فصلنامه تحقیقات مکانیک کاربردی
جلد ۴، شماره ۴، ص‌ص ۳۵ الی ۴۴، بهار ۱۳۹۲
تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۲/۲۲

ارزیابی پارامترهای تاثیرگذار در طراحی توربین بادی روتور معلق

هانیه رزاقی – دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی کرج
سید محمود هاشمی‌نژاد- استادیار پژوهشی، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی کرج

E-mail: haneyeh_razaghi@yahoo.com

چکیده: تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدید پذیر نه تنها به منابع طبیعی را حفظ می کند بلکه تاثیر به سزای در کاهش آلودگی هوا دارد. در حال حاضر انرژی بادی به عنوان کارآمد ترین منبع انرژی تجدید پذیر مورد استقبال فراوان قرار گرفته و کشور های زیادی بر روی این صنعت سرمایه گذاری می کنند. توربین های پروازی را می توان از نسل جدید توربین های بادی برشمرد که برای تولید برق پاک و ارزان می توان بکار گرفته شود. در این مقاله به بررسی پارامتر های مهم طراحی این نوع توربین ها می پردازیم و اثری که این پارامتر ها بر روی گشتاور و توان تولیدی آن می گذارد را بررسی کرده. در نهایت می توانیم دید کاملی برای طراحی این نوع توربین ها پیدا کنیم.

.

واژه های کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، توربین روتور معلق، دینامیک سیالات محاسباتی، پارامترهای طراحی.

Evaluation of Factors Affected on the Design of Hangover Wind Turbines

H. Razaghi, MS. Student, Energy Division, Materials and Energy Research Center
S. M. Hashemi-Nezad, Ass. Prof., Energy Division, Materials and Energy Research Center

Abstract: Photovoltaic cells are exchanging energy of polarization into electrical energy directly and without intermediate process, that mathematical investigation and analysis of this process is main the goal. In this research, by using of matrix model the light absorption phenomena in semiconductor-composite-polymer photovoltaic cells has been simulated. And electrical field and energy of absorption are expressed by mathematical relations. This simulation has been analyzed using MATLAB software. The result of analysis shows that, the optical absorption process completely depends on the optical parameters of layers and the thickness of layers and incident wavelength, and this result is very important to optimization of optical absorption process and energy of absorption in a photovoltaic cell.

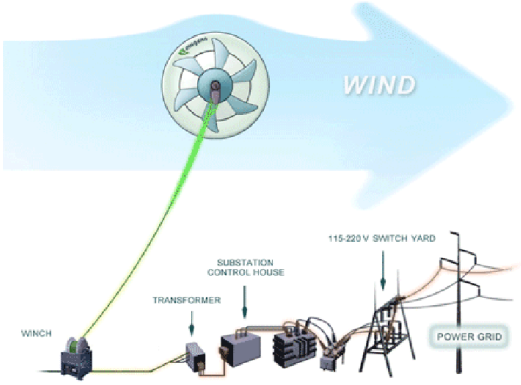
Keywords: Renewable energy, Hangover wind turbine, CFD and Design Parameters.

۱- مقدمه

انرژی بادی نوع ویژه ای از انرژی خورشیدی محسوب می شود و از انرژیهای تجدید پذیر است. ۲/۵ درصد از انرژی خورشیدی که به زمین می رسد به باد تبدیل می شود. حدود ۳۵ درصد انرژی باد در Km ۱ از سطح زمین موجود است. برای تولید برق به مقدار زیاد که بتواند شبکهٔ سراسری برق را تغذیه کند، نیاز به ایجاد مزرعه یا پارک بادی است که از مجموعه ای از توربین های بادی تشکیل شده است. بدین طریق می توان برق تولیدی را از نظر اقتصادی با نیروگاههای متداول قابل رقابت و عملکرد نیروگاه و هزینهٔ نگهداری آن را به صرفه و بهینه نمود.

