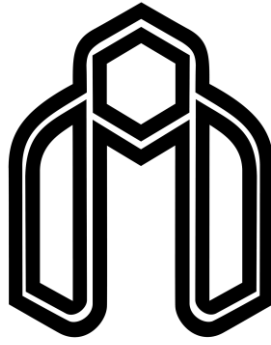


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک  
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا-آیرودینامیک

بررسی آزمایشگاهی امکان سنجی افزایش راندمان توربین های بادی

با توان کمتر از ۱۰۰۰ وات

نگارنده: شاهین قائد

استاد راهنما

دکتر علی خالقی

بهمن ۱۳۹۸

## تقدیم اثر

اثری کوچک است، خیلی کوچک و شاید هیچ؛

اما به یاد عهد قدیم و رسم ندیم، تقدیم می شود به:

اولین و مهربان‌ترین آموگار زندگی ام، پروردگار یگانه ام؛

تقدیم می شود به پدر، مادر و خواهر عزیزتر از جانم؛ آنان که امروز، بیشتر از دیروز و

نه به اندازه‌ی فردا،

دوستشان دارم...

تقدیم به خانواده‌ی عزیزم.

## تشکر و قدردانی

از خدای متعال سپاس گزارم که توفیق کسب علم و دانش را به من عطا فرمود تا بتوانم این مرحله از علم آموزی را با موفقیت به پایان برسانم. از خانواده‌ی عزیزم به خاطر حمایت‌ها و محبت‌های بی‌دینگی که نسبت به من داشته و دارند، کمال تشکر و سپاس را دارم. از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر علی خالقی به خاطر راهنمایی‌های ارزشمند و زحمات ایشان در کلیه‌ی مراحل انجام پایان‌نامه تقدیر و تشکر می‌نمایم. همچنین از پدر عزیزم مهندس منوچهر قاند از آقای مهندس مسعود حیدری و دوستانم دکتر سید محمد حسن تقوی و مهندس سلمان تظافتی به پاس زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند ایشان در انجام این مطالعه تشکر می‌نمایم.

در انتها از تمامی اساتید محترم دانشکده‌ی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود که توفیق شاگردی‌شان را داشتم، سپاس‌گزاری

نموده از خدای متعال سلامت و توفیق برای ایشان مسألت دارم.

شابین قاند

بهمن ۱۳۹۸



# تعمیر نام

این جانب **شاهین قائد** دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی **مهندسی هوافضا** گرایش **آیرودینامیک** دانشکده‌ی مهندسی **مکانیک و مکاترونیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی بررسی آزمایشگاهی امکان‌سنجی افزایش راندمان توربین‌های بادی با توان کمتر از ۱۰۰۰ وات تحت راهنمایی **دکتر علی خالقی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

توربین‌های بادی محور عمودی به دلیل طراحی ساده و عدم وابستگی به جهت باد، مورد توجه محققان قرار گرفته است. در میان این توربین‌ها، توربین داریوس که مبتنی بر نیروی برا می‌باشد بیشترین بازده را دارد که با مشکل راه‌اندازی خودکار روبرو می‌باشد. هدف پژوهش حاضر، ترکیب توربین داریوس با مکانیزم تغییر گام جهت دستیابی به گشتاور راه‌انداز و محدوده عملکرد مناسب و ایجاد قابلیت خود راه‌اندازی توربین می‌باشد. ابتدا یک مدل از توربین داریوس ساخته شده و به منظور تحلیل عملکرد مکانیزم تغییر گام، سه مدل پره از نوع مستقیم با استفاده از کامپوزیت ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که اعمال مکانیزم سبب ایجاد گشتاور مناسب در سرعت‌های پایین جهت راه‌اندازی توربین می‌شود. در نسبت سرعت نوک پره  $0/77$  درصد افزایش ضریب توان و ضریب گشتاور برای ایرفویل مدل Goe-508 به ترتیب  $33/03\%$  و  $33/33\%$ ، ایرفویل مدل Goe-602  $31/28\%$  و  $30/76\%$  و ایرفویل مدل Naca-2412  $18/93\%$  و  $18/34\%$  بوده است. همچنین نتایج بدست آمده در سرعت‌های مختلف جریان باد نشان می‌دهد که ایرفویل مدل Goe-508 در میان مدل‌های آزمایش شده (Goe-508، Goe-602 و Naca-2412) بیشینه‌ی افزایش درصد ضریب توان و ضریب گشتاور را داشته است.

**کلمات کلیدی:** توربین بادی، توربین محور عمود، توربین داریوس، مکانیزم تغییر گام.





## فهرست مطالب

فهرست اشکال	ل
فهرست علائم	ف
فصل ۱: مقدمه	۱
1-1 مقدمه	۲
۲-۱ تاریخچه استفاده از انرژی باد	۳
۳-۱ آمار جهانی استفاده از انرژی باد	۹
۴-۱ چشم‌انداز انرژی بادی در ایران	۱۱
۵-۱ معرفی توربین بادی	۱۳
۶-۱ انواع توربین‌های بادی	۱۴
۷-۱ توربین‌های بادی محور عمودی	۱۵
۱-۷-۱ توربین بادی محور عمود ساونیوس	۱۶
۲-۷-۱ توربین بادی محور عمودی داریوس	۱۷
۸-۱ مزایای توربین‌های بادی محور عمودی	۲۰
۹-۱ معایب توربین‌های بادی محور عمود	۲۱
فصل ۲: مفاهیم و پیشینه‌ی تحقیق	۲۳
۱-۲ مقدمه	۲۴
۲-۲ اساس کار توربین بادی ساونیوس	۲۴
۳-۲ اساس کار توربین بادی داریوس	۲۵
۴-۲ عوامل و روش مؤثر بر افزایش عملکرد توربین بادی داریوس	۲۶
۱-۴-۲ استفاده از تیغه راهنما	۲۶
۲-۴-۲ تأثیر زاویه حمله ایرفویل	۲۷
۳-۴-۲ بهره‌گیری از مکانیزم تغییر زاویه حمله	۲۹

- ۳۰-۴-۲ استفاده از فلاپ‌های متحرک.....
- ۳۱-۴-۲ بررسی تأثیر صلبیت در توربین بادی.....
- ۳۲-۴-۲ تأثیر ضخامت ایرفویل.....
- ۳۴-۴-۲ تأثیر انحنای ایرفویل.....
- ۳۶-۵-۲ هدف از مطالعه اخیر.....
- فصل ۳: بررسی آیرودینامیک توربین و تعریف مسأله..... ۳۹**
- ۴۰-۱-۳ مقدمه.....
- ۴۰-۲-۳ آیرودینامیکی توربین بادی داریوس.....
- ۴۰-۱-۲-۳ مساحت توربین بادی.....
- ۴۱-۲-۳ بررسی نحوه‌ی تأثیر سرعت جریان ورودی با تغییر گام تیغه.....
- ۴۲-۳-۲ محاسبه‌ی نیروهای برآ، پسا و ضرایب عمودی و مماسی.....
- ۴۳-۴-۲ محاسبه‌ی گشتاور توربین، توان خروجی کل و ضرایب آن.....
- ۴۵-۳-۳ تجهیزات آزمایشگاهی.....
- ۴۵-۱-۳-۳ دستگاه تونل باد.....
- ۴۷-۲-۳-۳ لانه زنبوری.....
- ۴۸-۳-۳ سرعت‌سنج، سیم داغ یا هت‌وایر.....
- ۴۹-۴-۳-۳ پروب سیم‌داغ.....
- ۵۰-۵-۳-۳ پایه پروب یک بعدی.....
- ۵۱-۶-۳-۳ دستگاه جوش سنسور هت‌وایر.....
- ۵۲-۷-۳-۳ مکانیزم انتقال تغییر جهت پایه پروب.....
- ۵۳-۸-۳-۳ بادسنج هت‌وایر اسمارت سنسور مدل AR-866.....
- ۵۴-۹-۳-۳ گشتاورسنج.....
- ۵۵-۱۰-۳-۳ دورسنج (تاکومتر).....
- ۵۶-۴-۳-۳ ستاپ آزمایشگاه.....

۵۷	.....۱-۴-۳ نحوه‌ی ساخت شاسی توربین بادی
۵۹	.....۲-۴-۳ نحوه‌ی ساخت ایرفویل
۶۳	.....۵-۳ جمع بندی:
۶۵	<b>فصل ۴: ارائه و بررسی نتایج</b>
۶۶	.....۱-۴ مقدمه
۶۶	.....۲-۴ ارائه نتایج
۶۶	.....۱-۲-۴ بررسی نتایج تجربی ایرفویل مدل Goe-508
۷۱	.....4-2-2 بررسی نتایج تجربی ایرفویل مدل Goe-602
۷۵	.....۳-۲-۴ بررسی نتایج تجربی ایرفویل مدل Naca-2412
۷۹	.....۳-۴ بررسی تغییرات توان
۸۱	<b>فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها</b>
۸۲	.....۱-۵ بحث و نتیجه‌گیری
۸۳	.....۲-۵ پیشنهادها
۸۴	<b>مراجع</b>

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: قدیمی‌ترین آسیاب بادی در نشتیفان خواف سیستان- ایران معروف به آسباد [۷] ..... ۴
- شکل ۲-۱: قدیمی‌ترین آسیاب بادی محور عمود [۸] ..... ۵
- شکل ۳-۱: آسیاب بادی محور عمودی در چین [۸] ..... ۵
- شکل ۴-۱: آسیاب بادی در اروپا [۹] ..... ۶
- شکل ۵-۱: آسیاب بادی آمریکایی با پره‌های فولادی [۱۰] ..... ۷
- شکل ۶-۱: توربین بادی دو پره‌ای [۱۰] ..... ۹
- شکل ۷-۱: روند افزایش توربین‌بادی در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۰ [۱۷] ..... ۱۰
- شکل ۸-۱: ظرفیت توان تولیدی برق بادی در ۱۰ کشور جهانی در سال ۲۰۱۰ [۱۸] ..... ۱۱
- شکل ۹-۱: چند نمونه از توربین‌های بادی [۲۶] ..... ۱۵
- شکل ۱۰-۱: توربین بادی محور عمودی-ساونیوس [۲۹] ..... ۱۷
- شکل ۱۱-۱: سه مدل از توربین بادی داریوس (الف) داریوس تخم‌مرغی، (ب) اچ روتور، (پ) داریوس مارپیچی [۳۱] ..... ۱۸
- شکل ۱۲-۱: توربین بادی عمودی داریوس مدل تخم‌مرغی [۳۲] ..... ۱۸
- شکل ۱۳-۱: توربین بادی محور عمود داریوس مدل H-rotor یا گیرومیل [۳۳] ..... ۲۰
- شکل ۱-۲: (a) یک روتور توربین بادی ساونیوس دوطرفه معمولی- (b) نیروهای وارد بر روتور توربین بادی [۳۶] ..... ۲۵

- شکل ۲-۲: چرخش توربین بادی محور عمودی - مدل داریوس براساس نیروی برآ [۳۷].  
 ۲۵ .....
- شکل ۳-۲: استفاده از تیغه‌های راهنما در توربین بادی داریوس [۴۰] ..... ۲۷
- شکل ۴-۲: معرفی مکانیزم تغییر زاویه توربین بادی داریوس با پره‌های مستقیم [۴۲] .. ۲۸
- شکل ۵-۲: (الف) سیستم مختصات مکانیزم تغییر گام تیغه. (ب) تأثیر مکانیزم تغییر گام تیغه بر ضریب قدرت عملکرد توربین بادی داریوس [۴۴] ..... ۳۰
- شکل ۶-۲: روتور توربین داریوس با استفاده از فلپ [۴۵] ..... ۳۱
- شکل ۷-۲: منحنی ضریب توان بر حسب سرعت نوک در صلبیت‌های مختلف [۴۱] ..... ۳۲
- شکل ۸-۲: (الف) نمودار ضریب گشتاور بر حسب سرعت نوک - (ب) ضریب توان بر حسب سرعت نوک ایرفویل [۴۷] ..... ۳۳
- شکل ۹-۲: نمایی از اجزایی تشکیل دهنده ی یک ایرفویل [۴۸] ..... ۳۴
- شکل ۱۰-۲: تأثیر منحنی ایرفویل در توربین بادی داریوس مقایسه با ایرفویل متقارن و غیرمتقارن [۴۹] ..... ۳۵
- شکل ۱-۳: مؤلفه‌های سرعت جریان توربین داریوس با پره‌های مستقیم [۴۸] ..... ۴۱
- شکل ۲-۳: نیروهای وارد شده بر ایرفویل توربین بادی مدل داریوس [۴۹] ..... ۴۳
- شکل ۳-۳: شماتیک دستگاه تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود ..... ۴۶
- شکل ۴-۳: دستگاه تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود ..... ۴۷
- شکل ۵-۳: لانه زنبوری با (هانی کامب) در تونل باد ..... ۴۷
- شکل ۶-۳: دستگاه سرعت سنج سیم‌داغ یا (هات‌وایر) ..... ۴۹
- شکل ۷-۳: پایه پروپ مورد استفاده در آزمایشگاه تونل باد ..... ۵۰

- شکل ۳-۸: پایه سنسور هات‌وایر؛ در شکل (الف) سنسور هات‌وایر یک بعدی، در شکل (ب) سنسور هات‌وایر دوبعدی، در شکل (پ) سنسور هات‌وایر سه بعدی ..... ۵۱
- شکل ۳-۹: دستگاه جوش سنسور هات‌وایر ..... ۵۲
- شکل ۳-۱۰: مکانیزم انتقال تغییر جهت پروپ ..... ۵۳
- شکل ۳-۱۱: سنسور هات‌وایر مدل AR-866 ..... ۵۴
- شکل ۳-۱۲: گشتاور سنج (ترکومتر) ..... ۵۵
- شکل ۳-۱۳: تاکومتر یا دورسنج لیزری همراه با رفلکتور ..... ۵۶
- شکل ۳-۱۴: بدنه یا شاسی متحرک، توربین بادی با قسمت‌های نام گذاری شده ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۵: قسمت ثابت بدنه توربین و همراه با قسمت متحرک توربین همراه با سیستم مکانیزم تغییر گام ..... ۵۹
- شکل ۳-۱۶: در قسمت (الف) ایرفویل برش داد شده با وایرکات و در قسمت (ب) دستگاه وایرکات و ترانسفوماتور ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۷: در قسمت (الف) قالب ایرفویل (ب) نحوه‌ی دوغاب کاری ایرفویل (پ) ایرفویل صیقل داده شده و آماده برای فایبرگلاس (ت) فرآیند رزین کاری و چسباندن الیاف پشم شیشه ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۸: الیاف پشم شیشه برای فایبرگلاس ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۹: سه نوع ایرفویل نامتقارن ساخت شده از فایبرگلاس (الف) Naca-2412، (ب) Goe-602، (پ) Goe-508 ..... ۶۲
- شکل ۳-۲۰: نمای بالای توربین بادی محور عمود در حالت بدون مکانیزم تغییر گام ..... ۶۲
- شکل ۳-۲۱: نمای بالای توربین بادی محور عمود در حالت با مکانیزم تغییر گام ..... ۶۳

شکل ۴-۱: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۶۸

شکل ۴-۲: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۶۸

شکل ۴-۳: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۶۹

شکل ۴-۴: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۶۹

شکل ۴-۵: نمودار تغییرات و ضریب توان بر حسب سرعت نوک پره ..... ۷۰

شکل ۴-۶: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت نوک پره ..... ۷۰

شکل ۴-۷: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۷۲

شکل ۴-۸: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۷۲

شکل ۴-۹: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۷۳

شکل ۴-۱۰: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۷۳

شکل ۴-۱۱: نمودار تغییرات و ضریب توان بر حسب سرعت نوک پره ..... ۷۴

شکل ۴-۱۲: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت نوک پره ..... ۷۴

شکل ۴-۱۳: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۷۶

شکل ۴-۱۴: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۷۶

شکل ۴-۱۵: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۷۷

شکل ۴-۱۶: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش

مختلف ..... ۷۷

شکل ۴-۱۷: نمودار تغییرات و ضریب توان بر حسب سرعت نوک پره

شکل ۴-۱۸: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت نوک پره

شکل ۴-۱۹: توان خروجی توربین بر حسب سرعت باد

..... ۸۰



# فهرست علائم

$A$	مساحت ناحیه جاروب شده بر حسب $m^2$
$TSR$	نسبت سرعت نوک پره
$L$	طول پره توربین بر حسب $m$
$N$	تعداد پرها
$T$	گشتاور بر حسب نیوتن بر متر
$H$	ارتفاع توربین بر حسب $m$
$C$	طول وتر بر حسب $m$
$R$	شعاع روتور بر حسب $m$
$P$	توان بر حسب $W$
$W$	سرعت نسبی جریان
$L$	نیروی برآ
$D$	نیروی پسا
$V_{\infty}$	سرعت جریان آزاد
$F_t$	نیروی مماسی
$F_n$	نیروی عمودی
$V_c$	سرعت وتری
$V_n$	سرعت عمومی

$C_T$	ضریب گشتاور
$C_p$	ضریب توان
$C_t$	ضریب نیروی مماسی
$C_n$	ضریب نیروی عمودی
$C_d$	ضریب پسا
$C_l$	ضریب برا
$\omega$	سرعت دورانی
$\sigma$	ضریب صلبیت (استحکام)
$\theta$	زاویه‌ی چرخشی روتور توربین
$\alpha$	زاویه حمله
$\rho$	چگالی هوا بر حسب $Kg/m^3$

# فصل ۱ : مقدمه

امروزه انرژی بادی به خاطر مسائلی همچون آلودگی‌های زیست‌محیطی، گران‌بودن و تجدیدنپذیر بودن سوخت‌های فسیلی، به یکی از منابع اصلی کشورهای توسعه یافته برای تولید برق تبدیل شده است. آنچه اکنون به‌عنوان بزرگ‌ترین مشکل، جهان بشری را تهدید می‌کند کمبود انرژی و آلودگی هوا بر اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی است. برای رفع این دو معضل بزرگ از مدت‌های پیش پژوهشگران و دانشمندان مطالعه و تحقیق برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر<sup>۱</sup> و پاک را شروع کرده‌اند. تولید برق، انرژی تجدیدپذیر در بخش انرژی فعلی مورد توجه قرار گرفته است. هر چند بخش اعظمی از بخش انرژی از سوخت‌های فسیلی مثل زغال‌سنگ، گازهای طبیعی و سایر سوخت‌های فسیلی است. انرژی باد اقتصادی‌ترین و مناسب‌ترین انرژی تجدیدپذیر برای جلوگیری از آلودگی هوا در نظر گرفته می‌شود. این انرژی بادی دو مزیت اصلی دارد که خالی از هرگونه آلودگی برای محیط‌زیست است؛ یکی دیگر از این مزیت فراوانی باد به‌عنوان یک منبع انرژی محسوب می‌شود [۱]. امروزه منابع مختلفی از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد کاربرد قرار گرفته شده است. در این میان می‌توان منابع زیست‌توده، انرژی خورشیدی، زمین‌گرمایی و هیدروالکتریک می‌توان نام برد؛ که در این میان انرژی باد از نظر اقتصادی، ارزان‌قیمت‌ترین انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شود [۲]. از این رو تلاش‌های گسترده‌ای در زمینه تحقیق و بهینه‌سازی تولید برق از طریق توربین‌های بادی به‌دست می‌آید. جهان انرژی پتانسیل عظیمی از انرژی باد را که می‌توان از آن برای تولید انرژی برق استفاده کرد را دارا است. رشد جمعیت و پیشرفت فناوری در سال‌های اخیر باعث افزایش انرژی بادی شده است. از طرفی مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی منجر به کاهش ذخایر نفتی و آلودگی بیش از حد هوا و افزایش گازهای گلخانه‌ای گردیده است که نهایتاً باعث افزایش دمای سطح کره‌ی زمین شده است؛ بنابراین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر امری مهم و ضروری هست. انرژی باد از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر

---

<sup>۱</sup> Renewable Energiges

بوده که با توجه به راهبردهای صرفه‌جویانه و نگرش‌های زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است. براساس اطلاعات سازمان انرژی نو ایران (سانا)، استفاده از انرژی باد در طول سالیان اخیر بیشترین رشد را در مقایسه با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر تجربه کرده است و توربین‌های بادی هر روز بهبود یافته و با ظرفیت توان‌های بالاتر به بازار عرضه می‌گردند [۳].

توربین‌های بادی از جمله سازه‌هایی می‌باشند که با تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی موجود در پره توربین سبب چرخش محور شده و در نهایت با انتقال نیروی دورانی به ژنراتور و تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی بخشی از انرژی مورد استفاده‌ی شبکه برق را تأمین می‌کنند. توربین‌های بادی براساس جهت محور چرخش به دو دسته محور افقی<sup>۱</sup> و محور عمودی<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند که نوع محور افقی آن‌ها رایج‌تر است. در ادامه به اختصار چگونگی عملکرد این نوع توربین‌های بادی ارائه شده است.

## ۱-۲ تاریخچه استفاده از انرژی باد

انرژی باد هزاران سال برای آسیاب غلات، اره کردن و سایر کاربردهای مکانیکی به کار می‌رفت. امروزه چند صد هزار آسیاب بادی در سراسر جهان وجود دارد که بسیاری از آن‌ها برای پمپاژ آب کاربرد دارند؛ همچنین جهت تولید الکتریسیته بدون آلودگی در زمان حاضر مورد توجه قرار گرفته است [۴]. آغاز استفاده از انرژی باد (۱۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح تا ۱۳۰۰ سال بعد از میلاد مسیح) و تاریخچه انرژی بادی یک سیر تکاملی را به استفاده از قطعات سبک و ساده برای به حرکت در آوردن پره‌ها به وسیله نیروی پسا<sup>۳</sup>، به جای قطعات سنگین پیش گرفته است تا استفاده از قطعات سبک و مواد آیرودینامیکی با بازده زیاد در دوران مختلف رواج پیدا کرده است [۵]؛ اما نباید این‌گونه

---

<sup>۱</sup> Horizontal

<sup>۲</sup> Vertical

<sup>۳</sup> Drag

پنداشت که نیروی برآ<sup>۱</sup> یک مفهوم جدید، برای باستانیان ناشناخته بوده است. اولین استفاده شناخته شده از انرژی باد مربوط به کاربرد آن در قایق‌های بادبانی است و این فناوری نقش بسیار مهمی در توسعه آسیاب‌های بادی دارد. هرچند ملوانان باستانی نیروی برآ را می‌شناختند و روزانه از آن استفاده می‌کردند اما هیچ توضیحی علمی برای آن نداشتند. اولین آسیاب‌های بادی برای آسیاب کردن غلات و پمپاژ آب به کار گرفته شده است و قدیمی‌ترین مدل طراحی شده آن از نوع محور عمودی بوده که در طی سال‌های ۹۰۰-۵۰۰ میلادی در ایران توسعه یافته است [۶]. ظاهراً اولین استفاده از این آسیاب‌ها برای پمپاژ آب بوده است ولی نحوه دقیق کار آن معلوم نیست زیرا هیچ گونه طراحی و یا نقاشی از این آسیاب‌ها موجود نیست. نخستین مستندات ارائه شده مربوط به طراحی این آسیاب‌های بادی نیز مربوط به ایرانیان است که پره‌های آن یا اصطلاحاً بادبان‌های آن‌ها از جنس چوب و یا نی بوده که مطابق شکل ۱-۱ با تیرهای افقی به یک محور عمودی متصل می‌شدند [۷].



شکل ۱-۱: قدیمی‌ترین آسیاب بادی در نشتیفان خواف سیستان - ایران معروف به آسباد [۷]

---

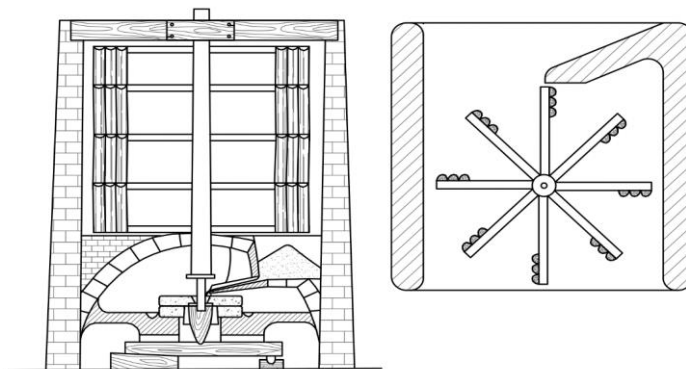
<sup>۱</sup> Lift

آسیاب نمودن غلات اولین استفاده مستند و بسیار ساده آسیاب‌های بادی است، به طوری که سنگ آسیاب به همان محور عمودی متصل بوده و مانند شکل ۲-۱ کلیه قسمت‌های آسیاب‌های بادی معمولاً در داخل یک ساختمان محصور شده است. ورودی ساختمان در جهت وزش باد قرار دارد تا باد بتواند از داخل ساختمان عبور کند [۸].



