

# شبیه سازی توربین های بادی مگنوس با استوانه های دوار توسط نرم افزار CFX

محسن رشیدی نژاد میبدی ، دکتر احمد صداقت ، دکتر مهدی نیلی ، دکتر محسن ثقفیان

دانشگاه صنعتی اصفهان

ایران

واژه های کلیدی : توربین بادی، نیروی بالابر، اثر مگنوس ، استوانه های دوار، توان، CFX

## چکیده

استفاده از انرژی باد از بین انواع منابع دیگر انرژی ارزاترین، مناسبترین و شاید موثرترین روش تولید انرژی و بهینه سازی انرژی باشد. به همین دلیل ساخت و توسعه توربین های بادی در چند سالیان اخیر بسیار چشمگیر بوده است. از جمله توربین هایی که طی سال های گذشته و بخاطر هزینه های ساخت نسبتا پایین تر آنها در قبال توربین های ابرفویلی بسیار رواج یافته است، توربین های بادی مگنوس با استوانه های دوار بجای پره می باشد. در این پژوهش، این نوع توربین در قالب دو مدل مختلف و توسط نرم افزار ANSYS CFX شبیه سازی شده است و نهایتا نمودار  $G_p$  بر حسب  $\lambda$  که بعنوان نمودار بازده توربین نیز معرفی می شود برای آن ترسیم شده است.

## ۱- مقدمه

### ۱-۱ انرژی باد

استفاده از انرژی باد از بین انواع منابع دیگر انرژی ارزاترین، مناسبترین و شاید موثرترین روش تولید انرژی و بهینه سازی آن باشد. به سبب پایان پذیر بودن منابع انرژی از نوع فسیلی و از طرفی نداشتن هیچگونه منابع آلاینده و پائین بودن هزینه تولید

انرژی با استفاده از انرژی باد، مطالعه و شناخت پتانسیل انرژی باد مناطق مورد مطالعه از اهمیت خاصی برخوردار است. به دلیل نیاز به انرژی و توسعه انرژی بادی، از اواخر دهه ۱۹۸۰ تولیدکنندگان به فکر احداث تأسیسات و واحدهای بزرگ تر تولید انرژی از باد بوده اند حتی واحدهای تولیدی واقع در مناطق دریایی نسبت به واحدهای تولید انرژی در مناطق خشکی از توسعه و پیشرفت بیشتری برخوردار شدند، زیرا از مزیت بالاتری برخوردار بوده اند. انرژی قابل دسترس در جریان باد متناسب با توان سوم سرعت باد می باشد. این بدان معناست که اگر سرعت باد دو برابر شود، انرژی تولید شده توسط توربین یا همان انرژی پتانسیل قابل دسترس ۸ برابر خواهد شد. بطور کلی میانگین سالانه سرعت باد بیش از ۵ متر بر ثانیه برای اهداف کاربردی مانند تولید الکتریسیته و برقراری جریان لازم و ضروری است. اگرچه ممکن است سرعت باد کمتر از ۵ متر بر ثانیه برای تامین شارژ باطری و یا پمپاژ کردن آب کافی باشد چگالی نیروی باد (توان) روش مفیدی برای ارزیابی پتانسیل انرژی باد قابل دسترس است و واحد اندازه گیری آن وات بر متر مربع می باشد. چگالی نیروی باد (توان) بعنوان عاملی است که نشان می دهد چه مقدار انرژی قابل دسترس در هر مکان می تواند

توسط توربین به جریان الکتریسته یا انرژی الکتریکی تبدیل گردد.

## ۱-۲ توربین های محور افقی

توربین های بادی با محور افقی از نظر جهت برخورد با باد به دو نوع توربین های با محور افقی رو به باد و توربین بادی محور افقی پشت به باد تقسیم می شوند. در توربین های رو به باد، سطح دایره ای شکل حاصل از چرخش پره ها، اولین قسمتی از توربین است که باد به آن برخورد می کند و برای بدست آوردن بیشترین میزان انرژی بادی همواره باید محور توربین بر راستای وزش باد عمود باشد و این امر با کمک نصب بادنما و سیستم گرداننده انجام می شود و تقریباً اغلب توربین های با محور افقی از نوع رو به باد با قابلیت حرکت در راستای وزش باد هستند. در توربین های با محور افقی از نوع پشت به باد، ابتدا برج توربین با باد برخورد می کند و در نتیجه قسمتی از انرژی باد، به موجب سایه اندازی بر روی دایره چرخش پره ها تلف خواهد شد. در این نوع سیستم ها نیاز به وجود بادنما و سیستم انحراف نمی باشد.

## ۱-۳ طراحی، نمونه اولیه و تست های آزمایشی توربین های با

### استوانه دوار

در زمینه استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، استخراج انرژی هیدروالکتریک در مقیاس کوچک می تواند چندین مزیت را بدنبال داشته باشد، از جمله:

الف- مزایای فنی: استفاده از هر مجرای معمولی با چشم پوشی از فشارهای محیطی

ب- مزایای اقتصادی: محدودیت سرمایه گذاری مالی و کاهش هزینه های ساخت و نگهداری

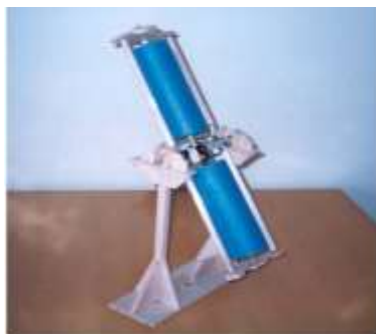
در سال های اخیر چندین بررسی روی کاربردهای تکنولوژی هیدرو در مقیاس کوچک گزارش شده است، مخصوصاً طرح های میکروهیدروپاورها که معمولاً ظرفیتی کمتر از ۵۰۰kw دارند [۱-۲]. در تمامی این تحقیقات، یک محدودیت فنی و اقتصادی را مشخص نموده اند، که منجر به محدوده های عملیاتی برای مشخصه های کاربردی هیدروتوربین ها و بازده آنها در مقیاس کوچک می شود [۲-۴].

همچنین در بیشتر تحقیقات اخیر، روی تحلیل های طراحی در رابطه با توان بسیار کم (کمتر از ۰.۲kw) بحث شده است و هنوز به نظر می رسد که بررسی میکروهیدروهایی که در محدوده هد هیدرولیکی کمتر از ۲ متر عمل می کنند، غیرممکن باشد [۵-۶].

