

بررسی اصول و شبیه‌سازی عددی عملکرد توربین باد در حالت پایا

جواد زارع^{۱*}، سید احسان حسینی^۲، مرتضی نامور^۳

^۱ دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

^۲ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

^۳ 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
دینامیک سیالات محاسباتی
مدل‌های توربولانسی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

با توجه به اهمیت روزافزون انرژی‌های تجدیدپذیر، لزوم مطالعه در این زمینه ضروری است. باد به عنوان یکی از منابع مهم انرژی‌های تجدیدپذیر شناخته می‌شود که قابلیت بهره‌برداری از انرژی آن با استفاده از توربین‌های بادی وجود دارد. در همین راستا و با توجه به اهمیت بررسی عملکرد توربین بادی، در پژوهش حاضر ابتدا پیشینه و اصول عملکرد مربوط به توربین‌های بادی تشریح و سپس از روش دینامیک سیالات محاسباتی به منظور بررسی عملکرد هیدرودینامیکی دو نوع توربین بادی ساحلی و فراساحلی که به ترتیب دارای دو و سه پره هستند استفاده گردیده است. از دینامیک سیالات محاسباتی به منظور بررسی اثر توربین و تعداد پره‌های آن بر بازدهی و همچنین تعیین مقادیر توان مکانیکی و نیروی پیشران در حالت پایا و برای هر دو نوع توربین استفاده گردیده است. عملکرد توربین به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و نتایج با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است که میانگین انحراف حدود ۴ درصد در گشتاور مکانیکی توربین ساحلی نسبت به نتایج تجربی نشان دهنده صحت روش و فرضیات مورد استفاده است. مشاهده گردید 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 با افزایش سرعت جریان آزاد باد، سرعت در نوک پره و تویی نیز افزایش خواهد یافت به نحوی که گردابه‌های حاصل از آن گسترش پیدا خواهند کرد.

۱ مقدمه

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. البته امروزه توسعه توربین‌های بادی در ارتفاعات به دلیل تغییرپذیری انرژی باد در ارتفاعات کم و همچنین ایجاد سر و صدا در زمین توسعه پیدا کرده است [۵].

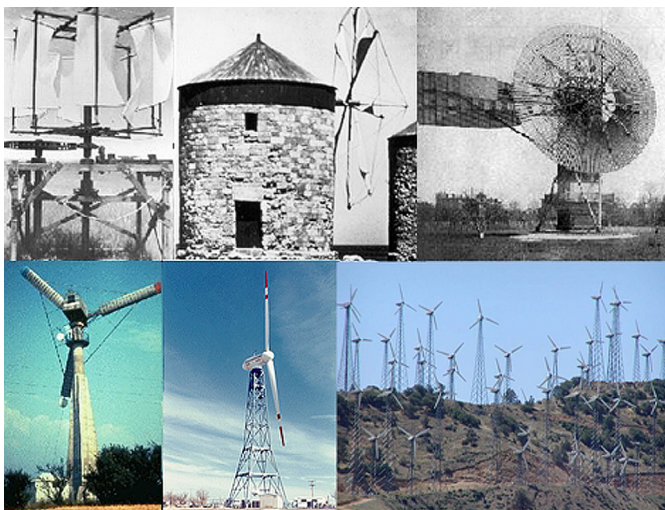
در اوایل قرن بیستم آلبرت بتز [۶] به کمک قوانین فیزیک کلاسیک نشان داد که بیشینه توان قابل استحصال از باد در توربین‌های محور افقی ۵۰/۷۳ درصد است. وجود این حد بالا از آن زمان به قانون بتز شهرت یافته است. در تحقیقاتی که توسط ایگرا [۷، ۸] و فورمن و همکاران [۹] صورت گرفته نشان داده شده است که با استفاده از مجرای مخروطی حول توربین می‌توان به بازده‌های بالایی حتی بیشتر از ضرایب ارائه شده بتز دست یافت. این نتایج قیمت نهایی توان باد را کاهش می‌دهند و امکان ایجاد تغییرات جدیدی را در طراحی توربین‌ها فراهم می‌آورد. تامسون و سورنسن [۱۰] افزایش ۱۵ درصدی در شدت توربولانسی ورودی به یک توربین بادی را به دلیل وجود یک توربین‌های بالادست اندازه‌گیری کرده‌اند. بر اساس این پارامترها، محققان مختلف در کارهای خود شدت اغتشاش‌هایی بین ۵ تا ۲۲ درصد را پیش‌بینی کرده‌اند [۱۱]. بر اساس مطالعات کلی و همکاران [۱۲]، روش‌های عددی امروز مشکلات و دشواری‌های زیادی را برای مدل‌سازی دقیق روبروی

در سال‌های اخیر با توجه به روند رو به رشد تقاضای انرژی، آلودگی‌های زیست محیطی [۱] و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، تمرکز بر منابع انرژی تجدیدپذیر و گرمایش جهانی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است [۲، ۳]. این منابع انرژی نقش مهمی را در جهان ایفا می‌کنند و تأمین‌کننده بیش از ۱۴ درصد کل تقاضای جهانی انرژی هستند [۴]. انرژی باد در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر یک منبع در دسترس است. علاوه بر این، برخلاف انرژی خورشید، تغییرات شرایط آب و هوایی تأثیرات چندانی بر آن ندارد. وظیفه توربین‌های بادی، تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی و سپس به انرژی الکتریکی است. توان خروجی توربین‌ها تابع عوامل مختلفی مانند شکل هندسه پره، زاویه پیچشی پره، سرعت دورانی روتور، سرعت باد و مشخصات اغتشاش و گرادیان سرعت باد در محل نیروگاه بادی است. پیش‌بینی‌های آئرو دینامیکی دقیق در طراحی تیغه‌های روتور و بهبود عملکرد دستگاه‌ها، امری مهم و موردنیاز است. این امر مستلزم اعتبار روش‌های جدید، افزایش دقت و کارایی نتایج است. دینامیک سیالات محاسباتی یکی از این ابزار طراحی است و تحقیقات گسترده‌ای در زمینه توسعه ابزار و روش دینامیک سیالات محاسباتی برای پیش‌بینی آئرو دینامیک توربین‌های بادی طی چند سال گذشته صورت گرفته است. تحقیقات در باب توربین‌های

وجود تنوع مکان‌هایی برای احداث مزارع بادی در توپوگرافی‌های خاص، ضرورت تحقیق در این حوزه را ایجاد خواهد کرد. به طور کلی برای استحصال بهینه انرژی بررسی عملکرد توربین‌های بادی که مهمترین پارامتر برای طراحی پره است [۲۶] باید در نظر گرفته شود. امروزه برای بررسی عملکرد هیدرودینامیکی توربین‌های بادی از نرم‌افزارهای تجاری و مرسوم در حوزه دینامیک سیالات محاسباتی استفاده می‌گردد. با مدنظر قرار دادن شرایط محیطی و جوی مختلف، انتخاب نوع توربین بادی پیچیده‌تر خواهد شد و جریان عبوری از روی پره‌های توربین باد شرایط خاص خود را پیدا خواهد کرد. برای رفع این مشکل و انتخاب نوع توربین بادی، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان به بررسی این مدل‌های چالش‌برانگیز پرداخت که نتایج دقیقی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی پره‌زینه ارائه خواهند کرد که در کار حاضر، عملکرد توربین باد محور افقی ساحلی و فراساحلی در حالت پایا مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با داده‌های تجربی مقایسه گردیده است و در ادامه اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد توربین مطالعه شده است.

۲ مفاهیم مربوط به توربین‌های بادی

در طول چند سال گذشته امنیت تأمین انرژی و مسائل زیست محیطی مورد توجه قرار گرفته است. آسیاب‌های بادی عمود محور در حدود ۲۰۰ سال قبل در مرزهای ایران و افغانستان و آسیاب‌های محور افقی در هلند و مدیترانه سالیان بعد از آن به وجود آمدند. تکامل و گستردگی بیشتر این سیستم‌ها (شکل ۱) در قرن نوزدهم در ایالت متحده آمریکا انجام گرفت.



شکل ۱: سیر مراحل اولیه بهره‌برداری از انرژی باد از ایران تا رسیدن به ایالات متحده آمریکا.