توربین های بادی مدرن را می توان به دو گروه اصلی توربین بادی محور افقی (HAWT) و توربین بادی با محور عمودی (VAWT) تقسیم نمود. برای بررسی کارایی این توربین ها می توان از نمودار توان–سرعت بهره گرفت[۱]. با مراجعه به نقشه منابع جهانی باد [۲] می توان تخمین زد که ۲۷٪ از مساحت خشکیهای زمین در معرض وزش باد با سرعت متوسط سالیانه ۵.۱ $\frac{m}{s}$ در ارتفاع ۱۰ m است که این ظرفیت، معادل ۲۴۰/۰۰۰ GWe برق می باشد. البته تنها ۴٪ این منبع را می توانیم استفاده کنیم چرا که کاربری های دیگری چون کشاورزی، دامداری و... هم وجود دارد[۳ تا ۶] .توربین های بادی شناور نوعی روتور نسل آینده است که در ارتفاع زیاد قرار داده می شود تا از حداکثر انرژی بادی استفاده کند. این روتور ها بسیار سبک بوده و به صورت افقی در مسیر باد قرار می گیرند. این روتورها از نوع درگ بوده و به وسیله یک بالون به اسمان فرستاده می شود. اجزای آن عبارتند از: بالون، محافظ المنیومی، کابل، ژنراتور (که در داخل بالون قرار دارد)، قرقره نگهدارنده در روی زمین و تجهیزات انتقال برق

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده انرژی الکتریکی در بالون (توسط ژنراتور داخل آن) تولید می شود و به سطح زمین با استفاده از کابل انتقال داده می شود. بالون در واقع نقش به پرواز در آوردن روتور را دارد و آن را در ارتفاع مورد نظر نگه می دارد. چگالی گاز هلیوم یک هفتم چگالی هوا است که این امر باعث ایجاد نیروی شناوری فوق العاده زیادی می شود. برای اینکه روتور و بالون استحکام کافی داشته باشند از یک ساختار آلمینیومی که توسط چند خرپا ساخته شده استفاده می کنیم. این ساختار علاوه بر استحکام کافی باید بسیار سبک هم بوده زیراکه در یک سازه پروازی وزن پرنده عامل بازدارنده به حساب می آید.



شکل (۱) اجزای روتور معلق

۲- طرح مسئله:

هندسه دو بعدی برای تحلیل توربین در نظر می گیریم که در شکل (۲) نشان داده شده است. نسبت دو قطر تعریف شده توربین را به عنوان پارامتر هندسی یعنی $\lambda = \frac{D_1}{D_2}$ لحاظ می کنیم.

۲-۱- بیان معادلات:

معادلات پیوستگی و ممنتم در زیر می آوریم

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{v}) = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial}(\rho\vec{v}) + \nabla.(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla.(\bar{\tau}) \qquad (۲)$$

که در آن $\vec{v}$ برادار سرعت در دستگاه کارتزین است ، p فشار استاتیک و $\bar{\tau}$ تانسور تنش است که :

$$\bar{\tau} \equiv \mu\left[\left(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^{T}\right) - \frac{2}{3}\nabla.\vec{v}I\right] \qquad (۳)$$

که در آن μ وسکوزیته مولکولی است و I ماتریس واحد و ترم دوم سمت راست اثر اتساع حجمی است.معادلات ناویر استوک در دستگاه تانسور کارتزین را می توانیم به صورت زیر بنویسیم[۷].