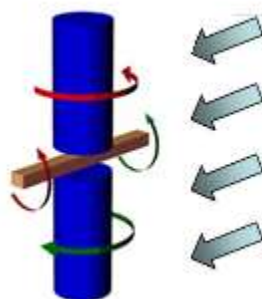
در رابطه با میدان کاربرد میکروهیدرها، گیودیس و روزا [۷]، امکان میکروتولید الکتریسته را، با طراحی، گسترش و تست دستگاهی بر اساس تکنولوژی ویژه ای از توربین ها با محور افقی و پره های استوانه ای را آنالیز نمودند. بطور کلی، برای کاربردهای بادی در مقیاس بزرگ [۸-۹]، توربین های پره استوانه ای، بعلت پدیده مکانیک سیال؛ که منجر به تولید نیروی لیفت روی یک جسم استوانه ای شده و نهایتاً باعث چرخش محور آن (که بطور عمود بر جریان قرار دارد) می شود؛ کار می کنند.

یک دستگاه در این نوع؛ جایی که روتور شامل پره های متقارن محوری که حول محور خود می چرخند، می شود؛ چندین مزیت دارد که در ارتباط با کاربرد میکرو هیدرها اهمیت ویژه ای دارند، از قبیل آنکه می تواند در کمترین انرژی فعال سازی کار نموده که برای میکروتولید در هد سرعت و نرخ جریان کم بسیار مناسب است، و همچنین امکان وفق دادن با بازگشت جریان را دارد، که منجر به یک عملکرد ثابت می شود.

نمونه اولیه توربین گیودیس و روزا [۷]، هم چنین دیاگرام چگونگی تولید نیروی لیفت در این نوع از توربین ها در شکل (۱) نشان داده شده است.



(a)

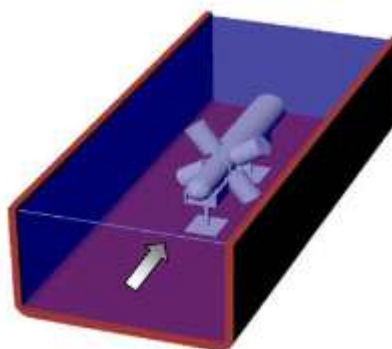


(b)

شکل (۱): (a) نمونه اولیه ، (b) دیاگرام چگونگی تولید نیروی لیفت در توربین های پره استوانه ای

شده در جدول (۱) در نظر گرفته شده است. هم چنین شرایط عملکردی این نوع از توربین نیز در جدول (۲) بیان شده است.

جهت عملکرد بهتر این از توربین ها، می توان با افزایش تعداد پره ها، توان تولیدی آنها را افزایش داد. بر این اساس جهت انجام آزمایش ، یک نوع توربین ۴ پره ای (شکل ۲) با ابعاد نشان داده-



شکل (۲): توربین مورد آزمایش با ۴ استوانه چرخان بعنوان پره

جدول (۱): ابعاد هندسی در نظر گرفته شده برای توربین

۴ پره‌ای

اندازه (سانتی متر)	پارامتر
۱۰	قطر استوانه‌ها
۱۴	طول استوانه‌ها
۴۹	قطر روتور

جدول (۲): شرایط عملکردی توربین ۴ پره‌ای طراحی شده

Chiral blade basic parameters		Theoretical ideal functional parameters		Adjusted functional parameters	
$R$	0.05 m	$P_{MAX}$	104.6–105.4 kPa	$L'_R$	181.4–296.4 N/m
$b$	0.14 m	$L$	394.8–740.3 N/m	$L_R$	25.4–41.5 N
$\omega$	31.4 rad/s	$L$	55.3–103.6 N	$D_R$	6.7–22.1 N
$V_{Pb}$	1.57 m/s	$D$	0 N	$L_{R\ TOT}$	101.7–165.8 N
$V_{Pb}/V_{\infty}$	1.96–1.04	$L_{TOT}$	221.1–414.6 N	$C_{R\ TOT}$	17.8–29.0 N m
Re	70200–131600	$C_{TOT}$	38.7–72.6 N m	$\Omega_R$	3.7–4.9 rad/s
Water flow $V_{\infty} = 0.8\text{--}1.5$ m/s		$\Omega$	5.2–7.9 rad/s	$P_R$	66–142 W
		$P$	201–572 W		

بدست آمده برای یک نیمه، نتایج مورد نظر را برای کل هندسه بدست آورد.

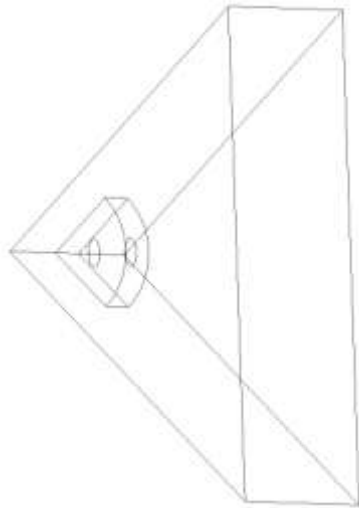
## ۲- هندسه مساله و نتایج

جهت شبیه‌سازی توربین‌های بادی مگنوس با استوانه‌های دوار در این پروژه از دو روش مختلف استفاده شده است که مطابقت نتایج بدست آمده با نتایج تجربی موجود، نشان می‌دهد که هر دو روش تا حد بسیار زیادی قابلیت شبیه‌سازی این نوع از توربین‌ها را دارند.

### ۲-۱ روش اول

در این روش علاوه بر یک میدان<sup>۱</sup> خارجی که معرف محیط اطراف توربین می‌باشد، یک میدان چرخشی داخلی نیز حول استوانه‌ها در نظر گرفته شده است که معرف فضای چرخشی توربین می‌باشد (شکل ۳)

البته لازم بذکر می‌باشد که در این روش جهت سادگی کار تنها یک چهارم از شکل در نظر گرفته شده است و با استفاده از شرط مرزی پریودیک بین صفحات واسطه، قسمت‌های دیگر توربین نیز شبیه‌سازی شده است و می‌توان با چهار برابر نمودن نتایج



شکل (۳): مدل در نظر گرفته شده برای یک چهارم از توربین به روش اول

در این روش علاوه بر چرخش استوانه‌ها به عنوان پره‌های توربین یک میدان چرخشی نیز حول آنها در نظر گرفته شده است که شبیه‌ساز هوای اطراف این استوانه‌ها است که بر اثر چرخش توربین، حول محور روتور می‌چرخد. در واقع تفاوت کار در این پروژه با سایر پروژه‌های انجام شده در این زمینه نیز این باشد

<sup>۱</sup>domain

شرایط مرزی در نظر گرفته شده در این روش مطابق با جدول زیر می‌باشد.

که در این شبیه‌سازی، دو چرخش بصورت همزمان وجود دارد، درحالی‌که در توربین‌های بادی ایرفویلی تنها چرخش خود توربین در نظر گرفته شده و خود ایرفویل چرخشی حول محور خود ندارد.

