

بهینه‌سازی عددی هندسه هیدروفویل یک پره توربین هیدرولیکی داریوس به کمک شبکه‌بندی دینامیکی و روش طراحی مرکب مرکزی

رضا کامرانی^۱

مهرداد جعفریار^۲

محمد حاتمی^{۳*}

چکیده

در این پژوهش، یک توربین هیدرولیکی داریوس مبنا برای کاربردهای تولید توان انتخاب و هندسه هیدروفویل به‌کاررفته به عنوان پره در آن با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی که از زیرمجموعه‌های روش سطح پاسخ است، جهت افزایش ضریب تورک بهینه‌سازی شده است. بدین منظور با ثابت نگه‌داشتن تمامی فاکتورهای عملکردی توربین، با استفاده از منحنی پارسک شکل هیدروفویل پارامتری می‌شود و ضریب تورک توربین به‌عنوان تابعی از پارامترهای منحنی پارسک توصیف‌کننده شکل هیدروفویل با روش طراحی مرکب مرکزی تخمین زده می‌شود. نقاط بیشینه تابع حاصل، همان هندسه بهینه پره توربین است. برای مشخص کردن ضریب تورک توربین از حل عددی گذرای دوبعدی جریان سیال تراکم ناپذیر، لزج و مغشوش به روش حجم محدود حول توربین، استفاده شده است. نتایج نشان از افزایش چهاردرصدی ضریب تورک با هیدروفویل بهینه‌شده می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

توربین داریوس، مدل‌سازی عددی، روش سطح پاسخ، طراحی مرکب مرکزی، منحنی پارسک.

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی صنعتی مازندران، بابل، ایران

۲. کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، مازندران، بابل، ایران

۳. * دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران m-hatami@um.ac.ir

علمی-پژوهشی

مقدمه

هیدرولیکی داریوس انجام شده است، افزایش مجرا را برای توربین داریوس پیشنهاد دادند و نشان دادند که توان تولیدی را دو برابر می کند و همچنین این افزایش مجرا تنش و تغییر شکل را نیز دو برابر خواهد کرد. پژوهش آن ها که به کمک مدل سازی عددی انجام شده است از روش SST-k- ω استفاده کرده اند و در نهایت پیشنهاد طراحی هندسه ای مناسب برای مجرا داشته اند که علاوه بر در نظر گرفتن هزینه های اضافی، به بهبود عملکرد توربین نیز کمک کند.

ساینی^۹ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ همچنین به بررسی پارامترهای مختلف روتور در یک توربین هیدرولیکی به روش عددی پرداختند. آن ها دو پارامتر نسبت شعاع و زاویه اتصال را نسبت به ضریب توان بررسی کردند و نشان دادند که ماکزیمم ضریب توان معادل ۰,۱۰۹، در نسبت شعاع ۰/۶ و زاویه اتصال ۹۰ درجه رخ می دهد. همچنین آن ها نشان دادند که ضرایب توان و گشتاور در توربین روتور ترکیبی به ترتیب ۳۷/۹۷ و ۳۵/۸۸٪ در مقایسه با توربین تک روتور بهبود یافته است. شاشیکومار^{۱۰} و همکارانش در سال ۲۰۲۱ به بررسی روتور ساوونیوس در توربین هیدرولیکی پرداختند و نشان دادند که برای نسبت سرعت نوک ۰,۹۲ و شیب کانال ۰,۵ درجه (در مقایسه با شیب ۰ درجه) ضرایب توان و گشتاور به ترتیب ۴۰٪ و ۱۰٪ بهبود یافته اند. همچنین آن ها نشان دادند که ماکزیمم شیب کانال برای به دست آوردن ماکزیمم انرژی قابل دسترس، ۲ درجه است.

لنگرودی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ به مدل سازی عددی و بهینه سازی چندهدفه برای یک توربین هیدرولیکی جدید جریان عرضی پرداختند. پارامترهای زاویه حمله ایرفویل و طول وتر آن به عنوان متغیرهای مسئله در نظر گرفته شد و به بررسی نیروهای لیفت و دراگ و همچنین ضرایب توان و فشار پرداختند و نشان دادند که روش عددی استفاده شده نتایج دقیقی با ماکزیمم ۸٪ خطا ارائه نموده است. پاتل^{۱۱} و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به بررسی تعداد پره ها و شکل هیدروفویل^{۱۲} در یک توربین داریوس هیدرولیکی پرداختند و نشان دادند که NACA0015 و NACA0018 بالاترین ضریب توان ۰,۱۵ را داشته و عملکرد بهتری نسبت به NACA4415 ارائه داده است. بنزردجب^{۱۳}

امروزه استفاده از انرژی های تجدید پذیر به دلیل کاهش منابع انرژی های فسیلی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از مهمترین دلایل روی آوری به این انرژی ها علاوه بر پاک بودن، تجدید پذیر و در دسترس بودن این نوع از انرژی ها است که باعث جذابیت آن ها برای تبدیلیشان به الکتریسیته و استفاده از این الکتریسیته در مصارف خانگی و صنعتی است. توربین های آبی جریان متقاطع محور عمودی یکی از وسایلی هستند که اخیراً برای تبدیل انرژی های جذر و مدی و امواج به انرژی مکانیکی و نهایتاً تبدیل انرژی مکانیکی حاصله به انرژی الکتریکی توسط ژنراتورها مورد استفاده قرار می گیرند. این نوع توربین ها را به دو دسته کلی تقسیم بندی می نمایند.

دسته اول آن هایی هستند که نیروی درگ^۱ عامل اصلی حرکتشان است. حداکثر سرعت خطی این نوع توربین ها محدود به سرعت جریان آزاد محرکشان است. توربین محور عمودی ساوونیوس^۲ یک مثال از این توربین ها است. در دسته دیگر نیروی لیفت^۳ عامل اصلی حرکت است. از ایرفویل^۴ به عنوان پروفیل پره در توربین های این دسته استفاده می شود. سرعت خطی این نوع توربین ها می تواند از سرعت جریان آزاد عامل حرکتشان فراتر رود و معمولاً راندمان بالاتری نسبت به توربین های دسته اول دارند. توربین داریوس^۵ در این دسته قرار می گیرد که در ادامه به بررسی پژوهش های اخیر روی این نوع توربین ها پرداخته شده است. ساینی^۶ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ به بررسی دو مدل توربین هیدرولیکی داریوس با نام های داریوس تک و ترکیبی پرداختند. آن ها نشان دادند که روتور^۷ ترکیبی برای توربین هیدرولیکی ۹,۹٪ ضریب توان بیشتری نسبت به توربین داریوس تک ارائه می نماید. همچنین آن ها نشان دادند که برای توربین ترکیبی ضریب گشتاور متوسط ۱۵,۹٪ بزرگ تر از توربین تک داریوس است. نتایج آن ها به صورت مدل سازی عددی حاصل شده که صحت سنجی نتایج را نیز با داده های آزمایشگاهی بررسی کرده اند. در مطالعه دیگری توسط تونیو^۸ و همکارانش در سال ۲۰۲۰، که روی توربین های

