

طراحی و آرایش بهینه یک نوع فلپ جهت افزایش توان تولیدی توربین باد محور افقی

نیما علیزاده، علیرضا جهانگیریان*

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۲۵

کلمات کلیدی:

توربین باد افقی

سطح برآ افزا، اندازه حرکت المان پره

بهینه‌سازی آیرودینامیکی

بهینه سازی پره

خلاصه: در این تحقیق یک نمونه فلپ افزودنی جدید همراستا با خط انحناى مقطع پره ارائه و اثر اضافه شدن آن به پره یک توربین باد محور افقی و بهینه سازی محل و میزان طول آن مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از سطوح برآ افزای افزودنی به دلیل نیاز به تغییرات جزئی در پره‌های موجود نسبت به سایر روش‌های اصلاح هندسه پره به منظور بهینه‌سازی آیرودینامیکی آن مقرون به صرفه‌تر است. اینکار باعث افزایش راندمان پره و در نهایت افزایش ضریب توان آن بدون نیاز به تغییر در هندسه پره مینا می‌شود. بمنظور افزایش دقت الگوریتم المان مومنتوم پره، ضرایب آیرودینامیکی مقطع پره از حل عددی معادلات حاکم بر جریان بروش دینامیک سیالات محاسباتی بدست آمد در حالیکه در اکثر تحقیقات مشابه از روش‌های مبتنی بر نظریه خطی ایرفویل استفاده می‌شود. نتایج بدست آمده نشان داد که اصلاح انجام شده در الگوریتم المان مومنتوم پره باعث افزایش دقت حلگر در عین حفظ سرعت محاسبات آن شد. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از آرایش فلپ پیشنهادی مقدار ضریب توان توربین مینا از مقدار 0.29 به 0.41 ارتقاء یافت که افزایش قابل ملاحظه‌ای را نسبت به روشهای دیگر نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

یکی از انواع انرژی‌های تجدید پذیر انرژی بادی است و توربین‌های بادی قابلیت آن را دارند که انرژی جنبشی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. طراحی و ساخت توربین‌های بادی فناوری مهم و استراتژیکی است که دستیابی به آن مزایای فراوانی از جمله تولید انرژی پاک، صادرات فناوری و توسعه صنایع وابسته را به همراه دارد. امروزه دانشمندان در تلاش‌اند تا با افزایش بهره‌وری توربین‌های بادی هزینه تولید انرژی توسط این وسایل را کاهش داده و استفاده از آنها را در مقایسه با نیروگاههایی که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند مقرون به صرفه سازند. محققین مختلفی در طول سال‌های گذشته اقدام به ارائه روش‌هایی برای ارتقاء توان تولیدی توربین‌های محورافقی موجود با اصلاح پارامترهای هندسی پره آنها از طریق تحلیل‌های آیرودینامیکی نموده‌اند. ولی یک نکته مهم همواره این بوده که اعمال این اصلاحات هندسی چگونه می‌تواند با کمترین تغییرات در خط تولید و کمترین هزینه محقق شود.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ajahan@aut.ac.ir

۱-۱- تاریخچه
در سال ۲۰۱۳ رضایی میرقاعد و روشندل [۱] با استفاده از تئوری مومنتوم المان پره و یک روش تکرار نسبت به بهینه‌سازی پارامترهای توربین باد محورافقی؛ شامل قطر روتور، ارتفاع هاب، ضریب سرعت نوک و ظرفیت ژنراتور اقدام کردند. توابع هدف نیزمیزان تولید انرژی سالیانه و هزینه الکتریسیته تولیدی انتخاب شده بودند. آن‌ها توانستند به سه توربین با پارامترهای هندسی بهینه برای سه سایت منجیل، اهر و خاف دست یابند. این روش برای هر منطقه یک نوع پره را پیشنهاد می‌دهد که با در نظر گرفتن هزینه تولید و ساخت پره‌های متفاوت عملاً مقرون بصره نمی‌باشد. در سال ۲۰۱۴ آشوری و همکاران [۲] به ارائه روشی برای بهینه‌سازی آیرودینامیکی و سازه‌ای روتور و برج توربین باد اقدام کردند. متغیرهای طراحی آن‌ها عبارت بودند از: طول پره، زاویه پیچش، سرعت دوران، طول وتر و ضخامت پره. همچنین تابع هدف قیمت انرژی تولیدی انتخاب شده بود. در مطالعه موردی یک توربین باد ۵ مگاواتی، آن‌ها توانستند $2/3$ ٪ قیمت انرژی تولیدی را کاهش دهند. این پژوهش نقص تحقیق قبلی را رفع نموده و فقط یک پره



کردند که طبق این پژوهش در نسبت سرعت نوک‌های بالا (۶/۳) فلپ توانست تا ۲۱٪ تولید توان را افزایش دهد.

۱-۲- نوآوری پژوهش

با توجه به پژوهش سینز و ژانگ می‌توان اذعان نمود که در صورت انتخاب یک فلپ مناسب امکان افزایش قابل توجه ضریب توان توربین باد وجود دارد. بنابراین در این مقاله یک مدل فلپ افزودنی که بر خط کمبر ایرفویل در محل لبه فرار منطبق است ارائه شده که با توجه به طراحی خاص خود راندمان آیرودینامیکی بهتری را ارائه می‌نماید. از طرفی به علت لزوم تغییرات هر چه کمتر در خط تولید پره، هزینه این بهبود بسیار کمتر از سایر روش‌ها که مستلزم تغییر طراحی در کل پره می‌باشد خواهد بود.

در تحقیق حاضر برای محاسبه توان، ابتدا ضریب توان توربین باد در نسبت سرعت مشخص محاسبه می‌شود. برای محاسبه ضریب توان از تئوری المان ممتوم پره^۷ استفاده شد. در نرم افزارهای تجاری موجود از جمله کیو بلید^۸ برای محاسبه ضرایب آیرودینامیکی از حلگر ایکس فویل^۹ که مبتنی بر روش‌های ساده شده خطی می‌باشد استفاده می‌شود. حال آنکه این حلگر مقدار لیفت را معمولاً بیش از مقدار واقعی و مقدار ضریب پسا را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. لذا برای جلوگیری از این خطا از یک حلگر عددی برای محاسبه ضرایب آیرودینامیکی مورد نیاز استفاده می‌شود. اما از آنجا که محاسبات روش ممتوم المان پره برای بدست آوردن نیروی وارد بر پره معمولاً بصورت سعی و خطا در داخل یک لوپ انجام می‌شود، در این لوپ به مقادیر ضرایب آیرودینامیکی در بازه‌ای از زوایای حمله و اعداد رینولدز مختلف نیاز می‌باشد. بنابراین ابتدا اطلاعات آیرودینامیکی مورد نیاز شامل ضرایب برآ و پسا از حل عددی جریان حول ایرفویل برای تعدادی زاویه حمله و عدد رینولدز متفاوت محاسبه شده و سپس برای اطلاع از مقدار ضرایب در شرایط دیگر از روش میانبایی استفاده می‌شود. در این تحقیق توان تولیدی پره مبنا محاسبه و سپس با توان تولیدی همان پره که به فلپ مجهز شده مقایسه می‌شود. در ضمن اثر مکان نصب فلپ بر تولید توان نیز بررسی و یک چپش مناسب از فلپ‌ها پیشنهاد می‌شود.

به طور کلی می‌توان نوآوری پژوهش فوق را در دو بخش جمع بندی نمود

- استفاده از یک هندسه جدید فلپ برای افزایش توان توربین باد

برای محل‌های مختلف پیشنهاد نموده است اما لزوم تغییرات اساسی در ساختار کلی پره که مستلزم تغییر در خط تولید است مانعی در جهت استفاده از این روش می‌باشد. در سال ۱۳۹۹ عزیزی و جهانگیریان [۳] با استفاده از تئوری المان ممتوم پره و الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی یک پره با هدف بهینه‌کردن مجموع تولید توان سالیانه در سه نقطه مختلف شرق کشور پرداختند. پارامترهای بهینه‌سازی این کار شامل طول وتر و زاویه پیش‌پره بود. هر چند این تحقیق تلاشی در جهت تولید توان بیشتر از یک توربین واحد بود، ولی با تغییر محل‌های انتخاب شده امکان افت مجموع توان تولیدی اجتناب ناپذیر می‌باشد.

با بررسی مقالات فوق مشخص می‌شود که بهینه‌سازی آیرودینامیکی توربین‌های بادی با هدف افزایش توان موضوع بسیار مهمی در صنعت است، اما بهینه‌سازی هندسه پره و تولید پره‌های جدید به نوبه خود هزینه تولید را بالا می‌برد. لذا استراتژی دیگری جهت افزایش توان تولیدی توربینها مورد نیاز است که بتواند با کمترین تغییر هندسی برای طیف وسیعتری از مناطق استفاده شده و کارایی مناسبی هم داشته باشد. یکی از راهکارها استفاده از سطوح متحرک اضافه‌شده^۱ به پره است. در سال ۲۰۱۷ چن^۲ و همکاران [۴] به طراحی بهینه توربین باد با فلپ‌های لبه حمله و لبه فرار با هدف بهینه‌سازی کاهش بار وارده به توربین و افزایش عمر پره پرداختند. در این مقاله با استفاده از فلپ، بارهای سازه‌ای بر روی پره کنترل شد که این امر موجب افزایش عمر پره می‌گردد. در سال ۲۰۱۹ آی^۳ و همکاران [۵] یک نمونه پره هندسه تغییر شکل پذیر طراحی کرده و به صورت تجربی اثرات فلپ بر کنترل بارهای سازه‌ای پره توربین باد را بررسی نمودند. اما در این بررسی اثرات فلپ بر توان پره مورد مطالعه قرار نگرفت. در سال ۲۰۱۸ میشل^۴ و همکاران [۶] یک پره به همراه سطوح برآ افزا لبه فرار طراحی کرده و گزارش نمودند که انرژی سالیانه ۱٪ افزایش یافته است. اما فلپ تحقیق میشل از نوع فلپ ساده بوده و به همین علت راندمان کمی را از خود نشان می‌داد. در سال ۲۰۱۸ سینز^۵ و همکاران [۷] اقدام به افزودن گارنی فلپ و تولیدکننده گردابه به پره توربین باد نمودند که با افزودن این دو وسیله توانستند ۳/۸۵ درصد انرژی تولیدی سالانه را افزایش دهند. در سال ۲۰۱۹ یی ژانگ^۶ و همکاران [۸] اثر گارنی فلپ را بر عملکرد توربین باد بررسی

- 1 Add-ons
- 2 Chen
- 3 Ai
- 4 Michael
- 5 Saenz
- 6 Ye Zhang

7 Blade Element Momentum Theory (BEMT)

8 Q-blade

9 Xfoil

$$\Omega r + \frac{\Omega r}{2} = \Omega r(1 + a') \quad (1)$$

در شکل ۲ هندسه یک توربین باد محور افقی با فرض اینکه ناظر از نوک پره به پایین نگاه می‌کند به همراه زوایا و نیروهای وارده بر پره نشان داده شده است. لازم به ذکر است که زاویه پیش‌پره را به صورت‌های مختلفی می‌توان تعریف کرد و در اینجا زاویه پیش‌پره نسبت به نوک پره تعیین شده است، که در آن θ_{po} زاویه پیش‌پره در نوک است.