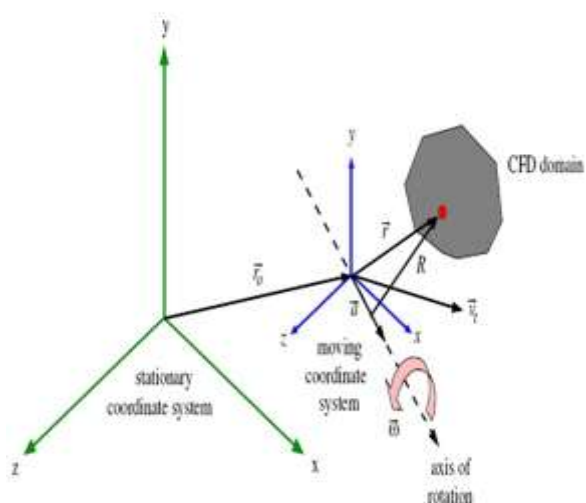
جدول (۳): شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای توربین مدل‌سازی شده به روش اول

Domain 1	شرط مرزی	توضیح
inlet	inlet	شرط مرزی سرعت ثابت
outlet	outlet	شرط مرزی فشار ثابت
wall	opening	دیواره جانبی میدان خارجی با شرط مرزی فشار ثابت
periodic	periodic	دیواره‌های میانی با شرط مرزی پرئودیک

Domain 2	شرط مرزی	توضیح
Cylinder 1	wall	چرخش با یک سرعت زاویه ای ثابت
Cylinder 2	wall	چرخش با همان سرعت زاویه ای استوانه دیگر اما در خلاف جهت چرخش آن

از روش سرعت نسبی استفاده شده است.

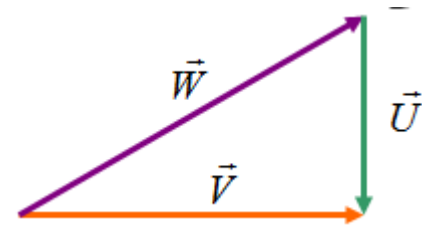
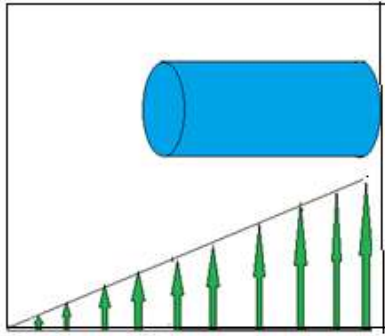


شکل (۴): دستگاه مختصات مورد استفاده در روش سرعت نسبی

لازم بذکر می‌باشد که میدان خارجی یک میدان ساکن در نظر گرفته شده است، در حالی‌که میدان داخلی یک میدان چرخشی با سرعت زاویه‌ای ثابت می‌باشد، که جهت چرخش آن بر اساس جهت چرخش استوانه‌ها و در پی آن نیروی لیفت ایجاد شده توسط آنها تعیین می‌شود. هم‌چنین جهت تطابق دو میدان داخلی و خارجی در نظر گرفته شده، از شرط مرزی interface بر روی صفحات تشکیل دهنده میدان داخلی استفاده شده است.

## ۲-۲ روش دوم

در این روش بجای استفاده از دو میدان، تنها از یک میدان خارجی استفاده شده است و دیگر میدان داخلی وجود ندارد و جهت شبیه‌سازی چرخش توربین و هوای در برگیرنده اطراف آن



شکل (۵): بردارهای سرعت در روش سرعت نسبی

(۱)

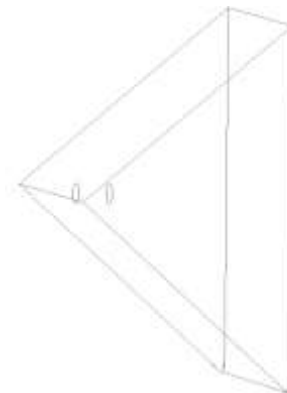
$$V_{\infty} = w + U \rightarrow V_{\infty} = w + R_{rt}\Omega \rightarrow w = V_{\infty} - R_{rt}\Omega$$

در واقع در این روش در ورودی میدان، علاوه بر یک سرعت ثابت عمود بر استوانه که معرف سرعت باد می‌باشد، سرعت  $v = R_{rt}\Omega$  را نیز داریم که بواسطه چرخش استوانه در هوای اطراف آنها بوجود می‌آید. بنوعی با استفاده از این روش می‌توان از در دسرهای دو چرخش همزمان که در روش اول وجود داشت و مشکلاتی را در رابطه با مش زدن شکل ایجاد می‌نمود، رهایی یافت و تا حد بسیار زیادی استفاده از این روش آسان‌تر بوده و زمان کمتری را جهت طراحی هندسه و مش زدن شکل می‌گیرد. در شکل (۶) پروفیل سرعت در نظر گرفته شده برای  $R_{rt}\Omega$  در ورودی نشان داده شده‌است که با ترکیب با سرعت جریان باد، سرعت نسبی مورد نظر را ایجاد می‌نمایند.

شکل (۶): پروفیل سرعت در نظر گرفته شده برای  $R_{rt}\Omega$  در روش سرعت نسبی

لازم بذکر می‌باشد که جهت ایجاد سرعت  $R_{rt}\Omega$  معادله‌ای نوشته شده‌است، که بر اساس آن سرعت را برای تک تک نقاط میدان بر اساس فاصله آن تا صفحه متقارن حساب می‌کند، بصورتی که فاصله هر نقطه ( $X$ ) را در  $\Omega$  ضرب نموده تا سرعت آن نقطه بدست آید. پس از رسیدن به انتهای استوانه نیز سرعت ثابت شده و برابر با  $R_{rt}\Omega$  در نظر گرفته می‌شود.

البته لازم بذکر می‌باشد که در این روش نیز جهت سادگی کار تنها یک چهارم از شکل در نظر گرفته شده‌است و با استفاده از شرط مرزی پرئودیک بین صفحات واسطه، قسمت‌های دیگر توربین نیز شبیه‌سازی شده‌است و می‌توان با چهار برابر نمودن نتایج بدست آمده برای یک نیمه، نتایج مورد نظر را برای کل هندسه بدست آورد. (شکل ۷).



شکل (۷): مدل در نظر گرفته شده برای یک چهارم از توربین به روش دوم

شرایط مرزی در نظر گرفته شده در این روش مطابق با جدول (۴) می باشد.

