



## هیدروفویل میکروتوربین آبی محور عمود داریوس نوع اچ روتور

حسین سیفی<sup>۱\*</sup>، محسن سیفی داوری<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار

۲- کارشناس، مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور مرکز اردبیل، اردبیل

\* چابهار، صندوق پستی ۹۹۷۱۷۵۶۴۹۹، [hseifidavary@gmail.com](mailto:hseifidavary@gmail.com)

### چکیده

در این تحقیق برای تحلیل آیرودینامیکی هیدروفویل میکروتوربین آبی محور عمود داریوس نوع اچ، سه هیدروفویل NACA0015، NACA0018 و NACA0021 انتخاب و با استفاده از معادله بی‌زیر هیدروفویل ها با استفاده از مدل اصلی آن، مدل سازی شد. سپس با استفاده از روش کدنویسی HOPMBL که با روش المان مرزی حل شد، ضریب توزیع فشار هیدروفویل NACA0015 نسبت به دو هیدروفویل دیگر در اعداد رینولدز مختلف شرایط بهتری داشت و در روش دیگر با استفاده از نرم افزار Q-Blade هیدروفویل NACA0015 نسبت ماکزیمم ضریب لیفت به درگ در عدد رینولدز ۵۳۶۷۰ نسبت به سایر هیدروفویل ها بیش تر و در زاویه ۵٫۹ درجه برابر ۲۴٫۳ می باشد و بخاطر همین، هیدروفویل NACA0015 انتخاب شد. سپس برای تحلیل هیدروفویل از نرم افزار فلونتت از مدل  $K\omega - SST$  استفاده تا ضریب لیفت، ضریب درگ و ضریب توزیع فشار را بر حسب طول بدست آورده و با داده بدست آمده از نرم افزار Q-Blade مقایسه و همخوانی خوبی داشت. در ادامه میکرو توربین آبی با هیدروفویل NACA0015 با طول وتر، ارتفاع پره و شعاع روتور ۶٫۴، ۳۵ و ۱۸٫۵ سانتی متر در نرم افزار کتیا طراحی و ساخته شد. سپس هیدروتوربین طراحی شده در نرم افزار انسیس فلونتت با مدل Realizable k-e شبیه سازی و در شرایط سرعت و فشار استاتیکی مورد تحلیل قرار گرفت.

کلیدواژگان: هیدروفویل، میکرو توربین آبی، X-Foil، داریوس، نسبت ضریب برآ به ضریب پسا

## Hydrofoil of Darriues H-Rotor Vertical Axis Water Micro Turbine

Hossein Seifi<sup>1\*</sup>, Mohsen Seifi Davari<sup>2</sup>

۱- Department Marine of Engineering, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran

2- Civil Engineering, University of Payam Nur, Ardabil, Iran

\* P.O.B. 9971756499 Chabahar, Iran, [hseifidavary@gmail.com](mailto:hseifidavary@gmail.com)

Received: 11 January 2020 Accepted: 07 June 2020

### Abstract

In this study, for aerodynamic analysis the vertical axis of Darius H type of hydrofoil micro water turbine, three hydrofoil NACA0015, NACA0018 and NACA0021 were selected and modeled using the Bezier equation of hydrofoil using its original model. Then, using the HOPMBL coding method, which was solved by the boundary element method, the NACA0015 hydrofoil pressure distribution coefficient was better than the other two hydrofoils numbers in different Reynolds numbers, and in another method, the maximum lift to drag coefficient using Q-Blade NACA0015 hydrofoil software The drip lift is higher on the Reynolds 53670 than on any other hydrofoil, at 5.9degree angle of 24.3, which is why the NACA0015 was chosen. Then, to analyze the hydrofoil of the fluent software, it used the KW-SST model to obtain the lift coefficient, drag coefficient and the pressure distribution coefficient in terms of length, and compared it with the data obtained from the Q-Blade software. Next, the water micro turbine with NACA0015 hydrofoil with chord length, blade height and rotor radius of 6.4, 35 and 18.5 cm was designed in catia software and manufactured. Then, the hydro-turbine designed in Ansys Fluent software was simulated with Realizable k-e model and analyzed velocity and pressure static conditions.

**Keywords:** Hydrofoil, Micro Wind Turbine, X-Foil, Darriues, Aspect Ratio Lift to Drag Coefficient



## ۱- مقدمه

جریان آب عبوری از هر سطحی دو نوع نیروی آبرودینامیکی به وجود می‌آورد که با نام‌های پسا و برآ شناخته می‌شوند که نیروی درگ در جهت باد و نیروی لیفت عمود بر جریان باد می‌باشد [۷].

خان و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۹ سیستم تبدیل انرژی هیدروکینتیک و ارزیابی توربین‌های محور افقی و عمودی برای ساختار رودخانه‌ها و شرایط جزر و مدی را مورد مطالعه قرار دادند.

هاوانگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۹ بهینه‌سازی توربین آبی حلقوی و بهبود عملکرد توسط کنترل پره را به صورت تکی مورد مطالعه قرار دادند.

آنی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۰ بر روی ارزیابی توربین‌های هیدروکینتیک جریان محوری کوچک تحقیق نمودند.

گونی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۰ بررسی وضعیت فناوری سیستم‌های تبدیل انرژی هیدروکینتیک را مورد مطالعه قرار دادند.

لاگو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۰ بر روی پیشرفت‌ها و روند سیستم‌های توربین هیدروکینتیک مطالعه نمودند.

کینسی و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۱ آزمایش نمونه اولیه یک توربین هیدروکینتیک مبتنی بر هیدروفویل‌های نوسان‌کننده را انجام دادند.

دای و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۱ مدل‌های آنالیز هیدروکینمیک برای طراحی توربین‌های دریایی محور عمودی از نوع داریوس را مورد مطالعه قرار دادند.

چیمی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۳ بر روی آنالیز توربین‌های هیدروکینتیک در جریان‌های کانال باز مطالعه نمودند.

اشلیکر و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۳ طراحی و شبیه‌سازی یک میکرو هیدرو توربین را مورد مطالعه قرار دادند.

فلیسینجر و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۴ تجزیه و تحلیل جریان محوری از یک توربین آبی محور عمودی داریوس را مورد مطالعه قرار دادند.

دادواد و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۵ طراحی پره‌های هیدرو میکروتوربین را مورد مطالعه قرار دادند.

یانگ [۱۸] در سال ۲۰۱۵ هیدروتوربین آبی محور عمودی داریوس با پره‌های جامی را تست کردند.

یانگ و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۶ توربین آبی محور عمودی از نوع موجی با پره‌های هیدروفویلی را طراحی و ساختند.

در پژوهش حاضر به تحلیل آبرودینامیکی هیدروفویل توربین آبی عمود محور داریوس نوع اچ در اعداد رینولدز پایین پرداخته می‌شود.

## ۲- مدل‌سازی هیدروفویل

برای مدل‌سازی هیدروفویل‌ها از معادلات بی‌یراستفاده شده است. نحوه حل معادلات بی‌یر به این صورت است که با داشتن نقاط ابتدایی، انتهایی و یک نقطه به عنوان نقطه کنترلی می‌توان هیدروفویل مورد نظر را از پانل‌های درجه دوم مدل‌سازی کرد. در این حل برای رسیدن به بهترین نقطه کنترلی ذکر شده از روش کم‌ترین مربعات استفاده شد. معادلات بی‌یر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$B(t) = (1-t)^2 P_0 + 2(1-t)t P_1 + t^2 P_2 \quad (1)$$

که  $t$  پارامتر بی‌یر که بین صفر تا یک قرار دارد و  $P_1$  نقطه کنترلی و  $P_0$  و  $P_2$  نقاط ابتدایی و انتهایی می‌باشد. در روش پانل مرتبه بالا، مدل‌سازی نیروی

نیاز بشر برای دستیابی به انرژی بطور مستمر وجود داشته و از منابع مختلفی برای تأمین آن بهره می‌برده است. امروزه از سوخت‌های فسیلی برای گرم کردن خانه‌ها و تولید توان ماشین‌ها استفاده می‌شود. استفاده از زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی برای رفع نیاز به انرژی راحت و مناسب بوده ولی منابع این سوخت‌ها روی کره زمین محدود است. علاوه بر این به علت افزایش قیمت روزافزون حامل‌های انرژی از جمله نفت و گاز و ازدیاد آلاینده‌های ناشی از استفاده از این نوع منابع، مجبور به استفاده از انرژی‌های نو یا تجدید پذیر هستیم [۱].