⁸Tunio

⁹ Saini

¹⁰ Shashikumar

¹¹ Patel

¹² Hydrofoil

¹³ Benzerdjeb

⁹ Saini

¹⁰ Shashikumar

¹ Drag

² Savonius

³ Lift

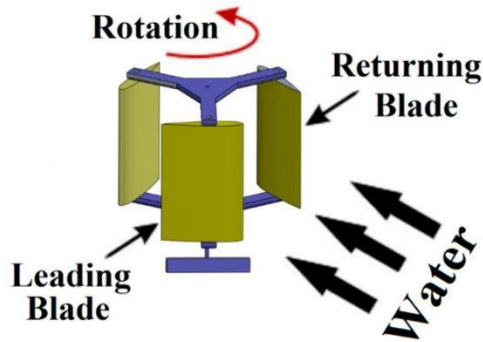
⁴ Airfoil

⁵ Darrieus Turbine

⁶ Saini

⁷ Rotor

در مطالعه موردی هان^۵ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ بر روی توربین گرلوف^۶ که تعمیم یافته توربین داریوس است، حداکثر ضریب توان توربین در سرعت‌های مختلف امواج و نسبت‌های مختلف سرعت نوک پره اندازه‌گیری گردید. حداکثر راندمان توربین مورد مطالعه آن‌ها، ۳۰ درصد بود که در سرعت امواج بین ۱/۵ تا ۱/۹ متر بر ثانیه و با متوسط نسبت سرعت نوک پره ۲/۴ محاسبه گردید.



شکل (۱): یک نمونه توربین داریوس هیدرولیکی (خانجانپور و جوادی، ۲۰۲۰)

یانگ^۷ و شو^۸ در سال ۲۰۱۲ به بهینه‌سازی پره توربین آبی گرلوف با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۹ پرداخته‌اند. آن‌ها با پارامتری کردن شکل هیدروفویل توسط منحنی بزیر^{۱۰}، تعداد درجات آزادی هیدروفویل را به ۱۳ کاهش دادند و برای محاسبه ضریب توان توربین که به عنوان هدف الگوریتم ژنتیک به منظور حداکثر سازی در نظر گرفته شده بود از حل عددی جریان حول هیدروفویل بهره جستند و با این کار موفق به یافتن هیدروفویل بهینه برای توربین خود شدند.

تأثیر خمیدگی^{۱۱} وتر^{۱۲} و ضخامت پره بر راندمان توربین توربین در پژوهش لن^{۱۳} و همکارانش در سال ۲۰۱۴ بررسی شد. کار آن‌ها نشان داد که ضخامت پره تأثیر زیادی بر راندمان دارد به طوری که با افزایش ضخامت، راندمان تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد ولی خمیدگی پره تأثیر چندانی بر راندمان توربین ندارد. همچنین مطالعه آزمایشگاهی تأثیر میزان زبری سطح پره، سرعت جریان آزاد محرک پره و نرخ صلبیت توربین بر راندمان توربین بادی

و همکارانش در سال ۲۰۱۹ در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی زاویه گام پره توربین هیدرولیکی داریوس در سرعت‌های مختلف جریان آب پرداختند و نشان دادند که بهترین نتایج برای زاویه گام ثابت صفر درجه و سرعت m/s ۰/۳۷ حاصل شده است در حالی که بدترین نتیجه برای زاویه گام ثابت ۴،۵- درجه به دست آمده است. خانجانپور و جوادی در سال ۲۰۲۰ نیز در مطالعه‌ای آزمایشگاهی و عددی به بررسی اثر زبری سطح بر عملکرد هیدرودینامیکی یک توربین داریوس پرداختند و نشان دادند که درصد کاهش توان خروجی توربین ۲۷ درصد (از نتایج عددی) و ۲۲ درصد (از نتایج آزمایشگاهی) برای پره‌هایی با زبری سطح به ارتفاع ۱۰۰۰ میکرومتر در مقایسه با زبری صفر است.

بر اساس تحقیقات فرانکل^۱ در سال ۲۰۰۲، یک توربین آبی با سرعت جریان آب معادل با ۱/۴ متر بر ثانیه از نظر قدرت هم‌ارز با یک توربین بادی با سرعت باد ۱۳ متر بر ثانیه عمل می‌کند که علت اصلی این پدیده دانسیته ۱۰۰۰ برابری آب نسبت به هواست، همچنین در توربین آبی نیروهای گرانشی وارد بر پره‌ها به علت وجود نیروهای شناوری خنثی می‌شوند. با توجه به اینکه در توربین آبی به‌ویژه در ناحیه نوک پره احتمال پدیده کاویتاسیون^۲ وجود دارد، برای پره‌ها محدودیت ماکزیمم سرعت به وجود خواهد آمد که بستگی به عمق آب، هندسه مقطع پره و زاویه حمله آن دارد. در پژوهش حسن خانی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به قدرت قابل حصول از امواج در دریا‌های ایران اشاره شده است. آن‌ها در مطالعه خود پتانسیل قابل حصول از امواج در خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر را تخمین می‌زنند. مالیپدی^۳ و چاترجی^۴ در سال ۲۰۱۲ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به طراحی یک مجرای جدید باهدف بهبود راندمان توربین آبی داریوس پرداخته‌اند. با استفاده از این مجرا ضریب توان توربین افزایش یافته است. در این مطالعه به منظور مدل‌سازی آشفتگی جریان از مدل SST- $k-\omega$ استفاده شده است.

9 Gorlov
10 Yang
11 Shu
12 Genetic algorithm
13 Bezier Curve
14 Camber
15 Chord
16 Lain

1 Patel
2 Hydrofoil
3 Benzerdjeb
4 Fraenkel
5 Cavitation
6 Malipeddi
7 Chatterjee
8 Han

در ایجاد فضای طراحی پارامتری برای انتخاب بهینه هندسه پره روش‌های متعددی به کاررفته که یکی از بهترین آن‌ها روش ایرفویل پارسک است (لی و همکارانش، ۱۹۹۸). این روش قادر است دامنه تغییرات بزرگی از اشکال مقطع پره را با تعداد مطلوبی از پارامترهای هندسی آن نمایش دهد. روش مذکور در تحقیق حاضر برای پارامتری کردن شکل مقاطع ایرفویل مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش یک شکل مقطع ایرفویل با ترکیب خطی توابع شکل به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود.

$$Z = \sum_{n=1}^6 a_n x^{\frac{2n-1}{2}} \quad (1)$$

که Z و x مختصات مقطع ایرفویل و a_n ضرایب توابع شکل هستند که مقدار آن‌ها به مقادیر پارامترهای مقطع بال بستگی دارد. در این روش جهت مشخص کردن یک شکل مقطع بال در حدود ۱۱ پارامتر بکار گرفته می‌شود. شکل (۲) طرح‌واره‌ای از یک مقطع ایرفویل به همراه ۱۱ پارامتر مربوطه را نشان می‌دهد.

