

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده‌ی مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

بررسی عوامل محیطی بر عملکرد پره توربین بادی با رویکرد انرژی  
علی خنجری

استاد راهنما:

دکتر علی سررشته‌داری

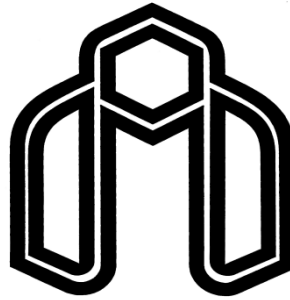
استاد مشاور:

دکتر اسماعیل محمودی

بهمن ۱۳۹۴



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک

گروه سیستم‌های انرژی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بررسی عوامل محیطی بر عملکرد پره توربین بادی با

رویکرد انرژی

علی خنجری

استاد راهنما:

دکتر علی سررشته‌داری

استاد مشاور:

دکتر اسماعیل محمودی

بهمن ۱۳۹۴

## دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

شماره :

تاریخ :

### بسمه تعالی

#### فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر ( عج ) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای علی خنجری رشته مهندسی مکانیک گرایش سیستم‌های انرژی تحت عنوان بررسی عوامل محیطی بر عملکرد پره توربین بادی با رویکرد انرژی که در تاریخ ..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به

شرح زیر است:

قبول ( با درجه : ..... امتیاز ..... )  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی ( ۲۰ - ۱۹ )

۲- بسیار خوب ( ۱۸/۹۹ - ۱۸ )

۳- خوب ( ۱۷/۹۹ - ۱۶ )

۴- قابل قبول ( ۱۵/۹۹ - ۱۴ )

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	اعضای هیأت داوران
	دکتری phd	علی سررشته‌داری	۱- استادراهنما
	دکتری phd	اسمعیل محمودی	۲- استاد مشاور
	مهندس	احمد مددی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	دکتری phd	دکتر علی عباس نژاد	۴- استاد ممتحن
	دکتری phd	دکتر پوریا اکبرزاده	۵- استاد ممتحن

## تقدیم

---

تقدیم به پدر و مادر عزیز و بزرگوارم که علیرغم تحمل سختی‌ها و دشواری‌های فراوان، مسیر پر پیچ و خم کسب علم و دانش و معرفت را برایم هموار نمودند و از دعای خیرشان بی نصیب نبوده‌ام.

تقدیم به استاد بزرگوارم دکتر علی سررشته داری که همواره مرا در این مسیر، راهنما و چراغ راه بودند. همچنین تقدیم به استاد گرانقدرم دکتر اسمعیل محمودی، که هر چه در این راه آموختم حاصل زحمات بی دریغ ایشان بوده است.

## تشکر و قدردانی

---

تشکر و سپاس بی‌پایان مخصوص خدایی است که بشر را آفریده و به او قدرت اندیشیدن داده و توانایی‌های بالقوه را در وجود انسان قرار داده و او را امر کرده به تلاش و کوشش نموده و راهنمایی برای هدایت بشر فرستاده است.

پس از ارادت خاضعانه به درگاه خداوند بی‌همتا لازم است از استادان ارجمند جناب آقای دکتر علی سررشته‌داری و جناب آقای دکتر اسمعیل محمودی به خاطر سعه صدر و رهنمودهای دلسوزانه که در تهیه‌ی این تحقیق مرا مورد لطف خود قرار دادند و راهنمایی‌های لازم را نمودند تشکر و قدردانی نموده و موفقیت همگان را از درگاه احدیت خواهانم.

# تعهدنامه

اینجانب علی خنجری دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک-گرایش سیستم‌های انرژی دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی بررسی عوامل محیطی بر عملکرد پره توربین بادی با رویکرد انرژی، تحت راهنمایی دکتر علی سررشته‌داری متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «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 کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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



## چکیده

پیشرفت فناوری، افزایش خدمات و در نتیجه بالا بردن سطح آسایش افراد باعث شده است تا نیاز روزافزون جوامع بشری به انرژی افزایش یابد. از طرفی دیگر از جمله چالش‌هایی که در قرن معاصر ملت‌ها با آن روبرو هستند، کاهش منابع سوخت فسیلی که بخش عظیمی از منابع تولید انرژی به حساب می‌آیند و همچنین تأثیرات مصرف این‌گونه منابع انرژی باعث بروز مسائل مربوط به آلودگی محیط‌زیست مانند پدیده گرم شدن جهانی دمای زمین، کاهش ضخامت لایه اوزون و از بین بردن منابع طبیعی مانند جنگل‌ها، مراتع و دریاها شده است. در این راستا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی باد در حال رونق فراوانی است. که با بررسی شرایط آب و هوایی هر منطقه می‌توان قابلیت استحصال انرژی باد از آن محیط را استخراج کرد. هدف از این تحقیق مطالعه و بررسی عوامل محیطی یک منطقه بادخیز بر عملکرد پره توربین بادی با رویکرد انرژی بر اساس شبیه‌سازی عددی می‌باشد. در این تحقیق، برای نخستین بار تأثیر عوامل محیطی نظیر دما، فشار، رطوبت نسبی و سرعت جریان باد، بر روی بازده انرژی و اکزرژی در توربین بادی آزمون مکزیکو برای سه ماه متوالی در منطقه منجیل شبیه‌سازی شد. همچنین عواملی دیگر نظیر تأثیر افزایش گرد و غبار و اثر افزایش زاویه یاو بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی که تا کنون کمتر مورد مطالعه قرار گرفته، بررسی و مطالعه شده است.

شبیه‌سازی با روش عددی بی-ای-ام<sup>۱</sup> که از نظریه تکانه اجزاء پره استخراج شده استفاده شد. داده شد که روش بی-ای-ام یک ابزار قوی در زمینه شبیه‌سازی رفتار توربین بادی از دیدگاه تحلیل اکزرژی در شرایط مختلف می‌باشد و می‌تواند به خوبی رفتار مربوط به انرژی توربین را پیش‌بینی کند. نتایج به دست آمده در منطقه منجیل نشان می‌دهد، توربین بادی به تغییرات سرعت باد حساسیت زیادی از خود نشان داد به گونه‌ای که در کمترین مقدار بازده انرژی و اکزرژی خود در سرعت باد ۸m/s، بازده اکزرژی ۱۱/۴۵٪ و بازده انرژی ۱۶/۰۷٪ را داشت و در سرعت ۱۴ m/s

---

<sup>1</sup> Blade element momentom theory

بهترین عملکرد را از خود نشان داد. در این سرعت بازده اکزرژی ۳۹/۸۶٪ و بازده انرژی برابر ۴۴/۰۵٪ بود.

همچنین گرد و غبار محیط با ایجاد سطح زبر بر روی سطح پره و با افزایش میزان اندازه زبری توانست بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی را کاهش دهد به گونه‌ای که در سرعت ۱۴m/s در اندازه زبری ۰/۵mm بازده اکزرژی نسبت به زمانی که پرها تمیز باشد ۱۴/۷۳٪ کاهش یافت.

تغییرات دما، فشار و رطوبت نسبی جریان باد هر کدام توانستند به نحوی بازده اکزرژی توربین بادی را تحت تاثیر قرار دهند به گونه‌ای که در سرعت مشخصه ۱۵m/s با تغییر دما در بازه ۲۸۱ K تا ۲۸۶ K بازده اکزرژی ۳/۳۱٪ افزایش یافت. همچنین در این سرعت با افزایش فشار از بازه ۱۰۰kPa تا ۱۰۵ kPa بازده اکزرژی ۳/۲۳٪ کاهش یافت. تغییرات رطوبت نسبی در بازه ۶۵٪ تا ۷۳٪ توانست ۰/۴٪ بازده اکزرژی را کاهش دهد. رطوبت نسبی، فشار و دمای جریان باد نتوانستند اثر قابل توجهی بر بازده انرژی داشته باشند.

رفتار توربین بادی تحت تاثیر زاویه یاو متفاوت بود به گونه‌ای که در زاویه‌های ۵ و ۱۰ درجه اثر چندانی بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی نداشت اما در زاویه ۱۵ و ۳۰ درجه تا قبل از سرعت ۱۶m/s بازده انرژی و اکزرژی از حالت بدون زاویه یاو کمتر بود و بعد از این سرعت علی‌رغم اینکه نشان داده شد افزایش زاویه یاو، توان تولیدی توربین بادی را کاهش می‌دهد، به تدریج توربین بادی بازده انرژی و اکزرژی بهتری از حالت بدون یاو را از خود نشان داد. این روند بهبود در زاویه یاو ۳۰ درجه بیشتر بود. تحلیل اکزرژی نشان داد که با مطالعه تمامی متغیرهای جریان باد می‌توان به درک درستی از رفتار توربین بادی رسید.

**واژگان کلیدی:** شبیه‌سازی توربین بادی، نظریه تکانه اجزاء پره، زاویه یاو، بازده انرژی و

اکزرژی، تحلیل اکزرژی.



## مقالات

---

- ۱- بررسی اثر اندازه زبری بر روی عملکرد توربین بادی آزمون مکزیکو در تونل باد، اولین کنگره بین-المللی زمین، فضا و انرژی پاک. دانشگاه محقق اردبیلی ۱۳۹۴/۰۸/۱۴
- ۲- بررسی بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی آزمون مکزیکو در تونل باد، اولین کنگره بین-المللی زمین، فضا و انرژی پاک. دانشگاه محقق اردبیلی ۱۳۹۴/۰۸/۱۴
- ۳- بررسی متغیری‌های جریان باد بر عملکرد بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی آزمون مکزیکو. بیست و چهارمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک. دانشگاه یزد. ۳۱ شهریور ۱۳۹۵
- 4- Modeling of Energy and Exergy Efficiencies of a Wind Turbine Based on the Blade Element Momentum Theory under Different Roughness Intensity, [journal of Energy Resources Technology](#). 03 Sep 2015.(under review)

## مطالب

فصل اول	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۱-۱ بازار انرژیهای تجدیدپذیر	۳
۲-۱-۱ چشم‌انداز انرژی بادی در ایران	۶
۳-۱-۱ ضرورت توجه و به‌کارگیری انرژی بادی در کشور	۷
۱-۲ انواع توربین‌های بادی	۸
فصل ۲	۱۱
۱-۲ تاریخچه تحقیق	۱۲
فصل ۳	۱۵
۱-۳ آزمون تجربی	۱۶
۱-۱-۳ روتور و پره توربین	۱۸
۲-۱-۳ ابزارهای اندازه‌گیری پره و روتور	۲۱
۳-۲ نظریه تکانه اجزاء پره	۲۳
۱-۲-۳ نظریه تکانه	۲۴
۲-۲-۳ نظریه اجزاء پره	۲۷
۳-۲-۳ تصحیح اتلاف پرنتل	۳۲

۳۳	..... نظریه تصحیح گلارت
۳۴	..... نظریه اصلاح ضریب‌های هوابر
۳۵	..... موقعیت یاو
۳۶	..... ضریب تصحیح گردابه مورب
۳۶	..... پیاده‌سازی نظریه
۳۹	..... تحلیل انرژی و اکزرژی توربین بادی
۴۱	..... اکزرژی ۱-۳-۳
۴۲	..... اکزرژی در توربین‌های بادی
۴۴	..... شبیه‌سازی هوابرهای پره توربین
۴۸	..... الگوریتم پیاده‌سازی محاسبات
۵۱	..... فصل ۴
۵۲	..... ۱-۴ نتایج
۵۲	..... ۱-۱-۴ شبیه‌سازی هوابرها
۶۷	..... ۲-۱-۴ نتایج نظریه تکانه اجزاء پره
۸۷	..... ۳-۱-۴ تحلیل اکزرژی
۱۰۵	..... فصل ۵
۱۰۶	..... ۱-۵ نتیجه‌گیری
۱۰۶	..... ۱-۱-۵ تأثیر سرعت باد
۱۰۷	..... ۲-۱-۵ تأثیر گردوغبار

- 
- ۳-۱-۵ تأثیر تغییرات زاویه یاو ..... ۱۰۸
- ۴-۱-۵ تأثیر تغییرات دما، فشار و رطوبت مخصوص ..... ۱۱۰
- ۲-۵ پیشنهادها ..... ۱۱۱
- پیوست‌ها ..... ۱۱۲
- پیوست الف ..... ۱۱۲
- مراجع ..... ۱۱۷

## شکل‌ها

- 
- شکل ۱-۱ توربین بادی محور افقی ..... ۹
- شکل ۱-۲ توربین‌های عمودی محور الف) توربین بادی داریوس ب) توربین بادی ساونیوس ..... ۱۰
- شکل ۳-۳ تونل باد DNW/LLF، بزرگ‌ترین تونل باد اروپا ..... ۱۷
- شکل ۳-۴ توربین بادی آزمون مکزیکو ..... ۱۷
- شکل ۳-۵ هندسه سه هوابر استفاده‌شده در توربین بادی آزمون مکزیکو ..... ۱۸

- شکل ۳-۶ تغییرات ضرایب برآ و پسا از سمت مرکز دوران هوابر اول، DU91-W2-250..... ۱۹
- شکل ۳-۷ تغییرات ضرایب برآ و پسا از سمت مرکز دوران هوابر دوم، RISØ A1-21..... ۱۹
- شکل ۳-۸ تغییرات ضرایب برآ و پسا از سمت مرکز دوران هوابر سوم، NACA64-418..... ۲۰
- شکل ۳-۹ تغییرات زاویه گام محلی در طول پره توربین بادی..... ۲۰
- شکل ۳-۱۰ تغییرات کورد در طول پره توربین..... ۲۱
- شکل ۳-۱۱ پره روتور توربین طراحی شده توسط گروه طراحی پره به ترتیب تفکیک هوابرهای پره..... ۲۱
- شکل ۳-۱۲ الف: ۲۵ و ۳۵ درصد فاصله از ابتدای پره، و همچنین فضای موجود درون پره را نشان میدهد، ب: حسگرهای فشار کولیت که در لبه جلوی هوابر بافاصله و در پهنای هوابر به صورت آنی نصب شده‌اند را نشان میدهد..... ۲۲
- شکل ۳-۱۳ نمایش مقطع طولی تونل جریان جهت اعمال قانون برنولی و اجزاء حلقوی دوار جهت اعمال نظریه تعادل تکانه..... ۲۵
- شکل ۳-۱۴ نمایش اجزاء پره و نحوه سازمان‌دهی ضرایب برآ و پسای هوابر جهت محاسبه جزء نیروی محوری و جزء گشتاور آن..... ۲۸
- شکل ۳-۱۵ چگونگی اصلاح ضرایب برآ در این تحقیق..... ۳۵
- شکل ۳-۱۶ جهت وزش باد و جهت نیروهای محوری و سمتی در زاویه یاو..... ۳۶
- شکل ۳-۱۷ الگوریتم کلی پیاده‌سازی نظریه بی-ای-ام پایه در این تحقیق..... ۳۸
- شکل ۳-۱۸ الگوریتم کلی پیاده‌سازی نظریه بی-ای-ام پایه در زاویه یاو در این تحقیق..... ۳۹
- شکل ۳-۱۹ نمودار گراسمان جریان اکزرژی باد بر روی توربین بادی..... ۴۱
- شکل ۳-۲۰ متغیرهای ترمودینامیکی جریان باد در ورودی و خروجی از رتور توربین بادی..... ۴۲
- شکل ۳-۲۱ نمونه بلوکه بندی ساده بر روی هوابرها. الف: ریزو. ب: ناکا. ج: دی-یو..... ۴۵
- شکل ۳-۲۲ الگوریتم پیاده‌سازی شده جهت بررسی عملکرد توربین بادی..... ۵۰



- شکل ۴-۱ نمودار تغییرات ضریب برآ هوا بر دی-یو بر اساس تغییرات زاویه حمله ..... ۵۳
- شکل ۴-۲ نمودار تغییرات ضریب پسا هوا بر دی-یو بر اساس تغییرات زاویه حمله ..... ۵۴
- شکل ۴-۳ کانتور سرعت برای هوا بر دی-یو در زاویه حمله صفر درجه ..... ۵۵
- شکل ۴-۴ کانتور سرعت برای هوا بر دی-یو در زاویه حمله ۴ درجه ..... ۵۵
- شکل ۴-۵ کانتور سرعت برای هوا بر دی-یو در زاویه حمله ۸ درجه ..... ۵۶
- شکل ۴-۶ کانتور سرعت برای هوا بر دی-یو در زاویه حمله ۱۱ درجه ..... ۵۶
- شکل ۴-۷ نمودار تغییرات ضریب برآ هوا بر ریزو بر اساس تغییرات زاویه حمله ..... ۵۷
- شکل ۴-۸ نمودار تغییرات ضریب پسا هوا بر ریزو بر اساس تغییرات زاویه حمله ..... ۵۷
- شکل ۴-۹ شبیه‌سازی تغییرات ضرایب برآ ناکا بر اساس زاویه حمله را نشان می‌دهد ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۰ شبیه‌سازی تغییرات ضرایب پسا هوا بر ناکا بر اساس زاویه حمله را نشان می‌دهد ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۱ تأثیرات زبری مختلف را بر روی ضریب برآ هوا بر دی-یو ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۲ تأثیرات زبری مختلف را بر روی ضریب پسا هوا بر دی-یو ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۳ تأثیرات زبری مختلف را بر روی ضریب برآ هوا بر ریزو ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۴ تأثیرات زبری مختلف را بر روی ضریب پسا هوا بر ریزو ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۵ تأثیرات زبری مختلف را بر روی ضریب برآ هوا بر ناکا ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۶ تأثیرات زبری مختلف را بر روی ضریب پسا هوا بر ناکا ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۷ اثر افزایش شدت زبری بر جدایش جریان روی هوا بر NACA 64-418 در شدت زبری الف: ۰ mm ب: ۰/۱ mm ج: ۰/۳ mm د: ۰/۵ mm ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۸ نحوه توزیع بار گسترده محوری در مقاطع مختلف پره توربین بادی ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۹ نحوه توزیع بار گسترده سمتی در مقاطع مختلف پره توربین بادی ..... ۶۹
- شکل ۴-۲۰ مقایسه توان خروجی نتایج تونل باد و نتایج شبیه‌سازی با نتایج هوا برها در شرایط

- آزمایشگاهی و نتایج هوابرها در نرم‌افزار فلوئنت. .... ۷۱
- شکل ۴- ۲۱ تأثیر زبری بر توان تولیدشده توربین بادی در سرعت‌های مختلف. .... ۷۱
- شکل ۴- ۲۲ توزیع نیروهای محوری در مقطع ۹۲٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s. .... ۷۴
- شکل ۴- ۲۳ توزیع نیروهای محوری در مقطع ۸۲٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s. .... ۷۴
- شکل ۴- ۲۴ توزیع نیروهای محوری در مقطع ۶۰٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s. .... ۷۵
- شکل ۴- ۲۵ توزیع نیروهای محوری در مقطع ۳۵٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s. .... ۷۶
- شکل ۴- ۲۶ توزیع نیروهای سمتی در مقطع ۲۵٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s. .... ۷۷
- شکل ۴- ۲۷ توزیع نیروهای سمتی در مقطع ۳۵٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s. .... ۷۸
- شکل ۴- ۲۸ توزیع نیروهای محوری و سمتی در مقطع ۶۰٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s. .... ۷۹
- شکل ۴- ۲۹ توزیع نیروهای محوری و سمتی در مقطع ۸۲٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s. .... ۷۹
- شکل ۴- ۳۰ توزیع نیروهای محوری و سمتی در مقطع ۹۲٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s. .... ۸۰
- شکل ۴- ۳۱ توزیع نیروی محوری در صفحه چرخش پره در زاویه یاو صفر درجه. .... ۸۱
- شکل ۴- ۳۲ توزیع نیروی سمتی در صفحه چرخش پره در زاویه یاو صفر درجه. .... ۸۲
- شکل ۴- ۳۳ توزیع زاویه حمله در صفحه چرخش پره در زاویه یاو صفر درجه. .... ۸۲
- شکل ۴- ۳۴ توزیع شاخص محوری در صفحه چرخش پره در زاویه یاو صفر درجه. .... ۸۳
- شکل ۴- ۳۵ توزیع نیروی محوری در صفحه چرخش پره در زاویه یاو ۱۵ درجه. .... ۸۴
- شکل ۴- ۳۶ توزیع نیروی سمتی در صفحه چرخش پره در زاویه یاو ۱۵ درجه. .... ۸۴
- شکل ۴- ۳۷ توزیع شاخص محوری در صفحه چرخش پره در زاویه یاو ۱۵ درجه. .... ۸۵
- شکل ۴- ۳۸ توزیع زاویه حمله در صفحه چرخش پره در زاویه یاو ۱۵ درجه. .... ۸۵
- شکل ۴- ۳۹ تأثیر زاویه یاو بر توان خروجی توربین بادی. .... ۸۷
- شکل ۴- ۴۰ نمایش میزان جریان اکزرژی عبوری از صفحه روتور را بر اساس نتایج تونل باد. .... ۸۸
- شکل ۴- ۴۱ میزان تخریب اکزرژی بر اساس تغییرات سرعت باد. .... ۸۸

- شکل ۴-۴۲ تغییرات بازده اکزرژی بر اساس تغییرات سرعت باد ..... ۹۰
- شکل ۴-۴۳ تغییرات بازده انرژی بر اساس تغییرات سرعت باد ..... ۹۰
- شکل ۴-۴۴ بازده انرژی بر اساس کد بی-ای-ام در سرعت‌های مختلف باد ..... ۹۲
- شکل ۴-۴۵ بازده اکزرژی بر اساس کد بی-ای-ام در سرعت‌های مختلف باد ..... ۹۲
- شکل ۴-۴۶ تغییرات بازده انرژی و اکزرژی بر اساس تغییرات دما جریان باد ..... ۹۴
- شکل ۴-۴۷ تغییرات بازده انرژی بر اساس تغییرات دما در سرعت‌های مختلف جریان باد ..... ۹۴
- شکل ۴-۴۸ تغییرات بازده اکزرژی بر اساس تغییرات دما در سرعت‌های مختلف جریان باد ..... ۹۵
- شکل ۴-۴۹ تغییرات بازده انرژی و اکزرژی بر اساس تغییرات فشار جریان باد ..... ۹۶
- شکل ۴-۵۰ تغییرات بازده انرژی بر اساس تغییرات فشار در سرعت‌های مختلف جریان باد ..... ۹۶
- شکل ۴-۵۱ تغییرات بازده اکزرژی بر اساس تغییرات فشار در سرعت‌های مختلف جریان باد ..... ۹۷
- شکل ۴-۵۲ تأثیر رطوبت مخصوص بر بازده انرژی توربین بادی ..... ۹۸
- شکل ۴-۵۳ تأثیر رطوبت مخصوص بر بازده اکزرژی توربین بادی ..... ۹۸
- شکل ۴-۵۴ تأثیر زبری بر عملکرد بازده انرژی توربین بادی ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۵۵ تأثیر زبری بر عملکرد بازده اکزرژی توربین بادی ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۵۶ تغییرات بازده اکزرژی نسبت به تغییرات زاویه یاو در سرعت‌های مختلف ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۵۷ تغییرات بازده انرژی نسبت به تغییرات زاویه یاو در سرعت‌های مختلف ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱ اثر تغییرات سرعت باد بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲ اثر زبری بر بازده اکزرژی توربین بادی در سرعت‌های مختلف ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۳ توزیع نیروی سمتی در صفحه چرخش پره در زاویه یاو ۱۵ درجه ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۴ اثر تغییر زاویه یاو بر بازده اکزرژی توربین بادی در سرعت‌های مختلف ..... ۱۱۰

شکل ۱ کانتور سرعت برحسب m/s هوا بر ریزو. الف: زاویه حمله ۰ درجه. ب: زاویه حمله ۹ درجه

۱۱۲ .....

شکل ۲ کانتور سرعت برحسب m/s هوا بر ناکا. الف: زاویه حمله ۰ درجه. ب: زاویه حمله ۱۱

درجه ..... ۱۱۳

شکل ۳ اثر افزایش شدت زبری بر جدایش جریان روی هوا بر RISØ A1-21 در شدت زبری الف:

۰ mm ب: ۰/۱ mm ج: ۰/۳ mm د: ۰/۵ mm ..... ۱۱۵

شکل ۴ اثر افزایش شدت زبری بر جدایش جریان روی هوا بر DU91-W2-250، در شدت زبری

الف: ۰ mm ب: ۰/۱ mm ج: ۰/۳ mm د: ۰/۵ mm ..... ۱۱۷

#### جداول

جدول ۱-۱ مجموع ظرفیت نصب شده انرژیهای تجدیدپذیر در سال ..... ۴

جدول ۱-۲ سهم کشورهای جهان در تولید توربینهای بادی [6] ..... ۵

جدول ۱-۳ تعداد سلول در هر شبیه‌سازی و ضرایب برآ و پسای محاسبه شده را نمایش می‌دهد

..... ۴۵

جدول ۲-۳ داده‌های هواشناسی شهر منجیل در سال ۲۰۱۰ ..... ۵۰

## علائم

-	شاخص محوری	$a$
-	شاخص دورانی	$\dot{a}$
-	شاخص محوری در زمان جدا شدن	$a_c$
-	ضریب پری	$B$
m	کورد پره توربین بادی	$C$
-	ضریب پسا سه بعدی	$C_{d,3D}$
-	ضریب پسا دو بعدی	$C_{d,2D}$
-	ضریب پسا در حالت لزج	$C_{d,inv}$
-	ضریب برآ سه بعدی	$C_{l,3D}$
-	ضریب برآ دو بعدی	$C_{l,2D}$
-	ضریب برآ در حالت لزج	$C_{l,inv}$
N/m	نیروی جزئی محوری	$dF_x$
mm	اندازه ذرات گرد و غبار	$D_d$
N/m	نیروی جزئی سمتی	$dF_\theta$
N	نیروی برآ	$dL$
N	نیروی پسا	$dD$
$W.m^{-1}$	جزء توان خروجی توربین بادی	$dP$
	جزء زمان	$dt$
	المان مساحت	$dA$
J	جریان اکزرژی باد	$Ex_{flow}$
J	اکزرژی فیزیکی باد	$Ex_{ph}$
J	آنتالپی	$h$
W	اکزرژی تخریب شده	$i$
-	پارامتر تصحیح گلارت	$K$
J	انرژی جنبشی جریان باد	$ke$
N.m.s	تکانه زاویه ای	$L$
kg	جرم هوا	$m$
$Kg.s^{-1}$	نرخ جرم هوا	$\dot{m}$

Kg.s-1	جرم ورودی به صفحه روتور توربین بادی	$m_{in}$
Kg.s-1	جرم خروجی هوا از صفحه روتور توربین بادی	$m_{ex}$
W	توان خروجی توربین بادی	$P$
kPa	فشار جریان باد	$p$
J	انرژی پتانسیل جریان باد	$pe$
-	ضریب اصلاح پرنتل	$Q$
J	میزان انتقال حرارت در روتور توربین بادی	$Q_r$
m	شعاع کل پره توربین باده	$R$
m	شعاع پره توربین بادی در هر نقطه مشخص	$r$
m	شعاع پره در انتهای هاب توربین بادی	$r_h$
K	دمای جریان باد	$T$
N.m	گشتاور	$T$
K	دمای حالت مرده هوا	$T_0$
K	دمای متوسط جریان باد	$T_{avg}$
month	بازه زمانی بر حسب ماه	$T_{month}$
K	دمای تصحیح شده جریان باد	$T_{windchill}$
m.s <sup>-1</sup>	سرعت جریان باد	$V$
m.s <sup>-1</sup>	برایند سرعت باد با پره توربین بادی	$W$
W	حداکثر کار استحصالی توربین بادی	$w_{out}$
degree	زاویه حمله	$\alpha$
degree	زاویه گام محلی	$\beta$
degree	زاویه گام	$\gamma$
degree	زاویه مچ	$\delta$
-	بازده انرژی	$\eta$
degree	زاویه قرارگیری پره توربین در صفحه روتور	$\theta$
-	نسبت سرعت نوک	$\lambda_r$
Rad.s <sup>-1</sup>	سرعت دورانی گردابه	$\omega$
Kg.m <sup>-3</sup>	چگالی هوا	$\rho$
degree	زاویه جریان	$\phi$
-	ضریب پری پره	$\sigma$

---

---

degree	زاویه یاو	$\varphi_y$
-	بازده اکزرژی	$\Psi$
Rad.s <sup>-1</sup>	سرعت دورانی روتور توربین بادی	$\square$
-	رطوبت مخصوص	$\omega$





# فصل اول

مقدمه و تئوری

## ۱-۱ مقدمه

تاریخ استفاده از انرژی باد به دوران باستان برمی‌گردد، هنگامی که از آن برای حرکت کشتی‌های بادی در دریا استفاده می‌شد. کاربرد انرژی باد، از ایران سرچشمه گرفته است. از آسیاب‌های بادی نوع محور عمودی برای اولین بار جهت استحصال انرژی باد و برای آسیاب گندم در ایران و در استان سیستان و بلوچستان استفاده شد. بعد از فتح ایران توسط اعراب، این فناوری در اختیار اعراب و به مناطقی از چین منتقل شد. در اروپا، توربین‌های بادی در قرن یازدهم میلادی ساخته شد و بعد از دو قرن به یک وسیله بسیار مهم تبدیل شد. آسیاب‌های بادی از سال ۱۸۸۸ تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در اواخر قرن ۱۹ میلادی اولین آسیاب بادی برای تولید برق طراحی گردید. این آسیاب بادی در سال ۱۸۸۸ میلادی در کلیولند<sup>۱</sup> اوهایو<sup>۲</sup> توسط چارلز برآش<sup>۳</sup> ساخته شد. روتورهای این آسیاب بادی به قطر ۱۷ متر بوده که یک اهرم جانبی برای چرخاندن آن به سمت باد داشته است. و اولین آسیاب بادی بود که جعبه دنده‌ای با نسبت ۵۰:۱ و ژنراتور جریان مستقیم دور ۵۰۰ دور بر دقیقه داشت. با وجود موفقیت نسبی این آسیاب بادی در مدت ۲۰ سال ولی محدودیت‌هایی در سرعت کم و استحکام بالای روتور برای تولید برق وجود داشت. میزان برق تولیدی این آسیاب بادی ۱۲ کیلوواتی با روتور ۱۷ متری در مقابل توربین‌های بادی مدرن با قطر روتور ۱۷ متر و ظرفیت ۷۰ تا ۱۰۰ کیلوواتی بسیار ناچیز است. از این زمان بود که نام توربین‌های بادی جایگزین آسیاب‌های بادی شدند [۱].

توربین‌های بادی با ظرفیت بیشتر برای اولین بار در سال ۱۹۳۱ در روسیه توسعه یافتند. به طوری که توربینی ۱۰۰ کیلوواتی در سواحل دریای خزر در طول ۲ سال در حدود ۲۰۰ هزار کیلووات ساعت برق تولید نمود. پس از آن نیروگاه‌های بادی در آمریکا، دانمارک، فرانسه، آلمان و انگلستان در طول سال‌های ۱۹۳۵ تا ۱۹۷۰ با توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ راه‌اندازی شدند [۲].

<sup>1</sup> Cleveland

<sup>2</sup> Ohio

<sup>3</sup> Charles Brush -

بعد از جنگ جهانی دوم، به خاطر ارزان شدن قیمت نفت، تحقیقات زیادی روی انرژی‌های جایگزین که انرژی باد نیز شامل آن بود، صورت نگرفت. تا اینکه در سال ۱۹۷۳ به خاطر بحران نفتی، علاقه زیادی در استفاده از انرژی‌های جایگزین به خصوص انرژی باد ایجاد شد و بودجه‌های سرمایه‌گذاری‌های زیادی را به خود اختصاص داد که منجر به تأسیس مزارع بادی شد [۱]. ماشین‌های اولیه به کاررفته در این مزارع، از لحاظ عملکرد مایوس‌کننده بود و قیمت نگهداری از آن‌ها هم زیاد بود. به طور مثال در اوایل دهه ۸۰ میلادی، هزینه هر  $1\text{kW/h}$  انرژی الکتریکی بادی ۲۵ سنت بود، ولی امروزه هزینه هر  $1\text{kW/h}$  انرژی الکتریکی بادی به کمتر از ۵ سنت رسیده است. [۳]

## ۱-۱-۱ بازار انرژی‌های تجدیدپذیر

با بررسی تحول انرژی‌های تجدیدپذیر در سال‌های (۲۰۰۴-۲۰۱۴) به این نتیجه می‌رسیم که این حوزه ظرفیت نصب‌شده جهانی و تولید فن‌آوری‌های تجدیدپذیر افزایش فراوان یافته‌است. هزینه‌های بسیاری از فن‌آوری‌ها به طور قابل توجهی کاهش یافته و انتشار سیاست‌های حمایتی در سرتاسر جهان ادامه یافته است.

عوامل متعددی در این رشد سریع دخالت داشته‌اند که از آن جمله می‌توان به بحران انرژی و رکود اقتصادی اشاره نمود. در همین زمان کشورهای انگشت‌شماری از جمله پیشگامانی چون آلمان، دانمارک، اسپانیا و ایالات متحده آمریکا بازارهای مهمی برای این صنعت به شمار می‌رفتند که پیشرفت‌های فن‌آوری به موقع و معیارهای اقتصادی آن‌ها کمک شایانی به گسترش بازار نمود. سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش‌های گرمایش، برق و حمل‌ونقل به طور پیوسته افزایش یافته است. البته در این راستا جمعیت و تقاضا نیز افزایش داشته است. رشد سهم بخش برق از انرژی‌های نو نسبت به بخش‌های دیگر سرعت بیشتری داشته است [۴]. کل ظرفیت نصب‌شده انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش برق بدون احتساب برق‌آبی از ۸۵ گیگاوات در سال ۲۰۰۴ به ۵۶۰ گیگاوات در سال ۲۰۱۳ رسیده است. انرژی بادی از ۴۸ گیگاوات در سال ۲۰۰۴ به ۳۱۸ گیگاوات در سال ۲۰۱۴ رسیده است. ظرفیت

دستگاه‌های فتوولتائیک از ۲/۶ گیگاوات در سال ۲۰۰۴ به ۱۳۹ گیگاوات در سال ۲۰۱۴ رسیده است. درک جهانی از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور قابل‌توجهی طی ده سال گذشته تغییر کرده است. جدول ۱-۱ گویای این مطلب است [۵].

جدول ۱-۱ مجموع ظرفیت نصب‌شده انرژی‌های تجدیدپذیر در سال

مجموع ظرفیت نصب‌شده	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	GW
صفحات الکترونیکی خورشیدی	۲/۶	۱/۱	۶/۶	۷/۶	۱۳/۵	۲۱	۴	۷۱	۱۰	۱۳۹	GW
انرژی حرارتی خورشیدی	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۷	۱/۱	۱/۶	۲/۵	۳/۴	GW
انرژی باد	۴۸	۵۴	۷۴	۹۴	۱۲۱	۱۵۹	۱۹۸	۲۳۸	۲۸۳	۳۱۸	GW
انرژی زیست‌توده	۳۹	۴۱	۴۳	۴۵	۴۶	۵۱	۷۰	۷۴	۷۸	۸۸	GW
انرژی زمین‌گرمایی	۷/۶	۷/۶	۱۰	۱۰/۶	۱۰/۷	۱۱	۱۱/۱	۱۱/۴	۱۱/۷	۱۲	GW
انرژی آب	۷۱۵	-----	-----	۹۲۰	۹۵۰	۹۸۰	۹۳۵	۹۶۰	۹۹۰	۱۰۰۰	GW

سرمایه‌گذاری جدید جهانی در بخش برق و سوخت، رشدی پیوسته داشته و از ۳۹/۵ میلیارد دلار در سال ۲۰۰۴ به ۲۷۹/۶ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۱ رسید. سرمایه‌گذاری در سال ۲۰۱۲ با کاهش روبرو بوده و به ۲۴۹/۵ میلیارد دلار رسید و در سال ۲۰۱۳ نیز مجدداً با کاهش روبرو گردید و به ۲۱۴/۴ میلیارد دلار رسید. کل سرمایه‌گذاری با ۱۱٪ کاهش در سال ۲۰۱۲ و ۲۳٪ کاهش در سال ۲۰۱۳ نسبت به سال ۲۰۱۱ روبرو بوده است. این کاهش در سرمایه‌گذاری پس از چند سال رشد ثابت، ناشی

از عدم اطمینان از سیاست‌های حمایتی در اروپا و ایالات متحده آمریکا و کاهش میزان حمایت با توجه به گذشت زمان بوده است [۵].

باین حال کاهش در سرمایه‌گذاری باعث کاهش شدید در هزینه‌های فن‌آوری‌ها از جمله فتوولتائیک شده است. باینکه سرمایه‌گذاری در فتوولتائیک در سال ۲۰۱۳ با ۲۲٪ کاهش نسبت به سال ۲۰۱۲ روبرو بوده ولی ظرفیت نصب‌شده جدید ۳۲٪ افزایش داشته است. این کاهش شیب هزینه‌ها در بخش بادی و فتوولتائیک باعث گردید تا جذابیت لازم در بازارهای جدید در کشورهای در حال توسعه که نیاز مبرم به افزایش ظرفیت تولید برق داشتند، ایجاد گردد [۵].

### ۱-۱-۱-۱ صنعت انرژی بادی در جهان

با به‌کارگیری تجاری نیروگاه‌های بادی در دنیا، رشد ظرفیت واحد نیروگاهی توربین‌ها افزایش یافته و راندمان‌های آن‌ها نیز بهبود یافته تا بدین ترتیب ضریب ظرفیت و کاهش هزینه‌های توربین‌ها نیز، به‌خوبی تعمیر و نگهداری آن‌ها بهبود یابد. جدول ۱-۲

جدول ۱-۲ سهم کشورهای جهان در تولید توربین‌های بادی [۶].

درصد %	سهم کشورهای جهان در تولید توربین بادی در ابتدای سال ۲۰۱۳
۱۷/۷	تولیدکنندگان آلمانی
۱۶/۶	تولیدکنندگان چینی
۱۵/۵	تولیدکنندگان آمریکایی
۱۴	تولیدکنندگان دانمارکی
۴/۷	تولیدکنندگان هندی
۱/۶	تولیدکنندگان اسپانیایی
۶/۲۲	دیگر کشورها

از سال‌های ابتدایی دهه ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۰۵ میلادی به دلیل گسترش کاربرد و رشد روزافزون فناوریانه نیروگاه‌های بادی قیمت سرمایه‌گذاری احداث و در نتیجه هزینه تمام‌شده برق تولیدی آن به شدت کاهش یافت. در طول سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ قیمت توربین‌های بادی در پاسخ به تقاضای رو به رشد جهانی و به دلیل افزایش هزینه‌های مواد اولیه (فولاد و مس) و بحران‌های مالی جهانی افزایش یافت. با این حال مجدداً با حل مشکلات مذکور شاهد روند کاهش قیمت‌ها به‌ویژه در سال‌های اخیر با عرضه چشمگیر توربین بادی به بازار جهانی بوده‌ایم به طوری که تنها در سال ۲۰۱۲ قیمت توربین‌های بادی در بازار جهانی ۲۰ تا ۳۵ درصد کاهش یافت.

## ۱-۱-۲ چشم‌انداز انرژی بادی در ایران

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

سیاست کلان کشور ما در چشم‌انداز برنامه‌های آتی در افزایش نقش بخش‌های غیردولتی استوار شده است که از جمله فواید و مزایای آن کاستن از حجم و فعالیت‌های تصدی‌گری دولت است. با فعال شدن بخش خصوصی در عرصه احداث نیروگاه‌های بادی که جذابیت‌های فراوانی برای بخش خصوصی دارد، توان مالی، فنی و مدیریتی کشور افزایش می‌یابد و با شروع پروژه‌ها و فعالیت‌های جدید عملاً بخش خصوصی به کمک بخش دولتی آمده و کل کشور از این مشارکت سود خواهد برد. همچنین باید توجه داشت که نیروگاه‌های بادی به سرمایه اولیه بالایی نیاز دارند بنابراین تأمین سرمایه اولیه در این طرح‌ها از مشکلات اجرایی آن‌هاست.

استفاده از سرمایه‌گذاری‌های غیردولتی در اجرای طرح‌ها کمک شایانی به دولت خواهد کرد، چراکه توسعه انرژی‌های نو و به‌ویژه انرژی بادی که تجاری‌ترین نوع از انواع آن‌هاست به‌صراحت در

اسناد و قوانین ملی بالادستی و سیاست‌های ابلاغی مقام معظم رهبری تدوین شده است که البته دلایل مهمی باعث این جهت‌گیری کلان در کشور شده است.

بازار نیروگاه‌های بادی در ایران رو به شکوفایی است و ورود به این بازار می‌تواند آینده خوبی را در درازمدت برای سرمایه‌گذاران تضمین کند. بنابراین اگر به ایران به‌صورت پایگاهی برای تولید تجهیزات و تأمین نیروی انسانی متخصص نگریسته شود بازارهای کشورهای منطقه می‌توانند مورد توجه قرار گیرند. [۲]

### ۱-۱-۳ ضرورت توجه و به‌کارگیری انرژی بادی در کشور

صرف نظر از عواملی همچون افزایش تنوع و امنیت انرژی، ایجاد فرصت‌های کسب و کار، جلوگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی، پدافند غیرعامل و... محاسبات نیز نشان می‌دهند که از منظر اقتصادی به‌کارگیری انرژی بادی برای تولید برق در کشور ما از اهمیت زیادی برخوردار است. به‌طور مثال مطابق آمارهای وزارت نیرو از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۰ نیروگاه‌های کشور ۲۲۴ میلیون بشکه گازوئیل (علاوه بر سوخت‌های دیگر مایع) برای تولید برق مصرف کرده‌اند. ارزش این مقدار گازوئیل بیش از ۲۵ میلیارد دلار است. اگر طی همین هشت سال به تدریج نیروگاه‌های بادی مجموعاً به ظرفیت ۱۲۵۰۰ مگاوات در کشور ساخته می‌شد و برق تولید می‌کرد نیازی به مصرف گازوئیل در نیروگاه‌های حرارتی نبود. هزینه احداث این میزان نیروگاه تجدیدپذیر کمتر از ۲۲ میلیارد دلار است. به عبارت روشن‌تر اگر فقط طی هشت سال گفته‌شده، کشور ۲۲ میلیارد دلار از واردات گازوئیل می‌کاست (و یا گازوئیل مصرف نشده در نیروگاه‌ها را صادر می‌کرد) و همین مبلغ را صرف احداث نیروگاه‌های بادی می‌نمود نه تنها ظرفیت صادرات خالص نفت کشور در سطح سال ۱۳۸۳ حفظ می‌شد. بلکه در باقیمانده عمر همین میزان نیروگاه‌های بادی پانزده سال ۷۰ میلیارد دلار دیگر به قیمت‌های امروز نفت، صرفه‌جویی یا افزایش صادرات نفت می‌توانست داشته باشد.

## ۱-۲ انواع توربین‌های بادی

اگرچه طراحی‌های مختلفی برای توربین بادی موجود است ولی به‌طور عمده به

دو دسته کلی بر اساس جهت محور چرخش تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- محور افقی<sup>۱</sup> که نوع رایج آن است.

۲- محور عمودی<sup>۲</sup>

جریان هوا بر روی هر سطحی دو نوع نیروی آئرو دینامیکی با نام‌های نیروی برآ<sup>۳</sup> و پسا<sup>۴</sup> به وجود می‌آورد که نیروی پسا در جهت جریان باد است و نیروی برآ عمود بر جریان باد است. یکی از این نیروها یا هر دو بسته به مدل توربین بادی می‌توانند نیروی موردنیاز برای چرخش پره‌های توربین‌های بادی را تأمین نمایند.

### ۱-۲-۱-۱ توربین‌های محور افقی

ویژگی روتورهای توربین‌های محور افقی جدید بسیار شبیه ملخ هواپیما است. جریان هوا روی مقطع آئرو دینامیکی شکل پره‌ها حرکت می‌کند و نیروی برآ را به وجود آورده که باعث چرخش روتور می‌گردد. در توربین‌های محور افقی ژنراتور، جعبه دنده و سایر تجهیزات در محفظه‌ای به نام ناسل<sup>۵</sup> نگهداری می‌شوند.

توربین‌های محور افقی باید سامانه‌ای برای تنظیم جهت قرار گرفتن در مقابل باد داشته باشند که به آن مکانیسم یاوینگ<sup>۶</sup> می‌گویند. به‌طوری‌که کل ناسل می‌تواند به سمت باد بچرخد. در توربین‌های کوچک دنپره بادنما<sup>۷</sup> این کنترل را بر عهده دارد. ولی در سامانه‌های متصل به شبکه سیستم کنترل یاو فعال است که به‌وسیله حس‌گرهای تعیین‌کننده جهت باد و موتورها، ناسل به سمت باد می‌چرخد

---

<sup>1</sup> Horizontal Axis Wind Turbines

<sup>2</sup> Vertical Axis Wind Turbines

<sup>3</sup> Lift force

<sup>4</sup> Drag force

<sup>5</sup> nacelle

<sup>6</sup> yawing

<sup>7</sup> vane





شکل ۱-۱ توربین بادی محور افقی

## ۲-۱-۲-۱ توربین‌های محور عمودی

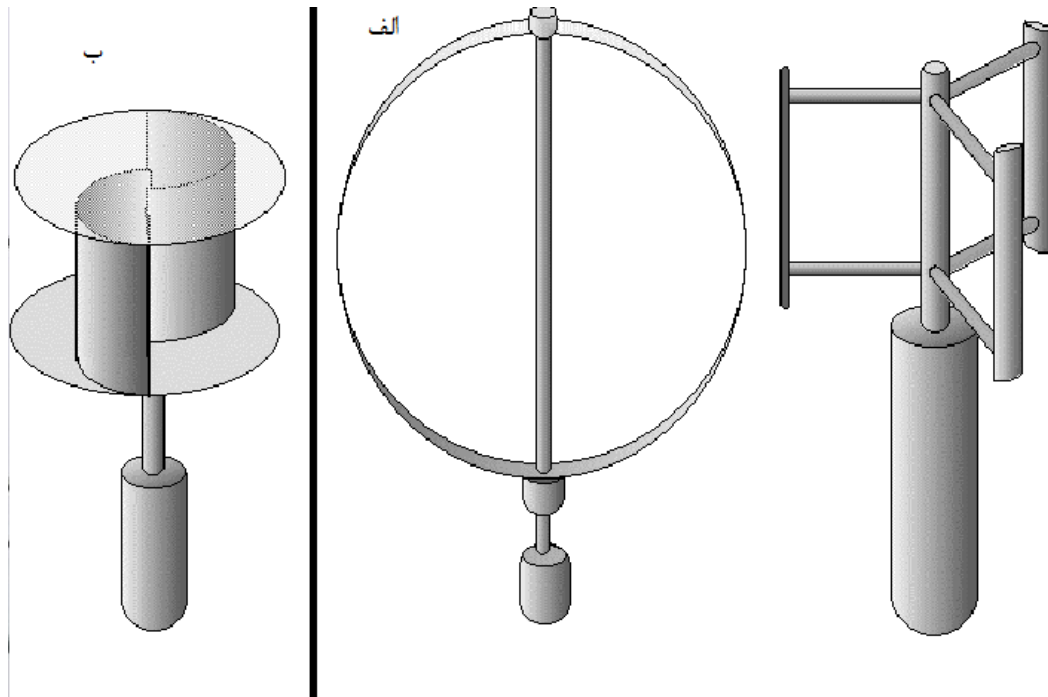
این توربین‌ها به دو نوع اصلی ساوئیوس<sup>۱</sup> و داریوس<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند

با توجه به شکل ۱-۲ ساوئیوس مانند یک چرخ آب با نیروی پسا کار می‌کند درحالی که داریوس از تیغه‌هایی مشابه توربین‌های محور افقی استفاده می‌کند. توربین‌های محور عمودی بسیار نزدیک به زمین قرار می‌گیرند که از مزیت‌های آن قرار دادن تجهیزات سنگین آن از جمله گیربکس و ژنراتور نزدیک به سطح زمین است، هرچند که شدت باد در سطح زمین کمتر است و در نتیجه برق کمتری تولید خواهد نمود. از دیگر مزایای این نوع توربین‌ها می‌توان به نیاز نداشتن سیستم یاو اشاره کرد چراکه این نوع توربین‌ها، باد را از هر جهت مهار می‌کنند و این مزیت برتری بسیاری نسبت به کمبودهای آن دارد. از کمبودهای آن می‌توان به این مورد اشاره نمود که این نوع توربین‌ها به‌طور

<sup>1</sup> Savonius

<sup>2</sup> Darrieus

خودکار مانند توربین‌های محور افقی شروع به کار نمی‌کنند.



