

طراحی و بهینه‌سازی توربین محوری برای نیروگاه‌های آبی کوچک

شهرام درخشان

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت

سیدنعمت‌اله کسائیان

کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت

چکیده

توربین‌های محوری با توجه به ارتفاع کم و دبی زیاد کاری، توانایی به کارگیری زیادی در کشور ما دارند. بخصوص در ظرفیت‌های کم و بصورت تولید پراکنده و مجزای شبکه. در این مقاله یک توربین محوری که محدوده‌ی دبی ۵۰ لیتر در ثانیه تا ۱۵۰ لیتر در ثانیه را پوشش می‌دهد، طراحی شده است که برای ارتفاع‌های بین ۲ تا ۵ متر، مناسب می‌باشد. طراحی اولیه با تدوین نرم‌افزاری انجام شد به شکلی که با دادن ارتفاع و دبی آب به عنوان ورودی برنامه، خروجی‌های مورد انتظار مانند قطرهای هاب و پوسته گرفته شود، این نرم‌افزار، زوایای ورودی و خروجی و بسیاری از متغیرهای لازم برای رسم هندسه‌ی چرخ توربین محوری را نمایش داده و قادر است شکل سه‌بعدی چرخ را در نرم‌افزار CATIA نمایش دهد. در مرحله بعدی، برای اطمینان پیدا کردن از طراحی اولیه توسط نرم‌افزار تجاری Numeca با یک روش تأیید شده توسط داده‌های تجربی برای یک هندسه‌ی مشابه، شبکه‌بندی و شبیه‌سازی انجام گردید. نتایج شبیه‌سازی بازدهی مناسبی را برای توربین محوری نشان ندادند، بنابراین در مرحله‌ی سوم، به منظور بهبود بازدهی ماشین، بهینه‌سازی هندسه‌ی چرخ با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی انجام شد که منجر به افزایش ۱۵٪ در بازده گردید.

کلمات کلیدی: توربین محوری، بهینه‌سازی، نیروگاه آبی کوچک، الگوریتم ژنتیک

Design and Optimization of Axial Turbine for Small Hydropower Stations

Sh. Derakhshan Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology

N. Kasaeian M.Sc., School of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology

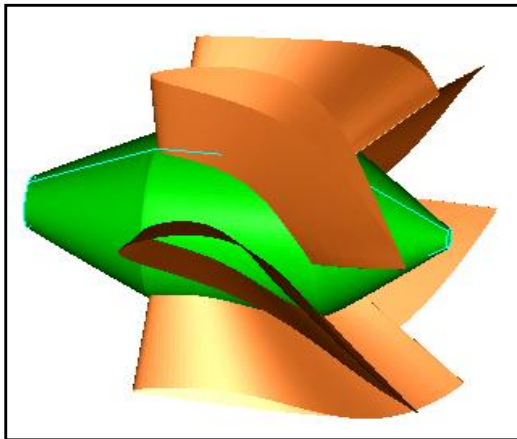
Abstract

Axial turbines can be applied in our country for low heads and high flows, especially in off-grid low capacities. In this research, an axial turbine was designed for flow ranged between 50 l/s to 150 l/s and for 2 to 5 meters of head. Firstly, primer design software was established to calculate all required geometrical parameters of turbine. Indeed, this software is able to show the 3D shape of runner in CATIA. In the next step for evaluation of design, turbine was simulated by Numeca using a verified numerical method by experimental data for a similar geometry. Simulation results did not show a suitable efficiency for axial turbine. Therefore, to improve the performance of machine, runner shape was optimized by genetic algorithm and neural network. Final geometry had 15% more efficiency than the initial one.

Keywords: Axial turbine, Optimization, Micro hydro power, Genetic algorithm

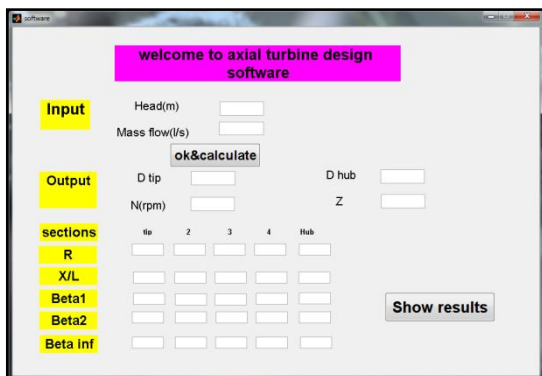
۱- مقدمه

خارجی آن ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. مدل هندسی اولیه‌ی چرخ، در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ - چرخ اولیه طراحی شده

در ادامه، برای انجام طراحی ذکر شده، نرم‌افزاری تهیه شد که قادر است با گرفتن دو ورودی شامل دبی و ارتفاع آب، اطلاعاتی همچون قطرهای هاب و پوسته، زوایای ورودی و خروجی، گام پره و سایر مشخصات لازم برای رسم پره را نمایش بدهد، علاوه بر نمایش مشخصات نرم‌افزار شکل سه‌بعدی مدل را در نرم‌افزار CATIA نشان می‌دهد. شکل ۲ نمایی از پنجره ورودی و خروجی و شکل ۳ نمایی از توربین را در نرم‌افزار CATIA نشان می‌دهد:



