

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا-آئرو دینامیک

## شبیه سازی عددی تأثیر دیمپل روی عملکرد آئرو دینامیکی توربین بادی

نگارنده: حامد صدیقی حسن کیاده

استاد راهنما

دکتر پوریا اکبرزاده

استاد مشاور

مهندس علی صلواتی پور

دی ۱۳۹۸

# تقدیم اثر

تقدیم به مهربان فرشتگانی که:

مخاطبات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جبارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه‌های یکتا و زیبای زندگی ام، مدیون

حضور سبز آن‌هاست

تقدیم به خانواده‌ی عزیزم.

# شکر 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 بی‌دریغی که نسبت به من داشته‌و دارند، کمال تشکر و سپاس را دارم. از

استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر پوریا اکبرزاده به خاطر راهنمایی‌های ارزشمند و زحمات ایشان در کلیه‌ی مراحل انجام پایان‌نامه تقدیر و

تشکر می‌نمایم. همچنین از آقای مهندس علی صلواتی پور 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 شاکردی‌شان را داشتم، سپاس‌گزار می‌نموده از خدای

متعال سلامت و توفیق برای ایشان مسألت دارم.

حامد صدیقی

# تعهدنامه

این جانب حامد صدیقی حسن کیاده دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی هوافضا گرایش آئرو دینامیک دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی شبیه‌سازی عددی تاثیر دیمپل روی عملکرد آئرو دینامیکی توربین بادی تحت راهنمایی دکتر پوریا اکبرزاده متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این جانب انجام شده‌است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده‌است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده‌است.
- 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 شده‌است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده‌است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده‌است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده‌است.

## 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

یکی از مهم‌ترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در دنیا، انرژی باد است. در سال‌های گذشته، تعداد زیادی از تحقیقات روی تولید توان از انرژی بادی، مخصوصاً با استفاده از توربین بادی انجام شده‌است. بنابراین تعداد زیادی از این فعالیت‌ها (که به‌طور کلی به دو دسته فعال و غیرفعال روش کنترل جریان دسته‌بندی می‌شوند) به‌منظور بهبود عملکرد توربین بادی سازمان‌دهی شده‌اند. تعداد زیادی از این فعالیت‌ها بر اساس روش‌های افزایش نسبت نیروی برا به پسا و به تأخیر انداختن جدایش در پره‌ها بدون استفاده از انرژی خارجی است. (که روش‌های غیرفعال نام‌گذاری می‌شوند). در این پژوهش، اثر سطح دیمپل زده شده پره توربین بادی روی عملکرد آئرودینامیکی توربین بادی ۶۶۰-۷۴۷ به صورت شبیه‌سازی بررسی شده‌است. به همین منظور سطح مکشی توربین بادی با استفاده از دیمپل‌های کروی شکل به‌عنوان یک روش غیرفعال تصحیح شده‌است. معادلات پیوستگی و ممنتوم با استفاده از حلگر ناویر استوکس و مدل آشفته  $k - \omega$  SST حل شده‌است. تأثیر شعاع، مکان قرارگیری و تعداد دیمپل‌ها روی عملکرد آئرودینامیکی شامل گشتاور، توان تولیدی، جدایش سیال و نیروی محوری به‌منظور پیدا کردن حالت مناسب بررسی شد. سپس تأثیر زاویه پیچ و سرعت باد نیز روی حالت مناسب پره دیمپل زده‌شده مطالعه شد. نتایج نشان می‌دهد در صورت طراحی درست دیمپل (از نظر شعاع، مکان قرارگیری و تعداد) این روش غیرفعال می‌تواند در افزایش گشتاور توربین بادی مؤثر باشد. همچنین با توجه به نتایج، دیمپل در بهترین حالت توانسته است گشتاور تولیدی از توربین بادی را تا ۱۶/۰۸ درصد بهبود ببخشد.

**کلمات کلیدی:** توربین بادی، دیمپل، روش‌های غیرفعال کنترل جریان، زاویه پیچ، سرعت باد، عملکرد آئرودینامیکی

## فهرست مطالب

|    |   |
|----|---|
| ۱  | فصل ۱ مقدمه                               |
| ۲  | ۱-۱- تاریخچه استفاده از توربین بادی       |
| ۳  | ۲-۱- اهمیت ویژه توربین بادی               |
| ۵  | ۳-۱- ظرفیت انرژی بادی در جهان             |
| ۷  | ۴-۱- ظرفیت انرژی بادی در ایران            |
| ۷  | ۵-۱- مزایا و معایب توربین بادی            |
| ۱۱ | ۶-۱- توربین بادی با محور افقی             |
| ۱۱ | ۱-۶-۱- مزایا توربین افقی                  |
| ۱۲ | ۲-۶-۱- معایب توربین افقی                  |
| ۱۲ | ۷-۱- توربین بادی‌های امروزی               |
| ۱۴ | ۸-۱- اجزای تشکیل‌دهنده توربین بادی        |
| ۱۸ | ۹-۱- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه          |
| ۱۹ | فصل ۲ مروری بر تحقیقات انجام‌شده          |
| ۲۰ | ۱-۲- مقدمه                                |
| ۲۰ | ۲-۲- روش‌های غیرفعال کنترل جریان          |
| ۲۵ | ۳-۲- روش‌های فعال کنترل جریان             |
| ۲۷ | ۱-۲-۳- جت سنتتیک محرک                     |
| ۲۹ | ۲-۲-۳- کنترل جریان مبتنی بر پلاسما        |
| ۳۲ | ۴-۲- ضرورت انجام تحقیق                    |
| ۳۳ | ۵-۲- نوآوری تحقیق                         |
| ۳۵ | فصل ۳ معادلات حاکم                        |
| ۳۶ | ۱-۳- معادلات حاکم                         |
| ۳۶ | ۱-۱-۳- معادله پیوستگی برای جریان آشفته    |
| ۳۷ | ۲-۱-۳- معادلات ممنتوم برای جریان‌ات آشفته |

|    |   |
|----|---|
| ۴۰ | ..... دستهبندی مدل‌های توربولانسی                                 |
| ۴۲ | ..... Spalart-Allmaras مدل یک معادله‌ای                           |
| ۴۳ | ..... مدل‌های دو معادله‌ای  |
| ۴۴ | ..... مدل انتقال تنش برشی $k - \omega$                            |
| ۴۷ | <b>فصل ۴ تولید هندسه، شبکه‌بندی، شبیه‌سازی عددی و نتایج</b>       |
| ۴۸ | ..... ۱-۴ مقدمه   |
| ۴۸ | ..... ۲-۴ تولید هندسه پره توربین                                  |
| ۴۸ | ..... ۱-۲-۴ اسکن سه‌بعدی پره و برازش سطوح از ابر نقاط             |
| ۵۲ | ..... ۲-۲-۴ تصحیح هندسه اولیه برازش یافته                         |
| ۵۶ | ..... ۳-۲-۴ آماده‌سازی نهایی پره، تولید هندسه کامل پره توربین     |
| ۵۸ | ..... ۳-۴ هندسه استفاده‌شده در پژوهش حاضر                         |
| ۵۹ | ..... ۴-۴ تولید شبکه‌بندی موردنیاز برای میدان حل                  |
| ۶۲ | ..... ۵-۴ شرایط مرزی  |
| ۶۲ | ..... ۱-۵-۴ Velocity Inlet : ورودی                                |
| ۶۲ | ..... ۲-۵-۴ Symmetry : سطوح اطراف میدان حل                        |
| ۶۲ | ..... ۳-۵-۴ Pressure Outlet : سطح پشتی میدان حل                   |
| ۶۲ | ..... ۴-۵-۴ wall : اجزا توربین                                    |
| ۶۳ | ..... ۵-۵-۴ Interface : سطوح متناظر میدان حل                      |
| ۶۳ | ..... ۶-۵-۴ Interior : تمامی سطوح داخل میدان                      |
| ۶۴ | ..... ۷-۴ تنظیمات حلگر و معیار همگرایی                            |
| ۶۷ | ..... ۸-۴ صحت سنجی شبیه‌سازی عددی                                 |
| ۷۱ | ..... ۹-۴ صحت سنجی نیروی محوری و گشتاور تولیدی                    |
| ۷۳ | ..... ۱۰-۴ تأثیر دیمپل روی ایرفویل                                |
| ۷۴ | ..... ۱۱-۴ تأثیر اندازه و فواصل مختلف دیمپل روی گشتاور پره توربین |
| ۷۶ | ..... ۱۲-۴ مقایسه گشتاور تولیدی در زاویه پیچ‌های مختلف            |

|  |    |
|--|----|
| فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....                        | ۸۱ |
| ۵-۱- بحث و نتیجه‌گیری .....                              | ۸۲ |
| ۵-۲- پیشنهادها .....                                     | ۸۲ |
| پیوست: کانتورهای استخراجی از حل جریان شبیه‌سازی شده..... | ۸۳ |
| مراجع.....   | ۸۷ |

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: کشورهای چین، ایالات متحده آمریکا و آلمان، در بین کشورهای جهان بالاترین ظرفیت تولید انرژی بادی را در اختیار دارند..... ۶
- شکل ۱-۲: توربین بادی ساونیوس..... ۱۳
- شکل ۱-۳: توربین بادی داریوس..... ۱۴
- شکل ۱-۴: اجزای تشکیل دهنده یک توربین بادی محور افقی..... ۱۷
- شکل ۱-۲: طبقه‌بندی روش‌های کنترل جریان..... ۲۶
- شکل ۲-۲: پیکربندی جت سنتتیک متحرک..... ۲۷
- شکل ۳-۲: یک نوع از پیکربندی محرک DBD پلاسما..... ۳۰
- شکل ۴-۲: پلاسما محرک DBD بکار گرفته شده روی ایرفویل NACA0015..... ۳۰
- شکل ۱-۳: مدل‌های توربولانسی ارائه شده برای مدل‌سازی جریان آشفته..... ۴۱
- شکل ۲-۳: مقایسه‌ای از حل عددی روش پرهزینه LES با روش RANS..... ۴۲
- شکل ۱-۴: اسکن سه‌بعدی پره توربین بادی..... ۴۹
- شکل ۲-۴: نمای کلی از سطوح برازش یافته به ابر نقاط حاصل از اسکن سه‌بعدی توسط نرم‌افزار کتیا..... ۵۰
- شکل ۳-۴: نماهای گوناگون از سطوح برازش یافته به ابر نقاط..... ۵۱
- شکل ۴-۴: نمونه‌هایی از ایرادات تلورانسی هندسه برازش یافته در نرم‌افزار کتیا..... ۵۲
- شکل ۵-۴: نمایی از پره اصلاح شده در نرم‌افزار سالیدورکز به همراه مقاطع جدید تشکیل دهنده اسکلت پره..... ۵۳
- شکل ۶-۴: ساختار اسکلتی قسمت‌های مختلف پره بعد از تصحیح - الف: نمای اسکلتی کلی پره - ب: نمایی از اسکلت پره در راستای محور پره - ج: نمایی از اسکلت نوک پره..... ۵۴
- شکل ۷-۴: (الف) نمای نزدیک - (ب) نمای دور از نماهای گرافیکی از پره اصلاح شده..... ۵۵
- شکل ۸-۴: نماهایی از هندسه نهایی و اصلاح شده پره..... ۵۸
- شکل ۹-۴: (الف) نمای دوبعدی از پره دیمپل زده شده (ب) شماتیک ایرفویل دیمپل زده شده (نمای برشی A\_A)..... ۵۹

- شکل ۴-۱۰: الف) نمای کلی از شبکه بندی- ب) نمایی از شبکه بندی روی دیمپل..... ۶۰
- شکل ۴-۱۱: نمودار Y plus روی سطح پره..... ۶۱
- شکل ۴-۱۲: بررسی استقلال شبکه برای پره دیمپل زده شده با  $r=25\text{ mm}$  و  $P_d=300\text{ mm}$ ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۳: بلوک حل و شرایط مرزی..... ۶۴
- شکل ۴-۱۴: نمودار همگرایی نیروی محوری و باقیمانده‌ها..... ۶۶
- شکل ۴-۱۵: تصویر ثبت شده از زمان ۱۸:۲۰ دقیقه از فیلم گرفته شده از سیستم مانیتورینگ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۶: داده بادسنجی که در آن بازه ۱۰ دقیقه‌ای همراه با اندازه سرعت‌های متوسط در ارتفاع‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ متری مشخص شده‌اند..... ۶۹
- شکل ۴-۱۷: مقایسه نیروی محوری در زاویه پیچ ۲ درجه..... ۷۱
- شکل ۴-۱۸: مقایسه نیروی محوری در زاویه پیچ ۱۱ درجه..... ۷۲
- شکل ۴-۱۹: مقایسه گشتاور در زاویه پیچ ۲ درجه..... ۷۲
- شکل ۴-۲۰: مقایسه گشتاور در زاویه پیچ ۱۱ درجه..... ۷۳
- شکل ۴-۲۱: تأثیر دیمپل روی ضریب برا ایرفویل S809..... ۷۴
- شکل ۴-۲۲: تأثیر شعاع و فواصل مختلف دیمپل روی گشتاور پره توربین بادی..... ۷۵
- شکل ۴-۲۳: خطوط جریان روی صفحات تعریف شده برای سرعت باد ۱۴ متر بر ثانیه و زاویه پیچ ۵ درجه: الف) زاویه حمله محلی ۳۰/۸۱ درجه،  $R_b=6947\text{mm}$ ، ب) زاویه حمله محلی ۲۷/۰۲ درجه،  $R_b=7497\text{mm}$ ، پ) زاویه حمله محلی ۲۳/۸۹ درجه،  $R_b=8947\text{mm}$ ..... ۷۶
- شکل ۴-۲۴: تأثیر دیمپل روی ضریب توان توربین بادی در زاویه پیچ و سرعت‌های مختلف باد..... ۷۹
- شکل ۴-۲۵: تأثیر دیمپل روی ضریب نیروی محوری در زاویه پیچ و سرعت‌های مختلف باد..... ۸۰

## فهرست جداول

جدول ۴-۱: نتایج اندازه‌گیری شده در شرایط عملکردی گوناگون.....۷۰

جدول شماره ۴-۲: تأثیر دیمپل در زاویه پیچ‌های مختلف برای سرعت بادهای گوناگون روی گشتاور تولیدی.....۷۷

## فهرست نشانه‌ها

|   |                            |
|---|----------------------------|
| $u_i \left( \frac{m}{s} \right)$          | مولفه بردار سرعت           |
| $\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$      | چگالی                      |
| $p \left( \frac{kg}{m.s^2} \right)$       | فشار                       |
| $\beta_i \left( \frac{kg.m}{s^2} \right)$ | نیروی حجمی                 |
| $\mu \left( \frac{kg}{m.s} \right)$       | لزجت                       |
| $\mu_t \left( \frac{m^2}{s} \right)$      | لزجت آشفتگی                |
| $g \left( \frac{m}{s^2} \right)$          | شتاب گرانش                 |
| Re  | عدد رینولدز                |
| t (s)                                     | زمان                       |
| $\omega \left( \frac{1}{s} \right)$       | فرکانس آشفتگی              |
| $k \left( \frac{m^2}{s^2} \right)$        | انرژی جنبشی جریان آشفته    |
| $P_d$ (m)                                 | فواصل طولی دیمپل از یکدیگر |
| r (m)                                     | شعاع دیمپل                 |
| $P_a$ (deg)                               | زاویه پیچ                  |
| $C_l$                                     | ضریب برا                   |
| $C_p$                                     | ضریب توان                  |
| $C_T$                                     | ضریب نیروی محوری           |
| $F_l \left( \frac{kg.m}{s^2} \right)$     | نیروی برا                  |
| $F_T \left( \frac{kg.m}{s^2} \right)$     | نیروی محوری                |



## فصل ۱ مقدمه

## فصل ۱ مقدمه

از انرژی باد سال‌های زیادی به‌منظور آسیاب غلات، پمپاژ آب و کاربردهای مکانیکی دیگری استفاده می‌شد. با وجود گذر زمان، همچنان تعداد زیادی آسیاب بادی وجود دارند که اکثر آن‌ها برای پمپاژ آب استفاده می‌شوند. ایده‌ی توربین بادی نیز از آسیاب‌های بادی آمده است که این تغییر نام به خاطر نحوه‌ی عملکرد آن‌ها مانند توربین‌های گازی و بخار و همچنین برای تفاوت قائل شدن این توربین‌های امروزی با آسیاب‌های بادی قدیمی صورت گرفته است. شیوه عملکرد توربین‌های بادی بر پایه تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی است که به آن توان بادی گفته می‌شود. توربین‌های بادی در دو گونه با محور افقی و با محور عمودی ساخته می‌شوند. توربین‌های بادی در اندازه کوچک برای کاربردهایی مانند شارژ کردن باتریها یا توان کمکی در قایق‌ها بادبانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، درحالی‌که توربین‌های بادی بزرگ‌تر با بهره‌گیری از چرخاندن ژنراتور، انرژی مکانیکی را به الکتریکی تبدیل می‌شود [۱].

### ۱-۱- تاریخچه استفاده از توربین بادی

آسیاب‌های بادی اولیه با تصویری که در ذهن وجود دارد متفاوت بود. این توربین‌ها با داشتن ۱۲ پره عملکردی مشابه چرخ و فلک‌های شهربازی‌های امروزی داشتند به‌طوری‌که محور اصلی آن‌ها در مرکز یک دایره روی زمین نصب شده است و اتاقک‌های چرخ و فلک با فاصله مشخصی از سطح زمین در حال چرخش هستند. منشأ این نوع طراحی ممکن است از بادبان‌های کشتی و یا چرخ‌های دعای بودائی الهام گرفته شده باشد [۲]. استفاده از انرژی باد سابقه طولانی داشته و به حدود ۲ سده پیش از میلاد در ایران باستان بازمی‌گردد [۳]. برای نخستین بار، ایرانیان چرخ چاه را به کمک نیروی باد به گردش درآورده و آب را از چاه‌ها به سطح زمین رساندند. نخستین وسیله‌ای که با استفاده از نیروی باد به حرکت درآمد، چرخ بادی هرون بود؛ اما نخستین آسیاب بادی عملی، در

قرن ۷ میلادی در سیستان ساخته شد. پیدایش آسیاب‌های بادی در اروپا مربوط به قرون وسطا است. نخستین مورد تأیید شده در مورد استفاده از آسیاب‌های بادی در انگلستان مربوط به قرن‌های ۱۱ و ۱۲ میلادی است. نخستین توربین بادی با هدف تولید برق توسط جیمز بلايث<sup>۱</sup> در سال ۱۸۸۷ در اسکاتلند ساخته شد [۴]. چند ماه بعد، مخترع آمریکایی چارلز فرانسیس براش<sup>۲</sup> نخستین توربین باد خودکار را برای تولید برق در کلیولند در اوهایو<sup>۳</sup> ساخت. به نحوی که در سال ۱۹۰۸، ۷۲ توربین بادی با ظرفیت بین ۵ تا ۲۵ کیلووات در آمریکا در حال چرخش بودند [۵]. در دهه ۱۹۳۰، توربین‌های بادی کوچک برای تولید برق مورد نیاز مزارع در آمریکا که هنوز سامانه سراسری توزیع برق راه‌اندازی نشده بود، بسیار متداول بودند. در پاییز سال ۱۹۴۱، نخستین توربین بادی در کلاس مگاوات در ورمانت<sup>۴</sup> راه‌اندازی شد. نخستین توربین بادی متصل به شبکه برق در بریتانیا در سال ۱۹۵۱ در جزایر اورکنی<sup>۵</sup> ساخته شد.

در سال ۲۰۰۶ برای اولین بار در اتحادیه اروپا رشد تولید برق از انرژی‌های تجدید پذیر بیش‌تر از رشد تولید برق از منابع فسیلی شد. از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷، ظرفیت تولید برق بادی جهان از ۱۸۰۰۰ مگاوات به ۹۲۰۰۰ مگاوات افزایش یافته است. از سال ۲۰۰۰ تاکنون این صنعت سالانه ۲۵٪ رشد کرده و هر سه سال دو برابر شده است و این در شرایطی است که رشد اقتصاد جهانی از یک تا دو درصد در سال بیشتر نیست [۶].

## ۱-۲- اهمیت ویژه توربین بادی

بازار تأمین انرژی یک بازار رقابتی بوده و از طرفی تأمین انرژی از باد مزیت‌هایی را نسبت به تأمین کردن آن از طرف سوخت‌های فسیلی دارد. از مزیت‌های نیروگاه‌های بادی این است که در طول مدت‌زمان عمر خود، مدت زیادی بدون هزینه زیادی انرژی تولید می‌کنند، این در حالی است که تولید انرژی از منابع دیگر با سپری شدن

---

<sup>1</sup> James Blyth

<sup>2</sup> Charles F. Brush

<sup>3</sup> Cleveland

<sup>4</sup> Vermont

<sup>5</sup> Orkney

زمان افزایش می‌یابد. فعالیت‌های گسترده بسیاری از کشورهای جهان برای تولید الکتریسیته از انرژی باد، الگویی برای دیگر کشورهایی است که در این زمینه راه طولانی را در پیش دارند. در دسترس نبودن شبکه برق سراسری در بسیاری از بخش‌های روستایی در کشورهای آسیایی نیز یادآور این نکته است که دستگاه‌های تولید انرژی باید هر چه سریع‌تر گسترش یابند؛ بنابراین در مناطقی مانند ایران استفاده از این انرژی موجب صرفه‌جویی در فرآورده‌های نفتی می‌شود و صرفه‌جویی حاصل شده در درجه اول باعث حفظ فرآورده‌های نفتی می‌گردد. در نتیجه امکان صادرات و همچنین تبدیل آن به مشتقات پتروشیمی را برای ما فراهم می‌سازد [۷]. در درجه دوم تولید الکتریسیته از این روش فاقد هرگونه آلودگی زیست‌محیطی بوده که این به‌نوبه خود باعث حفظ طبیعت سالم محیط‌زیست شده و در نتیجه مسیر را برای رسیدن به توسعه پایدار اقتصادی و اجتماعی فراهم می‌گرداند. روند گسترش نیروگاه‌های بادی به‌منظور کاهش بهای تمام‌شده برق تولیدی افزایش قابل‌مشاهده‌ای را دارد به‌طوری‌که بهای هر کیلووات ساعت برق تولیدی از ۴۰ سنت در سال ۱۹۹۰ به حدود ۶ سنت در سال ۲۰۰۲ رسیده است. عدم مصرف سوخت، تعمیر و نگهداری، هزینه کم راهبری و آلوده نکردن محیط‌زیست از مزایای نیروگاه‌های بادی است. لازم به ذکر است به‌طور متوسط برای هر کیلووات ساعت برق تولیدی نیروگاه بادی حدود ۰/۲۸ مترمکعب گاز طبیعی با آهنگ جهانی ۴ سنت بر مترمکعب صرفه‌جویی می‌شود. بهره‌برداری از انرژی باد در تولید برق، به‌ویژه در ظرفیت‌های چند مگاواتی تنها روش اقتصادی تولید در مقایسه با دیگر روش‌های تولیدی، مبتنی بر انرژی‌های بازیافت پذیر (خورشیدی، زیست توده<sup>۶</sup>، زمین‌گرمایی، امواج و سلول سوختی) است [۸].

لازم به ذکر است افزایش سهم انرژی‌های تجدید پذیر در تولید برق، از سیاست‌های راهبردی میان‌مدت و بلندمدت بسیاری از کشورهای جهان است. گسترش نیروگاه‌های بادی در بسیاری از کشورها، نیازمند حمایت‌های مستقیم و غیرمستقیم دولتی است. این حمایت‌ها، به‌صورت معافیت‌های مالیاتی، خرید برق تولیدی با بهای ترجیحی،

---

<sup>6</sup> Biomass

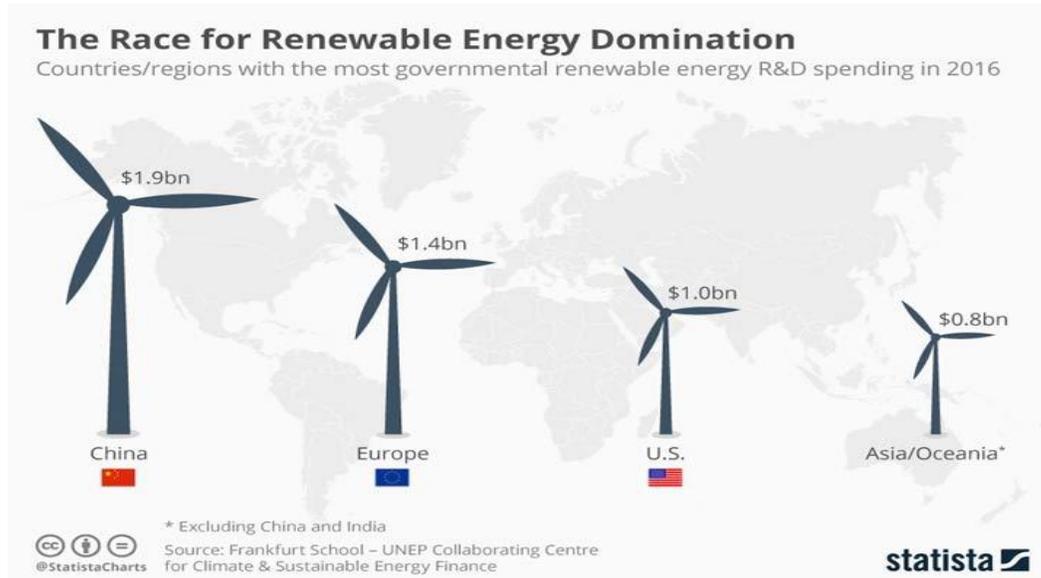
اعطای تسهیلات مالی و گمرکی و واگذاری زمین است. گسترش نیروگاه‌های بادی آلمان، دانمارک، اسپانیا، هند، برزیل، چین، آرژانتین، فیلیپین و ایتالیا با چنین حمایت‌هایی صورت گرفته است [۹].

در آسیا کشورهای هند و چین با اعمال سیاست‌های حمایتی و انتقال فناوری، گام‌های مهمی را در بومی کردن صنعت نیروگاه‌های بادی و بهره‌برداری بیش از پیش از آن برداشته‌اند.

### ۱-۳- ظرفیت انرژی بادی در جهان

انرژی باد تقریباً در همه‌جای زمین در دسترس است؛ یک ارزیابی نشان می‌دهد که ۱ میلیون گیگاوات انرژی بادی در کل زمین وجود دارد و اگر فقط ۱ درصد از این زمین‌ها از نیروی باد بهره‌برداری کنند، می‌توان تمامی تقاضای جهانی برق را تأمین کرد. اگرچه اکثر انرژی باد در حال حاضر در خشکی‌ها به دست می‌آید، اما به محبوبیت مزارع بادی دریایی به‌عنوان یک منبع بزرگ با اثرات زیست‌محیطی کمتری (به‌ویژه با توجه به آلودگی صوتی و بصری) افزوده می‌شود. ظرفیت تولید انرژی بادی جهان در اواخر سال ۲۰۱۵ به ۴۳۵ گیگاوات رسید، حدوداً ۷ درصد کل ظرفیت تولید برق جهان [۱۰].

سه کشور چین، ایالات متحده آمریکا و آلمان از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان برق از انرژی بادی هستند (شکل ۱-۱). چین با ظرفیت نصب‌شده‌ی بیش از ۱۵۶/۷ گیگاوات برق در سال ۲۰۱۶، بیشترین تولید برق از انرژی بادی در جهان را داشته است. این کشور سرمایه‌گذاری‌های بزرگی در بخش انرژی تجدیدپذیر مخصوصاً انرژی بادی انجام داده است. بر اساس گزارش انجمن انرژی بادی جهان، بازار انرژی بادی چین بزرگ‌ترین بازار جهانی است که ۵۲ از سهم بازار جهانی را در برمی‌گیرد. چین قصد دارد قبل از پایان سال ۲۰۲۰ ظرفیت ۱۰ گیگاوات برق از توربین‌های دریایی به شبکه برق خود اضافه کند. چین بر اساس گزارش شورای جهانی انرژی باد، از این لحاظ در رتبه سوم قرار داشت [۱۱].



شکل ۱-۱: کشورهای چین، ایالات متحده آمریکا و آلمان، در بین کشورهای جهان بالاترین ظرفیت تولید انرژی بادی را

#### در اختیار دارند [۱۲]

ایالات متحده آمریکا، دومین تولیدکننده انرژی بادی است که ظرفیت نصب شده آن به ۸۲/۱ گیگاوات در پایان سال ۲۰۱۶ می‌رسید. بر اساس گزارش امسال انجمن انرژی بادی آمریکا، بیش از ۱۴۰۰۴ مگاوات پروژه انرژی بادی در دست احداث است و ۱۱۸۱۵ مگاوات هم از این پروژه‌ها در آستانه شروع به کار هستند. ایالات متحده در سال ۲۰۱۷، دارای بیش از ۵۲ هزار توربین بادی تجاری در بیش از ۴۲ ایالت و همچنین در کشورهای گوام و پورتوریکو بود. آلمان با ظرفیت ۵۰ گیگاوات برق بادی در سال ۲۰۱۶، رتبه سوم را در زمینه انرژی بادی دارد. این کشور قصد دارد که ظرفیت انرژی بادی خود را تا سال ۲۰۱۹، به ۵۸/۴ گیگاوات افزایش دهد. آلمان یکی از کشورهای پیشرو اتحادیه اروپا از لحاظ انرژی‌های تجدید پذیر است و همچنین مزارع بادی در این کشور از یارانه‌های دولتی بهره‌مند هستند [۱۳].

## ۴-۱- ظرفیت انرژی بادی در ایران

توربین‌های بادی ایران عمدتاً با تلاش شرکت‌های داخلی و همکاری و سرمایه‌گذاری‌های شرکت‌های خارجی از جمله شرکت زیمنس<sup>۷</sup> آلمان ساخته و راه‌اندازی شده‌اند. در سال ۲۰۰۴، تولید برق از انرژی بادی در ایران فقط ۲۵ مگاوات بود؛ اما یک سال بعد، این میزان به ۳۲ مگاوات افزایش یافت و در سال ۲۰۰۶ به ۴۵ مگاوات نیز رسید. خوشبختانه با افزایش تولید پایدار برق، ایران به سرمایه‌گذاری در مزارع بادی ادامه داده است. در سال ۲۰۰۹، ظرفیت تولید برق حاصل از انرژی بادی به ۱۳۰ مگاوات افزایش یافت [۱۴].

