



دومین کنفرانس بین المللی و سومین همایش ملی

کاربرد فناوری های نوین در علوم مهندسی



February 25 2016

۰۶ اسفندماه ۱۳۹۴

گواهی ارائه مقاله

تاریخ: ۱۳۹۴/۱۲/۰۶

شماره: ۱۱۷۴۰۸۵۷

مؤلفین محترم: محمدرضا لالوی، مجتبی مأموریان، محمدجواد مغربی

بسمت ارائه مقاله با عنوان: بررسی عددی عملکرد آنرودینامیکی توربین بادی داریوس با استفاده از ایرفویل دوجزئی

گواهی می‌گردد این مقاله از سوی کمیته علمی همایش بصورت سخنرانی مورد پذیرش قرار گرفت و ارائه گردید. امید است که حضور ارزشمند شما در "دومین کنفرانس بین المللی و سومین همایش ملی کاربرد فناوری های نوین در علوم مهندسی" که در محل دانشگاه فردوسی مشهد برگزار گردید، گام بلندی در عرصه نوآوری و پیشرفت کشور عزیزمان باشد.

Dear author(s):

lalavi mohamadreza _mamourian mojtaba

maghrebi Mohamad javad

This is to certify that your article titled:

numerical study of darrieus wind turbine aerodynamic performance by using of multi_element airfols

has been accepted by and presented in the Scientific Committee of the Conference as. Oral We hope that your valuable presence in the " 2nd International Conference & 3rd National Conference on New Technologies Application in Engineering " that was held at the Ferdowsi University of Mashhad, is a big step towards the innovation and development of the country.

دبیر علمی کنفرانس

دکتر سید علیرضا درخشان
Conference scientific Manager
Dr S.A.Derakhshan



رئیس کنفرانس
پروفسور علیرضا کرباسی
Conference Chair
Professor A.R.Karbasi

بررسی عددی عملکرد آئرو دینامیکی توربین بادی داریوس با استفاده از ایرفویل دوجزئی

محمد رضا لالوی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

mohamadreza.lalavi@stu.um.ac.ir

مجتبی مأموریان

استادیار مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

mamourian@um.ac.ir

محمد جواد مغربی

استاد مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

mjmaghrebi@um.ac.ir

چکیده

در این پژوهش عملکرد یک توربین بادی محور عمودی داریوس با استفاده از پره های دوجزئی به صورت عددی مورد بررسی قرار می گیرد. پره های دوجزئی نسبت به نوع معمولی به دلیل ایجاد اختلاف فشار بیشتر بین سطوح بالا و پایین پره و کم کردن اثرات واماندگی به کمک کاهش زاویه حمله پره در مقابل جریان عملکرد بهتری را ارائه می دهند. ازین رو پیش بینی می شود که استفاده از این پره ها ماکزیمم توان خروجی توربین بادی را بهبود بخشد. هدف اصلی در این پژوهش یافتن بهترین زاویه و فاصله قرارگیری بین ایرفویل اصلی و ایرفویل کمکی برای بهبود عملکرد و افزایش ماکزیمم توان خروجی توربین بادی داریوس می باشد. به همین منظور شبیه سازی عددی روی یک توربین بادی محور عمودی ۱۵۰ وات با پره های دوجزئی انجام شده است. مطالعات توسط الگوریتم پیرو بر پایه روش حجم محدود گسسته انجام شده است. شبکه بندی این مدل به صورت شبکه متحرک و شبیه سازی با روش دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم افزار انسیس فلونت صورت پذیرفته است. مشاهده شد که حالت بهینه برای زاویه و فاصله بین دو پره به ترتیب در ۱۰ درجه و ۰/۰۰۳ متر به وجود می آید. نتایج نشان داد که استفاده از ایرفویل دوجزئی در پره های توربین بادی ماکزیمم توان خروجی را به میزان قابل توجهی بهبود می بخشد. همچنین استفاده از ایرفویل دوجزئی با کاهش اثرات واماندگی، ارتعاش و سروصدا را در پره های توربین کاهش می دهد.

واژگان کلیدی: ایرفویل دوجزئی، توربین بادی محور عمودی داریوس، دینامیک سیالات محاسباتی، ضریب توان

