

# بررسی اصول و شبیه‌سازی عددی عملکرد توربین باد ساحلی و فرا ساحلی در حالت ناپایا

جواد زارع<sup>۱\*</sup>، سید احسان حسینی<sup>۲</sup>، مرتضی نامور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جهرم، جهرم

<sup>۲</sup>کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۳</sup>کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه امیرکبیر، تهران

\*مسئول مکاتبات: j\_zare@alumni.iust.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

انرژی‌های تجدیدپذیر  
توربین باد محور افقی  
شبیه‌سازی عددی ناپایا  
مدل توربولانسی

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۵/۰۶  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۱/۱۹

با توجه به نقش بسزای توربین‌های بادی در تولید انرژی از باد به عنوان یکی از منابع انرژی تجدید پذیر، بررسی عملکرد این توربین‌ها در دو حالت پایا و ناپایا ضروری است. یکی از ابزارهای بسیار کارآمد در این زمینه روش دینامیک سیالات محاسباتی و یکی از حالات بسیار مهم در عملکرد توربین‌ها حالت ناپایا است. در این پژوهش عملکرد هیدرودینامیکی دو نوع توربین باد ساحلی و فراساحلی در حالت ناپایا و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های توربولانسی  $k - \omega$  SST و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به ترتیب برای توربین باد محور افقی ساحلی و فراساحلی استفاده گردیده است. نتایج سه بعدی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه و مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است که تطابق مناسب نتایج نشان‌دهنده صحت روش و فرضیات مورد استفاده است. میانگین خطا در توربین ساحلی در پارامتر توزیع فشار در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه در تمامی مقاطع پره توربین در حدود ۵ درصد است همچنین میزان اختلاف در گشتاور توربین فرا ساحلی در سرعت باد ۹ متر بر ثانیه کمتر از ۳ درصد خواهد بود. همچنین اثرات نوک پره بر روی ایجاد و گسترش گردابه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش تعداد پره‌ها مقدار گشتاور و نیروی پیش‌رانه به‌صورت تدریجی افزایش پیدا کرده و توزیع فشار بر روی سطوح به علت شدت توربولانسی نامرتب خواهد شد.

## ۱ مقدمه

بادی با استفاده از کدهای تجاری تکامل یافته است. نسل جدیدی از این توربین‌ها که در سال‌های اخیر مورد آزمایش و بهره‌برداری قرار گرفته‌اند قادرند توانایی استحصال انرژی باد را تا بیش از سه برابر افزایش دهند. در تحقیقات اخیر که در زمینه توربین بادی صورت گرفته گزارش‌ها حاکی از امکان افزایش بهره‌گیری از توان باد توسط به‌کارگیری مجرای مخروطی پیرامون روتور وجود دارد. لی و همکارانش [۲] با مدل‌سازی یک توربین محور افقی به قطر و ارتفاع نیم متر در یک تونل باد با سطح مقطع ۴ متر در ۴ متر و طول ۶/۲ متر که به شبکه توربولانسی مربعی، با نرخ کمترین انسداد ۰/۱۹ و بیشترین انسداد ۰/۷۳، مجهز بوده است توانستند با ۳ نوع الگوی متفاوت، شدت اغتشاشات ۱/۴٪ و ۸٪ و ۱۳/۵٪ تولید کنند. سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه بوده است و هدف از انجام این کار بررسی دقیق‌تر ویک‌های تشکیل شده توربین بادی با اندازه‌گیری آن در تونل بوده است، اما محاسبات عددی در ۲ بعد صورت گرفته که از جمله نتایج آن این است که در ویک نزدیک توزیع سرعت دارای ۲ ماکزیمم و در ویک دور دست یک ماکزیمم است و در شدت اغتشاش ۱/۴٪، توزیع سرعت در مکانی پشت توربین معادل ۵ برابر قطر آن، هنوز ۲ ماکزیمم سرعت مشاهده می‌شود که در شدت اغتشاش ۸٪ و ۱۳/۵٪ به یک

استفاده از توربین‌های بادی با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی ابعاد گسترده‌ای یافته است. با توجه به رشد روزافزون مصرف انرژی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله انرژی باد، در کانون توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از میان توربین‌های بادی که به منظور ایجاد توان مکانیکی از جریان باد استفاده می‌کنند، توربین‌های بادی محور افقی از بازدهی بیشتری برخوردار هستند. از آنجا که انرژی باد به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود، این دستگاه ژنراتور بادی نیز نامیده می‌شود. طبق گزارش جهانی انرژی باد [۱]، ظرفیت کل انرژی بادی تولیدی از ۵۹/۰۹۱ مگاوات در سال ۲۰۰۵ به ۴۳۲/۴۱۹ مگاوات در پایان سال ۲۰۱۵ رسیده است؛ یعنی بیش از ۷۰۰ درصد افزایش داشته است که این آمار به خوبی نشان‌دهنده افزایش تمایلات به استفاده از انرژی‌های نو و به‌ویژه انرژی باد است. انرژی باد ارزان‌ترین، پاک‌ترین و مناسب‌ترین شکل انرژی‌های نو است. در کشور ایران نیز در سال‌های اخیر توجه زیادی به استفاده از این نوع انرژی برای تولید برق شده است. در دهه گذشته، شبیه‌سازی عددی توربین‌های بادی در مؤسسات تحقیقاتی و همچنین تحقیقات انجام‌شده توسط تولیدکنندگان توربین‌های

باد در تونل باد پرداختند. هدف اصلی آن‌ها تمرکز بر روی مطالعه ساختار دنباله و مشخص کردن مرز بین دو ناحیه دنباله نزدیک و دنباله دور بود. برای این منظور آن‌ها از مشخصه شدت آشفتگی استفاده کردند.

در این پژوهش، توضیحاتی در مورد عملکرد توربین‌های بادی ارائه گردیده است و سپس جریان ناپایا حول یک توربین باد ساحلی با دو پره و یک توربین باد فراساحلی با سه پره و به ترتیب با استفاده از مدل‌های توربولانسی SST  $k - \omega$  و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. تأثیر گردابه‌های دنباله‌دار در دو نوع توربین باد محور افقی ساحلی و فراساحلی در حالت ناپایا و همچنین تأثیر تعداد پررها در پیدایش و گسترش گردابه‌های حاصل از نوک پره توربین مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲ تاریخچه پیدایش توربین بادی

از توربین‌های بادی به صورت دستگاه‌هایی کاملاً ساده در حدود پنج هزار سال پیش برای تأمین نیازهای الکتریکی استفاده شده است. ایران و افغانستان جزو اولین کشورهایی هستند که به این صنعت به صورت ساده دست پیدا کردند به طوری که در شکل ۱ نمونه‌ای از آسیاب‌های بادی که در سیستان و بلوچستان وجود داشتند مشاهده می‌گردد. این آسیاب‌های بادی به صورت عمود محور هستند. این صنعت به صورت گسترده بعدها توسط ایالت متحده آمریکا شکل گرفت.

تحقیقات در باب توربین‌های بادی در دو مدل عمده محور افقی و محور عمودی ادامه داشته است ولی در نتیجه‌گیری‌های اخیر تقریباً مسجل شده است که این توربین‌های محور افقی هستند که نقش عمده‌ای را در آینده صنعت انرژی باد خواهند داشت. از جمله مزایای توربین‌های محور افقی می‌توان به سرعت آغاز به کار پایین‌تر، مشکلات عملیاتی کمتر و ضریب توان بالاتر اشاره کرد.

برای استحصال بیشترین توان ممکن از توربین لازم است طراحی بخش‌های مختلف آن در شرایط عملیاتی گوناگون مورد آزمایش قرار گیرد که برای دستیابی به این مهم از روش‌های شبیه‌سازی نرم‌افزاری، آزمایش تونل باد و آزمایش‌های میدانی استفاده می‌شود. به این ترتیب طراحی بخش‌های مختلف به‌طور مداوم در حال تغییر است. نسل جدیدی از این توربین‌ها که در سال‌های اخیر مورد آزمایش و بهره‌برداری قرار گرفته‌اند قادرند توانایی استحصال انرژی باد را تا بیش از سه برابر افزایش دهند. در تحقیقات اخیر که در زمینه توربین بادی صورت گرفته گزارش‌ها حاکی از امکان افزایش بهره‌گیری از توان باد توسط به‌کارگیری مجرای مخروطی پیرامون روتور وجود دارد. در اوایل قرن بیستم آلبرت بتز [۱۲] به کمک قوانین فیزیک کلاسیک نشان داد که بیشینه توان قابل استحصال از باد در توربین‌های محور افقی ۵۰/۷۳ درصد است. وجود این حد بالا از آن زمان به قانون بتز شهرت یافته است. در تحقیقاتی که توسط ایگرا و فورمن و همکاران [۱۳] صورت گرفته، نشان داده شده است که با استفاده از مجرای مخروطی حول توربین می‌توان به بازده‌های بالایی حتی بیشتر از ضرایب ارائه‌شده بتز دست یافت. این نتایج قیمت نهایی توان باد را کاهش می‌دهند و امکان ایجاد تغییرات جدیدی را در طراحی توربین‌ها فراهم می‌آورد.