مدل $\kappa - \omega$ در این پروژه به عنوان مدل توربولنت مورد نظر استفاده شده است (ویلکوس ۱۹۹۴). مدل $K - \omega$ یکی از کارآمد ترین مدل های توربولنت برای جریان خارج(هوا و آب) است. مدل SST K-ω رفتار خوبی در گرادیان فشار نامطلوب و جدایش جریان از خود نشان می دهد. از مدل K-ω برای اغتشاشات عظیم در مناطق با کشش نرمال زیاد مثل ناحیه سکون و ناحیه شتاب زیاد می توان استفاده کرد. معادلات انتقال را می توان به صورت زیر نوشت[۸]:

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t} + \rho\bar{u}_j\frac{\partial k}{\partial x_j} =$$

$$\rho\frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho\bar{u}_j\frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_t\sigma^*)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + \alpha\frac{\omega}{k}\tau_{ij}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta\rho\omega^2 \qquad (۵)$$

که در آن $\omega = \frac{\varepsilon}{k\beta^*}$, $\mu_t = \rho\frac{k}{\omega}$ می باشد

در این کد CFD سلول های متمرکز_حجم محدود به کار می گیریم که با خطی سازی می توانیم از المانهای حل با شکل چند وجهی اختیاری، استفاده کنیم. برای این مسئله از حل کننده تفکیکی استفاده می کنیم. از یک حل کننده ضمنی معادلات خطی گوس

سایدل همرا با یک روش چند شبکه ای جبری AMG برای حل سیستم اسکالر معادلات، متغیرهای وابسته در هر سلول استفاده می شود. باید معادلات حاکم را به معادلات جبری تبدیل کنیم تا بتوانیم آنها را از روش های عددی حل نماییم که منجر به معادلات مجزا می گردد. برای این کار نیاز به میان یابی از یک روش بالا دست آپ وینـد مرتبه ۲ داریم. برای ایجاد وابستگی سرعت- فشار از الگوریتم SIMPLE (سیمپل) استفاده می کنیم.

۲-۲- نتایج تحلیل عددی

توان تولیدی توربین روتور پروازی تابعی از پارامتر های زیر است که می توان آن ها را به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد:

الف) پارامترهای هندسی

- قطر پایه $D1$
- قطر پره $D2$

ب) پارامتر های جریان هوا

- ویسکوزیته μ
- چگالی ρ
- سرعت v

ج) پارامتر های دینامیکی

- سرعت زاویه ای ω

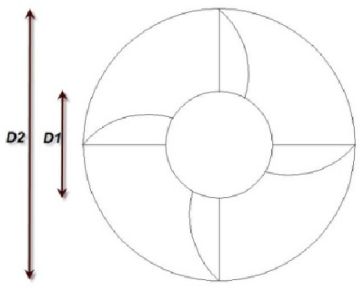
با استفاده از تئوری π باکینهام و روش هاناکر و رایتمایر به راحتی می توان نشان داد که ضریب توان روتور C_{p} تابعی از اعداد بی بعد زیر است.

$$f(\Pi_1,\Pi_2,\Pi_3)=0$$

$$\Pi_1=\frac{D_2}{D_1}$$

$$\Pi_2=1/\mathrm{Re}$$

$$\Pi_3=\frac{\omega D_1}{\nu}$$



شکل(۲) هندسه مسئله

حال برای بررسی اثر هر یک از اعداد بی بعد ارائه شده در بالا دو عدد بی بعد را ثابت و دیگری را متغیر می گیریم و اثر آن را بر توربین بررسی می کنیم

جریان باد حول روتور به دلیل ماهیت دینامیکی آن بسیار پیچیده است. هر گونه شبیع سازی عددی نمی تواند ماهیت فیزیکی جریان را به طور دقیق نمایان سازد ولی این شبیه سازی ها می تواند معیار تقریبی به منظور طراحی و ساخت توربین باشد. نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار قدرتمند FLOENT ارائه شده است.