شکل ۱-۲ توربین‌های عمودی محور الف) توربین بادی داریوس ب) توربین بادی ساونیوس

## فصل ۲

پیشینه تحقیق

## ۱-۲ تاریخچه تحقیق

در مسائل مهندسی توربین بادی، اهمیت بررسی بازده اکزرژی و انرژی توربین‌های بادی مهم است و می‌تواند در طراحی یک سایت بادی و سیاست‌گذاری کلان انرژی به‌عنوان یک شاخص مهم موردنظر قرار بگیرد. برای اولین بار در سال ۲۰۰۳ کرونوس<sup>۱</sup> تحلیل انرژی و اکزرژی را برای یک سیستم انرژی بادی انجام داد [۷]. باسکوت<sup>۲</sup> و همکاران اختلاف بین راندمان انرژی و اکزرژی را برای سه توربین در سایت بادی جسمه<sup>۳</sup> و ایزمیر<sup>۴</sup> در ترکیه انجام دادند و دریافتند که در دوره‌های مختلف سال، بازده اکزرژی این توربین‌ها بین ۰-۶۸/۲٪ تغییر کرد [۸]. در تحقیق اخیر به اهمیت بررسی بازده انرژی و اکزرژی پی برده شد. اما به این موضوع پرداخته نشد که پارامترهای مهم و تأثیرگذار در بررسی بازده انرژی و اکزرژی به ترتیب کدام پارامترها است.

همان محققان در مطالعه‌ی دیگری دریافتند که پارامترهای هواشناسی نظیر دما و فشار و رطوبت هر کدام به چه میزان راندمان انرژی و اکزرژی را تغییر می‌دهد [۹].

پارامترهایی نظیر دما، سرعت، فشار و رطوبت جریان باد از جمله متغیرهایی می‌باشند که متأثر از شرایط آب و هوایی و فصول مختلف سال تغییر می‌کنند. علاوه بر پارامترهای یادشده، عواملی دیگر نیز مانند گردوغبار و یخ‌زدگی بروی سطح پره، برخورد اجساد حشرات با سطح پره و واکنش‌های شیمیایی بر روی سطح پره توربین بادی، بسته به موقعیت مکانی و زمانی قرارگیری توربین‌های بادی می‌توانند تأثیر چشمگیری بر عملکرد توان خروجی آن داشته باشند. عوامل یادشده با ایجاد زبری بر روی سطوح پره‌های توربین بادی و تغییر الگوی جریان باد عملکرد توربین بادی را از حالت ایدئال آن خارج می‌نماید.

ساگل<sup>۵</sup> و همکاران مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه بررسی اثر زبری سطح پره‌های

---

<sup>1</sup> Koroneos

<sup>2</sup> Baskut

<sup>3</sup> Cesme

<sup>4</sup> Izmir

<sup>5</sup> Sagol

توربین‌های بادی بر عملکرد آئرو دینامیکی پره، اثر زبری بر الگوی جریان باد و تولید توان توربین‌های بادی انجام دادند. در این تحقیق به بررسی اثر زبری‌های مختلف نظیر یخ‌زدگی، گردوغبار، اجساد حشرات و انواع آلودگی‌ها پرداختند و دریافتند که زبری بسته به اندازه موقعیت آن بر روی پره می‌تواند تأثیرات مختلفی بر عملکرد توربین بادی داشته باشد [۱۰].

در آن تحقیق به جنبه‌های اهمیت زبری بر عملکرد توربین بادی پرداخته و زبری توسط ذرات گردوغبار را به‌عنوان یکی از مسائل مهم در بررسی عملکرد توربین بادی شناخته شد.

خلف الله<sup>۱</sup> و کولیوب<sup>۲</sup> به بررسی اثرات زبری گردوغبار بر روی تولید توان توربین بادی در یک سایت صحرائی پرداختند. در مدت‌زمانی که پره‌ها تمیز نمی‌شدند، اندازه ذرات گردوغبار و مساحت زبری پره‌ها اندازه‌گیری شدند و نشان دادند که اندازه و مساحت اشغال‌شده توسط ذرات چگونه باعث تغییرات توان تولیدی می‌شود. و آن‌ها این تحقیق را برای دو نوع توربین بادی انجام دادند و باهم مقایسه کردند [۱۱].

در مطالعات اخیر در مورد اهمیت زبری به‌تنهایی صحبت شد. اما به این موضوع پرداخته نشد که زبری در کنار پارامترهای جوی دیگر چه تأثیری در بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی خواهد داشت. پاپ<sup>۳</sup> و همکاران به تحلیل جریان اکزرژی چهار مدل از توربین‌های بادی (دو نوع محور عمودی و دو نوع محور افقی) در یک زبری ثابت و مشخص پرداختند. در این تحقیق به بررسی پارامترهای مختلف نظیر تغییر سرعت جریان باد، تغییرات دما و فشار باد بر روی بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی پرداختند [۱۲]. در این تحقیق برای توربین‌های بادی محور افقی میزان ثابتی از زبری فرض گرفته شد و به بررسی بازده انرژی اکزرژی و اهمیت پارامترهای جوی پرداخته شد. لذا در تحقیق یادشده اثر رشد زبری روی سطح پره توربین بادی بر روی بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی

---

<sup>1</sup> Khalfallah

<sup>2</sup> Koliub

<sup>3</sup> Pope

مورد مطالعه قرار نگرفت. همچنین شبیه‌سازی انجام‌گرفته در آن تحقیق برای توربین‌های بادی محور افقی با داده‌های آزمایشگاهی یک توربین بادی واقعی مشابه مقایسه‌ای انجام نشد.

یکی از روش‌های متداول برای شبیه‌سازی توربین بادی استفاده از نظریه تکانه اجزاء پره است. محمودی و همکاران در یک تحقیق با تصحیح<sup>۳</sup> بعدی ضرایب برا و پسا ایرفویل‌های توربین بادی آزمون مکسنت<sup>۱</sup> بر اساس نظریه تکانه اجزاء توانستند نتایج رضایت‌بخش و نزدیکی به نتایج تجربی بدست آمده از توربین بادی یاد شده بدست آورند [۱۳]. همچنین در شبیه‌سازی توربین بادی در شرایط یاو بر اساس نظریه تکانه اجزاء پره، بواتم<sup>۲</sup> و مرس<sup>۳</sup> توانستند رفتاری نزدیک و شبیه به نتایج یک توربین بادی مورد آزمایش در تونل باد ناسا به دست بیاورند [۱۴].

با توجه به این نکات در این پایان‌نامه در ابتدا شبیه‌سازی توربین بادی محور افقی با یک روش قوی و با دقت بالا صورت خواهد گرفت، سپس نتایج به دست آمده با نتایج توربین بادی واقعی مورد مقایسه قرار می‌گیرد، در مرحله بعد به تحلیل اکزرژی توربین بادی پرداخته خواهد شد. همچنین نشان داده خواهد شد، آیا نتایج بازده انرژی و اکزرژی در حالت شبیه‌سازی توربین بادی با نتایج واقعی آن تفاوت دارد یا خیر؟

همچنین تأثیرات رشد شدت زبری بر روی توان خروجی، بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی در شرایط شبیه‌سازی که تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است، بررسی شود. و برای اولین بار تأثیر زاویه یاو<sup>۴</sup> به‌عنوان یک متغیر تأثیرگذار، بر روی بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی مورد بررسی قرار بگیرد.

---

<sup>۱</sup> MexNext

<sup>۲</sup> Bouatem

<sup>۳</sup> mers

<sup>۴</sup> Yaw angle

## فصل ۳

### مواد و روش تحقیق

## ۱-۳ آزمون تجربی

آزمون توربین بادی مکزیکو در شرایط کنترل شده توسط اتحادیه اروپا در سال ۲۰۰۶ میلادی تأمین مالی شد و طراحی بخش‌های مختلف آزمون با همکاری مؤسسه‌ها و دانشگاه‌های مختلف به انجام رسید. مرکز تحقیقات انرژی هلند (ای-سی-ان)<sup>۱</sup> که مدیریت این پروژه را در دست داشت، در راستای اهداف پروژه، جهت توسعه نظریه‌های مختلف در زمینه مدل‌سازی توربین‌های بادی با بستن قرارداد با دانشگاه‌های مطرح، مجموعه تحقیقاتی یکپارچه‌ای به نام مکس-نکست<sup>۲</sup> را راه‌اندازی نمود.

تونل باد DNW/LLF و توربین بادی نصب‌شده در آن جهت انجام آزمون مکزیکو به ترتیب در شکل ۳-۳ و شکل ۳-۴ نشان داده شده است. مقطع آزمون این تونل باد، متغیر بوده و با ابعاد  $9/5 \times 9/5$  مترمربع می‌تواند بیشینه سرعت ۵۵ متر بر ثانیه که برابر عدد رینولدز  $10^6 \times 3/9$  است را برای آزمون‌های تجربی فراهم کند و با کوچک‌ترین مقطع، این تونل باد قادر است که محدوده  $0/01$  تا  $0/42$  ماخ را پوشش دهد.

---

<sup>1</sup> Energy research Center of Netherland (ECN)

<sup>2</sup> MexNext





شکل ۳-۳ تونل باد DNW/LLF، بزرگ‌ترین تونل باد اروپا [۱۵].

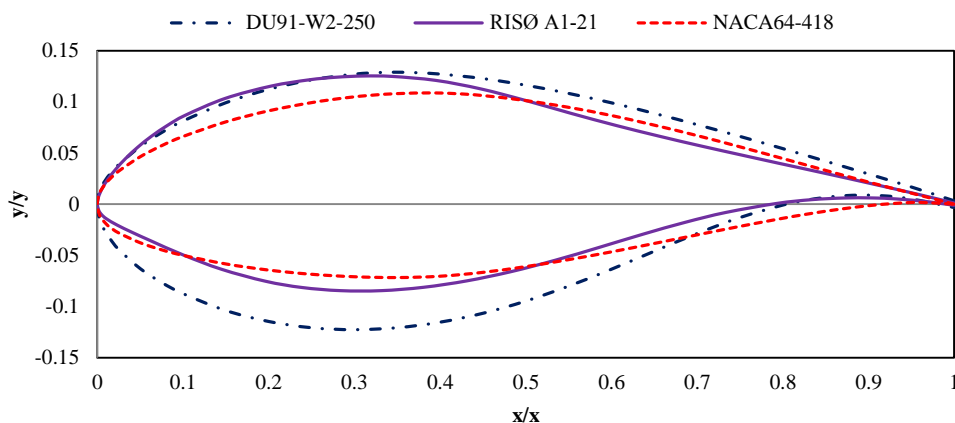


شکل ۳-۴ توربین بادی آزمون مکزیکو [۱۵].

### ۳-۱-۱ روتور و پره توربین

با توجه به ابعاد مقطع آزمون تونل باد (۹/۵ × ۹/۵ مترمربع)، توربین محور افقی سه پره با قطر ۴/۵ متر و سرعت دورانی ۴۲۴ دور بر دقیقه جهت انجام آزمون مکزیکو در نظر گرفته شد و سپس طراحی پره، ابزارهای اندازه‌گیری قابل نصب روی آن، ناسل، توپی و سایر اجزاء سامانه به انجام رسید. با توجه به شرایط متوسط سرعت باد در نقاط مختلف دنیا و همچنین گستره سرعت هوای تونل باد، تصمیم بر آن شد که توربین برای سرعت مشخصه ۱۵ متر بر ثانیه باد طراحی گردد.

پره توربین از ترکیب سه هواپر طراحی شد. با توجه به توزیع آئرو دینامیکی، هواپرها از سمت مرکز دوران پره به ترتیب DU91-W2-250، RISØ A1-21 و NACA64-418 انتخاب و چیده شدند. شکل ۳-۵ هندسه این هواپرها را در مقایسه باهم به تصویر کشیده است. ساختار پره طراحی شده به این صورت است که ریشه پره<sup>۱</sup> از یک استوانه شروع می‌شود و به صورت پیوسته به هواپر اول تغییر شکل میابد و فاصله بین هر دو هواپر هم با یک انتقال پیوسته خطی پر می‌شود.



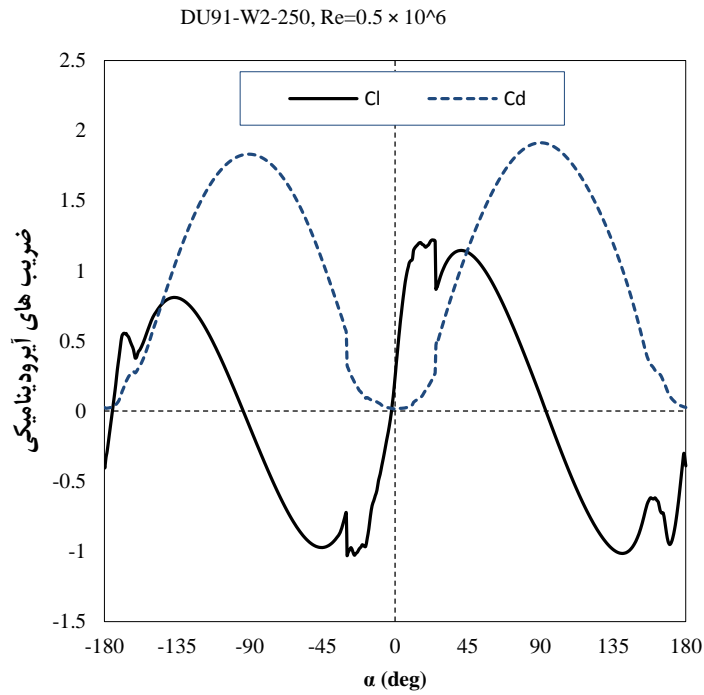
شکل ۳-۵ هندسه سه هواپر استفاده شده در توربین بادی آزمون مکزیکو [۱۵].

مشخصات هواپرها در نظر گرفته شده که شامل تغییرات ضرایب برآ و پسای هواپرها در مقابل تغییرات زاویه حمله<sup>۲</sup> ( $\alpha$ ) جریان هوا است، به ترتیب در شکل ۳-۶ تا شکل ۳-۸ آمده است [۱۵].

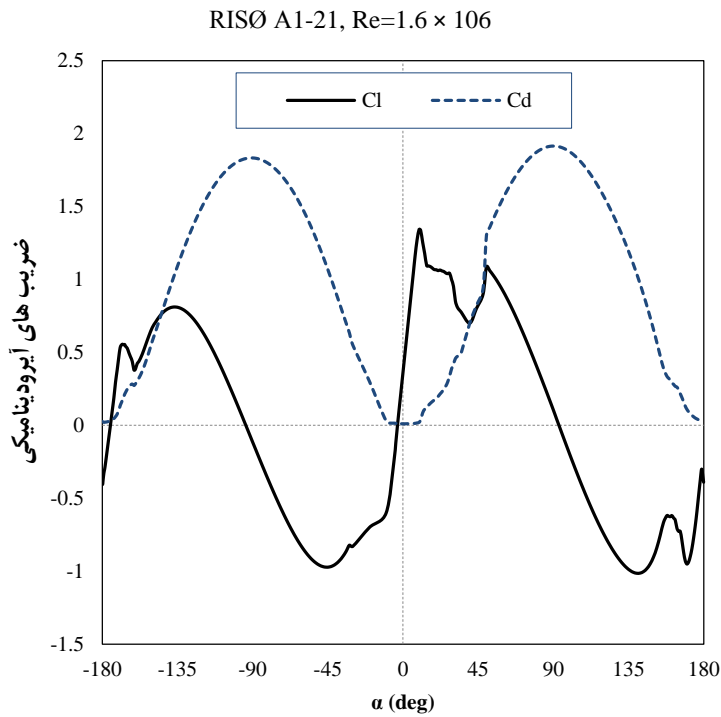
<sup>1</sup> Blade root

<sup>2</sup> Angle Of Attack (AOA)

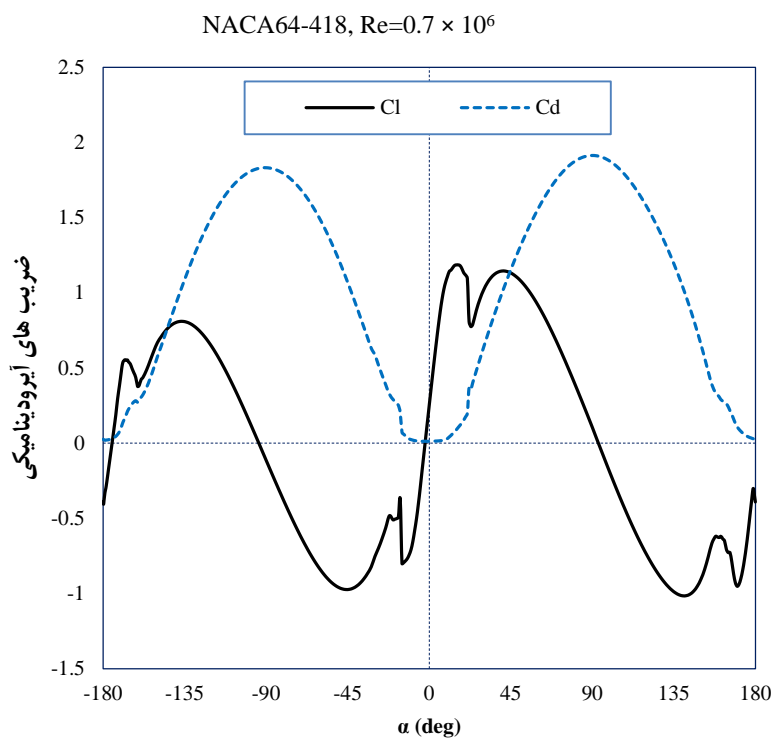
این ضریب‌ها بخشی از مواد کار مدل‌سازی توربین‌های بادی بر اساس آئرو دینامیک می‌باشند.



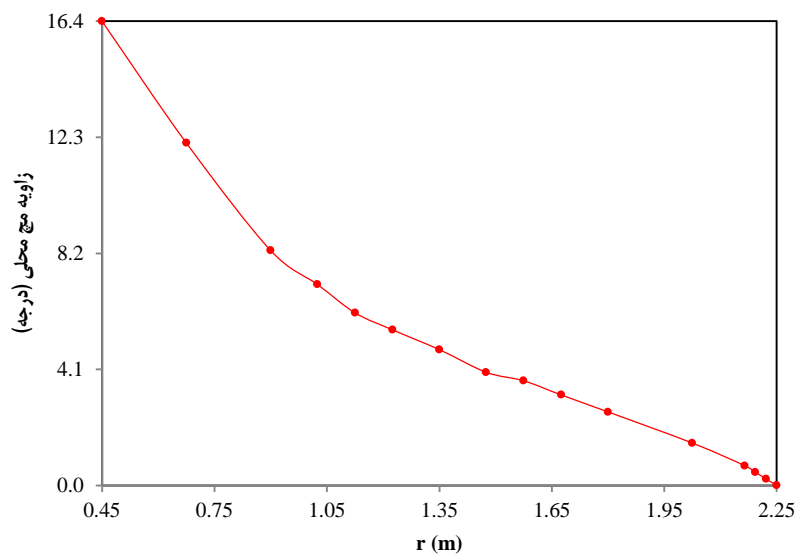
شکل ۳-۶ تغییرات ضرایب برآ و پسا از سمت مرکز دوران هوابر اول، DU91-W2-250 [۱۵].



شکل ۳-۷ تغییرات ضرایب برآ و پسا از سمت مرکز دوران هوابر دوم، RISØ A1-21 [۱۵].

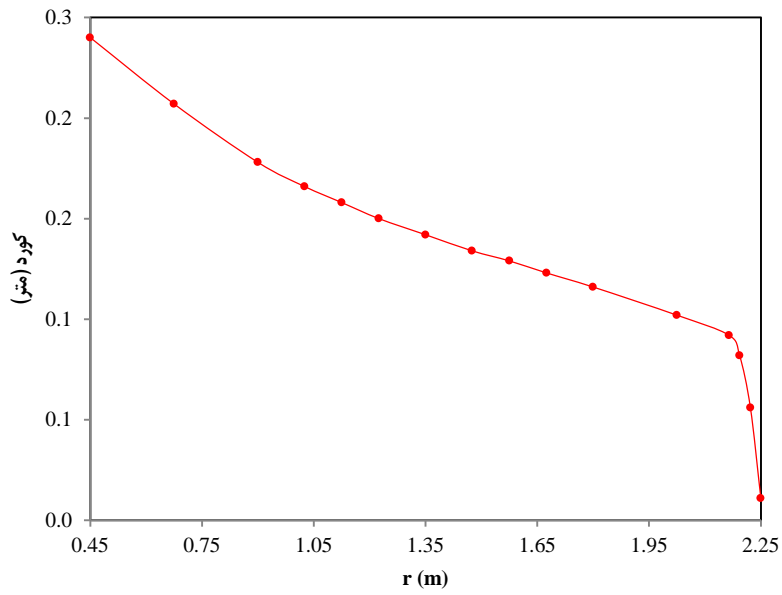


شکل ۳-۸ تغییرات ضرایب برآ و پسا از سمت مرکز دوران هوا بر سوم، NACA64-418 [۱۵].  
 تابع‌های تغییر زاویه گام محلی<sup>۱</sup> و اندازه کورد<sup>۲</sup> در طول پره به ترتیب مطابق با شکل ۳-۹ و شکل ۳-۱۰ توسط گروه طراحی پره در نظر گرفته شد.



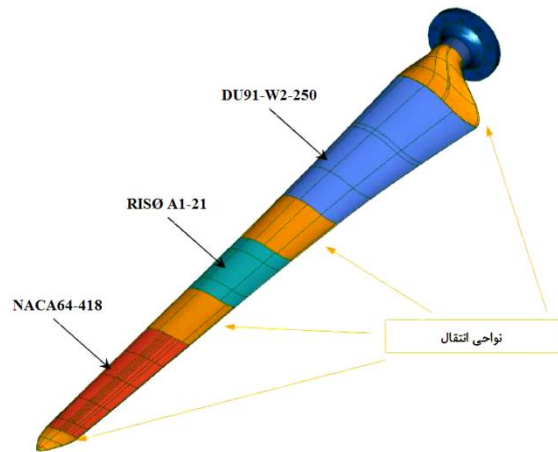
شکل ۳-۹ تغییرات زاویه گام محلی در طول پره توربین بادی [۱۵].

<sup>1</sup> Local Twist Angle  
<sup>2</sup> Chord



شکل ۳-۱۰ تغییرات کورد در طول پره توربین [۱۵].

در شکل ۳-۱۱ نحوه چیدمان سه هواپر انتخاب شده روی مدل سه بعدی پره بر اساس توابع طراحی شده برای زاویه گام محلی و کورد نشان داده شده است.



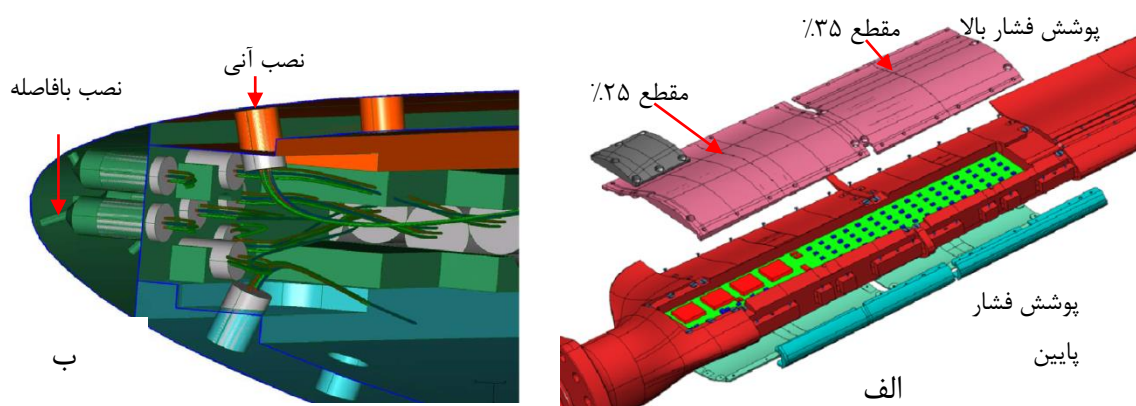
شکل ۳-۱۱ پره روتور توربین طراحی شده توسط گروه طراحی پره به ترتیب تفکیک هواپرهای پره.

### ۳-۱-۲ ابزارهای اندازه گیری پره و روتور

پیش از ارائه نقشه های صنعتی پره این توربین بادی به گروه ساخت، با مشورت با گروه طراحی

ابزارهای اندازه‌گیری آزمون، طراحی شده توسط دانشگاه صنعتی دلف<sup>۱</sup> هلند و مرکز هوافضای هلند (ان-ال-آر)<sup>۲</sup>، نوع حسگرها، تعداد آن‌ها و محل نصب آن‌ها روی پره تعیین شد [۱۶]. همچنین تصمیم بر آن شد که سیگنال‌های خروجی از حسگرها در یک مدار درون پره هماهنگ شوند تا انتقال داده‌ها به سامانه تحصیل داده راحت‌تر صورت گیرد شکل ۳-۱۲ الف. لذا علاوه بر در نظر گرفتن پایه حسگرها روی پره‌ها، فضایی نیز درون هر پره جهت نصب مدار هماهنگ‌کننده در نظر گرفته شد و در نهایت نقشه‌های صنعتی آن آماده و به گروه ساخت و تولید سپرده شد.

برای اندازه‌گیری توزیع فشار و نهایتاً محاسبه تکانه‌های وارده بر پره توربین از آن، ۱۴۸ حسگر اندازه‌گیری فشار، ساخته‌شده توسط شرکت کولیت<sup>۳</sup>، در پنج مقطع مختلف هر پره نصب شدند شکل ۳-۱۲ ب. این مقاطع به ترتیب در فاصله‌های ۲۵ درصد، ۳۵ درصد، ۶۰ درصد، ۸۲ درصد و ۹۲ درصد طول پره<sup>۴</sup> از طرف مرکز دوران انتخاب شدند.



شکل ۳-۱۲ الف: ۲۵ و ۳۵ درصد فاصله از ابتدای پره، و همچنین فضای موجود درون پره را نشان می‌دهد، ب: حسگرهای فشار کولیت که در لبه جلوی هوابر بافاصله<sup>۵</sup> و در پهناوی هوابر به‌صورت آنی<sup>۶</sup> نصب‌شده‌اند را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Delf Technical University

<sup>2</sup> National Aerospace Laboratory of Netherland (NLR)

<sup>3</sup> Kulite (XCQ-95-062-5A)

<sup>4</sup> Spanwise

<sup>5</sup> Cavity mounted

<sup>6</sup> Flash mounted

بر ساق هر پره<sup>۱</sup> دو عدد کرنش سنج نصب شده است که ممان‌های وارده در راستای کورد اولین هواپر<sup>۲</sup> و عمود بر آن<sup>۳</sup> را در هر پره اندازه‌گیری کنند. دو حسگر شتاب سنج نیز که بر نوک یکی از پره-ها نصب شده، جهت اندازه‌گیری شتاب در راستای جریان باد و عمود بر آن (در صفحه دوران روتور) استفاده شده است. یک حسگر دما که در فاصله ۲۵ درصد در طول پره نصب شده برای اندازه‌گیری دما در صفحه روتور استفاده شده است. با نصب این مجموعه از حسگرها و همچنین وسایل اندازه‌گیری می‌توان به راحتی سرعت جریان باد، مقدار نیروی محوری<sup>۴</sup> و سمتی<sup>۵</sup> وارد شده به پره توربین بادی و در نهایت توان خروجی از توربین بادی را محاسبه کرد.

داده‌های عملکرد توربینی در محدوده سرعت ۷ متر بر ثانیه تا ۲۴ متر بر ثانیه، را در ۱۱ سرعت مختلف و سایر پارامترها در سه سرعت ۱۰، ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه اندازه‌گیری و ثبت شدند. با توجه به اینکه توربین برای سرعت مشخصه ۱۵ متر بر ثانیه طراحی شده<sup>۶</sup> بود، لذا سرعت پایین تر ۱۰ متر بر ثانیه برای حالت تلاطم<sup>۷</sup> و سرعت بالاتر ۲۴ متر بر ثانیه برای حالت ایست(استال)<sup>۸</sup> توربین در نظر گرفته شد.

### ۲-۳ نظریه تکانه اجزاء پره

نظریه تکانه اجزاء پره (بی-ای-ام) برای توربین‌های بادی از مساوی قرار دادن دو روش به دست می‌آید که هر روش به گونه‌ای بیانگر نحوه عملکرد توربین است. روش اول که تعادل تکانه نامیده می‌شود، به کمک اعمال قانون برنولی بر تونل جریان روتور، نیروی محوری و به کمک اعمال تعادل تکانه بر روتور، گشتاور اعمالی روی توربین تخمین زده می‌شود. روش دوم که اجزاء پره نامیده می‌شود، از

---

<sup>1</sup> Shank of blade

<sup>2</sup> Edgewise

<sup>3</sup> Flatwise

<sup>4</sup> Axial force

<sup>5</sup> Tangential force

<sup>6</sup> Design State

<sup>7</sup> Turbulent State

<sup>8</sup> Stall State

توزیع داده‌های هوا بر پره توربین استفاده می‌کند و با تقسیم پره به اجزاء محدود، گشتاور و نیروی محوری اعمالی روی روتور تخمین زده می‌شود. با برابر قرار دادن نیروی محوری حاصل از روش اول و دوم، معادله تخمین شاخص محوری توربین به دست می‌آید و با برابر قرار دادن گشتاورهای حاصل از روش اول و دوم، معادله تخمین شاخص دورانی توربین محاسبه می‌شود. این دو معادله، اساس نظریه بی-ای-ام برای توربین‌های بادی می‌باشند. این نظریه توسط گلارت توسعه یافت [۱۷]. در این پایان‌نامه از منابع پروتون و همکاران، [۱۸]، و هانسن، [۱۹]، جهت پایه‌ریزی مدل اولیه بی-ای-ام این پایان‌نامه استفاده شده است.

### ۳-۲-۱ نظریه تکانه

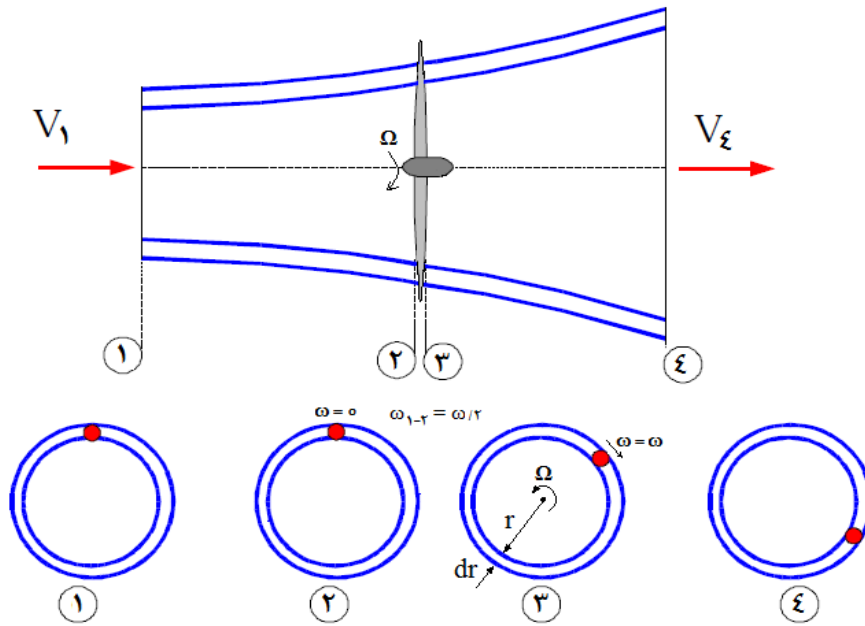
#### ۳-۲-۱-۱ نیروی محوری

با برخورد باد به روتور توربین بادی، در پشت توربین جریانی از هوا به شکل سایکلون<sup>۱</sup> تولید می‌شود، که از این به بعد پسباد<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. شکل ۳-۱۲-۳-۱۳ نمایش جریان محوری و معرفی چهار مقطع یک، دو، سه و چهار جهت اعمال قانون برنولی و اجزاء حلقوی دوار جهت اعمال تعادل تکانه است. با عبور جریان هوا از روتور، انرژی از هوا جذب می‌شود که نتیجه آن کاهش فشار هوای پشت توربین است [۱۹].

---

<sup>1</sup> Cyclone  
<sup>2</sup> wake





شکل ۳-۱۳ نمایش مقطع طولی تونل جریان جهت اعمال قانون برنولی و اجزاء حلقوی دوار جهت اعمال نظریه تعادل تکانه.

فرض بر آن است که در شکل ۳-۱۳،  $V_2=V_3$  و  $p_1=p_4$  است. همچنین فرض شده است که سیال بین مقطع‌های یک تا دو و بین سه تا چهار فاقد اصطکاک داخلی و از اثر جاذبه زمین صرف نظر شده است. بنابراین قانون برنولی قابل اعمال شدن بر این دو ناحیه است. بعد از ساده شدن این معادله به شکل معادله (۳-۱) درمی‌آید.

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) \quad (۳-۱)$$

با توجه به اینکه نیرو محوری  $dF_x$  از ضرب فشار در مساحت مقطع به دست می‌آید، بنابراین:

$$dF_x = (p_2 - p_3) dA \quad (۳-۲)$$

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) dA \quad (۳-۳)$$

با تعریف شاخص محوری  $a$  به صورت زیر:

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (۳-۴)$$

و با فرض اینکه سرعت باد  $V=V_1$  باشد، همچنین می‌تواند به صورت معادله (۳-۵) نشان داده

شود. با فرض اینکه سرعت ناحیه روتور از میانگین سرعت بالادستی و پایین‌دستی به دست می‌آید،

بنابراین معادله (۵-۳) بعد از انجام اعمال جبری به شکل معادله (۶-۳) درمی آید:

$$V_2 = V(1 - a) \quad (۵-۳)$$

$$V_4 = V(1 - 2a) \quad (۶-۳)$$

با جایگزینی معادله (۶-۳) در معادله (۳-۳)، داریم:

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho V^2 (4a(1 - a)) 2\pi r dr \quad (۷-۳)$$

ماکزیمم ضریب توان یک توربین ۰/۵۹۳ است، که به ازای شاخص محوری ۰/۳۳۳ به دست می آید که حد بتز<sup>۱</sup> نامیده می شود [۲۰]. همچنین توان بیشینه استحصالی از یک دیسک که هم قطر با تونل جریان است، نمی تواند بیشتر از ۵۹/۳٪ توان جنبشی قابل تبدیل جریان باشد [۲۱] و از طرفی چون این مقدار شامل اتلاف ناشی از دوران پسباد پشت دیسک نیست، بنابراین بیان دیگری از حد بتز است [۲۲].

### ۳-۲-۱-۲ اجزاء حلقوی دوار

المان حلقوی دوار در معرض تونل جریان باد در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است. با فرض بقاء تکانه زاویه ای در تونل جریان بین چهار مقطع نشان داده شده و از طرفی با توجه قوانین فیزیک پایه داریم:

$$I = mr^2 = \text{تکانه اینرسی} \quad (۸-۳)$$

$$L = I\omega = \text{تکانه زاویه ای} \quad (۹-۳)$$

$$T = \frac{dL}{dt} = \text{گشتاور} \quad (۱۰-۳)$$

$$T = \frac{d(I\omega)}{dt} = \frac{d(mr^2\omega)}{dt} = \frac{dm}{dt} r^2 \omega \quad (۱۱-۳)$$

حال چنانچه بخواهیم گشتاور را برای جزء حلقوی شکل ۳-۱۳ با ابعاد خیلی کوچک در نظر

بگیریم، داریم:

<sup>1</sup> Betz limit

$$dT = d\dot{m}\omega r^2 \quad (12-3)$$

از طرفی برای خود جزء دوار مقدار جزء دبی جرمی  $d\dot{m}$  شکل ۳-۱۳ داریم:

$$d\dot{m} = \rho AV_2 \quad (13-3)$$

$$d\dot{m} = \rho 2\pi r dr V_2 \quad (14-3)$$

$$dT = \rho 2\pi r dr V_2 \omega r^2 \quad (15-3)$$

با تعریف شاخص دورانی  $a'$  به صورت زیر داریم:

$$\dot{a} = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (16-3)$$

بنابراین با جایگزینی معادله‌های (۳-۵) و (۳-۱۶) در معادله (۳-۱۵) داریم:

$$dT = 4\dot{a}(1-a)\rho V\Omega r^3 \pi dr \quad (17-3)$$

بنابراین، نظریه تکانه معادله‌های نیروی محوری (معادله ۱-۷) و گشتاور اعمالی (معادله ۱-۱۷) بر

جزء حلقوی روتور محاسبه شد.

### ۳-۲-۲ نظریه اجزاء پره

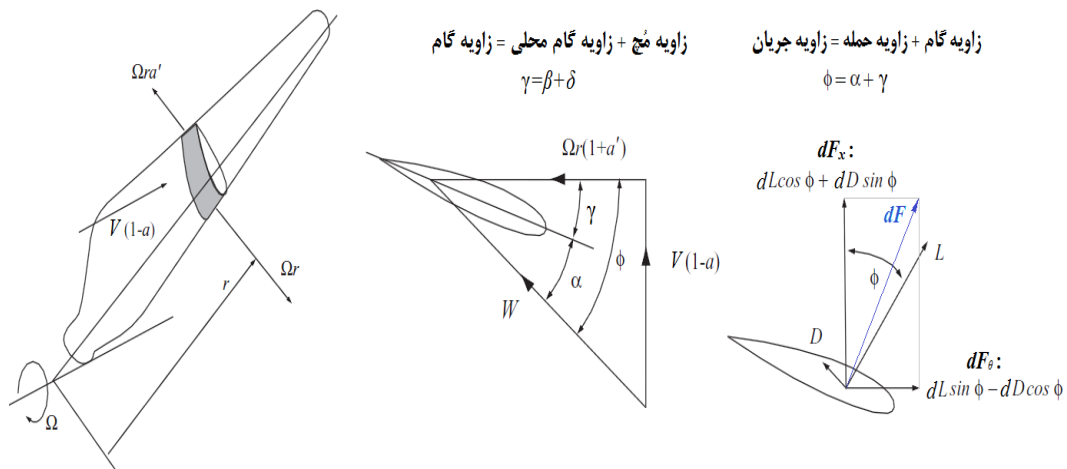
نظریه تکانه اجزاء پره روی دو فرض استوار است:

- هیچ‌گونه درهم کنش آئرو دینامیکی<sup>۱</sup> بین اجزاء مختلف پره وجود ندارد.
- نیروهای وارده بر اجزاء پره تنها ناشی از نیروهای برآ و پسا هستند.

در شکل ۳-۱۴ با فرض اینکه که یک پره به تعداد محدودی جزء تقسیم شده است. به دلیل داشتن سرعت سمتی متفاوت،  $r\Omega$ ، طول کورد متفاوت،  $c$ ، و زاویه گام متفاوت،  $\gamma$ ، هر جزء با جریان متفاوتی از سیال برخورد می‌کند. در نظریه اجزاء پره، جریان روی هر جزء به صورت جداگانه محاسبه می‌شود و سپس با انتگرال‌گیری در طول پره، عملکرد آن محاسبه می‌گردد.

در جزء مشخص شده در شکل ۳-۱۴، مؤلفه محوری سرعت نسبی هوا بر به جریان هوا،  $V(1-a)$ ، مؤلفه سمتی سرعت نسبی هوا بر به جریان هوا،  $\Omega r(1+a')$  می‌باشند.

<sup>1</sup> Aerodynamic Interaction



شکل ۳-۱۴ نمایش اجزاء پره و نحوه سازمان‌دهی ضرایب برآ و پسای هوا بر جهت محاسبه جزء نیروی محوری و جزء گشتاور آن [۱۳].

### ۳-۲-۱-۲-۳ سرعت جریان نسبی

با توجه به اینکه داده‌های هوا بر در شرایطی که هوا بر ثابت است و تنها سیال حرکت مطلق دارد اندازه‌گیری می‌شوند، بنابراین با این فرض که می‌توان سرعت نسبی بین هوا بر و جریان سیال را اساس کار قرارداد، در محاسبه‌های پره توربین‌های بادی از این داده‌ها استفاده می‌شود.

در عمل، سیال هنگام عبور از روی هوا بر، مقداری برگشت دارد، بنابراین جهت محاسبه دقیق‌تر عملکرد هوا بر، میانگینی از جریان سیال ورودی و خروجی برای تخمین روتور به کار برده می‌شود [۲۳].

جریان اطراف روتور در مقطع دوم شکل ۳-۱۳، آغاز می‌شود و در مقطع سوم پایان می‌یابد. در ورودی به روتور، جریان سیال نمی‌چرخد و در خروجی روتور، سیال با سرعت زاویه‌ای  $\omega$  دوران می‌کند. بنابراین سرعت زاویه‌ای جریان دورانی سیال درون روتور  $\omega/2$  فرض می‌شود. با توجه به اینکه روتور با سرعت زاویه‌ای  $\Omega$  دوران می‌کند، بنابراین میانگین جریان سیالی که روتور با آن مواجه می‌شود برابر  $r\Omega + r\frac{\omega}{2}$  است. بنابراین با توجه به معادله (۳-۱۶) می‌توان آن را به صورت معادله (۳-۱۸) نوشت که در شکل معادله ۳-۸ نیز به تصویر کشیده شده است.

$$r\Omega + \frac{\omega r}{2} = r\Omega(1 + \dot{a}) \quad (18-3)$$

همچنین با توجه به معادله (3-5) و شکل معادله 1-8 برای معادله زاویه جریان داریم:

$$\tan \phi = \frac{V(1-a)}{r\Omega(1+\dot{a})} \quad (19-3)$$

زاویه جریان،  $\phi$ ، از هر جزء به جزء بعدی تغییر می‌کند. نسبت سرعت نوک محلی<sup>1</sup>،  $\lambda_r$ ، نیز

به صورت معادله (3-20) تعریف می‌شود:

$$\lambda_r = \frac{r\Omega}{V} \quad (20-3)$$

بنابراین معادله زاویه جریان (3-19) به شکل معادله (3-21) درمی‌آید:

$$\tan \phi = \frac{(1-a)}{\lambda_r(1+\dot{a})} \quad (21-3)$$

همچنین با توجه به شکل (3-2)، رابطه مثلثاتی (3-22) برای سرعت نسبی،  $W$ ، به دست می‌آید:

$$W = \frac{V(1-a)}{\sin \phi} \quad (22-3)$$

### ۳-۲-۲-۲ اجزاء پره

با توجه به اینکه نیروهای برآ و پسا به ترتیب در راستای عمود و موازی با سرعت نسبی تعریف

می‌شوند، بنابراین برای هر جزء پره با توجه به شکل (3-2) داریم:

$$dF_\theta = dL \sin \phi - dD \cos \phi \quad (23-3)$$

$$dF_x = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad (24-3)$$

آنجا که  $dL$  و  $dD$  به ترتیب جزء نیروهای برآ و پسا روی جزء هواپر پره هستند. این مقادیر از

ضرایب آئرو دینامیکی برآ،  $C_l$ ، و پسا،  $C_d$ ، مطابق زیر محاسبه می‌گردند:

$$dL = C_l \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (25-3)$$

$$dD = C_d \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (26-3)$$

<sup>1</sup> Local Tip Speed Ratio

تمامی هوابرهای مورد استفاده در توربین بادی مورد آزمایش، در مقادیر پایین زاویه‌های حمله، می‌توانند نیروی برآ قابل توجهی با نیروی پسای بسیار پایین ایجاد کنند. اما بعد از عبور از این ناحیه، ناگهان افت شدیدی در نیروی برآ و افزایش شدید در نیروی پسا رخ می‌دهد که به ناحیه ایست<sup>۱</sup> شناخته شده است.