پارامترها عبارت‌اند از شعاع دایره لبه حمله r_{le} ، ارتفاع لبه فرار Z_{TE} ، زاویه خط میانی لبه فرار با افق α_{TE} ، زاویه گوه لبه فرار β_{TE} ، مختصه، اندازه و شعاع انحنای بیشترین ضخامت روی سطح بالایی ایرفویل سه پارامتر Z_{up} ، X_{up} و Z_{xxup} . مختصات و شعاع انحنای بیشترین ضخامت روی سطح پایینی ایرفویل سه پارامتر (X_{lo}, Z_{lo}) و Z_{xxlo} و همچنین ضخامت لبه فرار ΔZ_{TE} در تحقیق حاضر با ثابت نگه‌داشتن منحنی توصیف‌کننده سطح بالایی ایرفویل و نیز با فرض $(\Gamma_{le}=0.88, \Delta Z_{TE}=0)$ ، ۴ پارامتر مختصات ماکزیمم ضخامت، اندازه بیشترین ضخامت، شعاع انحنای نقطه ماکزیمم ضخامت و نیز زاویه گوه لبه فرار سطح پایینی تغییر داده می‌شود تا حالت بهینه منحنی توصیف‌کننده سطح پایین ایرفویل جهت به حداکثر رساندن راندمان توربین به دست آید.

مدل‌سازی عددی

معادلات حاکم و گسسته سازی آن‌ها

شبیه‌سازی عددی توربین در حالت دوبعدی، تراکم ناپذیر، غیر دائم، بدون انتقال حرارت و جریان مغشوش با استفاده

داریوس توسط هاول^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ صورت گرفت. تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که در اعداد رینولدز کمتر از ۳۰۰۰۰ با افزایش صافی سطح پره، راندمان توربین کاهش ولی در اعداد رینولدزی فراتر از رقم فوق با افزایش صافی سطح پره توربین، راندمان افزایش می‌یابد.

در این پژوهش توربین به کاررفته در مراجع (لن و همکارانش، ۲۰۱۴، لی^۲ و همکارانش، ۱۹۹۸، خانجانپور و جوادی، ۲۰۲۰) به عنوان توربین مینا (شکل (۱)) جهت بهینه سازی انتخاب و با ثابت نگه‌داشتن تمامی فاکتورهای عملکردی توربین از قبیل نرخ سرعت نوک پره، عدد رینولدز و ابعاد هندسی توربین، هندسه پره به کاررفته در این توربین که ناکا^۳ ۰۰۲۵ است به منظور افزایش راندمان اصلاح می‌گردد. بدین منظور و برای کاهش فضای طراحی منحنی بالایی^۴ توصیف‌کننده هندسه هیدروفویل را همان منحنی ناکا ۰۰۲۵ در نظر گرفته و منحنی پایینی^۵ توصیف‌کننده هیدروفویل را باهدف افزایش ضریب تورک^۶ و راندمان توربین طراحی می‌نماییم. برای طراحی هندسه منحنی پایینی هیدروفویل از منحنی پارسک^۷ استفاده می‌گردد.

شرح روش تحقیق

در گام اول این پژوهش، توربین موردنظر برای صحت سنجی نتایج و تخمین ضریب تورک شبیه‌سازی عددی می‌شود. آنگاه با استفاده از یکی از زیرمجموعه‌های روش سطح پاسخ یعنی روش طراحی مرکب مرکزی^۸، ۲۵ مورد از ترکیب پارامترهای منحنی پارسک به منظور بهینه‌سازی شکل هندسی پره توربین انتخاب و در نتیجه ۲۵ هندسه پره طراحی می‌شود. با استفاده از حل عددی جریان حول تمامی این ۲۵ هندسه مختلف که در مرحله قبل طراحی شد، ضریب تورک هر مورد را محاسبه می‌نماییم. با استفاده از چهار پارامتر منحنی پارسک به عنوان ورودی و ضریب تورک معادل با این چهار پارامتر به عنوان خروجی، یک تابع با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی تخمین می‌زنیم. نقطه ماکزیمم تابع حاصله همان هندسه‌های بهینه‌شده پره است.

منحنی پارسک

⁵ Torque

⁶ Parsec

⁷ Central Composite Design

17 Howell

¹ Li

2. NACA

3. Suction side

4. Pressure side

$$Y^+ = \frac{\rho u^* y}{\mu} \quad (۶)$$

در این پژوهش برای مدل‌سازی حرکت توربین از روش مش لغزان^۶ استفاده شده است. بدین منظور حوزه حل جریان سیال به دو حوزه چرخان و حوزه ثابت تقسیم‌بندی شده است. در روش مش لغزان، مش‌های قرار گرفته در حوزه چرخان موقعیت نسبی خود را نسبت به پره‌ها حفظ کرده و در واقع در هر گام زمانی از اجرای نرم افزار همراه با پره‌ها حول مرکز دوران توربین، دوران می‌نمایند.

گسسته‌سازی جمله جابه‌جایی در معادلات مومنتم^۷، انتقال انرژی جنبشی آشفتگی و انتقال فرکانس آشفتگی به روش بالادست مرتبه اول^۸ و جملات گرادانی به روش تقریب کمترین مربعات سلولی^۹ صورت گرفته است. برای میانمایی فشار بر روی سطوح حجم کنترل از روش مرتبه دوم^{۱۰} و همچنین جهت گسسته‌سازی جمله زمانمند از روش کاملاً ضمنی مرتبه دوم^{۱۱} بهره گرفته شده است. برای حل همزمان معادله‌های سرعت و مومنتم از الگوریتم پیروز^{۱۲} و تنها از تصحیح همسایگی^{۱۳} به‌کاررفته در این الگوریتم در نرم‌افزار انسیس فلونت، استفاده گردیده است.

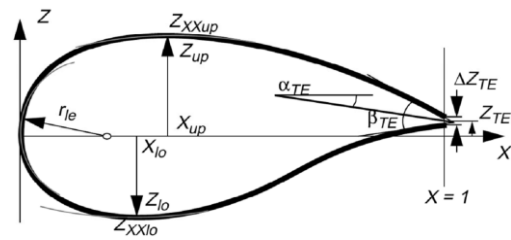
هندسه، تولید مش و شرایط مرزی

هندسه توربین، میدان حل جریان و شرایط مرزی مساله در شکل (۳) نشان داده شده است که به‌صورت دوبعدی مدل شده و جزئیات هندسه و ابعاد در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین ابعاد هندسی توربین و حوزه حل در جدول ۱ نشان داده شده است. جهت صحت سنجی نتایج حل عددی، ابتدا نتایج استقلال حل از شبکه را بررسی می‌نماییم. بدین منظور چهار سطح مختلف مش ساختاریافته هگز^{۱۴} به روش بلوک‌بندی^{۱۵} و با استفاده از نرم افزار آیسیم سی اف دی^{۱۶} ۱۴ تولید شده است و در هر مورد برای ارزیابی همگرایی حل پس از رسیدن باقیمانده‌های حل به $1e - 5$ و شبه نوسانی شدن رفتار ضریب تورک توربین فرآیند حل متوقف و میانگین ضریب تورک محاسبه می‌گردد.

