

شبیه‌سازی عددی توربین بادی محور عمودی داریوس سه پره مستقیم

شایسته امینی^۱، محمودرضا گلزاریان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

* ایمیل نویسنده مسئول: m.golzarian@um.ac.ir

چکیده

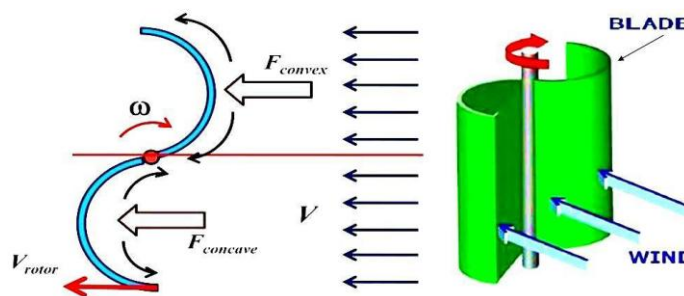
محدودیت‌های برق‌رسانی و تأمین سوخت برای مناطق دورافتاده، استفاده از انرژی باد و سایر منابع انرژی تجدیدپذیر را توجیه می‌کند. هزینه‌های پایین تولید انرژی از طریق باد به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر عامل مهمی بوده‌است تا بسیاری از کشورهای جهان به فکر ساخت توربین‌های بادی بزرگ و کوچک بیفتند و تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای برای بهبود تکنولوژی تولید برق از طریق باد انجام شود. امروزه خیلی از مزارع کشاورزی دور از خطوط و منابع انرژی قرار دارند، بنابراین نیاز به تولید انرژی در محل داریم. توربین‌های بادی راه حل امیدبخشی را برای مناطق دور از شبکه عرضه می‌کنند. توربین‌های بادی محور عمودی توانایی تولید برق در مقیاس بزرگ را ندارند، اما برای تولید انرژی در مکان‌هایی که دور از خطوط توزیع اصلی قرار دارند، واحدهای پراکنده تولید در مقیاس کوچک ترجیح داده می‌شود. در این مقاله به طور خلاصه به مطالعه روش‌های مدل‌سازی آئرو‌دینامیک توربین‌های بادی محور عمودی پرداخته و یک نمونه توربین بادی محور عمودی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی شده‌است. شبیه‌سازی به صورت دو بعدی با استفاده از مدل توربولانسی SST $k-\omega$ و به کمک الگوریتم PISO انجام شد. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی دو بعدی با حداکثر اختلاف ۱۲ درصدی در نسبت سرعت نوک $2/5$ ، از دقت مناسبی در مقایسه با نتایج تجربی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی محور عمودی، دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی عددی

مقدمه

با توجه به کاهش ناگهانی سوخت‌های فسیلی به عنوان منابع متعارف انرژی، افزایش قیمت، تأثیر مخرب بر محیط زیست، محدودیت‌های برق‌رسانی و تأمین سوخت برای مناطق دورافتاده، تقاضا برای منابع انرژی تجدیدپذیر روز به روز افزایش یافته‌است (Tummala et al., 2016; Lenug and Yung, 2012). استفاده از انرژی باد دارای پیشینه طولانی می‌باشد. در ابتدا بشر از انرژی باد برای آسیاب کردن غلات و پمپاژ آب از چاه توسط آسیاب‌های بادی استفاده می‌کرده است. امروزه خیلی از مزارع کشاورزی دور از خطوط و منابع انرژی قرار دارند، بنابراین نیاز به تولید انرژی در محل می‌باشد. توربین‌های بادی محور عمودی راه حل امیدبخشی