$$\theta_T = \theta_p - \theta_{po} \quad (2)$$

روابط زیر از شکل ۲ به دست می‌آیند [۱۰]

$$dF_L = \frac{1}{2} c_L \rho U_{rel}^2 c dr \quad (3)$$

$$dF_D = \frac{1}{2} c_D \rho U_{rel}^2 c dr \quad (4)$$

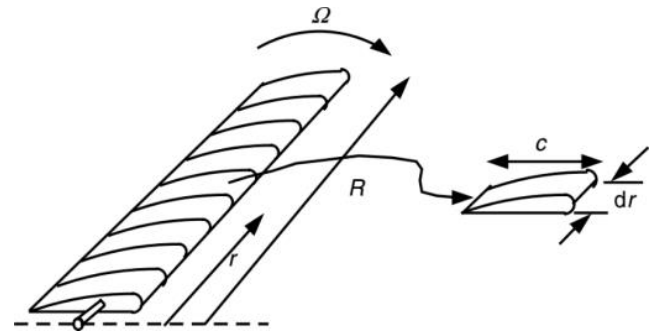
$$dF_N = dF_L \cos \varphi + df_d \sin \varphi \quad (5)$$

$$dF_T = dF_L \sin \varphi - df_d \cos \varphi \quad (6)$$

با تعری c_n و c_t به صورت ضرایب بی‌بعد تصویر نیروهای برآ و پسا در جهت عمودی و مماسی داریم [۱۱].

$$c_n = \frac{dF_N}{\frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr} = C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi \quad (7)$$

$$c_t = \frac{dF_T}{\frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr} = C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi \quad (8)$$



شکل ۱. شماتیک المان‌های پره [۱۰]

Fig. 1. Schematic of blade elements

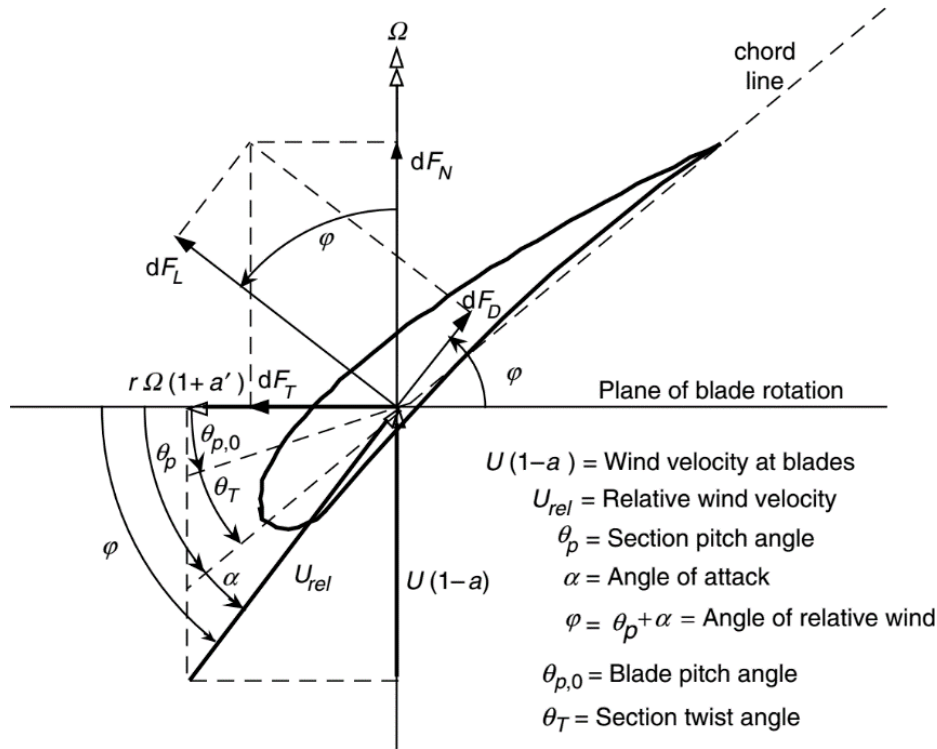
که به صورت افزونه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- ابداع یک اصلاح در الگوریتم المان مومنتوم که با حفظ سرعت دقت محاسبات را افزایش می‌دهد.

۲- تئوری مومنتوم المان پره

پره یک توربین باد محور افقی از مقاطع به شکل ایرفویل تشکیل شده با ایجاد اختلاف فشار، تولید نیروی برآ می‌کنند. برای تحلیل توان تولیدی پره توربین باد در مرحله طراحی مفهومی باید از روش‌های تحلیل سریع از جمله الگوریتم مومنتوم المان پره استفاده نمود. روش فوق با ترکیب دو الگوریتم المان پره و نظریه مومنتوم به‌دست‌آمده است [۹]. تئوری المان پره مبتنی بر تحلیل نیروهای آیرودینامیکی است که تابع شکل و مقطع پره هستند. این نیروها عمدتاً شامل ضرایب برآ و پسا بوده و برحسب زاویه حمله بیان می‌شوند. به این منظور، فرض می‌شود که پره به N مقطع یا المان تقسیم شده است. در شکل ۱ شماتیک المان‌های پره نشان داده شده است که در آن c طول وتر ایرفویل، dr طول شعاعی المان، r شعاع هر مقطع، R شعاع پره و Ω سرعت دورانی روتور هستند. همچنین در این روش جریان به صورت تراکم ناپذیر بوده، هیچ‌گونه برهم‌کنش شعاعی میان المان‌ها و جریان شعاعی روی پره وجود ندارد و نیروهای روی پره تنها ناشی از ضرایب برآ و پسا ایرفویل مقاطع پره هستند [۱۰].

در تحلیل نیروهای ایرفویل، اغلب نیروهای برآ و پسا به ترتیب عمود و موازی یک سرعت مؤثر یا نسبی هستند. برای توربین باد، این سرعت نسبی جمع برداری سرعت باد روی روتور $U(1-a)$ و سرعت ناشی از دوران پره هستند. این مؤلفه دورانی خود نیز جمع برداری سرعت المان Ωr و سرعت القایی روی پره‌ها از قانون بقای مومنتوم زاویه‌ای $\frac{\Omega r}{2}$ است.



شکل ۲. نمادگذاری پارامترهای هندسه پره یک توربین باد محور افقی [۱۰]

Fig. 2. Symbolizing the blade geometry parameters of a horizontal axis wind turbine [10]

$$C_t = \frac{dF_N}{\frac{1}{2}\rho U^2 dA} = \frac{U_{rel}^2}{U^2} \sigma C_n \quad (12)$$

تعاریف فوق برای یک پره بوده و با فرض اینکه توربین تعداد B پره داشته باشد داریم:

$$C_q = \frac{dQ}{\frac{1}{2}\rho U^2 dA} = \frac{U_{rel}^2}{U^2} \sigma C_t \quad (13)$$

$$dF_N = B \frac{1}{2} C_n \rho U_{rel}^2 c dr \quad (9)$$

$$dF_T = B \frac{1}{2} C_T \rho U_{rel}^2 c dr \quad (10)$$

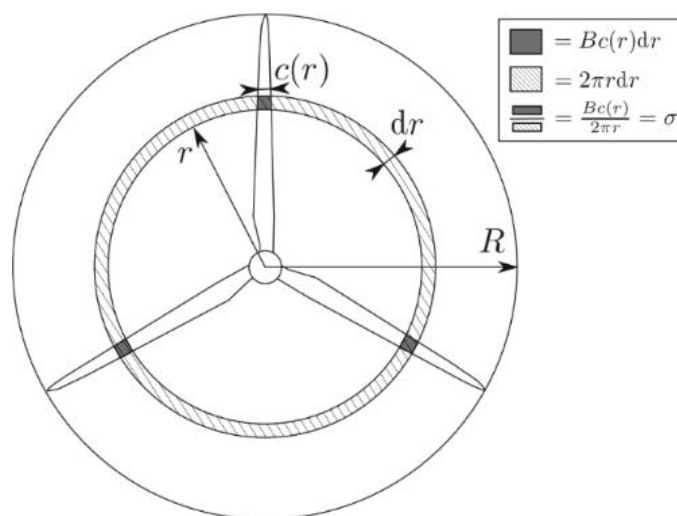
که در معادلات فوق σ جامدیت^۱ پره بوده که در شکل ۳ نمایش داده شده است و نسبت مساحت المان پرها به مساحت ناحیه جاروب شده و یا حجم کنترل حلقوی بر اساس شکل ۳ است [۱۲]

همچنین گشتاور دیفرانسیلی ناشی از نیروی مماسی در فاصله r از مرکز برابر است با:

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (14)$$

$$dQ = BrdF_T = B \frac{1}{2} C_T \rho U_{rel}^2 c r dr \quad (11)$$

ضریب تراست و گشتاور محلی بر اساس تئوری المان پره برابرند با [۱۲]



شکل ۳. مفهوم جامدیت پره σ [۸]

Fig. 3. The concept of blade solidity σ [8]

توان پیش‌بینی شده به کمک نرم افزار ایکس فویل مقدار به مراتب بیشتری را نسبت به داده‌های تجربی به دست می‌دهد.

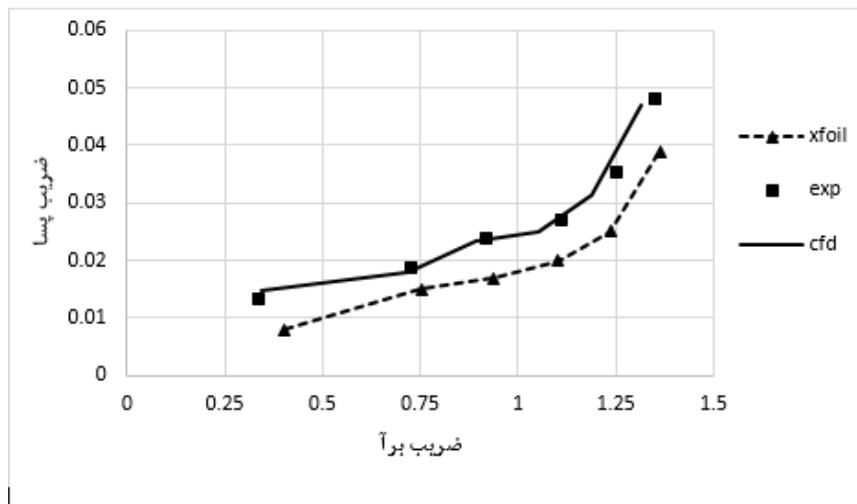
در این پژوهش به منظور ارتقا دقت نتایج از روشی جدید استفاده شد، به این صورت که بجای کوپل کردن نرم افزار مهندسی ایکس فویل با الگوریتم المان مومنتوم پره، از ترکیب دو روش حل عددی جریان و الگوریتم المان مومنتوم پره استفاده می‌شود. روش تحلیل به این صورت است که ابتدا محدوده عدد رینولدز در سرتاسر پره توربین با شرایط سرعت جریان ورودی از ۵ تا ۲۵ متر بر ثانیه و نسبت سرعت نوک نیز از ۰/۵ تا ۶/۵ محاسبه گردید. با این شرایط محدوده عدد رینولدز از ۳۰۰۰ تا ۷۰۰۰۰۰ تغییر می‌کند، سپس جریان حول ایرفویل در زاویه حمله‌های ۰ تا ۱۸ درجه با گام یک درجه و ۲۰ عدد رینولدز مختلف به روش عددی حل شد (مجموعاً ۳۶۰ حالت). اکنون با داشتن ضرایب آیرودینامیکی در بازه فوق و استخراج معادله یک رویه گذرنده از این نقاط می‌توان هر یک از ضرایب برآ و پسا را در زاویه حمله و عدد رینولدز دلخواه در بازه فوق به دست آورد. با توجه به مطالب بیان شده حل عددی جریان حول پروفیل مقطع پره در حالات مختلف انجام می‌پذیرد تا نتایج آن به عنوان مقادیر ورودی به الگوریتم المان مومنتوم پره داده شوند. در این پژوهش برای بررسی اثر فلپ بر توان تولیدی، مقطع پره در ۴ حالت بدون فلپ، با فلپ به طول ۵ درصد وتر، با فلپ به طول ۱۰ درصد وتر و فلپ با ۱۵ درصد طول وتر، در نظر گرفته شده است. محاسبه ضرایب آیرودینامیکی به روش دینامیک سیالات محاسباتی برای هر موقعیت فلپ

در معادلات فوق اثر نیروی پسا کاهش گشتاور و توان، و همچنین افزایش تراست و بارگذاری پره است.

