نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۶، شماره۱، بهار ۱۴۰۲، صفحه ۷۸-۹۰

شبیه‌سازی و بهبود توان توربین بادی با اعمال روش مکش لایه‌مرزی روی پره‌ها

سجاد سعدی[۱]، مهرداد محمودیان[۲]

چکیده

پره‌ها و بال‌ها مبتنی بر سطوح آئرودینامیک به نام ایرفویل‌ها هستند. هر چند ایرفویل‌ها برای شرایط کارکرد بهینه شده باشند، باز هم دارای محدودیت‌هایی در عملکرد هستند چراکه شکل ثابتی دارند و نمی‌توانند پاسخگوی تمام شرایط کاری باشند. در مراجع علمی برای گسترش ناحیه کاری ایرفویل‌ها و بهبود رفتار آن‌ها، از تکنیک‌هایی به نام کنترل جریان استفاده می‌شود. یکی از روش‌های کنترل جریان روی ایرفویل‌ها روش مکش لایه‌مرزی می‌باشد که در این روش تلاش می‌شود لایه مرده و بدون انرژی نزدیک سطح، از درون سیال بیرون کشیده شده و سیال با انرژی اطراف، جای آن را بگیرد. در این مقاله ابتدا توربین ۶۶۰ کیلووات شرکت وستاس به عنوان مدل نمونه انتخاب و سپس هندسه آن ایجاد و مدل سه‌بعدی و شبکه محاسباتی آن توسعه داده شد و به‌طور کامل شبیه‌سازی و نتایج آن با اطلاعات تجربی آن توربین اعتبارسنجی گردید. در نهایت با استفاده از روش مکش لایه‌مرزی و با اعمال مقدار صحیح شدت مکش، می‌توان عملکرد آئرودینامیک روتور را تا ۸ درصد بهبود بخشید. از آنجایی که سیستم همیشه کارآمد نیست، برای بازگشت به پیکربندی اولیه باید سیستم مکش، کنترل و یا خاموش شود.

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱ / ۱۰ / ۲۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲ / ۰۴ / ۱۳

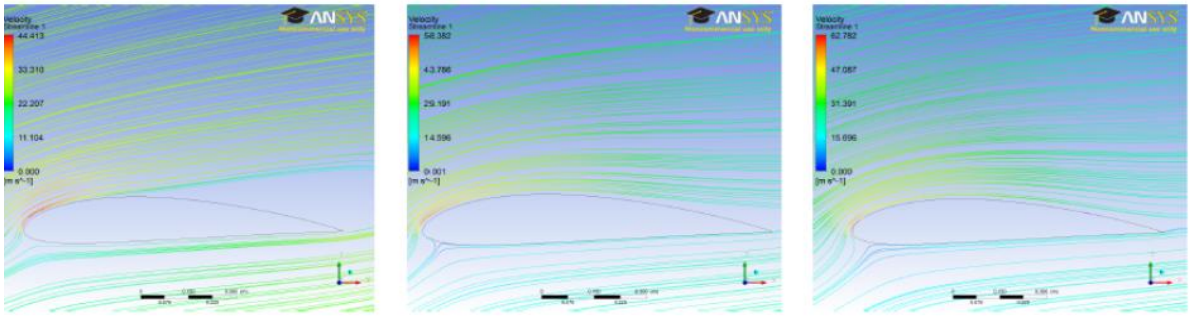
کلمات کلیدی:
توربین بادی
مکش لایه‌مرزی
آئرودینامیک
توان باد

۱. دکتری مهندسی انرژی دانشگاه جامع امام حسین s.sadi@modares.ac.ir
۲. دکتری برق قدرت دانشگاه صنعتی شیراز

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۱. مقدمه

تحقیقات مربوط به کنترل جریان به کشف لایه‌مرزی توسط پرنتل به سال ۱۹۰۴ بر می‌گردد. او ابتدا در یک کنفرانس مقاله‌ای را ارائه داد که در آن مبانی تئوری لایه‌مرزی جریان را معرفی نمود. او همچنین از روش مکش لایه‌مرزی استفاده کرد تا جریان روی یک استوانه را تغییر داده و جدایش آن را به تأخیر بیندازد. پس از توسعه این روش؛ تعریف‌های متعددی برای این کار ارائه شد که شاید جامع‌ترین آن‌ها مربوط به فلت سال ۱۹۶۱ باشد [۱]. طبق تعریف او روش‌های کنترل جریان به مجموعه مکانیسم‌ها و فرآیندهایی گفته می‌شود که باعث می‌شود لایه‌مرزی جریان روی یک سطح صاف به گونه دیگری رفتار کند که باحالت توسعه طبیعی آن روی یک سطح صاف متفاوت است [۲]. روش‌های کنترل جریان متفاوتی وجود دارد که از جمله آن می‌توان به مولد گرداب؛ ناهمواری‌های سطحی؛ شیار لبه حمله؛ تیغه‌های مضاعف؛ بالک‌های گونی؛ فلپ صلب لبه‌دار؛ دمش و مکش در لایه‌مرزی و غیره اشاره نمود. در این پژوهش از روش مکش لایه مرزبندی برای کنترل جریان روی پره‌های یک توربین بادی استفاده شده است. در روش مکش لایه مرزبندی تلاش می‌شود لایه مرده و بدون انرژی نزدیک سطح؛ از درون سیال بیرون کشیده شده و سیال با انرژی اطراف؛ جای آن را بگیرد. در این مقاله چند نمونه از کارهای انجام شده در این حوزه ذکر شده است. آکاریا [۳ و ۴] به صورت تجربی اثر مکش لایه‌مرزی را روی ایرفویل استاندارد ناکا ۰۰۱۲ بررسی کرده است. نتیجه کار او نشان می‌دهد که موقعیت بهینه محل مکش در ۲ تا ۵ درصد اول ایرفویل است. کار عددی مشابهی روی همین ایرفویل توس ونگ [۵] و گودرزی [۶] انجام شده و او موقعیت ۲۰ درصد را توصیه کرده است. کارهای متعدد دیگری روی سایر ایرفویل‌های پر کاربرد نیز انجام شده که می‌توان به پژوهش‌های احمدی [۷] و پیپراس [۸] و دوان [۹] اشاره نمود. در شکل ۱ می‌توان تأثیر مقادیر مختلف مکش جهت مکش جهت کنترل جریان را مشاهده نمود.