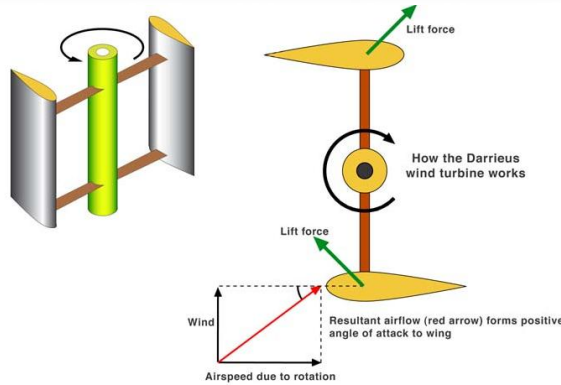
را برای مناطق دور از شبکه عرضه می‌کنند. به طور کلی توربین‌های بادی از نظر محور دوران به دو دسته محور افقی^۱ و محور عمودی^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. توربین‌های محور عمودی خود به دو دسته توربین‌های محور عمودی بر پایه نیروی لیفت^۳ و توربین‌های محور عمودی بر پایه نیروی درگ^۴ نیز تقسیم‌بندی می‌شوند (Mahale et al., 2015). اولین توربین بادی مورد استفاده بشر در منطقه سیستان نصب شده‌است (Spera, 2009). توربین ساونیوس^۵ توربین محور عمودی بر پایه نیروی درگ است که توسط طراح فنلادی آن سیگارد جوهان ساونیوس در سال ۱۹۲۲ اختراع شد. این توربین در حالت کلی از دو بخش مقعر و محدب (شکل ۱) تشکیل شده‌است. نحوه عملکرد توربین به این صورت است که باد نیرویی را در جهت خود به پره‌های توربین وارد می‌کند، علت چرخش روتور این است که نیروی درگ باد در بخش مقعر از بخش محدب بیش‌تر است (Tilham, 2011; Bhutta et al., 2012).



شکل ۱: ساز و کار توربین بادی محور عمودی ساونیوس (Ali, 2013)

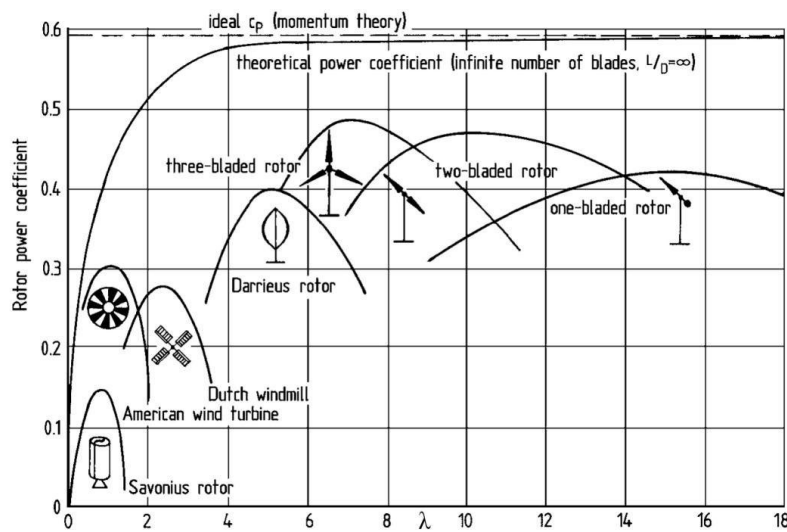
توربین داریوس^۶ توربین محور عمودی بر پایه نیروی لیفت است که توسط ژان ماری داریوس در سال ۱۹۳۱ اختراع شد. نحوه عملکرد توربین به این صورت است که شکل ایرفویل^۷ یا مقطع عرضی پره باعث می‌شود که سرعت جریان سیال در قسمت بالای ایرفویل از قسمت پایین بیشتر باشد، بنابراین طبق قانون برنولی فشار در قسمت بالا کم و در قسمت پایین بیشتر تر و باعث ایجاد لیفت به سمت بالا و چرخش روتور می‌شود. برآیند سرعت باد و سرعت هوای ناشی از چرخش روتور که اصطلاحاً سرعت نسبی نامیده می‌شود، عامل چرخش ایرفویل می‌باشد (شکل ۲) (Óskarsdóttir, 2014; D'Ambrosio and Medaglia, 2010).

-
- 1 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)
 - 2 Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)
 - 3 Lift-Based
 - 4 Drag-Based
 - 5 Savonius
 - 6 Darrieus
 - 7 Airfoil



شکل ۲: ساز و کار توربین بادی محور عمودی داریوس (Óskarsdóttir, 2014)

توربین‌های محور عمودی دارای مزایا و معایبی می‌باشند. یکی از مزایای مهم توربین‌های بادی محور عمودی این است که به دلیل عدم وابستگی به جهت باد ورودی به سیستم کنترل یا^۱ که روتور را مانند توربین‌های محور افقی در راستای جهت جریان باد قرار می‌دهد نیاز ندارند (Burton *et al.*, 2001). اما مهم‌ترین عیب توربین‌های محور عمودی راندمان بسیار پایین آن‌ها می‌باشد (شکل ۳)، از مقایسه حداکثر توان تولیدی توربین داریوس و ساونیوس با حد بتز، ضعف راندمانی این توربین‌ها آشکار می‌شود.



