

بهبود عملکرد توربین باد محور عمودی بر مبنای شیوه‌های کنترل جریان فعال و غیرفعال و مقایسه‌ی آنها

سعید کریمیان علی‌آبادی* (استاد)

مهدی یادگاری (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

شاهین تیمورپور (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۹)
دوری ۳-۳، شماره‌ی ۲، ص. ۷۱-۶۱

نوشتار حاضر به بررسی و مقایسه‌ی عملکرد توربین بادی محور عمودی با اعمال ۵ روش کنترلی مختلف شامل روش‌های فعال مکش و دمش جریان و روش‌های غیرفعال ریبلت، حفره و ساختار متخلخل به‌عنوان شیوه‌ی جدید می‌پردازد. توربین باد انتخاب شده در این تحقیق از نوع داریوس و پارامتر مورد مطالعه در این بررسی‌ها عمدتاً ضریب توان است. مشخصه‌های هندسی و ابعاد عملگرها تا حد امکان مشابه انتخاب شده تا امکان مقایسه‌ی بهتر فراهم شود. شبیه‌سازی و حل عددی جریان در نرم‌افزار استار سی‌ام به‌صورت دوبعدی انجام شده است. معادلات حل جریان، معادلات ناویر-استوکس ناپایا و مدل توربولانسی $k-\epsilon$ انتخاب شده است. اعتبارسنجی نتایج بر مبنای داده‌های تجربی و برای حالت اولیه‌ی توربین که فاقد کنترل جریان است انجام شده است. سپس حل عددی برای هریک از شیوه‌های کنترلی انجام شده و ارزیابی صورت گرفته است. نتایج کیفی حاصل از میدان جریان نشان می‌دهد به میزانی که روش کنترلی در کاهش اثرات ناحیه دنباله مؤثر است، به همان میزان ضریب توان و یا راندمان بهبود پیدا کرده است. نتایج کمی نشان می‌دهد روش‌های کنترلی فعال دمش و مکش با بهبودی در حدود ۶ درصد در نسبت سرعت نوک پره ۱/۷ و ۲/۶۴ عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های کنترلی داشته‌اند. روش جدید معرفی شده که بکارگیری ساختار متخلخل در بخشی از پره است، به میزان ۱ درصد بهبود عملکرد در نسبت سرعت نوک پره ۱/۷ به همراه داشته که البته با لحاظ مزیت‌های اکوستیکی و کاهش نویز می‌تواند به‌عنوان یک روش غیر فعال مناسب کاربرد داشته باشد. در ادامه همچنین به بررسی پارامتریک هرکدام از این روش‌های کنترلی پرداخته شده است. میزان تغییر ضریب توان به شدت عملگر و نسبت سرعت نوک پره بستگی دارد. به‌عنوان یک نتیجه‌ی کاربردی می‌توان ترکیبی از این شیوه‌های کنترل جریان را در فازهای عملکرد متفاوت توربین پیشنهاد کرد.

واژگان کلیدی: توربین بادی محور عمود، کنترل جریان، ریبلت، حفره، مکش، دمش، ساختار متخلخل.

۱. مقدمه

در سال ۲۰۰۰، به ۵۳۷ پتاژول در سال ۲۰۱۰ افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۳۰ به ۲۳۰۰ پتاژول برسد.^[۱] در طی زمان، طرح‌های مختلفی برای توربین‌های باد پیشنهاد شده است. به طور کلی توربین‌های بادی از نظر محور حرکت به دو دسته کلی تقسیم می‌شود: توربین بادی محور افقی (HAWT)^۱ که دارای محور چرخشی موازی با باد است، و توربین بادی محور عمودی (VAWT)^۲ که دارای محور چرخش عمود بر باد است.^[۲] هرکدام از این دو نوع توربین مزایا

انرژی تجدیدپذیر در حال تبدیل شدن به یک جایگزین مقرون به صرفه برای سوخت فسیلی است. در این بین یکی از سیستم‌های بسیار کارآمد در تولید انرژی تجدیدپذیر و پاک، انرژی باد است. تولید خالص انرژی باد اروپا در مدت یک دهه از ۸۰ پتاژول

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۱۱/۱۳۹۸، اصلاحیه ۲۲/۲/۱۳۹۹، پذیرش ۱۰/۳/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J40.2020.55142.1545

karimian@modares.ac.ir
mahdi.yadegari@modares.ac.ir
sh.teymourpour@auto.iust.ac.ir

و معایبی دارند؛ مقایسه‌ی بین این دو نوع توربین به‌طور جامع توسط اریکسون و همکاران^[۳] انجام شده است. اخیراً با توجه به اهمیت تولید الکتریسیته در محل مصرف بیشتر کارها متمرکز بر توربین‌های جریان عمودی بوده است.^[۴] از مهم‌ترین انواع توربین‌های محور عمود می‌توان به توربین محور عمود داریوس (DAWT)^۲ اشاره کرد که اولین بار توسط جورج جین ماری داریوس معرفی شد.^[۵] در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ی به انواع بزرگ این نوع توربین برای تولید توان‌های بالا شده است و این نوع توربین قابلیت تولید توان تا بالاتر از ۱۰ مگاوات را دارد.^[۶]

یکی از مشکلات مهم توربین‌های محور عمود با پره‌های مستقیم (SB – VAWT)^۴ و از آن جمله توربین داریوس، واماندگی دینامیکی است که می‌تواند باعث اتلاف آبرودینامیکی، نوسان بارها و در نتیجه کاهش عملکرد توربین شود.^[۷] در سال‌های اخیر بهینه‌سازی‌های متعددی به‌عنوان مثال با زاویه‌ی گام و نوع ایرفویل برای این نوع توربین انجام شده است. به‌علاوه روش‌های فعال و غیرفعال متعدد برای کنترل جریان در توربین باد و به‌ویژه کنترل پدیده‌ی واماندگی دینامیکی در توربین محور عمود پیشنهاد شده که از آن جمله می‌توان به استفاده از فلپ، لبه‌ی فرار با قابلیت تغییر شکل،^۵ پیچش فعال،^۶ جت‌های ترکیبی، مولدهای گردابه‌ی فعال و غیرفعال و عملگرهای پلاسمایی اشاره کرد.^[۸] از پژوهش‌های انجام شده در حوزه‌ی بهینه‌سازی می‌توان به کارگوسلین^[۹] اشاره کرد که جریان اطراف توربین داریوس با زاویه‌ی گام^۷ و تعداد مختلف پره را مورد بررسی قرار داد. سورامانیان و همکاران^[۱۱] به بررسی اثر نوع ایرفویل و مقدار ضریب پوشایی^۸ بر عملکرد ایرفویل پرداختند. محققین با مدل‌سازی دوبعدی به بررسی عملکرد توربین داریوس با ۲۵ مقطع ایرفویل مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد توربین با مقطع ایرفویل Naca ۰۰۱۸ عملکرد بهتری دارد.^[۱۲] با مانزاکو و آراکوا نیز به بهینه‌سازی ایرفویل و نقش هندسه‌ی شفت وسط توربین و بازوهای اتصال پره‌ها در عملکرد توربین پرداختند که در آن از مطالعه‌ی ضریب توان برای بررسی عملکرد این توربین استفاده شده است؛ نتیجه‌ی آن معرفی یک هندسه‌ی بهینه برای ایرفویل بوده است.^[۱۳] پنگ و همکاران^[۱۴] اخیراً به بررسی اثر ضریب منظری^۹ توربین بر عملکرد آن پرداخته و نشان دادند با افزایش ضریب منظری، ضریب فشار توربین افزایش می‌یابد. از دیگر کارهای جدید به روش عددی در حوزه‌ی بهینه‌سازی می‌توان به کار سنگو و همکاران^[۱۵] اشاره کرد که به بهینه‌سازی انحنای ایرفویل نامتقارن مورد استفاده در توربین محور عمود پرداختند. نتیجه‌ی این تحقیق بهبود عملکرد ایرفویل نامتقارن در سرعت‌های پایین بود.

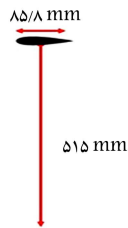
در حوزه‌ی بهبود عملکرد با استفاده از روش‌های کنترلی فعال و غیر فعال، می‌توان به کار وانگ و همکاران^[۱۶] اشاره کرد که به بررسی اثر استفاده از لبه‌های فرار دندانه‌دار بر روی عملکرد توربین‌های داریوس پرداختند و تا ۱۶٫۴ درصد توان آن را بهبود بخشیدند. ژنگ و همکاران^[۶] با استفاده از روش کنترلی فعال و با استفاده از یک محور کوچک دوار در جلو ایرفویل به‌عنوان مولد گردابه، به کنترل واماندگی دینامیکی توربین داریوس پرداختند. چن و همکاران^[۱۷] نیز با روش فعال به بررسی اثرات استفاده از میکروجت بر عملکرد توربین با پره‌های واگرا در ناحیه‌ی لبه‌ی فرار پرداختند. گامیز و همکاران^[۱۸] تأثیر دو نوع از روش‌های کنترل غیرفعال شامل مولد گردابه و فلپ جرنی^{۱۰} بر عملکرد و توان خروجی توربین محور افقی ۵ مگاواتی را بررسی کردند. مطالعات آن‌ها با توسعه‌ی روش BEM انجام شد و در نهایت با استفاده از مطالعه‌ی پارامتریک توان خروجی بین ۳٫۵ تا ۱۰٫۴ درصد افزایش یافت. سواوز و همکاران^[۱۹] به بررسی روش کنترل غیرفعال مولد گردابه میله‌ی (RVG)^{۱۱} در توربین محور عمود به‌صورت سه‌بعدی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد قرار گرفتن این نوع مولد گردابه در ناحیه مشخص در طول پره می‌تواند با ایجاد «اثر محافظتی^{۱۲}» از نفوذ جدایش جریان به نواحی نوک پره جلوگیری کند. ژو و