شکل ۲ - نمایی از پنجره ورودی و خروجی

۳- شبیه‌سازی در نرم‌افزار

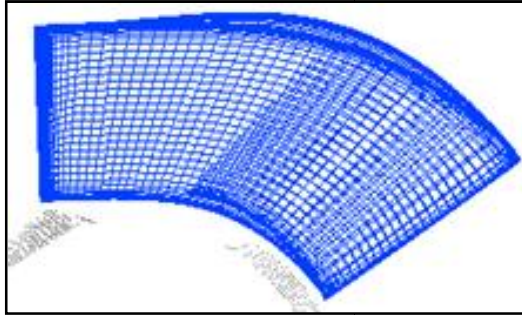
بعد از تولید هندسه سه‌بعدی برای شبکه‌بندی از بخش Autogrid نرم‌افزار استفاده شده است. شبکه‌بندی در تحلیل عددی یکی از مهمترین مراحل بوده که باید از کیفیت بالایی برخوردار بوده و همچنین سلول منفی نداشته باشد. شبکه‌بندی مورد استفاده در این مقاله از نوع O4H می‌باشد. هر چه

توربین‌های محوری با توجه به محدوده‌ی دبی زیاد و ارتفاع کم، بخصوص در ظرفیت‌های کم و در حدود چند کیلووات، به منظور تولید برق به صورت مجزای شبکه کاربرد زیادی دارند. مسئله‌ی مهم در این نوع توربین، دستیابی به یک روش طراحی مناسب می‌باشد. گذشته از روش‌های کلاسیک موجود بر اساس روش‌های پتانسیل یا تابع جریان [۱]، روش‌های عددی بهینه‌سازی نوین، کاربرد زیادی در طراحی بهینه‌ی توربین‌های آبی داشته‌اند. در سال‌های اخیر، سوزکی و همکاران، [۲]، کوئی و همکاران [۳]، لویز [۴]، درخشان و همکاران [۵]، درخشان و مصطفوی [۶] با استفاده از الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی عددی، هندسه‌ی توربین‌های آبی شعاعی و محوری را بهینه نموده‌اند.

در تحقیق حاضر، طراحی اولیه برای یک داده‌ی هیدرولیکی داده شده، با تدوین نرم‌افزار طراحی انجام شد به شکلی که تا با دادن ارتفاع و دبی آب بعنوان ورودی برنامه، خروجی‌های مورد انتظار، مانند قطرهای هاب و پوسته گرفته شود، این نرم‌افزار، زوایای ورودی و خروجی و بسیاری از متغیرهای لازم برای رسم هندسه‌ی چرخ توربین محوری را نمایش داده و قادر است شکل سه‌بعدی چرخ را در نرم‌افزار CATIA نمایش دهد. در مرحله بعدی، برای اطمینان پیدا کردن از طراحی اولیه توسط نرم‌افزار تجاری Numeca با یک روش تأیید شده توسط داده‌های تجربی برای یک هندسه‌ی مشابه، شبکه‌بندی و شبیه‌سازی انجام گردید. نتایج شبیه‌سازی بازدهی مناسبی را برای توربین محوری نشان ندادند، بنابراین در مرحله‌ی سوم، به منظور بهبود بازدهی ماشین، بهینه‌سازی هندسه‌ی چرخ با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی انجام شد که منجر به افزایش ۱۵٪ در بازده گردید.

۲- معرفی چرخ طراحی شده ابتدایی

در این تحقیق از یک نرم‌افزاری به نام Numeca [۷] استفاده شده است. این نرم‌افزار بخش‌های متفاوتی را برای شبکه‌بندی، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و همچنین تحلیل نهایی دارا می‌باشد. روش‌های کلاسیک متفاوتی برای طراحی چرخ توربین‌های آبی وجود دارد که در این تحقیق از روش ارائه شده توسط سیمپسون و ویلیامز استفاده شده است [۸]. این توربین برای ارتفاع ۳ متر و دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه طراحی شده است. در طراحی ۵ مقطع در نظر گرفته شده است که برای هر مقطع، اطلاعاتی همچون زوایای ورودی و خروجی، طول وتر و ... بدست آورده شده است. تعداد پره‌های توربین ۶ عدد و قطر



شکل ۵- نمایی از شبکه‌ی سه‌بعدی

معادلات حاکم برای سیال نیوتنی در یک دستگاه دکارتی، معادلات بقای جرم، ممنتوم و انرژی در شکل تانسوری به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{ui} \\ \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j H) = -\frac{\partial q_j}{\partial x_j} + \frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} + S_E \end{cases} \quad (1)$$

در معادلات بالا، u_i نماینده سرعت در جهت‌های مختصاتی x_i فشار استاتیک، H آنتالپی کل، ρ چگالی، τ_{ij} تانسور تنش لزجت، q_j انتقال رسانشی انرژی مولکولی، S جمله‌های چشمه^۲ است. آنتالپی کل به صورت $H = h + \frac{u_i u_i}{2}$ تعریف می‌شود

که h آنتالپی استاتیکی می‌باشد. شارهای مولکولی τ_{ij} و q_j برای یک سیال نیوتنی در جمله‌های سرعت، دما و گرادیان‌های غلظت قانون استوکس^۳ و فوریر- فیک^۴ به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{cases} \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \\ q_j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \sum_k^n \Gamma_k h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \end{cases} \quad (2)$$

که μ ، λ ، Γ_k ، h_k و Y_k به ترتیب لزجت دینامیکی^۵، ضریب رسانندگی^۶، انرژی دیفیوژنی^۷، آنتالپی استاتیکی^۸ و جرم جزء k می‌باشند. جمله دوم سمت راست معادله تعریف q_j جمله پخش انرژی مربوط به پخش مولکولی را بیان می‌کند، در زمانی که سیال آنتالپی‌های مختلفی داشته باشد.