شکل ۳: مقایسه ضریب توان توربین‌های بادی مختلف (Spera, 2009)

تئوری و پیشینه پژوهش

1 Yaw



در گذشته چندین مدل تئوری برای پیش‌بینی عملکرد آئرو‌دینامیکی توربین‌های محور عمودی ارائه شده‌است، از جمله می‌توان به مدل‌های مومنتم^۱ که به سه صورت مدل لوله جریان یگانه^۲، لوله جریان چندگانه^۳، لوله جریان چندگانه دوبل^۴ بیان می‌شوند، مدل گردابه^۵ و مدل کسکید^۶ و اما روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۷ که امروزه برای پیش‌بینی عملکرد توربین‌های محور عمودی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اشاره کرد.

مدل‌های مومنتم (BEM):

این روش، یکی از روش‌های رایج و سودمند در طراحی پره توربین بادی و آنالیز توربین بادی موجود می‌باشد. پایه و اساس این مدل‌ها به این صورت است که از برابر قرار دادن نیروهای آئرو‌دینامیک در جهت جریان با تغییرات مومنتم، سرعت القا شده در طول جریان به دست می‌آید. مزایای این روش، سهولت در اجرا، دقت مناسب و سرعت بالا می‌باشد. مهم‌ترین ضعف این روش این است که برای نسبت‌های سرعت نوک^۸ بالا و استحکام‌های^۹ بالا، نتایج غیر صحیح و غیر معتبر خواهد بود، زیرا حل معادلات مومنتم در این موارد خاص کافی نیستند.

تمپلین در سال ۱۹۷۴، (Templin, 1974) مدل لوله جریان یگانه را که اولین و ساده‌ترین روش برای خصوصیات عملکرد توربین بادی داریوس است را ارائه کرد. در این مدل فرض می‌شود که کل توربین در داخل یک لوله جریان یگانه قرار دارد. سرعت القایی در طول روتور ثابت است و از برابر قرار دادن نیروی درگ در جهت جریان با تغییرات مومنتم به دست می‌آید. در این مدل، اثر واماندگی ایرفویل، استحکام و نسبت ارتفاع به قطر روتور در نظر گرفته می‌شود، اما اثرات جریان برشی در نظر گرفته نمی‌شود. این مدل می‌تواند عملکرد کل یک توربین بادی با بارگذاری سبک را پیش‌بینی کند اما توان پیش‌بینی شده از این روش در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بیش‌تر است.

ویلسون و لیسامان در سال ۱۹۷۴، (Wilson and Lissaman, 1974) مدل لوله جریان چندگانه را که حالت بهبود یافته مدل لوله جریان یگانه بود ارائه کردند. در این مدل فرض می‌شود که حجم جاروب شده توسط توربین به مجموعه‌ای از لوله جریان‌های موازی مستقل تقسیم می‌شود و سپس تئوری BEM برای هر لوله جریان اعمال می‌شود. تفاوت این مدل با مدل لوله جریان یگانه

-
- 1 Blade Element Momentum Theory (BEM)
 - 2 Single Streamtube
 - 3 Multiple Streamtube
 - 4 Double Multiple Streamtube
 - 5 Vortex Model
 - 6 Cascade Model
 - 7 Computational Fluid Dynamics
 - 8 Tip Speed Ratio
 - 9 Solidity

در این است که در این مدل اثرات جریان برشی در نظر گرفته می‌شود. این مدل هم می‌تواند عملکرد کل یک توربین بادی با بارگذاری سبک را پیش‌بینی کند.

پاراسچیو در سال ۱۹۸۱ (Paraschivoiu, 1981) مدل لوله جریان چندگانه دوپل را جهت پیش‌بینی عملکرد توربین بادی داریوس ارائه کرد. در این مدل محاسبات برای نیم سیکل‌های بالادست و پایین‌دست به صورت جداگانه انجام می‌شود و تغییرات سرعت القایی به صورت تابعی از زاویه چرخش در نظر گرفته می‌شود. این مدل رابطه بهتری را میان نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی برای نیروهای آئروپویسی وارد بر پره ارائه می‌دهد و توان را برای توربین‌های با استحکام بیش‌تر پیش‌بینی می‌کند. ضعف این روش در این است که در قسمت پایین‌دست توربین و نسبت‌های سرعت نوک بالا مشکل همگرایی در محاسبات وجود دارد.