چنانچه تعداد پره روتور توربین B باشد، بنابراین با ترکیب معادله‌های (۲۳-۳) تا (۲۶-۳) باهم

داریم:

$$dF_x = B \frac{1}{2} \rho W^2 [c_l \cos(\phi) + c_d \sin(\phi)] c(r) dr \quad (۲۷-۳)$$

$$dF_\theta = B \frac{1}{2} \rho W^2 [c_l \sin(\phi) - c_d \cos(\phi)] c(r) dr \quad (۲۸-۳)$$

گشتاور روی هر جزء هوابر،  $dT$ ، به سادگی از حاصل ضرب جزء نیروی سمتی  $dF_\theta$  در شعاع به

دست می‌آید. بنابراین داریم برای جزء گشتاور داریم:

$$dT = B \frac{1}{2} \rho W^2 [c_l \sin(\phi) - c_d \cos(\phi)] c(r) r dr \quad (۲۹-۳)$$

تأثیر نیروی پسا در معادله‌های به دست آمده مشخص می‌کند که با افزایش نیروی پسا، بarmحوری

وارد بر روتور افزایش می‌یابد و گشتاور تولیدی و در نهایت توان تولیدی روتور کاهش می‌یابد. چنانچه

سرعت نسبی  $W$  بر حسب شاخص محوری از معادله (۲۲-۳) و زاویه جریان از معادله (۱۹-۳) جایگزین

شوند و ضریب پُری محلی نیز تعریف شود، معادله‌های (۲۷-۳) و (۲۹-۳) به شکل مفیدتری ظاهر

می‌شوند. بنابراین داریم:

$$dF_x = \sigma \pi r \frac{V^2 (1-a)^2}{\sin^2(\phi)} [c_l \cos(\phi) + c_d \sin(\phi)] r dr \quad (۳۰-۳)$$

$$dT = \sigma \pi r \frac{V(1-a)r\Omega(1+a)}{\sin(\phi) \cos(\phi)} [c_l \sin(\phi) - c_d \cos(\phi)] r^2 dr \quad (۳۱-۳)$$

که در این معادله‌ها، ضریب پُری محلی،  $\sigma'$ ، از رابطه (۳۲-۳) به دست می‌آید:

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (۳۲-۳)$$

<sup>1</sup> Stall Region

### ۳-۲-۲-۳ معادله‌های تکانه اجزاء پره

بنا بر معادله‌های بحث شده در بخش‌های پیشین، اکنون چهار معادله نهایی برای جزء نیروی محوری و جزء گشتاور استخراج شدند. این معادله‌ها مجدداً در زیر آورده شده‌اند. دو معادله‌ای که از نظریه تکانه به دست آمدند به صورت زیر محاسبه شدند:

$$dF_x = \rho V^2 (4a(1-a)) \pi r dr \quad (۳۳-۳)$$

$$dT = 4a'(1-a) \rho V \Omega r^3 \pi dr \quad (۳۴-۳)$$

دو معادله دیگر از نظریه اجزاء پره برای جزء نیروی محوری و جزء گشتاور بر حسب ضرایب آئرو دینامیکی برآ و پسا به صورت زیر به دست آمدند:

$$dF_x = \sigma' \pi \rho \frac{V^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) r dr \quad (۳۵-۳)$$

$$dT = \sigma' \pi \rho \frac{V(1-a)r\Omega(1+a')}{\sin \phi \cos \phi} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r^2 dr \quad (۳۶-۳)$$

برای محاسبه عملکرد روتور، معادله‌های (۳۳-۳) و (۳۴-۳) باید برابر معادله‌های (۳۵-۳) و (۳۶-۳) قرار گیرند. بنابراین، با انجام اعمال جبری و ساده کردن دو طرف تساوی‌ها، معادله‌های مفید (۳۷-۳) و (۳۸-۳) به عنوان معادله‌های نظریه تکانه اجزاء پره به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{1-a}{a} = \frac{4 \sin^2(\phi)}{\sigma(c_l \cos(\phi) + c_d \sin(\phi))} \quad (۳۷-۳)$$

$$\frac{1+a'}{a'} = \frac{4 \sin(\phi) \cos(\phi)}{\sigma(c_l \sin(\phi) - c_d \cos(\phi))} \quad (۳۸-۳)$$

معادله‌های (۳۷-۳) و (۳۸-۳) اساس نظریه بی-ای-ام را تشکیل می‌دهند که می‌توان به کمک آن‌ها، به ترتیب شاخص محوری و شاخص دورانی را با استفاده از روش‌های عددی محاسبه کرد. بعد از محاسبه شاخص‌های محوری و دورانی، با استفاده از انتگرال‌گیری از معادله‌های (۳۵-۳) و (۳۶-۳) می‌توان نیروی محوری و ضریب توان برای توربین مورد نظر را تخمین زد.

و بنابراین برای تخمین توان داریم:

$$dP = \Omega dT \text{ جزء توان تولید شده} \quad (۴۱-۳)$$

$$P = \int_{r_h}^R dP = \int_{r_h}^R \Omega dT \quad (۴۲-۳)$$

که در این معادله،  $dT$  از معادله (۳-۳۶) جایگزین می‌گردد.

پس از پیاده‌سازی نظریه تکانه اجزا و به دست آوردن روابط موردنیاز جهت محاسبه توان و نیروهای آئرودینامیکی توربین بادی، می‌توان جهت بالا بردن دقت و نزدیک کردن نتایج خروجی از این نظریه با نتایج واقعی، به مطالعه رفتارهای فیزیکی توربین بادی در شرایط مختلف پرداختند، و ویرایش‌هایی به این فرایند اضافه کرد.

### ۳-۲-۳ تصحیح اتلاف پرنتل

یک روتور واقعی شامل تعداد مشخصی پره است. در نوک این پرها، گردابه‌هایی به وجود می‌آید که به درون پسباد پشت روتور گسترش می‌یابد و اتلاف انرژی را به همراه دارد [۱۸، ۱۹، ۲۴]. تعداد پرها در نظریه بی-ای-ام تنها به صورت یک ضریب ظاهر می‌شود و قادر به تفکیک و تخمین اتلاف ناشی از محدود بودن تعداد پرها نیست. بنابراین نتیجه‌های به دست آمده، برای گردنده‌ای است که تعداد پرها بیش نامحدود و اتلاف توان در نوک پره وجود ندارد. پرنتل توانست روشی را ارائه دهد که این اتلاف را در بی-ای-ام پیش‌بینی می‌کند [۲۵]. این ضریب اصلاح،  $Q$ ، بین صفر تا یک تغییر می‌کند و باعث کاهش مقدار بار گسترده در طول پره می‌گردد که از معادله (۳-۴۴) زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \text{EXP} \left\{ - \left( \frac{B(R-r)}{2r \sin \phi} \right) \right\} \right] \quad (۴۴-۳)$$

مقدار خروجی از تابع  $\cos^{-1}$  بایستی به صورت رادیان در معادله قرار گیرد. این ضریب در معادله‌های حاصله از نظریه تکانه، یعنی معادله‌های (۳-۳۳) و (۳-۳۴) ضرب می‌شود و آن‌ها را اصلاح می‌کند. بنابراین داریم:

$$dF_x = Q \rho V^2 (4a(1-a)) \pi r dr \quad (۴۵-۳)$$



$$dT = Q4a(1-a)\rho V\Omega r^3\pi dr \quad (46-3)$$

سپس با جایگزینی مجدد این معادله‌ها در فرآیند محاسبه معادله‌های پایه نظریه تکانه اجزاء پره،

داریم:

$$\frac{1-a}{a} = \frac{4Q\sin^2(\phi)}{\sigma(c_l \cos(\phi) + c_d \sin(\phi))} \quad (47-3)$$

$$\frac{1+a}{a} = \frac{4Q\sin(\phi)\cos(\phi)}{\sigma(c_l \sin(\phi) - c_d \cos(\phi))} \quad (48-3)$$

### ۴-۲-۳ نظریه تصحیح گلارت

وقتی که شاخص محوری بزرگ‌تر از ۰/۴ می‌شود، نظریه تکانه با شکست مواجه می‌شود. روابط

تجربی زیادی را می‌توان بین ضریب نیروی محوری و شاخص محوری به کمک اندازه‌گیری در آزمون-

های تجربی تعریف کرد [۱۹]. رابطه نشان داده‌شده در معادله (۵۱-۳) توسط اسپرا پیشنهاد شده است

[۱۴].

$$C_t = \begin{cases} 4Qa(1-a) & , a \leq a_c \\ 4Q(a_c^2 + (1-2a_c)a) & , a > a_c \end{cases} \quad (51-3)$$

با تعریف ضریب نیروی محوری محلی روی حجم یک جزء حلقوی، که از تقسیم معادله (۳۶-۳)

بر مقدار بیشینه قابل انتظار نیروی محوری روی جزء،  $\frac{1}{2}\rho V^2 2\pi r dr$ ، به دست می‌آید، جهت محاسبه

شاخص محوری، معادله (۴۷-۳) به معادله (۵۲-۳) تغییر می‌کند و مجهول معادله (۵۲-۳) از معادله

(۵۳-۳) محاسبه می‌شود [۲۶].

$$a = \begin{cases} (K+1)^{-1} & , a \leq a_c \\ \frac{1}{2} \left( 2 + K(1-2a_c) - \sqrt{(K(1-2a_c+2))^2 + 4(ka_c^2 - 1)} \right) & , a > a_c \end{cases} \quad (52-3)$$

$$K = \frac{4Q\sin^2(\phi)}{\sigma(c_l \cos(\phi) + c_d \sin(\phi))} \quad (53-3)$$

شاخص دورانی نیز همچنان از معادله (۴۸-۳) محاسبه می‌شود. اسپرا در پژوهش خود مقدار

شاخص محوری در نقطه جدا شدن،  $a_c$ ، را برابر  $0.2$  در نظر گرفت و توانست توافق بیشتری بین داده-های نظری و تجربی پیدا کند [۲۶]. شاخص محوری بحرانی در این تحقیق در ابتدا با رسم مقدار ضریب توان در مقابل شاخص محوری و بررسی دامنه انتگرال‌گیری بار گسترده محوری روی پره، مورد بررسی قرار گرفت و برای آزمون مکزیکو در شرایط محیطی مورد بحث، مقدار  $0.31$  به‌عنوان شاخص بحرانی مطلوب برای آن به دست آمد.

### ۳-۲-۵ نظریه اصلاح ضریب‌های هوابر

زمانی که توربین بادی در سرعت جریان باد بالا و یا در شرایط یابو قرار می‌گیرد، قسمت قابل توجه از پره توربین بادی در ناحیه واماندگی عمل می‌کند. این مسئله ارتباط مستقیم با جدایش جریان باد بر روی سطح پره دارد. از طرفی داده‌های دوبعدی هوابرهای<sup>۱</sup> مورد استفاده در پره توربین‌های بادی، که شامل ضرایب برآ و پسا هستند، به کمک آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری می‌شوند. اما استفاده از داده‌های دوبعدی هوابرها برای پره در حال چرخش نتایج مطلوبی را نشان نخواهد داد. یکی از دلایل آن، تأخیر در واماندگی است که به خاطر چرخ در فضای سه‌بعدی پره رخ می‌دهد.

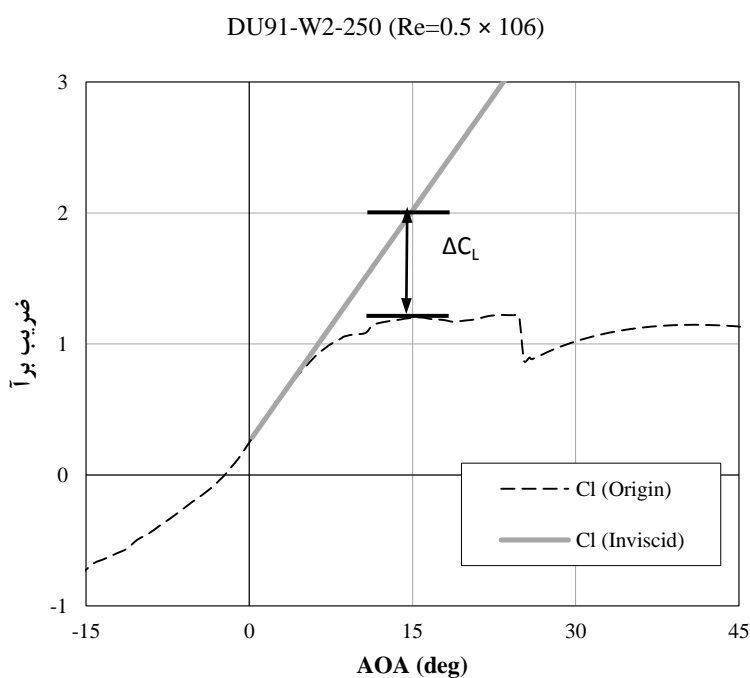
طی سال‌های زیادی، مهندسان و طراحان پره توربین‌های بادی از هوابرهای ناکا (ثابت شده توسط دانشگاه صنعتی دلف هلند)، از قبیل NACA 44xx و NACA 63-4xx استفاده می‌کردند. با این وجود از آغاز سال ۱۹۹۰ هوابرهای مناسب متفاوتی برای پره توربین طراحی و استفاده شده‌اند. داده‌های هوابرها در محاسبه توان و نیروی محوری توربین‌های بادی به کمک نظریه بی-ای-ام، استفاده می‌شوند. چون اندازه‌گیری داده‌های سه‌بعدی هزینه بالایی دارد بنابراین پژوهشگران روش‌هایی را جهت اصلاح داده‌های دوبعدی هوابر به داده‌های سه‌بعدی هوابر استفاده کرده‌اند که در مراجع [۲۷-۲۹] یافت می‌شوند. اسنیل در سال ۱۹۹۳ نظریه خود را به صورت معادله (۳-۵۴) بیان کرد که در آن به اصلاح ضرایب برآ در هوابر پرداخته شده است.

<sup>1</sup> 2D airfoil data

$$C_{l,3D} = C_{l,2D} + J \left(\frac{c}{r}\right)^H (C_{l,inv} - C_{l,2D}) \quad (54-3)$$

در این تحقیق به کمک این معادله داده‌های دوبعدی ضریب برآ،  $C_{l,2D}$ ، را به داده‌های سه‌بعدی،  $C_{l,3D}$ ، تبدیل شدند.

مجهول‌های معادله (54-3) شامل سه مجهول است.  $J$  ضریب ثابتی است که بین ۲ تا ۳ تغییر می‌کند،  $H$  ضریب ثابتی است که بین ۱ تا ۲ تغییر می‌کند و  $C_{l,inv}$  ضریب برآ است زمانی که سیال کاملاً غیر چسبنده در نظر گرفته شود که از دیدگاه ریاضی، از ادامه خط مماس بر ناحیه خطی منحنی برآ در زاویه‌های حمله پایین به دست می‌آید. به‌طور کلی،  $C_{l,inv} - C_{l,2D}$  اختلاف بین خط مماس بر ناحیه خطی منحنی برآ با خود منحنی است شکل ۳-۱۵ که این مقدار در ناحیه ایست هوابر افزایش می‌یابد [۱۸،۲۹].

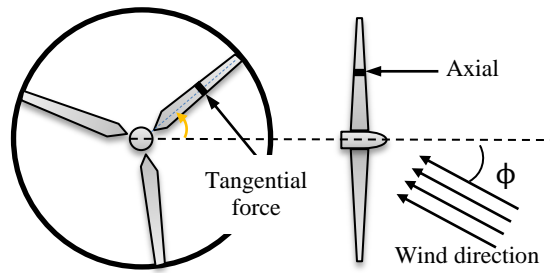


شکل ۳-۱۵ چگونگی اصلاح ضرایب برآ در این تحقیق.

### ۳-۲-۶ موقعیت یاو

زمانی که جهت وزش باد به‌صورت عمود به صفحه روتور توربین بادی برخورد نکند توربین بادی در موقعیت زاویه یاو قرار دارد شکل ۳-۱۶. در این حالت میزان نیروهای اعمالی به پره، ضریب شاخص

محوری و زاویه جریان با توجه به زاویه قرارگیری پره در صفحه دایروی روتور تغییر خواهد کرد.



شکل ۳-۱۶ جهت وزش باد و جهت نیروهای محوری و سمتی در زاویه یاو در این شرایط زاویه جریان برابر است با:

$$\phi = \text{atan} \left( \frac{V_1 \cos(\phi_y)(1-a)}{[r\Omega - v_1 \sin(\theta) \cos(\phi_y)](1+a')} \right) \quad (55-3)$$

### ۳-۲-۷ ضریب تصحیح گردابه مورب<sup>۱</sup>

در حالت یاو پسباد ایجادشده توسط توربین در پشت آن با محور روتور هم‌مرکز نمی‌باشند. در نظریه بی-ای-ام (جریان به صورت متقارن به صفحه توربین بادی برخورد می‌کند. در نتیجه برای اعمال صحیح تأثیر ضریب گردابه مورب نیازمند تصحیح ضریب شاخص محوری است. روابط زیادی برای تصحیح ضریب گردابه مورب وجود دارد در این گزارش از ضریب تصحیح ارائه شده توسط پیت و پتر (معادله ۳-۵۶) استفاده خواهد شد [۳۰, ۳۱].

$$a_{\text{cor}} = a \left[ 1 + \frac{15}{35} \frac{r}{R} \tan \left( \frac{\phi_y}{2} \right) \cos(\theta) \right] \quad (56-3)$$

### ۳-۲-۸ پیاده‌سازی نظریه

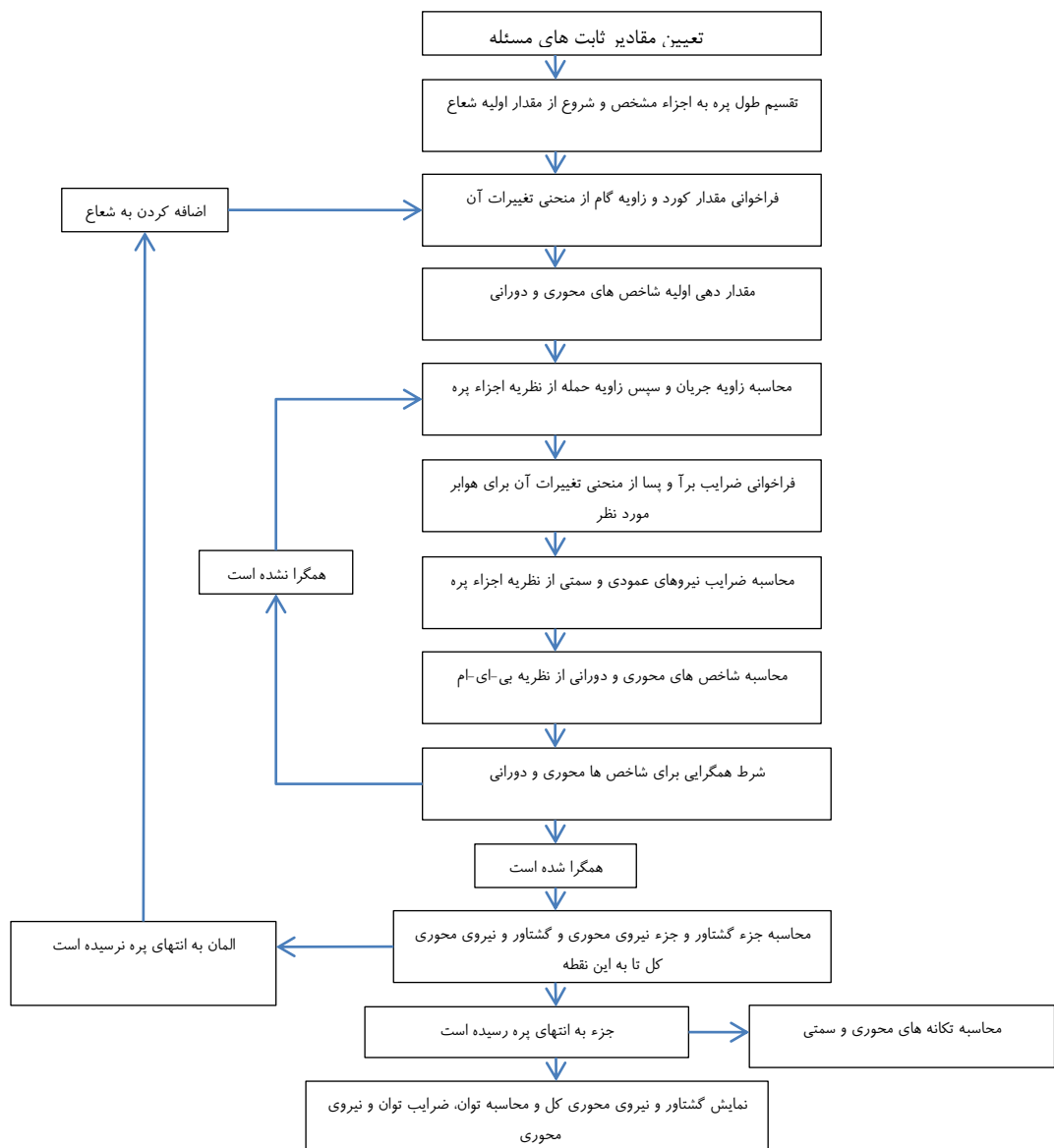
نظریه بی-ای-ام در شرایط بدون زاویه یاو و تحت زاویه یاو، مطابق با معادلات بحث شده فوق به زبان C نوشته شد و به کمک کامپایلر GCC کامپایل شد و نتایج استخراج گردید شکل ۳-۱۷ الگوریتم کلی پیاده‌سازی نظریه بی-ای-ام و شکل ۳-۱۸ الگوریتم کلی پیاده‌سازی نظریه بی-ای-ام بر اساس موقعیت زاویه یاو طراحی شده است.

در این الگوریتم ابتدا مقطعی از پره که قرار است نیروها محاسبه شوند معین می‌شود. سپس با

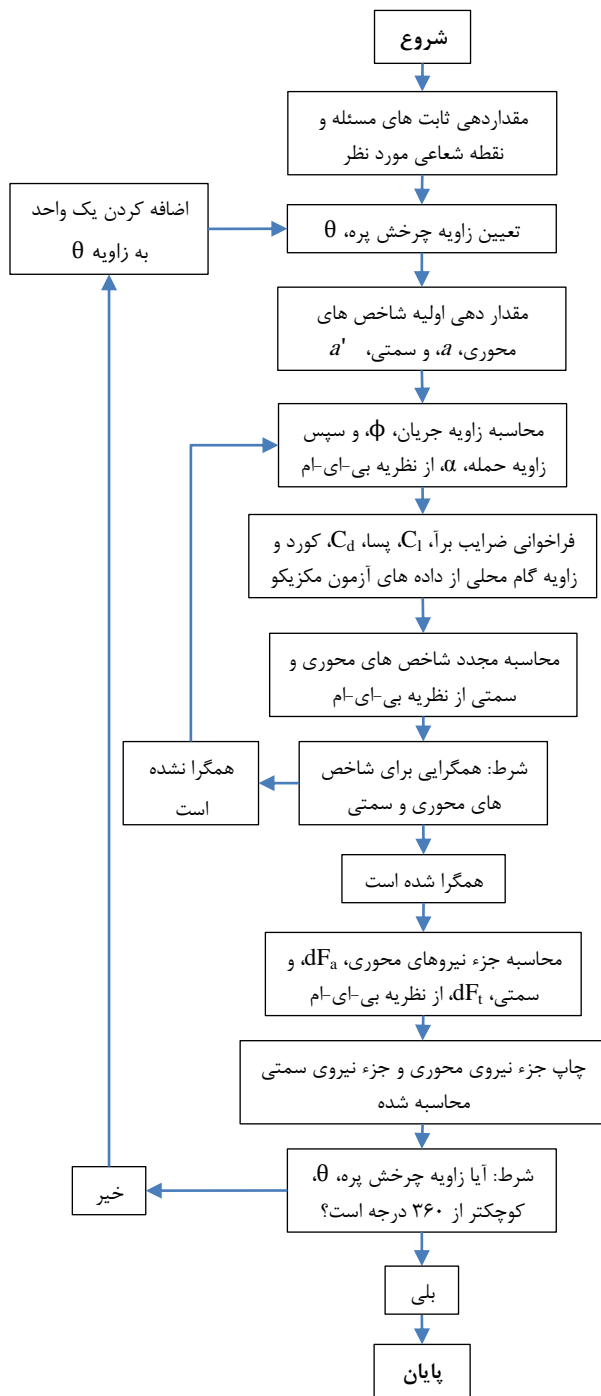
<sup>1</sup> Skewed Wake Correction

توجه به مقطع، مقدار سرعت باد، گام محلی و کورد بازخوانی می‌شود. سپس به شاخص محوری یک مقدار اولیه داده می‌شود. در مرحله بعد با توجه به رابطه (۳-۱۹) مقدار زاویه جریان محاسبه می‌شود. در ادامه بر اساس زاویه، حمله مقدار ضرایب برآ و پسا فراخوانی خواهد شد همچنین ضریب برآ بر اساس معادله (۳-۵۴) اصلاح خواهد شد. در ادامه براساس ضرایب برآ و پسا مقدار ضرایب نیروهای محوری و سمتی با توجه به معادله‌های (۳-۳۰ و ۳-۲۸) حساب خواهد شد. همچنین در یک مرحله دیگر مقدار ضریب شاخص محوری بر اساس ضرایب تصحیح عنوان شده معادلات (۳-۵۲ و ۳-۵۳) حل خواهند شد و در انتها شرط همگرایی ضریب محوری با مقدار اولیه بررسی خواهد شد. اگر شرط همگرایی ضریب شاخص محوری ارضاء نشد برنامه محاسبات را با مقدار شاخص محوری جدید ادامه خواهد داد. اگر این اختلاف از مقدار  $0/00001$  کمتر شد برنامه از این مرحله خارج خواهد شد و مقادیر جزء نیروی محوری و گشتاور محاسبه و چاپ خواهد کرد.

تفاوت در الگوریتم نظریه تکانه اجزاء در شرایط زاویه یاو نسبت به حالت بدون زاویه یاو به این صورت است که محاسبات بر روی تمامی المان‌های پره توربین بادی باید در یک دور چرخش کامل پره در صفحه چرخش روتور توربین بادی صورت بگیرد. زیرا مقادیر برآیند سرعت در هر زاویه چرخش روتور توربین بادی تغییر می‌کند. بر این اساس برای محاسبه زاویه جریان باید از رابطه (۳-۵۵) و همچنین مقدار ضریب شاخص محوری پس از اینکه در معادلات (۳-۵۲ و ۳-۵۳) حساب شدند، باید به وسیله رابطه (۳-۵۶) تصحیح گردد.



شکل ۳- ۱۷ الگوریتم کلی پیاده‌سازی نظریه بی-ای-ام پایه در این تحقیق [۱۳].



شکل ۳-۱۸ الگوریتم کلی پیاده‌سازی نظریه بی-ای-ام پایه در زاویه یاو در این تحقیق [۱۴].

### ۳-۳ تحلیل انرژی و اکزرژی توربین بادی

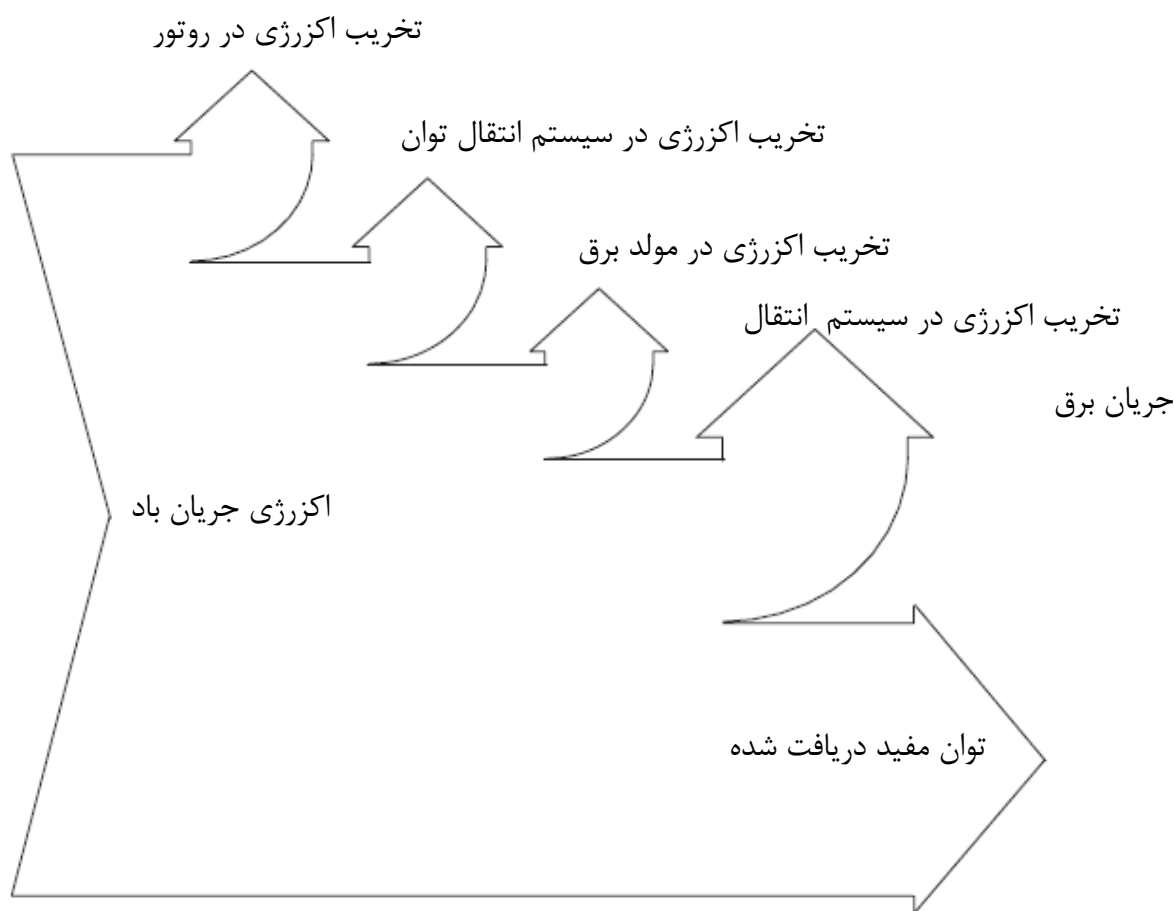
با پیشرفت سریع فناوری توربین‌های بادی و گسترش آن در سبب تولید انرژی کشورها، نیاز به بررسی عملکرد توربین‌های بادی در شرایط مختلف آب و هوایی برای مهندسان انرژی باد از اهمیت بالایی برخوردار شده است. بررسی برخی از متغیرهای ترمودینامیکی باد هنوز به‌طور کامل در عملکرد

توربین بادی موردبررسی قرار نگرفته است. در اکثر تحقیقات ضریب توان یا بازده انرژی توربین بادی را نسبت توان استحصال شده از توربین بادی به انرژی جنبشی باد که با صفحه روتور در تماس است، در نظر می گیرند. اما این فرض برای محاسبه بازده توربین بادی دقت مناسبی را نخواهد داشت. زیرا با این فرض سایر خصوصیات جریان باد مانند تأثیر دما، اختلاف فشار سایر پارامترهای جریان باد را در نظر نمی گیرد. همچنین ماشین های بادی از کل انرژی که جریان باد دارد، نمی تواند تمامی آن را جذب نماید و در قسمت های مختلف این دستگاه ها انرژی تخریب می شود. در نهایت دستگاه مقداری از کل انرژی جریان باد را جذب می نماید. در نتیجه مطالعه قسمت های مختلف توربین بادی و بررسی میزان تخریب انرژی هر قسمت اهمیت فراوانی دارد. باتوجه به شکل ۳-۱۹ قسمتی از انرژی جریان باد که غالب انرژی جنبشی است با پره های توربین بادی برخورد می کند. اما پره ها تنها قسمتی از آن را می توانند جذب کنند، و قسمت دیگر به صورت گردابه<sup>۱</sup> پس از برخورد با پره ها از بین می رود. پره ها پس از جذب انرژی جنبشی باد تولید گشتاور کرده، گشتاور با چرخاندن محور متصل کننده پره ها به سیستم تولید توان، تولید انرژی جنبشی می کند. مقداری از انرژی جنبشی نیز در محور دوران بر اثر اصطکاک به علت تماس با بلبرینگ ها به صورت انرژی گرمایی دفع می شود. پس از انتقال انرژی جنبشی توسط محور به سیستم تولید توان، انرژی الکتریکی تولید می شود، اما در این قسمت نیز مقداری از انرژی وارد شده در قسمت های مختلف سیستم تولید توان مانند سیستم گیربکس و ژنراتور تولید کننده انرژی الکتریکی به علت محدود بودن بازده سیستم تولید توان از بین می رود. در آخر پس از انتقال انرژی الکتریکی از سیستم تولید توان به خطوط انتقال جریان برق، مقداری از انرژی الکتریکی به علت مقاومت کابل های جریان برق تلف خواهد شد. از این رو انتظار می رود برای بالا بردن دقت در محاسبات تحلیل انرژی و انرژی بر روی توربین های بادی به صورت کامل انجام شود.

---

<sup>1</sup> wake





شکل ۳-۱۹ نمودار گراسمان جریان اکزرژی باد بر روی توربین بادی.

### ۳-۳-۱ اکزرژی

اکزرژی عبارت است از حداکثر کار مفید خروجی از یک سیستم در طول یک فرایند تحت شرایط معین می‌تواند به دست آید به شرط اینکه حالت نهایی حالت مرده<sup>۱</sup> باشد.

یک سیستم زمانی در شرایط مرده قرار دارد که در حالت تعادل ترمودینامیکی با محیط اطراف خود باشد. حالت مرده حالتی است که در آن دما و فشار سیستم با محیط یکی باشد. و همچنین نسبت به محیط سرعت و اختلاف ارتفاع نداشته باشد. به عبارت دیگر انرژی جنبشی و پتانسیل آن صفر باشد.

اکزرژی خاصیتی مربوط به ترکیب سیستم و محیط است و مربوط به سیستم تنها نیست. در این تعریف محیط ناحیه‌ای است که در آن شرایط ترمودینامیکی آن تحت تأثیر شرایط سیستم قرار نمی-

<sup>1</sup> Dead state

گیرد.

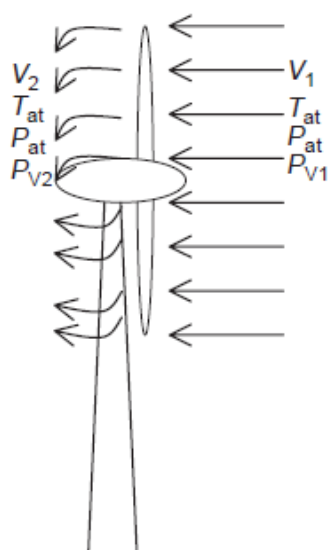
### ۳-۳-۲ اکزرژی در توربین‌های بادی

متغیرهای ترمودینامیکی جریان باد مانند دما، فشار، سرعت و میزان رطوبت نسبی از جمله پارامترهای

مهم در محاسبه جریان اکزرژی باد می‌باشند [۳۲] شکل ۳-۲۰. در این پایان‌نامه دمای مرجع تونل

باد را  $298K$  و فشار مرجع را  $101kPa$  و روابط حاکم در تحلیل اکزرژی توربین بادی از منابع

دینسر<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۲۰ متغیرهای ترمودینامیکی جریان باد در ورودی و خروجی از رتور توربین بادی. رابطه (۳-۵۷) موازنه انرژی برای توربین بادی در ورودی و خروجی آن نمایش می‌دهد.

$$ke_1 = w_{out} + ke_2 \quad (3-57)$$

که  $w_{out}$  میزان کار مفیدی دریافت شده از توربین بادی است. و میزان انرژی جنبشی در ورودی و خروجی از رابطه (۳-۵۸) به دست می‌آید.

$$ke = 0.5mv^2 \quad (3-58)$$

میزان جریان جرمی عبوری از صفحه روتور برابر خواهد بود با:

<sup>1</sup> dincer

$$\dot{m} = \rho \pi r^2 v_1 \quad (59-3)$$

برای محاسبه میزان سرعت خروجی از روتور توربین بادی می‌توان از رابطه (3-60) استفاده کرد.

$$v_2 = \sqrt[3]{\frac{2(ke_1 - w_{out})}{\rho \pi R^2 t}} \quad (60-3)$$

بعد از به دست آوردن روابط مربوط به موازنه انرژی باید روابط مربوط به موازنه اکزرژی را برای یک سیستم و محیط به دست آورد:

$$\sum_{in} (h + ke + pe)_{in} m_{in} - \sum_{ex} (h + ke + pe)_{ex} m_{ex} + \sum_r Q_r - W = 0 \quad (61-3)$$

جریان اکزرژی از توربین بادی شامل دو قسمت انرژی جنبشی و اکزرژی فیزیکی جریان است.

$$Ex_{flow} = Ex_{ph} + ke \quad (62-3)$$

که می‌توان اکزرژی فیزیکی را با رابطه (3-63) معرفی کرد.

$$Ex_{ph} = m \left[ c_p (T_2 - T_1) + T_0 \left( C_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) - \frac{C_p (T_0 - T_{avg})}{T_0} \right) \right] \quad (63)$$

همچنین در شرایطی که اثر رطوبت مخصوص بر جریان اکزرژی مورد مطالعه باشد می‌توان از

رابطه (3-64) استفاده کرد.

$$Ex_{ph} = m \left[ (c_{p,a} + \varpi c_{p,v}) (T - T_0) - T_0 \left[ (c_{p,a} + \varpi c_{p,v}) \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) - (R_a + \varpi R_v) \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) \right] + T_0 \left[ (R_a + \varpi R_v) \ln \left( \frac{1 + 1.6078 \varpi_0}{1 + 1.6078 \varpi} \right) + 1 + 1.6078 R_a \varpi \ln \left( \frac{\varpi}{\varpi_0} \right) \right] \right] \quad (64)$$

که  $P_i = P_0 \pm \left( \frac{\rho}{2} \right) V^2$  است و دماهای ورودی و خروجی از توربین بادی بر اساس دمای

ویندچیل<sup>1</sup> بر اساس مدل زیچر<sup>2</sup> ارائه گردیده است [33]:

<sup>1</sup> Wind chill

<sup>2</sup> zecher

$$T_{windchill} = 35.74 + 0.6215T - 35.75(V^{0.16}) + 0.4274T(V^{0.16}) \quad (۶۵-۳)$$

میزان برگشت‌ناپذیری ایجادشده توسط توربین بادی با رابطه (۶۷-۳) محاسبه خواهد شد.

$$I = T_0 \left( C_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) - \frac{C_p (T_0 - T_{avg})}{T_0} \right) \quad (۶۶-۳)$$

و در نهایت بازده انرژی و اکزرژی را می‌توان بر اساس روابط (۶۷-۳) و (۶۸-۳) نمایش داد.

$$\eta = \frac{W_{out}}{\text{power of wind}} \quad (۶۷-۳)$$

$$\Psi = \frac{W_{out}}{Ex_{flow}} \quad (۶۸-۳)$$

### ۳-۴ شبیه‌سازی هوابرهای پره توربین

جهت محاسبه تأثیر شدت زبری بر عملکرد توربین بادی، هوابرهای مورد استفاده در پره توربین توسط نرم‌افزار دینامیک سیالاتی فلوئنت شبیه‌سازی شدند. روش حل در این نرم‌افزار بر اساس معادلات ناویر استوکس<sup>۱</sup> است که با پنج فرض تراکم‌ناپذیری<sup>۲</sup>، همگن بودن<sup>۳</sup>، نیوتونی<sup>۴</sup>، سرعت جریان کمتر از ۰/۳ ماخ<sup>۵</sup> و گرانروی ثابت برای سیال، می‌توان از معادله زیر استفاده کرد که در این رابطه  $\vec{f}$  مقدار نیروی خارجی بر سیال و کمیت  $\mu \nabla^2 \vec{V}$  عبارت گرانروی است [۳۴].

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{f} \quad (۶۹-۳)$$

همان‌طور که قبل نیز اشاره شد، پره توربین بادی آزمون مکزیکو از ترکیب سه هوابر طراحی شد که از سمت ریشه پره به ترتیب DU91-W2-250، RISØ A1-21 و NACA64-418 بودند. این هوابرها توسط نرم‌افزار گمبیت بلوکه‌بندی و سپس شبکه‌بندی شدند.

<sup>1</sup> Navier stocks

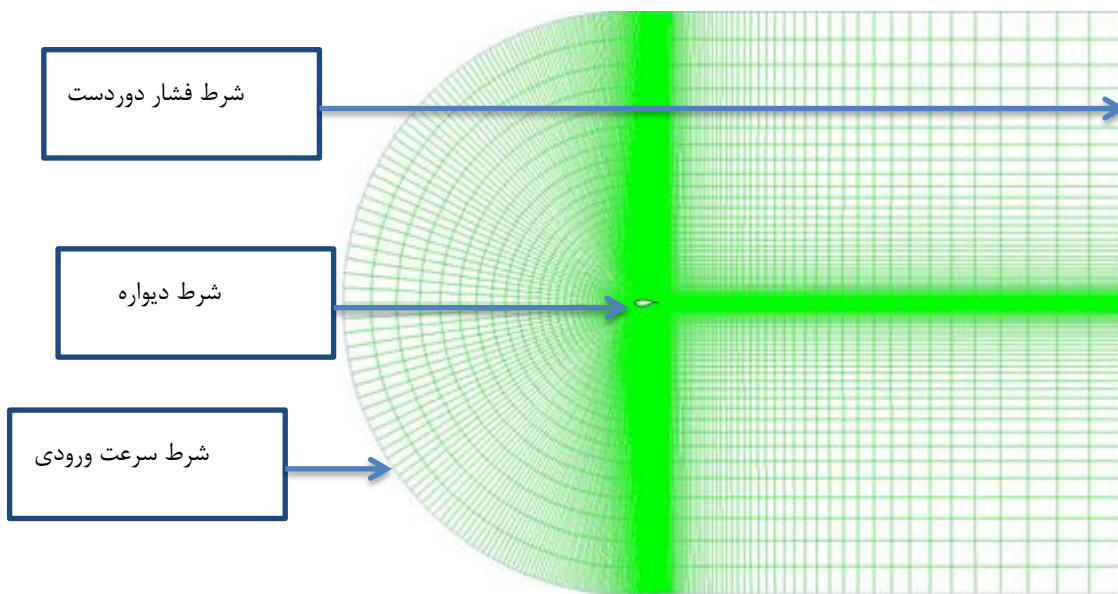
<sup>2</sup> Incompressible flow

<sup>3</sup> Homogeneous

<sup>4</sup> Newtonian flow

<sup>5</sup> Mach number

برای هر سه هواپر ۳۰۹۴۰ سلول و ۳۱۳۶۲ گره تولید شد در یک شبکه بندی با سازمان با توجه به شکل شکل ۳-۲۱ در نظر گرفته شد. بر روی سطح هر هواپر ۲۰۰ عدد سلول ایجاد شد. با توجه به جدول ۳- با افزایش تعداد سلول ها از تعداد ۳۰۹۴۰ نتایج به دست آمده از نرم افزار فلونت مانند ضرایب برآ و پسا تغییر محسوسی نداشتند و به ترتیب به عدد ۰/۲۷۴ برای ضریب برآ و عدد ۰/۰۱۳ برای ضریب پسا همگرا شدند. تغییرات تعداد سلول های مش بندی را برای هواپر NACA64-418 در زاویه حمله صفر درجه نمایش می دهد.



شکل ۳-۲۱ نمونه بلوکه بندی ساده بر روی هواپر ریزو

جدول ۳-۱ تعداد سلول در هر شبیه سازی و ضرایب برآ و پسای محاسبه شده را نمایش می دهد

تعداد سلول های شبکه	ضریب برآ	ضریب پسا
۱۵۰۳۴	۰/۲۳۲	۰/۰۲۱
۳۰۹۴۰	۰/۲۷۴	۰/۰۱۳
۴۰۵۶۳	۰/۲۷۴	۰/۰۱۳

هدف اصلی در شبیه سازی هواپرهای توربین بادی در این تحقیق، محاسبه تأثیر رشد زبری بر عملکرد ضرایب آئرو دینامیکی هواپر ها و جایگذاری این مقادیر در کد (بی-ای-ام) جهت پیش بینی

رفتار توربین بادی است. در شبیه‌سازی هواپرها جریان باد برای تمامی هواپرها به صورت آشفته<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد و مقادیر زاویه حمله با توجه به مقدار محاسبه شده آن توسط کد (بی-ای-ام) برای هر هواپر محاسبه شد.

سایر شرایط انتخاب شده در نرم‌افزار فلوئنت به صورت زیر است.

در این شبیه‌سازی مدل آشفتگی<sup>۲</sup> (k- $\omega$  SST) توانست نتایج مطلوبی را به دست آورد. این مدل به منظور درآمیختن روش (k- $\omega$ ) در نواحی نزدیک به دیواره و روش (k- $\epsilon$ ) در نواحی دور از دیواره استفاده شده است. از طرفی این مدل بسیار شبیه به مدل آشفتگی (k- $\omega$ ) عمل می‌کند. این مدل هم برای جریان‌هایی با رینولدز با و پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. و در جریان‌های آزاد برشی نتایج مطلوبی را به پیش‌بینی می‌کند. [۳۴]

این مدل از مجموعه روش میانگین رینولدز است. برای دستیابی به روش میانگین رینولدز، پارامترهای مشخصه سیال، سرعت و فشار، هر کدام به دو بخش تقسیم می‌شوند. یک بخش آن مقدار میانگین و بخش دیگر مقدار نوسانی آن پارامتر می‌باشد که تجزیه رینولدز<sup>۳</sup> نام دارد. با تجزیه رینولدز سرعت سیال داریم:

$$\vec{V}(x,t) = \overline{\vec{V}}(x) + \vec{V}'(x,t) \quad (70-3)$$

که در آن،  $\overline{\vec{V}}(x)$  مقدار میانگین سرعت است و  $\vec{V}'(x,t)$  مقدار نوسانی آن می‌باشد. با اعمال مجدد میانگین‌گیری،  $\overline{\vec{V}'(x,t)}$  برابر صفر و  $\overline{\overline{\vec{V}}(x)} = \overline{\vec{V}}(x)$  می‌شود. از این رو با جایگزینی معادله (۷۰-۳) در معادله (۶۹-۳) داریم و اعمال میانگین‌گیری رینولدز از کل معادله داریم:

$$\rho \left( \frac{\partial \overline{\vec{V}}}{\partial t} + \overline{\vec{V}} \cdot \nabla \overline{\vec{V}} \right) = -\nabla \overline{p} + \mu \nabla^2 \overline{\vec{V}} - \nabla \cdot \rho \left( \overline{\vec{V}' \cdot \vec{V}'} \right) + \overline{f} \quad (71-3)$$

مقدار  $\overline{\vec{V}' \cdot \vec{V}'}$  تانسور تنش رینولدز<sup>۴</sup> نامیده می‌شود که از تجزیه رینولدز پارامتر غیرخطی شتاب

<sup>1</sup> Turbulence model

<sup>2</sup> Turbulence model: k-w(sst)

<sup>3</sup> Reynolds Decomposition

<sup>4</sup> Reynolds Stress Tensor

همرفت بیرون می‌آید. تنش رینولدز می‌تواند به عنوان نیروهای منشاء تلاطم<sup>۱</sup> تفسیر شود [۳۴]. جهت دستیابی به مجموعه‌ای کاربردی از معادله‌های ناویر-استوکس در این بخش، نیاز به مدل‌هایی است که بتواند تنش رینولدز را بر حسب میانگین سرعت جریان بیان کند. یکی از روش‌های رایج مدل‌سازی تانسور تنش رینولدز، استفاده از فرضیه بوسینسک<sup>۲</sup> می‌باشد [۳۴]. بنابر این روش، بر این اساس یک شباهت‌انگاری<sup>۳</sup> با جریان آرام، تانسور تنش رینولدز می‌تواند به کمک پارامتر گرانیروی اِدی متلاطم<sup>۴</sup>،  $V_T$ ، به میانگین جریان سیال به صورت زیر ربط داده شود:

$$\overline{\vec{V}' \cdot \vec{V}'} = \nu_T \left( \nabla \cdot \overline{\vec{V}} + \left( \nabla \overline{\vec{V}} \right)^T \right) \quad (۷۲-۳)$$

بنابراین با جایگزینی معادله (۷۲-۳) در معادله (۷۱-۳)، و جایگزینی ویسکوزیته دینامیکی،  $\mu$ ، با سینماتیکی،  $\nu$ ، به کمک رابطه  $\nu = \mu / \rho$  معادله رانز<sup>۵</sup> به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\rho \left( \frac{\partial \overline{\vec{V}}}{\partial t} + \overline{\vec{V}} \cdot \nabla \overline{\vec{V}} \right) = -\nabla \overline{p} - \nabla \cdot \rho \left( (\nu + \nu_T) \left( \nabla \overline{\vec{V}} + \left( \nabla \overline{\vec{V}} \right)^T \right) \right) + \overline{\vec{f}} \quad (۷۳-۳)$$

این معادله به صورت گسترده جهت مدل‌سازی تلاطم استفاده می‌شود و یک معادله مهندسی بسیار مفید است چون مدت زمان حل معادله تنها به صورت ضعیفی وابسته به عدد رینولدز می‌باشد. روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران برای محاسبه ویسکوزیته اِدی مطالعه و توسعه یافته است. یک از مدل‌های دو معادله‌ای، مدل k- $\omega$  (sst) می‌باشد. این مدل دو معادله‌ای به صورت همزمان با معادله‌های ناویر-استوکس حل می‌شوند تا بتواند گرانیروی اِدی را برای معادله (۷۳-۳) محاسبه نماید. آشفتگی در جریان آزاد معمولاً از خواص تونل قابل اندازه‌گیری است. در تونل‌های باد پیشرفته، شدت آشفتگی جریان آزاد کمتر از ۰/۰۵٪ است. بنابراین برای شبیه‌سازی چنین تونل‌هایی می‌توان شدت آشفتگی<sup>۶</sup> در ورودی جریان را همان ۰/۰۵٪ در نظر گرفت [۳۴]. همچنین مقدار چگالی

<sup>1</sup> Turbulent Diffusive Forces

<sup>2</sup> Boussinesq Hypothesis

<sup>3</sup> Analogy

<sup>4</sup> Turbulent Eddy Viscosity

<sup>5</sup> RANS

<sup>6</sup> Turbulence intensity

مقدار ویسکوزیته  $1/225 \text{ kg/m}^3$  و مقدار  $10^{-5} \times 1/7894 \text{ kg/m.s}$  برای هوا استفاده شد. برای افزایش دقت در حل مقدار انرژی جنبشی آشفتگی ۱ و نرخ اضمحلال آشفتگی ۲ بر روی نقاط محاسباتی بر اساس روش پیشرو درجه دوم ۳ حل شد.