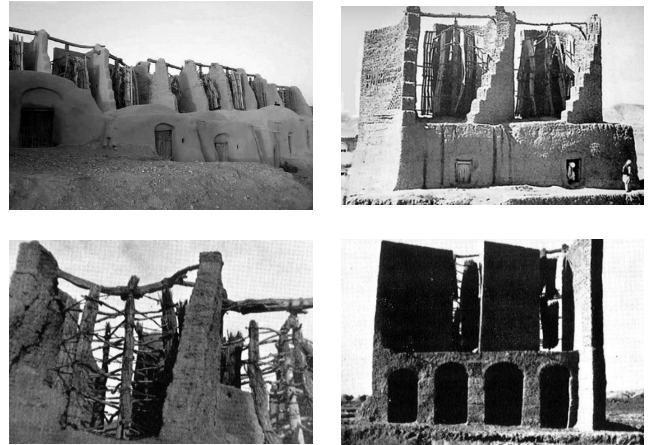
ماکزیمم سرعت کاهش یافته است. همچنین در مکانی پشت توربین معادل ۱۰ برابر طول قطر، سرعت بدون بعد در شدت اغتشاش ۱۳/۵٪ معادل ۰/۹ و در ۱/۴٪ معادل ۰/۸۲ است که به این نتیجه دست یافتند که با افزایش شدت اغتشاش سرعت در آن مکان بیشتر می‌شود. ژئوکوی وانگ و همکاران [۳] شبیه‌سازی برهم‌کنش سازه و سیال توربین باد فراساحلی را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند. این شبیه‌سازی بر اساس مدل توربولانسی  $k - \varepsilon$  انجام گرفت. در این شبیه‌سازی نتایج با دقت خوبی به دست آمد به نحوی که میزان خطا در گشتاور مکانیکی حدود ۲/۱۵ درصد گزارش گردید.

سورنسن و مایکلسون [۴] کاربردهای توربین بادی NREL phase VI را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد شبیه‌سازی قرار دادند. برای این کار با قرار دادن توربین در یک دامنه محاسباتی یک شبکه‌بندی سازمان یافته برای آن در نظر گرفته شد. لانگتری و همکاران [۵] عملکرد ایرفویل دو بعدی و روتور توربین باد سه بعدی را به صورت ناپایا مورد شبیه‌سازی قرار دادند. در واقع دو مدل توربولانسی کامل و توربولانسی ناپایا را برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار دادند و دریافتند که نتایج ناپایا مطابقت بهتری با نتایج تجربی دارد. هارتوانگر و هورات [۶] مدل‌سازی سه‌بعدی توربین باد را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند. عملکرد توربین‌های بادی NREL phase VI تحت حالت ناپایا مورد بررسی قرار گرفت که نتایج با دقت بسیار خوبی نزدیک به نتایج تجربی بود. سیلوا و همکاران [۷] حل عددی ویژگی‌های یک در توربین باد محور افقی را مورد تحقیق قرار دادند. برای این کار توربین باد مدل NREL phase VI انتخاب گردید. شبیه‌سازی با استفاده از معادلات RANS و مدل توربولانسی  $k - \omega$  انجام گرفت. نتایج نسبت به دیگر مقالات دارای کمترین خطا بوده است و دریافتند که ویک ایجادشده ناشی از نوک و ریشه پره است.

سانگ و همکاران [۸] به منظور بهینه‌سازی روش‌های چینش بزرگ به بررسی جریان دنباله در یک مزرعه بادی پرداختند. آن‌ها برای مشخص کردن شدت جریان دنباله از روش شبیه‌سازی ذرات استفاده کردند. این روش در گام اول ذرات را شبیه‌سازی می‌کند، سپس چگالی نسبی ذرات موهومی را با استفاده از روش‌های آماری به دست می‌آورد و در نهایت این چگالی نسبی را تبدیل به مقدار کاهش سرعت می‌نماید. تلاش‌های اخیر به منظور گسترش و تصدیق چهارچوب شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ (LES) توسط پورته آگل و همکاران بررسی شد [۹]. آن‌ها مدل‌هایی از قبیل مدل صفحه چرخان استاندارد بدون چرخش (ADMNR)، مدل صفحه چرخان با چرخش (ADMR) و مدل چرخان (ALM) را در یک کد LES که به‌وسیله آلبرستون و پارلانگ در سال ۱۹۹۹ ارائه شد، اجرا نمودند. بارتل و همکاران [۱۰] به اندازه‌گیری مشخصات میدان سرعت مابین دو توربین باد مدل‌شده برای دو فاصله جدایی متفاوت پرداختند. هدف آن‌ها جمع‌آوری داده‌های تجربی مربوط به چگونگی تولید توان توربین پایین‌دست هنگامی که در فاصله ۳ برابری و ۵ برابری قطر نسبت به توربین بالادست قرار دارد، بود. ژانگ مو و همکاران [۱۱] با استفاده از یک نرم‌افزار تجاری و مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به بررسی خواص موجود در دنباله یک توربین

توربین‌های عمود محور ابعاد کوچک‌تر و اجزای درونی بسیار کمتری نسبت به توربین‌های محور افقی دارند لذا حمل و نقل و جانمایی آن‌ها آسان‌تر است. همچنین می‌توان به دلیل ابعاد کوچک و سروصدای کمتری که دارند در سطح شهر نصب شوند ولی توربین‌های محور افقی را اصولاً در خارج از شهر قرار می‌دهند.

افق محورها دارای بازدهی بالاتری هستند ولی جهت وزش باد برخلاف عمود محورها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در ادامه تفاوت‌های این نوع توربین‌ها می‌توان به ساختار ساده توربین‌های عمود محور اشاره کرد که این سادگی کمتر بودن عملکرد هیدرولیکی نسبت به محور افقی را نیز موجب می‌شود.



#### ۴ ضرایب برآ، پسا و گشتاور برای توربین باد

به‌طور کلی نیروهای برآ، پسا و گشتاور پیچشی بر یک ایرفویل وارد می‌شود. نیروی برآ نیرویی است برای غلبه بر نیروی گرانش که جهت آن عمود برجهت جریان هوا تعریف می‌شود. این نیرو در اثر اختلاف فشار موجود در سطح ایرفویل به وجود می‌آید. نیروی پسا بر اثر وجود اصطکاک و اسکوز در سطح ایرفویل و عدم تعادل در فشار موجود روی سطح ایرفویل به وجود می‌آید. گشتاور حاصل از انتقال برآیند نیروهای آئرونامیکی به نقطه‌ای که این گشتاور مستقل از تغییرات زاویه حمله باشد را گشتاور آئرونامیکی می‌نامند. ضرایب برآ، پسا و گشتاور به ترتیب طبق رابطه‌های (۱)، (۲) و (۳) به دست می‌آیند.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (3)$$

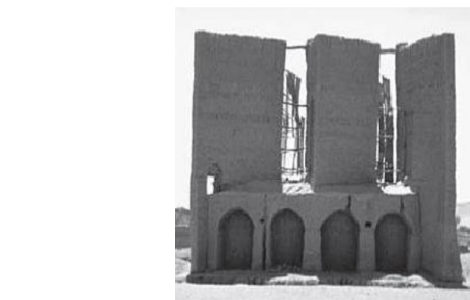
#### ۵ مفاهیمی در رابطه با توربین باد محور افقی

##### ۱.۵ سرعت باد راه‌انداز

سرعت باد راه‌انداز، حداقل سرعت باد جریان آزاد که پره توربین بادی را به حرکت درمی‌آورد. سرعت باد راه‌انداز توربین یکی از پارامترهای اساسی است که در نمودار توان توربین باد مشخص می‌شود و تأثیر بسزایی در میزان انرژی تولیدی توربین دارد.

##### ۲.۵ سرعت توقف باد

جهت محافظت از پرها و جلوگیری از آسیب‌دیدگی، توربین‌های بادی به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که در محدوده مشخصی از سرعت باد عملیاتی گردند. بدین معنا این توربین‌ها همان‌گونه که در سرعت‌های زیر سرعت باد راه‌انداز کاربرد ندارند، در سرعت باد توقف نیز نمی‌توانند انرژی تولید کنند و کار کردن در سرعت‌های بالاتر باعث آسیب آن‌ها می‌شود.



شکل ۱: نمونه‌های اولیه آسیاب‌های بادی در ایران (سیستان و بلوچستان)

#### ۳ توربین‌های بادی محور عمودی و محور افقی

ساختار و طراحی توربین‌های محور عمودی و محور افقی به‌طور کلی با هم متفاوت است. شکل ۲ نمونه‌ای از توربین‌های عمود محور و افق محور را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمای سه‌بعدی از توربین باد محور عمودی (شکل بالا) و توربین باد محور افقی (شکل پایین)

### ۳.۵ نسبت سرعت نوک

این توربین از دو پره تشکیل شده است و دارای قطر ۵۸/۰ متر بوده و بر اساس ایرفویل S809 طراحی شده است. طراحی این توربین باد توسط هند و همکارانش انجام گرفته شده [۱۴] که در جدول ۱ مشخصات عملکردی و طراحی این توربین قابل مشاهده است.

این مفهوم به صورت نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد تعریف می شود که پارامتر مهمی در تحلیل و طراحی پره توربین باد است. این پارامتر در رابطه (۴) گزارش شده است.

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (4)$$

در این رابطه  $\omega$  سرعت زاویه ای روتور،  $R$  شعاع روتور و  $V$  سرعت باد است. مقدار بالای این پارامتر معمولاً نشان دهنده بازدهی بالای توربین باد است؛ اما با افزایش آن، بحث آکوستیک نیز اهمیت پیدا می کند. به طور کلی در توربین های بادی سرعت پایین این نسبت بین ۱ تا ۴ و در توربین های سرعت بالا بین ۵ تا ۹ است.

**جدول ۱:** مشخصات کلی و پارامترهای عملکردی توربین باد محور افقی ساحلی

| تعداد پره | شعاع پره (m) | سرعت دورانی (RPM) | نرخ توان (kW) | جهت دوران زاویه کلی گام (deg) |
|-----------|--------------|-------------------|---------------|-------------------------------|
| ۲         | ۵/۰۲۹        | ۷۲                | ۱۹/۸          | CCW                           |
|           |              |                   |               | ۵                             |

بعد از کاهش تدریجی طول کورد، پروفیل های S809 در طول پره (از تویی تا نوک) استفاده شده است. طول پره برابر ۵/۰۲۴ متر بوده که در شکل ۳ نشان داده شده است. این پره از ۲۸ مقطع مختلف تشکیل شده که شامل دو نوع سطح مقطع دایروی، دو نوع سطح مقطع بیضوی و ۲۴ سطح مقطع با ایرفویل S809 است.