شکل ۲-۱: قدیمی‌ترین آسیاب بادی محور عمود [۸]

آسیاب‌های بادی محور عمودی در چین مطابق شکل ۳-۱ مورد استفاده قرار می‌گرفتند و چینی‌ها ادعای تخصیص این نوع آسیاب‌ها را به زادگاه خود دارند. این در حالی است که به طور دقیق می‌توان گفت اولین مستندات آن‌ها مربوط به سال ۱۲۱۹ میلادی هست که توسط یک سیاستمدار چینی به نام Yehlu Chhu-Tshai اختراع شده است. در این کشور هم اولین کاربردهای آسیاب بادی برای آرد نمودن غلات و پمپاژ آب بوده است [۸].



شکل ۳-۱: آسیاب بادی محور عمودی در چین [۸]

یکی از موفق‌ترین کاربردهای انرژی بادی پمپاژ آب برای محصولات کشاورزی و دامداری است که در حال حاضر مورد استفاده‌ی گسترده قرار دارد. اولین آسیاب بادی در غرب اروپا از نوع محور افقی مانند شکل ۴-۱ بوده است [۹].



شکل ۴-۱: آسیاب بادی در اروپا [۹]

تبدیل توربین‌های بادی محور عمودی که توسط ایرانیان طراحی شده بودند به توربین‌های بادی محور افقی به این دلیل بوده است که راندمان نیروی پسا توربین‌های بادی محور افقی بیشتر از توربین‌های بادی محور عمودی است. اولین آسیاب‌های بادی، ۴ پره چوبی داشتند که بیشتر آن‌ها دارای اهرمی در پشت خود بودند تا پره‌ها را به سمت جهت وزش باد بچرخانند ولی آن‌ها برج‌های‌شان را در مسیر جهت باد برپا می‌کردند. مهم‌ترین رویداد در آسیاب‌های بادی استفاده از پره‌های فولادی در سال ۱۸۷۰ در آمریکا بوده است (شکل ۵-۱). چرا که پره‌های فولادی سبک‌تر و به شکل ایرودینامیکی ساخته شده است. بین سال‌های ۱۸۵۰ تا ۱۹۷۰ در حدود ۶ میلیون توربین بادی کوچک تنها در آمریکا ساخته و نصب شده است [۱۰]. استفاده اولیه آن‌ها برای پمپاژ آب به منظور تهیه آب مورد نیاز آبیاری مزارع و خانه‌ها بوده است. در اواخر قرن ۱۹ میلادی میزان برق تولیدی این آسیاب بادی ۱۲ کیلوواتی با روتور ۱۷ متری در مقابل توربین‌های بادی مدرن با این قطر روتور و ظرفیت ۷۰ تا ۱۰۰



کیلوواتی بسیار ناچیز هست. از آن زمان به بعد نام توربین‌های بادی جایگزین آسیاب‌های بادی شده است.



شکل ۱-۵: آسیاب بادی آمریکایی با پره‌های فولادی [۱۰]

اولین آسیاب بادی برای تولید برق طراحی گردید. این آسیاب بادی در سال ۱۸۸۸ میلادی در کلیولند اوهایو توسط چارلز براش<sup>۱</sup> ساخته شده است. روتورهای آسیاب بادی به قطر ۱۷ متر بوده که یک اهرم جانبی برای چرخاندن آن به سمت باد داشته است. اولین آسیاب بادی گیربکسی با نسبت ۱:۵۰ و ژنراتور جریان مستقیم با دور 500rpm ساخته و نصب شده است. با وجود موفقیت نسبی این آسیاب بادی در مدت ۲۰ سال، محدودیت‌هایی نظیر سرعت کم و استحکام بالای روتور برای تولید برق داشت. در سال ۱۸۹۱ میلادی فرد دانمارکی اولین سیستم توربین بادی با پره‌های آیرودینامیکی را طراحی نمود و در بهترین برج آسیاب بادی به کار گرفت [۱۰-۱۱]. سرعت بالاتر حرکت پره‌ها باعث تولید برق بیشتری گردید. با پایان جنگ جهانی دوم استفاده از توربین بادی با توان ۲۵ کیلوواتی در سرتاسر دانمارک رواج پیدا کرد ولی قیمت ارزان‌تر از سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های بخار باعث شد تا استفاده از این آسیاب‌های بادی از رونق بیفتد. اولین توربین‌های بادی کوچک برای تولید برق جریان مستقیم مورد استفاده قرار می‌گرفتند. این توربین‌ها توسط دو شرکت Parris-Dunn و Jacobs

---

<sup>۱</sup> Charles F. Brush

WindElectric برای استفاده در مناطق شهری و روستایی که دسترسی به آن مناطق امکان پذیر نبود ساخته می شدند. کاربرد اولیه توربین های بادی برای روشنایی مزارع و شارژ کردن باتری برای استفاده در رادیو به کار گرفته شد. در سال ۱۹۲۲ توربین های بادی محور عمودی توسط مهندس فنلاندی سیگورد یوناس ساوونیوس<sup>۱</sup> اختراع گردید [۱۲]. این توربین های بادی با نیروی پسا کار می کردند و راندمان آن ها پایین بود. در سال ۱۹۲۵ میلادی توربین بادی محور عمود نخستین بار توسط مهندس فرانسوی جیمز جین ماری داریوس<sup>۲</sup> ثبت شده است [۱۳]. در این توربین بادی از نیروی برآ به جای نیروی پسا استفاده می گردید و با دو یا سه پره<sup>۳</sup> آیرودینامیکی به محور مرکزی متصل شده است. راندمان این نوع از توربین های بادی نیز پایین است چرا که نیاز به سرعت بالای باد برای شروع به چرخش دارد. توربین های با ظرفیت بیشتر برای اولین بار در سال ۱۹۳۱ در روسیه توسعه داده شده است. به طوری که توربینی ۱۰۰ کیلوواتی در سواحل دریای خزر در طول ۲ سال در حدود ۲۰۰ هزار کیلووات ساعت برق تولید نمود. پس از آن نیروگاه های بادی در آمریکا، دانمارک، فرانسه، آلمان و انگلستان در طول سال های ۱۹۳۵ تا ۱۹۷۰ با توربین های بادی در مقیاس بزرگ راه اندازی شدند. در سال ۱۹۳۱ میلادی توربین بادی داریوس معروف تخم مرغی توسط مهندس فرانسوی اختراع گردید. بزرگ ترین توربین بادی به ظرفیت ۱/۲۵ مگاوات در سال ۱۹۴۱ در ورمونت نصب گردید (شکل ۱-۶) [۱۴]. این توربین از نوع محور افقی و با ۲ پره با قطر ۵۳/۳ رو به جهت باد ساخته شده است. روتور آن از جنس فولاد ضدزنگ به وزن ۱۶ تن بوده و سیستم کنترل آن روی ۲۸ دور بر دقیقه تنظیم شده است. در سال ۱۹۴۵ تنها بعد از چند صد ساعت کار مداوم یکی از پره ها شکست و علت آن فقط به خاطر فرسودگی و خوردگی فلز آن بوده است [۱۵].

---

<sup>۱</sup> Sigurd Johannes Savonius

<sup>۲</sup> Darrieus

<sup>۳</sup> Blade



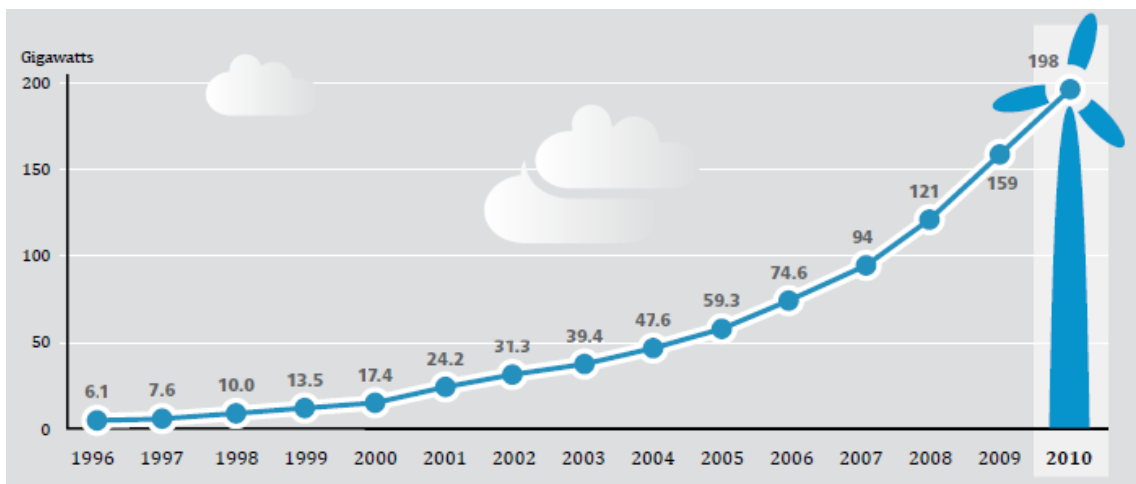
شکل ۱-۶: توربین بادی دو پره‌ای [۱۰]

اما توربین‌های مدرن امروزی بیشتر از نوع محور افقی و با ۳ پره می‌باشند. پره‌های این توربین‌ها بسیار شبیه به بال هواپیما طراحی گردیده و از نیروی برآ استفاده می‌کنند. میزان برق تولیدی آن‌ها به ظرفیت توربین و محل قرارگیری آن مربوط است. اکثر توربین‌های تجاری بین ۱ تا ۲/۵ مگاوات می‌باشند. با توجه به شرایط وزش باد و میزان برق مصرفی خانوارها توربین‌های یک مگاواتی برق مورد نیاز تقریباً ۵۰۰ خانه را تأمین می‌کنند [۱۶].

### ۳-۱ آمار جهانی استفاده از انرژی باد

ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی بادی در طول سال‌های ۲۰۱۰ به مقدار ۳۹ گیگاوات افزایش یافته است. بیشتر از هر فن‌آوری تجدیدپذیر دیگر و بیش از سه برابر تولید شده از انرژی بادی حدود ۱۱/۵ گیگاوات تنها در پنج سال اخیر در سراسر جهان افزایش یافته است. شکل ۱-۷ ظرفیت موجود

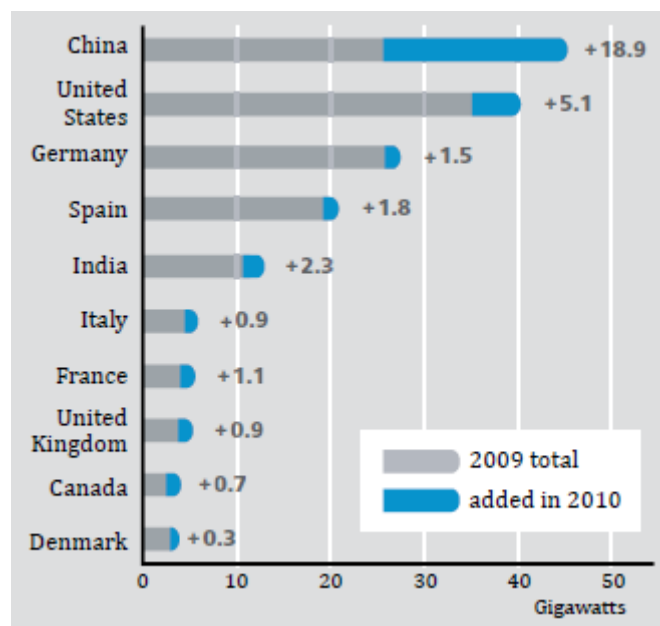
در مقایسه با سال‌های ۲۰۰۹، بیش از ۲۴٪ افزایش یافت و ظرفیت جهانی تا پایان سال ۱۹۸ گیگاوات بود. کشورهای که از این انرژی بادی استفاده می‌کنند به ۵۲ کشور می‌رسید؛ که کل ظرفیت موجود را در طول سال ۲۰۱۰ افزایش داده است؛ و ۸۳ کشور در حال حاضر از انرژی بادی به صورت تجاری استفاده می‌کنند. در بازه‌ی زمانی سال ۲۰۰۵ تا پایان سال ۲۰۱۰، بازار جهانی انرژی بادی به میزان قابل توجهی افزایش یافت و به دلیل رشد روز افزون تقاضای برق در کشورهای اروپایی و ایالات متحده بوده است. در نتیجه، برای اولین بار، اکثر ظرفیت‌های بادی جدید توربین بادی در کشورهای در حال توسعه و بازار نوظهوری به جای بازارهای انرژی سنتی جایگزین شده است [۱۷].



شکل ۱-۷: روند افزایش توربین بادی در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۰ [۱۷]

با افزایش رشد جمعیت جهان در سال ۲۰۱۷ از انرژی‌های تجدیدپذیر که بیشترین افزایش ظرفیت تولید برق تجدیدپذیر و همچنین کاهش هزینه‌ها، افزایش سرمایه‌گذاری و پیشرفت فناوری‌های باعث افزایش ظرفیت تولید برق می‌شود. انرژی‌های تجدیدپذیر از قبیل انرژی آبی، انرژی زیستی و انرژی زمین و گرما به مدت طولانی به‌عنوان منبع اصلی انرژی و هزینه مقرون‌به‌صرفه شده است. انرژی خورشیدی و نیروی باد در حال پیوستن به آن‌ها هستند هر دو در حال حاضر با ظرفیت جدید از سوخت‌های فسیلی موجود و تولید انرژی هسته‌ای نزدیک‌تر می‌شود. در حالی که این پیشرفت‌ها در زمینه‌های انرژی تجدیدپذیر و بخش انرژی گسترده‌تر با چالش‌های متعددی مواجه شده است. رشد قوی اقتصادی جهانی منجر به افزایش ۲/۱ درصدی تقاضای انرژی در سال ۲۰۱۷ شده است بیش از

دو برابر شدن افزایش متوسط در طی پنج سال گذشته با انتشار گاز دی‌اکسید کربن مرتبط با انرژی، به میزان ۱/۴٪ در سال ۲۰۱۷ افزایش یافته است. در برخی از کشورها به جای استفاده از زغال سنگ از انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی و نیروی باد استفاده می‌کنند [۱۸]. اگرچه صنعت برق بادی شاهد افزایش حجم تولید برق در سال ۲۰۰۹ میلادی بوده است، اما ظرفیت تولید در طی سال ۲۰۱۰ میلادی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. در شکل ۸-۱ مشاهده می‌شود که سهم تولید برق از نیروی باد در جهان بیشترین استفاده کننده از این انرژی در سال ۲۰۱۰ با رشد ۱۸/۹٪ در کشور چین رقم خورده است. کم‌ترین سهم از انرژی باد مطلق به کشور دانمارک با رشد کمتر از ۳٪ در سال ۲۰۱۰ ثبت شده است.



شکل ۸-۱: ظرفیت توان تولیدی برق بادی در ۱۰ کشور جهانی در سال ۲۰۱۰ [۱۸].

#### ۴-۱ چشم‌انداز انرژی بادی در ایران

در وزارت نیرو، نصب پنج هزار مگاوات نیروگاه تجدیدپذیر در قانون برنامه پنجم توسعه هدف‌گذاری شده است که از این میزان ۴۵۰۰ مگاوات آن برای توسعه باد در نظر گرفته شده است، می‌توان گفت در پنج سال آینده قریب به چهار هزار مگاوات بازار برای توسعه بخش خصوصی وجود

خواهد داشت [۱۹]. سیاست کلان کشور ایران در چشم انداز برنامه‌های آتی در افزایش نقش بخش‌های غیر دولتی استوار شده است که از جمله فواید و مزایای آن کاستن از حجم و فعالیت‌های تصدی‌گری دولت است. با فعال شدن بخش خصوصی در عرصه احداث نیروگاهی بادی که جذابیت‌های فراوانی برای بخش خصوصی دارد، توان مالی و مدیریتی کشور افزایش می‌یابد و با شروع پروژه‌ها و فعالیت‌های جدید عملاً بخش خصوصی به کمک بخش دولتی آمده و کل کشور از این مشارکت سود خواهد برد [۲۰]. هم‌چنین باید توجه داشت که نیروگاه‌های بادی به سرمایه اولیه بالایی نیاز دارند بنابراین تأمین سرمایه اولیه در این طرح‌ها از مشکلات اجرایی آن‌هاست. استفاده از سرمایه‌گذاری‌های غیر دولتی در اجرای طرح‌ها کمک شایانی به دولت خواهد کرد، چرا که توسعه انرژی‌های نو و به‌ویژه انرژی بادی که تجاری‌ترین نوع آن‌هاست به‌صراحت در اسناد و قوانین ملی بالادستی و سیاست‌های ابلاغی مقام معظم رهبری تدوین شده است که البته دلایل مهمی باعث این جهت‌گیری کلان در کشور شده است؛ بنابراین بدون تردید، یکی از اصلی‌ترین مؤلفه‌های امنیتی تمام کشورها دسترسی به انرژی مورد نیاز است [۲۱]. البته به وجود آمدن هر اشکالی در سیستم عرضه انرژی، اختلال و آسیب‌های پدیده‌ای را در تمام بخش‌های اقتصادی و اجتماعی برجای خواهد گذاشت. به همین دلیل کشورها تنوع بخشی به منابع انرژی را جزء اصلی‌ترین راهبردهای خود قرار می‌دهند تا از وابستگی به یک یا دو نوع انرژی به‌شدت احتراز کرده و آسیب‌پذیری خود را به حداقل ممکن کاهش دهند [۲۲]. بر این اساس باید کلیه منابع انرژی در دسترس و قابل حصول، از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی مصرفی موردنیاز کشور تأمین گردد و در منابع انرژی، پایداری بیشتری به سیستم انرژی کشور تنوع ایجاد شود؛ اگر چه ایران در زمره کشورهایی که متعهد به کاهش انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای، محسوب نمی‌شود ولی از هم اکنون براساس سیاست‌های مصوب، خود را متعهد به حفاظت از کره زمین، اتمسفر و محیط‌زیست می‌داند و با تولید انرژی برق بادی به جای نیروگاه‌های سوخت فسیلی می‌توان حدود سه درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داد. مسئله دیگر اینکه، اشتغال‌زایی و

تحول اجتماعی در مناطق محروم از مباحث مورد توجه برای توسعه انرژی‌های نو در کشور است. از آنجا که غالباً نقاط بادخیز ایران در مناطقی واقع‌اند که از نظر توسعه اجتماعی محروم به شمار می‌روند بنابراین توسعه نیروگاه‌های بادی مستقیماً در شرایط اجتماعی این مناطق تحول ایجاد خواهد کرد. آمارها نشان می‌دهد تنها در سال ۲۰۱۰ میلادی ۶۳۰ هزار شغل در حوزه باد به ازای ۳۹ گیگاوات ظرفیت نصب شده جدید بادی، در کشورهای پیشرو و در حال توسعه ایجاد شده است. نکته مهم دیگر اینکه، با توجه به مشکلات بهره‌برداری و حفظ پایداری شبکه‌های گسترده، به‌وسیله تولید پراکنده برق از میزان اتکا به شبکه‌های طولانی کاسته شده و این یکی از راهکارهای صورت گرفته در صنعت برق است [۲۳]. این کار نه تنها به لحاظ اقتصادی هزینه‌بر نیست بلکه به‌واسطه تقلیل تلفات شبکه انتقال و توزیع و همچنین کاهش نیاز به ظرفیت ذخیره‌شده تولید و افزایش پایداری در شبکه، هزینه تمام شده برق به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد داد. بهترین نوع تولید پراکنده، نیروگاه‌های بادی، آبی کوچک، زیست‌توده، زمین‌گرمایی و خورشیدی است که نه تنها به لحاظ مکان تولید برق بلکه به لحاظ منابع اولیه هم پراکنده‌اند و نیازمند استفاده از شبکه گاز و یا شبکه‌های انتقال نفت نیستند. این فعالیت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تدابیر پدافند غیرعامل محسوب می‌شود. تحقیق هدف مذکور بدین معناست که کشور از امکاناتی برخوردار خواهد شد که در صورت بروز حوادث و سوانح مختلف می‌تواند ضروری‌ترین نیازهای برق بخش‌های مختلف را صرفاً با اتکا به منابع و امکانات محلی تأمین کند [۲۴].

## ۱-۵ معرفی توربین بادی

توربین‌های بادی کوچک کم‌توان برای استفاده در مناطق شهری و روستایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف از طراحی این توربین‌های بادی کوچک و کم‌توان، برق از طریق این توربین‌ها برای ایجاد روشنایی یا به کار انداختن ابزار الکترونیکی با مصرف کم است. توربین‌های بادی براساس جهت

محور دورانی، دو دسته‌ی محور افقی (HAWT)<sup>۱</sup>، محور عمودی (VAWT)<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند: کاربرد توربین‌های بادی کوچک برای استفاده در مناطق کوهستانی که دسترسی کمی دارد می‌توان از این نوع توربین‌های بادی کوچک برای تأمین برق، شارژ کردن باتری‌ها به‌عنوان یک منبع انرژی مستقل از آن استفاده می‌شود. در حالی که توربین بادی که امروزه در نیروگاه‌های بادی بزرگ با توان بالا برای تولید انرژی الکتریکی و تأمین برق از مناطق شهری مورد استفاده می‌شوند [۲۵]. توربین‌های بادی بزرگ معمولاً سه-پره هستند و با سامانه‌های کنترلی در جهت وزش باد قرار می‌گیرد. توربین‌های بادی برای افزایش سرعت چرخش توربین از جعبه‌دنده کاهنده به افزایش سرعت چرخش محور توربین را افزایش داده می‌شود. برخی از مدل‌های توربین‌های بادی، در سرعت ثابت کار می‌کنند ولی توربین‌های با سرعت متغیر انرژی بیشتری می‌توانند تولید کنند؛ که به‌واسطه نیروی برآ و پسا پره‌های توربین به حرکت درمی‌آیند [۲۶].

## ۱-۶ انواع توربین‌های بادی

توربین‌های بادی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. توربین‌های بادی محور افقی و توربین‌های بادی محور عمودی نام گذاری کرد. توربین‌های بادی پیشینه بیشتری دارد و همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ و بازده این نوع توربین‌های بادی محور افقی<sup>۳</sup> بیشتر است. در مقابل مزیت استفاده از توربین‌های بادی محور عمودی<sup>۴</sup> که نسبت به جهت وزش باد وابسته نیست. توربین‌های بادی، تبدیل انرژی بادی به کار مکانیکی و کار مکانیکی به الکتریسیته تبدیل می‌شود. توربین‌های بادی یک منبع جایگزین انرژی تجدیدپذیر خوبی است که آلودگی زیست‌محیطی ندارد و کاملاً سازگار با محیط

---

<sup>۱</sup> Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

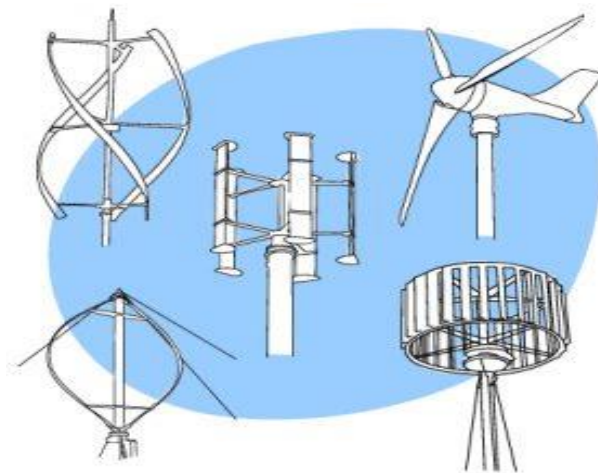
<sup>۲</sup> Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

<sup>۳</sup> Horizontal

<sup>۴</sup> Vertical



طبیعی است. توربین‌های بادی محور افقی، دارای ساختمان پیچیده بوده است و نصب آن‌ها فقط در مناطق با باد دائمی و سرعت وزش باد بالا ارزش اقتصادی دارد؛ اما توربین‌های بادی محور عمودی به دلیل طراحی و نصب ساده و در سرعت‌های دورانی کم و گشتاوری زیاد و مستقل از جهت وزش باد و همچنین در مناطق شهری و روستایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱-۹ چند نمونه از توربین‌های بادی را نشان می‌دهد [۲۷].



شکل ۱-۹: چند نمونه از توربین‌های بادی [۲۶]

## ۱-۷ توربین‌های بادی محور عمودی

توربین‌های بادی محور عمود<sup>۱</sup> که به اختصار VAWT نام گذاری شده است، برای تبدیل نیروی باد به گشتاور، برای به چرخش درآمدن توربین بادی از تعدادی ایرفویل<sup>۲</sup> که معمولاً به صورت عمودی بر محور چرخش کار می‌کند استفاده می‌شود. این نوع از توربین‌های بادی نسبت به توربین‌های بادی با محور افقی کمتر شناخته شده است. در کشور توسعه یافته این نوع توربین‌های بادی بر روی سقف ساختمان‌های بلند شهری و مناطق شهری نصب شده است. در مناطق کوهستانی و سرد به عنوان یک منبع مستقل انرژی بادی محسوب می‌شود. مزیت عمده این نوع توربین‌های بادی محور عمود به دلیل

<sup>۱</sup> Vertical Axis Wind Turbine

<sup>۲</sup> Airfoil

طراحی ساده و هزینه کم و همچنین مستقل از جهت باد در مقایسه با توربین بادی محور افقی، وزش باد با سرعت کمتر نیز قابلیت تولید برق را دارد. توربین‌های بادی محور عمودی به دو دسته تقسیم می‌شود:

۱- توربین بادی ساونیوس که اساس کار آن، با استفاده از نیروی پسا<sup>۱</sup> آیرودینامیکی است و باعث به چرخش درآمدن توربین بادی می‌شود.