اکنون که اساس تئوری المان مومنتوم پره شرح داده شد باید ضرایب آیرودینامیکی روی مقاطع محاسبه شوند. در این تحقیق برای دستیابی به دقت بیشتر از روش حل عددی معادلات حاکم به جای تخمین‌های خطی استفاده شد. نوع معادلات حاکم به صورت تراکم ناپذیر، دوبعدی و لزج با دقت درجه دو برای ترم‌های مومنتوم و لزجت حل شدند که شرح آن در ادامه ذکر شده است.

۳- محاسبه ضرایب آیرودینامیکی پره

با توجه به روابط تئوری المان مومنتوم پره دقت محاسبه ضرایب آیرودینامیکی نقش مهمی در اندازه‌گیری توان تولیدی توربین دارد. در الگوریتم‌های معمول، ضرایب آیرودینامیکی شامل ضرایب برآ و پسا مقاطع پره در زوایای حمله عملیاتی با استفاده از نرم‌افزار مهندسی ایکس فویل که از یک حل خطی شده با فرضیات ابتدایی از جمله ترکیب جریان غیر لزج و حل لایه مرزی استفاده می‌کند محاسبه می‌گردد. اشکال این روش دقت کم آن خصوصاً برای شرایط جریان جدا شده است که باعث می‌شود محاسبات توان تولیدی با خطا روبه‌رو گردد. بدین منظور مقایسه نتایج نرم افزار ایکس فویل نسبت به حل عددی و داده‌های تجربی برای ضرایب پسا در شکل ۴ نشان داده شده است. که این امر موجب بروز خطا در محاسبه توان شده و



شکل ۴. مقایسه نتایج تجربی، عددی و ایکس فویل برای ایرفویل کلارک وای [۱۳]

Fig. 4. Comparison of Experimental, Numerical and X-Foil Results for Clark-Y Airfoil [13]



شکل ۵. تصویر پره توربین برت در تونل باد [۱۴]

Fig. 5. Image of TU-BERT turbine blade in the wind tunnel

شود. برای این کار ابتدا هندسه ایرفویل در نرم‌افزار گمبیت مدل شد. سپس مطالعات ابعاد میدان و شبکه صورت گرفت و جریان تراکم ناپذیر اطراف مقطع پره به صورت لزج با مدل توربولانسی کی-امگا-اس-اس-تی^۴ حل شد. درنهایت برای اطمینان از صحت روش، نتایج حل عددی با داده‌های تجربی [۱۳] مقایسه گردید.

در این مرحله از پژوهش از پره‌ی مینا استفاده شد که نتایج تجربی آن

4 $k-\omega$ -SST

در ۱۸ زاویه حمله و ۲۰ عدد رینولدز و جمعاً ۱۴۴۰ حل عددی انجام پذیرفت.

۳-۱- معرفی توربین پایه پژوهش

هدف از این پژوهش بررسی اثر افزودن فلپ بر توان تولیدی یک توربین باد محور افقی است، برای اجرای این پژوهش نیاز به یک توربین باد مینا بود که اطلاعات هندسی و عملکردی آن موجود باشد تا با افزودن فلپ‌ها مقایسه توان تولیدی به‌راحتی میسر شود. توربین مینا در این پروژه توربین باد دانشگاه برلین با نام تی-یو-برت^۱ و به صورت خلاصه برت^۲ انتخاب شد [۱۴]. تصویر مدل توربین فوق در شکل ۵ آورده شده است.

این توربین از انواع توربین‌های کوچک بوده که برای مصارف خانگی استفاده می‌شود. لذا هدف اصلی این است تا با افزایش توان تولیدی توربین مزبور با کمترین هزینه محصول صنعتی مناسبی طراحی گردد. مشخصات کلی این توربین در جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به مشخصات توربین باد ابتدا باید ضرایب آیرودینامیکی مقطع آن که از نوع ایرفویل کلارک-وای^۳ است، محاسبه شده سپس توان تولیدی توربین بدست آید تا تفاوت عملکرد پره با فلپ و بدون فلپ مشخص گردد.

۳-۲- مدل‌سازی هندسه و تولید شبکه

برای تحلیل عددی ایرفویل ابتدا باید یک شبکه عددی مناسب ایجاد

- | | |
|---|---------|
| 1 | TU-BERT |
| 2 | BERT |
| 3 | Clark-Y |

جدول ۱. مشخصات توربین برت [۱۴]

Table 1. TU-BERT turbine parameters

| مقدار | مشخصه |
|-----------|---------------------------------|
| ۳ | قطر روتور (متر) |
| ۱/۲۸۵ | طول پره (متر) |
| کلارک-وای | ایرفویل مقطع پره |
| ۴/۶ | نسبت سرعت نوک طراحی |
| ۱۳۰ | سرعت دورانی نامی (دور بر دقیقه) |

شکل ۶. ایرفویل کلارک-وای [۱۲]

Fig. 6. Clark-Y airfoil [12]

صحت سنجی روش طبق مرجع [۱۳] اعمال شد. تنظیمات تحلیل عددی با توجه به آزمون تجربی در جدول ۲ ذکر شده است.

۳-۳- اعتبارسنجی روش عددی

برای اینکه یک حل عددی نتایج قابل قبولی داشته باشد باید جواب‌های آن مشابهت کافی با واقعیت داشته باشند. لذا در این پژوهش ابتدا نتایج عددی جریان اطراف ایرفویل با داده‌های تجربی [۱۳] مقایسه شد تا از صحت نتایج اطمینان حاصل گردد. در شکل ۱۰ نتایج ضریب پسای حل عددی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند، همان‌طور که مشخص است نتایج به‌دست‌آمده دقت مناسبی دارند. اکنون با توجه به اطمینان از صحت نتایج حل عددی ادامه مراحل انجام پذیرفت.

۳-۴- مدل‌سازی عددی مقاطع پره توربین باد به همراه سطوح برآ افزا

اکنون با توجه به نتایج بخش قبل و داشتن شبکه مناسب به تحلیل جریان حول مقاطع پره پرداخته می‌شود. یکی از نوآوری‌های انجام‌شده در پروژه فوق این است که ضرایب آیرودینامیکی موردنیاز در روش اندازه حرکت المان پره^۲ از حل عددی جریان محاسبه و سپس توابع متناظر با ضرایب آیرودینامیکی برحسب عدد رینولدز و زاویه حمله استخراج شد تا در کد المان مومنتوم پره استفاده گردد. برای این کار ابتدا هندسه ایرفویل در چهار حالت بدون فلپ، فلپ ۵ درصد وتر، فلپ ۱۰ درصد وتر و فلپ ۱۵ درصد وتر با توجه به شبکه‌ای که دقت آن اثبات شد مدل‌سازی شده و سپس در نرم‌افزار فلوئنت ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل در شرایط مختلف محاسبه شد.

در این پروژه از سطوح برآ افزا جدیدی استفاده شد. ایده طراحی این فلپ به این صورت است که سطحی منطبق بر خط انحناى ایرفویل در محل لبه فرار درون بدنه ایرفویل تعبیه شده و با توجه به شرایط این صفحه از روی خط انحنا بیرون آمده و باعث افزایش سطح ایرفویل و انحناى آن می‌شود که این

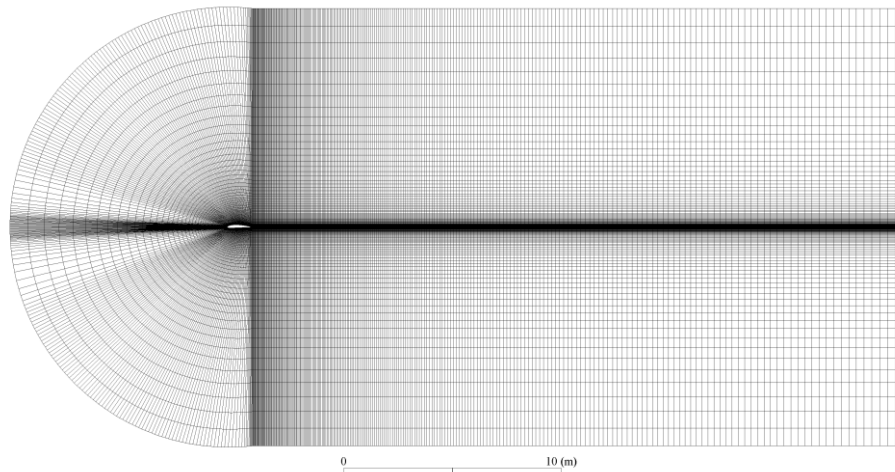
(بدون فلپ) موجود است. ایرفویل مقطع این پره ایرفویل کلارک-وای است که در سرتاسر پره مورد استفاده قرار گرفته است. برای اینکه حل از دقت کافی برخوردار باشد ابعاد میدان و ریزی شبکه باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که نتایج حل عددی با نتایج حل تجربی [۱۳] مطابقت مناسبی داشته باشند. شرایط اولیه حل عددی با شرایط محیط آزمون تجربی یکسان در نظر گرفته شد تا پس از حل جواب‌های منطبق بر واقعیت تولید کنند. شرایط مرزی سرعت جریان ۱۵ متر برثانیه و طول وتر ایرفویل ۰/۳ متر گزارش شده و عدد رینولدز جریان نیز ۳۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شده. مقطع ایرفویل کلارک-وای با حداکثر ضخامت ۱۲ درصد طول وتر در شکل ۶ آورده شده است.

برای مدل‌سازی ایرفویل از یک میدان به شکل سی^۱ استفاده شد، تصویر میدان حل و شبکه با سازمان تولید شده در شکل ۷ آورده شده است.

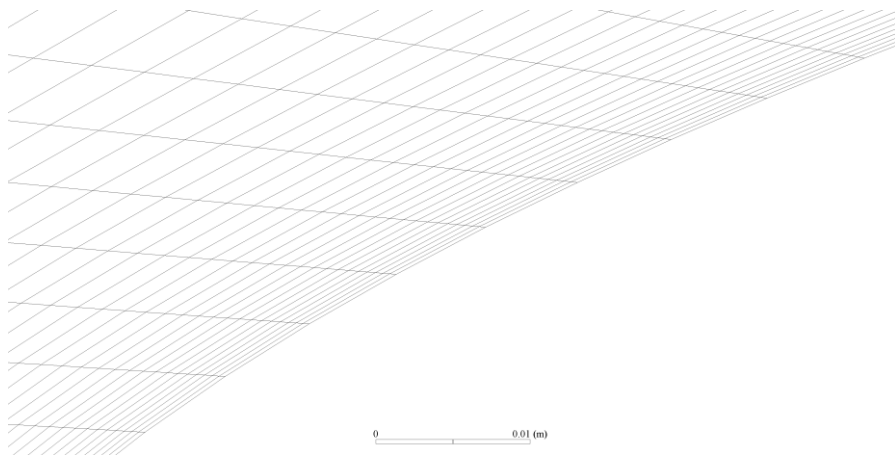
پس از بررسی ابعاد میدان، میدانی به اندازه ۲۵ برابر وتر پشت ایرفویل و شعاع ۱۵ برابر وتر انتخاب شد. مطالعه ریزی مناسب شبکه با تولید چهار شبکه با مشخصات مندرج در شکل ۸ و بررسی روند تغییرات ضریب پسای انجام پذیرفت. طبق همین جدول شبکه با ۴۲۰۰۰ سلول دارای استقلال نتایج بوده و برای ادامه تحلیل مناسب تشخیص داده شد.