همکاران^[۲۰] به بررسی اثر روش کنترلی غیرفعال، با تغییر هندسه لبه فرار پره توربین به شکل بلانت داریوس (FCC)^{۱۳} و نیم داریوس (PCC)^{۱۴} پرداختند و نشان دادند هندسه‌ی لبه‌ی فرار نیم حلقوی عملکرد بهتری نسبت به حلقوی دارد. یانگ و همکاران^[۲۱] به بررسی اثر استفاده از ایرفویل مجهز به فلپ برای بهبود عملکرد توربین محور عمود پرداختند و نشان دادند ایرفویل همراه با فلپ اثر مثبت در دمپ گردابه‌های جدایش در لبه‌ی فرار پره توربین دارد. در نهایت نتایج آن‌ها نشان داد با این روش کنترلی ضریب توان تا ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

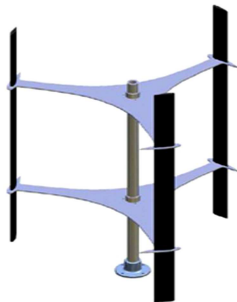
در سال‌های اخیر همچنین مطالعات گسترده‌ی در استفاده از روش فعال عملگر پلاسمایی در کنترل جریان مشاهده شده است.^[۲۲] در زمینه‌ی جت‌های ترکیبی^{۱۵} نیز سالیان سال کارهای متعدد انجام شده است که از جمله جدیدترین کارها می‌توان به کار ژو و همکاران^[۲۳] اشاره کرد که به بررسی اثر تعداد سوراخ‌های دمش و استراژی‌های کنترلی پرداخته و نهایتاً با بهینه‌سازی این روش تا ۱۵٫۲ درصد ضریب توان افزایش یافت. ژو و همکاران^[۲۴] در مقاله‌ی دیگر به بررسی کارهای انجام شده با استفاده از عملگرهای جت در بهبود عملکرد توربین محور عمود پرداختند. تیان و همکاران^[۲۵] اخیراً در روشی غیرفعال به بررسی اثر استفاده از یک محافظه یا منحرف کننده‌ی هوا^{۱۶} بر عملکرد توربین محور عمود با حل عددی دوبعدی پرداختند و تا ۴۶٫۳۲ درصد عملکرد توربین را بهبود بخشیدند. دسوک و همکاران^[۲۶] نیز در مقاله‌ی اثر سه نوع منحرف کننده‌ی هوا را بر عملکرد توربین بررسی کردند. در دیگر مقالات جدید وانگ و همکاران^[۲۷] اثر ایرفویل‌های با قابلیت تغییر شکل^{۱۷} را بر عملکرد توربین جریان محوری بررسی کردند. در این روش در واقع زاویه‌ی کمبر ایرفویل، با استفاده از کنترل فعال در چرخه‌ی توربین دچار تغییر شکل می‌شود. سان و همکاران^[۲۸] نیز در جدیدترین کارها در این حوزه، با استفاده از روش فعال دمش و مکش توأمان، به بهبود عملکرد توربین جریان محوری پرداختند.

علی‌رغم کارهای صورت گرفته، فقدان یک مطالعه‌ی جامع با مقایسه‌ی روش‌های کنترلی فعال و غیر فعال، راهکارهای عملکردی آن‌ها و همچنین اثرات آن‌ها بر رژیم جریان حول توربین باد، احساس می‌شود. به‌طور کلی روش‌های کنترلی غیرفعال و فعال با راهکارهای آشفته کردن جریان، مکش جریان با اندازه حرکت پایین و دمش جریان با اندازه حرکت بالا سعی در تأخیر، کاهش و از بین بردن جریان با اندازه حرکت پایین کرده و نواحی جریان جدا شده و ناحیه Wake را کاهش و عملکرد توربین را بهبود می‌بخشند. بنابراین در این مقاله پنج روش کنترلی شناخته شده مقایسه شده و نقاط بهبود ضریب توان در هر کدام از آن‌ها شناسایی می‌شود. روش‌های کنترلی مقایسه شده در این نوشتار شامل روش‌های شناخته شده فعال دمش و مکش جریان و روش‌های غیرفعال مولد گردابه با ریبلت^{۱۸} و حفره^{۱۹} است.

علاوه بر این روش‌ها در این مقاله روش جدید استفاده از سطح متخلخل همراه با محافظه‌ی زیرین^{۲۰} معرفی می‌شود. روش‌های کنترلی مولد گردابه و دمش و مکش جریان در مطالعات گذشته در حوزه‌ی هوانوردی و توربین، بارها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.^[۲۳، ۱۸، ۷، ۶] در این بین روش استفاده از حفره در حوزه‌ی توربین کم‌تر به آن توجه شده است. از طرف دیگر روش کنترلی ساختار متخلخل که کارایی آن در حوزه‌ی کنترل تداخل شوک و لایه‌ی مرزی^[۲۹] و بهبود عملکرد ایرفویل^[۳۰، ۳۱] ثابت شده است می‌تواند ایده‌ی جدیدی در حوزه‌ی توربین‌های بادی باشد. در این روش سطح متخلخل و محافظه‌ی در زیر آن، در ناحیه‌ی قرار می‌گیرد که نوسانات فشار و پدیده‌های اتلافی مانند جدایش روی سطح محتمل است. سیال داخل محافظه فشار یکنواختی دارد اما بالای سطح متخلخل طیفی از تغییرات فشار مشاهده می‌شود. سطح متخلخل قرار گرفته مابین محافظه و جریان بالای سطح متخلخل نقش رابط را بین این دو جریان دارد. در نواحی‌یی که فشار روی سطح

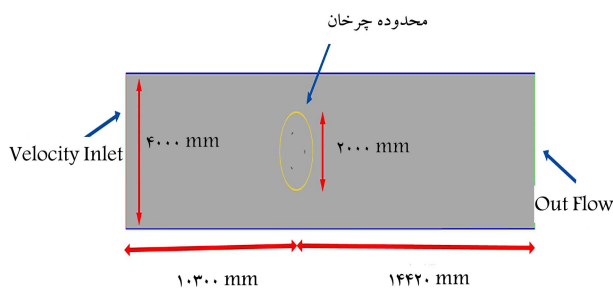


الف) هندسه مدل سازی دو بعدی این مقاله؛

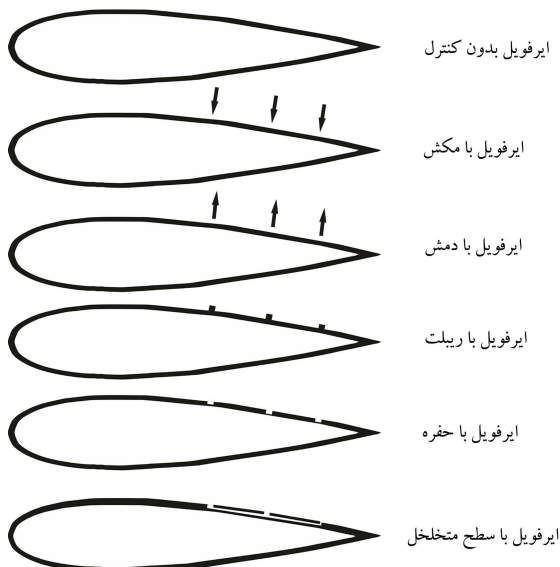


ب) هندسه واقعی.

شکل ۱. هندسه‌ی توربین. [۳۲]



شکل ۲. ابعاد و شرایط مرزی و مشخصات دامنه‌ی حل.



شکل ۳. شیوه‌های کنترل جریان استفاده شده در تحلیل.

بالتر از فشار سیال داخل محفظه باشد جریان از طریق سوراخ‌های موجود روی سطح متخلخل به داخل محفظه مکیده می‌شود و در نواحی بی که فشار پایین تر از فشار سیال داخل محفظه باشد، سیال از محفظه به بالای سطح متخلخل جریان پیدا می‌کند. در نتیجه فشار یکنواختی متناسب با فشار داخل محفظه در قسمت بالای سطح متخلخل ایجاد می‌شود که باعث یکنواختی جریان روی سطح متخلخل، اصلاح لایه‌ی مرزی و در نتیجه کاهش پدیده‌های اتلافی در این ناحیه می‌شود. در ادامه، پس از اعتبار بخشی به مدل توربین داریوس با داده‌های تجربی [۳۲] ضمن بررسی اثر هر روش کنترلی به صورت مجزا بر عملکرد توربین، اثر روش‌های کنترلی نیز با یکدیگر مقایسه می‌شود. در انتها، مطالعه‌ی پارامتریک با بررسی یکی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد هر کدام از این روش‌های کنترلی و سرعت صورت می‌گیرد.