یکی از منابع انرژی تجدید پذیر اقیانوس‌ها و دریاها هستند که پتانسیل زیادی برای تأمین انرژی جهان دارد. آب اقیانوس مدام در حال حرکت است و جریان‌های اقیانوسی در الگوهای مختلفی حرکت می‌کنند که تحت تأثیر باد، شوری آب، دما، نقشه کف اقیانوس و چرخش زمین قرار دارد. جریان‌های اقیانوسی توسط باد و گرمای آب نزدیک استوا در اثر خورشید ایجاد می‌شوند. برخی از این جریان‌ها از اختلاف چگالی و شوری آب حاصل می‌شوند. این جریان‌ها نسبتاً ثابت‌اند و تنها در یک جهت جریان دارند. گرچه جریان‌های اقیانوسی با سرعت کمتر از سرعت باد حرکت می‌کنند ولی به خاطر چگالی زیاد آب مقدار قابل توجهی انرژی حمل می‌کند [۲].

روش بسیار متداول برای بهره‌برداری از جریان‌های دریایی استفاده از توربین جریان دریایی است که عمود بر جهت جریان در بستر دریا قرار گرفته و یا از سکوی شناوری آویزان می‌شود. برای بهره‌برداری موفق از این منبع انرژی، در درجه اول دستیابی به هیدروکینمیک توربین‌های جریان دریایی از اهمیت برخوردار است [۳].

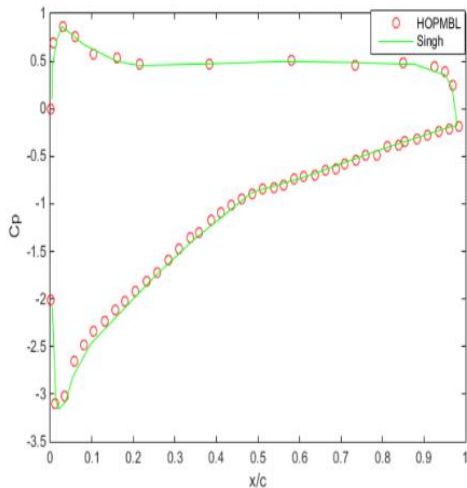
در میان انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی آبی از انرژی‌های مهم به شمار رفته که قسمتی از آن مربوط به اقیانوس است. این انرژی تحت عنوان انرژی اقیانوسی، توان اقیانوسی، انرژی دریایی یا توان دریایی شناخته می‌شود. اقیانوس دارای پتانسیل انرژی تجدید پذیر گسترده‌ای به صورت‌های موج، جزر و مد، جریان‌های دریایی، اختلاف دما میان آب‌های سرد عمیق و آب‌های گرم سطحی، اختلاف شوری در دهانه‌های رودخانه‌ها است. امواج منبع توان زیادی هستند، آن‌گونه که دستگاه‌های گوناگونی را در اندیشه می‌پروانند جزر و مد نتیجه ترکیبی از گرانش خورشید، ماه و دوران زمین هستند [۴].

دریا منبع عظیمی از انرژی است. دریا و زمین واقع در زیر دریا قادر است تمام انرژی موردنیاز جهان را در سال‌های آینده تأمین کند. با توجه به نیاز روزافزون به انرژی و روند نزولی منابع سوخت فسیلی و گازهای طبیعی و همچنین آلودگی‌های ناشی از این سوخت‌ها باید به سرعت به سوی منابع جایگزین رفت. یکی از بهترین گزینه‌ها منابع انرژی تجدیدشونده دریا است. در حال حاضر یکی از دلایل عدم استفاده از انرژی‌های نو نسبت به دیگر انرژی‌ها، گرانی هزینه بهره‌برداری از آن‌ها است زیرا استخراج این انرژی به دلیل کمبود تکنولوژی هنوز به صرفه نیست. تحقیقات وسیعی در زمینه این تکنولوژی انجام شده و یا در دست اجرا است [۵].

انرژی‌های اقیانوسی یک پیشنهاد خوب برای دستیابی به انرژی‌های نو بوده که یکی از عمده‌ترین روش‌های استحصال توان از طریق توربین‌های جریان دریایی محور عمودی است. مکانیزم کار این نوع توربین‌ها شباهت زیادی به توربین‌های بادی محور عمودی داشته و می‌توان از فناوری آن در زمینه این نوع توربین‌ها بهره برد. هر چند اختلافات عمده‌ای در اثرات سطح آزاد و وقوع کایوتاسیون دارند [۶].



برای اعتبارسنجی کد HOPMBL نتایج کد را برای حالت نامحدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و توزیع فشار هیدروفویل AF300 را در زاویه حمله ۱۰ درجه در عدد رینولدز ۷۵۰۰۰ مدل سازی کرده که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده که بیانگر تطابق خوب نتیجه آزمایشگاهی با مدل انجام شده است.



شکل ۴ توزیع فشار در هیدروفویل AF300 در رینولدز ۷۵۰۰۰ و زاویه حمله ۱۰ درجه

### ۳- طراحی آیرودینامیکی هیدروفویل با استفاده از نرم افزار X-Foil و روش المان مرزی با استفاده از کدنویسی

برای انجام روند شبیه سازی و انتخاب هیدروفویل از نرم افزار X-Foil استفاده شد. نرم افزار ذکر شده نرم افزاری است که برای محاسبات توربین های بادی و آبی استفاده می شود که با استفاده از سرعت می توان هیدروفویل مناسب را طراحی و عملکرد قطبی آن را در زوایای ۳۶۰ درجه بررسی کرد و در طراحی روتورهای توربین آبی و شبیه سازی آن ها مورد استفاده قرار داد. این نرم افزار با استفاده از مدل های مومنتم و الگوریتم صحیح، شبیه سازی را انجام می دهد و پارامترهای مورد نیاز طراحی با مدل CMDMS تغییر می پذیرد که از یک مدل مومنتم دو مرحله ای برای شبیه سازی آیرودینامیک هیدروتوربین آبی محور عمودی استفاده می کند. جریان آب به یک قسمت کلی و یک قسمت محلی تفکیک می شود. مدل قسمت محلی جریان آب از نقشه برداری منسجم برای توصیف هیدروفویل همانند یک دایره استفاده می کند. با این روش سریع تر شدن محاسبات با استفاده از تبدیل فوریه امکان پذیر می شود. برای برخی پروفیل های متقارن NACA بخاطر اعداد رینولدز کم خلا داده تجربی در ناحیه پیش استال وجود دارد [۲۱].

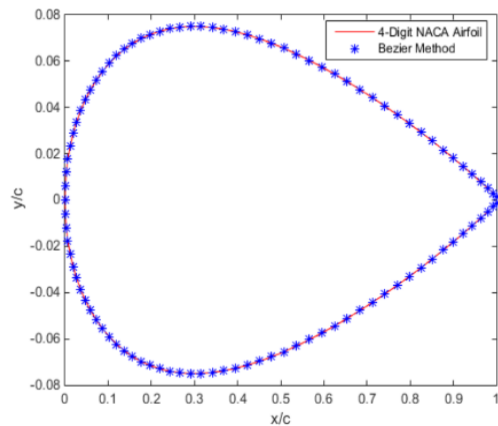
### ۳-۱ انتخاب هیدروفویل با استفاده از نرم افزار Q-Blade

برای انتخاب هیدروفویل از سه هیدروفویل Naca0018، Naca0015 و Naca0021 استفاده شد. برای تحلیل هیدروفویل ها از نرم افزار X-Foil استفاده و در نهایت هیدروفویلی که ضریب لیفت به درگ بالایی داشته باشد، برای طراحی از آن استفاده می شود.

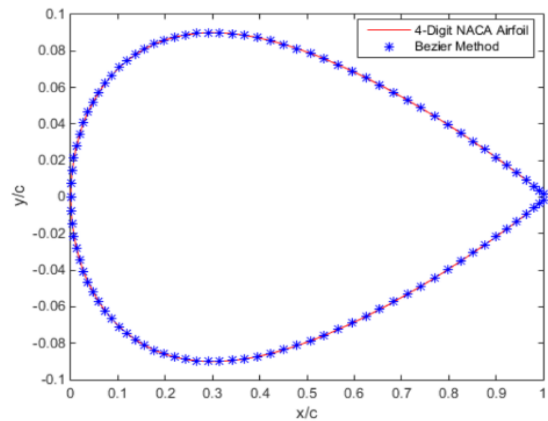
از نمودارهای مهم در تحلیل هیدروفویل ها نمودار ضریب لیفت به ضریب درگ بر حسب زاویه آلفا می باشد. سه هیدروفویل ذکر شده در اعداد رینولدز ۳۵۷۸۰، ۱۷۸۹۰ و ۵۰۰۰۰ بررسی شد و نتایج آن در شکل های ۵، ۶ و ۷ آورده شد. ماکزیمم ضریب لیفت به درگ در هیدروفویل NACA0015 در اعداد رینولدز ۳۵۷۸۰ و ۵۳۶۷۰ در زوایای ۵٫۸ و ۵٫۹ درجه اتفاق می افتد. چون

لیفت و ایرفویل با یک تکین انجام می شود تا حجم محاسبات کاهش یابد و جریان باید پتانسیل باشد [۲۰].