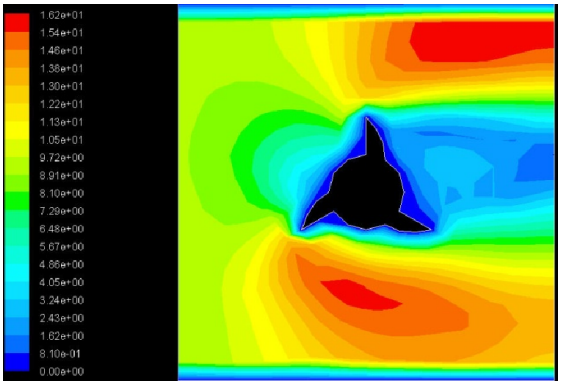
به منظور طراحی یک روتور معلق باید به خوبی از تغیرات میدان فشار و سرعت جریان باد حول آن آگاه بود. در شکل (۳) می توانید کانتور های سرعت را برای سرعت زاویه های مختلف مشاهده کرد. به خوبی مشاهده می شود که با افزایش سرعت زاویه ای گردابه ها از روتور دور می شوند. در سرعت زاویه صفر گردابه ها دقیقا بعد از روتور شروع می شوند ولی در سرعت زاویه ای ۲ اینگونه نیست و گردابه ها کمی دورتر و البته ضعیفتر شده اند. که این امر باعث می شود گشتاور تولیدی کاهش یابد .

اولین پارامتر بی بعد که بررسی می شود عدد بی بعد Π_1 است. تغیرات آن و اثر آن را روی لیفت و درگ و گشتاور می توان در شکل (4) و (۵) مشاهده کرد. با افزایش این پارامتر درگ افزایش می یابد و به تبع آن گشتاور نیز زیاد شده ولی افزایش اندازه باعث کاهش لیفت می شود که علت آن نیز سنگینی بیش از اندازه بالن است. این پارامتر یکی از محدودیت ها را برای طراحی این بالن نمایان می کند که باید درطراحی بالن مورد توجه قرار گیرد. مقدار بهینه نسبت ۲ را می توان از نمودار برداشت کرد، کوچک تر بودن بالن علاوه بر سبکتر کردن آن به کنترل آن در هوا نیز کمک شایانی می کند.

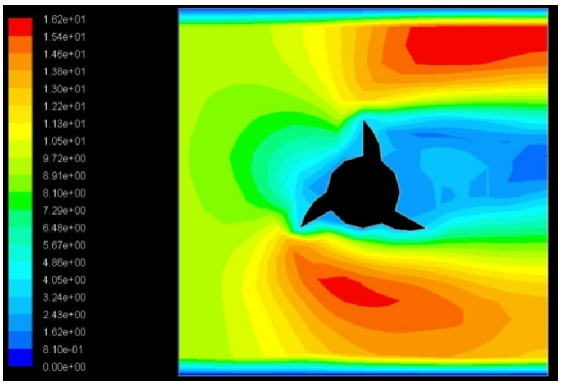
پارامتر بعدی که مورد بررسی قرار می گیرد پارامتر Π_3 است. که مستقیما به سرعت زاویه روتور باز می گردد. تغیرات گشتاور، لیفت و درگ نسبت به به این پارامتر در شکل (۶) نشان داده شده است.

با افزایش Π_3 لیفت و درگ افزایش می یابند ولی این افزایش زیاد محسوس نیست. اما این افزایش باعث کاهش گشتاور تولیدی می شود شکل (۷). ولی اختلاف گشتاور در سرعت زاویه صفر با سرعت زاویه ای ۳ تنها ۱ درصد است. با استفاده از این حقیقت برای بررسی جریان حول روتور معلق می توانیم روتور را ثابت در نظر بگیریم با علم به اینکه داده های بدست آمده با داده های واقی تنها ۱ درصد خطا دارد که خطا بسیار کمی است.

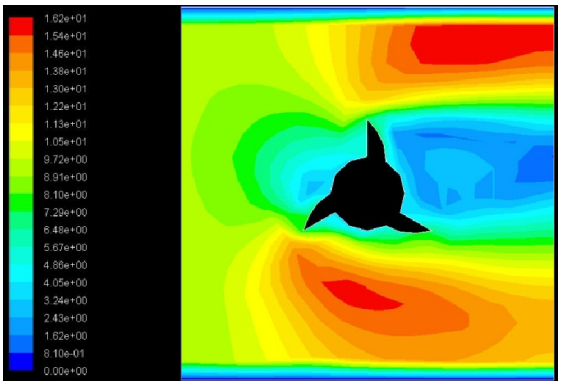
شکل (۸) و (۹) ویژگی های نیرویی روتور (گشتاور، لیفت و درگ) با افزایش عدد بی بعد Π_2 کاهش می یابد. که این کاهش نیز قابل ملاحظه است .