الف) Cq = 0.15 ب) Cq = 0.08 پ) Cq = 0.01

شکل ۱. تأثیر مقادیر مختلف مکش روی خطوط جریان و کنترل جدایش

۲. توربین ٦٦٠ کیلووات وستاس

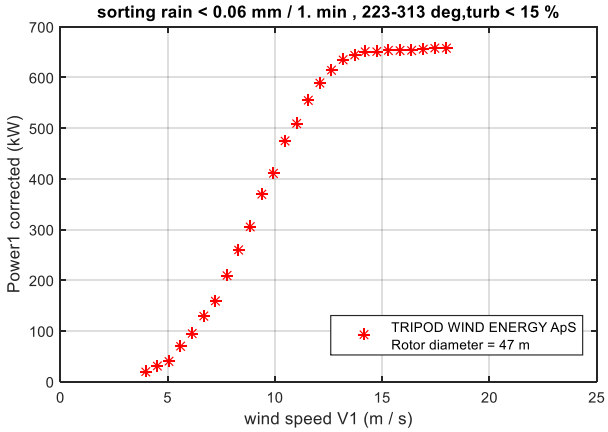
شرکت صبا نیرو متعلق به گروه صنعتی سدید می‌باشد. این شرکت اولین سازنده توربین‌های برق بادی در ایران و خاورمیانه بوده و از سال ۱۳۷۹ در زمینه تولید توربین به فعالیت پرداخته و با دریافت تکنولوژی توربین‌های ۶۶۰ کیلووات از شرکت وستاس دانمارک و هم‌اکنون بیش از ۹۰ مگاوات از توربین‌های تولید خود را در استان‌های خراسان رضوی، گیلان و کشور ارمنستان نصب و راه‌اندازی نموده و نقش مهمی در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

توسعه انرژی بادی ایران بر عهده گرفته است. این توربین ساخت داخل بوده و خوشبختانه اطلاعات خوبی از آن در اختیار می‌باشد به نحوی که در مراجع کارهای زیادی روی این توربین انجام شده است. صدیقی، اکبر زاده و صلواتی پور [۱۰] تأثیر ناهمواری سطوح پره را بر عملکرد توربین بادی محور افقی ۶۶۰ کیلووات با تحلیل عددی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که گودی‌ها اگر به‌طور مناسب طراحی شوند، می‌توانند در افزایش گشتاور تا ۱۶/۶درصد مؤثر باشند. در پژوهشی دیگر، طاهانی و مرادی [۱۱] تجزیه و تحلیل آئرودینامیکی توربین بادی V47 Vestas با مقیاس کامل را با استفاده از نظریه تکانه المان پره و دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند. آن‌ها دریافتند که در مقایسه با اندازه‌گیری میدان واقعی، نتیجه‌ی دو بعدی می‌تواند توان خروجی را با هزینه‌ی محاسباتی کمتر پیش‌بینی کند. سلطانی، بیرجندی و صدیقی مورانی [۱۲] مجموعه‌ای از آزمایش‌های تونل باد با سرعت کم را در قسمتی از پره توربین بادی محور افقی ۶۶۰ کیلووات انجام دادند تا تأثیر آلودگی سطح توزیع شده بر ویژگی‌های عملکردی آن، مورد بررسی قرار گیرد. مشخصات این توربین در شکل (۳) و جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۲. توربین ۶۶۰ کیلووات صبا نیرو



شکل ۳. توان اندازه‌گیری شده توربین بادی ۶۶۰ کیلووات

با توجه به اینکه این توربین در ایران تولید می‌شود و همچنین در دسترس بودن آن ساده می‌باشد و بهره‌برداری از نتایج این پژوهش امکان‌پذیر است، توربین ۶۶۰ کیلووات برای ادامه پژوهش انتخاب می‌گردد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

جدول ۱. مشخصات کلی توربین ۶۶۰ کیلووات

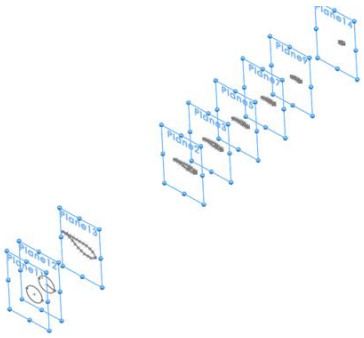
مشخصات توربین	U47 – 660 kW	U47 – 660 / 200 kW
قطر روتور (متر)	۴۷	۴۷
مساحت جاروب شده (متر مربع)	۱۷۳۵	۱۷۳۵
سرعت دوران	۲۸/۵	۲۶/۲۰
تعداد پره ها	۳	۳
روش تنظیم توان	Pitch / optislip	Pitch / optislip
ارتفاع پایه برج (متر)	۴۰–۴۵–۵۰–۵۵	۴۰–۴۵–۵۰–۵۵–۶۰–۶۵
سرعت قطع پایین (متر بر ثانیه)	۴	۳/۵
سرعت نامی (متر بر ثانیه)	۱۵	۱۶
سرعت قطع بالا (متر بر ثانیه)	۲۵	۲۵