انرژی باد یکی از صورت‌های مختلف انرژی خورشید است که در اثر گرم شدن زمین به وسیله تابش خورشید به وجود می‌آید. همچنین اتمسفر کره زمین به دلیل حرکت وضعی زمین، با انتقال گرما از منطقه‌ای به منطقه دیگر باعث به وجود آمدن باد می‌شود. یکی از راهکارهای استفاده از انرژی باد، به‌کارگیری توربین‌های بادی است. وظیفه این توربین‌ها تبدیل انرژی جنبشی باد به کار مکانیکی و تولید الکتریسیته است. مزیت عمده استفاده از توربین‌های بادی قابلیت تولید برق در نقاطی است که انتقال برق

خود می‌بینند. به همین دلیل است که مطالعه و تحقیق در زمینه محاسبات عددی در مورد جریان حول پره‌های توربین‌های بادی از ارزش بالایی برخوردار است.

علیصادقی و همکاران [۱۳] شبیه‌سازی عددی و مطالعه پارامتریک بر روی ایرفویل نوسانی یک توربین بادی دو باله را انجام دادند. نتایج نشان داد که فرکانس، بیشینه زاویه حمله مؤثر و دامنه جابه‌جایی، نقش مؤثرتری بر عملکرد ایرفویل دارند.

کلیماس و همکارانش [۱۴] اثر اعمال گام اولیه بر پره‌های توربین داریوس را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که انتخاب گام اولیه مناسب می‌تواند کارایی توربین را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد. فیدلر و همکارانش [۱۵] اثر تغییر محل اتصال پره‌های روتور و گام اولیه پره را به‌صورت آزمایشگاهی بر کارایی توربین محور عمودی پره مستقیم (بدون پیچش) مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با انتخاب مقدار مناسب این دو پارامتر می‌توان ضریب عملکرد توربین را به میزان قابل توجهی افزایش داد. لانگات و همکاران [۱۶] اثرات دنباله بر یک مزرعه‌ی باد را با استفاده از دو روش عملکرد پایا و عملکرد پویا (دینامیک) ارزیابی کردند. نتایج ارائه‌شده توسط آن‌ها در محاسبات سرانگشتی به منظور طراحی یک مزرعه به کار می‌رود. آن‌ها مدل دنباله‌ی خود را با در نظر گرفتن اثراتی هم چون اثر انباشتگی سایه‌افکنی، رژیم باد و اثر تأخیر زمانی سرعت باد در نرم‌افزار متلب اجرا کردند و آن را با یک سیستم شبیه‌سازی قدرت به‌منظور توضیح اثر دنباله بر مزرعه باد تلفیق نمودند. شبیه‌سازی‌های اثر دنباله روی عملکرد مزرعه‌ی باد نشان دادند که کارایی پیکربندی توربین‌ها به فاصله‌گذاری مابین آن‌ها و نوع رژیم بادی که به توربین‌ها می‌وزد بستگی دارد. هر دو شبیه‌سازی (پایا و پویا) انجام‌شده، نشان دادند که بهبود پیکربندی توربین‌ها اثر قابل توجهی در بهبود توان خروجی از یک مزرعه‌ی باد دارد. شبیه‌سازی پویا اثبات کرد که افزایش تلفات الکتریکی به دلیل افزایش فاصله‌ی توربین‌ها در مقایسه با افزایش توان استخراج‌شده از باد، بسیار ناچیز است. مزرعه بادی مجموعه‌ای از توربین‌های بادی است و می‌توان به عنوان یک نیروگاه در نظر گرفته شود [۱۷].

یکی از اهداف اصلی و چالش‌برانگیز در طراحی توربین‌های باد، به دست آوردن حداکثری توان ممکن است [۱۸]. توربین‌های بادی به دلیل سرعت نامی تعریف شده قادر به تولید توان بیشتر در سرعت‌های باد بالاتر از سرعت نامی نیستند [۱۹].

ویسی و شفیع‌ی میم [۲۰] اثرات جهت چرخش توربین باد پایین دست را با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با کاهش حد فاصل بین توربین‌های بادی در پیکربندی جهت چرخ مخالف بازدهی توربین باد پایین دست بهبود می‌یابد. استارگ [۲۱] اثرات ویک یک توربین بادی را بر روی عملکرد توربین‌های پایین‌دست بررسی کرد. همان‌طور که در این تحقیق نشان داده شد، برای یک توربین در پایین‌دست یک کاهش قدرت قابل توجه به دلیل وجود یک توربین بالادست وجود داشت که محققان گوناگونی مانند مو [۲۲]، مانول [۲۳]، سندرس [۲۴] و باستان‌خواه [۲۵] نیز به آن اشاره کرده‌اند. در ایران

ساحلی دارای دو پره خواهند بود. به صورت کلی می‌توان بیان کرد که توربین‌های بادی که دارای سه پره می‌باشند نسبت به توربین‌های دو پره‌ای دارای گشتاور مکانیکی بیشتری می‌باشند؛ درعین 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 گردابه‌های ایجاد شده ناشی از نوک پره هم به آن اعمال می‌گردد. توربین‌های بادی ساحلی که عمدتاً برای تولید الکتریسیته به کار می‌روند نیاز به عملکرد در سرعت‌های بالاتری دارند و در واقع گشتاور بیشتری نیاز خواهند داشت. مشکل اساسی که توربین‌های بادی با تعداد دو پره دارند تأثیر پدیده لرزش در عملکرد آن خواهد بود. این مشکل در توربین‌های بادی فراساحلی با افزایش تعداد پره‌ها کمتر خواهد شد و شدت ارتعاشات بهبود پیدا خواهد کرد. در واقع می‌توان بیان کرد که در توربین‌های دو پره‌ای نسبت به توربین‌های سه پره‌ای میزان سروصدا و استهلاک بیشتر است.

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که می‌توان در رابطه با مفهوم و آنالیز و طراحی توربین‌های بادی محور افقی دانست پارامتر نسبت سرعت نوک پره خواهد بود. نسبت سرعت نوک به صورت نسبت سرعت نوک پره به سرعت آزاد باد تعریف خواهد شد. این پارامتر به شدت به بازدهی هیدرولیکی توربین‌های بادی محور افقی بستگی دارد به نحوی که افزایش آن باعث افزایش بازدهی هیدرولیکی خواهد گردید؛ اما مشکلی که در این رابطه به وجود می‌آید افزایش سروصدا و لرزش در توربین است به همین علت انتخاب این پارامتر نقش اساسی در طراحی توربین‌های بادی ایجاد خواهد کرد. این پارامتر در رابطه (۱) گزارش شده است. به‌طور کلی در توربین‌های بادی سرعت پایین این نسبت بین ۱ تا ۴ و در توربین‌های سرعت بالا بین ۵ تا ۹ است.

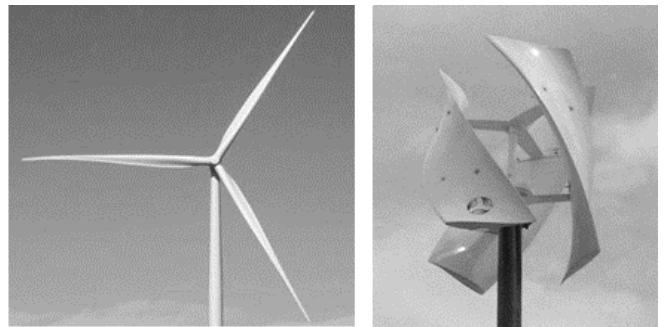
$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (1)$$

که در این رابطه ω سرعت زاویه‌ای روتور، R شعاع روتور و V سرعت باد است. پارامتر دیگری که در بحث توربین باد بسیار حائز اهمیت است محدودیت بتز خواهد بود. آلبرت بتز فیزیکدان آلمانی اثبات کرد که یک توربین باد حداکثر می‌تواند ۵۰/۷۳ درصد انرژی بادی را که در مسیر آن می‌وزد استخراج کند. به عبارت دیگر بر اساس این تئوری، برای اخذ حداکثر انرژی ممکن، روتور توربین بادی باید به‌گونه‌ای تعبیه گردد که سرعت جریان در پایین دست روتور یک سوم سرعت بالادست روتور باشد. بدین ترتیب مقدار ضریب توان بیشینه (در شرایط ایده‌آل) برابر ۰/۵۰ خواهد بود.