۲- توربین بادی داریوس که براساس نیروی برآ<sup>۲</sup> آیرودینامیکی شروع به چرخش می‌کند [۲۸].

### ۱-۷-۱ توربین بادی محور عمود ساونیوس

توربین بادی ساونیوس اولین بار توسط مهندس فنلاندی سیگورد یوناس ساونیوس<sup>۳</sup> در سال ۱۹۲۲ میلادی ساخته شده است. با این وجود اروپایی‌ها پره‌های انحناداری بر روی توربین‌های بادی محور عمودی را برای دهه‌ها، آزمایش کرده بودند [۱۲-۲۹].

توربین بادی ساونیوس یکی از ساده‌ترین مدل‌های توربین بادی محور عمود است. عملکرد آن براساس نیروی آیرودینامیکی باد است که با برخورد با پره‌های توربین باعث چرخش محور می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱-۱۰ مشاهده می‌شود، این نوع توربین در طراحی ساده از دو یا سه نیم استوانه تشکیل شده است و توان بادی کمتری را نسبت به توربین‌های بادی با مدل داریوس که از نیروی برآ استفاده می‌کند فراهم می‌آورد. از توربین‌های بادی ساونیوس می‌توان در پمپ‌ها و یا راه‌اندازی یک مولد کوچک برق مورد استفاده قرار گیرد. دستگاه بادسنج که دارای دونیم استوانه است نیز یکی از انواع ساده این نوع توربین‌های بادی ساونیوس محسوب می‌شود [۳۰].

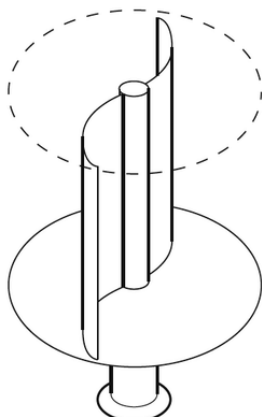
---

<sup>۱</sup> Drag

<sup>۲</sup> Lift

<sup>۳</sup> Sigurd Johannes Savonius

Savonius-Rotor



شکل ۱-۱: توربین بادی محور عمودی-ساوونیوس [۲۹]

## ۲-۷-۱ توربین بادی محور عمودی داریوس

این نوع از توربین بادی محور عمود نخستین بار توسط مهندس فرانسوی جیمز داریوس<sup>۱</sup> در سال ۱۹۲۵ میلادی اختراع و به نام خود ثبت شده است [۳۱]. توربین بادی محور عمود یا مستقیم یا توربین‌های بادی اچ-روتور یا توربین بادی تخم‌مرغی شکل نیز معروف هستند. مانند شکل ۱-۱ در توربین‌های بادی محور عمودی سرعت نوک تیغه کم است به طوریکه در سرعت‌های بادهای کم هم می‌توانند شروع به حرکت کنند و باعث تولید انرژی برق شود چون گشتاور<sup>۲</sup> این توربین‌ها کم است، برای تولید برق منازل مناسب است. اکثر توربین‌های بادی داریوس از ایرفویل‌های<sup>۳</sup> با مقطع متقارن استفاده می‌کنند. توربین‌های بادی داریوس نمی‌توانند خود باعث چرخش خودکار شوند؛ زیرا این نوع توربین بادی محور عمود داریوس براساس نیروی برآ شروع به چرخش می‌کند و در ابتدا به علت شکل تیغه‌های توربین و نوع قرارگیری آن‌ها نسبت به هم یک اختلاف فازی بین تیغه‌ها، بر نیروی پسا غالب کرده و توربین نمی‌تواند به چرخش در آید و اگر هم چرخشی داشته باشد بسیار ناچیز است. پس باید

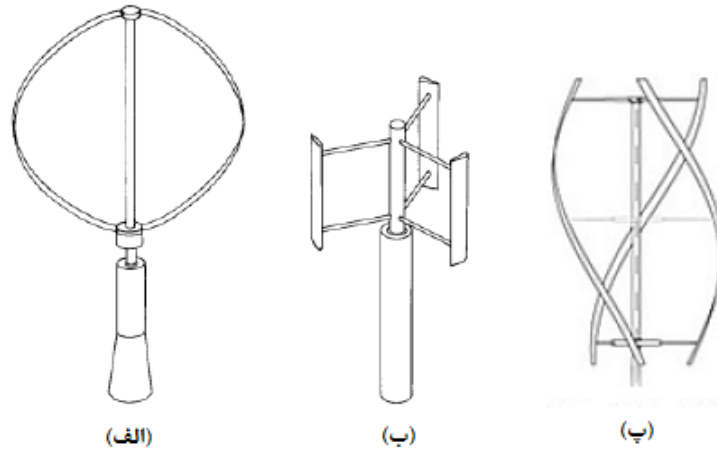
---

<sup>۱</sup> Darrieus

<sup>۲</sup> Torque

<sup>۳</sup> Airfoil

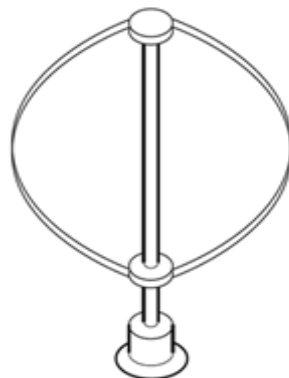
توسط یک نیروی محرک دستی و یا مکانیکی، گشتاوری به توربین داده شود تا توربین بادی راه‌اندازی شود [۳۲].



شکل ۱-۱۱: سه مدل از توربین بادی داریوس (الف) داریوس تخم‌مرغی، (ب) اچ روتور، (پ) داریوس مارییچی [۳۱]

توربین بادی داریوس در شکل‌های مختلفی است. همان‌طور که در شکل ۱-۱۲ مشاهده می‌شود توربین بادی داریوس از دو یا سه ایرفویل به شکل تخم‌مرغی استفاده می‌شود. معمولاً از این نوع مدل تخم‌مرغی شکل خیلی کم استفاده می‌شود. در این توربین‌ها ژنراتور را در پایین برج قرار داده و بنابراین می‌تواند سنگین‌تر و بزرگ‌تر از ژنراتور معمولی در توربین‌های بادی محور افقی باشد و در پایین برج تعمیر و نگهداری آن آسان است.

Darrieus-Rotor



شکل ۱-۱۲: توربین بادی عمودی داریوس مدل تخم‌مرغی [۳۲]

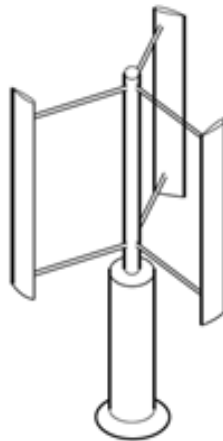
مدل‌های دیگری از توربین بادی نیز وجود دارد که در طراحی و شکل تیغه‌های توربین به صورت اچ-روتور یا مستقیم هستند مانند شکل ۱-۱۲ که تیغه‌های آن عمود بر محور موازی با برج توربین قرار دارد [۳۳].

توربین بادی محور عمودی در اکثر مکان‌هایی نصب شده است که یک شبکه برق به منظور ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی و انتقال به شبکه برق شهری وجود دارد. از این نوع توربین‌های بادی بیشتر در مناطق شهری بهره می‌برند. در مدل توربین بادی محور عمودی داریوس جریان‌های آشفته باد بازدهی خوبی نسبت به توربین بادی محور افقی دارد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است. شکل ۱-۱۳ مشاهده می‌شود ایرفویل‌های توربین بادی توسط میله‌ای به محور اصلی متصل شده است. حرکت تیغه‌های توربین به میله و محور اصلی منتقل شده و حرکت چرخشی محور توربین را به یک جعبه‌دنده کاهنده به افزایش در پایین برج منتقل کرده و در نهایت خروجی جعبه دنده را به ژنراتور انتقال داده و باعث تولید انرژی الکتریکی می‌شود. در توربین بادی محور عمود داریوس از ایرفویل‌های متقارن سری ناکا<sup>۱</sup> چهار رقمی استفاده می‌شود و به صورت خودکار شروع به حرکت نمی‌کند و نیاز به یک نیروی محرک است که گشتاور اولیه را به توربین بادی اعمال کند؛ اما اگر از نیروی محرک برای شروع چرخش توربین استفاده شود مدل دیگری از توربین بادی محور عمود اچ-روتور وجود دارد که با تغییر دادن جهت وزش باد تیغه‌های توربین توسط سیستم کنترلر باعث ایجاد تغییر زاویه حمله ایرفویل می‌شود و از نیروی برآ کاسته شده و نیروی پسا زیاد می‌شود و باعث به چرخش درآمدن توربین بادی می‌شود؛ بعد از اینکه گشتاور مورد نیاز فراهم گردید سیستم کنترلر دستور داده و به حالت اولیه آیرودینامیکی قبلی برگشته و هم‌راستا با جریان سیال، باد به تیغه‌ها برخورد کرده که سبب به وجود آمدن نیروی برآ در توربین بادی می‌شود که اساس کار توربین بادی داریوس می‌باشد [۳۴].

---

<sup>۱</sup> Naca

H-Darrieus-Rotor



شکل ۱-۱۳: توربین بادی محور عمود داریوس مدل H-rotor یا گیرومیل<sup>۱</sup> [۳۳].

#### ۸-۱ مزایای توربین‌های بادی محور عمودی

۱. توربین بادی محور عمود می‌تواند برق را در هر جهت وزش باد تولید کنند.
۲. در توربین‌های بادی محور عمود به برج قوی نیاز نیست، زیرا ژنراتور، گیربکس و سایر تجهیزات پایین توربین بادی بر روی زمین قرار دارد.
۳. هزینه ساخت توربین‌های بادی محور عمود در مقایسه با ساخت توربین‌های بادی افقی کم است.
۴. نصب این نوع از توربین بادی نسبت به سایر مدل‌های دیگر از توربین‌های بادی آسان‌تر است.
۵. حمل و نقل این نوع از توربین بادی آسان و کم هزینه است.
۶. هزینه تعمیر و نگهداری آن کم است.
۷. این نوع توربین بادی برای مناطق صعب‌العبور با شرایط آب و هوایی نامناسب، مانند نواحی کوهستانی کاربرد دارد.
۸. به دلیل سرعت‌های نسبتاً پایین تیغه‌های این نوع توربین کمترین خطر برای انسان و سایر

---

<sup>۱</sup> Giromill\_ H-rotor

پرندگان را دارد [۳۵].

## ۹-۱ معایب توربین‌های بادی محور عمود

۱. یکی از معایب عمده‌ی توربین بادی محور عمود داریوس، بازده پایین در تولید برق مطرح شده است.

۲. برای راه‌اندازی این نوع از توربین بادی نیاز به یک نیروی محرک اولیه است که از تیغه‌های راهنما که این نیرو را تولید می‌کند، استفاده می‌شود.

۳. در توربین‌های بادی محور عمودی به دلیل نزدیک بودن به سطح زمین جریان‌های آشفته‌ی ایجاد می‌شود که باعث ایجاد ارتعاش در توربین بادی می‌شود.

۴. به علت ارتعاشات زیاد در توربین بادی موجب افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود.

۵. در توربین‌های بادی محور عمودی با پره‌های بلند، به دلیل بالا بودن سرعت خطی نوک تیغه‌ها<sup>۱</sup> و نیروهای گریز از مرکز توربین باعث ایجاد تنش‌های خمشی در تیغه‌های توربین می‌شود و سبب ایجاد شکستگی در پره‌های توربین بادی می‌شود. جنس پره‌های توربین از مواد مقاوم و سخت کامپوزیتی ساخته شده است [۳۵].

در این فصل به معرفی انواع توربین‌های بادی پرداخته شد. همچنین فواید و معایب توربین بادی محور عمود مدل داریوس بیان گردید. در فصل دوم مرور کارهای گذشتگان بر روی انواع توربین‌های بادی آورده شده است و در نهایت با بهره‌گیری از نکات مغفول و پارامترهای مهم مورد بررسی از کارهای گذشتگان بهره برده و در فصل سوم معادلات حاکم بر روی توربین بادی محور عمود داریوس آورده شده است و روش ساخت و تجهیزات به کار رفته در ساخت یک نمونه از این مدل توربین ارائه شده است.

---

<sup>۱</sup> Tip Speed Ratio

در فصل چهارم نتایج حاصل از مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده در محیط آزمایشگاهی ارائه شده است و در نهایت در فصل پنجم نتایج جمع‌بندی شده و پیشنهاداتی جهت بهبود در این زمینه ارائه شده است.



## فصل ۲: مفاهیم و پیشینه‌ی تحقیق

## ۱-۲ مقدمه

در فصل قبلی، تاریخچه‌ی استفاده از انرژی بادی و جایگاه آن در کشورهای توسعه یافته یا در حال توسعه به همراه انواع توربین بادی و نحوی کار کردن آن‌ها معرفی گردید. توربین‌های بادی محور عمود مزایا و معایبی دارد که منجر به کاهش عملکرد توربین بادی می‌شود در این فصل هدف، بررسی توربین بادی محور عمود داریوس است. در گذشته مطالعات و تحقیقات بسیاری بر روی توربین‌های بادی برای افزایش عملکرد آیرودینامیکی توربین‌های بادی محور عمود داریوس، به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی انجام شده است. در ادامه این نوع توربین‌های بادی به طور کامل شرح داده شده و چند نمونه از کارهای گذشتگان آورده شده است.

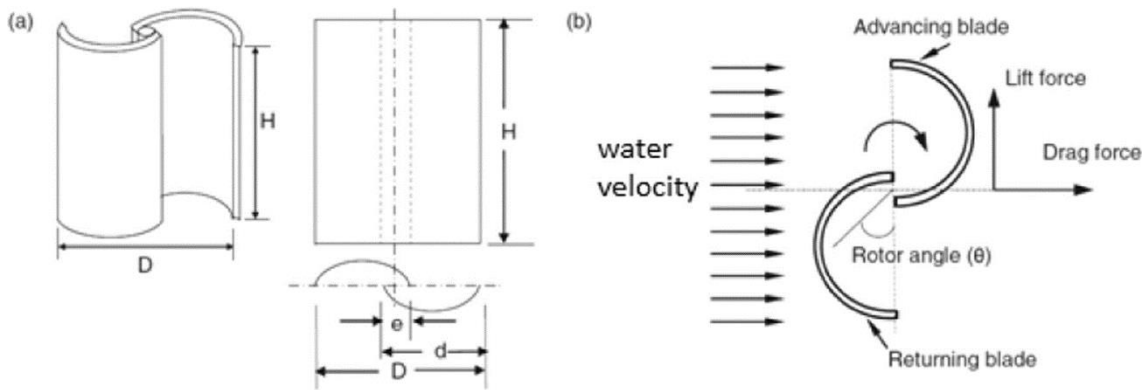
## ۲-۲ اساس کار توربین بادی ساونیوس

توربین‌های بادی ساونیوس بر اساس نیروی پسا ایجاد شده باعث چرخش روتور توربین می‌شود. روتور این توربین بادی ساونیوس تشکیل شده از دو یا سه نیم‌استوانه عمود بر محور توربین تشکیل شده است مانند شکل ۱-۲ روتور توربین بادی ساونیوس را مشاهده می‌کنیم که جریان بادی در داخل نیم‌استوانه فشار زیادی تولید شده که همان نیروی پسا است که باعث چرخش روتور توربین بادی می‌شود تیغه‌های توربین بادی ساونیوس همگرا<sup>۱</sup> و اگر<sup>۲</sup> است [۳۶].

---

<sup>۱</sup> Convergent

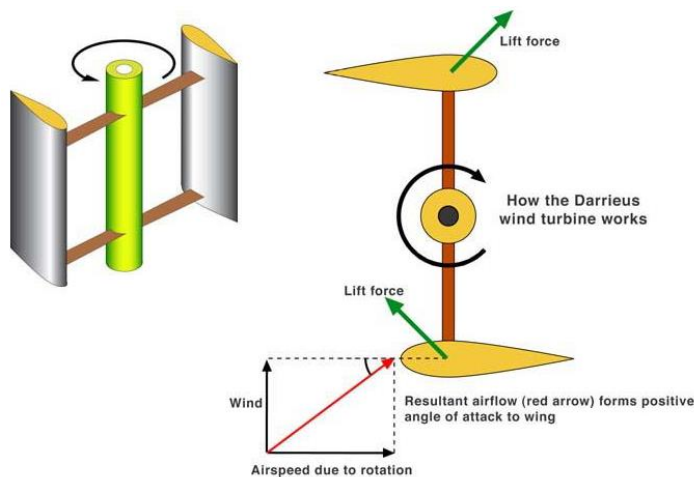
<sup>۲</sup> Diverget



شکل ۲-۱: (a) یک روتور توربین بادی ساونبوس دوطرفه معمولی - (b) نیروهای وارد بر روتور توربین بادی [۳۶].

### ۳-۲ اساس کار توربین بادی داریوس

در توربین‌های بادی محور افقی و محور عمودی مدل داریوس با استفاده از نیروی بالابر یا برآ روتور توربین بادی شروع به چرخش می‌کنند. نیروی باد به تیغه‌های توربین برخورد کرده و به دلیل شکل آیرودینامیکی که دارند توزیع فشار بر روی سطح بالای و پایینی ایرفویل وارد شده و باعث نیروی برآ می‌شود. شکل ۲-۲ نیروی وارد بر توربین بادی مدل داریوس را نشان می‌دهد [۳۷].



شکل ۲-۲: چرخش توربین بادی محور عمودی - مدل داریوس براساس نیروی برآ [۳۷].

## ۲-۴ عوامل و روش مؤثر بر افزایش عملکرد توربین بادی داریوس

در سال‌های اخیر مطالعات و تحقیقات فراوانی به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی عملکرد بهتر توربین داریوس انجام شده است. بیشتر این تحقیقات انجام شده بر روی افزایش راندمان توربین و گشتاور راه‌اندازی و ایجاد یک سیستم خودکار برای توربین‌های بادی محور عمود داریوس که براساس نیروی برآ (لیفت) شروع به چرخش می‌کنند انجام شده است. مشکل عمده این نوع توربین بادی شروع خودکار توربین بادی می‌باشد. در این فصل پارامترهای مؤثر جهت بهبود عملکرد بهتر آیرودینامیکی توربین داریوس آورده شده است.

### ۲-۴-۱ استفاده از تیغه راهنما

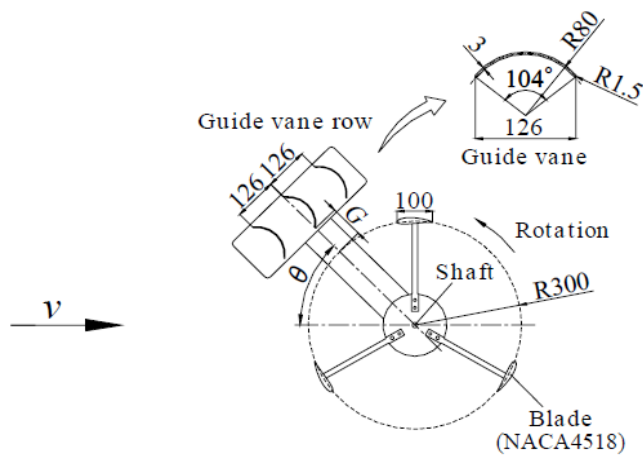
با استفاده از تحقیقات انجام شده، مشخص شده است که برای بهتر کردن عملکرد توربین داریوس از تیغه‌های راهنما<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. سه ردیف از تیغه‌های راهنما در اطراف روتور توربین بادی قرار دارد و نیروهای آیرودینامیکی که توسط تیغه‌های راهنما ایجاد شد باعث چرخش توربین بادی می‌شود و عملکرد توربین بادی محور عمود- داریوس که با استفاده از پره‌های راهنما گشتاور این نوع توربین بهبود یافته و حداکثر ضریب توان  $0/135$  است و مقدار آن تقریباً  $1/5$  برابر بیشتر از توربین‌های بادی اصلی است که پره‌های راهنما ندارد. پره‌های راهنما در توربین بادی محور عمود به‌منظور غلبه بر معایب این مدل از توربین بادی است [۳۸]. در نتیجه برای خنثی کردن اثر منفی بر روی توربین ساونیوس که نیروی پسا محور، می‌بایست تأثیر آن بر روی توربین‌های داریوس که برآ محوری است مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور تاکائو<sup>۲</sup> و همکاران [۳۹] بر روی پره‌های راهنمای پیشنهاد شده تحقیق نموده که عملکرد این مدل توربین بادی محور عمود داریوس تیغه‌های مستقیم را به‌صورت

---

<sup>۱</sup> Guid Vane

<sup>۲</sup> Takao

آزمایشگاهی در تونل باد با جریان جت، مورد بررسی قرار گرفته است. با انجام آزمایش، پره‌های راهنما، و اثر تنظیم زاویه و فاصله بین تیغه و روتور و تیغه‌های راهنما بر عملکرد توربین بادی را بهبود می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که پره‌های راهنما به دلیل تغییر زاویه ایرفویل و جریان ورودی هوا به روتور توربین، تأثیر بهینه‌ی بر عملکرد توربین بادی دارد حداکثر ضریب قدرت توربین بادی  $1/8$  افزایش می‌یابد. همان‌طور در شکل ۲-۳ نشان داده شده است شماتیک توربین بادی محور عمود با پره‌های راهنما برای توربین بادی داریوس مشاهده می‌شود [۴۰].



شکل ۲-۳: استفاده از تیغه‌های راهنما در توربین بادی داریوس [۴۰]

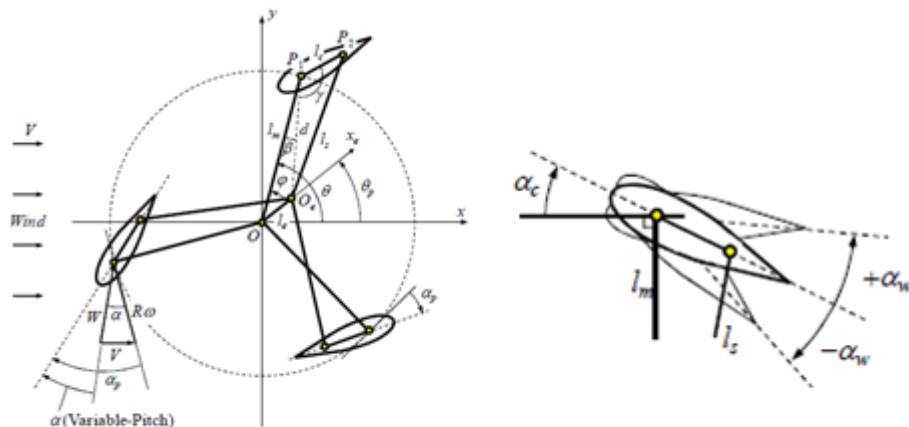
## ۲-۴-۲ تأثیر زاویه حمله ایرفویل

در سال‌های اخیر مطالعات و تحقیقات انجام شده بر روی توربین بادی محور عمود داریوس برای افزایش گشتاور توربین بادی بر روی تأثیر زاویه حمله ایرفویل<sup>۱</sup> در توربین بادی داریوس انجام شده است و بهترین زاویه‌ی حمله مشخص شده است. مک‌لارن<sup>۲</sup> [۴۱] توربین بادی محور عمود داریوس با سیستم تغییر زاویه و میزان دامنه‌ی تیغه‌ها را کنترل می‌کند. در توربین بادی با سیستم تغییر گام

<sup>۱</sup> Blade Pitch angle

<sup>۲</sup> McLaren

متغیر خودکار نیروی آیرودینامیکی که بر روی تیغه‌ها و نیروی ناشی از مکانیزم تغییر زاویه گام تیغه‌ها عمل می‌کند. شینتا تاکاتا<sup>۱</sup> و همکاران [۴۲] مکانیزمی طراحی کردن که با تغییر محور غیر عادی نسبت به محور چرخش یک روتور دورانی برای راهنما را می‌توان در هر جهت سطح توربین در چرخش تنظیم کرد. مکانیزم تغییر زاویه‌ی در توربین بادی داریوس یک روتور دورانی شامل تیغه‌های مستقیم و اتصال چهار میله‌ای است که به ایرفویل فشار وارد می‌نماید. این مکانیزم کنترل زاویه گام تیغه‌ها در عملکرد آیرودینامیکی باعث افزایش گشتاور توربین می‌شود. دامنه زاویه حمله تیغه‌ها از ۱۵-، ۰ و ۱۵+ درجه، مورد بررسی و مقایسه آن‌ها در بهترین عملکرد توربین بادی را در زاویه حمله ۱۵- درجه برای نسبت سرعت نوک تیغه پیش‌بینی شده است. همان‌طور در شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود نتایج را با حالتی که توربین بادی از تیغه‌های ثابت و با نتایج تیغه‌های با تغییر زاویه گام مقایسه کرده که عملکرد توربین در زاویه ۱۵- درجه ضریب قدرت توربین بادی افزایش داشته است.