۳. ایجاد مدل سه‌بعدی

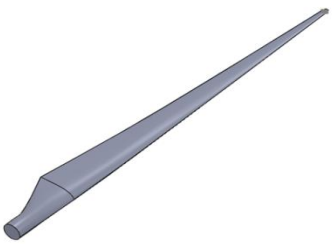
در ادامه مشخصات هندسی و فیزیکی توربین تشریح می‌گردد.

۳.۱ مدل هندسی

بر اساس اطلاعات ذکر شده در قسمت قبل و همچنین یافتن پروفیل‌های آئرودینامیک مورد استفاده، مدل هندسی پره توربین بادی مذکور در نرم‌افزار Solid Works ایجاد گردید. برای این منظور، ابتدا پروفیل‌های آئرودینامیک در ابعاد گفته‌شده در شکل ۴ آماده شده و سپس در مقطع مناسب قرار داده شد. در نهایت با اتصال این مقاطع به یکدیگر، شکل سه‌بعدی پره حاصل گردید.



شکل ۴. ایرفویل‌های ایجاد شده در مقاطع مختلف پره

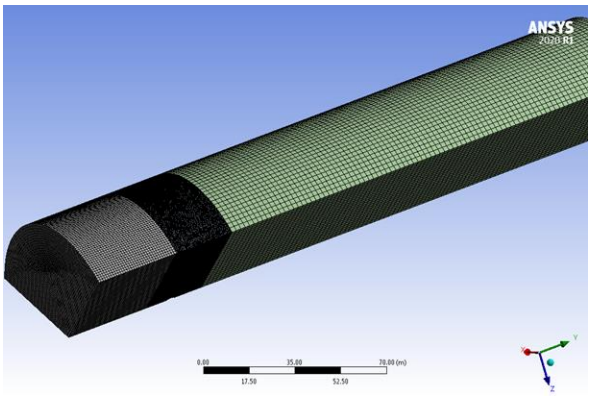


شکل ۵. شکل کلی هندسه پره در نرم‌افزار

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۳.۲ دامنه محاسباتی

پس از ایجاد مدل سه‌بعدی پره می‌بایست مدل محاسباتی آن تولید گردد. برای محاسبه میدان جریان در اطراف پره، باید محیط سیال اطراف روتور نیز تولید گردد. از آنچه که توربین دارای تقارن محوری است و هر سه پره شرایط یکسانی هستند، برای صرفه‌جویی در هزینه محاسباتی و کاهش زمان، تنها یکی از آن‌ها را در نظر می‌گیریم؛ بنابراین، محیط اطراف یک پره توربین، یک قطاع ۱۲۰ درجه از یک استوانه خواهد بود. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده در مراجع مذکور، فاصله‌ای به‌اندازه ۲ برابر قطر از جلوی توربین تا ۴ برابر قطر بعد از توربین لحاظ شده است. برای سهولت در انجام محاسبات عددی، این حجم به سه قسمت تقسیم شده است. قسمت ابتدایی و انتهایی ثابت هستند و قسمت میانی که در آن پره توربین واقع شده است، دارای چرخش می‌باشد. سرعت این چرخش معادل ۲۸/۵ دور در دقیقه یعنی همان سرعت کاری توربین است. برای تکمیل دامنه محاسباتی لازم است این حجم‌ها شبکه‌بندی شوند. شبکه‌بندی نواحی ۱ و ۳ با استفاده از المان‌های شش‌وجهی منظم است ولی برای ناحیه میانی به علت هندسه پیچیده پره از المان‌های هرمی استفاده شده است. همچنین برای محاسبه صحیح لایه‌مرزی روی پره، شبکه لایه‌ای با ضخامت کل ۱ سانتی‌متر در ۵ لایه ضخیم شونده ایجاد شده است. این مدل دارای ۷ میلیون المان و ۱۹۳۳۰۰۰ گره می‌باشد.

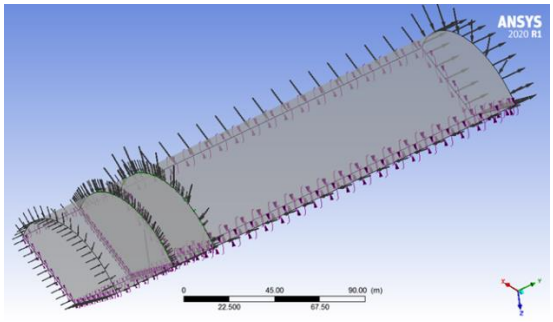


شکل ۶. شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

۳.۳ مدل محاسباتی

با داشتن دامنه محاسباتی می‌توان نسبت به ایجاد مدل محاسباتی اقدام نمود. برای این کار باید خواص سیال (در اینجا هوا)، شرایط مرزی، شرایط اولیه و مدل‌های آشفتگی را تعیین نمود. در این پژوهش، وجه جلویی دارای شرط ورودی سرعت، وجه بالای استوانه از نوع سرعت در راستای مماسی، وجوه کناری از نوع تکرارشونده و وجه آخر از نوع خروجی فشار فرض شده است. همچنین برای آشفتگی از مدل کی امگا [۱۳ و ۱۴] استفاده شده است. در این پژوهش از نرم‌افزار CFX به عنوان حل گر استفاده شده است.