از نرم‌افزار انسیس فلونت^۱ ۱۴ صورت گرفته است. سیال عامل آب در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار اتمسفر و با سرعت ۱/۶۲ متر بر ثانیه در مرز ورودی و با فشار نسبی صفر در مرز فشار خروجی است. معادلات حاکم بر جریان سیال در این حالت معادلات ناویر-استوکس^۲ و معادله پیوستگی برای جریان مغشوش می‌باشند که به شکل زیر است (ساینی و همکارانش، ۲۰۲۰).

$$\nabla \cdot (\vec{V}) = 0 \quad (۲)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (۳)$$



شکل (۲): منحنی پارسک و پارامترهای مربوطه

برای مدل‌سازی جریان مغشوش از مدل SST-k- ω استفاده شده است. این مدل ترکیبی از مدل آشفتگی کی اومگا^۳ و کی-اپسیلون^۴ بوده و به طور هم زمان قابلیت بالای مدل‌سازی کی اومگا در مناطق عدد رینولدز پایین جریان و توانایی بالای مدل کی اپسیلون در نواحی عدد رینولدز بالای جریان را داراست. معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی و فرکانس آشفتگی در این مدل به‌صورت زیر است (حاتمی و همکارانش، ۲۰۱۴):

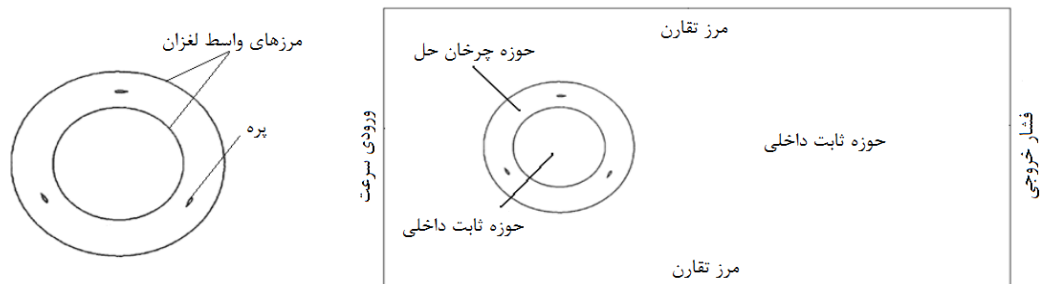
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (۵)$$

وای پلاس^۵ کوچک‌تر از یک از الزامات مدل SST-k- ω بوده و به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

8. Least Square Cell Based
9. Second Order
10 Second Order Implicit
11. PISO
12. Neighbor Correction
13. HEXA Meshing
14. Blocking
15. ICEM CFD 14.0

8. ANSYS FLUENT 14.0
1 Navier-Stokes
2 K- ω
3 K- ϵ
4 Y+
5 Sliding Mesh
6 Momentum
7. First Order Upwind



شکل (۳): هندسه توربین و حوزه حل جریان

جدول (۱): مشخصات هندسی توربین و میدان حل

واحد	اندازه	مشخصه هندسی
سانتیمتر	۱۳/۲۷۵	طول وتر پره توربین (C)
سانتیمتر	۹۰	قطر روتور توربین (D)
متر	۱۰/۳۵	طول حوزه حل جریان
متر	۴/۵	عرض حوزه حل جریان
متر	۲/۲۵	فاصله مرکز روتور تا ورودی حوزه حل
سانتیمتر	۳۰	شعاع دایره مرز واسط لغزان داخلی
سانتیمتر	۶۰	شعاع دایره مرز واسط لغزان خارجی
بی بعد	۱/۷۴۵	نسبت سرعت نوک پره توربین (۸)
رادیان بر ثانیه	۶/۲۸	سرعت دورانی توربین (ω)

جدول (۲): نتایج استقلال حل از شبکه

سطوح مش	تعداد مش	میانگین ضریب تورک (C _T)
۱	۵۸۳۳۷	۰/۰۳۷۱
۲	۱۴۸۰۸۵	۰/۱۵۶۵
۳	۲۴۸۲۹۵	۰/۱۵۴۵
۴	۳۵۲۴۳۱	۰/۱۵۲۳

جدول (۳): تعداد المان در شبکه محاسباتی

تعداد المان	حوزه مورد بررسی
۱۰۱۹۶۴	حوزه چرخان حل
۴۲۴۱۷	حوزه ثابت حل
۱۱۷	مرزهای ورودی و خروجی
۴۳۴	مرزهای تقارن
۲۷۶	پره ها
۰/۰۱	ضخامت اولین لایه مش روی پره ها (mm)
۱/۱	نرخ رشد المان ها از سطح پره ها
۱۴۸۰۸۵	تعداد کل المان ها

آن ها در مقاله خود با مقایسه گام های زمانی مختلف نتایج مستقل از زمان را، گام زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه معرفی می نمایند

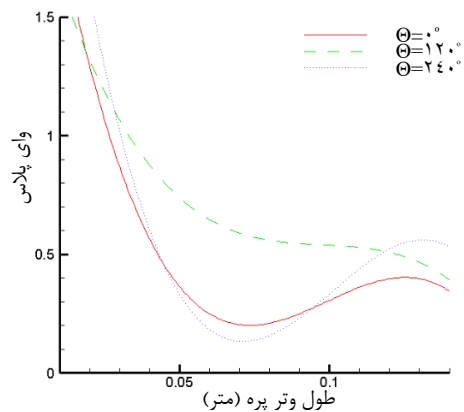
همچنین ابعاد هندسی توربین و حوزه حل در جدول ۱ نشان داده شده است. جهت صحت سنجی نتایج حل عددی، ابتدا نتایج استقلال حل از شبکه را بررسی می نماییم. بدین منظور چهار سطح مختلف مش ساختاریافته هگز ۱^۱ به روش بلوک بندی ۲^۲ و با استفاده از نرم افزار آیس ام سی اف دی ۱۴^۳ تولید شده است و در هر مورد برای ارزیابی همگرایی حل پس از رسیدن باقیمانده های حل به $1e - 5$ و شبه نوسانی شدن رفتار ضریب تورک توربین فرآیند حل متوقف و میانگین ضریب تورک محاسبه می گردد.

جهت محاسبه میانگین ضریب تورک، پس از همگرا شدن حل که با سه دور گردش کامل توربین به دور خود حاصل می شود، انتگرال عددی ضریب تورک لحظه ای در یک چرخش کامل توربین به دور خود (بین ثانیه ۳ تا ۴) محاسبه و بر مدت زمان یک دوران کامل که معادل با یک ثانیه است، تقسیم شده است. همچنین برای محاسبه انتگرال عددی از روش ذوزنقه ای استفاده شده است. سطوح انتخابی برای تعداد مش ها و نتایج صحت سنجی برای استقلال حل از شبکه در جدول (۲) آورده شده است.