باتیستا و همکاران (۲۰۱۳)، مقایسه‌ای بین مدل‌های یاد شده انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل دوپل نزدیک‌ترین تطابق را از بین سه مدل به اطلاعات آزمایشگاهی دارد (Batista et al., 2013).

مدل گردابه

مدل‌های گردابه اساساً مدل‌های جریان پتانسیل هستند که بر مبنای محاسبه میدان سرعت حول توربین از طریق تأثیر چرخشی در دنباله پره کار می‌کنند. سرعت سیال در هر نقطه از میدان جریان برابر با سرعت جریان باد بدون اغتشاش ناشی از گردابه‌های میدان جریان است. لارسن در سال ۱۹۷۵ (Larsen, 1975) این مدل را ارائه کرد. در این مدل زاویه حمله کوچک فرض می‌شود در نتیجه از اثر واماندگی صرف نظر شده‌است. مهم‌ترین عیب مدل گردابه‌ای این است که به زمان محاسباتی فوق‌العاده بالایی نیاز دارد.

مدل کسکید

این مدل توسط هرش و ماندال (Hirsch and Mandel, 1987) برای توربومشین‌ها و برای اولین بار برای تحلیل توربین بادی محور عمودی ارائه شد. در این مدل فرض می‌شود که ایرفویل‌های پره توربین روی یک صفحه قرار گرفته‌اند که فاصله بین پرها با فاصله محیطی توربین تقسیم بر تعداد پرها برابر است. در این مدل خصوصیات آئروپویسی و المان پره شبیه تئوری لوله جریان چندگانه دوپل به طور مستقل برای نیمه‌های بالادست و پایین‌دست روتور با در نظر گرفتن عدد رینولدز و زاویه حمله به دست می‌آید. ویژگی این روش در این است که به زمان محاسبات معقول نیاز دارد و در نسبت‌های سرعت نوک زیاد و استحکام بالا مشکل همگرایی در محاسبات را ندارد.



روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی

روش دینامیک سیالات محاسباتی یا سی‌اف‌دی، تجزیه تحلیل مربوط به جریان سیال را با استفاده از روش‌های عددی و الگوریتم‌ها به کمک کامپیوترها انجام می‌دهد. مهم‌ترین مزیت این روش صرفه‌جویی در زمان است. در این روش به طور کلی با شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی و اعمال شرایط مرزی معادلات پاره‌ای حاکم بر سیالات با گسسته‌سازی با استفاده از روش حجم محدود به معادلات جبری تبدیل می‌شوند و به این ترتیب امکان حل عددی آن‌ها فراهم می‌شود.

الت و همکاران برای اولین بار از روش سی‌اف‌دی برای تجسم میدان جریان حول یک توربین بادی محور عمودی استفاده کردند (Allet *et al.*, 1999).

مایتر و همکاران با استفاده از مدل آشفتگی اسپالارات آلماراس به کمک نرم‌افزار فلوئنت شبکه لغزشی برای توربین بادی محور عمودی داریوس دو پره مستقیم بررسی کردند (Maître *et al.*, 2005).

هاول و همکاران یک مدل کوچک توربین بادی داریوس را تحت تست تجربی در تونل باد و روش دینامیک سیالات محاسباتی قرار دادند آن‌ها از ایرفویل NACA0021 استفاده کردند و تأثیر پارامترهایی نظیر سرعت باد، صلیبیت، نسبت سرعت نوک و پرداخت سطح پره را مورد بررسی قرار دادند (Howell *et al.*, 2010).

وانگ و همکاران از دو مدل URANS¹ همراه $k-\omega$ استاندارد و $k-\omega$ SST برای شبیه‌سازی پدیده واماندگی در رینولدز پایین استفاده کردند. پس از مقایسه نتایج این دو مدل با مدل تجربی دریافتند که مدل $k-\omega$ SST از مدل $k-\omega$ بهتر است زیرا مدل $k-\omega$ SST ویژگی‌های اصلی پدیده واماندگی دینامیک مانند ساختار گردابه‌ها را نشان می‌دهد (Wang *et al.*, 2010).