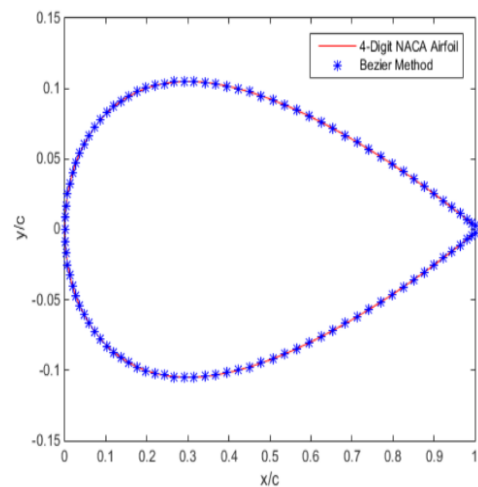
برای اطمینان از صحت مدل سازی بیزیر هیدروفویل، نتایج آن را با سه هیدروفویل NACA0015، NACA0018 و NACA0021 با هیدروفویل اصلی آن مقایسه کرده که در شکل ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. با مشاهده شکل های ذکر شده، می توان به این نتیجه رسید که مدل بیزیر هیدروفویل برای مدل سازی شرایط قابل قبولی را دارد.



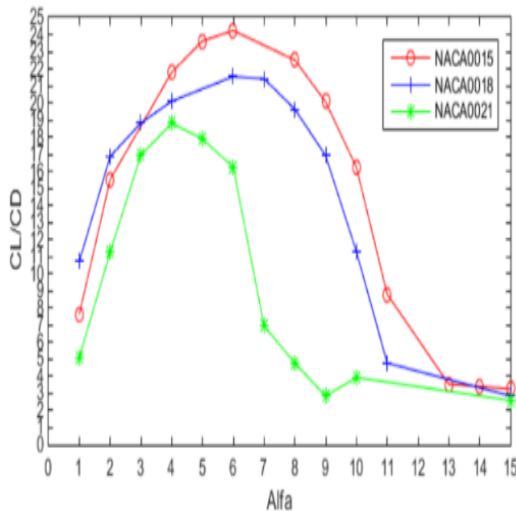
شکل ۱ مقایسه مدل بیزیر هیدروفویل NACA0015 با مدل اصلی آن



شکل ۲ مقایسه مدل بیزیر هیدروفویل NACA0018 با مدل اصلی آن



شکل ۳ مقایسه مدل بیزیر هیدروفویل NACA0021 با مدل اصلی آن



شکل ۷ مقایسه ضریب لیفت به درگ سه هیدروفویل NACA0015, NACA0018 و NACA0021 در عدد رینولدز ۵۳۶۷۰

در شکل ۷ مقایسه نسبت ضریب لیفت به درگ سه هیدروفویل در اعداد رینولدز ۵۳۶۷۰ قابل مشاهده است که در هیدروفویل NACA0015 این نسبت در زاویه ۵٫۹ برابر ۲۴٫۴ می باشد و در هیدروفویل NACA0018 در زاویه ۵٫۸ درجه این نسبت برابر ۲۱٫۷ و برای هیدروفویل NACA0021 در زاویه ۴٫۲ نسبت ضریب برآ به ضریب پسا ۱۸٫۸ می باشد که در عدد رینولدز ذکر شده هیدروفویل NACA0015 نسبت ضریب لیفت به درگ بالایی در زاویه ۵٫۹ درجه دارد و مناسب انتخاب در این عدد رینولدز با استفاده از نرم افزار X-Foil می باشد.

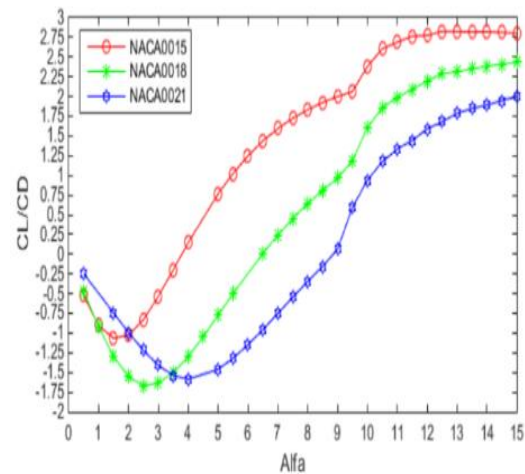
### ۲-۲- تحلیل به روش المان مرزی با استفاده از کدنویسی HOPMBL

کارایی هیدروفویل طراحی شده به روش المان مرزی مستقیم و در حالت پایا مورد ارزیابی قرار گرفته شد. در این روش معادله انتگرالی مرزی لاپلاس با فرض جریان پتانسیل حل می شود. در این راستا ابتدا هیدروفویل توربین و دنباله ناشی آن مدل سازی با استفاده از کدنویسی HOPMBL انجام و در نهایت توزیع فشار روی هیدروفویل مشخص شد. در شکل ۸ توزیع فشار حاصل از تحلیل جریان با استفاده از کد نویسی با استفاده از روش المان مرزی را در سه هیدروفویل NACA0015, NACA0018 و NACA0021 در عدد رینولدز ۵۰۰۰۰ در زاویه ۵ درجه نشان می دهد.

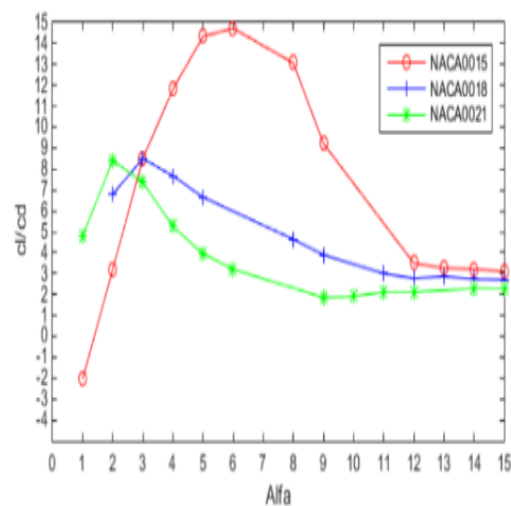
با توجه به شکل ۸ می توان دریافت که هیدروفویل NACA0015 نسبت به دو هیدروفویل دیگر از ضریب توزیع فشار قابل قبول تری نسبت به دو هیدروفویل دیگر دارد.

با توجه به اینکه با استفاده از تحلیل های روش المان مرزی و Q-Blade نتیجه ای که حاصل شد هیدروفویل NACA0015 در دو روش ذکر شده نسبت ماکزیمم ضریب برآ به ضریب پسا بالا و ضریب توزیع فشار بهتری نسبت به دو هیدروفویل دیگر داشت که دلیل بر استفاده از هیدروفویل NACA0015 در این تحقیق دارد.

ماکزیمم ضریب لیفت به ضریب درگ هیدروفویل NACA0015 در اعداد رینولدز ۱۷۸۹۰، ۳۵۷۸۰ و ۵۳۶۷۰ نسبت به دو هیدروفویل دیگر بیش تر است، هیدروفویل NACA0015 انتخاب می شود.



شکل ۵ مقایسه ضریب لیفت به درگ سه هیدروفویل NACA0015, NACA0018 و NACA0021 در عدد رینولدز ۱۷۸۹۰

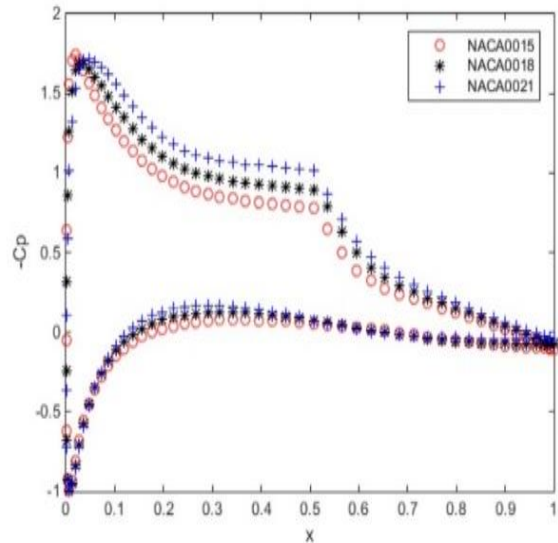


شکل ۶ مقایسه ضریب لیفت به درگ سه هیدروفویل NACA0015, NACA0018 و NACA0021 در عدد رینولدز ۳۵۷۸۰

همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است نسبت ضریب برآ به ضریب پسای هیدروفویل NACA0015 در زاویه ۵٫۸ درجه برابر ۱۴٫۸ می باشد و نسبت ضریب برآ به ضریب پسای هیدروفویل NACA0018 در زاویه ۲٫۹ درجه برابر ۸٫۴ و نسبت ضریب برآ به ضریب پسای هیدروفویل NACA0021 در زاویه ۱٫۸ درجه برابر ۸٫۳ می باشد که نسبت ضریب برآ به ضریب پسای هیدروفویل NACA0015 نسبت به دو هیدروفویل دیگر بالاتر می باشد که در عدد رینولدز ۳۵۷۸۰ با استفاده از نرم افزار X-Foil مناسب انتخاب برای طراحی می باشد.