۲. معرفی توربین مبنا

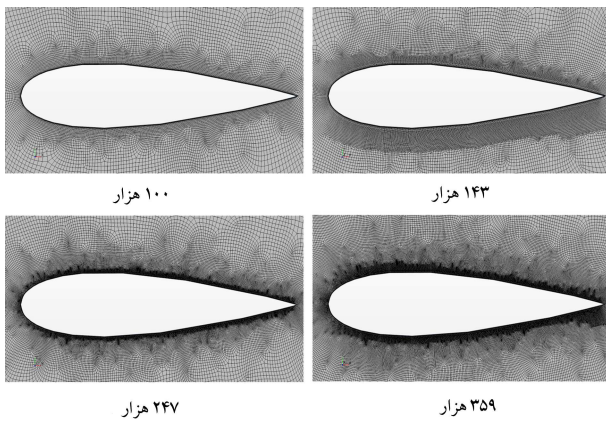
مشخصه‌های هندسی توربین مورد نظر در کار حاضر و همچنین مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی در توربین مطابق جدول ۱ است. مهم‌ترین معیار بررسی عملکرد توربین، توان خروجی آن است. ضریب توان به عنوان پارامتر بی‌بعد توان، به صورت نسبت توان مفید به بیشینه‌ی توان مفید باد ورودی تعریف می‌شود. توان خروجی از توربین محور عمودی خود متأثر از پارامترها متعدد مانند شکل مقطع پره، تعداد پره، ضریب پوشایی، نسبت سرعت نوک پره توربین (TSR) و عدد رینولدز است. [۳۳] لازم به ذکر است برای اعتبار بخشی به حل عددی آیرودینامیکی و همچنین بررسی اثرگذاری روش کنترلی بر عملکرد توربین این پارامتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. مدل سازی هندسی و شبکه‌ی محاسباتی

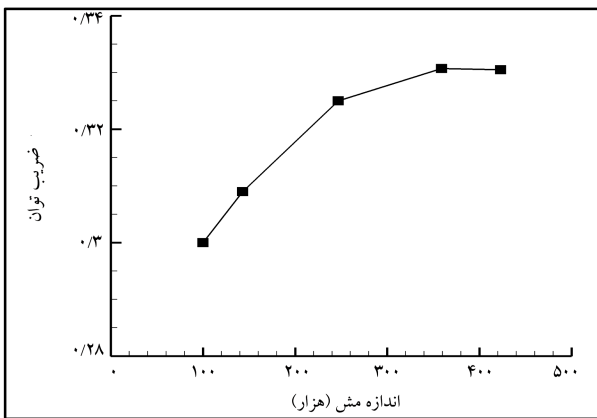
حل عددی به صورت دوبعدی بوده و هندسه‌ی توربین مطابق شکل ۱ است. مراحل آماده‌سازی مدل و تحلیل در نرم‌افزار Star CCM انجام می‌شود. مقطع پره‌ی توربین، ایرفویل متقارن NACA ۰۰۲۱ با طول وتر ۸۵۸ mm و متر است. مطابق ابعاد تونل باد تست تجربی، در این کار عددی از دامنه‌ی حل مستطیلی مطابق شکل ۲ استفاده می‌شود. دامنه‌ی حل به دو قسمت ناحیه‌ی دوار و ناحیه‌ی ایستا تقسیم می‌شود. برای شبیه‌سازی دوران ناحیه‌ی دوار از روش مش لغزان^{۲۱} استفاده می‌شود. هندسه‌های مورد بررسی برای مقایسه‌ی روش‌های کنترلی مطابق شکل ۳ است. به منظور مقایسه‌ی این پنج روش کنترلی سعی شده است هندسه‌ها متناسب

جدول ۱. مشخصه‌های هندسی توربین.

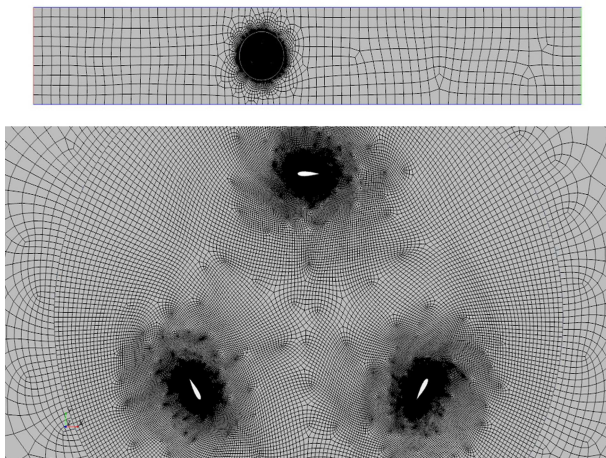
مقدار	پارامتر
H-Darius	نوع توربین
NACA ۰۰۲۱	مقطع ایرفویل (C)
۳	تعداد پره
۸۵٫۸ میلی‌متر	طول وتر ایرفویل
۰/۵ C	محل اتصال بازو
۱۰۳۰ میلی‌متر	قطر توربین (D)
پارامتر متغیر	نسبت سرعت نوک پره‌ی توربین $TSR = \frac{R\omega}{V}$
صفر درجه	زاویه‌ی نصب پره نسبت به بازو
۰/۲۵	ضریب پوشایی $\sigma = \frac{NC}{R}$



شکل ۴. شبکه‌های مورد بررسی برای استقلال حل از شبکه.



شکل ۵. بررسی استقلال حل از شبکه در $TSR = 2.64$.



شکل ۶. شبکه‌بندی مورد استفاده در حل عددی.

$$\Delta t = \frac{60}{\omega \times 360 \times n} \quad (1)$$

که در آن ω سرعت دورانی بر حسب دور بر دقیقه است؛ n نیز تعداد گام زمانی در هر درجه است که مقادیر ۱، ۲، ۳ و برای سرعت دورانی ۴۴۰/۵ ($\lambda = 2.64$) به ترتیب منجر به مقدار گام زمانی ۰٫۰۰۰۰۹۷۶، ۰٫۰۰۰۰۴۸۸، ۰٫۰۰۰۰۲۴۴ و ۰٫۰۰۰۰۱۶۳ می‌شود. مطابق شکل ۷، در حالت ۲ گام زمانی در هر درجه که معادل با گام زمانی ۰٫۰۰۰۰۲۴۴ است، می‌توان گفت استقلال حل از گام زمانی حاصل

جدول ۲. شرایط مرزی در مدل‌سازی روش‌های کنترلی.

مرز مورد نظر	نحوه مدل‌سازی شرایط مرزی
ورودی تونل	شرایط مرزی سرعت ورودی ^۱
خروجی تونل	شرایط مرزی جریان خروجی ^۲
دیواره تونل باد	شرایط مرزی دیواره ^۳
ایرفویل‌های توربین	شرایط مرزی دیواره
مرز بین ناحیه‌ی دوار و ایستا	سطح رابط ^۴
دمش	شرایط مرزی سرعت ورودی با مقدار مشخص مثبت
مکش	شرایط مرزی سرعت ورودی با مقدار مشخص منفی
ریبالت	مدل‌سازی هندسی برآمدگی
حفره	مدل‌سازی هندسی تو رفتگی
سطح متخلخل و محفظه زیرین	مدل‌سازی هندسی

^۱velocity inlet

^۲outflow

^۳wall

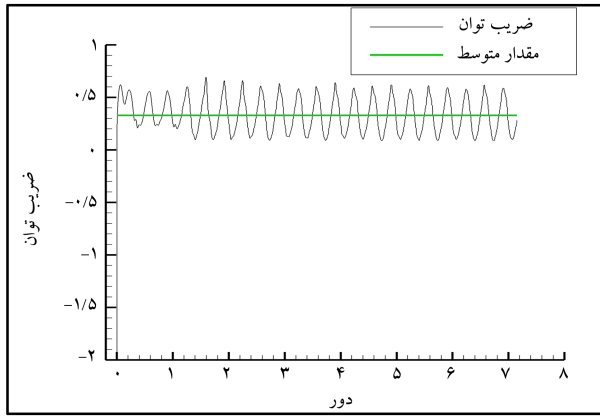
^۴interface

انتخاب شوند، بدین ترتیب، سه ناپویستگی هندسی در هر پنج روش کنترلی مشاهده می‌شود که محل قرارگیری ناحیه‌ی مکش، دمش، حفره، ریبالت و سوراخ‌های سطح متخلخل‌اند. این سه ناپویستگی در ۵۵، ۷۰ و ۸۵ درصد طول وتر قرار گرفته‌اند. این سه ناحیه با توجه به این که در منطقه‌ی شتاب منفی جریان روی ایرفویل قرار دارند، بسیار مستعد جدایش و پدیده‌های اتلافی آن هستند. بنابراین روش‌های کنترلی در سه نقطه با فاصله‌ی مساوی در این سه ناحیه انتخاب می‌شود. قطر سوراخ‌های مکش و دمش، قطر و عمق حفره، ضخامت و ارتفاع ریبالت، قطر سوراخ‌های سطح متخلخل و عمق محفظه‌ی زیر سطح متخلخل همگی برابر و معادل ۰٫۷ درصد طول تراست. طول کل صفحه‌ی متخلخل ۳۱ درصد طول وتر و شدت تخلخل ۲۲ آن ۶٫۷ درصد است. خلاصه‌ی این شرایط مرزی استفاده شده برای این شبیه‌سازی و مدل‌سازی هریک از روش‌های کنترلی مطابق جدول ۲ است.