کستلی و همکاران توربین بادی محور عمودی داریوس سه پره مستقیم را با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به منظور پیش‌بینی بارهای آئرو دینامیکی و ضریب عملکرد توربین مورد مطالعه قرار دادند (Castelli *et al.*, 2011).

لی و همکاران با استفاده از دو روش RANS² و LES³ که هر دو از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی هستند، توربین بادی محور عمودی داریوس را شبیه‌سازی ۲/۵ بعدی و ۳ بعدی کردند (Li *et al.*, 2013).

داناو و همکاران به مقایسه بین دو مدل توربولانسی $k-\omega$ و $k-\omega$ SST با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل $k-\omega$ SST توانایی بیش‌تری برای مدل کردن جریان حول روتور دارد (Danao *et al.*, 2014).

1 Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes

2 Reynolds Averaged Navier Stokes

3 Large Eddy Simulatin



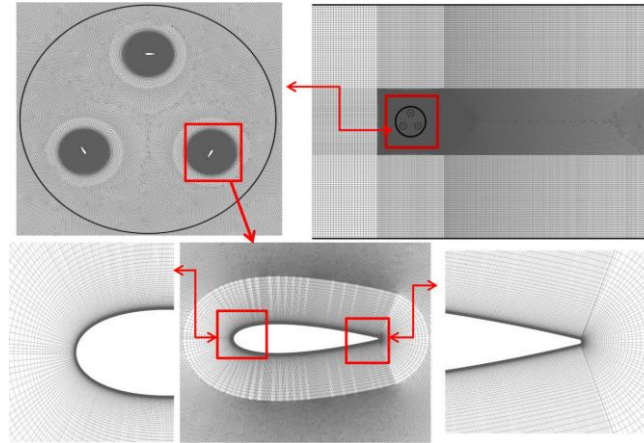
مواد و روش ها

شبیه سازی عددی

مراحل شبیه سازی به ترتیب، ایجاد دامنه محاسباتی^۱، ایجاد هندسه ایرفویل، ایجاد مش یا شبکه^۲، اعمال شرایط مرزی^۳ و در نهایت تحلیل به وسیله نرم افزارهای سیالاتی می باشد. چهار مرحله اول به وسیله نرم افزار گمبیت^۴ نسخه 2.4.6 و تحلیل به وسیله نرم افزار انسیس فلونت^۵ نسخه 15.0 انجام شد.

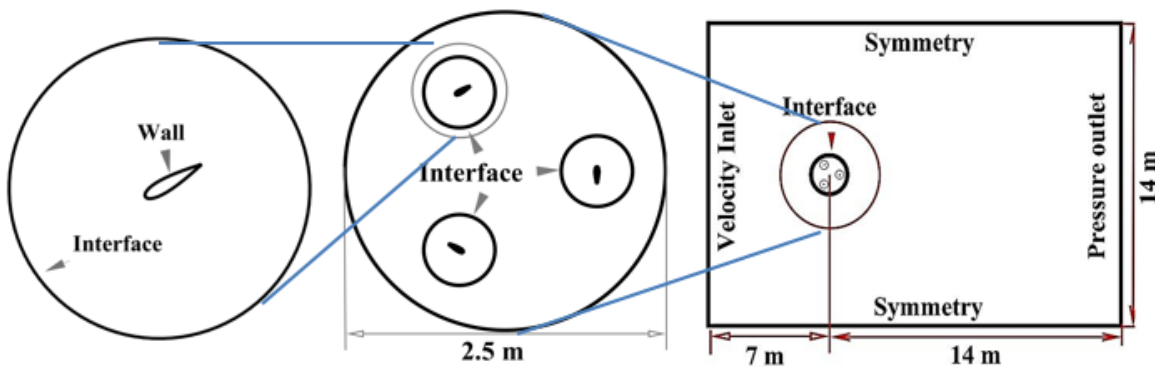
دامنه محاسباتی در شبیه سازی های عددی روی نتایج نهایی تأثیرگذار است. بنابراین باید به نحوی انتخاب شود که کمترین تأثیر را روی نتایج داشته باشد. با توجه به مقادیر بهینه توصیه شده در مقالات، طول ناحیه محاسباتی در این پژوهش، (C*۲۵۶) و عرض ناحیه محاسباتی (C*۱۶۳) انتخاب شد (Mohamed *et al.*, 2011) که C طول وتر^۶ ایرفویل است. شکل ۵ نمایی از شکل مستطیلی ناحیه محاسباتی را در نرم افزار گمبیت نشان می دهد که به شکل مستطیل می باشد. ایرفویل های زیادی به صورت استاندارد برای پره های توربین های بادی موجود است که در این پژوهش از ایرفویل NACA0021 با طول وتر ۰/۰۸۵ متر استفاده شد. تعداد پره ۳ و شعاع روتور ۰/۵۱۵ متر می باشد. پس از ایجاد هندسه، ناحیه محاسباتی شبکه بندی می شود (شکل ۴). شبکه بندی هم روی نتایج نهایی تأثیرگذار است به طوری که مش های ریز هزینه محاسبات را بالا می برد و مش های درشت دقت نتایج را پایین می آورد. در این پژوهش برای صرفه جویی در زمان محاسبات و حفظ دقت نتایج، نواحی دورتر که گردابه ها می شوند به صورت درشت تر و نواحی نزدیک روتور به صورت ریز شبکه بندی شد. برای دامنه محاسباتی از مش ساختاریافته^۷ و نواحی نزدیک ایرفویل از مش غیرساختار یافته^۸ استفاده شد.