شکل ۹ شماتیک و ساخت هیدروتوربین



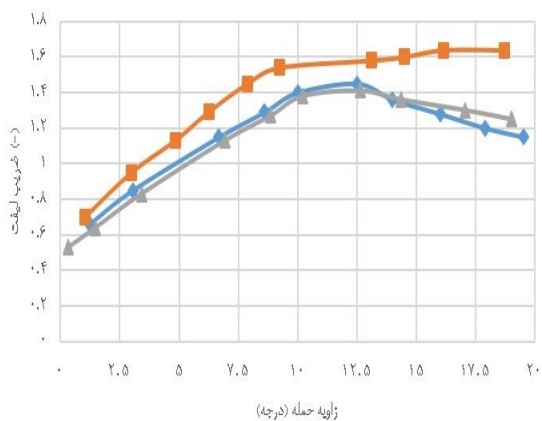
شکل ۸ توزیع فشار در عدد رینولدز ۵۰۰۰۰ برای هیدروفویل های NACA0015، NACA0018 و NACA0021

#### ۵- بحث و نتایج

##### ۱-۵- اعتبارسنجی داده‌های Q-Blade

برای صحت کار انجام شده در مرحله اول، نتایج به دست آمده را با داده‌های عملی به دست آمده توسط پینکرتون [۲۲] و تحلیل داناو [۲۳] برای ایرفویل NACA4412 در عدد رینولدز ۲۵۰۰۰۰ و زوایای صفر تا ۲۰ درجه مقایسه و اعتبارسنجی شد که نتایج بدست آمده مطابقت خوبی داشته و ۴/۸ درصد خطا دارد که در شکل ۱۰ نشان داده که در زمان افزایش زاویه حمله تا قبل از زاویه واماندگی، ضریب نیروی برآ به صورت خطی افزایش پیدا کرده و در روش تحقیق حاضر مدل انتخاب شده به صورت دقیق تر نسبت به مدل داناو، نتایج را پیش‌بینی کرده و با نزدیک شدن به مرحله واماندگی در زاویه حمله بالا، به خاطر مسائلی هم چون جدایی جریان، نتایج دارای اختلاف در نزدیکی‌های زاویه واماندگی می‌باشد و مقدار ماکزیمم ضریب برای پیش‌بینی شده در تحقیق حاضر خیلی نزدیک تر نسبت به مدل حل شده داناو برای مدل تجربی می‌باشد.

— Pinkerton Experimental Data — Qblade By Danao — Qblade By Diction



شکل ۱۰ اعتبارسنجی داده‌های Q-Blade

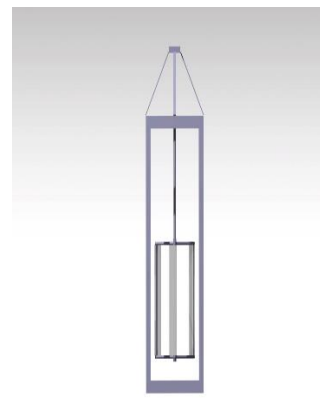
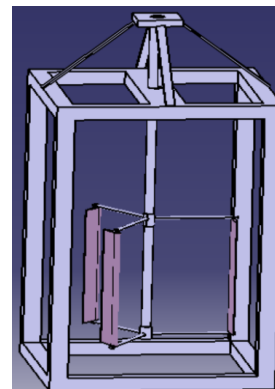
##### ۲-۵- هندسه مسئله و تولید شبکه هیدروفویل NACA0015

###### ۱-۲-۵- نحوه مش‌بندی هیدروفویل NACA0015

به علت پیچیدگی هندسه ایرفویل، جهت بهبود کیفیت شبکه‌بندی، دامنه محاسباتی به چهار ناحیه تقسیم و هر ناحیه به صورت جداگانه شبکه‌بندی شد. این امر کیفیت شبکه بندی را به خصوص در نواحی نزدیک سطح ایرفویل افزایش داده که این گونه مش‌زنی سبب بهبود خاصیت تعامدپذیری خطوط شبکه بر سطح ایرفویل در لبه حمله گردید. هندسه مقطع پره و مش‌بندی

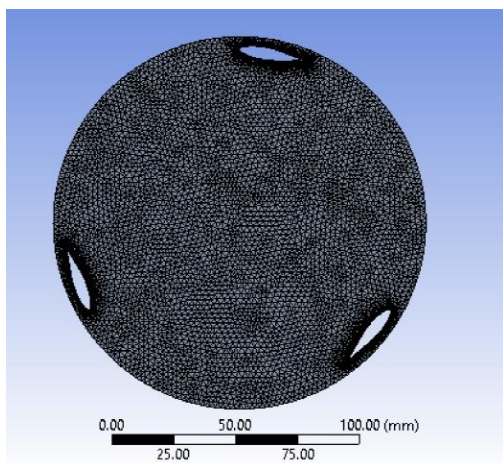
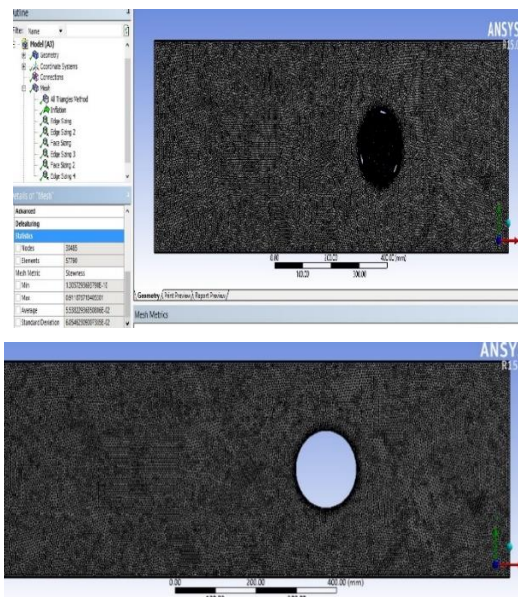
#### ۴- طراحی و ساخت

شماتیک توربین آبی طراحی شده در نرم افزار کتیا ترسیم شده و سپس ساخته شد که در شکل ۱۴ نشان داده شده که ارتفاع پره برابر ۳۵ سانتی‌متر، شعاع پره ۱۸/۵ سانتی‌متر و طول هیدروفویل برابر ۶/۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در شکل ۹ نشان داده شده است.



مومنتم، پیوستگی و فشار استفاده می‌شود. این روش دارای همگرایی متوسطی در غالب شبیه سازی‌ها بوده که حدس اولیه مناسب برای فشار به همگرایی این روش کمک می‌کند و مقادیر تصحیح همسایه‌ها صفر فرض می‌شود.

۳-۵- نحوه شبیه سازی روتور هیدروتوربین در نرم‌افزار انسیس فلونتت برای شبیه سازی روتور هیدروتوربین در نرم‌افزار انسیس فلونتت از مدل سه بعدی یا ۳D استفاده شد که شامل دو قسمت می‌باشد که ناحیه اول Enclosure و ناحیه دوم Turbine Rotor می‌باشد که خود این ناحیه از دو قسمت تشکیل شده است که پره‌ها دارای هیدروفویل NACA0015 و طول وتر هیدروفویل ۶,۴ سانتی‌متر می‌باشد.

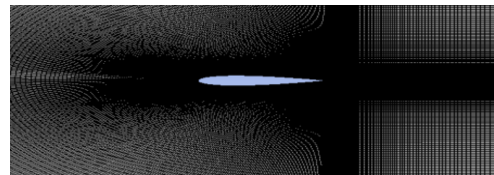


شکل ۱۲ انجام مش‌زنی

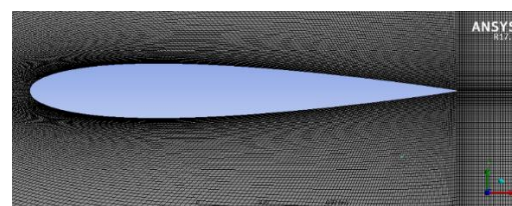
در زمینه قدرت کامپیوتر، به همراه گرافیک قدرتمند و به کارگیری مدل‌های سه بعدی، فرآیند تهیه یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل نتایج را آسان‌تر کرده است. در این راستا چندین مدل سه بعدی از توربین آبی با محور افقی توسط همین روش ارائه شده است [۱۴].