نمای نزدیک شبکه انتخاب شده در اطراف ایرفویل در شکل ۹ آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است نقاط در اطراف لبه حمله و فرار که پدیده‌های مهمی از جمله نقطه سکون و جدایش در آن‌ها رخ می‌دهد ریزتر شده و در نقاط دور از ایرفویل شبکه درشت‌تر شده است.

پس از مطالعه ابعاد میدان و مطالعات شبکه تنظیمات حل عددی برای



(الف) a



(ب) b

شکل ۷. الف) میدان و شبکه تولیدشده برای حل عددی ب) شبکه لایه مرزی دیواره مقطع

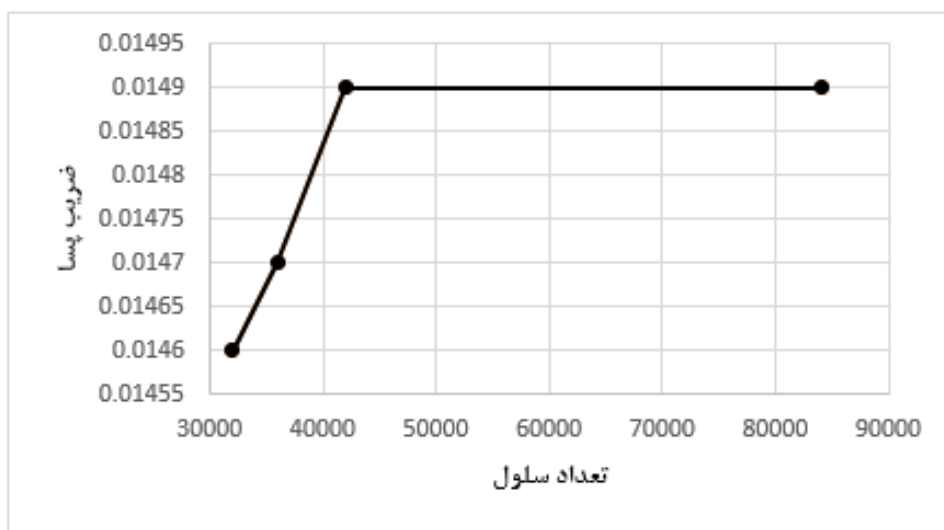
Fig. 7. a) Domain and grid generated for numerical solution b) Boundary layer grid of airfoil

آیرودینامیکی برحسب زاویه حمله و عدد رینولدز از ۴ هندسه مختلف استفاده شد و برای هر هندسه توابع میانمایی مخصوص به آن تخصیص داده شد. برای تحلیل جریان اطراف ایرفویل مورد استفاده ابتدا حالت بدون فلپ بررسی شد. برای این کار از شبکه و میدانی که در بخش‌های قبل اعتبار آن ثابت شد استفاده شد. پس از محاسبه ضرایب ایرفویل کلارک-وای بدون فلپ ادامه تحلیل برای محاسبه ضرایب مقاطع دارای فلپ انجام شد. در این مرحله محاسبه ایرفویل با فلپ ۱۵ درصد وتر انجام شد که شمایی از شبکه تولیدشده در شکل ۱۲ آورده شده است.

معیار همگرایی نتایج همانطور که در جدول ۲ ذکر شده است مقدار مانده کمتر از 0.001 در نظر گرفته شد. اما در صورتی که به علت وجود گردابه‌ها

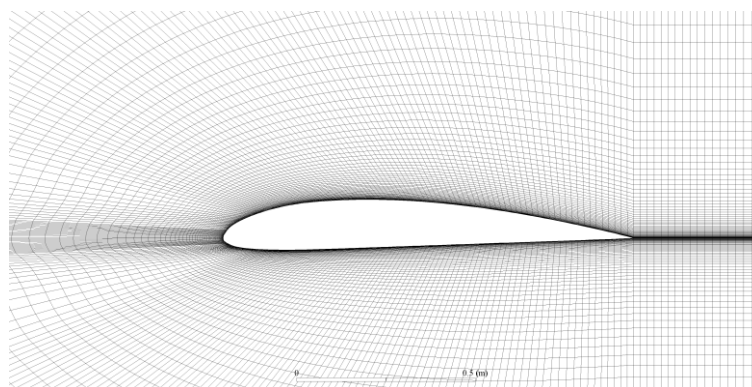
امر موجب افزایش راندمان آیرودینامیکی پره می‌شود. نکته اینکه خروج فلپ اگر بیش از اندازه باشد در عین افزایش ضریب برآ باعث افزایش ضریب پسا نیز می‌شود که این امر باعث کاهش راندمان آیرودینامیکی ایرفویل می‌گردد، لذا باید فلپ تا حد مشخصی از ایرفویل بیرون آمده تا بهترین عملکرد را داشته باشد تصویر فلپ‌های طراحی شده در این تحقیق در شکل ۱۱ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است نحوه استفاده از فلپ از طریق بیرون آمدن آن برحسب کسری از طول وتر ایرفویل است. در این پروژه به‌منظور بررسی اثر فلپ بر توربین باد از سه اندازه ۵ درصد وتر، ۱۰ درصد وتر و ۱۵ درصد وتر استفاده شد. در ادامه برای استخراج مقادیر ضرایب



شکل ۸. تغییرات ضریب پسا با تعداد سلول‌های شبکه

Fig. 8. Drag coefficient changes due to the number of grid cells



شکل ۹. شبکه اطراف ایرفویل مورد تحلیل

Fig. 9. The grid around the airfoil

گواه همگرایی حل است.

در ادامه تحلیل عددی برای فلپ ها در شرایط مختلف انجام شد که برای نمونه کانتورهای سرعت در شرایط زاویه حمله صفر درجه و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰۰ در سه حالت بدون فلپ، فلپ ۵ درصد و فلپ ۱۵ درصد در شکل ۱۴ آورده شده است. همانطور که مشخص است افزودن فلپ باعث افزایش انحنای ایرفویل شده که این امر موجب افزایش فشار در زیر ایرفویل و افزایش برآ آن می‌گردد. با توجه به این موضوع مشخص می‌شود که فلپ

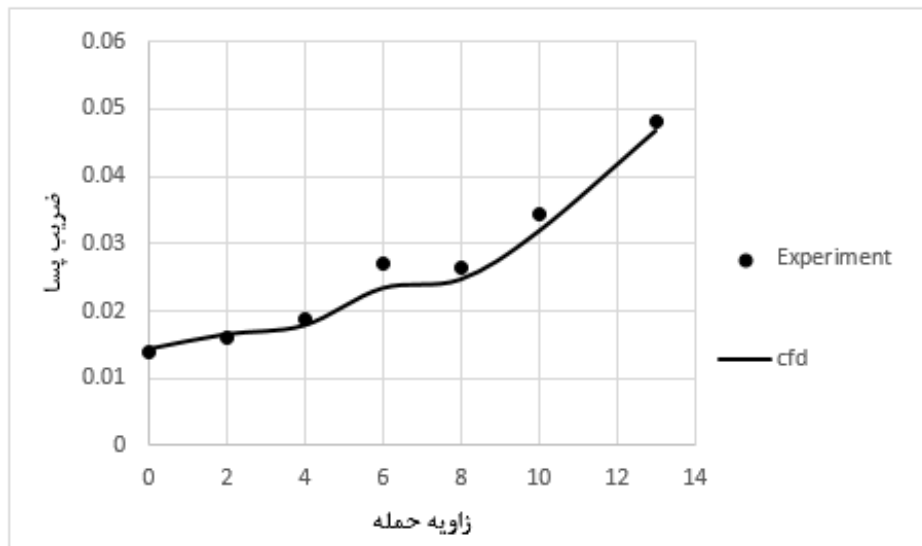
در جریان امکان ثابت شدن مقادیر مانده حول عدد خاصی وجود دارد روند تغییرات ضریب پسا در هر گام حل نیز بررسی شد که با ثابت شدن مقدار ضریب پسا حل همگرا می‌شود. برای مثال در شکل ۱۳ روند همگرایی نتایج برای ایرفویل با فلپ ۱۵ درصد در زاویه حمله صفر درجه و رینولدز ۲۰۰۰۰۰ آورده شده است. همانطور که در شکل ۱۳ (الف) مشخص است مقادیر مانده معادله بقای جرم در مقدار ۰/۰۰۵ ثابت شده و باقی مقادیر کمتر از حد همگرایی هستند لذا تغییرات ضریب پسا که در شکل ۱۳ (ب) آورده شده

جدول ۲. شرایط تحلیل عددی [۱۳]

Table 2. Conditions of numerical solution

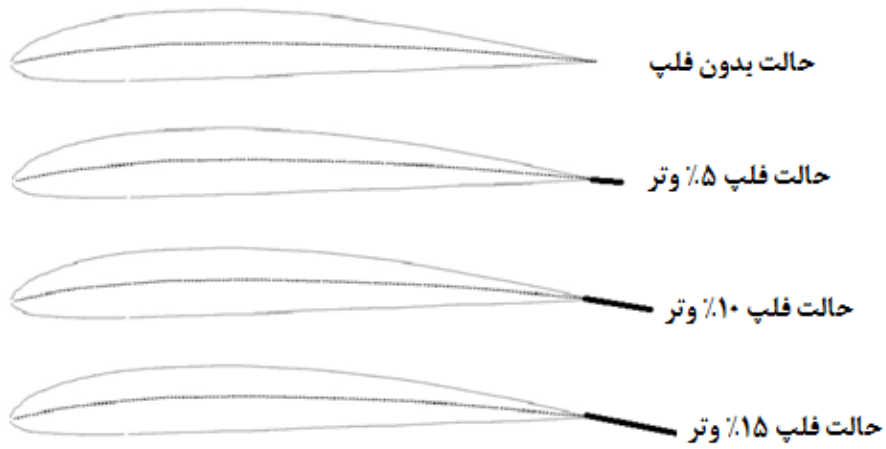
| مقدار | شرایط تحلیل عددی |
|------------------------------------|---------------------------------|
| ۱۵ | سرعت جریان (متر بر ثانیه) |
| ۱۰۱۳۲۵ | فشار محیط (پاسکال) |
| ۱/۲۲۵ | چگالی محیط (کیلوگرم بر مترمکعب) |
| ۰/۳ | طول وتر ایرفویل (متر) |
| ۰/۲۲۸ | مساحت سطح مدل (مترمربع) |
| تراکم ناپذیر پایا | نوع جریان |
| سیمپل ^۱ | روش گسسته سازی |
| مرتبه دوم | دقت حل |
| مقادیر مانده معادلات کمتر از ۰/۰۰۱ | حد همگرایی |

