مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1395، دوره 16، شماره 13، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص 222-225

مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی تهویه‌مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی
بیرجند، دانشگاه بیرجند، 6 و 7 مهر 1395

مهندسی مکانیک مدرس
mme.modares.ac.ir

بهینه‌سازی یک ایرفویل به‌کار رفته در قسمت نوک تیغه‌های توربین باد به‌منظور افزایش نسبت ضرایب لیفت به درگ

پیمان اسد ایوبی[1*]، محمود ابراهیمی[2]

1- دانشجوی مقطع دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
*تهران، صندوق پستی 1469669191، p.a_ayoubi@iauctb.ac.ir

چکیده

یکی از روش‌های بهینه‌سازی توان تولیدی توربین‌های باد، بهینه‌سازی تیغه روتور توربین باد می‌باشد، به این صورت که با افزایش نسبت ضریب برآ به ضریب پسا، C_l/C_d، در ایرفویل‌های به کار رفته در ساخت سطح مقطع تیغه روتور توربین باد، می‌توان عملکرد تیغه روتور را بهینه‌سازی نمود و نهایتاً توان تولیدی توربین را افزایش داد. ایرفویل‌های مورد استفاده در ساخت قسمت نوک تیغه روتور، از ضخامت کمتری در مقایسه با ایرفویل‌های استفاده شده در ساخت سایر بخش‌های تیغه برخوردار می‌باشند تا قسمت نوک تیغه وزن کمتری داشته باشد و گشتاور کمتری به قسمت هاب توربین وارد شود. در پژوهش انجام شده با بررسی 150 نوع از ایرفویل‌های به کار رفته در ساخت تیغه روتور توربین‌های باد، آن دسته از ایرفویل‌هایی که ضخامت لازم به منظور استفاده در ساخت قسمت نوک تیغه روتور را داشته‌اند، انتخاب شده و پس از تحلیل آیرودینامیکی، ایرفویلی که بیشترین C_l/C_d را دارا بود جهت بهینه‌سازی انتخاب گردید. در مرحله بعدی هندسه ایرفویل انتخاب شده در نرم‌افزار اکسفلر مورد بهینه‌سازی قرار گرفت تا C_l/C_d در آن افزایش یابد. پس از بهینه‌سازی هندسه ایرفویل مورد نظر، بیشترین مقدار C_l/C_d در ایرفویل بهینه به نسبت ایرفویل اولیه 7.82% معادل مقدار مطلق 11.78، افزایش یافته است.

کلید واژگان: توربین باد، بهینه‌سازی، تیغه روتور، ایرفویل

Optimization of an airfoil used in the tip of wind turbine blades for maximizing its lift to drag coefficients ratio

Peyman Asad Ayoubi[1*], Mahmoud Ebrahimi[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 1469669191, Tehran,Iran, p.a_ayoubi@iauctb.ac.ir

ABSTRACT

One method to maximize the generated power of wind turbines is to improve the performance of the rotors' blade. This is possible through optimizing their geometry design by maximizing the ratio of the lift to drag coefficients C_l/C_d of the airfoils. The airfoils used in the tip section of the rotor blade are thinner compared with other sections of the blade, which makes the tip lighter, thus inducing less amounts of momentum to the turbine hub. In the present study, after examination of 150 airfoils, those that met the criteria for the thickness of the blade tips were chosen. Then, using appropriate aerodynamic analyses, the airfoil featuring the highest value of C_l/C_d was selected for further geometrical design optimization. The geometrical design of the selected airfoil was optimized using Xflr software, so that the value of C_l/(C_d)parameter was maximized. For the optimized blade geometry, the maximum increase of about 7.8 % in C_l/C_d parameter was noticed compared to that of initial blade.