با مقایسه سطوح مش ۲ و ۳ و ۴ در جدول (۲)، می توان مستقل شدن حل از شبکه را به وضوح مشاهده نمود. در این پژوهش از سطح ۲ مش معرفی شده در جدول (۲) به علت دقت قابل قبول و زمان حل کمتر نسبت به مش ۳ و ۴ برای مدل سازی رفتار جریان سیال حول تمامی توربین های طراحی شده استفاده می کنیم. در جدول (۳) مشخصات کامل مش به کار رفته در این پژوهش جهت مدل سازی رفتار کلیه توربین ها آورده شده است. در گام بعدی چون مساله به صورت گذرا حل شده است نیاز به نتایج مستقل از زمان است. مساله ای که در این مقاله به عنوان مساله مرجع جهت صحت سنجی استفاده شده، برگرفته از مقاله لن و همکارانش در سال ۲۰۱۴ است.

3. ICEM CFD 14.0

1. HEXA Meshing
2. Blocking



شکل (۴): نمودار وای پلاس بر روی پره در سه موقعیت زاویه‌ای مختلف

روش طراحی مرکب مرکزی

طراحی آزمایش یک روش مفید برای تجزیه و تحلیل داده‌های چند متغیره است زیرا یک جدول داده ساختار یافته تولید می‌کند که شامل مقادیر مهمی از تنوع ساختار داده‌ها است. در مرحله بعد این ساختار اساسی به عنوان مبنایی برای مدل‌سازی چند متغیره که مدل‌های پایدار و قوی را تضمین می‌کند، استفاده خواهد شد. به‌طور کلی انتخاب صحیح داده‌ها جهت انجام آزمایش، شانس استخراج اطلاعات مفید از داده‌ها را افزایش می‌دهد. تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام متغیر به چه میزان و طبق چه الگوی آزمایشی تغییر کند بخش مهمی از انجام آزمایش است. طراحی آزمایش در اصل برای طراحی آزمایش‌های فیزیکی ابداع شد اما بعداً آن برای طراحی آزمایش‌های عددی نیز به کار گرفته شد. طراحی مرکب مرکزی^۱ یک روش طراحی آزمایش آماری است که برای ساختن یک مدل ریاضیاتی مرتبه دوم^۲ برای متغیرهای پاسخ بدون نیاز به انجام کلیه آزمایش‌های عاملی در روش سطح پاسخ کاربرد دارد. روش سطح پاسخ شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیاتی است که رابطه تابعی بین متغیرهای مستقل و یک یا چند متغیر پاسخ را جستجو می‌کند (خوری^۳ و همکارش، ۲۰۱۰).

در روش طراحی مرکب مرکزی هر متغیر مستقل یک فاکتور نامیده می‌شود. این روش از سه بخش تشکیل شده است:

- ۱- یک طراحی عاملی کامل 2^k (k تعداد فاکتورهاست)
- که سطوح ماکزیمم و مینیمم فاکتورها به ترتیب به

که در این پژوهش از همین گام زمانی جهت شبیه‌سازی رفتار گذرای سیال حول تمامی توربین‌ها استفاده شده است.

$$C_p = \lambda C_T \quad (1)$$

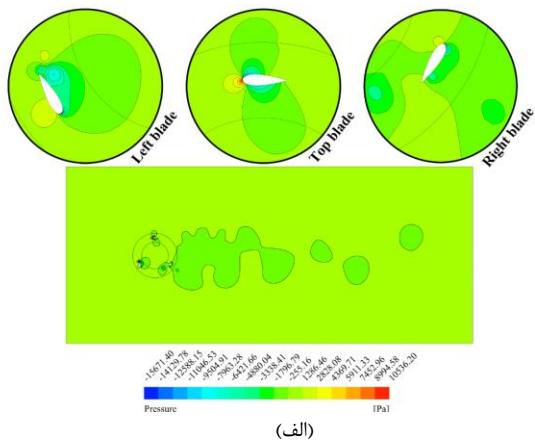
ضریب توان توربین حاصل از مدل‌سازی این پژوهش، که با استفاده از رابطه (۷) به ضریب تورک مرتبط می‌شود، با ضریب توان واقعی همین توربین در شرایط یکسان که حاصل از نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در پژوهش لن و همکارانش در سال ۲۰۱۴، مطابقت خوبی داشته و نشان‌دهنده صحت رویه حل انتخابی است.

برای برآوردن شرط وای پلاس کوچک‌تر از یک بر روی مرز دیواره که از الزامات مدل SST-k- ω است، ضخامت اولین لایه مش بر روی پره‌ها در این پژوهش به نحوی انتخاب شده که این شرط را ارضا نماید. شکل (۴) منحنی چندجمله‌ای درجه سوم وای پلاس برای پره توربین در سه موقعیت زاویه‌ای مختلف و شکل (۵) نمونه‌هایی از مش تولید شده را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اطراف هیدروفویل از شبکه‌بندی ریزتر و مش لایه مرزی جهت افزایش دقت حل استفاده شده است. در شکل (۶) نمونه‌ای از کانتورهای فشار، سرعت و آشفتگی ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل خاص سطح پایینی هیدروفویل (منحنی پارسک) تأثیر زیادی بر ایجاد گردابه، افزایش فشار و آشفتگی در زیر هیدروفویل داشته که با بهینه‌سازی آن می‌توان ضریب تورک را افزایش داد.

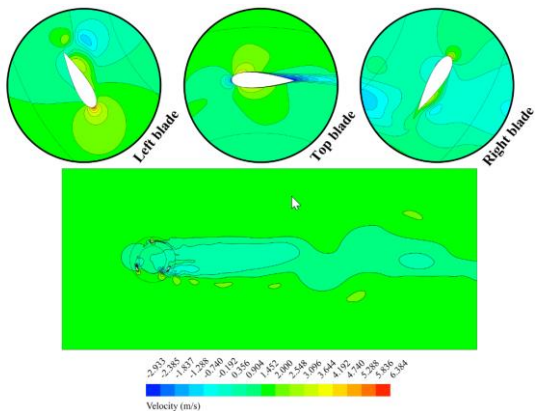
جدول (۴): مقایسه ضریب توان توربین در پژوهش حاضر و