نرم‌افزار انسیس فلونتت دارای مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی هیدروفویل مورد نظر هست که با مطالعه‌ی کارهای انجام شده و امتحان چند مدل مختلف، در نهایت مدل Realizable k-e, Standard wall function برای این کار انتخاب گردید. این مدل از یک رابطه متناوب برای تعیین لزجت

ایرفویل در انسیس انجام و شبکه ایجاد شده ساختار یافته و از دامنه محاسباتی C شکل حول ایرفویل استفاده شده که شعاع نیم دایره حول دامنه ۱۱ برابر وتر و فاصله مرز خروجی دامنه تا لبه فرار ۱۸ برابر وتر ایرفویل بوده و سعی شده تا مقدار ضریب بی بعد  $\gamma^+$  به اندازه‌ای باشد تا اولین گره در نزدیکی ایرفویل در زیر لایه لزج قرار گرفته باشد. دامنه محاسباتی و نمای نزدیک در شکل ۱۱ نشان داده شد.



الف



ب

شکل ۱۱ نمایی از شبکه‌بندی کل دامنه حل (الف) و نمای نزدیک ایرفویل (ب)

### ۲-۲-۵- شرایط مرزی و شبیه سازی هیدروفویل NACA0015

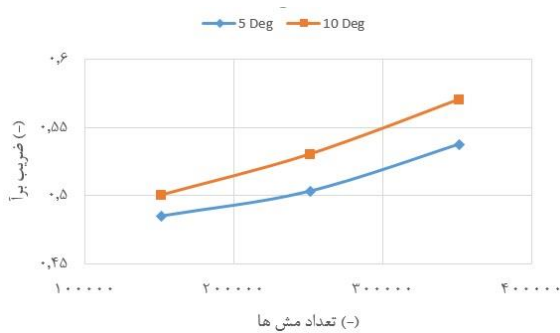
شرط مرزی ورودی سرعت Inlet Velocity، در خروجی جریان Pressure Outlet که در این شرط مرزی فشار استاتیک به صورت نسبی در مرز خروجی وارد، برای سطح ایرفویل شرط مرزی دیوار Wall و شرط عدم لغزش به صورت پیش فرض در حرکت سیال از روی سطح ایرفویل اعمال و قسمت خروجی شبکه outlet، قسمت بالا و پایین شبکه Wall و ایرفویل مورد نظر Airfoil نام‌گذاری شد.

نرم‌افزار انسیس فلونتت دارای مدل‌های مختلفی برای شبیه سازی ایرفویل مورد نظر هست که با مطالعه‌ی کارهای انجام شده برای هیدروفویل NACA0015 در نهایت مدل  $k\omega - SST$  برای این کار انتخاب گردید. مزیت استفاده از این مدل در بهبود محاسبات در نزدیکی دیواره‌ها برای اعداد رینولدز بدون نیاز به اعمال تابع دیواره می‌باشد و متعاقباً دقت و پایداری بالاتری در این نواحی خواهد داشت و این مدل دقت بالاتری در پیش بینی نقطه شروع، شروع جدایش و محاسبه نیروی لیفت دارد.

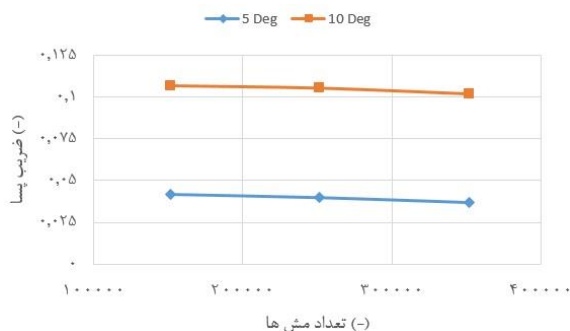
مراحل و روش انجام کار به طور اختصار در ذیل آورده شده است. سپس موارد مورد استفاده در شبیه سازی و فاز اصلی که در اینجا آب است، از کتابخانه نرم افزار مطابق فراخوانی شده و مشخصات تکمیلی مورد نیاز اضافه گردید. سپس از شرط سرعت ورودی (VELOCITY\_INLET) و شرط مرز فشار خروجی (PRESSURE\_OUTLET) در خروجی بهره گرفته شد. همچنین برای دیواره از شرط مرزی (WALL) و از نوع No slip استفاده گردید. برای جداسازی (Discretized) معادلات مومنتم، از روش Second Order و برای جداسازی باقی معادلات از روش Second Order Upwind استفاده شده است. همچنین جهت کوپل فشار و سرعت، روش SIMPLE به کار گرفته شد که دلیل استفاده از این روش از یک روش نیمه ضمنی برای ارتباط بین معادلات



۳۵۰۰۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت که بررسی نتایج در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ استقلال از شبکه ضریب برآ در زوایای مختلف

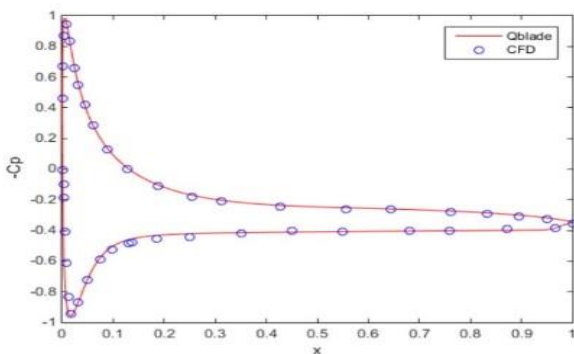


شکل ۱۴ استقلال از شبکه ضریب پسا در زوایای مختلف

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود که نتایج با افزایش سلول‌های شبکه ضریب برآ و پسا در زاویه‌های پنج و ۱۰ درجه تاثیر گذاشته و تغییر کرده است.

#### ۵-۵- مقایسه توزیع فشار، ضریب برآ و پسا ی هیدروفویل NACA0015 در نرم‌افزار انسیس و Q-Blade

در شکل ۱۵ توزیع فشار در عدد رینولدز ۱۷۸۹۰ در زاویه حمله ۱۰ درجه که در نرم‌افزارهای Q-blade و انسیس فلونت انجام شده که از مطابقت خوبی برخوردار است.



شکل ۱۵ مقایسه داده‌های Q-blade و فلونت در عدد رینولدز ۱۷۸۹۰ و در زاویه ۱۰ درجه

در شکل ۱۶ مقایسه داده‌های Q-Blade و فلونت با استفاده از مدل K-W در عدد رینولدز ۳۵۷۸۰ و در زاویه حمله ۵ درجه برای هیدروفویل NACA0015 نشان می‌دهد که دو مدل استفاده شده از دقت خوبی برای

گردابه‌ای استفاده می‌کند. هر دو مدل RNG و Realizable در مواردی که جریان تحت چرخش باشد عملکرد بهتری نسبت به مدل استاندارد از خود نشان می‌دهند. بعلاوه این مدل تا حدودی دارای دقت بالاتر و همگرایی آسان تری نسبت به مدل RNG از خود نشان می‌دهد. از مزایای دیگر مدل پایداری مدل، همگرایی راحت، حساسیت کم این مدل به مشخصات جریان آزاد مثل شدت اغتشاشات و اقتصادی بودن آن اشاره کرد و مدل Realizable k-e, Standard wall function در دیواره‌ها عملکرد بهتری دارد و این مدل برای گستره وسیعی از جریان‌ها بخصوص جریان‌های برشی همگن دورانی، جریان‌های آزاد شامل جت‌ها، لایه‌های اختلاطی، جریان‌های لایه مرزی، جریان‌های شامل چرخش و نرخ کرنش زیاد نتایج قابل قبولی بخصوص نسبت به مدل استاندارد ارائه می‌کند و مدل RNG مشکلات مربوط به استفاده در نزدیکی دیواره را دارد و ویسکوز استفاده شده برای جریان‌های آشفته بکار می‌رود و آبی که سمت هیدروتوربین در جریان است به صورت کاملا آرام نبوده و اغتشاشاتی داشته و مدل استفاده شده در دیواره‌ها عملکرد بهتری داشته و بخاطر همین از این مدل استفاده گردید.

مراحل و روش انجام کار به طور اختصار در ذیل آورده شده است. سپس موارد مورد استفاده در شبیه سازی و فاز اصلی که در اینجا آب است، از کتابخانه نرم افزار مطابق فراخوانی شده و مشخصات تکمیلی مورد نیاز اضافه گردید. سپس از شرط سرعت ورودی (VELOCITY\_INLET) و شرط مرز فشار خروجی Outflow در خروجی بهره گرفته شد. هم‌چنین برای تحلیل پرها از شرط مرزی Mesh Motion استفاده شد تا دامنه انتخابی بتواند با یک درجه آزادی چرخشی باشد تا در اثر اصابت جت جریان آب و در نتیجه تبادل تکانه آن با پره‌های هیدروتوربین به چرخش در آید. در این روش عملا هیچ بخشی از شبکه حل جا به جا نمی‌شود و تنها تاثیر سرعت مرز متحرک به صورت یک شرط مرزی اعمال می‌گردد تا قسمت‌های شامل پره بچرخش در آمده و نواحی داخلی آن ثابت در نظر گرفته شد. برای جداسازی (Discretized) معادلات مومنتم، از روش Upwind Second Order استفاده شده است. در این روش مقدار سرعت بر روی سطوح با استفاده از یک میانبایی بالادستی مرتبه دوم محاسبه می‌شود و دقت بالاتری نسبت به روش‌های مرتبه اول دارد.