ایرفویل ها در سطح مقطع مختلف پیچیده شده اند تا کیفیت آئرو دینامیکی را در زمانی که می چرخد بهبود بخشد. همان طور که پیش تر توضیح داده شد، در این مسئله از پره های پیچشی استفاده شده است و در طول پره وتر مقاطع و زوایای پیچش آن ها تغییر می کند.

### ۴.۵ محدودیت بتز

آلبرت بتز فیزیکدان آلمانی اثبات کرد که یک توربین باد حداکثر می تواند ۵۹ درصد انرژی بادی را که در مسیر آن می وزد استخراج کند. به عبارت دیگر بر اساس این تئوری، برای اخذ حداکثر انرژی ممکن، روتور توربین بادی باید به گونه ای تعبیه گردد که سرعت جریان در پایین دست روتور یک سوم سرعت بالادست روتور شود. بدین ترتیب مقدار ضریب توان بیشینه (در شرایط ایده آل) برابر ۰/۵۹ می شود.

### ۶ تفاوت توربین باد ساحلی و فراساحلی

توربین های باد فراساحلی معمولاً دارای سه پره و توربین های بادی ساحلی دارای دو پره خواهند بود. به صورت کلی می توان بیان کرد که توربین های بادی که دارای سه پره هستند نسبت به توربین های دو پره ای دارای گشتاور مکانیکی بیشتر و در عین حال دارای سرعت دورانی کمتری خواهند بود. همچنین با توجه به افزایش نیروی درگ و لیفت اعمال شده بر روی روتور مقاومت جریان باد ناشی از تشکیل گردابه های ایجاد شده ناشی از نوک پره هم به آن اعمال می گردد. توربین های بادی ساحلی که عمدتاً برای تولید الکتریسیته به کار می روند نیاز به عملکرد در سرعت های بالاتری دارند و در واقع گشتاور بیشتری نیاز نخواهند داشت. مشکل اساسی که توربین های بادی با تعداد دو پره دارند تأثیر پدیده لرزش در عملکرد آن خواهد بود. این مشکل در توربین های بادی فراساحلی با افزایش تعداد پره ها کمتر خواهد شد و شدت ارتعاشات بهبود پیدا خواهد کرد. در واقع می توان بیان کرد که در توربین های دو پره ای نسبت به توربین های سه پره ای میزان سر و صدا و استهلاک بیشتر است.

### ۷ مدل سازی توربین باد محور افقی ساحلی

یکی از مهم ترین کاربردها در صنعت توربین باد، طراحی آن است که باید به گونه ای انجام گیرد که بیشترین گشتاور و توان را بدست دهد. بعد از مقایسه انواع مختلف توربین باد، توربین بادی مدل NREL phase VI جهت مدل سازی انتخاب گردید.



شکل ۳: نمای ایزومتریک توربین باد محور افقی ساحلی مدل سازی شده

### ۸ مدل سازی توربین باد محور افقی فراساحلی

بعد از مقایسه انواع مختلف توربین، توربین باد ۵ مگاواتی فراساحلی NREL با توجه به مقالات و گزارش های مختلف جهت شبیه سازی انتخاب گردید. این توربین باد فراساحلی در پروژه دوم و سوم CPower در شمال بلژیک به کار رفته است. مدل از پیش طراحی شده DOWEC ۶ مگاواتی به خوبی تغییر کرده است و با بهبود پروژه DOWEC [۱۵]، طراحی توربین باد ۵ مگاواتی دارای نتایج قابل اعتمادی است که توسط تحقیقات جانکمن [۱۶] ارائه شده است.

بخش ریشه پره یک استوانه کامل است. در حالی که تویی مهم ترین بخش هر سه پره است، اطلاعات زیادی در رابطه با تویی روتور در دسترس نیست. کار حاضر طرح جدیدی است که برای تویی در نظر گرفته شده است. از آنجایی که ناحیه تویی در مقایسه با کل ناحیه روتور خیلی کوچک است لذا تأثیر زیادی در شبیه سازی توربین باد نخواهد داشت. شکل ۴ توربین باد مورد استفاده جهت شبیه سازی به روش دینامیک سیالات محاسباتی را نشان می دهد.

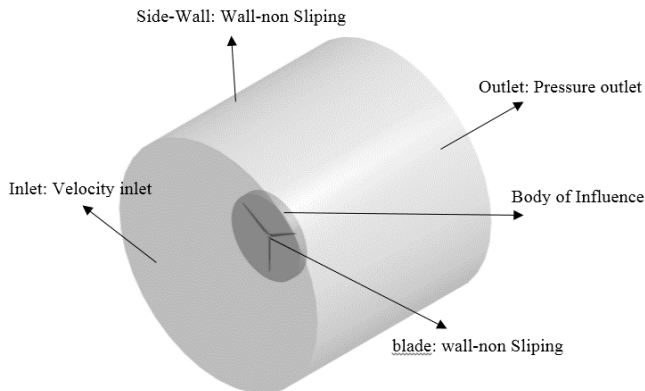




شکل ۵: برج و پره توربین باد جهت تست در تونل باد [۱۴]



شکل ۴: نمای ایزومتریک توربین باد محور افقی فراساحلی مدل‌سازی شده



شکل ۶: دامنه محاسباتی و شرایط مرزی توربین باد محور افقی

## ۹ حل عددی

برای شبیه‌سازی عددی ناپایای هر دو توربین باد محور افقی از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده گردیده است. اعتباربخشی نتایج نیز با استفاده از داده‌های تجربی انجام گردیده است.

از معادلات سه بعدی میانگین‌گیری شده ناویراستوکس همراه با مدل توربولانسی  $k-\omega$  SST و مدل توربولانسی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای محاسبه و آنالیز جریان توربولانسی اطراف توربین باد و به ترتیب برای توربین ساحلی و فراساحلی استفاده شده است.

عملکرد توربین باد ساحلی با داده‌های تجربی از کار هند و همکاران [۱۴] مورد مقایسه قرار گرفته است. در واقع برای بررسی حالت ناپایای توربین باد محور افقی با در نظر گرفتن گام زمانی ۱/۰۵ ثانیه در سرعت باد از ۷ متر بر ثانیه گشتاور و گردابه‌های تشکیل شده در پشت توربین مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵ برج و پره‌های توربین باد را نشان می‌دهد که در تونل باد برای تست قرار داده شده است. معادلات مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، ارزیابی گردابه‌های بزرگ را توصیف می‌کند و شامل تانسور تنش مقیاس زیر گره که نشان‌دهنده اثرات مقیاس‌های کوچک حل نشده است می‌باشد [۱۷].

دامنه محاسباتی برای هر دو توربین باد به یک صورت خواهد بود، به این صورت که ورودی این دامنه سرعت یکنواخت و خروجی دامنه فشار بیرونی است. روتور به عنوان دیواره بدون لغزش در نظر گرفته خواهد شد. همچنین دیواره کناری به عنوان دیواره با تنش برشی  $10^{-5}$  پاسکال قرار داده شده است. از اثرات برج نگه‌دارنده در این شبیه‌سازی صرف‌نظر گردیده است و تنها اثرات روتور در نظر گرفته شده است. حوزه محاسباتی شامل یک سیلندر بوده که دارای قطر و طولی حدود ۶ برابر شعاع روتور بوده (شکل ۶)، به نحوی که نسبت به جلوی توپی ۲ برابر و نسبت به پشت توپی ۴ برابر شعاع روتور است. جهت وقوع گردابه‌های ریز در پشت روتور نیز از سیلندر کوچک‌تری با شعاع اندازه طول روتور استفاده شده که شبکه‌بندی در این ناحیه کوچک‌تر است. در واقع سیلندر کوچک‌تر بخش نفوذی در شبکه‌بندی خواهد بود که چگالی شبکه‌بندی در این ناحیه بیشتر خواهد شد.

### ۱.۹ روابط حاکم بر مدل توربولانسی SST

مدل توربولانسی SST فرم مشابهی از مدل توربولانسی  $k-\omega$  استاندارد است که به صورت معادلات (۵) و (۶) تعریف می‌شود.

$$r \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

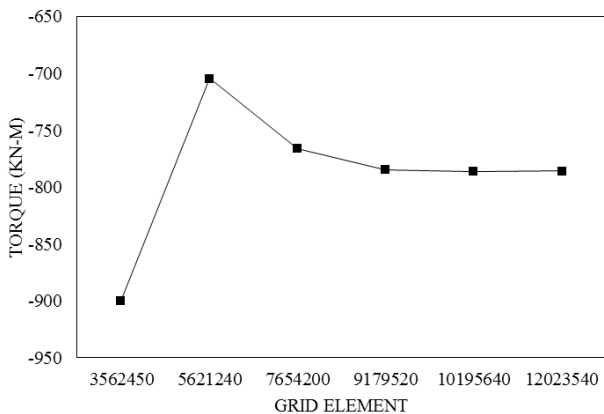
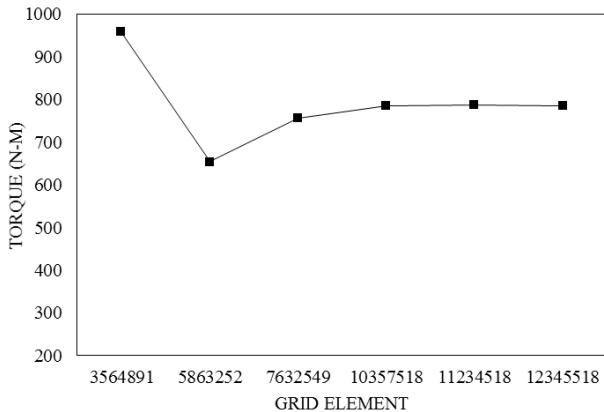
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

در این معادلات،  $G_k$  نشان‌دهنده انرژی جنبشی توربولانس ناشی از گرادیان سرعت میانگین است.  $G_\omega$  نشان‌دهنده تولید  $\omega$  خواهد بود.  $\Gamma_\omega$  و  $\Gamma_k$  نشان‌دهنده نفوذ موثر  $k$  و  $\omega$  است. همچنین  $Y_\omega$  و  $Y_k$  اختلالات ناشی از ترم  $k$  و  $\omega$  را مشخص می‌کند.  $D_\omega$  ترم نفوذ عرضی و  $S_\omega$  و  $S_k$  نیز ترم منبع است.