$a)\quad \omega = 0$

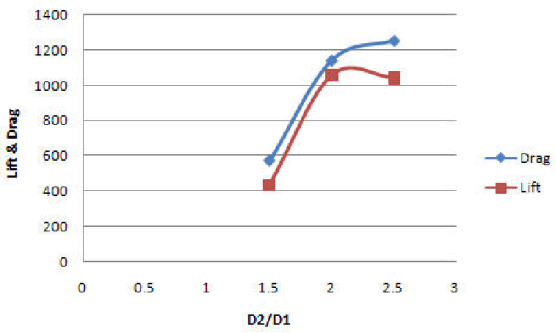


$b)\quad \omega = 1$

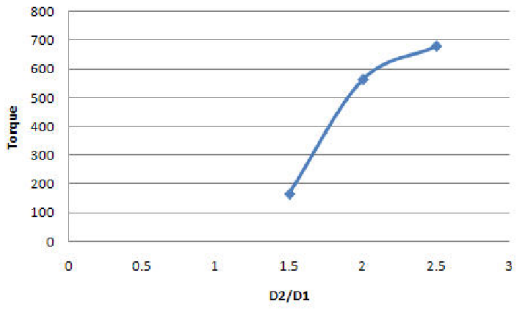


$c)\quad \omega = 2$

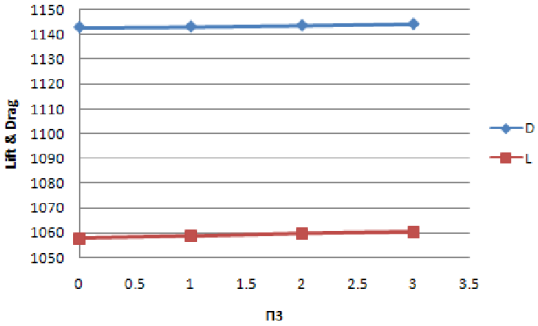
شکل (۳) کانتورهای سرعت در اطراف روتور



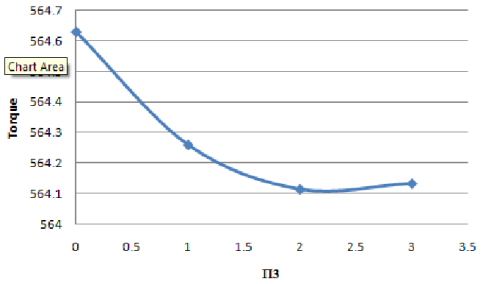
شکل (۴) نمودار لیفت و درگ با عدد بی بعد Π_1



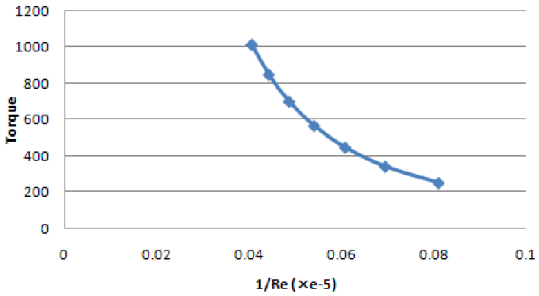
شکل (۵) نمودار گشتاور تولیدی با عدد بی بعد Π_1