مرجع لن و همکارانش، ۲۰۱۴

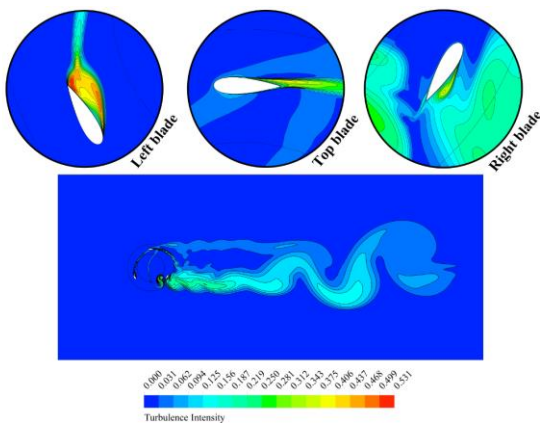
مطالعه حاضر	مطالعه آزمایشگاهی مرجع لن و همکارانش، ۲۰۱۴	
ضریب توان	٪۲۶/۵	٪۲۷/۳



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۶): نتایج حل عددی (الف) شمارگر فشار، (ب) شمارگر سرعت، (ج) شمارگر شدت توربولانسی

بحث و نتایج

همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شد، به علت تأثیر زیاد هندسه سطح زیرین هیدروفویل بر فشار، توربولانسی^۴ و ضریب تورک، برای بهینه‌سازی هندسه هیدروفویل در این پژوهش با ثابت نگه‌داشتن منحنی توصیف‌کننده سطح بالایی هیدروفویل، چهار فاکتور مختصات، اندازه و شعاع

۱ و ۱- نگاشت می‌شوند. این بخش را بخش عاملی می‌نامند.

۲- یک بخش طراحی نقاط محوری^۱ شامل $2k$ نقطه طراحی که در این بخش فاصله نقاط محوری از نقطه مرکز طراحی^۲ برابر با $\pm\alpha$ است. مقادیر α بر مبنای میزان قابلیت اعتماد طراحی و تعداد فاکتورها تعیین می‌شود.

۳- بخش طراحی تعداد نقاط مرکزی (n_0).

بنابراین، تعداد نقاط طراحی در روش طراحی مرکب مرکزی از رابطه (۸) به دست می‌آید.

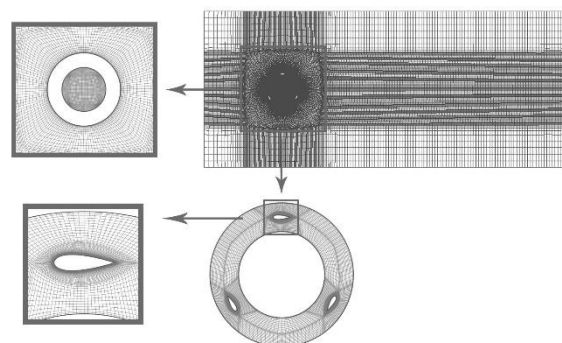
$$n = 2^k + 2k + n_0 \quad (۸)$$

به‌عنوان مثال طراحی مرکب مرکزی برای چهار متغیر مستقل این پژوهش که همان پارامترهای منحنی پارسک می‌باشند با انتخاب یک نقطه مرکزی، ۲۵ نقطه طراحی پیشنهاد می‌دهد.

مدل چندجمله‌ای مرتبه دومی که روش طراحی مرکب مرکزی برای تخمین تابع استفاده می‌کند به فرم معادله (۹) است (حاتمی و همکارانش، ۲۰۱۴).

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j \quad |_{i < j} \quad (۹)$$

در معادله فوق x_i و x_j متغیرهای مستقل طراحی و a پارامترهای معادله (۹) می‌باشند. در این پژوهش جهت طراحی آزمایش عددی به روش طراحی مرکب مرکزی از نرم‌افزار طراحی آزمایش یا دیزاین اکسپرت^۳ استفاده شده است.



شکل (۵): نمونه‌هایی از مش تولیدشده

⁴ Turbulence

1 Axial points
2. Center points
3. Design Expert

است که نشان‌دهنده دقت مناسب این مدل است. معادله تخمینی که ضریب تورک توربین را با توجه به اثرات فاکتورهای اصلی و تعامل دو به دو بین فاکتورها محاسبه می‌نماید، به شکل معادله (۱۰) به دست می‌آید.

$$C_T = 0.13976 - 0.0039x_{i0} + 0.0068y_{i0} + 0.0013\beta_{TE} - 0.0173z_{xxl0} - 0.0005x_{i0}y_{i0} + 0.0021x_{i0}\beta_{TE} - 0.0046x_{i0}z_{xxl0} - 0.0013y_{i0}\beta_{TE} + 0.0023y_{i0}z_{xxl0} + 0.003\beta_{TE}z_{xxl0} + 0.0023x_{i0}^2 + 0.0012y_{i0}^2 - 0.0063\beta_{TE}^2 - 0.0024z_{xxl0}^2$$

شکل (۷) تأثیر مکان و شعاع انحنای ماکزیمم ضخامت منحنی پارسک توصیف‌کننده سطح پایین هندسه هیدروفویل این پژوهش بر ضریب تورک توربین را نشان می‌دهد. همانطوری که در این شکل مشخص است، کاهش شعاع انحنا (Z_{xxl0}) باعث افزایش ضریب تورک توربین می‌گردد که مقدار ماکزیمم ضریب تورک در سطح ۱- (۷۵٪) مطابق با جدول (۵) رخ داده است درحالی‌که مکان ماکزیمم (x_{i0}) با کاهش شعاع انحنا تأثیر بسیار کمی بر ضریب تورک خواهد داشت و در هر دو سطح ۱- و ۱+ مقدار بیشینه خواهد داشت. همچنین مطابق شکل (۸)، افزایش ماکزیمم ضخامت (y_{i0}) باعث افزایش ضریب تورک شده حال آنکه با کاهش زاویه گوه لبه فرار (β_{TE}) تا میزان مشخصی ضریب تورک افزایش و بعد از آن کاهش یافته است که این مطالب به‌خوبی از شکل (۸) قابل استنباط است که مقدار ماکزیمم ضریب تورک در سطح میانی زاویه گوه و سطح ۱+ ماکزیمم ضخامت رخ داده است. از شکل‌های (۷) و (۸) مشخص است که از میان چهار فاکتور مستقل این پژوهش، ضریب تورک به تغییر شعاع انحنای نقطه ماکزیمم ضخامت منحنی حساسیت بیشتری دارد که ناحیه‌های طراحی بهینه روی شکل‌ها مشخص شده است.