برای شدت زبری سه مقدار  $0/1 \text{ mm}$ ،  $0/3 \text{ mm}$  و  $0/5 \text{ mm}$  انتخاب شد. این مقادیر توسط خلف الله بر اساس یک رابطه خطی در بازه‌های زمانی پیوسته بدون اینکه پره‌های یک توربین بادی در یک سایت بادی تمیز شود، قطر ذرات گردوغبار نشست شده روی پره‌ها را اندازه‌گیری کرد و رابطه (۳-۷۴) به‌عنوان شدت زبری نسبی معرفی کرد [۱۱].

$$D_d = 0.08T_{month} + 0.02 \quad (3-74)$$

با توجه به رابطه (۳-۷۰) فرض گرفته می‌شود که پره‌های توربین بادی ۶ ماه تمیز نشوند و در این مدت هم هیچ‌گونه بارش باران یا برفی نیز صورت نگیرد در این صورت ۳ مقدار مختلف زبری با اندازه‌های  $0/1 \text{ mm}$  (بعد از یک ماه)،  $0/3 \text{ mm}$  (بعد از سه ماه و نیم) و  $0/5 \text{ mm}$  (بعد از شش ماه) را برای زبری سطح هوا برها در نرم‌افزار می‌توان انتخاب کرد.

### ۳-۵ الگوریتم پیاده‌سازی محاسبات

در این تحقیق روند اجرای محاسبات با توجه به شرایط قرارگیری توربین بادی به سه دسته تقسیم‌بندی شد. عملکرد توربین بادی بر اساس تغییرات متغیرهای آب و هوایی نظیر دما، فشار، سرعت و رطوبت نسبی جریان باد جزو دسته اول و تغییرات شدت زبری بر عملکرد توربین بادی جزو دسته دوم و در آخر تغییرات زاویه یاو بر عملکرد توربین بادی جزو دسته سوم تقسیم‌بندی شده‌اند. هر یک از این دسته‌ها روند اجرای محاسبات متفاوت با سایر گروه‌ها را دارد. الگوریتم کلی جهت اجرای هر یک از این گروه‌ها در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است. روتور توربین بادی بر اساس نظریه تکانه اجزاء پره، برای حالت بدون زاویه یاو و زاویه یاو شبیه‌سازی خواهد شد. در مرحله بعد نتایج

<sup>1</sup> Turbulence kinetic energy

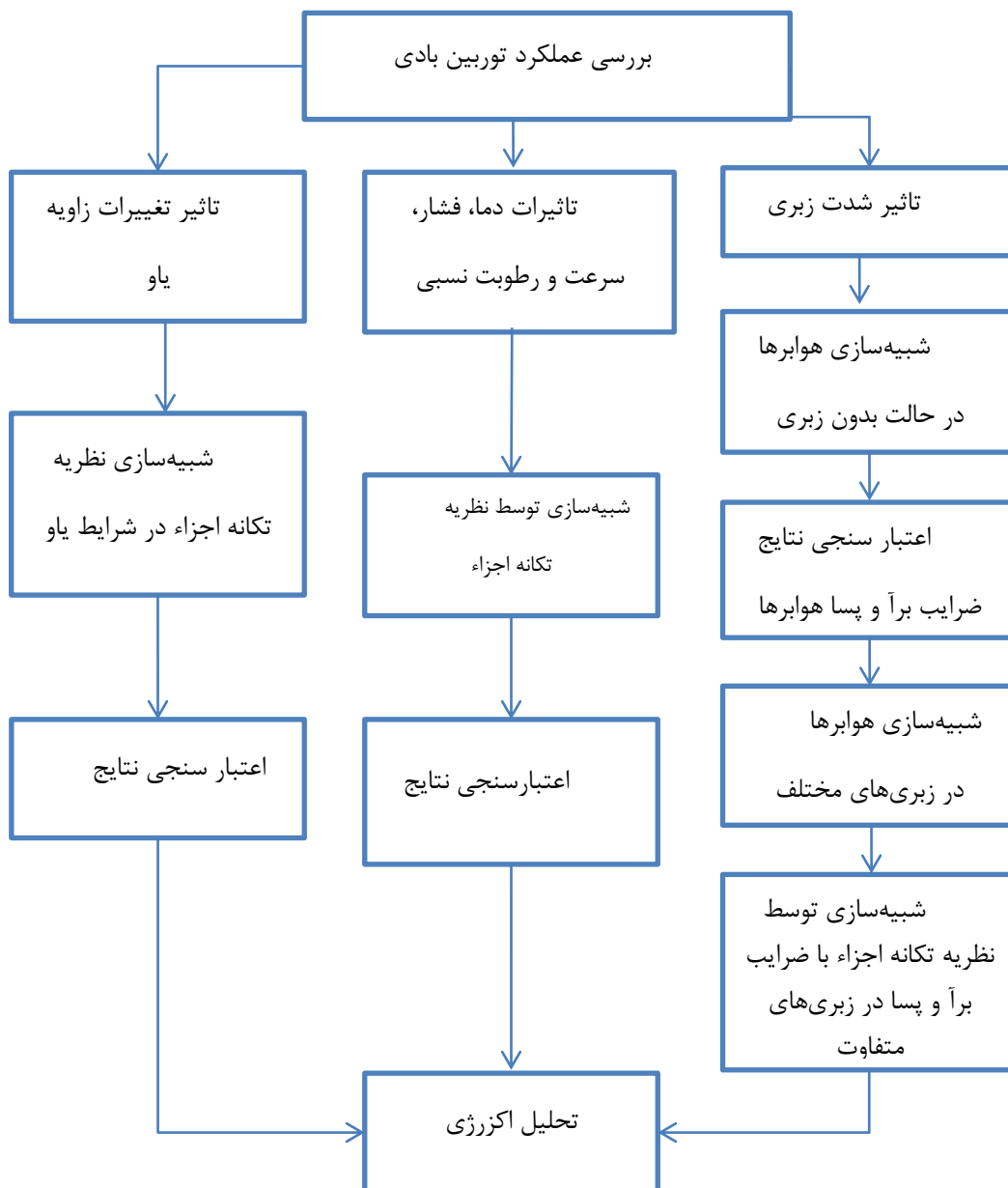
<sup>2</sup> Turbulence dissipation rate

<sup>3</sup> Second order upwind



به دست آمده از شبیه‌سازی نظریه تکانه اجزاء پره، با مقادیر تجربی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. سپس آنالیز انرژی و اکزرژی بر اساس قوانین اول و دوم ترمودینامیک بر روی مدل بر اساس متغیرهای جریان باد نظیر دما، فشار، سرعت و رطوبت مخصوص که بر اساس داده‌های هواشناسی شهر منجیل در سه ماه متوالی دسامبر، ژانویه و فوریه سال ۲۰۱۰ میلادی صورت خواهد گرفت. جدول ۳- منجیل از جمله مناطق بادخیز کشور ایران است که دارای چندین مزرعه توربین بادی است. همچنین داده‌های هواشناسی استخراج شده در سال ۲۰۱۰ از شهر منجیل بسیار شبیه با متغیرهای جریان باد مانند دما، سرعت و فشار هوا در آزمون مکزیکو است [۳۵].

بررسی اثر رشد زبری بر روی پره توربین بادی بر روی بازده انرژی و اکزرژی آن از جمله عواملی است که کمتر به آن پرداخته شده است. جهت بررسی این موضوع ابتدا هوابرهای استفاده شده در توربین بادی مورد آزمایش، جهت محاسبه تأثیر شدت زبری بر عملکرد توربین با استفاده از یک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی خواهند شد و نتایج ضرایب برآ و پسا به دست آمده از نرم‌افزار در حالت بدون زبری، با مقادیر تجربی ضرایب برآ و پسا مورد مقایسه قرار خواهند گرفت. سپس اثر رشد شدت زبری بر اثر افزایش گردوغبار بر روی ضرایب برآ و پسای هوابرها شبیه‌سازی شد. سپس در نظریه تکانه اجزاء مقادیر ضرایب برآ و پسا به دست آمده از شبیه‌سازی جایگزین ضرایب برآ و پسا تونل باد شد و مقدار توان توربین بادی محاسبه به دست آمد. در مرحله آخر اثر رشد شدت زبری بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی محاسبه شد.



شکل ۳-۲۲ الگوریتم پیاده‌سازی شده جهت بررسی عملکرد توربین بادی

جدول ۳-۲ داده‌های هواشناسی شهر منجیل در سال ۲۰۱۰

متغیر	دسامبر	ژانویه	فوریه
سرعت (m/s)	۱۲/۸	۱۲/۶	۱۵/۴
دما (°C)	۱۱/۹	۱۰/۶	۹/۳
دما حباب خشک (°C)	۱۰/۸	۹/۷	۸/۶
فشار (HPA)	۱۰۳۲/۱	۱۰۳۴/۸	۱۰۳۴/۶
رطوبت نسبی (%)	۶۵	۷۳	۷۲
فشار بخار آب (HPA)	۸/۱۹	۸/۸۱	۷/۹۲

## فصل ۴

### نتایج و بحث

## ۱-۴ نتایج

در این فصل در ابتدا نتایج مربوط به شبیه‌سازی هوابرها و سپس نتایج شبیه‌سازی توربین بادی با نتایج واقعی اعتبارسنجی شد. در مرحله‌ای دیگر تأثیر هر متغیر بر روی بازده انرژی و اکزرژی بر اساس شبیه‌سازی‌ها بررسی شد. نتایج هر متغیر به صورت جداگانه بررسی شد.

### ۱-۱-۴ شبیه‌سازی هوابرها

برای محاسبه اثر شدت زبری بر عملکرد توربین بادی، در این تحقیق ابتدا هوابرها در نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی شدند. سپس با مقادیر ضرایب برآ و پسا هوابرها در تونل باد مورد مقایسه قرار گرفتند. و در مرحله آخر اثر رشد شدت زبری بر ضرایب برآ و پسا هر هوابر نشان داده شده است.

#### ۱-۱-۱-۴ شبیه‌سازی هوابر DU91-W2-250

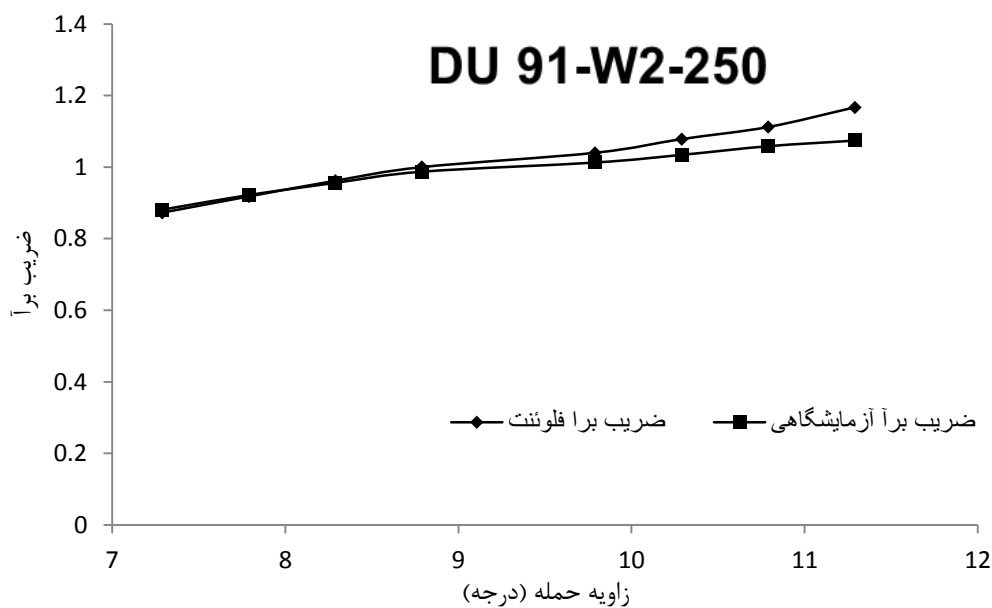
شبیه‌سازی هوابرها از این جهت صورت گرفت که بتوان شدت زبری‌های مختلف را بر روی هوابرها در محیط نرم‌افزار اعمال کرد تا بتوان ضرایب برآ و پسا در مقادیر مختلف زبری را تعیین کرد. مقادیر برآ و پسا تحت اثر زبری، در نظریه بی-ای-ام وارد شدند تا اثرات آن بر عملکرد روتور توربین مشاهده شوند. در نهایت با استفاده از این نتایج، بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی را که تحت تأثیر زبری‌های متفاوت بودند پیش‌بینی شد. شبیه‌سازی برای هر سه هوابر با توجه به موقعیت قرارگیری آن‌ها در پره‌ی توربین بادی صورت گرفت. محدوده زاویه حمله جهت شبیه‌سازی هر هوابر با توجه به محدوده زاویه حمله درگیر در فرآیند همگرایی کد بی-ای-ام است.

اولین نتایج برای هوابر DU91-W2-250 است. این هوابر که در ریشه پره قرار دارد از فاصله ۰/۴۵ متری پره از مرکز هاب<sup>۱</sup> شروع شده است و تا فاصله ۱/۰۲۵ متری پره از مرکز هاب خاتمه می‌یابد. همچنین این شبیه‌سازی در عدد رینولدز ۵۰۰۰۰۰ انجام شده است.

با توجه به شکل ۴-۱ نرم‌افزار فلوئنت توانست رفتاری شبیه به رفتار تغییرات ضریب برآ بر اساس

<sup>1</sup> Hub

زاویه حمله را مدل کند و نتایجی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی داشته باشد. هرچند که با افزایش زاویه حمله و نزدیک شدن به ناحیه ایست به تدریج اختلاف بین نتایج اندازه‌گیری شده در تونل باد و نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار فلونت افزایش می‌یابد. بیشترین میزان خطای نسبی اندازه‌گیری شده در ضرایب برآ آزمایشگاهی و نتایج فلونت در زاویه حمله ۱۱/۲۹ درجه، ۱۳/۶٪ است.

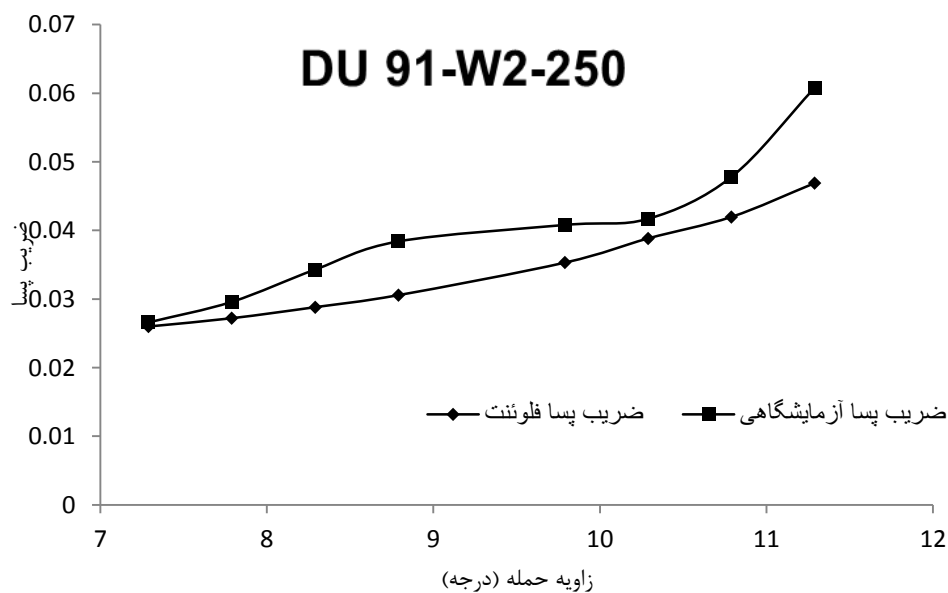


شکل ۴- ۱ نمودار تغییرات ضریب برآ هوابر دی-یو بر اساس تغییرات زاویه حمله

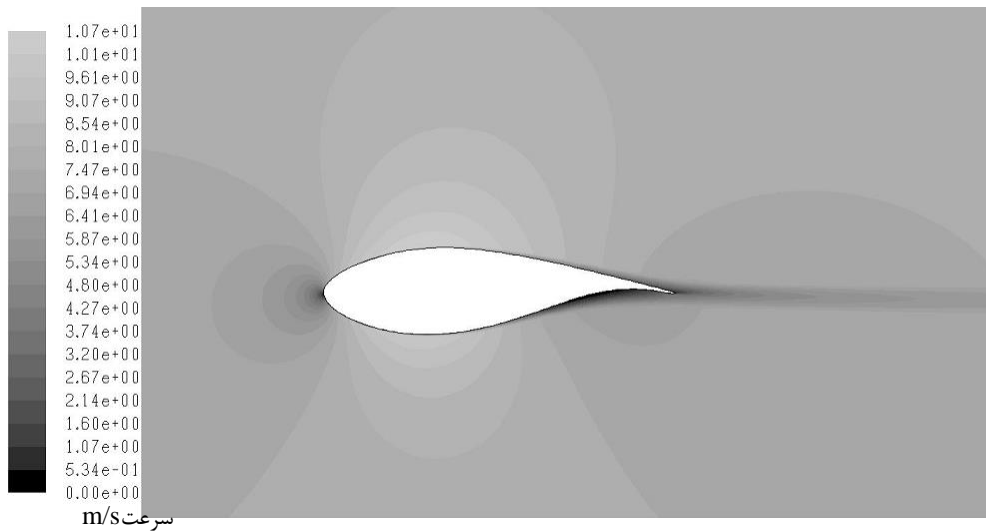
همچنین شبیه‌سازی برای ضریب پسا نیز صورت گرفته است که با توجه به شکل ۴- ۲، نتایج از زاویه حمله ۷/۲۹ شروع شده، در این زاویه حمله میزان اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج فلونت حداقل است. در این شبیه‌سازی بیشترین خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج فلونت در زاویه حمله ۱۱/۲۹ درجه، ۲۰/۸٪ است.

یکی از عوامل مهمی که باعث می‌شود این هوابر و دو هوابر دیگر با افزایش زاویه حمله از مقادیر محاسبه شده آزمایشگاهی برای ضرایب برآ و پسا فاصله بگیرند، رسیدن به نقطه ناحیه ایست است با توجه به شکل ۴- ۳ تا شکل ۴- ۶ که کانتورهای سرعت برحسب m/s را بر روی هوابر دی-یو نمایش

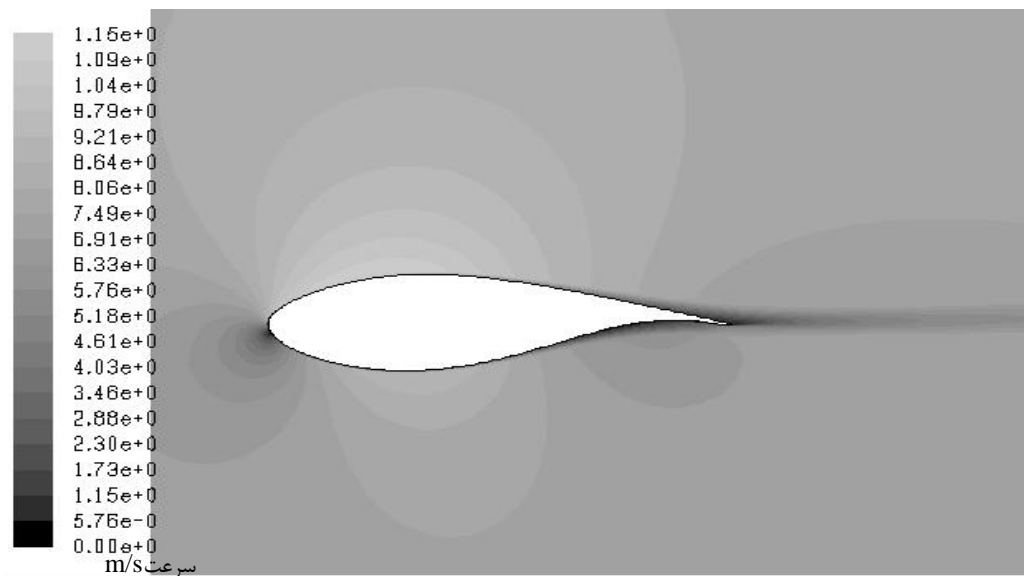
می‌دهد، با افزایش زاویه حمله، نقطه‌ای که در آن سرعت جریان باد به صفر می‌رسد به سمت نوک هواپر در حرکت است. با حرکت این نقطه به سمت نوک، هواپر دچار افت در ضریب برآ و افزایش ضریب پسا می‌شود. طبق قانون برنولی برای جریان‌های آزاد با کاهش سرعت جریان باد میزان فشار جریان افزایش خواهد یافت. با توجه به شکل ۴-۶ در قسمت انتهایی بالای هواپر میزان سرعت باد به حداقل رسیده است. همچنین این میزان سرعت از قسمت انتهایی پایین هواپر نیز کمتر بوده است. پس می‌توان گفت که در ناحیه انتهایی هواپر میزان فشار در قسمت بالای هواپر به حداکثر خواهد رسید و در نتیجه با تولید نیرویی به سمت پایین از میزان ضریب بالابرنندگی هواپر کاسته می‌شود. کانتور سرعت برای دو هواپر دیگر در پیوست الف موجود است.



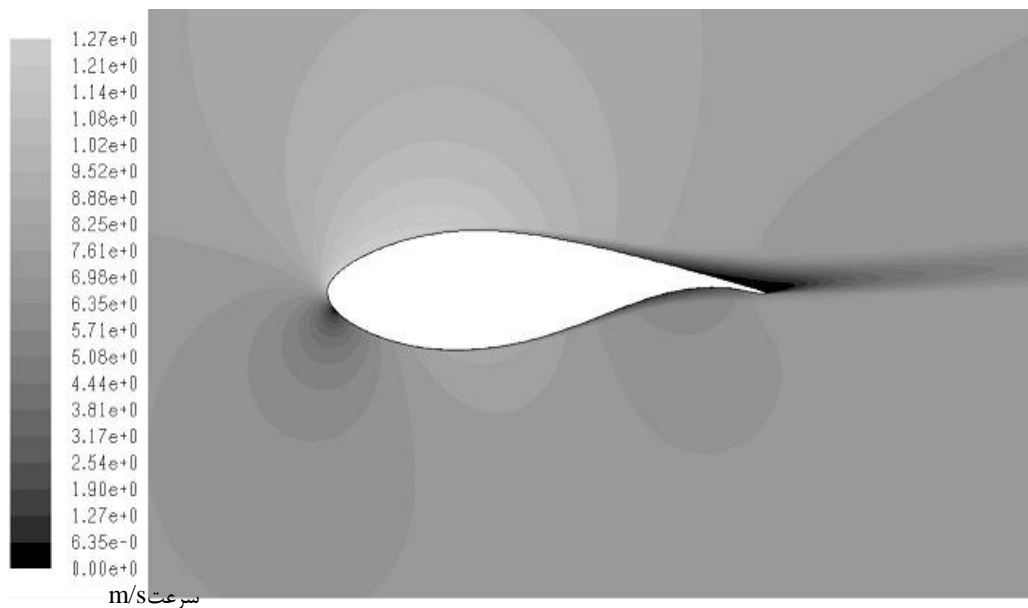
شکل ۴-۲ نمودار تغییرات ضریب پسا هواپر دی-یو بر اساس تغییرات زاویه حمله



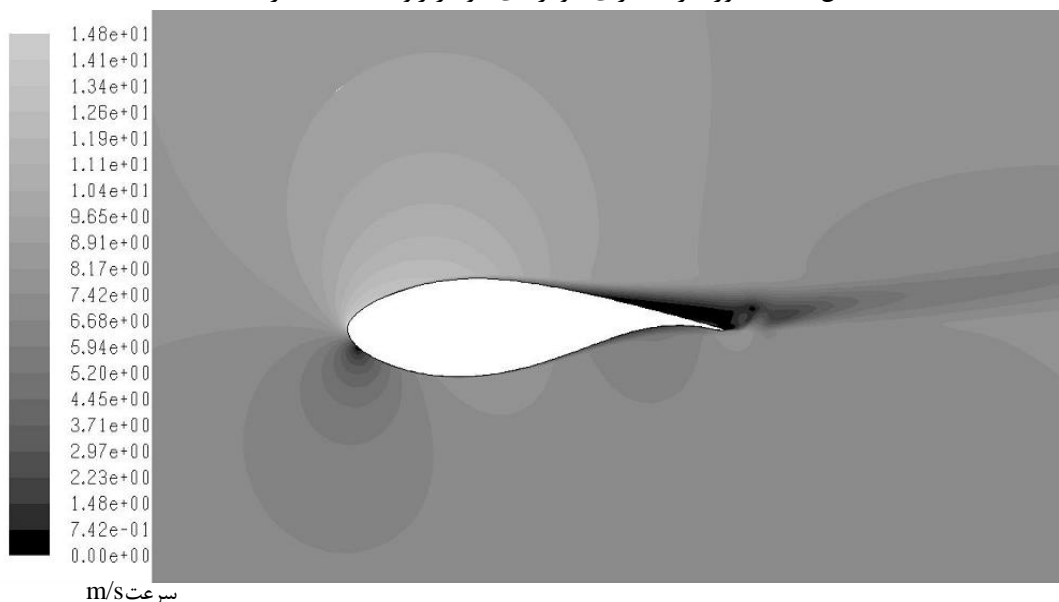
شکل ۴-۳ کانتور سرعت برای هواپر دی-یو در زاویه حمله صفر درجه



شکل ۴-۴ کانتور سرعت برای هواپر دی-یو در زاویه حمله ۴ درجه



شکل ۴-۵ کانتور سرعت برای هواپرواز دی-یو در زاویه حمله ۸ درجه



شکل ۴-۶ کانتور سرعت برای هواپرواز دی-یو در زاویه حمله ۱۱ درجه

#### ۴-۱-۱-۲ شبیه‌سازی هواپرواز A1-21 RISØ

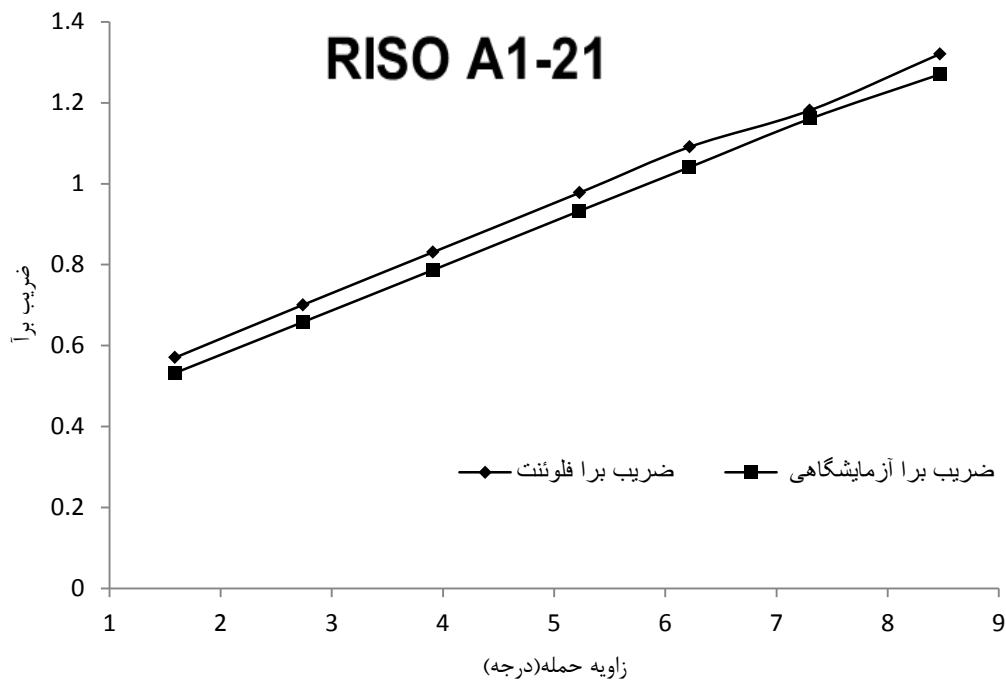
دومین شبیه‌سازی مربوط به هواپرواز A1-21 RISØ است. این هواپرواز در وسط پره توربین بادی قرار دارد و از فاصله ۱/۲۲۵ متری از مرکز هاب شروع می‌شود و تا فاصله ۱/۴۷۵ متری از مرکز هاب ادامه دارد. این هواپرواز در عدد رینولدز یک میلیون شش صد هزار مورد آزمایش قرار گرفته بود شکل ۴-۷. این شبیه‌سازی از زاویه حمله ۱/۵۹ درجه شروع شد و تا زاویه حمله ۸/۴۷ درجه ادامه داشت. و توانست رفتاری بسیار نزدیک و شبیه به نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند. همچنین در شکل ۴-۸، تغییرات ضرایب پسا بر اساس زاویه حمله نمایش داده شده است. این نتایج نیز مانند ضریب برآ توانست رفتاری کاملاً شبیه و نزدیک نتایج آزمایشگاهی را نمایش دهد. بیشترین خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی در زاویه حمله ۸/۴۷ درجه برابر ۱۸/۷٪ بود. در نتیجه این شبیه‌سازی برای هواپرواز یادشده توانست نتایج



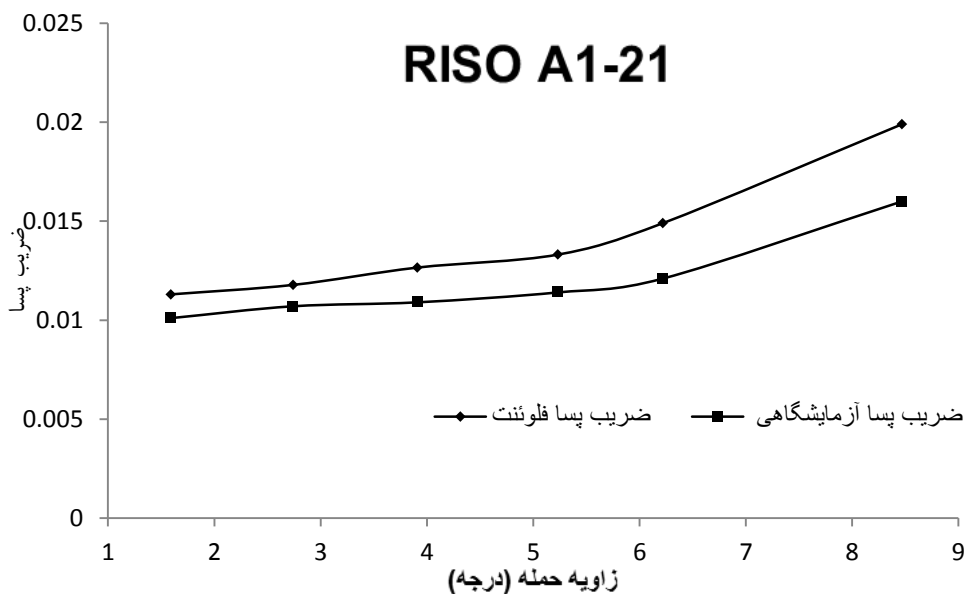
قابل قبول در ضرایب برآ و پسا نمایش دهد. مشابه هوا بر دی-یو با کانتورهای سرعت هوا بر ریزو در

شکل ۱ پیوست الف نشان داده شده است. هوا بر ریزو در مقایسه با هوا بر دی یو در زاویه حمله ۹

درجه، اثر جدایش جریان باد در انتهای هوا بر کمتر دیده شد.



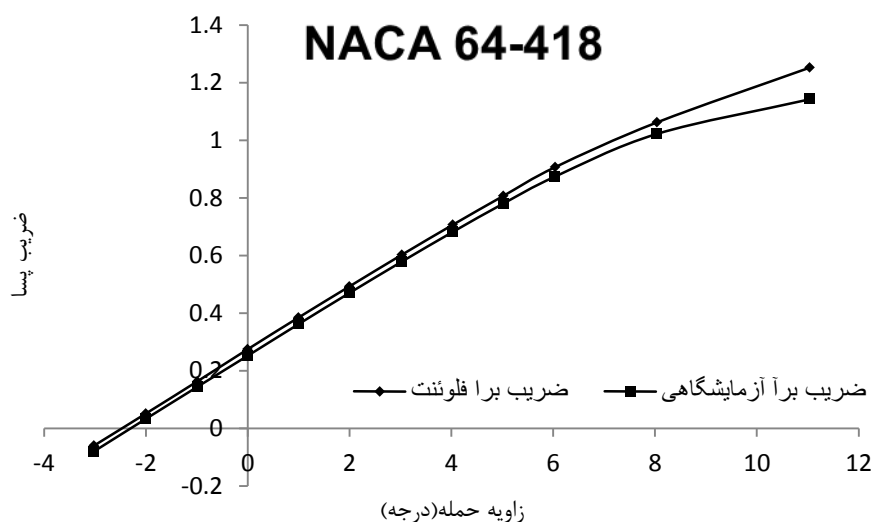
شکل ۴-۷ نمودار تغییرات ضریب برآ هوا بر ریزو بر اساس تغییرات زاویه حمله



شکل ۴-۸ نمودار تغییرات ضریب پسا هوا بر ریزو بر اساس تغییرات زاویه حمله

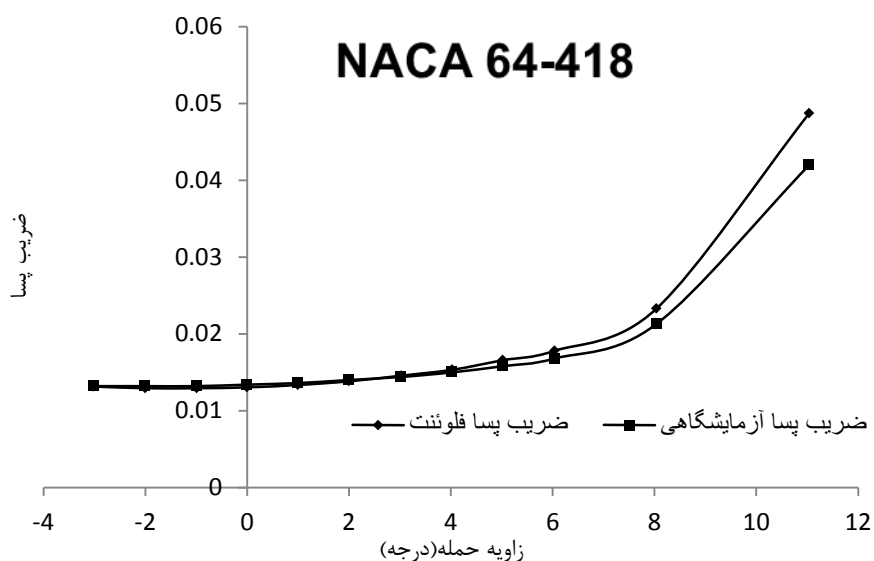
#### ۳-۱-۱-۴ شبیه‌سازی هوا بر NACA64-418

سومین شبیه‌سازی مربوط به هوا بر NACA64-418 است. این هوا بر در نوک پره توربین بادی قرار دارد و از فاصله  $1/675$  متری از مرکز هاب شروع می‌شود تا فاصله  $2/04$  متری از مرکز هاب ادامه دارد. این هوا بر در عدد رینولدز  $500000$  شبیه‌سازی شد. شکل ۴-۹ نتایج مربوط به تغییرات ضریب برآ نسبت به تغییر زاویه حمله را نمایش می‌دهد. این شبیه‌سازی از زاویه حمله  $3/02$  - درجه شروع شد و تا زاویه حمله  $11/04$  درجه ادامه داشت. شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار تونست رفتاری بسیار نزدیک و شبیه به نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند. و برای تمام زوایای حمله نتایج به دست آمده از نرم‌افزار بسیار نزدیک به مقادیر آزمایشگاهی است.



شکل ۴-۹ شبیه‌سازی تغییرات ضرایب برآ ناکا بر اساس زاویه حمله

در شکل ۴-۱۰ شبیه‌سازی تغییرات ضرایب پسا بر اساس زاویه حمله را نشان می‌دهد. این شبیه‌سازی بسیار نزدیک به مقادیر آزمایشگاهی بود. بیشترین میزان خطا نسبی در زاویه حمله  $11/04$  درجه  $16/4\%$  است. همچنین کانتور سرعت بر روی این هوا بر در شکل ۲ نشان داده شده است.

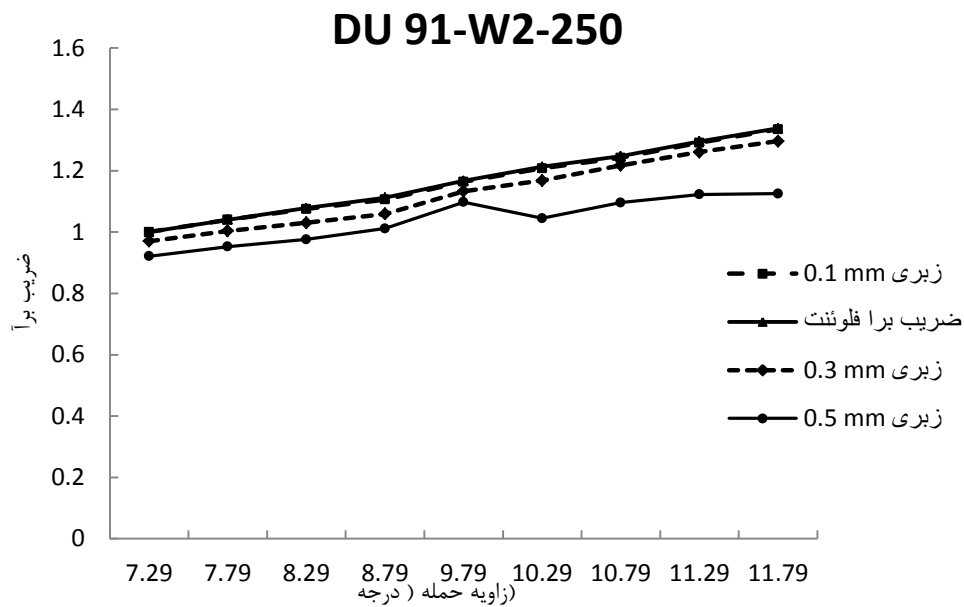


شکل ۴-۱۰ تغییرات ضرایب پسا هوا بر ناکا بر اساس زاویه حمله

#### ۴-۱-۱-۴ بررسی تأثیر زبری

زبری ایجاد شده بر روی پره‌های توربین بادی از جمله عواملی هستند که عملکرد توربین بادی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به‌طور معمول این زبری بر اثر عواملی همچون گردوغبار، یخ‌زدگی پره، برخورد حشرات و جانوران با پره‌های توربین بادی، زنگ‌زدگی پره، تأثیرات بارندگی و سایر عوامل محیطی می‌تواند باشد. زبری ایجاد شده بر روی پره‌ها با تغییر دادن الگوی جریان باد بر روی پره، می‌تواند عملکرد و در نتیجه توان خروجی از توربین بادی را تغییر دهد. پس از شبیه‌سازی هوا بره‌های توربین بادی و مقایسه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی، زبری نسبی در سه مقدار مختلف  $0.1 \text{ mm}$ ،  $0.3 \text{ mm}$  و  $0.5 \text{ mm}$  به صورت نظری در نرم‌افزار در فرآیند شبیه‌سازی هوا برها اعمال شدند.

با توجه به شکل ۴-۱۱ با افزایش شدت زبری از  $0.1 \text{ mm}$  تا  $0.5 \text{ mm}$  میزان ضریب برآ در هر زاویه حمله برای هوا بر دی-یو، به تدریج کاهش خواهد یافت. هرچه شدت زبری افزایش یابد این میزان کاهش نیز بیشتر قابل لمس خواهد شد، این میزان کاهش در زاویه حمله  $11/79$  درجه باعث شد ضریب برآ در زبری  $0.5 \text{ mm}$  به مقدار  $1/252$  برسد و نسبت به محاسبه شده در حالت بدون زبری



شکل ۴- ۱۱ تأثیرات زبری مختلف بر روی ضریب برا هوا بر دی-یو.

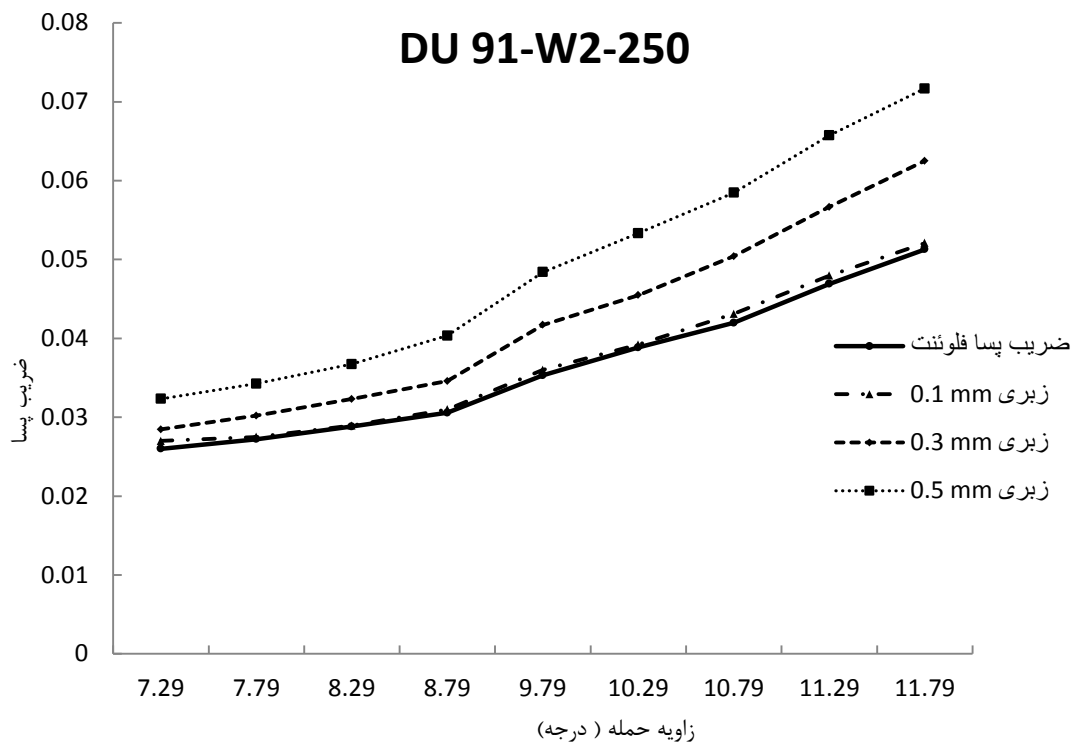
با توجه به شکل ۴- ۱۲ همان طور که مشاهده می شود با افزایش شدت زبری از ۰/۱ mm تا ۰/۵ mm

۰/۵ میزان ضریب پسا در هر زاویه حمله برای هوا بر دی-یو، به تدریج افزایش خواهد یافت. هرچه

شدت زبری افزایش یابد این میزان افزایش نیز بیشتر قابل لمس خواهد شد، این میزان افزایش در

زاویه حمله ۱۱/۷۹ درجه باعث شد ضریب پسا در زبری ۰/۵ mm به مقدار ۰/۰۷۱۶ برسد و در

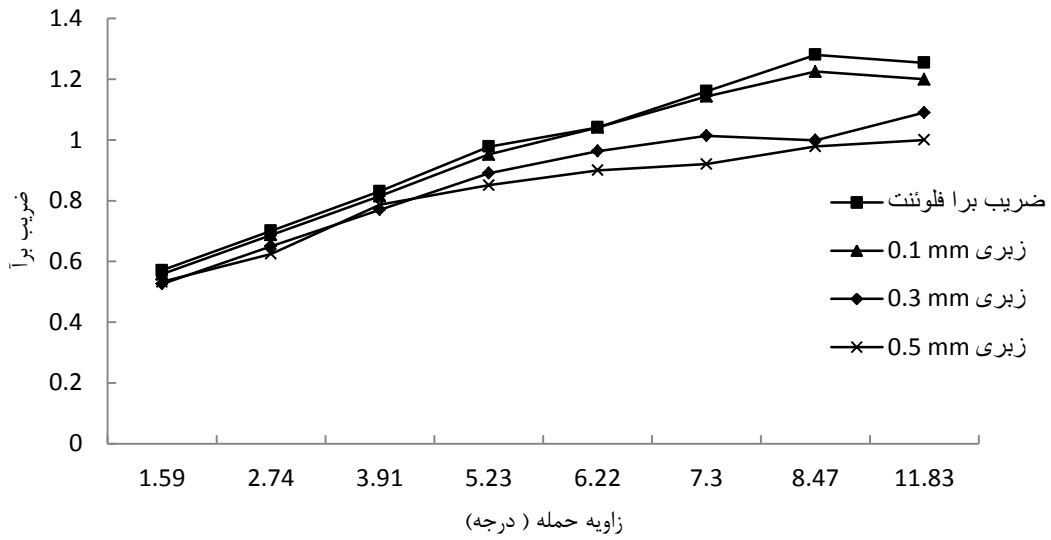
مقایسه با حالت بدون زبری مقدار ۰/۰۲۰۴ افزایش داشته باشد.



