

بررسی عددی طراحی بهینه و ساخت میکروتوربین بادی ساونیوس

سعید گلابی^{۱*}، سید ابوالفضل حسینی^۲، مریم السادات اخوان حجازی^۳، حمید ضامنی^۴

۱- دانشیار، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، golabi-s@kashanu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان

۳- استادیار، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان

چکیده

در میان انرژی‌های نوظهور، انرژی بادی به دلیل هزینه‌های پایین تر تولید انرژی، راندمان تولید انرژی بالا، دسترسی آسان و سازگاری با محیط‌زیست از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این مقاله بررسی طراحی بهینه پره توربین بادی ساونیوس ماریچ، تعیین نیروهای برا، پسا و ضریب توان بهینه و رویکرد اقتصادی نصب میکروتوربین بادی ساونیوس ماریچ در مناطق مسکونی و شهری که همه در راستای بهینه‌سازی و افزایش بازدهی بیشینه در طراحی جدید بررسی شده است. بهینه‌سازی و طراحی مقطع پره در سه پروفیل با تابع درجه ۳، ۴ و ۵ با استفاده از کد PSO در متلب و با شبیه‌سازی عددی با روش CFD در نرم‌افزار کامسول با مدل توربولانسی k-w صورت گرفته است. با تحلیل و بررسی شبیه‌سازی‌های سه بعدی، پره بهینه با پروفیل تابع درجه ۵ بهترین عملکرد را نشان داده است که دارای حداکثر ضریب توان ۰/۳۴ می باشد در صورتی که توربین ساونیوس معمولی دارای حداکثر ضریب توان ۰/۲۳ می باشد. توربین پیشنهادی در این مقاله توانایی تولید توان ۶۰ وات را دارد که در مقایسه با نمونه های موجود در بازار با مشخصات مشابه توان تولیدی بیشتری است.

کلمات کلیدی: ساونیوس، آیرودینامیک پره، پروفیل پره، الگوریتم ازدحام ذرات، شبیه سازی عددی

۱*

۲

Numerical study of optimal design and construction of savonius wind microturbine

Sa'id Golabi^{*1}, Abolfazl Hosseini², Maryam Sadat Akhavan Hejazi³, Hamid Zameni⁴

*1- Associate Professor, Energy Research Institute, University of Kashan, Kashan, Iran

2- Masters Student, Energy Research Institute, University of Kashan, Kashan

3- Assistant Professor, Energy Research Institute, University of Kashan, Kashan

4- Masters Student, Energy Research Institute, University of Kashan, Kashan

Abstract

Among new emerging energies, wind energy has a special place due to lower energy costs, high energy efficiency, easy access and environmental compatibility. The purpose of this paper is to investigate the optimal design of the blade of spiral Savonius wind turbine, the determination of the lift and drag forces, and the optimal power factor and the economic approach of installing the spiral Savonius wind turbine in urban and residential areas, all of which have been investigated in order to optimize and maximize the maximum return on the new design. Optimization and design of the blade section in three profiles has been done with the grade 3, 4, and 5 functions using the PSO code in MATLAB and numerically simulating by CFD method in COMSOL software with k-w turbulence model. By analyzing and investigating the three-dimensional simulations, the optimum blade with a order-5 function profile has shown the best performance that has a maximum power coefficient of 0.34, while the ordinary Savonius turbine has a maximum power coefficient of 0.23. The proposed turbine in this article is capable of generating 60 watts of power, which is more productive than the market examples with similar specifications.

Key words: Savonius, blade profile, optimization, particle swarm algorithm, numerical simulating

*1

۲

۱ – مقدمه



شکل (۱-۱) آسیاب های بادی اولیه [۳]

اگرچه طراحی های مختلفی برای توربین بادی موجود است ولی به طور عمده به دو دسته کلی بر اساس جهت چرخش تقسیم بندی می شوند: محور افقی^۱ و محور قائم^۲

جریان هوا بر روی هر سطحی دو نوع نیروی آیرودینامیکی با نام های پسا و برا به وجود می آورد که نیروی پسا در جهت جریان باد است و نیروی برا عمود بر جریان باد است. یکی از این نیروها یا هر دو می توانند نیروی مورد نیاز برای چرخش پره های توربین را تأمین نمایند.

توربین های بادی محور افقی دارای محور چرخش افقی هستند در حالی که توربین های بادی محور قائم دارای محور چرخش عمودی هستند که در شکل (۱-۲) [۴] نشان داده شده است.

استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به دلیل پایان ناپذیر بودن و همچنین داشتن آلودگی زیست محیطی کمتر، در مقایسه با انرژی فسیلی جایگزین مناسبی خواهند بود. از جمله این منابع، انرژی باد است که از آن برای تولید انرژی الکتریسیته استفاده می شود. پیش بینی می شود که تا سال ۲۰۵۰ دست کم ۱۲٪ از انرژی الکتریکی در جهان از باد گرفته می شود. بر اساس گزارش سازمان جهانی انرژی باد، از کل ظرفیت نصب شده در جهان در راستای تولید انرژی برق بادی تا سال ۲۰۱۵ میلادی حدود ۲۵٪ آن در آسیا خواهد بود [۱]؛ و این در حالی است که در بین قاره های مختلف تا سال ۲۰۱۰، اروپا دارای بیشترین ظرفیت (حدود ۴۸٪) است [۲].

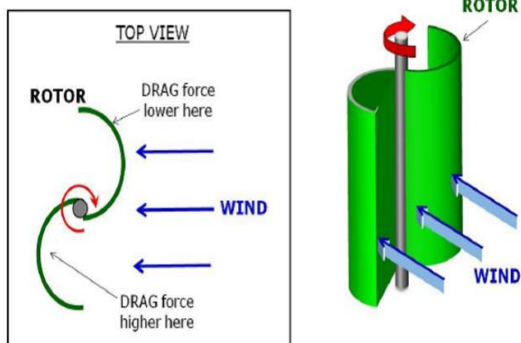
با توجه به تمایل جهانی برای کاهش گازهای گلخانه ای و تأمین انرژی پایدار که پاسخگوی نیاز روزافزون بشر به انواع انرژی است، تلاش های بسیاری در جهت توسعه انرژی های تجدیدپذیر در دست انجام است. انرژی بادی به عنوان یکی از انواع انرژی های تجدیدپذیر دارای پیشینه ای کهن بوده که در چند دهه اخیر به منظور ساخت نیروگاه های بادی و استفاده در مناطق شهری رونق چشمگیری داشته است. این امر موجب شده تا مطالعات زیادی بر روی انواع توربین های بادی انجام شود.

اولین استفاده شناخته شده از انرژی باد مربوط به کاربرد در قایق های بادی است و این فناوری نقش بسیار مهمی در توسعه آسیاب های بادی دارد. ملوانان باستانی نیروی برا را می شناختند و روزانه از آن استفاده می کردند در صورتی که هیچ توضیح علمی برای آن نداشتند. اولین آسیاب های بادی برای آسیاب کردن غلات و پمپاژ آب به کار گرفته می شدند (شکل ۱-۱) [۳].

^۱-Horizontal Axis Wind Turbine(HAWT)

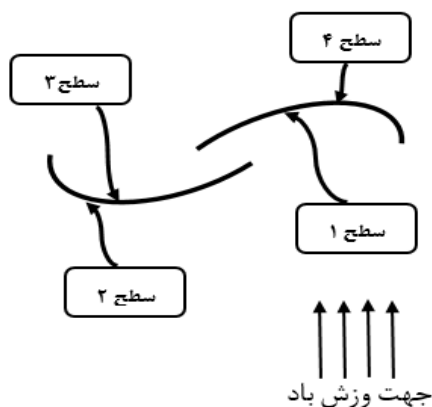
^۲-Vertical Axis Wind Turbine(VAWT)

توربین بادی ساونیوس و مکانیزم عملکرد آن را نمایش می دهد [۵].



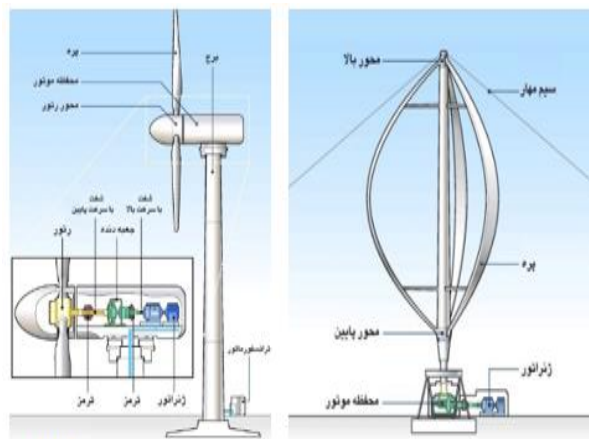
شکل (۳-۱) مکانیزم عملکرد توربین ساونیوس [۵]

در توربین‌هایی که تنها از نیروی پسا برای تولید توان موجود در باد استفاده می‌کنند، افزایش ضریب نیروی پسا منجر به بهبود بازده توربین شده و از این رو این امر یکی از عوامل مهم در انتخاب پره توربین‌های نوع پسا به حساب می‌آید. در شکل (۴-۱) سطوح پره توربین ساونیوس نام گذاری شده است.