Keywords: Wind turbine, geometrical design optimization, rotor's blade, airfoil

1- مقدمه

امروزه با توجه به افزایش نیاز بشر به استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی به منظور تامین انرژی مورد نیاز خود، توجه به بهره‌برداری بهینه از این منابع بیش از پیش می‌باشد. انرژی بادی یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی است که از گذشته همواره مورد توجه بشر بوده است و امروزه از توربین‌های باد در جهت بهره‌برداری از انرژی باد استفاده می‌شود. یکی از روش‌های بهینه‌سازی استفاده از منابع بادی، بهینه‌سازی توربین‌های باد و به طور دقیق‌تر، بهینه-سازی تیغه روتور توربین باد می‌تواند باشد، به این صورت که با افزایش نسبت ضریب برآ (لیفت) به ضریب پسا (درگ)، C_l/C_d ، در ایرفویل‌های به کار رفته در سطح مقطع تیغه روتور توربین باد، می‌توان عملکرد تیغه روتور را بهینه-سازی نمود و نهایتاً توان تولیدی توربین را افزایش داد.

به طور کلی در ساخت مقطع تیغه روتور توربین‌های باد از سه نوع ایرفویل با ضخامت‌های زیاد، متوسط و کم به ترتیب در قسمت‌های ریشه، میانی و نوک تیغه استفاده می‌شود. ضخامت ایرفویل به کار رفته در قسمت نوک تیغه حدود 16% تا 18% طول وتر می‌باشد و از ضخامت کمتری در مقایسه با سایر قسمت‌ها برخوردار است تا این ناحیه وزن کمتری داشته باشد و گشتاور کمتری به قسمت هاب توربین وارد کند [1]. در پژوهش انجام شده با بررسی 150 نوع از ایرفویل‌های به کار رفته در تیغه روتور توربین‌های باد، آن‌هایی که ضخامت لازم را به منظور استفاده در قسمت نوک تیغه داشته‌اند، انتخاب شده و پس از تحلیل آیرودینامیکی، ایرفویلی که بیشترین C_l/C_d را دارا بود جهت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
Please cite this article using:
P.Asad Ayoubi1, M.Ebrahimi, Optimization of an airfoil used in the tip of wind turbine blades for maximizing its lift to drag coefficients ratio, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 222-225, 2016 (in Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.39.6]

بهینه‌سازی انتخاب گردید. هندسه ایرفویل انتخاب شده در مرحله بعدی در نرم‌افزار اکسفلر مورد بهینه‌سازی قرار گرفت تا C_l/C_d در آن افزایش یابد.

2- روش تحقیق

2-1- ایرفویل

هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی ایرفویل به کار رفته در قسمت نوک تیغه توربین باد به منظور افزایش C_l/C_d در این ایرفویل می‌باشد. با بررسی 150 نوع ایرفویل به‌کار رفته در ساخت قسمت نوک تیغه، آن دسته از ایرفویل‌هایی که ضخامت آن‌ها 16% تا 18% طول وتر بود انتخاب شدند و در نرم‌افزار اکسفلر مورد تحلیل آیرودینامیکی قرار گرفتند. سپس ایرفویلی که بیشترین مقدار C_l/C_d را در زاویه حمله 0 تا 25 درجه در سرعت باد 15 متر در ثانیه، دارا بود جهت بهینه‌سازی انتخاب شد. ایرفویل انتخاب شده، AH-93-W-174 نام دارد (شکل 1) که ضخامتی برابر با 17% طول وتر داشته و مربوط به دسته ایرفویل‌های آلتهوس می‌باشد. در "شکل 2" مقدار C_l/C_d برای ایرفویل AH-93-W-174 در زاویه حمله مورد بررسی نشان داده شده است. بیشترین مقدار C_l/C_d برای ایرفویل مذکور 150.67 بوده و مربوط به زاویه حمله 9 درجه می‌باشد.