¹ SIMPLE



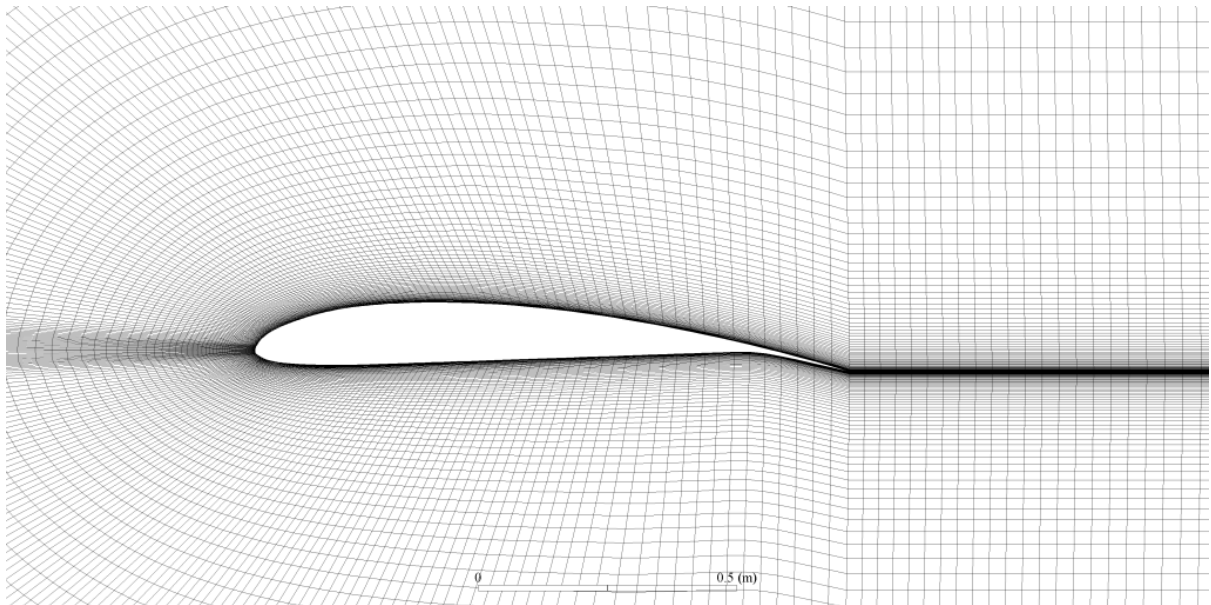
شکل ۱۰. مقایسه نتایج حل عددی با نتایج حل تجربی [۱۱]

Fig. 10. Comparison of numerical solution results with experimental solution results [11]



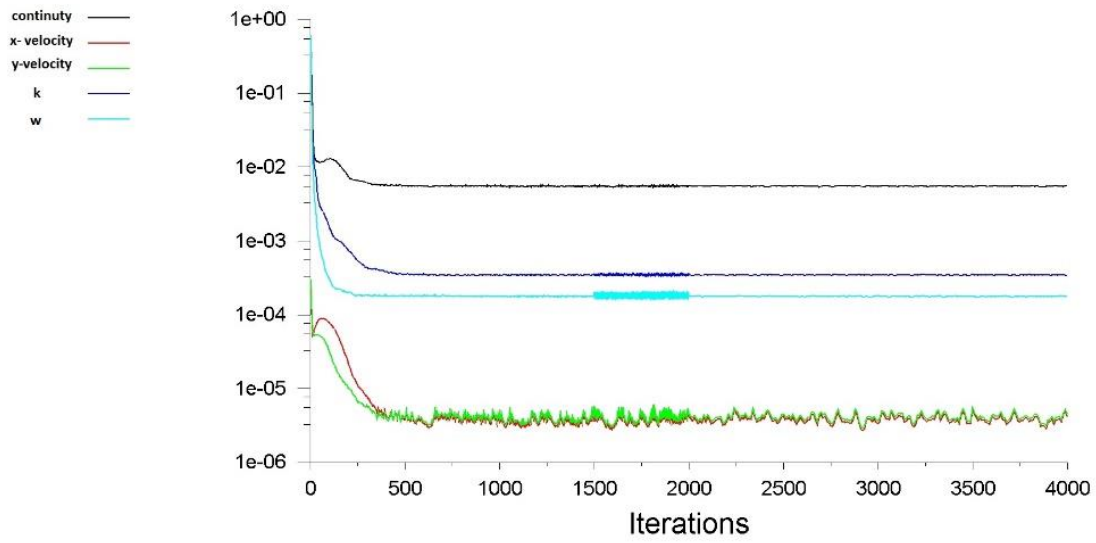
شکل ۱۱. فلپ های طراحی شده در این تحقیق

Fig. 11. Flaps which is designed in this research

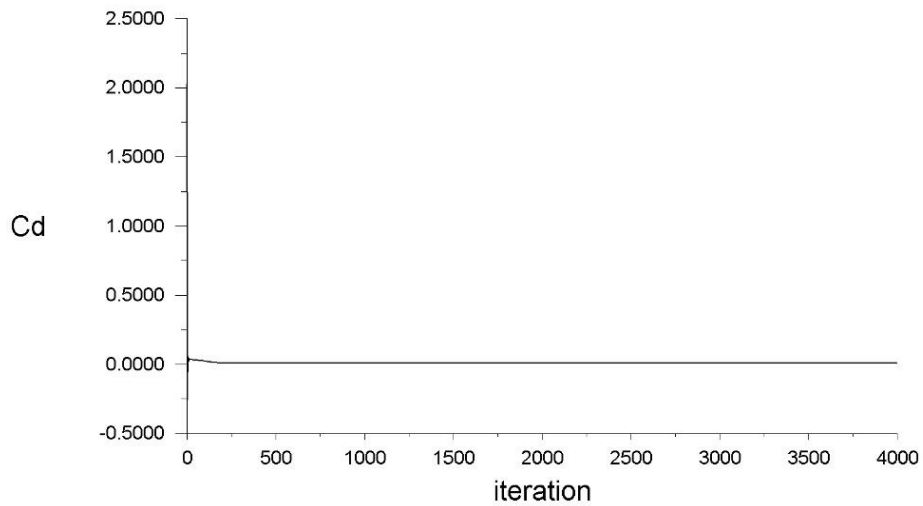


شکل ۱۲. شبکه تولیدشده اطراف مقطع دارای فلپ ۱۵ درصد

Fig. 12. The grid which is produced around the airfoil with a 15% flap



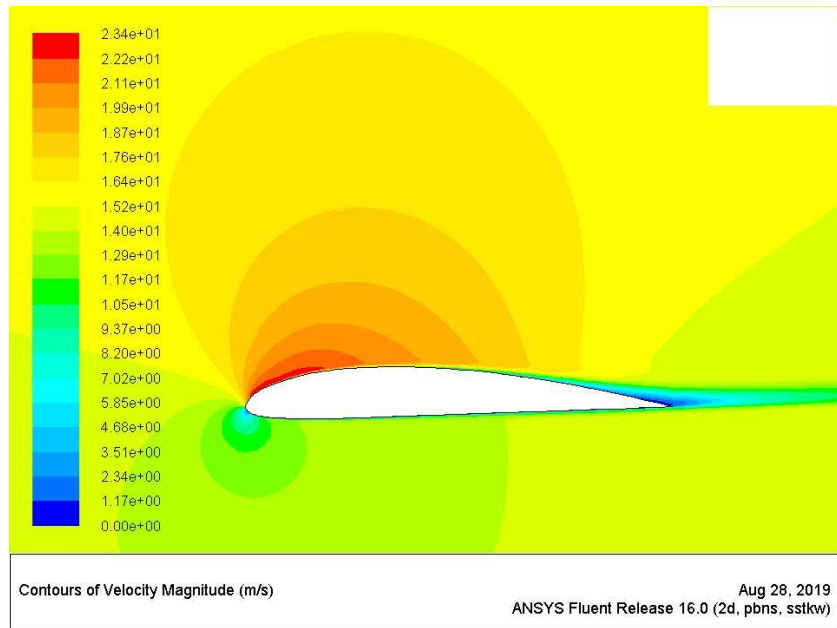
(الف)



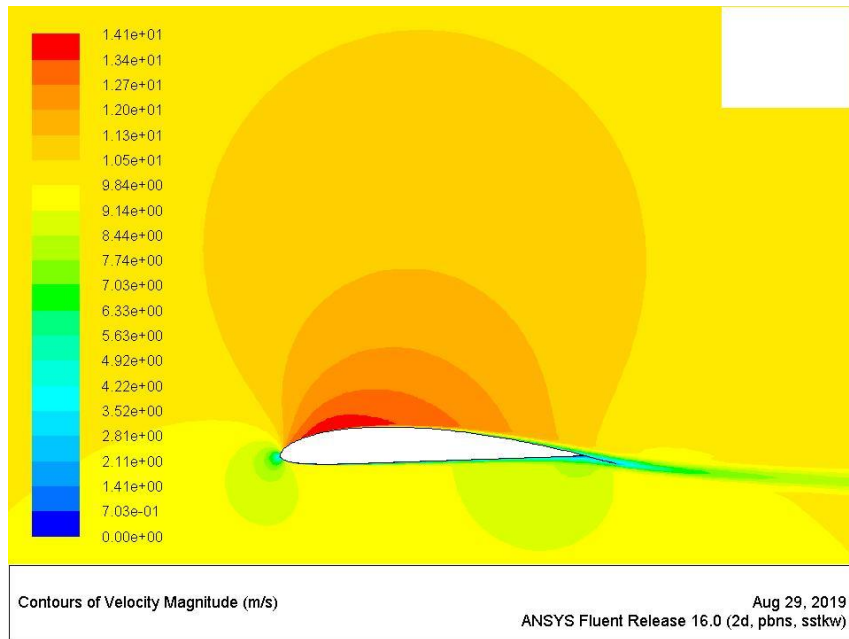
(ب)

شکل ۱۳. روند همگرایی برای ایرفویل با فلپ ۱۵٪ در زاویه حمله صفر درجه و رینولدز ۲۰۰۰۰۰ (الف) مقادیر مانده معادلات (ب) مقدار ضریب پسا

Fig. 13. a) The grid which is produced around the airfoil with a 15% flap b) Convergence drag for airfoil with 15% flap at zero angle of attack and Reynolds 200.000



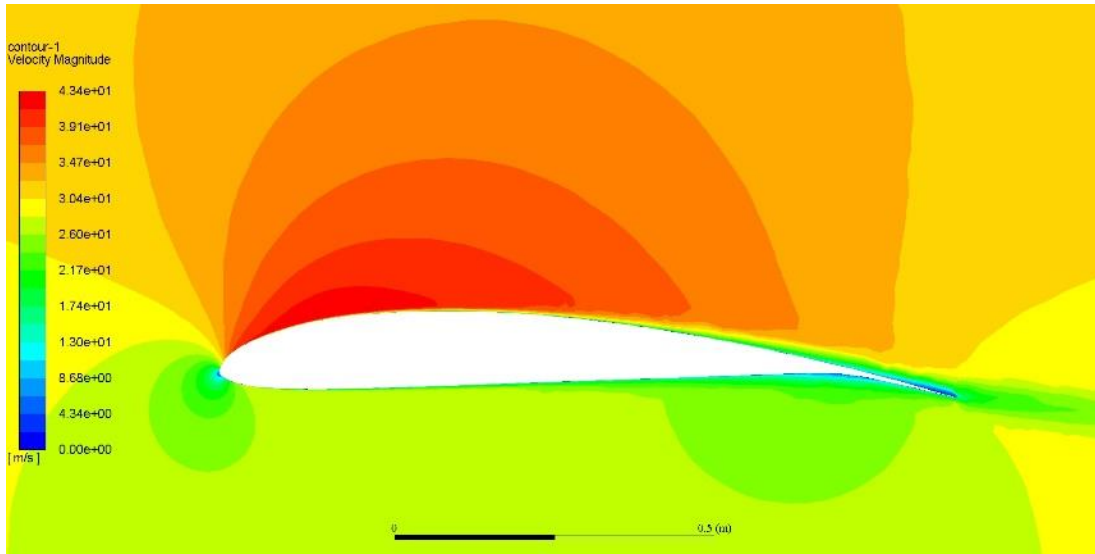
(الف)