شکل (۴-۱) نام گذاری سطوح پره ساونیوس

هنگامی که باد به پره‌های روتور ساونیوس می‌وزد نخست با ایجاد فشار بر سطح ۱ و ۲ دنیروی F_1 و F_2 را ایجاد می‌کند، شکل (۵-۱)، که در این میان نیروی F_1 از F_2 بزرگتر بوده و



شکل (۲-۱) نمونه‌هایی از توربین بادی محور افقی و قائم [۴]

توربین‌های بادی با محور قائم نظیر ساونیوس^۱، داریوس^۲ و H روتور^۳ از دو بخش اصلی تشکیل شده‌اند. یک میله اصلی که رو به باد قرار می‌گیرد و پره‌های قائم که عمود بر جهت باد کار گذاشته می‌شوند. این توربین شامل قطعاتی با اشکال گوناگون بوده که باد را در خود جمع کرده و باعث چرخش محور اصلی می‌گردد. ساخت این توربین‌ها بسیار ساده است و می‌توانند در فاصله نزدیک به زمین نصب شوند.

توربین‌های بادی محور قائم در مقایسه با توربین بادی محور افقی ارزان تر، دارای امنیت بیشتر در ساخت و نگهداری و سروصدای کمتری می‌باشند و از سوی دیگر مهم‌ترین عیب این توربین‌ها بازده پایین آن‌ها است.

۱-۱ مکانیزم توربین بادی ساونیوس

روتور ساونیوس یک نمونه بسیار ساده از آسیاب‌های بادی بر پایه نیروی پسا است. این توربین‌ها به حرکت درمی‌آیند چرا که نیروی پسا در ناحیه باز و مقعر این روتورها بسیار بزرگ‌تر و بیشتر از قسمت بسته و محدب آن‌ها است. در این توربین‌ها اختلاف نیروی درگ در دو پره مقعر و محدب به‌عنوان نیروی محرک باعث چرخش پره‌ها می‌شود. شکل (۳-۱) شماتیک یک

3 -H-Rotor

1 -Savonius
2 -Darriues

آفریقا بررسی و بیان کردند که از لحاظ آیرودینامیکی روتور ساونبوس قابل رقابت با توربین‌های محور افقی و همچنین ساختار ساده و تکنولوژی مورد نیاز برای ساخت نسبت به توربین‌های دیگر دارای پیچیدگی کمتری است [۸].

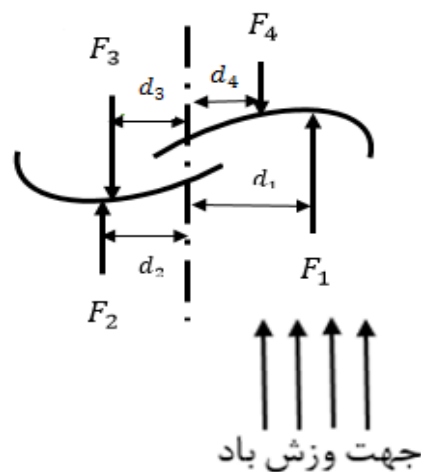
ماهانتا^۶ و همکاران (۲۰۰۳) عملکرد توربین‌های بادی ساونبوس را با پره مارپیچ بامبو مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با ساخت و بررسی تیغه پیچ‌خورده از نوار بامبو نشان دادند که در زاویه ۱۸/۴ درجه به دلیل سرعت چرخش بالاتر از انرژی باد استفاده بیشتری می‌شود [۹].

منت^۷ و بورابا^۸ (۲۰۰۴) با بررسی رفتار آیرودینامیکی پره ساونبوس برای افزایش بازدهی آن مدلی را پیشنهاد کردند که در توربین ساونبوس ارتفاع پره دو برابر قطر آن، نسبت هم‌پوشانی اولیه بین ۰/۱۵ الی ۰/۳ و فاصله هم‌پوشانی ثانویه برابر صفر در نظر گرفته شود [۱۰].

یرابو^۹ (۲۰۰۷) ویژگی‌های توان باد بر روتور ساونبوس را با استفاده از تونل باد بررسی نمود. این مطالعه به منظور بهبود و تنظیم توان خروجی روتور ساونبوس با سرعت‌های مختلف باد انجام شده است و طبق نتایج آن ماکزیمم سرعت چرخشی در محدوده $0.3 \leq \lambda \leq 0.7$ رخ می‌دهد [۱۱].

استنکوویچ^{۱۰} (۲۰۰۹) بیان می‌کند که نصب توربین‌های بادی کوچک بر روی ساختمان‌ها یکی از روش‌های کم‌هزینه و با پتانسیل بالا برای استفاده وسیع و معقول از منابع انرژی تجدید پذیر است [۱۲].

در نتیجه گشتاوری در خلاف جهت عقربه‌های ساعت ایجاد می‌کند که منجر به چرخش روتور حول محورش می‌شود. پس از آن به دلیل فرم سطح بخشی از هوا به سوی سطح ۳ منحرف شده و بر آن می‌وزد و بدین ترتیب نیروی F_3 را تولید می‌کند. نیروی F_4 در اثر مقاومت هوای ساکن در پشت پره روتور ایجاد می‌شود.



شکل (۵-۱) دیاگرام نیروهای اصلی وارد بر پره توربین ساونبوس

تاکنون محققین زیادی درباره ترکیب پره‌های ساونبوس مطالعه نموده‌اند. نتایج کار یوشیاما^۱ و ناگایی^۲ (۱۹۸۸) نشان می‌دهد که توربین ساونبوس با دو پره نیم استوانه در فاصله هم‌پوشانی ۲۰٪ الی ۳۰٪ دارای عملکرد بهینه است [۶].

مطالعات بنش^۳ (۱۹۹۵) نشان می‌دهد که اصلاح راندمان توربین ساونبوس مربوط به نیروی پیشران حاصل از باد است [۷].

راباه^۴ و اسوا^۵ (۱۹۹۶) بهبود هندسه و بازدهی روتور ساونبوس را با استفاده از یک سری آزمایش‌ها تونل باد در شرق

6 -Mahanta
7 -Menet
8 -Bourabaa
9 -Irabu
10 -Stankovic

1 -Ushiyama
2- Nagai
3-Benesh
4 -Rabah
5 -Osawa

دوت^۶ (۲۰۱۵) به طراحی و آنالیز ساختمان، طراحی، مواد به کاررفته، دینامیک و نوع ژنراتور در توربین‌های بادی ساوننیوس کوچک پرداخته است و طبق نتایج آن با استفاده از مواد غیرخورنده در هر آب و هوایی و قرار دادن توربین در ارتفاع ۸ تا ۱۰ متر و ترکیب ژنراتور و دینام می توان راندمان خروجی را افزایش داد [۱۸].

دریس^۷ و همکاران (۲۰۱۵) با تحقیقات تجربی به بررسی نسبت های همپوشانی خارجی در سرعت های باد ۸/۸ ، ۹/۹۵ ، ۱۱/۱۵ ، ۱۲/۲۵ بر عملکرد روتور بادی محور عمودی ساوننیوس پرداخته اند و طبق نتایج آنها بیشترین ضریب توان در سرعت باد ۸،۸ و نسبت سرعت نوک ۰/۲۵ برابر ۰/۱۱ بدست می‌آید [۱۹].

تیان و همکاران (۲۰۱۷) با ارائه یک روش بهینه سازی به بررسی روتور ساوننیوس اصلاح شده با قسمت های محدب و مقعر متفاوت برای به حداکثر رساندن بهره وری انرژی پرداخته اند که دوطرف پره به صورت نیم بیضی می باشند. طبق نتایج بدست آمده حداکثر ضریب توان متوسط ۰/۲۵۸ می باشد که ۴/۴۱٪ بالاتر از طراحی معمولی روتور ساوننیوس است [۲۰].

ژائو^۱ و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی عددی ساختار روتور ساوننیوس حلزونی شکل، هندسه آن را بهینه نمودند که طبق نتایج آنها بیشترین ضریب توان ۰/۲۱ در نسبت همپوشانی ۰/۱۹، و نسبت منظری ۶ بدست می‌آید [۱۳].

بویس^۲ (۲۰۱۰) به بررسی جریان ناپایا بر روی میکرو توربین‌های بادی محور عمودی ساوننیوس پرداخته و به این نتیجه رسیده که بهترین کارایی توربین ۳۲٪ در $\lambda = 0/4$ به دست می‌آید [۱۴].

پاتیل^۳ (۲۰۱۱) با انجام مطالعات موردی بر روی میکرو توربین‌های بادی ساوننیوس به این نتیجه رسید که توربین ساوننیوس دو پره ای دارای بازدهی بالاتری نسبت به توربین‌های سه پره ای از این نوع دارد [۱۵].