این نتیجه ساخت مزارع بادی بزرگ‌تر در مناطق ساحلی و بادخیز مانند منجیل در استان گیلان و بینالود در خراسان رضوی بود. به گزارش شورای جهانی انرژی باد، با رشد سریعی در بخش انرژی باد، ایران در حال حاضر در رتبه ۳۰ جهان به لحاظ تولید انرژی بادی قرار دارد؛ اما با وجود پیشرفت قابل توجه صنعت انرژی بادی در کشور، مجموع کل ۱۵۰ مگاوات برق تولیدی از انرژی بادی، هنوز بخش کوچکی از برق مصرفی سالانه ایران را تشکیل می‌دهد که حدود ۳۳ هزار مگاوات است [۱۵].

واقعیت این است که ایران همچنان به شدت وابسته به سوخت‌های فسیلی است و این سوخت‌ها به‌طور عمده برق کشور را تأمین می‌کنند؛ با این وجود ممکن است صنعت انرژی بادی کشورمان به مشکلاتی عدیده‌ای مواجه بشود. علاوه بر این ممکن است ایران ظرفیت فعلی برق تولیدی از انرژی بادی را نیز از دست بدهد. زیرا بیشتر توربین‌های بادی هر ۱۰ تا ۱۵ سال نیاز به تعمیرات اساسی دارند و اگر به‌خوبی نگهداری نشوند، دیگر کارایی ندارند [۱۶].

## ۵-۱- مزایا و معایب توربین بادی

مهم‌ترین مزیت توربین‌های بادی، کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی است. توربین‌های بادی به‌طور مستقیم هیچ‌گونه آلودگی زیست‌محیطی ندارند. به بیان دیگر تجهیزات و ماشین‌آلات توربین‌های بادی هیچ‌یک از گازهای

---

<sup>7</sup> Siemens

گلخانه‌ای مضر را که به باعث آسیب به اقلیم می‌شود، منتشر نمی‌کنند. پاک بودن این انرژی باعث می‌شود که کسانی در مزارع توربین‌های بادی زندگی می‌کنند از مشکلاتی مانند بیماری‌های تنفسی و پوستی که از پیامدهای استفاده از سوخت‌های فسیلی است، در امان باشند. علاوه بر این، به زیست‌بوم حیوانات نیز آسیبی نمی‌رسد. با توجه به وابسته نبودن انرژی باد به کشتیرانی یا ذخایر زیرزمینی، بهره‌گیری از این انرژی، از آلودگی‌های غیرمستقیم ناشی از حمل‌ونقل جلوگیری می‌کند. انرژی بادی برخلاف بسیاری از روش‌ها، قادر به تولید برق بدون استفاده از آب است، بنابراین می‌تواند از آلودگی آب جلوگیری و در صورت بودن خشک‌سالی همچنان به تولید انرژی بپردازد [۱۷].

توربین‌های بادی به‌ویژه در مناطق بادخیز، می‌توانند در تمام ساعات شبانه‌روز برق تولید کنند. این امر مخصوصاً برای مناطق کوهستانی و ساحلی مطلوب است. علاوه بر این می‌توان توربین‌های بادی و پانل‌های خورشیدی متوسط را برای به حداکثر رساندن تولید انرژی تجدید پذیر در مکان‌هایی با آفتاب و باد متناوب ترکیب کرد. توربین‌های بادی می‌توانند در مکان‌های مختلفی با کاربردهای تجاری یا خانگی نصب شوند. تجهیزات بادی را می‌توان در سکوه‌های دریایی، مزارع، در بالای تپه‌های بلند و حتی منازل نصب کرد. توربین‌های دریایی هم نوعی از این توربین‌ها هستند که می‌توانند پایه‌های ثابت یا شناور داشته باشند و از جریان‌های مداوم بادهای اقیانوسی استفاده کنند. به‌بیان‌دیگر این انرژی تجدید پذیر قابلیت مقیاس‌پذیری بالایی دارند. درحالی‌که نیروگاه‌های سنتی برای تأمین برق جمعیت‌های بزرگ طراحی شده‌اند، توربین‌ها در ابعاد مختلفی توسعه یافته‌اند. مدل‌های مختلف توربین‌های بادی می‌توانند برق یک مزرعه کوچک، یک‌خانه یا صدها خانه را تأمین کنند. توربین‌های بادی مستقیماً، هیچ‌گونه آلودگی آب و هوایی یا زیست‌محیطی ندارند. مزیت دیگر توربین‌ها، جاگیر نبودن است. توربین‌های بادی برخلاف نیروگاه‌های رایج و حتی مزارع خورشیدی، فضای زیادی را اشغال نمی‌کنند؛ و مردم می‌توانند به‌راحتی به فعالیت‌های دیگر خود در مناطق اطراف توربین‌های بادی ادامه بدهند. به‌عنوان‌مثال، توربین بادی می‌تواند در یک مزرعه با محصولات کشاورزی یا دام‌ها نصب شود. این مورد، به‌خصوص برای کشورهای

کوچکی که با مشکل کمبود جا مواجه‌اند، می‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد. به این ترتیب، توربین‌های بادی می‌توانند بدون از بین بردن زمین‌های کشاورزی یا زیستگاه‌های حیات وحش به تولید برق بپردازند. توربین‌های بادی در مقایسه با روش‌های دیگر تولید انرژی، احتمال وقوع حوادث فاجعه‌آمیز در آن کمتر است زیرا توربین‌های بادی وابسته به سوخت‌هایی نیستند که باید حفر و استخراج و یا در کشتی بارگیری شوند. این خود می‌تواند از خطراتی بسیاری که در این مراحل وجود دارد جلوگیری کند. اگرچه وقوع چنین حوادثی نادر هستند، اما نیروگاه‌های هسته‌ای می‌توانند نشت کنند و اتفاقات ناگواری مانند چرنوبیل یا فوکوشیما را به وجود بیاورند و نواحی مسکونی و زمین‌های بزرگی را تخریب و غیرقابل سکونت و یا دریاها و اقیانوس‌های وسیعی را آلوده کنند. همچنین استخراج گاز طبیعی هم به آلودگی آب‌های زیرزمینی و حتی می‌تواند باعث زمین‌لرزه بشود؛ اما توربین‌های بادی می‌توانند برق زیادی بدون ریسک چندانی تولید کنند [۱۸].

مزیت دیگر انرژی باد، باصرفه بودن آن است. کشاورزان و دیگر صاحبان زمینی که توربین‌های بادی را روی زمین‌های خود نصب می‌کنند، صرفه‌جویی‌های قابل توجهی می‌کنند. توربین‌های بادی به آن‌ها کمک می‌کند که بدون استفاده از مقادیر قابل توجهی زمین، زمین‌های خود را به لحاظ اقتصادی زنده نگاه‌دارند. صاحبان خانه‌ای نیز که از توربین‌های بهره می‌برند، می‌توانند در هزینه‌های ماهانه برق صرفه‌جویی قابل توجهی را داشته باشند. البته توربین‌های بادی مزایا و معایب خاص خودشان را دارند. در ادامه به شرح مختصری از مزایا و معایب توربین‌های بادی می‌پردازیم:

## مزایا:

- به دلیل اینکه سوخت توربین‌های بادی، انرژی باد است و انرژی باد به صورت خدادادی در طبیعت وجود دارد، نیاز به پرداخت هزینه برای سوخت ندارد.

- خروجی توربین بادی پاک است یعنی مانند نیروگاه‌های حرارتی، هسته‌ای و غیره خروجی آن مضر نیست.
- زمین‌های زیر مکانی که توربین‌های بادی در آن‌ها نصب می‌شوند قابلیت استفاده را دارند زیرا این توربین‌ها در ارتفاع بالا نصب می‌شوند. این موضوع بیشتر در زمین‌ها کشاورزی مهم است.
- این توربین‌ها به دلیل قابلیت نصب در بیشتر مکان‌ها، قابلیت برق دهی به روستاها و مزرعه‌های کشاورزی که از برق شبکه محروم هستند را دارند.
- فناوری این توربین‌ها قابلیت انتقال به همه‌ی کشورها را دارد و مانند انرژی هسته‌ای و دیگر انرژی‌های خاص محدودیت انتقال ندارند.
- این توربین‌ها قابلیت طراحی برای مصارف کوچک و بزرگ را دارا می‌باشند. این بدین معنی است که این توربین‌ها قادر به تأمین برق یک خانه یا یک کارخانه هستند.
- این توربین‌ها می‌توانند باعث ایجاد یک منظره جذاب باشند. تا به حال شاید از کنار مزرعه توربین‌های بادی گذشته باشید و خود به‌وضوح دیده باشید.
- این توربین‌ها به دلیل ساختارشان می‌توانند آلودگی هوا را کاهش دهند.

### معایب:

- انرژی باد یکسان نیست و از صفر شروع شده تا به حد طوفان برسد، این بدین معنی که انرژی الکتریکی تولید توربین بادی متغیر است.
- یکی دیگر از معایب این توربین‌ها به هم زدن محیط زندگی پرندگان است مخصوصاً در مزرعه‌های توربین‌های بادی این موضوع بیشتر اهمیت پیدا می‌کند.

- این توربین‌ها به میزان کمی سروصدا تولید می‌کنند که اگر تعداد آن‌ها زیاد باشد این خود به یک مشکل برای محیط‌زیست تبدیل می‌شود.

## ۱-۶- توربین بادی با محور افقی

در توربین‌های بادی با محور افقی<sup>۸</sup> که به اختصار HAWT هم نامیده می‌شوند، روتور<sup>۹</sup> و ژنراتور الکتریکی در بالای یک برج بلند قرار گرفته و باید در راستای باد قرار گیرند. توربین‌های بزرگ‌تر معمولاً از یک سنسور<sup>۱۰</sup> باد که با یک سروموتور<sup>۱۱</sup> در ارتباط است، استفاده می‌کنند ولی توربین‌های بادی کوچک برای تعیین جهت وزش باد از یک بادنمای ساده استفاده می‌کنند. بیشتر توربین‌های بادی بزرگ، با استفاده از یک جعبه‌دنده، سرعت چرخش آهسته پره‌ها را به سرعت بیشتری برای ژنراتور تبدیل می‌کنند [۱۹].

### ۱-۶-۱- مزایا توربین افقی

توربین‌های بادی افقی رایج‌ترین نوع توربین‌های بادی هستند مزایا این توربین به شرح زیر است:

- تیغه‌ها به سمت مرکز گرانش توربین‌اند که به ثبات آن کمک می‌کند.
- تیغه‌ها برای قرارگیری در بهترین زاویه قابلیت پیچ‌و تاب دارند.
- با پیچ کردن تیغه‌ها به روتور، آسیب‌ها در طوفان به حداقل می‌رسد.
- بلندی برج این امکان را می‌دهد تا دسترسی به بادهای شدید و قوی بیشتر شود.
- قابل استفاده در زمین‌های ناهموار و دور از ساحل.

<sup>8</sup> Horizontal Axis Wind Turbine

<sup>9</sup> Rotor

<sup>10</sup> Sensor

<sup>11</sup> Servo motor

## ۱-۶-۲- معایب توربین افقی

این نوع توربین همچنین معایب مختلفی دارد که می‌توان به‌صورت زیر شرح داد:

- کارکرد سخت در نزدیکی سطح زمین
- سختی در حمل‌ونقل
- مشکل در نصب و راه‌اندازی
- در مجاورت رادار تحت تأثیر قرار می‌گیرد
- تعمیر و نگهداری آن سخت است

## ۱-۷- توربین بادی‌های امروزی

توربین‌های بادی که برای تولید در مقیاس تجاری برق مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً سه پره بوده و با استفاده از سامانه‌های کنترل رایانه‌ای در جهت وزش باد تنظیم می‌شوند. البته توربین‌های باد با دو پره و حتی یک پره هم استفاده می‌شوند [۲۰]. پره‌های این توربین‌ها، معمولاً طولی بین ۲۰ تا ۴۰ متر و حتی بیشتر و سرعت دورانی حدود ۱۰ تا ۲۲ دور بر دقیقه دارند. اگر طول پره یک توربین بادی، ۴۰ متر بوده و با سرعت ۲۰ دور بر دقیقه دوران کند، سرعت خطی نوک پره‌های آن، حدود ۸۴ متر بر ثانیه (۳۰۲ کیلومتر بر ساعت) خواهد بود. برجی که پره‌ها بر بالای آن نصب می‌شوند، به‌صورت لوله فولادی و به ارتفاع ۶۰ تا ۹۰ متر است. معمولاً با استفاده از جعبه‌دنده، سرعت چرخش محور افزایش داده می‌شود، ولی در برخی از طراحی‌ها، محور با همان سرعت یک ژنراتور حلقوی را می‌چرخاند. برخی از مدل‌های توربین بادی، در سرعت ثابت کار می‌کنند ولی توربین‌های با سرعت متغیر انرژی بیشتری می‌توانند تولید کنند؛ که به‌واسطه نیروی برآ و پسا پره‌ها به حرکت درمی‌آیند.

در توربین‌های بادی با محور عمودی<sup>۱۲</sup> که به‌اختصار VAWT نامیده می‌شود، روتور اصلی به‌صورت عمودی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین مزیت این نوع از توربین‌های بادی آن است که نیازی به تنظیم برای قرارگیری نسبت به جهت وزش باد ندارند. این برتری در مکان‌هایی که جهت وزش به‌شدت متغیر است، مثلاً در بالای ساختمان‌های مسکونی، به کار می‌آید. مهم‌ترین نقص این نوع توربین‌ها، کم بودن سرعت دورانی آن‌ها و در نتیجه زیاد بودن گشتاور، بارگذاری دینامیکی زیاد پره‌ها و هزینه بیشتر سیستم انتقال قدرت و همچنین پیچیدگی زیاد طراحی و تحلیل ایرفویل پره‌ها پیش از ساخت پیش نمونه (پروتوتایپ<sup>۱۳</sup>) است. با توجه به عمودی بودن محور، جعبه‌دنده و ژنراتور می‌توانند در نزدیکی زمین قرار گیرند که این موضوع دسترسی به این تجهیزات را برای نگهداری و تعمیر آسان‌تر می‌کند. توربین‌های بادی با محور عمودی به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند. دو نوع عمده آن‌ها، توربین‌های داریوس<sup>۱۴</sup> (شکل ۲-۱) و ساوونیوس<sup>۱۵</sup> (شکل ۳-۱) هستند.



شکل ۲-۱: توربین بادی ساوونیوس [۲۱]

<sup>12</sup> Vertical Axis Wind Turbine

<sup>13</sup> Prototype

<sup>14</sup> Darrieus wind turbine

<sup>15</sup> Savonius wind turbine



شکل ۱-۳: توربین بادی داریوس [۲۲]

## ۱-۸- اجزای تشکیل دهنده توربین بادی

برای تعیین ارتفاع مناسب برج، سیستم کنترلی، تعداد و شکل پره‌ها از شبیه‌سازی‌های آئرودینامیکی استفاده می‌شود. توربین‌های با محور افقی متداول، به سه بخش اصلی تقسیم می‌شوند:

- بخش روتور که تقریباً ۲۰ درصد قیمت توربین باد را به خود اختصاص داده و شامل پره‌های تبدیل‌کننده انرژی باد به انرژی جنبشی دورانی با سرعت کم می‌شود.
- بخش ژنراتور که حدوداً ۳۴ درصد هزینه توربین باد بوده و شامل مولد الکتریکی، تجهیزات کنترلی و جعبه‌دنده برای افزایش سرعت دورانی محور توربین می‌شود.

• بخش تکیه‌گاهی که دربرگیرنده ۱۵ درصد قیمت توربین بوده و شامل برج و سازوکار جهت‌دهی روتور نسبت به جهت وزش باد می‌شود.

در شکل ۱-۴ اجزای مختلف یک توربین بادی افقی به صورت جز به جز آورده شده‌است، این اجزا به شرح زیر هستند:

بادسنج<sup>۱۶</sup>: این وسیله سرعت باد را اندازه گرفته و اطلاعات حاصل از آن را به کنترل‌کننده‌ها انتقال می‌دهد.

پره‌ها<sup>۱۷</sup>: بیشتر توربین‌ها دارای دو یا سه پره می‌باشند. وزش باد روی پره‌ها باعث بلند کردن و چرخش پره‌ها می‌شود.

ترمز<sup>۱۸</sup>: از این وسیله برای توقف موتور در مواقع اضطراری استفاده می‌شود. عمل ترمز کردن می‌تواند به صورت مکانیکی، الکتریکی یا هیدرولیکی انجام گیرد.

کنترلر<sup>۱۹</sup>: کنترلرها وقتی که سرعت باد به ۸ تا ۱۶ مایل بر ساعت می‌رسد ماشین را راه‌اندازی می‌کنند و وقتی سرعت از ۶۵ مایل بر ساعت بیشتر می‌شود دستور خاموش شدن ماشین را می‌دهند. این عمل از آن جهت صورت می‌گیرد که توربین‌ها قادر نیستند زمانی که سرعت باد به ۶۵ مایل بر ساعت می‌رسد حرکت کنند زیرا ژنراتور به سرعت به حرارت بسیار بالایی خواهد رسید.

گیربکس<sup>۲۰</sup>: چرخ‌دنده‌ها به شفت سرعت‌پایین متصل هستند و آن‌ها از طرف دیگر همان‌طور که در شکل ۱-۴ مشخص شده به شفت با سرعت بالا متصل می‌باشند و افزایش سرعت چرخش از ۳۰ تا ۶۰ دور بر دقیقه به سرعتی حدود ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه را ایجاد می‌کنند. این افزایش سرعت برای تولید برق توسط ژنراتور الزامی است. هزینه ساخت گیربکس‌ها بالاست، در ضمن گیربکس‌ها بسیار سنگین هستند. مهندسان در حال انجام

<sup>16</sup> Anemometer

<sup>17</sup> Blades

<sup>18</sup> Brake

<sup>19</sup> Controller

<sup>20</sup> Gear box

تحقیقات گسترده‌ای می‌باشند تا درایوهای مستقیمی کشف نمایند و ژنراتورها را با سرعت کمتری به چرخش درآوردند تا نیازی به گیربکس نداشته باشند.

ژنراتور<sup>۲۱</sup>: که وظیفه آن تولید برق متناوب است و بیشتر از نوع ژنراتورهای القایی می‌باشد.

شفت با سرعت بالا<sup>۲۲</sup>: که وظیفه آن به حرکت درآوردن ژنراتور می‌باشد.

شفت با سرعت پایین<sup>۲۳</sup>: روتور حول این محور چرخیده و سرعت چرخش آن ۳۰ تا ۶۰ دور در دقیقه می‌باشد.

روتور: بال‌ها و هاب<sup>۲۴</sup> به روتور متصل هستند.

برج<sup>۲۵</sup>: برج‌ها از فولادهایی که به شکل لوله درآمده‌اند ساخته می‌شوند. توربین‌هایی که روی برج‌هایی با ارتفاع بیشتر نصب شده‌اند انرژی بیشتری دریافت می‌کنند.

بادنما<sup>۲۶</sup>: وسیله‌ای است که جهت وزش باد را اندازه‌گیری می‌کند و کمک می‌کند تا جهت توربین نسبت به باد در وضعیت مناسبی قرار داشته باشد.

درايو انحراف<sup>۲۷</sup>: وسیله‌ای هست که وضعیت توربین را هنگامی که باد در خلاف جهت می‌وزد کنترل می‌کند و زمانی استفاده می‌شود که قرار است روتور در مقابل وزش باد از روبرو قرار گیرد اما زمانی که باد در جهت توربین می‌وزد نیازی به استفاده از این وسیله نمی‌باشد.

موتور انحراف<sup>۲۸</sup>: برای به حرکت درآوردن درايو انحراف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

---

21 Generator

22 High-speed shaft

23 Low-speed shaft

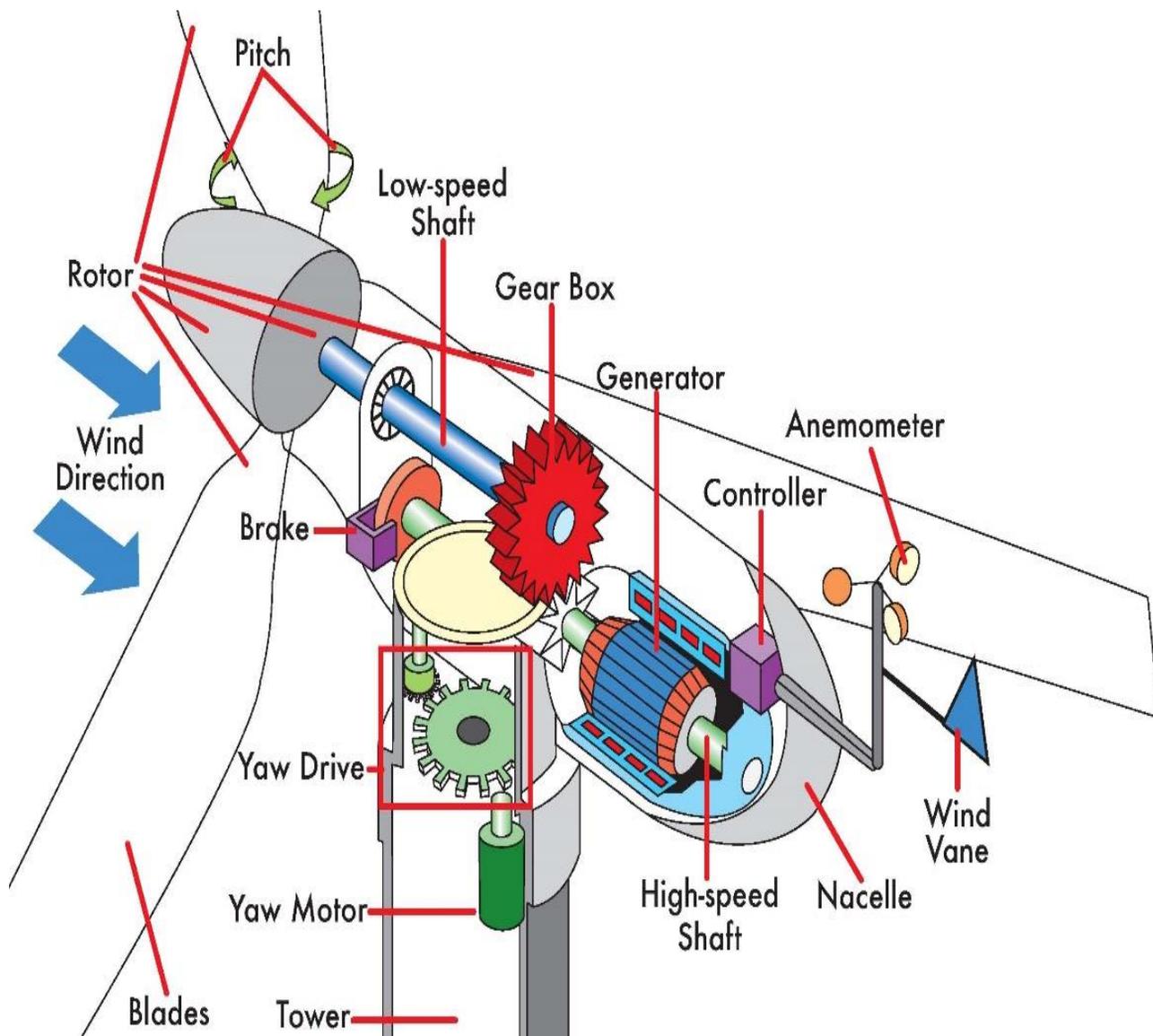
24 Hub

25 Tower

26 Wind vane

27 Yaw drive

28 Yaw motor



شکل ۱-۴: اجزای تشکیل دهنده یک توربین بادی محور افقی [۲۳]

## ۱-۹- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

این پایان‌نامه از فصل اول به‌عنوان مقدمه و ۴ فصل اصلی و بخش آخر جهت معرفی مراجع مورد استفاده تشکیل شده‌است. در فصل دوم به کارهای انجام‌شده برای افزایش عملکرد آئرو‌دینامیکی توربین بادی و همچنین موارد مختلفی که دیمپل به‌عنوان ابزاری برای کنترل لایه‌مرزی استفاده‌شده، توضیح داده‌شده‌است. در فصل سوم، ارائه مسئله و معادلات حاکم برای حل عددی ارائه‌شده‌اند. در فصل چهارم ابتدا در مورد روش تولید هندسه، شبکه‌بندی و میدان حل پرداخته‌شده و در ادامه صحت‌سنجی و سپس نتایج حاصل از این مطالعه ارائه می‌گردد. در فصل پنجم به معرفی نتایج این پایان‌نامه و ارائه پیشنهادها و توصیه‌هایی برای ارتقای سطح کیفی تحقیق حاضر و انجام مطالعه جامع‌تر در راستای موضوع این پایان‌نامه، ارائه شده‌است.

## فصل ۲ مروری بر تحقیقات انجام شده

## ۲-۱- مقدمه

یکی از منابع مهم انرژی‌های تجدید پذیر در دنیا، انرژی بادی است. در سال‌های گذشته، تحقیقات زیادی به‌منظور بهره‌گیری از انرژی بادی، مخصوصاً توربین بادی انجام شده‌است؛ بنابراین فعالیت‌های زیادی برای بهبود عملکرد توربین بادی سازماندهی شده‌است (به‌عنوان مثال روش‌های فعال و غیرفعال). در شکل ۲-۱ این روش‌ها به‌طور خلاصه دسته‌بندی شده‌است. تعداد زیادی از این فعالیت‌ها بر پایه‌ی افزایش نیروی برآ به پسا و کاهش پدیده‌ی واماندگی، در پره‌های توربین بادی بدون استفاده از انرژی خارجی است (روش‌های غیرفعال).

## ۲-۲- روش‌های غیرفعال کنترل جریان

ژو و همکاران [۲۴] شکل‌های مختلف بالک<sup>۲۹</sup> با روش‌های شبیه‌سازی عددی روی توربین بادی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها همچنین تأثیر بالک را روی سطوح مکشی<sup>۳۰</sup> و فشاری<sup>۳۱</sup> پره را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که بالک می‌تواند توان توربین را حداکثر تا ۳/۹۶ درصد بهبود ببخشد. آن‌ها همچنین تأکید کردند اهمیت‌ی ندارد که بالک روی سطح فوقانی یا تحتانی از پره توربین نصب شود، در هر دو حالت جهت نوک بالک باید با جهت جریان ورودی هماهنگ باشد. در نهایت پره توربین با دو سطح پوشیده از بالک توان بیشتری را نسبت به حالتی که فقط یک صفحه آن بالک باشد را تولید می‌کند. هانگ و سنو [۲۵] شکل‌های مختلف شیار بلند را روی سطح ایرفویل NACA0015 مورد بررسی قرار دادند. عملکرد شیار بلند به این صورت است که لایه‌مرزی آرام روی سطح ایرفویل را به لایه‌مرزی آشفته<sup>۳۲</sup> منتقل می‌کند. آن‌ها موقعیت‌های مختلف شیار بلند را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که شیار بلند حداکثر می‌تواند ۱۵/۳ درصد نسبت نیرو برآ به پسا را افزایش دهد. بیهقی و آمانو

<sup>29</sup> winglet

<sup>30</sup> Suction side

<sup>31</sup> Pressure side

<sup>32</sup> Turbulent boundary layer

[۲۶] تأثیر شیار باریک را روی لبه حمله ایرفویل در زاویه حمله‌های<sup>۳۳</sup> مختلف برای ایرفویل های متقارن مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با طراحی مناسب شیار باریک می‌توان ضریب برآ را در شرایط خاصی بهبود بخشید. بدین صورت که زاویه حمله حداقل باید از ۶ درجه بیشتر باشد. با افزایش پهنای شیار ضریب برآ افزایش پیدا می‌کند، درحالی که ضریب پسا تغییر چندانی نخواهد داشت. کامرو و همکاران [۲۷] تأثیر ریبلت<sup>۳۴</sup> را بر کاهش ضریب پسا مورد بررسی قرار دادند. شکل و ارتفاع‌های مختلف ریبلت را تحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که ریبلت با شکل هندسی V و ارتفاع ۱۰۰ میکرومتر با کاهش ۶ درصدی زبری بهترین کارایی را دارد. همچنین عدد رینولدز و زاویه حمله عواملی دیگری هستند که می‌توانند اثربخشی ریبلت را تحت تأثیر قرار دهند. یکی دیگر از کارها، الگو گیری از بال نهنگ برای به تأخیر انداختن جدایش است. بولزن و همکاران [۲۸] کارهای انجام شده در این زمینه را مورد مطالعه قرار دادند و با بررسی‌هایی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که بارزترین تأثیر ایجاد برآمدگی<sup>۳۵</sup>، آهسته کردن واماندگی و افزایش حداکثر برآ و کاهش تغییرات برآ در نزدیکی واماندگی است. شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که برآمدگی توزیع فشار روی سطح بال را توسط قسمت کردن ناحیه کم‌فشار به ناحیه‌های کم فشارتر، جایگزین می‌کند. از کارهای دیگر انجام شده می‌توان پیچ دادن<sup>۳۶</sup> پره توربین بادی را نام برد که سامپونگ و پرامبات [۲۹] این نتیجه رسیدند که پیچ دادن پره توربین می‌تواند پایداری دینامیکی را بهبود و بارگذاری‌های آئرو دینامیکی را کاهش دهد. پیچ با زاویه کوچک می‌تواند به افزایش بهره‌وری کمک کند، درحالی که پیچ خیلی بزرگ با ایجاد جدایش سیال می‌تواند بهره‌وری را کاهش دهد.