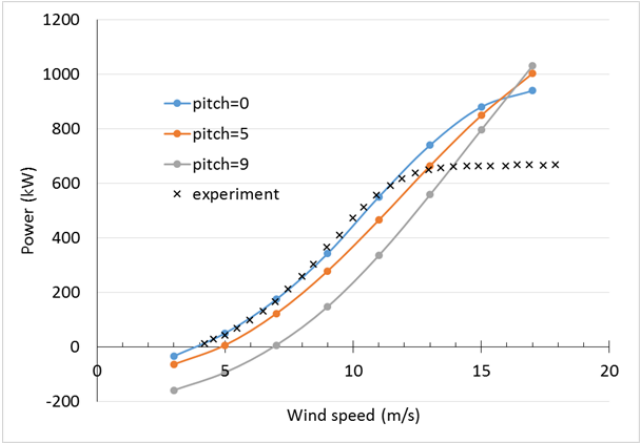
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل ۷. مدل عددی در نرم‌افزار

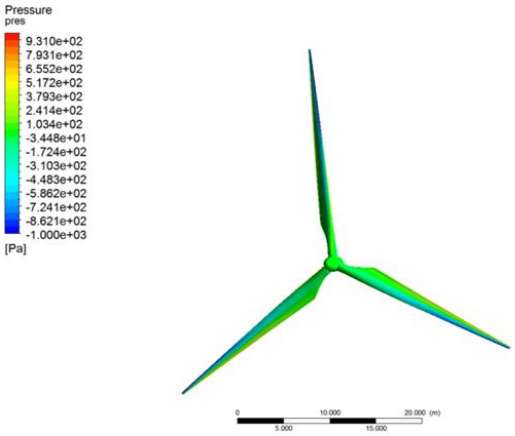
٤. شبیه‌سازی توربین اصلی و بررسی نتایج

اولین پارامتری که در بررسی نتایج شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، توان توربین در سرعت‌های مختلف باد می‌باشد. این مقایسه در شکل ۸ انجام شده است. از آنجا که سیستم کنترل این توربین از نوع پیچ کنترل است، بنابراین پره‌های آن می‌توانند بچرخند و بر حسب شرایط مختلف زوایای مناسب را اختیار نمایند. معمول این است که زاویه صفر متناظر شرایط نامی توربین است؛ بنابراین شبیه‌سازی توربین ابتدا با زاویه پیچ صفر انجام شده است. از روی نمودار مشاهده می‌شود که تا سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه نمودار شبیه‌سازی انطباق خوبی با داده‌های تجربی دارد پس از آن نمودارها از هم فاصله می‌گیرند. طبق مبانی کنترل توربین‌های بادی، پس از رسیدن توربین به توان نامی، برای جلوگیری از ناپایدار شدن سیستم و افزایش سرعت دوران، سیستم کنترل زاویه پره را تغییر می‌دهد؛ بنابراین با افزایش سرعت باد، توان توربین در یک مقدار ثابت کنترل می‌شود. برای بررسی این موضوع، شبیه‌سازی توربین در دو زاویه پیچ دیگر نیز انجام شده است. می‌توان مشاهده کرد که برای سرعت باد ۱۳ متر بر ثانیه، برای داشتن همان توان ۶۶۰ کیلووات می‌بایست زاویه پره‌ها رو ۵ در جه تنظیم شود. در سرعت باد ۱۴ متر بر ثانیه این مقدار باید ۹ درجه باشد. از مجموع موارد مطرح شده و نیز مقایسه با داده‌های تجربی می‌توان دریافت که مدل عددی دارای اعتبار لازم برای ادامه پژوهش می‌باشد. در ادامه سایر خروجی‌های قابل استحصال از نرم‌افزار (در شرایط نامی) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مطابق آنچه گفته شد، تنها یکی از پره‌ها شبیه‌سازی شده است؛ اما برای نمایش بهتر نتایج، ۳ پره از طریق تکرار در شکل‌ها نشان داده شده است.



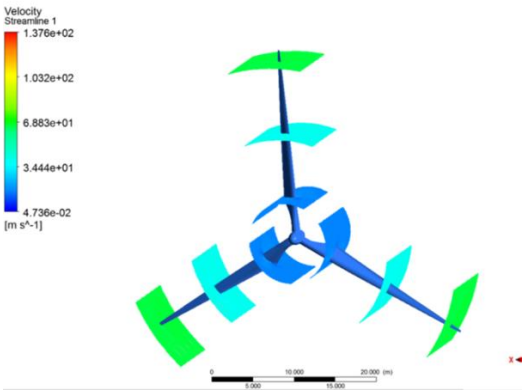
شکل ۸. توان تولیدی توربین در زوایای مختلف پره و سرعت باد در مقایسه با نتایج تجربی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