-
- 1 Domain
 - 2 Mesh or Grid
 - 3 Boundry Condition (B.C)
 - 4 Gambit
 - 5 Ansys Fluent
 - 6 Chord line
 - 7 Structure
 - 8 Unstructure



شکل ۴: نمایی از شبکه و هندسه تولید شده نزدیک به ایرفویلها

پس از تولید شبکه، شرایط مرزی اعمال می شود. شرایط مرزی تعریف شده برای این مسئله، شرط ورودی سرعت^۱ برای ورودی جریان یکنواخت با سرعت مشخص، شرط فشار خروجی^۲ برای انتها و برای مرزهای افقی بالا و پایین شرط مرزی متقارن^۳، برای ایرفویلها شرط مرزی دیواره^۴ و شرط مرزی فصل مشترک^۵ برای مابین ناحیه دایروی داخلی و ناحیه استوانه ای چرخشی می باشد (شکل ۵).



شکل ۵: ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده برای مسئله

پس از شبکه بندی ناحیه محاسباتی و اعمال شرایط مرزی، تحلیل توربین به وسیله نرم افزار آنسیس فلونت انجام شد. با توجه به اینکه سرعت جریان ورودی ۹ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد، جریان تراکم ناپذیر^۶ می باشد. با توجه به اینکه جریان مورد بررسی در این کار جریان آشفته می باشد، لازم است شکل معادلات در قالب آشفته بررسی گردد. برای اعمال اثرات توربولانسی جریان از مدل

- 1 Inlet Velocity
- 2 Outlet Pressure
- 3 Symmetry
- 4 Wall
- 5 Interface
- 6 Incompressible



SST $k-\omega$ ، روش گسسته‌سازی معادلات روش حجم محدود^۱ و برای حل دستگاه معادلات از الگوریتم پیرو^۲ جهت کوپل کردن سرعت و فشار در معادلات ناویر استوکس استفاده شده است.

معادلات حاکم

معادلات حاکم برای حل جریان سیال تراکم‌ناپذیر و ناپایا، معادله پیوستگی (۱) و معادله مومنتم (۲) می‌باشند.

$$(\vec{v} \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho f - \nabla P + \mu \nabla^2 V \quad (2)$$

ضریب قدرت C_p توربین بادی محور عمودی بیان‌گر نسبت انرژی تولیدشده توسط توربین به کل انرژی باد عبور کرده از توربین، معادله (۳) می‌باشد. در این معادله، P توان کل، ρ چگالی هوا، A مساحت جاروب شده توسط توربین، V_∞ سرعت باد جریان آزاد می‌باشد.

$$C_p = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot A \cdot V_\infty^3} \quad (3)$$

نسبت سرعت نوک پره روتور به سرعت جریان آزاد، نسبت سرعت نوک^۳ که با حرف λ تعریف می‌شود. در معادله فوق شعاع روتور و ω سرعت دورانی روتور می‌باشد.