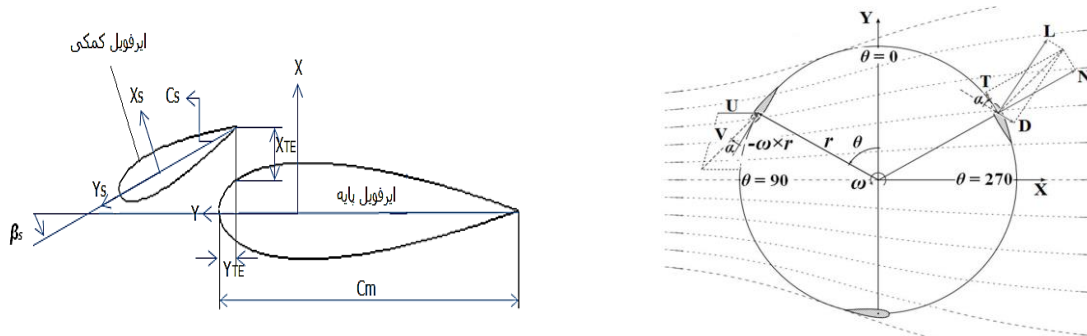
۱-مقدمه

در سال های اخیر تقاضا برای منابع انرژی تجدید پذیر در پی آلودگی های زیست محیطی و کمبود سوخت های فسیلی بیشتر شده است. از این رو تمرکز و بر روی منابع انرژی تجدید پذیر از جمله انرژی بادی بالاتر رفته است. توربین های بادی راه حل مناسب برای مناطق دوردست می باشد. توربین های بادی از با توجه به محور دوران به دودسته کلی محور افقی و محور عمودی تقسیم می شوند. در حال حاضر بیشترین انرژی جذب شده از نیروی باد توسط توربین های بادی محور عمودی دریافت می شود. ولی به دلایل مزایای پر شمار توربین بادی محور عمودی از جمله تولید توان در سرعت مختلف باد، عدم تولید سروصدای آزاردهنده به همراه زیبایی ظاهری و کارکردی مستقل از جهت وزش باد، تولید این نوع را در ابعاد کوچک و برای کاربرد در محیط های شهری بسیار مناسب می سازد. از دیگر دلایل گسترش چشم گیر نوع محور عمودی هزینه پایین نصب و تعمیر نگهداری به خاطر قرار گرفتن تجهیزات در سطح زمین می باشد؛ اما با توجه به چرخش مداوم و تغییر زاویه حمله پره، این نوع توربین با بازدهی پایین همراه می باشد. توربین بادی محور عمودی با توجه به استفاده از نیروی آئرو دینامیکی پسا و برآ به دو نوع ساوینوس و داریوس تقسیم می شوند. اگرچه توربین بادی نوع داریوس به دلیل استفاده از نیروی آئرو دینامیکی برآ بیشتر راندمان را در بین توربین های عمود محور دارا است ولی با مشکل بزرگ راه اندازی ضعیف که ناشی از گشتاور کم آن در شروع حرکت است مواجه می باشد. مشکل اساسی دیگر آن بازدهی پایین در نسبت سرعت های نوک پایین است (Almohammadi et al, 2011) و (butta et al, 2012). هاول (Howell et al, 2010) تأثیر صلبیت، نسبت سرعت نوک پره، سرعت باد و پرداخت سطح پره را در یک مدل توربین کوچک با ایرفویل ناکا ۰۰۲۲ را به روش تجربی در تونل باد و روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. عملکرد آئرو دینامیکی توربین بادی محور عمودی با سه پره مستقیم به روش دینامیک سیالات محاسباتی توسط کستلی و همکاران (Castelli et al, 2011) انجام شد. لی و همکاران (Li et al, 2013) شبیه سازی گردابه های بزرگ را به روش متوسط زمانی رینولدز به صورت ۲/۵ بعدی و ۳ بعدی انجام دادند. استفاده از ایرفویل های خمیده جهت افزایش توان توربین بادی داریوس توسط کادلک (Kadlec et al, 1979) پیشنهاد شد. دومینی و همکاران (Dominy et al, 2007) اثبات کردند که توربین بادی محور عمودی نوع سه پره نسبت به دو پره پتانسیل بهتری برای خود راه اندازی دارند زیرا راه اندازی خودکار در نوع دو پره وابستگی شدید به زاویه قرارگیری اولیه پره ها دارد. شل دال و همکاران (Sheldahl et al,) گزارشی از مطالعه تجربی عملکرد ایرفویل های ناکا ۰۰۱۲، ناکا ۰۰۱۵، ناکا ۰۰۱۸ و ناکا ۰۰۲۱ بکار گرفته شده در توربین بادی محور عمودی داریوس را ارائه کردند. گوپتا و همکاران (Gupta et al, 2007) نشان دادند بهبود راه اندازی خودکار و توان توربین با استفاده از دو روتور امکان پذیر است. میتر و همکاران (Maître et al, 2005) با استفاده از مدل آشفتگی اسپالارات آماراس به کمک نرم افزار فلوئنت، شبکه لغزشی برای توربین بادی محور عمودی با دو پره مستقیم را مورد بررسی قرار دادند. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است زاویه حمله پره از صفر تا ۳۶۰ درجه دائماً در حال تغییر می باشد و قسمت های از پره در تمام سرعت های باد واماندگی را تجربه می کنند. بخش اعظمی از انرژی موجود در جریان از روبه رو آمده و در گرداب ها و جریان های برگشتی پشت توربین هدر می روند. در نتیجه توربین بادی محور عمودی نسبت به نوع افقی با بازدهی کمتری همراه می باشد. همچنین واماندگی دینامیکی باعث تحمیل بارهای ارتعاشی، خستگی ساختاری و سروصدا در پره های توربین می شود. اگرچه استفاده از ایرفویل های چاک دار در بال های هواپیما برای افزایش ضریب برآ و کاهش زاویه حمله برای به تأخیر انداختن واماندگی و کاهش افت های لبه فرار استفاده شده است ولی کمتر در توربین های بادی عمود محور بکار گمارده شده. هر چند استفاده از ایرفویل دوجزئی در توربین بادی محور عمودی باعث افزایش جزئی ضریب پسا می شود، ولی با کمک کنترل کننده های جریان فعال، باعث کاهش واماندگی دینامیکی در سمت عقب روتور می شود. هزینه اضافی تحمیل شده در ساخت این نوع ایرفویل ها در مقایسه با ایرفویل تک جزئی با افزایش توان تولیدی توربین بادی قابل جبران است (Staelens et al, 2003) و (Hsieh et al, 2012).

هدف از انجام این مطالعه بررسی و مقایسه عملکرد آئرو دینامیکی توربین بادی محور عمودی با استفاده از ایرفویل های تک جزئی و دوجزئی می باشد.

۲- تشریح مسئله

کار حاضر به بررسی مناسب بودن استفاده از ایرفویل دوجزئی برای بهبود بخشیدن به توان تولیدی توربین بادی محور عمودی داریوس پرداخته است. ایرفویل دوجزئی به کار گرفته شده در این شبیه سازی به همراه پارامترهای آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: الف- سینماتیک توربین بادی محور عمودی داریوس (Bos, 2012). ب- ایرفویل دوجزئی و پارامترهای آن

کلیه مشخصات و پارامترهای بکار رفته در شبیه سازی توربین بادی محور عمودی داریوس با ایرفویل دوجزئی در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات و پارامترهای توربین بادی داریوس	
β_s	زاویه پره اصلی نسبت به پره کمکی
X_{TE}	فاصله لبه فرار پره کمکی تا پره اصلی
$Y_{TE} = 0.005 \text{ m}$	فاصله لبه حمله پره اصلی تا لبه فرار پره کمکی
$C_m = 0.085 \text{ m}$	طول کرد پره اصلی
$C_s = 0.036 \text{ m}$	طول کرد پره کمکی
$P = 150 \text{ W}$	توان خروجی توربین
$\sigma = \frac{BC}{R} = 0.5$	مقدار صلبیت
$AR = \frac{H}{C} = 0.017 \text{ m}$	نسبت ضخامت به قطر پره
$B = 3$	تعداد پره
$H = 1.03 \text{ m}$	ارتفاع روتور