شکل ۲-۴: معرفی مکانیزم تغییر زاویه توربین بادی داریوس با پره‌های مستقیم [۴۲]

<sup>۱</sup> Shinei Takata

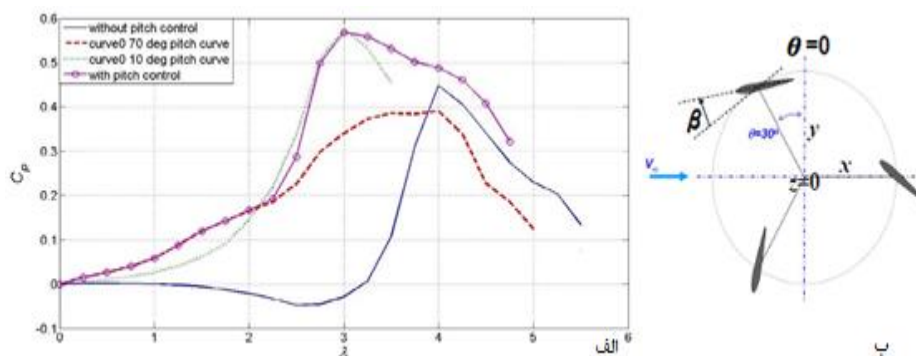
## ۲-۴-۳ بهره‌گیری از مکانیزم تغییر زاویه حمله

در تحقیقات انجام شده بر روی توربین بادی محور عمود داریوس روش کنترل زاویه حمله متغیر و کنترل ثابت است. نتایج حاضر نشان می‌دهد که توربین بادی داریوس با گام ثابت شروع خودکار ندارد. در واقع در سرعت‌های نوک کم، به همین دلیل بیشترین مقادیر در ضریب قدرت توربین بادی منفی است. با استفاده از این سیستم که بر روی محور پره، می‌توان گام توربین بادی داریوس با تیغه‌های مستقیم را متغیر کرد. در توربین بادی داریوس گام متغیر<sup>۱</sup> می‌توان با تغییر دادن زاویه گام، زاویه حمله توربین بادی جریان برخورد به تیغه‌های توربین را تغییر داد که باعث تنظیم و بهبود عملکرد توربین می‌شود. توربین بادی با مکانیزم تغییر زاویه، که بر زاویه‌ی حمله جریان ورودی باد برخورد کرده و گشتاور شروع به کار به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و باعث چرخش خودکار توربین بادی می‌شود. در تحقیقات اخیر لیانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۴۳] با مطالعه بر روی توربین بادی داریوس برای بهبود گشتاور راه‌اندازی با مکانیزم تغییر گام تیغه که در سرعت نوک کم، شکل ۲-۵ (الف) که با استفاده از این سیستم تغییر گام متغیر مورد استفاده قرار گرفته است. آن‌ها به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی ثابت کردند که با مکانیزم تغییر زاویه تیغه‌ها، عملکرد توربین بادی را نسبت به بدون مکانیزم تغییر زاویه راندمان توربین بهبود می‌یابد. نتایج لیانگ و همکاران که در شکل ۲-۵ (ب) مشاهده می‌شود با استفاده از مکانیزم تغییر زاویه تیغه‌ها و کنترل آن تأثیر زیادی بر عملکرد توربین به خصوص در لحظه شروع خودکار آن دارد که با کنترل بهینه آن مقدار ضریب قدرت توربین باد نیز بهبود می‌یابد [۴۴].

---

<sup>۱</sup> Variable Pitch

<sup>۲</sup> Liang



شکل ۲-۵: (الف) سیستم مختصات مکانیزم تغییر گام تیغه. (ب) تأثیر مکانیزم تغییر گام تیغه بر ضریب قدرت عملکرد

توربین بادی داریوس [۴۴].

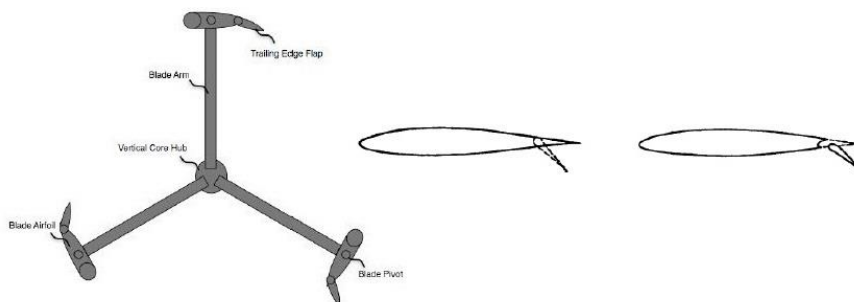
## ۲-۴-۴ استفاده از فلاپ‌های متحرک

در مطالعات انجام شده بر روی توربین بادی محور عمود جهت بهبود ضریب توان و ضریب گشتاور توربین بادی دو پارامتر بسیار مهم در توربین بادی مورد بررسی قرار گرفته است که تحت تأثیر مشخصات آیرودینامیکی توربین بادی داریوس می‌باشد. ایوان<sup>۱</sup> و همکاران [۴۵] با مطالعات و تحقیقات انجام شده بر روی این توربین بادی محور عمود داریوس به منظور بهبود عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی استفاده از فلاپ<sup>۲</sup> مانند شکل ۲-۶ در تیغه‌های توربین و کنترل آن تأثیر زیادی بر عملکرد توربین به خصوص در لحظه شروع خودکار آن دارد که با کنترل بهینه آن مقدار ضریب توان توربین باد را نیز بهبود می‌دهد.

<sup>۱</sup> Ioan Szava

<sup>۲</sup> Flap





شکل ۲-۶: روتور توربین داریوس با استفاده از فلپ [۴۵].

## ۲-۴-۵ بررسی تأثیر صلبیت در توربین بادی

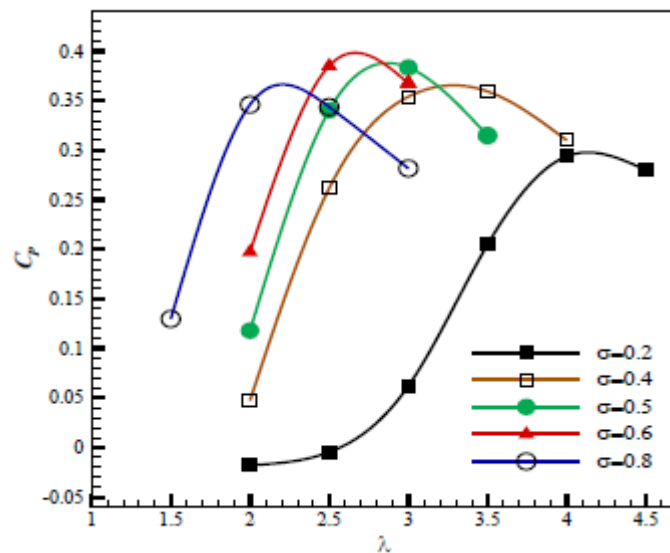
یکی از پارامترهای مهم در توربین‌های بادی داریوس، ضریب پُری (صلبیت)<sup>۱</sup> است و به این معناست که چه میزان از سطح توربین بادی را اشغال کرده و به صورت نسبت سطح پره‌ها به سطح جاروب شده توسط روتور توربین در نظر گرفته است.

$$\sigma = \frac{NC}{R} \quad (۱-۲)$$

در رابطه (۱-۲) پارامترهای مؤثر در ضریب صلبیت تعداد پره‌ها ( $N$ )، طول وتر ایرفویل ( $C$ ) و شعاع روتور توربین ( $R$ ) است [۴۶]. در یک توربین بادی داریوس پره‌های عمودی شکل (H-rotor)، حداکثر ضریب توان در حدود ۳۵٪ می‌باشد. هر توربین بادی داریوس یک صلبیت بهینه دارد. در نسبت سرعت نوک پره ضریب توان توربین در ابتدا با افزایش صلبیت افزایش می‌یابد تا به یک مقدار ماکزیمم برسد و پس از این نقطه بهینه، عملکرد توربین با افزایش صلبیت کاهش می‌یابد. صلبیت در توربین بادی داده شده، دارای یک نسبت سرعت نوک پره بهینه است که حداکثر ضریب توان در آن صلبیت محاسبه می‌شود. به علاوه هر چه صلبیت بیشتر شود مقدار این نسبت سرعت نوک بهینه کوچک‌تر می‌شود. شکل ۲-۷ نشانگر تغییرات ضرایب توان توربین بر حسب سرعت نوک تیغه برای یک توربین بادی ۳ پره در صلبیت‌های مختلف است. این نمودار نشان می‌دهد با افزایش نیروی پسا همراه

<sup>۱</sup> Solidity

با افزایش صلبیت سبب کاهش و افت توان در سرعت‌های بالای نوک پره و در روتورهای با صلبیت بالاتر می‌شود. ترکیب این اثر سبب کاهش دامنه کاری در صلبیت‌های بالاتر و برعکس افزایش دامنه کاری در صلبیت‌های پایین توربین می‌گردد. به‌طور کلی برای تولید توان، روتورهای با صلبیت پایین‌تر بر روتور با صلبیت‌های بالاتر ترجیح داده می‌شود؛ زیرا هر چه سرعت نوک تیغه بالاتر باشد اختلاف بین سرعت روتور و فرکانس تولیدی کاهش می‌یابد. بنابراین صرفاً برای افزایش گشتاور راه‌اندازی، با استفاده از یک صلبیت بالا می‌تواند یک گزینه مناسب در طراحی توربین بادی باشد [۴۶].

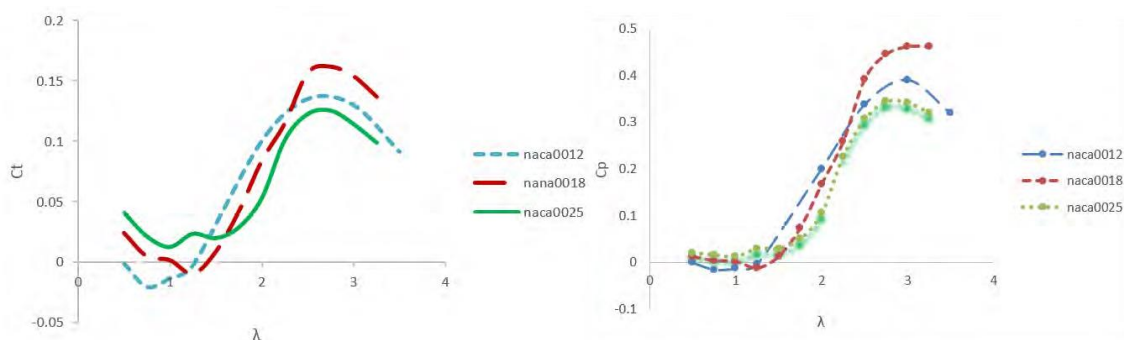


شکل ۲-۷: منحنی ضریب توان بر حسب سرعت نوک در صلبیت‌های مختلف [۴۱]

## ۲-۴-۶ تأثیر ضخامت ایرفویل

در این مطالعه اثر ضخامت‌های مختلف ایرفویل بر روی ضریب آیرودینامیکی توربین بادی محور عمود بررسی شده است و نتایج حاصل از آن در نمودارهای موجود در شکل ۲-۸ مشاهده می‌شود [۴۷]. برای بررسی تأثیر شکل ایرفویل از سه ایرفویل متقارن ناکا استفاده می‌شود. در این مطالعه در رینولدز ۳۹۰۰۰ و برای ضریب صلبیت ۰/۵ انجام شده است نمودار شکل ۲-۸ الف، منحنی ضریب گشتاور عملکرد برای تیغه‌ی موردنظر را نشان می‌دهد. برای بررسی بهترین نتایج آن است که از دو جهت

مقایسه انجام گیرد. اگر حداکثر بازدهی مدنظر باشد ایرفویل نازک دارای ضریب گشتاور خوبی است؛ اما به دلیل اینکه یکی از مشکلات اساسی توربین بادی محور عمودی ضعف در راهاندازی توربین بادی است، با توجه به شکل ۲-۸ ب در صورتی که از ایرفویل‌های نازک استفاده شود با وجود بازدهی بیشتر در نسبت سرعت بالای، در نسبت سرعت‌های پایین حتی ممکن است که توان منفی ایجاد کند و توان منفی به این دلیل است که توربین بادی به هیچ عنوان به صورت خودکار شروع به کار نمی‌کند و تا به نسبت سرعت نوک بالا که در آن بازدهی مناسبی دارد برسد، اصطلاحاً می‌گویند که توربین در ناحیه مرده باقی‌مانده است به همین منظور اگر از ایرفویل نازک برای دستیابی به بازدهی بیشتر استفاده گردد باید از موتور برای راهاندازی و خارج کردن از ناحیه مرده استفاده شود. دلیل این پدیده (بازدهی بالا در نسبت سرعت‌های نوک زیاد برای ایرفویل‌های نازک و همچنین توان بالا در حالت شروع به کار برای ایرفویل‌های ضخیم) به ضریب برآ این ایرفویل‌ها مربوط می‌گردد. ایرفویل‌های نازک افت بیشتری دارد و سبب واماندگی می‌شود، به همین دلیل میانگین ضریب لیفت ایرفویل‌های نازک در محدوده کاری پایین‌تری از ایرفویل‌های ضخیم استفاده می‌شود [۴۷].

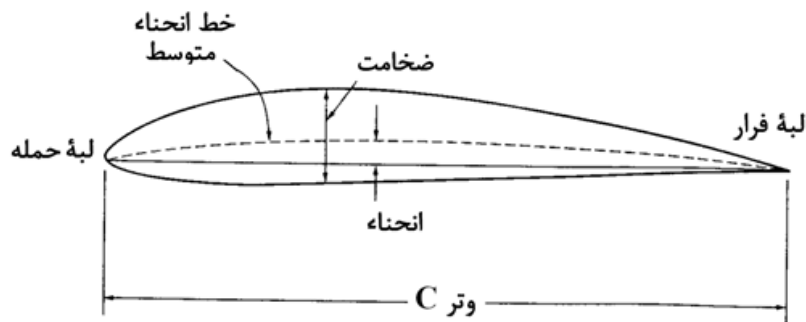


شکل ۲-۸: (الف) نمودار ضریب گشتاور برحسب سرعت نوک - (ب) ضریب توان برحسب سرعت نوک ایرفویل [۴۷]

## ۲-۴-۷ تأثیر انحنای ایرفویل

افزایش خط انحنای<sup>۱</sup> به معنای غیرممتقارن کردن پره توربین می‌باشد که تأثیر بسزایی بر عملکرد توربین بادی در نسبت سرعت‌های پایین دارد. در این حالت توربین در سرعت بالا مؤثر عمل می‌کند و انرژی بیشتری از باد استحصال می‌گردد. این انحنای ایرفویل باعث افزایش نیروی برا به نیروی پسا می‌شود. و همچنین واماندگی به تأخیر می‌افتد. در

شکل ۲-۹ یک ایرفویل با مقطع غیرممتقارن مشاهده می‌شود [۴۸].



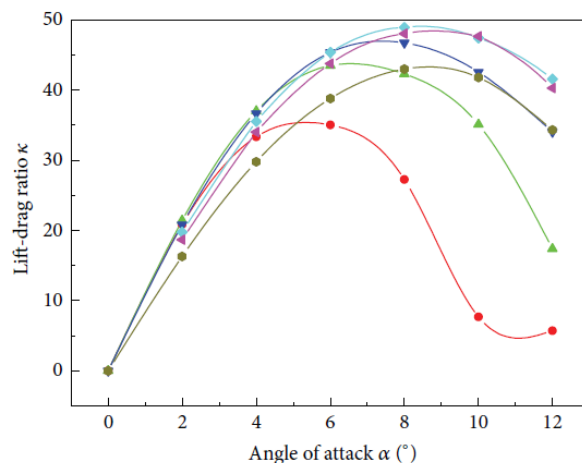
شکل ۲-۹: نمایی از اجزایی تشکیل دهنده ی یک ایرفویل [۴۸]

در واقع فرق بین ایرفویل متقارن و غیرممتقارن در رینولدز پایین مشخص می‌شود. ایرفویل‌های غیرممتقارن خاصیت خود راه‌اندازی دارد اما این قابلیت با بالا رفتن سرعت رینولدز کاهش می‌یابد. ایرفویل غیرممتقارن هم برای زاویه‌های حمله مثبت و منفی مناسب است. انحنای ایرفویل با شیب صعودی نیروی برا بیشتری تولید می‌شود، یعنی جایی که عموماً انرژی بیشتری مورد نیاز است. ایرفویل با شیب نزولی در پایین دست عملکرد خوبی دارند یعنی جایی که زاویه حمله پایداری نسبتاً خوبی دارد [۴۸]. اشکال عمده‌ی ایرفویل‌های غیرممتقارن، امکان تولید برا مثبت در زاویه حمله‌ی منفی است که منجر به ایجاد نیروی مماسی منفی ایجاد می‌شود. به‌طور کلی در زاویه حمله‌ی کم،

<sup>۱</sup> Camber

نیروی مماسی ایرفویل غیرمتقارن در مقایسه با ایرفویل متقارن کاهش می‌یابد که این از معایب ایرفویل‌های غیرمتقارن است.

در مطالعات و تحقیقات اخیر بر روی ایرفویل‌های متقارن و غیرمتقارن لی سونینگ ژانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۴۹] از طریق دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup>، به صورت دوبعدی شبیه‌سازی و تأثیر انحنای ایرفویل بر عملکرد آیرودینامیکی و مقدار ضریب توان و نیروی مماسی و اثر استحکام در بخش زیر معرفی می‌شود تأثیر ضخامت ایرفویل بر عملکرد آیرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج شبیه‌سازی ایرفویل تأثیر ضخامت تیغه در نسبت به نیروی برآ به پسا در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است. برای توربین بادی داریوس با سه ایرفویل متقارن با ضخامت نسبی ۱۵٪ دارای بالاترین نسبت نیروی برآ به نیروی پسا و در ایرفویل غیرمتقارن با ضخامت ۱۸٪ عملکرد بسیار بالاتر دارد همچنین در شکل زیر با کاهش شیب منحنی برآ در محدوده خطی و کاهش بسیار سریع در محدوده غیرخطی، که به دلیل ضخامت بالا افزایش می‌یابد. در این آزمایش نشان داده می‌شود که از ایرفویل‌های با ضخامت ۱۵٪ و ۱۸٪ ضریب توان و عملکرد توربین بادی بهبود می‌یابد [۴۹].



شکل ۱۰-۲: تأثیر منحنی ایرفویل در توربین بادی داریوس مقایسه با ایرفویل متقارن و غیرمتقارن [۴۹]

<sup>۱</sup> Li- Xun Zhang

<sup>۲</sup> Computational Fluid Dynamics(CFD)

جمیز<sup>۱</sup> و همکاران [۵۰] از طریق بررسی آزمایشگاهی تأثیر انحنای ایرفویل بر عملکرد توربین بادی داریوس را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها توربین بادی سه پره از نوع مستقیم با ایرفویل متقارن و غیرمتقارن از سری ناکا ۸۴۱۰ با انحنای بهره بردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد با وجود کاهش ضریب توان توربین با ایرفویل متقارن، به دلیل افزایش گشتاور در لحظه‌ی شروع به حرکت، تأثیر مطلوبی در راه‌اندازی خودکار توربین بادی ایجاد می‌شود.

## ۲-۵ هدف از مطالعه اخیر

همان‌طور که اشاره شد مشکل اساسی در توربین بادی داریوس، گشتاور راه‌اندازی توربین می‌باشد. یکی از روش‌های رفع این مشکل، مکانیزم تغییر زاویه بر عملکرد آیرودینامیکی توربین است. جهت استفاده از قابلیت‌های هر کدام، در قالب یک توربین واحد و همچنین بهبود گشتاور راه‌اندازی، افزایش محدوده‌ی عملکرد و دستیابی به توان خروجی مطلوب از این مکانیزم می‌توان بهره برد. در اکثر پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی توربین بادی مکانیزم تغییر زاویه و بدون مکانیزم تغییر زاویه در توربین بادی داریوس استفاده شده است. در مطالعه‌های اخیر بر روی توربین‌های بادی داریوس با پره‌های مستقیم ثابت و تأثیر آن بر عملکرد توربین مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور توربین بادی داریوس طراحی شده که دارای مکانیزم تغییر زاویه می‌باشد. در اکثر روش‌های استفاده شده جهت بهبود عملکرد آیرودینامیکی توربین داریوس، باعث افزایش ضریب توان توربین بادی می‌شود. در نتیجه در این پژوهش سعی شده است با بررسی روش‌های مختلف، عملکرد بهتر توربین بادی بهبود یابد. از آنجایی که کاهش ضریب توان توربین بادی در نسبت سرعت‌های بالا است، با بررسی آیرودینامیکی پره‌ها به‌خصوص پره توربین داریوس عملکرد توربین بهبود خواهد یافت. در واقع در پژوهش پیش‌رو، به بررسی اثر مکانیزم تغییر زاویه به‌عنوان روشی برای افزایش راندمان توربین و

---

<sup>۱</sup> James

افزایش گشتاور راه‌انداز پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده از اعمال مکانیزم تغییرگام با نتایج حالت بدون اعمال مکانیزم تغییر گام در نسبت سرعت‌های مختلف نوک پره مقایسه شده است. علاوه بر استفاده از مکانیزم تغییر گام از انواع تیغه‌های توربین عمود محور جهت بررسی حاضر استفاده شده است. هدف از این مقایسه تأثیر مکانیزم تغییر گام و نوع پره‌های مختلف بر عملکرد توربین‌های بادی در نسبت سرعت‌های مختلف و در حالت عملی بوده است.





# فصل ۳ : بررسی آیرودینامیک توربین و

## تعریف مسأله

### ۳-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی توربین بادی داریوس و نحوه‌ی برقراری جریان حول روتور توربین بادی پرداخته شده است. برای این منظور در این فصل ابتدا به معرفی روابط مربوط به آیرودینامیکی توربین بادی داریوس پرداخته شده و در ادامه روند ساخت و طراحی توربین بادی ارائه می‌گردد.

### ۳-۲ آیرودینامیکی توربین بادی داریوس

در این بخش، روابط ریاضی مربوط به محاسبه آیرودینامیک توربین بادی داریوس و نحوه‌ی برقراری جریان حول روتور این نوع توربین بادی ارائه شده است.

### ۳-۲-۱ مساحت توربین بادی

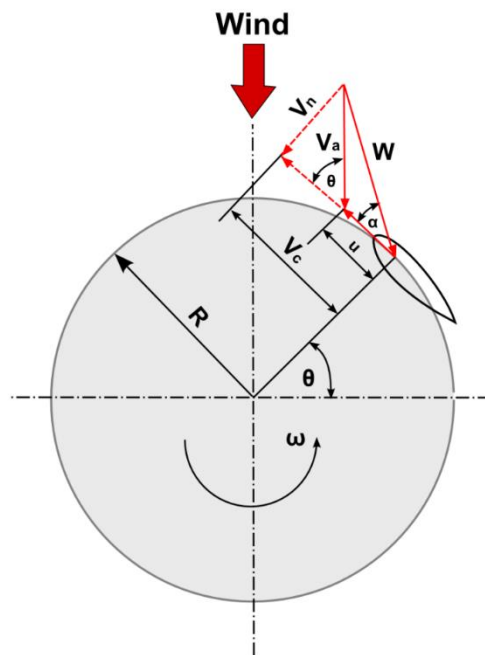
در توربین بادی محور افقی مساحت جاروب شده به صورت دایره‌ای محاسبه می‌شود در حالی که مساحت جاروب شده توربین بادی محور عمودی مدل داریوس به شکل مستطیل و با استفاده از رابطه (۳-۱) محاسبه می‌شود.

$$A = 2RL \quad (۳-۱)$$

در رابطه (۳-۱)،  $A$  مساحت جاروب شده برحسب ( $m^2$ )،  $R$  شعاع روتور توربین برحسب ( $m$ ) و  $L$  طول پره توربین برحسب ( $m$ ) است. سطح جاروب شده حجم جریان هوایی که توسط توربین جابه‌جا می‌شود را محدود می‌کند. روتور توربین انرژی موجود در باد را به حرکت چرخشی تبدیل می‌کند به طوری که اگر مساحت توربین بادی بزرگ‌تر باشد توان خروجی بیشتری را در همان شرایط بادی فراهم می‌کند [۱].

### ۲-۲-۳ بررسی نحوه‌ی تأثیر سرعت جریان ورودی با تغییر گام تیغه

توربین بادی محور عمودی داریوس برخلاف ظاهر ساده، محاسبات پیچیده‌ای دارد. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش‌روی توربین بادی داریوس، گستره‌ی وسیع زاویه حمله است که ایرفویل توربین آن را تجربه می‌کند. افزایش بیش از حد زاویه حمله، باعث بروز پدیده‌ی جدایش جریان از روی ایرفویل می‌شود که سبب کاهش قابل‌توجهی در نیروی برآ و عملکرد توربین بادی می‌شود. در شکل ۱-۳ نمایی از یک ایرفویل توربین بادی داریوس و مؤلفه‌های مؤثر در تغییر مداوم زاویه حمله که تفاوت سرعت جریان ورودی توربین را به همراه دارد مشاهده می‌شود [۴۸، ۱].