جدول (۴) : شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای توربین مدل سازی شده به روش دوم

Domain 1	شرط مرزی	توضیح
inlet	inlet	یک سرعت ثابت $u$ در جهت عمود بر استوانه ها ( بعنوان سرعت باد ) و یک سرعت $v = R_{rt}\Omega$
outlet	outlet	شرط مرزی فشار ثابت
wall	opening	دیواره جانبی میدان با شرط مرزی فشار ثابت
periodic	periodic	در صفحات واسطه جهت حل متقارن مساله
Cylinder	wall	چرخش با یک سرعت زاویه ای ثابت

در جدول (۵) به ترتیب هندسه در نظر گرفته شده و شرایط مساله ذکر شده است.

## ۳-۲ مقایسه نتایج بدست آمده در این پژوهش با نتایج

### تجربی برای توربین ۴ پره ای

جدول (۵) : هندسه و شرایط در نظر گرفته شده برای محاسبه توان توربین آزمایش شده

پارامتر	اندازه ( سانتی متر )
قطر استوانه ها	۱۰
طول استوانه ها	۱۴
قطر روتور	۴۹

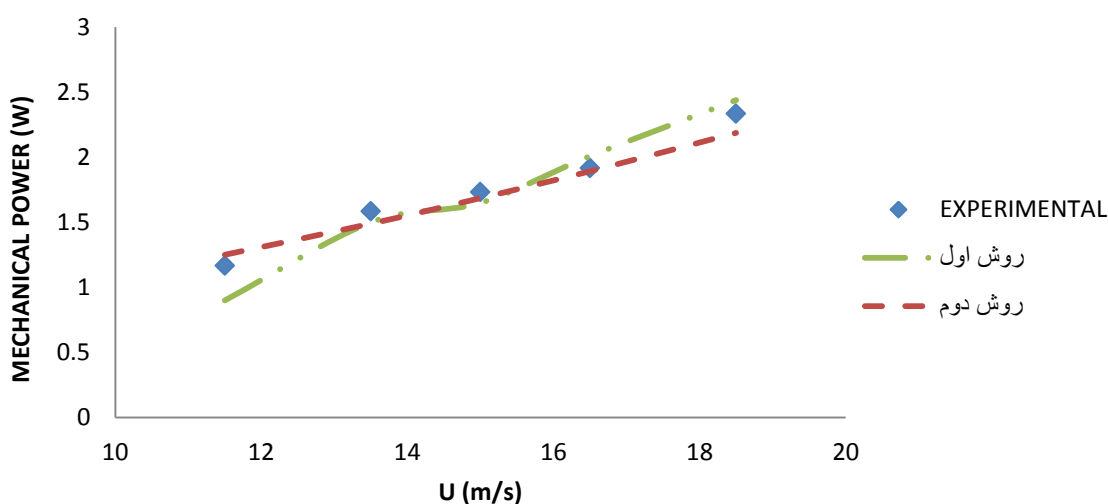
  

پارامتر	اندازه ( رادیان بر ثانیه )
سرعت زاویه ای استوانه ها	۳۱.۴
سرعت زاویه ای توربین	۸.۹۷
مدل توربولانسی	BSL

نتایج بدست آمده از شبیه سازی انجام گرفته به همراه نتایج تجربی موجود، در جدول (۶) فهرست شده است.

جدول (۶): مقایسه بین نتایج بدست آمده در این پروژه با نتایج تجربی

$U_{\infty} \left(\frac{m}{s}\right)$	توان محاسبه شده از شبیه سازی به روش اول (W)	توان محاسبه شده از شبیه سازی به روش دوم (W)	توان محاسبه شده بصورت تجربی (W)
۱۱.۵	۰.۹۰	۱.۲۵	۱.۱۷
۱۳.۵	۱.۵۱	۱.۴۹	۱.۵۹
۱۵	۱.۶۶	۱.۶۹	۱.۷۳
۱۶.۵	۲.۰۱	۱.۸۹	۱.۹۱
۱۸.۵	۲.۴۵	۲.۱۹	۲.۳۶



شکل (۸): مقایسه بین نتایج بدست آمده در این پروژه با نتایج تجربی

جهت بررسی استقلال شبکه در شبیه سازی توربین موردنظر، در سرعت زاویه ای ۱۵ متر بر ثانیه با درشت و ریز نمودن مش و افزایش و کاهش تعداد المان های موجود در شبکه، مقدار توان مجددا محاسبه شده و در جدول (۷) فهرست شده است.

همانطور که ملاحظه می گردد هر دو مدل تا حد زیادی توانایی شبیه سازی این نوع از توربین ها را دارند و نتایج نسبتا قابل قبولی را ارائه می دهند.

جدول (۷): بررسی استقلال شبکه در شبیه سازی انجام گرفته

روش اول	تعداد المان	توان (W)
	مش درشت	۱۴۷۴۲۶
	مش متوسط (مش مورد استفاده در شبیه سازی انجام گرفته)	۲۷۹۰۲۵
	مش ریز	۴۵۲۳۷۲



روش دوم	توان (W)		تعداد المان
	مش درشت	۱.۷۲	۱۱۷۵۰۷
	مش متوسط (مش مورد استفاده در شبیه‌سازی انجام گرفته)	۱.۶۹	۲۶۷۲۱۹
	مش ریز	۱.۶۵	۴۴۹.۷۷

این رابطه عدد ۰.۱۷۵ معرف فاصله مرکز استوانه‌ها تا محور دوران روتور و  $V$  سرعت چرخشی استوانه‌ها یعنی  $r\omega$  می‌باشد. در جدول (۸) و شکل (۹) تاثیر افزایش سرعت زاویه‌ای استوانه‌ها بر روی ضریب توان در سرعت باد ( $1 \cdot \frac{m}{s}$ ) نشان داده شده است.