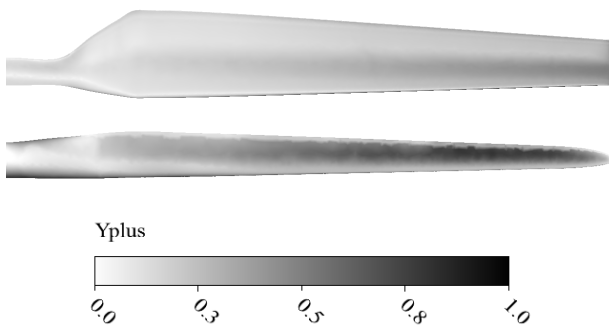
### ۲.۹ روابط حاکم بر مدل توربولانسی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)

همان‌طور که توضیح داده شد در توربین باد فراساحلی معادلات با استفاده از مدل توربولانسی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و فیلترینگ ناویر استوکس

درجایی که  $u_*$  سرعت در نزدیکی دیوار،  $y$  فاصله تا نزدیک‌ترین دیوار و  $v$  ویسکوزیته سینماتیکی است. تعداد سلول‌های ایجاد شده بر روی پره ساحلی و فرا ساحلی به ترتیب ۱۰۳۵۷۵۱۸ و ۹۱۷۹۵۲۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۷: بررسی استقلال از شبکه برای توربین باد محور افقی ساحلی (شکل بالا) و توربین باد محور افقی فراساحلی (شکل پایین)



شکل ۸: کانتور توزیع  $y^+$  بر روی پره توربین باد محور افقی ساحلی (شکل بالا) و توربین باد محور افقی فراساحلی (شکل پایین)

## ۱۱ نتایج مربوط به توربین باد ساحلی

بررسی و تست‌های آئرو دینامیکی بر روی پره توربین درون یک تونل باد انجام گرفته است. یکی از مسائلی که از اهمیت خاصی نیز برخوردار است بررسی گردابه‌های تشکیل شده ناشی از نوک پره است که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است. در شکل ۹ قسمت پایین گردابه‌های تشکیل شده در پشت توربین باد ناشی از شبیه‌سازی نمایش داده شده و قسمت بالا نیز گردابه‌های تشکیل شده با استفاده از تست تونل باد است.

حل می‌شوند که مقیاس‌های فضایی را حذف خواهد کرد. متغیرهای فیلتر به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.

$$\bar{\phi}(x) = \int_D \phi(x') G(x, x') dx' \quad (7)$$

جایی که  $\phi$  متغیر فضایی،  $D$  دامنه سیال و  $G$  تابع فیلتر است که اندازه مقیاس گردابه‌ها را حل می‌کند. در ضمن فلوتنت یک فیلترینگ تولید می‌کند که با استفاده از گسسته سازی حجم محدود برابر خواهد بود با:

$$\bar{\phi}(x) = \frac{1}{V} \int_V \phi(x') dx', \quad x' \in V \quad (8)$$

به طوری که  $V$  حجم سلول‌های محاسباتی می‌باشد. تابع فیلتر  $G(x, x')$  به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$G(x, x') = \begin{cases} \frac{1}{V'} & x' \in V \\ 0 & x' \text{ otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

برای جریان تراکم‌ناپذیر معادلات میانگین‌گیری شده ناویر استوکس برابر خواهد بود با:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (11)$$

جایی که  $\sigma_{ij}$  تانسور تنش ناشی از ویسکوزیته مولکولی است با استفاده از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$\sigma_{ij} \equiv \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \quad (12)$$

و  $\tau_{ij}$  تنش مقیاس زیر گره با استفاده از رابطه (۱۳) قابل محاسبه خواهد بود:

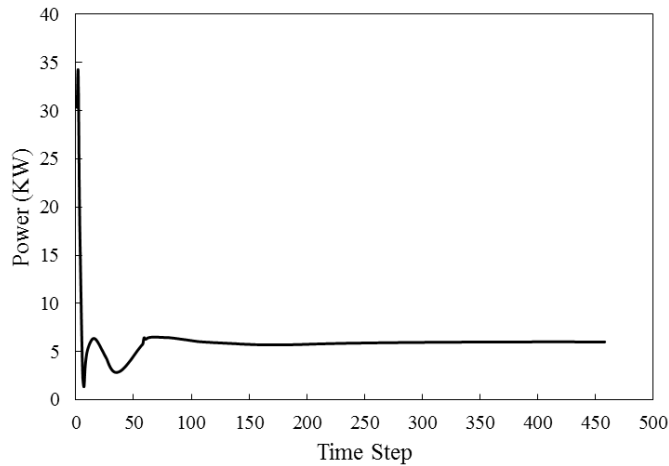
$$\tau_{ij} \equiv \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (13)$$

## ۱۰ شبکه بندی

شبکه بندی برای هر دو حالت توربین باد به صورت بدون سازمان انجام گرفته شده است. سلول‌های به کار رفته در این نوع شبکه بندی به صورت تتراهدرال خواهد بود. جهت بررسی و دقت مسائل از تست استقلال از شبکه استفاده شده است و پس از بررسی شبکه بندی‌های مختلف در نهایت بهترین نوع شبکه بندی انتخاب گردید (شکل ۷). در هر دو حالت توربین باد تعداد لایه‌های مرزی برابر ۲۰ در نظر گرفته شده است. مقدار  $y^+$  در این شبکه بندی کمتر از یک بوده که در شکل ۸ کانتور مربوط به  $y^+$  در طول پره مشاهده می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار  $y^+$  در نوک پره بیشتر از ریشه آن خواهد بود که این مهم با توجه به رابطه (۱۴) قابل توضیح است، همچنین علت آن را می‌توان با توجه به رابطه  $y^+$ ، افزایش سرعت در نوک پره دانست.

$$y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \quad (14)$$

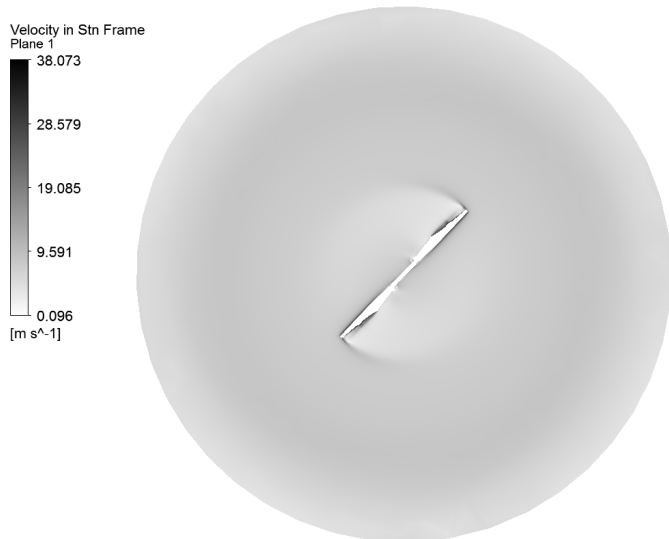
از آنجایی که توان مکانیکی از جنس گشتاور است و با آن رابطه دارد نحوه تغییرات همانند نمودار شکل ۱۰ خواهد بود.



شکل ۱۱: نمودار توان مکانیکی ایجادشده در حالت ناپایا

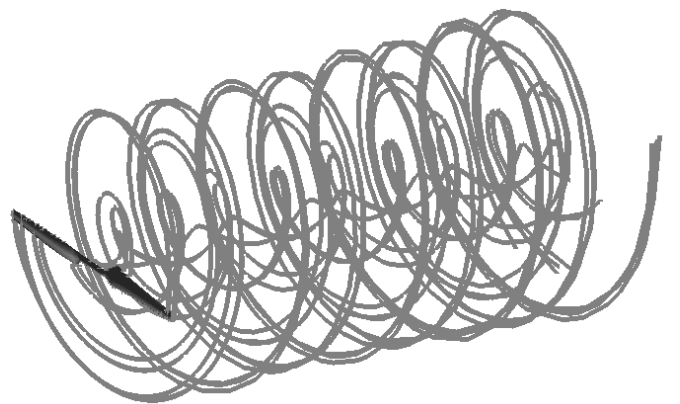
کانتور سرعت در صفحه گذر از مرکز پره (نمای روبرو) در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این نتایج در زمان  $t = 4s$  و سرعت باد ۷ متر بر ثانیه به دست آمده است.

با توجه به شکل ۱۲ نحوه تغییرات سرعت را می توان به وضوح مشاهده کرد. همان طور مشخص است سرعت در نوک پره بیشترین مقدار خود را دارا بوده و با چرخش در جهت ساعت گردابه های تشکیل شده پشت پره مشخص می گردد.