شکل ۱-۳: مؤلفه‌های سرعت جریان توربین داریوس با پره‌های مستقیم [۴۸]

مطابق شکل ۱-۳،  $V_c$  مؤلفه‌ی سرعت وتری و  $V_n$  مؤلفه‌ی سرعت عمودی است. سرعت جریان ورودی در قسمت‌های بالا و پایین دست توربین بادی مدل داریوس ثابت نیست. مؤلفه‌ی سرعت وتری و سرعت عمودی با استفاده از روابط (۲-۳) و (۳-۳) محاسبه می‌شود [۴۸].

$$V_c = R\omega + V_a \cos \theta \quad (۲-۳)$$

$$V_n = V_a \sin \theta \quad (۳-۳)$$

در رابطه‌های بالا  $V_a$  مؤلفه‌ی سرعت محوری جریان عبوری،  $\omega$  سرعت چرخشی توربین،  $R$  شعاع توربین و  $\theta$  زاویه‌ی چرخش روتور توربین بادی است. از رابطه ۳-۴ می‌توان زاویه‌ی حمله را با استفاده از مؤلفه‌های سرعت بدست آورد.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{V_n}{V_c} \right) \quad (۴-۳)$$

سرعت نسبی جریان ( $W$ ) که برآیند سرعت وتری و سرعت عمودی است، مطابق رابطه‌ی ۳-۵ محاسبه می‌شود.

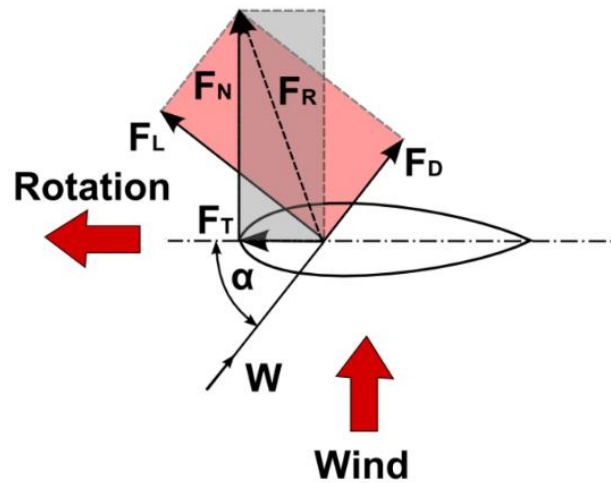
$$W = \sqrt{V_c^2 + V_n^2} \quad (۵-۳)$$

نسبت سرعت جریان با جایگذاری رابطه‌های  $V_c$  و  $V_n$  و با بی‌بعد سازی مؤلفه‌ی جریان آزاد،  $V_\infty$  محاسبه می‌شود.

$$\frac{W}{V_\infty} = \frac{W}{V_a} \cdot \frac{V_a}{V_\infty} = \frac{V_a}{V_\infty} \sqrt{\left[ \left( \frac{R\omega}{V_\infty} \right) + \cos \theta \right]^2 + \sin^2 \theta} \quad (۶-۳)$$

### ۳-۲-۳ محاسبه‌ی نیروهای برآ، پسا و ضرایب عمودی و مماسی

در شکل ۲-۳ نیروهای وارد بر یک ایرفویل توربین بادی مدل داریوس نشان داده شده است. جهت نیروهای برآ ( $L$ ) و پسا ( $D$ ) با توجه به جهت سرعت نسبی جریان ( $W$ ) در شکل رسم شده است. جهت نیروی برآ، عمود بر بردار ( $W$ ) است به گونه‌ای که گشتاور حاصل از این نیرو حول محور توربین، هم‌جهت با چرخش توربین بادی واقع می‌شود. جهت نیروی پسا، هم‌جهت با بردار ( $W$ ) است، به طوری که گشتاور حاصل از این نیرو حول محور توربین در خلاف جهت دوران توربین عمل می‌کند و باعث توان تولیدی در توربین بادی می‌شود. مؤلفه‌های  $F_n$  و  $F_t$  به ترتیب نیروی مماسی و عمودی خالص است که با استفاده از رابطه‌های (۳-۷) و (۳-۸) محاسبه می‌شوند [۴۹].



شکل ۳-۲: نیروهای وارد شده بر ایرفویل توربین بادی مدل داریوس [۴۹]

$$F_t = \frac{C_t}{2} \rho C H W^2 \quad (۷-۳)$$

$$F_n = \frac{C_n}{2} \rho C H W^2 \quad (۸-۳)$$

در رابطه‌های (۷-۳) و (۸-۳)  $\rho$  چگالی هوا برحسب  $(kg/m^3)$ ،  $C$  طول وتر ایرفویل برحسب  $(m)$  و  $H$  ارتفاع توربین برحسب  $(m)$  است. ضریب نیروی مماسی  $C_t$ ، اختلاف مؤلفه‌ی مماسی و ضریب نیروی عمودی  $C_n$ ، از اختلاف مؤلفه‌ی عمودی نیروهای برآ و پسا محاسبه می‌شود.

$$C_t = C_l \sin \alpha - C_d \cos \alpha \quad (۹-۳)$$

$$C_n = C_l \cos \alpha + C_d \sin \alpha \quad (۱۰-۳)$$

### ۳-۲-۴ محاسبه‌ی گشتاور توربین، توان خروجی کل و ضرایب آن

گشتاور کل پره‌های توربین بادی با استفاده از رابطه‌ی (۱۱-۳) به دست می‌آید.

$$T = N F_t R \quad (۱۱-۳)$$

در رابطه‌ی (۱۱-۳)  $T$  گشتاور توربین برحسب  $N, N.m$ ، تعداد تیغه‌های توربین،  $R$  شعاع توربین برحسب  $m$  و  $F_t$  نیروی مماسی متوسط یک پره است که طبق رابطه‌ی (۱۲-۳) محاسبه می‌شود.

$$F_t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (12-3)$$

با به دست آوردن نیروی مماسی متوسط پره، گشتاور کل توربین بدست می‌آید و با در نظر گرفته سرعت چرخشی روتور توربین و با استفاده از رابطه‌ی (۱۳-۳) توان خروجی توربین به دست می‌آید [۴۹].

$$P = T \cdot \omega \quad (13-3)$$

بعد از محاسبه توان خروجی می‌توان ضریب توان  $C_p$ ، که بیانگر قدرت موجود در باد است را از رابطه‌ی (۱۴-۳) محاسبه کرد.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (14-3)$$

در رابطه‌ی (۱۴-۳)،  $P$  توان خروجی توربین برحسب  $W$ ، مساحت جاروب شده توسط توربین بادی برحسب  $m^2$  است. همچنین ضریب گشتاور با استفاده از رابطه‌ی (۱۵-۳) محاسبه می‌شود.

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A R V^2} \quad (15-3)$$

در رابطه‌ی (۱۶-۳) ارتباط بین ضریب توان و گشتاور توربین به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$C_t = \frac{C_p}{TSR} \quad (16-3)$$

در رابطه‌ی (۱۶-۳) مقدار  $TSR$ ، نسبت سرعت نوک تیغه است که به صورت حاصل ضرب شعاع روتور در سرعت زاویه‌ای روتور نسبت به سرعت جریان هوای آزاد، بیان می‌شود [۵۰].

$$TSR = \frac{R \cdot \omega}{V_\infty} \quad (17-3)$$

## ۳-۳ تجهیزات آزمایشگاهی

### ۳-۳-۱ دستگاه تونل باد

در این پژوهش به منظور بررسی رفتار جریان، از تونل باد موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است. اندازه‌گیری مشخصات جریان هوا شامل اندازه‌گیری سرعت، فشارهای استاتیکی و جریان هوا می‌باشد و با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مربوط به تونل باد، داده‌های حاصل از این اندازه‌گیری‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در ادامه نحوه‌ی عملکرد دستگاه‌های بکار رفته در این پژوهش و نرم‌افزارهای مورد استفاده شرح داده شده است.

کلیه آزمایش‌ها با استفاده از تونل باد مدار باز، در دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفته است. شکل ۳-۳ که با استفاده از نرم‌افزار Solidworks طراحی شده است به همراه شکل ۳-۴ تونل باد مدار باز را نشان می‌دهد. این تونل باد دارای اتاق آزمایش به ابعاد (۸۵۰×۸۵۰×۲۰۰۰) میلی‌متر است. تونل باد را می‌توان براساس شکل ظاهری به دو دسته کلی تونل باد، مدار باز<sup>۱</sup> و مدار بسته<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی نمود. همچنین براساس سرعت جریان هوا، تونل باد به پنج دسته زیر صوت<sup>۳</sup>، نزدیک صوت<sup>۴</sup>، صوت<sup>۵</sup>، بالای صوت<sup>۶</sup>، مافوق صوت<sup>۷</sup> تقسیم می‌شود. در تونل باد مدار باز، هوا از محیط مکیده شده و پس از عبور از قسمت‌های مختلف تونل باد و اتاق نمونه‌گیری دوبار به محیط باز می‌گردد. در این مدل از تونل باد مدار باز جریان هوای ورودی و خروجی هیچ ارتباطی با هم ندارد. شکل‌های زیر نمونه‌ای ساده از تونل

---

<sup>۱</sup> Open-Circuit

<sup>۲</sup> Closed-Circuit

<sup>۳</sup> Subsonic

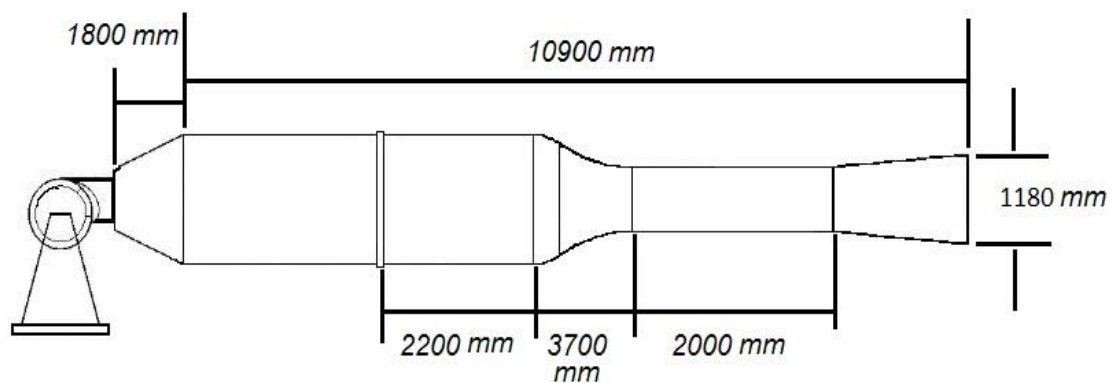
<sup>۴</sup> Transonic

<sup>۵</sup> Sonic

<sup>۶</sup> Supersonic

<sup>۷</sup> Hypersonic

باد مدار باز را نشان می‌دهد که جریان هوا توسط یک الکتروموتور سه فاز ۴۵ کیلووات به محیط داخل تونل باد دمیده می‌شود. اتاق نمونه‌گیری یا در اصطلاح گلوگاه<sup>۱</sup> در این منطقه دارای فشار کم و سرعت زیاد است، به همین خاطر نمونه‌ی آزمایش را در این قسمت قرار گرفته و در جریان‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. برای کنترل جریان ورودی هوا به تونل باد، از یک اینورتر<sup>۲</sup> تنظیم‌کننده سرعت موتور (کنترل دور) الکتروموتور تونل باد استفاده می‌شود. سرعت تونل باد دانشگاه از ۳ تا ۳۶ متر بر ثانیه متغیر است. به منظور کاهش اغتشاشات جریان ورودی هوا به اتاق آزمایش و یکنواخت شدن جریان هوا در تونل باد از شبکه‌های توری یا هانی کامب استفاده می‌شود.



شکل ۳-۳: شماتیک دستگاه تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود

<sup>۱</sup> Throat

<sup>۲</sup> Inverter

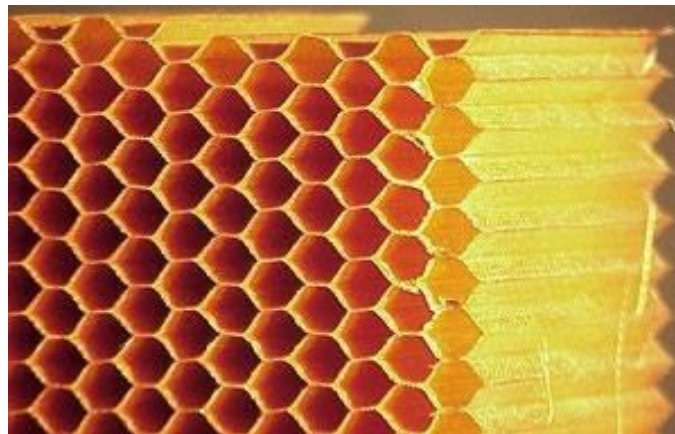




شکل ۳-۴: دستگاه تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود

### ۳-۳-۲ لانه زنبوری

لانه زنبوری در واقع سیال قبل از ورود به محفظه تست، از دورن حفره‌هایی به شکل لانه زنبور<sup>۱</sup> عبور می‌کند که این حفره‌ها هانی کامب نامیده می‌شود. در شکل ۳-۵ شیوه استفاده از آن‌ها در تونل باد نشان داده شده است. نکته مهمی که در طراحی و ساخت هانی کامب باید مورد توجه قرار گیرد این است که طول هانی کامب باید حداقل شش برابر قطرشان باشد.



شکل ۳-۵: لانه زنبوری با (هانی کامب) در تونل باد

<sup>۱</sup> Hony- Comb

### ۳-۳-۳ سرعت سنج، سیم داغ یا هات وایر

همان طور که در شکل ۳-۶ مشاهده می شود هات وایر<sup>۱</sup> یکی از ابزارهای دقیق سنجش سرعت سیال است، که با استفاده از آن در مکانیک سیالات سرعت جریان هوا اندازه گیری می شود. هات وایر، سیمی است که جریان الکتریکی از آن عبور می کند و درون جریان سیال قرار دارد. با عبور جریان سیال، به دلیل انتقال حرارت جابه جایی بین سیال و سیم، دمای سیم کاهش می یابد و هر چه سرعت سیال بیشتر باشد میزان این انتقال حرارت نیز بیشتر خواهد بود. با استفاده از هات وایر سرعت لحظه ای جریان و سرعت متوسط را اندازه گیری نموده و اغتشاشات جریان سیال، تنش های رینولدز، زاویه جریان (در صورت استفاده از سیم داغ دو بعدی یا سه بعدی) دمای جریان، جهت حرکت جریان (به خصوص در جریان های معکوس) و کمیت های جریان دوفازی را اندازه گیری می کنند. اساس کار سرعت سنج سیم داغ یا سنسور هات وایر انتقال حرارت از سیم داغ بسیار نازک که قطر رایج سیم داغ ۵ میکرومتر و طول آن برابر با ۱ تا ۳ میلی متر است. بنابراین این ابزار با توجه به اندازه آن توانایی محاسبه سرعت جریان سیال، به صورت نقطه ای را دارد. به منظور اندازه گیری رفتار جریان هوا از دستگاه جریان سنج سیم داغ ساخت شرکت فرا سنجش صبا استفاده شده است. با توجه به بالا بودن شدت اغتشاشات جریان آشفته، فیلتر پایین گذر ۳۰ کیلوهرتز انتخاب شده است. همچنین فرکانس قطع سرعت سنج سیم داغ به همراه پروب ۱۶ کیلوهرتز است. داده های اندازه گیری شده توسط جریان سنج سیم داغ از طریق کارت آنالوگ به دیجیتال به رایانه ارسال و توسط نرم افزار Flow Ware تجزیه و تحلیل می شود. برای جابجایی پروب از مکانیزم انتقال دهنده استفاده شده که دقت این مکانیزم ۰/۰۱ میلی متر در سه جهت است. حرکت مکانیزم انتقال دهنده توسط رایانه و نرم افزار کنترل می شود.

---

<sup>۱</sup> Hot- Wire

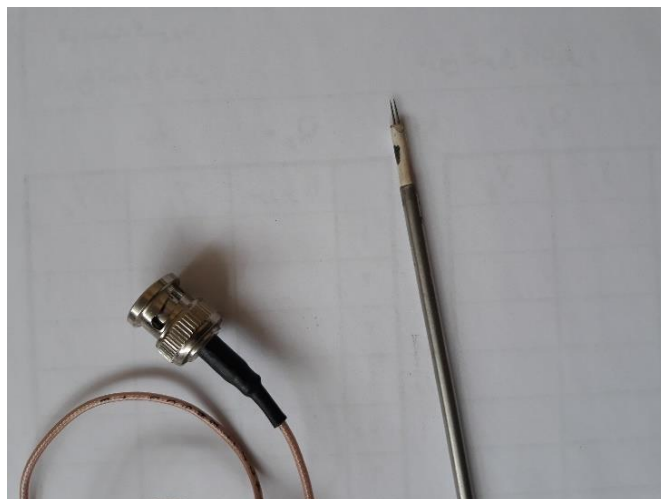


شکل ۳-۶: دستگاه سرعت سنج سیم داغ یا (هات وایر)

### ۳-۳-۴ پروب سیم داغ

یکی از اجزای دستگاه سرعت سنج سیم داغ که در شکل ۳-۷ دیده می شود پروب<sup>۱</sup> است که شامل سنسور، پایه ها، بدنه، کابل و اتصالات است. در اینجا، پروب به معنای کاوشگر سرعت یا سرعت سنج در نظر گرفته شده است. جنس سیم هات وایر از پلاتین یا تنگستن است. سنسور موجود در هات وایر، بسیار نازک بود و قطر رایج سیم داغ برابر با ۵ میکرون است. هات وایر برای محاسبه سرعت در جریان های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی استفاده می شود. در این آزمایش از هات وایر یک بعدی استفاده می شود که در شکل ۳-۷ مشاهده می شود.

<sup>۱</sup> Probe



شکل ۳-۷: پایه پروب مورد استفاده در آزمایشگاه تونل باد

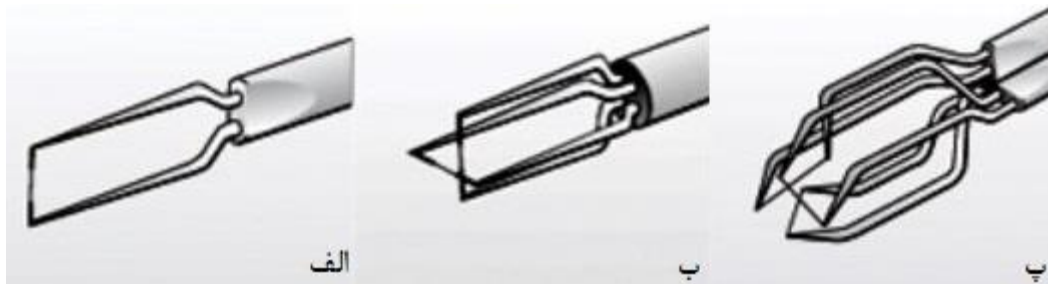
### ۳-۳-۵ پایه پروب یک بعدی

پروب یک بعدی دارای یک سنسور بوده و قادر به اندازه‌گیری سرعت در جهت جریان سیال است. پروب یک بعدی را می‌توان مطابق شکل ۳-۸ به پروب مستقیم<sup>۱</sup> و به پروب مایل<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی نمود. در پروب مستقیم پایه‌ها موازی و هم‌اندازه بوده به‌طوری‌که سنسور عمود بر جریان سیالی که موازی ساقه است، قرار می‌گیرد. در پروب مایل پایه‌ها موازی بوده ولی اندازه آن‌ها با یکدیگر متفاوت است و سنسور با جریان سیالی موازی بوده ولی اندازه آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. هات‌وایر برای محاسبه سرعت در جریان‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی استفاده می‌شود. از هات‌وایر یک بعدی برای محاسبه سرعت جریان استفاده می‌شود. سنسور هات‌وایر دو بعدی برای محاسبه سرعت جریان سیال در جریان‌های دو بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمانی که هدف پژوهش محاسبه سرعت جریان سیال در جریان سه بعدی است می‌توان از سنسور هات‌وایر سه بعدی استفاده نمود.

---

<sup>2</sup> Single Normal

<sup>3</sup> Single Yaw



شکل ۳-۸: پایه سنسور هات‌وایر؛ در شکل (الف) سنسور هات‌وایر یک بعدی، در شکل (ب) سنسور هات‌وایر دوبعدی، در شکل (پ) سنسور هات‌وایر سه بعدی

### ۳-۳-۶ دستگاه جوش سنسور هات‌وایر

دستگاه جوش سنسور هات‌وایر، که معمولاً از جنس فولاد ضد زنگ نیکل ساخته شده است با جوش القایی و یا لحیم کاری سنسور هات‌وایر به دو پایه پروب جوش می‌دهد. چون سنسور هات‌وایر خیلی نازک است معمولاً پایه پروب به شکل سوزنی ساخته می‌شود. قطر نوک دستگاه جوش سنسور هات‌وایر ۰/۱ میلی‌متر در شکل ۳-۹ دستگاه جوش سنسور هات‌وایر مشاهده می‌شود. در حالت عادی دستگاه جوش سنسور با یکی از پایه‌های پروب سنسور تشکیل آهن‌ربا می‌دهد، (این حالت توسط کلید صفر و یک که بر روی دستگاه جوش تعبیه شده بین پایه‌های پروب متغیر است). جوش کاری سنسور باید از پایه‌ای شروع شود که با دستگاه جوش آهن‌ربا تشکیل می‌دهد.



شکل ۳-۹: دستگاه جوش سنسور هات وایر

### ۳-۷ مکانیزم انتقال تغییر جهت پایه پروب

بعد از فرآیند جوش کاری، برای مشخص شدن سرعت جریان سیم داغ، باید سرعت لحظه‌ای جریان سیال در داخل محیط آزمایشگاه توسط هات وایر جوش داده شده به پایه پروب اندازه‌گیری شود، برای این اندازه‌گیری به مکانیزم انتقال تغییر جهت پایه پروب که از تجهیزات اصلی تونل باد می‌باشد نیاز است. این مکانیزم در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. قسمت‌های مکانیکی مکانیزم انتقال تغییر جهت پایه پروب را می‌توان در هر جهت از محیط آزمایش با دقت بسیار بالا تغییر مکان داد تا فشارهای منفی در داخل محیط آزمایشگاه کم شود. در صورتی که تونل باد از مدل مدار باز و یا مدار بسته دمنده باشد، مشکل نصب مکانیزم انتقال تغییر جهت پایه پروب وجود ندارد.



شکل ۳-۱۰: مکانیزم انتقال تغییر جهت پروب

### ۳-۳-۸ بادسنج هات وایر اسمارت سنسور مدل AR-866

بادسنج به روش مقاومتی سیم‌داغ با استفاده از هات‌وایر مدل AR-866 دبی سنج هات‌وایر مدل AR-866، بادسنجی جهت اندازه‌گیری سرعت سیال، دبی حجمی، دما و رطوبت نسبی هوا، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بادسنج حرارتی مدل AR-866 دارای قابلیت اتصال به کامپیوتر و ثبت داده‌ها تا ۲۰۰۰ مورد می‌باشد. اندازه‌گیری توسط بادسنج هات‌وایر از طریق انتقال گرما بین محیط و سنسور مقاومتی دستگاه، انجام می‌گیرد. سنسور هات‌وایر شامل دسته و یک میله آنتن مانند می‌باشد که طول آن ۲ متر باز شده و به نقاط مختلف در دسترس در مخازن و سیستم تهویه جهت اندازه‌گیری سرعت جریان، دما و جریان هوا هدایت می‌شود. صفحه دیجیتالی هات‌وایر AR-866 قابلیت نمایش همزمان سرعت و دبی دما را دارا می‌باشد. شکل ۳-۱۱ یک هات‌وایر مدل AR-866 مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱۱: سنسور هات وایر مدل AR-866

### ۳-۳-۹ گشتاور سنج

حاصل ضرب برداری نیروی وارد بر یک جسم از نقطه اثر نیرو تا نقطه‌ای که جسم بر اثر همین نیرو شروع به دوران می‌کند را گشتاور یا تورک<sup>۱</sup> گویند. واحد گشتاور نیوتن بر متر، کیلوگرم بر سانتی‌متر و فوت بر پوند می‌باشد. گشتاور با چرخش سه‌نظام یا حسگرهای مغناطیسی<sup>۲</sup> گشتاور (که به دما حساس می‌باشند) اندازه‌گیری می‌شود. با تغییرات گشتاور، ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی برای میله تغییر می‌نماید که می‌توان آن را توسط یک حسگر مغناطیسی اندازه‌گیری نمود. وقتی میله بدون بار است ضریب نفوذ پذیری آن در همه جا یکنواخت می‌باشد. اما تحت گشتاور تعداد خطوط میدان مغناطیسی و به تناسب گشتاور ضریب نفوذ پذیری تغییر می‌کند. حسگر از دور سیم‌پیچ اولیه و دو سیم‌پیچ ثانویه که در یک سمت میله قرار دارند ساخته می‌شود. حسگر گشتاور از یک میله باریک فولادی تشکیل شده که محکم به میله چرخان کوپل شده است. این ترکیب به‌عنوان یک آهنربای ثابت که شدت میدان مغناطیسی‌اش با گشتاور اعمال شده به میله متناسب است، عمل می‌کند. این

---

<sup>۱</sup> Turaqe

<sup>۲</sup> Magnetostrictive



میله باریک میان موتور و بار قرار داده می‌شود. یک حسگر مغناطیسی میدان تولید شده را به سینگال الکتریکی خروجی تبدیل می‌کند که با گشتاور اعمال شده متناوب می‌باشد. در شکل ۳-۱۲ یک گشتاورسنج مدل TQ-8800 دیجیتالی و نحوه اتصال آن به روتور توربین بادی محور عمود نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۲: گشتاورسنج (ترکومتر)

### ۳-۳-۱۰ دورسنج (تاکومتر)

تاکومتر یا دورسنج لیزری<sup>۱</sup> مدل RM-1500 )

شکل ۳-۱۳)، یک دورسنج دیجیتالی جهت اندازه‌گیری سرعت دورانی یک جسم در بازه زمانی برحسب واحد rpm یا rps می‌باشد. برای اندازه‌گیری با دورسنج لیزری بایستی، رفلکتور برجسیبی را روی سطح جسم در حال دوران روی یک نقطه خاص از روتور یا محور چسبانده و سپس لیزر تاکومتر

<sup>۱</sup> Tachometer

را نیز بر روری روتور بتابانیم که با هر دور زدن یک بار نور بازگشتی حس می‌شود و سرعت جسم چرخنده روی دورسنج نوری نمایش داده می‌شود.