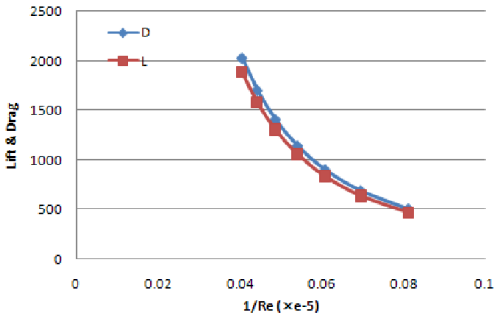
شکل (۶) نمودار لیفت و درگ با عدد بی بعد Π_3



شکل (۷) نمودار گشتاور تولیدی با عدد بی بعد Π_3

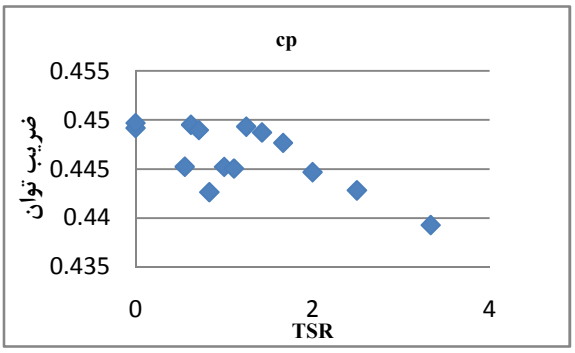


شکل (۸) نمودار گشتاور تولیدی با عدد بی بعد Π_2



شکل (۹) نمودار لیفت و درگ با عدد بی بعد Π_2

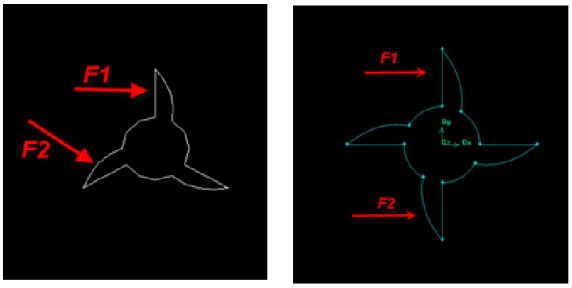
توان یک توربین بادی را می توان با نوشتن موازنه انرژی برای یک حجم کنترل معین بدست آورد. این کار توسط بیتز انجام شد. وی نشان داد که توان تولیدی یک توربین بادی به پارامتر ضریب توان بستگی دارد و بیشترین میزان ضریب توان برابر ۵۹.۳٪ است. این اتفاق زمانی می افتد که سرعت خروجی یک سوم سرعت ورودی باشد. با محاسبه نسبت سرعت خروجی به سرعت ورودی برای توربین روتور معلق و با استفاده از قانون بیتز، ضریب توان این نوع توربین که به نحوی نشان دهنده بازده آن نیز است بدست می آید. نکته قابل توجه این است که نمودار ضریب توان برای توربین های نوع درگ از جمله توربین ساوینیوس کمتر از نوع لیفت است، چیزی در حدود ۰/۲ تا۰/۳ [۱] ولی در مورد روتور معلق این ضریب توان مقدار قابل قبولی را نسبت به ساوینیوس دارد شکل (۱۰). این موضوع نشان می دهد که این نوع توربین می تواند جایگزین مناسبی برای توربین های از نوع درگ باشد.



شکل (۱۰) نمودار ضریب توان برای روتور

۳-۲- بررسی تعداد پره های توربین:

تعداد پره های توربین با توجه به توان مورد نیاز و ارتفاع کار کرد آن تعیین می شود اما چه تعداد پره برای توربین مناسب است؟ برای پاسخ به این سوال به تحلیل جریات حول دو روتور کاملا متشابه می پردازیم که تنها در تعداد پره با یکدیگر فرق دارند. در شکل (۱۱) مشخصات نیرویی برای هر دو روتور نشان داده شده است. همچنین مقادیر این نیروها در جدول (۲) بیان شده است.