۳ توربین باد محور افقی مورد مطالعه

مدل‌سازی توربین بادی نقش چالش برانگیزی بر روی شبیه‌سازی عددی ایجاد خواهد کرد. برای بررسی عملکرد توربین‌های بادی محور افقی دو نوع توربین باد ساحلی و فراساحلی NREL مورد بررسی قرار گرفته است. توربین باد ساحلی [۲۹] (شکل ۳) از دو پره تشکیل شده است و دارای قطر ۱۰/۵۸ متر است و براساس ایرفویل S۸۰۹ طراحی شده است. همچنین توربین باد فراساحلی ۵ مگاواتی که با بهبود پروژه DOWEC [۳۰]، به وجود آمده است دارای نتایج قابل اعتمادی است که نمای ایزوتروپیک آن در شکل ۴ نشان داده

به آن‌ها به علت اتلاف ناشی از انتقال و هزینه کابل مقرون به صرفه نیست. به طور کلی می‌توان کاربردهای توربین‌های بادی را به دو قسمت کاربردهای منفصل از شبکه و کاربردهای متصل به شبکه تقسیم کرد. کاربردهای منفصل از شبکه شامل شارژ باتری، تولید توان در نواحی دورافتاده، تأمین انرژی موردنیاز پایگاه‌های موقتی و تأمین برق موردنیاز برای قایق‌های تفریحی هستند. کاربردهای متصل به شبکه نیز شامل توربین‌های بادی منفرد و مزارع بادی می‌شوند. تحقیقات در باب توربین‌های بادی در دو مدل عمده محور افقی و محور عمودی ادامه داشته است. شکل ۲ نمای سه بعدی از دو نوع توربین‌های بادی محور عمودی (شکل ۲ چپ) و محور افقی (شکل ۲ راست) را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمای سه بعدی از توربین باد محور عمودی (شکل چپ) و توربین باد محور افقی (شکل راست).

توربین‌های بادی محور افقی به دلیل بازدهی بالای خود از رایج‌ترین توربین‌های بادی مورد استفاده هستند. از لحاظ تعداد پره‌ها نیز قاعده کلی بدین صورت است که هرچه سرعت باد بیشتر باشد تعداد پره‌های کمتری موردنیاز است. از مزایای توربین‌های محور افقی می‌توان به بازدهی بالا، ایجاد گشتاور یکنواخت، قابلیت تولید انرژی الکتریکی در سرعت‌های پایین، قابلیت استفاده در زمین‌های ناهموار، حداقل آسیب دیدگی در طوفان‌ها اشاره کرد. این توربین‌ها معایبی از جمله سختی حمل و نقل، کارکرد سخت در نزدیکی سطح زمین، مشکل در نصب و راه‌اندازی، ایجاد صدای ناهنجار و تعمیر و نگهداری دشوار نیز دارند. همچنین این توربین‌ها نیازمند مکانیزمی جهت تنظیم در مقابل باد هستند. توربین‌های بادی با محور عمودی دارای قسمتی به نام روتور هستند که پره‌ها به آن متصل می‌شوند. در این نوع توربین‌ها روتور اصلی به صورت عمودی قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که خستگی مهم‌ترین و جدی‌ترین باری است که بر پره توربین‌های بادی وارد خواهد شد [۲۷].

با توجه به تنوع زیاد می‌توان این توربین‌ها را به سه دسته کلی داریوس، ساونیوس و یا ترکیبی از این دو دسته‌بندی کرد. مزیت اصلی توربین‌های بادی محور عمودی وجود یک عضو متحرک (روتور) است و نیاز به مکانیزم انحراف‌دهنده (گیربکس تغییر محور گشتاور) ندارند چراکه این نوع توربین‌ها، باد را از هر جهت مهار می‌کنند. پره‌های این توربین‌ها ممکن است دارای مقطعی یکنواخت و بدون تاب خوردگی باشند که ساخت آن‌ها را نسبتاً آسان می‌کند؛ اما پره‌ها در توربین‌های محور افقی جهت داشتن عملکرد مطلوب، مخروطی و پیچ‌دار هستند که این موضوع باعث پیچیدگی در ساخت و طراحی آن‌ها می‌شود [۲۸].

در اکثر مواقع توربین‌های باد فراساحلی دارای سه پره و توربین‌های بادی

شده است [۳۱].

سرعت یکنواخت خواهد بود. همچنین جریان ورودی به داکت توربولانسی بوده که شدت توربولانسی آن ۵ درصد فرض شده است. معادلات حاکم بر جریان بر اساس روابط (۲) و (۳) به ترتیب برای پیوستگی و مومنتوم به دست می‌آیند.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j, \quad (3)$$

به طوری که \bar{p} فشار میانگین، μ ویسکوزیته مولکولی و $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ تنش رینولدز است. این مدل بر اساس فرضیه بوزینسک [۳۲] بوده که تنش رینولدز را به گرادیان سرعت مربوط می‌سازد. به دلیل اینکه جریان توربولانس است معادلات انتقال اضافی برای مدل توربولانسی نیز باید حل گردند. همچنین در جدول ۱ و ۲ شرایط عملکردی توربین‌های بادی ساحلی و فراساحلی به ترتیب گزارش شده است.

جدول ۱: شرایط عملکردی توربین باد محور افقی ساحلی

wind speed (m/s)	rotor speed (rpm)	density (kg/m ³)	pitch-B1 (deg)
۵	۷۲	۱/۲۴۳۴۵۲	۲/۹۸
۷	۷۲	۱/۲۴۵۷۸۶	۲/۹۸
۱۰	۷۲	۱/۲۴۵۸۹۶	۲/۹۸
۱۳	۷۲	۱/۲۲۶۵۷۷	۲/۹۸
۱۵	۷۲	۱/۲۲۴۰۳۷	۲/۹۸
۲۰	۷۲	۱/۲۲۳۳۵۵	۲/۹۸
۲۵	۷۲	۱/۲۱۹۶۸۴	۲/۹۸

جدول ۲: شرایط عملکردی توربین باد محور افقی فراساحلی.

wind speed (m/s)	rotor speed (rad/sec)	density (kg/m ³)
۵	۱/۰۵	۱/۱۸۵
۷	۱/۰۵	۱/۱۸۵
۱۰	۱/۰۵	۱/۱۸۵
۱۳	۱/۰۵	۱/۱۸۵
۱۵	۱/۰۵	۱/۱۸۵
۲۰	۱/۰۵	۱/۱۸۵
۲۵	۱/۰۵	۱/۱۸۵

۵ شبکه‌بندی

برای مدل‌سازی توربین باد آن را در درون یک داکت قرار داده که در شکل ۵ نشان داده شده است. شش نوع محاسبات براساس تجزیه و تحلیل جهت یکسان‌سازی عملکرد هیدرولیکی توربین باد انجام گرفته است. در نهایت بهترین شبکه‌بندی جهت ارزیابی تست استقلال از شبکه انتخاب شده است. به دلیل پیچیده بودن هندسه توربین بادی از شبکه‌بندی بدون سازمان با سلول‌های تراهدرال برای هر دو توربین باد استفاده شده است و تأثیر تعداد شبکه‌بندی برای پیش‌بینی عملکرد آن در سرعت باد به دست آمده است. نتایج به دست آمده در شکل ۶ نشان می‌دهد که از شبکه‌بندی ۴ (۱۰۳۵۷۵۱۸ سلول) به بعد تغییرات گشتاور یکسان بوده است. شبکه‌بندی ۱ تا ۴ به علت ضعیف بودن



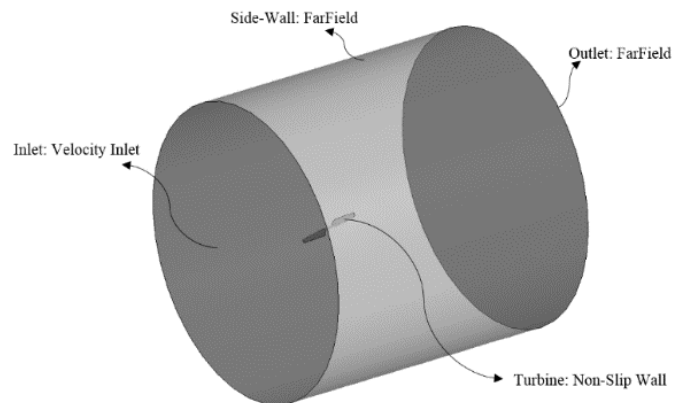
شکل ۳: نمای ایزومتریک توربین باد محور افقی ساحلی مورد مطالعه.



