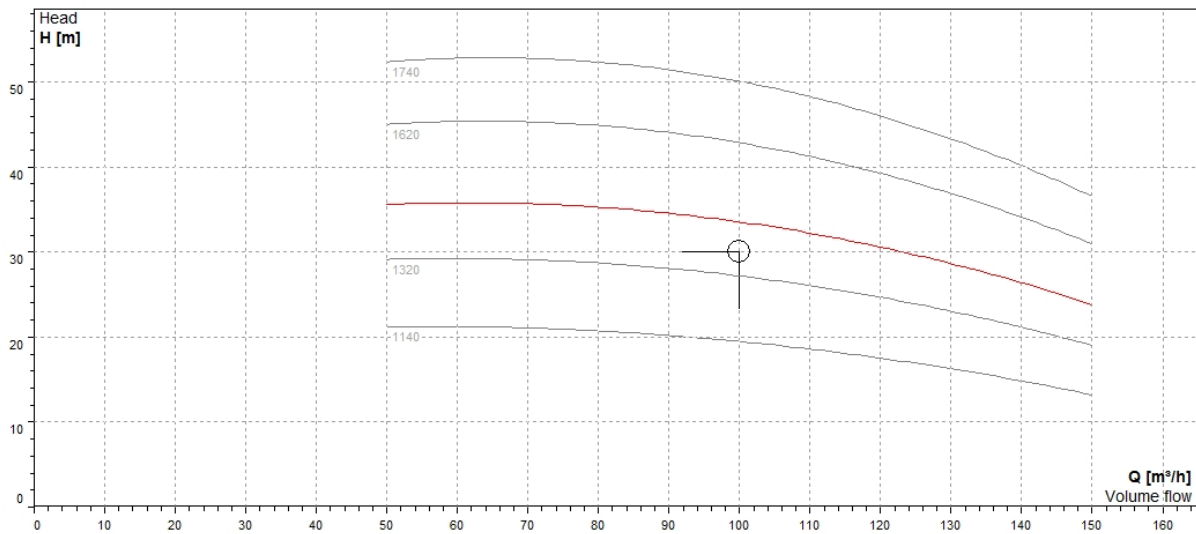
پارامتر	پره مرحله به مرحله CFTurbo
قطر داخلی روتور (mm)	103
قطر خارجی روتور (mm)	312
نسبت قطرها	3.08
زاویه ی ورودی پره	30
زاویه ی خروجی پره	23
تعداد پره	6
گام پره در ورودی (mm)	52.88
گام پره در خروجی (mm)	163.36
پهنای پره در خروجی (mm)	20
بازده هیدرولیکی	86.6%
بازده حجمی	87%
بازده کل	75%

در پایان جهت جمعبندی و مقایسه ی بهتر روش های ارائه شده اطلاعات به دست آمده از آنها در جدول ۴ آورده شده است.





شکل ۶



شکل ۷

جدول ۴

پارامتر	پره لازارکویچ	پره گولیچ	پره اتوماتیک CFTurbo	پره مرحله به مرحله CFTurbo
قطر داخلی روتور (mm)	111	110	138	103
قطر خارجی روتور (mm)	292	313	317	312
نسبت قطرها	2.63	2.84	2.29	3.08
زاویه ی ورودی پره	22	23	12.6	30
زاویه ی خروجی پره	25	23	13.7	23
تعداد پره	6	6	6	6
گام پره در ورودی (mm)	58.12	57.57	72.25	52.88
گام پره در خروجی (mm)	152.55	163.9	165.9	163.36
پهنای پره در خروجی (mm)	16	20	21	20
بازده هیدرولیکی	82.5%	86.6%	87%	86.6%
بازده حجمی	84.2%	87%	96%	87%
بازده کل	68%	75%	76%	75%

### منابع و مراجع

[1] Impeller pumps, Stephen Lazarkiewicz, Oxford, London, 1965.

[2] رسول پایدار نویخت، برنامه ی کامپیوتری برای طراحی پروانه ی پمپ های سانتریفیوژ با خروجی قابل استفاده در CNG. پایان نامه ی دوره ی کارشناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۴

[3] Centrifugal pumps, Johhan F.Gulich, Springer, Leipzig, 2007.