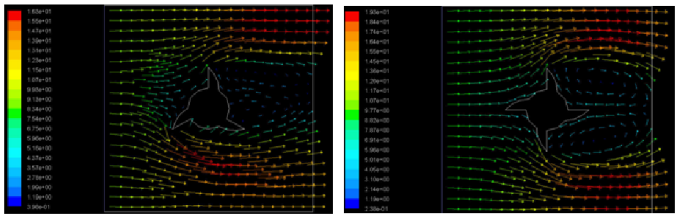
شکل (۱۱) تعیین بردارهای نیرو برای روتور چهار پره و سه پره

جدول (۲) مقادیر بدست آمده برای روتور سه پره و چهار پره

	روتور سه پره	روتور چهار پره
گشتاور	۵۶۴	۲۳۸
نیروی درگ	۱۱۴۲	۲۲۱۵
نیروی لیفت	۱۰۵۷	۴۸۰

همانطور که مشاهده می شود در روتور سه پره گشتاور تولیدی و نیروی برا به مراتب بالاتر از روتور چهار پره است. دلیل این امر را می توان در تحلیل نیروهای F1 و F2 دانست. در روتور چهار پره نیروی F1 نیروی موافق و نیروی F2 نیروی مخالف برای تولید گشتاور است ولی در روتور سه پره این نیرو باید تصویر شود و نیروی تصویر شده (F2) کمتر از مقدار تصویر نشده خود است و در نتیجه گشتاور مخالف ما نسبت به حالت قبل کاهش می یابد و درنتیجه گشتاور کل افزایش می یابد.

دلیل دیگر در این مورد را می توان در شکل (۱۲) مشاهده کرد. همانطور که دیده می شود در روتور چهار پره میدان جریان حالتی تقارنی دارد. که نشان دهنده توزیع یکسان نیرو روی پره ها است ولی در حالت سه پره تقارن میدان جریان کاملا بهم ریخته است.



شکل (۱۲) میدان جریان حول روتور سه و چهار پره

۳- نتیجه گیری

با استفاده از بی بعد سازی پارامتر های تاثیر گذار روی توان توربین به سه پارامتر بی بعد اصلی می رسیم. با بررسی پارامتر هندسی در می یابیم که نسبت قطر روتور ۲ مناسبترین نسبت است. چرا که با افزایش نسبت قطر نیروی لیفت کاهش می یابد. همچنین افزایش سرعت باد باعث افزایش توان روتور می گردد. افزایش پارامتر دینامیکی نیز باعث کاهش گردابه ها می گردد. ضریب توان توربین های روتور معلق به مراتب بیشتر از توربین های حالت درگ دیگر است. در روتور با سه پره به دلیل برهم زدن تقارن میدان و کاهش نیروی درگ میزان گشتاور تولیدی سه برابر روتور چهار پره خواهد بود.

۴- مراجع

1- Frank M.White, fluid mechanics. Mcgraw-hill, pp. 750-755, 2002.

2- World Meteorological Organization. Meteorological Aspects of the Utilization of Wind as an energy Source. Technical Note 175. Geneva,Switzerland,1981

3- The Potential of Renewable Energy :An Interlaborator White paper .Golden, Colorado, USA, March 1990

4- D.L.Elliott,L.L.Wendell and G.L.Gower.Wind Energy Potential in the United States Considering Environmental and Land-use Exclusions.Proceedings Solar Word congress, Denver, Colorado USA, August 1991,Vol. 1, Part 2,PP. 576-581.

5- L.Arkesteijn, G.van Huis and E.Reckman. Space for Wind,Rijksplanologische Dienst, The Hagus, The Netherlands 1987.

6- J.C.Berkhuizen, E.T.de Vries, J.C.van den Doel and H.Muis.The potential of Wind Energy in the Netherlands:A Modelling Approach,Hoek van Holland, the Netherlands 1986

7- Schilichting, **Boundary Layer Theory, 8nd Edition, John Wiley publications**, 2006.

8- Baxevanou, C.A., Vlachos, N.S., 2004. A comparative study of numerical schemes and turbulence models for wind turbine aerodynamic modelling. Wind Eng. 28 (3), 275–290