نوبری و همکاران [۳۰] برای حذف نیروی پسا ناشی از گردابه‌های موجود در نوک پره توربین بادی، چهار صفحه افقی مستطیل شکل را با ضخامت‌های گوناگون روی نوک پره ایجاد کردند. آن‌ها با شبیه‌سازی و تحلیل جریان

---

<sup>33</sup> Angle of attack

<sup>34</sup> Riblet

<sup>35</sup> Tubercle

<sup>36</sup> Twist

اطراف این چهار صفحه، به این نتیجه رسیدند که افزودن صفحه‌ای مناسب در نوک پره باعث افزایش ۱۶ درصدی توان خروجی توربین بادی می‌شود. وانگ و همکاران [۳۱] میکرو سیلندر را در جلوی لبه حمله پره توربین قراردادند تا با این کار از جدایش سیال جلوگیری کنند. فواصل و قطرهای مختلف سیلندر مورد بررسی قراردادند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که قرار دادن میکرو سیلندر در لبه حمله، بدون اینکه تأثیری بر پایداری توربین بگذارد، می‌تواند به‌طور مؤثری جدایش را فروبشانند. با این کار توان خروجی حداکثر تا ۲۷/۳ درصد افزایش پیدا می‌کند. اگرچه میکرو سیلندر در سرعت‌های پایین و همچنین زمانی که به قسمت لبه راهنما پره مماس باشد، تأثیر مثبتی روی گشتاور توربین ندارد. بلامادی و همکاران [۳۲] تأثیر شیار را روی بهبود عملکرد پره توربین بادی محور افقی تحت شرایط واماندگی مورد بررسی قراردادند. تأثیر مکان قرارگیری، پهنا و زاویه‌ی شیار روی ایرفویل S809 بررسی شد. با شبیه‌سازی دو بعدی آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عملکرد ایرفویل در زاویه‌های حمله‌های کوچک مقداری کمتر از حالت پایه است. در زاویه‌ی حمله‌های بالا مانند ۱۰ تا ۲۰ درجه، ایرفویل شیاردار عملکرد بهتری را نسبت به حالت پایه دارد. گائو و همکاران [۳۳] تأثیر طول و ارتفاع  $VGs$  مثلثی روی عملکرد آئرو دینامیکی توربین بادی مورد بررسی قراردادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که  $VGs$  می‌توانند نسبت ضریب برآ به پسا را افزایش دهند. علاوه بر این، آن‌ها این نکته رو یادآور شدند که افزایش ارتفاع  $VGs$  می‌تواند تأثیر مثبتی را روی نیروی برآ داشته باشد در حالی که در این رویداد نیروی پسا قربانی می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که افزایش طول  $VGs$  تأثیر منفی روی نیروی برآ و پسا دارد.

وانگ و همکاران [۳۴] عملکرد آئرو دینامیکی ایرفویل S809 با  $VGs$  دوتایی را مورد بررسی قراردادند.  $VGs$  دوگانه می‌تواند گردابه‌های شدید رو ایجاد کند، بنابراین پره توربین می‌تواند ممنوم بالاتری در لایه‌مرزی داشته باشد. آن‌ها تأکید کردند که  $VGs$  می‌تواند نیروی پسا و ضخامت لایه‌مرزی را کاهش دهد. در نتیجه در بهترین حالت

VGs می‌تواند توان خروجی توربین را ۹۶/۵ درصد افزایش بدهد. ژانگ و همکاران [۳۵] به‌صورت آزمایشگاهی تأثیر VGs روی عملکرد آئرو دینامیکی سه ایرفویل نازک -CAS-W2-350, CAS-W1-450, CAS-W2-400 مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ارتفاع و مکان‌های مختلف VGs و همچنین فواصل مختلف بین VGs را تحلیل کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در فواصل بیشتر از ۲۰ درصد از chordwise، VGs می‌تواند ضریب برآ را در زاویه حمله‌های کوچک بهبود ببخشد.

مشفق و همکاران [۳۶] تأثیر شکاف را روی عملکرد پره توربین بادی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شکاف باید در نزدیکی نقطه‌ی سکون قرار بگیرد و زاویه‌ی مکش سیال باید مماس بر سطح مکش پره توربین باشد. سدا و همکاران [۳۷] ایرفویل NACA0020 با استفاده از حفره‌ای<sup>۳۸</sup> روی سطح مکشی آن، عملکرد آئرو دینامیکی این ایرفویل را بهبود بخشیدند. این حفره‌ها می‌تواند گردابه‌ها را به دام بیندازد و در مقابل جدایش سیال مقاومت می‌کند. آن‌ها نتیجه گرفتند که جریان پایین دست در حفره‌ها به همدیگر ملحق می‌شوند و نیروی پسا کمتر و برآ بالاتر به دست می‌آید. لی و همکاران [۳۸] تأثیر سطوح زبر را روی عملکرد پره توربین مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها سطوح زبر را با ارتفاع و مکان‌های مختلف زبری در سطح فشاری و سطح مکشی ایرفویل -DU-95 W-180 شبیه‌سازی کردند. آن‌ها ارتفاع و مکان بحرانی زبری را برای بیشینه و کمینه کردن نیروی برآ و پسا را به دست آوردند. یکی از ابزارهای آئرو دینامیکی که نیروی پسا کلی را در اجسام کروی کاهش می‌دهد (مانند توپ گلف و ایرفویل) سطوح دیمپل<sup>۳۹</sup> دار است. دیمپل مانند یک المان زبر کننده درآشفته کردن لایه مرزی نقش دارد که باعث می‌شود جدایش به تأخیر بیافتد، البته ممکن است نیروی پسا اصطکاکی نیز افزایش بیابد [۳۹].

آسی و همکاران [۴۰] به‌طور آزمایشگاهی خواص آئرو دینامیکی سطوح دیمپل دار و لانه‌زنبوری را روی توپ والیبال با استفاده از تونل باد بررسی کردند. آن‌ها به این نکته پی بردند که رینولدز بحرانی توپ‌های جدید اندکی کمتر از

---

<sup>38</sup> Trapped vortex cell

<sup>39</sup> Surface Dimples

توپ‌های مرسوم است. آن‌ها همچنان ضریب نیروی پسا را برای توپ‌ها اندازه گرفتند و به این نتیجه رسیدند که توپ‌های با سطح لانه‌زنبوری ضریب نیروی پسا بیشتری نسبت به توپ‌های مرسوم دارند. جوزف و همکاران [۴۱] با حل شبیه‌سازی تأثیر دیمپل مربعی را روی سطح بالایی NACA0012 در زاویه حمله‌های مختلف بررسی کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که دیمپل می‌تواند زاویه واماندگی را زیاد کند. تای و همکاران [۴۲] تأثیر دیمپل اشک‌گون و دایره‌ای را روی کاهش نیروی پسا در یک کانال مربعی در محدوده رینولدز ۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشینه کاهش نیروی پسا برای دیمپل اشک‌گون زمانی اتفاق می‌افتد که نوک آن به سمت جریان بالادست باشد. لو و همکاران [۴۳] تأثیر مکان قرارگیری دیمپل روی عملکرد آئرودینامیکی کمپرسور با حل شبیه‌سازی بررسی کردند. آن‌ها به این موضوع اشاره کردند که دیمپل می‌تواند انرژی لایه‌مرزی را افزایش و از گرادیان فشار معکوس جلوگیری کند. آن‌ها تأکید کردند که اگر دیمپل به طور مناسب روی سطح مکشی پره قرار بگیرد می‌تواند عملکرد کمپرسور رو بهبود ببخشد. ژانگ و همکاران [۴۴] به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تأثیر دیمپل را بر کاهش نیروی پسا روی سطح کشتی دریایی بررسی کردند. آن‌ها طول، قطر و ارتفاع مختلف دیمپل را در دو حالت بدون مکش و با مکش هوا تحلیل کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند در صورت وجود مکش هوا، حجم هوای ورودی تأثیری مهمی را بر کاهش نیروی پسا دارد. اگرچه، افزایش حجم هوا باعث چرخش هوا در جهت عکس به سوی جریان پایین دست می‌شود؛ بنابراین، قرار دادن دیمپل بزرگ‌تر همیشه انتخاب مناسبی نیست. در حالت بدون مکش، نیروی پسا می‌تواند تا ۴۰/۳۸ درصد کاهش یابد در صورتی که هندسه دیمپل به درستی طراحی شده باشد. وانگ و همکاران [۴۵] با حل شبیه‌سازی تأثیر دیمپل را روی ماشین بررسی کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که ضریب پسا با کاهش انرژی آشفته<sup>۴۰</sup> و گردابه در ناحیه اغتشاشی<sup>۴۱</sup> کاهش می‌یابد. اسلامی و ویرژایارغوان [۴۶] با حل عددی تأثیر دیمپل و برآ افزایش<sup>۴۲</sup> روی خواص

---

<sup>40</sup> Turbulence kinetic energy

<sup>41</sup> Wake

<sup>42</sup> flap

آرودینامیکی NACA0015 به منظور افزایش بازدهی توربین عمود محور مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد نیروی مماسی به دلیل گردش مجدد<sup>۴۳</sup> جریان نزدیک لبه فرار<sup>۴۴</sup> ایرفویل افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین شاهد اختلاف فشار بیشتر بین سطح فوقانی و تحتانی ایرفویل جدید بودند که این به معنی افزایش نیروی برآ است. چیر و دال [۴۷] تأثیر دیمپل را روی اتومبیل فورد به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تحلیل کردند. آن‌ها به این نکته پی بردند که در بهترین حالت نسبت قطر به عمق دیمپل، نیروی پسا ۱/۹۵ درصد کاهش می‌یابد. آرونراژ و همکاران [۴۸] به صورت آزمایشگاهی تأثیر مکش را روی تأخیر انداختن جدایش در ایرفویل NACA0012 بررسی کردند. آن‌ها مکش با فشارهای گوناگون را در مکان‌های مختلف طول وتر ایرفویل آزمایش کردند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که مکش در فشارهای مکشی پایین بسیار مؤثرتر است. به بیان دیگر جدایش در لبه فرار ایرفویل در حضور مکش به تأخیر می‌افتد. اما وقتی که فشار مکش از ۸۰ کیلو نیوتن بر مترمربع بیشتر شود تأثیری چندانی در نیروی برآ مشاهده نمی‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که ایرفویل با مکش در زاویه حمله‌های پایین‌تر، عملکرد بهتری را دارد. بهترین نتیجه مربوط به کمترین فشار انتخاب شده برای مکش در فاصله ۷۰ درصد وتر است. ونکاتسان و همکاران [۴۹] شکل‌های مختلف دیمپل مانند مربعی، مستطیلی و مثلثی را روی ایرفویل NACA2412 به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بررسی کردند. با بررسی انجام شده، دیمپل مربعی عملکرد بهتری را از خود نشان داده و بیشترین ضریب برا در زاویه حمله ۱۸ درجه برای این نوع دیمپل به دست می‌آید.

## ۲-۳- روش‌های فعال کنترل جریان

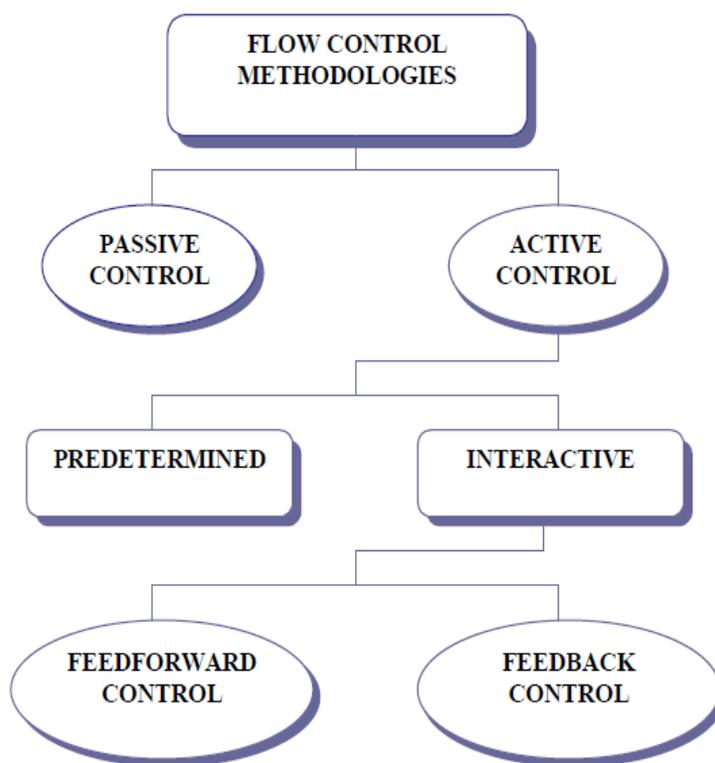
روش فعال بر پایه اضافه کردن ممنوم یا انرژی به جریان سیال در حالت تنظیم شده استوار است که این کار می‌تواند با مکش یا دمش یک سیال ثانویه روی سطح جسم صورت گیرد. اگرچه روش فعال در مقایسه با روش

---

<sup>43</sup> Recirculation

<sup>44</sup> Trailing edge

غیرفعال مناسب‌تر است ولی نیازمند هزینه و تلاش‌های بیشتری است. از روش‌های فعال می‌توان به جت سنتتیک محرک<sup>۴۵</sup>، کنترل جریان مبتنی بر پلاسما<sup>۴۶</sup>، میکرو تب‌های نوسانی<sup>۴۷</sup> اشاره کرد.



شکل ۲-۱: طبقه‌بندی روش‌های کنترل جریان [۵۰]

<sup>45</sup> Synthetic jet actuator

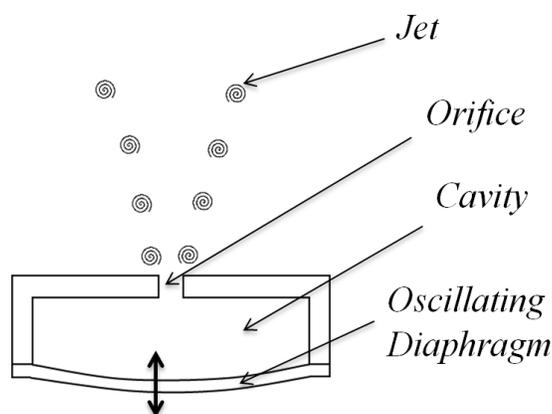
<sup>46</sup> Plasma based flow control

<sup>47</sup> Oscillating micro tabs

### ۳-۲-۱- جت سنتتیک محرک

جت سنتتیک محرک<sup>۴۸</sup> (SJA) یک نوع از جریان جت است که از سیال اطراف به وجود می‌آید. SJA معمولاً از جریان در حال حرکت به عقب و جلو در میان یک دریچه کوچک است. SJA با استفاده از مکش و دمش پریودی سیال از یک اوریفیس با حرکت یک دیافراگم داخل یک حفره<sup>۴۹</sup> ایجاد می‌شود.

منتظر و همکاران [۵۱] جت سنتتیک محرک روی ایرفویل NACA0015 در دو زاویه حمله شبیه‌سازی کردند. جت سنتتیک محرک یک وسیله کنترل جریان فعال است که به‌طور متناوب سیالی را از شیار باریک تزریق و خارج می‌کند (شکل ۲-۲). بهینه‌سازی را در دو زاویه حمله واماندگی و پسا واماندگی<sup>۵۰</sup> انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که در زاویه حمله واماندگی نسبت ضریب برآ به پسا ۲۹ درصد افزایش می‌یابد و واماندگی ۱۳ درجه به تأخیر می‌افتد. درحالی‌که این عدد برای بعد واماندگی ۶۶ درصد است که ناشی از به هم پیوستن ناحیه گردش مجدد به روی سطح مکشی ایرفویل است. بنابراین واضح است که جت سنتتیک محرک در زاویه‌ی حمله پسا واماندگی مؤثرتر است.



شکل ۲-۲: پیکربندی جت سنتتیک محرک [۵۲]

<sup>48</sup> Synthetic jet actuator

<sup>49</sup> Cavity

<sup>50</sup> Poststall

سیلوا و ژوکاب [۵۳] به صورت آزمایشگاهی جریان روی ایرفویل NACA 65(2)-415 با استفاده از حفره دوگانه جت سنتتیک کنترل و آزمایش کردند. حفره دوتایی تنها از یک دیسک پیرو الکتریک برای تغذیه دو حفره و دو شیار استفاده می‌کند، بنابراین دو تا جت تشکیل می‌شود. یکی از جت‌ها در نزدیکی لبه فرار سطح فشاری ایرفویل برای کنترل لایه برشی در لبه فرار قرار گرفته است و دیگری روی بیشترین ضخامت ایرفویل در سطح مکشی ایرفویل به منظور جلوگیری از جدایش سیال، ایجاد شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که استفاده جت سنتتیک نیروی پسا را کاهش و نیروی برآ را در محدوده‌ای از عدد رینولدز و زاویه حمله، افزایش می‌دهد. در عدد رینولدز ۵۰۰۰۰، جت سنتتیک محرک جدایش سیال را محدود می‌کند و زاویه‌ی واماندگی را افزایش می‌دهد. داده‌های  $PIV^{51}$  نشان می‌دهد که ناحیه اغتشاشی نیز کاهش می‌یابد و جریان با شتاب بیشتری روی ایرفویل حرکت می‌کند. اوهی بابا و همکاران [۵۴] جت سنتتیک محرک را روی ایرفویل S809 به صورت شبیه‌سازی بررسی کردند. ایرفویل در رینولدز ۱۰۰۰۰۰ با زاویه حمله ۱۵/۲ شبیه‌سازی شد. جت سنتتیک محرک روی سطح بالایی پروفیل در فاصله‌ی ۵ درصدی خط وتر ایرفویل از لبه حمله قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نسبت نیروی برا به پسا می‌تواند تا ۱۵۰ درصد نسبت به حالت کنترل نشده، افزایش یابد. مشفق و همکاران [۵۵] تأثیر SJA روی خواص آئرودینامیکی یک باله با ایرفویل S809 با استفاده از مدل توربلانس  $DES^{52}$  در زاویه حمله‌های مختلف بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که رفتار آئرودینامیکی سیال در زاویه حمله‌های کوچک، SJA باعث جدایش زودتر می‌شود و مقدار نیروی برآ را کاهش می‌دهد. با این حال برای جریان جدایش یافته، SJA عملکرد آئرودینامیکی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این در زاویه حمله‌های کوچک، بارگذاری‌های آئرودینامیکی کاملاً سینوسی است. اگرچه، هراندازه که زاویه‌ی حمله افزایش بیابد و جدایش شدیدتر شود، بارگذاری‌های آئرودینامیکی

---

<sup>51</sup> Particle image velocimetry

<sup>52</sup> Detached eddy simulation

نمی‌توانند فرم هماهنگ خود را حفظ کنند و به‌صورت بی‌نظم می‌شوند. همچنین کانتر<sup>۵۳</sup> های گرفته‌شده از جریان نشان‌دهنده‌ی این امر است که SJA ناحیه جدایش را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج در زاویه‌های مختلف تزریق سیال نشان می‌دهد که این کمیت تأثیراتی را روی ضخامت ناحیه جدایش دارد اما در این حالت به علت بالا بودن زاویه حمله، این تأثیرات قابل‌لمس نیست.

چاپین و همکاران [۵۶] کنترل فعال جدایش لبه حمله ایرفویل NACA 0012 روی سطح مکشی در رینولدز ۱۰۰۰۰۰ به‌صورت شبیه‌سازی بررسی کردند. آن‌ها شبیه‌سازی خواص محرک پایا و غیر پایا را روی جدایش سیال در محدوده‌ی زاویه حمله ۰ تا ۲۸ درجه مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مکان، زاویه و فرکانس مناسب محرک برای زاویه حمله واماندگی (۱۹ درجه) پیدا کردند و همچنین افزایش قابل توجه در نیروی برآ مشاهده شده‌است. (۸۴ درصد نسبت به حالت کنترل نشده) و زاویه واماندگی نیز از ۱۹ درجه به ۲۵ درجه افزایش یافت.

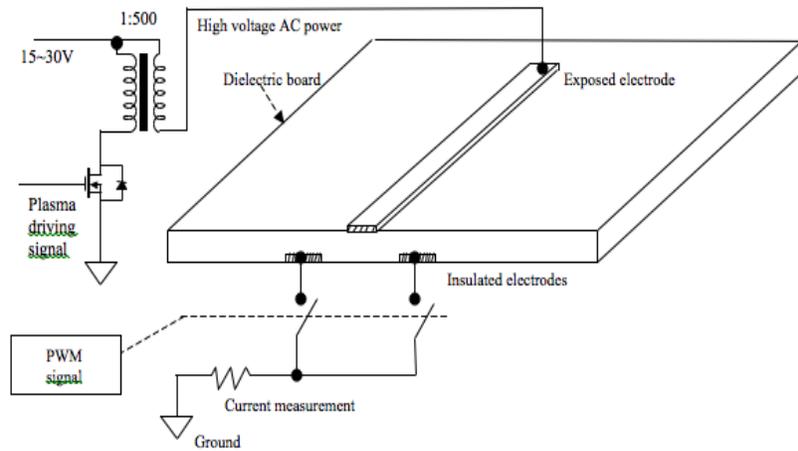
### ۳-۲-۲- کنترل جریان مبتنی بر پلاسما

همان‌طور که پیش از این اشاره شد کنترل جریان مبتنی بر پلاسما<sup>۵۴</sup> (DBD) یکی از روش‌های فعال برای بهبود خواص آئرو دینامیکی است. محرک پلاسما یک آشفتگی محلی را در جریان القا می‌کند که باعث گسترش جریان پایین‌دست در vortex sheet (صفحه‌ای که در آن ناپیوستگی در سرعت سیال را مشاهده می‌کنیم) می‌شود. در نتیجه، محرک پلاسما می‌تواند مانند VG عمل کند. تفاوت این روش با روش VG در این است که هیچ قطعه مکانیکی جابه‌جا یا هیچ سوراخی رو سطح انجام نمی‌شود که این نشان‌دهنده مزیت مهم این روش است [۵۷].

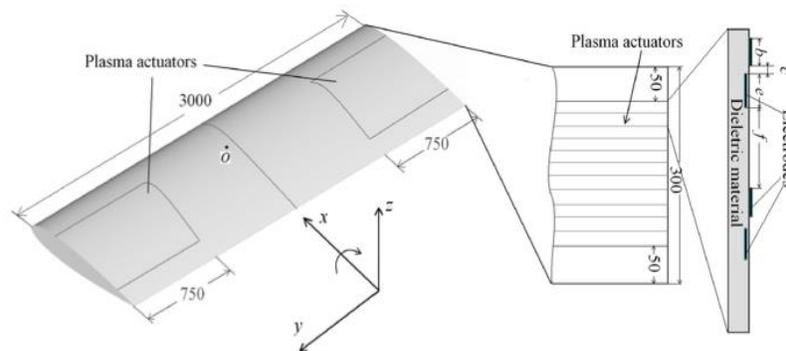
---

<sup>53</sup> Contour

<sup>54</sup> Dielectric barrier discharge



شکل ۲-۳: یک نوع از پیکربندی محرک DBD پلاسما [۵۸]



شکل ۲-۴: پلاسما محرک DBD بکار گرفته شده روی ایرفویل NACA0015 [۵۹]

کاراکوس و همکاران [۶۰] به صورت شبیه‌سازی تأثیر مکان قرارگیری محرک پلاسما DBD را روی خواص آئرودینامیکی ایرفویل NACA-0015 بررسی کردند. طبق نتایج، محرک پلاسما ضریب برآ را افزایش و ضریب پسا را کاهش می‌دهد. مکان قرارگیری پلاسما محرک تأثیر بسیار مهمی در عملکرد این ابزار دارد.

فوکوموتو و همکاران [۶۱] تأثیر پلاسما محرک روی ایرفویل NACA0012 با زاویه پیچ‌های مختلف در رینولدز ۲۵۶۰۰۰ با استفاده از مدل LES<sup>۵۵</sup> به صورت شبیه‌سازی بررسی کردند. با زاویه پیچ به سمت پایین، ضریب برآ به طور چشمگیری افزایش می‌یابد در حالی که ضریب پسا و ممنتوم کاهش می‌یابد. اگرچه ضریب ممنتوم تقریباً ۸ درصد کسر شده است، زاویه حمله و اماندگی به طور مؤثری به تأخیر می‌افتد که این تغییر جدی ناشی از گردابه‌هایی هست که از پلاسما محرک ناشی می‌شود. این گردابه‌های بزرگ نه تنها باعث نیروی مکشی می‌شوند بلکه باعث ارتقا پیوستن دوباره ممنتوم به جریان آزاد نیز می‌شود.

اوگاو و همکاران [۶۲] کنترل جدایش سیال با استفاده از محرک پلاسما DBD روی ایرفویل NACA0015 در رینولدز ۶۳۰۰ به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بررسی کردند. آن‌ها با مشاهده نتایج به این موضوع پی بردند که به کارگیری این روش می‌تواند ضریب برآ را تقریباً ۴ درصد افزایش و ضریب پسا را ۱۱ درصد کاهش بدهد.

یانگ و همکاران [۶۳] تأثیر انحنای برآ افزا و محرک پلاسما DBD روی عملکرد آئرو دینامیکی با استفاده از حل شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. حل شبیه‌سازی نشان می‌دهد انحنای بیشتر برآ افزا زمانی که جدایشی روی سطح برآ افزا رخ ندهد باعث افزایش نیروی برآ می‌شود. اگرچه برای زاویه حمله‌های خاصی، جدایش روی سطح فوقانی برآ افزا رخ می‌دهد، در نتیجه افزایش انحنا برآ افزا لزوماً باعث افزایش نیروی برآ نمی‌شود. تأثیر برآ افزا با کنترل جریان با استفاده از روش DBD در عدد رینولدز  $1.5 \times 10^6$  شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که این روش کنترل جریان، کاملاً جدایش سیال را متوقف می‌کند، بنابراین باعث می‌شود که ضریب برآ در محدوده پیش و اماندگی<sup>۵۶</sup> افزایش بیابد.

---

<sup>55</sup> large-eddy simulations

<sup>56</sup> Prestall

## ۲-۴- ضرورت انجام تحقیق

مدل‌سازی و بررسی عملکرد توربین‌های بادی با توجه به رو به کاهش بودن منابع انرژی در دوره‌های اخیر همواره مورد توجه محققان بوده است. از طرفی تأمین نیروی الکتریسیته که بخش مهمی از میزان انرژی مورد نیاز در صنعت و همچنین مصارف عمومی در جامعه را شامل می‌شود، همواره دارای اهمیت خاصی برای دولت‌ها و کشورها دارد؛ اما به دلیل نبود شرایط مناسب آزمایشگاهی و یا هزینه‌های بسیار بالای این گونه تحقیقات مخصوصاً در کشور ما ساخت مدل‌های (توربین بادی، تونل باد، تجهیزات آزمایشگاهی گران‌قیمت و غیره) این گونه تحقیقات همواره در حاشیه توجه قرار گرفته است؛ اما با توجه به پیشرفت‌هایی که در نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی از جمله فلونت<sup>۵۷</sup> انجام شده است، این امکان فراهم شده که شبیه‌سازی توربین‌های بادی در این نرم‌افزارها میسر شود. بررسی عملکرد توربین‌های بادی به دلیل آئرو دینامیک پیچیده توربین بادی، سرعت چرخش و اعداد رینولدز بالای شرایط عملیاتی، وقوع پدیده جدایش جریان در زاویه‌های معین از چرخش پره‌های توربین و سایر موارد مشابه، توسط روش‌های معمول گذشته کار آسانی نبوده و در عمل نیز نتایج آن از درجه اهمیت پایینی برخوردارند. لذا به منظور تحلیل دقیق‌تر جریان و بررسی روش‌های متفاوت و نوین، برای بالا بردن بهره‌وری توربین‌های بادی لازم است تا از روش‌های نوین محاسباتی و در نتیجه نرم‌افزارهای بروز دنیا استفاده شود. گرچه این روش‌ها نیازمند زمان زیادی به منظور بررسی و تحلیل مسائل هستند و از حجم بالایی از محاسبات برخوردارند، اما نباید از مزایای این روش مانند دقت بالا و بررسی همه‌جانبه و همچنین قابلیت تغییر داده‌های ورودی به منظور تحلیل شرایط مختلف غافل شد.

---

<sup>57</sup> Fluent

## ۲-۵- نو آوری تحقیق

شکل هندسی و عملکرد آئرو دینامیکی باله‌های توربین‌های بادی نقش مهمی در ضریب توان آن‌ها دارد. از طرفی سادگی ساخت و توجیه اقتصادی نیز به همان اندازه حائز اهمیت هستند. سال‌های بسیاری است که کاهش ضریب پسا و افزایش ضریب برا به‌منظور کاهش نیروهای اعمالی بر پره و بالا بردن توان تولیدی توربین بادی مورد توجه دانشمندان بوده است. یکی مهم‌ترین مشکلات طراحان توربین بادی، جدایش جریان روی سطوح در تماس با سیال است. با توجه به اینکه جدایش جریان و در نتیجه واماندگی جریان در روی باله‌ها موجب افزایش نیرو حاصل از گردابه ایجاد شده در پشت باله می‌گردد، همواره به تأخیر انداختن جدایش روی باله یکی از مهم‌ترین مزیت‌های طراحی باله‌های توربین بادی بوده است. بدین منظور نیاز است تا تأثیر عوامل مختلف از جمله، خصوصیات جریان باد، اثرات سه‌بعدی باله‌ها، شدت آشفتگی جریان، پارامترهای هندسی و سایر موارد مؤثر بررسی شوند.

یکی از ابزارهای آئرو دینامیکی که می‌تواند نیروی پسا کل را کاهش دهد (مخصوصاً نیروی پسا فشاری) در اجسام کروی، دیمپل است. اگرچه، اضافه کردن دیمپل باعث کاهش نیروی پسا فشاری می‌شود اما افزایش اندازه و تعداد آن ممکن است نیروی پسا اصطکاکی را زیاده‌تر کند. در این تحقیق به‌منظور بیشینه کردن نسبت ضریب نیروی برا به نیروی پسا، افزایش گشتاور و در نتیجه بهره‌وری توربین بادی محور افقی، دیمپل‌ها با شعاع، تعداد و فواصل مختلف از یکدیگر روی سطح مکشی پره توربین بادی با محور افقی پیاده‌سازی شده‌است. سپس با توجه به بهترین حالت بدست‌آمده دیمپل در افزایش گشتاور توربین، این هندسه دیمپل برای سرعت‌های مختلف باد و زاویه پیچ‌های مختلف نیز بررسی شد تا اثرات دیمپل روی عملکرد آئرو دینامیکی توربین بادی نتیجه‌گیری شود.