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

نتایج و بحث

جهت اعتبارسنجی نتایج محاسبات، نمودار ضریب عملکرد توربین در مقابل نسبت سرعت نوک تهیه و با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط کستلی و همکاران (Castelli *et al.*, 2011) مقایسه شد (شکل ۶ الف). دلایل اختلاف اندک حل عددی با نتایج آزمایشگاهی، در نظر نگرفتن اتلافات و شبیه‌سازی به صورت دو بعدی می‌باشد. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی دو بعدی با حداکثر اختلاف ۱۲ درصدی در نسبت سرعت نوک ۲/۵، از دقت مناسبی در مقایسه با نتایج تجربی برخوردار است.

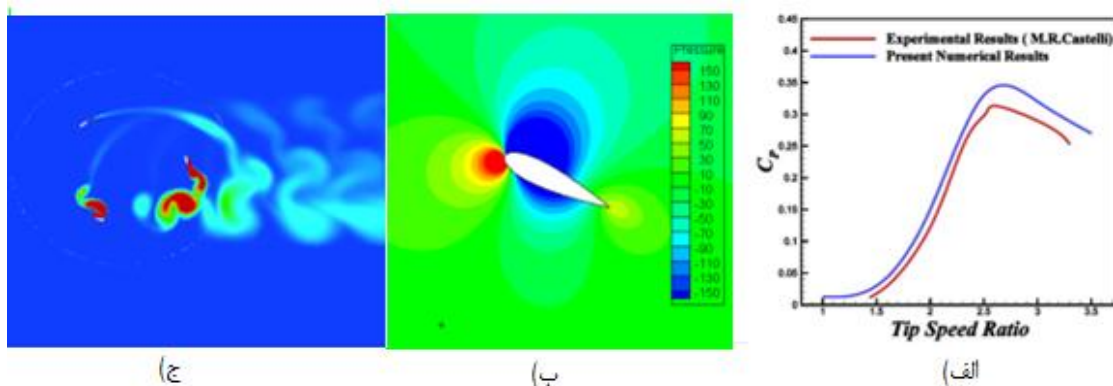
1 Finite Volume Method (FVM)

2 PISO

3 Tip Speed Ratio (TSR)

میدان فشار برای پره های توربین بادی داریوس در شکل ۶ ب نمایش داده شده است. سطح بالایی ایرفویل دارای کمترین فشار می باشد. نیروی لیفت از اختلاف فشار بین سطح بالا و پایین در هر پره به وجود می آید.

در شکل ۶ ج میدان ورتیسیته حول روتور و نمایی از توربین در حال چرخش نشان داده شده است. از زاویه چرخش ۰ تا ۱۸۰ درجه بیشترین جذب انرژی و در نتیجه بیشترین توان تولیدی را داریم. جدا شدن گردابه ها از سطح پره ها در بالادست جریان بر پره های پایین دست تأثیر منفی گذاشته و باعث کاهش جذب انرژی در پایین دست می شود. تغییر مداوم زاویه حمله، باعث جدایش جریان از سطح پره ها و سبب ایجاد پدیده استال^۱ یا واماندگی می شود. در حالت استال، توان تولیدی توربین به دلیل جدایش جریان از سطح پره ها و عدم استفاده از تمام طول وتر ایرفویل کاهش می یابد.



شکل ۶: الف) نمودار اعتبارسنجی حل عددی حاضر (ب) میدان فشار برای ایرفویل (ج) میدان ورتیسیته حول روتور

نتیجه گیری

در این پژوهش روش های مختلف مدل سازی جهت پیش بینی عملکرد توربین های محور عمودی مورد بررسی قرار گرفت و یک نمونه توربین محور عمودی داریوس سه پره مستقیم با ایرفویل NACA0021 به صورت دو بعدی با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت شبیه سازی شد. نتایج نشان داد که شبیه سازی دو بعدی در مقایسه با شبیه سازی سه بعدی و کارهای آزمایشگاهی علاوه بر هزینه محاسباتی کمتر، از دقت خوبی نیز برخوردار است. توربین بادی داریوس سه پره مستقیم در نسبت سرعت نوک ۲/۵ بهترین بازده را دارد. مدل های آئرو دینامیکی مومنتم، گردابه ای و کسکید توانایی تصویر سازی میدان جریان حول روتور را ندارند. روش های سی اف دی به خوبی می توانند میدان جریان را حول روتور تصویر سازی کنند تا موجب درک پدیده های آئرو دینامیکی گردند. مزیت بزرگ روش سی اف دی نسبت به مدل های آئرو دینامیکی ذکر شده توانایی تحلیل و تصویر سازی میدان جریان اطراف پره ها و سرعت و دقت بالای محاسبات توربین می باشد.