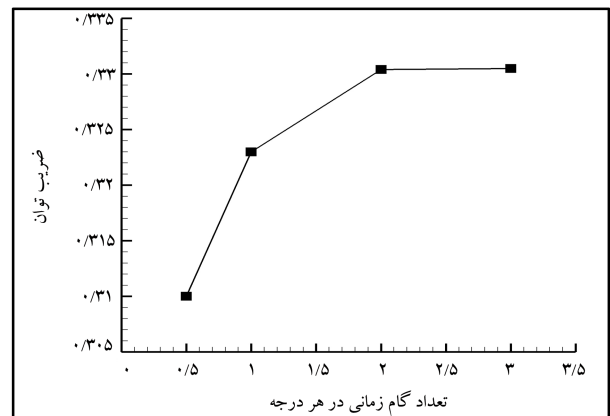
۴. تنظیمات حل عددی

در این کار عددی از شبکه‌ی سازمان یافته با استفاده از نرم‌افزار تولید مش نرم‌افزار CD – Adapco Star CCM در این کار عددی از شبکه‌ی سازمان یافته با استفاده از نرم‌افزار تولید مش نرم‌افزار CD – Adapco Star CCM استفاده شده است. پس از بررسی شبکه‌های مختلف مطابق شکل‌های ۴ و ۵، شبکه‌ی مورد نظر برای این حل عددی شبکه با ۳۵۹ هزار سلول با توجه به استقلال حل از شبکه در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ۶، به منظور مدل‌سازی دقیق رفتار جریان در نزدیک پره از شبکه‌ی ریز در این نواحی استفاده شده است و همچنین برای مدل‌سازی دقیق رفتار آشفتگی جریان بر روی سطح پره‌ها از مش لایه مرزی استفاده شده است. شبکه در دو طرف سطح رابط ناحیه‌ی دوار و غیردوار مشابه است تا روند همگرایی بهیود یابد.

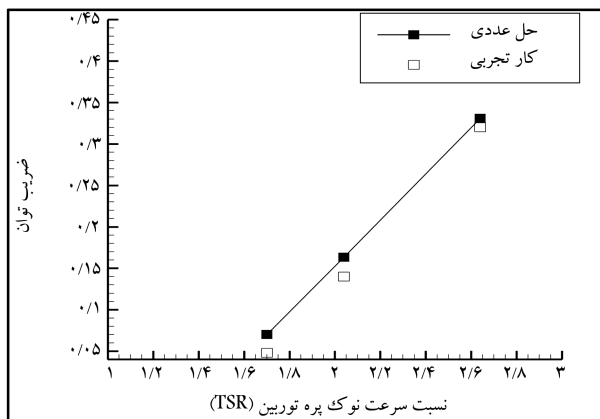
در این کار عددی از روش حجم محدود با استفاده از حل‌گر تجاری Star CCM استفاده شده است. معادلات جریان معادلات بقای جرم، انرژی و اندازه حرکت است که به معادلات ناویر-استوکس معروف است. با توجه به سرعت پایین جریان، جریان تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود. به منظور حل دقیق معادلات، گسسته‌سازی از مرتبه‌ی ۲ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به پدیده‌های فیزیکی وابسته به زمان، حل جریان به صورت ناپایاست. برای تعیین گام زمانی بررسی می‌شود که با تغییر تعداد گام زمانی در هر درجه تغییر زاویه‌ی آزیموت توربین، ضریب توان چه مقدار تغییر می‌کند. بدین ترتیب گام زمانی مطابق معادله‌ی ۱ محاسبه می‌شود:



شکل ۸. تغییرات ضریب توان برحسب زمان برای $TSR = 2.04$.



شکل ۷. بررسی استقلال حل از گام زمانی در $TSR = 2.64$.



شکل ۹. مقایسه‌ی نتایج حل عددی ایرفویل بدون کنترل با نتایج کار تجربی. [۲۲]

سه نقطه مطابق با داده‌های تست تجربی، از این جهت انتخاب شده است تا سه محدوده‌ی توان پایین (در $\lambda = 1/7$)، متوسط (در $\lambda = 2/0.4$) و بیشینه (در $\lambda = 2/6.4$) را پوشش دهد. همچنین انتخاب این سه نقطه باعث می‌شود اثرات روش‌های کنترلی بر فیزیک متفاوت جریان با توجه به تفاوت رینولدز، مشاهده و بررسی شود. چنان‌که اشاره شد مقدار $2/6.4$ بالاترین توان به دست آمده از این نوع توربین مطابق با نتایج تجربی است.

به منظور مقایسه‌ی نتایج در این کار عددی از ضریب توان استفاده می‌شود. با توجه به تغییرات ضریب توان در زمان حرکت توربین مطابق با کارهای عددی مشابه، از مقدار میانگین این ضریب استفاده می‌شود. این مقدار پس از تعداد حدوداً ۸ دور که میانگین نوسانات به یک مقدار مشخص سوق پیدا می‌کند (شکل ۸) در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است مقدار متوسط هر نمودار با میانگین‌گیری داده‌های خروجی نرم‌افزار در بازه‌های زمانی ثابت به دست می‌آید. به این ترتیب نهایتاً با مقایسه‌ی نتایج کار عددی و تجربی مطابق شکل ۹ اختلاف بین نتایج در نسبت سرعت نوک پره $7/1$ در حدود ۲۲ درصد، در نسبت سرعت نوک پره $2/0.4$ در حدود ۴ درصد است. بنابراین کار عددی انطباق نسبتاً خوبی با نتایج کار تجربی دارد. این اختلاف نتایج به این دلیل است که در مدل‌سازی دو بعدی، پدیده‌های سه بعدی جریان مانند اثرات گردابه‌های نوک پره (که ناشی از محدود بودن طول پره است) و اثرات بازوهای نگهدارنده دیده نشده و تا حدودی جواب بالاتر از حد معمول است.

جدول ۳. فرضیات مدل‌سازی.

نوع مدل‌سازی	دو بعدی (بدون در نظر گرفتن اثرات پره متناهی)
وابستگی به زمان	حل ناپایا
تراکم‌پذیری	فرض تراکم‌ناپذیر
نوع جریان	آشفته
مدل توربولانسی	$k - \epsilon$
شدت آشفتگی جریان ورودی	0.1
گسسته‌سازی معادلات	مرتب‌به ۲
گام زمانی	دو گام در هر درجه چرخش روتور

شده است. لازم به ذکر است مقدار 0.5 برای m معادل با دو درجه حرکت توربین در هر گام زمانی است.

انتخاب مدل توربولانسی در این کار عددی بسیار حائز اهمیت است. با توجه به این که هر یک از ایرفویل‌ها در این نوع توربین و اماندگی دینامیکی را تجربه می‌کنند، مدل‌سازی آشفتگی این نوع توربین‌ها با پیچیدگی‌هایی همراه است. [۲۴] در کارهای مختلف از مدل‌های توربولانسی مختلف در مدل‌سازی فیزیکی جریان حول این نوع توربین‌ها استفاده شده است [۲۵، ۲۶] اما بیشتر مدل‌های RANS و بخصوص $k - \omega$ و $k - \epsilon$ مورد توجه بوده است. کستلی [۲۲] اشاره دارد که مدل $k - \epsilon$ در مدل‌سازی دو بعدی و $k - \omega$ SST در مدل‌سازی سه بعدی جریان این نوع توربین‌ها مؤثرتر است. در این کار عددی نیز با بررسی این دو مدل مشاهده شد که نتایج مدل توربولانسی $k - \epsilon$ به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. بنابراین در نوشتار حاضر، با توجه به نتایج کستلی [۲۲] و مقایسه‌ی مدل‌ها، از مدل $k - \epsilon$ استفاده می‌شود. در نهایت مشخصات کار عددی مطابق جدول ۳ است.

۵. اعتبار بخشی به حل

به منظور اعتبار بخشی به مدل عددی از داده‌های تجربی کاستلی و همکاران [۲۲] که در تونل باد با ابعاد 3800×4000 میلی‌متر انجام شده است، استفاده می‌شود. به همین منظور سرعت جریان ورودی ۹ متر بر ثانیه ثابت بوده و سرعت دورانی توربین و در نتیجه نسبت سرعت نوک پره λ تغییر می‌کند. مقدار رینولدز جریان در نقطه‌ی همیشه، با توجه به مشخصه‌های هندسه و جریان $10^5 \times 4/8$ است. تنظیمات صورت گرفته برای اعتبار بخشی به نتایج عددی مطابق جدول ۴ است. سه λ متفاوت در این اعتبار بخشی و به طور کلی در این مقاله بررسی می‌شود؛ این

جدول ۴. تنظیمات حل برای اعتباربخشی به نتایج عددی در سه نقطه.

نسبت سرعت نوک پره (λ)	سرعت زاویه‌یی (Rad/s)	سرعت جریان ورودی (m/s)	گام زمانی (S)	اندازه‌ی شبکه
۱٫۷	۲۹٫۷	۹	۰٫۰۰۰۲۹۳	۳۵۹۰۰۰
۲٫۰۴	۳۵٫۶۵	۹	۰٫۰۰۰۲۴۴	۳۵۹۰۰۰
۲٫۶۴	۴۶٫۱۳	۹	۰٫۰۰۰۱۸۹	۳۵۹۰۰۰

مکش) در محدوده‌ی این زوایا، باعث بهبود عملکرد توربین در یک چرخه‌ی کامل شد.

به منظور مقایسه‌ی بهتر و توصیف فیزیکی رفتار روش‌های کنترلی، در این جا روش‌های فعال مطابق شکل ۱۲ با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همان‌طور که مشخص است هر دو روش فعال در محدوده‌ی زوایای ۲۲۵-۳۶۰ درجه عملکرد بهبودی خود را به وضوح نشان می‌دهند. این رفتار بهبودی در زوایای حدود ۳۰-۳۰۰ درجه و با از بین رفتن ریزش گردابه‌ها که باعث اتلاف توان می‌شود، مشاهده می‌شود (شکل ۱۳). در این بین روش دمشی در محدوده‌ی ۰-۱۲۰، ۲۱۰-۲۱۵ و ۲۸۵-۲۱۵ عملکرد بهتری نسبت به روش مکش با همان شدت دارد و در سایر نواحی مکش عملکرد بهتری را در بهبود ضریب توان از خود نشان می‌دهد.