## فصل ۳ معادلات حاکم

### ۳-۱- معادلات حاکم

برای حل هرگونه جریانی، لازم است معادلات پیوستگی و ممنتوم حل شود تا مؤلفه‌های سرعت در سه راستای محورهای مختصات حاصل شوند. در صورتی که جریان تراکم پذیر باشد یا فیزیک مسئله شامل جریان‌های چند فازی و یا اگر بررسی انتقال حرارت مدنظر باشد، لازم است تا معادلات انرژی نیز همراه با مجموعه معادلات فوق حل گردند [۶۴].

### ۳-۱-۱- معادله پیوستگی برای جریان آشفته

فرم دیفرانسیلی معادله پیوستگی به فرم زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (۱-۳)$$

که در آن  $u_i$  مؤلفه بردار سرعت در راستای فضائی و  $\rho$  چگالی است. این معادله برای مقادیر لحظه‌ای جریان آشفته نیز برقرار است. در صورت متوسط گیری از معادله فوق، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\overline{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i)} = 0 \quad (۲-۳)$$

با جایگذاری کمیت‌های لحظه‌ای با مقادیر متوسط زمانی به علاوه مقادیر نوسانی، و نیز استفاده از قوانین متوسط گیری رینولدز:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho' u_i'}) = 0 \quad (۳-۳)$$

برای یک جریان تراکم ناپذیر، از آنجاکه  $\rho' = 0$  می‌باشد، معادله فوق به صورت زیر درخواهد آمد:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4-3)$$

### ۳-۱-۲- معادلات ممنتوم برای جریان‌ات آشفته

معادلات ممنتوم برای یک جریان تراکم ناپذیر با لزجت ثابت به صورت زیر می‌باشد:

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \beta_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (5-3)$$

که در آن  $p$  فشار،  $\beta_i$  نیروی حجمی در راستای  $i$  است. این معادله هم برای جریان‌ات آرام و هم برای جریان‌ات آشفته معتبر می‌باشد. لیکن برای یک جریان آشفته، متغیرهای وابسته‌ای نظیر سرعت و فشار تماماً وابسته به زمان می‌باشند. حال می‌خواهیم معادله ممنتوم فوق را بر حسب کمیت‌های متوسط زمانی بیان نماییم. با قرار دادن  $u_i = \bar{u}_i + u'_i$  و نیز  $p = \bar{p} + p'$  در معادله (۵-۳) حاصل می‌شود:

$$\rho \left( \frac{\partial (u'_i + \bar{u}_i)}{\partial t} + (\bar{u}_j + u'_j) \frac{\partial (\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_j} \right) = \beta_i - \frac{\partial (\bar{p} + p')}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 (\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_i \partial x_j} \quad (6-3)$$

با ساده‌سازی معادله‌ی (۶-۳) و نیز اعمال متوسط‌گیری زمانی از طرفین این معادله، حاصل می‌شود:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \bar{\beta}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (7-3)$$

عبارت سوم در سمت چپ معادله‌ی (۷-۳) معمولاً به صورت اشکال مختلف بیان می‌گردد. از معادله‌ی پیوستگی

جریان‌ات تراکم ناپذیر،  $\frac{\partial u'_j}{\partial x_j} = 0$  می‌باشد، بنابراین:

$$u'_i \frac{\partial u'_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{and} \quad \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (8-3)$$

با اضافه و کم نمودن عبارت  $\overline{u'_i \frac{\partial u'_j}{\partial x_j}}$  به طرفین معادله به دست آمده برای ممنتوم، و از آنجاکه:

$$\overline{u'_i} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_j} + \overline{u'_j} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) \quad (۹-۳)$$

معادله ممنتوم برای جریان آشفته به صورت زیر بیان می گردد:

$$\rho \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} \right) = \overline{\beta}_i - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (۱۰-۳)$$

تنها تفاوت معادله ممنتوم حاصله با معادله ممنتوم با کمیت های لحظه ای، اضافه شدن عبارت آخر در سمت راست معادله (۱۰-۳) یعنی  $\overline{\rho u'_i u'_j}$  می باشد. این عبارت را اصطلاحاً تنش آشفتگی یا تنش رینولدز نامیده می شود. تنها تفاوت معادلات جریان آرام با آشفته نیز فقط حضور همین عبارت می باشد. به طور کلی این عبارت، از لحاظ فیزیکی یک تنش نمی باشد، بلکه بیانگر اثر تبادل اینرسی (ممنتوم) می باشد. البته این عبارت از سمت راست معادله ممنتوم (درجایی که با عبارت های اینرسی وجود دارد) به سمت چپ منتقل شده است. بنابراین ریشه آن عبارت از جنس ممنتوم می باشد.

در حالت کلی، معادلات بقا حاکم بر جریان سیالات آشفته، (یعنی بقای ممنتوم و جرم)، به صورت زیر بیان می شوند:

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = -P_i + (\rho - \rho_0) g_i + [\mu (u_{i,j} + u_{j,i}) - \rho \overline{u'_i u'_j}]_j \quad (۱۱-۳) \text{ بقای ممنتوم}$$

$$u_{j,j} = 0 \quad (۱۲-۳) \text{ بقای جرم (پیوستگی)}$$

که در آن  $\mu$  لزجت و  $g$  شتاب گرانش است. معادلات فوق را اصطلاحاً معادلات RANS نامیده و در ضمن معادلاتی صریح بوده و هیچ فرضی در به دست آمدن و احياناً ساده‌سازی آن‌ها نشده‌است. ولیکن این معادلات تشکیل یک دستگاه بسته<sup>۵۸</sup> را نمی‌دهند. (یعنی تعداد مجهولات بیش‌تر از تعداد معادلات است). به‌واسطه غیرخطی بودن این معادلات، پس از فرآیند متوسط‌گیری، همبسته<sup>۵۹</sup> جدید مطرح شده‌است:

$$\overline{u'_i u'_j} : \text{همبستگی بین نوسانات سرعت}$$

عبارت  $\overline{\rho u'_i u'_j}$  بیانگر انتقال  $Momentum - x_i$  در راستای  $x_j$  ( و بالعکس) است. به این عبارت اصطلاحاً تانسور تنش رینولدز گفته می‌شود.

تانسور تنش رینولدز به‌عنوان یک تنش روی سیال عمل کرده و مشخص‌کننده اثر رفتار ادیهای<sup>۶۰</sup> آشفتگی روی میدان جریان متوسط می‌باشند.

در بسیاری از نواحی جریان، تنش‌های آشفتگی و شارهای آشفتگی<sup>۶۱</sup> بسیار بزرگ‌تر از مقادیر نظیر جریان آرام می‌باشند و لذا از مقادیر نظیر جریان آرام در مقایسه با مقادیر آشفتگی می‌توان چشم‌پوشی کرد. هدف از مدل‌سازی جریانات آشفتگی، تعیین عبارت‌هایی از قبیل تنش رینولدز، شار جرمی آشفتگی و یا شار حرارتی آشفتگی با استفاده از ارتباط دادن مقادیر کمیت‌های مزبور به کمیت‌های جریان متوسط و بالأخص گرادیان‌های موجود در جریان متوسط می‌باشد [۶۴].

برای جریانات ساده برشی ترکیب تنش برشی به‌دست‌آمده از میدان سرعت متوسط با مؤلفه مربوط به آشفتگی به رابطه‌ی زیر پایان می‌یابد:

<sup>58</sup> Closet set

<sup>59</sup> Correlation

<sup>60</sup> Eddy

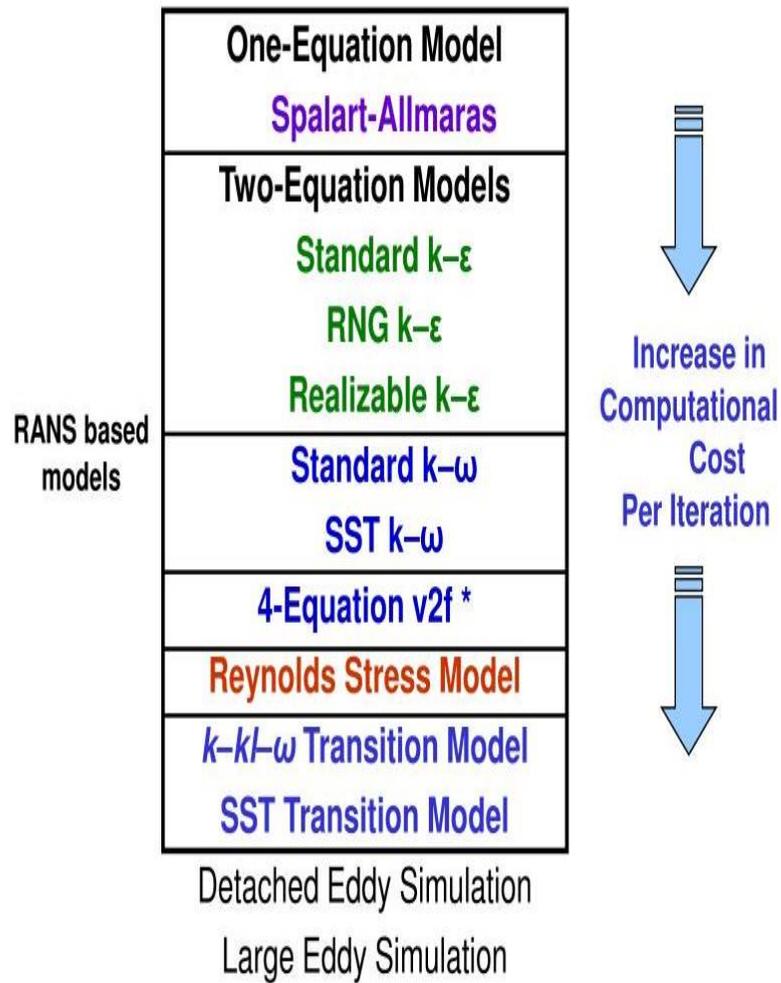
<sup>61</sup> Turbulent mass flux

$$\tau = \tau_{laminar} + \tau_{Turbulent} = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} - \overline{\rho u'v'} \quad (3-13)$$

به جز در ناحیه زیر لایه لزوج (ناحیه مجاور دیواره)، در بقیه نواحی، اندازه تنش‌های رینولدز،  $\overline{\rho u'v'}$  بسیار بزرگ‌تر از تنش‌های لزوج  $\mu \frac{d\bar{u}}{dy}$  می‌باشد [۶۴].

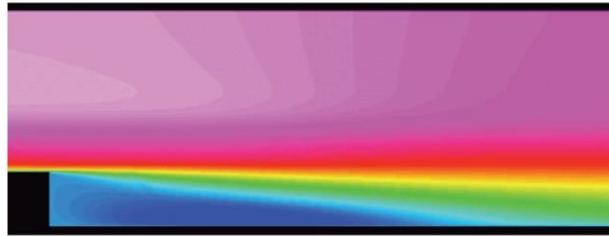
### ۳-۳- دسته‌بندی مدل‌های توربولانسی

جریان‌های آشفته با استفاده از عبارت‌های سرعت نوسانی مشخص می‌شوند. این نوسانات کمیت‌هایی مانند ممنتوم، انرژی رو ترکیب کرده و باعث می‌شود این کمیت‌های انتقالی هم نوسان کنند. چون این نوسانات می‌تواند در مقیاس کوچک و با فرکانس شدید باشد، شبیه‌سازی مستقیم آن‌ها برای کاربردهای مهندسی می‌تواند بسیار هزینه‌بر باشد. در عوض، معادلات حاکم آنی (دقیق) می‌توانند به‌طور متوسط زمانی یا در غیر این صورت برای حذف وضوح مقیاس‌های کوچک دست‌کاری بشوند. در نتیجه مجموعه اصلاح‌شده‌ای از معادلات که از نظر محاسباتی ارزان‌تر هستند برای حل کردن جریان‌های آشفته ارائه شده‌است. با این وجود، معادلات اصلاح‌شده حاوی متغیرهای ناشناخته اضافی هستند و برای تعیین این متغیرها از نظر مقادیر شناخته‌شده، مدل‌های تلاطم لازم است [۶۵]. همان‌طور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده‌است، مدل‌های توربولانسی مختلفی ارائه شده‌است که هر کدام برای شرایط مشخصی مطرح شده‌اند. بسته به دقت هر کدام، زمان محاسبات آن نیز افزایش می‌یابد. اگرچه روش‌های LES و DES نسبت به مدل‌های RANS از دقت بالاتری برخوردارند ولی این مدل‌ها نیازمند شبکه‌بندی‌های بسیار سنگین هستند در نتیجه هزینه محاسباتی را به شدت افزایش می‌دهند. شکل ۲-۳ به خوبی تفاوت روش‌های پرهزینه مانند LES با روش RANS در نمایش گردابه نشان می‌دهد.



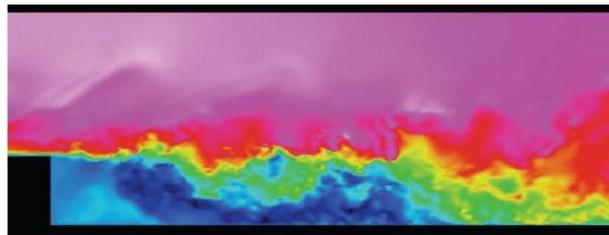
\*A separate license is required

شکل ۳-۱: مدل‌های توربولانسی ارائه شده برای مدل‌سازی جریان آشفته [۶۶]



**RANS**

Source: Rémy Fransen, 3<sup>rd</sup> INCA colloquium, ONERA, Toulouse (2011)



**LES**

Source: Rémy Fransen, 3<sup>rd</sup> INCA colloquium, ONERA, Toulouse (2011)

شکل ۳-۲: مقایسه‌ای از حل عددی روش پرهزینه LES با روش RANS [۶۷]

### ۳-۳-۱- مدل یک معادله‌ای Spalart-Allmaras

در مدل‌های یک معادله‌ای، یکی از دو مقیاس مهم در جریان‌ات آشفته، (زمان مقیاس جریان آشفته و طول مقیاس جریان آشفته) یا ترکیبی از آن دو، با استفاده از یک معادله انتقالی به دست می‌آید. معمولاً این انرژی جنبشی آشفته، ( $k$ ) است که برای آن از یک معادله انتقالی استفاده می‌شود [۶۸].

مدل Spalart-Allmaras یک مدل تک معادله‌ای ساده بوده که یک معادله انتقال را برای به دست آوردن  $\mu_t$  حل می‌کند. مدل فوق که برای کاربردهای هوافضایی ارائه شده‌است، نتایج قابل قبولی برای جریان‌های لایه‌مرزی که در معرض گرادیان فشار معکوس قرار دارند، به دست می‌دهد. همچنین این مدل، یک مدل توربولانسی قابل قبول برای کاربردهای توربوماشینی است [۶۹-۷۰].

دو تا از بهترین مزیت‌های این مدل توربلانسی به شرح زیر است:

✓ حل را تنها درگیر یک معادله انتقال می‌کند، در نتیجه هزینه محاسباتی در مقایسه با مدل‌های دو معادله‌ای

متداول مانند K-epsilon کمتر است

✓ مدل Spalart-Allmaras به‌طور گسترده‌ای برای جریان‌های خارجی تأیید شده‌است و تطبیق خوبی با

نتایج تجربی در کاربردهای هوافضایی دارد

### ۳-۳-۲- مدل‌های دو معادله‌ای

مدل‌های دو معادله‌ای به‌عنوان پایه بسیاری از تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریانات آشفته، به‌ویژه در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ساده‌ترین مدل‌های کامل آشفتگی (که در عین قابلیت‌های بالا، دارای معادلات نسبتاً ساده‌ای نیز می‌باشند)، مدل‌های دو معادله‌ای هستند که در آن‌ها، حل دو معادله انتقال جداگانه به‌صورت مستقل مقیاس‌های سرعت آشفتگی و طول آشفتگی را تعیین می‌کنند.

مهم‌ترین اختلاف بین مدل‌های دو معادله‌ای و سایر مدل‌های لزجت گردابه‌ای، در کامل بودن مدل‌های دو معادله‌ای است، به‌عبارت‌دیگر از آن‌ها می‌توان برای پیش‌بینی خواص یک جریان آشفته بدون آگاهی قبلی از ساختار جریان از آن استفاده نمود. درحالی‌که در مدل‌های یک معادله‌ای، طول مقیاس‌هایی وجود دارد که برای تعیین اندازه آن‌ها، نیاز به آشنایی کامل با رژیم جریان و شکل آن پیش از انجام حل است و این امر مدل‌سازی جریانات آشفته را کمی دشوار و همین‌طور همراه با خطا می‌نماید [۶۴].

### ۳-۳-۳- مدل انتقال تنش برشی (SST) $k - \omega$

مدل SST  $k - \omega$  توسط منتر [۷۱] یک مدل قدرتمند هست که از مزیت‌های مدل  $k - \omega$  که در نواحی نزدیک دیواره و مدل  $k - \varepsilon$  که برای جریان آزاد در نواحی دور از دیواره نتایج خوبی به دست می‌دهد، ارائه شده‌است. این مدل به‌طور هم‌زمان، توانایی بالای مدل  $k - \omega$  در نواحی با عدد رینولدز پایین و توانایی بالای مدل  $k - \varepsilon$  در نواحی با عدد رینولدز بالا را در اختیار گرفته‌است. معادلات حاکم بر مدل‌هایی مانند مدل  $k - \varepsilon$  با فرض آشفتگی بودن کامل جریان نوشته شده‌اند، بنابراین این قبیل مدل‌ها اغلب برای هسته مرکزی آشفتگی جریان مناسب هستند و استفاده از مدل‌های مزبور برای نواحی نزدیک دیواره، که جریان آرام می‌باشد مناسب نبوده و اغلب با مشکلات عدم دقت و خطای محاسباتی روبرو می‌شوند. بنابراین برای پروفیل در نزدیک دیواره باید از دو روش استفاده کرد: الف) استفاده از توابع دیواره ب) استفاده از مدل‌های دو معادله‌ای رینولدز پایین. استفاده از توابع دیواره نیاز به اصلاح مدل‌های آشفتگی را برطرف می‌سازد اما مشکل اصلی این توابع محدودیت استفاده از آنها در جریان‌های مختلف می‌باشد. استفاده از مدل‌های دو معادله‌ای رینولدز پایین، اگرچه حجم محاسباتی بیشتری را می‌طلبد لیکن به واسطه حل معادله به جای استفاده از معادلات پروفیل ثابت، دقت حل را با افزایش می‌دهد. بنابراین برای این ترکیب دو مدل، نیاز است که فرمول‌بندی مدل  $k - \varepsilon$  را به شکل مدل  $k - \omega$  به دست بیاید. مدل SST  $k - \omega$  بسیار شبیه به مدل استاندارد  $k - \omega$  است با این تفاوت که شامل بهینه‌سازی‌های زیر نیز است (لازم به ذکر است که مدل  $k - \omega$  بر مبنای مدل Wilcox  $k - \omega$  قرار دارد که حاوی اصلاحاتی در اثرات عدد رینولدز پایین، تراکم‌پذیری و پراکندگی جریان برشی است):

الف) مدل استاندارد  $k - \omega$  و شکل تبدیل یافته مدل  $k - \varepsilon$  هر دو در یک تابع آمیختگی ضرب شده و آنگاه دو مدل با یکدیگر جمع می‌شوند. تابع آمیختگی طوری طراحی شده‌است که در نواحی نزدیک دیواره دارای مقدار یک (که باعث فعال شدن مدل  $k - \omega$  در آن نواحی می‌شود) است. توجه شود که اگرچه این روش می‌تواند

قابلیت‌های هر دو مدل را به شکل قابل‌توجهی بهبود ببخشد، لکن به‌واسطه فرایند سوئیچ شدن از یک مدل به مدل دیگر، این مدل بیشتر از مدل  $k - \omega$  در معرض رفتارهای ناپایداری عددی و یا واگرایی قرار داد.

ب) مدل SST  $k - \omega$  دارای یک عبارت مشتق پخشی در معادله  $\omega$  است.

ج) تعریف لزجت آشفتگی  $\mu_t$  به‌منظور به‌حساب آوردن اثرات انتقال تنش‌های برشی اصلی جریان آشفته مورد بازبینی قرار گرفته است.

د) ضرایب مدل نسبت به مدل استاندارد  $k - \omega$  تغییر یافته است. این خصوصیات باعث شده‌است که مدل SST  $k - \omega$ ، با یک دسته وسیعی از جریانات (همانند جریانات حاوی گرادیان فشار معکوس، ایرفویل‌ها و موج شوک گذرا) نسبت به مدل استاندارد  $k - \omega$  بسیار دقیق‌تر و مطمئن‌تر باشد [۶۴]. بنابراین با توجه به مزایا ذکر شده از مدل ترکیبی SST  $k - \omega$ ، این مدل برای شبیه‌سازی توربین بادی استفاده شده است.



## فصل ۴ تولید هندسه، شبکه‌بندی، شبیه‌سازی عددی و نتایج

#### ۴-۱- مقدمه

اکثر هندسه‌های موجود از پره توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی V-47 برای کاربردهای جامداتی و تحلیل کرنش و تنش بوده و قابلیت این را نداشته تا برای نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی مورد استفاده قرار بگیرد. علاوه بر این، از نظر تلورانس نقشه‌کشی بسیار ضعیف بوده و انحنای حساس پره شامل انحنای لبه حمله و یا نحوه تغییر پروفیل‌های پره از مقطعی به مقطع دیگر به درستی در آن لحاظ نشده بود؛ بنابراین با توجه به نیاز پروژه به هندسه صحیح و دقیق پره توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی با استفاده از اسکن سه‌بعدی پره و سپس تحلیل ابر نقاط به دست آمده در نرم‌افزارهای گمبیت و سالیدورکز<sup>۶۲</sup> و حذف تلورانس‌های موجود، نسبت به تهیه هندسه نهایی اقدام شد.

#### ۴-۲- تولید هندسه پره توربین

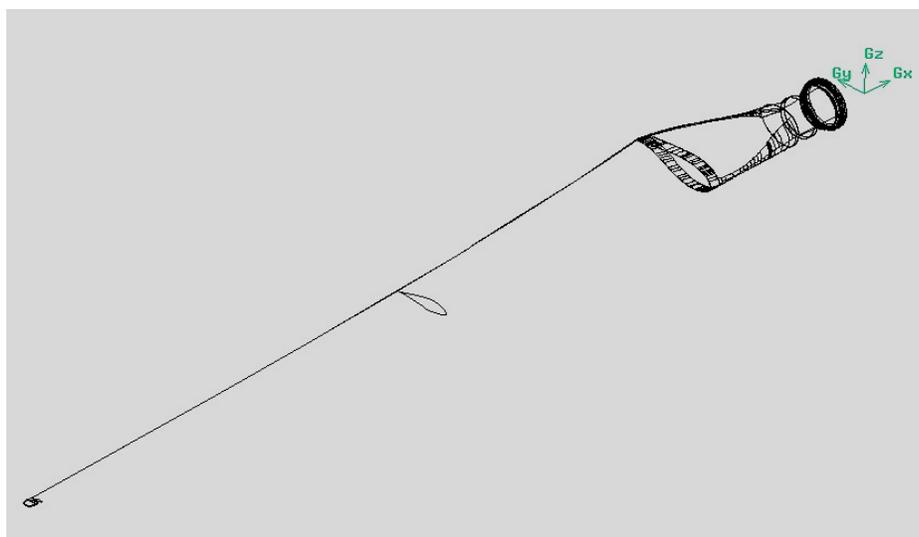
##### ۴-۲-۱- اسکن سه‌بعدی پره و برازش سطوح از ابر نقاط

هندسه اولیه همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، پس از بررسی روش‌های گوناگون (مانند اسکن اپتیکی، اسکن لیزری، CMM و غیره) برای تهیه نقشه و هندسه دقیق مورد نیاز از پره‌های تولیدشده در کارخانه صبا نیرو، روش اسکن اپتیکی سه‌بعدی پره با توجه به کیفیت و دقت عملکرد و همچنین هزینه پایین‌تر نسبت به دیگر روش‌ها انتخاب شده است و با استفاده از اسکن سه‌بعدی (که جایگزینی مناسب، دقیق و ارزان برای CMM است) تولید گردیده است. دقیق بودن این هندسه دارای اهمیت بالایی در امر شبیه‌سازی عددی است به طوری که کوچک‌ترین خطا و اعوجاج در تولید هندسه مذکور می‌تواند منجر به بروز خطاهای عددی بزرگی در مرحله شبیه‌سازی عددی جریان حول روتور گردد. بنابراین ابر نقاط حاصل، با تلاش فراوان بیش از ۶۵۰ نفر ساعت کار

---

<sup>62</sup> Solidworks

مفید تا حدود زیادی تصحیح شده و عیوب آن با کمک نرم افزارهای مختلف مرتفع گردید تا پس از مونتاژ روتور روی برج در نرم افزار گمبیت آماده تولید شبکه مورد نیاز برای انجام تحلیل عددی شود.



شکل ۴-۱: اسکن سه بعدی پره توربین بادی

در این روش ابتدا با توزیع تعداد زیادی نقطه روی سطح جسم مورد نظر و سپس داده برداری و محاسبه فواصل و مختصات نقاط به روش اپتیکی، ابری از نقاط پیرامون هندسه تشکیل می گردد و در ادامه با تحلیل ابر نقاط به دست آمده، هر سه نقطه مجاور دلخواه به یکدیگر مرتبط گشته و تشکیل المان های سطحی می دهند. که هر المان با یک بردار سطحی نرمال تعریف می شود. بانک داده تشکیل شده از این بردارهای نرمال فایلی با پسوند STL\* است که می بایست با استفاده از آن رویه سطوح منحنی پره با دقت میان یابی گردند. قوی ترین نرم افزار جهت ایجاد هندسه از ابر نقاط و تولید سطوح منحنی نرم افزار کتیا<sup>۶۳</sup> است. لذا با استفاده از نرم افزار کتیا سطوح پره از میان ابر نقاط برازش داده شد. در شکل ۴-۲ و ۴-۳ سطوح برازش یافته از ابر نقاط مشاهده می شود. بالین حال سطوح برازش یافته مذکور همچنان دارای خطاهایی بوده که به شرح زیر هستند:

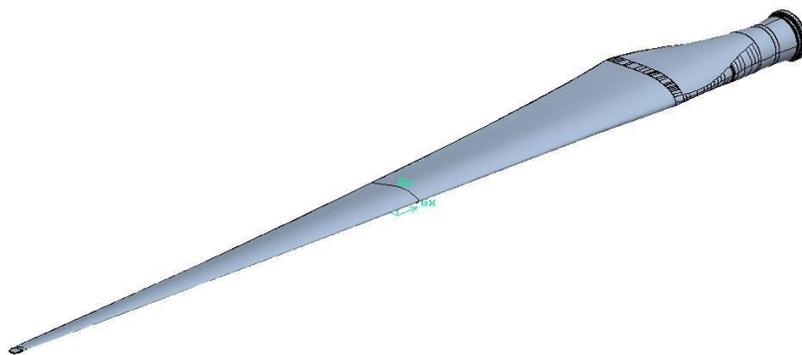
<sup>63</sup> Catia

✓ خطای برشی<sup>۶۴</sup> در تقریب مختصات مکان نقاط توسط سیستم داده برداری اپتیکی

✓ خطای ناشی از برآزش سطوح به ابر نقاط

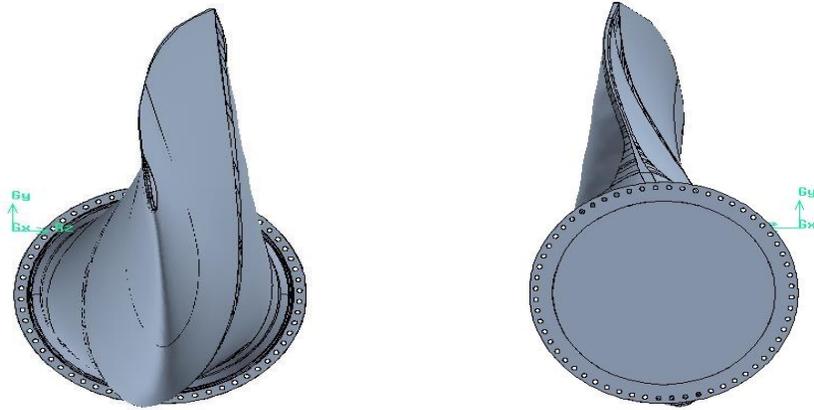
✓ خطای ناشی از تلورانس‌های نرم‌افزاری

خطای ناشی از مورد اول بسیار ناچیز بوده (کمتر از یک میکرومتر) و قابل صرف‌نظر کردن است. عمده خطای سیستم ناشی از موارد دوم و به‌ویژه سوم است. با استفاده از نرم‌افزار کتیا و قابلیت‌های آن تلاش گردید تا خطای ناشی از مورد دوم نیز کمینه شود زیرا که یکی از دلایل توسعه این نرم‌افزار و نقاط قوت آن برآزش تولید احجام و اشکال هندسی پیچیده که دارای سطوح منحنی هستند، است؛ اما خطای ناشی از مورد سوم قابل اغماض نبوده و به دلیل ایرادات هندسی وارده که ناشی از حذف تلورانسی در نرم‌افزار فوق‌الذکر است، نسبت به تصحیح آن در نرم‌افزار سالی‌دورکز اقدام شد. در شکل ۴-۴ نمونه‌هایی از ایرادات و اعوجاج‌های کوچک موجود در فایل مذکور که شامل حدوداً ۴۰ مورد اساسی و تعداد قابل توجهی موارد جزئی می‌شد، قابل مشاهده است.