². Source terms

³. Stokes law

⁴. Fourier & Fick law

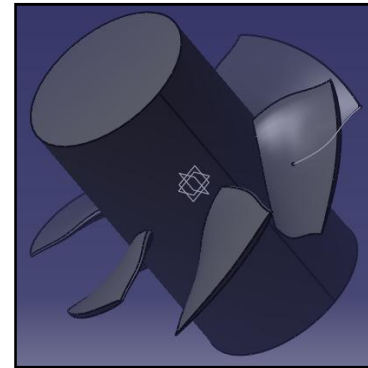
⁵. Dynamic Viscosity

⁶. Conductivity

⁷. Diffusion energy

⁸. Static Enthalpy

کیفیت شبکه‌بندی بالاتر باشد، حل دقیق‌تر خواهد بود. جدول ۱ برخی از مشخصات شبکه را نشان می‌دهد.

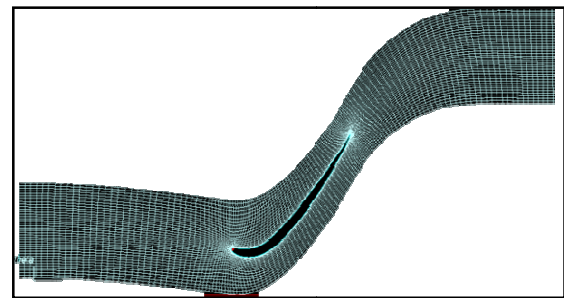


شکل ۳- نمای سه‌بعدی توربین

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نمایی از شبکه‌بندی پره را در حالت پره به پره^۱ و نمای شبکه‌ی سه‌بعدی پره را نمایش می‌دهند.

جدول ۱- مشخصات شبکه‌بندی

تعداد نقاط شبکه	۴۸۳۷۸۲
ارتفاع اولین سلول کنار دیواره در لایه مرزی	۰/۰۱ میلی‌متر
نرخ رشد ارتفاع سلول‌ها در لایه مرزی	۱/۳
تعداد نقاط شبکه روی سطح مکش پره	۶۵
تعداد نقاط شبکه روی سطح فشار پره	۶۵



شکل ۴- نمایی از شبکه‌بندی

پس از ایجاد شبکه، مرحله بعدی، یعنی شبیه‌سازی آغاز می‌گردد. مدل‌های فیزیکی استفاده شده در این نرم‌افزار، معادلات ناویر استوکس با روش رینولدز میانگین‌گیری شده، در دستگاه چرخشی نسبی کوپل شده با مدل‌های آشفتگی مختلف و مدل‌های رینولدز پائین برای نزدیک دیواره می‌باشند.

¹. Blade to blade



شکل ۷- نمودار همگرایی باقیمانده‌ی کلی

نتایج تجربی بازده در ارتفاع‌ها و دبی‌های متفاوت در جدول ۳ قابل مشاهده است. همچنین در شکل‌های ۸ و ۹ نمایی از مدار آزمایش و چرخ توربین A300 قابل مشاهده می‌باشد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمای شبکه‌بندی پره به پره و نمای شبکه‌بندی پره توربین مذکور نمایش داده شده است.

جدول ۳- نتایج آزمایش توربین محوری A300

دبی (l/s)	۲۱۰	۲۰۰	۱۹۳	۱۹۰	۱۷۰	۱۵۴
ارتفاع (m)	۷	۶/۲	۵/۷	۵/۵	۳/۷	۲/۱
بازده (%)	۵۹	۶۱	۶۲/۴	۶۰	۴۱	۹

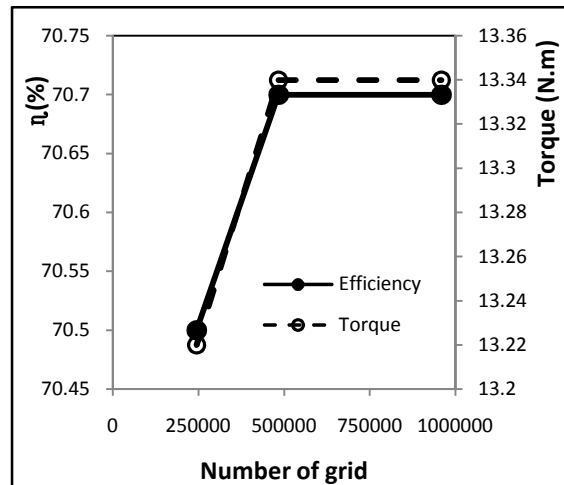


شکل ۸- مدار آزمایش توربین A300

مدل آشفته‌گی که در این تحلیل استفاده شده است K-ε توسعه یافته با تابع دیواره می‌باشد. شرایط مرزی در ورودی دبی جرمی، جهت سرعت و دمای استاتیک و در خروجی فشار اتمسفر قرار داده شده است. برای اطمینان از استقلال شبکه سه نوع شبکه‌بندی درشت (۲۴۴۸۵۹)، متوسط (۴۸۳۷۸۲) و ریز (۹۵۸۷۱۵) در نظر گرفته شد. با استفاده از هر کدام، به صورت جداگانه شبیه‌سازی انجام پذیرفت. جدول ۲ و شکل ۶ مقادیر مربوط به بازده و گشتاور این سه شبکه را نشان می‌دهد. در نهایت، برای ادامه‌ی کار شبیه‌سازی، از شبکه‌ی متوسط استفاده شده است.