عبدلکدیر^۴ و همکاران (۲۰۱۲) با مطالعه تجربی و عددی بر روی توربین بادی ساوننیوس نوع کوچک به بررسی وضعیت قرارگیری پره‌ها در مقابل باد پرداختند و یک توربین بادی محور عمودی را در سه هندسه مختلف برای بهبود عملکرد مورد بررسی قرار گرفت. دو توربین بادی شکل اولیه (ساخته شده از فولاد و مقوای نازک) مورد مطالعه قرار گرفت. برای شکل اولیه فولاد، پیکربندی با هواکش کامل نسبت به پیکربندی دارای اندکی هواکش و بدون هواکش دارای کمترین کارایی است [۱۶].

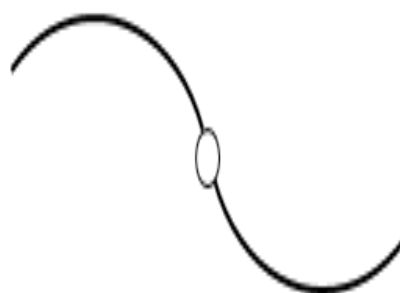
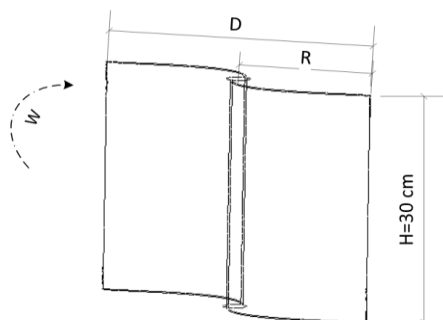
حمودا^۵ (۲۰۱۳) امکان سنجی احداث نیروگاه بادی در قاهره را مورد بررسی قرارداد و تأکید نموده که علی‌رغم ضعف شهر قاهره به لحاظ برخورداری از انرژی باد، احداث چنین واحدی به‌ویژه برای سرمایه‌گذارانی که برای تأمین برق خارج از شبکه سراسری برق مصر تأکید دارند، مفید خواهد بود [۱۷].

5 -Hamouda
6 -Dote
7-Driss

1 -Zhao
2 -Bois
3 -Patil
4 -Abdulkadir

۲- شکل و آیرودینامیک هندسه

۱-۲ هندسه مورد بررسی



شکل (۱-۲) پره ساونویوس

در هندسه مورد بررسی نشان داده شده در شکل ۱-۲ از توابع درجه ۳، ۴ و ۵ برای بهینه سازی پروفیل پره ساونویوس استفاده شده، و هر کدام به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته شده است.

شکل (۲-۲) شماتیکی سه بعدی از توربین ساونویوس مورد بررسی

۲-۲ ضرایب عملکرد و نیروهای آیرودینامیکی

بازده یک توربین بادی عبارت است از نسبت انرژی جنبشی که پرها از باد می‌گیرند به انرژی جنبشی کل باد که از مقابل پرها عبور می‌کند که اغلب این کمیت ضریب توان C_p نامیده می‌شود. ضریب توان توربین بستگی به نسبت $a = \frac{V_2}{V_1}$ نسبت سرعت باد خروجی از توربین به باد ورودی به توربین دارد و بنا به محاسبات بتز از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۱]:

$$C_p = \frac{1}{2}(1 - a^2)(1 + a) \quad (۴-۲)$$

نیروی برا (L)، یکی از اجزا نیروی وارد بر پره از سوی جریان باد ورودی محسوب می‌شود. جهت این نیرو عمود بر

معادلات مربوط به توابع درجه ۳، ۴ و ۵ به صورت

زیر می‌باشد:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (۱-۲)$$

$$y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (۲-۲)$$

$$y = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f \quad (۳-۲)$$

شکل (۲-۲) شماتیکی از توربین ساونویوس مورد

بررسی، همراه با پارامترهای کلیدی را نشان می‌دهد. که در آن H ارتفاع روتور با مقدار ۳۰ cm، سرعت زاویه ای ω ، نسبت ابعاد (H/D) و پره های توربین در اطراف مرکز خودشان با قطر D دوران می‌کنند.

شده است. هر عضو در این گروه توسط بردار سرعت و بردار موقعیت در فضای جستجو تعریف می‌گردد. در هر تکرار زمانی، موقعیت ذرات با توجه به بردار سرعت فعلی، بهترین موقعیت یافت شده توسط آن ذره و بهترین موقعیت یافت شده توسط بهترین ذره موجود در گروه، به‌روزرسانی می‌گردد.

برای بهینه نمودن عملکرد پره ساونویس تابع هدف را طول خط مینیمم هر پره در نظر گرفته شد. بدین منظور با استفاده از کامسول ضرایب معادله فوق و شعاع میله وسط را بدست آمد. قید اصلی این مسئله گشتاور بر واحد طول پره $(50 \text{ N.m}/100 \text{ mm})$ است. قید گشتاور لازم است با رعایت بیشتر بودن میانگین گشتاور در یک دور کامل بررسی شود. گشتاور وارد بر توربین با استفاده از نیروهای برا و پسا بهینه نیز بررسی می‌شود و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$T = D \cdot R_e - L \cdot R_e \quad (1-3)$$

که در آن D و L به ترتیب نیروهای برا و پسا و R_e شعاع مؤثری است که نیروی باد بر آن وارد می‌شود که در این مقاله مرکز فشار در نظر گرفته شده است. با ارضاء شدن شرط توقف مسئله بهینه‌سازی پایان می‌پذیرد.

شکل (۱-۳) نشان دهنده‌ی الگوریتم حل مسئله است. تابع هدف، طول خط مینیمم و ضرایب معادلات (۱-۲) تا (۲-۳) به دست می‌آیند. توجه شود که ضرایب ثابت در شکل پروفیل تأثیری ندارند بنابراین مقداری برابر صفر خواهند داشت و عملاً عرض از مبدا را کم و یا زیاد می‌کند. قید مدنظر مسئله گشتاور بر واحد طول (توان بر واحد طول) است.

جهت جریان باد است. این نیرو ناشی از اختلاف فشار در دو سمت پره بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$L = \frac{1}{2} \cdot C_l \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (5-2)$$

در این رابطه ρ چگالی هوا، C_l ضریب برا و A مساحت سطح ایرفویل پره هست.

نیروی پسا (D)، در جهت جریان باد بر پره وارد می‌شود. این نیرو ناشی از اصطکاک لزجی جریان بر روی ایرفویل پره به وجود می‌آید. پسا تابعی از سرعت نسبی باد در سطح پره، که به‌صورت تفاضل سرعت باد و سرعت در سطح توربین تعریف می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$D = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot (V - \Omega r)^2 \quad (6-2)$$

که در آن Ωr سرعت در سطح پره، C_d ضریب پسا و V سرعت باد است.

ضریب سرعت نوک پره، λ به‌صورت نسبت سرعت در نوک پره به سرعت باد در جریان آزاد تعریف می‌شود در یک سرعت باد مشخص سرعت زاویه‌ای توربین ω ، بر اساس نوع و طراحی توربین متفاوت است. سرعت نوک پره در یک توربین محور قائم از حاصل ضرب شعاع توربین در سرعت زاویه‌ای آن به دست می‌آید. در نتیجه ضریب سرعت نوک پره را می‌توان به شکل زیر تعریف نمود [۲۴].

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (7-2)$$

۳- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات^۱

الگوریتم ازدحام ذرات از دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که بر مبنای تولید تصادفی جمعیت اولیه عمل می‌کند. در این الگوریتم با الگوگیری و شبیه‌سازی رفتار پرواز دسته‌جمعی پرندگان یا حرکت دسته‌جمعی ماهی‌ها بنانهاده

$$L_1 = \int \sqrt{1 + \dot{y}^2} dx$$

$$= \int \sqrt{1 + (3ax^2 + 2bx + c)^2} dx$$

$$\dot{y}_2 = 4ax^3 + 3bx^2 + 2cx + d$$

$$L_2 = \int \sqrt{1 + \dot{y}^2} dx$$

$$= \int \sqrt{1 + (4ax^3 + 3bx^2 + 2cx + d)^2} dx$$

$$\dot{y}_3 = 5ax^4 + 4bx^3 + 3cx^2 + 2dx + e$$

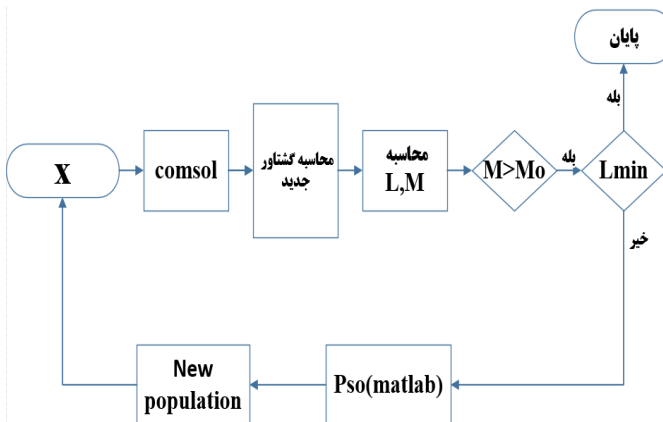
$$L_3 = \int \sqrt{1 + \dot{y}^2} dx$$

$$= \int \sqrt{1 + (5ax^4 + 4bx^3 + 3cx^2 + 2dx + e)^2} dx$$

۴- حل عددی

روش‌های تئوری و تحلیلی بر اساس حل معادلات حاکم در مکانیک سیالات و انتقال حرارت بنا شده است. اما در اغلب موارد فرمول‌بندی قوانین پایه مکانیک سیالات و انتقال حرارت به صورت معادلات دیفرانسیل مرتبه دومی درمی‌آیند که فقط در بعضی از حالات خاص دارای حل تحلیلی و دقیق هستند. چون معادلات حاکم در مکانیک سیالات یک مجموعه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غیرخطی و وابسته را ایجاد می‌کنند که باید در یک قلمرو ناهموار و با شرایط اولیه و مرزی مختلف حل شوند، بنابراین در بیشتر موارد حل تحلیلی معادلات مکانیک سیالات بسیار محدود است و با اعمال شرایط مرزی این محدودیت‌ها تنگ‌تر می‌شود. روشی که در سال‌های اخیر برای حل معادلات، شهرت بسیار زیادی یافته است روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که بر پایه محاسبات عددی بنا شده است.