همچنین جهت کوپل فشار و سرعت، روش SIMPLE به کار گرفته شد که دلیل استفاده نکردن از روش SIMPLEC این بود که در عمل، برای شبکه‌های یکنواخت و در حضور جریان‌های ساده و آرام صادق است و در غالب شبیه سازی‌های پیچیده صنعتی روش SIMPLEC مزیت معناداری بر روش SIMPLE ندارد.

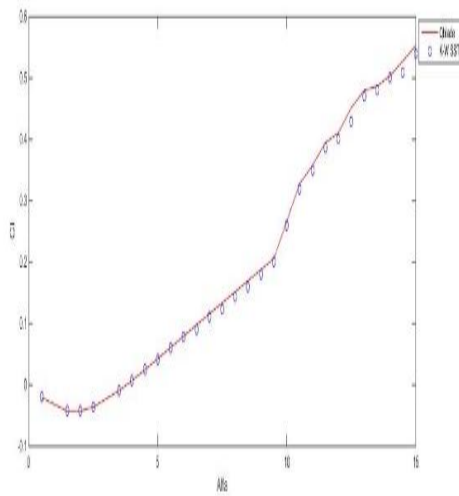
برای محاسبه گرادیان از حداقل مربعات بر پایه کنترل استفاده شد. این روش با استفاده از مقادیر سلول‌های همسایه سطح، مقادیر گرادیان را محاسبه می‌کند. تفاوت آن در استفاده از یک تابع تغییرات بر پایه هندسه شبکه است. ضرایب این تابع به روش مینیمم مجموع مربعات محاسبه می‌گردد. دقت آن نسبت به روش پایه Cell-Based بالاتر و هزینه آن نسبت به روش Node-Based پایین‌تر است.

#### ۴-۵- استقلال از شبکه

از آن جایی که نتایج حل عددی می‌تواند به شبکه ایجاد شده وابسته باشد، لذا برای بدست آوردن جواب دقیق، نتایج می‌بایست مستقل از شبکه‌ای ایجاد شده باشند. برای بررسی استقلال حل عددی از سه نوع شبکه متفاوت در حالت پایا و در زاویه حمله پنج و ۱۰ درجه و برای هیدروفویل NACA0015 سه نوع شبکه‌بندی درشت با تعداد ۱۵۰۰۰۰، متوسط با تعداد ۲۵۰۰۰۰ و ریز به تعداد

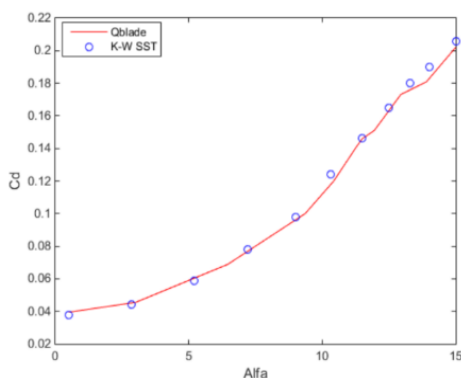


مطابقت خوبی برخوردار هستند. در شکل ۱۹ با افزایش زاویه حمله ضریب لیفت سیر صعودی دارد و در زاویه ۱۵ درجه ماکزیمم ضریب لیفت را دارد.



شکل ۱۹ مقایسه داده‌های Q-blade و fluent ضریب لیفت بر زاویه آلفا در عدد رینولدز ۱۷۸۹۰

در شکل ۲۰ نمودار ضریب درگ بر حسب زاویه حمله را در اعداد رینولدز ۱۷۸۹۰ برای هیدروفویل NACA0015 نشان داده شده که با افزایش زاویه حمله، ضریب درگ سیر صعودی داشته که برای تحلیل فلئونت از مدل K-W SST استفاده شده که به خوبی افزایش ضریب درگ را با افزایش زاویه حمله نشان داده است.

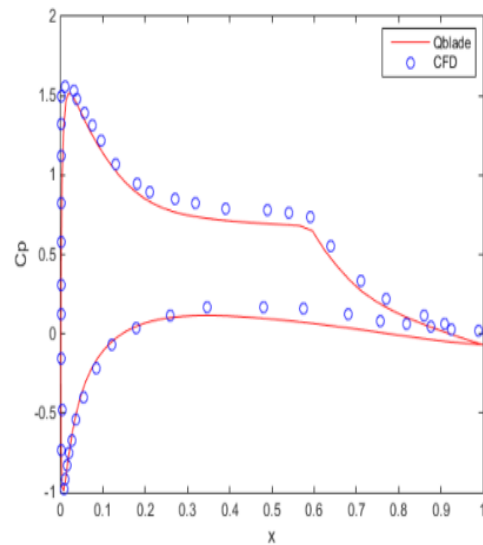


شکل ۲۰ مقایسه داده‌های Q-blade و انسیس در عدد رینولدز ۱۷۸۹۰ برای هیدروفویل Naca0015

#### ۵-۶- آنالیز کانتور سرعت کل سیستم و روتور هیدروتوربین

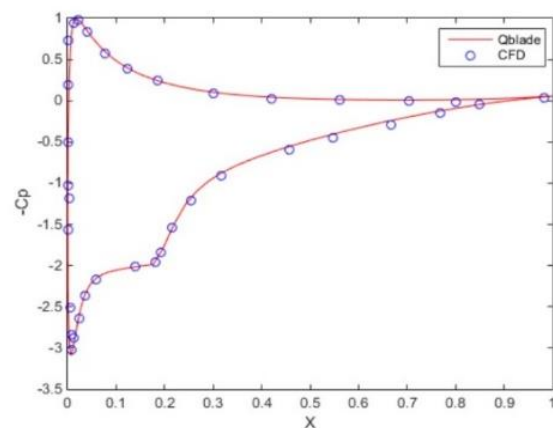
همان‌گونه که در شکل ۲۱، ۲۲ و ۲۳ قابل مشاهده است هنگام آغاز حرکت توربین در کنار پره اول یا پره سمت بالایی بیشترین سرعت را داشته و پشت پره دوم (سمت چپ) کمترین سرعت را در روتور هیدروتوربین ایجاد کرده است که می‌توان گفت تقریباً سرعت دو برابری را بین بیشترین سرعت پره در قسمت بالایی و پره دومی (سمت چپ) توصیف نمود و در پشت پره سوم (سمت راست) سرعت به دلیل اینکه به جلوی پره برخورد می‌کند کمتر است.

تحلیل هیدروفویل NACA0015 را نشان می‌دهد که هیدروفویل ذکر شده در عدد رینولدز ۳۵۷۸۰ از ضریب توزیع فشار بهتری در طول هیدروفویل دارد.



شکل ۱۶ مقایسه داده‌های Q-blade و فلئونت در عدد رینولدز ۳۵۷۸۰ و در زاویه حمله ۵ درجه

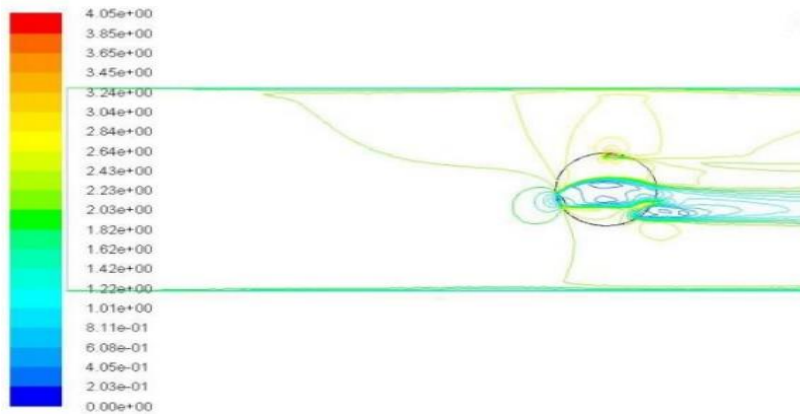
در شکل ۱۷ توزیع فشار در عدد رینولدز ۵۳۶۷۰ و زاویه حمله ۱۰ درجه برای هیدروفویل NACA0015 که در نرم افزارهای Q-Blade و فلئونت با استفاده از مدل K-W SST انجام شده که نتایج حاصله از مطابقت خوبی برخوردار است و هیدروفویل NACA0015 در عدد رینولدز ۵۳۶۷۰ از ضریب توزیع فشار بهتری در طول هیدروفویل NACA0015 دارد که با افزایش عدد رینولدز ضریب توزیع فشار نیز با افزایش طول هیدروفویل افزایش پیدا می‌کند.