جدول ۲- نتایج استقلال از شبکه‌بندی

شبکه ریز (گره)	شبکه درشت (گره)	شبکه اولیه (گره)
۹۵۸۷۱۵ (گره)	۲۴۴۸۵۹ (گره)	۴۸۳۷۸۲ (گره)
بازده (%)	۷۰/۵ (-۰/۱)	۷۰/۷
گشتاور (N.m)	۱۳/۲۲ (-۰/۱)	۱۳/۳۴



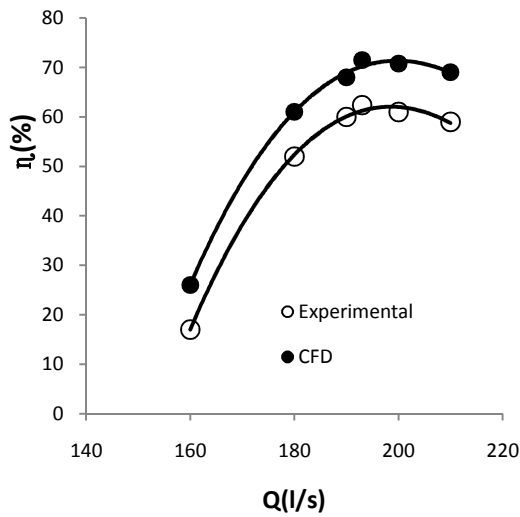
شکل ۶- نمودار استقلال از شبکه

نمودار باقیمانده‌ی کلی آن که تا 10^{-6} همگرا شده است، در شکل ۷ نشان داده شده است.

۴- اعتبارسنجی

در این قسمت به بررسی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی توربین A300 که در نرم‌افزار Numeca انجام گرفته، پرداخته شده است. نتایج عددی حاصل با نتایج تجربی موجود [۹] مقایسه گشته تا اعتبار روش شبیه‌سازی سنجیده شود.

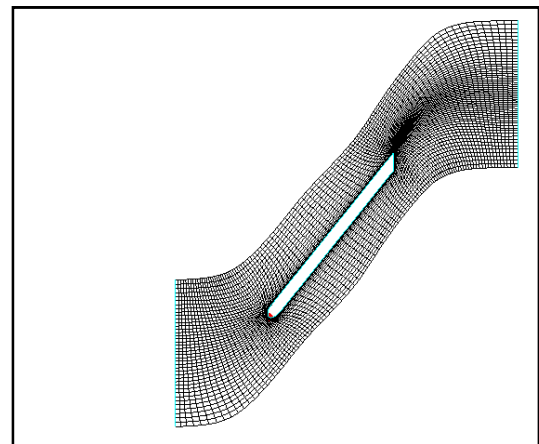
خطا می‌تواند مربوط به تلفات هندسه واقعی همچون استفاده از زانویی در مدل آزمایش شده، زبری سطح پره و نشتی باشد.



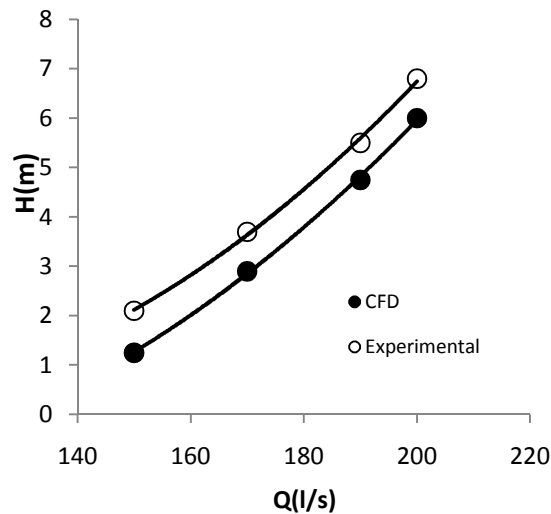
شکل ۹- چرخ توربین A۳۰۰



شکل ۱۰- نمای شبکه‌بندی پره به پره توربین A۳۰۰

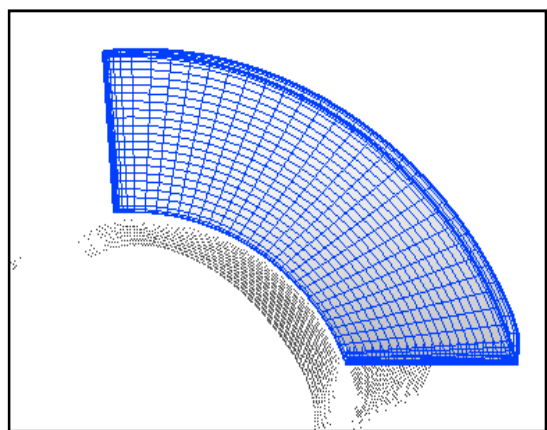


شکل ۱۱- نمای شبکه‌بندی سه‌بعدی پره توربین A۳۰۰



شکل ۱۲- نمودار بازده بر حسب دبی

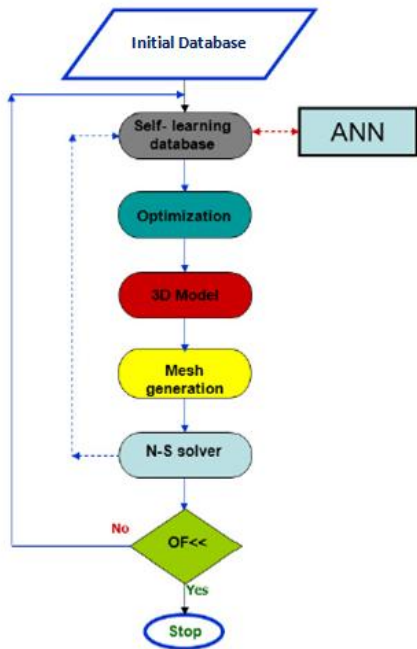
۵- بهینه‌سازی هندسه چرخ توربین
در این تحقیق، از روش تکاملی استفاده شده است. این الگوریتم‌ها برای یافتن نقطه بهینه به جای محاسبه مشتقات تابع هدف، از مقدار خود تابع هدف استفاده می‌کنند. به همین علت قابلیت استفاده در همه مسائل بهینه‌سازی شکل بدون توجه به مشتقات تابع هدف را دارند. همچنین این الگوریتم‌ها قابلیت بهینه‌سازی چندین تابع هدف به طور همزمان را دارند. این دسته از الگوریتم‌ها بر خلاف الگوریتم‌های گرادیانی که یافتن نقطه بهینه را از یک نقطه در فضای طراحی آغاز می-



شکل ۱۳- مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی برای به ترتیب بازده و ارتفاع نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، خطای مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی، کمتر از ده درصد می‌باشد که این

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی برای به ترتیب بازده و ارتفاع نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، خطای مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی، کمتر از ده درصد می‌باشد که این

اسپلاین هر یک با ۵ نقطه کنترلی در نمای نصف‌النهاری متغیره شده‌اند.