مقایسه‌ی روش‌های غیرفعال نشان می‌دهد که سطح متخلخل نسبت به سایر روش‌های غیرفعال در محدوده‌ی زوایای ۹۰-۱۰۵ درجه، و نسبت به ریبلت در محدوده‌ی ۲۰-۲۱۰ درجه عملکرد بسیار بهتری دارد (شکل ۱۴). در سایر زوایا حفره معمولاً عملکرد بهتری دارد.

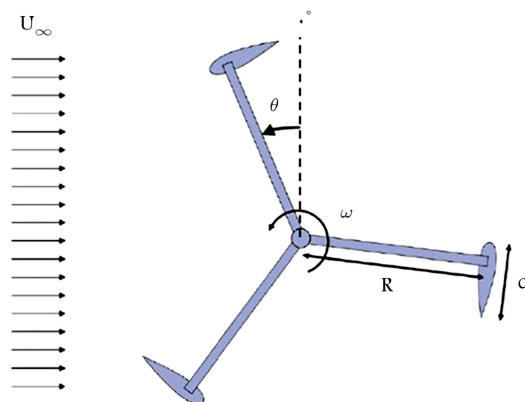
بررسی دقیق رفتار و ساختار جریان حول ایرفویل در هر زاویه می‌تواند بیان‌گر علت این تفاوت‌ها در ضریب توان باشد. در این قسمت به منظور بررسی علت این مشاهدات در ضریب توان، تمام روش‌های کنترلی به عنوان نمونه در محدوده ۲۳-۲۵ درجه چرخش یک پره مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۱۵). چنان که مشاهده می‌شود در محدوده‌ی زاویه‌ی ۲۴۵ درجه، تمام روش‌های کنترلی به جز ریبلت، ضریب توان بالاتری دارند. یکی از مواردی که باعث اتلاف جریان و کاهش ضریب توان (به عنوان راندمان) در توربین‌های بادی می‌شود، رشد و تشکیل گردابه‌ها و در واقع ناحیه Wake در پشت هر پره است.^[۲۳] به همین دلیل رفتار ناحیه‌ی Wake و اندازه‌ی آن در زاویه‌ی حدود ۲۴۵ درجه بررسی می‌شود. بدین منظور، کانتور انرژی جنبشی توربولانس در این ناحیه تهیه می‌شود. ناحیه‌ی Wake با تمام روش‌های کنترلی به جز ریبلت، نسبت به حالت بدون کنترل رشد کم‌تری دارد (شکل ۱۶). این رشد با نقطه‌ی جدایش جریان، ضخامت ناحیه‌ی Wake و شدت انرژی جنبشی توربولانس مشخص می‌شود. مقایسه‌ی ناحیه‌ی Wake بین روش‌های غیرفعال به دلیل تفاوت اندکی دشوار است اما شدت آشفتگی و اندازه‌ی ناحیه‌ی Wake بین روش‌های فعال دمشی و مکش نسبت به حالت بدون کنترل به طور محسوس قابل مشاهده است. مقایسه‌ی ناحیه‌ی wake در دو روش ساختار متخلخل و حفره نشان می‌دهد در هر دو روش طول این ناحیه نسبت به حالت بدون کنترل کاهش یافته و در نتیجه ضریب توان در این محدوده برای هر دو روش بهبود یافته است. در روش ریبلت با وجود کاهش طول ناحیه‌ی Wake شدت آن به خصوص در نواحی دورتر از سطح بیشتر از حالت بدون کنترل است. بنابراین در تعامل بین این دو عامل، تقریباً ضریب توان با حالت بدون کنترل برابر و در برخی موارد حتی کم‌تر از آن است. بنابراین می‌توان نتایج (شکل ۱۵) و رفتار پره توربین در تمام زوایا را بررسی و توجیه کرد.

۶. نتایج حاصل و مقایسه‌ی روش‌ها

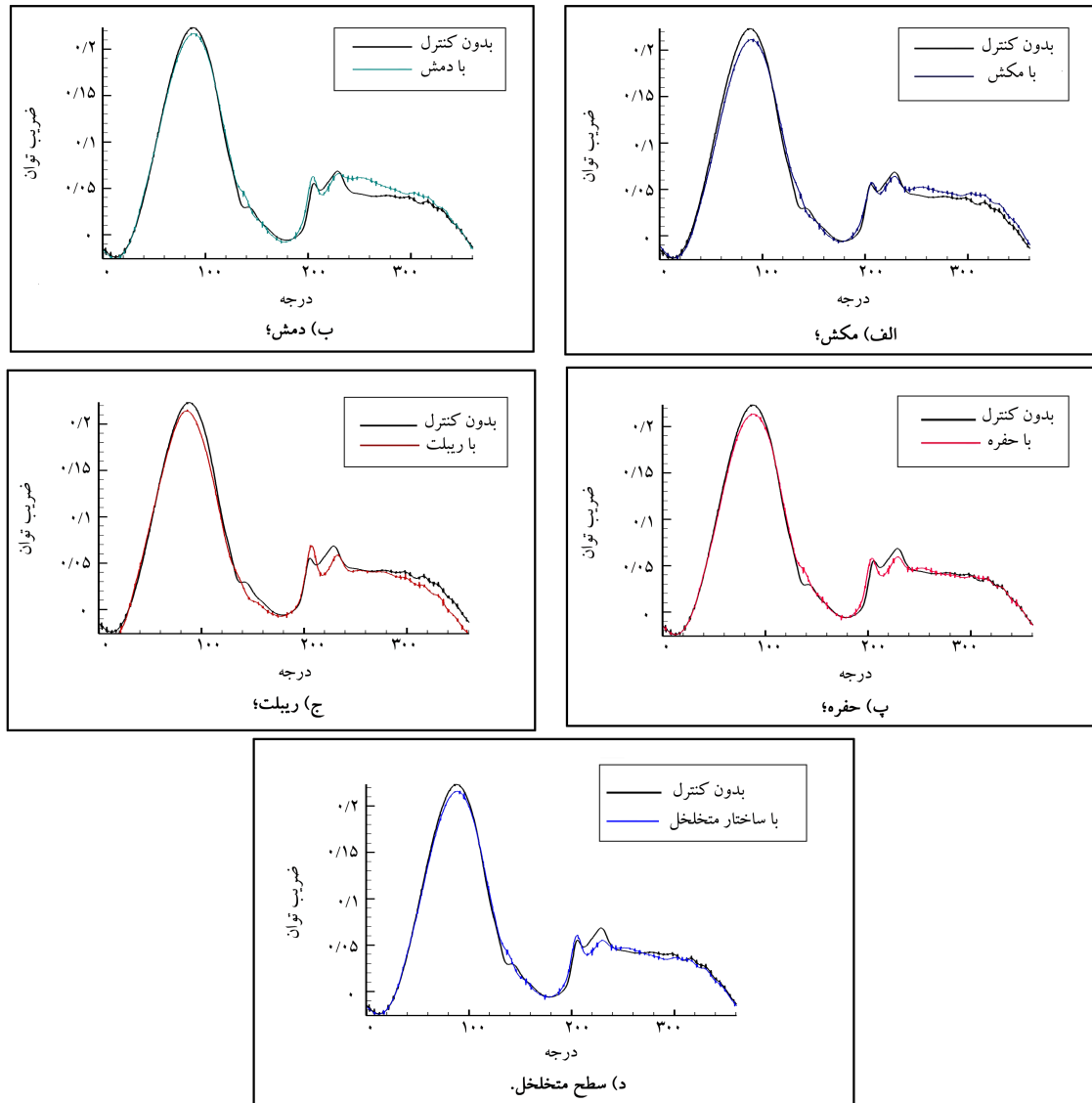
۱.۶. مطالعه در نسبت سرعت نامی

همان‌طور که اشاره شد در این مقاله ۵ روش کنترلی شامل روش‌های شناخته شده فعال دمشی و مکش جریان، و روش‌های غیرفعال ریبلت، حفره و سطح متخلخل مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد. بررسی دقیق رفتار توربین در λ معادل ۲٫۶۴ که نقطه‌ی پیشینه‌ی ضریب توان توربین است صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است سرعت دمشی و مکش جریان در دو روش کنترلی فعال، معادل ۵ متر بر ثانیه است. در بررسی‌های صورت گرفته، زاویه‌ی دوران مطابق شکل ۱۰ در نظر گرفته می‌شود.