شکل ۴: نمای ایزومتریک توربین باد محور افقی فراساحلی مورد مطالعه.

۴ شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. از معادلات سه‌بعدی میانگین‌گیری شده زمانی ناویر-استوکس و مدل توربولانسی برای محاسبه و آنالیز جریان توربولانسی در میدان جریان اطراف هر دو توربین باد ساحلی و فراساحلی جهت ارزیابی بهتر جریان چرخشی استفاده شده است. برای گسسته‌سازی معادلات سه‌بعدی ناویر استوکس و معادلات توربولانسی از روش مرتبه دوم استفاده شده است. در کار حاضر عملکرد توربین باد ساحلی و فراساحلی در حالت پایا مورد ارزیابی قرار گرفته است. حوزه محاسباتی مورد تحلیل در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵: دامنه محاسباتی و شرایط مرزی توربین باد محور افقی.

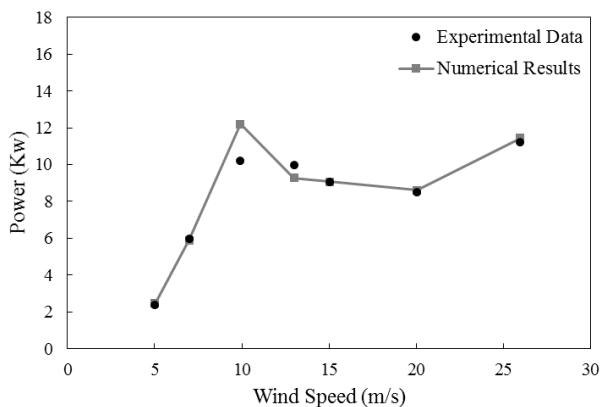
شرایط مرزی این هندسه به گونه‌ای خواهد بود که داکت و شرط مرزی خروجی دارای شرط مرزی دوردست (باز) است و سرعت آن برابر سرعت چرخشی توربین باد است. مابقی دیواره‌ها دارای شرط مرزی بدون لغزش خواهند بود. شرط مرزی ورودی که در جلوی ورودی داکت قرار می‌گیرد

گشتاور و توان توربین باد با استفاده از رابطه (۴) به دست خواهد آمد:

$$P = T\Omega \quad (4)$$

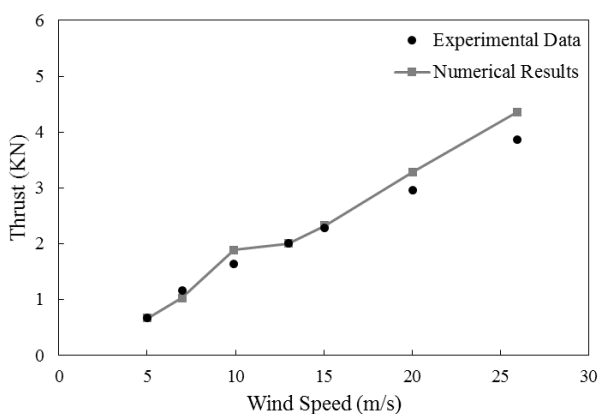
به نحوی که P توان مکانیکی، T گشتاور توربین و Ω سرعت دورانی خواهد بود.

شکل ۸ نشان دهنده توان مکانیکی حاصل از توربین باد محور افقی است که با داده‌های تجربی مقایسه شده است. همان‌طور که واضح است در هر دو نمودار بیشینه خطا در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه ایجاد شده است ولی در سایر سرعت‌های باد نتایج از دقت بسیار خوبی برخوردار خواهد بود. میانگین خطا در این دو نمودار حدود ۵ درصد خواهد بود.



شکل ۸: مقایسه نتایج توان مکانیکی حل عددی با داده‌های تجربی در سرعت‌های مختلف باد.

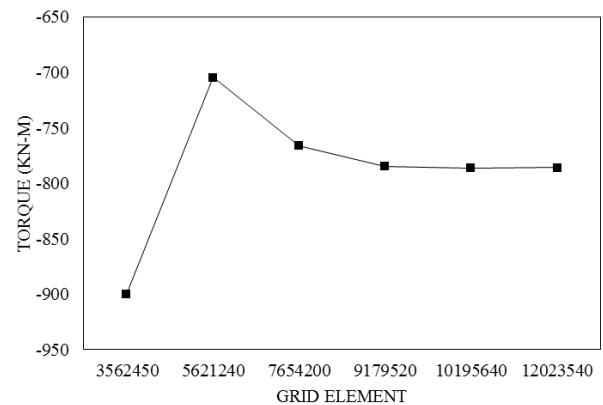
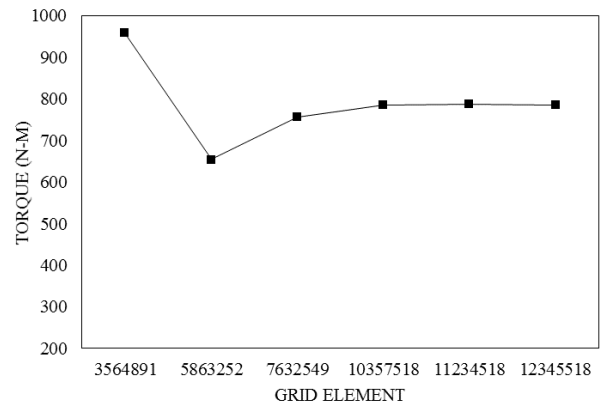
شکل ۹ نمودار مربوط به پیشرانه توربین را نشان می‌دهد که با داده‌های تجربی مقایسه شده است. با افزایش سرعت باد مقدار پیشرانه به علت افزایش فشار در پشت توربین نیز افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار می‌توان بیان کرد که با افزایش سرعت باد نیز دقت حل عددی کمی کاهش یافته است. میانگین خطا در این نمودار نیز کمتر از ۸ درصد خواهد بود.



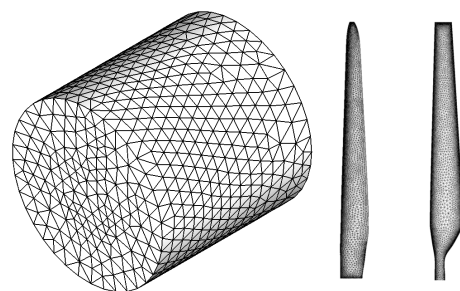
شکل ۹: مقایسه نتایج پیشرانه حل عددی با داده‌های تجربی در سرعت‌های مختلف باد.

توزیع فشار بر روی سطح فشاری و مکشی پره توربین باد در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار شکل ۹ نشان داده شد پیشرانه با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد، لذا فشار در سطح مکش نیز بیشتر می‌شود. با افزایش سرعت کمینه فشار بر روی سطح پره کمتر شده و می‌توان گفت که فشار را افزایش می‌دهد.

نوع شبکه‌بندی تفاوت قابل توجهی نسبت به نتیجه تجربی دارد. شبکه‌بندی بدون سازمان برای داکت و پره‌های توربین باد در شکل ۷ نشان داده شده است که تعداد سلول‌ها برای توربین باد ساحلی برابر ۱۰۳۵۷۵۱۸ و برای توربین باد فراساحلی برابر ۹۱۷۹۵۲۰ در نظر گرفته شده است. در این شبکه‌بندی از ۲۰ لایه مرزی استفاده شده است که ضخامت اولین لایه آن 10^{-6} متر در نظر گرفته شده است. مقدار y^+ در این شبکه‌بندی کمتر از یک بوده است.



شکل ۶: تست استقلال از شبکه برای توربین باد محور افقی ساحلی (شکل بالا) و توربین باد محور افقی فراساحلی (شکل پایین).



شکل ۱۰: شبکه‌بندی بر روی حوزه محاسباتی و پره توربین باد.