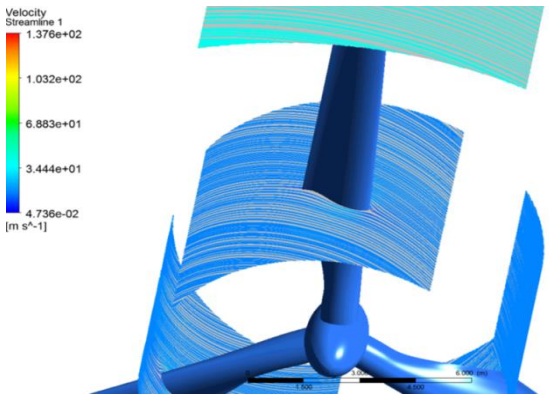


شکل ۹. کانتور فشار روی پره‌ها

برای حصول اطمینان و بررسی جزئیات جریان، ۳ صفحه در مقاطع مختلف پره ایجاد شده‌اند و روی هر کدام خطوط جریان ترسیم شده است. از روی این نمودارها می‌توان دریافت که جریان به‌خوبی روی پره‌ها جاری شده و از پروفیل آن پیروی می‌نماید. به همین خاطر هیچ جدایشی دیده نمی‌شود و جریان در وضعیت ایده آل خود قرار دارد.

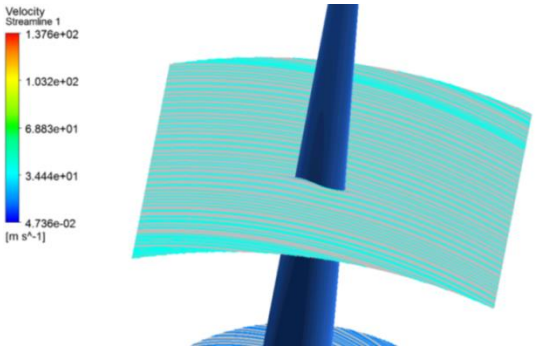


شکل ۱۰. صفحات ایجاد شده در مقاطع مختلف برای بررسی جریان

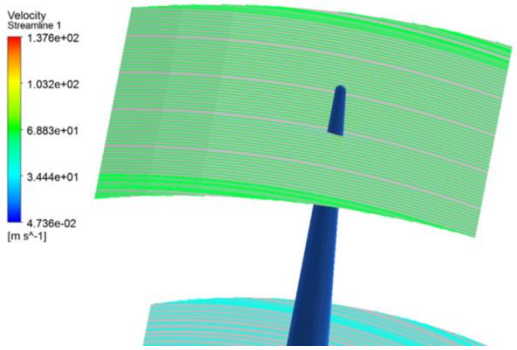


شکل ۱۱. خطوط جریان روی صفحه باب فاصله ۵ متر از محور دوران

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل ۱۲. خطوط جریان روی صفحه باب فاصله ۱۲ متر از محور دوران



شکل ۱۳. خطوط جریان روی صفحه باب فاصله ۲۰ متر از محور دوران

۵. سامانه مکش لایه‌مرزی

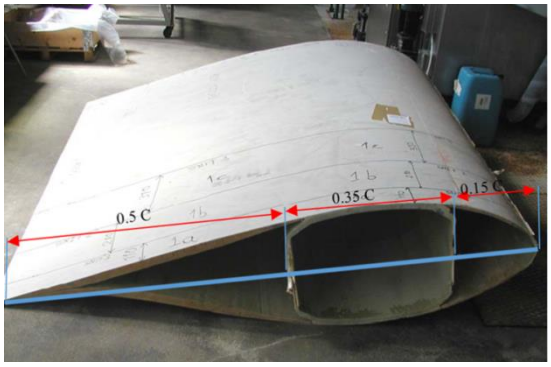
نحوه و محل اجرای مدل ارائه‌شده در نرم‌افزار، در ادامه تشریح می‌گردد.

۵.۱ نحوه و محل اجرا

مطابق آنچه پیش‌تر شرح داده شد، روش مکش لایه‌مرزی برای کنترل جدایش روی پره مورد نظر است. برای اجرای آن، می‌بایست شیاری روی پره ایجاد شده و سیال مرده و کم انرژی از طریق آن بیرون کشیده شود؛ اما ایجاد چنین شیاری روی سازه‌ای با این اندازه که تحت بارها و تنش‌های پیچیده‌ای قرار دارد، کار ساده‌ای نیست و می‌بایست بررسی‌های عمیقی درباره آن انجام شود. ساختار پره‌های توربین بادی در مقیاس بزرگ نشان می‌دهد که آن‌ها عمدتاً از دو قسمت تشکیل شده‌اند. قسمت اول پوسته آن است که وظیفه ایجاد شکل آئرودینامیک و استخراج نیروهای لازم از جریان باد را دارد. این پوسته نازک است و تحمل بار زیادی ندارد. قسمت دوم سازه درونی پره است که وظیفه دریافت بار از پوسته آئرودینامیک، تجمیع و انتقال آن به ریشه و هاب را بر عهده دارد. این سازه دارای مقطع مستطیلی است و متشکل از

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

لایه‌های متعدد و مستحکم کامپوزیت است و می‌توان بار بسیار زیادی را تحمل کند (شکل ۱۴). این سازه در پهن‌ترین قسمت هر ایرفویل واقع شده است که بر اساس تجربه بین ۱۵ تا ۵۰ درصد طول وتر پره است.