ضریب برآ (شکل 3) برای ایرفویل مورد بررسی، در زاویه حمله 11 درجه بیشترین مقدار خود را دارد و این مقدار برابر با 1.56 می باشد. در "شکل 4"، تغییرات ضریب پسا ایرفویل نشان داده شده است. بیشترین مقدار ضریب پسا در بازه زاویه حمله مورد بررسی، از زاویه 0 تا 27 درجه، مربوط به زاویه حمله 27 درجه بوده که مقدار ضریب پسا در این زاویه برابر با 0.36 می باشد و علت آن جدایش جریان در این زاویه حمله است [2].

به‌منظور استفاده از ایرفویل بهینه‌سازی شده در قسمت نوک تیغه، لازم بهینه‌سازی ایرفویل اولیه به‌گونه‌ای انجام شود که نهایتاً ضخامت ایرفویل بهینه شده تغییر نکند و در بازه 16% تا 18% طول وتر باقی بماند. با ثابت نگه‌داشتن ضخامت ایرفویل و اعمال تغییرات در هندسه قسمت بالایی ایرفویل، مشاهده شد که گرادیان سرعت و فشار هوا در این ناحیه به شدت دچار تغییر و تحول می‌شود به گونه‌ای که نسبت C_l/C_d به‌شدت کاهش یافته

Fig 1. AH-93-W-174 Airfoil

شکل 1 ایرفویل AH-93-W-174

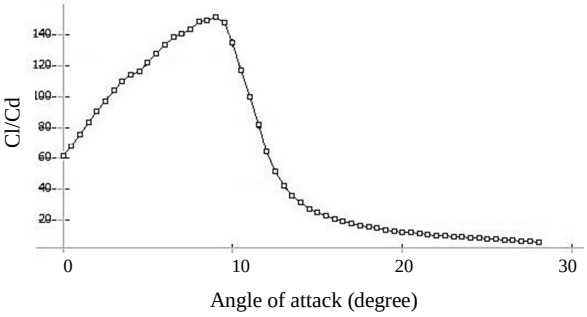

Fig 2. Lift to drag coefficients ratio changes according to angle of attack

شکل 2 تغییرات نسبت ضریب برآ به ضریب پسا برحسب زاویه حمله

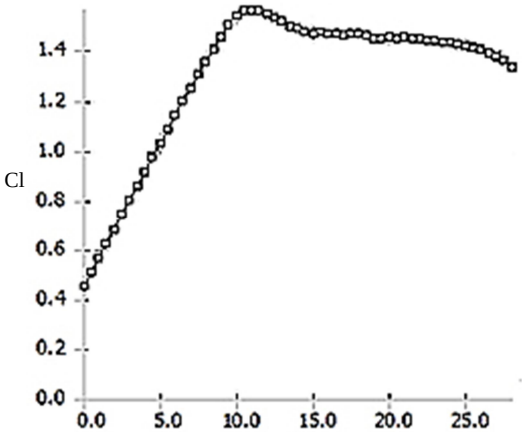

Fig 3. Lift coefficient changes according to angle of attack

شکل 3 تغییرات ضریب برآ برحسب زاویه حمله

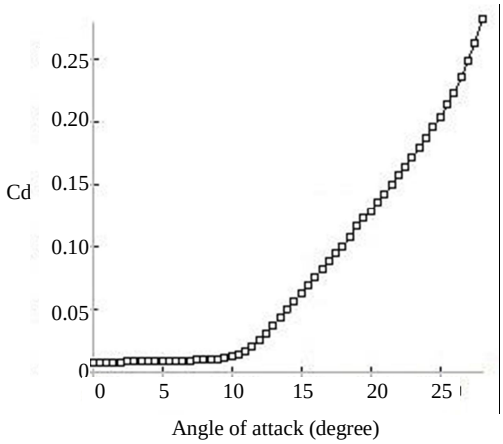

Fig 4. Drag coefficient changes according to angle of attack

شکل 4 تغییرات ضریب پسا برحسب تغییرات زاویه حمله

و ایرفویل در زاویه حمله کوچکی دچار استال می‌شود. پس هدف بر آن شد که تغییرات هندسه ایرفویل در قسمت پایینی ایرفویل اعمال گردد. به منظور بهبود هندسه در قسمت پایینی ایرفویل، لازم است تغییرات به گونه‌ای اعمال شود تا سرعت جریان هوا در این ناحیه کاهش یابد. با کاهش سرعت هوا در ناحیه پایینی ایرفویل، فشار استاتیک هوا در این قسمت افزایش یافته و در نتیجه مقدار نیروی برآ افزایش خواهد یافت.