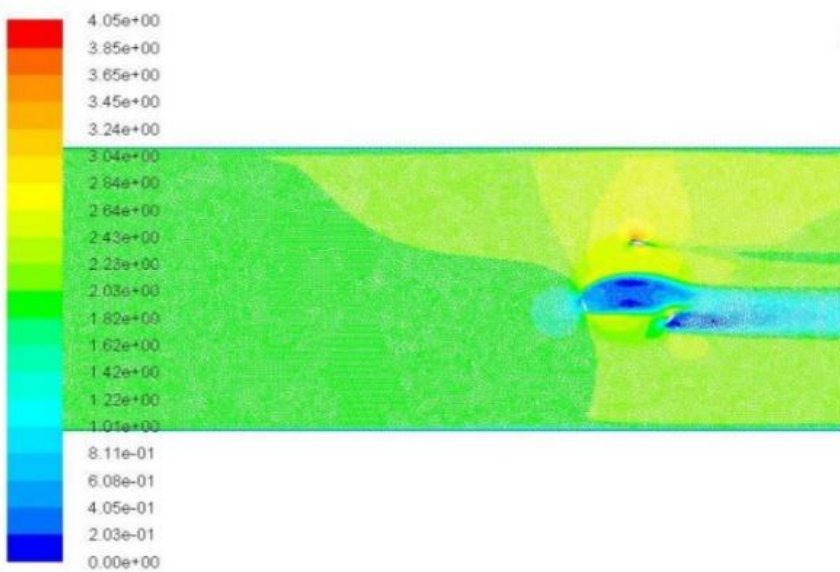
شکل ۱۷ مقایسه داده‌های Q-blade و فلئونت در عدد رینولدز ۵۳۶۷۰ و در زاویه ۱۰ درجه

در شکل ۱۸ و ۱۹ مقایسه نتایج ضریب لیفت بر حسب زاویه حمله را برای هیدروفویل NACA0015 در اعداد رینولدز ۱۷۸۹۰ و ۳۵۷۸۰ در دو نرم افزار Q-blade و فلئونت با استفاده از مدل K-W SST قابل مشاهده است که از

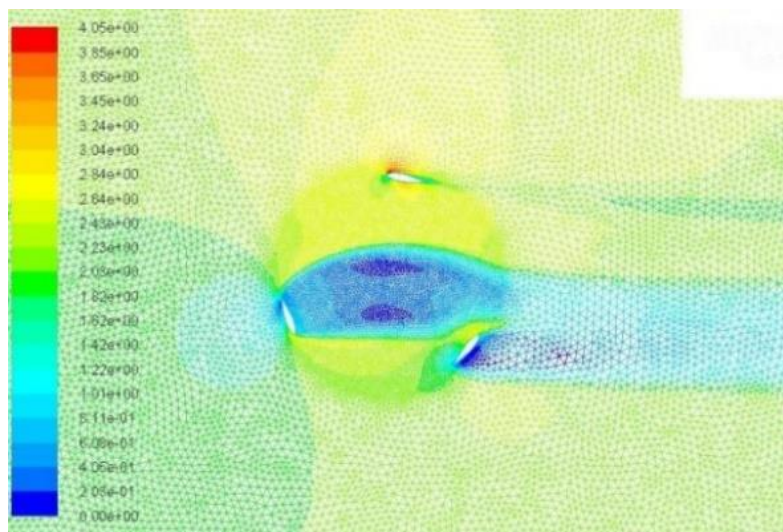




شکل ۲۱ خط کانتور سرعت برای کل سیستم

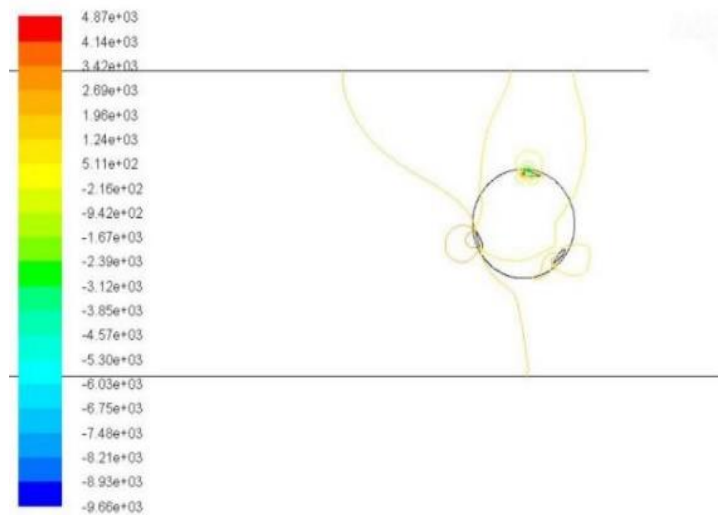


شکل ۲۲ کانتور سرعت برای کل سیستم

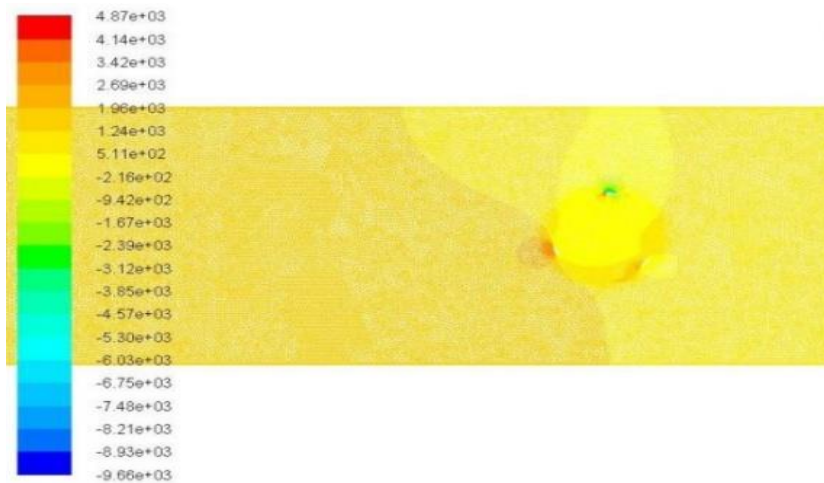


شکل ۲۳ کانتور سرعت برای روتور توربین

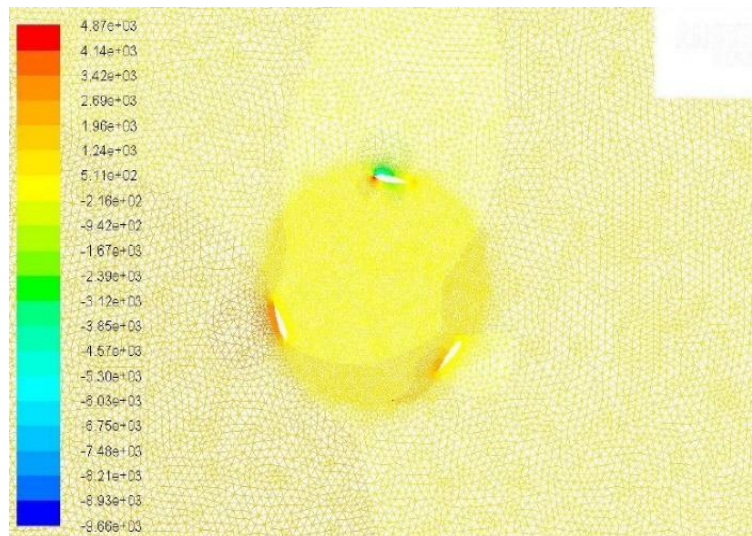
۷-۵- آنالیز کانتور فشار استاتیکی سیستم و روتور هیدروتوربین همان‌گونه که در شکل ۲۴، ۲۵ و ۲۶ قابل مشاهده است هنگام آغاز حرکت هیدروتوربین در کنار پره دوم (سمت چپ) بیشترین فشار موجود می‌باشد که در واقع به دلیل جهت افقی آب و در راستای X می‌باشد و در پشت هیدروبالایی نیز فشار نسبت به حالت انحنای آن در جلوی آن بیش تر می باشد



شکل ۲۴ خط کانتور فشار استاتیکی برای کل سیستم



شکل ۲۵ کانتور فشار استاتیکی کل سیستم



شکل ۲۶ کانتور فشار استاتیکی روتور توربین

دیگر در اعداد رینولدز مختلف شرایط بهتر و قابل قبول تری داشت و در روش دیگر با استفاده از نرم افزار Q-Blade در اعداد رینولدز مختلف نسبت ضریب لیفت به درگ را در زوایای حمله مختلف بدست آورده و پس از تحلیل آیرودینامیکی هیدروفویل NACA0015 با استفاده از نرم افزار X-Foil نسبت ماکزیمم ضریب لیفت به درگ هیدروفویل NACA0015 در عدد رینولدز ۵۳۶۷۰ نسبت به سایر هیدروفویل‌ها بیش تر و در زاویه ۵٫۹ درجه برابر ۲۴٫۳ بود و هیدروفویل NACA0015 انتخاب گردید.