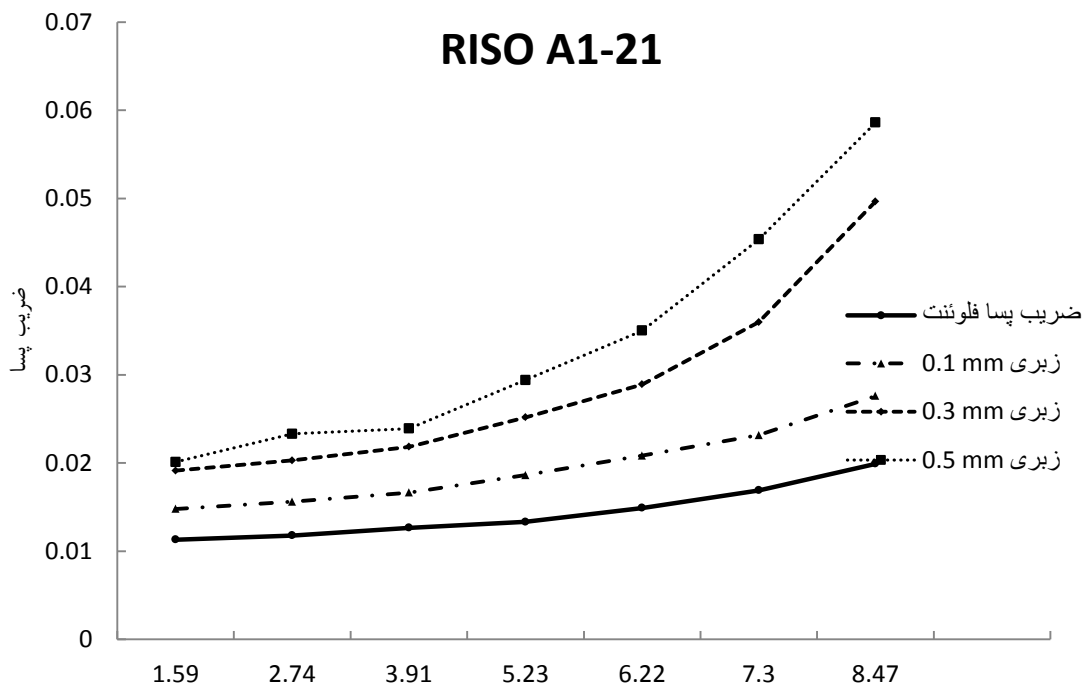
شکل ۴- ۱۲ تأثیرات زبری مختلف بر روی ضرب پسا هوا بر دی-یو.

با توجه به شکل ۴- ۱۳ و شکل ۴- ۱۴ مشاهده می‌شود با افزایش شدت زبری از ۰/۱ mm تا ۰/۵ mm میزان ضرب برآ در هر زاویه حمله برای هوا بر ریزو، به تدریج کاهش خواهد یافت. هرچه شدت زبری افزایش یافت، میزان کاهش نیز بیشتر قابل لمس شد، این میزان کاهش در زاویه حمله ۱۱/۸۳ درجه باعث شد ضرب برآ در زبری ۰/۵ mm به مقدار ۱ برسد و بیشترین اختلاف به دست آمده نسبت به مقادیر محاسبه شده در حالت بدون زبری در زاویه حمله ۸/۴۷ درجه، میزان ۰/۳۰۱۹ کاهش داشت. همچنین با افزایش شدت زبری از ۰/۱ mm تا ۰/۵ mm میزان ضرب پسا در هر زاویه حمله برای هوا بر ریزو به تدریج افزایش یافت. هرچه شدت زبری افزایش یافت این میزان افزایش نیز بیشتر قابل لمس شد. این میزان افزایش در زاویه حمله ۸/۴۷ درجه باعث شد ضرب پسا در زبری ۰/۵ mm به مقدار ۰/۰۵۸۵۹ برسد و نسبت به مقادیر محاسبه شده در این زاویه حمله، ۰/۰۳۶۹ واحد افزایش یابد.

### RISO A1-21



شکل ۴-۱۳ تأثیرات زبری مختلف بر روی ضریب برا هوا بر ریزو.

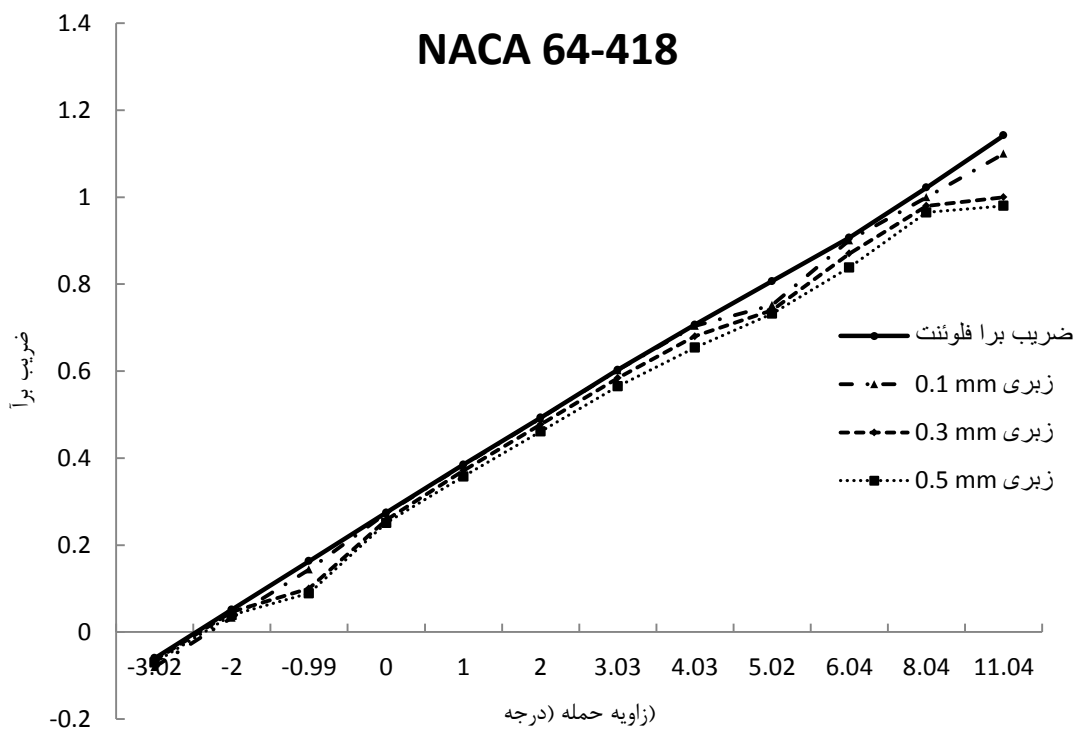


شکل ۴-۱۴ تأثیرات زبری مختلف بر روی ضریب پسا هوا بر ریزو.

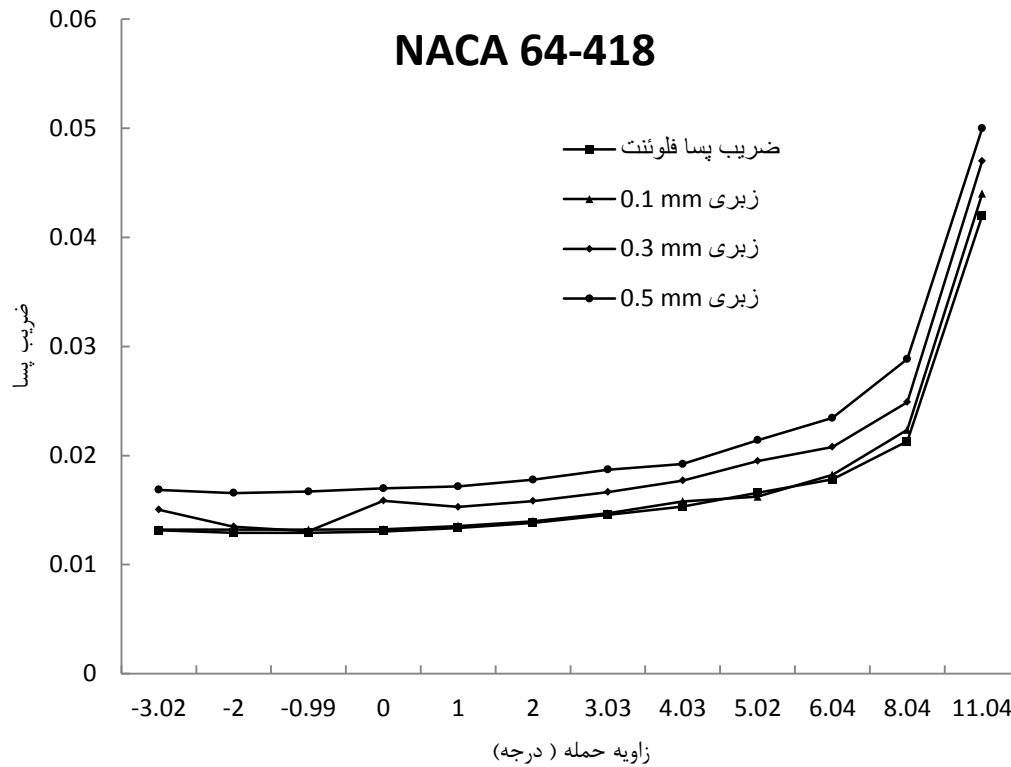
با توجه به شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶ با افزایش شدت زبری از ۱ mm تا ۵ mm میزان ضریب

برآ در هر زاویه حمله برای هوا بر ناکا به تدریج کاهش خواهد یافت. هرچه شدت زبری افزایش یافت

میزان کاهش ضریب برآ نیز بیشتر شد، این میزان کاهش در زاویه حمله  $11/04$  درجه باعث شد ضریب برآ در زبری  $0/5$  mm به مقدار  $0/98$  برسد. و در مقایسه باحالت بدون زبری مقدار  $0/162$  کاهش داشته باشد. همچنین با افزایش شدت زبری از  $0/1$  mm تا  $0/5$  mm میزان ضریب پسا در هر زاویه حمله برای هوا بر ناکا به تدریج افزایش خواهد یافت. هرچه شدت زبری افزایش یابد این میزان افزایش نیز بیشتر قابل لمس خواهد شد، این میزان افزایش در زاویه حمله  $11/04$  درجه باعث شد ضریب پسا در زبری  $0/5$  mm به مقدار  $0/05$  برسد. و در مقایسه باحالت بدون زبری مقدار  $0/008$  افزایش داشته باشد.



شکل ۴-۱۵ تأثیرات زبری مختلف بر روی ضریب برآ هوا بر ناکا .



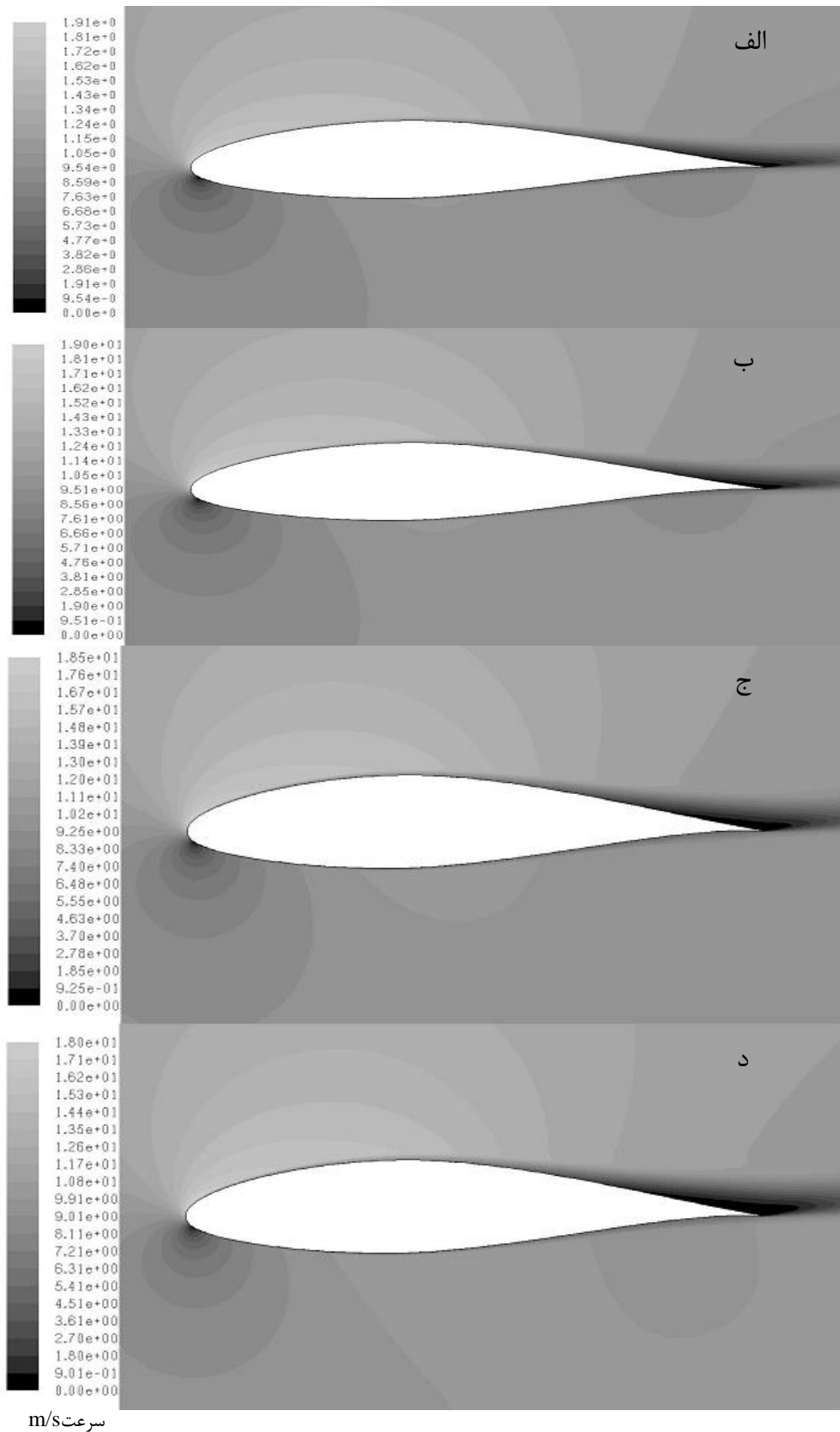
شکل ۴-۱۶ تأثیرات زبری مختلف بر روی ضریب پسا هوا بر ناکا.

همان‌طور که در هر سه هوا بر مشاهده شد با افزایش شدت زبری، ضریب برآ کاهش و ضریب پسا افزایش یافت. با افزایش شدت زبری، اختلاف بین ضرایب آئرو دینامیکی در حالت بدون زبری و حالت با زبری افزایش یافت. در توربین بادی افزایش ضریب پسا و کاهش ضریب برآ هر کدام به صورت جداگانه باعث خواهند شد که توان خروجی توربین کاهش یابد، حال آنکه با اعمال زبری بر روی پره ضریب برآ کاهش، و ضریب پسا افزایش پیدا کرده است و لذا انتظار کاهش عملکرد توربین می‌رود. شدت زبری با تسریع بخشیدن به فرایند جدایش جریان باد بر روی هوا برها باعث می‌شود تا پدیده واماندگی<sup>۱</sup> با سرعت بیشتری بر روی هوا برها رخ بدهد. به عنوان مثال با توجه به شکل ۴-۱۷ کانتورهای سرعت بر حسب m/s را بر روی هوا بر ناکا در زاویه حمله ۸ درجه نمایش می‌دهد، با افزایش شدت زبری، نقطه‌ای که در آن سرعت جریان باد به صفر می‌رسد به سمت وسط هوا بر در حرکت است. با

<sup>1</sup> stall



حرکت این نقطه به سمت وسط، هوا بر دچار افت در ضریب برآ و افزایش ضریب پسا می‌شود. طبق قانون برنولی برای جریان‌های آزاد با کاهش سرعت جریان باد میزان فشار جریان افزایش خواهد یافت. با توجه به شکل ۴-۱۷ در شدت زبری‌های بالا در قسمت انتهایی بالای هوا بر میزان سرعت باد به حداقل رسیده است. همچنین این میزان سرعت از قسمت انتهایی پایین هوا بر نیز کمتر بوده است. پس می‌توان گفت که در ناحیه انتهایی هوا بر میزان فشار در قسمت بالای هوا بر به حداکثر خواهد رسید و در نتیجه با تولید نیرویی به سمت پایین از میزان ضریب بالابردگی هوا بر کاسته می‌شود. در قسمت بعد باید به این مسئله پرداخت که شبیه‌سازی هوا برها و افزایش شدت زبری به چه میزانی توان خروجی توربین بادی و بازده انرژی و اکزرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین در پیوست الف شکل ۳ و شکل ۴ تأثیر شدت زبری برای دو هوا بر دیگر موجود است.



شکل ۴-۱۷ اثر افزایش شدت زبری بر جدایش جریان در کانتور سرعت روی هواپر NACA 64-418 در شدت زبری الف:  
 ۰ mm ب: ۰/۱ mm ج: ۰/۳ mm د: ۰/۵ mm

## ۴-۱-۲ نتایج نظریه تکانه اجزاء پره

در این مرحله توربین بادی آزمون مکزیکو با استفاده از کد بی-ای-ام تحت جریان مستقیم شبیه‌سازی شد و با نتایج به‌دست‌آمده از تونل باد مورد مقایسه قرار گرفت. در مرحله بعد به محاسبه توان خروجی از این نظریه و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی پرداخته شد. از ضرایب برآ و پسا که از مدل‌سازی هواپرها در نرم‌افزار فلونت محاسبه شده بود، به‌جای ضرایب آزمایشگاهی برآ و پسا در کد بی-ای-ام استفاده شد. با این کار به این سؤال که " آیا با جایگذاری مقادیر برآ و پسای محاسبه شده از شبیه‌سازی هواپرها در نرم‌افزار فلونت، در نظریه تکانه اجزاء پره می‌تواند به‌خوبی توان خروجی از توربین بادی را پیش‌بینی نماید؟" پاسخ داده شد و مدل مورد ارزیابی قرار گرفت.

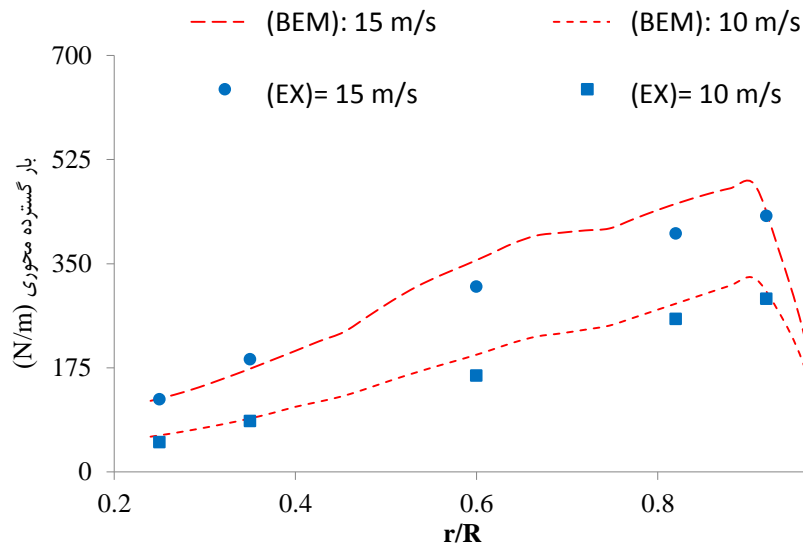
سپس ضرایب برآ و پسا که تحت شدت زبری‌های مختلف در نرم‌افزار فلونت محاسبه شدند، در نظریه تکانه اجزاء پره قرار داده شد تا تأثیر زبری بر توان خروجی از توربین بادی مشاهده شود.

## ۴-۱-۲-۱ محاسبه توان خروجی

داده‌های اندازه‌گیری در سه سرعت  $10 \text{ m/s}$ ،  $15 \text{ m/s}$  و  $24 \text{ m/s}$  به‌طور کامل و در  $5^\circ$  مقطع  $25\%$ ،  $35\%$ ،  $60\%$ ،  $82\%$  و  $92\%$  نسبت به طول پره ثبت شدند و توان و نیروی محوری روتور در  $11^\circ$  سرعت مختلف و در همین محدوده اندازه‌گیری و ثبت شدند. اما از طرفی چون توربین بادی در این تحقیق با توجه به شرایط آب و هوایی شهر منجیل تحلیل شد، اعتبارسنجی نتایج تنها در محدوده سرعت  $10 \text{ m/s}$  تا  $15 \text{ m/s}$  صورت گرفت.

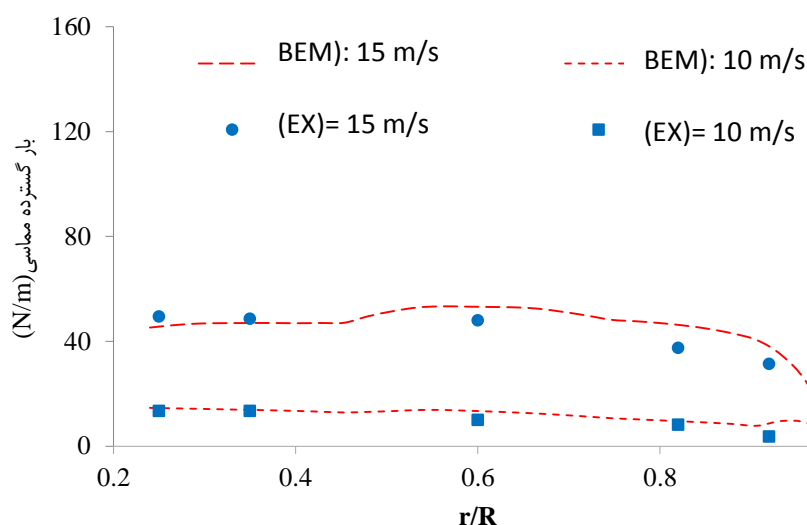
توزیع بار گسترده محوری حاصل از آزمون آزمایشگاهی و محاسبات مدل بی-ای-ام در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. نتایج حاصل از کد بی-ای-ام توانست تطابق خوبی در مقاطع مختلف پره توربین بادی، با نتایج به‌دست‌آمده از تونل باد را نمایش دهد. می‌توان گفت در هر دو سرعت مورد آزمایش در تمامی مقاطع، شبیه‌سازی به‌صورت قابل اطمینانی نتایج را پیش‌بینی کرده است. در این

شبیه‌سازی بیشترین خطای نسبی بار گسترده محوری در سرعت  $15\text{m/s}$  در مقطع  $0/6$  پره،  $11/4\%$  است.



شکل ۴-۱۸ نحوه توزیع بار گسترده محوری در مقاطع مختلف پره توربین بادی

همچنین توزیع بار گسترده سمتی حاصل از آزمون آزمایشگاهی و محاسبات مدل بی-ای-ام در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. نتایج حاصل از کد بی-ای-ام برای محاسبه بار گسترده سمتی توانست تطابق خوبی در مقاطع مختلف پره توربین بادی، با نتایج به دست آمده از تونل باد را نشان دهد. می‌توان گفت در هر دو سرعت مورد آزمایش در تمامی مقاطع، شبیه‌سازی به صورت قابل اطمینانی نتایج را پیش‌بینی کرده است. در این شبیه‌سازی بیشترین خطای نسبی بار گسترده سمتی در سرعت  $15\text{m/s}$  در مقطع  $0/92$  پره،  $25/3\%$  است. با دقت بیشتر در توزیع بارهای سمتی محوری، جهشی آرام در توزیع بار در نواحی میانی پره که محل نصب هوا بر ریزو است، مشاهده می‌شود. شروع و پایان این پدیده در دو فاصله شعاعی  $42\%R < r < 52\%R$  و  $61\%R < r < 76\%R$  است که نواحی انتقال هندسی دو هوا بر کناری به هوا بر ریزو است. این جهش هنگام مقایسه نتیجه محاسبات با داده‌های تجربی در مقطع  $60\%R$  در شکل ۴-۱۹ مشاهده می‌شود.



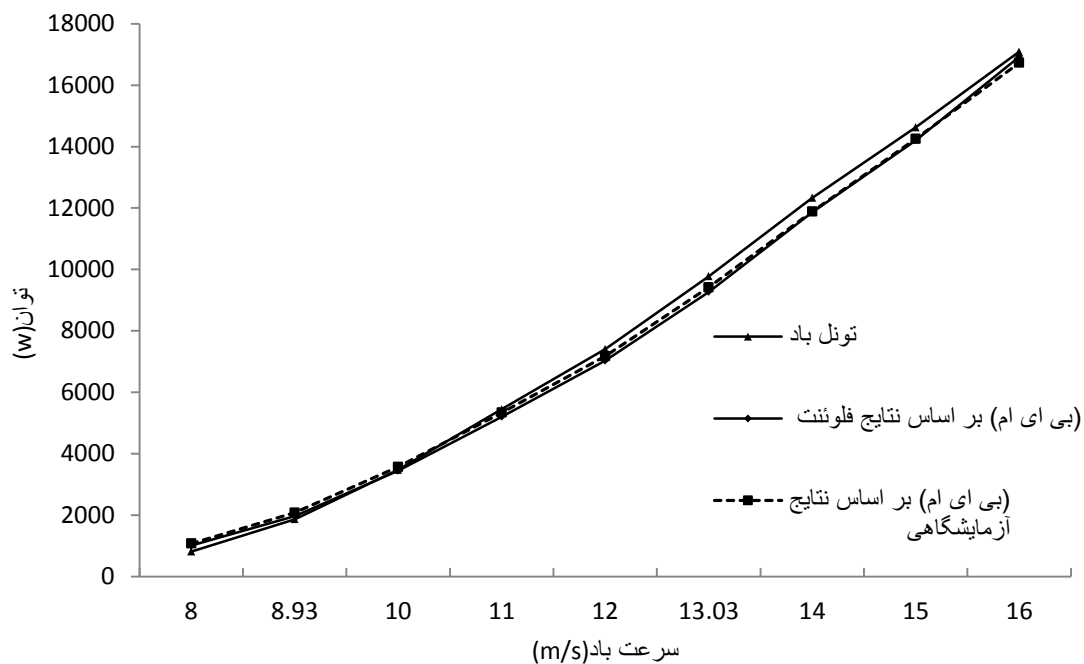
شکل ۴-۱۹ نحوه توزیع بار گسترده سمتی در مقاطع مختلف پره توربین بادی

پس از محاسبه نیروهای سمتی و محوری در سرعت‌های  $10\text{ m/s}$  و  $15\text{ m/s}$ ، بر روی قسمت‌های مختلف پره توربین بادی و مقایسه با مقادیر به دست آمده با نتایج تونل باد، نظریه تکانه اجزاء پره نشان داد که قادر به پیش‌بینی عملکرد توربین بادی است.

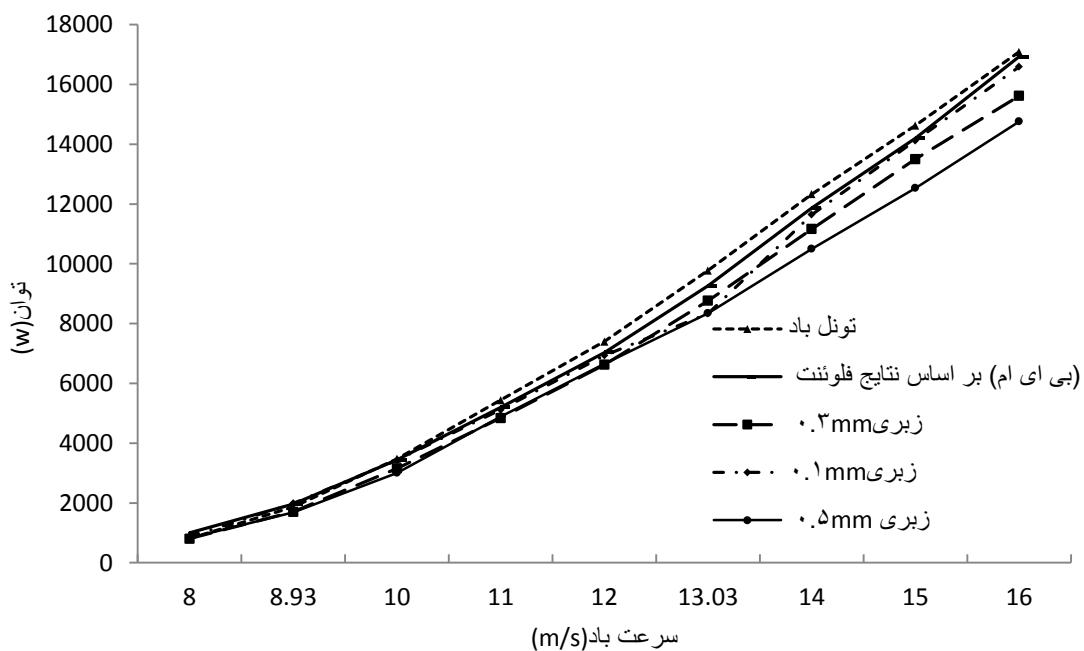
در شکل ۴-۲۰ به مقایسه توان خروجی اندازه‌گیری شده از تونل باد و نتایج شبیه‌سازی با استفاده از ضرایب برآ و پسا اندازه‌گیری شده (از تونل باد) و هم با استفاده از ضرایب برآ و پسا محاسبه شده (از نرم‌افزار فلونت) پرداخته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که در هر دو حالت (استفاده از نتایج فلونت و نتایج آزمایشگاهی داده‌های هواپرها)، شبیه‌سازی توانست به خوبی و با اختلاف کمی توان خروجی از توربین بادی را پیش‌بینی کند. با افزایش سرعت باد توان خروجی از توربین بادی مورد مطالعه با شیبی رو به بالا افزایش پیدا می‌کند. کد (بی-ای-ام) نیز توانست این خصوصیت توربین بادی را با افزایش سرعت باد نمایش دهد. بیشترین اختلاف بین نتایج کد بر اساس نتایج آزمایشگاهی و نتایج توان اندازه‌گیری شده از تونل باد در سرعت  $14\text{ m/s}$  است، در این سرعت تنها  $446$  وات با نتایج تونل باد اختلاف وجود دارد. این اختلاف برای نتایج کد بر اساس نتایج نرم‌افزار

فلوئنت در سرعت  $13\text{m/s}$  برابر  $510$  وات است. بر اساس این نتایج در شکل ۴-۲۰ می‌توان دریافت در صورتی که داده‌های هواپرها مانند ضرایب برآ و پسا اگر به صورت کامل موجود نبودند، می‌توان با شبیه‌سازی آن‌ها در محیط دینامیک سیالات محاسباتی و انتقال نتایج به کد بی-ای-ام نتایج قابل قبولی را استخراج کرد.

پس از محاسبه قابل قبول توان خروجی از کد بی-ای-ام، در گام بعد، به بررسی تأثیرات زبری بر توان خروجی از توربین بادی پرداخته شد. بررسی اثرات رشد شدت زبری توسط گردوغبار بر عملکرد توربین بادی برای توربین بادی آزمون مکزیکو با شبیه‌سازی به کمک کد بی-ای-ام، یکی از گام‌های نو این مطالعه است. با توجه به شکل ۴-۲۱ هر چه شدت زبری افزایش یابد مقدار توان محاسبه شده از شبیه‌سازی کاهش می‌یابد. بر این اساس می‌توان دریافت که شدت زبری  $0.1\text{mm}$  در مقایسه با سایر شدت زبری‌ها زبری، نتوانست اثر قابل توجهی بر توان خروجی توربین داشته باشد، هرچند که در همین شدت زبری نیز توان خروجی کاهش نامحسوسی از خود نشان داد. از طرفی با افزایش سرعت باد، توان خروجی تحت یک زبری ثابت، کاهش بیشتری از خود نمایش می‌دهد. مثلاً در شدت زبری  $0.3\text{mm}$  در سرعت  $8\text{m/s}$ ، اختلاف در توان خروجی در مقایسه با توان محاسبه شده از کد بر اساس نتایج فلوئنت  $197$  وات بود که با افزایش سرعت به  $16\text{m/s}$  این مقدار اختلاف به  $1309$  وات رسید. و برای شدت زبری  $0.5\text{mm}$  و در سرعت  $8\text{m/s}$ ، این اختلاف از  $179$  وات شروع شد و در سرعت  $16\text{m/s}$  به مقدار  $2165$  وات رسید. این موضوع نشان می‌دهد که شدت زبری در سرعت‌های بالا با تسریع بخشیدن به فرایند جدایش جریان بادبر روی پره توربین بادی پدیده واماندگی را تشدید می‌کند. این امر سبب کاهش ضریب برآ و افزایش ضریب پسا در هواپرها استفاده شده در پره می‌شود. در نتیجه با کاهش ضرایب آئرو دینامیکی توربین بادی توان کمتری تولید می‌کند.



شکل ۴-۲۰ مقایسه توان خروجی نتایج تونل باد و نتایج شبیه‌سازی با نتایج هوابرها در شرایط آزمایشگاهی و نتایج هوابرها در نرم‌افزار فلوننت.



شکل ۴-۲۱ تأثیر زبری بر توان تولیدشده توربین بادی در سرعت‌های مختلف.

#### ۴-۲-۱-۲ نتایج اثر زاویه یاو

اثر زاویه یاو هنگامی به وجود می‌آید که جریان باد به صورت عمود با صفحه روتور برخورد نکند. در این شرایط نیروهای سمتی و سمتهی با تغییرات زاویه قرارگیری پره در صفحه روتور و

همچنین زاویه یاو تغییر خواهند کرد. شبیه‌سازی و درک صحیح از شرایط روتور تحت زاویه یاو همواره جزو قسمت‌های پیچیده در این زمینه تحقیقاتی بوده است. هرچند مطالعات زیادی در زمینه زاویه یاو انجام شده و در حال انجام است تا بتوانند یک شبیه‌سازی با نتایج نزدیک به مقادیر آزمایشگاهی و واقعی داشته باشند، اما هنوز اثراتی نامشخص از زاویه یاو روی روتور وجود دارد که نیاز به مدل‌سازی‌های قوی‌تر و مطالعه و تحقیق بیشتر جهت نزدیک شدن داده‌های محاسباتی به داده‌های آزمایشگاهی دارد.

در این تحقیق پس از محاسبه نیروهای سمتی و سمتی در طول پره، توان توربین بادی تحت زاویه یاو در بازه سرعت  $10\text{ m/s}$  تا  $24\text{ m/s}$  و در زاویه‌های یاو  $5^\circ$ ،  $10^\circ$  و  $30^\circ$  درجه محاسبه شدند. در این تحقیق نیروهای سمتی و محوری برای سرعت  $24\text{ m/s}$  در زاویه یاو  $15^\circ$  درجه، در  $5$  مقطع  $25\%$ ،  $35\%$ ،  $60\%$ ،  $82\%$  و  $92\%$  نسبت به طول پره توربین بادی محاسبه شد. این نتایج با مقادیر به‌دست‌آمده از آزمون مکزیکو مورد مقایسه قرار گرفتند.

از مدل‌های ریاضی که توسط سایر پژوهشگران برای توربین بادی آزمون مکزیکو تحت زاویه یاو به کار گرفته شده می‌توان به سه مدل به نام‌های روتور-کامل ریزو<sup>۱</sup>، تی-یو-دی-پن<sup>۲</sup> و مدل سی-اف-دی تکنیک<sup>۳</sup> نام برد [۱۵].

مدل روتور-کامل ریزو توسط دانشگاه صنعتی دانمارک به وسیله نرم‌افزار الیپسیس<sup>۴</sup> و به روش توربلانسی غیر متراکم میانگین رینولدز<sup>۵</sup> حل شد. مدل سی-اف-دی تکنیک به کمک نرم‌افزار محاسباتی استار-سی-دی<sup>۶</sup> در دو مدل توربلانسی کی-اِپسیلون<sup>۷</sup> و کی-امگا<sup>۸</sup> حل شد. مدل تو-یو-دی-پن توسط دانشگاه تی-یو-دلف هلند بر اساس مدل پتانسیل جریان آزاد کد نویسی شد که در آن

---

<sup>1</sup> RISØ CFD

<sup>2</sup> TUDelft Panel code

<sup>3</sup> Technion CFD

<sup>4</sup> EllipSys3D

<sup>5</sup> RANS

<sup>6</sup> STAR-CD

<sup>7</sup> k-ε

<sup>8</sup> K-ω/SST

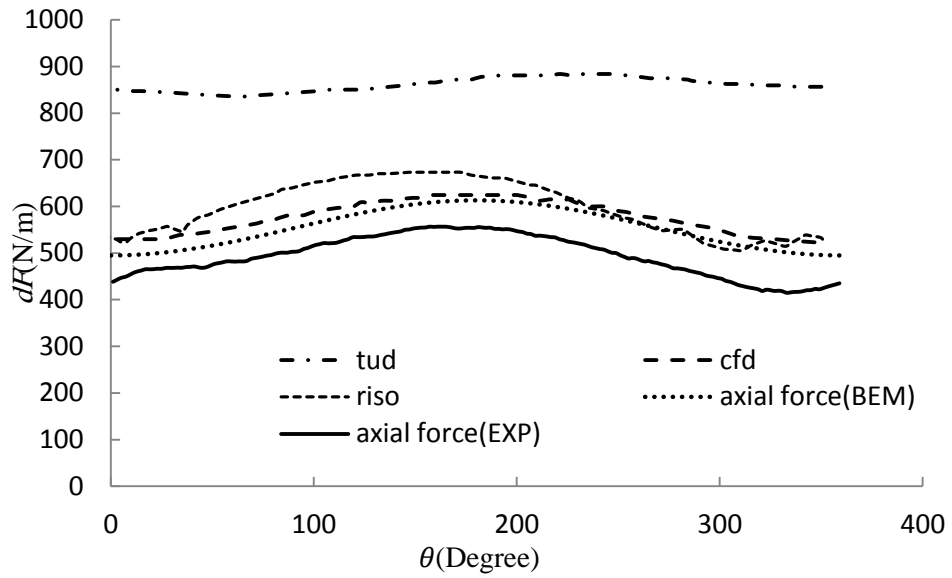


جسم و پسابد به کمک مومنتوم و توزیع دابلت<sup>۱</sup> در هر گام زمانی محاسبه شدند.

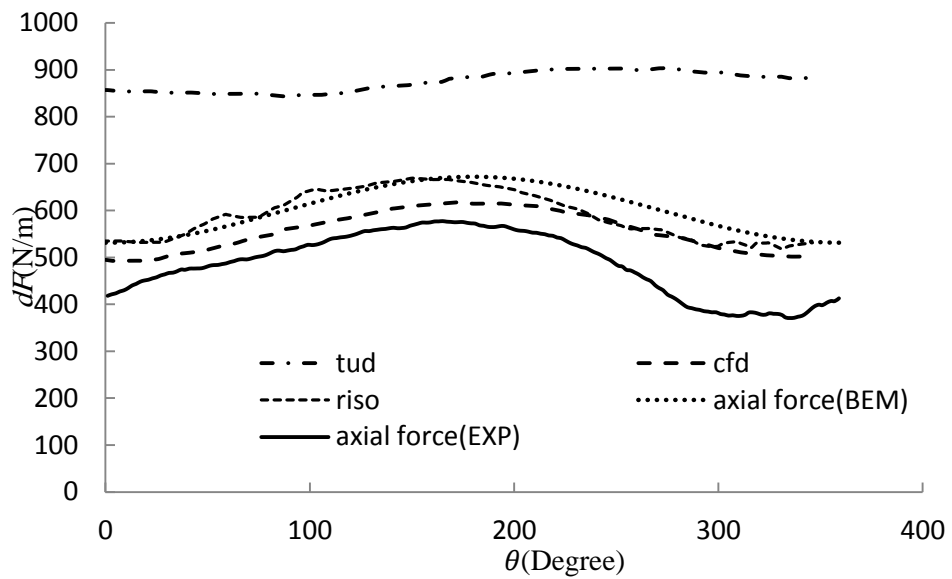
نتایج حاصل از محاسبات مدل بی-ای-ام ارتقاء یافته این تحقیق، جهت ارزشیابی بیشتر، با نتایج حاصل از این سه مدل نیز مقایسه شده است.

شکل ۴-۲۲ تا شکل ۴-۳۱ نتایج نیروی سمتی و محوری در مقاطع مختلف پره توربین بادی در سرعت باد ۲۴m/s و تحت زاویه یاو ۱۵ درجه نشان می‌دهد. شکل ۴-۲۲ و شکل ۴-۲۳ مقایسه نیروهای سمتی به دست آمده از شبیه‌سازی و مقادیر آزمایشگاهی در سرعت ۲۴ m/s در مقاطع ۹۲٪ و ۸۲٪ طول پره را نشان می‌دهند. در مقطع ۹۲٪ مدل ارائه شده توانست رفتاری نزدیک به نتایج واقعی را در مقایسه با سایر شبیه‌سازی‌ها نشان دهد. در این مقطع بیشترین خطای نسبی توسط مدل ارائه شده در زاویه صفر درجه برابر ۱۲٪ داشت. همچنین این مدل ریاضی در مقطع ۸۲٪ رفتار نیروی محوری را مشابه رفتار آزمایشگاهی پیش‌بینی کرد. بیشترین خطای نسبی در این مقطع در زاویه ۳۳۶ درجه، برابر ۴۴٪ بود. در همین زاویه بیشترین خطای نسبی برای مدل سی-اف-دی و مدل روتور-کامل ریزو به ترتیب ۴۰٪ و ۴۲٪ داشت [۳۶]. همان‌طور که در شکل ۴-۲۲ و شکل ۴-۲۴ مشاهده می‌شود، پیشینه نیروی محوری در سرعت باد ۲۴m/s اختلاف‌فاز قابل توجهی با نتایج آزمایشگاهی نداشت. این نکته گویای این مطلب است که در سرعت‌های بالاتر باد، ضخامت لایه مرزی تونل باد کاهش یافته و اثر متقابل آن روی پسابد و روتور ناچیز شده است. از این رو، نتایج محاسبات گد بی-ای-ام با نتایج اندازه‌گیری به‌ویژه در نیروی محوری از نظر رفتاری تناسب بهتری داشته است.

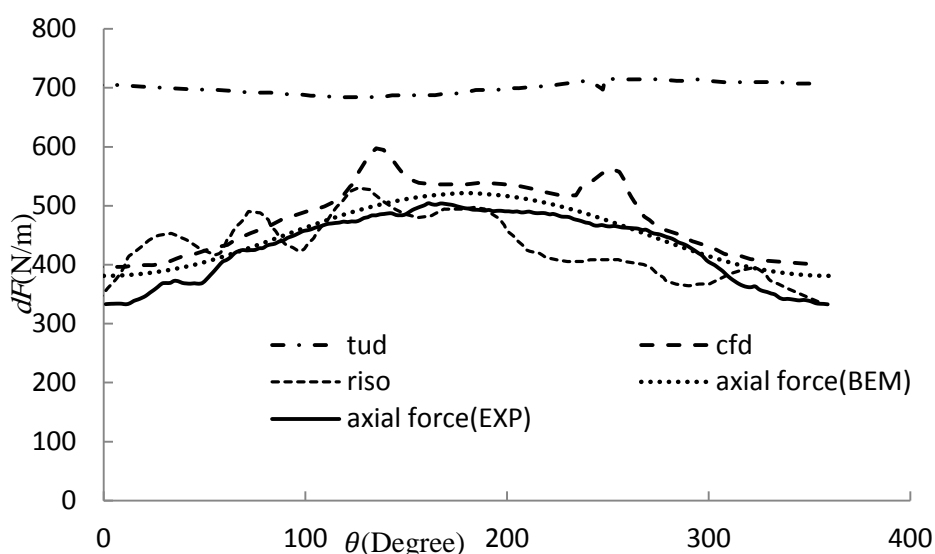
در سرعت باد ۲۴m/s در مقطع ۶۰٪، در مقایسه با سایر پژوهش‌ها [۳۶]، میزان اختلاف بین نیروی سمتی آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه شده در این شبیه‌سازی، قابل قبول بود و نزدیک‌ترین رفتار را به نتایج واقعی پیش‌بینی کرد شکل ۴-۲۴.



شکل ۴-۲۲ توزیع نیروهای محوری در مقطع ۹۲٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s.



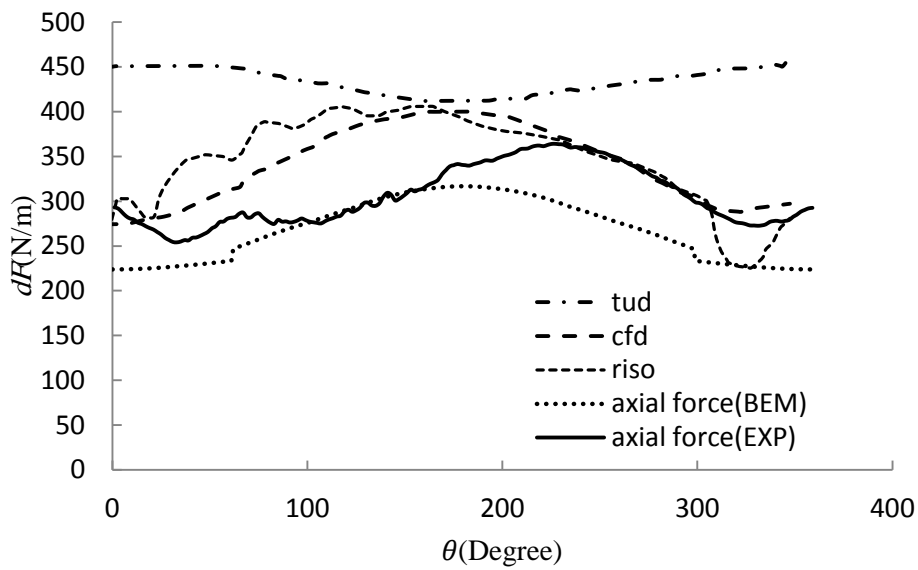
شکل ۴-۲۳ توزیع نیروهای محوری در مقطع ۸۲٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s.