2-2- نرم‌افزار اکسفلر[1]

تحلیل‌های آیرودینامیکی صورت گرفته و همچنین بهینه‌سازی ایرفویل اولیه در نرم‌افزار اکسفلر صورت می‌گیرد. نرم‌افزار اکسفلر نسخه پیشرفته‌تری از نرم‌افزار شناخته شده اکسفویل در تحلیل ایرفویل‌ها می‌باشد. ایجاد یک محیط گرافیکی روان برای کاربر مهمترین تفاوت اکسفلر به نسبت اکسفویل می‌باشد [3]. در طراحی معکوس اکسفلر که در پژوهش انجام شده از آن استفاده شده است، ابتدا هندسه یک ایرفویل اولیه به صورت ورودی وارد برنامه می‌شود و دیاگرام سرعت جریان هوا در نزدیکی سطح ایرفویل به ازای طول ایرفویل کشیده می‌شود. سپس کاربر تعیین می‌کند که چه سرعتی از جریان هوا و در چه فاصله‌ای از ابتدای ایرفویل مدنظر وی است و این اطلاعات را وارد برنامه می‌کند. پس از آن برنامه هندسه ایرفویل را تغییر می دهد تا کاربر به خواسته خود برسد. سپس ایرفویل جدید دوباره وارد قسمت

[1] Xflr

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.39.6]

آنالیز اکسفلر شده و بررسی می‌گردد تا نقاط ضعف آن مشخص شود. در مرحله بعد ایرفویل دوباره وارد بخش طراحی معکوس می‌شود و این روند بین بخش آنالیز و طراحی معکوس آنقدر تکرار می‌شود تا در نهایت هندسه ایرفویل مورد نظر بدست آید. با ثابت نگه داشتن ضخامت ایرفویل، به جهت بهبود هندسه ایرفویل لازم است تغییرات هندسه در قسمت پایینی ایرفویل صورت گیرد. چنانچه سرعت جریان باد در قسمت بالایی ایرفویل تغییر کند، ضخامت و دیگر مشخصات آیرودینامیکی ایرفویل به شدت دستخوش تغییر خواهند شد.

3-2- اعتبارسنجی

به منظور بررسی دقت داده‌های خروجی نرم‌افزار اکسفلر ، ایرفویل S809 که توسط ان.آر.ای.ال طراحی و ساخته شده است، در نرم‌افزار اکسفلر از نظر آیرودینامیکی مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج حاصل از تحلیل اکسفلر با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط ان.آر.ای.ال مقایسه گردید [4]. در تحلیل صورت گرفته، خطای مقادیر حاصل از نتایج تئوری و آزمایشگاهی در نقاط یکسان محاسبه گردید. ضریب فشار محلی در ایرفویل‌ها مهم ترین عامل تعیین کننده ضریب برآ به‌شمار می‌رود لذا ضریب فشار محلی برای ایرفویل S809 در طول وتر در زاویه حمله صفر درجه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در "شکل 5" مقادیر تئوری و آزمایشگاهی ضریب فشار ایرفویل S809 به نمایش درآمده است. طبق "شکل 5"، در مقدار ضریب فشار محلی در نتایج آزمایشگاهی و تئوری در ناحیه بالایی ایرفویل کمی اختلاف دیده می‌شود در حالی که برای همین نتایج در قسمت پایینی ایرفویل اختلاف قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. از آن‌جایی که هدف این پروژه تغییر هندسه قسمت پایینی ایرفویل می‌باشد لذا نتایج به‌دست آمده برای قسمت پایینی از اهمیت بیشتری برخوردار است. اختلاف داده‌ها برای ناحیه پایینی ایرفویل بسیار ناچیز بوده و مقدار مطلق کل آن برابر با 0.07 می‌باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- هندسه

با اعمال تغییراتی در هندسه ایرفویل اولیه، ایرفویل بهینه بدست آمد. "شکل 6" ایرفویل‌های اولیه و بهینه را که از قسمت وتر در زاویه حمله صفر درجه جهت نمایش و مقایسه برهم منطبق شده اند، نشان می‌دهد.