شکل ۳-۱۳: تاکومتر یا دورسنج لیزری همراه با رفلکتور

### ۳-۴ ستاپ<sup>۱</sup> آزمایشگاه

در بخش پیشین به معرفی و کاربرد اجزای مختلف آزمایشگاهی و تجهیزات تونل باد پرداخته شد. در این قسمت به تشریح فرآیند ساخت توربین و ایرفویل‌های استفاده شده جهت مدل‌سازی توربین بادی و چگونگی انجام آزمایش پرداخته می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Setup

### ۳-۴-۱ نحوه‌ی ساخت شاسی توربین بادی

نوع شاسی یا بدنه که در این آزمایش در نظر گرفته شده است برای آزمایش توربین بادی محور عمود از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

۱- شاسی یا بدنه ۲- یاتاقان‌ها و بلبرینگ‌ها ۳- شاخه‌های نگهدارنده‌ی ایرفویل‌ها به بدنه ۴- میله‌ای ثابت نگهدارنده‌ی ایرفویل‌ها با گام متغیر  
در ابتدا مختصری از روند ساخت قسمت‌های از این بخش‌ها توضیح داده می‌شود.

#### ❖ شاسی یا بدنه

شاسی یا بدنه از دو بخش متحرک و ثابت تشکیل شده است. همانطور که در شکل ۳-۱۴ مشاهده می‌شود، بخش متحرک از یاتاقان‌ها و بلبرینگ تشکیل شده که دو عدد بلبرینگ داخل شفت با استفاده از ماشین تراش جاسازی شده است و یک میله به طول ۱۰۰ سانتی‌متر از میان دو عدد بلبرینگ عبور کرده و با استفاده از دو عدد خار میله و بلبرینگ‌ها با هم کوپل شده است. در قسمت بالا و پایین میله عمودی که به بلبرینگ‌ها متصل شده سه عدد شاخک ۳۰ سانتی‌متر جوش داده شده است. تیغه‌های توربین به این شاخک‌ها متصل می‌شوند. در قسمت شاخک‌های بالا و پایین بلبرینگ‌هایی جاسازی شده است که هم به‌عنوان نشیمن‌گاه تیغه‌های ایرفویل و هم به‌عنوان لولا عمل می‌کند. کلیه‌ی ابعاد در نظر گرفته شده برای ساخته توربین پیش‌رو براساس تطبیق با تونل باد موجود جهت اندازه‌گیری و انجام تست‌های استاندارد در محیط آزمایشگاه مذکور بوده است.



شکل ۳-۱۴: بدنه یا شاسی متحرک، توربین بادی با قسمت‌های نام گذاری شده

#### ❖ قسمت ثابته بدنه توربین

در شکل ۳-۱۵ بدنه ثابت توربین بادی که یکی از قطعات مهم در ساخت سیستم تغییر گام ایرفویل می‌باشد مشاهده می‌گردد. این قطعه که در بالای شاخک‌های نگهدارنده ایرفویل نصب می‌شود، دارای ابعادی به طول ۷۰ سانتی‌متر و عرض ۴۰ سانتی‌متر است. این سیستم که از نوع سیستم مفصلی می‌باشد با تغییر گام تیغه‌های ایرفویل سبب می‌شود که هر کدام از ایرفویل‌ها به‌طور جداگانه در هر دور چرخش گام مختلفی بگیرند. نوع سیستم مفصلی که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته شده است از بالا به بدنه ثابت متصل می‌شود و از سیستم مفصلی سه شاخک از آن خروجی گرفته می‌شود. مرکز ثقل بال  $\frac{1}{3}$  وتر از لبه حمله می‌باشد که از آن به‌عنوان مرکز لولا استفاده می‌شود و سیستم مفصلی را در فاصله  $\frac{1}{4}$  وتر از لبه حمله به ایرفویل وصل می‌گردد. همچنین از محل مرکز سیستم مفصلی دو عدد تنظیم کننده گام بر روی شاخک تعبیه شده است. از این تنظیم کننده‌ها جهت افزایش و کاهش زاویه گام تیغه توربین استفاده می‌شود.



شکل ۳-۱۵: قسمت ثابت بدنه توربین و همراه با قسمت متحرک توربین همراه با سیستم مکانیزم تغییر گام

### ۳-۴-۲ نحوه ساخت ایرفویل

در این آزمایش از سه نوع ایرفویل با سطح مقطع متفاوت و نامتقارن استفاده شده است. ایرفویل‌های آزمایش شده از مدل Naca-2412، Goe-602 و Goe-508 می‌باشند. ابتدا پروفیل ایرفویل را با لیزر برش داده و سپس آن را روی یونولیت چسبانده و با استفاده از وایرکات<sup>۱</sup> ایرفویل برش داده می‌شود. در شکل ۳-۱۶ در قسمت (الف) ایرفویل که با لیزر برش داده شده و به یونولیت چسبانده نشان داده شده است. در قسمت (ب) ترانسفوماتور کاهنده و کمان وایرکات که با این وسیله

<sup>۱</sup> Wire Cut



ایرفویل برش داده شده است نشان می‌دهد. به دلیل استفاده از قالب یکسان برای هر مدل از پره، از صلیبیت و یکنواختی پره‌ها می‌توان اطمینان حاصل نمود.



شکل ۳-۱۶: در قسمت (الف) ایرفویل برش داد شده با وایرکات و در قسمت (ب) دستگاه وایرکات و ترانسفورماتور

بعد از اینکه ایرفویل برش داده شد، انحنای بالایی و پایینی ایرفویل با چسب آمونیاک به هم چسبانده می‌شود. شکل ۳-۱۷ مراحل ساخت ایرفویل را نشان می‌دهد. قسمت (الف) نشان دهنده‌ی قالب ایرفویل مورد نظر است. قسمت (ب) قالب را که با دوغاب گچ پر شده نشان می‌دهد. بعد از چند ساعت که دوغاب گچ سفت شد ایرفویل مورد نظر را از یونولیت بیرون آورده، سپس ایرفویلی که با لیزر برش داده شده است را به قالب گچی متصل کرده و با تخته سنباده سطح ایرفویل صیقل کاری می‌گردد. در قسمت (پ) ایرفویل که با سنباده صقیل کاری شده را آماده کرده و قالب گچی را با پلاستیک مخصوص پوشانده و قالب برای فایبرگلاس آماده می‌گردد. در قسمت (ت) بعد از آن که قالب آماده گردید با چسب مخصوص رزین، الیاف پشم شیشه را روی قالب گچی چسبانده و سطح ایرفویل

را به چسب رزین آغشته کرده تا ایرفویل شکل بگیرد. بعد چند ساعت که فایبرگلاس سفت و خشک شد، از قالب گچی خارج می‌گردد.



شکل ۳-۱۷: در قسمت (الف) قالب ایرفویل (ب) نحوه‌ی دوغاب کاری ایرفویل (پ) ایرفویل صیقل داده شده و آماده برای فایبرگلاس (ت) فرآیند رزین کاری و چسباندن الیاف پشم شیشه

شکل ۳-۱۸ نوع الیاف پشم شیشه‌ی مورد استفاده در فایبرگلاس را نشان می‌دهد. از ترکیب این نوع الیاف با یک لایه رزین جهت سبک‌سازی و مستحکم نمودن ایرفویل استفاده می‌شود.



شکل ۳-۱۸: الیاف پشم شیشه برای فایبرگلاس

مرحله‌ی بعد با تخته سنباده سطح ایرفویل صقل کاری گردید؛ سپس یک لایه بتونه رو سطح ایرفویل با کارتک کشیده شده و پس از خشک شدن بتونه مجدداً روی سطح ایرفویل را با تخته

سنباده صقيل كاري كرده تا سطح ايرفويل صاف و يكنواخت شود. بعد از صقيل كاري كاور مخصوص با اتو روي سطح ايرفويل چسبانده شد. شكل ۳-۱۹ سه نمونه ايرفويل نامتقارن ساخته شده را نشان مي دهد.

شكل ۳-۲۰ و شكل ۳-۲۱ نمايه بالاي توربين بادي محور عمود داريوس ساخته شده در حالت بدون مكانيزم تغيه گام و در شرايط اعمال مكانيزم تغيه گام و نحوي تغيه زاويه تغيه را نشان مي دهد.



شكل ۳-۱۹: سه نوع ايرفويل نامتقارن ساخت شده از فايبرگلاس (الف) Naca-2412، (ب) Goe-602، (پ) Goe-508



شكل ۳-۲۰: نماي بالاي توربين بادي محور عمود در حالت بدون مكانيزم تغيه گام





شکل ۳-۲۱: نمای بالای توربین بادی محور عمود در حالت با مکانیزم تغییر گام

### ۳-۵ جمع بندی:

در فصل سوم روابط حاکم بر توربین مورد بررسی آورده شد. همچنین روش ساخت توربین مورد نظر تشریح گردید که در فصل چهارم نتایج حاصل از بررسی توربین ساخته شده در محیط آزمایشگاهی به وسیله‌ی تجهیزات معرفی شده در فصل سوم، آورده شده است.



## فصل ۴ : ارائه و بررسی نتایج

#### ۱-۴ مقدمه

در این بخش نتایج حاصل از بررسی تجربی توربین باد مدل داریوس با در نظر گرفتن دو حالت مکانیزم تغییر گام و بدون آن ارائه شده است. هدف از بررسی این مکانیزم بهبود وضعیت راه‌اندازی خودکار توربین باد در لحظه‌ی شروع به کار سیستم می‌باشد. به این منظور در ادامه نتایج حاصل از بررسی ضریب گشتاور و ضریب توان بر حسب سرعت نوک پره پرداخته شده است.

#### ۲-۴ ارائه نتایج

در این پژوهش ضریب گشتاور و ضریب توان به‌عنوان دو خروجی اصلی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. ضریب گشتاور پارامتری است که میزان نیروی وارد شده بر محور چرخشی توربین را نشان می‌دهد. همچنین ضریب توان بر حسب توان ورودی به سیستم نسبت به توان پتانسیل حرکتی باد تعریف می‌گردد. افزایش این دو پارامتر سبب بهبود عملکرد توربین شده و افزایش توان خالص خروجی از سیستم را به همراه دارد.

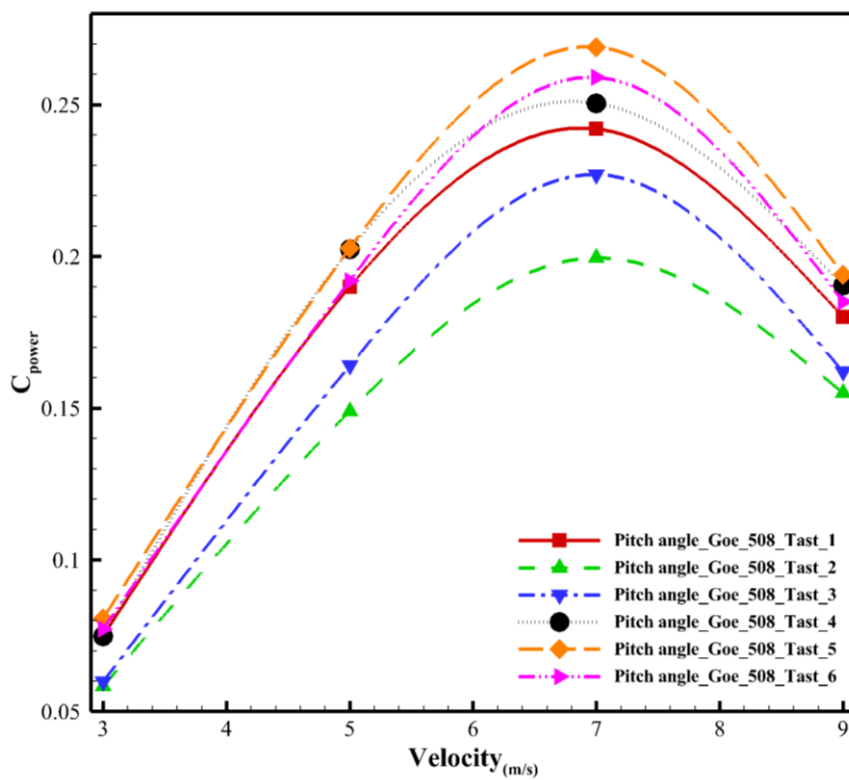
#### ۱-۲-۴ بررسی نتایج تجربی ایرفویل مدل Goe-508

در این بخش به بررسی نتایج تجربی حاصل از آزمایش ایرفویل مدل Goe-508 تحت دو حالت با مکانیزم تغییر گام و بدون مکانیزم در سرعت‌های مختلف پرداخته شده است.

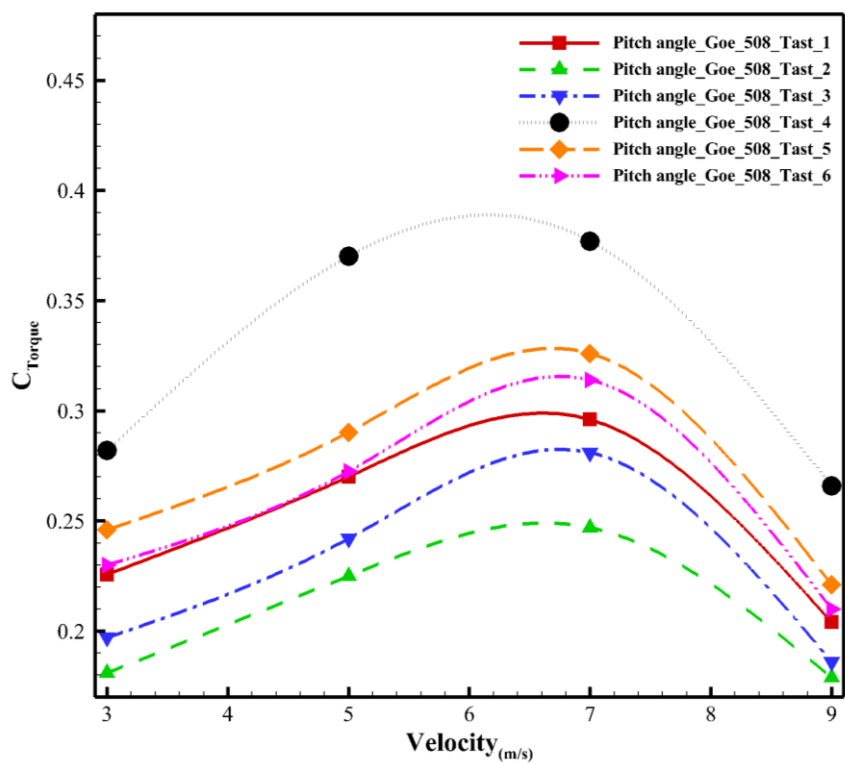
شکل ۱-۴ و شکل ۲-۴ به ترتیب تغییرات ضریب توان و ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد برای حالت اعمال مکانیزم تغییر گام، شکل ۳-۴ و شکل ۴-۴ به ترتیب تغییرات ضریب توان و ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد برای حالت بدون مکانیزم را در شش آزمایش متفاوت برای ایرفویل مدل Goe-508 نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها در سرعت‌های مختلف توربین باد در حالت با مکانیزم تغییر گام و بدون مکانیزم، نتایج حاصل اختلاف کمی را نشان می‌دهد که این امر به علت

خطای انسانی و شرایط محیط آزمایش می‌باشد. مطابق این نتایج بیشترین درصد خطا برای ضریب توان و ضریب گشتاور برای حالت اعمال مکانیزم تغییر گام به ترتیب بین آزمایش ۲ و آزمایش ۵، آزمایش ۲ و آزمایش ۴ بوده که برابر با ۰.۲۶/۰.۲٪ و ۰.۳۶/۰.۷۱٪ می‌باشد. همچنین بیشترین درصد خطا برای ضریب توان و ضریب گشتاور برای حالت بدون مکانیزم تغییر گام به ترتیب بین آزمایش ۲ و آزمایش ۵، آزمایش ۱ و آزمایش ۵ بوده که برابر با ۰.۱۳/۰.۸۳٪ و ۰.۸/۱.۱٪ می‌باشد.

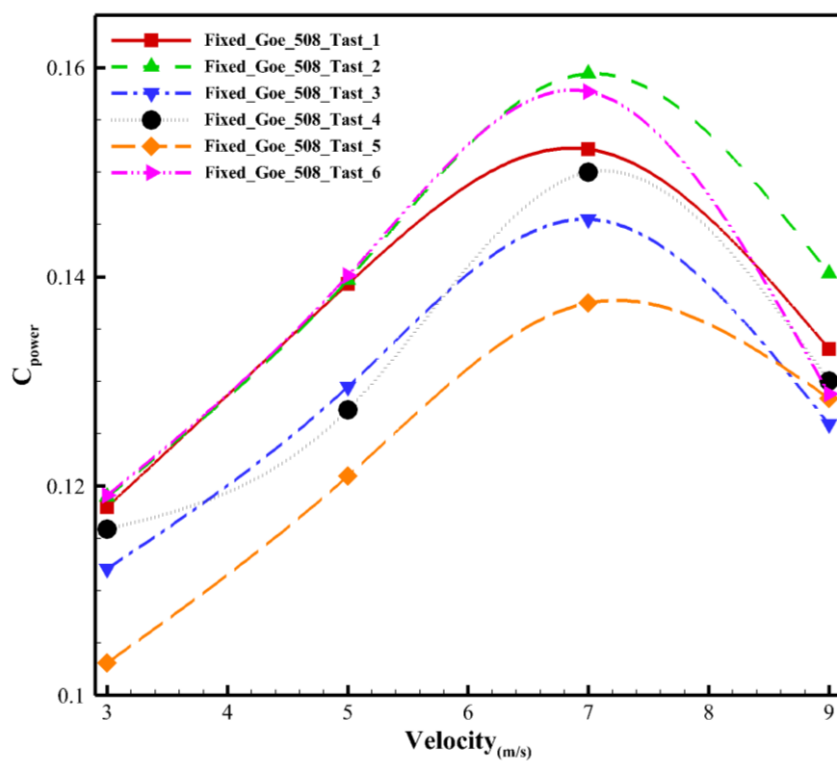
شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ به ترتیب تغییرات ضریب توان و ضریب گشتاور را بر حسب سرعت نوک پره در ایرفویل مدل Goe-508 نشان می‌دهد. یکی از مشکلات عمده در توربین‌های بادی عمود محور بدون مکانیزم در نسبت سرعت پایین نوک پره، راه‌اندازی خودکار توربین می‌باشد. به گونه‌ای که در نسبت سرعت‌های پایین، مقادیر ضریب توان، خیلی ناچیز است و توربین قادر به شروع چرخش نمی‌باشد. اعمال مکانیزم تغییرگام سبب عملکرد بهتر توربین در سرعت‌های مختلف می‌گردد. دلیل این امر، تغییر لحظه‌ای زاویه‌ی حمله‌ی تیغه‌های توربین در هر دور چرخش می‌باشد. مطابق شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ اعمال مکانیزم، سبب افزایش ضریب توان و ضریب گشتاور توربین، حتی در نسبت سرعت پایین شده است. به نحوی که در نسبت سرعت ۰/۵۵ ضریب توان ۰/۱۹/۶۶٪ و ضریب گشتاور ۰/۱۵/۳۲٪ افزایش یافته است. بیشترین درصد افزایش ضریب توان و ضریب گشتاور به ترتیب در نسبت سرعت ۰/۸۱۵ و ۰/۸۰۶ به دست آمده است.



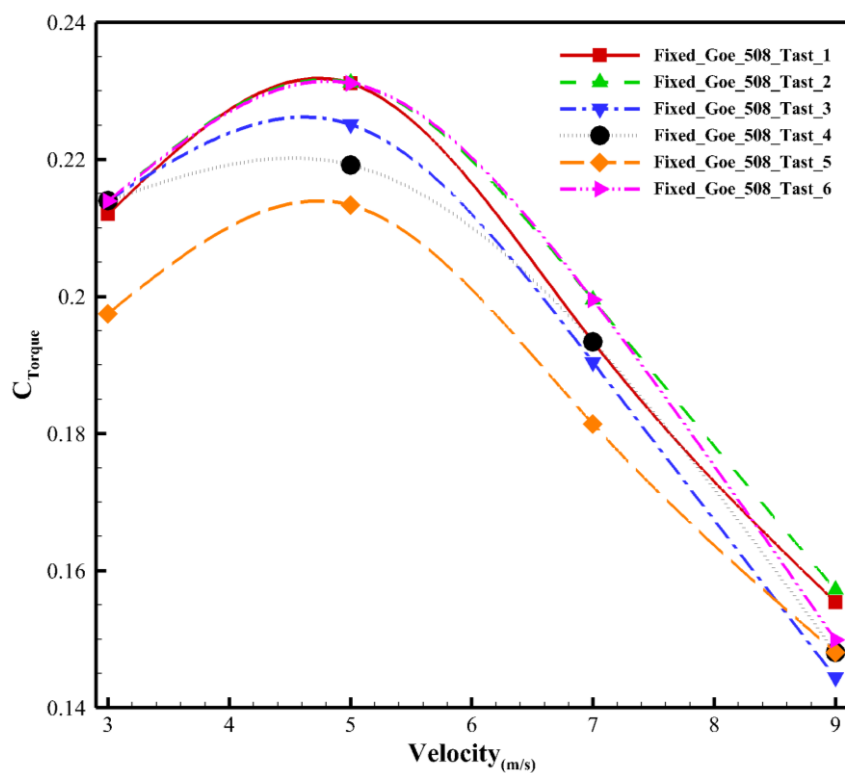
شکل ۴-۱: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



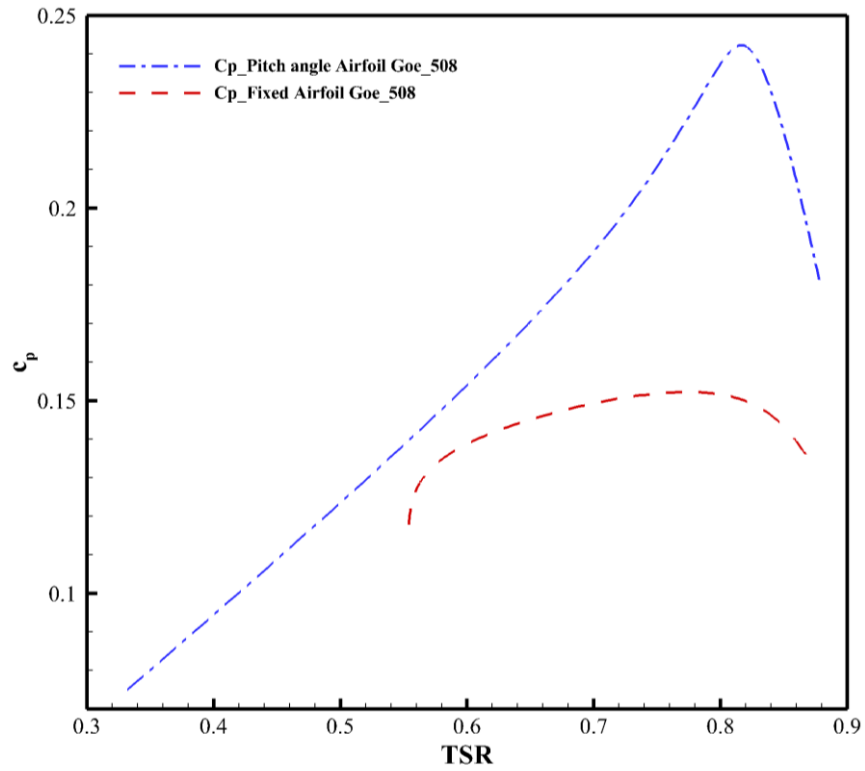
شکل ۴-۲: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