با توجه به اینکه در این پژوهش، جریان اطراف پره توربین بادی ساونپوس مدل‌سازی و تحلیل می‌گردد. دو قانون بقای جرم و بقای مومنتوم (معادلات ناویر-استوکس) مهم‌ترین قوانین حاکم بر این تحلیل خواهند بود.



شکل (۱-۳) دیاگرام بهینه‌سازی با الگوریتم pso

گشتاوری که با استفاده از کامسول به دست می‌آید باید بزرگتر یا مساوی M_0 باشد بنابراین جمعیت اولیه برای تابع درجه ۳ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$X = \{a, b, c, x\}$$

که در آن:

$$0 \leq x \leq 25$$

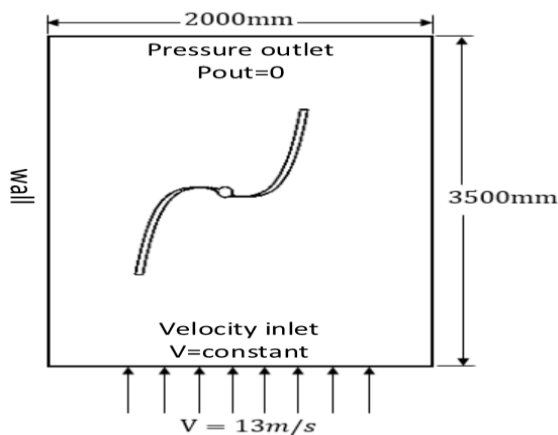
$$-1000 \leq a, b, c \leq 1000$$

اگر تابع f در فاصله $[a, b]$ پیوسته و در فاصله (a, b) نیز مشتق پیوسته داشته باشد در این صورت برای محاسبه طول منحنی $y=f(x)$ در فاصله $x=a$ تا $x=b$ از فرمول زیر استفاده می‌شود.

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + \dot{y}^2} dx \quad (۲-۳)$$

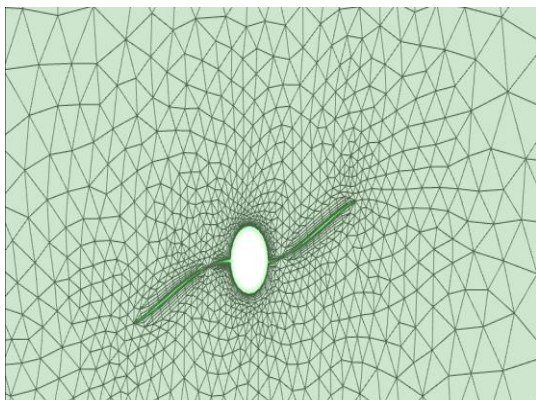
در این قسمت تابع هدف که همان طول خط پروفیل است از روابط زیر بدست می‌آید. اگر توابع درجه سه، چهار و پنج به ترتیب با اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ نمایش داده شوند برای محاسبه طول قوس منحنی به ترتیب زیر عمل می‌شود:

$$\dot{y}_1 = 3ax^2 + 2bx + c$$



شکل (۱-۴) اعمال شرایط مرزی بر روی حجم کنترل

از آنجایی که به منظور دستیابی به پاسخ نهایی، در نرم افزار حل معادلات اشاره شده در بخش های گذشته در المان-ها یا به عبارت دیگر گره های ایجاد شد در حجم کنترل انجام می شود، شیوه شبکه بندی و کیفیت مش تولید شده بسیار تأثیرگذار است. از آنجایی که در این پژوهش ۳ مدل مختلف از توربین طراحی شده مدل سازی، مش بندی و تحلیل شده اند، تعداد دقیق گره ها برای هر یک از مدل ها با توجه به مشخصات فیزیکی آن بین ۴۵۰۰ تا ۵۹۲۰ گره متغیر برای حالات دوبعدی متغیر است و شکل گره ها از نوع مثلثی است. باین وجود به منظور استقلال نتایج از مش بندی، نوع مش ایجاد شده و اندازه مش ها در تمامی مدل ها یکسان در نظر گرفته شده اند.



شکل (۲-۴) مدل شبکه بندی پروفیل تابع درجه ۲

1 -Wall

۱-۴ مدل توربولانسی

برای شبیه سازی دو دامنه جریان، روتور و استاتور، ترکیبی از دو مختصات کارتزین و استوانه ای به کار گرفته می شود. مدل استاندارد $k-\omega$ برای تحلیل جریان آشفته به کار برده شده است. این روابط به وسیله پارامترهای جابجایی جریان به روابط ناویر استوکس ارتباط داده می شوند. روش $k-\omega$ روشی با دقت مناسب برای تحلیل جریان سیال آشفته و تنش های رینولدز به وجود آمده ناشی از آن است.

۲-۴ شرایط مرزی و تولید مش

در مدل مورد بررسی، سیال هوا با سرعت 13m/s وارد ناحیه محاسباتی می شود؛ بنابراین می توان از یکی از دو شرط ورودی سرعت یا ورودی جریان استفاده نمود که با توجه به اینکه سیال در ورودی دارای خواص ثابت است، تفاوتی در انتخاب این دو شرط وجود ندارد که در اینجا از شرط مرزی سرعت استفاده می شود. در خروجی از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده که برابر با صفر است و همچنین دیواره های دیگر، کف و سقف ناحیه محاسباتی، با شرط مرزی دیوار^۱ مشخص شده است.

شکل (۱-۴) محدوده ای که برای شبیه سازی در نظر گرفته

شده را نشان می دهد:

۴-۲-۱ استقلال از شبکه

پاسخ درست یک شبیه‌سازی CFD بستگی زیادی به شکل، اندازه و در نتیجه به تعداد شبکه ایجاد شده برای شبیه‌سازی دارد. در این پژوهش مدل با تعداد سلول ۱۲۸۱۰۴، ۳۳۷۷۰۶ و ۵۲۴۲۲۳ عدد مش در مدل سازی اولیه ایجاد شده و مقدار گشتاور توربین برای هر یک از مدل‌ها بدست آمد. اختلاف ناچیز این مقادیر نشان‌دهنده‌ی آن است که جواب‌های حاصله، مستقل از شبکه‌بندی است و با زیاد شدن تعداد سلول‌ها، پاسخ‌ها تغییر با نتایج حل در شبکه بندی ایجاد شده کنونی نداشته و در نتیجه مدل کنونی با ۱۲۸۱۰۴ سلول برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده در

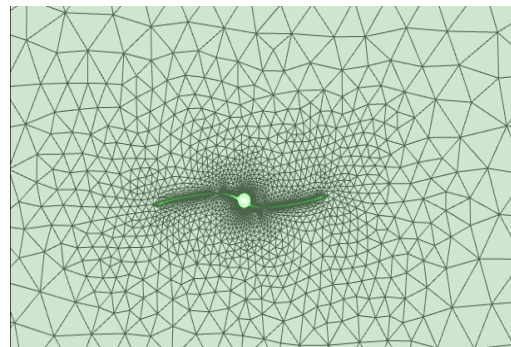
جدول (۴-۱) بررسی استقلال شبکه برای پروفیل تابع

درجه ۵

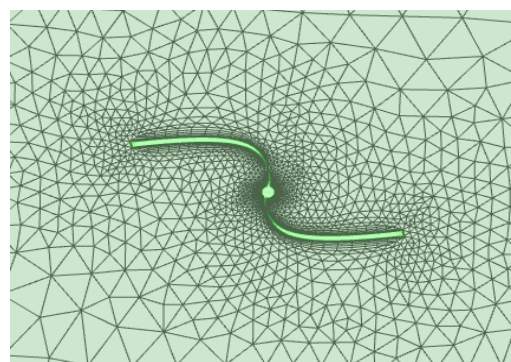
تعداد مش	گشتاور
۱۲۸۱۰۴	۷۸/۴۵
۳۳۷۷۰۶	۷۹
۵۲۴۲۲۳	۸۰/۳
خطا	۲درصد

۵- نتایج و بحث

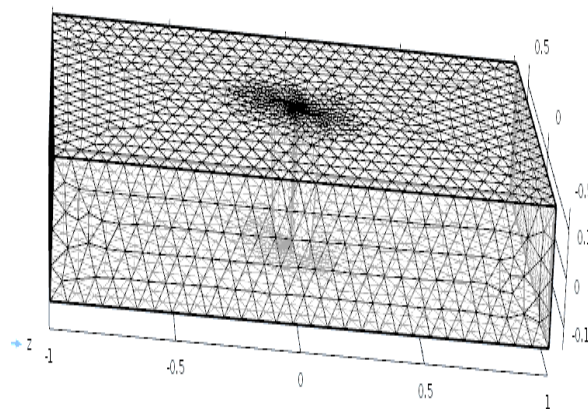
به‌طور کلی پارامترهای مختلفی بر روی عملکرد توربین‌های بادی نوع پسا تأثیری گذارند که از جمله می‌توان به شکل هندسی بهینه پره، ضرایب برا و پسا، گشتاور، مرکز فشار پره‌ها، کانتور جریان فشار و سرعت اطراف پره اشاره کرد.