3-2- ضریب برآ

طبق نتایج به‌دست آمده که در "شکل 7" دیده می‌شود، ضریب برآ در ایرفویل بهبود یافته از زاویه حمله صفر درجه تا زاویه حمله 9.5 درجه افزایش می‌یابد تا به بیشترین مقدار خود در 9.5 درجه که برابر با 1.62 می‌باشد، برسد و پس از این نقطه، ضریب برآ کاهش می‌یابد تا اینکه ایرفویل در زاویه حمله 28 درجه دچار استال می‌شود.

به طور کلی ضریب برآ در ایرفویل جدید به نسبت ایرفویل اولیه، در زاویه 9.5 درجه، به میزان 7.55% افزایش داشته است. مقدار مطلق افزایش ضریب برآ در ایرفویل جدید به نسبت ایرفویل اولیه در زاویه حمله از بازه 22 تا 30 درجه، افزایش بسیار کمی داشته است و از این رو نمودار برآ مربوط به هر دو ایرفویل در این بازه تقریبا برهم منطبق می‌باشد.

3-3- ضریب پسا

مقدار مطلق تغییرات ضریب پسا در ایرفویل بهینه به نسبت ایرفویل اولیه، بر خلاف ضریب برآ، تغییرات بسیار اندکی داشته است. مقدار ضریب پسا در این ایرفویل‌ها تقریبا برابر بوده و این مقادیر در شکل 7 تقریبا برهم منطبق می‌باشند. در واقع هدف از بهبود هندسه یک ایرفویل، افزایش نسبت ضریب برآ به ضریب پسا است، به همین دلیل افزایش ضریب برآ در ایرفویل جدید از یک جهت و ثابت ماندن ضریب پسا از جهت دیگر، سبب شده است تا نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در ایرفویل بهینه افزایش یابد.

ضریب پسا در ایرفویل جدید، از زاویه 0 تا 11 درجه تقریبا ثابت است. سپس ضریب پسا از زاویه 11 تا 28 درجه، به طور خطی با شیب بسیار کمی افزایش می‌یابد تا این‌که در زاویه 28 درجه ایرفویل دچار استال می‌شود. مقدار ضریب پسا پس از زاویه 28 تا 30 درجه مقدار تقریبا ثابت 0.36 را دارد.

3-4- نسبت ضریب برآ به ضریب پسا

مهمترین هدف از بهبود هندسه یک ایرفویل، افزایش بیشترین مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا و یا همان C_l/C_d می‌باشد. همان‌طور که در "شکل 8" می‌توان دید، مقدار C_l/C_d ، در ایرفویل اولیه در زوایای حمله کمتر از