شکل ۱۴- الگوریتم بهینه‌سازی

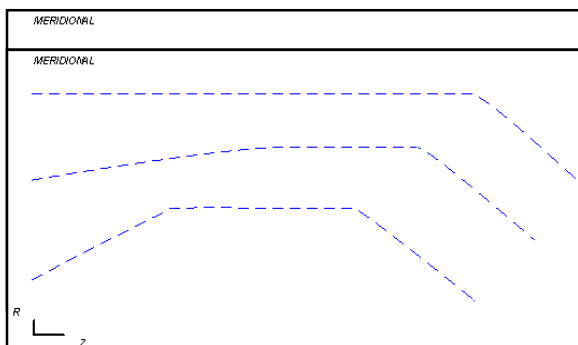
کنند، از چند نقطه در فضای طراحی به سمت نقطه بهینه نزدیک می‌شوند. در نتیجه در نقاط بهینه محلی گرفتار نشده و نقطه بهینه مطلق را نشان می‌دهند [۱۰].

در بهینه‌سازی شکل در توربوماشین‌ها با استفاده از این الگوریتم‌ها، مجموعه‌ای کاملاً تصادفی از هندسه‌های مختلف تولید می‌شوند. حال الگوریتم برای ارزیابی این هندسه‌ها به مقدار تابع هدف آن‌ها احتیاج دارد. این بخش از کار به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام خواهد گرفت. پس از محاسبه تابع هدف، هندسه‌های با مقادیر بهتر، تابع هدف نسبت به بقیه از میان جمعیت اولیه انتخاب می‌شوند. این هندسه‌ها سپس توسط عملگرهای وراثتی با یکدیگر ادغام شده و جمعیت دوم از هندسه‌ها را ایجاد می‌کنند. دوباره برای این نسل هم مراحل قبلی تکرار می‌شود. از آنجا که در هر نسلی تنها هندسه‌های مناسب با مقادیر تابع هدف بهتر به نسل بعدی راه پیدا می‌کنند، پس از چند نسل تنها آن دسته از هندسه‌هایی که تابع هدف بهتری داشته و از طرفی قیود اعمال شده را نیز ارضا کرده‌اند، باقی خواهند ماند. در اینجا است که الگوریتم متوقف شده و هندسه بهینه کشف خواهد شد [۱۰].

شکل ۱۴، الگوریتم بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

۵-۱- متغیره کردن هندسه

با توجه به انتخاب لبه ورودی پره به عنوان مبنا برای ساختن پره در نمای مماسی، از منحنی بی‌اسپلاین با ۵ نقطه کنترلی استفاده شده است. هر یک از خطوط میانی پره در این پنج مقطع هم با منحنی بی‌اسپلاین با ۵ نقطه کنترلی متغیره شده است. برای اضافه کردن ضخامت به صورت متقارن به پره با انتهای پخ‌دار هم از منحنی بزیر^۲ با ۵ نقطه کنترلی استفاده شده است، که به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ دیده می‌شوند.



شکل ۱۵- مقاطع در نظر گرفته شده برای چرخ توربین

در بهینه‌سازی طراح نیازمند روشی است تا بتواند هندسه مورد نظر خود را ایجاد کرده و مورد بررسی قرار دهد. این عمل با ایجاد هندسه در چند مقطع دوبعدی به کمک چند نقطه و سپس، از کنار هم قرار گرفتن این مقاطع هندسه سه‌بعدی پره ایجاد می‌شود. این نقاط همان نقاط کنترلی یا متغیره‌های طراحی هستند که با تغییر هر یک، هندسه‌ی جدیدی ایجاد می‌شود. یک روش برای ساختن پره ایجاد سمت مکش و فشار پره به صورت مستقل با کمک نقاط کنترلی می‌باشد. روش دیگر ایجاد خط میانی پره در چند مقطع انتخابی روی پره و سپس اضافه کردن توزیع ضخامت به این خطوط می‌باشد. با اتصال مقاطع به یکدیگر یک هندسه کاملاً پیوسته ایجاد می‌شود. تعدد زیاد متغیره‌ها باعث زمان‌بر شدن بهینه‌سازی و کم بودن آن نیز موجب عدم مدل‌سازی مناسب هندسه می‌شود.

در این تحقیق برای متغیره کردن پره چرخ سه مقطع یکی در نزدیکی هاب، یکی در نزدیکی تاج و مقطع دیگر هم در فاصله بین هاب و تاج در نظر گرفته شده است. هاب و تاج با استفاده از منحنی‌های بی‌اسپلاین^۱ هر یک با ۷ نقطه کنترلی متغیره شده‌اند. لبه ورودی و لبه خروجی پره نیز با منحنی بی-

^۲. Bezier

^۱. B-Spline

با توجه به رابطه (۴) دیده می‌شود که کمیت ΔP_t (اختلاف فشار ورودی و خروجی توربین) در مخرج کسر قرار دارد:

$$\eta = \frac{T \cdot \Omega}{\Delta P_t Q} \quad (4)$$

که T, Ω و Q به ترتیب گشتاور، سرعت دورانی و دبی می‌باشند.