شکل (۳-۴) مدل مش بندی اطراف پروفیل تابع درجه ۴




شکل (۴-۴) مدل مش بندی اطراف پروفیل تابع درجه ۵



شکل (۵-۴) شبکه بندی مدل سه بعدی پره با پروفیل تابع درجه ۵

جدول (۳-۵) مشخصات پروفیل تابع درجه پنج

ضرایب	مقدار	شکل پره
a	-۹۳۶/۸	
b	۵۷۱/۸	
c	-۱۳۰/۹	
d	۱۵/۲	
e	-۰/۶۴۴۹	
f	0	
x	۳۴ cm	

با ضرایب بدست آمده از کد PSO معادلات (۱-۲)، (۲-۲) و (۳-۲) به ترتیب برای پروفیل های درجه ۳، ۴ و ۵ به شکل زیر در می آیند:

$$y_{three\ order} = -9.312x^3 + 4.213x^2 - 0.4396x$$

$$y_{four\ order} = 89.89x^4 - 45.27x^3 + 8.836x^2 - 0.8283x$$


$$y_{five\ order} = -963.8x^5 + 571.8x^4 - 130.9x^3 + 15.26x^2 - 0.6449x$$

با در نظر گرفتن معادلات تابع درجه ۳، ۴ و ۵ برای پروفیل پره و تحلیل و بررسی شبیه سازی های سه بعدی، پره بهینه با پروفیل تابع درجه ۵ بهترین عملکرد را نشان داده است که دارای حداکثر ضریب توان ۰/۳۴ می باشد. علت بهتر بودن این پره را می توان در کمتر بودن نیروی برا جستجو نمود که به نسبت دو روتور دیگر دارای مقدار نیروی برای کمتری است و این نتیجه تقریباً یک نتیجه کلی است که در مورد روتورهای بنش، پیکو، خسروی و ساونیوس نیز صادق است.


۱-۵ شکل هندسی بهینه پره

با ترکیب نرم افزار کامسول و کد PSO از نرم افزار متلب شکل بهینه ای از پره های درجه سه، چهار و پنج به دست آمد، که در جداول (۱-۵)، (۲-۵) و (۳-۵) به ترتیب ضرایب بهینه سازی شده، مقدار طول خط به همراه شکل پروفیل درجه سه، چهار و پنج نشان داده شده است.

جدول (۱-۵) مشخصات پروفیل تابع درجه سه

ضرایب	مقدار	شکل پره
a	-۹/۳۱۲	
b	۴/۳۱۲	
c	۰/۴۳۹۶	
d	۰	
x	۳۶cm	

جدول (۲-۵) مشخصات پروفیل تابع درجه چهار

ضرایب	مقدار	شکل پره
a	۸۹/۸۹	
b	-۴۵/۲۷	
c	۸/۸۳۶	
d	-۰/۸۲۸۳	
e	۰	
x	۳۶cm	

۲-۵ ضریب توان و ضریب گشتاور

راندمان توربین‌های بادی بر اساس توان این توربین‌ها در استحصال انرژی موجود در باد تعیین می‌شود. انرژی باد به صورت انرژی جنبشی موجود است. پره‌های توربین‌های بادی این انرژی را دریافت نموده و به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. سپس در مرحله بعد با استفاده از ژنراتور این انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. راندمان این تبدیل به چگونگی طراحی پره‌ها، روتور و نحوه مواجه آن‌ها با جریان باد بازمی‌گردد. بهترین شیوه محاسبه این بازدهی، اندازه‌گیری توان خروجی دستگاه و مقایسه آن با توان ایده‌آل موجود در باد است.

نرم‌افزار کامسول نیروی وارد بر باد و گشتاور تولیدی توسط این نیرو قابل محاسبه است. توان ایجاد شده توسط توربین بادی پس از تحلیل، در فرایند آنالیز نتایج محاسبه می‌شود. دو کمیت گشتاور (T) و ضریب گشتاور (C_m) با تعیین مقادیر مرجع قابل اندازه‌گیری است. با استفاده از روابط زیر می‌توان از این کمیت‌ها برای محاسبه ضریب توان توربین بادی محور قائم استفاده نمود [۲۵].

$$T = \frac{1}{2} C_m \rho R A V^2 \quad (1-5)$$

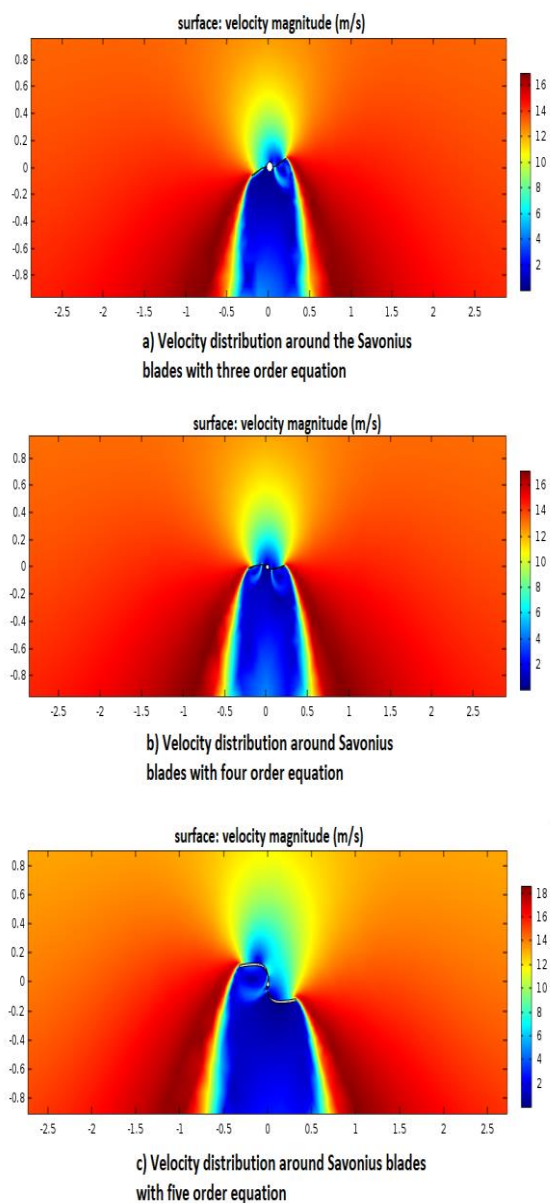
$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (2-5)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (3-5)$$

در روابط بالا R شعاع توربین، A مساحت جاروب شده توسط پره توربین، V سرعت باد، λ سرعت نوک پره و ω سرعت چرخشی پره است. با استفاده از روابط بالا ضریب توان توربین بادی محور قائم برابر است با:

$$C_p = C_m \times \lambda \quad (4-5)$$

شکل (۱-۵) توزیع سرعت سیال، در تحلیل پره توربین بادی ساونیوس با پروفیل‌های درجه ۳، ۴ و ۵ را نشان می‌دهد.