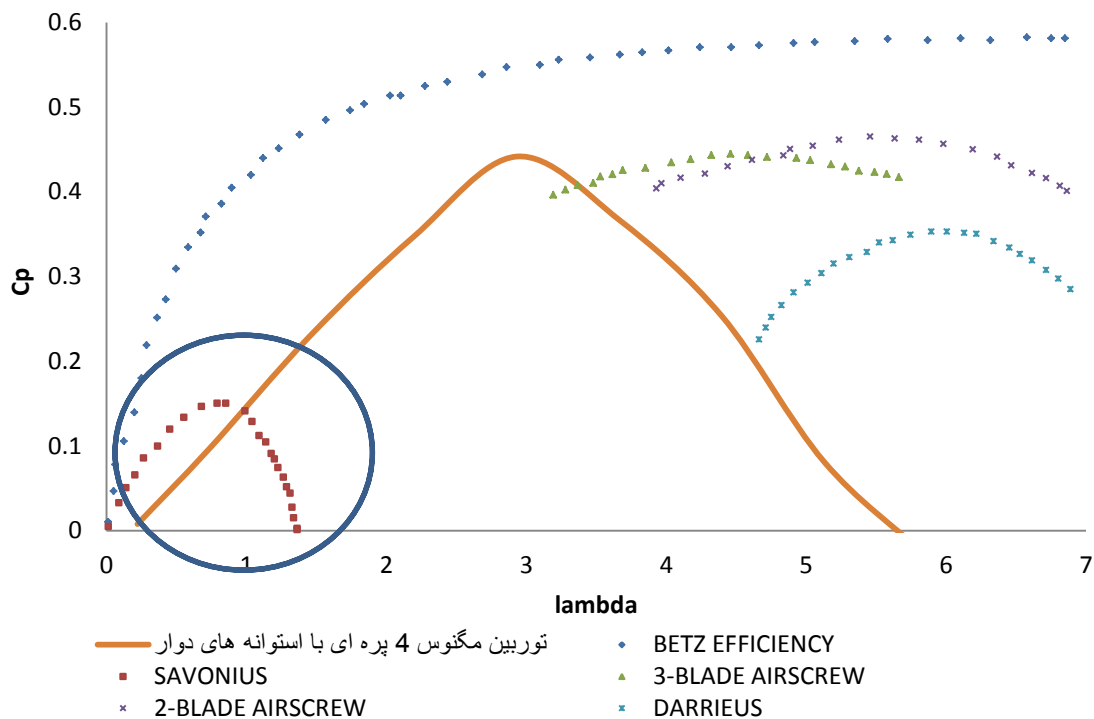
با توجه به نتایج موجود در جدول (۷) مشاهده می‌شود که مقدار توان بدست‌آمده با تغییر تعداد المان‌ها و ریز یا درشت نمودن شبکه تغییر محسوسی نمی‌کند و حل انجام‌گرفته تا حد بسیار زیادی مستقل از شبکه می‌باشد.

از دیگر نتایج بدست‌آمده در این پروژه، تاثیر سرعت زاویه‌ای استوانه‌ها بر روی پارامتر ضریب توان می‌باشد.

با توجه به رابطه موجود بین سرعت زاویه‌ای استوانه‌ها و روتور ( $\Omega = \frac{V}{0.175}$ )، با افزایش سرعت زاویه‌ای استوانه‌ها، سرعت روتور نیز افزایش می‌یابد و تاثیر این پارامترها بر روی ضریب توان در جدول (۸) نشان داده شده است. قابل ذکر می‌باشد که در

جدول (۸):  $C_p$  محاسبه شده برای توربین مدل‌سازی شده بر حسب سرعت زاویه‌ای استوانه‌ها در  $V_{\infty} = 10 \frac{m}{s}$

$\omega$ (rpm)	$\Omega$ (rpm)	$\lambda = \frac{R_{rt}\Omega}{V_{\infty}}$	$C_p = \frac{P_{rt}}{1/2 \rho A V_{\infty}^3}$
۳۰۰	۸۵.۷۱	۰.۲۲	۰.۰۰۷۷
۱۰۰۰	۲۸۵.۷۱	۰.۷۳	۰.۰۹۶
۲۰۰۰	۵۷۱.۴۲	۱.۴۷	۰.۲۳
۳۰۰۰	۸۵۷.۱۴	۲.۲۰	۰.۳۵
۴۰۰۰	۱۱۴۲.۵۸	۲.۹۳	۰.۴۴
۵۰۰۰	۱۴۲۸.۵۷	۳.۶۶	۰.۳۷
۶۰۰۰	۱۷۱۴.۲۸	۴.۴۰	۰.۲۵
۷۰۰۰	۲۰۰۰	۵.۱۳	۰.۰۸۱
۸۰۰۰	۲۲۸۵.۷۱	۵.۸۶	-۰.۰۳



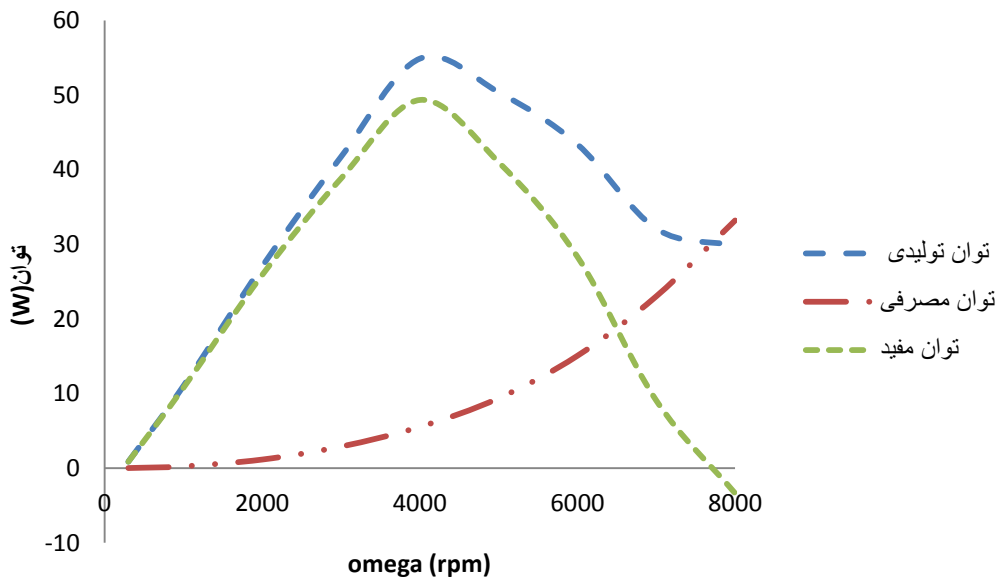
شکل (۹):  $C_p$  محاسبه شده برای توربین مدل سازی شده بر حسب سرعت زاویه ای استوانه ها در  $V_{\infty} = 10$

رواج یافته اند را توربین های مناسبی دانست. البته با توجه به محدودیت های موجود، می توان ماکزیمم سرعت در نظر گرفته شده برای استوانه را  $2000 \text{ rpm}$  ( $\lambda < 1.5$ )، در نظر گرفت (محدوده ای که در نمودار نیز با یک دایره مشخص گردیده است).

البته بایستی بیان نمود که نمودار **Betz Efficiency** که در این شکل نشان داده شده است، مربوط می شود به بازده بتز که در سال ۱۹۱۹ توسط بتز (فیزیکدان آلمانی) بدست آمد و وی اثبات نمود که یک توربین حداکثر می تواند بازده ای برابر با ۵۹ درصد داشته باشد و در واقع این بازده بعنوان یک بازده ایده آل شناخته می شود.