به منظور بررسی بهتر اثر هر کدام از روش‌های کنترلی، مقایسه‌ی ضریب توان هر کدام از روش‌های معرفی شده با توربین بدون کنترل، در ۳۶۰ درجه دوران یک پره می‌تواند مفید باشد. نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که روش‌های مکش و دمشی در تمام طول حرکت روتور به جز زوایای حدود ۹۰ و ۲۱۰ درجه، عملکرد مناسبی دارد و باعث بهبود ضریب توان می‌شود. روش حفره در محدوده‌ی زوایای اطراف ۱۲۰، ۲۰۰ و ۲۶۰ درجه عملکرد مناسبی داشته و در نقاط اوج ضریب توان شامل ۹۰ و ۲۱۰ درجه، مانند روش‌های فعال عملکرد مناسبی ندارد. روش ریبلت به جز در محدوده کوچکی در حوالی زاویه‌ی ۲۰۵ درجه در سایر نقاط عملکرد مناسبی ندارد. در نهایت رفتار سطح متخلخل از نظر عملکردی بسیار شبیه رفتار حفره است با این تفاوت که مقدار افت ضریب توان در محدوده‌ی ۹۰ درجه کم‌تر و در محدوده‌ی ۲۸۰ درجه بیشتر است. نکته‌ی قابل توجه این است که تمام روش‌های کنترلی در محدوده‌ی زاویه‌ی ۹۰-۱۰۰ درجه عملکرد بسیار نامناسبی دارند. بنابراین می‌توان با اعمال سیستم کنترلی به هر کدام از این روش‌های کنترلی و توقف عملکرد آن‌ها (به عنوان مثال قطع دمشی یا



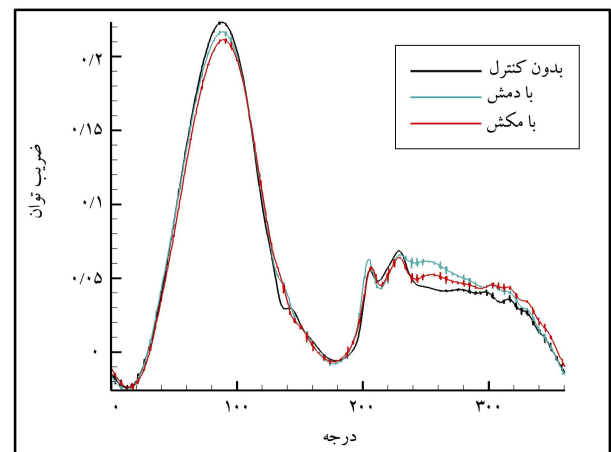
شکل ۱۰. تعریف زاویه‌ی دوران.



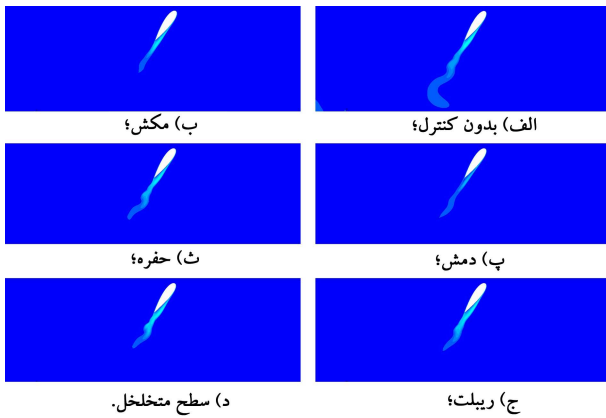
شکل ۱۱. مقایسه‌ی روش‌های کنترلی.

۲.۶. مطالعه در طیف نسبت سرعت نوک پره

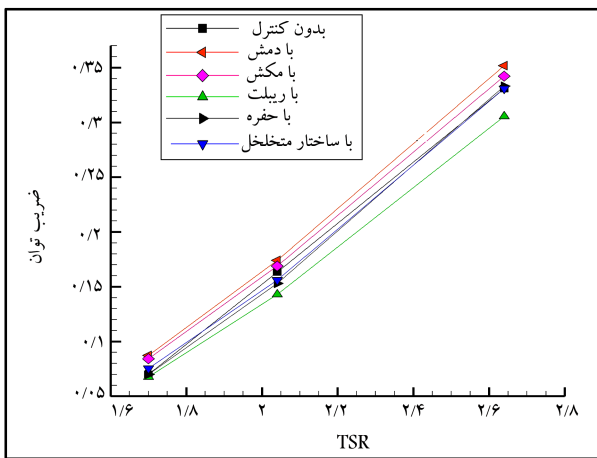
تغییرات ضریب توان با روش‌های کنترلی نسبت به حالت بدون کنترل در TSRهای مختلف مطابق شکل ۱۷ است. مطابق نتایج، روش‌های کنترلی مکش و دمش در تمام TSRها باعث بهبود عملکرد توربین می‌شود. این بهبود در TSRهای ۱/۷ و ۲/۶۴ مؤثرتر و در حدود ۶ درصد است. نتایج همچنین نشان می‌دهد در تمام TSRها (به‌ویژه $TSR = 2/64$) عملکرد بهبودی مکش بیشتر از دمش بوده است. روش سطح متخلخل در مقدار $TSR = 1/7$ عملکرد بهتری نسبت به مابقی موارد دارد (در حدود ۱ درصد بهبود). همچنین در این روش ساختار متخلخل نسبت به ریپلت و حفره بهترین عملکرد را داشته است. عملکرد روش کنترلی ریپلت تقریباً در تمام TSRها نامناسب است و فقط در $TSR = 1/7$ عملکرد آن تقریباً خنثی است. روش کنترلی حفره به جز در $TSR = 2/64$ که عملکرد نامناسبی دارد در سایر TSRها در حدود ۱ درصد باعث بهبود عملکرد آیرودینامیکی می‌شود.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی روش‌های فعال.



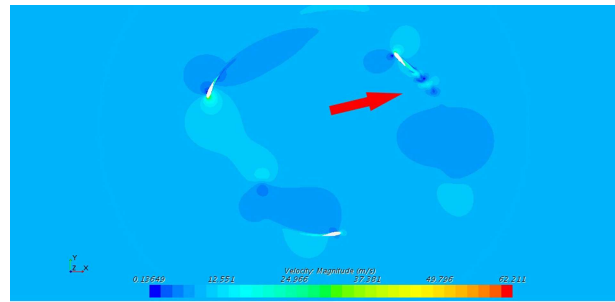
شکل ۱۶. مقایسه‌ی رفتار Wake در پشت پره در زاویه ۲۴.۵ درجه.



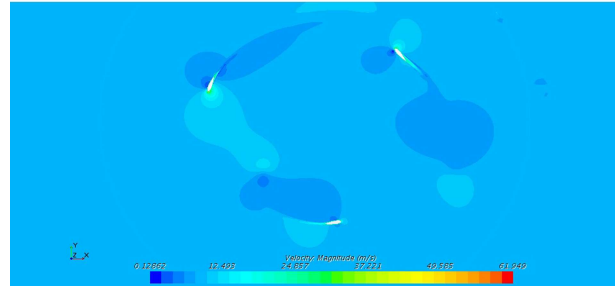
شکل ۱۷. مقایسه‌ی ضریب توان روش‌های کنترلی در TSRهای مختلف.

۳.۶. مطالعه‌ی پارامتری شدت کنترل جریان

در این قسمت با تغییر یکی از پارامترهای مؤثر هر کدام از روش‌های کنترلی، اثر آن بر ضریب توان بررسی و مقایسه می‌شود. بررسی‌های مقایسه‌ی در $TSR = 2/64$ که معادل بالاترین ضریب توان توربین است، انجام می‌گیرد. در روش کنترلی مکش و دمزش میزان سرعت دمزش و مکش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور بی‌بعد کردن سرعت مکش و دمزش از سرعت جریان آزاد استفاده می‌شود. مطابق شکل‌های ۱۸ و ۱۹، با افزایش نسبت سرعت مکش و دمزش ضریب توان افزایش پیدا می‌کند. گرادیان فشار معکوس روی سطح و تلفیق آن با دوران توربین موجب کاهش اندازه حرکت جریان و جدا شدن آن از روی سطح می‌شود. در روش کنترلی دمزش، جریان با اندازه حرکت زیاد به داخل ناحیه‌ی جریان با اندازه حرکت کم تزریق می‌شود، بنابراین اندازه حرکت کلی جریان افزایش یافته و در نتیجه جریان با اندازه حرکت زیاد در مقابل جدایش مقاومت می‌کند. این مقاومت باعث تأخیر در جدایش و در نتیجه کاهش ناحیه‌ی Wake در پشت هر ایرفویل توربین می‌شود که در نهایت افزایش ضریب توان را به همراه دارد. بنابراین افزایش سرعت دمزش جریان موجب افزایش اندازه حرکت جریان و بهبود بیشتر شرایط عملکردی توربین می‌شود. در خصوص روش مکش، جریان با اندازه حرکت کم که مستعد جدایش است مکیده شده و جریان با اندازه حرکت بالا از بالا دست جایگزین آن می‌شود. بنابراین در

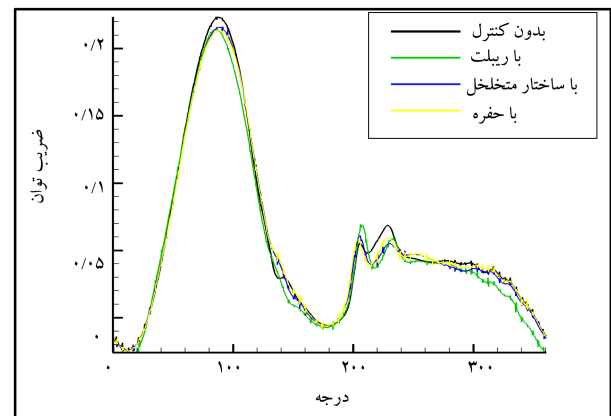


الف) ایرفویل بدون کنترل؛

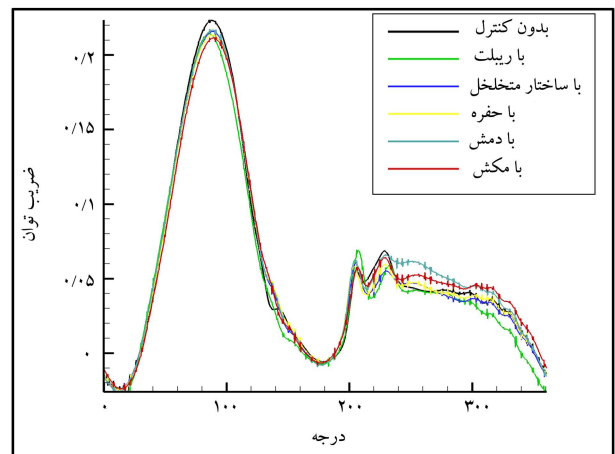


ب) ایرفویل همراه با کنترل فعال دمزش.