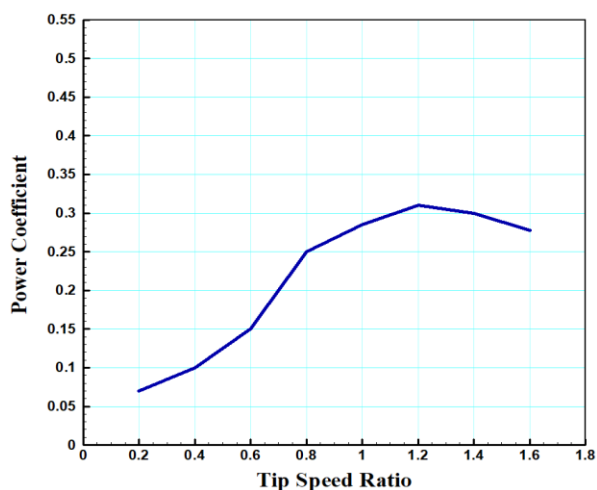
شکل (۱-۵) توزیع سرعت سیال برای (a) پروفیل تابع درجه ۳

(b) پروفیل تابع درجه ۴ (c) پروفیل تابع درجه ۵

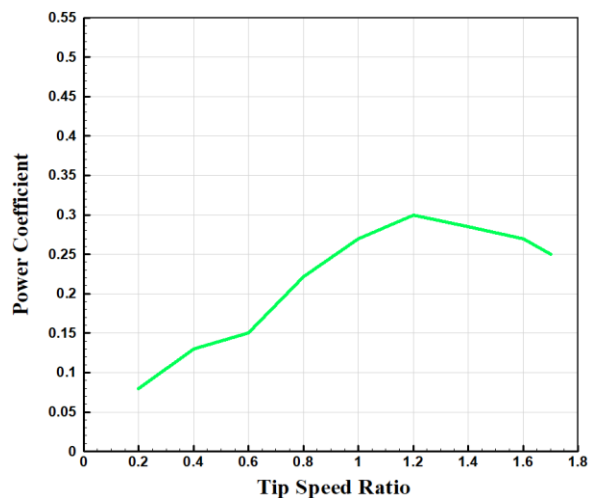
همانطور که در شکل گویاست بیشترین مقدار سرعت در مسیری است که باد از روبرو به روتور توربین برخورد می‌کند که برای رسیدن به بیشترین بازدهی در روتور ساونیوس باید از صفحات انتهایی در دو سوی روتور استفاده کرد. بخشی از سیال هوا پس از برخورد با روتور به سمت لبه‌های روتور حرکت

با بررسی توزیع فشار در هر سه پروفیل مشخص شده که در پروفیل درجه ۵ حجم بیشتری از باد به پره توربین فشار وارد می کند و بیشترین فشار به مرکز فشار توربین که ۱۰/۵ سانتی متر بدست آمده، وارد می شود.

شکل (۳-۵) نمودار ضریب توان برحسب سرعت نوک پره توربین را در پروفیل درجه سه نشان می دهد؛ و همان طور که از نمودار مشخص است بیشترین بازده این توربین ۰/۳۱ در ضریب سرعت نوک پره ۱/۲ به دست آمده است.



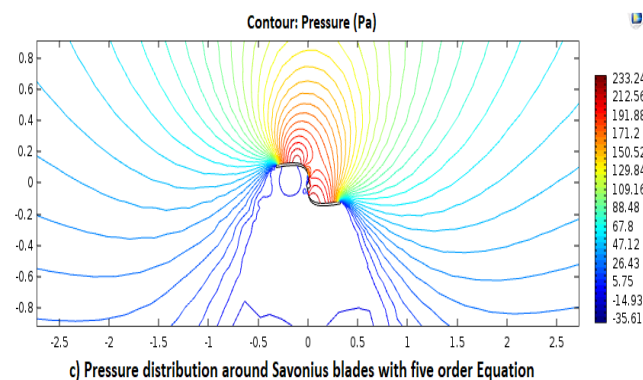
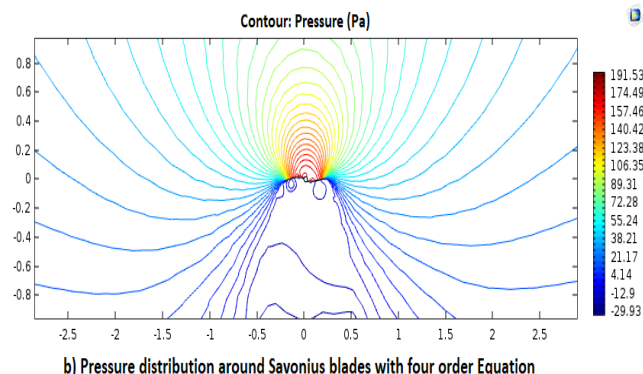
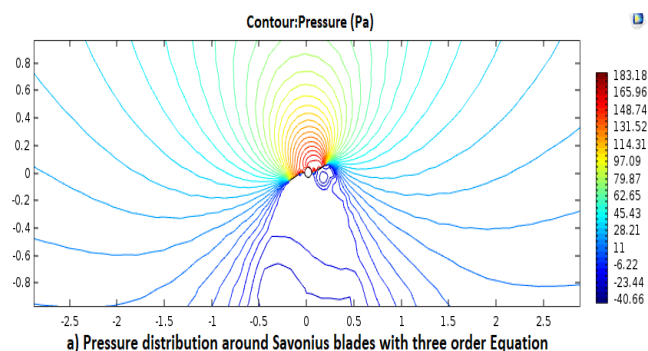
شکل (۳-۵) C_p بر حسب λ برای توربین با پره پروفیل تابع درجه ۳



شکل (۴-۵) C_p بر حسب λ برای توربین با پره پروفیل تابع درجه ۴

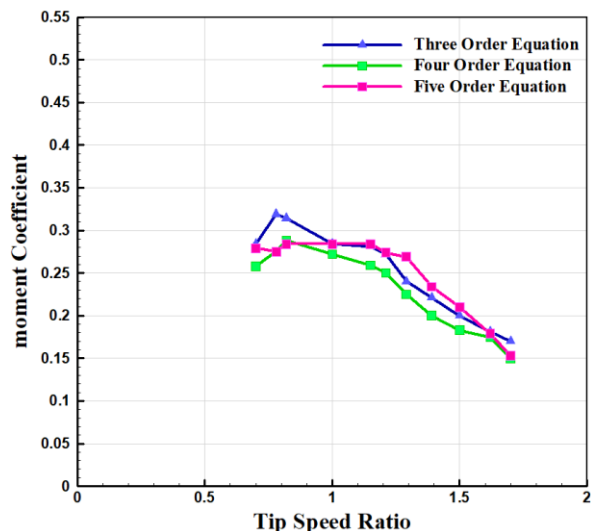
کرده و می گریزد که در نتیجه حداکثر مومنتوم باد به روتور منتقل نشده و بدین ترتیب بازدهی آن کاهش می یابد. برای جلوگیری از این امر باید از صفحات انتهایی در روتور استفاده کرد.

شکل (۲-۵) توزیع فشار سیال، در تحلیل پره توربین بادی ساونیوس با پروفیل های درجه ۳، ۴ و ۵ را نشان می دهد.



شکل (۲-۵) توزیع فشار در تحلیل پره توربین با: (a) پروفیل تابع

درجه سه (b) پروفیل تابع درجه ۴ (c) پروفیل تابع درجه ۵

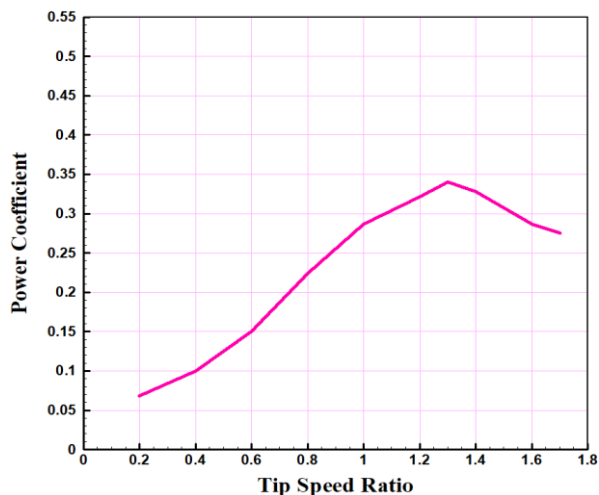


شکل (۶-۵) C_m بر حسب λ برای سه نوع پروفیل پره توربین

درنهایت بعد از تحلیل CFD هر سه الگوی بهینه سازی شده آن ها به ترتیب عملکرد بهینه مطابق با جدول (۴-۵) مرتب سازی شده و با توربین ساونبوس معمولی مقایسه شده است.