البته بایستی بیان نمود که این نمودار بر اساس مقدار توان مفید توربین ترسیم شده است. یعنی جهت محاسبه مقدار توان استفاده از آن در رابطه ضریب توان، مقدار توان مصرفی استوانه ها جهت چرخش نیز در نظر گرفته شده و از توان تولیدی کم شده است و بدین ترتیب توان مفید توربین محاسبه شده است. مشاهده می شود که در یک شرایط ایده آل (یعنی در حالتی که نمودار  $C_p$  ماکزیمم خود را داراست)، مقدار  $C_p$  بدست آمده و یا به اصطلاح بازده این نوع خاص از توربین ها تقریباً مقدار مناسبی بوده و این نوع از توربین ها می توانند در این شرایط توان رقابت با سایر توربین های بادی موجود را داشته باشند که با توجه به هزینه های ساخت بسیار پایین تر این نوع از توربین ها در قیاس با توربین های ایرفویلی، می توان این نوع از توربین ها را که به تازگی

در شکل (۱۵) تغییرات مقدار توان تولیدی و مصرفی این توربین در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است که همانطور که گفته شد مشاهده می‌شود که مقدار توان تولیدی، یک روند سهمی‌وار داشته که در  $\omega = 4000 \text{ rpm}$  ماکزیمم مقدار خود را دارا می‌باشد، اما مقدار توان مصرفی همواره رو به افزایش بوده تا جایی که در  $\omega = 8000 \text{ rpm}$ ، تقریباً مقدار توان تولیدی توربین با مجموع توان مصرفی استوانه‌ها برابر شده و منجر به کاهش مقدار  $C_p$  تا صفر می‌شود.

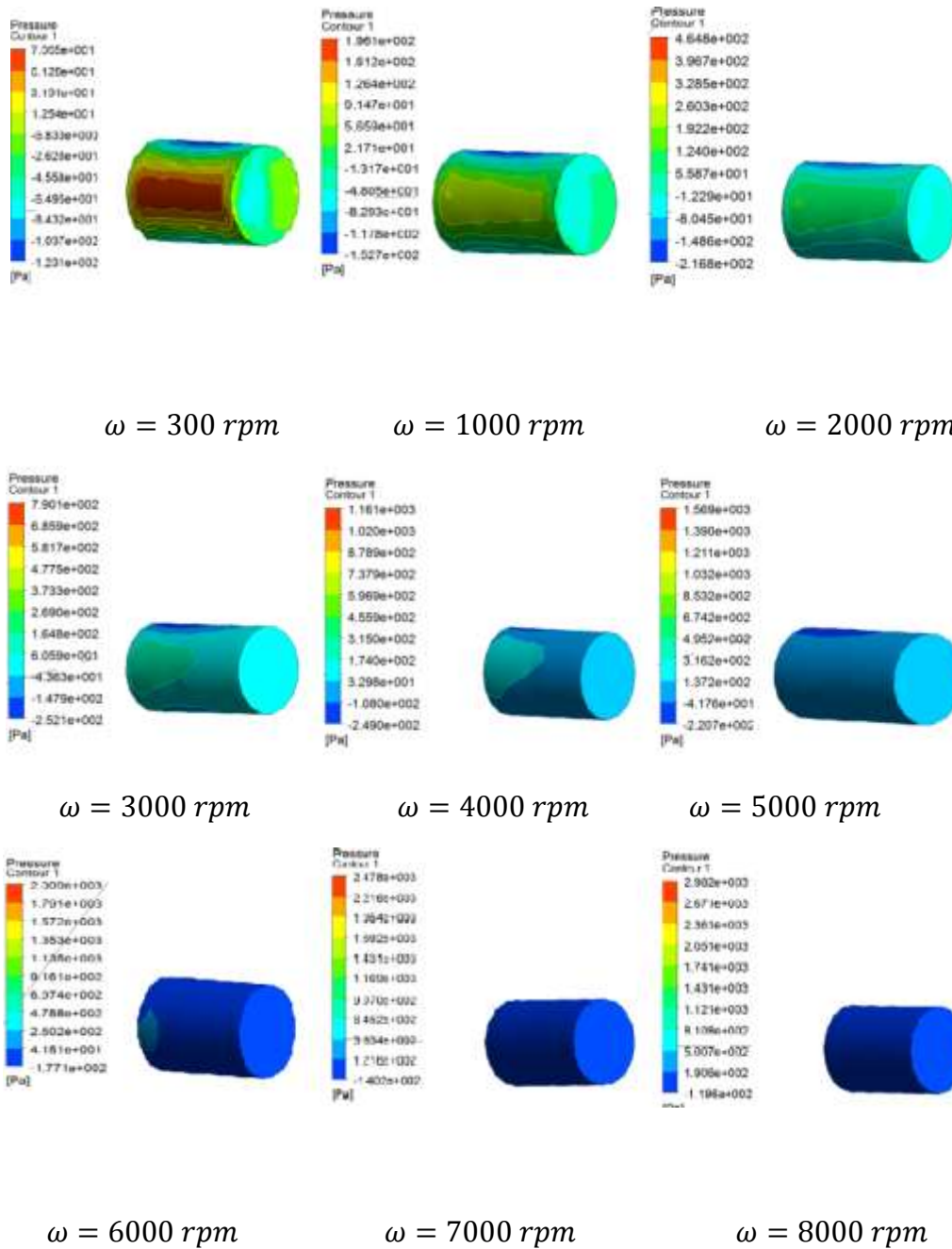


شکل (۱۰): نمودار توان تولیدی، توان مصرفی و توان مفید توربین در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف استوانه

از جمله نقاط قابل توجه در این نمودار سیر نزولی این نمودار بعد از  $\lambda = 3$  و نهایتاً رسیدن مقدار  $C_p$  به صفر در  $\lambda$  های بالاتر می‌باشد که علت این موضوع را می‌توان در دو دلیل جستجو کرد: ۱- کاهش فشار وارده بر استوانه بواسطه یکنواخت شدن سرعت جریان بر روی آن پس از  $\omega = 4000 \text{ rpm}$ ، که منجر به کاهش گشتاور و نهایتاً توان تولیدی استوانه‌ها با افزایش سرعت دورانی آنها می‌شود.

۲- افزایش مقدار توان مصرفی استوانه‌ها با افزایش سرعت دورانی آنها که یک نتیجه کاملاً منطقی می‌باشد.

در شکل (۱۱) کانتور فشار بر روی استوانه (بعنوان پره توربین)، در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف و سرعت باد  $10 \frac{m}{s}$  نشان داده شده‌است.