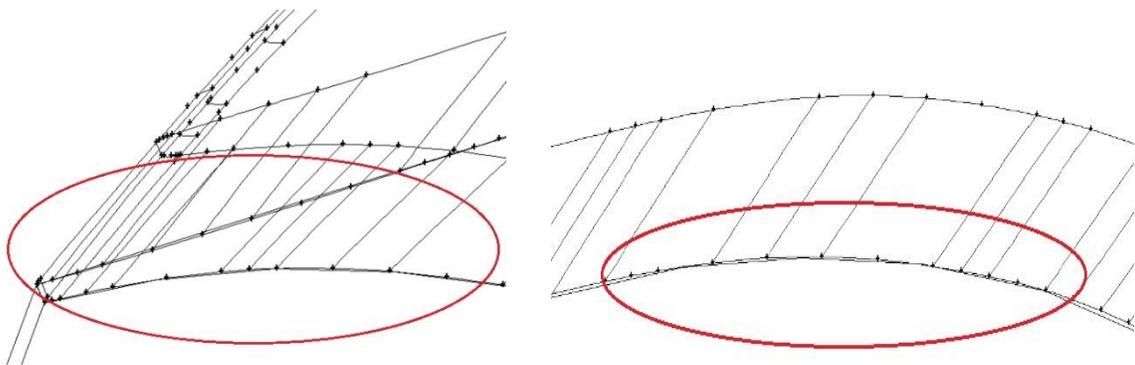


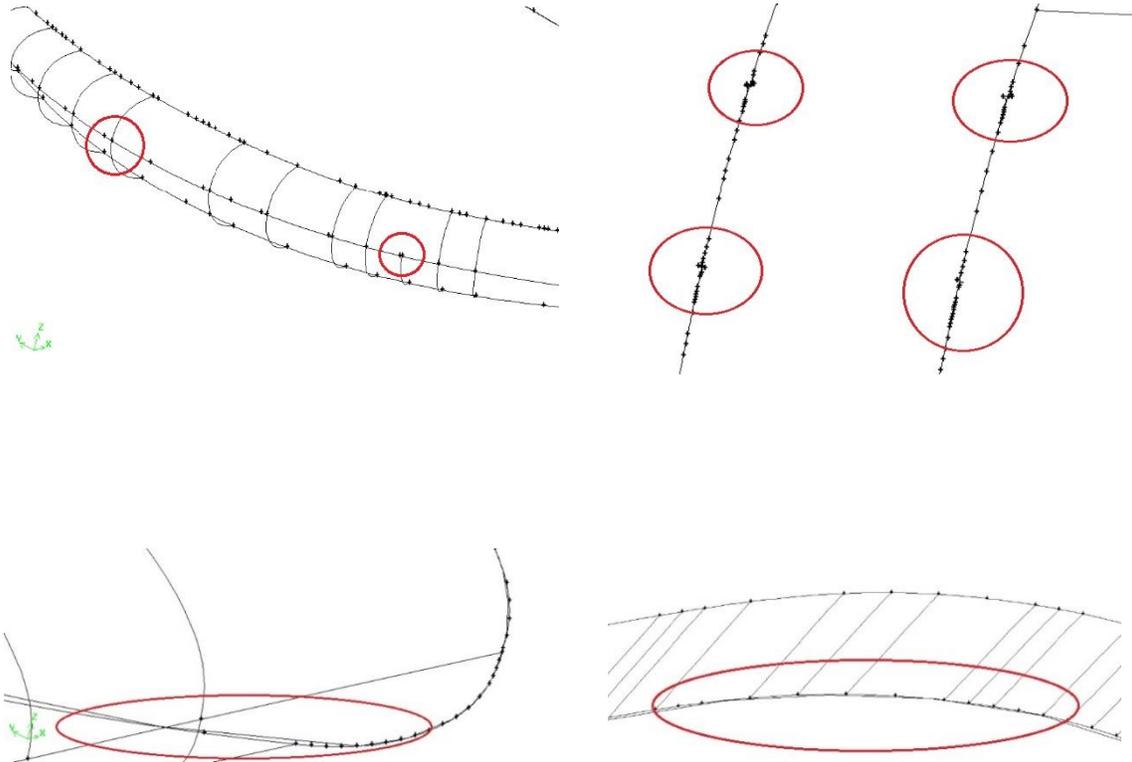
شکل ۴-۲: نمای کلی از سطوح برآزش یافته به ابر نقاط حاصل از اسکن سه‌بعدی توسط نرم‌افزار کتیا

<sup>64</sup> Cut off Error



شکل ۴-۳: نماهای گوناگون از سطوح برازش یافته به ابر نقاط

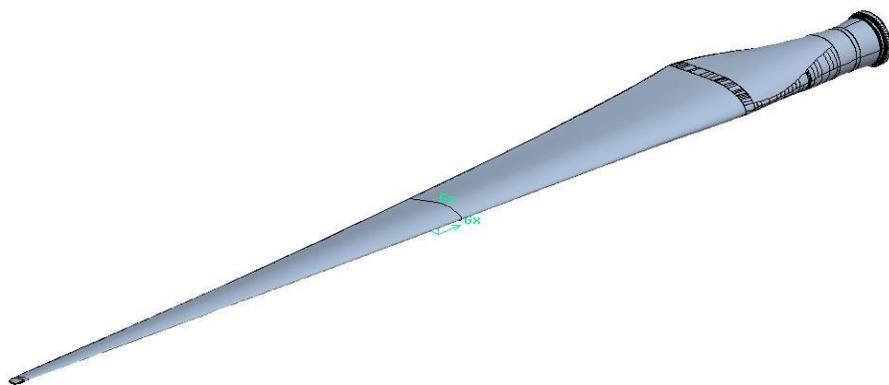




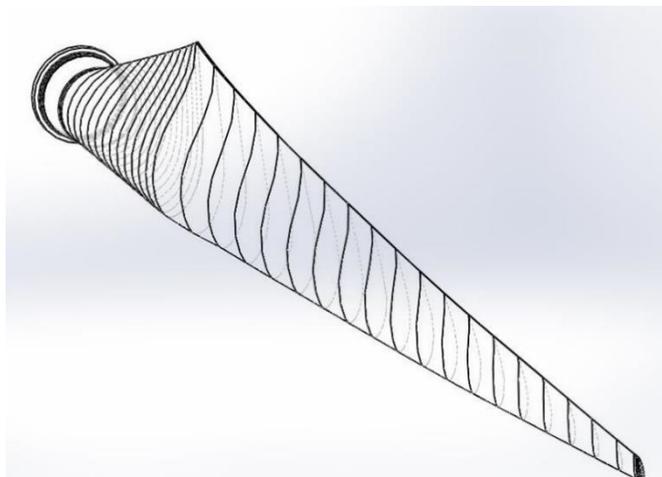
شکل ۴-۴: نمونه‌هایی از ایرادات تلورانسی هندسه برازش یافته در نرم‌افزار کتیا

#### ۴-۲-۲- تصحیح هندسه اولیه برازش یافته

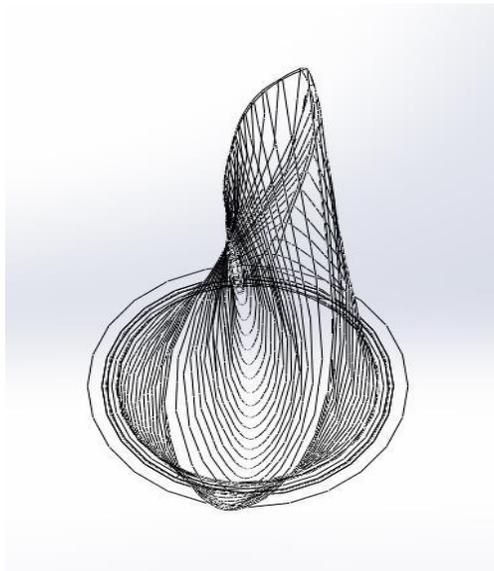
جهت رفع عیوب سطوح برازش یافته به ابر نقاط (که در بخش قبل به نمونه‌هایی از آن اشاره شد) و آماده‌سازی هندسه برای تولید شبکه و تحلیل عددی جریان پیرامون آن، از نرم‌افزار سالیدورکز بهره گرفته شد. تصحیح‌های موردنیاز عبارت‌اند از: رفع عدم پیوستگی‌ها و تولید یک سطح بسته که قابلیت تبدیل شدن به حجم را داشته باشد، برطرف نمودن اشکالات کلی و جزئی سطوح و خطوط راهنما، ایجاد اسکلت‌بندی مناسب در طول پره برای حفظ شاخص‌های هندسی و جلوگیری از اعمال تلورانس‌های نامناسب و جابجایی سطوح هنگام تولید شبکه سطحی. در شکل ۴-۵ تا شکل ۴-۷ تصاویر هندسه پره آماده‌سازی شده را مشاهده می‌نمایید:



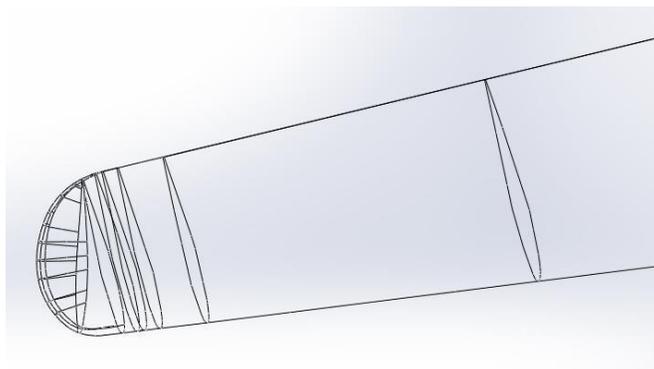
شکل ۴-۵: نمایی از پره اصلاح شده در نرم افزار سالیدورکز به همراه مقاطع جدید تشکیل دهنده اسکلت پره



(الف)



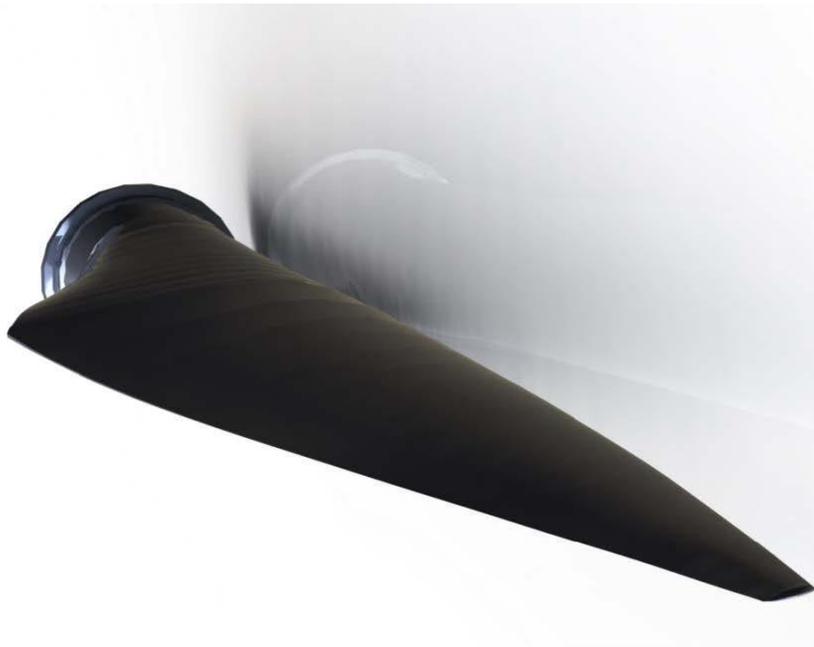
(ب)



(ج)

شکل ۴-۶: ساختار اسکلتی قسمت‌های مختلف پره بعد از تصحیح - الف: نمای اسکلتی کلی پره - ب: نمایی

از اسکلت پره در راستای محور پره - ج: نمایی از اسکلت نوک پره



(الف)

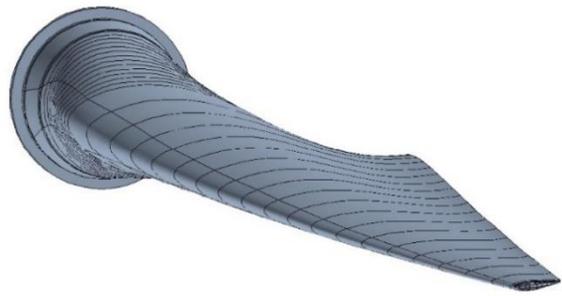
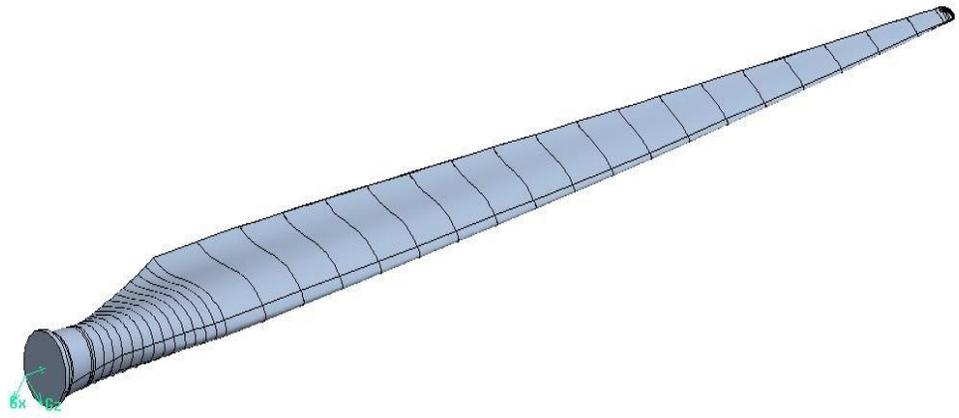


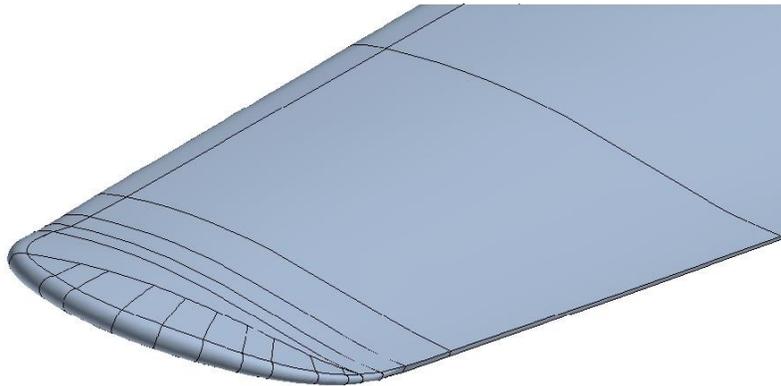
(ب)

شکل ۴-۷: الف) نمای نزدیک - ب) نمای دور از نماهای گرافیکی از پره اصلاح شده

#### ۴-۲-۳- آماده‌سازی نهایی پره، تولید هندسه کامل پره توربین

برای فراخوانی هندسه اصلاح‌شده پره در نرم‌افزار گمبیت لازم است تا آن را از نرم‌افزار سالی‌دورکز به صورت یکی از فرمت‌های متداول نقشه‌کشی مانند .step، .stp یا .igs استخراج شود. با بررسی فرمت‌های مختلف و فایل‌های استخراج‌شده، مشاهده شده‌است که فایل‌هایی که با فرمت .stp یا .step استخراج‌شده‌اند، دقیق‌تر از فرمت .igs است، در نتیجه از پسوند .stp برای انتقال هندسه پره به نرم‌افزار گمبیت استفاده شد. در جریان استخراج و انتقال فایل نیز در حالت طبیعی مقداری خطا اتفاق می‌افتد که ناشی از خطای برشی در تولید سطوح و خطوط در نرم‌افزار سالی‌دورکز است. برای به حداقل رساندن این خطا از دو راهکار استفاده شد: اولاً میزان دقت تولید هندسه بیشترین حد ممکن معادل با تلورانس  $1 \times 10^{-11}$  متر انتخاب شد، ثانیاً برای از دست دادن کمترین میزان از ارقام اعشار، هندسه تولیدی هزار برابر شده‌است، بدین ترتیب سه رقم اعشار به دقت تلورانسی افزوده می‌شود که در نهایت معادل  $1 \times 10^{-14}$  متر خواهد بود که به ما معادل ۱۴ رقم اعشار دقت هندسی می‌دهد؛ اما از آنجاکه نرم‌افزار گمبیت یک نرم‌افزار کاملاً ریاضی بوده و خطای برشی موجب از هم جدا شدن فصل مشترک خطوط و سطوح گشته و هندسه از حالت پیوسته و یکپارچه خارج می‌شود، علیرغم تلاش‌های فوق به منظور حفظ دقت هندسه، همچنان در برخی نقاط محدود شاهد مشکلات جزئی و عدم برهم‌نشینی نقاط و خطوط بوده که پس از بررسی دقیق، این مشکلات نیز در همان نرم‌افزار گمبیت مرتفع گردید. در ادامه تصویر هندسه نهایی پره را که در نرم‌افزار گمبیت تکمیل شده‌است در شکل ۴-۸ مشاهده می‌نمایید [۷۲].

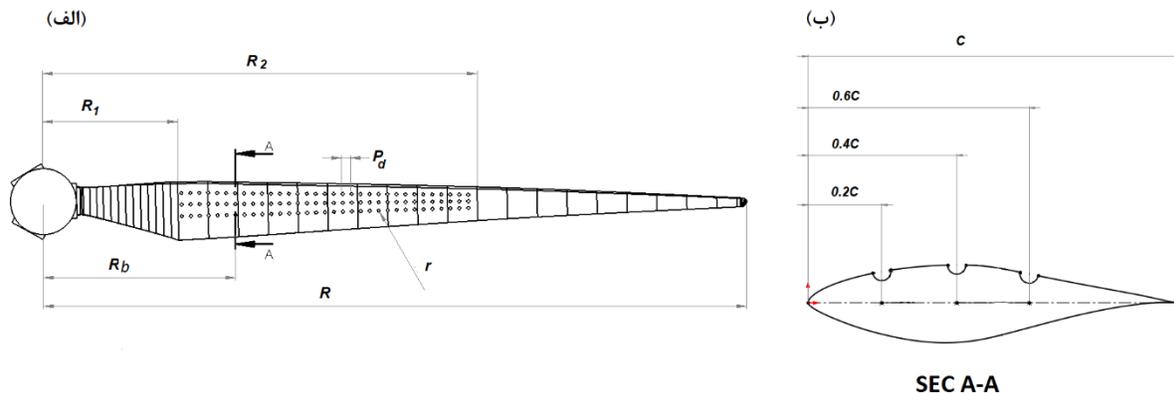




شکل ۴-۸: نماهایی از هندسه نهایی و اصلاح شده پره

### ۴-۳- هندسه استفاده شده در پژوهش حاضر

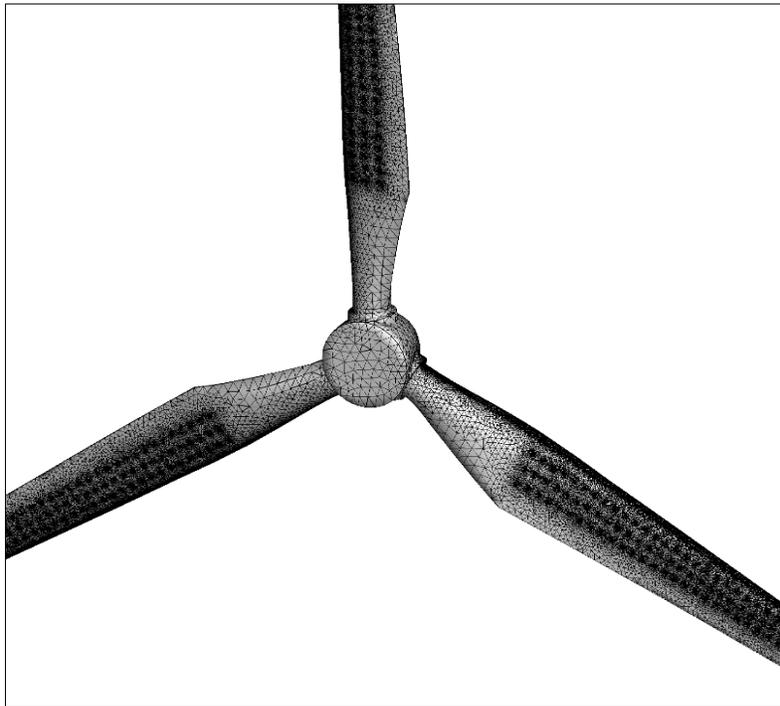
در این پژوهش با توجه به روش‌های اشاره شده در فصل‌های قبل برای بهبود عملکرد پره توربین، از دیمپل به عنوان ابزاری برای بهبود عملکرد پره توربین بادی استفاده شده است. به نحوی که سه ردیف دیمپل در موقعیت‌های ۰,۲، ۰,۴ و ۰,۶ خط وتر (فاصله از لبه حمله) ایرفویل، روی سطح فوقانی پره توربین قرار داده شده است. همان طور که در شکل ۴-۹ نشان داده شده است تمام دیمپل‌ها در فاصله‌ی مشخصی از روتور توربین قرار گرفته‌اند به طوری که اولین ردیف دیمپل در فاصله‌ی  $R_1 = 4508.45 \text{ mm}$  و آخرین ردیف در فاصله‌ی  $R_2 = 14520.43 \text{ mm}$  طراحی شده است. به منظور بررسی اثر تعداد دیمپل‌ها روی عملکرد توربین بادی، دیمپل‌ها با فواصل مختلف شبیه‌سازی اثرات برج لحاظ نشده و همچنین زاویه انحراف صفر لحاظ شده است.  $P_d = 150, 200, 300, 400 \text{ mm}$  و سایزهای مختلف  $r = 15, 25, 50, 70 \text{ mm}$  شبیه‌سازی شده‌اند. در این



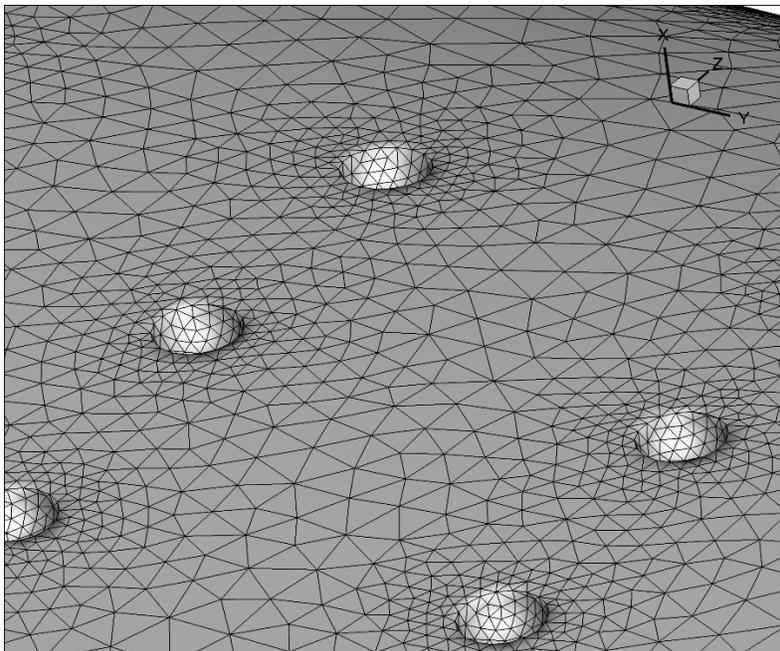
شکل ۴-۹: (الف) نمای دوبعدی از پره دیمپیل زده شده (ب) شماتیک ایرفویل دیمپیل زده شده (نمای برشی A\_A)

#### ۴-۴- تولید شبکه‌بندی موردنیاز برای میدان حل

در این تحقیق، بلوک دوار و متحرک با المان‌های مثلثی بی‌سازمان شبکه‌بندی شده‌اند. تعداد کل المان‌های شبکه در بلوک ثابت و متحرک به ترتیب ۱۷۵۰۰۰ و ۱۰۹۰۰۰۰۰ هست. شبکه‌بندی روی سطوح پره‌ها و دیمپل‌ها در شکل‌های ۴-۱۰ نشان داده شده‌است. در شبیه‌سازی جریان آشفته با مدل SST  $k - \omega$  به منظور تحلیل درست لایه مرزی، توصیه شده‌است که پارامتر  $y^+$  باید کمتر از ۳ باشد [۷۳]. به همین منظور، پنج لایه با ضخامت اولین لایه ۰,۰۰۰۰۰۵ متر با نرخ رشد ۱/۱۵ در نزدیک دیواره‌ها پیاده‌سازی شده‌است. همان‌طور که در شکل ۴-۱۱ آورده شده‌است  $y^+$  در اکثر نواحی کمتر از یک و در ناحیه اطراف هاب افزایش می‌یابد. برای بررسی استقلال حل از شبکه، پره دیمپیل زده شده توربین در  $P_a = 5 \text{ deg}$  و سرعت باد ۱۴ متر بر ثانیه انتخاب شد. مقدار گشتاور به دست آمده بر اساس تعداد شبکه‌بندی مختلف در شکل ۴-۱۲ آورده شده‌است. این شبکه‌بندی‌ها به گونه‌ای است که اندازه المان‌های هر شبکه در هر مرحله ۲۰ درصد نسبت به حالت قبل کاهش یافته و در نهایت گشتاور به دست آمده از ریزترین شبکه کمتر از ۰,۶ درصد نسبت به شبکه‌بندی ۱۱۰۳۰۰۰۰ اختلاف دارد. به همین منظور برای جلوگیری از کاهش حجم محاسبات شبکه با تعداد المان ۱۱۰۳۰۰۰۰ برای حل شبیه‌سازی انتخاب شده‌است.

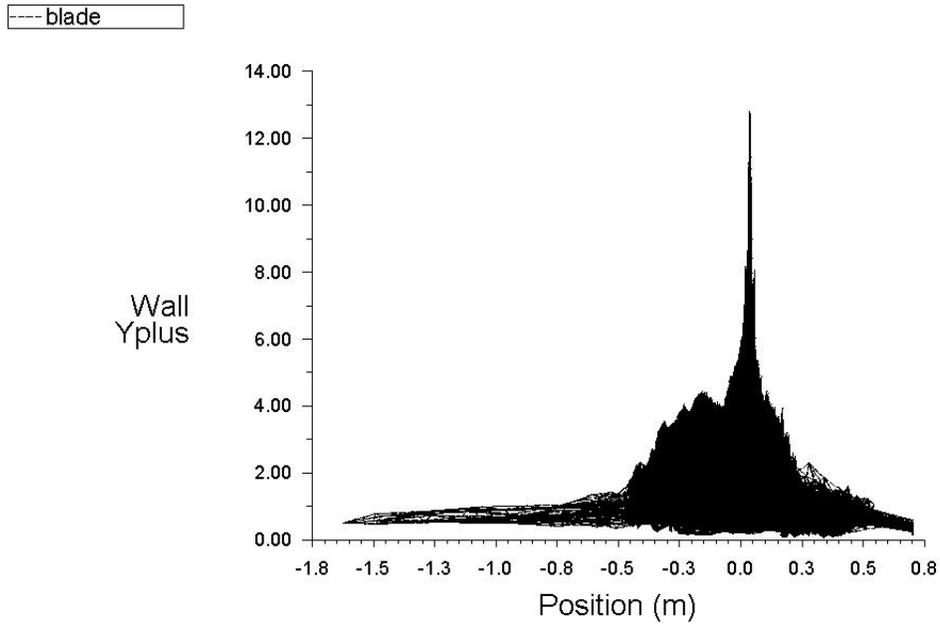


(الف)

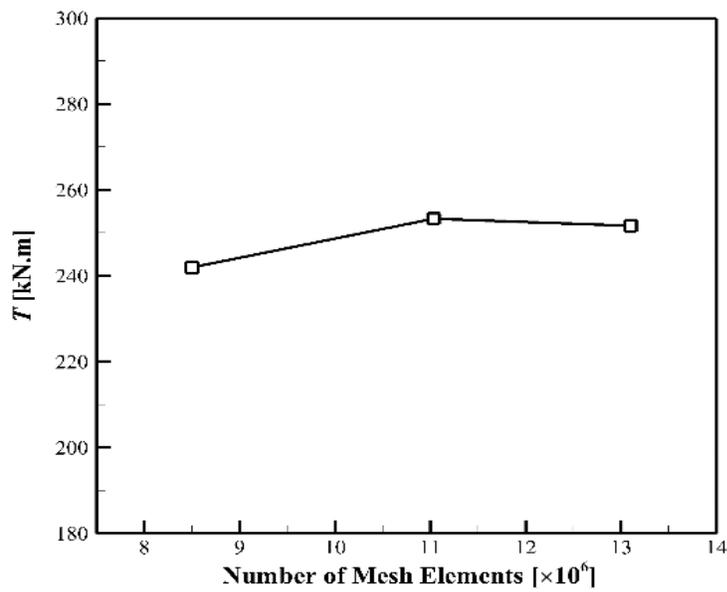


(ب)

شکل ۴-۱۰: الف) نمای کلی از شبکه‌بندی - ب) نمایی از شبکه‌بندی روی دیمپل



شکل ۴-۱۱: نمودار Y plus روی سطح پره



شکل ۴-۱۲: بررسی استقلال شبکه برای پره دیمپل زده شده با  $r = 25 \text{ mm}$  و  $P_d = 300 \text{ mm}$ .

#### ۴-۵- شرایط مرزی

شرایط مرزی میدان حل با توجه به فشار پایه بودن جریان به صورت زیر انتخاب شد:

#### ۴-۵-۱- ورودی: Velocity Inlet

در این نوع شرط مرزی اطلاعات مرزی تعیین شده توسط کاربر عبارت‌اند از: پروفیل سرعت به صورت عدد ثابت یا پروفیل  $UDF^{65}$  دلخواه نوشته شده (پارامترهای تعیین میزان اغتشاشات برای مثال بر پایه شدت آشفتگی و مقیاس طولی آشفتگی و یا شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی) که با توجه متنوع بودن سرعت باد ورودی متغیر است.

#### ۴-۵-۲- سطوح اطراف میدان حل: Symmetry

در این نوع شرط مرزی، نرم‌افزار اطلاعاتی از سوی کاربر نمی‌گیرد؛ ویژگی این شرط مرزی آن است که تمامی گرادینان‌ها را روی مرز صفر می‌کند، گویی هر اتفاقی در آخرین سلول‌های مجاور مرز در داخل میدان رخ می‌دهد، قرینه گرادینانی آن در سوی دیگر مرز اتفاق می‌افتد.