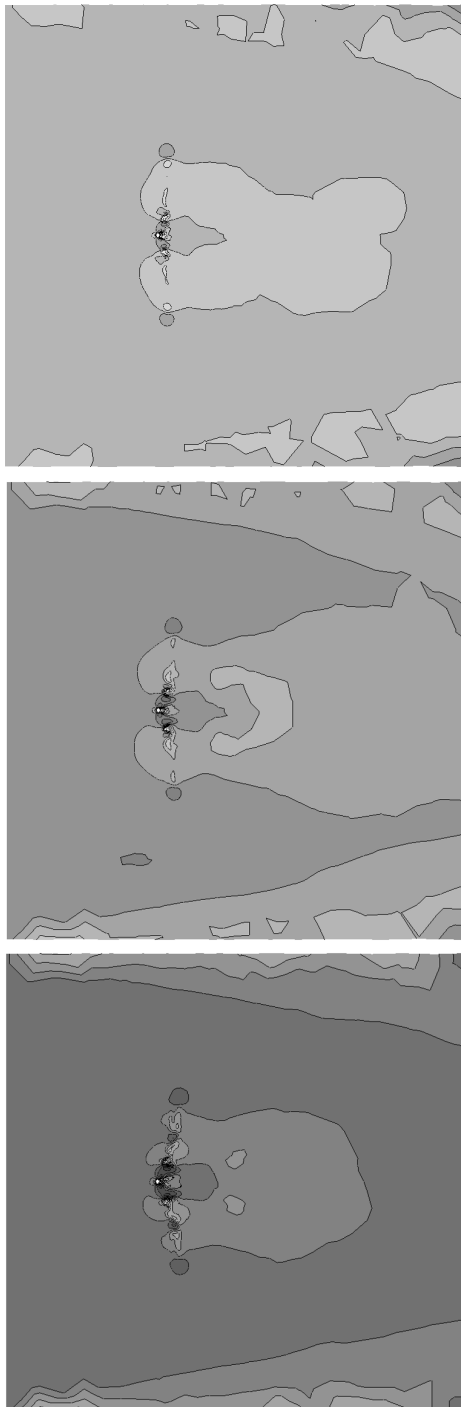
۶ نتایج مربوط به توربین باد ساحلی

حالت پایای توربین باد محوری به صورت حل عددی بررسی گردیده و نتایج آن با داده‌های تجربی [۳۳] مقایسه شده است. با توجه به این نتایج می‌توان گفت نتایج حاصل از شبیه‌سازی از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. برای شبیه‌سازی در این حالت با توجه به شرایط توضیح داده‌شده در جدول ۱ ابتدا

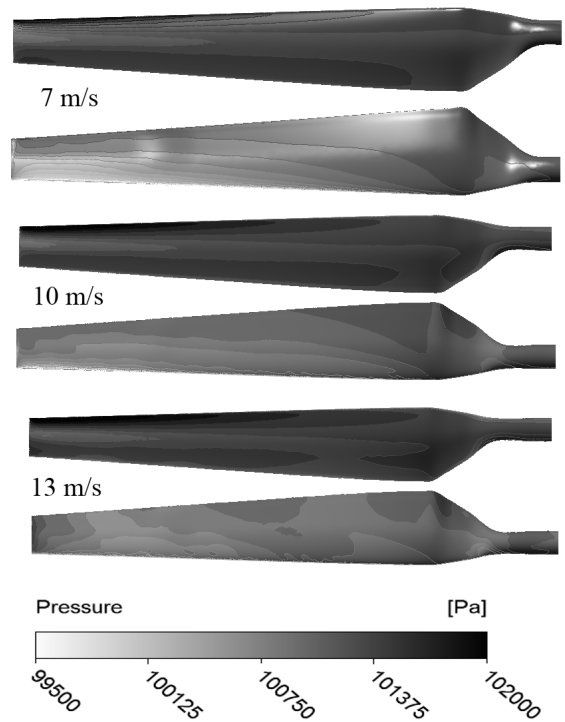
نقاط اختلافاتی وجود دارد که ناشی از مدل توربولانسی است که نمی‌تواند به خوبی جریان جدایش را پیش‌بینی کند. ضریب فشار با توجه به رابطه (۵) به دست خواهد آمد.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho[V_\infty^2 + (r\Omega)^2]} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، P فشار، P_∞ فشار مرجع، ρ چگالی سیال، V_∞ سرعت بی‌نهایت می‌باشد.

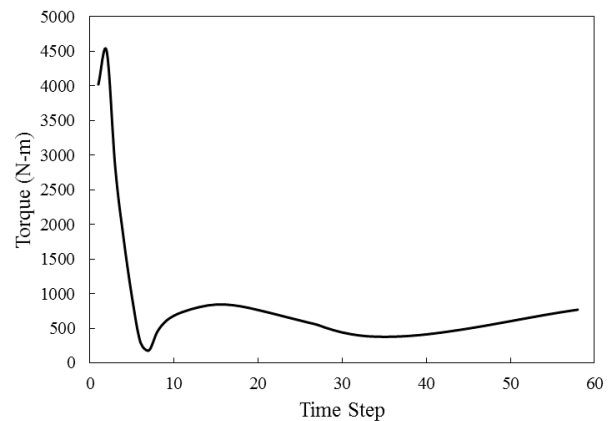


شکل ۱۲: توزیع سرعت در صفحه عبوری از مرکز توربین باد و از نمای جانبی در سرعت‌های باد مختلف.



شکل ۱۰: کانتور فشار در سطح فشاری (بالا) و مکشی (پایین) پره توربین در سرعت ۷ و ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه.

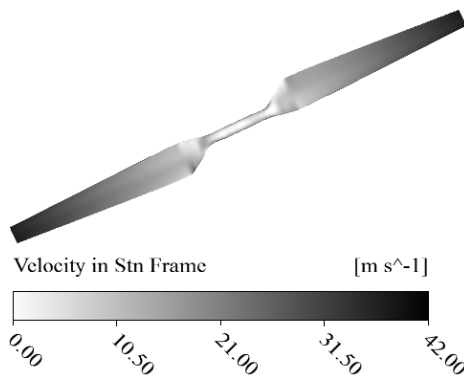
شکل ۱۱ همگرایی گشتاور ایجاد شده توسط پره توربین در حالت پایا را نشان می‌دهد که با افزایش گام زمانی به یک مقدار ثابت رسیده است. نتایج در ۵۹ مرحله حل به دست آمده است.



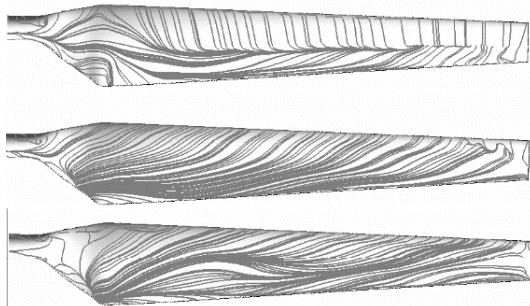
شکل ۱۱: نمودار همگرایی گشتاور در گام زمانی.

توزیع سرعت در صفحه عبوری از مرکز توربین باد در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این توزیع سرعت در سرعت باد ۷، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه به دست آمده است. بیشینه مقدار این سرعت در نوک پره توربین باد ایجاد شده است. ناحیه آبی رنگ که پشت توربین ایجاد شده ناشی از گردابه‌هایی است که به وجود می‌آیند. هرچه سرعت باد بیشتر می‌شود این ناحیه به عقب‌تر پیش خواهد رفت. سرعت در نوک پره نیز با افزایش سرعت باد بیشتر شده است. شکل ۱۳ توزیع فشار در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد که با داده‌های تجربی مقایسه گردیده شده است. این نتایج در چهار مقطع $x/R = 30\%, 46\%, 80\%, 95\%$ به دست آمده است. همان‌طور که مشخص است نتایج با دقت بسیار خوبی نزدیک به داده‌های تجربی است. در برخی

از ریشه تا نوک پره سرعت نیز افزایش می‌یابد. به‌طور کلی بیشینه سرعت بر روی نوک پره خواهد بود. با توجه به این توزیع سرعت می‌توان دلیل افزایش y^+ بر روی نوک را توجیه کرد. همچنین خطوط جریان ایجاد شده بر روی سطح مکشی پره توربین در سرعت باد ۷ و ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه نیز در شکل ۱۵ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۱۵ قابل مشاهده است که افزایش سرعت باد باعث تغییر الگوی جریان می‌شود. قابل مشاهده است که جریان در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه تا حدودی جریان بر روی پره چسبیده است ولی با افزایش سرعت جدایش جریان بر روی پره به تدریج بیشتر خواهد شد. در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه جریان به جز در نزدیکی نوک پره جدا شده است ولی در سرعت باد ۱۳ متر بر ثانیه جریان بر روی پره به صورت کامل جدا شده است. این جدایش نیز باعث افزایش گردابه‌هایی بزرگ خواهد شد که اگر کنترل نگردد توان مکانیکی و گشتاور توربین کاهش خواهد یافت.