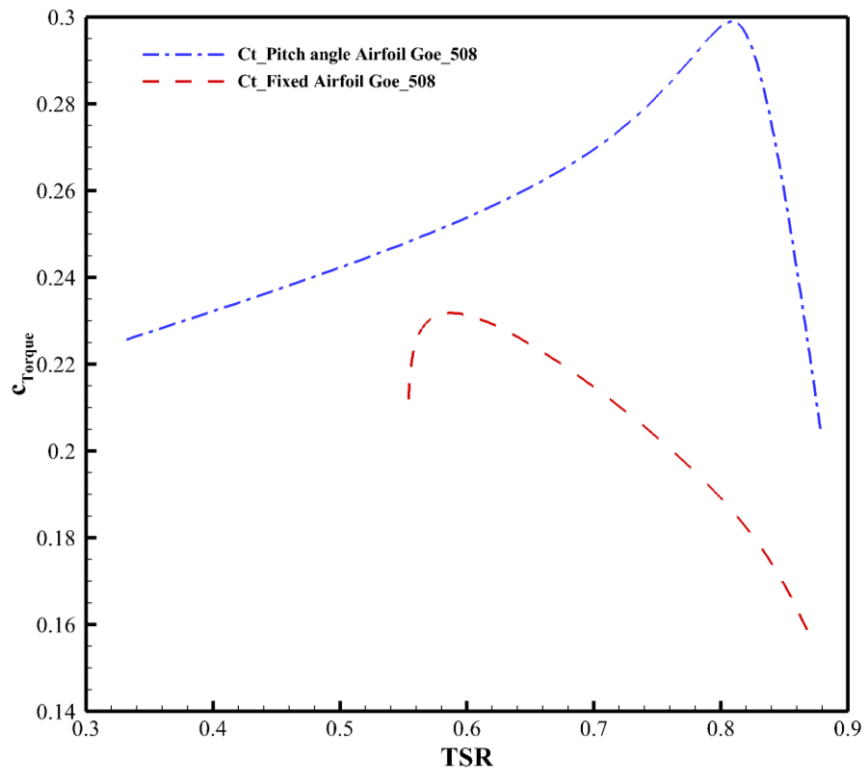
شکل ۴-۳: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



شکل ۴-۴: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



شکل ۴-۵: نمودار تغییرات و ضریب توان بر حسب سرعت نوک پره



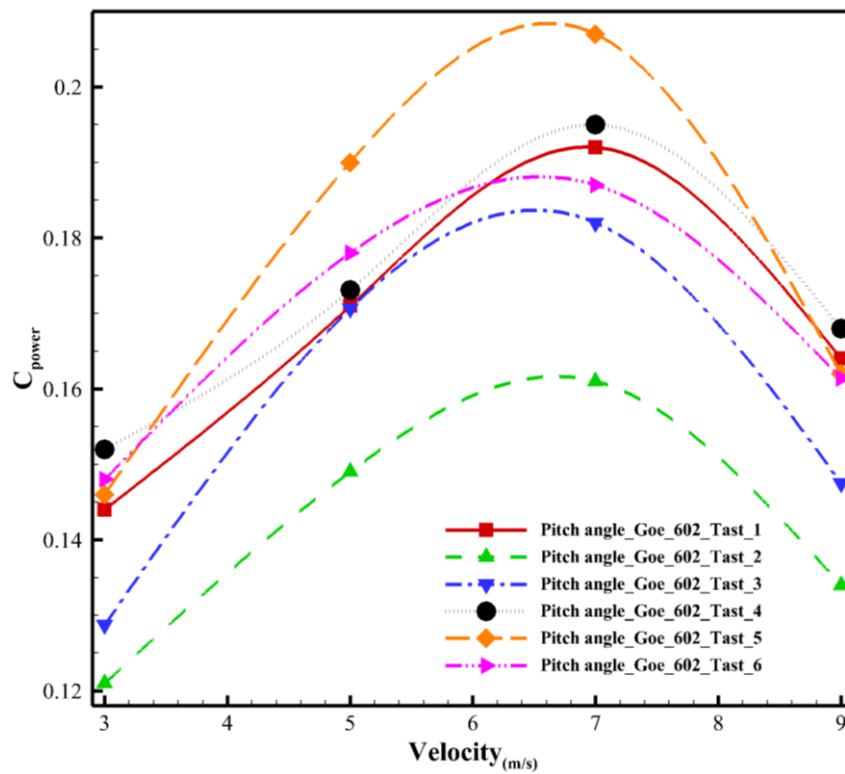
شکل ۴-۶: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت نوک پره



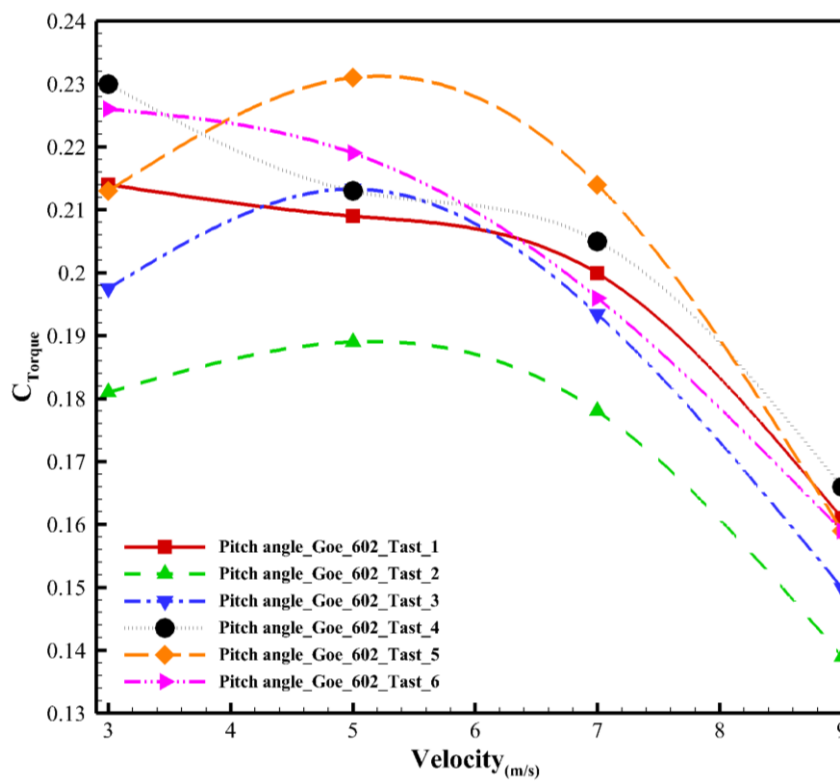
## ۲-۲-۴ بررسی نتایج تجربی ایرفویل مدل Goe-602

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از آزمایش ایرفویل مدل Goe-602 تحت دو حالت با مکانیزم تغییر گام و بدون مکانیزم در سرعت‌های مختلف پرداخته شده است.

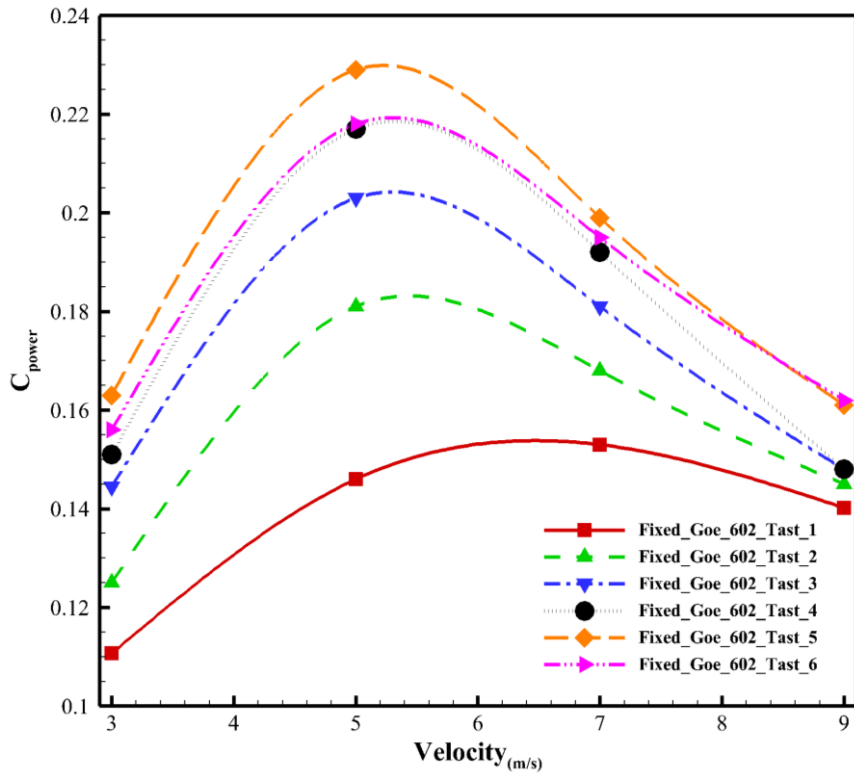
شکل ۷-۴ و شکل ۸-۴ به ترتیب تغییرات ضریب توان و ضریب گشتاور برحسب سرعت تونل باد برای حالت اعمال مکانیزم تغییر گام، شکل ۹-۴ و شکل ۱۰-۴ به ترتیب تغییرات ضریب توان و ضریب گشتاور برحسب سرعت تونل باد برای حالت بدون مکانیزم را در شش آزمایش متفاوت برای ایرفویل مدل Goe-602 نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها در سرعت‌های مختلف توربین باد در حالت با مکانیزم تغییر گام و بدون مکانیزم، نتایج حاصل اختلاف کمی را نشان می‌دهد که این امر به علت خطای انسانی و شرایط محیطی آزمایش می‌باشد. مطابق این نتایج بیشترین درصد خطا برای ضریب توان و ضریب گشتاور برای حالت اعمال مکانیزم تغییر گام به ترتیب بیت آزمایش ۲ و آزمایش ۵، آزمایش ۲ و آزمایش ۵ بوده که برابر با  $22/59\%$  و  $18/18\%$  می‌باشد. همچنین بیشترین درصد برای ضریب توان و ضریب گشتاور برای حالت بدون مکانیزم تغییر گام به ترتیب بین آزمایش ۱ و آزمایش ۵، آزمایش ۱ و آزمایش ۵ بوده که برابر با  $35/80\%$  و  $34/89\%$  می‌باشد. شکل ۴-۱۱ و شکل ۴-۱۲ به ترتیب تغییرات ضریب توان و ضریب گشتاور را برحسب سرعت نوک پره در ایرفویل مدل Goe-602 نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-۱۱ و شکل ۴-۱۲ اعمال مکانیزم، سبب افزایش ضریب توان و ضریب گشتاور توربین، حتی در نسبت سرعت پایین شده است. به نحوی که در نسبت سرعت  $0/76$  ضریب توان  $31/67\%$  و ضریب گشتاور  $30/38\%$  افزایش یافته است. درصد افزایش ضریب توان در نسبت سرعت  $0/96$  و بیشترین افزایش ضریب گشتاور در نسبت سرعت  $0/66$  به دست آمده است.



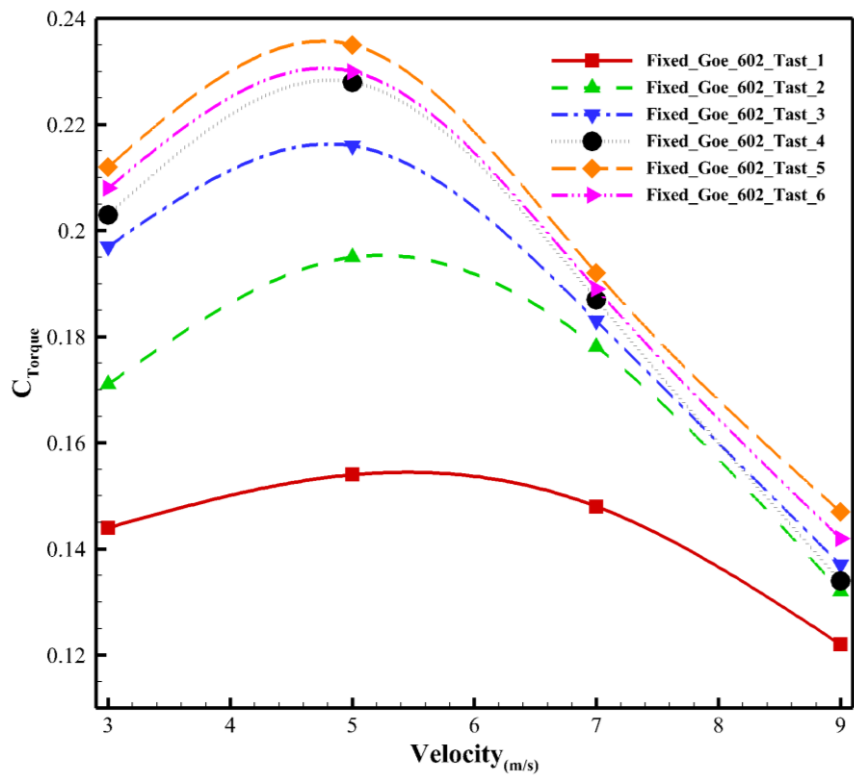
شکل ۴-۷: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



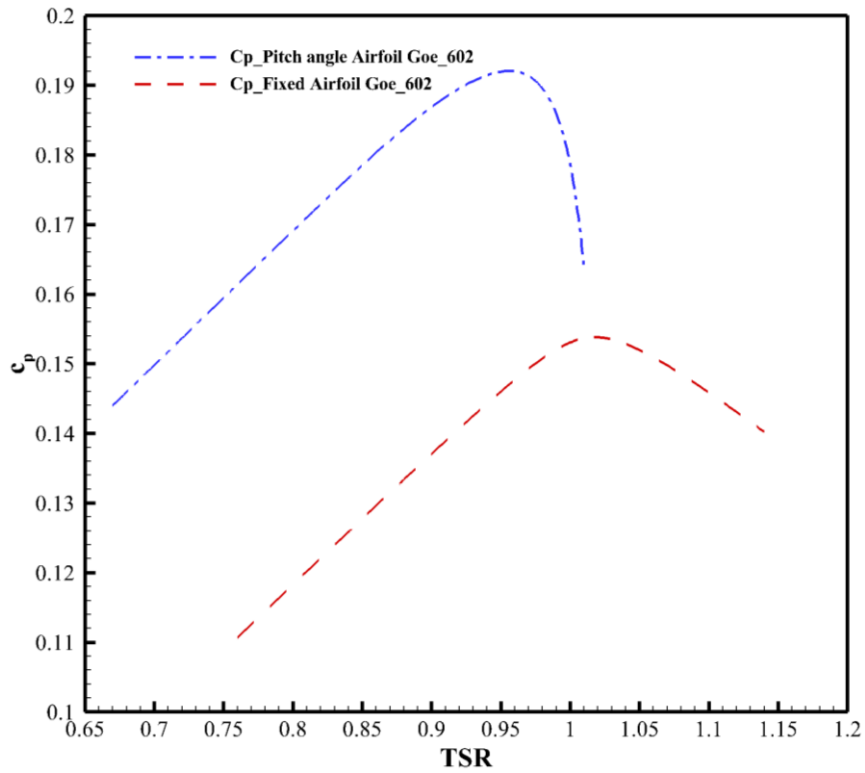
شکل ۴-۸: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



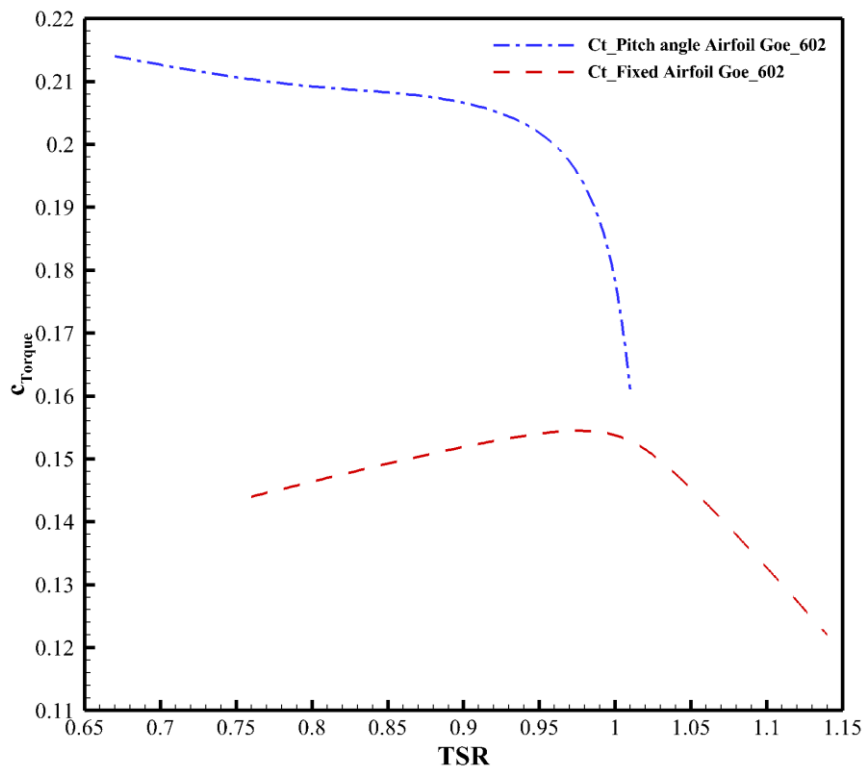
شکل ۴-۹: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



شکل ۴-۱۰: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



شکل ۴-۱۱: نمودار تغییرات و ضریب توان بر حسب سرعت نوک پره

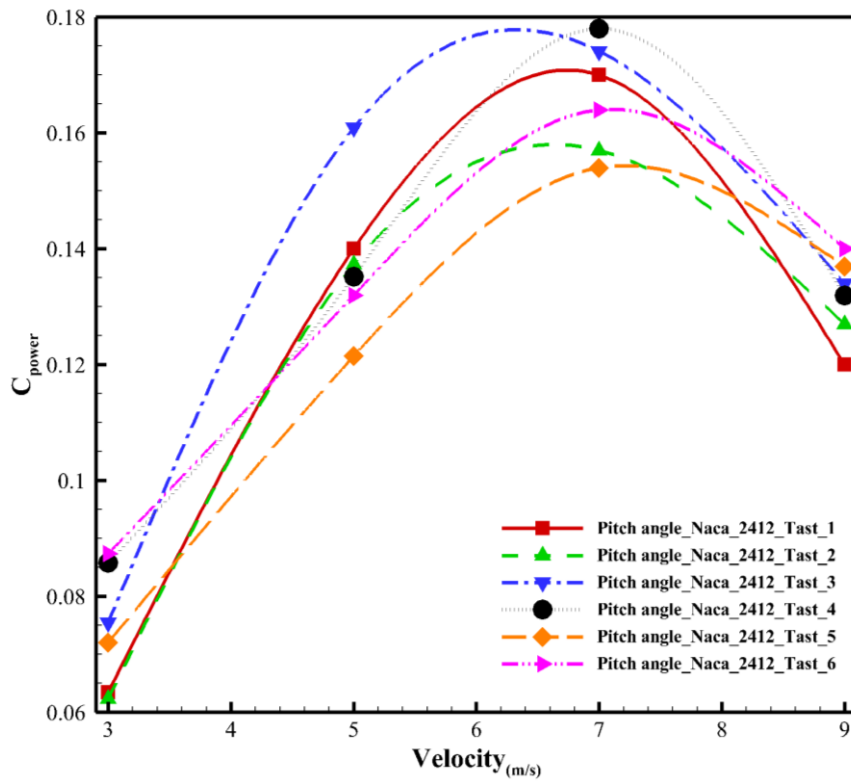


شکل ۴-۱۲: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت نوک پره

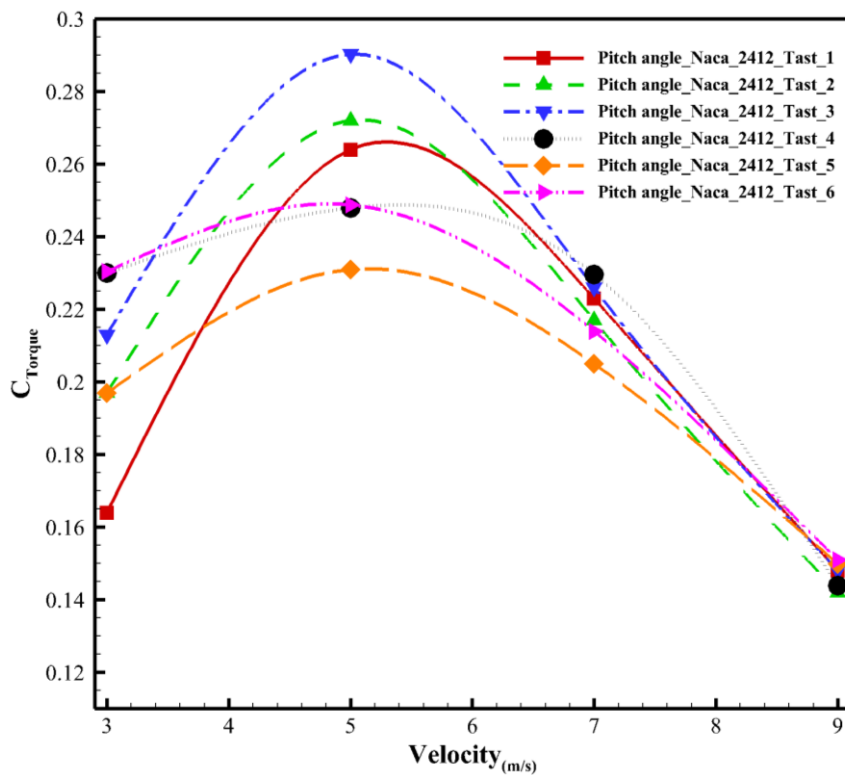
### ۳-۲-۴ بررسی نتایج تجربی ایرفویل مدل Naca-2412

در این بخش به بررسی نتایج تجربی حاصل از آزمایش ایرفویل مدل Naca-2412 تحت دو حالت با مکانیزم تغییر گام و بدون مکانیزم تغییر گام در سرعت‌های مختلف پرداخته شده است.

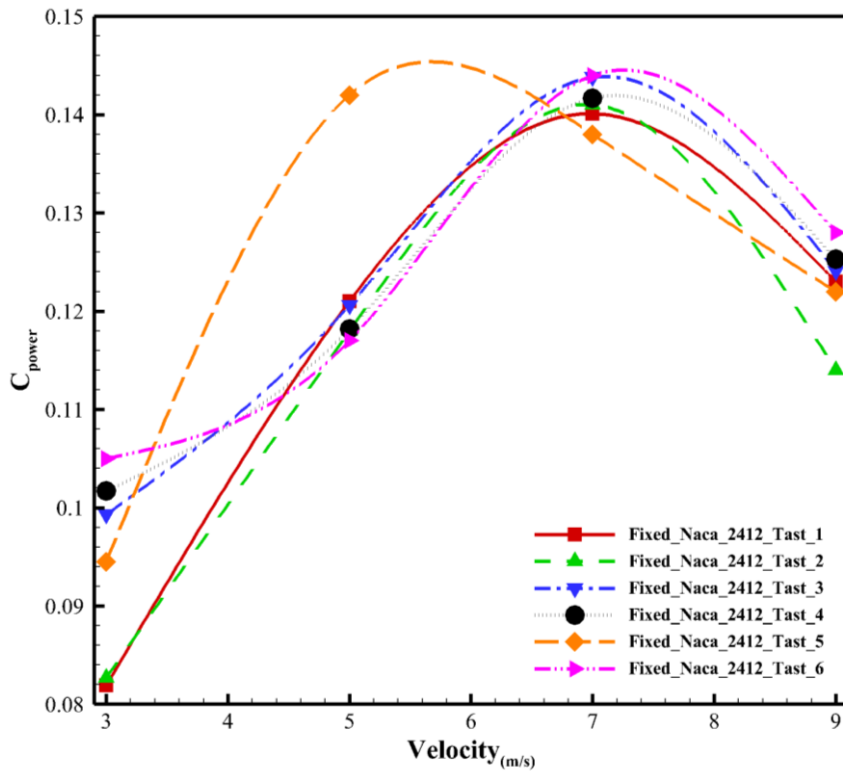
شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ به ترتیب تغییرات ضریب توان و ضریب گشتاور برحسب سرعت تونل باد برای حالت اعمال مکانیزم تغییر گام، شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶ به ترتیب تغییرات ضریب توان و ضریب گشتاور برحسب سرعت تونل باد برای حالت بدون مکانیزم را در شش آزمایش متفاوت برای ایرفویل مدل Naca-2412 نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها در سرعت‌های مختلف توربین باد در حالت با مکانیزم تغییر گام و بدون مکانیزم تغییر گام، نتایج حاصل اختلاف کمی را نشان می‌دهد که این امر به علت خطای انسانی و شرایط محیط آزمایش می‌باشد. مطابق این نتایج بیشترین درصد خطا برای ضریب توان و ضریب گشتاور برای حالت اعمال مکانیزم تغییر گام به ترتیب بین آزمایش ۳ و آزمایش ۵، آزمایش ۲ و آزمایش ۵ بوده که برابر با ۱۶/۹۴٪ و ۲۰/۶۸٪ می‌باشد. همچنین بیشترین درصد خطا برای ضریب توان و ضریب گشتاور برای حالت بدون مکانیزم تغییر گام به ترتیب بین آزمایش ۶ و آزمایش ۵، آزمایش ۱ و آزمایش ۲ بوده که برابر با ۶/۶۷٪ و ۲۱/۰۷٪ می‌باشد. شکل ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۸ اعمال مکانیزم، سبب افزایش ضریب توان و ضریب گشتاور توربین بادی حتی در نسبت سرعت پایین شده است. به نحوی که در نسبت سرعت ۰/۴۳ ضریب توان ۲۰/۹۳٪ و ضریب گشتاور ۲۰/۰۵٪ افزایش یافته است. بیشترین درصد افزایش ضریب توان در نسبت سرعت ۰/۷۴ و بیشترین درصد ضریب گشتاور در نسبت سرعت ۰/۳۷ به دست آمده است.