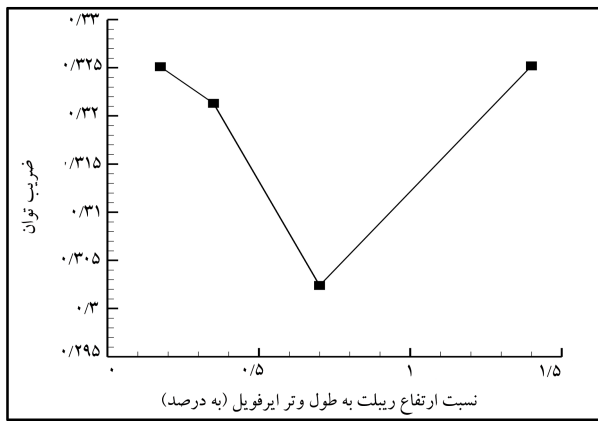
شکل ۱۳. مقایسه‌ی کانتور سرعت.



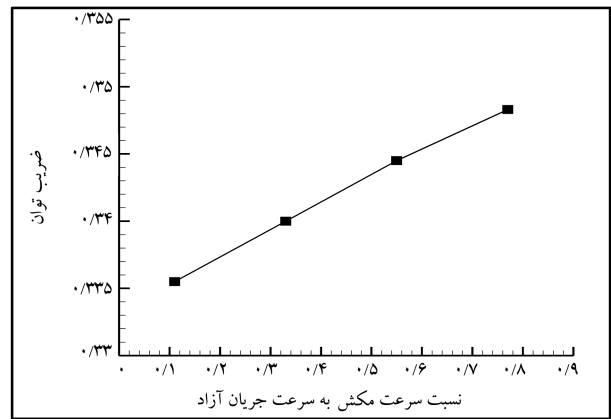
شکل ۱۴. مقایسه‌ی روش‌های غیر فعال.



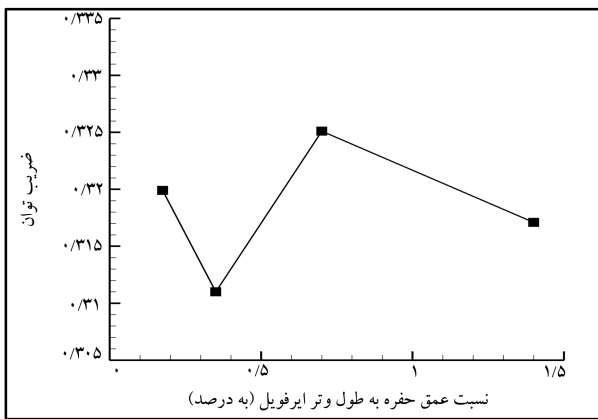
شکل ۱۵. مقایسه‌ی تمام روش‌های کنترلی در محدوده‌ی ۲۳۰ تا ۲۵۰ درجه تغییر زاویه یک پره.



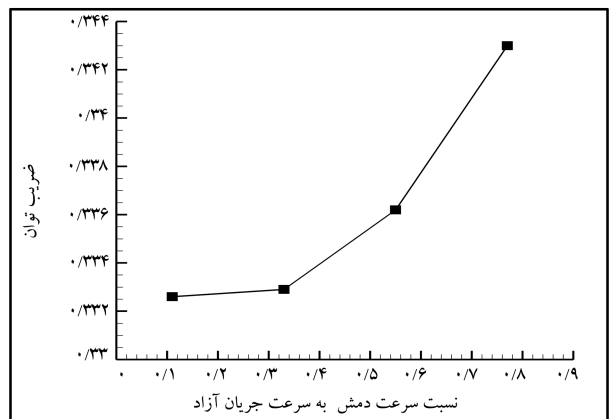
شکل ۲۰. مقایسه‌ی اثر ارتفاع ریب به طول وتر ایرفویل بر ضریب توان.



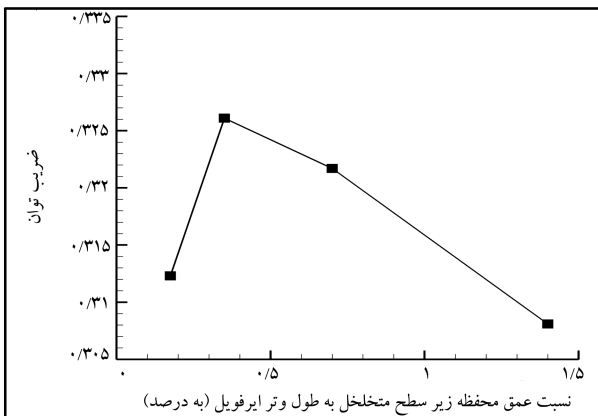
شکل ۱۸. مقایسه‌ی اثر شدت مکش بر ضریب توان.



شکل ۲۱. مقایسه‌ی اثر عمق حفره بر ضریب توان.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی اثر شدت دمش بر ضریب توان.



شکل ۲۲. مقایسه‌ی اثر عمق محفظه و سطح متخلخل بر ضریب توان.

نهایت مکش بیشتر باعث کاهش بیشتر جریان با اندازه حرکت کم و بهبود بیشتر ضریب توان می‌شود.

در روش کنترلی ریب، میزان ارتفاع ریب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این ارزیابی به منظور بی بعد کردن ارتفاع ریب از طول وتر ایرفویل استفاده می‌شود. مطابق شکل ۲۰ میزان ضریب توان با افزایش ارتفاع ریب تا مقدار ۰/۷ درصد طول وتر ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. ریب به عنوان یک ناپوستگی در مسیر جریان با اعمال اغتشاش عمده به جریان باعث افزایش اندازه حرکت جریان نزدیک ناحیه جدایش می‌شود. از طرف دیگر این اغتشاش خود می‌تواند باعث رشد ناحیه Wake شود. در این بین ارتفاع ریب پارامتر بسیار مهمی در تعامل بین این دو پدیده مخرب و مفید است. بنابراین با تغییر ارتفاع ریب، رفتار جریان، ناحیه wake و در نتیجه ضریب توان، در تعامل این دو پدیده می‌تواند متغیر باشد. در روش کنترلی حفره، میزان عمق حفره مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این ارزیابی به منظور بی بعد کردن عمق حفره از طول وتر ایرفویل استفاده می‌شود. مطابق شکل ۲۱ میزان ضریب توان در نسبت ۰/۷ درصد طول وتر بیشترین مقدار خود را دارد. در روش حفره، مشابه روش ریب، ناپوستگی و در نتیجه اغتشاش عمده به صورت دیگری به جریان اعمال می‌شود، و مشابه ریب در اینجا عمق حفره پارامتر تعیین کننده در تعامل پدیده مفید و مخرب است.

در روش کنترلی محفظه و سطح متخلخل، میزان عمق محفظه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این ارزیابی به منظور بی بعد کردن عمق محفظه از طول وتر ایرفویل استفاده می‌شود. مطابق شکل ۲۲ میزان ضریب توان در نسبت ۰/۳۵

درصد طول وتر بیشینه خواهد شد. همانطور که در مقدمه اشاره شد روش سطح متخلخل و محفظه با یک دست کردن فشار روی سطح از طریق تلفیق مکش و دمش، باعث کاهش اغتشاشات روی سطح و در نتیجه بهبود ناحیه Wake می‌شود. داخل محفظه زیر سطح متخلخل فشار جریان تقریباً ثابت است و تعامل محفظه با جریان روی سطح متخلخل باعث یک دست شدن فشار جریان روی سطح متخلخل می‌شود. این فشار ثابت به عوامل بسیاری از جمله عمق محفظه بستگی دارد. بنابراین دور از انتظار نیست که با تغییر عمق محفظه و تغییر فشار در این ناحیه فیزیک جریان روی سطح متخلخل

نشان می‌دهد. در نهایت بررسی ضریب توان توربین در TSRهای مختلف نشان داد روش‌های کنترلی مکش و دمش در تمام TSRها باعث بهبود عملکرد توربین می‌شوند. این بهبود در TSRهای ۱٫۷ و ۲٫۶۴ حدود ۶ درصد است. در بین روش‌های غیرفعال روش سطح متخلخل در مقدار $TSR = ۱٫۷$ عملکرد بهتری نسبت به دیگر روش‌ها دارد (در حدود ۱ درصد بهبود). روش کنترلی ریبلت تقریباً در تمام TSRها عملکرد نامناسبی دارد و فقط در $TSR = ۱٫۷$ عملکرد آن تقریباً خنثی است. روش کنترلی حفره به جز در $TSR = ۲٫۰۴$ که عملکرد نامناسبی دارد در سایر TSRها در حدود ۱ درصد باعث بهبود عملکرد آبرودینامیکی می‌شود. همچنین بررسی پارامتریک این روش‌های کنترلی نشان داد در روش کنترلی مکش و دمش با افزایش سرعت مکش و دمش ضریب توان افزایش پیدا می‌کند. در روش کنترلی ریبلت، میزان ضریب توان با افزایش ارتفاع ریب تا مقدار $۰٫۷$ درصد طول وتر ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در روش کنترلی حفره میزان ضریب توان در نسبت عمق حفره $۰٫۷$ درصد از طول وتر بیشینه می‌شود. در شیوه‌ی محافظه و سطح متخلخل میزان ضریب توان در عمق محافظه معادل $۰٫۳۵$ درصد وتر بیشینه می‌شود.