R = 0.515 m	شعاع روتور
$\mu = 1.85 * 10^{-5} \mu$	ویسکوزیته دینامیکی
$\rho = 1.224 \text{ Kg/m}^3$	دانسیته
U = 9 m/s	سرعت در ورودی
P = 1 atm	فشار در خروجی

روشن است که استفاده از ایرفویل دوجزئی نسبت به تک جزئی در توربین بادی محور عمودی دارای بازدهی بهتری می باشد. در نظر بگیریید برای نمونه در موردی که در آن باد نسبی عمود بر خط وتر ایرفویل اصلی می باشد باعث واماندگی در پره می شود. ایرفویل ثانویه با کاهش زاویه حمله در همان زمان، نیروی برآ و گشتاور محوری را تولید می کند. مطالعه دقیق و طراحی توربین بادی با ایرفویل دوجزئی نیاز به مطالعه آزمایشگاهی دارد. در این مطالعه به دلیل بالا بودن هزینه درروش تجربی، از روش های عددی برای بررسی تأثیر استفاده از ایرفویل دوجزئی در توربین بادی محور عمودی استفاده شده است. این مقاله به بررسی تأثیر اندازه زاویه ایرفویل ثانویه نسبت به ایرفویل اولیه پرداخته است. برای ساده کردن تحلیل جریان عبوری از توربین و عملکرد آئرو دینامیکی آن، در هر دو جزء، ایرفویل ناکا ۰۰۲۱ در نظر گرفته شده است. هدف اصلی در این مقاله کشف مزایای بالقوه استفاده از ایرفویل دوجزئی نسبت به تک جزئی در توربین بادی محور عمودی داریوس با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. جدول ۲ مدل هندسه های مختلف استفاده شده در این مقاله را نشان می دهد.

جدول ۲: هندسه های مختلف بکار رفته در این مطالعه				
مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵
$\beta_s = 5 \text{ degree}$	$\beta_s = 10 \text{ degree}$	$\beta_s = 20 \text{ degree}$	$\beta_s = 30 \text{ degree}$	$\beta_s = 40 \text{ degree}$

۳- روش عددی

جریان ورودی با توجه به سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه تراکم ناپذیر فرض شده است. حل گر عددی حجم محدود دینامیک سیالات محاسباتی به کمک معادلات "U.R.A.N.S" برای حل عددی غیر دائم جریان استفاده می شود. برای حل معادلات توربولانسی، فشار و مومنوم از الگوریتم گسسته سازی مرتبه دوم بالادست و برای کوپل کردن سرعت و فشار در معادلات ناویر استوکس از الگوریتم پیزو استفاده شده است. مدل ترکیبی توربولانسی تنش برش انتقالی برای به دست آوردن خواص جریان دوردست دیواره، SST K- ω بکار گرفته شده و مدل اصلاح شده k- ϵ با فرکانس توربولانسی ω به جای ترم اتلاف انرژی E برای به دست آوردن خواص جریان کنار دیواره، استفاده شده است. از مدل توربولانسی SST K- ω و حل گر مبتنی بر فشار، برای شبیه سازی و محاسبه جریان تراکم ناپذیر استفاده شده است. در شبیه سازی این مدل توربولانسی جریان لایه مرزی تأثیر زیادی روی نتایج نهائی حاصل از شبیه سازی داشته، بنابراین مدل سازی صحیح جریان حول دیواره در دقت محاسبات تأثیر به سزایی دارد. این مدل توربولانسی توانایی پیش بینی ساختار جریان اطراف پره های توربین را داشته و برای شبیه سازی جریان چرخشی و محاسبه دقیق گرادیان فشارهای معکوس و جدایش جریان مناسب می باشد (Mohamed et al, 2011) در حالت

غیر دائم شبیه سازی به نحوی انتخاب می شود که زمان کافی برای تشکیل گردابه جریان حول روتور وجود داشته باشد. مشاهده شد که پس از چهار دور ضریب گشتاور به صورت پایا درآمده که نتایج از همان دور به عنوان نتایج صحیح و پایا برای محاسبه ضریب توان توربین گزارش شد.

۴- معادلات حاکم

ضریب قدرت C_p توربین بادی محور عمودی بیان گر نسبت انرژی تولید شده توسط توربین به کل انرژی باد عبور کرده از توربین می باشد.

$$C_p = \frac{2.P}{\rho AU^3} \quad (1)$$

نسبت سرعت مماسی پره روتور به سرعت جریان آزاد، نسبت سرعت نوک λ تعریف می شود.

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{U} \quad (2)$$

ضریب گشتاور توربین بادی محور عمودی به صورت زیر می باشد.

$$C_T = \frac{2.T}{\rho AU^2 R} \quad (3)$$

برای جریان تراکم ناپذیر و حالت نا پایا، معادلات حاکم در حل این مدل توربولانسی، معادله بقای مومنتوم و جرم برای حل در همه حوزه جریان و معادله پیوستگی می باشند.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (4)$$

ρ چگالی جریان، u و v و w سرعت جریان در راستای x و y و z بوده می باشد.