(ب)

شکل ۱۴. کانتور سرعت اطراف مقطع در زاویه حمله صفر درجه و عدد رینولدز 200000 (الف) مقطع بدون فلپ (ب) مقطع با فلپ ۵ درصد (ادامه دارد)

Fig. 14. a) Velocity contour around the section without flap at zero angle of attack and Reynolds number 200000 b) Velocity contour around the section with 5% flap at zero angle of attack and Reynolds number 200000 (Continue)



(ج)

شکل ۱۴. کانتور سرعت اطراف مقطع در زاویه حمله صفر درجه و عدد رینولدز 200000 (ج) مقطع با فلپ ۱۵ درصد

Fig. 14. c) Velocity contour around the section with 15% flap at zero angle of attack and Reynolds number 200000

در زوایای حمله پایین که جریان به ایرفویل کاملاً چسبیده است عملکرد بهتری دارد، اما با افزایش زاویه حمله ناحیه جدایش پشت ایرفویل رشد کرده که منجر به کاهش راندمان آیرودینامیکی فلپ با انحنای زیاد می‌شود. لذا در زوایای حمله ۶ تا ۱۰ درجه فلپ ۱۰ درصد بر سایرین برتری دارد. اما با افزایش بیشتر زاویه حمله حالت بدون فلپ راندمان بهتری دارد.

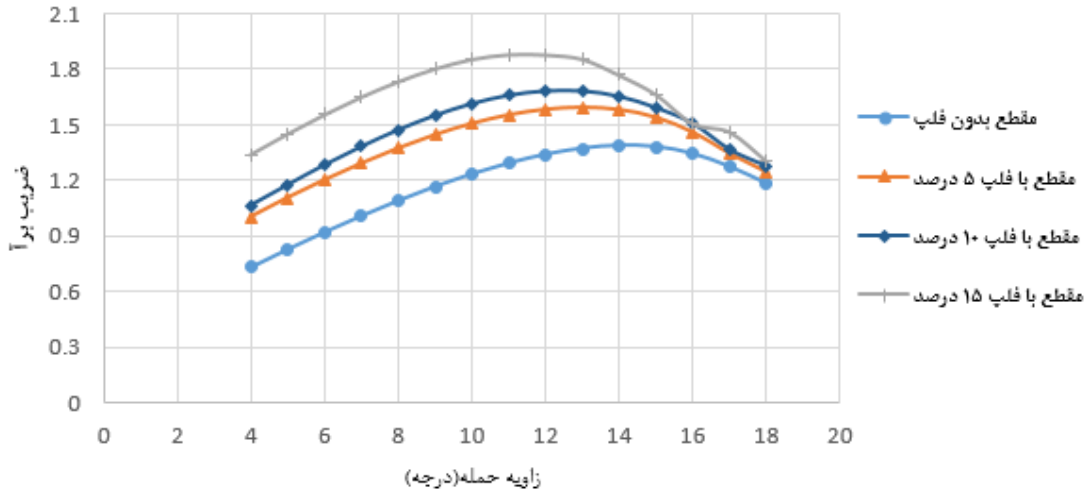
همان‌طور که در شکل مشخص است فلپ ۱۰ درصد در بازه زاویه حمله ۶ تا ۱۰ درجه عملکرد آیرودینامیکی بهتری نسبت به دیگر فلپ‌ها دارد و در زوایای حمله کم که پدیده جدایش منطقه کوچکی را اشغال می‌کند فلپ ۱۵ درصد مناسب‌تر است. اما با افزایش عدد رینولدز به علت کاهش ضریب پسا عملکرد فلپ‌ها بهبود می‌یابد، در شکل ۱۷ عملکرد مقطع ایرفویل کلارک-وای در عدد رینولدز 400000 آورده شده است.

با توجه به نمودار فوق مشخص می‌گردد که در این عدد رینولدز عملکرد فلپ ۱۰ درصد بهبود یافته و از زاویه ۶ تا ۱۳ درجه بهترین عملکرد را دارد. با بررسی نمودارهای بالا می‌توان نتیجه گرفت که بهتر است متناسب با عدد رینولدز جریان اعمال شده به هر مقطع از فلپ‌های ۱۰ درصد و یا ۱۵ درصد طول وتر استفاده نمود، زیرا عدد رینولدز و زاویه حمله در طول پره تغییر می‌کند. پس از محاسبه ضرایب در شرایط مختلف نوبت به محاسبه

۱۵ درصد که انحنای بیشتری دارد در زوایای کمتر از ۵ درجه راندمان بهتری ایجاد می‌کند. با افزایش زاویه حمله در انتهای ایرفویل جدایش رخ داده که این موضوع سبب افزایش پسا و کاهش راندمان آیرودینامیکی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است فلپ ۱۵ درصد تا زاویه حمله ۶ درجه عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. سپس در بازه زاویه حمله ۶ الی ۱۰ درجه، فلپ ۱۰ درصد عملکرد بهتری داشته و با افزایش زاویه حمله حالت بدون فلپ برتری دارد.

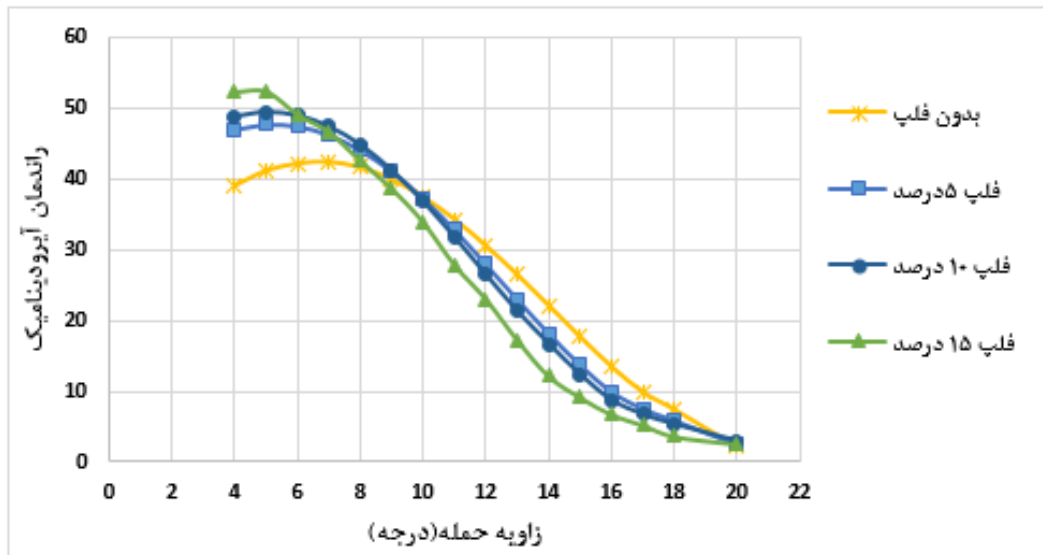
افزودن فلپ با ایجاد انحنای بیشتر در جریان باعث کاهش سرعت در زیر ایرفویل و افزایش برآ می‌گردد علاوه بر این فلپ معرفی شده به خاطر شکل خود، افزایش ضریب پسای کمتری نسبت به سایر فلپ‌ها دارد که باعث عملکرد بهتر فلپ می‌گردد. در شکل ۱۵ مقادیر ضریب برآی مقطع پره در زوایای حمله مختلف به همراه هر کدام از سه فلپ با مقطع بدون فلپ مقایسه شده است.

همان‌طور که مشخص است با افزایش طول فلپ ضریب برآ افزایش می‌یابد، اما ضریب پسا نیز به علت بزرگ‌تر شدن منطقه گردابی بیشتر می‌شود. بازده آیرودینامیکی (نسبت ضریب برآ به ضریب پسا) فلپ در هر زاویه حمله را می‌توان در شکل ۱۶ مشاهده کرد. با توجه به این شکل فلپ ۱۵ درصد



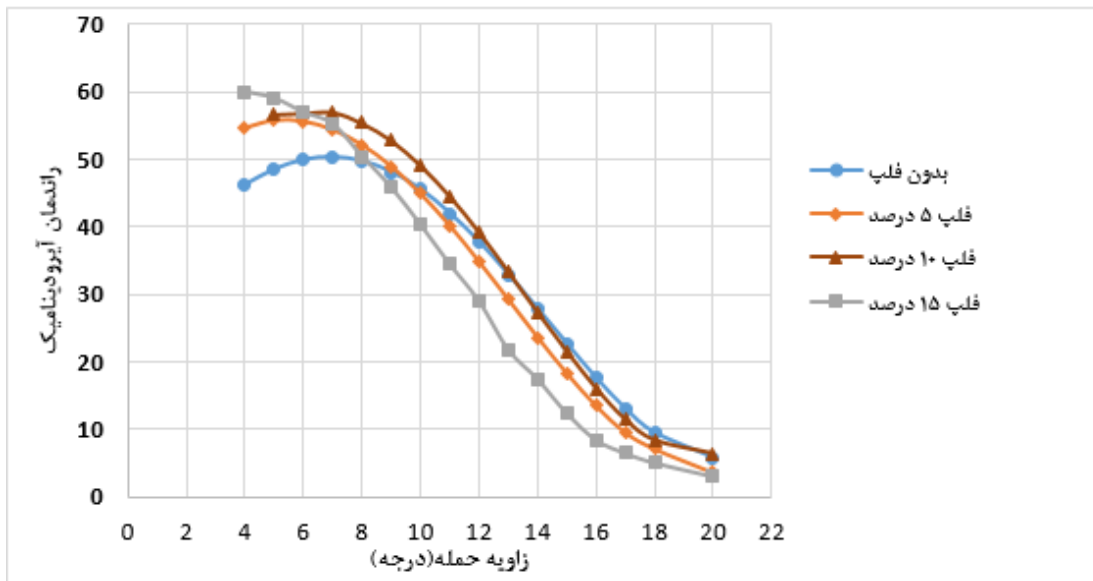
شکل ۱۵. مقایسه ضرایب برآ ایرفویل در حالات هندسی مختلف در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰۰

Fig. 15. Comparison of airfoil lift coefficients in different geometric states in Reynolds number 200000



شکل ۱۶. عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل کلارک-وای به همراه انواع فلپ در رینولدز ۲۰۰۰۰۰

Fig. 16. Aerodynamic performance of Clark-Y Airfoil with different flaps at Reynolds 200000



شکل ۱۷. نمودار عملکرد مقطع کلارک وای به‌مراه انواع فلپ با هندسه‌های مختلف در عدد رینولدز ۴۰۰۰۰۰

Fig. 17. Aerodynamic performance of Clark-Y Airfoil with different flaps at Reynolds 400000

به ترتیب به المان‌های پره اضافه می‌شود تا اثر مکان و نوع سطح بر افزایش مشخص گردد. سپس با بررسی اثر هر یک از سطوح بر افزایش چیدمان خاص از آن‌ها پیشنهاد می‌گردد و توان تولیدی آن محاسبه و با حالت بدون سطح بر افزایش مقایسه می‌گردد.