دستخوش تغییر شده و در نتیجه شاهد تغییر ضریب توان با تغییر عمق محافظه باشیم.

۷. نتیجه‌گیری

در این کار عددی، عملکرد توربین محور عمود داریوس با اعمال پنج روش کنترلی مختلف شامل روش‌های شناخته شده فعال، مکش و دمش جریان و روش‌های غیرفعال ریبلت، حفره و ساختار متخلخل بررسی و مقایسه شد. در این مقایسه ضریب توان در یک دور دوران کامل پره با اعمال هرکدام از روش‌های کنترلی بررسی شد. بررسی‌ها نشان داد رفتار Wake در پشت پره‌های توربین تعیین‌کننده‌ی کارایی و در واقع ضریب توان توربین با اعمال روش کنترلی است؛ و هر قدر اثرات این ناحیه محدود شود عملکرد توربین بهبود پیدا می‌کند. به طور کلی تمام روش‌های کنترلی در محدوده‌ی زوایای ۹۰° - ۱۰۰° درجه عملکرد نامناسبی دارند؛ روش دمش نسبت به مکش و روش سطح متخلخل نسبت به حفره و ریبلت عملکرد بهتری از خود

پانوشته‌ها

1. horizontal axis wind turbine (HAWT)
2. vertical axis wind turbine
3. darrius vertical axis wind turbine
4. straight-bladed vertical axis wind turbines
5. deformable trailing edge
6. active twist
7. pitch
8. Solidity
9. aspect ratio
10. gurney
11. rod vortex generator
12. shielding effect
13. full circulation control
14. partial circulation control
15. synthetic Jet
16. air deflector
17. deformable
18. riblet
19. groove
20. porous structure with cavity
21. sliding mesh
22. porosity

منابع (References)

1. Capros, P.P., Mantzos, D.L., Tasios, N. and et al. "EU energy trends to 2030: UPDATE 2009", Publications Office of the European Union, **184**, pp.184 (2010).
2. Rossetti, A. and Pavesi, G. "Comparison of different numerical approaches to the study of the H-Darrius turbines start-up", *Renew. Energy*, **50**, pp. 7-19 (2013).
3. Eriksson, S., Bernhoff, H. and Leijon, M. "Evaluation of different turbine concepts for wind power", *Renew. Sustain. Energy Rev*, **12**, pp. 1419-1434 (2008).
4. Wang, Z., Ozbay, A., Tian, W. and et al. "An experimental study on the aerodynamic performances and wake characteristics of an innovative dual-rotor wind turbine", *Energy*, **147**, pp. 94-109 (2018).
5. D'Ambrosio, M. and Medaglia, M. "Vertical axis wind turbines", *History, Technology and Applications* (2010).
6. Zhong, J., Li, J., Guo, P. and et al. "Dynamic stall control on a vertical axis wind turbine aerofoil using leading-edge rod", *Energy*, pp. 246-260 (2019).
7. Zhu, H., Hao, W., Li, C. and et al. "A critical study on passive flow control techniques for straight-bladed vertical axis wind turbine", *Energy*, **165**, pp. 12-25 (2018).
8. Hansen, M. O. and Aagaard, M.H. "Review paper on wind turbine aerodynamics", *Journal of Fluids Engineering*, **133**(11) (2011).
9. Johnson, S.J. and Berg, D.E. "Active load control techniques for wind turbines", Sandia National Laboratories (2008).
10. Gosselin, R., Dumas, G. and Boudreau, M. "Parametric study of H-Darrius vertical-axis turbines using uRANS simulations", *21st Annual Conference of the CFD Society of Canada*, pp.16 (2013).
11. Subramanian, A., Yogesh, S.A., Sivanandan, H. and et al. "Effect of airfoil and solidity on performance of small scale vertical axis wind turbine using three dimensional CFD model", *Energy*, **133**, pp. 179-190 (2017).
12. Mohamed, M.H., Ali, A.M. and Hafiz, A.A. CFD. "Analysis for H-rotor darrius turbine as a low speed wind energy converter", *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, **18**, pp. 1-13 (2015).

13. Yamazaki, W. and Arakawa, Y. "Inexpensive airfoil shape optimization for vertical axis wind turbine and its validation", *J. Fluid Sci. Technol*, **10**, JFST0015-JFST0015 (2015).
14. Peng, H.Y., Lam, H.F. and Liu, H.J. "Power performance assessment of H-rotor vertical axis wind turbines with different aspect ratios in turbulent flows via experiments", *Energy*, **173**, pp. 121-132 (2019).
15. Sengupta, A.R., Biswas, A. and Gupta, R. "Comparison of low wind speed aerodynamics of unsymmetrical blade H-Darrieus rotors-blade camber and curvature signatures for performance improvement. *Renew*", *Energy*, **139**, pp. 1412-1427 (2019).
16. Wang, Z., Wang, Y. and Zhuang, M. "Improvement of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines with leading-edge serrations and helical blades using CFD and Taguchi method", *Energy Convers. Manag*, **177**, pp. 107-121 (2018).
17. chen H. and Qin N. "Trailing-edge flow control for wind turbine performance and load control", *Renew. Energy*, **105**, pp. 419-435 (2017).
18. Fernandez-Gamiz, U., Zulueta, E., Boyano, A. and et al. "Five megawatt wind turbine power output improvements by passive flow control devices", *Energies*, **10**(6), pp.742 (2017).
19. Martinez Suarez, J., Flaszynski, P. and Doerffer, P. "Application of rod vortex generators for flow separation reduction on wind turbine rotor", *Wind Energy*, **21**, pp. 1202-1215 (2018).
20. Xu, H.Y., Dong, Q.L., Qiao, C.L. and et al. "Flow control over the blunt trailing edge of wind turbine airfoils using circulation control", *Energies*, **11**(3), pp.619 (2018).
21. Yang, Y., Li, C., Zhang, W. and et al. "Investigation on aerodynamics and active flow control of a vertical axis wind turbine with flapped airfoil", *J. Mech. Sci. Technol*, **31**, pp. 1645-1655 (2017).
22. Yu, J., Yu, J., Chen, F. and et al. "Numerical study of tip leakage flow control in turbine cascades using the DBD plasma model improved by the parameter identification method", *Aerosp. Sci. Technol*, **84**, pp. 856-864 (2019).
23. Zhu, H., Hao, W., Li, C. and et al. "Simulation on flow control strategy of synthetic jet in an vertical axis wind turbine", *Aerosp. Sci. Technol*, **77**, pp. 439-448 (2018).
24. Zhu, H., Hao, W., Li, C. and et al. "Application of flow control strategy of blowing, synthetic and plasma jet actuators in vertical axis wind turbines", *Aerosp. Sci. Technol*, **88**, pp. 468-480 (2019).
25. Tian, W., Mao, Z. and Ding, H. "Numerical study of a passive-pitch shield for the efficiency improvement of vertical axis wind turbines", *Energy Convers. Manag*, **183**, pp. 732-745 (2019).
26. Dessoky, A., Bangga, G., Lutz, T. and et al. "Aerodynamic and aeroacoustic performance assessment of H-rotor darrieus VAWT equipped with wind-lens technology", *Energy*, **175**, pp. 76-97 (2019).
27. Wang, Y., Tong, H., Sima, H. and et al. "Experimental study on aerodynamic performance of deformable blade for vertical axis wind turbine", *Energy*, **181**, pp. 187-201 (2019).
28. Sun, X., Xu, Y. and Huang, D. "Numerical simulation and research on improving aerodynamic performance of vertical axis wind turbine by co-flow jet", *J. Renew. Sustain. Energy*, **11**(1), pp.013303 (2019).
29. Doerffer, P. and Szulc, O. "Passive control of shock wave applied to helicopter rotor high-speed impulsive noise reduction", *Task Q*, **14**, pp. 297-305 (2010).
30. Aldheeb, M., Asrar, W., Sulaeman, E. and et al. "Aerodynamics of porous airfoils and wings", *Acta Mech*, **229**, pp. 3915-3933 (2018).
31. Tinetti, A., Kelly, J., Bauer, S. and et al. "On the use of surface porosity to reduce unsteady lift", *In: 15th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, pp. 2921 (2013).
32. Raciti Castelli, M., Ardizzon, G., Battisti, L. and et al. *Modeling Strategy and Numerical Validation for a Darrieus Vertical Axis Micro-Wind Turbine*, **7** Fluid Flow, Heat Transf. Therm. Syst. Parts A B. pp. 409-418 (2010).
33. Overview, G., Summary for policymakers, Earthscan in the UK and USA (2002).
34. Almohammadi, K.M., Ingham, D.B., Ma, L. and et al. "Computational fluid dynamics (CFD) mesh independence techniques for a straight blade vertical axis wind turbine", *Energy*, **58**, pp. 483-493 (2013).
35. Mukinović, M., Brenner, G. and Rahimi, A. "Analysis of vertical Axis Wind Turbines", *Notes Numer. Fluid Mech. Multidiscip. Des*, **112**, pp. 587-594 (2010).
36. Jericha, H., Göttlich, E., Selic, T. and et al. "Novel Vertical-Axis Wind Turbine With Articulated Blading", (2013).