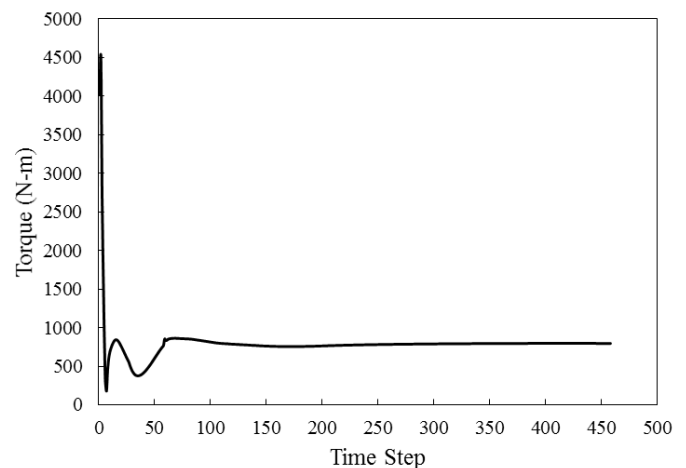
شکل ۱۲: توزیع سرعت در صفحه عبوری از مرکز توربین در  $t = 4s$

شکل ۱۳ توزیع فشار بروی پره توربین باد در سطح فشار و سطح مکش را نشان می دهد که در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه به دست آمده است. فشار در خط مقدم سطح فشاری دارای بیشترین مقدار است و در سطح مکشی دارای کمترین مقدار خواهد بود. در سطح فشار پره با پیشروی به سمت ریشه این فشار بیشتر خواهد شد. البته این قضیه برای سطح فشاری برعکس خواهد بود یعنی با پیشروی از ریشه تا تویی خط مقدم فشار افزایش می یابد.



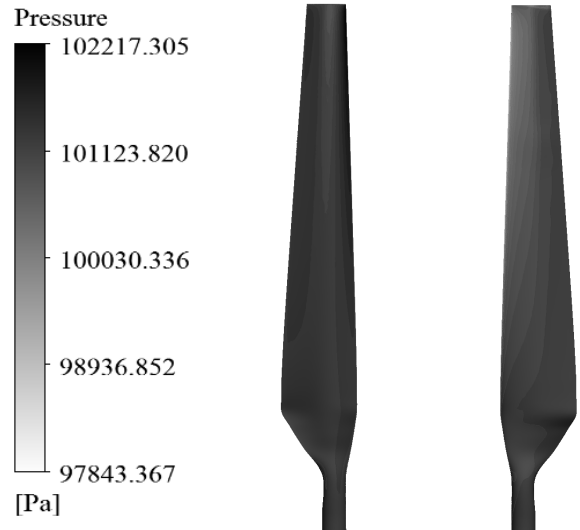
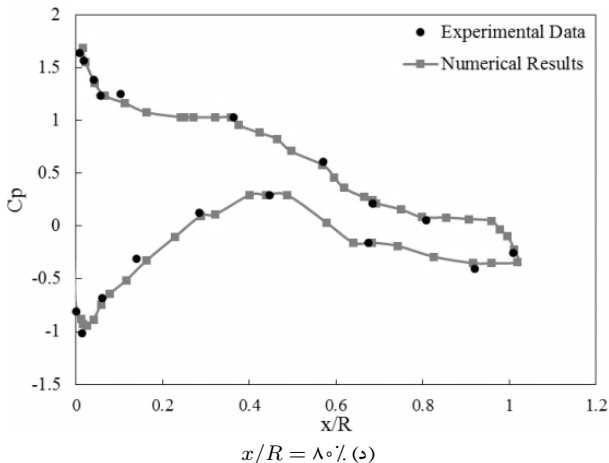
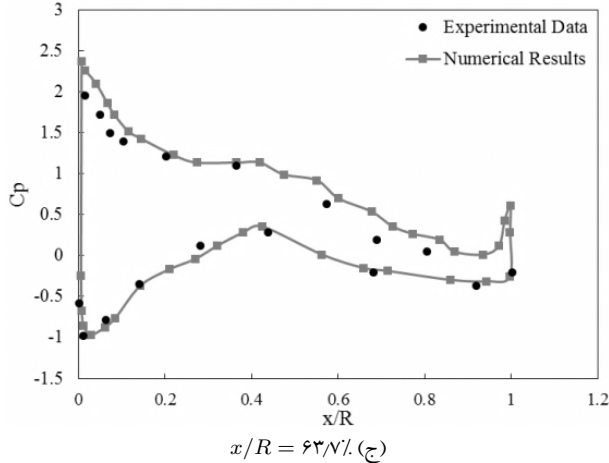
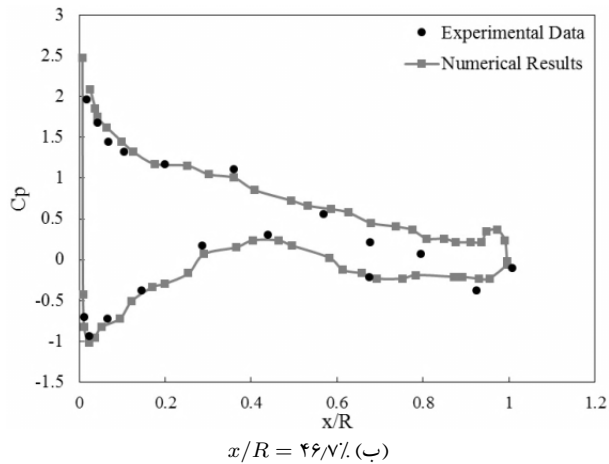
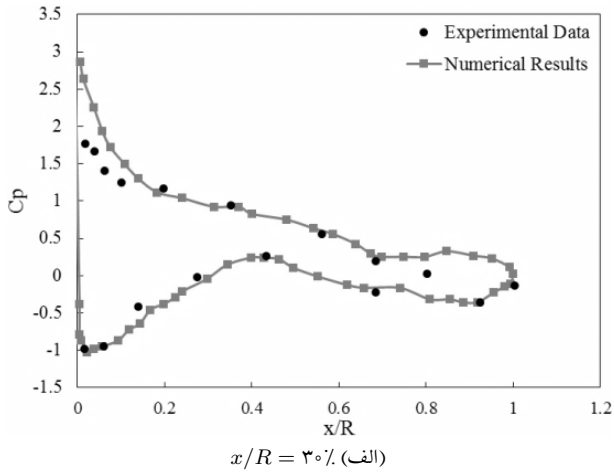
شکل ۹: گردابه های تشکیل شده در پشت توربین باد ناشی از نوک پره با استفاده از حل عددی (شکل پایین) و نتایج تجربی (شکل بالا)

نتایج به دست آمده در حالت ناپایا برای توربین در ادامه ارائه گردیده است. شکل ۱۰ توزیع گشتاور ایجادشده بر روی توربین باد را نشان می دهد که با گذر زمان تغییر کرده و در نهایت پایدار شده و یک مقدار ثابت را نشان می دهد. همان طور که مشخص است بیشتر گشتاور در گام زمانی کمتر رخ داده و به مرور زمان جواب پایدار می شود.



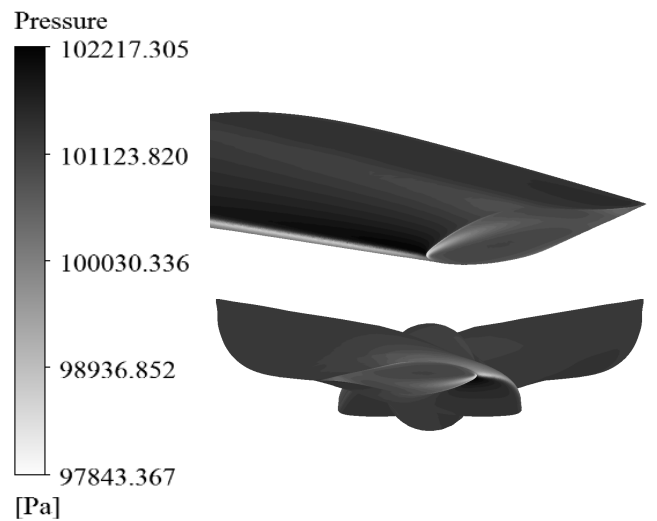
شکل ۱۰: نمودار گشتاور ایجادشده توسط روتور در حالت ناپایا

شکل ۱۱ توان مکانیکی ایجادشده توسط پره توربین را نشان می دهد.



شکل ۱۳: توزیع فشار بر روی سطح فشاری (سمت چپ) و مکشی (سمت راست) توربین باد

شکل ۱۴ نشان‌دهنده توزیع فشار در نوک پره است. همان‌طور که قابل مشاهده است در خط مقدم فشار بر روی سطح فشار بیشتر از سطح مکشی است. نکته حائز اهمیت کاهش فشاری است که بر روی سطح ایرفویل نوک ایجاد شده است که تلاش‌های زیادی برای کنترل این قسمت اخیراً در حال انجام است.