شکل ۱۴. مقطع پره توربین بادی و سازه درونی آن

بر این اساس برای اجرای شیار لازم برای سیستم مکش لایه‌مرزی، نمی‌توان آسیب و اختلالی در قسمت سازه‌ای پره وارد نمود. چراکه این کار می‌تواند به‌شدت ایمنی و عمر پره را کاهش دهد. از آنچه که شیار مکش لایه‌مرزی می‌بایست کمی پیش از محل جدایش جریان ایجاد گردد، اولین موقعیتی که می‌توان آن را قرار داد، بلافاصله بعد از سازه درونی، یعنی همان موقعیت ۵۰ درصد است (مکان شیار). برای این منظور شیاری به عرض ۵ سانتی‌متر بین طول ۵/۵ تا ۱۱ متری پره در نظر گرفته می‌شود (ابعاد شیار). نکته دیگری که می‌توان از روی شکل دریافت این است که پره دارای ساختاری توخالی است و در نتیجه می‌تواند به‌عنوان مسیر و لوله‌ای برای انتقال جریان مکش شده به محلی دیگر (هاب توربین) استفاده شود. در این طرح برای ایجاد مکش در شیار مورد نظر می‌بایست وسیله‌ای وجود داشته باشد تا با ایجاد اختلاف فشار، جریان را خارج کند. ساده‌ترین وسیله‌ای که در این خصوص در دسترس است، فن‌ها هستند. با توجه به ساختار پره در قسمت ریشه، می‌توان به‌راحتی یک فن محوری را در قسمت ریشه (شکل ۱۵) تعبیه نمود. این فن می‌تواند قابلیت تنظیم دور جهت کنترل میزان جریان مکش شده، داشته باشد. مقدار ظرفیت و توان فن متعاقباً محاسبه خواهد شد.

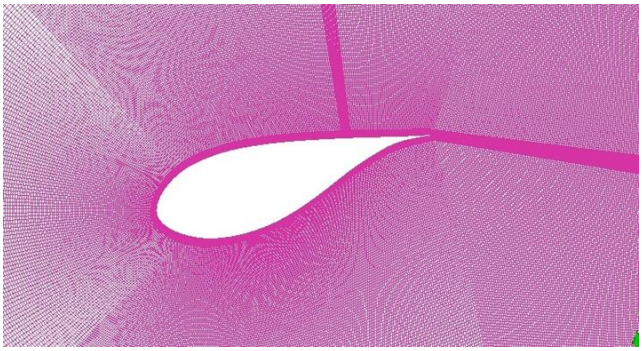


شکل ۱۵. هندسه ریشه پره توربین بادی و موقعیت نصب فن مکنده

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۵.۲ بررسی عملکرد روی پره توربین

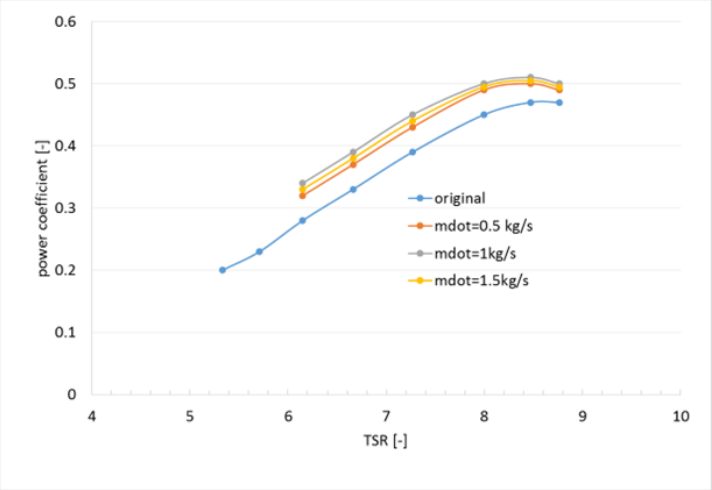
بعد از تعیین محل و ابعاد شیار می‌بایست دبی لازم برای رسیدن به عملکرد مطلوب را بررسی کرد. برای انجام شبیه‌سازی‌ها لازم است شیار روی هندسه پره ایجاد گردد. همچنین شبیه‌سازی لایه‌مرزی مستلزم ایجاد شبکه با دقت بسیار بالا در ناحیه نزدیک سطح و شیار است؛ بنابراین، شبکه‌بندی جدید با توجه به موارد فوق ایجاد گردید (شکل ۱۶).



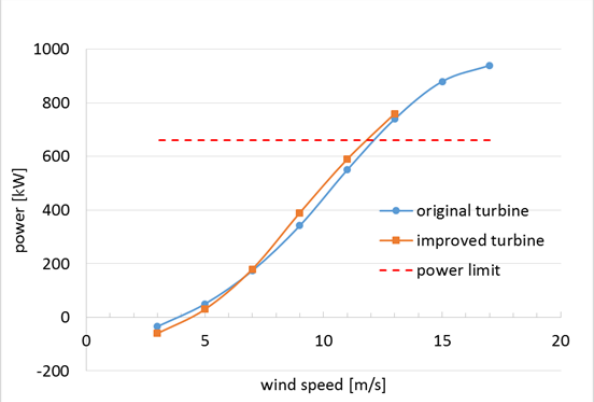
شکل ۱۶. شبکه‌بندی منظم جدید در اطراف پره