معادله بقای مومنتوم را می توان به صورت زیر نوشت.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho g + F \quad (5)$$

که g نیروی گرانش، F نیروی حجمی و τ تانسور تنش می باشد که به صورت زیر ارائه می شود.

$$\tau = \mu \left[(\nabla v + \nabla v^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot v I \right] \quad (6)$$

رفتار جریان را می توان بر اساس خواص فشار p و ویسکوزیته μ و بردار سرعت u و ... مشخص کرد. تغییرات در این خواص سیال در بازه های از زمان رخ می دهد. این تغییرات برای المان های کوچکی از سیال با استفاده از روش دینامیک سیالات

محاسباتی محاسبه می شود و با استفاده از قوانین پیوستگی و فیزیکی خواص موردنظر به دست می آیند. روش میانگین زمانی برای شبیه سازی اثرات توربولانسی استفاده می شود. در این مدل ها ترم هایی برای شبیه سازی توربولانسی میانگین حوزه جریان به جای بررسی صریح رفتار توربولانسی معرفی می شود. سپس معادلات انتقال برای مدل سازی کل تغییرات توربولانسی جریان حل می گردد. این معادلات Reynolds average navier stokes می باشند که مدل سازی در مقیاس بزرگ تری از مسائل توربولانسی را سرعت می بخشد. حل دقیق جریان در مدل توربولانسی که شامل میانگین گیری رینولدز می باشد، به وسیله معادلات ناویر استوکس به مؤلفه های متغیر و میانگین زمانی تقسیم می شوند. فرم کلی هر ترم اسکالر جریان به صورت زیر می باشد.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (7)$$

که $\bar{\phi}$ مقدار میانگین خاصیت جریان و ϕ' مقدار متغیر وابسته به زمان می باشد. با جایگذاری مقادیر میانگین زمانی متغیر جریان در معادلات ناویر استوکس، معادلات Reynolds average navier stokes به دست می آیند که به صورت زیر نوشته می شوند.

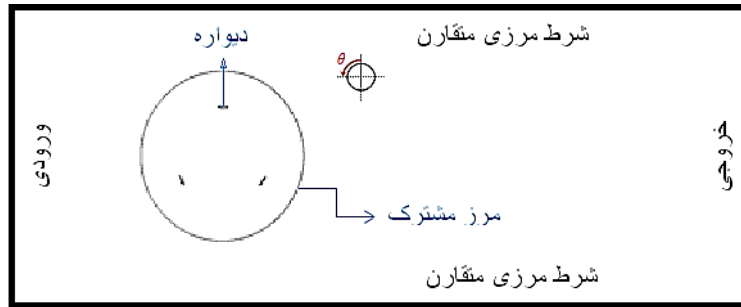
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'v'}) \quad (8)$$

مدل توربولانسی Reynolds average navier stokes بیان می کند که انتقال مومنوم تولید شده به وسیله گردابه های توربولانسی را می توان با یک گردابه توربولانسی معادل مدل سازی کرد. این تئوری نشان می دهد که تانسور تنش رینولدز با نرخ تانسور کرنش متناسب می باشد که به صورت زیر بیان می شود.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \quad (9)$$

۵- شرط مرزی

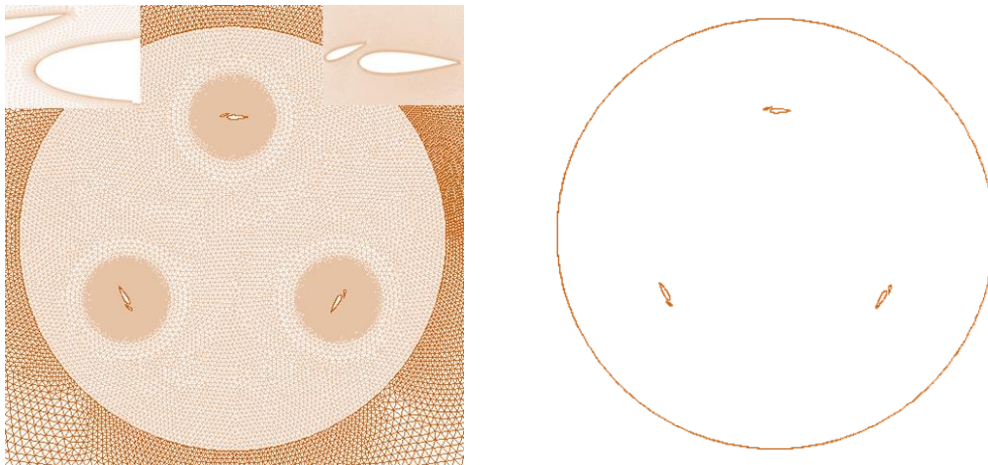
صحت نتایج در شبیه سازی های عددی تا حدی وابسته به اندازه دامنه دارد. دامنه محاسباتی باید به نحوی انتخاب شود که کمترین تأثیر را در نتیجه نهایی داشته باشد. محمد و همکاران [۱۰] نشان دادند که دامنه کوچک تأثیر زیادی بر نتایج نهایی حل خواهد گذاشت. در شکل ۱ دامنه محاسباتی برای حالت تراکم ناپذیر و دوبعدی نشان داده شده است. طول وتر ایرفویل اصلی $C_m = 0.085$ متر و طول وتر ایرفویل جزئی $C_s = 0.036$ متر می باشد. طول دامنه شبیه سازی (C*۲۵۶) و عرض (C*۱۶۳) بوده که این انتخاب برای هرچه کمتر کردن اثرات اندازه دامنه می باشد. سرعت ورودی باد ۹ متر بر ثانیه و فشار در مرز خروجی ۱ اتمسفر به صورت ثابت تنظیم شده است. قسمت بالا و پایین با شرط مرزی متقارن بوده و روی سطح پره ها شرطی مرزی دیواره با شرط عدم لغزش بوده که تمام این شرایط مرزی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲: دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

۶- شبکه هندسی و مدل حل

نتیجه گیری درست و صحیح از شبیه سازی توربین بادی به شبکه بندی مناسب بستگی زیادی دارد. در این پژوهش سعی شده از شبکه بندی بهینه به منظور صرفه جویی در زمان محاسبات و حفظ دقت نتایج استفاده شود چراکه شبکه بندی درشت دقت نتایج را پایین آورده و شبکه بندی خیلی ریز علی رقم پیش بینی دقیق تر رفتار جریان باد و دقت بالاتر نتایج، سبب افزایش هزینه محاسبات می شود. در یک منطقه دایره ای در اطراف پره ها شبکه بندی به تدریج ریزتر شده است. شبکه بندی قسمت روتور توربین به صورت مثلثی و روی سطح پره ها از مدل شبکه بندی لایه مرزی استفاده شده است. در شکل ۲ هندسه مسئله، شبکه بندی مثلثی و لایه مرزی نشان داده شده است.