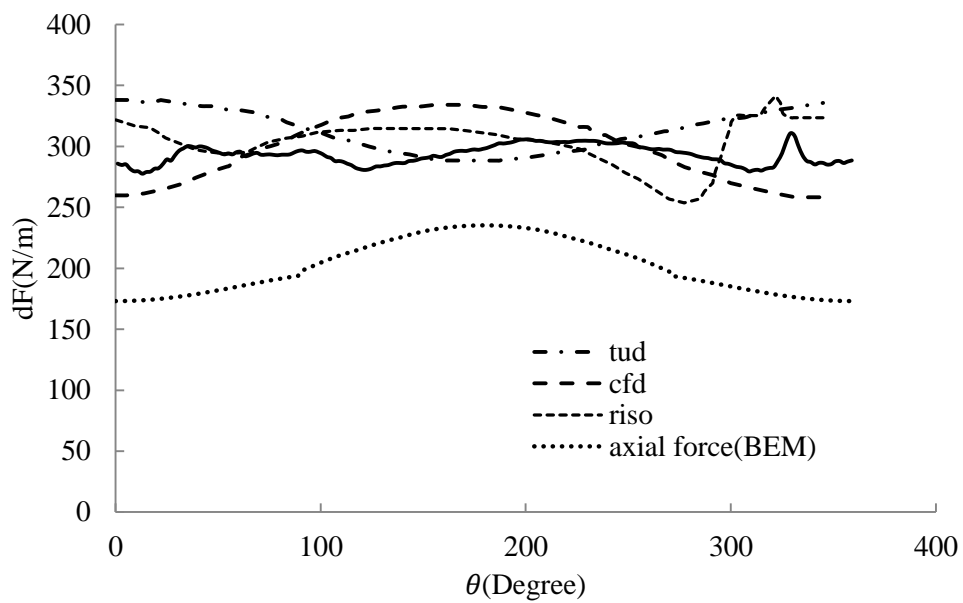
شکل ۴-۲۴ توزیع نیروهای محوری در مقطع ۶۰٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s.

در شکل ۴-۲۵ و شکل ۴-۲۷ نتایج و مقایسه نیروهای محوری در زاویه‌های مختلف چرخش پره در مقاطع ۳۵٪ و ۲۵٪ طول پره در سرعت باد ۲۴m/s برای داده‌های اندازه‌گیری و مدل بی-ای-ام ارتقاء یافته این تحقیق نمایش داده شده است. نیروی سمتی محاسبه شده از گد، در هر دو در شکل ۴-۲۵ و شکل ۴-۲۷ رفتاری مشابه با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد، در مقطع ۳۵٪ مدل ارائه شده توانست نتایج بهتری نسبت به مقطع ۲۵٪ محاسبه کند و نتایجی نزدیک‌تر به نتایج واقعی به دست آمده آورد. در این مقطع بیشترین خطای نسبی برای مدل ارائه شده در زاویه صفر درجه برابر ۲۳٪ است. سایر مدل‌های ارائه شده دارای خطاهای بالاتری هستند. بیشترین خطا متعلق به مدل تی-یو-دی-پن بوده و بعد از آن، بیشترین خطای نسبی مدل روتور-کامل ریزو ۴۴٪ و در زاویه ۱۱ درجه است. همچنین بیشترین خطای نسبی مدل سی-اف-دی ۳۳٪ و در زاویه ۱۱۰ درجه است. مشابه نتایج دو مدل روتور-کامل ریزو و سی-اف-دی تکنیک، نتایج محاسبات این تحقیق نیز در این دو مقطع از روندی منطقی پیروی می‌کند. اختلاف بین محاسبات انجام شده توسط مدل بی-ای-ام و مقادیر اندازه‌گیری شده در مقطع ۲۵٪ قابل توجه‌تر است. بیشترین خطای نسبی در این مقطع برای مدل ارائه شده در زاویه ۳۴۰ درجه برابر ۳۹٪ است، در حالی که بیشترین خطای نسبی برای سایر پژوهش‌ها

در زاویه صفر درجه برای مدل تی-یو-دی-پن ۱۸٪ است.



شکل ۴-۲۵ توزیع نیروهای محوری در مقطع ۳۵٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s.



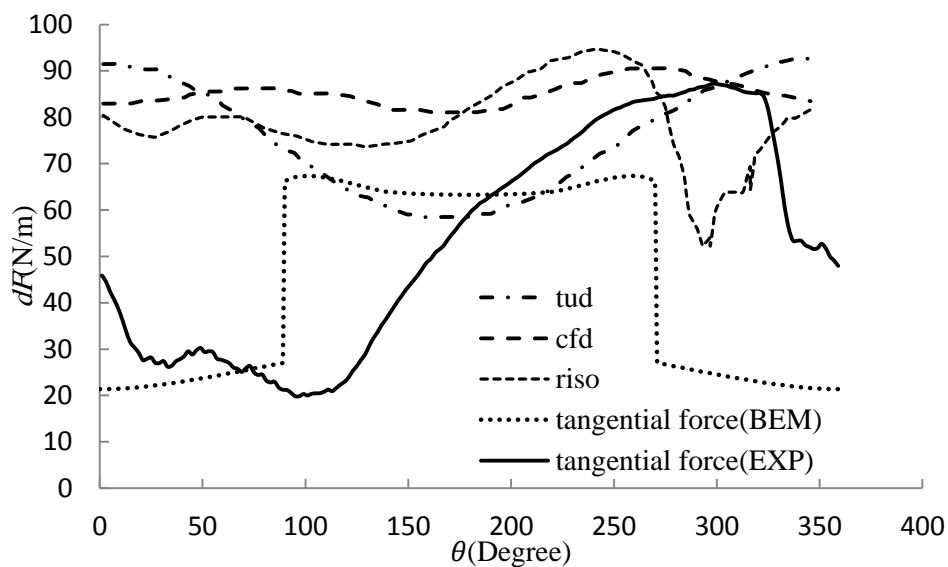
شکل ۴-۲۶ توزیع نیروهای محوری در مقطع ۲۵٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s.

شکل ۴-۲۷ و شکل ۴-۲۸ نتایج نیروی سمتی را در سرعت باد ۲۴m/s و تحت زاویه یاو ۱۵

درجه نشان می‌دهند. رفتار داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی برای نیروی سمتی نامنظم‌تر شد.

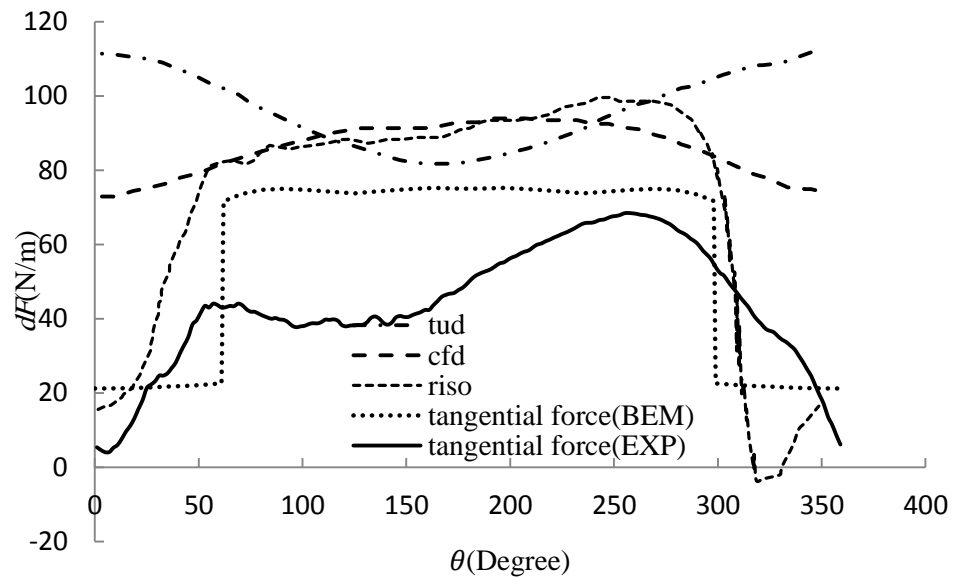
از این رو، مشابه سایر پژوهش‌ها [۳۶]، مدل ریاضی این تحقیق نتایج قابل توجهی را در مقطع ۲۵٪ محاسبه کند شکل ۴-۲۷. در مدل محاسباتی این تحقیق، یک جهش مشخص در فاصله زاویه‌ای ۹۰ تا ۲۷۰ درجه مشاهده می‌شود که در نتایج آزمایشگاهی دیده نمی‌شود، هرچند در مقطع ۳۵٪ رفتار مدل محاسباتی به نتایج اندازه‌گیری نزدیک‌تر شد و جهش اشاره‌شده تقریباً در همان فاصله زاویه‌ای اتفاق افتاد شکل ۴-۲۸.

نیروی سمتی محاسبه‌شده توسط شبیه‌سازی این پژوهش در این مقطع، بهترین نتیجه را نسبت به سه روش دیگر نشان داد و مقادیر آزمایشگاهی را بهتر پیش‌بینی کرد [۳۶]. نتایج در مقاطع ۲۵٪ و ۳۵٪ تحت زاویه یا ۳۰ درجه به ترتیب تحت سرعت باد ۲۴ m/s نشان داد که به‌طور کلی پیچیدگی در نواحی نزدیک به مرکز روتور بیشتر است و لذا مدل‌های ریاضی پیشرفته‌تری در ناحیه مرکزی تا فاصله شعاعی حدود ۳۵٪ طول پره به‌ویژه برای محاسبه بار محوری بایستی توسعه یابند. این پیچیدگی می‌تواند ناشی از بالا بودن زاویه حمله پره و جریان گردابه‌ای باشد که از ریشه پره و از روی سطح ناسل<sup>۱</sup> توربین به درون پس‌باد نفوذ می‌کند و در نهایت عکس‌العمل آن به پره وارد می‌شود که می‌تواند تا فاصله شعاعی حدود ۳۵٪ درصد نیز توسعه یابد.



شکل ۴-۲۷ توزیع نیروهای سمتی در مقطع ۲۵٪ شعاع پره در سرعت ۲۴ m/s.

<sup>۱</sup> Nacelle



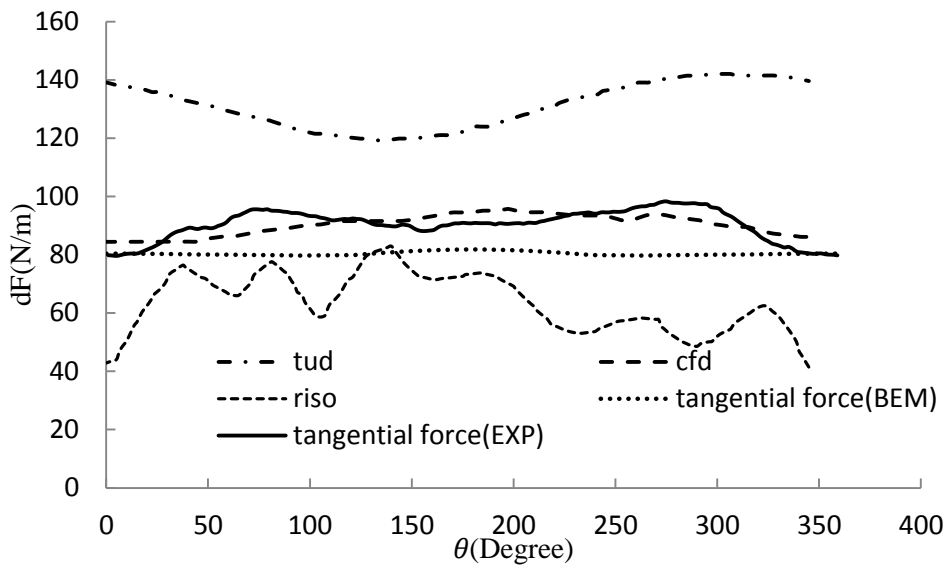
شکل ۴- ۲۸ توزیع نیروهای سمتی در مقطع ۳۵٪ شعاع پره در سرعت ۲۴ m/s.

در مقطع ۶۰٪ شکل ۴- ۲۹ میزان اختلاف بین نیروی سمتی اندازه‌گیری شده با مقادیر

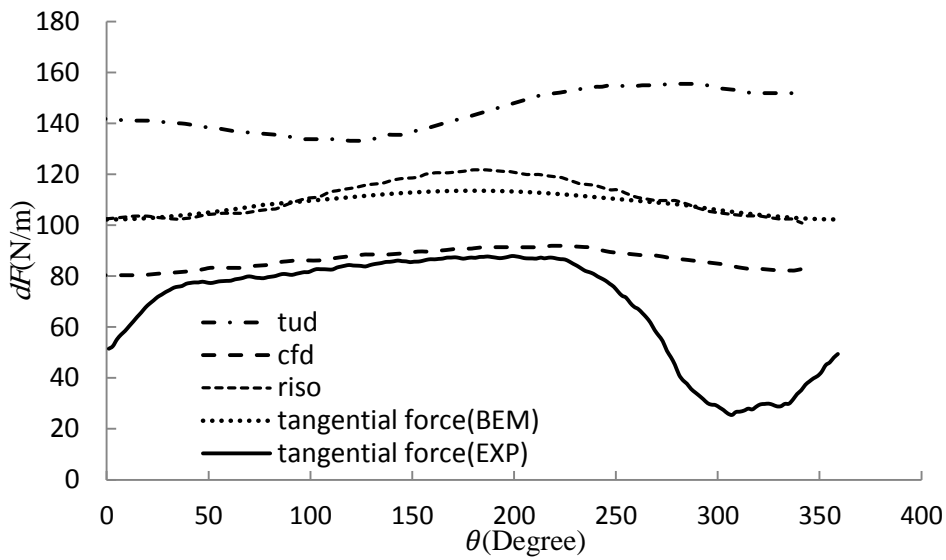
محاسبه شده برای مدل سی-اف-دی به حداقل رسید. برای مدل ارائه شده، بیشترین خطای نسبی در زاویه ۳۰۰ درجه برابر ۱۶٪ است. در حالی که در همان زاویه، خطای نسبی مدل روتور-کامل ریزو ۴۶٪ است. نتایج در این مقطع برای مدل ارائه شده در مقایسه با دو مدل روتور-کامل ریزو و تی-یو-دی-پن از روند مطلوب تری برخوردار بود.

شکل ۴- ۳۰ و شکل ۴- ۳۱ نیروی سمتی به دست آمده از شبیه‌سازی و مقادیر آزمایشگاهی در

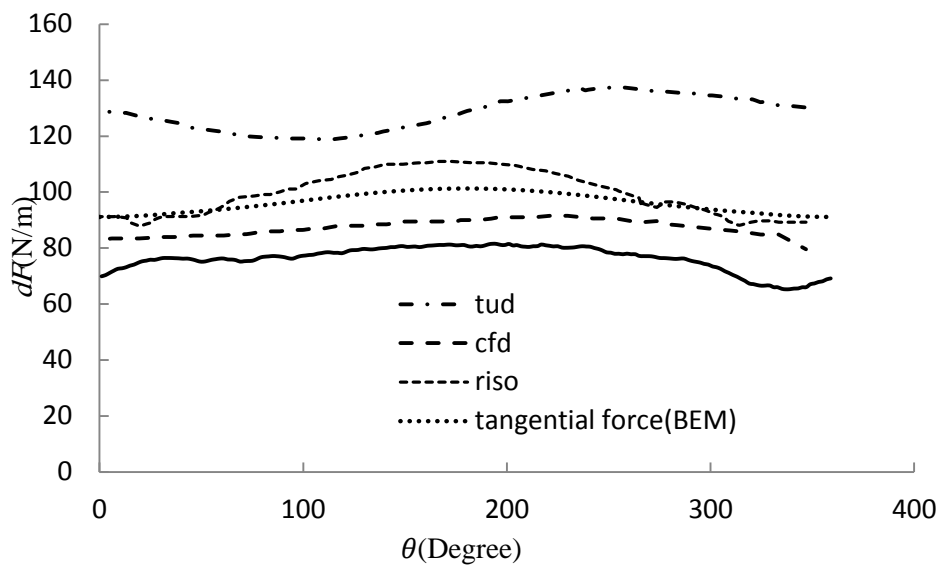
سرعت ۲۴ m/s تحت زاویه یاو ۱۵ درجه در مقاطع ۸۲٪ و ۹۲٪ طول پره را نمایش می‌دهند. به‌طور کلی رفتار داده‌ای آزمایشگاهی پیش‌بینی شد. در هر دو مقطع، مقادیر محاسبه شده توسط مدل ارائه شده، اختلاف ثابتی با نتایج آزمایشگاهی در طی چرخش پره حول محور روتور را نشان داد. در شکل ۴- ۳۰ میزان خطای نسبی برای تمامی شبیه‌سازی‌ها از زاویه ۲۵۰ درجه تا ۳۶۰ درجه به شدت رو به افزایش است، اما با این وجود مدل ارائه شده در این تحقیق در مقایسه با دو مدل روتور-کامل ریزو و تی-یو-دی-پن نتایج مطلوبی را استخراج کرد.



شکل ۴-۲۹ توزیع سمتی در مقطع ۶۰/شعاع پره در سرعت ۲۴m/s.



شکل ۴-۳۰ توزیع نیروهای سمتی در مقطع ۸۲/شعاع پره در سرعت ۲۴m/s.



شکل ۴-۳۱ توزیع نیروهای سمتی در مقطع ۹۲٪ شعاع پره در سرعت ۲۴m/s.

همان‌طور که شکل ۴-۳۰ و شکل ۴-۳۱ مشاهده می‌شود، پیشینه نیروی‌های محوری در سرعت باد بالاتر (یعنی سرعت ۲۴m/s) اختلاف‌فاز قابل توجهی ندارد. این نکته احتمالاً گویای این مطلب است که در سرعت‌های بالاتر باد، ضخامت لایه مرزی تونل باد کاهش یافته و اثر متقابل آن روی پس‌باد و روتور ناچیز شده است. از این رو، نتایج محاسبات گد بی-ای-ام با نتایج اندازه‌گیری به‌ویژه در نیروی محوری از نظر رفتاری تناسب بهتری داشته است.

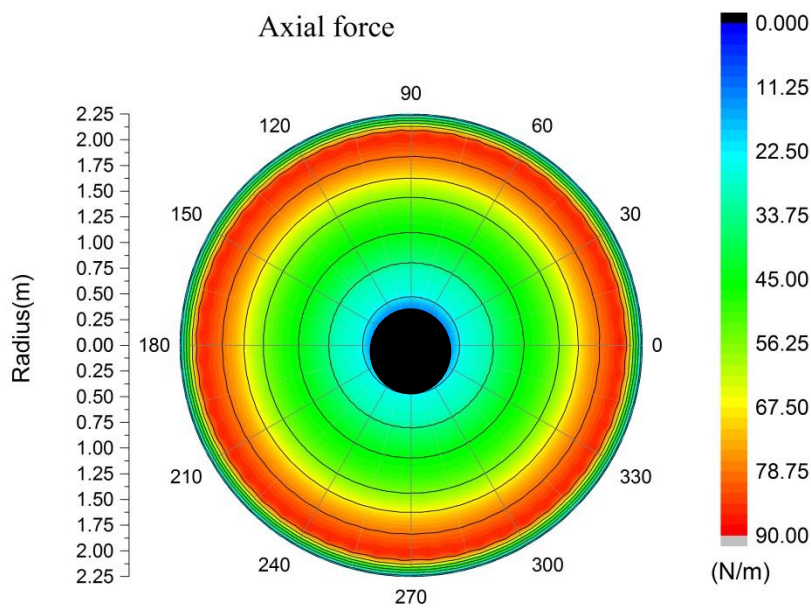
پس از محاسبه و مقایسه توزیع نیروهای محوری و سمتی در شرایط زاویه یاو بر روی توربین بادی، در مرحله بعد به بررسی وضعیت زاویه حمله، شاخص محوری و نیروی محوری و گشتاور بر روی پره توربین بادی در زاویه یاو پرداخته خواهد شد.

در شکل ۴-۳۲ و شکل ۴-۳۵ وضعیت نیروی‌های محوری و سمتی، زاویه حمله، شاخص محوری، بر روی پره توربین بادی در سرعت باد ۲۴ m/s تحت زاویه یاو صفر درجه نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۴-۳۲ و شکل ۴-۳۳ مقدار و آهنگ رشد نیروی‌های محوری و سمتی در نواحی نزدیک ریشه پره تا شعاع ۰/۸۷۵m پره از سایر قسمت‌های پره توربین بادی کمتر است.

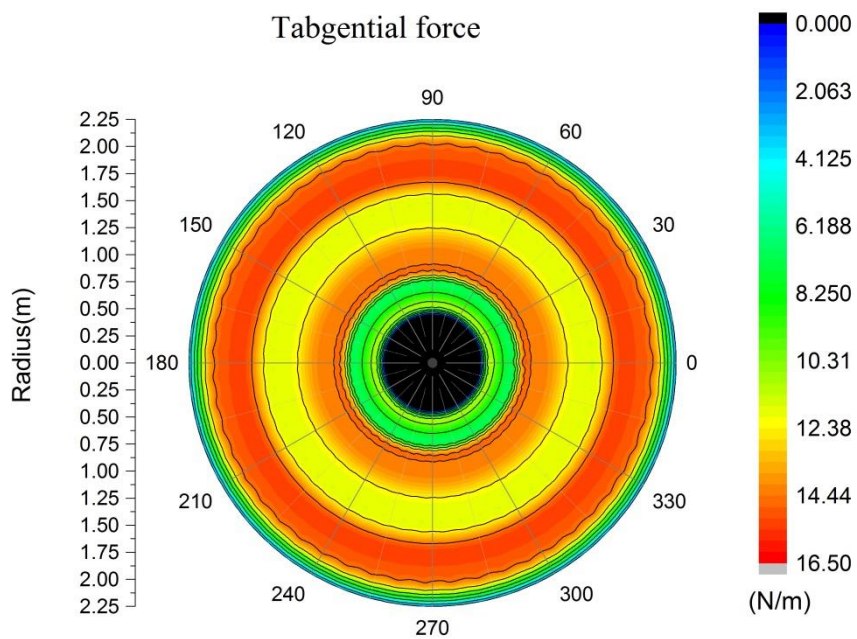
همچنین با توجه به شکل ۴-۳۴ مقدار زاویه حمله در ناحیه نزدیک به ریشه تا شعاع ۰/۸۷۵m بر



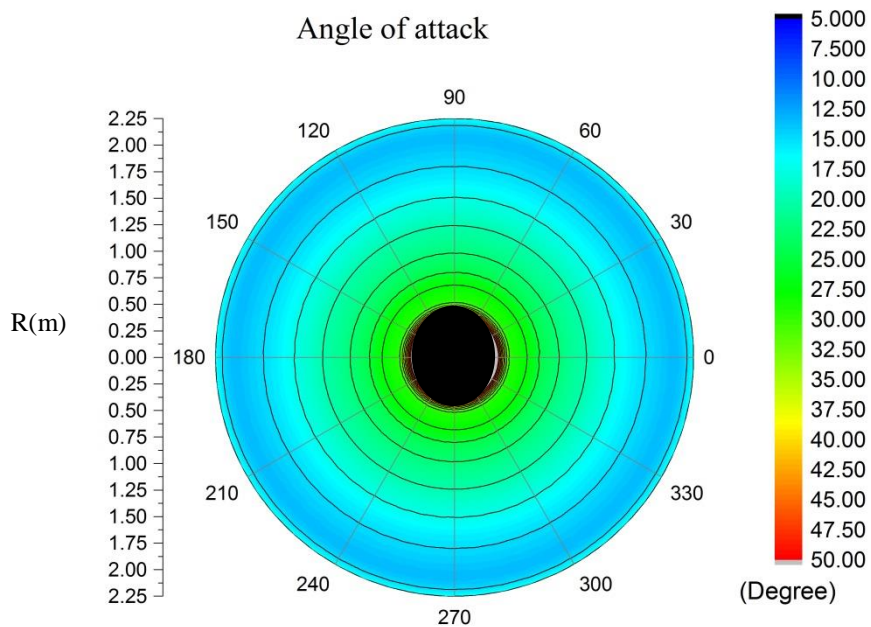
روی پره بیشتر از نواحی دیگر است. می توان دریافت که در نواحی نزدیک به ریشه پره توربین بادی آزمون مکزیکو، پدیده واماندگی زودتر از ناحیه های دیگر پره احتمالاً رخ می دهد. همچنین با افزایش شعاع پره از  $1/6$  m تا نوک پره به تدریج مقدار شاخص محوری افزایش می یابد اما مقدار شاخص محوری در انتهای پره کمتر از سایر قسمت ها شد شکل ۴-۳۵. با توجه به رابطه (۳-۴) هر چه مقدار شاخص محوری کم باشد نشانگر این موضوع است که سرعت  $v_2$  زیاد است. یعنی پره نتوانسته است مقدار زیادی از انرژی جنبشی باد را جذب کند. در انتهای پره به علت اینکه تأثیرات جدایش جریان باد از نوک پره رخ می دهد، باعث می شود که پره در آن نواحی مقدار قابل توجهی از انرژی جنبشی باد را اتلاف کند.



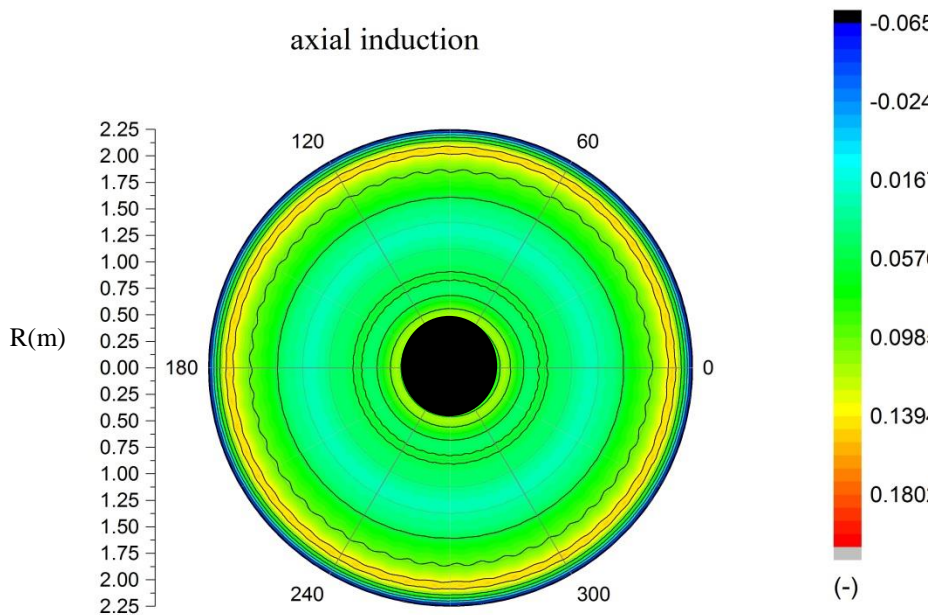
شکل ۴-۳۲ توزیع نیروی محوری در صفحه چرخش پره در زاویه یابو صفر درجه



شکل ۴-۳۳ توزیع نیروی سمتی در صفحه چرخش پره در زاویه یابو صفر درجه

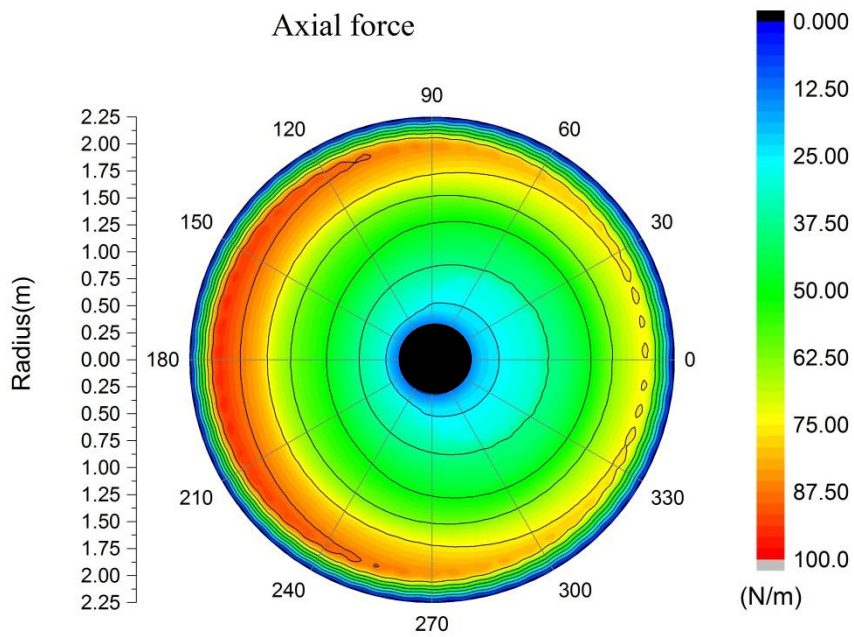


شکل ۴-۳۴ توزیع زاویه حمله در صفحه چرخش پره در زاویه یابو صفر درجه

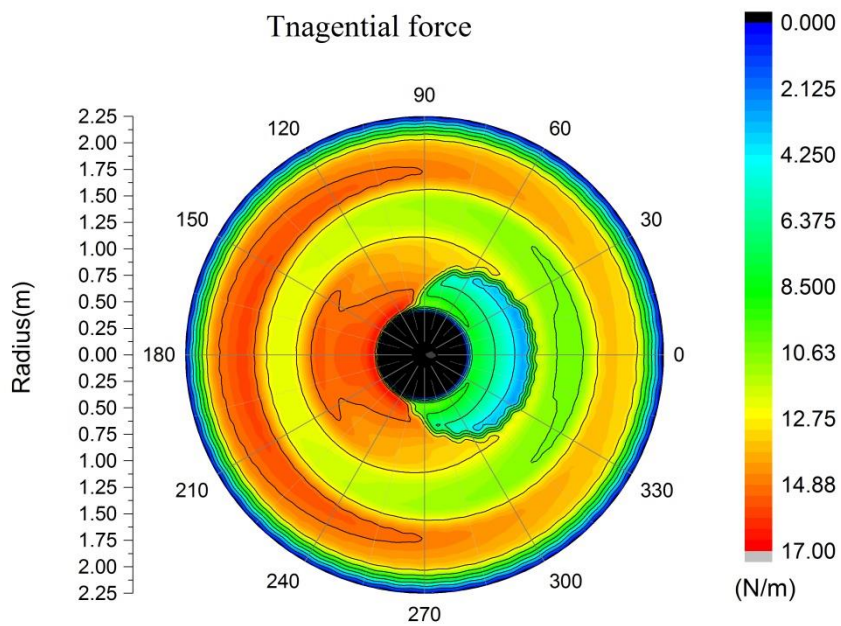


شکل ۴-۳۵ توزیع شاخص محوری در صفحه چرخش پره در زاویه یابو صفر درجه

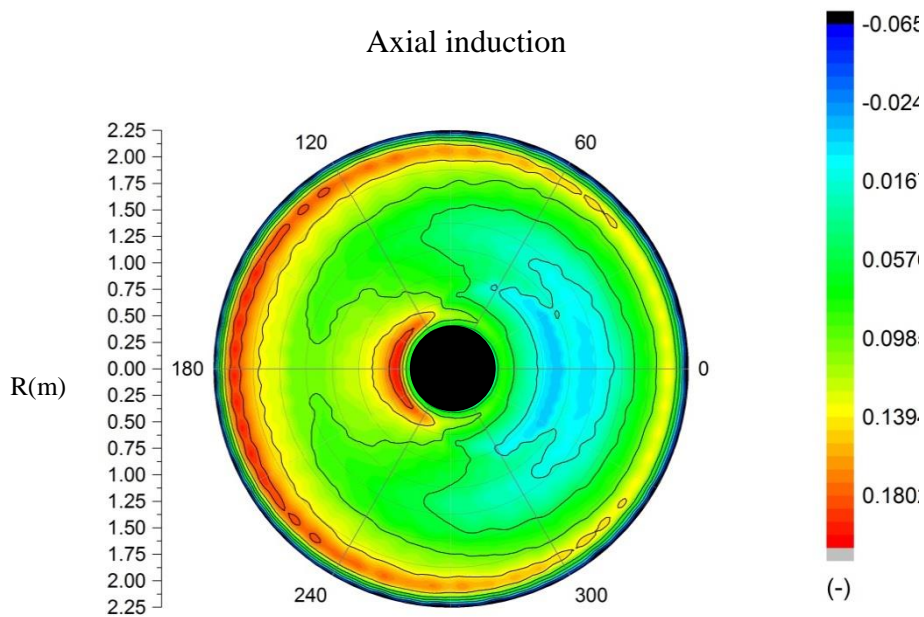
شکل ۴-۳۶ تا شکل ۴-۳۹ مقدار نیروی‌های محوری و سمتی، شاخص محوری و زاویه حمله در سرعت ۲۴m/s در زاویه یابو ۱۵ درجه را نمایش می‌دهد. در شکل ۴-۳۶ تا شکل ۴-۳۷ مقدار نیروی‌های محوری و سمتی برخلاف مقدار مشابه آن‌ها در شرایط زاویه یابو صفر درجه دارای تقارن نیست و با چرخش پره توربین بادی در صفحه گردش روتور تغییر می‌کند. در صفحه چرخش پره، از زاویه ۲۷۰ تا ۹۰ درجه که در اینجا به‌عنوان نیمه دوم شناخته می‌شود، مقدار گشتاور، نیروی محوری و شاخص محوری کمتر از نیمه اول صفحه روتور است. علت این موضوع این است نیمه اول که زودتر با جریان باد برخورد می‌کند، سرعت برخورد باد با پره توربین زیاد است ولی در نیمه دوم صفحه روتور این مقدار کاهش می‌یابد شکل ۴-۳۸ [۱۸]. همچنین در نیمه اول صفحه روتور در نواحی نزدیک به ریشه تا اواسط پره مقدار زاویه حمله زیاد است شکل ۴-۳۹. این امر به‌تنهایی احتمال وجود ناحیه واماندگی را در نیمه اول صفحه روتور نشان می‌دهد.



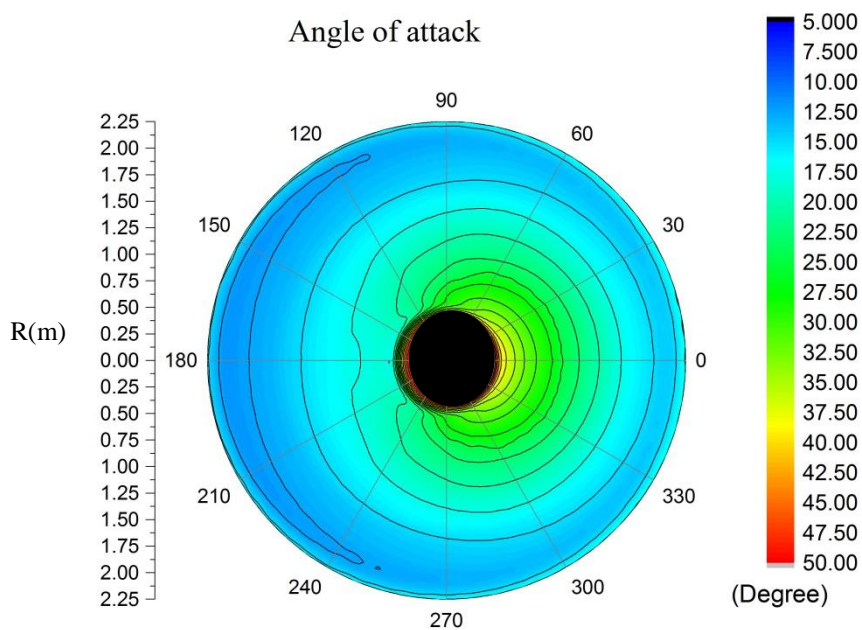
شکل ۴-۳۶ توزیع نیروی محوری در صفحه چرخش پره در زاویه یاو ۱۵ درجه



شکل ۴-۳۷ توزیع نیروی سمتی در صفحه چرخش پره در زاویه یاو ۱۵ درجه



شکل ۴-۳۸ توزیع شاخص محوری در صفحه چرخش پره در زاویه یابو ۱۵ درجه

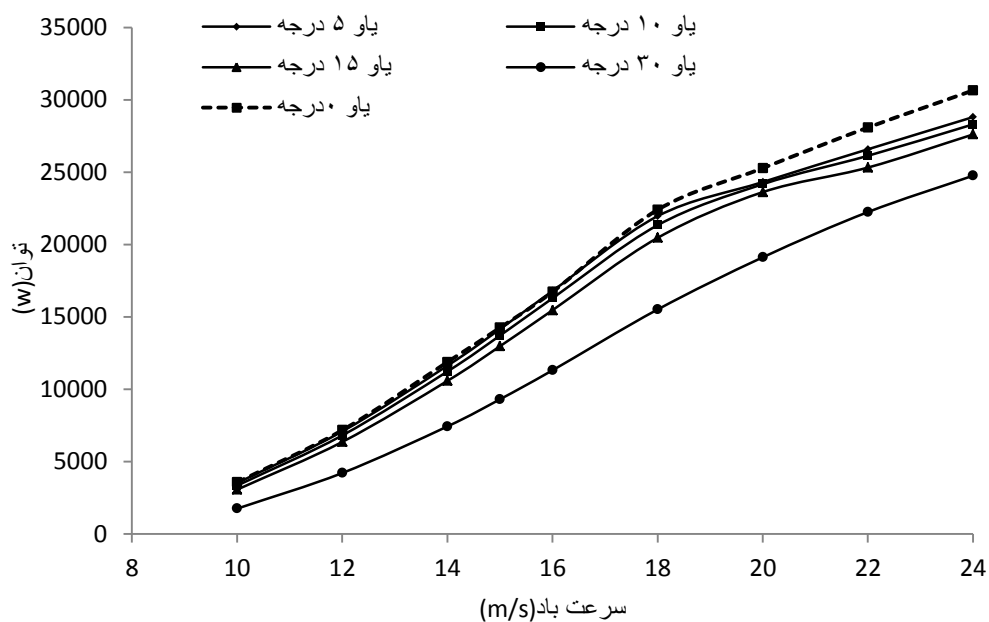


شکل ۴-۳۹ توزیع زاویه حمله در صفحه چرخش پره در زاویه یابو ۱۵ درجه

در این پژوهش، شبیه‌سازی توانست نتایج بهتری در مقایسه با سایر مدل‌های ریاضی در تخمین نیروی‌های محوری و سمتی را نشان دهد. برای سرعت‌های ۱۵ m/s و ۲۴m/s در مقاطع ۶۰٪، ۸۲٪ و ۹۲٪ شبیه‌سازی انجام‌شده در مقایسه با سایر شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای آزمون مکزیکو

توانست رفتاری قابل قبول و نزدیک به نتایج آزمایشگاهی را محاسبه نماید. در مقاطع ۲۵٪ و ۳۵٪ نتایج به دست آمده روندی بهتر نسبت به سایر شبیه‌سازی‌های انجام گرفته از خود نشان داد هرچند مشابه سایرین در سرعت  $24\text{m/s}$  تحت زاویه یابو ۱۵ درجه نتوانست دقت قابل قبولی را در تخمین داده‌های آزمایشگاهی نشان دهد. نتایج نشان داد که مدل اصلاح شده بی-ای-ام این تحقیق، در مقاطع شعاعی بیشتر از ۳۵٪ طول پره، قابلیت اطمینان بالاتری در تخمین داده‌های اندازه‌گیری دارد. در محاسبه نیروی سمتی در مقطع ۳۵٪، عملکرد بسیار بهتری نسبت به سایر شبیه‌سازی‌ها به دست آمد. با توجه به مدت‌زمان پایین محاسبات الگوریتم به کار گرفته در این پژوهش و همچنین نتایج قابل قبول آن در مقایسه با نتایج سایر پژوهشگران، می‌توان گفت که استفاده از این مدل ریاضی در محاسبه عملکرد و توزیع بار پره توربین‌های بادی محور افقی تحت زاویه یابو، به‌ویژه در محاسبه نیروی گسترده سمتی، نتایج مطمئن‌تر است.

پس از شبیه‌سازی و مقایسه داده‌ها جزء نیرو در مقاطع مختلف میزان توان خروجی در سرعت‌های مختلف در زاویه‌های یابو ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ درجه محاسبه شد. شکل ۴-۴۰ تأثیرات زاویه یابو بر توان خروجی توربین بادی را نمایش می‌دهد. در این نمودار توان متوسط تولیدی توسط توربین بادی، در یک دور چرخش کامل روتور صورت گرفته است. با توجه به شکل ۴-۴۰ با افزایش زاویه یابو میزان توان استحصالی از روتور توربین بادی به تدریج از خود کاهش نشان می‌دهد. در زاویه یابو ۳۰ درجه میزان افت توان از سایر زاویه‌های یابو بیشتر بوده است. بیشترین میزان کاهش توان در سرعت باد  $10\text{m/s}$  در زاویه یابو ۳۰ درجه اتفاق افتاد. در این وضعیت میزان افت توان  $5888\text{W}$  است. همچنین در سرعت‌های پایین میزان افت توان، با افزایش زاویه یابو تا ۱۵ درجه تغییر کمتری داشتند. اما با افزایش سرعت باد این میزان افت توان به تدریج افزایش یافت به گونه‌ای که در زاویه یابو ۱۵ درجه در سرعت جریان باد  $10\text{m/s}$  میزان افت توان برابر  $500\text{W}$  بود و با افزایش سرعت باد تا  $24\text{m/s}$  میزان افت توان به  $3039\text{W}$  رسید.



شکل ۴-۴۰ تأثیر زاویه یاء بر توان خروجی توربین بادی.

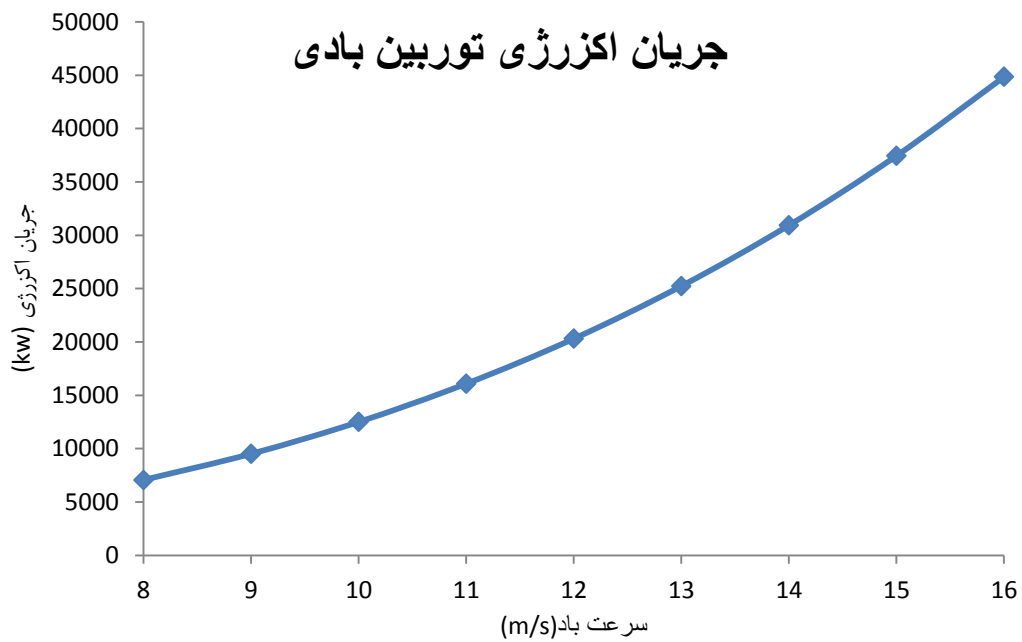
### ۳-۱-۴ تحلیل اکزرژی

در این قسمت از تحقیق، ابتدا به بررسی جریان اکزرژی، سپس میزان تخریب اکزرژی و بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی بر اساس شرایط آب و هوایی شهر منجیل پرداخته خواهد شد. سپس تأثیر عامل زبری، اثر زاویه یاء، تغییرات سرعت، دما، فشار و رطوبت نسبی را بر روی بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی بررسی خواهد شد.

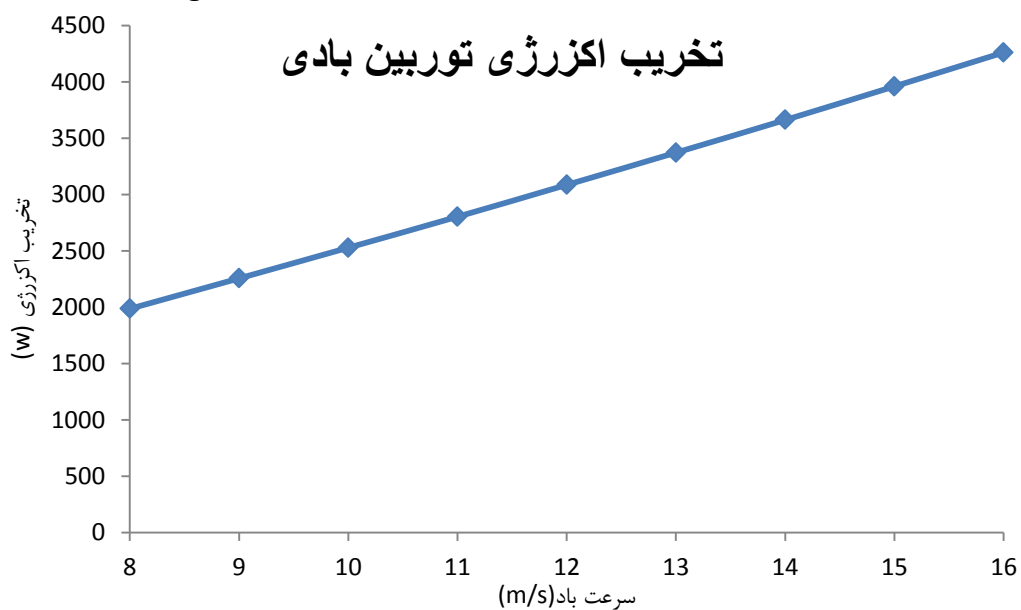
### ۱-۳-۱-۴ تحلیل اکزرژی توربین بادی در تونل باد

با توجه به شرایط آب و هوایی و میزان سرعت باد منطقه منجیل تحلیل اکزرژی توربین بادی در بازه سرعت ۸m/s تا ۱۶m/s صورت گرفت. شکل ۴-۴۱ میزان جریان اکزرژی عبوری از صفحه روتور را بر اساس تغییرات سرعت باد نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشهود است با افزایش سرعت باد، میزان جریان اکزرژی افزایش خواهد یافت. از آنجاکه بیشتر انرژی توربین بادی از طریق انرژی جنبشی باد تأمین می‌گردد، لذا با توجه به اینکه انرژی جنبشی باد با توان دوم تغییرات سرعت رابطه مستقیم دارد، در جریان اکزرژی نیز انرژی جنبشی باد همین تأثیر را خواهد گذاشت. همچنین افزایش سرعت

باد باعث تخریب اکزرژی بیشتر خواهد شد، با توجه به شکل ۴-۴۲ مشاهده شد که با افزایش سرعت باد میزان تخریب اکزرژی افزایش یافت. میزان محاسبه شده تخریب اکزرژی توربین بادی فقط مقدار تخریب اکزرژی در روتور توربین بادی است. و از تخریب اکزرژی در سایر قسمت‌های توربین بادی صرف نظر شده است.