با انتخاب تابع هدف به صورت ترکیبی از دو جمله ارتفاع و بازده، در فرایند بهینه‌سازی سعی در کم کردن این کمیت با کاهش مقدار تلفات می‌شود تا بازده افزایش یابد. ولی با محدود کردن این کمیت در جمله ارتفاع فشاری تابع هدف به منظور انجام بهینه‌سازی توربین در نقطه کاری مورد نظر، مقدار تغییرات جمله بازده محدود می‌شود.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی با این نوع تابع هدف در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- نتایج بهینه‌سازی برای توابع هدف ترکیبی از ارتفاع و بازده

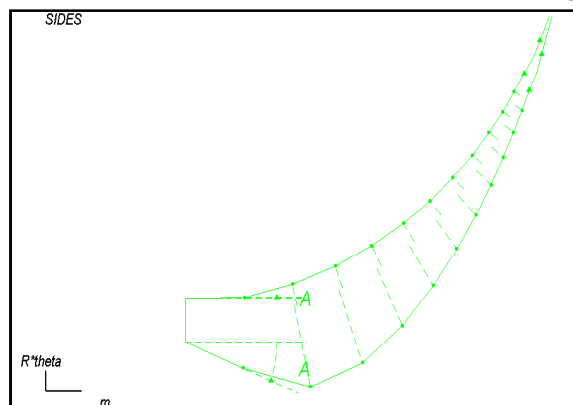
هندسه اولیه	بازده (%)	اختلاف فشار کلی در توربین (Pa)	گشتاور (N.m)
$k=100$	۷۰٫۷	۳۰۲۰۰	۱۴۳۷
$k=10$	۸۱٫۳ (+۱۵٫۶۴)	۲۸۰۲۳ (-۷٫۲)	۱۵۳۳ (+۶٫۲۲)
$k=1$	۸۹٫۹ (+۱۴٫۴۲)	۲۸۲۳۳ (-۶٫۵)	۱۵۳۷ (+۶٫۹۲)
	۸۰٫۸ (-۱۳٫۴۳)	۲۸۴۳۲ (-۵٫۸۶)	۱۵۴۶ (-۷٫۵۸)

۷- نتایج

روند تغییرات تابع هدف به همراه مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و دینامیک سیالات محاسباتی در طی فرایند بهینه‌سازی در شکل ۱۷ دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود از تکرار پانزدهم به بعد مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله شبکه عصبی تطابق کامل با مقادیر به دست آمده از دینامیک سیالات محاسباتی دارد و تغییرات تابع هدف ناچیز می‌شود. با توجه به عدم تغییر تابع هدف در تکرار ۱۵ مشخص می‌شود که جواب به نقطه بهینه رسیده است. با این تفاسیر هندسه تولید شده در تکرار ۱۵ به عنوان هندسه بهینه انتخاب می‌شود (شکل ۱۸).

در جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد بازده، گشتاور و در نتیجه توان خروجی توربین، در یک مقدار ارتفاع آب تقریباً ثابت افزایش قابل ملاحظه‌ای کرده‌اند. با افزایش مقدار $1.1/100$ مطلق برای بازده هندسه نهایی و یا افزایش مقدار $15.6/100$ نسبت به مقدار بازده

در طراحی بهینه شکل به کمک الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی، احتیاج به تولید هندسه‌های مختلف جهت ایجاد پایگاه داده تصادفی برای آموزش شبکه عصبی که به عنوان یک مدل تقریبی، جمعیت مورد نیاز الگوریتم ژنتیک را تولید می‌نماید، می‌باشد.



شکل ۱۶- نقاط کنترلی روی سطح مکش و فشار

در این تحقیق هندسه‌های تصادفی با تغییر در خطوط میانی پره هدف تولید شده‌اند. محدوده‌ی مجاز تغییرات در حدود ۱۰ درصد در نظر گرفته شده و بقیه متغیرهای طراحی ثابت نگه داشته شده‌اند. برای آموزش شبکه عصبی پایگاه داده‌ای شامل ۹۰ هندسه‌ی مختلف با تغییر در ۳۰ نقطه‌ی کنترلی ذکر شده، ایجاد شده‌است و نتایج حل عددی و شبیه‌سازی جریان برای آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Fine Turbo به دست آمده‌اند.

۶- بهینه‌سازی برای افزایش بازده و نتایج آن

۱-۶- تابع هدف

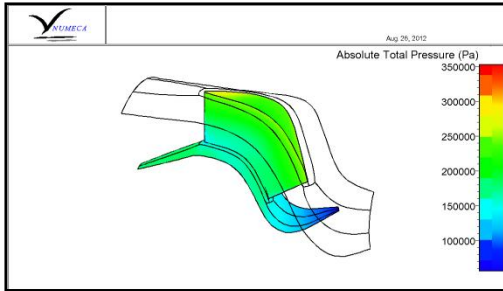
کیفیت هندسه‌های به دست‌آمده در فرایند بهینه‌سازی با معیار تابع هدف سنجیده می‌شود، در بهینه‌سازی چندهدفه، تابع هدف نهایی به صورت ترکیب وزنی تک‌تک توابع هدف می‌باشد. در این مقاله، دو نوع تابع هدف در نظر گرفته شده است. رابطه‌ی (۳) تابع هدف را به صورت ترکیبی از ارتفاع و بازده نشان می‌دهد. در نهایت تابع هدف به صورت ترکیب ارتفاع و بازده با نسبت وزنی ۱۰۰ به عنوان بهترین تابع هدف برگزیده گردید.