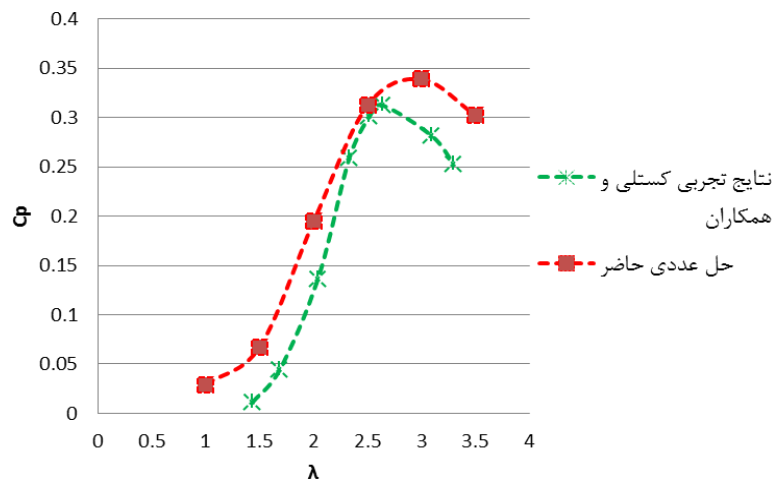


شکل ۳: نمایی از هندسه و شبکه مورد استفاده همراه با بزرگنمایی

۷- بحث و نتیجه گیری

۷-۱ اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی نتایج، منحنی ضریب عملکرد توربین برحسب نسبت سرعت نوک، تهیه شده و با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط کستلی و همکارانش [۱۱] مقایسه شده است.

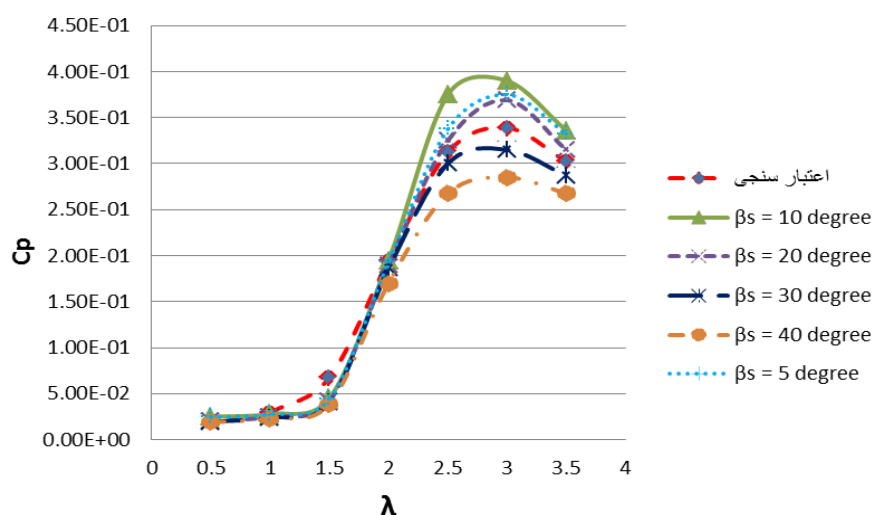


شکل ۴: نمودار اعتبار سنجی کار حاضر

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود حل عددی حاضر به خوبی توانایی پیش بینی رفتار توربین در سرعت های نوک مختلف رادار است. حل دوبعدی جریان و در نظر نگرفتن اتلافات، دلایل اختلاف اندک نتایج روش عددی با تجربی می باشد.