شکل (۱۱): کانتور فشار بر روی استوانه (بعنوان پره توربین) در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف استوانه

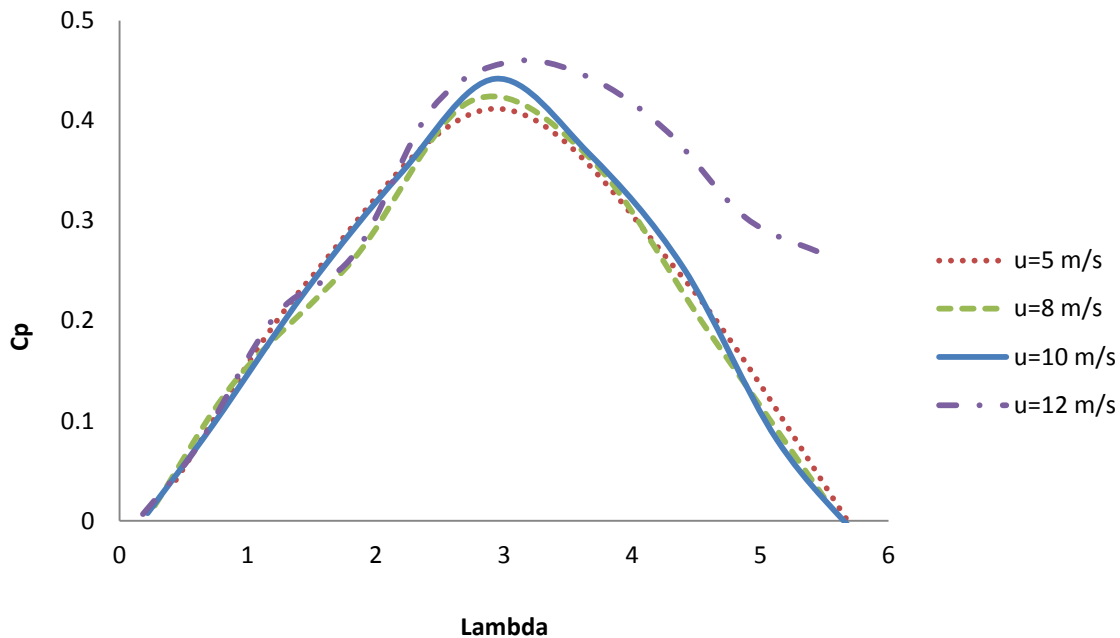
از دیگر نکات قابل توجه در این شکل، حرکت مرکز پرفشار استوانه به سمت چپ آن یعنی به سمت محور دوران روتور می‌باشد، تا جاییکه در  $\omega = 5000 \text{ rpm}$  تقریباً فشار از روی استوانه برداشته شده و سطح استوانه دارای یک فشار یکنواخت

با دقت بر روی کانتورهای فشار بر روی استوانه، مشاهده می‌شود که مینیمم فشار همواره در بالای استوانه بوده که علت آن را می‌توان ماکزیمم بودن سرعت جریان در آن مکان؛ بواسطه هم‌جهتی سرعت دورانی استوانه با سرعت جریان باد؛ دانست.

اختلاف فشار؛ که عامل اصلی ایجاد نیروی لیفت و تولید توان می‌باشد؛ نام برد.

جهت ترسیم نمودار  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  برای سرعت‌های باد متفاوت، در این مرحله از انجام پروژه، این نمودار برای سرعت‌های باد ۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ رسم شده‌است.

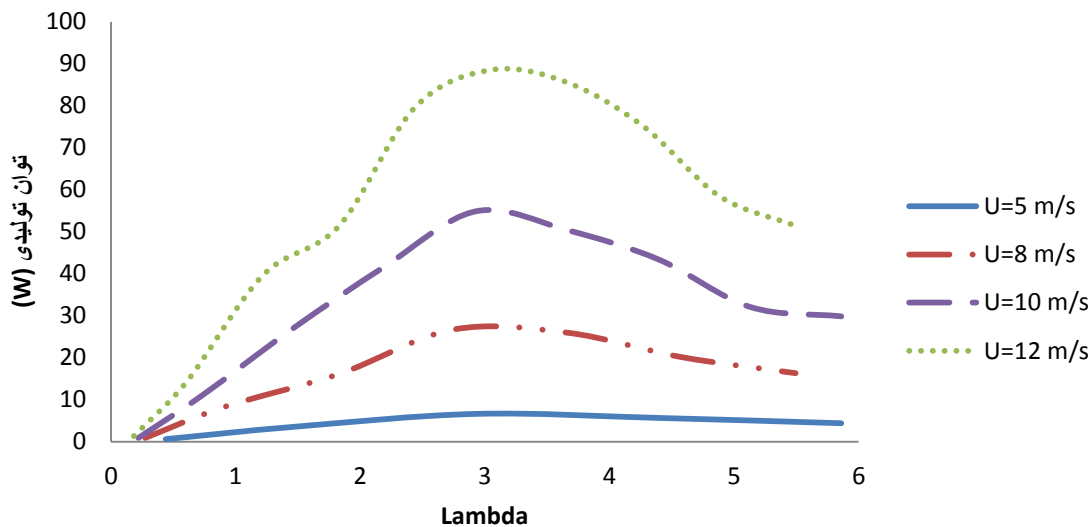
می‌شود. این نکته در خطوط جریان حول استوانه نیز مشهود بود که با رسیدن سرعت دورانی استوانه به  $\omega = 5000 \text{ rpm}$  تقریباً سرعت بر روی استوانه یکنواخت شده و اختلاف سرعت بر روی آن تا حد زیادی کاهش یافت. در واقع می‌توان عامل اصلی کاهش توان تولیدی توربین بعد از  $\omega = 4000 \text{ rpm}$  را همین یکنواخت شدن سرعت و فشار بر روی استوانه و کاهش



شکل (۱۲): نمودار  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  با تغییر سرعت جریان باد

باد، مقدار توان تولیدی توربین نیز افزایش می‌یابد و از آنجا که در محاسبه مقدار  $C_p$ ، در مخرج کسر سرعت باد با توان ۳ وجود دارد، باعث تعدیل مقدار این پارامتر در سرعت بادهای مختلف می‌شود. در شکل (۱۳) مقدار توان تولیدی توربین در سرعت بادهای مختلف بر حسب پارامتر  $\lambda$  نشان داده شده‌است.