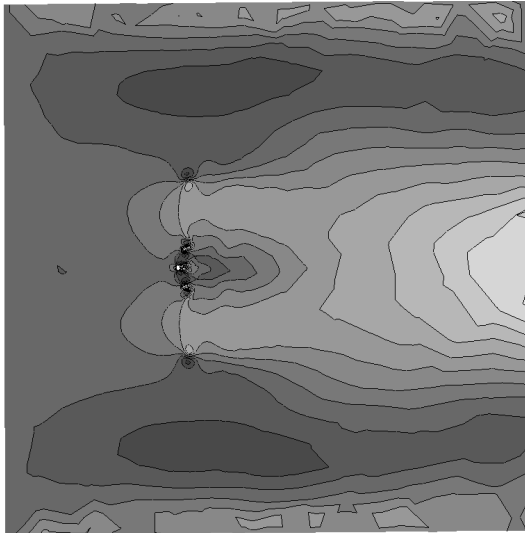


شکل ۱۴: توزیع فشار بر روی نوک پره

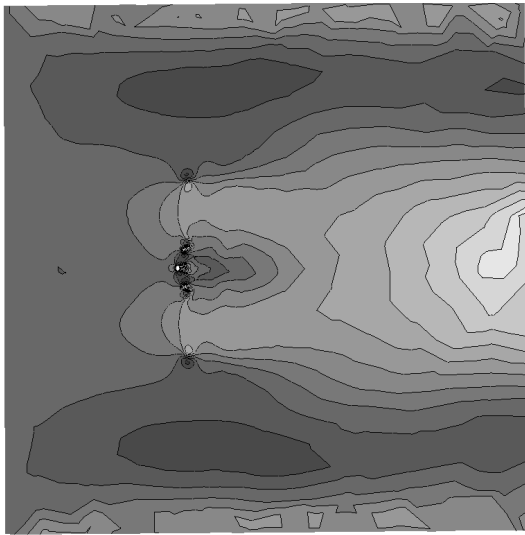
شکل ۱۵ مقایسه توزیع فشار حاصل از حل عددی با داده‌های تجربی را نشان می‌دهد که در حالت ناپایا و سرعت باد ۷ متر بر ثانیه به دست آمده است. این نتایج با توجه به کار باقری و نجات [۱۸] شبیه‌سازی شده است. این نتایج در پنج مقطع ( $x/R = 30, 46, 63, 80, 95\%$ ) دست آمده است.

نتایج حل عددی با دقت بسیار خوبی نزدیک به داده‌های تجربی است. با توجه به نمودار می‌توان پی برد که در بعضی مقاطع در خط مقدم و خط انتهایی کمی تفاوت در نتایج وجود دارد که ناشی از زاویه حمله خواهد بود که در نتایج تجربی وجود دارد.

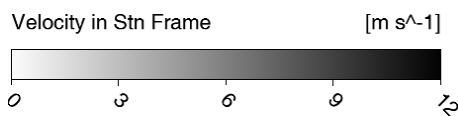




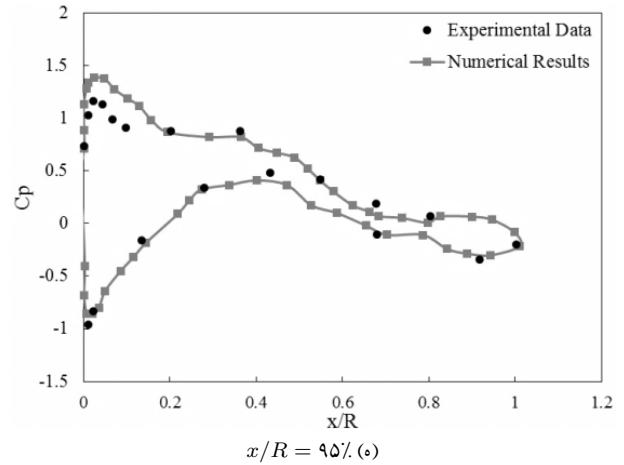
$t = 3s$  (ب)



$t = 4s$  (ج)



**شکل ۱۶:** توزیع سرعت بر روی صفحه عبوری از مرکز توربین از نمای جانبی و در زمان‌های متفاوت

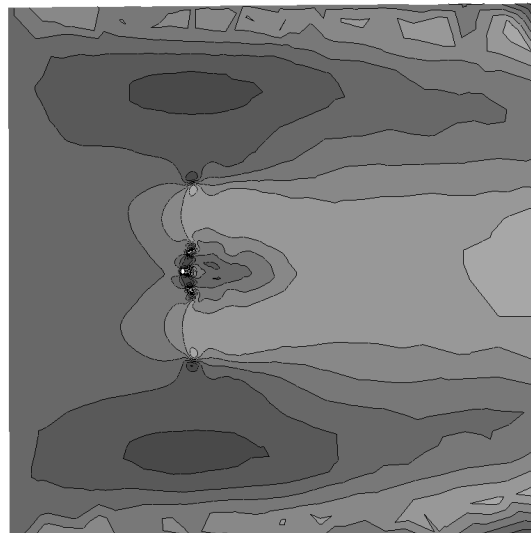


**شکل ۱۵:** مقایسه توزیع فشار نتایج حل عددی با داده‌های تجربی در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه در حالت ناپایا

نحوه تغییرات سرعت در صفحه عمود بر پره (عبوری از مرکز) توربین باد در چهار گام زمانی مختلف در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این تغییرات در زمان‌های ( $t = 1/5, 3/10, 4/5$ ) به دست آمده است. همان‌طور که به وضوح مشخص است با افزایش زمان حل، گردابه‌ها در پشت توربین بیشتر شده است. همچنین با گذشت زمان حجم بیشتری از جریان با سرعت کمتری در حال عبور از پشت توربین خواهد بود.

بیشینه سرعت در همه حالات در نوک پره خواهد بود و کمترین سرعت در پشت توپی رخ می‌دهد. در واقع می‌توان گفت حجم بیشتری از گردابه‌های تشکیل شده ناشی از گردابه‌های توپی است.

شکل ۱۷ به ترتیب حجم گردابه‌های تشکیل شده بر روی پره توربین را نشان می‌دهد که در زمان‌های  $0/27, 0/47, 0/8, 0/92$  و  $1/17$  ثانیه به دست آمده است. حجم سفیدرنگ ایجاد شده بر روی پره توربین بیانگر گردابه‌های ایجاد شده توسط توربین باد است. با افزایش زمان حجم گردابه‌های تشکیل شده نیز افزایش خواهد یافت. در واقع با افزایش زمان گردابه‌ها شبیه یک حالت پیچشی یا به اصطلاح torch می‌شود. ناحیه پشت توپی مربوط به گردابه توپی خواهد بود که نسبت به نوک پره کمتر است. همچنین قابل ذکر است که با افزایش زمان پیوستگی در گردابه‌ها بیشتر خواهد شد.

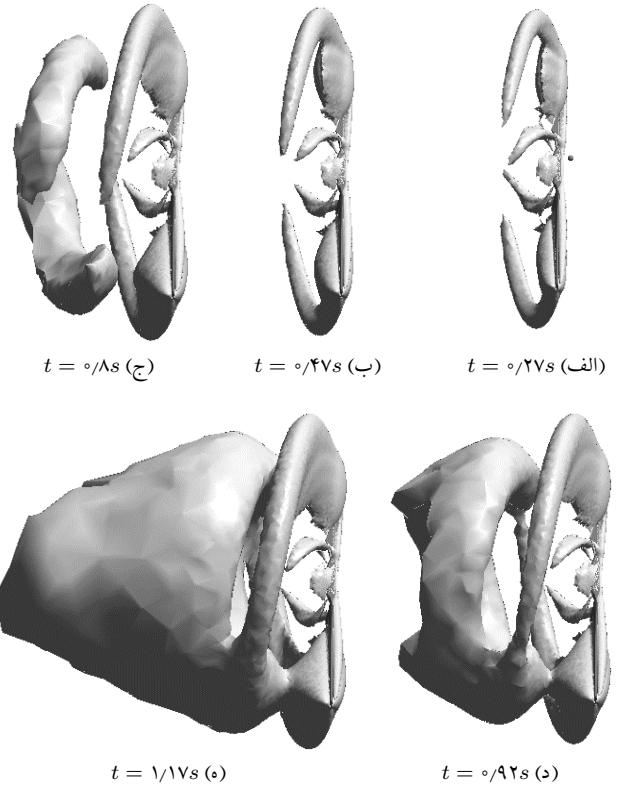


$t = 1/5s$  (الف)

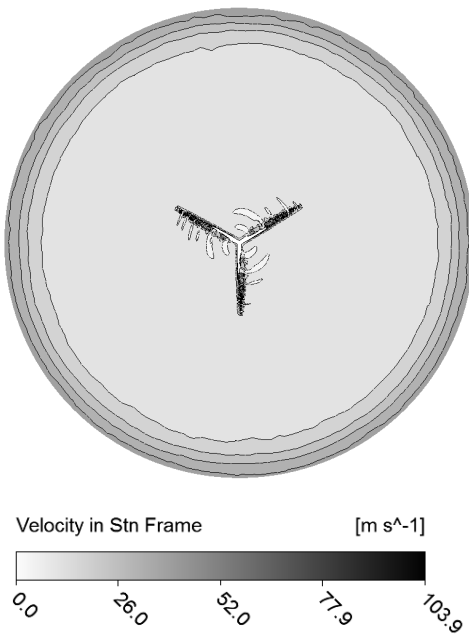
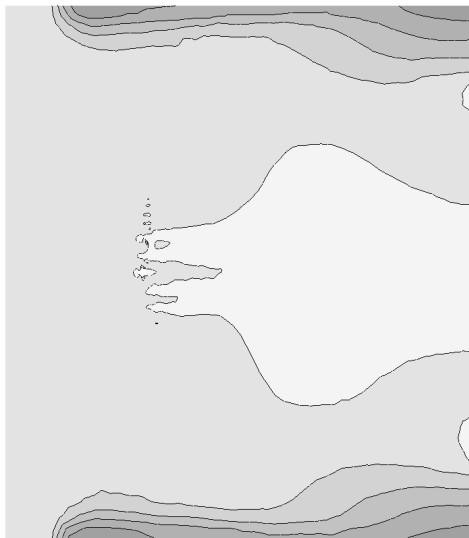
## ۱۲ نتایج مربوط به توربین باد فراساحلی

همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد سرعت باد در این شرایط ۹ متر بر ثانیه بوده است. نمودار همگرایی گشتاور توربین باد در گام زمانی  $0/1$  ثانیه در شکل ۱۸ نشان داده شده است که با داده‌های وانگ [۱۹] مقایسه گردیده است. همان‌طور که واضح است نتایج از دقت بسیار خوبی برخوردار می‌باشد. اختلاف در نمودار بیشتر در ثانیه‌های اول رخ داده که به دلیل تفاوت روش‌های حل خواهد بود. با گذشت زمان مقدار گشتاور پایدار شده است و اختلاف به حداقل مقدار ممکن رسیده است. همچنین در شکل ۱۹ نمودار همگرایی توان مکانیکی مشاهده می‌گردد که با گذشت زمان به مقداری ثابت رسیده است.