۲-۷ بررسی تأثیر تغییر زاویه β_s

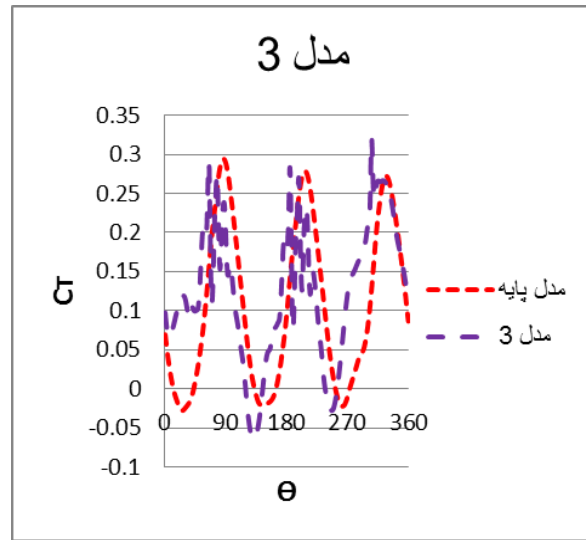
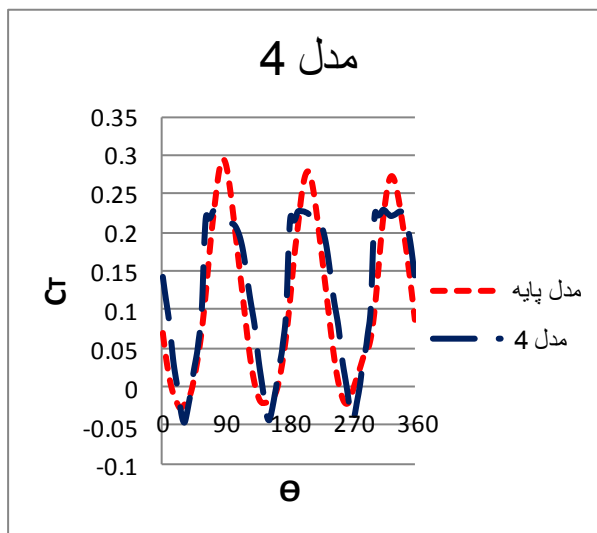
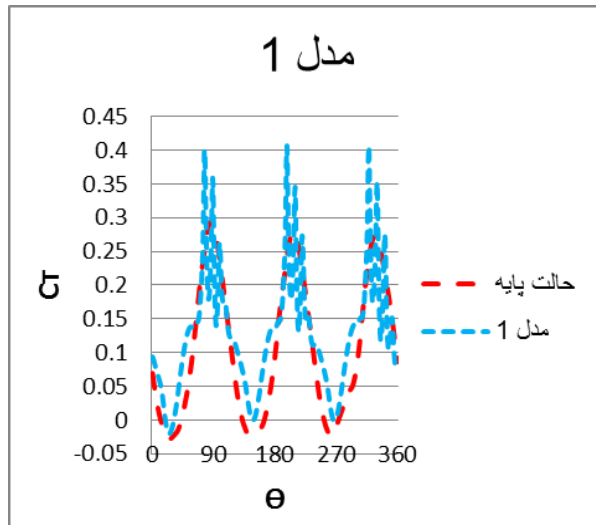
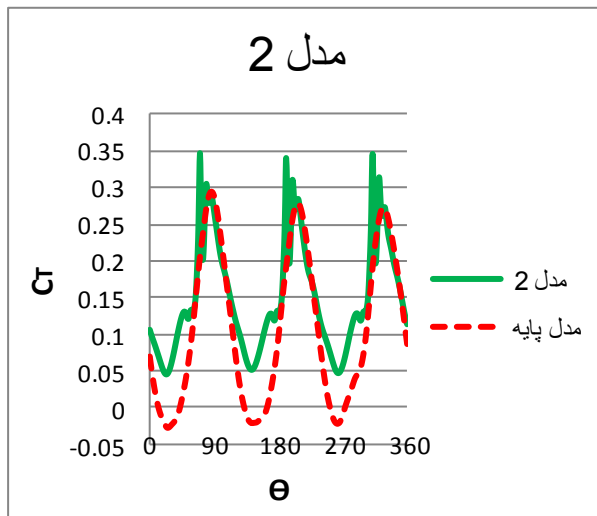
برای بررسی تأثیر تغییر زاویه پره اصلی نسبت به پره کمکی β_s در ایرفویل دوجزئی بکار گرفته شده برافزایش ضریب توان توربین بادی، نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک ترسیم شده است. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده، استفاده از ایرفویل دوجزئی با تأثیرگذاری بر جریان عبوری از پره های توربین، باعث افزایش در ماکزیمم ضریب توان توربین بادی شده است. از نمودار مشاهده می شود که ماکزیمم ضریب توان ایجاد شده توسط توربین، در زاویه $\beta_s = 10^\circ$ مقدار بهینه را در مقایسه با سایر مدل ها، به دلیل ایجاد اختلاف فشار بهینه بین بالا و پایین پره و به تأخیر انداختن واماندگی، دارا می باشد.

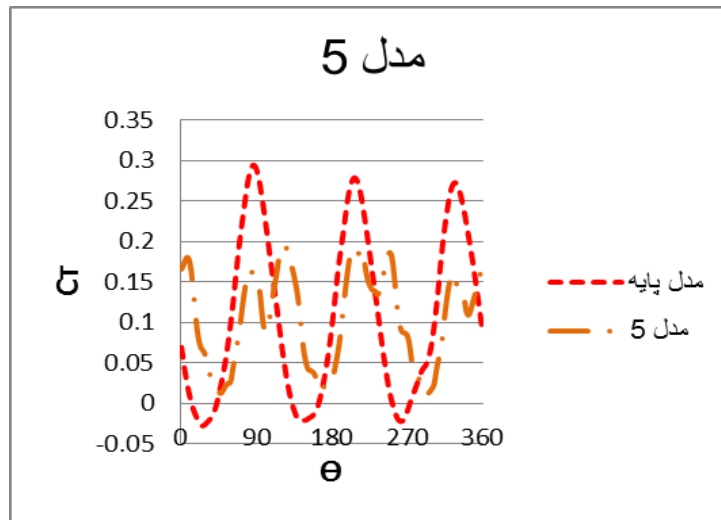


شکل ۵: نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک λ

شکل ۵ نمودار ضریب گشتاور توربین C_T برحسب زاویه چرخش روتور Θ برای پنج مدل مختلف در مقایسه باحالت مبنا را نشان داده می دهد. این مقادیر در حالت پایدار بعد از چهار دور چرخش توربین در نسبت سرعت نوک پره ۲/۵ به دست آمده

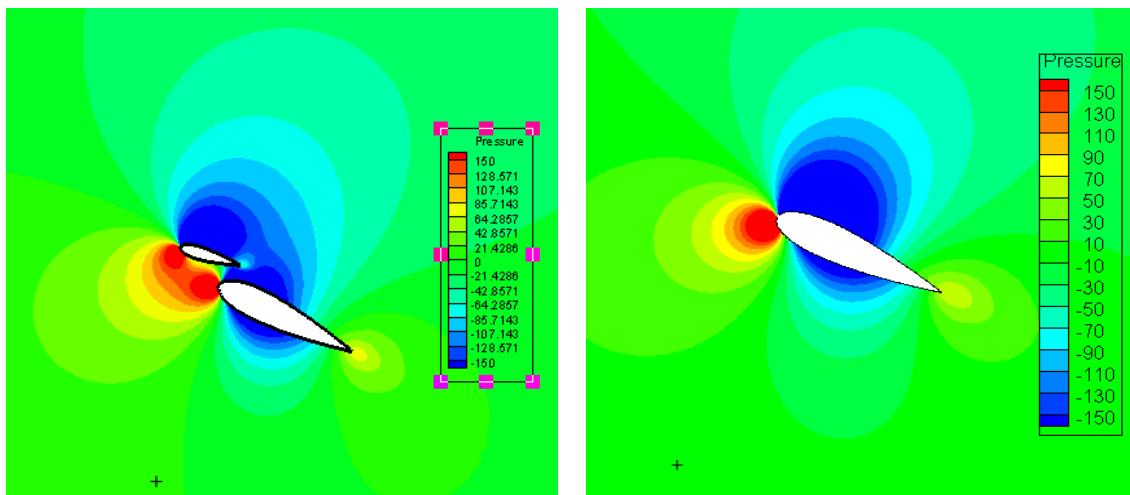
است. همان طور که مشاهده می شود در مدل های ۱، ۲ و ۳ مقادیر ضریب گشتاور بالاتری را به ثبت رسانده است. مطابق انتظار در این سه مدل، پره ثانویه با کاهش زاویه حمله در حالتی که جریان باد عمود بر پره اصلی می باشد، با به تأخیر انداختن و کم کردن اثرات واماندگی باعث افزایش گشتاور بیشتر توربین نسبت به حالت پایه می شود. همان طور که پیش تر اشاره شد، توربین بادی محور عمودی داریوس یک توربین برآ محور می باشد به طوری که با افزایش ضریب برآ، توان تولیدی توربین افزایش می یابد. در شکل ۵ مشاهده می شود که با افزایش زاویه پره اصلی نسبت به پره کمکی β_s ، در مدل های ۴ و ۵ ضریب گشتاور توربین به دلیل بالا رفتن بیش از حد ضریب پسا نسبت به ضریب برآ یا کاهش نسبت C_L/C_D ، در مقایسه با حالت مبنا مقادیر کمتری را نشان می دهد.