فاکتورهای بهینه مستقل این پژوهش که با بهینه‌سازی به روش طراحی مرکب مرکزی به‌دست آمده‌اند، در جدول (۷) آورده شده است. جهت اطمینان به افزایش تورک و راندمان توربین با استفاده از هندسه هیدروفویل به‌دست‌آمده، شبیه‌سازی عددی انجام شد. با شبیه‌سازی عددی توربین با پروفیل حاصله، افزایش ضریب تورک به میزان ۴ درصد نسبت به حالتی که از پروفیل پره ناکا ۰۰۲۵ استفاده می‌شود، حاصل شد که این مطلب در جدول (۸) نشان داده شده است. در شکل (۹) هندسه بهینه‌شده پره نمایش

انحنای ماکزیمم ضخامت و نیز زاویه گوه لبه فرار منحنی پارسک توصیف‌کننده سطح پایینی هیدروفویل تغییر داده می‌شود تا ترکیب بهینه این فاکتورها به دست آید. سطوح انتخابی این فاکتورها برای روش طراحی مرکب مرکزی در جدول (۵) نشان داده شده‌اند که بر اساس حداقل و حداکثر مقادیر قابل امکان مطابق با هندسه مسئله انتخاب شده است. همچنین نمونه‌هایی از ۲۵ آزمایش طراحی شده با این سطوح توسط روش طراحی مرکب مرکزی و ضرایب تورک مربوط به هر مورد که با حل عددی به دست آمده‌اند در جدول (۶) آورده شده است. اعداد این جدول به جز زاویه گوه لبه فرار که برحسب درجه در جدول (۶) آمده، نسبت به طول وتر پره که عدد یک در نظر گرفته می‌شود، بی‌بعد شده‌اند. مقدار α برابر واحد و تنها یک نقطه مرکزی برای طراحی مرکب مرکزی انتخاب شده است. از منحنی چندجمله‌ای مرتبه دوم (معادله (۹)) برای تخمین متغیر پاسخ (ضریب تورک) استفاده شده است.

جدول (۵): سطوح فاکتورها در روش طراحی مرکب مرکزی

فاکتورها	نماد	سطح ۱-	نقطه مرکزی	سطح ۱+
مختصه ضخامت ماکزیمم	x_{i0}	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵
اندازه ضخامت ماکزیمم	y_{i0}	۰/۱۲	۰/۱۳۷۵	۰/۱۳۵
شعاع انحنا ضخامت ماکزیمم	Z_{xxl0}	۰/۷۵	۱/۲۵	۱/۷۵
زاویه گوه لبه فرار (Degree)	β_{TE}	-۵	۵/۵	۱۶

جدول (۶): نمونه‌هایی از فاکتورهای طراحی شده منحنی

پارسک با روش مرکب مرکزی

ردیف	x_{i0}	y_{i0}	Z_{xxl0}	β_{TE}	ضریب تورک (C_T)
۱	۰/۳	۰/۱۳۷۵	۰/۷۵	۵/۵	۰/۱۵۷۸
۲	۰/۲۵	۰/۱۳۷۵	۱/۲۵	۵/۵	۰/۱۴۷۷
۳	۰/۳۵	۰/۱۳۵	۰/۷۵	۱۶	۰/۱۵۵۴
۴	۰/۲۵	۰/۱۳۵	۰/۷۵	-۵	۰/۱۵۷۶
۵	۰/۲۵	۰/۱۳۵	۰/۷۵	۱۶	۰/۱۵۰۶
۶	۰/۳۵	۰/۱۳۵	۰/۷۵	-۵	۰/۱۵۸۵
۷	۰/۳۵	۰/۱۲	۰/۷۵	۱۶	۰/۱۴۷۵
۸	۰/۳۵	۰/۱۳۵	۱/۲۵	-۵	۰/۱۱۱۵
...					
۲۴	۰/۲۵	۰/۱۳۵	۱/۷۵	۱۶	۰/۱۳۶
۲۵	۰/۳	۰/۱۳۷۵	۱/۲۵	-۵	۰/۱۳۱۸

ضریب تعیین^۱ مدل مرتبه دوم تخمین زده شده ۰/۹۸۸۶ و جذر مربعات میانگین خطایش^۲ برابر با ۰/۰۰۶۹

شکل (۸): اثر تغییر اندازه ضخامت ماکزیمم و زاویه گوه لبه فرار بر ضریب تورک

جدول (۸): مقایسه ضریب تورک توربین با هیدروفویل اولیه و بهینه شده

درصد افزایش	هیدروفویل بهینه	هیدروفویل اولیه	ضریب تورک
۴	۰/۱۶۲۴	۰/۱۵۶۵	ضریب تورک

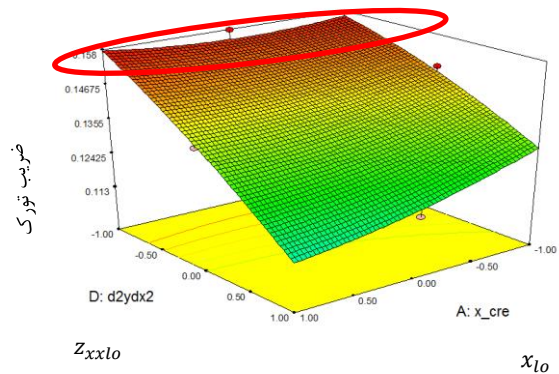
خلاصه نتایج

در این پژوهش با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی که یکی از زیرمجموعه‌های روش سطح پاسخ است برای بهینه‌سازی هندسه هیدروفویل پره یک توربین داریوس با هدف افزایش ضریب تورک توربین، استفاده شد. برای رسیدن به این هدف، ۲۵ هندسه هیدروفویل مختلف با یک نقطه مرکزی طراحی و جایگزین هندسه هیدروفویل اصلی توربین شد. در هر مورد با حل عددی جریان سیال عامل حرکت توربین، ضریب تورک محاسبه و با استفاده از اطلاعات حاصل شده یک منحنی مرتبه دوم برای تخمین ضریب تورک به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که انحنای منحنی پارسک در محل ماکزیمم ضخامت، بیشترین تأثیر را بر ضریب تورک توربین دارد به طوری که با کاهش آن ضریب تورک افزایش می‌یابد. همچنین با استفاده از بهینه‌سازی به روش طراحی مرکب مرکزی هندسه هیدروفویل بهینه برای توربین این پژوهش حاصل شد که افزایش ۴ درصدی در ضریب تورک در آن مشاهده شد.

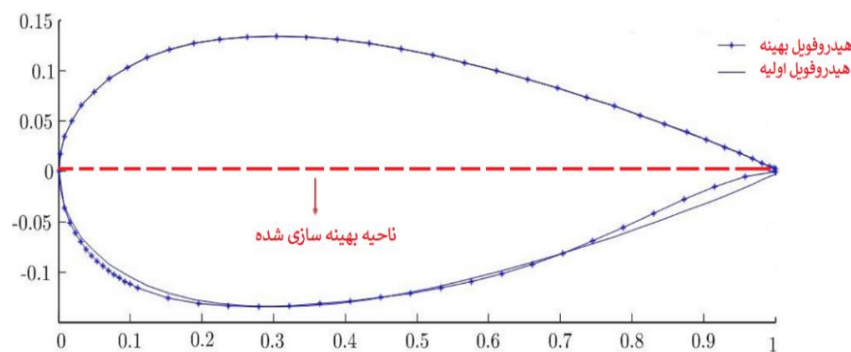
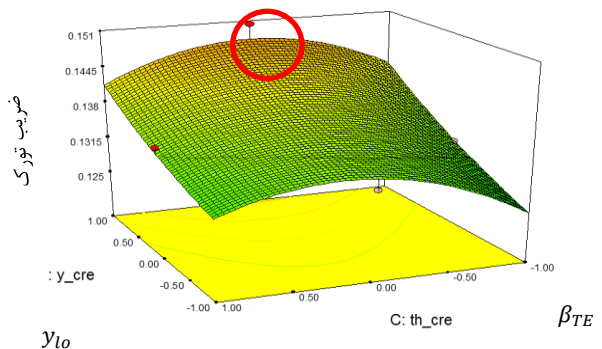
داده شده است. در هندسه بهینه ارائه شده در قسمت انتهایی هیدروفویل به دلیل انحنای ایجاد شده، توربولانسی افزایش یافته و ضریب تورک را افزایش خواهد داد که در نتایج نیز مشهود است.