#### ۴-۵-۳- سطح پشتی میدان حل: Pressure Outlet

در این شرط مرزی فشار نسبی در مرز به همراه اطلاعات توربولانسی جریان برگشتی در صورت ورود جریان از مرز مورد نظر وارد می‌شود.

#### ۴-۵-۴- اجزا توربین: wall

در این نوع شرط مرزی، میزان زبری سطح و شرط لغزش در مرز مشخص می‌گردد. در حالت پیش فرض با در

---

<sup>65</sup> User Define Function

نظر گرفتن شرط عدم لغزش مؤلفه‌های سرعت جریان روی این مرز برابر با صفر می‌گردند.

#### ۴-۵-۵: سطوح متناظر میدان حل: Interface

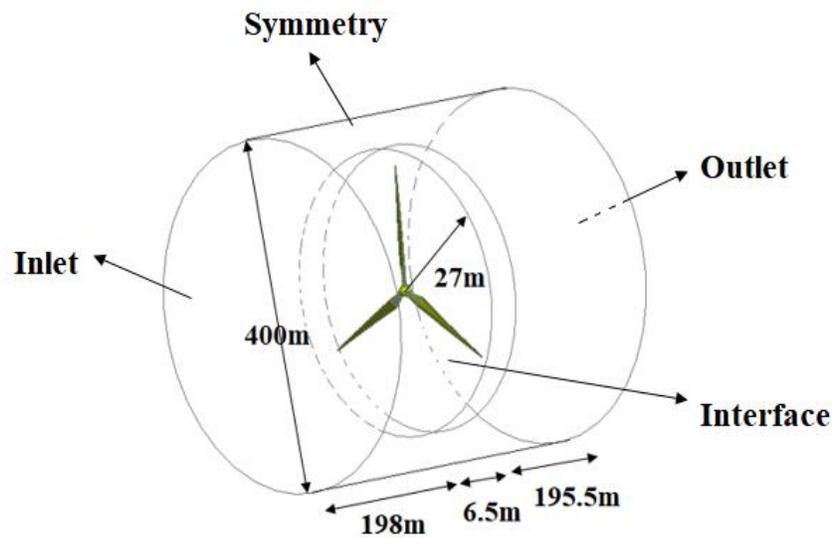
سطوح متناظر مرتبط باهم بایستی به صورت نظیر به نظیر در نرم‌افزار فلوئنت به یکدیگر مرتبط گردند. این مرز جهت اتصال و ارتباط شار عبوری از هر یک از جفت سطوح معین شده به مرز متناظر خود به کار می‌رود و هیچ اطلاعاتی از کاربر دریافت نمی‌کند.

#### ۴-۵-۶: تمامی سطوح داخل میدان: Interior

این مرز در عمل بخشی از فضای سیال بوده و جریان از آن بدون تغییری عبور می‌کند. از این نوع مرز برای تقسیم میدان‌های چند بلوکی استفاده می‌شود. هندسه و شرایط مرزی ذکر شده در شکل ۴-۱۳ به صورت شماتیک آورده شده است. به دلیل سرعت مادون صوت جریان و تراکم ناپذیر بودن آن و در نتیجه انتخاب حلگر فشار پایه<sup>۶۶</sup>، فاصله مورد نیاز مرزهای ورودی از محل نصب روتور رعایت شده است. ماسون و همکاران [۷۴] حداقل فاصله مورد نیاز هر یک از مرزهای بیرونی میدان حل از محل قرارگیری روتور که در طی آن توان تولیدی پیش‌بینی شده توربین مستقل از فاصله روتور تا مرزهای خارجی است را در سال ۱۹۹۷ ارائه کرده‌اند. بر اساس نتایج آن‌ها فاصله مرزهای ورودی (در بالادست توربین)، خروجی (پایین دست توربین)، و همچنین مرزهای جانبی و بالایی میدان حل از محل قرارگیری روتور، حداقل می‌بایست به ترتیب  $4/5$ ،  $7/5$  و  $4$  برابر قطر روتور باشد.

---

<sup>66</sup> Pressure Based



شکل ۴-۱۳: بلوک حل و شرایط مرزی

#### ۴-۷- تنظیمات حلگر و معیار همگرایی

در نرم‌افزار فلونت برای شبیه‌سازی توربوماشین‌ها و اجسام دوار می‌توان از دو روش مرجع دوار<sup>۶۷</sup> و شبکه لغزان<sup>۶۸</sup> بهره گرفت. در روش مرجع دوار شبکه ناحیه دوار به صورت فیزیکی چرخانده نمی‌شود بلکه معادلات حاکم در آن ناحیه با مختصات متحرک (مثلاً مبدأ چرخان) حل می‌شوند. مزیت بزرگ این روش آن است که می‌توان چنین حلی را به صورت پایدار نسبت به زمان<sup>۶۹</sup> انجام داد و در زمان همگرایی صرفه‌جویی قابل توجهی نمود؛ اما از آنجاکه در این روش شبکه چرخانده نمی‌شود، اثرات وجود اجسام و اتفاقات واقع در پایین دست جریان روی روتور دیده نمی‌شود. مثلاً هنگامی که پره‌ها از روبروی برج عبور می‌کند، نیروهای وارد بر آن متفاوت از زمان‌های دیگر است. در نتیجه در حل به روش مرجع دوار نوسانات زمانی جریان دیده نشده و جواب‌های حاصل (ضرایب، نیروها و گشتاورها) به نوعی میانگین زمانی حل و مقدار متوسط نوسانات خواهند بود. این روش عموماً در مسائل صنعتی

<sup>67</sup> Moving Reference Frame

<sup>68</sup> Sliding Mesh

<sup>69</sup> Steady

مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا جواب‌هایی قابل قبول با خطای اندک و در مدت زمان نسبتاً کوتاه به دست می‌دهد، در روش دوم شبکه حل به شکل فیزیکی با سرعت دورانی مورد نظر دوران می‌یابد و طی آن اثرات زمانی چرخش و همین‌طور وجود اجسام و پدیده‌های پایین‌دستی مانند تغییرات نیروهای وارد بر پره هنگام قرارگیری روبروی پایه برج<sup>۷۰</sup> قابل‌رؤیت هستند. اما این روش به دلیل پیچیدگی و الزام آن به داشتن حلگر غیر پایا<sup>۷۱</sup> دارای سرعت همگرایی و حل بسیار کمتری نسبت به روش اول است. در اینجا برای شبیه‌سازی توربین در شرایط کاری گوناگون از روش اول بهره گرفته شده‌است. به جز تنظیمات دوران، سایر تنظیمات حلگر برای هر دو روش فوق یکسان بوده که در ادامه به بیان آن پرداخته می‌شود. حلگر میدان با توجه به زیرصوتی بودن جریان، به صورت فشار پایه انتخاب شد. جهت شبیه‌سازی هرچه بهتر آشفتگی یا همان توربولانس جریان با توجه به اهمیت دنباله پشت توربین و گستردگی ناحیه آن از مدل  $k-\omega$  SST بهره گرفته شد. نحوه گسسته‌سازی عبارت‌های مکانی معادلات ممنوم از مرتبه دوم تعیین شد. همچنین سایر معادلات حاکم مانند معادلات توربولانس از مرتبه اول گسسته سازی شدند. برای کوپل نمودن سرعت و فشار روی شبکه حل از روش سیمپل<sup>۷۲</sup> استفاده شد. در ادامه با توجه به شرایط هر شبیه‌سازی در بخش شرایط مرزی مقادیر متناظر آن داده شد و به بلوک دوار با مرکزیت محور روتور سرعت دورانی نامی توربین معادل  $28/5$  دور بر دقیقه یا  $2/984513$  رادیان بر ثانیه اعمال شد. به دلیل نصب روتور به صورت زاویه‌دار با راستای قائم (زاویه تمایل<sup>۷۳</sup>) زاویه محور دوران روتور در راستای جریان باد نیست بلکه از آنجاکه زاویه تمایل توربین معادل  $5/153$  درجه است، محور دوران روتور دارای دو مؤلفه افقی و قائم به صورت زیر خواهند بود:

$$\text{Rotation Axis Direction: } \cos(\text{Tilt})\hat{i} - \sin(\text{Tilt})\hat{j} = 0.99596 \hat{i} + 0.08982 \hat{j} \quad (1-4)$$

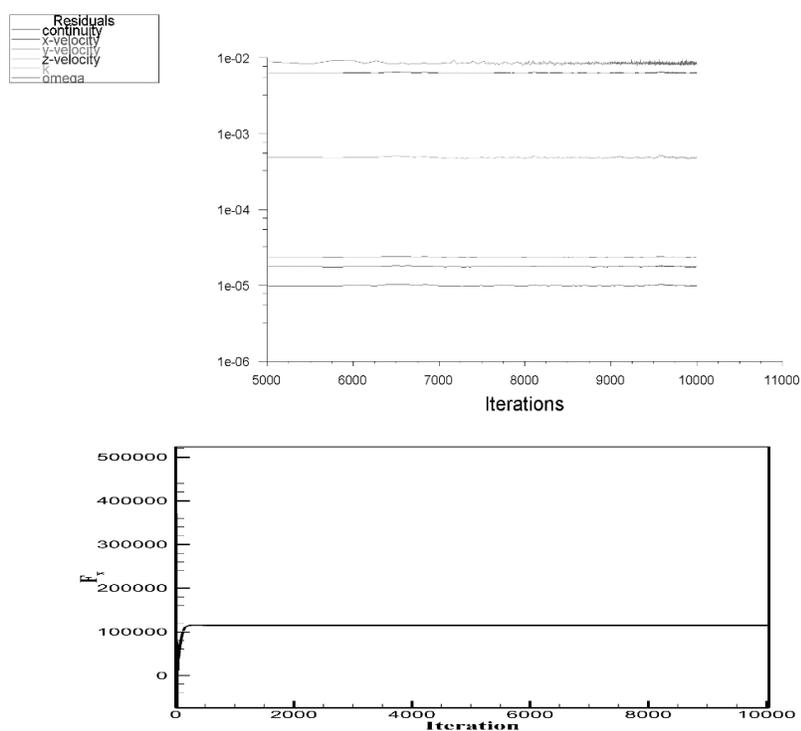
<sup>70</sup> Tower Shadow

<sup>71</sup> unsteady

<sup>72</sup> Simple

<sup>73</sup> Tilt angle

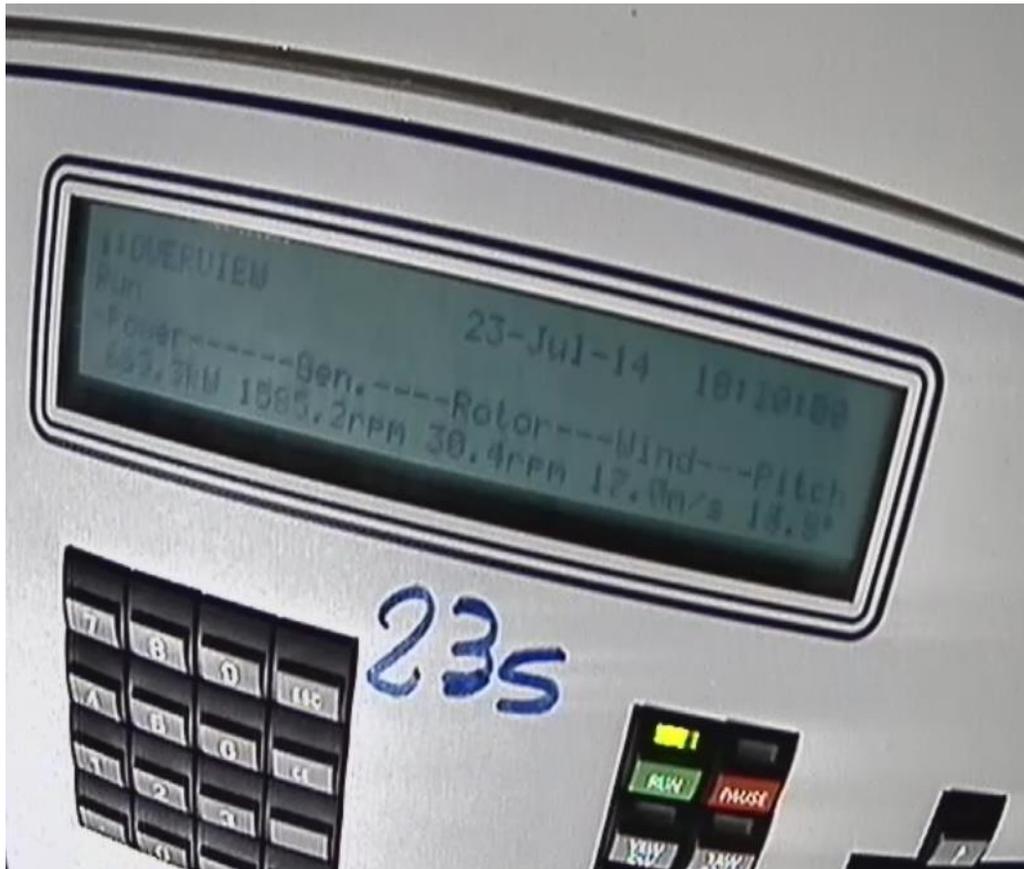
با توجه به اینکه هدف از شبیه‌سازی بررسی گشتاور و نیروی اعمالی به توربین بادی است، معیار همگرایی این شبیه‌سازی گشتاور و نیروی محوری وارد بر توربین مدنظر قرار داده شده‌است، بنابراین در هر شبیه‌سازی رفتار نیروی محوری و گشتاور در حین انجام محاسبات به تصویر کشیده شده‌است. همچنین زاویه تمایلی که در بالا اشاره شد نیز مانند اثرات برج در شبیه‌سازی لحاظ نشده‌است. همگرایی برای این نیروها و گشتاورها به این صورت تعریف می‌شود که با پیشروی حل، نیروها و گشتاورهای وارد بر روتور ثابت مانده یا دارای تغییرات تناوبی با سیکل نوسانی منظم و مشابه باشد. همچنین شرط رسیدن مانده‌های حل<sup>۷۴</sup> به عدد  $1 \times 10^{-6}$  نیز قرار داده شد که البته این شرط به‌خودی خود نمی‌تواند تضمینی بر همگرایی باشد (شکل ۴-۱۴).



شکل ۴-۱۴: نمودار همگرایی برای نیروی محوری و باقیمانده‌ها

#### ۴-۸- صحت سنجی شبیه‌سازی عددی

همان‌طور که در فصل شرایط مرزی ذکر شد، جهت انجام شبیه‌سازی‌ها و صحت‌سنجی نیاز مبرم به دانستن پروفیل‌های دقیق و لحظه‌ای از سرعت جریان باد وجود دارد؛ و از آنجاکه مقیاس‌های زمانی در تلاطم و آشفتگی جریان هوا بسیار کوچک‌تر متوسط‌گیری‌های ۱۰ دقیقه‌ای انجام‌شده بر پایه داده‌برداری از طریق دکل بادسنجی است، میزان نوسانات جریان بسیار بزرگ‌تر بوده و متوسط‌های ۱۰ دقیقه‌ای راهگشا نخواهند بود. علیرغم آنکه فیلم‌های گرفته‌شده از بخش مانیتورینگ توربین اطلاعات مفیدی مانند توان، زاویه پیچ لحظه‌ای و سرعت دورانی لحظه‌ای روتور را در اختیار قرار داده است، اما از آنجاکه حسگر سرعت‌سنج سیستم مانیتورینگ روی سقف گهواره توربین و دقیقاً پشت سر روتور نصب شده‌است، مشخص نیست این پارامترهای لحظه‌ای به ازای چه سرعت باد لحظه‌ای رخ داده‌اند. با توجه به مطالب بیان‌شده به‌عنوان مثال، از فایل مربوط به اطلاعات داده‌برداری شده، بازه ده دقیقه‌ای ۱۸:۲۰ در روز ۲۰۱۴/۵/۲۳ انتخاب شد. دلیل این انتخاب بیشتر به خاطر کیفیت مطلوب‌تر فایل فیلم متناظر با آن بازه زمانی و خوانا بودن اعداد سیستم مانیتورینگ بوده است. تصویری از فیلم سیستم مانیتورینگ در شکل ۴-۱۵ و تصویر اطلاعات داده‌برداری شده در شکل ۴-۱۶ قابل مشاهده‌اند.



شکل ۴-۱۵: تصویر ثبت شده از زمان ۱۸:۲۰ دقیقه از فیلم گرفته شده از سیستم مانیتورینگ [۷۲]

اطلاعات روبرو (شکل ۴-۱۵) از تصویر لحظه‌ای فیلم مذکور قابل استخراج است: زاویه پیچ معادل ۱۴ درجه، سرعت دورانی روتور برابر ۳۰/۴ دور بر دقیقه و توان تولیدی برق معادل ۶۶۰/۳ کیلووات.

| N1         |       |                      |                      |                      |                       |                      |                      |                      |                       |                      |                      |                      |                       |                       |                        |                     |                      |
|------------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| date       | Time  | Ave. wind speed- 60m | Max. wind speed- 60m | Min. wind speed- 60m | SDev. wind speed- 60m | Ave. wind speed- 40m | Max. wind speed- 40m | Min. wind speed- 40m | SDev. wind speed- 40m | Ave. wind speed- 20m | Max. wind speed- 20m | Min. wind speed- 20m | SDev. wind speed- 20m | Wind direction- 37.5m | SDev. direction- 37.5m | Wind direction- 30m | SDev. direction- 30m |
| 23/05/2014 | 17:10 | 17.8                 | 25.8                 | 4                    | 4.66                  | 17.2                 | 25.3                 | 4.5                  | 4.5                   | 15.8                 | 23.9                 | 4.7                  | 4.1                   | 257                   | 10.21                  | 175                 | 10.6                 |
| 23/05/2014 | 17:20 | 16.8                 | 26.7                 | 6.6                  | 4.54                  | 15.8                 | 27.7                 | 4.8                  | 4.67                  | 14.4                 | 25.5                 | 4.5                  | 4.5                   | 254                   | 9.92                   | 177                 | 9.98                 |
| 23/05/2014 | 17:30 | 19                   | 27                   | 6.7                  | 4.41                  | 18.4                 | 25.7                 | 5.5                  | 4.43                  | 17.3                 | 24.6                 | 6.6                  | 4.19                  | 257                   | 9.77                   | 175                 | 8.84                 |
| 23/05/2014 | 17:40 | 18.5                 | 28.6                 | 6.8                  | 4.2                   | 17.5                 | 25.5                 | 6.4                  | 4.48                  | 16                   | 24.5                 | 6                    | 3.98                  | 255                   | 9.03                   | 177                 | 10.27                |
| 23/05/2014 | 17:50 | 18.5                 | 26.5                 | 9.5                  | 3.55                  | 17.7                 | 25.6                 | 8.9                  | 3.67                  | 16.4                 | 25.4                 | 8.6                  | 3.43                  | 255                   | 8.91                   | 176                 | 8.11                 |
| 23/05/2014 | 18:00 | 17.2                 | 25.5                 | 8.4                  | 3.65                  | 16                   | 25.2                 | 5.5                  | 3.76                  | 15                   | 23.7                 | 5.8                  | 3.4                   | 250                   | 9.83                   | 182                 | 11.24                |
| 23/05/2014 | 18:10 | 18.9                 | 25.6                 | 7.2                  | 3.33                  | 18.2                 | 24.2                 | 8.7                  | 3.26                  | 16.5                 | 24                   | 8.8                  | 3.12                  | 251                   | 7.55                   | 182                 | 8.04                 |
| 23/05/2014 | 18:20 | 17.5                 | 25.5                 | 9.6                  | 3.01                  | 17.1                 | 24.8                 | 10.2                 | 2.88                  | 15.2                 | 21.5                 | 8.4                  | 2.56                  | 251                   | 7.95                   | 184                 | 8.85                 |
| 23/05/2014 | 18:30 | 15.8                 | 22.8                 | 8.9                  | 2.52                  | 15.5                 | 24.4                 | 8.4                  | 2.94                  | 13.9                 | 22.9                 | 5                    | 3.1                   | 258                   | 8.23                   | 175                 | 9.08                 |
| 23/05/2014 | 18:40 | 15.7                 | 22.7                 | 9.9                  | 2.23                  | 15.4                 | 22.5                 | 10.7                 | 2.15                  | 13.9                 | 20.3                 | 8                    | 2.26                  | 250                   | 10.36                  | 183                 | 10.3                 |
| 23/05/2014 | 18:50 | 14.6                 | 20.4                 | 7.8                  | 2.3                   | 14                   | 21                   | 6.4                  | 2.39                  | 12.7                 | 18.8                 | 7.6                  | 2.3                   | 250                   | 10.02                  | 184                 | 11.36                |
| 23/05/2014 | 19:00 | 15.2                 | 19.2                 | 9.5                  | 1.92                  | 14.7                 | 19.5                 | 9.4                  | 2.15                  | 13.3                 | 17.8                 | 8.8                  | 2.08                  | 248                   | 8.03                   | 185                 | 9.15                 |
| 23/05/2014 | 19:10 | 12.7                 | 17.4                 | 6.8                  | 2.09                  | 12                   | 18.5                 | 6.1                  | 2.19                  | 10.8                 | 16                   | 5.5                  | 2.15                  | 252                   | 8.64                   | 182                 | 9.65                 |
| 23/05/2014 | 19:20 | 10.6                 | 15.8                 | 4                    | 2.39                  | 9.5                  | 14.5                 | 3.8                  | 2.34                  | 8.6                  | 13.1                 | 3.9                  | 2.12                  | 257                   | 9.73                   | 172                 | 8.24                 |
| 23/05/2014 | 19:30 | 11.1                 | 17.5                 | 3.9                  | 2.93                  | 9.3                  | 15.4                 | 3.1                  | 2.67                  | 9.9                  | 14.1                 | 4.8                  | 2.21                  | 246                   | 10.58                  | 183                 | 10.43                |
| 23/05/2014 | 19:40 | 10.8                 | 16.5                 | 5.1                  | 2.6                   | 9.2                  | 15.2                 | 4.7                  | 2.4                   | 9.3                  | 14.1                 | 3.8                  | 1.92                  | 250                   | 11.57                  | 180                 | 9.92                 |
| 23/05/2014 | 19:50 | 11.2                 | 16.1                 | 4.6                  | 2.37                  | 10.4                 | 15.2                 | 3.9                  | 2.41                  | 9.6                  | 14.7                 | 3.2                  | 2.03                  | 259                   | 9.79                   | 172                 | 7.86                 |

شکل ۴-۱۶: داده بادسنجی که در آن بازه ۱۰ دقیقه‌ای همراه با اندازه سرعت‌های متوسط در ارتفاع‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ متری مشخص شده‌اند [۷۲]

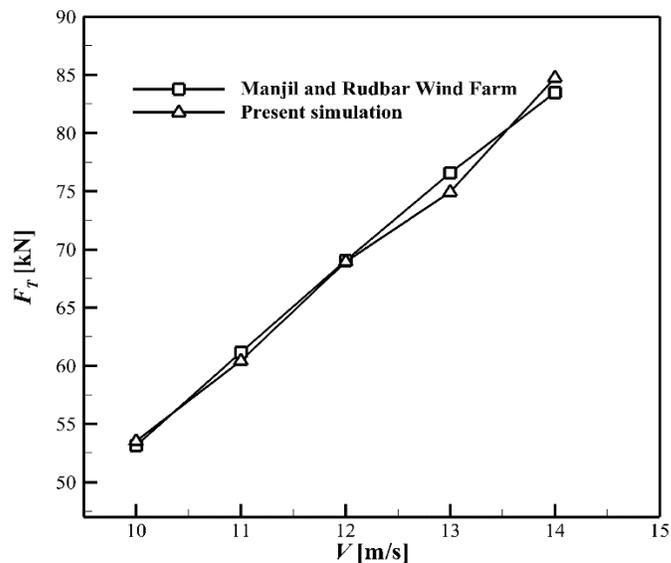
در جدول ۴-۱ نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های تجربی که توسط مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط‌زیست دانشگاه تهران انجام شده‌است، نشان داده شده‌است.

جدول ۴-۱: نتایج اندازه‌گیری شده در شرایط عملکردی گوناگون [۷۲]

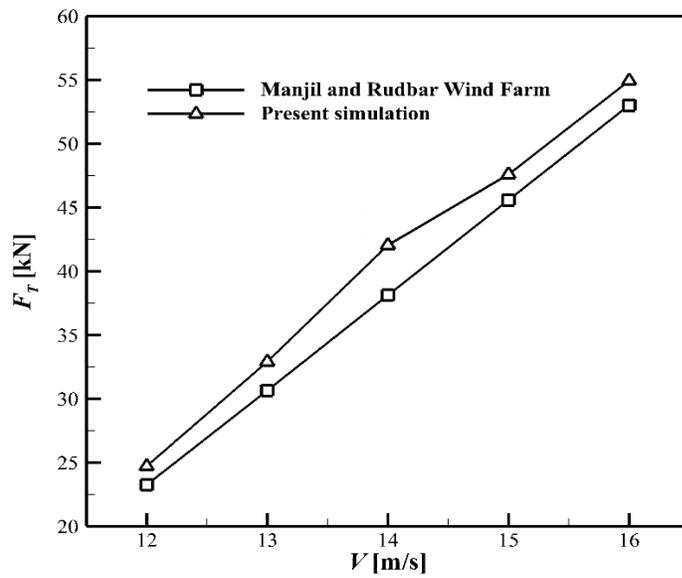
| Free Stream Velocity | Pitch = 14   |            | Pitch = 11   |            | Pitch = 8    |            | Pitch = 5    |            | Pitch = 2    |            | Pitch = 1.5  |            |
|----------------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                      | Moment (N.m) | Thrust (N) |
| ۱۸ (m/s)             | ۲۳۵۱۸۵       | ۵۰۷۸۶      | -            | -          | -            | -          | -            | -          | -            | -          | -            | -          |
| ۱۷ (m/s)             | ۱۸۸۷۲۳       | ۴۲۵۰۷      | ۲۶۱۰۲۷       | ۶۰۳۲۷      | -            | -          | -            | -          | -            | -          | -            | -          |
| ۱۶ (m/s)             | ۱۴۴۹۴۸       | ۳۶۱۲۱      | ۲۱۶۰۵۸       | ۵۳۰۲۷      | ۲۷۱۹۲۷       | ۶۸۸۸۸      | -            | -          | -            | -          | -            | -          |
| ۱۵ (m/s)             | ۱۰۴۰۲۸       | ۲۸۷۳۸      | ۱۷۳۰۸۹       | ۴۵۵۸۱      | ۲۲۹۱۰۴       | ۶۱۶۹۶      | ۲۶۸۶۲۶       | ۷۶۸۱۳      | -            | -          | -            | -          |
| ۱۴ (m/s)             | ۶۶۷۹۵        | ۲۱۴۴۸      | ۱۳۲۲۵۳       | ۳۸۱۲۸      | ۱۸۸۲۹۰       | ۵۴۲۲۶      | ۲۳۱۰۹۹       | ۶۹۷۸۸      | ۲۵۰۹۲۱       | ۸۳۴۸۴      | ۲۶۲۶۱۵       | ۹۷۸۵۷      |
| ۱۳ (m/s)             | ۳۱۸۷۵        | ۱۴۲۲۶      | ۹۸۰۴۴        | ۳۰۶۶۴      | ۱۴۹۴۷۸       | ۴۶۷۸۹      | ۱۹۰۰۱۰       | ۶۲۴۰۶      | ۲۱۳۳۷۰       | ۷۶۵۶۸      | ۲۲۷۶۷۰       | ۹۲۱۵۶      |
| ۱۲ (m/s)             | ۱۰۰۴         | ۷۱۹۴       | ۶۳۰۳۳        | ۲۳۲۶۴      | ۱۱۴۵۱۰       | ۳۹۱۶۱      | ۱۵۳۳۲۷       | ۵۴۷۶۹      | ۱۷۶۵۹۹       | ۶۹۰۳۶      | ۱۹۰۱۶۹       | ۸۵۰۹۴      |
| ۱۱ (m/s)             | -            | -          | ۳۳۲۷۷        | ۱۶۰۳۸      | ۸۰۸۶۸        | ۳۱۵۶۱      | ۱۱۸۳۶۵       | ۴۶۸۹۶      | ۱۴۱۶۳۸       | ۶۱۱۴۴      | ۱۵۳۴۱۲       | ۷۷۱۸۱      |
| ۱۰ (m/s)             | -            | -          | ۷۱۴۹         | ۹۰۲۷       | ۵۲۰۷۸        | ۲۴۱۱۹      | ۸۶۸۸۹        | ۳۹۰۸۸      | ۱۰۹۴۱۲       | ۵۳۱۱۵      | ۱۱۹۲۴۱       | ۶۸۷۶۱      |
| ۹ (m/s)              | -            | -          | -            | -          | ۲۷۴۶۵        | ۱۶۹۸۴      | ۵۹۶۳۲        | ۳۱۵۳۴      | ۸۰۲۹۹        | ۴۵۱۵۷      | ۸۸۶۵۸        | ۶۰۲۴۴      |
| ۸ (m/s)              | -            | -          | -            | -          | ۶۷۴۰         | ۱۰۱۸۳      | ۳۶۵۹۲        | ۲۴۲۹۱      | ۵۵۰۶۱        | ۳۷۵۰۱      | ۶۱۵۹۰        | ۵۱۸۱۷      |
| ۷ (m/s)              | -            | -          | -            | -          | -            | -          | ۱۷۵۰۱        | ۱۷۴۱۶      | ۳۳۷۰۲        | ۳۰۱۴۷      | ۳۷۱۸۷        | ۴۳۳۳۸      |
| ۶ (m/s)              | -            | -          | -            | -          | -            | -          | ۲۰۲۷         | ۱۰۹۳۱      | ۱۶۲۲۳        | ۲۳۰۸۱      | ۱۶۲۹۱        | ۳۴۸۷۵      |
| ۵ (m/s)              | -            | -          | -            | -          | -            | -          | -            | -          | ۲۶۰۵         | ۱۶۴۴۸      | ۱۶۲          | ۲۶۶۳۸      |

#### ۹-۴- صحت سنجی نیروی محوری و گشتاور تولیدی

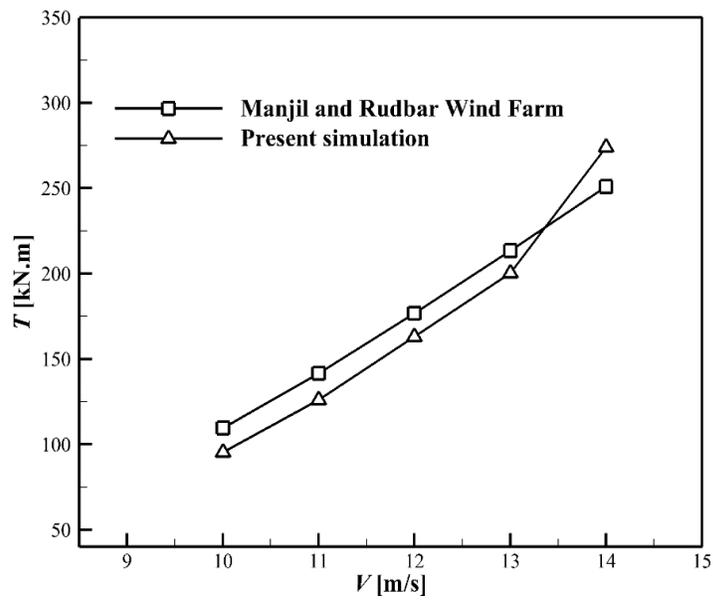
در ابتدا نیروی‌های محوری تولیدی حاصل از حل شبیه‌سازی با نتایج تجربی اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۱۷-۴ و ۱۸-۴ مشاهده می‌شود در دو حالت زاویه پیچ ۲ و ۱۱ درجه در سرعت ۱۴ متر بر ثانیه نتایج حاصل از حل شبیه‌سازی تطابق قابل قبولی با داده‌های تجربی دارد به طوری که برای نیروی محوری، میانگین خطای حاصل از حل شبیه‌سازی برای زاویه پیچ ۱۱ و ۲ درجه، به ترتیب ۵/۲۱ و ۱/۶۵ درصد است. پس از اعتبار سنجی نیروی محوری تولیدی، گشتاور تولیدی نیز اعتبار سنجی می‌شود. همانند نیروی محوری، مقادیر گشتاور تولیدی نیز همخوانی نسبتاً خوبی با داده‌های تجربی دارد. خطای میانگین حاصل از حل شبیه‌سازی برای زاویه پیچ ۱۱ و ۲ درجه به ترتیب ۹/۳۴ و ۸/۲۵ درصد است (شکل‌های ۱۹-۴ و ۲۰-۴). یکی از دلایل خطای شبیه‌سازی می‌توان هندسه اسکن شده پره توربین اشاره کرد که مقداری خطا نسبت به هندسه اصلی دارد. همچنین اثرات برج و زاویه تمایل لحاظ نشده‌است.