شکل ۱۴: کانتور سرعت کل بر روی توربین در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه.

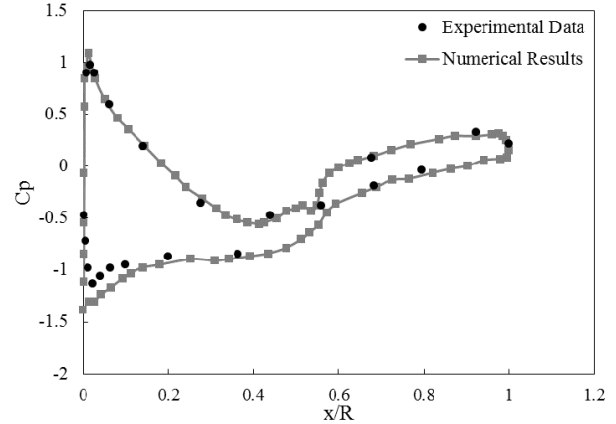
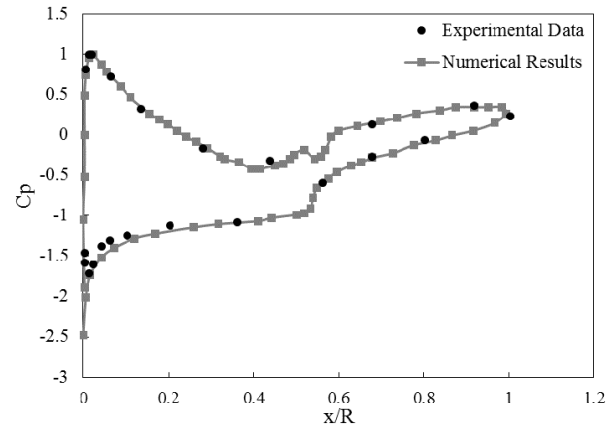
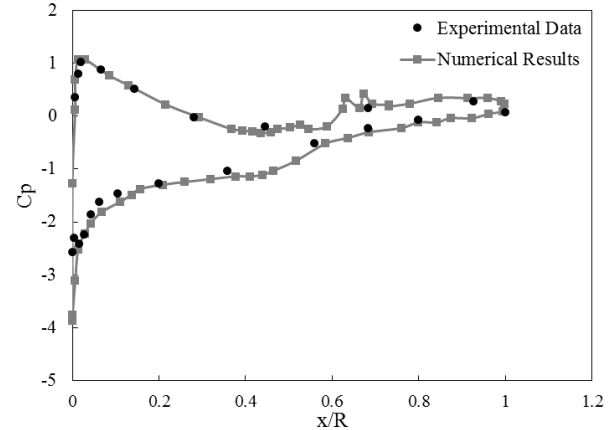
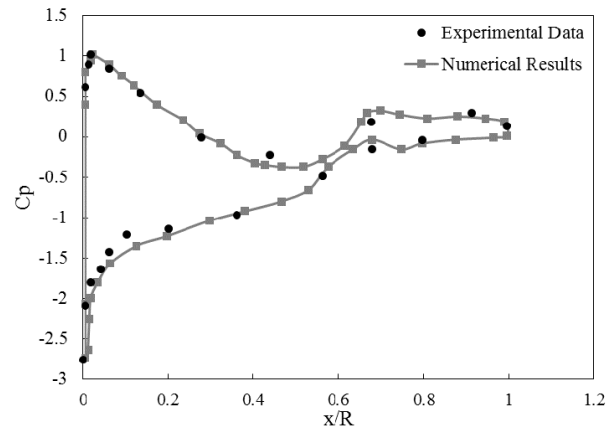


شکل ۱۵: خطوط جریان بر روی سطح پره در سرعت باد ۷ (بالا)، ۱۰ (وسط) و ۱۳ (پایین) متر بر ثانیه.

شبیه‌سازی حالت پایای توربین باد محور افقی به صورت ناپیوسته انجام گرفته و برای به دست آوردن نمودارهای عملکردی، نقاط به صورت جداگانه به دست آمده است. همگرایی این مجموعه همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است با دقت 10^{-4} انجام گرفته شده است.

۷ نتایج مربوط به توربین باد فراساحلی

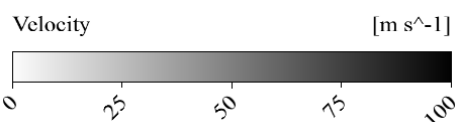
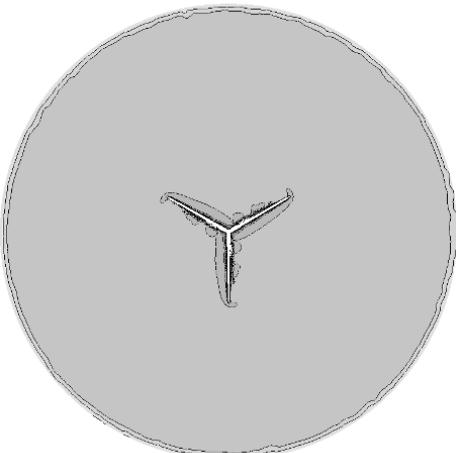
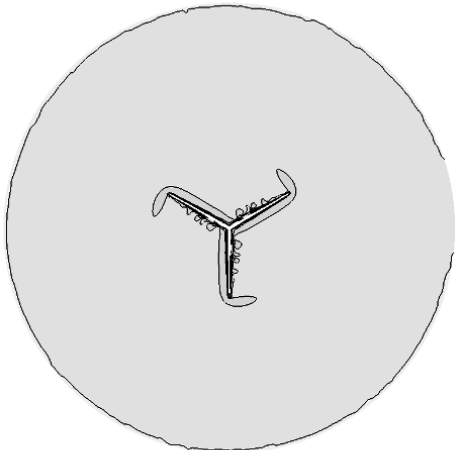
همان‌طور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد حالت پایای توربین باد فراساحلی نیز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در سرعت‌های باد متفاوت مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. شکل ۱۷ نمودار توان مکانیکی و شکل ۱۸ نمودار گشتاور ناشی از دوران توربین باد را در سرعت‌های مختلف باد نشان



شکل ۱۳: مقایسه توزیع فشار نتایج حل عددی با داده‌های تجربی در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه.

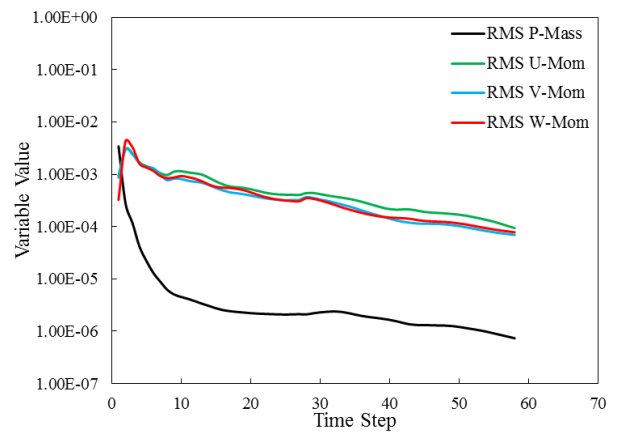
شکل ۱۴ کانتور سرعت کل بر روی توربین باد در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل ملاحظه است با افزایش شعاع

باد ۲۵ کیلومتر بر ساعت گردابه‌هایی ناشی از توپی نیز مشاهده می‌شود. به صورت واضح‌تر شکل ۲۰ دنباله گردابه‌های ناشی از نوک و توپی توربین باد قابل مشاهده است. با افزایش سرعت باد دنباله گردابه‌ها وسیع‌تر شده است. همچنین می‌توان بیان کرد که با افزایش سرعت باد شدت جریان نیز در نزدیکی توپی بیشتر خواهد شد.