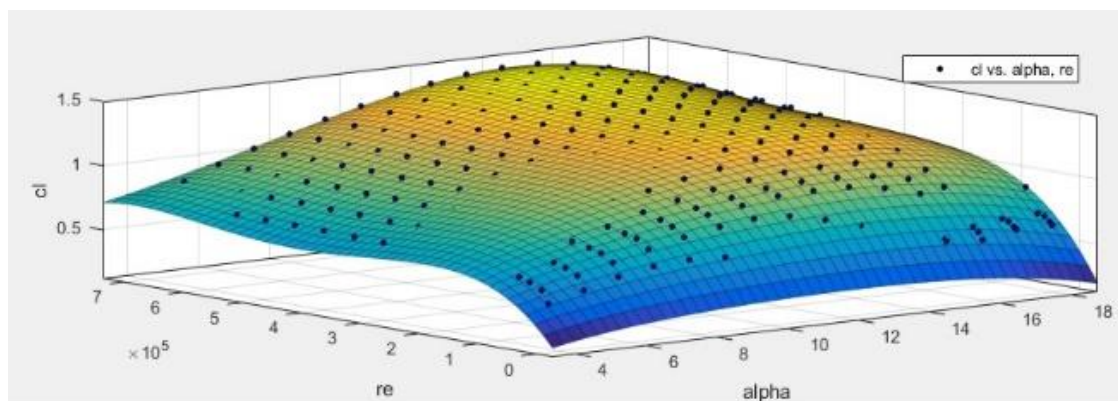
۴-۱- اعتبارسنجی الگوریتم محاسبه توان تولیدی

توان تولیدی پره توربین باد با استفاده از نرم افزار توسعه داده شده به روش اندازه حرکت المان پره که تئوری آن در فصل دوم شرح داده شد محاسبه می‌شود. در این نرم افزار، پره را به المان‌های مختلف تقسیم کرده و برای هر المان با توجه به شرایط جریان از جمله سرعت باد، نسبت سرعت نوک و مشخصات هندسی، مشخصات توربین مانند سرعت دورانی، زاویه نسبی جریان، عدد رینولدز و زاویه حمله را محاسبه می‌کند. با داشتن مشخصات جریان روی هر المان، ضرایب آیرودینامیکی برآ و پسا با استفاده از روابط برازش شده از مقادیر حل عددی استخراج شده و در نتیجه نیروهای وارد بر المان محاسبه می‌شوند. با داشتن نیروهای وارد بر المان، گشتاور وارده بر هر المان حساب شده و با کمک سرعت دورانی، توان تولیدی هر المان محاسبه می‌گردد. در نهایت با انتگرال‌گیری از کل المان‌ها توان کل

توابع میان یابی ضرایب آیرودینامیک با عدد رینولدز و زاویه حمله می‌رسد. در کد محاسبه توان توربین باد، ضرایب آیرودینامیکی مورد نیاز به این صورت محاسبه می‌شوند که اعداد رینولدز و زاویه حمله جریان روی هر المان توربین باد محاسبه شده و با توجه به آن ضرایب آیرودینامیک متناظر از طریق توابع میان یابی به دست می‌آیند. برای ایرفویل بدون فلپ مجموعه نقاط ضریب برآ برحسب اعداد رینولدز و زاویه حمله به صورت شکل ۱۸ است. از این رویه یک معادله چندجمله‌ای با کمک نرم‌افزار برازش گر متلب استخراج شد. حال برای باقی حالات میانی نیز معادلات رویه‌ها در نرم‌افزار توسعه داده شده وارد و مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۲ بررسی اثر سطوح بر افزایش توان تولیدی

برای بررسی اثر سطوح بر افزایش توان تولیدی پره مینا با کمک کد حلگر جریان و الگوریتم اندازه حرکت المان پره محاسبه شود، سپس این نتایج با آزمون تجربی صحت‌سنجی شود. با داشتن یک حلگر مناسب که توان تولیدی را با دقت خوبی محاسبه می‌کند می‌توان توان تولیدی پره توربین را در حالات مختلف محاسبه و با هم مقایسه نمود. بررسی اثر سطوح بر افزایش به این صورت انجام می‌شود که ابتدا هر سطح بر افزایش به صورت مجزا



شکل ۱۸. رویه ضریب برآ برحسب زاویه حمله و عدد رینولدز برای مقطع بدون فلپ

Fig. 18. The surface of lift coefficient in terms of angle of attack and Reynolds number for airfoil without flap

بعدی حل عددی دانست. در جریان واقعی روی پره جریان‌های لغزشی ایجاد می‌شود که این امر استال را به تأخیر انداخته و موجب افزایش برآ می‌گردد. بنابراین بیشتر بودن مقادیر تجربی توان از مقادیر محاسبه شده با حل عددی ایرفویل را می‌توان قابل قبول دانست.

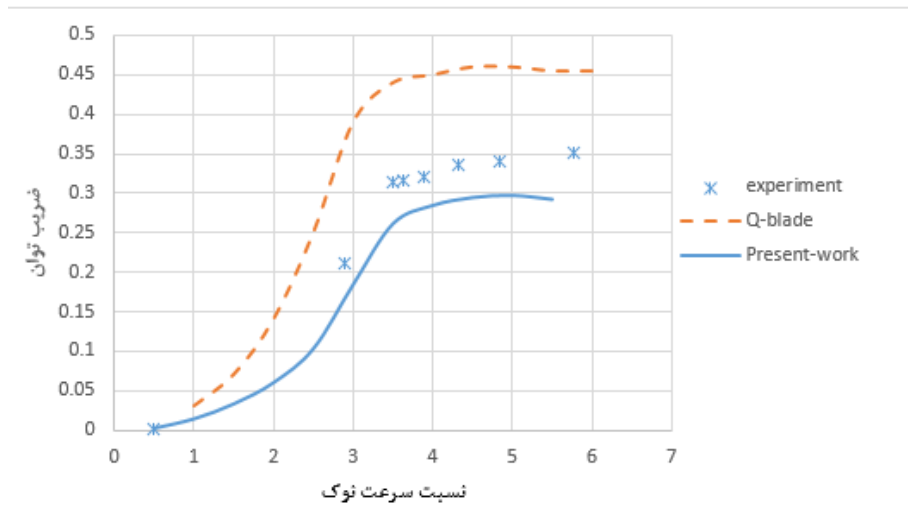
اکنون با استفاده از کد توسعه داده شده که اعتبار آن مورد بررسی قرار گرفت توان تولیدی پره محاسبه می‌شود. با توجه به شکل ۱۹ سرعت نوک ۵/۵ که ضریب توان بالایی را تولید می‌کند برای تحقیق حاضر انتخاب شد. ضریب توان پره مبنا برای محاسبات بعدی در نسبت سرعت نوک یادشده مقدار ۰/۲۹۵ در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲- بررسی اثر سطوح برآ افزا بر توان تولیدشده

در این بخش اثر افزودن سطوح برآ افزا به پره بر ضریب توان تولیدی در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه بررسی می‌شود. روش بررسی به این صورت است که ابتدا اثر مکان سطوح برآ افزا بررسی می‌شود. برای این کار به ترتیب روی هر المان پره یک سطح برآ افزا اضافه شده و بهبود ضریب توان محاسبه می‌شود. سپس با تغییر سطح برآ افزا اثر هر سه نوع سطح یعنی با طول ۵ درصد وتر، ۱۰ درصد وتر و ۱۵ درصد وتر بررسی می‌شود. در شکل ۲۰ تصویر پره المان‌بندی شده آورده شده است.

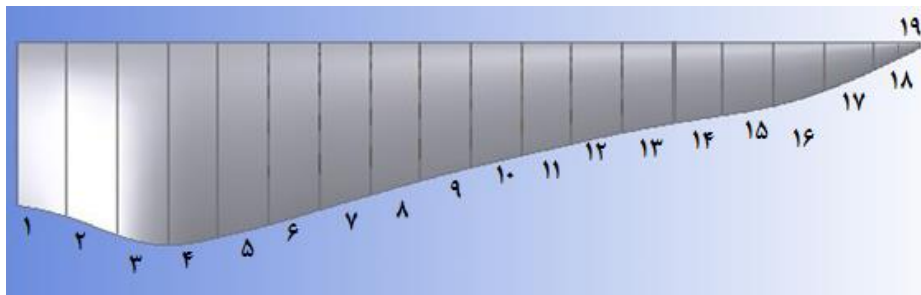
برای این کار پره به ۱۹ المان با عرض هر کدام ۷ سانتی‌متر تقسیم شده و به هر بخش به صورت مجزا در هر مرحله یک سطح برآ افزا اضافه می‌شود. در نهایت میزان درصد بهبود ضریب توان کل توربین با اضافه کردن انواع فلپ به هر کدام از قسمت‌های پره (از ۱ تا ۱۹) در شکل ۲۱ آورده شده است.

محاسبه شده و با بی‌بعد سازی، ضریب توان توربین باد به دست می‌آید. برای اعتبار سنجی و اطمینان از صحت نتایج این کد نتایج آن با داده‌های تجربی [۱۴] مقایسه شد. این آزمون در دانشکده انرژی موسسه سلطنتی فناوری سوئد انجام شده است. در این آزمون سانچز [۱۴] ضریب توان پره را در ابعاد واقعی برحسب نسبت سرعت نوک اندازه گیری کرده است. با توجه به آزمون فوق ضریب توان پره توسط کد توسعه داده شده در این تحقیق در نسبت سرعت نوک‌های مختلف محاسبه و با نتیجه آزمون تجربی و همین‌طور نتایج بدست آمده از نرم‌افزار کیوبلید ۱۶ که در واقع همان حلگر اندازه حرکت المان پره است، اما با این تفاوت که ضرایب آیرودینامیک را با کمک حلگر خطی ایکس-فوایل حساب می‌کند، مقایسه شد. نتایج این سه روش در شکل ۱۹ آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است روش کیوبلید مقادیر بیشتری را برای ضریب توان نسبت به حل تجربی پیش‌بینی می‌کند. دلیل این خطا این است که حلگر کیوبلید مانند اکثر حل‌های الگوریتم اندازه حرکت المان پره از نظریه ایرفویل نازک برای محاسبه ضرایب آیرودینامیکی استفاده می‌کند. این روش مقادیر را بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند که باعث خطای فوق می‌شود. در این پژوهش این نقص رفع شده و برای محاسبه ضرایب آیرودینامیکی از حل عددی معادلات استفاده شده که خطای کمی دارد. لذا نتایج بدست آمده از روش توسعه داده شده در این پروژه بسیار به واقعیت نزدیکتر است. علت اختلاف نتایج تحلیل عددی با حل تجربی را می‌توان دو عامل یکی خطای خود نظریه المان مومنتوم پره و دیگری تفاوت جریان سه بعدی پره با جریان دو



شکل ۱۹. مقایسه ضریب توان بدست آمده از حل کیوبلید و کد توسعه داده شده در این تحقیق با داده‌های تجربی [۱۴]

Fig. 19. Comparison of power coefficient obtained from Q-blade solution and the code which is developed in this research with experimental data [14]