شکل ۶: نمودار ضریب گشتاور برحسب زاویه چرخش روتور برای پنج مدل مختلف در $\lambda = 2/5$

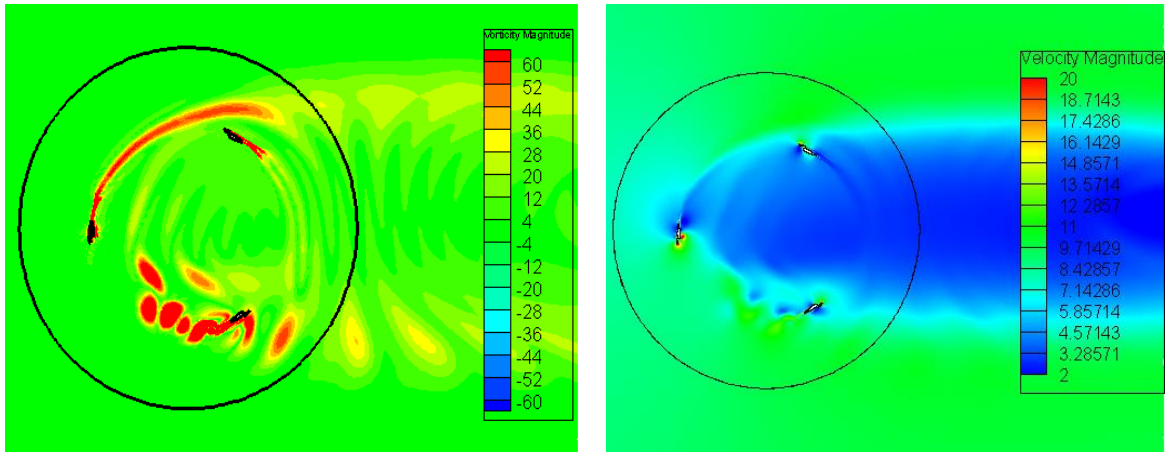
در شکل ۷ میدان فشار برای دو مدل مختلف از پره های توربین بادی داریوس بعد از چهار دور چرخش توربین در نسبت سرعت نوک $2/5$ نمایش داده شده است. نیروی برآ از اختلاف فشار بین سطوح بالا و پایین در هر پره به وجود می آید. همان طور که انتظار می رفت به دلیل استفاده از ایرفویل دوجزئی، محدوده نقاط پرفشار بالا رفته و اختلاف فشار بیشتری بین سطوح پره به وجود آمده که نسبت به حالت پایه باعث افزایش نیروی برآ می شود.



شکل ۷: میدان فشار برای حالت پایه و دوجزئی

توربین بادی بیشترین انرژی نیروی باد را در بالادست جریان جذب می کند. شکل ۸ میدان ورتیسیته و جریان برای مدل دوجزئی را نشان می دهد. همان طور که پیش بینی می شد، جدا شدن گردابه ها از سطح پره ها در بالادست جریان تأثیر منفی بر پره های پایین دست گذاشته و باعث کاهش جذب انرژی در پایین دست می شود. استفاده از ایرفویل دوجزئی در توربین بادی با کاهش زاویه حمله توسط ایرفویل کمکی، در حالتی که جریان باد عمود بر پره می باشد باعث تأخیر در جدایش جریان عبوری

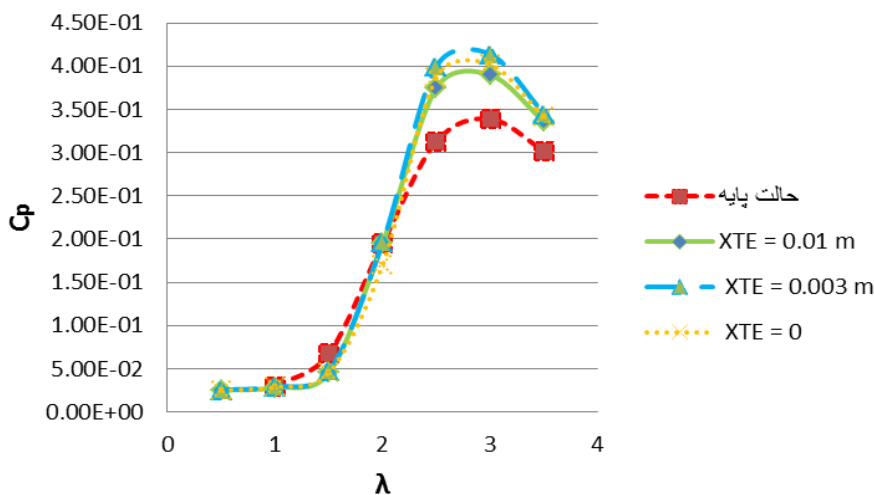
از سطح پره‌ها و کوچک‌تر شدن گردابه‌های جدانشده از پره‌های بالادست جریان شده. کوچک‌تر شدن گردابه‌ها باعث کاهش ارتعاشات، کاهش سروصدا، کمتر کردن اثرات منفی بالادست جریان بر پایین‌دست و نهایتاً افزایش کارایی توربین می‌شود.