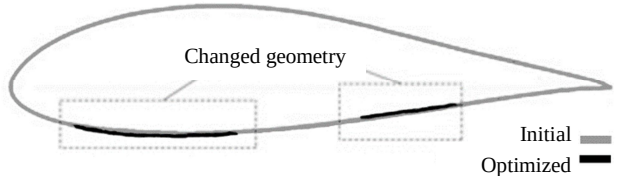

Fig 6. Comparison of the Geometry changes of the initial and optimized airfoils

شکل 6 مقایسه تغییرات هندسی در ایرفویل اولیه و بهبود یافته

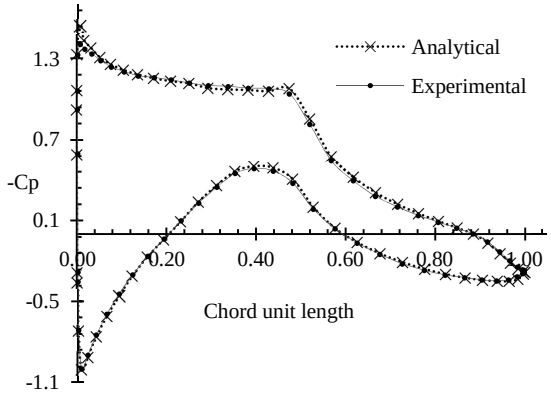

Fig 5. Local pressure coefficient on upper and lower surfaces of the airfoil according to unit length of the chord

شکل 5 ضریب فشار محلی بر سطوح بالایی و پایینی ایرفویل برحسب طول وتر

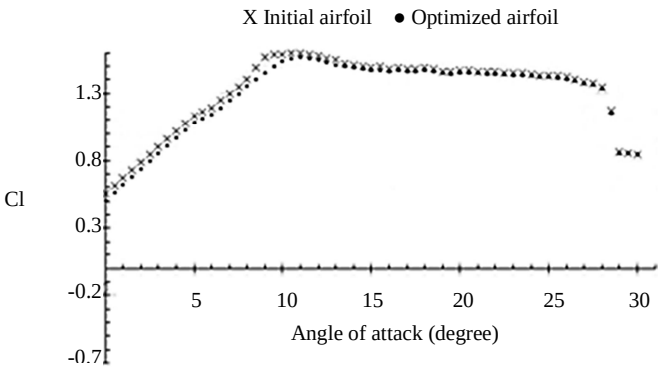

Fig 7. Lift coefficient of the initial and optimized airfoils according to the angle of attack from 0 to 30 degrees

شکل 7 ضریب برآ ایرفویل اولیه و بهبود یافته برحسب زوایای حمله 0 تا 30 درجه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.39.6]

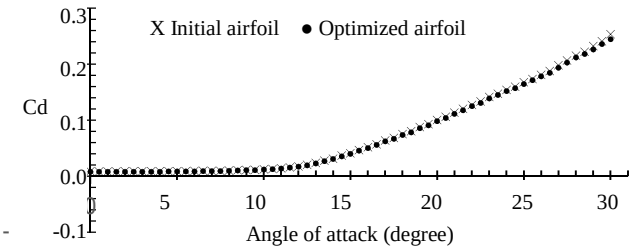

Fig 8. Drag coefficient of the initial and optimized airfoils according to the angle of attack from 0 to 30 degrees

شکل 8 ضریب پسا ایرفویل اولیه و بهبود یافته برحسب زوایای حمله 0 تا 30 درجه

13 درجه، کمتر از مقدار آن در ایرفویل جدید می‌باشد و این روند تا زاویه حمله 13.5 درجه ادامه دارد تا اینکه از این زاویه به بعد، مقدار C_l/C_d در هر دو ایرفویل تقریبا برابر می‌باشد. حداکثر مقدار C_l/C_d در ایرفویل جدید و ایرفویل اولیه مربوط به زاویه حمله 9 درجه می‌باشد و مقدار آن برای ایرفویل های ذکر شده به ترتیب 150.67 و 162.45 است. در زاویه حمله 9 درجه حداکثر درصد افزایش C_l/C_d، 7.82% و برابر مقدار مطلق، 11.78 می باشد.