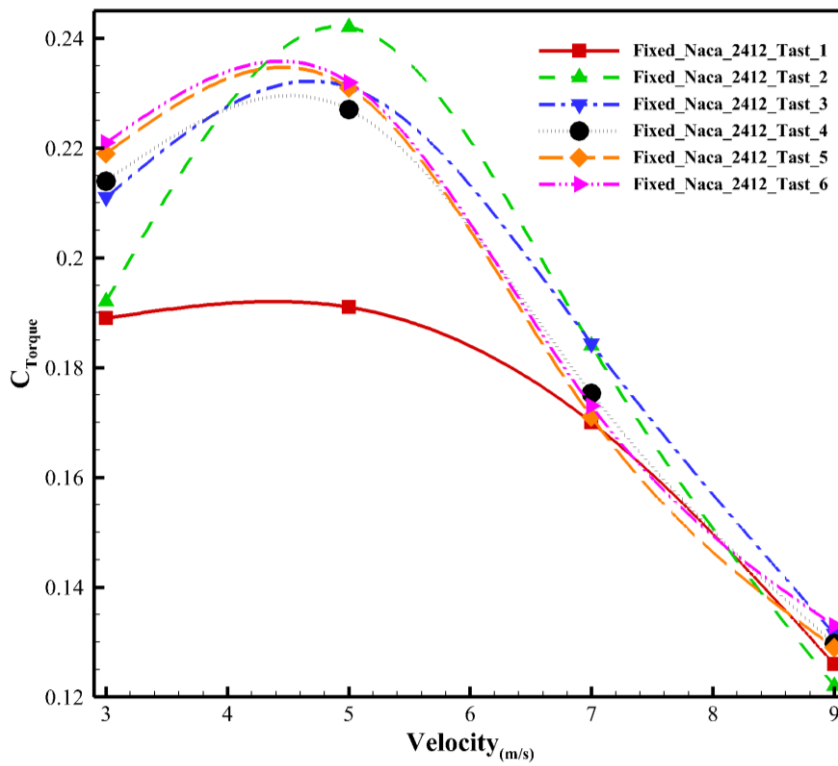
شکل ۴-۱۳: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



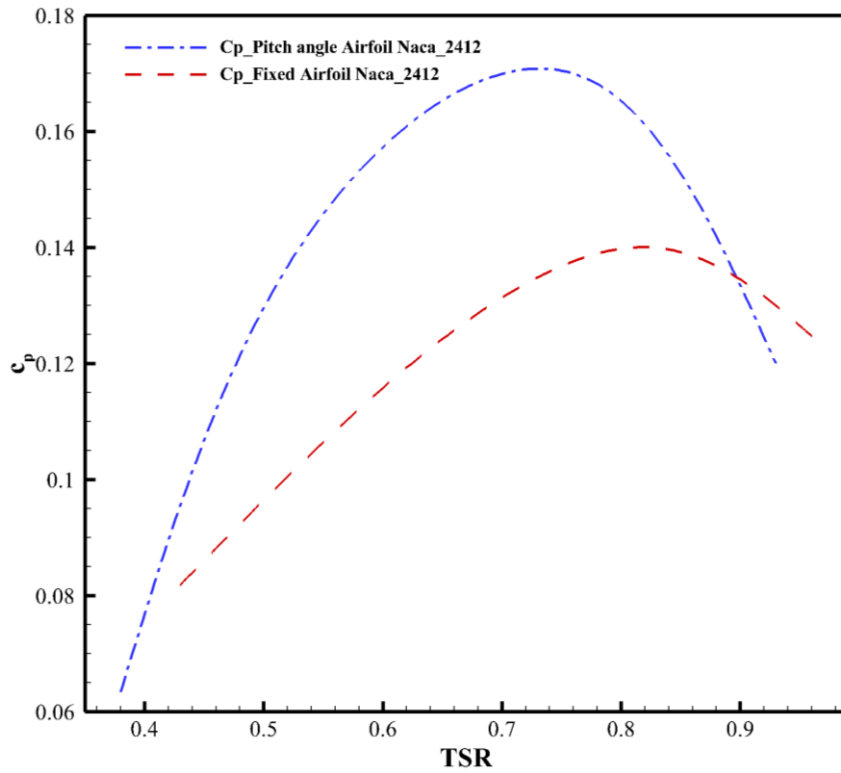
شکل ۴-۱۴: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



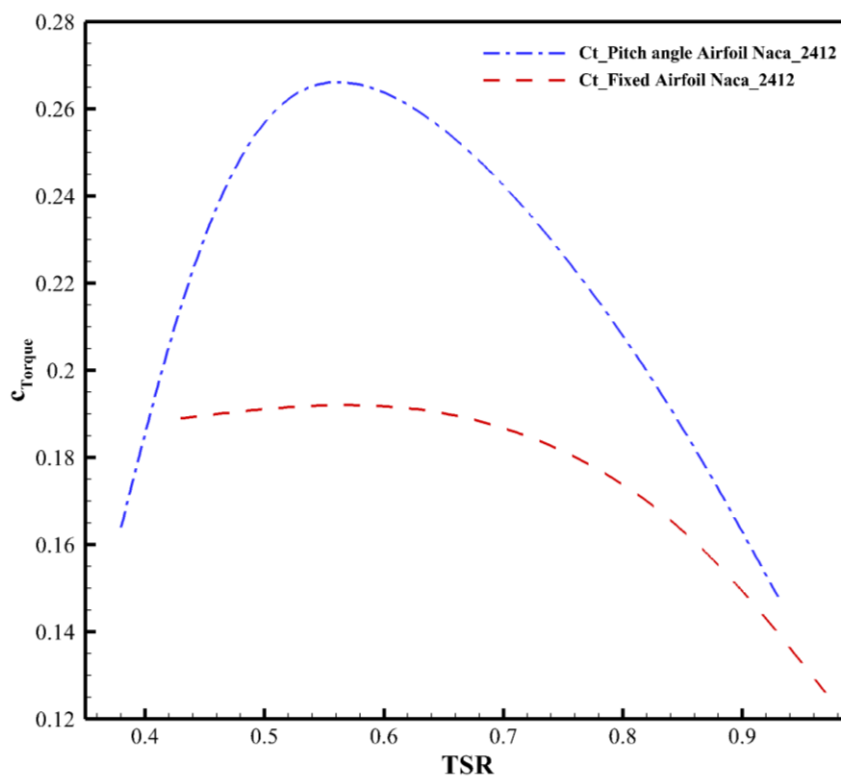
شکل ۴-۱۵: نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



شکل ۴-۱۶: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت تونل باد در شش آزمایش مختلف



شکل ۴-۱۷: نمودار تغییرات و ضریب توان بر حسب سرعت نوک پره

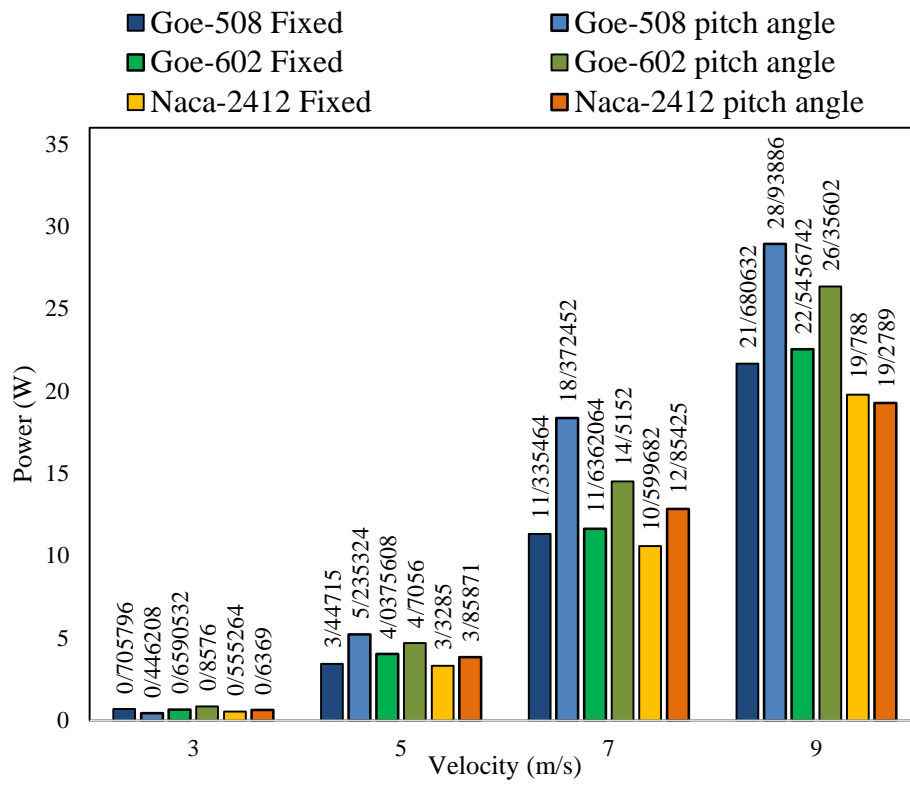


شکل ۴-۱۸: نمودار تغییرات ضریب گشتاور بر حسب سرعت نوک پره



#### ۳-۴ بررسی تغییرات توان

در این بخش به بررسی توان خالص خروجی توربین در سرعت‌های مختلف پرداخته شده است. شکل ۱۹-۴ توان خروجی خالص توربین برای مدل‌های مختلف پره توربین تحت شرایط اعمال مکانیزم تغییر گام و بدون اعمال مکانیزم تغییر گام تحت سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل ایرفویل مدل Goe-508 بهترین عملکرد را در میان ایرفویل‌های آزمایش شده داشته است. دلیل این امر هندسه آیرودینامیک ایرفویل مدل Goe-508 می‌باشد. در توربین‌های بادی محور عمود داریوس نیروی برآ عامل چرخش توربین است؛ ایرفویل مدل Goe-508 به دلیل هندسه آیرودینامیکی ضخامت مقطع بیشتری نسبت به باقی مدل‌های آزمایش دارد که سبب اعمال نیروی برآ بیشتری به آن می‌شود. همانطور که در شکل ۱۹-۴ بیشترین توان خروجی در سرعت ۹ متر بر ثانیه و با توجه به ابعاد نمونه‌ی ساخته شده می‌باشد که در حدود ۲۵ وات است چنانچه توان بالاتری مد نظر باشد می‌بایست نمونه واقعی داری ابعاد پره بزرگتر باشد. همچنین جهت دستیابی به توان‌های مورد نیاز بیشتر می‌بایست از چندین توربین باد به صورت موازی بهره برد. علاوه بر این افزایش سرعت باد سبب افزایش توان تولیدی می‌گردد که در این پژوهش بررسی نشده است.



شکل ۴-۱۹: توان خروجی توربین بر حسب سرعت باد

## فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، راندمان توربین بادی محور عمود داریوس در دو حالت مکانیزم با تغییر گام تیغه و بدون مکانیزم تغییر گام تیغه مورد بررسی قرار گرفته است. توربین بادی محور عمود داریوس به دلیل استفاده از نیروی برآ حاصل از پره‌های آیرودینامیکی، از توان و بازده بالاتری در بین توربین‌های بادی محور عمود برخوردار است، در عین حال با مشکل اساسی در راه‌اندازی توربین در سرعت‌های پایین روبرو است. با طراحی این مکانیزم تغییر گام تیغه توربین که در هر دور چرخش گام تیغه‌های توربین تغییر می‌کند قادر به تولید گشتاور کافی جهت راه‌اندازی به صورت خودکار در سرعت‌های پایین می‌باشد. در این پایان‌نامه، به منظور ارتقاء گشتاور راه‌اندازی و ایجاد قابلیت خود راه‌اندازی توربین بادی داریوس، از مکانیزم تغییر گام استفاده شده است. جهت بررسی عملکرد مکانیزم تغییر گام در راندمان توربین از سه مدل ایرفویل که از کامپوزیت ساخته شده استفاده گردید. توربین بادی محور عمود داریوس در حالت بدون اعمال مکانیزم و با اعمال مکانیزم در آزمایشگاه تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود مورد آزمایش قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که سیستم مکانیزم با تغییر گام مشکل اساسی راه‌اندازی در سرعت‌های پایین برطرف می‌کند. همین‌طور گشتاور راه‌اندازی توربین بادی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. در نسبت سرعت نوک پره ۰/۷۷ درصد افزایش ضریب توان و ضریب گشتاور برای ایرفویل مدل Goe-508 به ترتیب ۳۳/۰۳ و ۳۳/۳۳ درصد، ایرفویل مدل Goe-602، ۳۱/۲۸٪ و ۳۰/۷۶٪ و ایرفویل مدل Naca-2412، ۱۸/۹۳٪ و ۱۸/۳۴٪ بوده است. همچنین در میان ایرفویل‌های مورد آزمایش ایرفویل مدل Goe-508 در سیستم مکانیزم با تغییر گام علاوه بر بهبود راه‌اندازی خودکار و بهتر شدن گشتاور راه‌اندازی، بیشترین راندمان را داشته است.

## ۲-۵ پیشنهادها

برای تکمیل مطالعه‌ی انجام شده بر روی توربین‌های بادی محور عمود داریوس با مکانیزم تغییر گام، پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد.

- ✓ شبیه‌سازی عددی توربین با اعمال مکانیزم تغییر گام و مقایسه با نتایج این پژوهش.
- ✓ بررسی عملکرد مکانیزم تغییر گام بر روی مدل‌های دیگر ایرفویل.
- ✓ بررسی تأثیر تغییر زاویه‌ی گام بر روی عملکرد توربین و گشتاور راه‌انداز.
- ✓ بررسی تأثیر پارامترهای مختلف توربین بادی داریوس با مکانیزم تغییر گام، نظیر انحنا، ضخامت ایرفویل، تعداد پره‌ها، شعاع روتور توربین و....
- ✓ بررسی تأثیر دیمپل بر روی راندمان توربین با مکانیزم تغییر گام و مقایسه با نتایج این پژوهش.

## مراجع

- [1] Castillo, J., 2011. Small-scale vertical axis wind turbine design. Tampere University of Applied Sciences.
- [2] Jha, A.R., 2010. Wind turbine technology. CRC press.
- [3] Bhutta, M.M.A., Hayat, N., Farooq, A.U., Ali, Z., Jamil, S.R. and Hussain, Z., 2012. Vertical axis wind turbine–A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), pp.1926-1939.
- [4] Islam, M., Ting, D.S.K. and Fartaj, A., 2008. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(4), pp.1087-1109..
- [5] D'Ambrosio, M. and Medaglia, M., 2010. Vertical axis wind turbines: History, technology and applications..
- [6] Bernard, A. and Vielle, M., 2008. GEMINI-E3, a general equilibrium model of international–national interactions between economy, energy and the environment. *Computational Management Science*, 5(3), pp.173-206.
- [7] Hau, E., 2013. Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics. Springer Science & Business Media..
- [8] Jin, X., Wang, Y., Ju, W., He, J. and Xie, S., 2018. Investigation into parameter influence of upstream deflector on vertical axis wind turbines output power via three-dimensional CFD simulation. *Renewable energy*, 115, pp.41-53..
- [9] Kazem, H.A., Chaichan, M.T., Al-Waeli, A.H., Yousif, J.H. and Al-Waeli, K.H., Wind Resource Assessment for nine locations in Oman using weather data..
- [10] Huber, M., Dimkova, D. and Hamacher, T., 2014. Integration of wind and solar power in Europe: Assessment of flexibility requirements. *Energy*, 69, pp.236-246.0.
- [11] Eriksson, S., Bernhoff, H. and Leijon, M., 2008. Evaluation of different turbine concepts for wind power. *renewable and sustainable energy reviews*, 12(5), pp.1419-1434.

- [12] Nakajima, T., Tsutahara, M., Yamauchi, M. and Kuroda, K., 2015. Performance of vertical-axis type straight-bladed Darrieus turbine with elastic blades (Performance improvement by deformation of blades). *Journal of Fluid Science and Technology*, 10(1), pp.JFST0009-JFST0009.
- [13] Sutherland, H.J., Berg, D.E. and Ashwill, T.D., 2012. A retrospective of VAWT technology. Sandia Report No. SAND2012-0304.
- [14] Bychkov, N.M., Dovgal, A.V. and Sorokin, A.M., 2008. Parametric optimization of the Magnus wind turbine. In *International Conference Methods Aerophysical Research (ICMAR)*, Akademgorodok, Novosibirsk, June (p. 5).
- [15] Boyle, G., 2004. *Renewable energy*. Renewable Energy, by Edited by Godfrey Boyle, pp. 456. Oxford University Press, May 2004. ISBN-10: 0199261784. ISBN-13: 9780199261789, p.456.
- [16] Tong, W., 2010. *Wind power generation and wind turbine design*. WIT press.
- [17] Alon, I. and Cherp, A., 2012. Is China's outward investment in oil a global security concern?. *Transnational Corporations Review*, 4(4), pp.1-3..
- [18] Martinot, E. and Sawin, J., 2012. *Renewables global status report*. Renewables 2012 Global Status Report, REN21.
- [19] Fadai D., The feasibility of manufacturing wind turbines in Iran , *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11,. 536-542, 2007.
- [20] Mostafaeipour A., Sedaghat A., Ghalishooyan M., Dinpashoh Y., Mirhosseini M., Sefid M., Pour-Rezaei M., "Evaluation of wind energy potential as a power generation source for electricity production in Binalood, Iran ", *Journal of Renewable Energy*, Vol. 52, 222-229, 2013.
- [21] Mahale P., Jangid N., Gite A., "Vertical Axis Wind Turbine: A Lucid Solution for Global Small Scale Energy Crisis", *Journal of Academia and Industrial Research*, Vol. 3, No. 8, 393-396, 2015.
- [22] Tillman J. P., "Improvements to vertical axis wind turbine blades to aid in self-starting", M.Sc Thesis, Eastern Illinois University, 2011.
- [23] Oskarsdottir M.O., "A General Description and Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines", M.Sc Thesis, University of Iceland, 2014.

- [24] Martinot, E. and Sawin, J.L., 2009. Renewables: Global Status Report: 2007. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris and Worldwatch Institute, Washington, DC. Retrieved from [http://www.ren21.net/pdf/RE2007\\_Global\\_Status\\_Report.pdf](http://www.ren21.net/pdf/RE2007_Global_Status_Report.pdf).
- [25] Sunny, K.A. and Kumar, N.M., 2016. Vertical axis wind turbine: Aerodynamic modelling and its testing in wind tunnel. *Procedia Computer Science*, 93, pp.1017-1023.
- [26] Patel, M.R., 2005. Wind and solar power systems: design, analysis, and operation. CRC press.
- [27] D'Ambrosio, M. and Medaglia, M., 2010. Vertical axis wind turbines: History, technology and applications.
- [28] Islam, M., Ting, D.S.K. and Fartaj, A., 2008. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(4), pp.1087-1109.
- [29] Didane, D.H., Rosly, N., Zulkafli, M.F. and Shamsudin, S.S., 2019. Numerical investigation of a novel contra-rotating vertical axis wind turbine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, pp.43-53.
- [30] Delafin, P.L., Nishino, T., Wang, L. and Kolios, A., 2016, September. Effect of the number of blades and solidity on the performance of a vertical axis wind turbine. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 753, No. 2, p. 022033). IOP Publishing.
- [31] Boyle, G., 2004. Renewable energy. *Renewable Energy*, by Edited by Godfrey Boyle, pp. 456. Oxford University Press, May 2004. ISBN-10: 0199261784. ISBN-13: 9780199261789, p.456.
- [32] Kumar, A. and Saini, R.P., 2016. Performance parameters of Savonius type hydrokinetic turbine—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, pp.289-310.
- [33] Kumar, A. and Saini, R.P., 2016. Performance parameters of Savonius type hydrokinetic turbine—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, pp.289-310.



- [34] Takao, M., Maeda, T., Kamada, Y., Oki, M. and Kuma, H., 2008. A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row. *Journal of Fluid Science and Technology*, 3(3), pp.379-386.
- [35] Takao, M., Kuma, H., Maeda, T., Kamada, Y., Oki, M. and Minoda, A., 2009. A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row—Effect of guide vane geometry on the performance—. *Journal of thermal Science*, 18(1), pp.54-57.
- [36] McLaren, K., Tullis, S. and Ziada, S., 2012. Measurement of high solidity vertical axis wind turbine aerodynamic loads under high vibration response conditions. *Journal of Fluids and Structures*, 32, pp.12-26.
- [37] Kiwata, T., Yamada, T., Kita, T., Takata, S., Komatsu, N. and Kimura, S., 2010. Performance of a vertical axis wind turbine with variable-pitch straight blades utilizing a linkage mechanism. *Journal of Environment and Engineering*, 5(1), pp.213-225.
- [38] Miao, J.J., Liang, S.Y., Yu, R.M., Hu, C.C., Leu, T.S., Cheng, J.C. and Chen, S.J., 2012. Design and test of a vertical-axis wind turbine with pitch control. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 225, pp. 338-343). Trans Tech Publications.
- [39] Ionescu, R.D., GALFI, B.P., Dani, P., IVANOIU, M., Munteanu, I.R. and Száva, I., 2014. Experimental investigation on wind turbines blades using video image correlation (VIC).
- [40] Eriksson, S., Bernhoff, H. and Leijon, M., 2008. Evaluation of different turbine concepts for wind power. *renewable and sustainable energy reviews*, 12(5), pp.1419-1434.
- [41] Batista, N.C., Melício, R., Matias, J.C.O. and Catalão, J.P.S., 2011. Self-start performance evaluation in Darrieus-type vertical axis wind turbines: methodology and computational tool applied to symmetrical airfoils. *ICREPQ'11*, 51.
- [42] Yang, Y., Guo, Z., Song, Q., Zhang, Y. and Li, Q.A., 2018. Effect of Blade Pitch Angle on the Aerodynamic Characteristics of a Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine Based on Experiments and Simulations. *Energies*, 11(6), p.1514.

- [43] Rishmany, J., Daaboul, M., Tawk, I. and Saba, N., Optimization of a Vertical Axis Wind Turbine Using FEA, Multibody Dynamics and Wind Tunnel Testing.
- [44] Ostrach, S., 1953. National Advisory Committee for Aeronautics. An Analysis of Laminar Free-convection Flow and Heat Transfer about a Flat Plate Parallel to the Direction of the Generating Body Force.
- [45] Liang, Y.B., Zhang, L.X., Li, E.X., Liu, X.H. and Yang, Y., 2014. Design Considerations of Rotor Configuration for Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbines. *Advances in Mechanical Engineering* (Hindawi Publishing Corporation).
- [46] Joo, J.J., Marks, C.R., Zientarski, L. and Culler, A.J., 2015. Variable camber compliant wing-design. In 23rd AIAA/AHS Adaptive Structures Conference (p. 1050).
- [47] Hashem, I. and Mohamed, M.H., 2018. Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine. *Energy*, 142, pp.531-545.
- [48] Islam, M., Ting, D.S.K. and Fartaj, A., 2008. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(4), pp.1087-1109.
- [49] Wenehenubun, F., Saputra, A. and Sutanto, H., 2015. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. *Energy Procedia*, 68, pp.297-304.
- [50] Zanforlin, S. and Deluca, S., Effects of the Reynolds number and the tip losses on the optimal aspect ratio of straight-bladed Vertical Axis Wind Turbines. *Energy*, 148, 2018, 179-195.

## **Abstract**

Vertical axis wind turbines (or VAWTs) have attracted the attention of researchers because of their simple design and independency of wind direction. Among these turbines, the Darrieus turbine, which is based on lift force, has the highest efficiency. However, this type suffers from automatic start-up issue. The purpose of this dissertation is to combine the Darrieus turbine with the variable blade pitch angle mechanism in order to achieve the starting torque, proper performance range and to provide self-starting capability for the turbine. Initially, a prototype of Darrieus turbine has been constructed and in order to analyze the performance of the variable pitch angle mechanism, three straight type composite blades have been fabricated and investigated.

The results showed that the application of the mechanism produces the appropriate torque at low speeds in order to start the turbine. At 0.77% tip speed ratio (TSR), power factor and torque coefficient increase for Goe-508 airfoil were 33.03% and 33.33%, for Goe-602 airfoil were 31.28% and 30.76%, and for Naca-2412 airfoil were 18.93% and 18.34%, respectively. The results at different wind flow speeds have also shown that the Goe-508 airfoil had the highest increase in power factor and torque among the tested models including Goe-508, Goe-602 and Naca-2412.

**Keywords:** *Wind Turbine; Vertical Axis Wind Turbine; Darrieus Turbine; Variable Pitch Angle Mechanism*



**Shahrood University of Technology**

Faculty of Aerospace Engineering

A Thesis submitted in partial Fulfillment of the Requirement for  
The Degree of master of Science In  
Aerodynamic Engineering

An experimental study on the feasibility of  
increasing efficiency the wind turbines (with  
power less than 1000 watts)

**By:**

**Shahin Ghaed**

**Supervisor:**

**Dr. Ali Khaleghi**

January 2020