$$OF = \left(\frac{100 - eff}{100} \right)^2 + k \left(\frac{Pres_0 - Pres}{Pres_0} \right)^2 \quad (3)$$

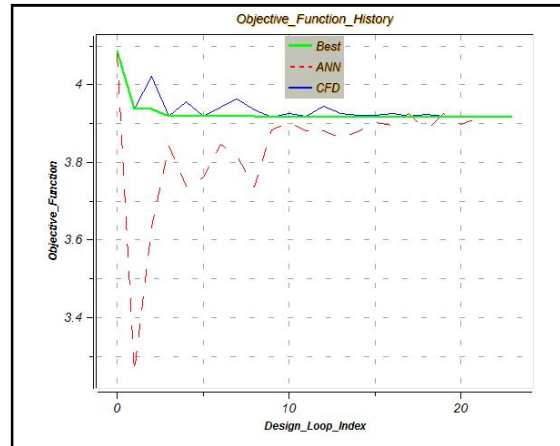
که $OF, eff, Pres$ و k به ترتیب نماینگر تابع هدف، بازده، فشار و ضریب وزنی می‌باشند. اندیس 0 مربوط به هندسه‌ی اولیه می‌باشد.

جدول ۵- نتایج بهینه‌سازی

هندسه	η (%)	Q(kg/s)	H(m)	T(N.M)	\dot{W} (kW)
اولیه	۷۰٫۷	۷۵	۳	۲۰٫۳۴	۲٫۱۲
نهایی	۸۰٫۶	۷۵	۲٫۹	۲۱٫۷	۲٫۲۶

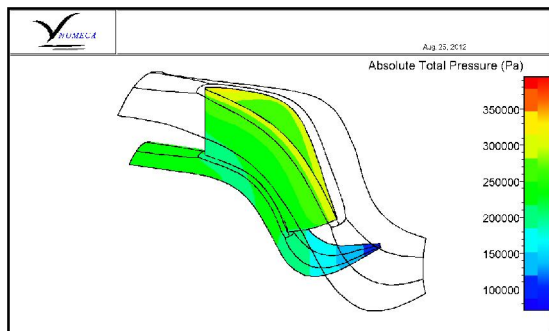


هندسه اولیه، اهمیت استفاده از روش طراحی بهینه را نشان می‌دهد. کانتورهای فشار و سرعت در کانال جریان در شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۷- نمودار همگرایی شبکه عصبی و دینامیک سیالات محاسباتی

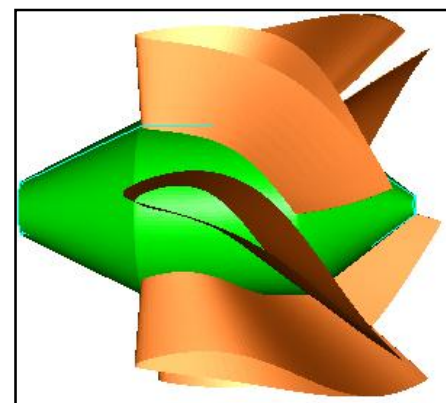
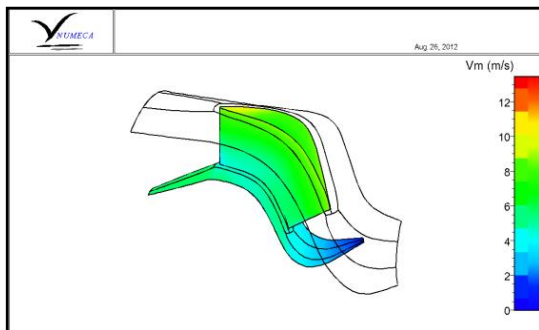
شکل ۱۹- کانتور فشار در پره اولیه



مشاهده می‌گردد که هندسه نهایی نسبت به هندسه اولیه دارای توزیع فشار یکنواخت‌تر و مقادیر سرعت کمتری می‌باشد، که خود نشان دهنده کاهش تلفات در هندسه نهایی ماشین می‌باشد. همچنین بهبود عملکرد هندسه نهایی از نظر کاویتاسیون مشخص است. در کانتورهای فشار بهبود این پدیده با افزایش فشار محلی در قسمت خروجی پره و در نزدیکی هاب قابل مشاهده است.

شکل ۲۳، مقایسه مقاطع مختلف هندسه را برای توربین-های اولیه و نهایی نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد، بیشترین تغییرات مربوط به مقاطع خروجی پره، بخصوص در مقطع شروود می‌باشد.