¹ Stall

منابع

- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha D. K., Indraja, V., Krishna V. H. 2016. A review on small scale wind turbines, *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, pp. 1351-1371.
- Leung, D. Y. C., Yang, Y. 2012. Wind energy development and its environmental impact: A review, *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 1031-1039.
- Mahale, P., Jangid, N., Gite, A. 2015. Vertical Axis Wind Turbine: A Lucid Solution for Global Small Scale Energy Crisis, *Journal of Academia and Industrial Research*, Vol. 3, No. 8, pp. 393-396.
- Tillman, J. P. 2011. Improvements to vertical axis wind turbine blades to aid in self-starting, M. Sc. Thesis, Eastern Illinois University.
- Bhutta, M. M. A., Hayat, N., Farooq, A. U., Ali Z., Jamil, S. R., Hussain, Z. 2012. Vertical axis wind turbine–A review of various configurations and design techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 4, pp. 1926-1939.
- Óskarsdóttir, M.Ó. 2014. A General Description and Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines, M. Sc. Thesis, University of Iceland.
- D'Ambrosio, M., Medaglia, M. 2010. "Vertical axis wind turbines: History, technology and applications.
- Ali, M.H. 2013. Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed, *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 3, No. 5, pp. 2978-2986.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E. 2001. *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.
- Spera, D.A. 2009. *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering*, Second, Edition. ASME.
- Templin, RJ. 1974. Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine. NRC Lab. report LTR-LA-190, June, p. 29.

Wilson, R. E, Lissaman, P. B. 1974. Applied aerodynamics of wind power machines. Oregon State University, May.

Paraschivoiu, I. 1981. Double-multiple streamtube model for Darrieus wind turbines. Second DOE/NASA wind turbines dynamics workshop, NASA CP-2186, Cleveland, OH, February, p. 19–25.

Batista, N.C., Melício, R., Mendes, V.M., Figueiredo, J. and Reis, A.H. 2013. Darrieus Wind Turbine Performance Prediction: Computational Modeling. In Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, pp. 382-391. Springer Berlin Heidelberg.

Larsen, H.C. 1975. June. Summary of a vortex theory for the cyclogiro. In Proceedings of the 2nd US National conference on Wind Engineering Research.(1975-8), Colorado State University (Vol. 8, p. 1).

Hirsch, H. and Mandal, A.C. 1987. A cascade theory for the aerodynamic performance of Darrieus wind turbines. Wind Engineering, 11(3), pp.164-175.

Allet, A. S., Hallé, S., Paraschivoiu, I. 1999. Numerical Simulation of Dynamic Stall Around an Airfoil in Darrieus Motion. Journal of Solar Energy Engineering. Vol. 121/69.

Maître, T., Achard, J. L., Guittet, L., Ploesteanu, C. 2005. Marine turbine development: numerical and experimental investigations. Workshop on Vortex Dominated Flow Achievement and Open Problems, pp. 59-66.

Howell, R., Qin, N., Edwards, J., Durrani, N. 2010. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. Renewable Energy, (35), PP. 412–422.

Wang S, Ingham DB, Ma L, Pourkashanian, M, Tao Z. 2010. Numerical investigations on dynamic stall of low Reynolds number flow around oscillating airfoils. Computers and Fluids. 39(9), pp.1529–1541.



Castelli, M. R., Englaro, A., Benini, E. 2011. The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD. *Energy*, (36), PP. 4919-4934.

Li, Ch., Zhu, S., Xu, Y., Xiao, Y. 2013. 2.5D large eddy simulation of vertical axis wind turbine in consideration of high angle of attack flow. *Renewable Energy*, (51), PP. 317-330.

Danao, L.A., Edwards, J., Eboibi, O. and Howell, R. 2014. A numerical investigation into the influence of unsteady wind on the performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy*, 116, pp.111-124.

Mohamed, M., Janiga, G., Pap, E., Thévenin, D. 2011. Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade. *Energy Convers Manage*, 52 (1): 236-242.