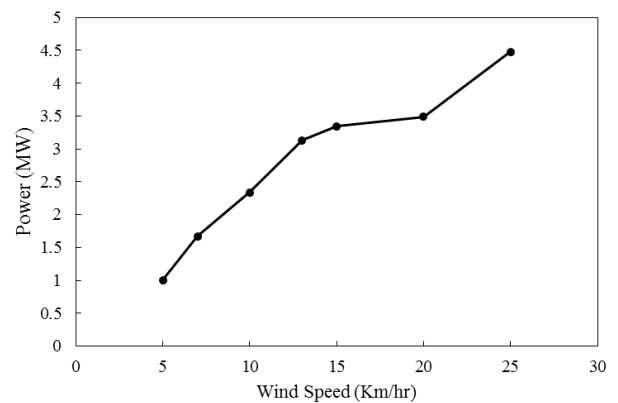


شکل ۱۹: کانتور سرعت در صفحه عبوری از مرکز توربین باد فراساحلی از نمای روبرو

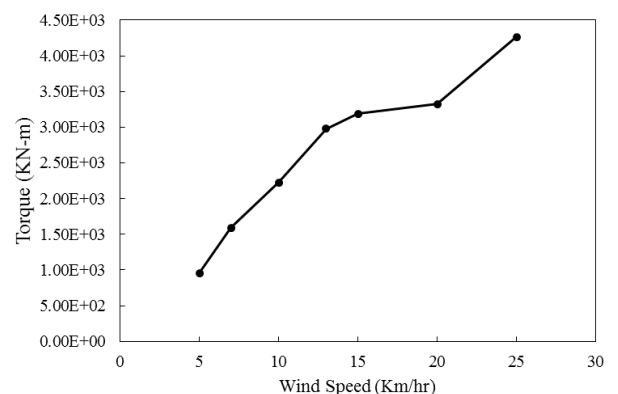
می‌دهد. به وضوح قابل مشاهده است که با افزایش سرعت باد مقدار گشتاور و توان مکانیکی افزایش می‌یابد. بیشترین توان مکانیکی و گشتاور در سرعت باد ۲۵ کیلومتر بر ساعت ایجاد شده است. بیشینه توان مکانیکی برای توربین باد فراساحلی حدود ۴/۶ مگاوات است.



شکل ۱۶: دقت همگرایی در سرعت ۷ متر بر ثانیه.

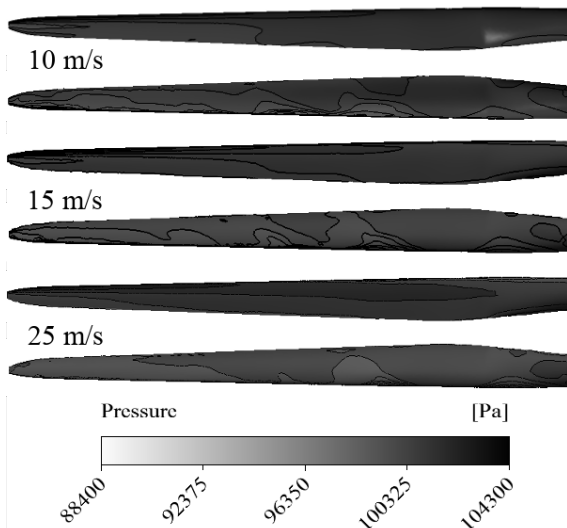


شکل ۱۷: نمودار توان مکانیکی توربین باد در سرعت‌های مختلف باد.



شکل ۱۸: نمودار گشتاور ناشی از دوران توربین باد در سرعت‌های مختلف باد.

کانتور سرعت باد در صفحه عبوری از مرکز توربین باد و از نمای روبرو در شکل ۱۹ نشان داده شده است. این نتایج در سرعت‌های باد ۱۰، ۱۵ و ۲۵ کیلومتر بر ساعت گزارش شده است. همان‌طور که قابل ملاحظه است با افزایش سرعت باد گردابه‌های ناشی از نوک پره نیز بیشتر خواهد شد به نحوی که باعث می‌شود سرعت در ناحیه بالادست بیشتر شود. در سرعت



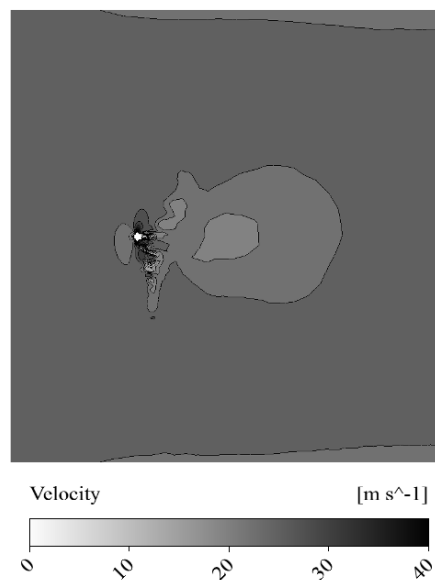
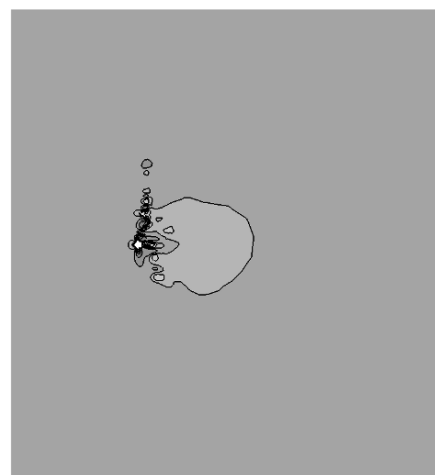
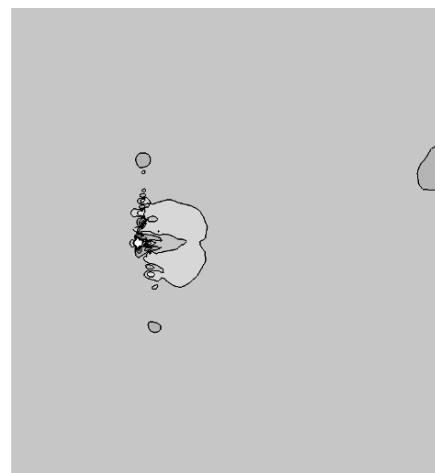
شکل ۲۱: کانتور توزیع فشار استاتیکی بر روی سطح فشاری (بالا) و سطح مکشی (پایین) پره‌های توربین باد در سرعت باد متفاوت.

۸ نتیجه‌گیری

توربین‌های بادی از پتانسیل بالایی در زمینه تولید توان مکانیکی برخوردارند و همین امر نشان دهنده ضرورت تحقیق هرچه بیشتر در این زمینه است. برای کاربردهای علمی به منظور محاسبه نرخ توان فهم کاملی از عملکرد هیدرولیکی توربین‌های بادی لازم است. به علت بازدهی بالاتر توربین‌های بادی با محور افقی نسبت به سایر توربین‌های بادی و همچنین نیاز به یکنواخت بودن گشتاور و توان مکانیکی از این نوع توربین در شبیه‌سازی استفاده شده است. در این پژوهش شبیه‌سازی توربین باد محور افقی ساحلی و فراساحلی در حالت پایا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام گرفت. نتایج به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید که با دقت بسیار خوبی مطابقت داشت. با استناد بر این یکسان‌سازی 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 می‌توان بیان کرد که افزایش سرعت باد باعث کاهش سرعت کمینه بر روی لبه مقدم سطح مکشی پره توربین خواهد شد. بر اساس این نتایج مشاهده گردید که با افزایش سرعت جریان آزاد باد، سرعت در نوک پره و تویی نیز افزایش خواهد یافت به نحوی که گردابه‌های حاصل از آن نیز گسترش پیدا خواهند کرد. این نتایج به صورت کلی برای هر دو توربین ساحلی و فراساحلی یکسان خواهد بود. پس می‌توان فرق اصلی این دو نوع توربین را تعداد پره‌های آن‌ها، ابعاد و تعداد سطح مقطع‌های به کار رفته در پره توربین دانست.