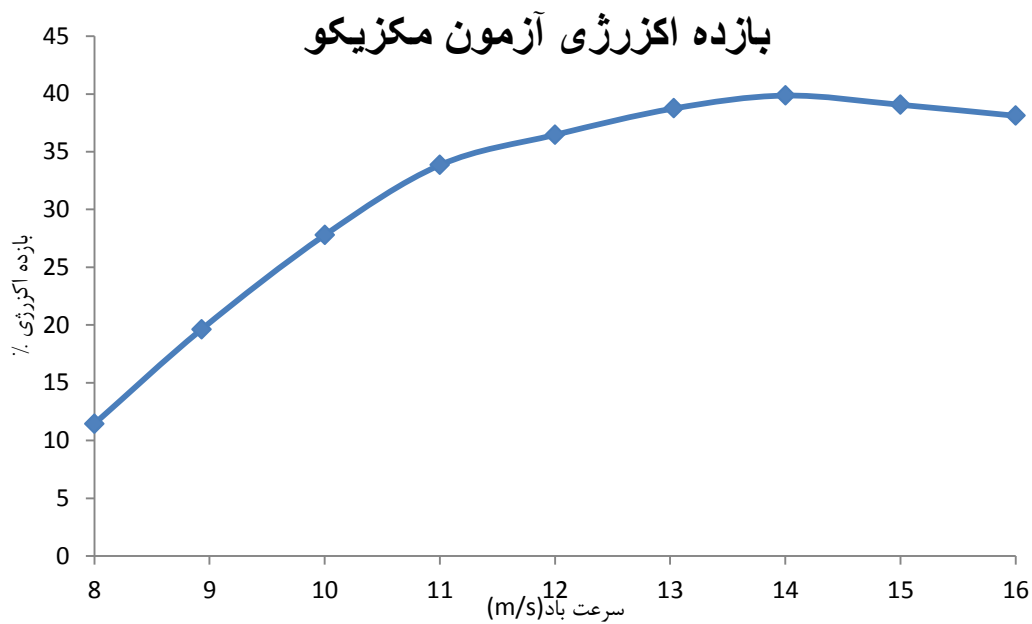
شکل ۴-۴۱ نمایش میزان جریان اکزرژی عبوری از صفحه روتور را بر اساس نتایج تونل باد.



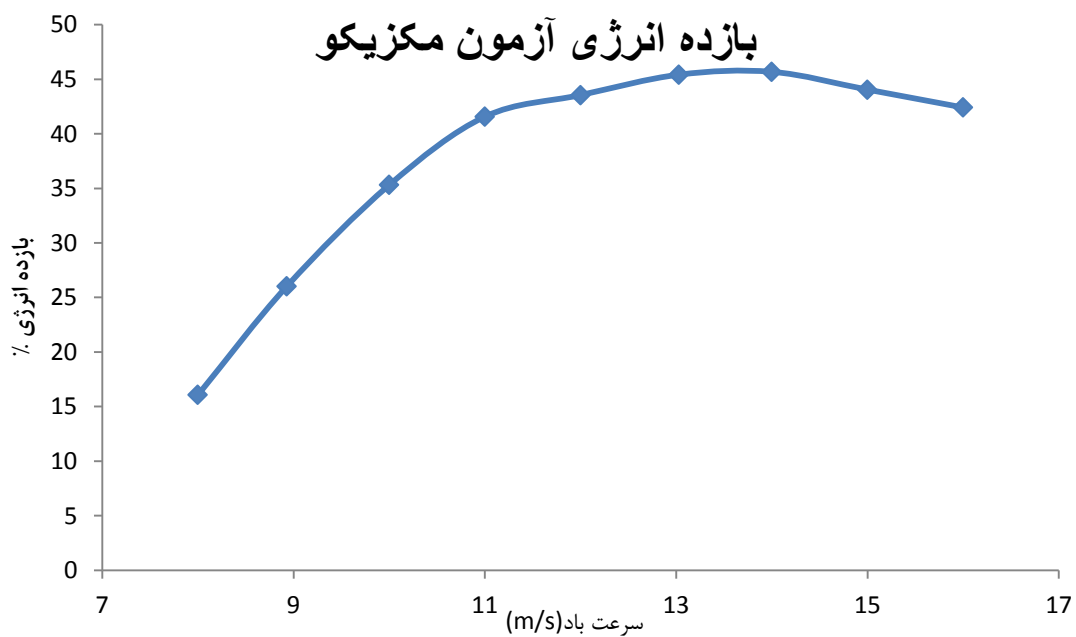
شکل ۴-۴۲ میزان تخریب اکزرژی بر اساس تغییرات سرعت باد.



شکل ۴-۴۳ و شکل ۴-۴۴ تغییرات بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی را بر اساس تغییرات سرعت باد نمایش می‌دهد. تقریباً هر دو نمودار رفتاری مشابه یکدیگر را نشان دادند با این تفاوت که بازده انرژی مقادیری بیشتر از بازده اکزرژی را محاسبه کرده است. با افزایش سرعت باد، بازده انرژی و اکزرژی تا سرعت باد  $11 \text{ m/s}$  با شیب تندتری افزایش می‌یابد سپس این شیب نرم‌تر شده و در سرعت  $14 \text{ m/s}$  به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در این سرعت بازده اکزرژی  $39/86\%$  بوده و بازده انرژی برابر  $44/05\%$  است. با توجه به اینکه این توربین بادی برای سرعت باد بهینه  $15 \text{ m/s}$  طراحی شده است، بهترین عملکرد را در سرعت باد حدود  $14 \text{ m/s}$  داشته است و در سرعت باد  $15 \text{ m/s}$  نیز از باده بالا و خوبی نسبت به سایر سرعت‌های جریان باد برخوردار است. کمترین مقدار بازده انرژی و اکزرژی این توربین بادی در سرعت باد  $8 \text{ m/s}$  به ترتیب  $11/45\%$  و  $16/07\%$  است. با افزایش سرعت جریان باد در آزمون مکزیکو، از سرعت  $8 \text{ m/s}$  تا سرعت  $11 \text{ m/s}$  بازده اکزرژی سیستم  $22/39$  واحد و بازده انرژی سیستم  $25/5$  واحد افزایش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین، این نوع توربین بادی از عملکرد مناسبی برخوردار نیست و قادر نخواهد بود بخش اعظمی از انرژی باد را جذب کند. انتظار می‌رود طراحان با بهبود طراحی توربین بادی در سرعت‌های باد پایین نیز عملکرد توربین بادی بهبود ببخشند.



شکل ۴-۴۳ تغییرات بازده اکزرژی بر اساس تغییرات سرعت باد



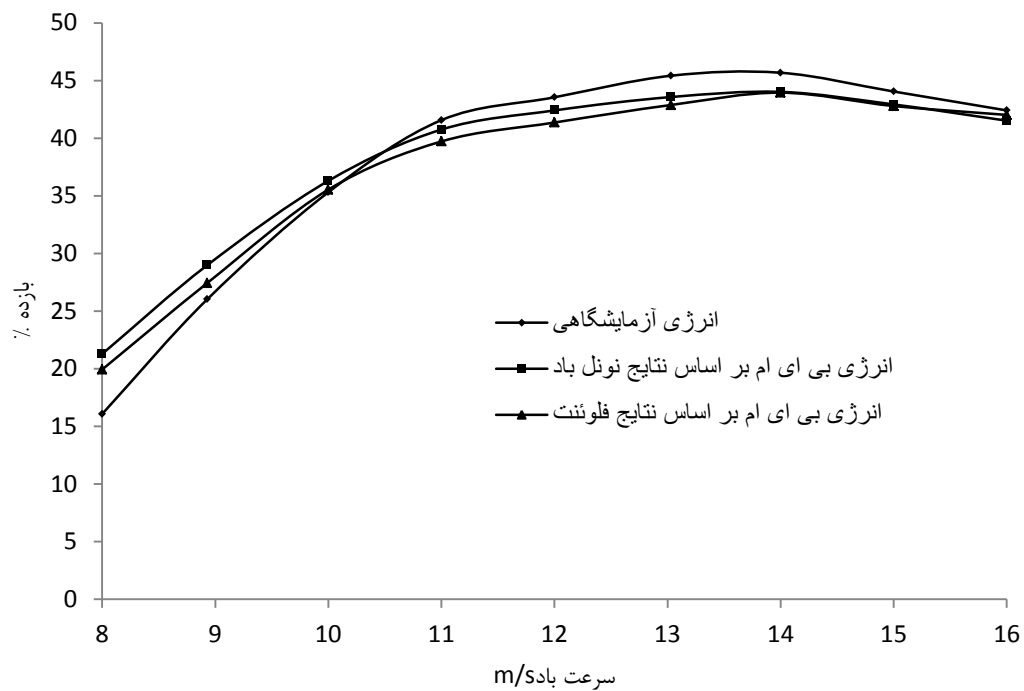
شکل ۴-۴۴ تغییرات بازده انرژی بر اساس تغییرات سرعت باد.

#### ۴-۱-۳-۲ تحلیل اکزرژی توربین بادی بر اساس نظریه تکانه اجزاء پره

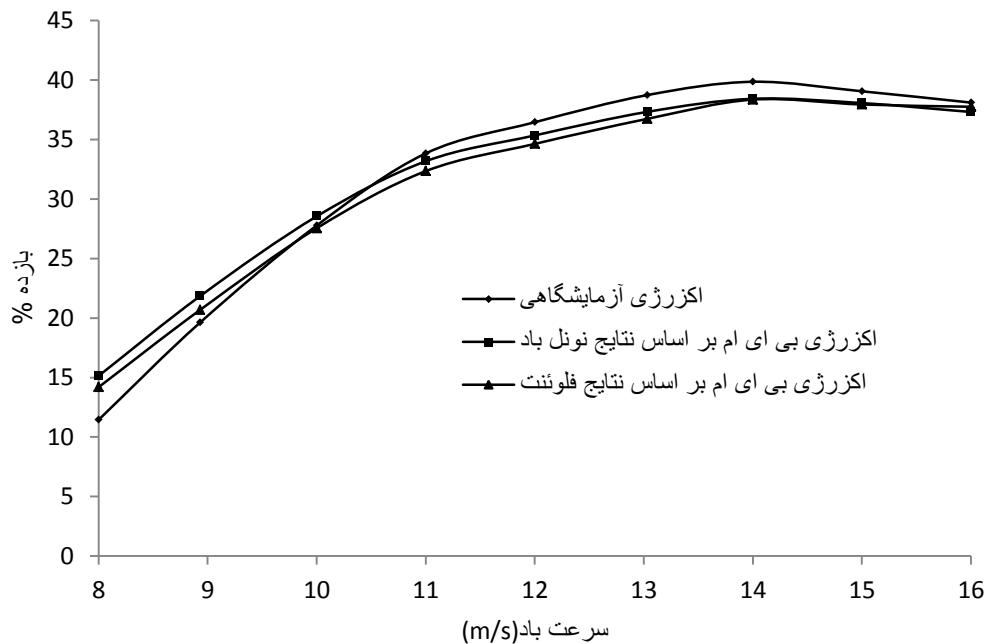
شکل ۴-۴۵ و شکل ۴-۴۶ بازده انرژی و اکزرژی به دست آمده از داده‌های نظریه تکانه اجزاء پره را

با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده است. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده از نظریه

تکانه اجزاء پره بر اساس داده‌های تونل باد هواپرها و داده‌های مدل فلوئنت هواپرها توانستند رفتاری مشابه رفتار نتایج آزمایشگاهی (آزمون مکزیکو) را به دست آمده بیاورند. در سرعت باد  $8\text{ m/s}$  بازده انرژی و اکزرژی محاسبه شده، از مقادیر آزمایشگاهی بیشتر بود. در این سرعت اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج نظریه تکانه اجزاء پره بر اساس نتایج تونل باد برای بازده اکزرژی  $3/69$  واحد درصد بوده، و برای بازده انرژی  $3/86$  واحد درصد بوده است. علت اصلی این مقدار اختلاف، میزان توان محاسبه شده از نظریه تکانه اجزاء پره است، که با مقدار آزمایشگاهی  $242$  وات اختلاف دارد و باعث خطای نسبی  $32\%$  شده است. اما در سایر سرعت‌ها، نتایج به دست آمده مطابقت خوبی با آزمون مکزیکو دارد. با توجه به این شبیه‌سازی و نتایج بازده انرژی و اکزرژی، می‌توان این چنین دریافت کرد که نظریه تکانه اجزاء پره ارتقاء یافته در این پایان‌نامه ابزار مناسبی برای محاسبه توان خروجی از توربین‌های بادی است، و می‌تواند در تحلیل اکزرژی توربین بادی نیز به خوبی عمل کند و نتایجی نزدیک به نتایج آزمون آزمایشگاهی را به دست آورد. لذا می‌توان برای کاهش هزینه‌های مطالعات آزمایشگاهی و جلوگیری از صرف زمان زیاد برای اندازه‌گیری و یا محاسبه سیالاتی اطلاعات مربوط به بارهای وارده و داده‌های خروجی از توربین بادی، از نظریه تکانه اجزاء پره ارتقاء یافته این تحقیق استفاده نمود.



شکل ۴-۴۵ بازده انرژی بر اساس کد بی-ای-ام در سرعت‌های مختلف باد.

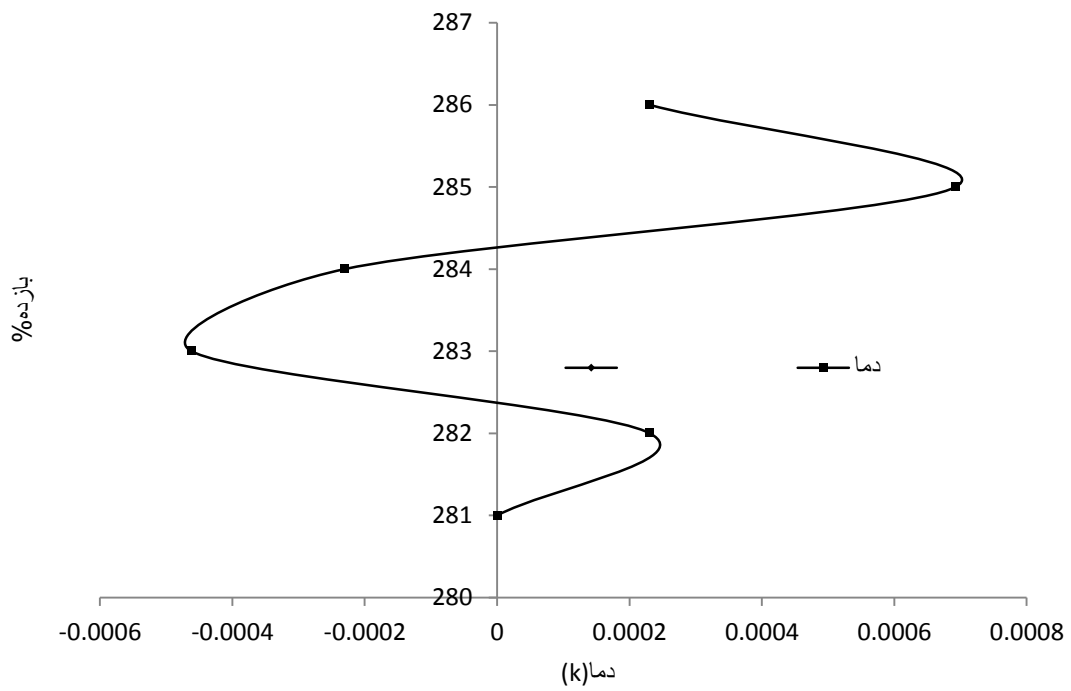


شکل ۴-۴۶ بازده اکزرژی بر اساس کد بی-ای-ام در سرعت‌های مختلف باد.

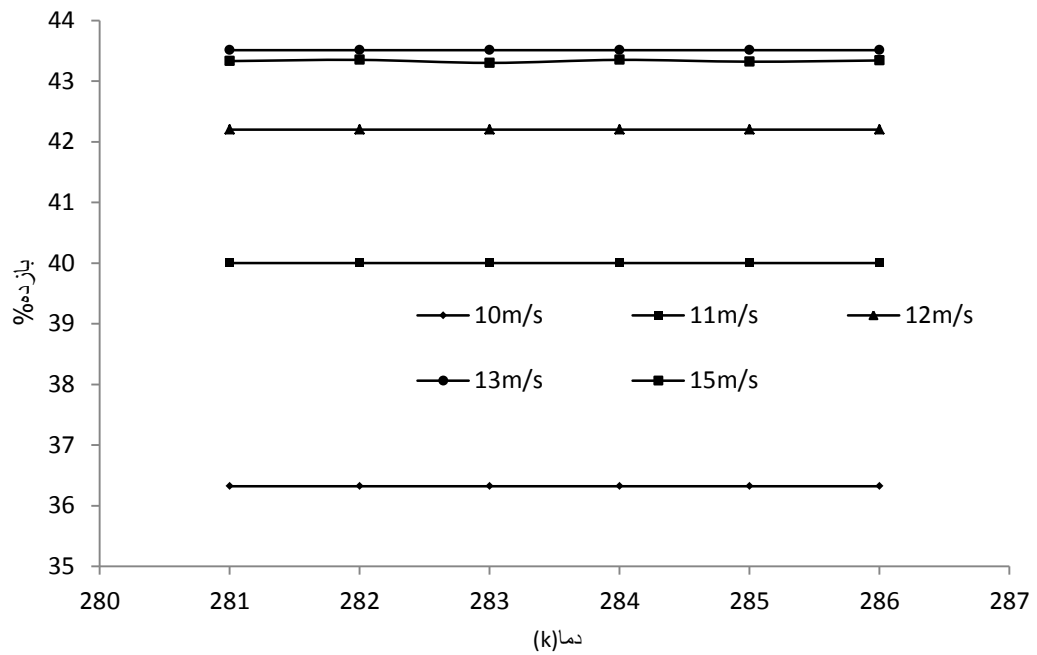
#### ۳-۳-۱-۴ تأثیر دما بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی

دما از جمله عوامل محیطی است که در طی روز می‌تواند تغییر کند و نیاز است که تأثیر آن بر

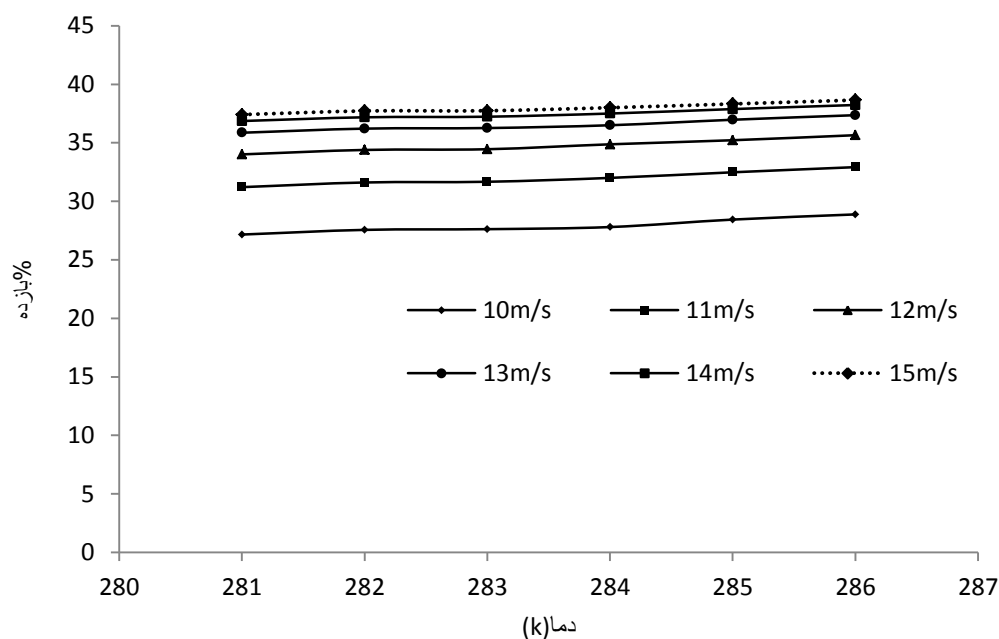
عملکرد توربین بادی مورد مطالعه قرار گیرد. یکی از متغیرهای کلیدی در تعریف جریان اکزرژی برای محاسبه بازده اکزرژی، دما است. همچنین در این تحقیق دمای حالت مرده را  $298K$  در نظر گرفته شد. دمای تونل باد در سرعت باد  $15m/s$  برابر  $284K$  بود. در این تحقیق با توجه به شرایط دما شهر منجیل، تغییرات بازه دما از  $281K$  تا  $286K$  مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در تحقیقات اخیر پاپ و همکاران دریافتند که دما و فشار در مقایسه با سرعت باد به صورت قابل توجه نمی تواند بازده انرژی و اکزرژی را تحت تأثیر خود قرار دهد. [۱۲] شکل ۴-۴۷ تأثیرات تغییرات دما بر عملکرد بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی را نشان می دهد. در این شکل بازده انرژی تأثیرات نامحسوسی از تغییرات دما را دریافت کرد به گونه ای که می توان گفت تغییرات دما بر عملکرد بازده انرژی توربین بادی مورد مطالعه تأثیری نداشته است. اما با تغییرات دما، بازده اکزرژی کمی تغییر از خود نشان داد به گونه ای که با یک شیب ملایم با افزایش دما، بازده اکزرژی نیز افزایش یافت. این تغییرات قابل توجه نبودند به عنوان مثال، اختلاف در بازده اکزرژی در سرعت  $15m/s$  و دمای  $281K$  تا  $286K$  تنها برابر  $1/24$  واحد بوده است. همچنین در شکل ۴-۴۸ و شکل ۴-۴۹ که تأثیرات تغییرات دما را بر بازده انرژی و اکزرژی در سرعت های مختلف نشان می دهد، دما حتی در سرعت های مختلف تأثیری زیادی بر بازده اکزرژی نداشت، به طوری که با افزایش دما در هر سرعت جریان باد مقدار بازده اکزرژی نامحسوس افزایش یافت. این در حالی است که بازده انرژی در سرعت های مختلف تحت تأثیر تغییرات دما قرار نگرفت و مقدار ثابتی را در هر سرعت جریان باد نشان داد.



شکل ۴-۴۷ تغییرات بازده انرژی و اکزرژی بر اساس تغییرات دما جریان باد.



شکل ۴-۴۸ تغییرات بازده انرژی بر اساس تغییرات دما در سرعت‌های مختلف جریان باد

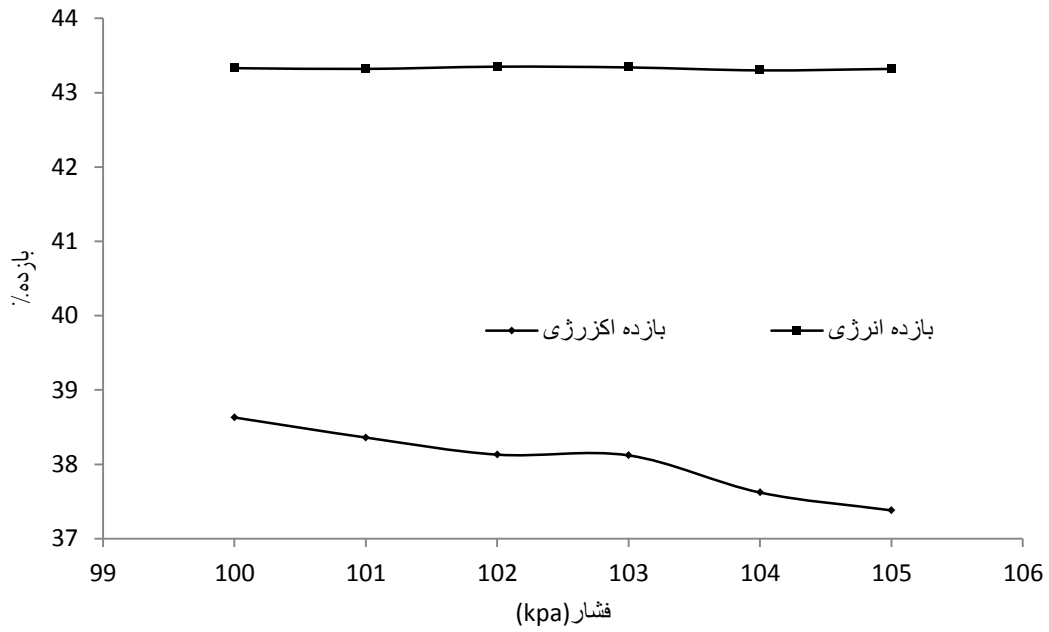


شکل ۴-۴۹ تغییرات بازده انرژی و انرژی بر اساس تغییرات دما در سرعت‌های مختلف جریان باد

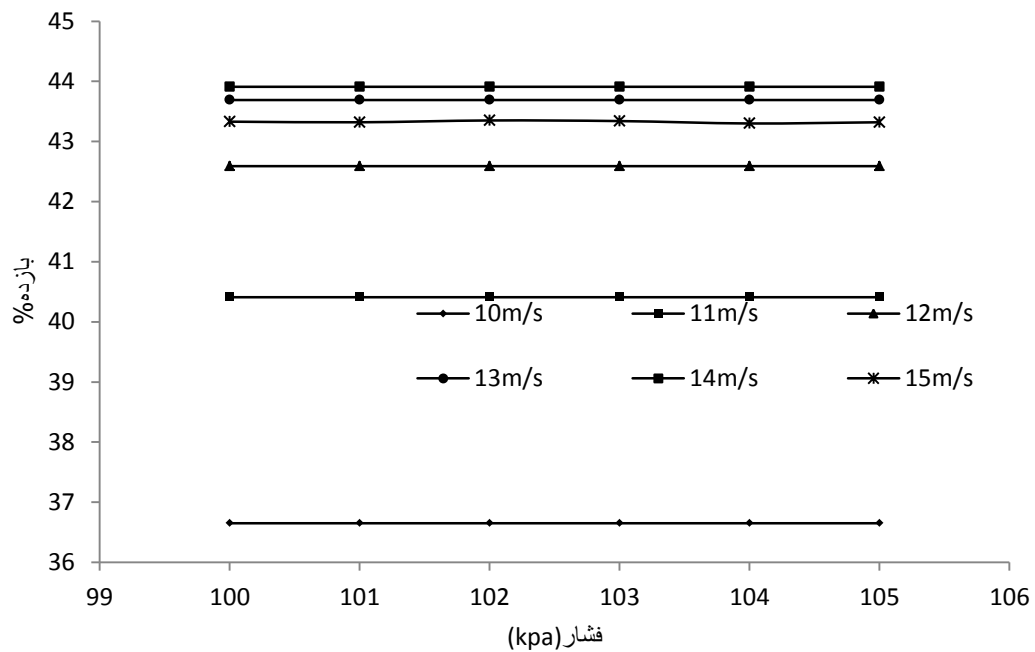
#### ۴-۳-۱-۴ تأثیر فشار بر بازده انرژی و انرژی توربین بادی

فشار نیز مانند دما از جمله متغیرهایی است که در محاسبه جریان انرژی توربین بادی اهمیت دارد. فشار هوا در حالت مرده در این تحقیق یک اتمسفر فرض شده است. شکل ۴-۵۰ تأثیر تغییرات فشار جریان باد بر روی بازده انرژی و انرژی را نمایش می‌دهد. در این شکل بازده انرژی، تغییرات نامحسوسی از تغییرات فشار را دریافت کرد، به گونه‌ای که می‌توان گفت تغییرات فشار بر عملکرد بازده انرژی توربین بادی مورد مطالعه تقریباً بی‌تأثیر بوده است. اما با تغییرات فشار، بازده انرژی کمی تغییر از خود نشان داد به گونه‌ای که با یک شیب ملایم با افزایش فشار، بازده انرژی رو به کاهش است. اختلاف در بازده انرژی در سرعت ۱۵m/s از فشار ۱۰۰kPa تا ۱۰۵kPa تنها برابر ۱.۲۵ واحد بوده است. از این رو این تحقیق نشان داد بازده انرژی و انرژی در مقایسه با تغییرات سرعت باد، حساسیت چندانی به تغییرات فشار از خود نشان نمی‌دهند. همچنین در شکل ۴-۵۱ و شکل ۴-۵۲ نمایش می‌دهد، فشار هوا در سرعت‌های مختلف تأثیری ملایم بر بازده انرژی داشت، به طوری که با افزایش فشار در هر سرعت جریان باد مقدار بازده انرژی به آرامی کاهش یافت. این در حالی است که

بازده انرژی در سرعت‌های مختلف تحت تأثیر تغییرات فشار قرار نگرفت و یک مقدار ثابتی را در هر یک از سرعت جریان باد نمایش داد.

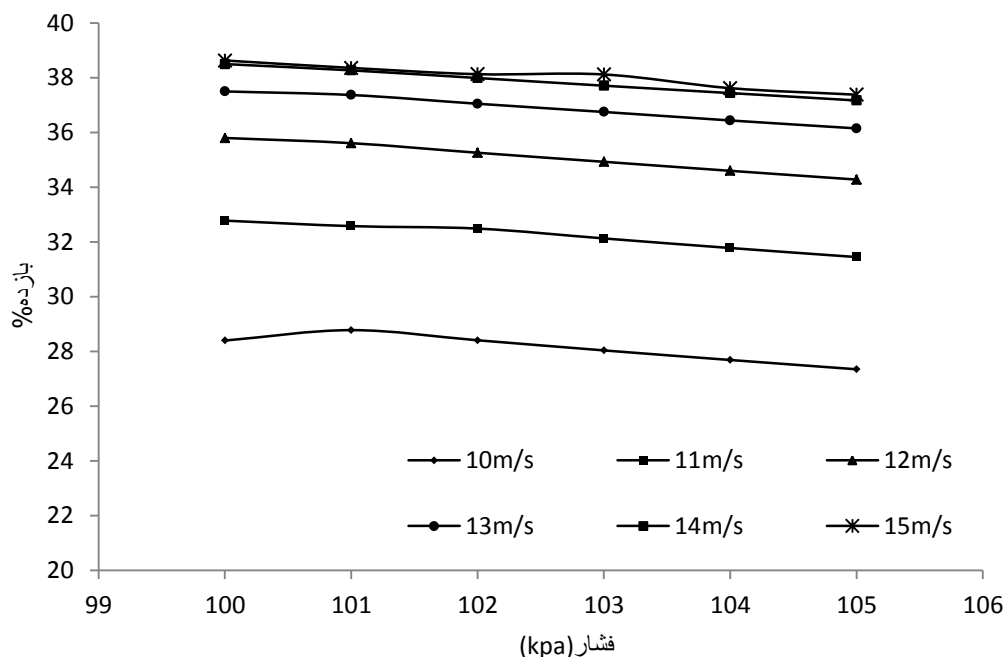


شکل ۴- ۵۰ تغییرات بازده انرژی و اکزرژی بر اساس تغییرات فشار جریان باد.



شکل ۴- ۵۱ تغییرات بازده انرژی بر اساس تغییرات فشار در سرعت‌های مختلف جریان باد

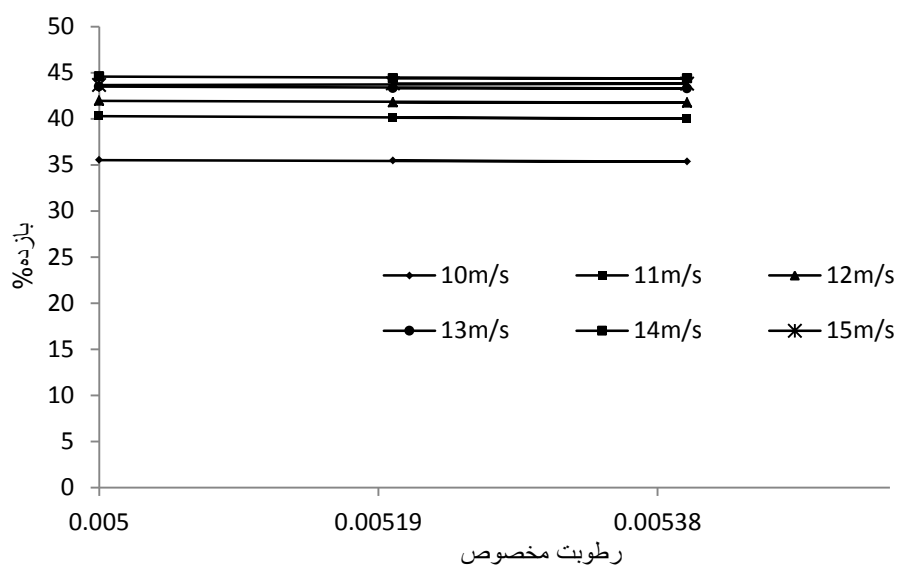




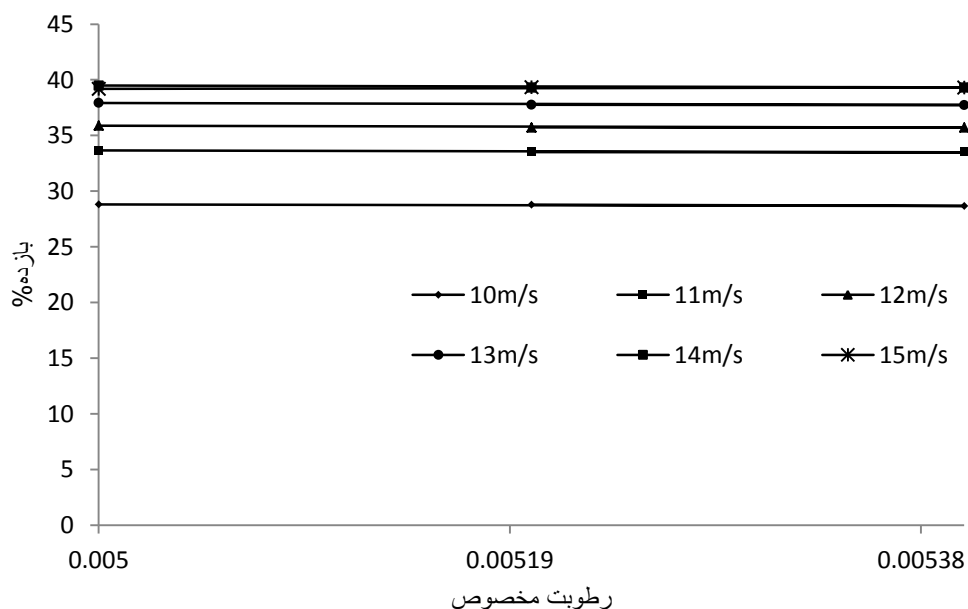
شکل ۴-۵۲ تغییرات بازده اکزرژی بر اساس تغییرات فشار در سرعت‌های مختلف جریان باد

#### ۴-۳-۱-۵ تأثیر رطوبت بر بازده انرژی و اکزرژی

با توجه به شرایط منطقه یادشده، میزان رطوبت نسبی برای ماه‌های موردنظر در دسترس است و بر اساس تغییرات رطوبت در هوا می‌توان بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی را محاسبه نمود. شکل ۴-۵۳ و شکل ۴-۵۴ تأثیرات افزایش رطوبت مخصوص در سرعت‌های مختلف بر روی بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی را نشان می‌دهد. می‌توان دریافت که با افزایش رطوبت مخصوص، هر دو بازده انرژی و اکزرژی با یک شیب ملایم رو به کاهش می‌باشند. با توجه به این موضوع که تغییرات رطوبت مخصوص در سه ماه متوالی سال تغییرات زیادی نداشتند، تغییرات بازده انرژی و اکزرژی نیز در یک بازه کوچک روی داد. به‌گونه‌ای که در سرعت ۱۵m/s بیشترین تغییرات در بازده انرژی ۰/۱۷٪ و بیشترین تغییرات در بازده اکزرژی در این سرعت ۰/۱۶٪ است.



شکل ۴-۵۳ تأثیر رطوبت مخصوص بر بازده انرژی توربین بادی.



شکل ۴-۵۴ تأثیر رطوبت مخصوص بر بازده انرژی توربین بادی.

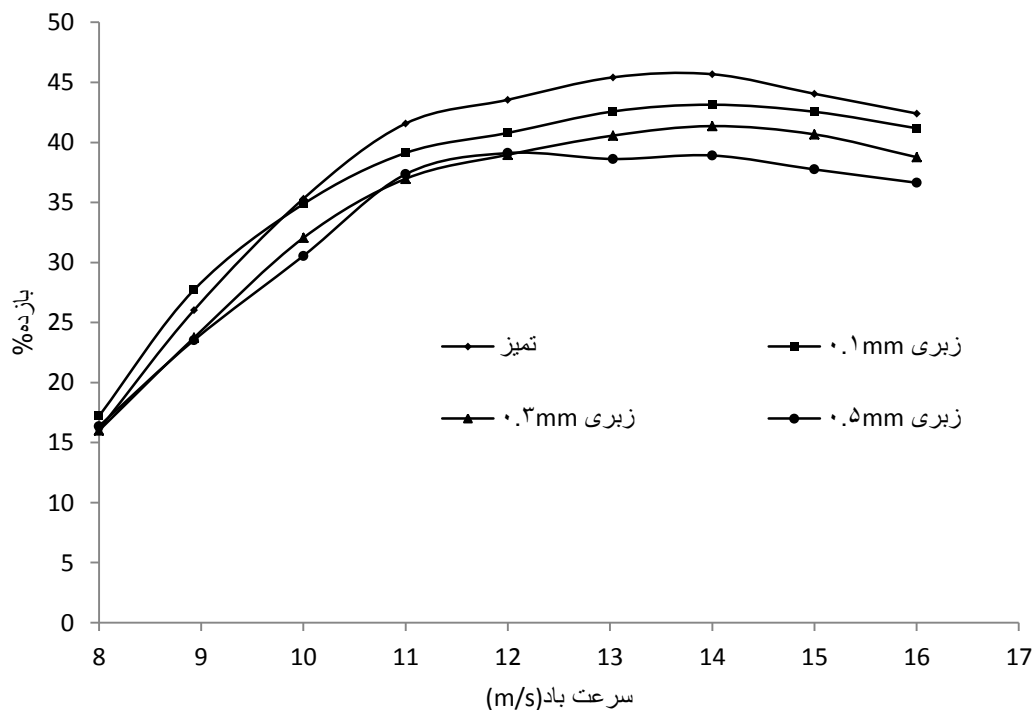
#### ۴-۱-۳-۶ اثر زبری بر بازده انرژی و اکزرژی

زبری از جمله عواملی (چه طبیعی و چه مصنوعی) است که با ایجاد کردن سطحی ناهموار بر روی روتور توربین بادی، الگوی جریان باد بر روی هواپرها را تغییر می‌دهد. در این تحقیق برای اولین بار تأثیرات رشد شدت زبری بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی مورد مطالعه قرار گرفت. در بخش ۴-۲ نشان داده شد که زبری مقدار ضریب پسا در هواپرها را افزایش و ضریب برآ را کاهش

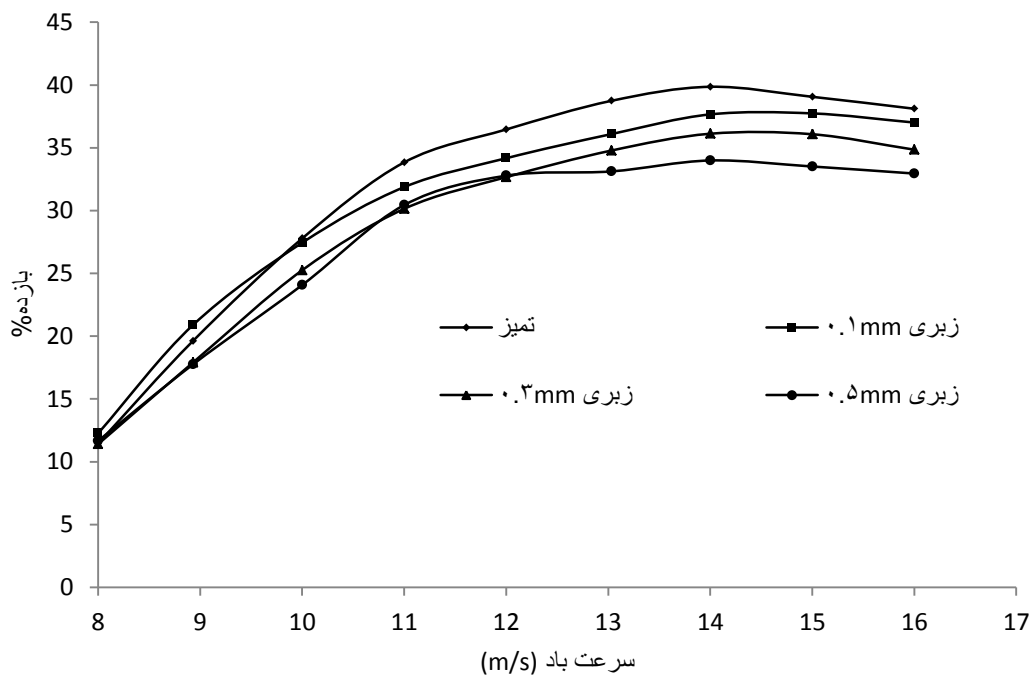
داد. همچنین بر اساس نظریه تکانه اجزا در بخش ۳-۴ مشخص شد که توان خروجی از توربین بادی، با افزایش شدت زبری کاهش می‌یابد.

شکل ۴-۵۵ و شکل ۴-۵۶ اثر زبری بر روی عملکرد بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها، بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی در شرایط آزمایشگاهی با بازده انرژی و اکزرژی آن که به صورت نظری تحت تأثیر اثر زبری قرار گرفته است، مقایسه شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شدت زبری، بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی کاهش یافته است. ابتدا در سرعت اولیه  $8\text{ m/s}$  اختلاف قابل‌لمسی مشاهده نشد. یکی از عوامل این است که نظریه تکانه اجزاء پره منحصرأ در این سرعت باد برخلاف سایر سرعت‌ها دقت بسیار بالایی نداشت. در این سرعت باد، توان محاسبه شده  $24\%$  بیشتر از توان خروجی توربین بادی در تونل باد تخمین زده شده بود. اما در سایر سرعت‌ها، با افزایش شدت زبری به تدریج بازده انرژی و اکزرژی کاهش یافتند. از سرعت  $8\text{ m/s}$  تا سرعت  $10\text{ m/s}$  در شدت زبری  $0/1\text{ mm}$  اختلاف زیادی در محاسبه بازده انرژی و اکزرژی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مشاهده نشد. اما در همین شدت زبری و با گذر از سرعت  $10\text{ m/s}$  به تدریج بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی کاهش یافت. این موضوع بیان می‌کند که در زبری  $0/1\text{ mm}$  بازده انرژی و اکزرژی این توربین بادی تا سرعت باد  $10\text{ m/s}$  حساسیت زیادی را از خود نشان نمی‌دهد و بازده استحصالی کاهش محسوسی نمی‌یابد. اما در سایر اندازه‌های زبری در هر سرعت باد، بازده انرژی و اکزرژی از خود کاهش قابل‌توجهی نشان می‌دهد. در شدت زبری  $0/5\text{ mm}$  و  $0/3\text{ mm}$  میزان بازده انرژی و اکزرژی تا سرعت باد  $12\text{ m/s}$  رفتاری شبیه به هم داشتند، اما بعد از این سرعت و در شدت زبری  $0/5\text{ mm}$ ، میزان افت بازده انرژی و اکزرژی بیشتر می‌شود. در سرعت باد  $13\text{ m/s}$ ، بازده انرژی بیشترین حساسیت را به شدت زبری نمایش می‌دهد. در این سرعت با شدت زبری  $0/1\text{ mm}$ ، میزان کاهش بازده انرژی  $2/84$  واحد بوده است. در زبری  $0/3\text{ mm}$  این میزان کاهش  $4/85$  واحد شد. و در زبری  $0/5\text{ mm}$  این مقدار به بیشترین حد خود یعنی به مقدار  $6/8$  واحد رسید. در همین سرعت بازده اکزرژی نیز در دو شدت زبری  $0/1\text{ mm}$  و  $0/3\text{ mm}$  بیشترین حساسیت را از خود نشان می‌دهد و زبری-

های  $0.1 \text{ mm}$  و  $0.3 \text{ mm}$  به ترتیب باعث کاهش  $2/65$  و  $3/89$  واحدی بازده انرژی شدند. اما در زبری  $0.5 \text{ mm}$  بیشترین میزان کاهش بازده انرژی در سرعت باد  $14 \text{ m/s}$  رخ داد و باعث شد این بازده حداکثر  $5/87$  واحد کاهش یابد. در نتیجه در این بازه سرعت باد که مورد بررسی قرار گرفت، می‌توان نتیجه گرفت سرعت باد  $13 \text{ m/s}$  و  $14 \text{ m/s}$  که نزدیک به سرعت طراحی توربین بادی می‌باشند، بیشترین حساسیت را به تغییر شدت زبری و همچنین افت بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی دارد. بیشترین کاهش در سرعت‌های مختلف، مربوط به زبری  $0.5 \text{ mm}$  است. و این موضوع به خوبی نشان می‌دهد که هرچند توربین بادی مورد آزمایش در رده‌بندی توربین‌های بادی متوسط قرار می‌گیرد (حداکثر  $30$  کیلووات توان تولید می‌کند)، اما با افزایش گردوغبار و در نتیجه افزایش شدت زبری، این توربین بادی نیز از شرایط ایده آل خود فاصله می‌گیرد. پس می‌بایست در بازه‌های کوتاه زمانی به صورت مرتب گردوغبار نشسته شده بر روی روتور توربین بادی پاک شود، تا توربین بادی بتواند در شرایط ایده‌آل خود انرژی تولید کند.