تأثیر مقدار و شدت مکش جریان روی ضریب توان توربین در شرایط مختلف در شکل ۱۷ آورده شده است. از روی نمودار می‌توان دریافت که کمترین مقدار مکش یعنی ۰/۵کیلوگرم بر ثانیه قادر است ضریب توان را به میزان ۰/۰۴ در نقطه TSR=7 افزایش دهد که معادل ۸ درصد آن است. کمترین مقدار ارتقای عملکرد در TSR=9 اتفاق می‌افتد که برابر است با ۰/۰۱۵ یا ۳/۱ درصد. با دو برابر کردن مقدار مکش، مقدار بسیار کمی بهبود نسبت به حالت قبل مشاهده می‌شود. این میزان در بهترین حالت حدود ۰/۰۱ است. افزایش میزان مکش بیش از این مقدار باعث بدتر شدن وضعیت می‌شود. هرچند از حالت اولیه بهتر است ولی می‌توان دریافت که به‌صرفه‌ترین مقدار مکش برای بهبود عملکرد همان مقدار نیم کیلوگرم بر ثانیه است. ضریب عملکرد کمیت محسوسی نیست و مستقیماً قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. آنچه از دیدگاه بهره‌بردار یا شبکه برق اهمیت دارد، میزان تولید انرژی توربین است؛ بنابراین لازم است منحنی توان توربین نیز ترسیم گردد (شکل ۱۸). از روی این نمودار می‌توان دریافت که سیستم مکش لایه‌مرزی در همه شرایط مفید نیست. در سرعت باد کمتر از ۷ متر بر ثانیه، اعمال این روش باعث کاهش توان توربین می‌شود. دلیل موضوع این است که در سرعت باد پایین مقدار TSR بسیار بالاست و جدایش مطابق آنچه پیش‌تر بیان شد اتفاق نمی‌افتد؛ بنابراین مکش لایه‌مرزی درواقع قسمت مفید جریان را نیز مکش نموده و مانع از تولید توان آن می‌شود. پس توان توربین دچار کاهش می‌شود. از این سرعت به بعد سیستم کاملاً مفید واقع می‌شد. بیشترین مقدار افزایش توان حدود ۳۸ کیلووات برآورد می‌شود که در سرعت ۹ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد. پس از آن توربین به‌تدریج به توان نامی خود نزدیک می‌شود. جایی که سیستم پیچ عامدانه توان را کاهش داده و مقدار نامی محدود می‌نماید؛ بنابراین پس از سرعت باد ۱۳ متر بر ثانیه نیز، احتیاجی به فعال بودن سیستم نیست. روشن و خاموش کردن سامانه نیز به‌راحتی با اتصال یا قطع برق فن مکش هر پره قابل اعمال است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل ۱۷. تأثیر شدت مکش روی ضریب توان توربین

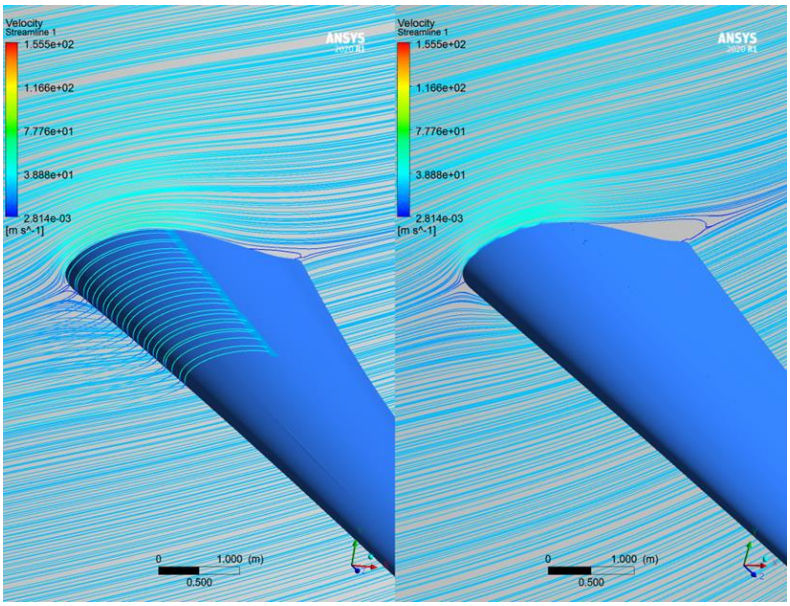


شکل ۱۸. منحنی توان توربین در حالت‌های مختلف

علت تأثیر مکش لایه‌مرزی را می‌بایست مجدداً در خطوط جریان جستجو کرد (شکل ۱۹). به این منظور خطوط جریان برای نسبت سرعت نوک پره ۷ در حالتی که مکش وجود دارد و حالت اولیه نشان داده شده است. از روی شکل می‌توان مشاهده کرد در حالت اولیه (شکل راست) مطابق بررسی‌های قبلی جریان دارای جدایش است و از پروفیل پره پیروی نمی‌کند. با فعال کردن سیستم مکش، گردابه‌های زیر ناحیه جدایش به داخل پره و نهایتاً محیط بیرون منتقل شده‌اند؛ بنابراین با خالی شدن ناحیه جدایش از سیال کم انرژی، سیال با اندازه حرکت کافی جایگزین آن شده و در نتیجه قادر است شکل ایرفویل را دنبال نماید (شکل چپ). از آنچه که حالت دوم به حالت کارکرد عادی ایرفویل نزدیک‌تر است، توزیع فشار بهتری روی پره ایجاد شده و پره می‌تواند گشتاور و نهایتاً توان بیشتری را تولید نماید. اکنون می‌بایست مشخصات فن‌های لازم برای مکش جریان را تخمین زد. مطابق بررسی‌ها دبی نیم کیلوگرم بر ثانیه برای هر پره لازم است. برای اطمینان این مقدار را یک کیلوگرم در ثانیه فرض می‌کنیم که با چگالی هوا معادل حدود ۰/۸۳ متر مکعب بر ثانیه یا ۲۹۹۰ متر مکعب بر ساعت می‌باشد. فشار لازم برای مکش جریان با توجه به تحلیل‌های عددی حدود ۸۰۰ پاسکال است. توان مصرفی با ضرب دبی در اختلاف فشار قابل تخمین است که برابر ۶۰۰ وات است؛ بنابراین توان مصرفی برای کل توربین در حدود ۱۸۰۰ وات می‌باشد. به‌خوبی می‌توان مشاهده کرد که میزان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

ارتقای توان (۳۸ کیلووات) بسیار بیشتر از میزان هزینه شده برای آن یعنی ۱/۸ کیلووات است؛ بنابراین استفاده از این مجموعه نهایتاً به‌صرفه خواهد بود.