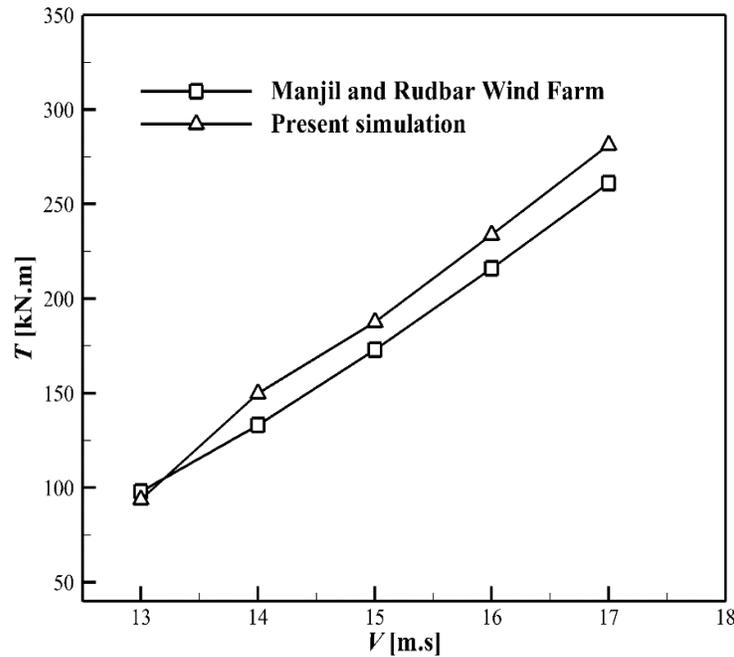
شکل ۱۷-۴: مقایسه نیروی محوری در زاویه پیچ ۲ درجه



شکل ۴-۱۸: مقایسه نیروی محوری در زاویه پیچ ۱۱ درجه



شکل ۴-۱۹: مقایسه گشتاور در زاویه پیچ ۲ درجه



شکل ۴-۲۰: مقایسه گشتاور در زاویه پیچ ۱۱ درجه

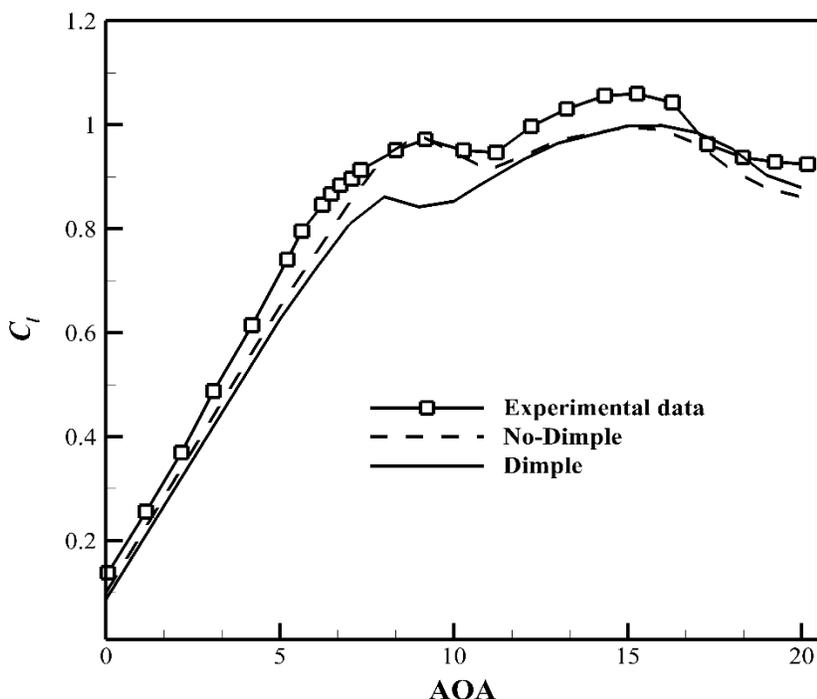
#### ۴-۱۰- تأثیر دیمپل روی ایرفویل

قبل از اینکه تأثیر دیمپل روی عملکرد پره توربین بادی بررسی شود، ابتدا ایرفویل دیمپل زده شده را مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار، ایرفویل S809 را که به عنوان ایرفویل مورد استفاده در توربین های NREL<sup>۷۵</sup> است، انتخاب می شود. پس از پیاده سازی دیمپل روی سطح فوقانی ایرفویل (اندازه دیمپل با توجه به حالت مناسب حل سه بعدی ۲۵ میلی متر انتخاب شده است)، شبیه سازی دو بعدی این ایرفویل در رینولدز ۱۰۰۰۰۰۰ انجام می شود. ابتدا داده های حاصل از حل ایرفویل بدون دیمپل با داده های آزمایشگاهی سومر [۷۵] صحت سنجی می شود، سپس نتایج حاصل از ایرفویل دیمپل زده شده با ایرفویل بدون دیمپل مقایسه می شود. پس از بررسی ضریب

<sup>75</sup> National renewable energy laboratory

برای  $C_l = \frac{F_l}{0.5\rho V^2}$ ، این نتیجه حاصل می‌شود که دیمپل می‌تواند ضریب برآ ایرفویل را در زاویه حمله‌های بالا

افزایش دهد در حالی که در زاویه حمله‌های پایین، خلاف این قضیه اتفاق می‌افتد (شکل ۴-۲۱).



شکل ۴-۲۱: تأثیر دیمپل روی ضریب برآ ایرفویل S809

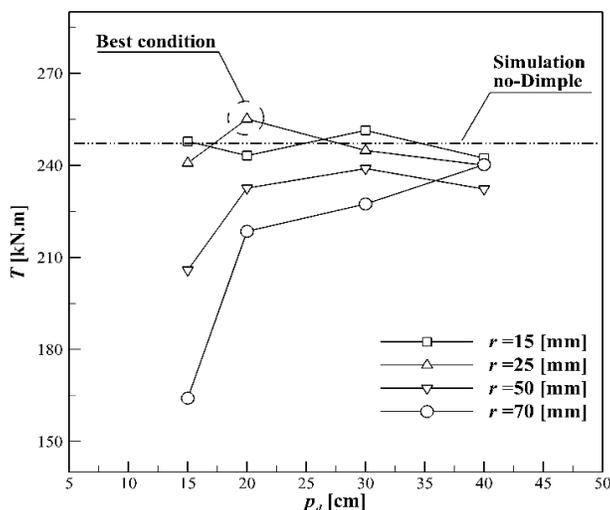
#### ۴-۱۱- تأثیر اندازه و فواصل مختلف دیمپل روی گشتاور پره توربین

همان‌طور که در قسمت معرفی هندسه اشاره شد، دیمپل با فواصل و اندازه‌های گوناگون روی پره توربین طراحی شده‌است. به‌منظور بررسی تأثیر دیمپل بر گشتاور توربین، حالت زاویه پیچ ۵ درجه با سرعت ۱۴ متر بر ثانیه انتخاب شده‌است. نتایج حاصل از حل شبیه‌سازی در شکل ۴-۲۲ ارائه شده و با حالت پره بدون دیمپل مقایسه شده‌است. برای فواصل  $P_d = 150, 200, 300, 400$  mm تعداد دیمپل‌ها به ترتیب ۲۷۹ و ۱۵۰ و ۹۹ و ۷۵

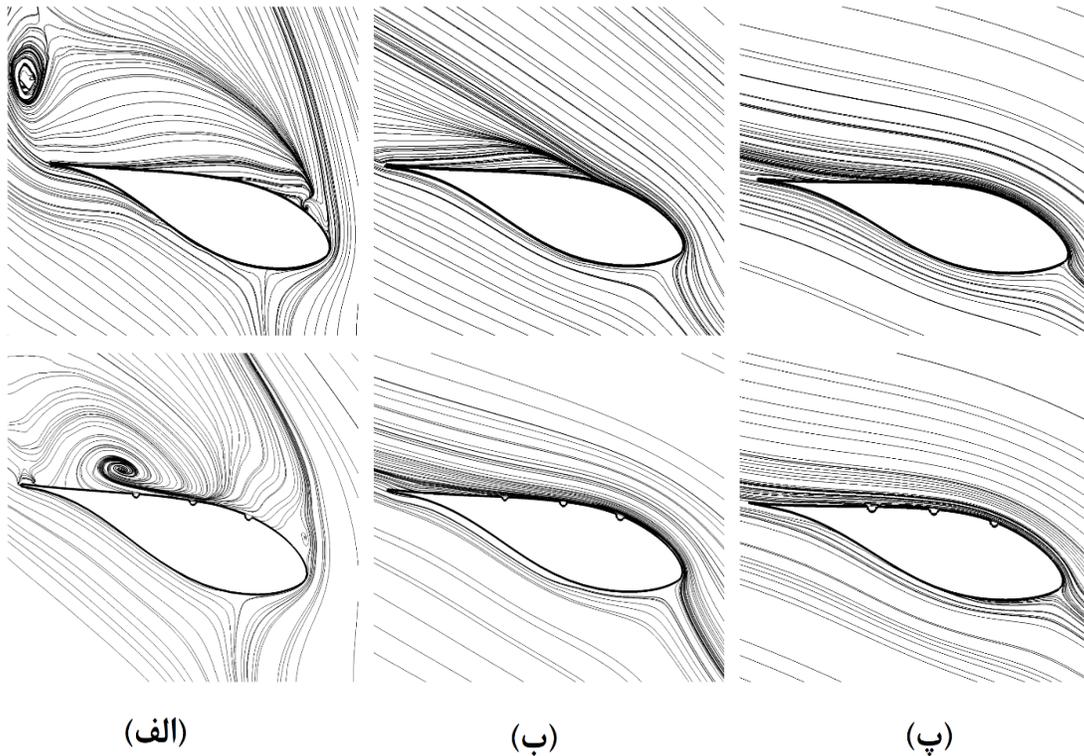
<sup>76</sup> Lift coefficient

هستند به طوری که با افزایش فواصل، تعداد دیمپل ها نیز کاهش یافته است. نتایج نشان می دهد با کاهش شعاع دیمپل گشتاور توربین افزایش می یابد، به بیان دیگر گشتاور توربین با وجود دیمپل هایی با شعاع ۵۰ و ۷۵ میلی متر کاهش یافته است در حالی که دیمپل هایی با اندازه ی ۲۵ و ۱۵ میلی متر می توانند گشتاور پره توربین را بهبود ببخشند. همچنین نمودار نشان می دهد که وقتی تعداد دیمپل ها کاهش می یابد، گشتاور حاصل شده به حالت بدون دیمپل نزدیک می شود.

برای توجیه کردن گشتاور افزایش یافته در حالت ( $r = 25 \text{ mm}$  and  $P_d = 200 \text{ mm}$ )، سه صفحه در فواصل مختلف  $R_b = 6947, 7497, \text{ and } 8947 \text{ mm}$  از مبدأ دوران پره توربین ایجاد شده است. با توجه به چرخش توربین و سرعت باد، زاویه حمله محلی در این سه صفحه به ترتیب  $30.81 \text{ deg}$ ,  $27.02 \text{ deg}$ , and  $23.89 \text{ deg}$  است. همان طور که در شکل ۴-۲۳ آمده است خطوط جریان روی این صفحات تعریف شده است و در دو حالت با دیمپل و بدون دیمپل مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که سطح دیمپل زده شده می تواند جدایش را به تأخیر بیندازد و نقطه جدایش را به سمت لبه فرار جابه جا کند. به بیان دیگر، در سطوح دیمپل زده شده سیال تمایل دارد تا به سطح جامد پره بچسبد و ضخامت لایه مرزی نازک می شود. در نتیجه، این اتفاق می تواند به افزایش نیروی برا و همچنین بهبود گشتاور توربین کمک کند.



شکل ۴-۲۲: تأثیر شعاع و فواصل مختلف دیمپل روی گشتاور پره توربین بادی



شکل ۴-۲۳: خطوط جریان روی صفحات تعریف شده برای سرعت باد ۱۴ متر بر ثانیه و زاویه پیچ ۵ درجه: (الف) زاویه حمله محلی ۳۰/۸۱ درجه،  $R_b = 6947\text{mm}$ ، (ب) زاویه حمله محلی ۲۷/۰۲ درجه،  $R_b = 7497\text{mm}$ ، (پ) زاویه حمله محلی ۲۳/۸۹ درجه،  $R_b = 8947\text{mm}$

#### ۴-۱۲- مقایسه گشتاور تولیدی در زاویه پیچ‌های مختلف

بعد از مقایسه حالت‌های مختلف، سایز و فواصل مناسب دیمپل انتخاب می‌شود. سپس برای حالت مناسب، گشتاورهای تولیدی در زاویه پیچ‌های مختلف برای دو حالت بدون دیمپل و با دیمپل با یکدیگر مقایسه می‌شود. در جدول شماره ۴-۲ گشتاور تولیدی برای شش زاویه پیچ  $P_a = 4, 5, 6, 7, 9$  and  $11$  و سرعت‌های  $V = 12 \sim 16\text{m/s}$  آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای زاویه پیچ ۴ و ۷ درجه، دیمپل تأثیر محسوسی روی

توان و گشتاور تولیدی نگذاشته است. اما در زاویه پیچ ۵ و ۶ و ۹ دیمپل می‌تواند مؤثر واقع شود به طوری که بیشترین افزایش گشتاور برای زاویه پیچ ۹ درجه در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد که در این حالت ۱۶/۰۸ درصد گشتاور حاصل شده افزایش یافته است. اگرچه در زاویه پیچ بالا ۱۱ درجه گشتاور کاهش یافته ولی این کاهش گشتاور در سرعت‌های پایین باد است که به طور معمول از زاویه پیچ‌های بالا برای سرعت‌های پایین باد در توربین بادی محور افقی استفاده نمی‌شود. بنابراین در صورت طراحی درست دیمپل، عملکرد آئرو دینامیکی توربین بادی بهبود می‌یابد.

جدول شماره ۴-۲: تأثیر دیمپل در زاویه پیچ‌های مختلف برای سرعت بادهای گوناگون روی گشتاور تولیدی

| Pitch Angle = 4 [deg] |                            |                                   | Pitch Angle = 5 [deg]      |                            |                                   | Pitch Angle = 6 [deg]      |                            |                                   |                            |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| $V$<br>[m/s]          | Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | No-<br>Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | Torque<br>Increment<br>[%] | Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | No-<br>Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | Torque<br>Increment<br>[%] | Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | No-<br>Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | Torque<br>Increment<br>[%] |
| 12                    | 142.63                     | 140.59                            | 1.45                       | 142.59                     | 133.13                            | 7.11                       | 132.82                     | 128.66                            | 3.2                        |
| 13                    | 182.55                     | 185.01                            | -1.3                       | 188.28                     | 172.81                            | 8.96                       | 177.58                     | 170.04                            | 4.43                       |
| 14                    | 253.35                     | 253.53                            | -0.07                      | 255.13                     | 247.20                            | 3.20                       | 248.04                     | 240.49                            | 3.14                       |
| 15                    | 300.98                     | 297.98                            | 1.007                      | 299.58                     | 287.78                            | 4.09                       | 294.58                     | 286.46                            | 2.83                       |
| 16                    | 340.95                     | 340.99                            | -0.01                      | 341.98                     | 333.00                            | 2.69                       | 333.89                     | 334.73                            | -0.24                      |
| -                     | Average Increment          |                                   | 0.21                       | Average Increment          |                                   | 5.21                       | Average Increment          |                                   | 2.68                       |

| Pitch Angle = 7 [deg] |                            |                                   | Pitch Angle = 9 [deg]      |                            |                                   | Pitch Angle = 11 [deg]     |                            |                                   |                            |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| $V$<br>[m/s]          | Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | No-<br>Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | Torque<br>Increment<br>[%] | Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | No-<br>Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | Torque<br>Increment<br>[%] | Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | No-<br>Dimple<br>Blade<br>[kN. m] | Torque<br>Increment<br>[%] |
| 12                    | 115.20                     | 111.53                            | 3.29                       | 91.64                      | 78.94                             | 16.08                      | 45.18                      | 53.85                             | -16.09                     |
| 13                    | 155.09                     | 158.13                            | -1.92                      | 133.31                     | 118.80                            | 12.2                       | 84.64                      | 93.78                             | -9.74                      |
| 14                    | 220.16                     | 223.31                            | -1.41                      | 197.96                     | 181.32                            | 9.18                       | 149.98                     | 149.88                            | 0.07                       |
| 15                    | 266.24                     | 271.56                            | -1.96                      | 239.66                     | 224.20                            | 6.89                       | 187.87                     | 187.70                            | 0.09                       |
| 16                    | 300.11                     | 312.89                            | -4.08                      | 277.97                     | 272.76                            | 1.9                        | 232.78                     | 233.78                            | -0.4                       |

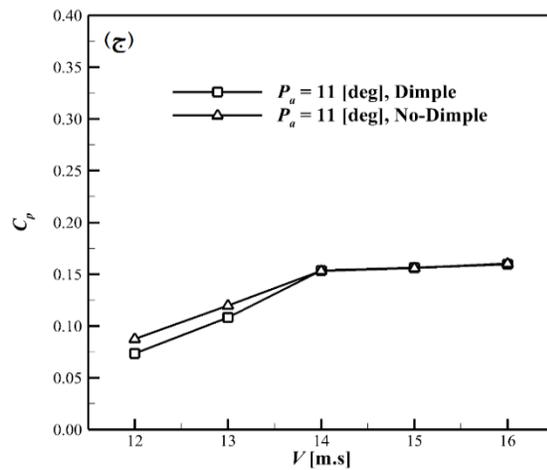
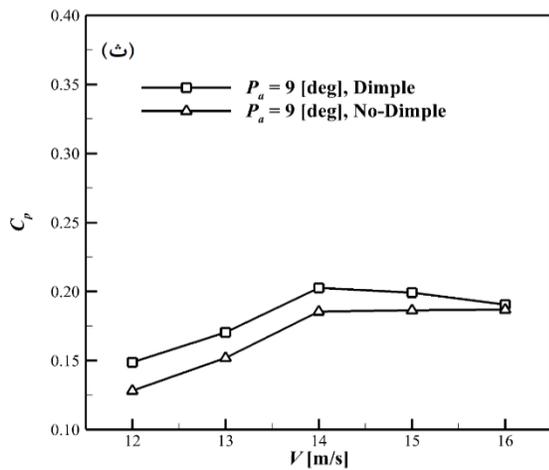
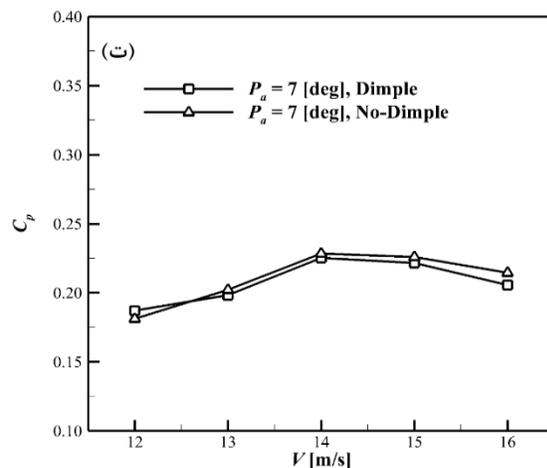
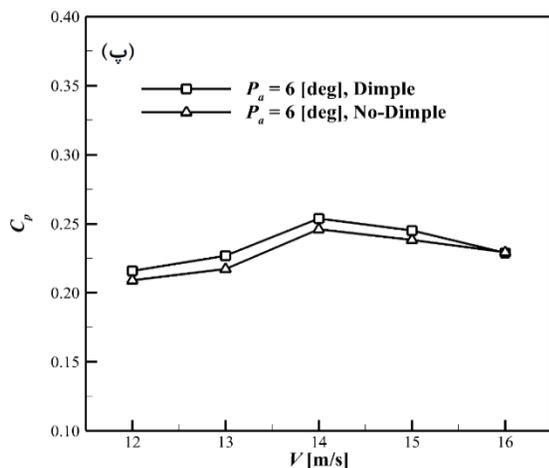
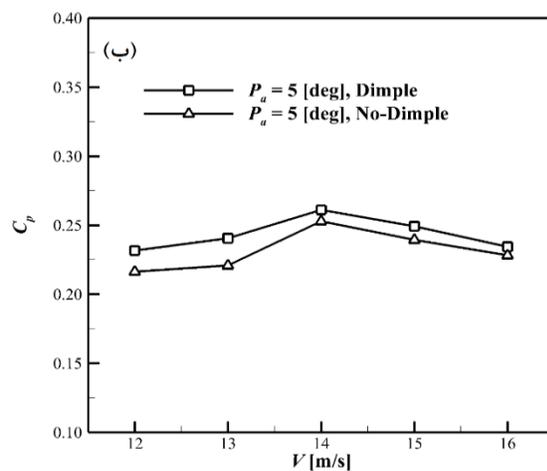
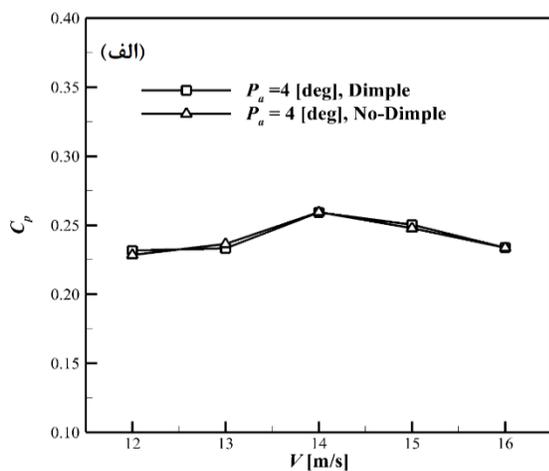
|   |                   |       |                   |      |                   |      |
|---|-------------------|-------|-------------------|------|-------------------|------|
| - | Average Increment | -1.21 | Average Increment | 9.25 | Average Increment | -5.2 |
|---|-------------------|-------|-------------------|------|-------------------|------|

ضریب توان یک کمیت رایج برای تحلیل توربین‌های بادی است. در واقع ضریب توان کمیتی است که نشان می‌دهد توربین بادی تا چه اندازه می‌تواند به‌طور مؤثر انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل کند. بنابراین برای مشاهده بهتر تأثیر دیمپل روی عملکرد توربین بادی، نمودار این کمیت برای زاویه پیچ‌های مختلف در دو حالت بدون دیمپل و با دیمپل در شکل ۴-۲۴ ترسیم شده‌است. این کمیت به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

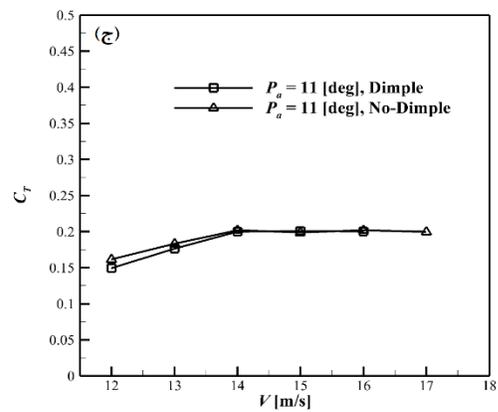
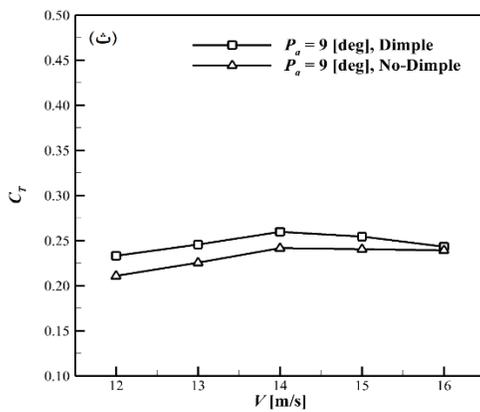
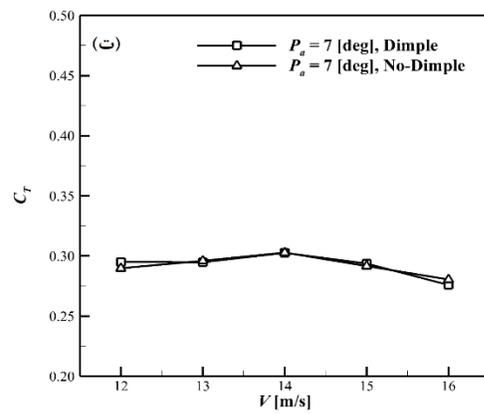
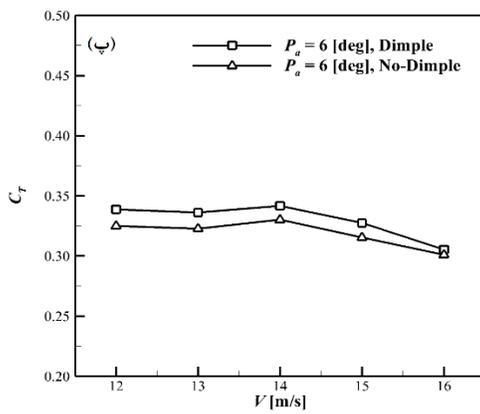
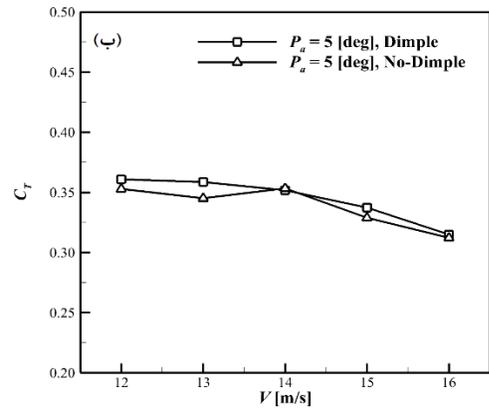
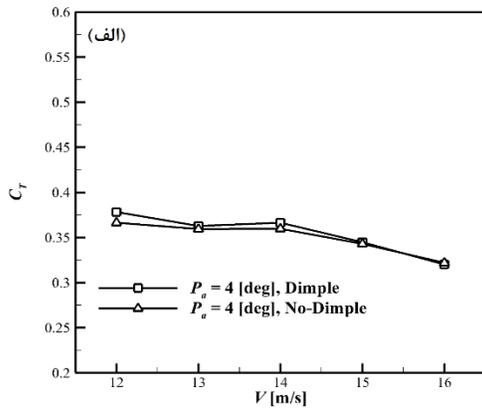
$$C_p = \frac{P}{0.5\rho AV^3} \quad (۲-۴)$$

از آنجایی که دیمپل باعث تغییر شکل در پره توربین شده‌است بنابراین باید اثرات نیروی محوری نیز بررسی شود زیرا افزایش بیش از اندازه این نیرو می‌تواند باعث انحراف و شکست پره توربین بادی بشود. به همین منظور کمیت مهم ضریب نیروی محوری  $C_T$  آورده شده‌است. ضریب نیروی محوری پره توربین بادی در دو حالت بدون دیمپل و با دیمپل برای زاویه پیچ‌های مختلف در سرعت بادهای متفاوت در شکل ۴-۲۵ آورده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب نیروی محوری برای پره دیمپل دار تقریباً در اکثر موارد منطبق بر حالت بدون دیمپل است. در نتیجه دیمپل باعث افزایش شدید نیروی محوری نشده و نمی‌تواند باعث انحراف پره توربین بادی بشود. این کمیت به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$C_T = \frac{F_T}{0.5\rho AV^2} \quad (۳-۴)$$



شکل ۴-۲۴: تأثیر دیمپل روی ضریب توان توربین بادی در زاویه پیچ و سرعت‌های مختلف باد



شکل ۴-۲۵: تأثیر دیمپل روی ضریب نیروی محوری در زاویه پیچ و سرعت‌های مختلف باد

## فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۱-۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، تأثیر پیاده‌سازی دیمپل روی پره توربین بادی ۶۶۰-۷۴۷ بر عملکرد آئرودینامیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور، دیمپل با شکل کروی با اندازه و فواصل گوناگون شبیه‌سازی شد تا حالت مناسب آن به دست بیاید. با مقایسه کردن گشتاور به دست آمده از حل شبیه‌سازی، استفاده از ۱۵۰ دیمپل با شعاع‌های ۲۵ میلی‌متر و فواصل ۲۰ سانتی‌متر در سه ردیف، بهترین نتیجه را داده است. تأثیر زاویه پیچ‌های مختلف در سرعت‌های مختلف باد برای این حالت مناسب دیمپل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد در صورت طراحی درست دیمپل (شعاع، فاصله و تعداد)، این روش غیرفعال می‌تواند در افزایش گشتاور توربین بادی مؤثر باشد. همچنین با توجه به نتایج، دیمپل در بهترین حالت توانسته است گشتاور تولیدی از توربین بادی را تا ۱۶/۰۸ درصد بهبود ببخشد.