جدول (۴-۵) رده بندی اشکال آبرودینامیکی متفاوت بر اساس عملکرد بهینه

ردیف	مدل پره	C_{pMax}	λ	$C_{m Max}$	گشتاور ماکزیمم (N.m)
۱	درجه ۵	۰/۳۴	۱/۳	۰/۴۱	۹۵/۳۷۸
۲	درجه ۳	۰/۳۱	۱/۲	۰/۴	۶۱/۱۲۱
۳	درجه ۴	۰/۳	۱/۲	۰/۳۹	۵۷/۷۵۹
۴	ساونبوس معمولی	۰/۲۳	۰/۸	-	-

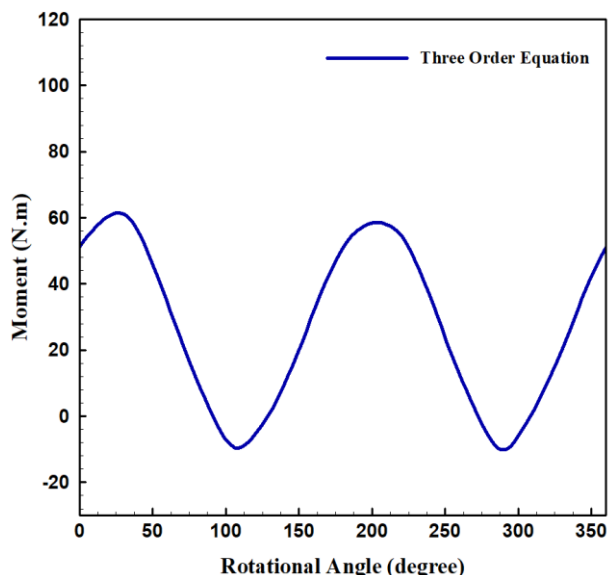


شکل (۵-۵) C_p بر حسب λ برای توربین با پره پروفیل تابع درجه ۵

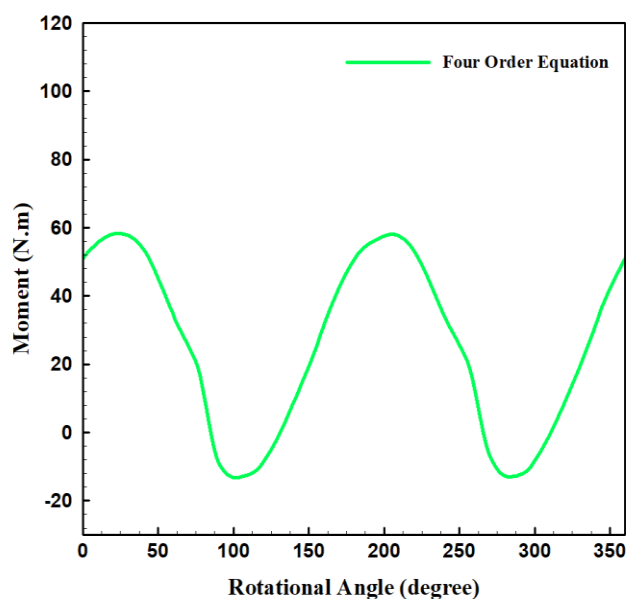
شکل (۴-۵) نمودار ضریب توان برحسب سرعت نوک پره توربین را در پروفیل درجه ۴ نشان می دهد. و همانطور که از نمودار مشخص است بیشترین بازده این توربین ۰/۳ در ضریب سرعت نوک پره ۱/۲ به دست آمده است.

شکل (۵-۵) نمودار ضریب توان برحسب سرعت نوک پره توربین را در پروفیل درجه ۵ نشان می دهد. و همانطور که از نمودار مشخص است بیشترین بازده این توربین ۰/۳ در ضریب سرعت نوک پره ۱/۲ به دست آمده است.

شکل (۶-۵) تغییرات ضرایب گشتاور برای هر سه مدل پره را نشان می دهد و مشاهده می شود نحوه تغییر این ضرایب نیز همانند ضریب توان است. که بیشترین ضریب گشتاور ۰/۴۱ که مربوط به پره با پروفیل درجه پنج می باشد.



شکل (۷-۵) گشتاور در یک دور کامل برای پره توربین با پروفیل تابع درجه ۳



شکل (۸-۵) گشتاور در یک دور کامل برای پره توربین با پروفیل تابع درجه ۴

۳-۵ نیروی برا، پسا و گشتاور

در این بخش نیروهای برا و پسا و مرکز فشار پره‌ها در شرایط یکسان و عدد رینولدز 10^6 از طریق شبیه‌سازی کامپیوتر به دست آمده است. به دست آوردن مرکز فشار از این رو ضروری است که با افزایش فاصله مرکز فشار از مرکز توربین بازوی گشتاور افزایش یافته و احتمال تولید گشتاور بیشتر افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۵-۵) آورده شده است.

جدول (۵-۵) مشخصات آیرودینامیکی پره‌های پیشنهادی

ردیف	نام پره	مرکز فشار (cm)	نیرو برا	نیرو پسا
۱	پره با پروفیل درجه ۵	۹/۳	-۶۱۱/۶۳	۲۲۳۷/۹
۲	پره با پروفیل درجه ۳	۱۰/۵	-۲۷۰	۳۸۰
۳	پره با پروفیل درجه ۴	۱۰/۵	۲۷۰/۳۵	۳۸۰/۴۴

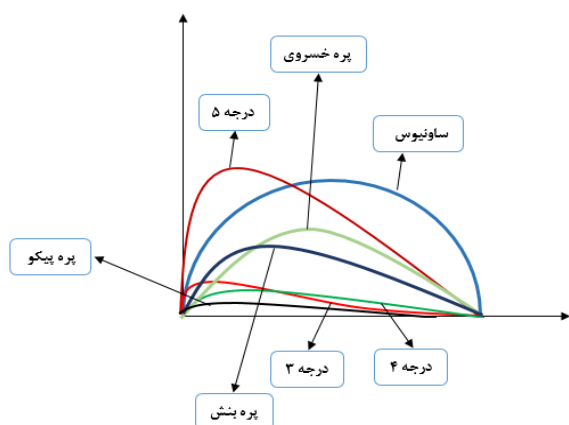
بیشترین فاصله مرکز فشار از مرکز توربین مربوط به پره‌های با پروفیل تابع درجه ۳ و ۴ است. درحالی‌که بهترین عملکرد مربوط به پروفیل پره با درجه ۵ است با مشاهده جدول می‌توان نتیجه گرفت نیروی برا و پسا مهم‌ترین عامل در عملکرد توربین است درحالی‌که طول بازوی گشتاور اثر چندانی در عملکرد توربین ندارد چون با توجه به جدول (۴-۵) پره با پروفیل تابع درجه ۵ بهترین عملکرد را دارد درحالی‌که طول بازوی گشتاور آن از دو مدل دیگر کمتر است.

بعد از تعیین شکل آیرودینامیکی و نیروهای برا و پسا با استفاده از تحلیل^۱ CFD گشتاور پره‌ها در یک دور کامل به دست می‌آید. شکل‌های (۷-۵)، (۸-۵) و (۹-۵) نمودار گشتاور در یک دور کامل را نشان می‌دهد.

^۱ Computational fluid dynamics

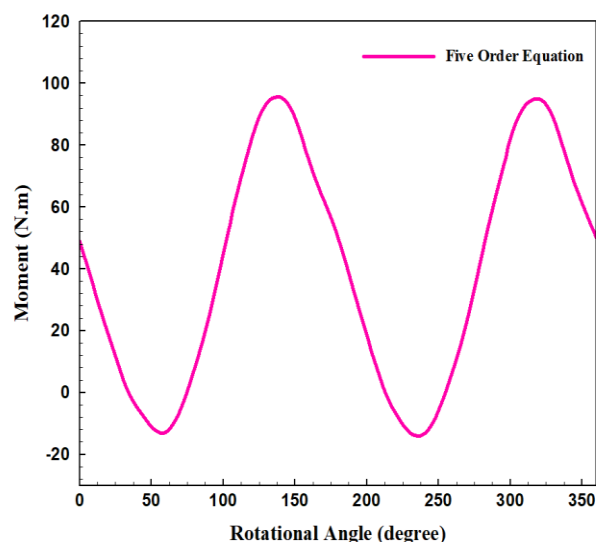
یکی از اهداف طراحی در این مقاله تعیین تاثیر شکل آیرودینامیکی پره روی بازدهی و گشتاور توربین‌های بادی نوع پسا است، از این رو چند نمونه از پره‌های موجود که تاکنون روی آنها تحقیق شده است در شکل (۵-۱۱) جمع‌آوری گردیده و خصوصیات آنها مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمامی این الگوها سعی شده است با افزایش و کاهش انحنای پره تاثیر هر یک از این پارامترها بر عملکرد توربین مشخص شود. اگر پره بنش [۲۶] را به عنوان پره معیار در نظر گرفته شود در نتیجه از آنجا که الگوهای پیکو [۲۷]، درجه ۳ و درجه ۴ از کاهش انحنا و پره‌های ساونئوس، خسروی [۲۸] و درجه ۵ نسبت به پره بنش از افزایش انحنا برخوردارند.

با استفاده از این اطلاعات توربین بهینه‌سازی در این پژوهش دارای ضریب توان یا همان بازدهی بهتر نسبت به دونوع ساونئوس متداول و خسروی است اما به میزان ۳ درصد از توربین پیشنهادی بنش بازدهی آن کمتر است.