شکل ۱۹. تأثیر مکش لایه‌مرزی روی خطوط جریان برای نسبت سرعت نوک پره ۷



شکل ۲۰. نمونه فن‌های قابل استفاده با قطر ۶۰ سانتی‌متر

٦. نتیجه‌گیری

پره توربین‌های بادی با استفاده از روابط آئرودینامیک و روش‌هایی خاص، تنها برای یک نقره‌کاری طراحی می‌شوند. در نتیجه شکل هندسی آن‌ها ثابت بوده و فقط در شرایط کاری (TSR) دارای بیشترین بازده و عملکرد هستند. در این کار پژوهشی نشان داده شد که ماهیت تصادفی و متغیر باد، باعث فاصله گرفتن از این شرایط نامی شده و عملاً پره توربین در بسیاری از شرایط در حالت بهینه خودکار نمی‌کند و توان کمتری را تولید می‌کند. با شبیه‌سازی‌های عددی یک توربین موجود در کشور نشان داده شد که در چه شرایطی توربین دچار کاهش توان می‌شود و بررسی‌های جریان نشان داد که علت اصلی آن جدایش روی قسمت‌های نزدیک ریشه پره است. جدایش پدیده‌ای شناخته‌شده در صنعت آئرودینامیک است و تاکنون روش‌های متعددی برای کنترل و پیشگیری از وقوع آن پیشنهاد شده است. در این پژوهش برای حل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

مشکل جدایش روی توربین از روش مکش لایه‌مرزی استفاده شود. لازم به ذکر است که این روش در کاربردهای گوناگون استفاده شده بود، ولی در توربین‌های بادی تاکنون مشاهده نشده است؛ بنابراین، این مهم یک نوآوری محسوب می‌شود. سیستم مکش لایه‌مرزی درون مدل عددی ایجاد گردید و شبیه‌سازی‌های متعددی بر روی توربین جدید انجام شد. نتایج نشان داد که با اعمال مقدار مشخصی مکش روی پره‌ها می‌توان توان الکتریکی توربین را تا ۳۸ کیلووات افزایش داد. قطعاً این میزان در طول عمر ۲۰ ساله یک توربین بادی منجری به انرژی الکتریکی و ارزش افزوده قابل‌ملاحظه‌ای می‌شود.

۷. مراجع

[1] M. Gad el Hak ; Flow control: passive, active and reactive flow management; Cambridge press; 2000

[2] Flatt, J., The History of Boundary Layer Control Research in the United States of America, edited by G. V. Lachmann, Boundary Layer and Flow Control: Its Principles and Application, Vol. 1, Pergamon Press, New York, 1961, pp. 122–143.

[3] M.A. Karim, M. Acharya; Suppression of dynamic stall vortices over pitching airfoils by leading-edge suction; AIAA J. 32 (1994) 1647-1655

[4] M. Alfrefai, M. Acharya; Controlled leading-edge suction for management of unsteady separation pitching airfoils; AIAA J. 34 (1996) 2327-2336

[5] Wang SC.; Control of dynamic stall; PhD Dissertation, Mechanical Engineering Department, Florida State University; 1995

[6] M. Goodarzi, R. Fereidouni, M. Rahimi; Investigation of flow control over a NACA0012 airfoil by suction effect on aerodynamic characteristics; Canadian Journal on Mechanical Sciences & Engineering 3 (2012) 102-109

[7] M. Ahmadi-Baloutaki, A. Sedaghat, M. Saghafian and M.A. Badri; Control of Transition over Aerofoil Surfaces using Active Suction; International Journal of Flow Control 5 (2013) 187-200

[8] A.Piperas; Investigation of Boundary Layer Suction on a Wind Turbine Airfoil using CFD; Master's Thesis; Technical University of Denmark; 2010

[9] H. Duan, P. Liu, Y. He, J. Chen; Numerical Investigation of Drag-reduction Control by Micro-suction-blowing on Airfoil; Acta Aeronautica et Astronautica Sinica; 30 (2009)1220-1226

[10] Sedighi H., Akbarzadeh P. & Salavatipour A.; Aerodynamic performance enhancement of horizontal axis wind turbines by dimples on blades: Numerical investigation; Energy, 2020

[11] Tahani, Moradi; Aerodynamic investigation of wind turbine using CFD and modified BEM methods; Journal of Applied Fluid Mechanics; 2016 (9) 107-111

[12] Soltani, Birjandi, Seddighi Moorani; Effect of surface contamination on the performance of a section of a wind turbine blade; Scientia Iranica; 2011 (18)349-357

[13] A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken; On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines; Energy 180 (2019) 838-857

[14] M. Maali Amiri, M. Shadman, S. F. Estefen; URANS simulations of a horizontal axis wind turbine under stall condition using Reynolds stress turbulence models; Energy 213 (2020) 118766

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]