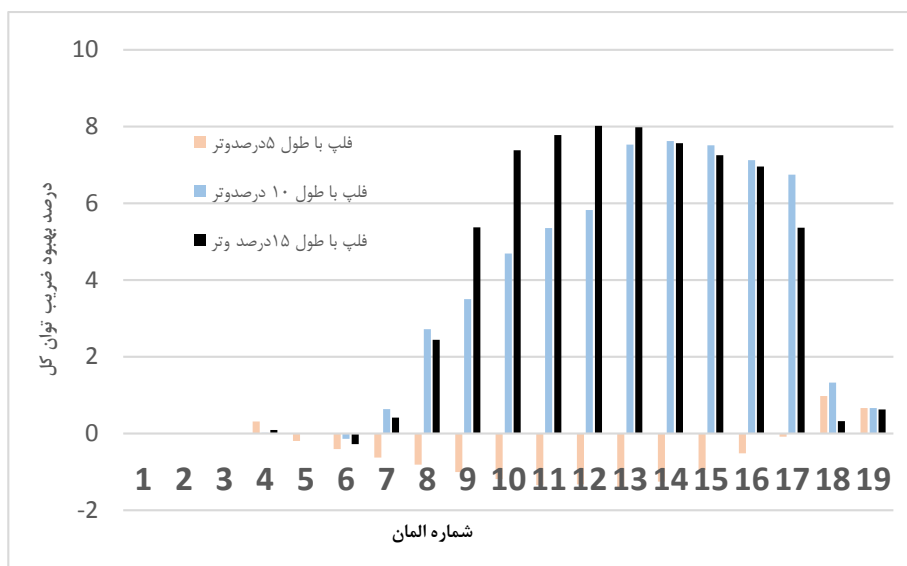


شکل ۲۰. تصویر پره المان بندی شده

Fig. 20. The blade and its elements

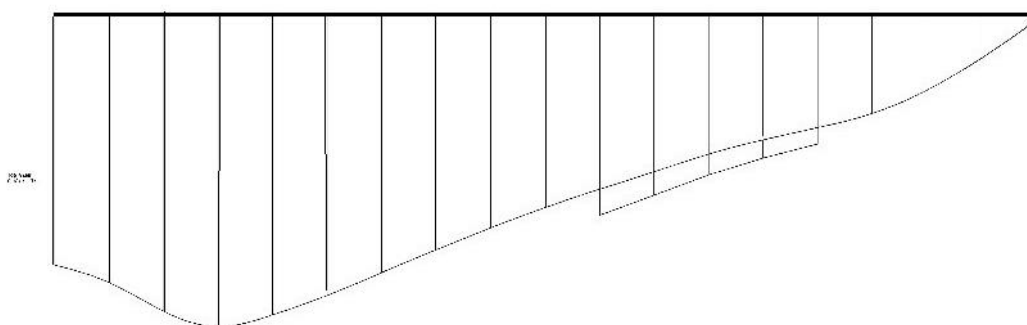
کمتری بر افزایش ضریب توان دارد. افزودن فلپ به المان‌های انتهایی به علت عدد رینولدز بالاتر (حدود ۳۰۰۰۰۰) و جریان‌های نوک پره اثر مثبتی ندارد و نتیجه‌ای مانند المان‌های ریشه پره دارند. در نتیجه اعمال سطح برآ افزا با طول ۱۵ درصد وتر به بخش میانی پره اثر بهتری نسبت به بقیه حالات دارد. لذا یک چپش پیشنهادی برای چیدمان سطوح اعمال فلپ ۱۵ درصد وتر به المان‌های ۱۱ تا ۱۴ است زیرا عملکرد سطح برآ افزا در این بازه چیزی بیش از ۷/۵ درصد بهبود برای هر المان است. در شکل ۲۲ تصویر پره با چپش فلپ‌ها آمده است.

با بررسی نتایج به دست آمده می‌توان اذعان نمود که افزودن سطح برآ افزا به ۷ المان ابتدایی که در واقع ریشه پره را شامل می‌شوند به علت سرعت برآیند کم جریان اثر مثبتی نداشته و حتی در صورت استفاده از سطح برآ افزای ۵ درصد به علت افزایش نیروی پسا اثر منفی بر توان تولیدی دارد. با اعمال سطح برآ افزا به بخش میانی پره از المان ۸ الی ۱۶ سطوح ۱۰ و ۱۵ درصد وتر اثر مثبتی را نشان می‌دهند و فلپ با طول ۱۵ درصد وتر به علت راندمان آیرودینامیکی بالاتر عملکرد بهتری در زاویه حمله و عدد رینولدز این منطقه دارد و فلپ با طول ۱۰ درصد به علت بازده آیرودینامیکی کمتر اثر



شکل ۲۱. درصد بهبود ضریب توان با استفاده از سطوح برآ افزا در المانهای مختلف

Fig. 21. Improvement of power coefficient in percentage due to using flaps in different elements



شکل ۲۲. پره برت دارای سطوح برآ افزا پیشنهادی

Fig. 22. The TU-BERT blade which has the recommended flap surfaces

آن اضافه می‌شود. این امر باعث کاهش هزینه اقتصادی و افزایش بهره‌وری توربین بادی می‌گردد.

۵- جمع بندی

نتایج حاصله از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود.
 - در این تحقیق برای افزایش کارایی آیرودینامیکی توربین بادی محور افقی از یک نوع جدید سطوح برآ افزا استفاده شد که نسبت برآ به پسا را افزایش داده و موجب عملکرد آیرودینامیکی بهتر پره‌ها می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۲۲ مشخص است فلپ‌ها به بخش میانی پره اعمال شده‌اند. با اعمال هندسه فوق در حلگر اندازه حرکت المان پره با شرایط نسبت سرعت نوک ۵/۵ و سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه، مقدار ضریب توان پره برابر مقدار ۰/۴۱ محاسبه شد که نشان‌دهنده رشد ۴۰/۹ درصدی در ضریب توان نسبت به حالت پایه با مقدار ۰/۲۹۵ است. بنا بر این مشخص شد که با افزودن سطوح برآ افزای مناسب به پره توربین بادی می‌توان تا ۴۱ درصد افزایش در ضریب توان پره در یک نسبت سرعت خاص ایجاد کرد. در عین اینکه کمترین تغییرات در هندسه پره و خط تولید ایجاد و فقط سطح جدید به

علائم یونانی

| | |
|---------------------|-----------|
| سرعت زاویه‌ای پره | Ω |
| نسبت سرعت پره | Λ |
| سرعت زاویه‌ای جریان | Ω |
| زاویه حمله ایرفویل | α |
| زاویه پیچش پره | Θ |
| زاویه جریان | Φ |

منابع

- [1] M.R. Mirghaed, R. Roshandel, Site specific optimization of wind turbines energy cost: iterative approach, *Energy Conversion and Management*, 73 (2013) 167-175.
- [2] T.Ashuri, M.Zaaijer, Multidisciplinary design optimization of offshore wind turbines for minimum levelized cost of energy, *Renewable Energy*, 68 (2014) 893-905.
- [3] M.Azizi, A.Jahangirian, Multi-site aerodynamic optimization of wind turbine blades for maximum annual energy production in East Iran, *Journal of Energy Science & Engineering*, 8 (2020) 169-2186.
- [4] Z.J. Chen, K.A. Stol, B.R. Mace, Wind turbine blade optimization with individual pitch and trailing edge flap control, *Renewable energy*, 103 (2017) 750-765.
- [5] Q. Ai, P.M. Weaver, T.K. Barlas, A.S. Olsen, H.A. Madsen, T.L. Andersen, Field testing of morphing flaps on a wind turbine blade using an outdoor rotating rig, *Renewable Energy*, 133 (2019) 53-65.
- [6] K.Michael, McWilliam, K.Thanasis, A.Helge, Madsen, F. Zahle, Aero-elastic wind turbine design with active flaps for AEP maximization, *Wind Energy Science* 3, 1 (2018) 231-241.
- [7] A. Saenz-Aguirre, S. Fernandez-Resines, I. Aramendia, U. Fernandez-Gamiz, E. Zulueta, J.M. Lopez-Guede, J. Sancho, 5 MW Wind Turbine Annual Energy Production Improvement by Flow Control Devices, *Proceedings*, 2(23) (2018) 1452.

- با بررسی انجام شده مشخص شد که سطوح برآ افزا در صورت اعمال در ناحیه میانی پره توربین (مقاطع ۵۰ الی ۸۵ درصد شعاع پره) عملکرد بهتری دارند.

- برای مقطع پره توربین باد مبنا که ایرفویل کلارک-وای است سطح برآ افزای منطبق با خط انحنای طول ۱۰ الی ۱۵ درصد وتر عملکرد مناسبی داشته و ضریب توان پره توربین را از ۰/۲۹ به ۰/۴۱ افزایش داده که موجب ۴۱ درصد رشد در توان تولیدی توربین در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه می‌شود. بنابراین می‌توان اذعان نمود که استفاده از سطوح برآ افزا در صورت طراحی و چیدمان مناسب باعث بهبود عملکرد توربین باد می‌شود و این روش به علت اینکه نیاز به ایجاد تغییرات اساسی در خط تولید پره‌ها ندارد از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه است. همچنین از آنجایی که این سطوح می‌توانند متحرک باشند برای هر محیط می‌توان یک چینش خاص را پیشنهاد داد که کاهش هزینه تولید انرژی را به همراه خواهد داشت.

- در نهایت نوآوری‌های این پژوهش را می‌توان استفاده از یک مدل سطح برآ افزای جدید برای افزایش توان و همچنین ابداع یک اصلاح در حل المان مومنتوم پره بیان نمود که نتایج دقیق‌تری با این حل حاصل می‌شود.

۶- فهرست علائم

علائم لاتین

| | |
|--------------------------------|-------|
| ضریب توان روتور | C_p |
| سرعت جریان باد | U |
| مساحت جاروب شده توسط پره‌ها | A |
| شعاع پره | R |
| طول وتر پره | C |
| تعداد پره‌ها | B |
| ضریب لیفت پره | C_l |
| ضریب پسای پره | C_d |
| نیروی وارده به شفت توسط روتور | F |
| گشتاور وارده به شفت توسط روتور | Q |

- [12] E. Branlard, Wind Turbine Aerodynamics and Vorticity-Based Methods, Springer., 2020.
- [13] S. Ghosh, M. Muste, F. Stern, Measurement of Pressure Distribution and Forces Acting on an Airfoil, Laboratory Experiment 3 57 (2004) 20.
- [14] A.S.PEÑA, Experimental Assessment of the Effectiveness of Active Flaps to Reduce the Blade Root Bending Moment of Wind Turbine Blades, KTH Royal Institute Of Technology, STOCKHOLM, SWEDEN, 2016.
- [8] Y.Zhang, V.Ramdoss, Z.Saleem, X. Wang, G.Schepers, C. Ferreira, Effects of root Gurney flaps on the aerodynamic performance of a horizontal axis wind turbine, Energy, 187 (2019).
- [9] B. masood, technical design of wind turbine power station for iran (in persian), Amirkabir university of technology, tehran, Iran, 1996.
- [10] J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers, Wind energy explained: theory, design and application, John Wiley & Sons, 2010.
- [11] C. Hansen, NWTC Design Codes: AirfoilPrep, 2012.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Alizadeh, A. Jahangirian, Design and Optimum arrangement of a Blade Flap for Improving the Power Generation of a Horizontal Axis Wind Turbine, Amirkabir J. Mech Eng., 54(5) (2022) 1007-1028.

DOI: 10.22060/mej.2022.20452.7233