سپس برای تحلیل هیدروفویل NACA0015 از نرم افزار فلونت از مدل  $K\omega - SST$  استفاده شد تا ضریب لیفت، ضریب برآ و ضریب توزیع فشار را بر حسب طول بدست آورده و با داده بدست آمده از نرم افزار Q-Blade مقایسه گردد که همخوانی خوبی داشت.

در ادامه میکرو توربین آبی با هیدروفویل NACA0015 با طول وتر ۶٫۴ سانتی متر، ارتفاع پره ۳۵ سانتی متر و شعاع روتور ۱۸٫۵ سانتی متر در نرم افزار کتیا طراحی و سپس ساخته شد.

هیدروتوربین طراحی شده با سه هیدروفویل NACA0015 با طول وتر ۶٫۴ سانتی متر در نرم افزار انسیس فلونت با مدل Realizable k-e شبیه سازی و در شرایط سرعت و فشار استاتیکی مورد تحلیل قرار گرفت که هنگام آغاز حرکت توربین هیدرو پره بالایی بیش ترین سرعت را داشته و در شرایط فشار استاتیکی هنگام آغاز حرکت هیدروتوربین در کنار پره دوم (سمت چپ) بیش ترین فشار موجود را داشت.

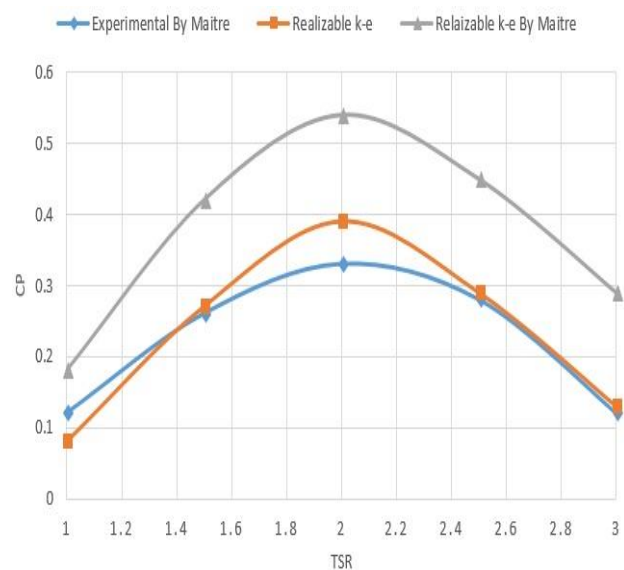
با استفاده از بهینه سازی هیدروفویل‌ها می توان انرژی آبی بیشتری با استفاده از میکرو توربین آبی محور عمودی داریوس نوع اچ در رودخانه ها و در ابعاد بزرگ تر در دریاها و اقیانوس ها بدست آورد.

#### ۷- فهرست علائم

پارامتر بیزیر	$T$
نقطه کنترلی	$P_1$
نقطه ابتدایی	$P_2$
نقطه انتهایی	$P_3$

#### ۵-۸- اعتبارسنجی نتایج انسیس فلونت

برای صحت سنجی نتایج انسیس فلونت، نتایج بدست آمده را با نتایج عددی و آزمایشگاهی مایتر و همکاران [۲۴] مقایسه کرده که نتایج بدست آمده در شکل ۲۷ نشان داده شده و خطای عددی برابر ۲٫۱ درصد بوده که از مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی [۲۴] داشته و از دقت بسیار خوب و دقیق نسبت به تحلیل عددی [۲۴] برخوردار است.



شکل ۲۷ اعتبارسنجی نتایج انسیس فلونت با نتایج تجربی و عددی

#### ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به تحلیل آیرودینامیکی هیدروفویل میکروتوربین آبی محور عمود داریوس نوع اچ روتور پرداخته شد. برای این کار سه هیدروفویل NACA0015، NACA0018 و NACA0021 انتخاب و با استفاده از معادله بیزیر هیدروفویل‌های انتخاب شده را با استفاده از مدل اصلی آن، مدل سازی کرده که صحت مدل سازی را نشان داد.

در ادامه با استفاده از روش کد نویسی HOPMBL که با روش المان مرزی حل شد ضریب توزیع فشار هیدروفویل NACA0015 نسبت به دو هیدروفویل

[14] Chime, A. (2013), "Analysis of Hydrokinetic Turbines in Open Channel Flows," Thesis submitted for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering University of Washington.

[15] Schleicher, W. Riglin, J. Kraybill, Z. Oztekin, A. (2013), "Design and Simulation of a Micro Hydrokinetic Turbine," Proceedings of the 1st Marine Energy Technology Symposium, METS13, Washington, D.C.

[16] Fleisinger, M. Vesenjaj, M. Hriberšek, M. (2014), "Flow Driven Analysis of a Darrieus Water Turbine," *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 60(2014)12, pp. 769-776.

[17] Dhadwad, A. Balekar, A. Nagrale, P. (2015), "Literature Review on Blade Design of Hydro- Microturbines," *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER)*, Volume 02, Issue 02, e-ISSN: 2349-9745, p-ISSN: 2393-8161, February.

[18] Yang, Y., Diaz, I., Morales, M., and Obregon, P. (2015), "A vertical axis wave turbine with cup blades," in *Proceedings of ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, St. John's, NL, Canada, May 31 – June 5.

[19] Yingchen, Y. Isaiyah, D. Quintero, S. (2016), A VERTICAL AXIS WAVE TURBINE WITH HYDROFOIL BLADES, Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11-17, 2016, Phoenix, Arizona, USA.

[20] Vince, J., "Mathematics for Computer Graphics", 3rd Edition, Springer, pp. 17-37, 2010.

[۲۱] ش. کوراوند، ب. معتفک ایمانی، ع. ماشاله کرمانی، طراحی و تحلیل عملکرد توربین بادی کوچک با ایرفویل ترکیبی، فصلنامه علمی - ترویجی انجمن‌های انرژی‌های تجدید پذیر و نو، سال سوم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۵، ص ۶۵-۷۳.

[22] Pinkerton, R. M., (1938), "The Variation with Reynolds Number of Pressure Distribution over an Airfoil Section," Technical Report No. 613, NASA, Cranfield, UK.

[23] Danao, L. Abuan, B. Howel, R. (2016), *Design Analysis of a Horizontal Axis Tidal Turbine*.

[24] Maître, T. Amet, E and Pellone, C. (2013), "Modeling of the Flow in a Darrieus Water Turbine: Wall Grid Refinement Analysis and Comparison with Experiments", *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 497 – 512.

طول وتر ایرفویل	$C$
ضریب برآ	$C_L$
ضریب پسا	$C_D$
زاویه حمله ایرفویل	$\text{Alfa}$
ضریب عملکرد فشار	$C_p$

## ۸- مراجع

- [1] Malipeddi, A. Chatterjee, D. (2012), "Influence of duct geometry on the performance of Darrieus hydro turbine," *Renewable Energy* 43, pp. 292-300.
- [2] Khan, M. Iqbal, M. Quaicoe, J. (2008), "River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp. 2177-2193.
- [3] Vermaak, H. Kusakana, K. Koko, S. (2014), "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, pp. 625-633.
- [4] Li, Y. Calisal, S. (2010), "Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbines: Part I—Power output," *Ocean Engineering*, 37, pp. 627-637.
- [5] Yang, B. Lawn, C. (2011), "Fluid dynamic performance of a vertical axis turbine for tidal currents," *Renewable Energy* 36, pp. 3355-3366.
- [6] Kinsey, T. Dumas, G. Lalande, G. Ruel, J. Méhut, A. Viarouge, P. Lemay, J. Jean, Y. (2011), "Prototype testing of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils," *Renewable Energy*, 36, pp. 1710-1718.
- [7] Wonga, H. Tong Chonga, K. Liana Sukiman, W. Chew poh, N. Shiah, S. and Wang, C. (2017), "Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73 pp 904-921.
- [8] Khan, M. Bhuyan, G. Iqbal, M. Quaicoe, J. (2009), "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review," *Applied energy* 86, pp. 1823-1835.
- [9] Hwang, I. Lee, Y. Kim, S. (2009), "Optimization of cycloidal water turbine and the performance improvement by individual blade control," *Applied Energy* 86, pp. 1532-1540.
- [10] Anyi, M. Kirke, B. (2010), "Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities," *Energy for Sustainable Development*, pp. 110-116.
- [11] Guney, M. Kaygusuz, K. (2010), "Hydrokinetic Energy Conversion Systems: A Technology 69 Status Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 2996-3004.
- [12] Lago, L. Ponta, F. Chen, L. (2010), "Advances and Trends in Hydrokinetic Turbine Systems," *Energy for Sustainable Development*, 14, pp. 287-296.
- [13] Dai, Y. Gardiner, N. Sutton, R. and Dyson, P. (2011), "Hydrodynamic analysis models for the design of Darrieus-type vertical-axis marine current turbines," *J. Engineering for the Maritime Environment, Proc. IMechE, Vol. 225 Part M*.