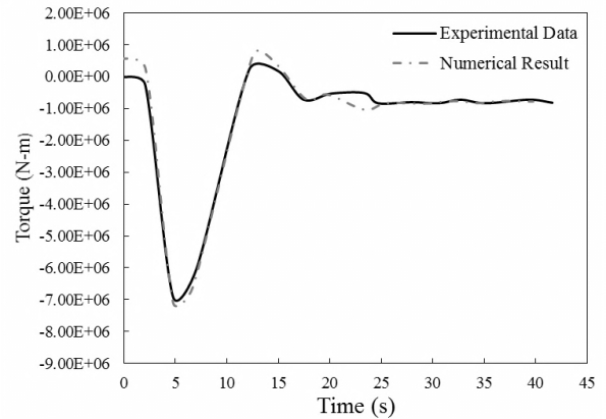
کانتور سرعت در نمای جانبی در صفحه گذراننده از مرکز توربین در دو نمای روبرو (قسمت پایین) و جانبی (قسمت بالا) در شکل ۲۰ نشان داده شده است. ناحیه سیاه‌رنگ نشان‌دهنده سرعت بالا بوده در حالی که ناحیه روشن‌تر سرعت پایین را نشان می‌دهد. بیشینه سرعت در این حالت  $103/926$  متر بر ثانیه است. جریان ناحیه ویک ناشی از تویی به صورت واضح مشخص است. در نزدیکی جریان دور دست جریان به صورت کاملاً توسعه یافته در آمده است. همچنین شکل ۲۰ قسمت پایین نمای روبروی توربین را در صفحه گذراننده از مرکز توربین نشان می‌دهد. در اطراف نوک پره‌ها افزایش سرعت شاهد هستیم که در جهت پادساعتگرد در حال چرخش است. بیشینه سرعت نیز در نوک پره رخ خواهد داد. در ناحیه اطراف نوک پره گردابه‌های بزرگی رخ خواهد داد که ساختاری سه بعدی و پیچیده را دارا هستند. جریان نزدیک خط مقدم و خط انتهایی به صورت گردابه‌های بزرگ در می‌آیند. شدت توربولانسی از نوک تا ریشه (تویی) به صورت آهسته کاهش می‌یابد.



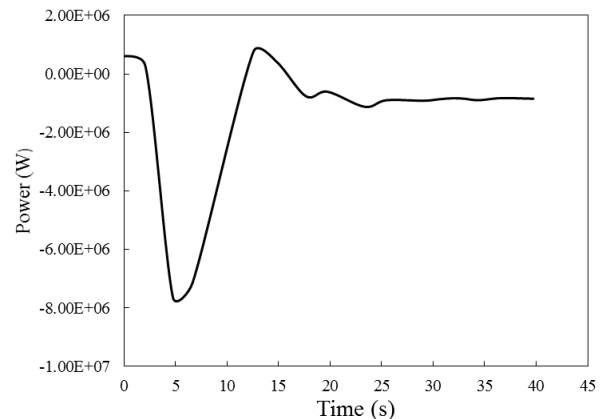
شکل ۱۷: پیدایش و گسترش دنباله گردابه‌ها در زمان متفاوت



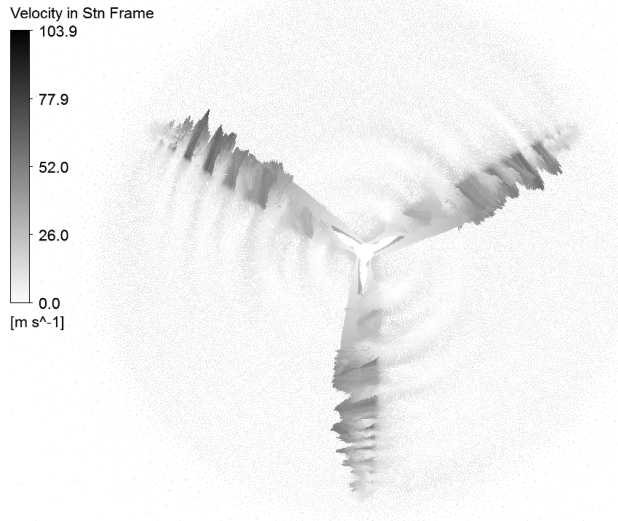
شکل ۲۰: توزیع سرعت در صفحه عبوری از مرکز توربین از نمای جانبی (شکل بالا) و نمای روبرو (شکل پایین)



شکل ۱۸: مقایسه نمودار گشتاور بر حسب زمان حاصل از نتایج حل عددی و داده‌های تجربی در گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه

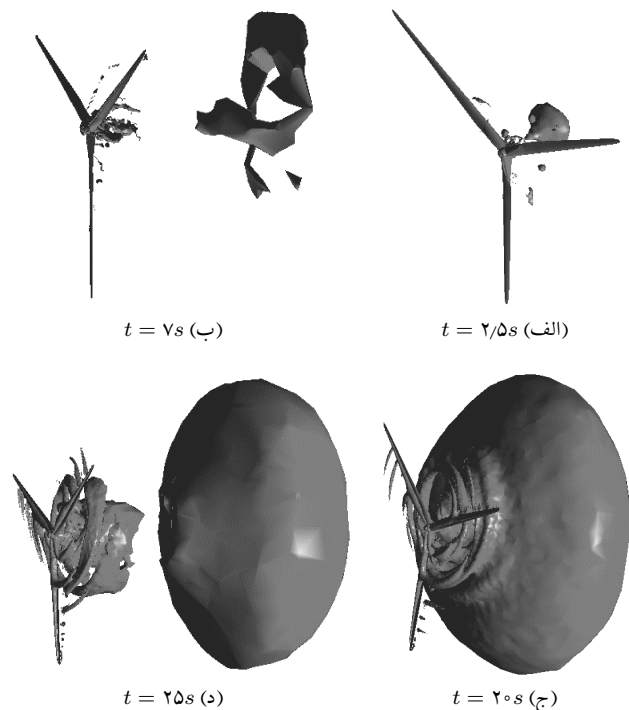


شکل ۱۹: نمودار همگرایی توان مکانیکی در گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه



شکل ۲۳: بردار سرعت عبوری از روتور توربین باد

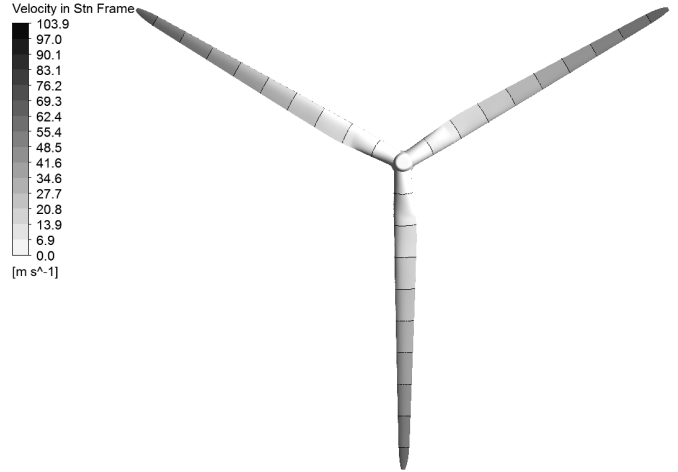
شکل ۲۴ گردابه تشکیل شده ناشی از دوران توربین باد را نشان می‌دهد. این نتایج در زمان ۲/۵، ۷، ۲۰ و ۲۵ ثانیه به دست آمده است. گردابه‌ها از نوک هر پره آغاز شده و به پایین دست منتقل می‌شود. این گردابه‌ها رفته‌رفته کم شده و از روتور دور خواهد شد. همان‌طور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌گردد در زمان‌های اولیه گردابه‌های تشکیل شده بیشتر ناشی از تویی است ولی با افزایش زمان گردابه‌های بزرگ‌تر ناشی از نوک پره خواهند بود.