شکل ۲۰- کانتور فشار در پره نهایی



شکل ۱۸- چرخ توربین بهینه شده

شکل ۲۱- کانتور سرعت در پره اولیه

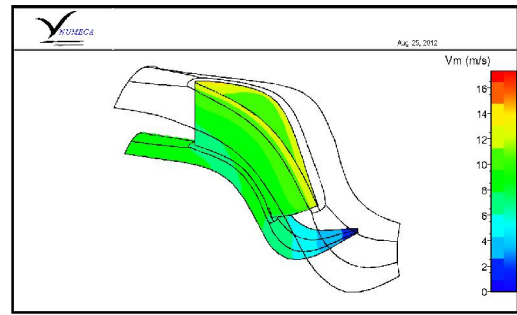
۸- نتیجه‌گیری

توربین‌های محوری با توجه به ارتفاع کم و دبی زیاد کاری، توانایی به کارگیری زیادی در کشور ما دارند. به خصوص در ظرفیت‌های کم و به صورت تولید پراکنده و مجزای شبکه. در این تحقیق با استفاده از تئوری‌های کلاسیک موجود، یک توربین محوری برای پتانسیل‌های آبی در حدود چند کیلووات، طراحی شد. برای انجام طراحی، نرم‌افزاری تهیه شد تا با دادن ارتفاع و دبی آب به عنوان ورودی، بتواند مشخصاتی همچون قطرهای هاب و پوسته، زوایای ورودی و خروجی و بسیاری از متغیرهای لازم برای رسم را نمایش بدهد. همچنین این نرم‌افزار قادر است شکل سه‌بعدی چرخ را در نرم‌افزار CATIA نمایش دهد. برای بهبود عملکرد توربین از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی برای بهینه‌سازی پره توربین محوری استفاده شد. برای بهینه‌سازی توابع هدف مختلفی انتخاب شد، که در نهایت تابع هدف ارتفاع و بازده با نسبت وزنی ۱۰۰ بهترین تابع هدف برگزیده شد. در نهایت بهینه‌سازی در توربین سبب بهبود بازدهی بیشتر از ۱۵/۶٪ نسبت به مقدار اولیه گشته است.

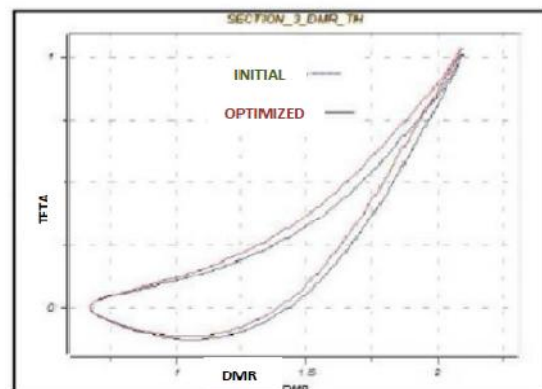
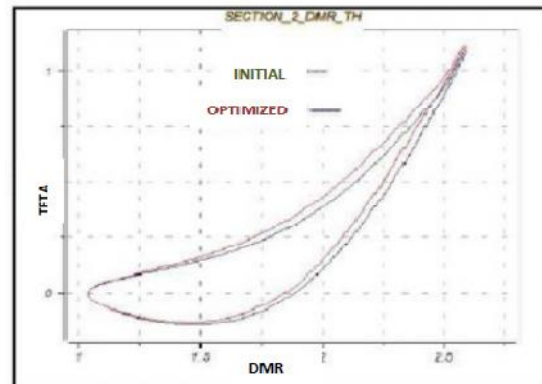
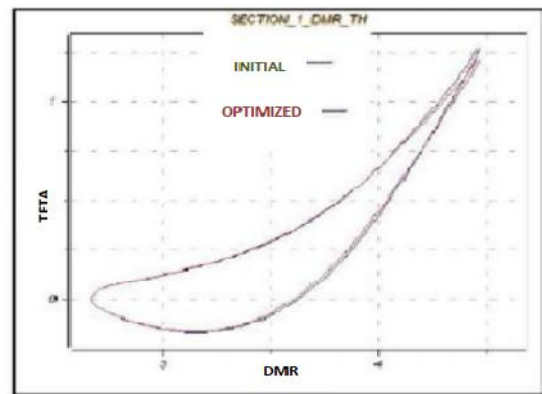
همچنین بهبود عملکرد آن از نظر کاویتاسیون که در کانتورهای فشار بهبود وضعیت افزایش فشار در هاب و در کل پره دیده می‌شود. این بهبود در افزایش گشتاور و کاهش افت فشار نیز قابل ملاحظه بوده است. بنابراین با توجه به مزایای فوق، بهینه‌سازی در نیروگاه‌های آبی کوچک و به ویژه در چرخ توربین‌هایی در مقیاس بزرگتر بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

مراجع

- [1]Hothersall, R.,Anestis, G.,Gürkök, C., "Hydrodynamic design guide for small Francis and propeller turbines", UNIDO, Vienna, 2004.
- [2]Suzuki, T., Enomoto, Y., Kurosawa, S., "Design optimization of a Francis turbine runner using multi-objective genetic algorithm", Proceeding of the 23rdIAHR Symposium on Hydraulic Turbomachinery and System, Yokohama, Japan, 2006.
- [3] Kueny, J.L, Lestriez, R., Helali, A., Demeulenaere, A., Hirsch, Ch., "Optimal design of a small hydraulic turbine", Proceeding of the 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Turbomachinery and System, Stockholm, Sweden, 2004.
- [4] Lupez, L.F., "Optimum design procedure for hydraulic turbines", PhD Thesis, EPFL, 2005.
- [5]Derakhshan, S., Mohammadi, B., Nourbakhsh, A., "The comparison of incomplete sensitivities and genetic algorithms applications in 3D radial turbomachinery blade optimization", Computers & Fluids, Vol. 39, Issue 10, pp. 2022-2029, 2010.
- [6]Derakhshan, S., Mostafavi, A., "Optimization of GAMM Francisturbine runner", World Academy of



شکل ۲۲- کانتور سرعت در پره نهایی



شکل ۲۳- مقایسه بین هندسه اولیه و بهینه در سه مقطع

Science, Engineering and Technology, Vol. 59, pp. 717-723, 2011.

[7] "FINE™/Design3D user guide", Numeca, Brussels, 2010.

[8] SIMPSON, R. and WILLIAMS, A., "The design of cost-effective pico-propeller turbines for developing countries", Proceeding of Hydroenergia-2006, Crieff, Scotland, 2006.

[9] Nourbakhsh, A., Derakhshan, S., Javidpour, E., Riasi A., "Centrifugal & axial pumps used as turbines in small hydropower stations", Proceeding of Hydroenergia-2010, Lausanne, Switzerland, 2010.

[10] Goldberg, D.E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison Wesley, Boston, 1989.