جدول (۷): مقادیر بهینه فاکتورهای طراحی

فاکتورها	x_{lo}	y_{lo}	β_{TE}	Z_{xxlo}
مقادیر بهینه	۰/۲۷۰۵	۰/۱۳۴۷	۲/۴۸۵۳	۰/۸۳۵۶



شکل (۷): اثر تغییر مختصه ماکزیمم و شعاع انحنای بر ضریب تورک



شکل (۹): مقایسه بین هندسه اولیه هیدروفویل و هندسه بهینه شده

7- Khanjanpour, M. H., & Javadi, A. A. (2020). Experimental and CFD Analysis of Impact of Surface Roughness on Hydrodynamic Performance of a Darrieus Hydro (DH) Turbine. *Energies*, 13(4), 928.

8- Khuri, A. I., & Mukhopadhyay, S. (2010). Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(2), 128-149.

9- Laín, S., López, O., Quintero, B., & Meneses, D. (2013). Design optimization of a vertical axis water turbine with CFD. In *Alternative energies* (pp. 113-139). Springer, Berlin, Heidelberg.

10- Langroudi, A. T., Afifi, F. Z., Nobari, A. H., & Najafi, A. F. (2020). Modeling and numerical investigation on multi-objective design improvement of a novel cross-flow lift-based turbine for in-pipe hydro energy harvesting applications. *Energy Conversion and Management*, 203, 112233.

11- Malipeddi, A. R., & Chatterjee, D. (2012). Influence of duct geometry on the performance of Darrieus hydro turbine. *Renewable Energy*, 43, 292-300.

12- Patel, V., Eldho, T. I., & Prabhu, S. V. (2017). Experimental investigations on Darrieus straight blade turbine for tidal current application and parametric optimization for hydro farm arrangement. *International journal of marine energy*, 17, 110-135.

13- Saini, G., & Saini, R. P. (2020). Comparative investigations for performance and self-starting characteristics of hybrid and single Darrieus hydrokinetic turbine. *Energy Reports*, 6, 96-100.

14- Saini, G., & Saini, R. P. (2020). A computational investigation to analyze the effects of different rotor parameters on hybrid hydrokinetic turbine performance. *Ocean Engineering*, 199, 107019.

15- Shashikumar, C. M., Honnasiddaiah, R., Hindasageri, V., & Madav, V. (2021). Studies on application of vertical axis hydro turbine for sustainable power generation in irrigation channels with different bed slopes. *Renewable Energy*, 163, 845-857.

16- Sobieczky, H., Center, D. G. A., Seebass, R., Li, P., Engineer, S. S., & Hannemann, M. (1998, January). Manual aerodynamic optimization of an oblique flying wing. In *Proceedings of the 36th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (pp. 12-15).

17- Tunio, I. A., Shah, M. A., Hussain, T., Harijan, K., Mirjat, N. H., & Memon, A. H. (2020). Investigation of duct augmented system effect on the overall performance of straight blade Darrieus hydrokinetic turbine. *Renewable Energy*, 153, 143-154.

18- Yang, B., & Shu, X. W. (2012). Hydrofoil optimization and experimental validation in helical vertical axis turbine for power generation from marine current. *Ocean Engineering*, 42, 35-46.

فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	p
تولید انرژی جنبشی آشفتگی	\tilde{G}_k
سرعت (ms^{-1})	u_j
سرعت اصطکاکی (m s^{-1})	u^*
تولید فرکانس آشفتگی	G_ω
جمله چشمه	S
تابع اختلاط	D
علائم یونانی	
چگالی (kgm^{-3})	ρ
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
ضریب نفوذ	Γ
زیر نویس ها	
فرکانس آشفتگی	ω
انرژی جنبشی آشفتگی	k

مراجع

1- Benzerdjeb, A., Abed, B., Achache, H., Hamidou, M. K., & Gorlov, A. M. (2019). Experimental study on blade pitch angle effect on the performance of a three-bladed vertical-axis Darrieus hydro turbine. *International Journal of Energy Research*, 43(6), 2123-2134.

2- Fraenkel, P. L. (2002). Power from marine currents. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 216(1), 1-14.

3- Han, S. H., Park, J. S., Lee, K. S., Park, W. S., & Yi, J. H. (2013). Evaluation of vertical axis turbine characteristics for tidal current power plant based on in situ experiment. *Ocean Engineering*, 65, 83-89.

4- Hasankhani Gavabari R., T. Gorji, M. Gorji-Bandpy, D. Domiri Ganji, (2014), review of marine renewable energy in iran, 8th international conference of on advances in engineering science, tonekabon, iran

5- Hatami, M., Jafaryar, M., Ganji, D. D., & Gorji-Bandpy, M. (2014). Optimization of finned-tube heat exchangers for diesel exhaust waste heat recovery using CFD and CCD techniques. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 254-263.

6- Howell, R., Qin, N., Edwards, J., & Durrani, N. (2010). Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable energy*, 35(2), 412-422.

Numerical optimization of hydrofoil geometry for a Darrieus hydraulic turbine using dynamic mesh and central composite design

Reza Kamrani¹
Mehrdad Jafaryar²
Mohammad Hatami^{3*}

Abstract

In this study, a Darrieus hydraulic turbine for power generation applications is chosen and the response surface methodology (RSM) based on central composite design (CCD) is applied to obtain the optimized design for its hydrofoil geometry to increase the torque coefficient. For this aim, all turbine performance factors, except hydrofoil geometry, were considered to be constant and the turbine torque coefficient was estimated as a function of hydrofoil geometry using Parsec hydrofoil function by CCD technique. Optimized geometry of the turbine blade is the maximum points of the proposed function by RSM. To determine the turbine torque coefficient, two dimensional and transient numerical simulation for incompressible fluid flow using finite volume method is considered. Results show that the optimized geometry increases the torque coefficient about four percentages.

Keywords

Darrieus Turbine, Numerical Simulation, Response Surface Method, Central Composite Design, Parsec Hydrofoil.

-
1. Department of Mechanical Engineering, Mazandaran Institute of Technology, Babol, Iran
 2. Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
 3. * Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. m-hatami@um.ac.ir