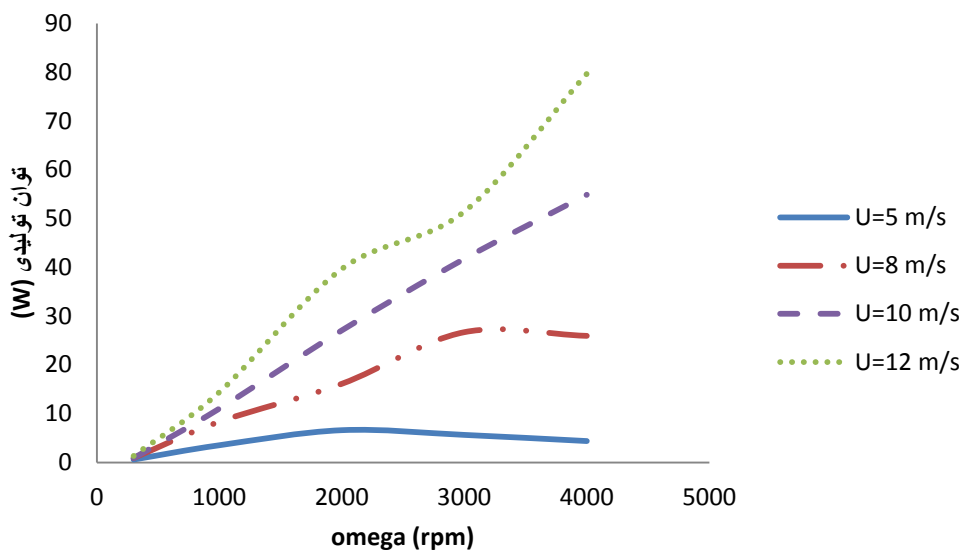
همان‌طور که انتظار می‌رفت، مشاهده می‌شود که در سرعت‌های باد متفاوت این نمودار تقریباً نمودار ثابتی می‌باشد، هر چند با افزایش سرعت جریان باد مقدار ماکزیمم نمودار بصورت جزئی افزایش پیدا می‌کند. البته بایستی دقت نمود که ثابت بودن این نمودارها به معنی یکسان بودن مقدار توان تولیدی آنها در سرعت بادهای متفاوت نمی‌باشد، بلکه همواره با افزایش میزان سرعت



شکل (۱۳): افزایش توان تولیدی توربین با تغییر مقدار سرعت جریان باد

همچنین در شکل (۱۴)، نمودار مقدار توان تولیدی توربین در سرعت‌های باد مختلف بر حسب سرعت زاویه‌ای استوانه‌ها نشان داده شده است که بیان می‌کند با افزایش سرعت باد مقدار توان تولیدی توربین همواره رو به افزایش است.

مشاهده می‌شود که افزایش سرعت جریان باد منجر به افزایش مقدار توان تولیدی می‌گردد، هر چند در تمامی سرعت‌ها نمودار توان تولیدی تقریباً سهمی وار بوده و در  $\lambda = 3$  ماکزیمم مقدار خود را دارد.



شکل (۱۴): تغییرات توان تولیدی توربین با افزایش سرعت زاویه‌ای استوانه (بعنوان پره توربین)

ماکزیمم در هر سرعت بادی برای یک سرعت دورانی استوانه می‌باشد (جدول ۹).

نکته قابل توجه در اینجا این است که ماکزیمم ضریب توان در تمامی سرعت‌های باد، تقریباً در  $\lambda = 3$  اتفاق می‌افتد، که این مقدار

جدول (۹): رابطه بین سرعت جریان باد و سرعت دورانی استوانه که ماکزیمم ضریب توان در آن اتفاق می‌افتد

$U_{\infty} (\frac{m}{s})$	$\lambda$	$C_{pmax}$	$\omega$ (rpm)	$\Omega$ (rpm)
۵	۲.۹۳	۰.۴۱۲	۲۰۰۰	۲۰۹.۳۳
۸	۲.۷۵	۰.۴۲۰	۳۰۰۰	۳۱۴
۱۰	۲.۹۳	۰.۴۴۲	۴۰۰۰	۴۱۸.۶۶
۱۲	۳.۰۵	۰.۴۵۹	۵۰۰۰	۵۲۳.۳۳

شبیه‌سازی شده‌است. مقایسه بین نتایج تجربی موجود و نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی، صحت شبیه‌سازی انجام‌گرفته را تایید می‌نماید. نهایتاً نمودار  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  که بعنوان نمودار بازده توربین نیز معرفی می‌شود برای این نوع توربین ترسیم شده‌است، که این نمودار بیان می‌کند این نوع از توربین‌ها در یک شرایط ایده‌آل و در سرعت چرخش نسبتاً بالای استوانه‌ها بازده نسبتاً خوبی را در قیاس با سایر توربین‌های بادی موجود داشته و با توجه به هزینه‌های ساخت بسیار کمترشان توانایی رقابت با آنها را دارند.

البته بایستی ذکر نمود که روند افزایش سرعت دورانی استوانه‌ها در این حالت، مانند حالت قبل و با افزایش  $1000 \text{ rpm}$  در هر مرحله نسبت به مرحله قبل می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت باد، ماکزیمم ضریب توان برای سرعت‌های دورانی بالاتری اتفاق می‌افتد.

### ۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش توربین بادی مگنوس با استوانه‌های دوار بجای پره که بخاطر هزینه‌های نسبتاً پایین آنها بسیار رواج یافته است، توسط نرم‌افزار ANSYS CFX و در قالب دو مدل مختلف

### منابع

- [1] Afgan. N.H, Gobaisi. D.A.,Carvalho. M.G, Cumo.M, "Sustainable energy development, Renewable and Sustainable Energy Reviews", pp. 235–286, 1998
- [2] Paish.O, Micro-hydropower: "status and prospects, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", Part A – Journal of Power and Energy, pp. 31–40, 2002
- [3] Voros. N.G,Kiranoudis. C.T, Maroulis. Z.B, "Short-cut design of small hydroelectric plants, Renewable Energy", pp. 545–563, 2000
- [4] Montanari.R, "Criteria for the economic planning of a low power hydroelectric plant, Renewable Energy", pp. 2129–2145, 2003
- [5]Anagnostopoulos. J.S, Papanonis. D.E, "Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant, Energy Conversion and Management", 2663–2670, 2007

- [6] Alexander. K.V, Giddens. E.P, “Microhydro: cost-effective, modular systems for low heads, Renewable Energy”, pp. 1379–1391, 2008
- [7] Giudice.F, Rosa. G. La, “Design, prototyping and experimental testing of a chiral blade system for hydroelectric microgeneration, Mechanism and Machine Theory”, pp. 1463–1484, 2009
- [8] United States Patent, *Magnus air turbine system*. Patent No. US 4366386 (1982).
- [9] United States Patent, *Magnus effect horizontal axis wind turbine*. Patent No. US 6375424 B1 (2002).