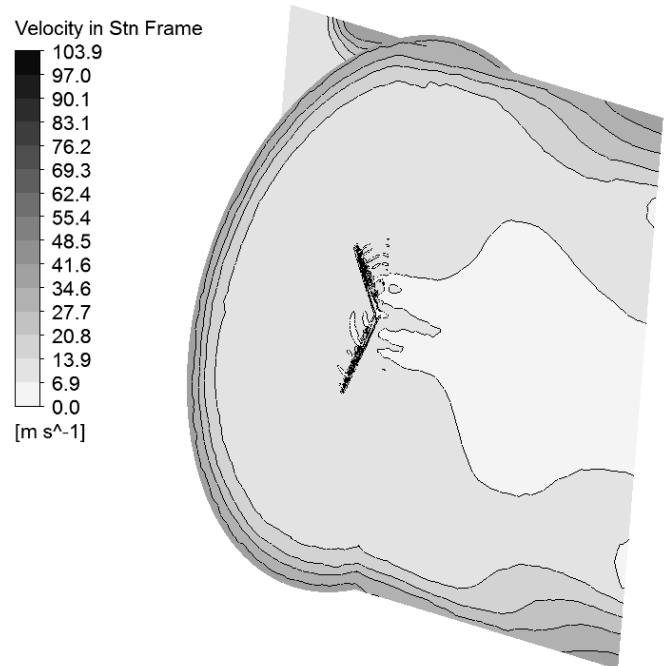
شکل ۲۴: توسعه و پیدایش گردابه‌های پشت توربین باد در زمان‌های متفاوت

کانتور فشار استاتیکی بر روی سطح پره در شکل ۲۵ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت فشار استاتیکی در طول خط مقدم بیشتر از خط انتهایی می‌باشد. همچنین فشار در نزدیکی نوک بسیار بیشتر از ریشه خواهد بود. فشار استاتیکی در سطح فشاری نیز از سطح مکشی بسیار بیشتر

همچنین کانتور سرعت بر روی پره‌ها در شکل ۲۱ نیز نشان داده شده است که با افزایش شعاع سرعت بیشتر شده است. در واقع بیشترین سرعت در نوک پره و کمترین آن در تویی به وجود آمده است. نمای کامل‌تری از شکل‌های نشان داده‌شده در شکل ۲۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲۱: توزیع سرعت بر روی پره توربین باد



شکل ۲۲: توزیع سرعت در صفحه عبوری از مرکز در نمای ایزوتروپیک

برداری سرعت سه بعدی در حوزه محاسباتی توربین باد در شکل ۲۳ نشان داده شده است. جریان در نزدیکی بالادست روتور یکنواخت است در حالی که در پایین دست جریان به صورت بردارهایی خواهد بود که سرعت در آن غیریکنواخت است. کانتور سرعت در نزدیکی روتور ساختار سه بعدی پیچیده‌ای خواهد داشت. همچنین بیشینه سرعت به صورت برداری در نوک توربین مشاهده می‌گردد.

خواهد بود.

در نزدیکی نوک پره که بیشینه مقدار را دارا است و کمترین مقدار در ریشه و تویی پره خواهد بود.

### ۱۳ نتیجه‌گیری

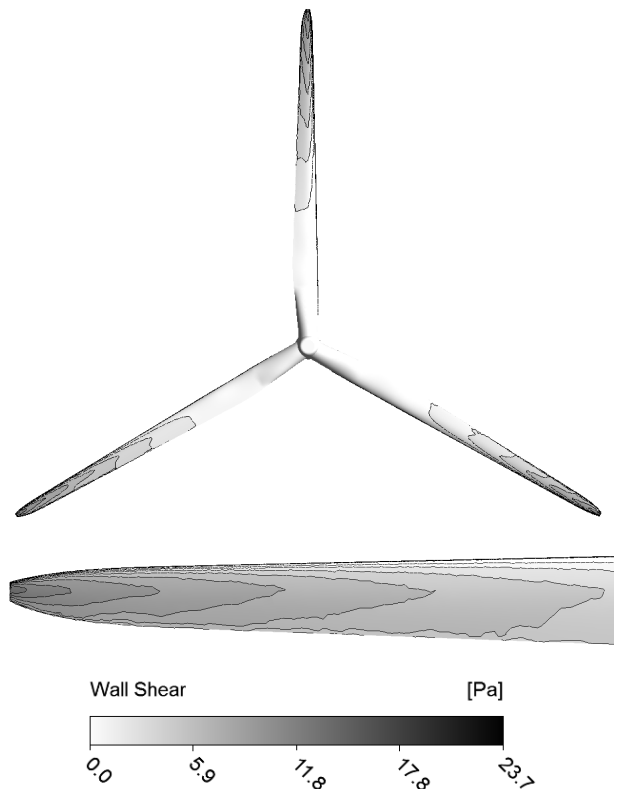
با توجه به اهمیت استخراج و دست‌یابی به انرژی باد به علت مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، افزایش راندمان و عملکرد هیدرولیکی این توربین‌ها امری بسیار ضروری است. اهمیت مدل‌سازی و آنالیز توربین‌های بادی تحت شرایط مختلف آئرودینامیکی به جهت بهبود فرآیند طراحی و بهینه‌سازی آن‌ها کاملاً پذیرفته شده است. با این وجود، حضور فاکتورهای تأثیر گردابه‌ها که در حالت ناپایا به دست خواهد آمد تحلیل این توربین‌ها را با پیچیدگی همراه ساخته است. هدف از ارائه این پژوهش ارائه رویکردی جهت بررسی آئرودینامیکی دو نوع توربین باد محور افقی ساحلی و فراساحلی در حالت ناپایا خواهد بود. در واقع برای بررسی گردابه‌های تشکیل شده و دنباله‌دار، دو نوع توربین با دو و سه پره تحقیق شده است. در این پژوهش شبیه‌سازی سه‌بعدی توربین باد محور افقی ساحلی و فراساحلی در حالت ناپایا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام گردید. نتایج به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت که با دقت بسیار خوبی مطابقت داشت. میانگین خطا در توربین ساحلی در پارامتر توزیع فشار در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه در تمامی مقاطع پره توربین در حدود ۵ درصد است همچنین میزان اختلاف در گشتاور توربین فراساحلی در سرعت باد ۹ متر بر ثانیه کمتر از ۳ درصد خواهد بود. نتایج حاصل از حل عددی نشان دادند که با افزایش سرعت باد توان مکانیکی و همچنین نیروی پیشران به صورت تدریجی افزایش پیدا خواهد کرد و توزیع فشار بر روی سطوح به علت شدت توربولانسی نامرتب خواهد شد. همچنین گزارش‌های ارائه شده نشان دادند که گردابه‌های تشکیل شده بیشتر ناشی از نوک پره خواهد بود البته قابل مشاهده بود که تویی روتور هم باعث ایجاد گردابه خواهد شد. دنباله گردابه‌ها با افزایش زمان در نوک پره بیشتر خواهد شد و از اثر گردابه‌های تویی کاسته خواهد شد. مقدار گردابه‌های ناشی از توربین باد فراساحلی نسبت به توربین باد ساحلی به واسطه تعداد پره‌های بیشتر و اندازه بزرگ‌تر روتور بیشتر خواهد بود.

### مراجع

- [1] Global statistics. <http://gwec.net/global-figures/graphs>.
- [2] Li, Qing'an, Murata, Junsuke, Endo, Masayuki, Maeda, Takao, and Kamada, Yasunari. Experimental and numerical investigation of the effect of turbulent inflow on a horizontal axis wind turbine (part ii: Wake characteristics). *Energy*, 113:1304-1315, 2016.
- [3] Wang, Zhi-Kui, Tsai, Gwo-Chung, and Chen, Yi-Bao. One-way fluid-structure interaction simulation of an offshore wind turbine. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 4(3):127-137, 2014.
- [4] Sørensen, Niels N, Michelsen, JA, and Schreck,



شکل ۲۵: کانتور توزیع فشار استاتیک در طول سطح پره



شکل ۲۶: کانتور تنش برشی دیواره بر روی روتور توربین باد

توزیع تنش برشی دیواره بر روی کل پره و نوک پره در شکل ۲۶ نشان داده شده است. مقدار تنش برشی کم در کل روتور قابل مشاهده است به جز



- [17] Musial, Walter and Ram, Bonnie. Large-scale offshore wind power in the united states: Assessment of opportunities and barriers, 2010.
- [18] Bagheri, Edris and Nejat, Amir. Numerical aeroelastic analysis of wind turbine nrel phase vi rotor. *Energy Equipment and Systems*, 3(1):45-56, 2015.
- [19] Wang, Chenglong. Computational fluid dynamic simulation for an offshore wind turbine. 2011.
- Scott. Navier-stokes predictions of the nrel phase vi rotor in the nasa ames 80 ft × 120 ft wind tunnel. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 5(2-3):151-169, 2002.
- [5] Langtry, Robin, Gola, Janusz, and Menter, Florian. Predicting 2d airfoil and 3d wind turbine rotor performance using a transition model for general cfd codes. in *44th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit*, pp. 1-11, 2006.
- [6] Hartwanger, David and Horvat, Andrej. 3d modelling of a wind turbine using cfd. in *NAFEMS Conference, United Kingdom*, vol. 2, pp. 1-14, 2008.
- [7] Silva, Paulo ASF, OLIVEIRA, TAYGOARA F, Brasil Junior, Antonio CP, and Vaz, Jerson RP. Numerical study of wake characteristics in a horizontal-axis hydrokinetic turbine. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88(4):2441-2456, 2016.
- [8] Song, MX, Chen, K, He, ZY, and Zhang, X. Wake flow model of wind turbine using particle simulation. *Renewable energy*, 41:185-190, 2012.
- [9] Porté-Agel, Fernando, Wu, Yu-Ting, Lu, Hao, and Conzemius, Robert J. Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4):154-168, 2011.
- [10] Bartl, Jan, Pierella, F, and Sætrana, L. Wake measurements behind an array of two model wind turbines. *Energy Procedia*, 24:305-312, 2012.
- [11] Mo, Jang-Oh, Choudhry, Amanullah, Arjomandi, Maziar, and Lee, Young-Ho. Large eddy simulation of the wind turbine wake characteristics in the numerical wind tunnel model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 112:11-24, 2013.
- [12] Betz, Albert. *Introduction to the Theory of Flow Machines*. Oxford Pergamon Press, 1966.
- [13] Foreman, KM, Gilbert, B, and Oman, RA. Diffuser augmentation of wind turbines. *Solar Energy*, 20(4):305-311, 1978.
- [14] Hand, M Maureen, Simms, DA, Fingersh, LJ, Jager, DW, and Cotrell, JR. Unsteady aerodynamics experiment phase v: test configuration and available data campaigns, 2001.
- [15] Kooijman, HJT, Lindenburg, C, Winkelaar, D, and van der Hooft, EL. Dowec 6 mw pre-design: Aeroelastic modelling of the dowec 6 mw pre-design in phatas, 2003.
- [16] Jonkman, Jason, Butterfield, Sandy, Musial, Walter, and Scott, George. Definition of a 5-mw reference wind turbine for offshore system development, 2009.