شکل ۴- ۵۵ تأثیر زبری بر عملکرد بازده انرژی توربین بادی



شکل ۴-۵۶ تأثیر زبری بر عملکرد بازده اکزرژی توربین بادی

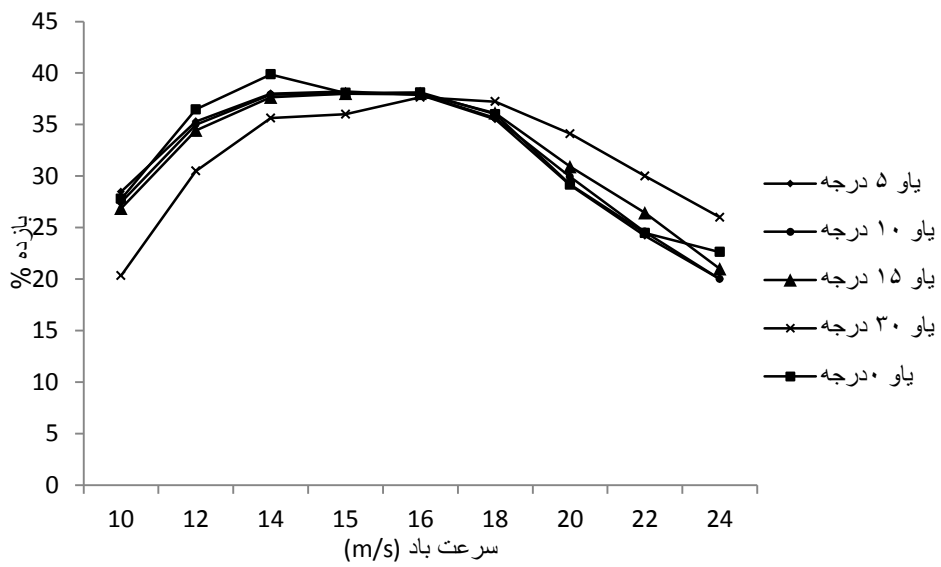
#### ۴-۱-۳-۷ تأثیر زاویه یابو بر بازده انرژی و اکزرژی

بیشترین تحقیقاتی که به بررسی عملکرد توربین بادی از دیدگاه انرژی پرداخته شده، اکثراً متغیرهای جریان باد نظیر دما، فشار، سرعت و رطوبت مخصوص را به عنوان پارامترهای تأثیر گزار بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی معرفی کرده‌اند. در این تحقیق برای اولین بار تأثیر تغییرات زاویه یابو بر بازده انرژی و اکزرژی یک توربین بادی بررسی می‌شود. همان‌گونه که در بخش ۲-۲-۹-۱ نشان داده شد، با افزایش زاویه یابو، میزان توان تولیدی توربین بادی نیز کاهش می‌یابد. حال باید این موضوع نمایان شود، با توجه به اینکه توان استحصالی کاهش یافته، عملکرد توربین از دیدگاه بازده انرژی و اکزرژی چگونه تغییر خواهد کرد.

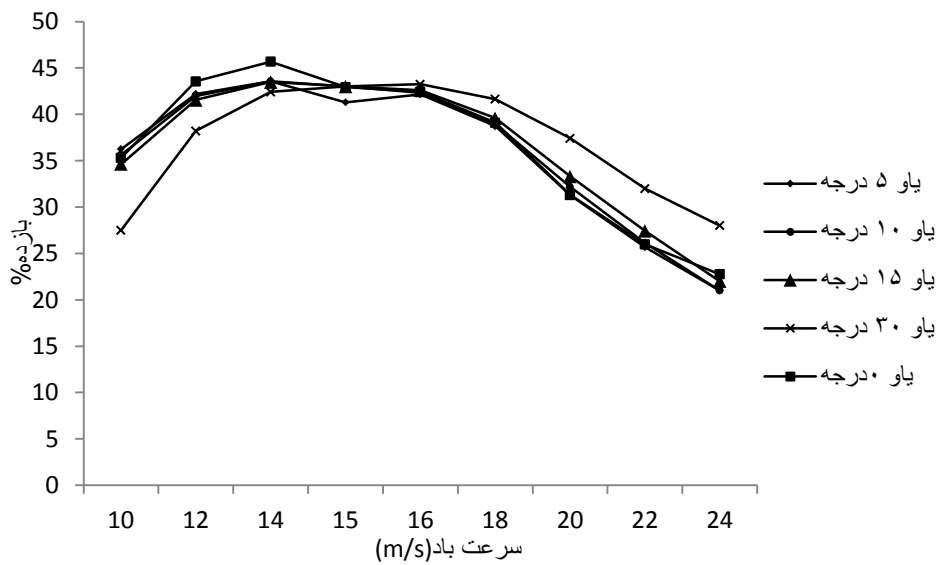
با توجه به شکل ۴-۵۷ و شکل ۴-۵۸ بازده اکزرژی و انرژی توربین بادی آزمون مکزیکو در چهار زاویه مختلف یابو و تحت سرعت‌های مختلف جریان باد مورد بررسی قرار گرفت. هر دو نمودار با رفتاری شبیه به هم، اثر تغییر زاویه یابو را بر عملکرد توربین بادی نشان دادند شکل ۴-۵۷ نشان داد که افزایش زاویه یابو تا زاویه ۱۵ درجه نتوانست تأثیر قابل توجهی بر بازده اکزرژی در سرعت‌های مختلف

جریان باد بگذارد. اما بازده اکزرژی توربین بادی در زاویه یاو ۳۰ و ۱۵ درجه رفتار متفاوتی با زاویه یاو ۵ و ۱۰ درجه داشت. در سرعت‌های کمتر از ۱۶m/s میزان بازده اکزرژی در زاویه یاو ۳۰ درجه، کمتر از بازده اکزرژی توربین بادی در شرایط بدون زاویه یاو است. همچنین با افزایش سرعت باد از ۱۰m/s تا سرعت ۱۵m/s به تدریج بازده اکزرژی در زاویه یاو ۳۰ درجه، به بازده اکزرژی در شرایط بدون زاویه یاو نزدیک شد، و در سرعت ۱۶m/s بازده اکزرژی مستقل از زاویه یاو شد و برای تمامی زاویه‌های یاو یک مقدار ثابت را نشان داد. با افزایش سرعت باد از ۱۶m/s تا سرعت باد ۲۴m/s به تدریج بازده اکزرژی توربین بادی در زاویه یاو ۳۰ درجه از بازده اکزرژی در شرایط بدون زاویه یاو بیشتر شد. علیرغم اینکه با افزایش زاویه یاو توان استحصال از توربین بادی کاهش یافت، اما در سرعت‌های بیشتر از ۱۶m/s این امر موجب افزایش بازده اکزرژی توربین بادی شد. به گونه‌ای که در سرعت ۲۴m/s در زاویه یاو ۳۰ درجه بازده اکزرژی نسبت به شرایط بدون زاویه یاو ۱۴/۸۹٪ افزایش نسبی داشت. همین رفتار مشابه اما با شدت کمتر در زاویه یاو ۱۵ درجه نیز مشاهده می‌شود.

از جمله عواملی که باعث افزایش بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی در بازه سرعت باد از ۱۶m/s تا سرعت باد ۲۴m/s در زاویه یاو ۱۵ و ۳۰ درجه می‌شود، می‌توان به این نکته اشاره کرد که با افزایش زاویه یاو، میزان نیروی محوری وارد بر روتور توربین بادی کاهش می‌یابد. این نیرو که اغلب در جهت عکس تولید توان عمل می‌کند، بیشترین فشار را بر یاتاقان‌ها و تکیه‌گاه‌های روتور توربین بادی وارد می‌کند. پس می‌توان گفت که با کاهش نیروی محوری به واسطه افزایش زاویه یاو در سرعت‌های بالای باد، می‌توان از استهلاک توربین بادی در بازه‌های زمانی معین کاست. و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را کاهش داد.



شکل ۴-۵۷ تغییرات بازده انرژی نسبت به تغییرات زاویه یاو در سرعت‌های مختلف



شکل ۴-۵۸ تغییرات بازده انرژی نسبت به تغییرات زاویه یاو در سرعت‌های مختلف





## فصل ۵

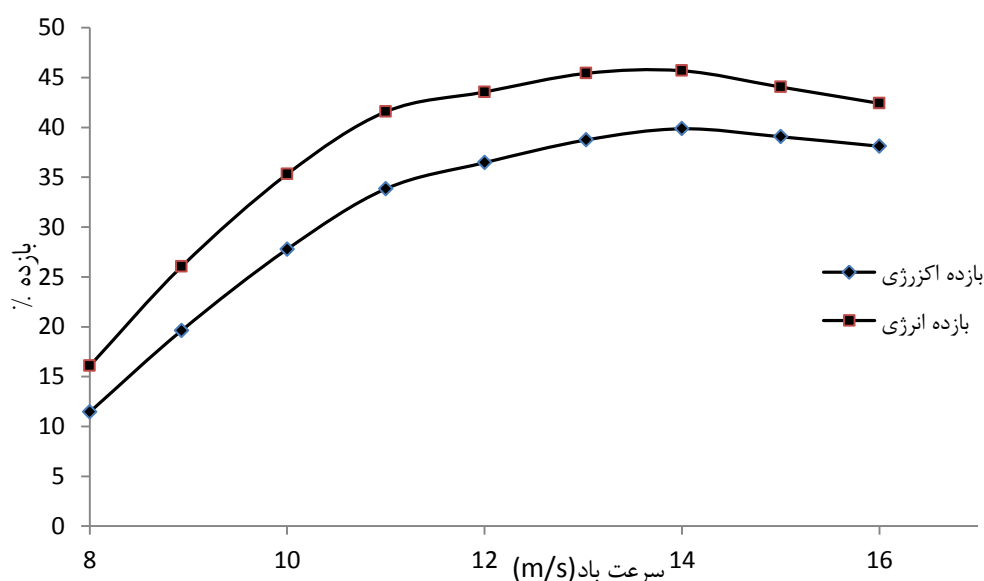
### نتیجه گیری

## ۱-۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک توربین بادی با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه منجیل در سه ماه متوالی سال از دیدگاه تحلیل اکزرژی و بر اساس کد بی-ای-ام مورد بررسی قرار گرفت. مدل ارتقاء یافته بی-ای-ام این تحقیق نشان داد که به خوبی می‌تواند بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی را پیش‌بینی کند. در ادامه تاثیر هر یک از پارامترهای جوی بر عملکرد توربین بادی نشان داده شده است.

### ۱-۱-۵ تأثیر سرعت باد

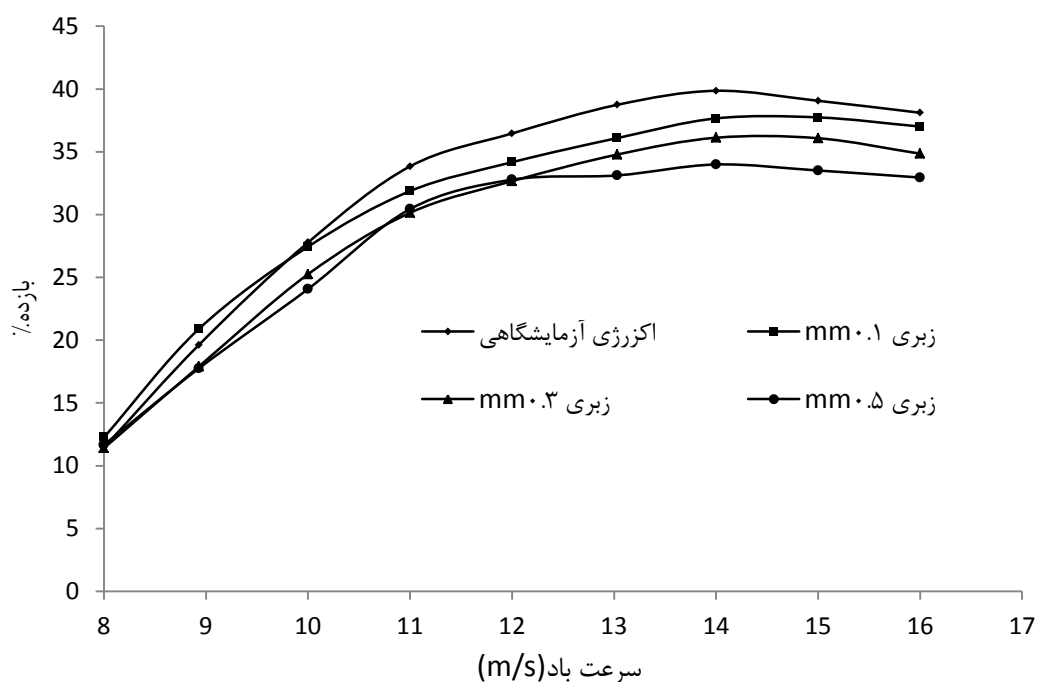
متغیر سرعت جریان باد بیشترین تأثیر را بر روی بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی داشت. به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت باد از حداقل سرعت  $8\text{m/s}$  تا سرعت  $11\text{m/s}$  بازده اکزرژی سیستم  $22/39$  واحد و بازده انرژی سیستم  $25/5$  واحد افزایش یافت شکل ۵-۱ شکل ۵-۱. این موضوع نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین، این نوع توربین بادی از عملکرد مناسبی برخوردار نیست و قادر نخواهد بود بخش اعظمی از انرژی باد را جذب کند. از طرفی با توجه به اینکه در سرعت‌های پایین پدیده استال دیرتر رخ می‌دهد می‌توان با تغییر زاویه گام محلی پره‌های توربین بادی یک موقعیت مناسب دیگر جهت استحصال توان بیشتر از توربین بادی انتخاب کرد. انتظار می‌رود طراحان با بهبود طراحی توربین بادی در سرعت‌های پایین باد عملکرد توربین بادی را بهبود ببخشند. زیرا در این قسمت با توجه به اینکه جریان باد کمتر است توربین بادی نیروهای محوری روتور را کمتر جذب می‌کند و در نتیجه می‌تواند دوره‌های زمانی تعمیرات کمتری در سال داشته باشد.



شکل ۵-۱ اثر تغییرات سرعت باد بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی

## ۵-۱-۲ تأثیر گردوغبار

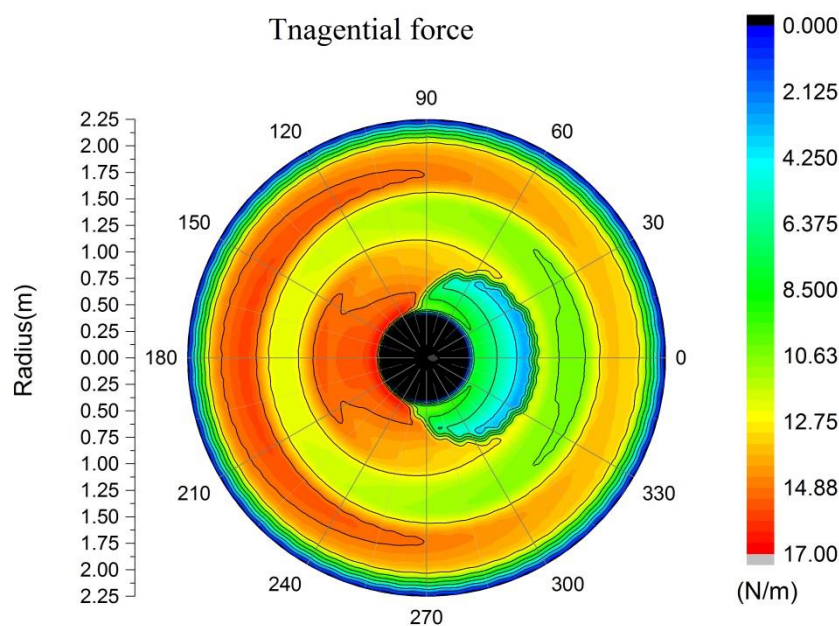
تأثیرات گردوغبار بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی از جمله متغیرهایی است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. گردوغبار با ایجاد زبری بر روی پره توربین بادی الگوی جریان باد بر روی پره را تغییر داد. این اثر باعث شد تا جدایش در انتهای هواپرها زودتر رخ دهد و هواپرها در ناحیه استال قرار بگیرد. در نهایت ضریب برآ در هواپرها کاهش و ضریب پسا افزایش یافت و موجب شد مقدار توان استحصال شده از توربین بادی کاهش یافته و در نتیجه بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی کاهش یابد. همچنین با توجه به شکل ۵-۲ با افزایش سرعت باد روند کاهش عملکرد توربین بادی بیشتر نیز می شود. به گونه ای که در سرعت  $14 \text{ m/s}$  در اندازه زبری  $0.5 \text{ mm}$  بازده اکزرژی نسبت به زمانی که پره ها تمیز باشد  $14/73\%$  کاهش یافت. لذا برای جلوگیری از این روند انتظار می رود که پره توربین های بادی در طی بازه های زمانی کوتاه تمیز شوند تا از کاهش عملکرد آن جلوگیری شود.



شکل ۵-۲ اثر زبری بر بازده اکزرژی توربین بادی در سرعت‌های مختلف

### ۵-۱-۳ تأثیر تغییرات زاویه یاو

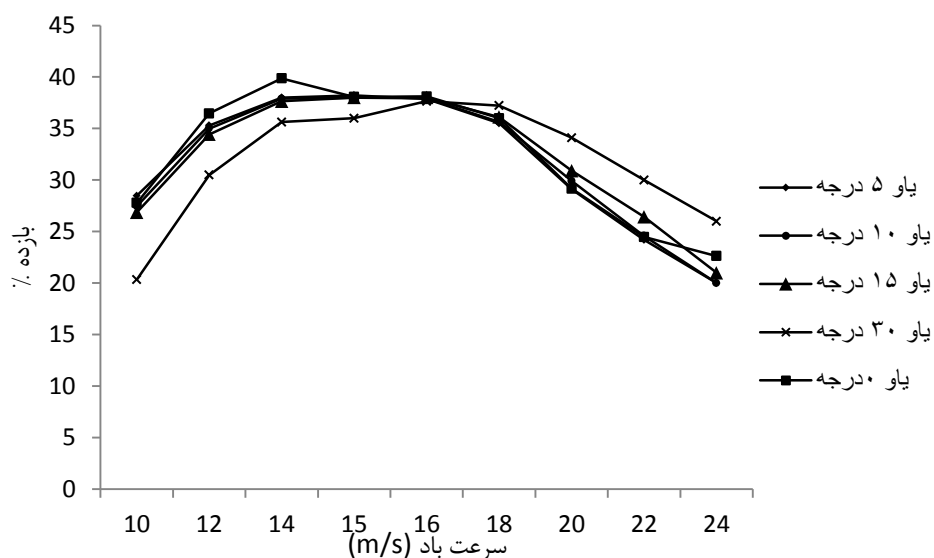
اثر افزایش زاویه یاو بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی از جمله موضوعاتی است که کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شد که نظریه تکانه اجزاء پره (بی-ای-ام) در مقاطع مختلف با دقت قابل قبولی می‌تواند نیروهای محوری و سمتی وارد شده بر پره توربین بادی را محاسبه کند. همچنین بیان شد که در زاویه یاو ۱۵ درجه در سرعت باد  $24 \text{ m/s}$ ، زاویه یاو با تغییر سرعت نهایی بر روی پره و در نتیجه با تغییر زاویه حمله میزان توان استحصالی از توربین بادی کاهش می‌دهد. بیشترین میزان افت توان در شرایط زاویه یاو زمانی رخ خواهد داد که پره توربین بادی در نیمه دوم صفحه روتور قرار داشته باشد.



شکل ۵-۳ توزیع نیروی سمتی در صفحه چرخش پره در زاویه یابو ۱۵ درجه

در این تحقیق نشان داده شد که زاویه یابو ۵ و ۱۰ درجه تأثیر قابل توجهی بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی ندارند. در زاویه یابو ۳۰ درجه، توربین بادی عملکرد متفاوتی را از خود نشان داد. در این زاویه توربین بادی تا سرعت باد  $16\text{m/s}$  بازده انرژی و اکزرژی کمتری از حالت بدون یابو را داشت. به نظر می رسد در بازه سرعت  $8\text{m/s}$  تا  $16\text{m/s}$ ، زاویه یابو ۳۰ درجه عملکرد توربین بادی را کاهش می دهد و نباید در این بازه از سرعت باد، روتور در این زاویه یابو قرار گیرد. در سرعت  $16\text{m/s}$  بازده اکزرژی مستقل از زاویه یابو شد و برای تمامی زاویه های یابو یک مقدار ثابت را نشان داد. با توجه به شکل ۵-۴ با افزایش سرعت باد از  $16\text{m/s}$  تا سرعت باد  $24\text{m/s}$  به بازده اکزرژی توربین بادی در زاویه یابو ۳۰ درجه از بازده اکزرژی در شرایط بدون زاویه یابو بیشتر شد. علیرغم اینکه با افزایش زاویه یابو قدرت استحالی از توربین بادی کاهش یافت، اما در سرعت های بیشتر از  $16\text{m/s}$  این امر موجب افزایش بازده اکزرژی توربین بادی شد. به گونه ای که در سرعت  $24\text{m/s}$  در زاویه یابو ۳۰ درجه بازده اکزرژی نسبت به شرایط بدون زاویه یابو  $14/89\%$  افزایش نسبی داشت. همین رفتار، مشابه اما با شدت کمتر در زاویه یابو ۱۵ درجه نیز مشاهده می شود.

با افزایش زاویه یاو، میزان نیروی محوری وارده بر روتور توربین بادی کاهش یافته است. این موضوع باعث افزایش بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی در بازه سرعت باد ۱۶m/s تا ۲۴m/s در زاویه‌های یاو ۱۵ و ۳۰ درجه است. این نیروی محوری که اغلب در جهت عکس تولید توان عمل می‌کند، بیشترین فشار را بر روی یاتاقان‌ها و تکیه‌گاه‌های روتور توربین بادی می‌آورد. پس می‌توان گفت که با افزایش زاویه یاو و در نتیجه کاهش نیروی محوری، در سرعت‌های بالای باد، می‌توان در کنار افزایش عملکرد توربین، از استهلاک توربین بادی نیز در بازه‌های زمانی معین کاست و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را کاهش داد.



شکل ۵-۴ اثر تغییر زاویه یاو بر بازده اکزرژی توربین بادی در سرعت‌های مختلف

## ۵-۱-۴ تأثیر تغییرات دما، فشار و رطوبت مخصوص

بر اساس این مدل، متغیرهای دما، فشار و رطوبت نسبی نتوانستند بر بازده انرژی توربین بادی تأثیری قابل توجه بگذارند. از جمله عواملی که باعث شد این متغیرها بر بازده انرژی بی‌تأثیر باشند، این است که این متغیرها به صورت مستقیم در بازده انرژی دیده نشده‌اند. با تأثیر دادن این متغیرها در بازده اکزرژی توربین بادی، می‌توان دریافت که با افزایش دما عملکرد توربین بادی نیز افزایش می‌یابد. همچنین اثر افزایش فشار جریان هوا و هم رطوبت نسبی باعث کاهش عملکرد توربین بادی شدند. تأثیر تغییرات دما، فشار و رطوبت مخصوص جریان باد در مقایسه با سرعت جریان باد، میزان

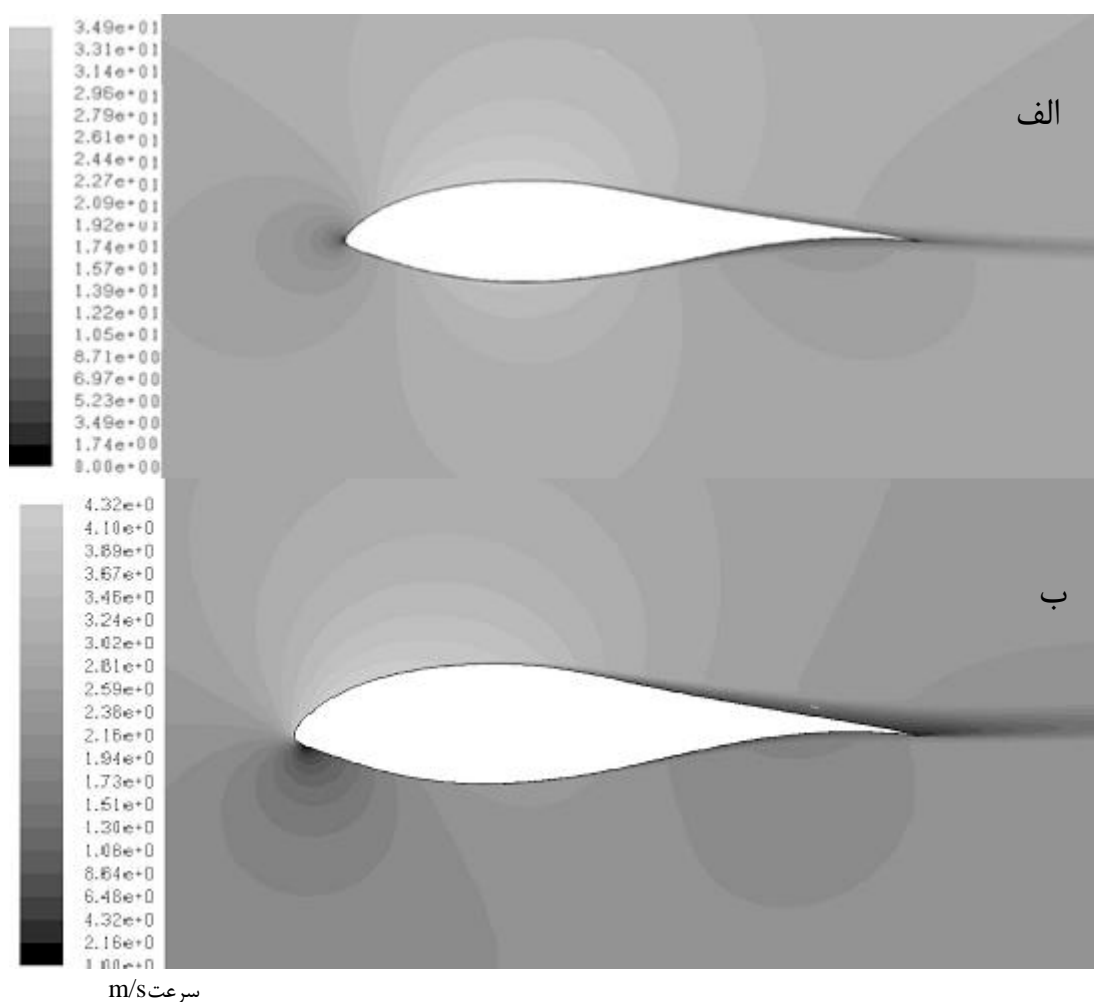
گردوغبار و تغییر زاویه یابو بر بازده اکزرژی کمتر بود.

## ۲-۵ پیشنهادها

۱. شبیه‌سازی توربین بادی توسط مدل‌های جدید مانند تئوری دیسک عملگر و تئوری خط عملگر در نرم‌افزارهای دینامیک سیالات عددی و تحلیل اکزرژی توربین بادی
۲. شبیه‌سازی یک مزرعه بادی توسط یک مدل عددی و تحلیل اکزرژی آن
۳. بررسی تغییرات زاویه گام، تغییر کورد پره و انتخاب هوابرهای مختلف در پره بر بازده انرژی و اکزرژی توربین بادی توسط نظریه تکانه اجزاء پره
۴. بررسی تأثیرات یخ‌زدگی بر بازده اکزرژی توربین بادی

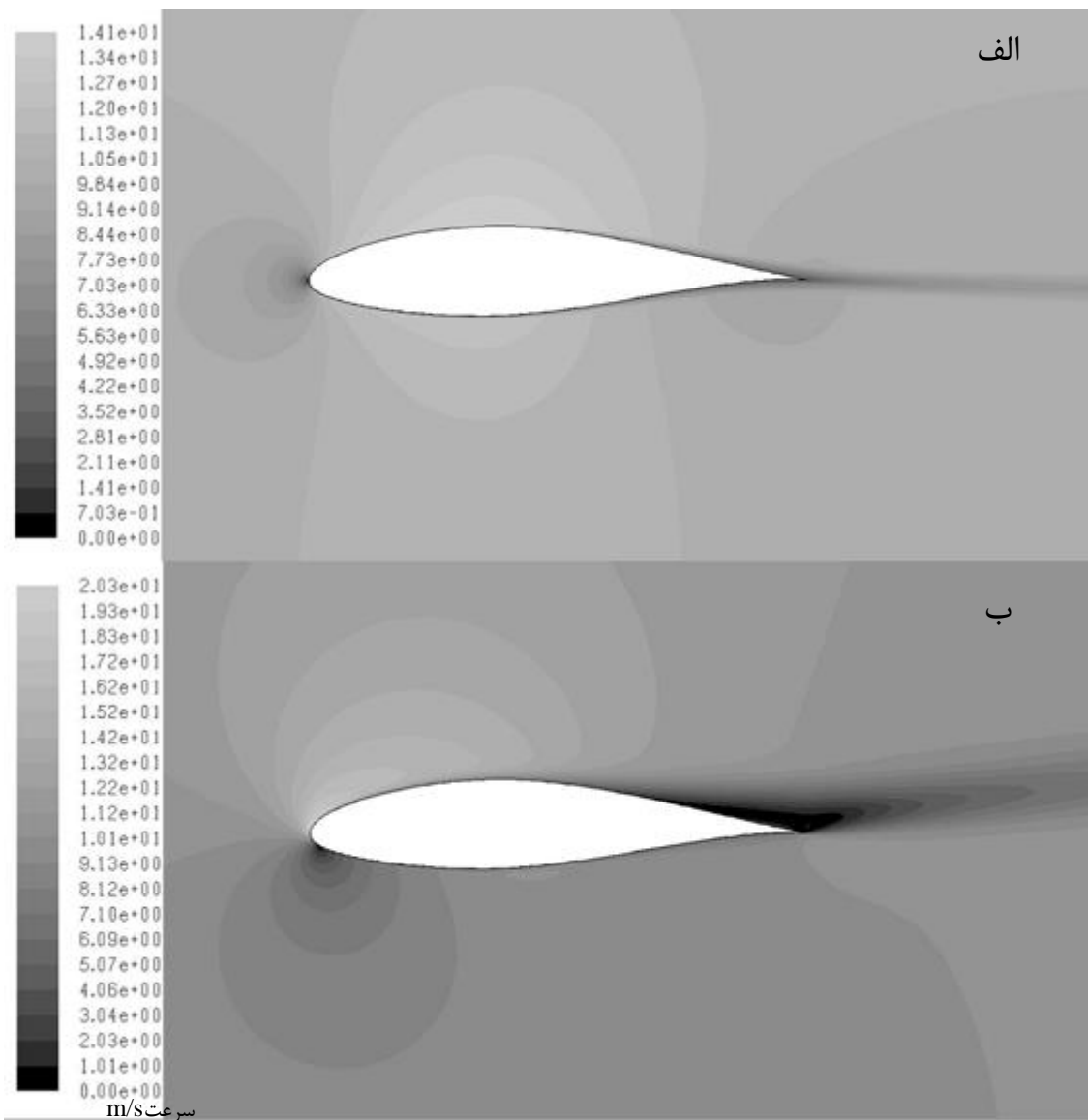
## پیوست‌ها

### پیوست الف

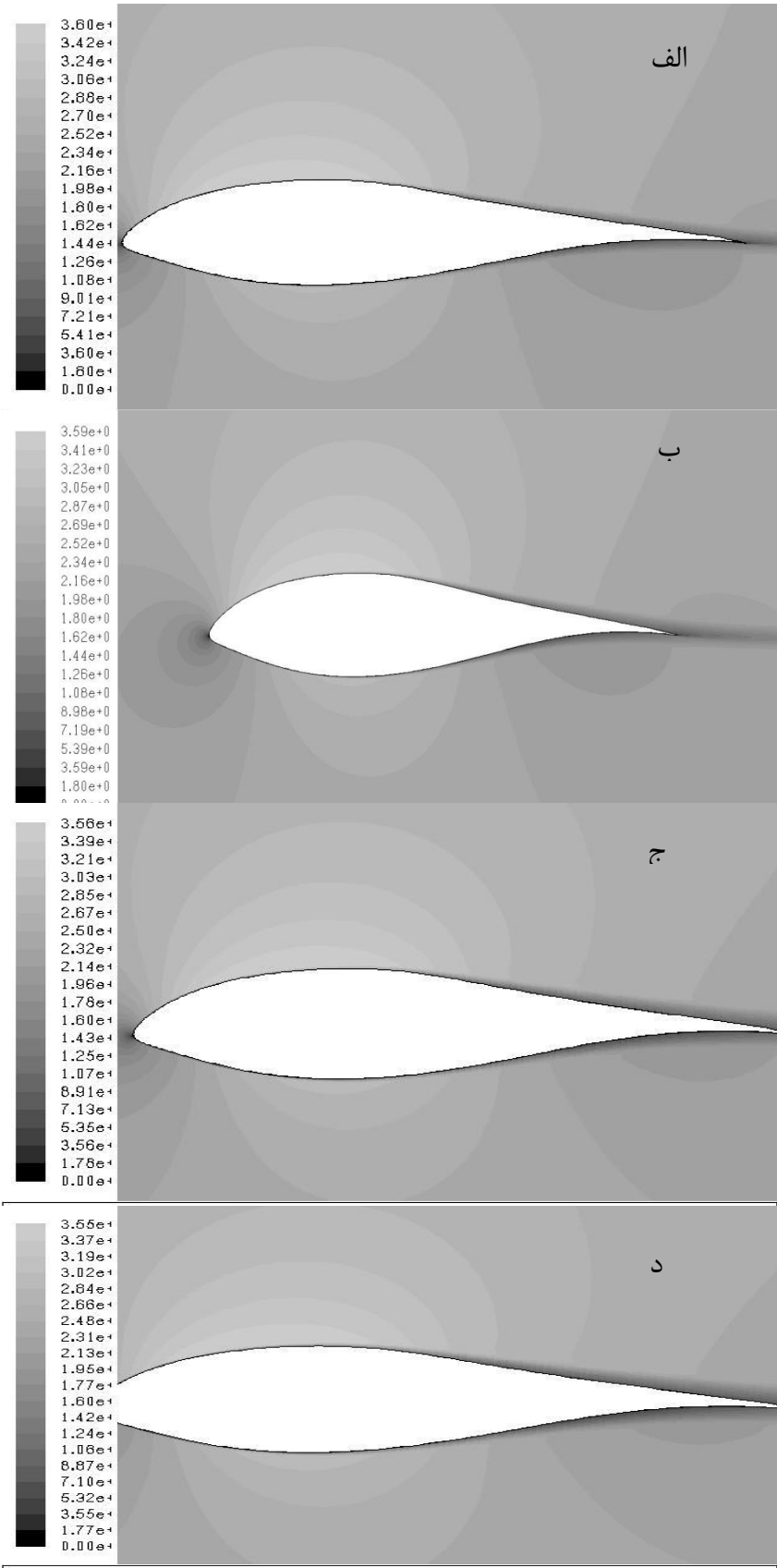


شکل ۱ کانتور سرعت برحسب m/s هوا بر ریزو. الف: زاویه حمله ۰ درجه. ب: زاویه حمله ۹ درجه



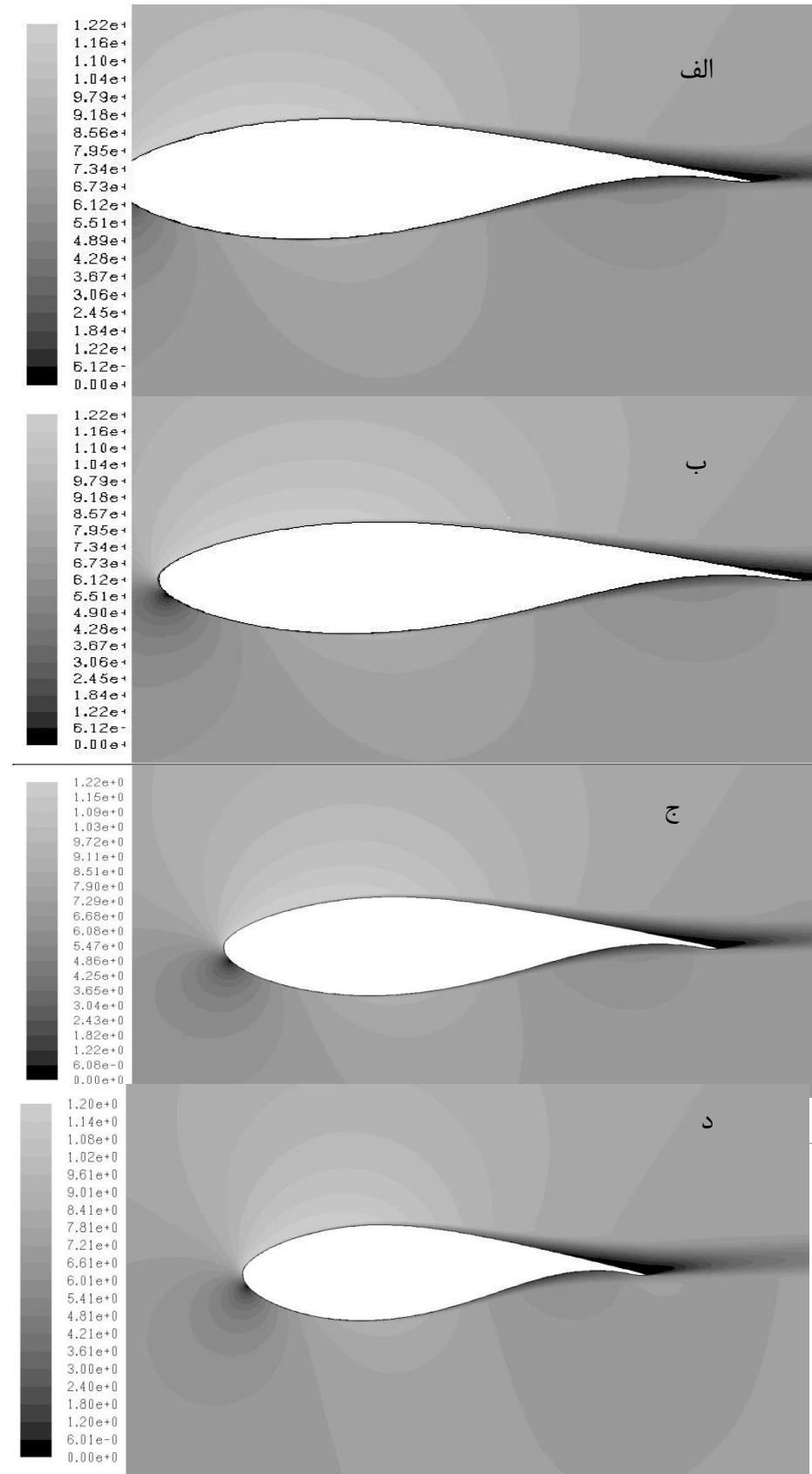


شکل ۲ کانتور سرعت برحسب m/s هوایر ناکا. الف: زاویه حمله ۰ درجه. ب: زاویه حمله ۱۱ درجه



Contours of Velocity Magnitude (m/s) Feb 06, 2016  
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, sstk)

شکل ۳ اثر افزایش شدت زبری بر جدایش جریان روی هوا بر RISØ A1-21 در شدت زبری الف: ۰ mm ب: ۰/۱ mm ج: ۰/۳ mm د: ۰/۵ mm



شکل ۴ اثر افزایش شدت زبری بر جدایش جریان روی هواپر DU91-W2-250. در شدت زبری الف: ۰mm ب: ۰/۱ mm ج: ۰/۳mm د: ۰/۵mm

## مراجع

- [1] فضلی, م., "مدلسازی و شبیه سازی توربین بادی مجهز با DIFG و STATCOM جهت بررسی عملکرد سیستم در طی خطای شبکه," دانشگاه آزاد اسلامی، تهران جنوب.
- [2] "دفتر انرژی باد و امواج | سازمان انرژی های نو ایران" [Online]. Available: <http://www.suna.org.ir/fa>. [Accessed: 26-Jan-2016].
- [3] Rosa, A. V. da, 2009, *Fundamental of renewable energy processes*, 2nd edition.
- [4] "نشریه سازمان انرژی-های نو," سال هفتم، شماره ۳۹ [Online]. Available: [http://www.suna.org.ir/suna\\_content/media/image/2015/11/4180\\_orig.pdf](http://www.suna.org.ir/suna_content/media/image/2015/11/4180_orig.pdf). [Accessed: 26-Jan-2016].
- [5] Ren21, 2014, "The First Decade: 2004-2014, 10 Years of Renewable Energy Progress," pp. 2004–2014.
- [6] REN21, 2013, *Renewables 2013 Global Status Report*.
- [7] Koroneos, C., Spachos, T., and Moussiopoulos, N., 2003, "Exergy analysis of renewable energy sources," *Renew. energy*, pp. 295–310.
- [8] Baskut, O., Ozgener, O., and Ozgener, L., 2011, "Second law analysis of wind turbine power plants: Cesme, Izmir example," *Energy*, **36**(5), pp. 2535–2542.
- [9] Baskut, O., Ozgener, O., and Ozgener, L., 2010, "Effects of meteorological variables on exergetic efficiency of wind turbine power plants," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **14**(9), pp. 3237–3241.
- [10] Sagol, E., Reggio, M., and Ilinca, A., 2013, "Issues concerning roughness on wind turbine blades," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 514–525.
- [11] Khalfallah, M. G., and Koliub, A. M., 2007, "Effect of dust on the performance of wind turbines," *Desalination*, **209**(3-3), pp. 209–220.
- [12] Pope, K., Dincer, I., and Naterer, G. F., 2010, "Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines," *Renew. Energy*, **35**(9), pp. 2102–2113.
- [13] Mahmoodi, E., Jafari, A., Peter Schaffarczyk, A., Keyhani, A., and Mahmoudi, J., 2013, "A new correlation on the MEXICO experiment using a 3D enhanced blade element momentum technique," *Int. J. Sustain. Energy*, (October), pp. 1–13.
- [14] Bouatem, A., and Mers, A. Al, 2013, "Validation of Chaviaro Poulos and Hansen Stall Delay Model in the Case of Horizontal Axis Wind Turbine Operating in Yaw Conditions," *Energy Power Eng.*, **05**(01), pp. 18–25.
- [15] Boorsma, K., and Schepers, J., 2009, "Description of experimental set-up, Mexico measurements," ECN, Netherlands, pp. 287–301.
- [16] Rosen, A., Wolf, A., Shmuel, D., and Omri, G., 2011, "Part 2. The Mexico Project Wind Turbine Model," pp. 287–301.
- [17] Glauert, H., 1935, "Airplane propellers," *Aerodyn. theory*.
- [18] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., 2001, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons.
- [19] Martin O. L. Hansen, 2008, *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2nd edition.
- [20] Betz, A., 1920, *Das Maximum der theoretisch moeglichen Ausnuetzung des Windes durch Windmotoren*.
- [21] Kuik, G. Van, 2007, "The Lanchester–Betz–Joukowski limit," *Wind Energy*, pp. 289–291.
- [22] Sørensen, J., 2011, "Aerodynamic aspects of wind energy conversion," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, pp. 427–448.
- [23] Hansen, A., and Butterfield, C., 1993, "Aerodynamics of horizontal-axis wind turbines," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, pp. 115–149.
- [24] Mikkelsen, R., 2003, "Actuator disc methods applied to wind turbines," p. 121.

- Prandtl, L., and A. B., 1928, "Vier abhandlungen zur hydrodynamik und aerodybamik," [25]  
*Zeitschrift für Angew. Math. und Mech.*, **8 (1)**, pp. 88–92.
- Wilson, R., 2009, "Wind Turbine Aerodynamics Part A: Basic Principles," ... [26]  
*Turbine Eng. Second ....*
- Martinez, J., and L. B., 2004, "An improved BEM model for the power curve prediction [27]  
of stall-regulated wind turbines," *Wind Energy*, **8 (4)**, pp. 385–402.
- Lanzafame, R., and M. M., 2012, "How to take into account the radial flow inside of a [28]  
1-D numerical code," *Renew. Energy*, **39 (1)**, pp. 440–446.
- Snel, H., Houwink, R., and Bosschers, J., 1993, "Sectional prediction of 3-D effects for [29]  
stalled flow on rotating blades and comparison with measurements," pp. 395–399.
- Hernandez, J., and Crespo, A., 1987, "Aerodynamics calculation of the performance of [30]  
horizontal axis wind turbines and comparison with experimental results," *Wind Eng*, pp.  
177–187.
- Moriarty, P., and Hansen, A., 2005, *AeroDyn theory manual*. [31]
- Dincer, I., and Rosen, M., 2007, "Exergy: Energy, Environment and Sustainable [32]  
DevelopmentElsevier," pp. 187–188.
- Bluestein, M., and Zecher, J., 1999, "A new approach to an accurate wind chill factor," [33]  
*Bull. Am. ...*, pp. 1893–1899.
- FLUENT. جدیدی، م. ۱۳۸۸، شرایط مرزی و پارامترهای آشفتگی در نرم افزار. [34]
- "آمار ۲۰۰ ایستگاه سینوپتیک کشور - اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری. [35]  
[Online]. Available: <http://www.chaharmahalmehmet.ir/iranarchive.asp>. [Accessed: 26-Jan-2016].
- Boorsma, K., and Schepers, J., 2009, "Model experiments in controlled conditions," p. [36]  
82,87.

## **Abstract**

In this study, the analysis of energy and exergy of a horizontal axis wind turbine based on blade element momentum theory (BEM) is presented. The computations are validated against wind tunnel data measured in the MEXICO wind turbine experiment. Results show that the blade element momentum theory has good ability to predict the energy and exergy efficiencies. The computations of energy and exergy show the wind speed has high impact on the energy and exergy efficiency. With increasing the wind speed from 8 m/s to 14 m/s the energy and exergy is increased. In the wind speed 14 m/s energy and exergy is maximum. In this speed the exergy efficiency is 39.86% and energy efficiency is 44.05%. The computations of energy and exergy exhibit that with the increasing the roughness from 0 mm to 0.5 mm, 2324 W of the output power is reduced. Roughness of 0.5 mm at the wind speed of 14 m/s reduced exergy efficiency 14.73% respectively. It's also found that the roughness in the first four months of the operation has a more negative effect on the wind turbine performance.

The other metrological variables like pressure, temperature and moisture don't have remarkable impact on wind turbine performance. In wind speed 15 m/s with increasing the temperature from 281K to 286K the exergy efficiency 3.31% is increasing. Also with increasing the pressure from 100KPa to 105KPa the exergy efficiency 3.31% is decreasing. With increasing the relative humidity from 65% to 75% the exergy efficiency 0.4% is decreasing.

The computations of energy and exergy exhibit that with the increasing the yaw angle from 0 degree to 15 degree in wind speed from 10 m/s to 24 m/s the energy and exergy efficiencies have a bit decreasing than energy and exergy efficiency at yaw angle 0 degree. at the wind speed from 18 m/s to 24 m/s, at yaw angle 30 degree, with increase in the wind speed, energy and exergy efficiency of wind turbine is increases. In wind speed 24 m/s at the yaw angle 30 degree, the energy and exergy efficiencies are reached up to 28% and 26%, respectively. They are increased 5.24% and 3.37%, comparing to the energy and exergy efficiencies at the yaw angle 0 degree in the same

speed. And also it is recommended that don't use the yaw angle 5, 10 and 30 degrees at the wind speed from 10 m/s to 16 m/s.

**Keywords:** wind turbine modeling, (BEM) theory, yaw angle, Exergy and Energy, Efficiency.





Shahrood University of Technology  
Faculty of Mechanical Engineering

**Study of environmental conditions on the performance of  
wind turbine's blade in sight of energy issues**

**Ali khanjari**

Supervisor:

**Ali sarreshtehdari**

Adviser:

**Esmail mahmoodi**

Feb 2016