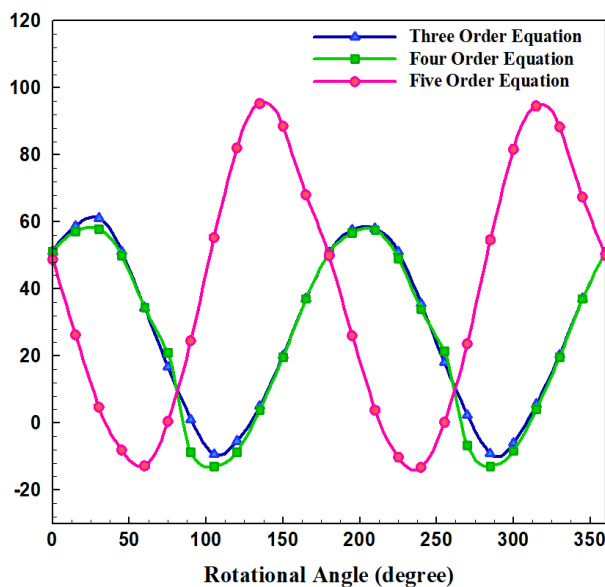
شکل (۵-۱۱) اشکال هندسی و آیرودینامیکی مورد تحلیل در مقاله

جدول (۳-۷) مقدار ضرایب پسا و برا را برای چند نمونه از پره توربین‌های مورد پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۹) گشتاور در یک دور کامل برای پره توربین با پروفیل تابع درجه ۵

شکل (۵-۱۰) تغییرات گشتاور برای هر سه مدل پره را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود گشتاور بیشینه در پره با پروفیل درجه ۵ در زاویه روتور ۱۳۵ درجه برابر ۹۵/۳۷۸ نیوتن متر می‌باشد.



شکل (۵-۱۰) C_p بر حسب λ برای سه نوع پروفیل پره توربین

جدول (۵-۶) مقایسه ضرایب توان، نیروهای برا و پسا پره توربینهای مختلف

نام پره	$C_{P Max}$	$C_{m Max}$	مرکز فشار (cm)	λ_{max}	ضریب برا	ضریب پسا
درجه ۵	۰/۳۴	۰/۴۱	۹/۳	۱/۳	۰/۰۷	۳/۰۱
درجه ۴	۰/۳	۰/۳۹	۱۰/۵	۱/۲	۰/۰۹	۳/۰۱
درجه ۳	۰/۳۱	۰/۴	۱۰/۵	۱/۲	۰/۱۱	۳
بنش	۰/۳۷	۰/۳۴	۱۱/۹	۱/۲	۰/۰۸	۳/۰۱
پیکو	۰/۴۲	۰/۴۶	۱۰/۰۷	۱/۲	۰/۱۲	۳/۰۲
خسروی	۰/۲۶	۰/۲۹	۱۰/۶	۰/۹	۰/۰۷	۳/۱۶
ساوونیوس معمولی	۰/۲۳	-	۱۱/۹	۰/۸	۰/۰۰۱	۲/۳

۶- نتیجه گیری

با تحلیل و بررسی شبیه‌سازی‌های سه بعدی، پره با پروفیل تابع درجه ۵ بهترین عملکرد را نشان داده است. لذا با محاسبه سطح زیر نمودار گشتاور میانگین این نوع پره به کمک نرم‌افزار متلب مقدار $84/4 \text{ N.m}$ برای گشتاور بدست می‌آید. مقدار توان با استفاده از معادلات (۵-۱) و (۵-۲) بدست می‌آید. برای مقایسه پره توربین‌های بهینه سازی شده یک نمونه پره توربین مدل CH-50 موجود در بازار با مشخصات یکسان مورد تحلیل ایرودینامیکی قرار گرفت که توان آن ۵۰ وات بدست می‌آید. توربین‌های بهینه سازی شده در این مقاله دارای توان خروجی ۶۰ وات می‌باشند که دارای توان خروجی بیشتری نسبت به نمونه‌های موجود در بازار دارند. هم‌چنین از دیگر ویژگی‌هایی که می‌توان در نظر گرفته شود، قیمت تمام شده برای توربین پیشنهادی در این مقاله است که به مراتب کمتر از نمونه توربین‌های موجود در بازار است.

blade”,2003,Proceeding of 19th Canadian congress
of applied mechanics, vol 2, pp:512-513

۷- مراجع

[۱۰] J.L.Menet, N.Bourabaa, ”Increase in the
savonius rotor efficiency via α parametric
investigation”, 2004

[۱] سازمان انرژی باد آمریکا " خلاصه گزارش انرژی باد سال

www.AWEA.com

" ۲۰۱۵

(American Wind Energy Association)

[۱۱] K.Irabu, J.nathroy, ”Characteristics of wind
power on savonius rotor using α gide
boxtunnel”, 2007, vol32, pp:580-586

[۲] گزارش سازمان جهانی انرژی باد سال ۲۰۱۰

www.WWEA.com

[۱۲] S.Stankovich, N.Campbell, ,” Urban
windenergy”, Earthscan, London, 2009

(World Wind Energy Association)

[۱۳] Z. Zhao, Y. Zheng, W. Liu, D. Zhou, ”
Optimum Design Configuration Of Helical
Savonius Rotor via Nummerical Study”, 2009,
ASME, vol 1, pp:1273-1278

[۳] J.Cleveland, ” History of wind energy”, 2007,
Elsevier, vol 6, pp: 421-422

[۴] J.Cleveland, ” History of wind energy”, 2007,
Elsevier, vol 6, pp: 421-422

[۱۴] G. Bois, A.C.Lain, ” Unsteady Similation of
Flow in micro vertical wind turbine”, 2010, The
21th International symposium transport
phenomena, koashing, Tiwan

[۵] S.J.Savonius, ”the S-rootor and it’s
application”, 1931, mechanic energy, vol 53,
pp:333-338

[۱۵] A. A. Kadam, S.S. Patil, ” A Review Study on
Savonius Wind Rotors for Accessing the Power
Performance”, 2011, IOSR Journal of Mechanical
and Civil Engineering, pp:18-24

[۶] I.Ushiyama, H.Nagai, ” optimum design
configurations and performance of savonius
rotors, 1988, vol 12, pp:59-75

[۱۶] A. Abdlokadir, S.Golde. F.Alam. H. Maria, ”
Experimental and Computational Study of Micro
Vertical Axis Wind Turbine”, 2012, IEF
International Energy Congress, vol 49, pp: 254-
262

[۷] A.H.Benesh, ”wind turbine system using α
vertical savonius- type rotor”, 1995, United
states patent, No. 4784654

[۱۷] Y.A.Hamouda, ”Wind energy in Egypt:
Economic feasibility for Cario renewable and
sustainable energy reviews”, vol16, Issue5, pp:312-
319

[۸] K.V.O.Rabah, B.M.Osawa, ”Design and field
testing of savonius wind pump in NEast
Africa”, 1996, International Journal of ambient
energy

[۹] U.K.Saha, P.Mahanta, A.S.Grinspan,
P.SureshKumar and P Goswami, ” Performance of
savonius wind turbine rotor with twisted bamboo

روی بازدهی و گشتاور توربین بادی " پایان نامه کارشناسی ارشد ۱۳۹۰، پژوهشگاه مواد و انرژی ایران

[۲۶] A.H.Benesh, "wind turbine system using α vertical savonius- type rotor" ,1995, United states patent, No. 4784654

[۲۷] حسین خسروی ، مجید جمیل ، "تأثیر آیرودینامیکی، وضعیت قرارگیری و تعداد پره‌های روتور ساونیوس پیشرفته روی بازدهی و گشتاور توربین بادی" پایان نامه کارشناسی ارشد ۱۳۹۰، پژوهشگاه مواد و انرژی ایران

[۲۸] حسین خسروی ، مجید جمیل ، "تأثیر آیرودینامیکی، وضعیت قرارگیری و تعداد پره‌های روتور ساونیوس پیشرفته روی بازدهی و گشتاور توربین بادی" پایان نامه کارشناسی ارشد ۱۳۹۰، پژوهشگاه مواد و انرژی ایران

[۱۸] A. Dhote, V. Bankar." Design, Analysis And Fabrication Of Savonius Vrtical Axis Wind Turbine",2015, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol 2, Issue 3

[۱۹] Z.Driss, A.Damak, M.S.Abid." Evaluation of the Savonius Wind Rotor Performance for Different External Overlap Ratios". International Journal of Fluid Mechanics & Thermal Sciences, 2015, 1(1): 14-19

[۲۰] W.Tian , Z.Mao ,B.Zhang , Y.Li." Shape optimization of a Savonius wind rotor with different convex and concave sides". Renewable Energy, 2017, 117:287-299

[۲۱] حسین خسروی ، مجید جمیل ، "تأثیر آیرودینامیکی، وضعیت قرارگیری و تعداد پره‌های روتور ساونیوس پیشرفته روی بازدهی و گشتاور توربین بادی" پایان نامه کارشناسی ارشد ۱۳۹۰، پژوهشگاه مواد و انرژی ایران

[۲۲] رابرت دلبلیو. فاکس، الن تی. مک دونالد، فیلیپ جی. پریچارد، "مقدمه‌ای بر مکانیک سیالات" ویرایش ششم، ترجمه بهرام پوستی، نشر کتاب دانشگاهی، ۱۳۸۵

[۲۳] رابرت دلبلیو. فاکس، الن تی. مک دونالد، فیلیپ جی. پریچارد، "مقدمه‌ای بر مکانیک سیالات" ویرایش ششم، ترجمه بهرام پوستی، نشر کتاب دانشگاهی، ۱۳۸۵

[۲۴] G.l.Johnson," wind enetgy system", Engle wood cliffs ,1985

[۲۵] حسین خسروی ، مجید جمیل ، "تأثیر آیرودینامیکی، وضعیت قرارگیری و تعداد پره‌های روتور ساونیوس پیشرفته