3-5- ضریب فشار محلی

مقدار ضریب فشار محلی (C_p) در راستای طول وتر برای ایرفویل‌های اولیه و ایرفویل بهینه شده در "شکل 9" در زاویه حمله 0 درجه و سرعت باد 15 متر در ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می رود مقدار C_p در قسمت بالایی ایرفویل بهینه شده در مقایسه با ایرفویل اولیه تغییر خاصی نداشته است، زیرا هندسه قسمت بالایی در هر دو ایرفویل یکسان است. نتایج بدست آمده برای قسمت پایینی ایرفویل از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا

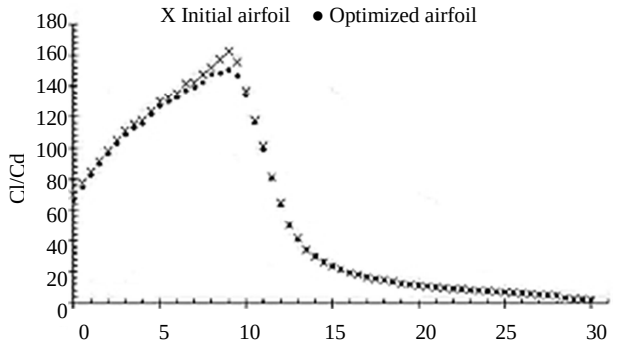

Fig 9. Lift to drag coefficients ratio of the initial and optimized airfoils according to the angle of attack from 0 to 30 degrees

شکل 9 نسبت ضریب برآ به ضریب پسا ایرفویل اولیه و بهبود یافته برحسب زوایای حمله 0 تا 30 درجه

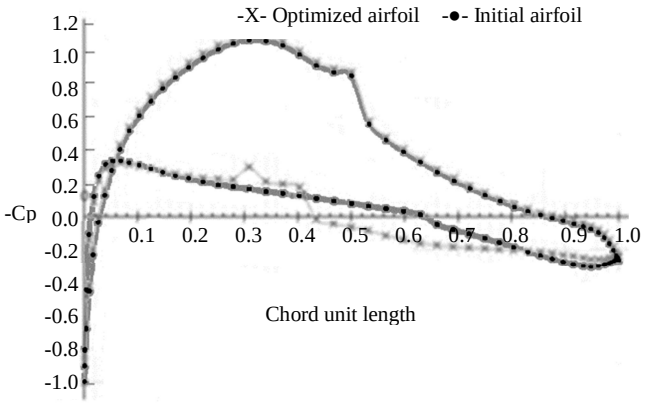

Fig 10. Local pressure coefficient changes on upper and lower surfaces of the initial and optimized airfoils at 0 degree angle of attack

شکل 10 تغییرات ضریب فشار محلی بر روی سطوح بالایی و پایینی ایرفویل اولیه و بهینه یافته در زاویه حمله 0 درجه

تغییرات هندسه ایرفویل در قسمت پایینی اعمال شده است. همان‌طور که در بخش اعتبارسنجی بیان گردید نرم‌افزار اکسفلر توانایی و دقت بالایی در محاسبه ضریب فشار محلی در قسمت پایینی ایرفویل دارد.

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش صورت گرفته، به منظور بهبود نسبت ضریب برآ به ضریب پسا، C_l/C_d، در یک ایرفویل به‌کار رفته در ساخت قسمت نوک تیغه روتور توربین‌های باد، با بررسی 150 نوع ایرفویل به کار رفته در ساخت تیغه توربین‌های باد، ایرفویلی که بیشترین C_l/C_d را داشته و مناسب جهت استفاده در نوک تیغه بوده است، جهت تغییر هندسه به‌منظور بهینه‌سازی انتخاب گشت. سپس با بهینه‌سازی هندسه ایرفویل مورد نظر، بیشترین مقدار C_l/C_d در ایرفویل بهینه به نسبت ایرفویل اولیه 7.82% معادل مقدار مطلق 11.78، افزایش داشته است.

5- تقدیر و تشکر

با تشکر از دکتر مهران اسدایوبی که در نگارش این مقاله یاری نمودند

6- مراجع

[1] *NREL, National Renewable Energy Laboratory*, Accessed on 8 August 2015; http://www.nrel.gov

[2] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*: Earthscan, 2008 .

[3] Xflr Manual and Guidelines, 2015 .

[4] D. M. Somers, *Design and Experirltental Results for the S809 Airfoil*, NREL, State College, Pennsylvania, 1997 .

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.39.6]