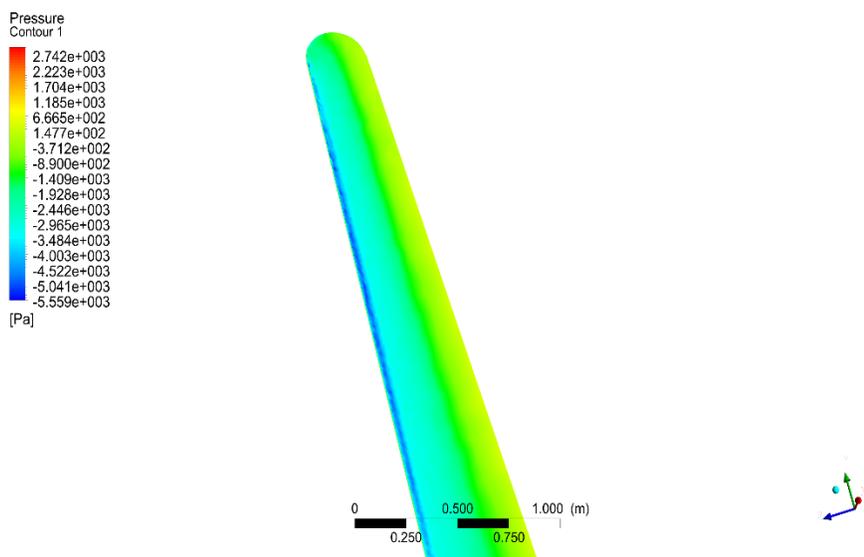
## ۲-۵- پیشنهادها

به منظور ارتقای سطح کیفی تحقیق حاضر و انجام مطالعه‌ی جامع‌تر در راستای موضوع این پایان‌نامه، پیشنهادها و توصیه‌هایی به شرح زیر مطرح می‌گردد:

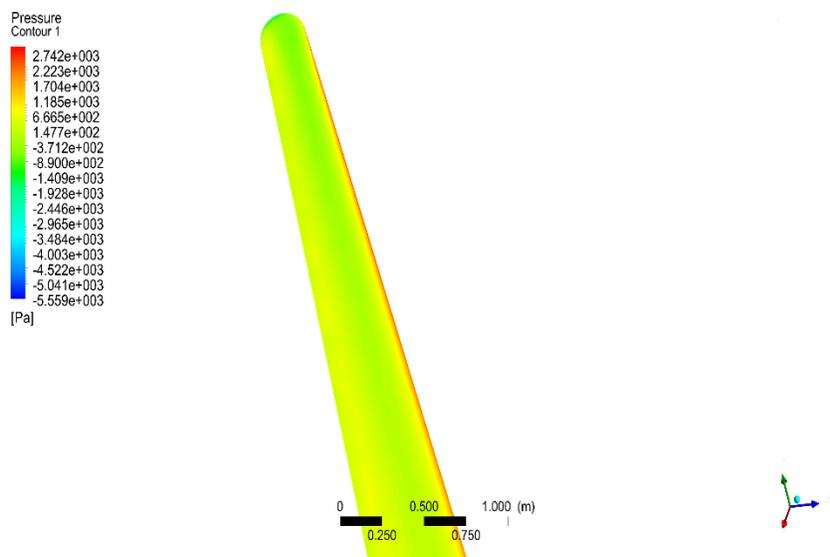
- بررسی شکل‌های دیگر دیمپل مانند دیمپل مربعی و مثلثی و غیره
- بررسی دیمپل روی سطح فشاری و هر دو سطح پره توربین بادی
- بررسی اثر دیمپل به صورت برآمدگی روی سطح پره توربین
- بررسی مدل‌های دیگر توربولانسی برای شبیه‌سازی توربین بادی ارائه شده
- بررسی اثرات برج و زاویه انحراف بر گشتاور توربین

## پیوست: کانتورهای استخراجی از حل جریان شبیه‌سازی شده

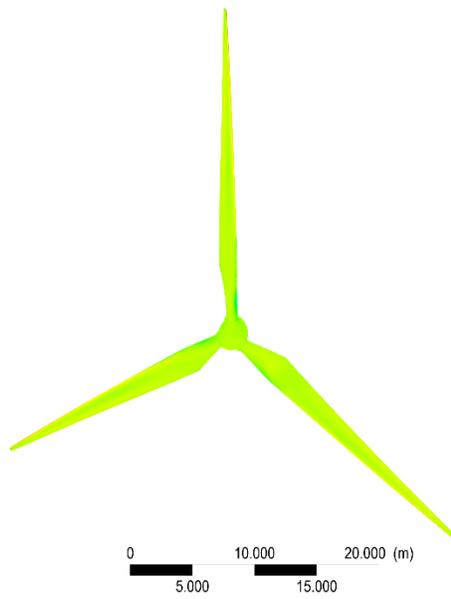
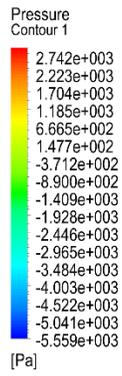
- کانتورهای فشار روی پره توربین باد در سرعت ۱۴ متر بر ثانیه و زاویه پیک ۵ درجه



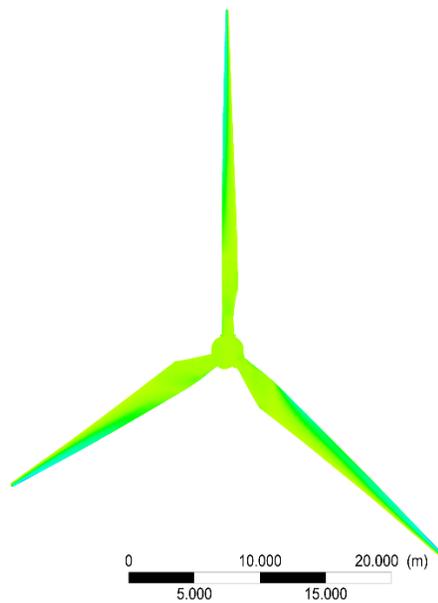
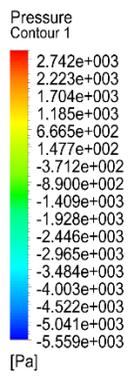
الف) سطح مکشی نمای نزدیک



ب) سطح فشاری نمای نزدیک

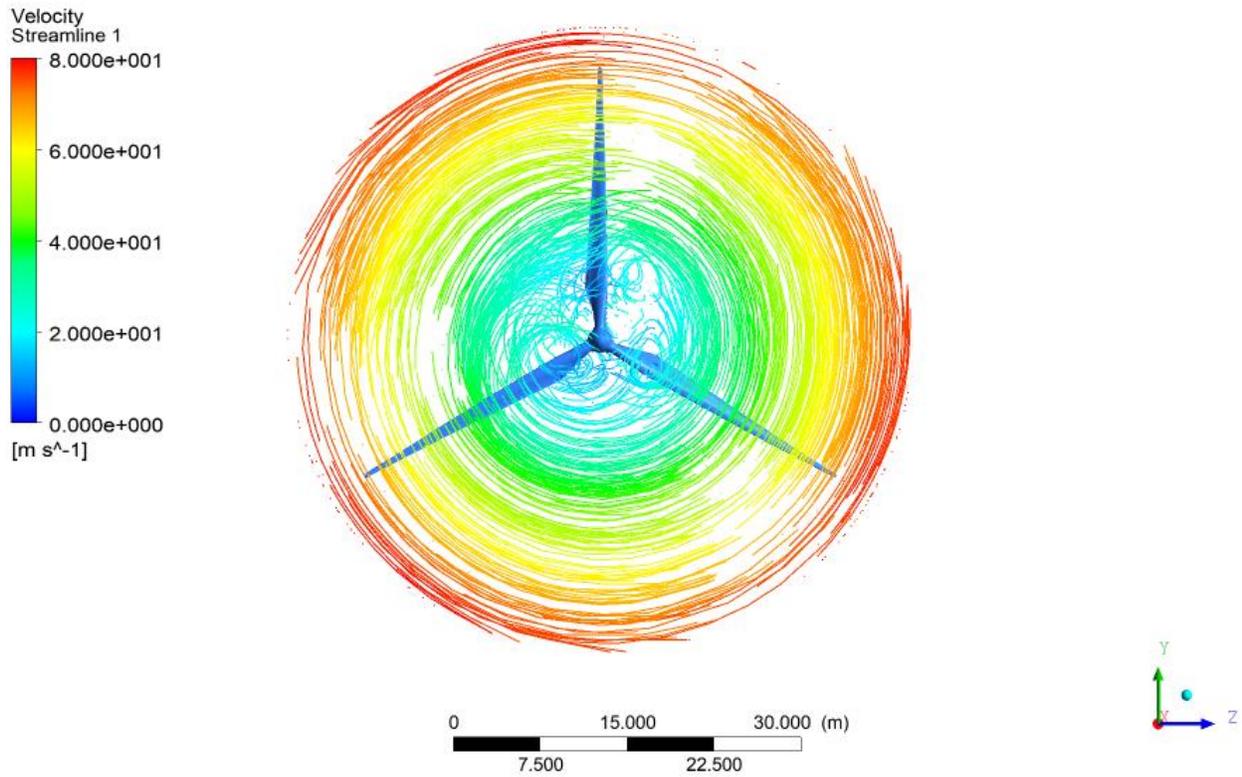


پ) سطح مکشی نمای دور

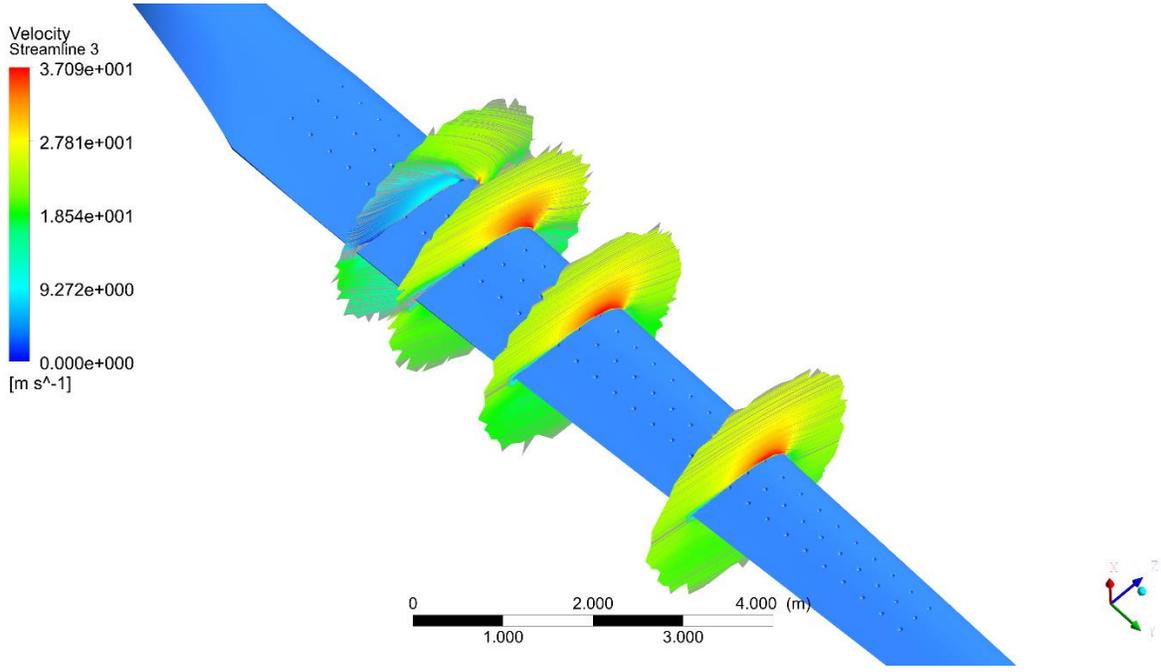


ت) سطح فشاری نمای دور

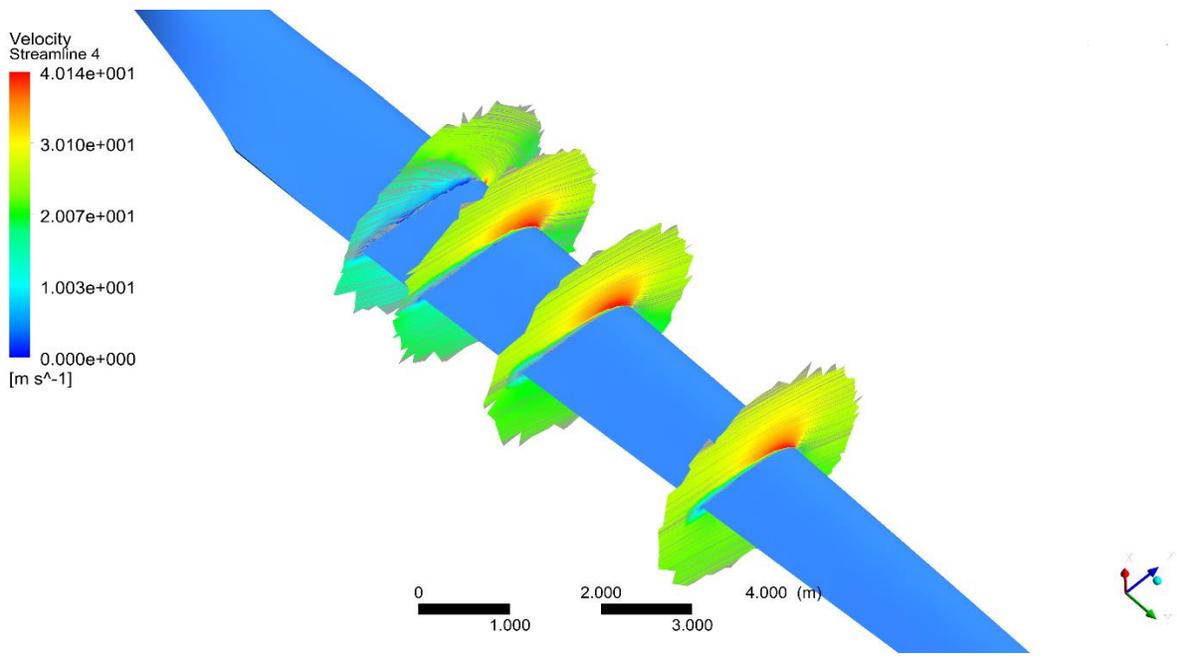
- خطوط جریان روی پره توربین باد در سرعت ۱۴ متر بر ثانیه و زاویه پیچ ۵ درجه



الف) خطوط جریان نمای کلی



ب) خطوط جریان روی مقاطع مختلف پره با دیمپل



پ) خطوط جریان روی مقاطع مختلف پره بدون دیمپل

## مراجع

[1] Hills, R., *Power from wind : a history of windmill technology*, Cambridge University Press, 1994.

گراهام. ا، (۱۳۹۳)، "انرژی باد"، نشر دلهام، مجید عمیق، ص ۱۵. [2]

[3] <http://www.telosnet.com/wind/early.html>.

[4] <http://www.oxforddnb.com/view/10.1093/ref:odnb/9780198614128.001.0001/odnb-9780198614128-e-100957>.

[5] <http://www.four-winds-energy.com/wind.html>.

[6] براون. ل، (۱۳۸۷)، "طرح امید: آینده و محیط زیست"، چاپ اول، نشر جهاد دانشگاهی مشهد، حمید طراوتی، ص ۱۱.

[7] [www.satba.gov.ir](http://www.satba.gov.ir)

[8] <https://www.shana.ir/>

[9] <https://tasisatnews.com/>

[10] <https://barghnews.com/>

[11] [http://www.stats.gov.cn/english/PressRelease/201702/t20170228\\_1467503.html](http://www.stats.gov.cn/english/PressRelease/201702/t20170228_1467503.html)

[12] <http://marketmonitor.com.ph/china-leads-in-growth-of-renewable-energy/china-renewable-energy>.

[13] Robert, W., *Wind energy in America*, University of Oklahoma Press, 2008

عزیزی. س، (۱۳۸۰)، "توربین‌های بادی"، نشر آکادمیک، ص ۱-۱۵۲ [14]

امیدفر. ا، (۱۳۹۴)، "نیروگاه بادی"، نشر پندار پارس، ص ۱-۷۴۰ [15]

[16] <http://mapta.co/>

[17] Trevor, M., *Wind Energy Engineering*, Academic Press, 2017

[18] <https://araniroo.ir/>

[19] Gipe, P., *Wind Energy for the Rest of Us: A Comprehensive Guide to Wind Power and How to Use It*, wind-works.org; Com edition, 2016

- [20] <https://www.technologyreview.com/s/528581/two-bladed-wind-turbines-make-a-comeback>.
- [21] <https://www.flickr.com/photos/escheide/3636063453>.
- [22] [https://www.researchgate.net/publication/266799978\\_Darrieus\\_vertical\\_axis\\_wind\\_turbine.\\_for\\_.power\\_generation\\_I\\_Assessment\\_of\\_Darrieus\\_VAWT\\_configurations](https://www.researchgate.net/publication/266799978_Darrieus_vertical_axis_wind_turbine._for_.power_generation_I_Assessment_of_Darrieus_VAWT_configurations).
- [23] [http://www.eere.energy.gov/windandhydro/images/illust\\_large\\_turbine.gif](http://www.eere.energy.gov/windandhydro/images/illust_large_turbine.gif).
- [24] Zhu, B., Sun, X., Wang, Y. and Huang, D., Performance characteristics of a horizontal axis turbine with fusion winglet, *Energy*, **120**, 2017, 431–440.
- [25] Seo, S.H. and Hong, C.H., Performance improvement of airfoils for wind blade with the groove, *International Journal of Green Energy*, **13**(1), 2016, 34–39.
- [26] Beyhaghi, S. and Amano, R.S., A parametric study on leading-edge slots used on wind turbine airfoils at various angles of attack, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **175**, 2018, 43–52.
- [27] Chamorro, L.P., Arndt, R.E.A. and Sotiropoulos, F., Drag reduction of large wind turbine blades through riblets: Evaluation of riblet geometry and application strategies, *Renewable Energy*, **50**, 2013, 1095–1105.
- [28] Bolzon, M., Richard, M. Kelso. And Arjomandi, M., Tubercles and Their Applications, *Journal of Aerospace Engineering*, **29**(1), 2016, 1–10.
- [29] Sompong, N and Pongtorn, P., Effects of bend-twist coupling deformation on the aerodynamic performance of a wind turbine blade, *International journal of geomate*, **34**(34), 2017, 15-20
- [30] Nobari, M.R.H., Mirzaee, E., Nosratollahi, M., Improvement of wind turbine performance using a novel tip plate structure, *Energy conversion and management*, **123**, 2016, 592-609
- [31] Wang, Y., Li, G., Shen, S., Huang, D. and Zheng, Z., Investigation on aerodynamic performance of horizontal axis wind turbine by setting micro-cylinder in front of the blade leading edge, *Energy*, **143**, 2018, 1107–1124.
- [32] Belamadi, R., Djemili, A., linca, A., Ramzi, M., Aerodynamic performance analysis of slotted airfoils for application to wind turbine blades, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, **151**, 2016, 79-99
- [33] Gao, L., Zhang, H., Liu, Y. and Han, S., Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines, *Renewable Energy*, **76**, 2015, 303–311.

- [34] Wang, H., Zhang, B., Qiu, Qinggang., Xu, Xiang., Flow control on the NREL S809 wind turbine airfoil using vortex generators, *Energy*, **118**, 2017, 1210-1221.
- [35] Zhang, L., Li, X., Yang, K. and Xue, D., Effects of vortex generators on aerodynamic performance of thick wind turbine airfoils, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **156**, 2016, 84–92.
- [36] Moshfeghi, M., Shams, S. and Hur, N., Aerodynamic performance enhancement analysis of horizontal axis wind turbines using a passive flow control method via split blade, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **167**, 2017, 148–159.
- [37] Sedda, S., Sardu, C., Lasagna, D., Iuso, G., Donelli, R.S. and Gregorio, F. De., Trapped vortex cell for aeronautical applications : flow analysis through PIV and Wavelet transform tools, *10<sup>th</sup> Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, Naples, Italy, 15-18 June, 2015.
- [38] Li, D., Li, R., Yang, C. and Wang, X., Effects of surface roughness on aerodynamic performance of a wind turbine airfoil, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 28-31 March, 2010.
- [39] Triet, N.M., Viet, N.N. and Thang, P.M., Aerodynamic Analysis of Aircraft Wing, *VNU Journal of Science: Mathematics – Physics*, **31** (2), 2015, 68–75.
- [40] Asai, T., Ito, S., Seo, K. and Hitotsubashi, A., Fundamental aerodynamics of a new volleyball, *Sports Technology*, **3**(4), 2010, 235–239.
- [41] Raja Joesph, D., Booma Devi, P. and Gopalsamy, M., Investigation on Effect of Square Dimples on NACA0012 Airfoil with Various Reynolds Number, *International Journal of Ambient Energy*, **0750** (D), 2018, 1–11.
- [42] Tay, C.M.J. and Lim, T.T., Drag Reduction with Teardrop-shaped Dimples, *Flow Control Conference*, Atlanta, Georgia, June 25-29, 2018.
- [43] Lu, H., Yang, Y., Guo, S., Huang, Y., Wang, H. and Zhong, J., Flow control in linear compressor cascades by inclusion of suction side dimples at varying locations, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, **232**(6), 706–721.
- [44] Zhang, G.Q., Schlüter, J. and Hu, X., Parametric investigation of drag reduction for marine vessels using air-filled dimpled surfaces, *Ships and Offshore Structures*, **13**(3), 2018, 244–255.

- [45] Wang, Y., Wu, C., Tan, G. and Deng, Y., Reduction in the aerodynamic drag around a generic vehicle by using a non-smooth surface, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, **231**(1), 2017, 130–144.
- [46] Ismail, M.F. and Vijayaraghavan, K., The effects of aerofoil profile modification on a vertical axis wind turbine performance, *Energy*, **80**, 2015, 20–31.
- [47] Chear, C.K. and Dol, S.S., Vehicle aerodynamics : Drag reduction by surface dimples, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, **9**(1), 2015, 202–205.
- [48] Arunraj, R., Logesh, K., Balaji, V., Ravichandran, T., Yuvasree, G.K., Experimental investigation of lift enhancement by suction-assisted delayed separation of the boundary layer on NACA 0012 airfoil, *Int. J. Ambient Energy*, **40**, 2019, 243–247.
- [49] Venkatesan, S.P., Kumar, V.P., Kumar, M.S., Kumar, S., Computational analysis of aerodynamic characteristics of dimple airfoil NACA 2412 at various angles of attack, *Int. J. Mech. Eng. Technol*, **9**, 2018, 41–49.
- [50] Jahanmiri, M., Active Flow Control : A Review Research Report, 2010, 1–33.
- [51] Montazer, E., Mirzaei, M., Salami, E., Ward, T.A., Romli, F.I., Kazi, S.N., Optimization of a synthetic jet actuator for flow control around an airfoil, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **152**, 2016, 1-11.
- [52] [https://www.researchgate.net/publication/282952295\\_Chipscale\\_electrodynamic\\_synthetic\\_jet\\_actuators](https://www.researchgate.net/publication/282952295_Chipscale_electrodynamic_synthetic_jet_actuators)
- [53] Silva, D.O., Jacobs, G.B., Experimental Study on a Dual Cavity Synthetic Jet Airfoil, *AIAA Scitech Forum American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Reston, Virginia, 2019, 1–17.
- [54] Ali, B., Ouahiba, G., Hamid, O., Ahmed, B., Aerodynamic optimization of active flow control over S809 airfoil using synthetic jet, *International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA)*, 2018, 1–6.
- [55] Moshfeghi, M., Hur, N., Numerical study on the effects of a synthetic jet actuator on S809 airfoil aerodynamics at different flow regimes and jet flow angles, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **31**, 2017, 1233–1240.
- [56] Chapin, V.G., Benard, E., Active control of a stalled airfoil through steady or unsteady

- actuation jets, *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, **137**, 2015, 1–10.
- [57] Gupta, A. Das, Roy, S., Three-dimensional plasma actuation for faster transition to turbulence, *Journal of Physics D: Applied Physics. IOP Publishing*, **50**, 2017
- [58] [http://www.like2do.com/learn?s=Plasma\\_actuator](http://www.like2do.com/learn?s=Plasma_actuator)
- [59] [https://readtiger.com/wkp/en/Plasma\\_actuator](https://readtiger.com/wkp/en/Plasma_actuator)
- [60] Karakoc, T.H., Ozerdem, M.B., Sogut, M.Z., Colpan, C.O., Altuntas, O., Açikkalp, E., *Sustainable Aviation, Springer International Publishing*, 2016.
- [61] Fukumoto, H., Aono, H., Tanaka, M., Matsuda, H., Osako, T., Nonomura, T., Oyama, A., Fuji, K., Control of Dynamically Stalled Flowfield around a Pitching Airfoil by DBD Plasma Actuator, *The Proceedings of Mechanical Engineering Congress, Japan*, 2016, 1-13.
- [62] Ogawa, T., Asada, K., Sekimoto, S., Tatsukawa, T., Fujii, K., Feed-back Control of Stall Separation with DBD Plasma Actuator by Detecting Vortex Passing over an Airfoil, *AIAA Aerospace Science Meeting., American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Reston, Virginia, 2018, 1-13.
- [63] Yang, L., Li, J., Cai, J., Wang, G., Zhang, Z., Lift Augmentation Based on Flap Deflection With Dielectric Barrier Discharge Plasma Flow Control Over Multi-Element Airfoils, *Journal of Fluids Engineering*, **138**, 2016, 1–10.
- [64] م. ص. نژاد، مبانی جریان های آشفته و مدل سازی آنها، ۱۳۸۸.
- [65] <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node406.htm>
- [66] <https://www.yumpu.com/en/document/view/15404536/modelling-turbulent-flows-with-fluent-department-of-aerospace-/6>.
- [67] <https://earthscience.stackexchange.com/questions/2932/what-are-the-differences-between-an-les-sgs-model-and-a-rans-based-turbulence-mo>.
- [68] Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows", *AIAA Paper*, 1992, 1-23.
- [69] Spalart, P. R., Trends in Turbulence Treatments, *AIAA 2000-2306*, June 2000, 1-13.
- [70] Spalart, P. R. and Rumsey, C. L., "Effective Inflow Conditions for Turbulence Models in Aerodynamic Calculations," *AIAA Journal*, **45**, 2007, 2544-2553.

[71] Menter, F.R., Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*, **32**, 1994, 1598-1605.

[72] اسمعیلی. ح، (۱۳۹۶)، پایان نامه ارشد: " شبیه سازی و تحلیل عملکرد آئرو دینامیکی جریان حول پره های توربین بادی همراه با تزریق سطحی ایرفویل"، دانشکده مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[73] Menter, F.R., Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows, *AIAA journal* , **32**, 1994, 1598-1605.

[74] C. Masson, I. Ammara, and I. Paraschivoiu, "An aerodynamic method for the analysis of isolated horizontal-axis wind turbines, *International Journal of Rotating Machinery*, **3**, 1997, 21-32.

[75] Somers, D.M., Design and Experimental Results for the S809 Airfoil, *National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States)*, 1997.





## **Abstract**

One of the most important renewable energy resources in the world is wind energy. In recent years, many studies focus on the power production from the wind, especially using wind turbines. Therefore, numerous activities (which are categorized into two general techniques i.e. passive and active flow control methods) have been organized to improve the performance of the wind turbines. Many of these activities are based on the strategy of increasing the lift to drag ratio and delaying the stall phenomenon in rotor blades without consuming external energy (which is called a passive flow control method). In this thesis, the effect of the dimpled surface blade on the performance of the V47-660 kW horizontal axis wind turbine is numerically investigated. For this purpose, the suction side of the wind turbine blades is passively modified using some spherical dimples. The governing continuity and momentum equations are solved using an incompressible Reynolds-averaged Navier-Stokes solver and the  $k - \omega$  Shear-Stress Transport turbulent model. The effect of dimple radius, location, and quantity on the aerodynamic performance of the wind turbine including torque and power generation, flow separation, and thrust load is studied to find an appropriate case. Then the effect of blade pitch angle and wind speed is also examined on the best-dimpled blades. The results show that dimples could be effective in increasing the torque and power generation if they are designed appropriately (including radius, location and quantity). Obtained results reveal that for the best situation, dimples could improve the generating torque by around 16.08%.

**Keywords:** wind turbine, dimple, passive flow control method, pitch angle, wind speed, aerodynamic performance



**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**

**M.sc. Thesis in aerodynamic engineering**

**Numerical simulation of dimple effect on the aerodynamic performance of a wind turbine**

**By**

**Hamed sedighi hasankiadeh**

**Supervisor**

**Dr. Pooria Akbarzadeh**

**Advisor**

**Ali salavatipour**

January 2020