مراجع

- [۱] کوراوند، شهریار. امکان‌سنجی فنی و اقتصادی ساخت و تولید توربین بادی عمود محور مقیاس کوچک خانگی برای استفاده در مناطق استان یزد. مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران، ۲۷(۱): ۳۲-۳۷، ۱۳۹۷.
- [۲] ابراهیم‌پور، محمد، شفقت، روزبه، عالمیان، رضوان، و صفدری شادلو، مصطفی. شبیه‌سازی عددی توربین باد محور عمودی نوع ساونویوس و ارزیابی



شکل ۲۰: کانتور سرعت در صفحه عبوری از مرکز توربین باد فراساحلی از نمای جانبی.

توزیع فشار بر روی سطوح فشاری و مکشی پره توربین باد در سرعت‌های باد ۱۰، ۱۵ و ۲۵ کیلومتر بر ساعت در شکل ۲۱ نشان داده شده است. می‌توان پی برد که بیشترین فشار در لبه مقدم بوده و در سمت فشاری پره است و کمترین فشار بر روی سطح مکشی و در لبه مقدم نوک پره اتفاق می‌افتد. با افزایش توزیع فشار بر روی سطوح پره یکنواخت‌تر خواهد شد، همچنین با افزایش سرعت باد توزیع فشار در نزدیکی تویی کمتر می‌گردد.

- [۲۰] ویسی، امین‌الله و شفیع‌می میم، محمدحسین. بررسی تأثیر جهت چرخش توربین برای دو توربین باد پشت سرهم به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ. ماهنامه علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، ۱۶(۱۲)، ۱۳۹۵.
- [21] Sturge, D., Sobotta, D., Howell, R., While, A., and Lou, J. A hybrid actuator disc – full rotor CFD methodology for modelling the effects of wind turbine wake interactions on performance. *Renewable Energy*, 80:525 – 537, 2015.
- [22] Mo, Jang-Oh, Choudhry, Amanullah, Arjomandi, Maziar, Kelso, Richard, and Lee, Young-Ho. Effects of wind speed changes on wake instability of a wind turbine in a virtual wind tunnel using large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 117:38 – 56, 2013.
- [23] Manwell, James F, McGowan, Jon G, and Rogers, Anthony L. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [24] Sanderse, B, Koren, B, and Sanderse, B. Energy preservation in the numerical calculation of wind turbine wakes. in *Euromech Colloquium*, vol. 508, pp. 20–22, 2009.
- [25] Bastankhah, Majid and Porté-Agel, Fernando. A new analytical model for wind-turbine wakes. *Renewable Energy*, 70:116 – 123, 2014. Special issue on aerodynamics of offshore wind energy systems and wakes.
- [۲۶] جوارشکیان، محمدحسن و بیدرونی، امیر لطفی. بهینه‌سازی ایرفویل ضخیم برای قسمت میانی پره توربین باد. ۲۰۱۳.
- [۲۷] صالحی، حمیدرضا، ابوکاظم‌پور، اسماعیل، و اسدی، عباس. کاربردها و الزامات به‌کارگیری مواد مرکب در بهره‌برداری از انرژی باد و ساخت توربین بادی. *مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران*، ۲۶(۵):۸۱-۹۰، ۱۳۹۶.
- [28] Islam, M., Esfahanian, V., Ting, D. S. K., and Fartaj, A. Applications of vertical axis wind turbines for remote areas. in *Proc. 5th Iran Natl. Energy Conf.*, 2005.
- [29] Hand, M. M., Simms, D. A., Fingersh, L. J., Jager, D. W., and Cotrell, J. R. Unsteady aerodynamics experiment phase v: Test configuration and available data campaigns; TOPICAL. tech. rep., United States, Aug 2001. NREL/TP-500-29491.
- [30] Kooijman, H. J. T., Lindenburg, C., Winkelaar, D., and Hooft, E. L. Van Der. Dowec 6 mw pre-design: Aero-elastic modelling of the DOWEC 6 MW pre-design in PHATAS, 2003.
- [31] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. tech. rep., United States, 2009.
- [32] Boussinesq, Joseph. *Essai sur la théorie des eaux courantes*. Imprimerie Nationale, Paris, 1877.
- [33] Yelmule, Mukesh Marutao and V. S. J, Eswararao Anjuri. CFD predictions of NREL phase VI rotor experiments in NASA/AMES wind tunnel. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 3(2):261–269, 2013.
- تأثیر فاصله هم‌پوشانی افقی بر عملکرد توربین. *مجله علمی پژوهشی رایانش نرم و فناوری اطلاعات*، ۶(۲):۴۰-۵۰، ۱۳۹۷.
- [3] Otero, A.D. and Ponta, F.L. On the structural behaviour of variable-geometry oval-trajectory darrieus wind turbines. *Renewable Energy*, 34(3):827 – 832, 2009.
- [4] United Nations Development Programme. *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*. UNDP, 2000.
- [۵] محمدی، مونا، محمدی، محمدرضا، و محمدی، علیرضا. توربین‌های بادی مرتفع. *مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران*، ۲۲(۲):۲۵-۳۱، ۱۳۹۲.
- [6] Betz, Albert. Introduction to the theory of flow machines. 1966.
- [7] Igra, Ozer. Research and development for shrouded wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 21(1):13 – 48, 1981.
- [8] Igra, Ozer. Compact shrouds for wind turbines. *Energy Conversion*, 16(4):149 – 157, 1977.
- [9] Foreman, K.M., Gilbert, B., and Oman, R.A. Diffuser augmentation of wind turbines. *Solar Energy*, 20(4):305 – 311, 1978.
- [10] Sicot, Christophe, Devinant, Philippe, Laverne, Thomas, Loyer, Stéphane, and Hureau, Jacques. Experimental study of the effect of turbulence on horizontal axis wind turbine aerodynamics. *Wind Energy*, 9(4):361–370, 2006.
- [11] Digraskar, Dnyanesh A. Simulations of flow over wind turbines, 2014.
- [12] Kelley, N., Hand, M., Larwood, S., and McKenna, E. *The NREL large-scale turbine inflow and response experiment- Preliminary results*.
- [۱۳] علیصادقی، حامد، صفی‌پور، حسین، و رضایی‌فرد، حجت. شبیه‌سازی عددی و مطالعه پارامتری یک توربین بادی دوباله نوسان‌کننده. *ماهنامه علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس*، ۱۹(۵)، ۱۳۹۸.
- [14] Klimas, P.C. and Worstell, M.H. Effects of blade pre-set pitch/offset on curved-blade darrieus vertical axis wind turbine performance. 10 1981.
- [15] Fiedler, Andrzej J. and Tullis, Stephen. Blade offset and pitch effects on a high solidity vertical axis wind turbine. *Wind Engineering*, 33(3):237–246, 2009.
- [16] González-Longatt, F., Wall, P., and Terzija, V. Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior. *Renewable Energy*, 39(1):329 – 338, 2012.
- [۱۷] پیرکنندی، جاماسب و حربی منفرد، رضا. توربین‌های بادی نوین و نقش آنها در آینده سیستم‌های انرژی. *مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران*، ۲۵(۳):۲۳-۳۱، ۱۳۹۵.
- [۱۸] پیرکنندی، جاماسب، مشهدی، مهرداد، و نصرت‌اللهی، مهرا. شبیه‌سازی و تحلیل دنباله‌ی یک توربین بادی نمونه در مزرعه‌ی بادی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی. *مهندسی و مدیریت انرژی (مدیریت انرژی)*، ۵(۴):۵۰-۶۱، ۱۳۹۴.
- [۱۹] سیفی، سید محمدسجاد، مجدم، محمد، و هاشمی طاری، پویان. طراحی بهینه پره توربین باد محور افقی کوچک با در نظر گرفتن قیود مکانیکی. *ماهنامه علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس*، ۱۸(۹)، ۱۳۹۷.