شکل ۸: میدان سرعت و ورتیسیته به ترتیب از راست به چپ برای مدل دوجزئی

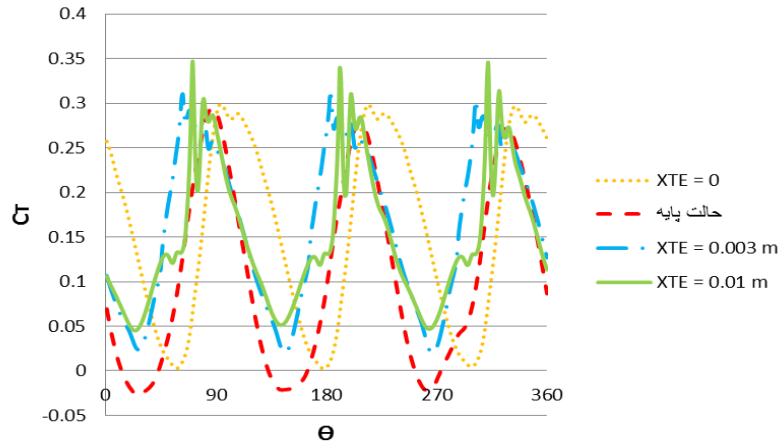
۳-۷ بررسی تأثیر فاصله لبه فرار پره کمکی تا پره اصلی X_{TE}

برای بررسی تأثیر فاصله لبه فرار پره کمکی تا پره اصلی نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک برای سه مدل مختلف در مقایسه باحالت پایه ترسیم شده است. استفاده از ایرفویل دوجزئی در توربین بادی باعث افزایش بازده نسبت باحالت پایه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است با کمتر کردن مقدار X_{TE} ، توربین در فاصله بین دو پره ۰/۰۰۳ متر، به دلیل ممانعت از عبور جریان از بین دو پره بیشترین بازدهی را به همراه دارد. با چسباندن پره کمکی به پره اصلی مقدار ضریب توان توربین به دلیل استفاده از یک نقطه پرفشار در هر پره نسبت به حالت دوجزئی مقداری کاهش می‌یابد.



شکل ۱: نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک λ

شکل ۱۱ نمودار ضریب گشتاور توربین C_T برحسب زاویه چرخش روتور θ برای سه فاصله مختلف در مقایسه باحالت پایه را نشان داده می‌دهد. این مقادیر در نسبت سرعت نوک $\lambda = 2/5$ و پس از رسیدن توربین به حالت پایا استخراج شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت در فاصله 0.003 متر توربین دارای بیشترین ضریب گشتاور می‌باشد.



شکل ۱: نمودار ضریب گشتاور برحسب زاویه چرخش روتور برای پنج مدل مختلف در $\lambda = 2/5$

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور افزایش ماکزیمم گشتاور و بهبود عملکرد توربین بادی محور عمودی داریوس، پره‌های توربین مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور از پره‌های دوجزئی به جای پره معمولی استفاده شد. پره‌های دوجزئی با کاهش زاویه حمله در مقابل جریان باد به خصوص در حالتی که جریان عمود بر طول وتر پره می‌باشد، باعث تأخیر در جدایش جریان و کم کردن اثرات واماندگی در پره می‌شود. همچنین استفاده از ایرفویل دوجزئی در توربین بادی محور عمودی داریوس که بر اساس نیروی برآ گشتاور تولید می‌کند، باعث ایجاد اختلاف فشار بیشتر بین سطوح بالا و پایین پره و افزایش نیروی برآ نسبت به حالت معمولی می‌شود. برای یافتن زاویه بهینه (β_S) و فاصله مناسب (X_{TE}) بین دو پره، پره‌های توربین با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی شد. پس استخراج منحنی ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک برای مدل‌های مختلف، مشاهده شد که مدل ۲ یعنی حالتی که زاویه بین پره کمکی و اصلی ۱۰ درجه می‌باشد با افزایش ۱۵ درصدی در ضریب توان توربین بادی حالت بهینه β_S می‌باشد. همچنین پس از استخراج نتایج، $X_{TE} = 0.003$ متر، با افزایش ۲۲ درصدی ضریب توان نسبت به حالت پایه، فاصله بهینه بین دو پره کمکی و اصلی معرفی شد.

فهرست علائم

C_p	ضریب قدرت	μ	ضریب لزجت دینامیکی
R	شعاع توربین	θ	زاویه چرخش
C_T	ضریب گشتاور	Ω	سرعت زاویه‌ای چرخش توربین
U	سرعت باد	λ	نسبت سرعت نوک
P	فشار	ν	ضریب لزجت سینماتیکی
T	گشتاور	ε	ضریب اتلاف انرژی توربولانسی

- Almohammadi, K., Ingham, D., Pourkashanian, M. (2011). CFD modelling investigation of straight-blade vertical axis wind turbine. in 13th International Conference on Wind Engineering Amsterdam Netherland .
- Bhutta, M., Hayat, N., Farooq, A., Ali, Z., Jamil, S., 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.
- 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.
- Castelli, M., Englaro, A., Benini, E. (2011). The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance predictio 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.
- Kadlec, E. (1979). Characteristics of future Vertical Axis Wind Turbines (VAWTs). *Large Wind Turbine Design Characteristics and and Requirements*, Vol. 1, pp. 133-141.
- Dominy, R., Lunt, P., Bickerdyke, A., Dominy, J. (2007). Self-starting capability of a Darrieus turbine *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy*, 221(1): 111-120.
- Sheldahl, R., Klimas, P. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical.
- Gupta, R., Biswas, A. (2010). Computational fluid dynamics analysis of twisted three-bladed H-Darrieus rotor. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 2, No. 4, pp. 1-15.
- Maître, T., Achard, J., Guittet, L., Ploesteanu, C. (2005). Marine turbine development: numerical and experimental investigations. *Workshop on Vortex Dominated Flow Achievementand Open Problems*, pp. 59-66.
- Staelens, Y., Saeed, F., Paraschivou, I. (2003). A Straight-Bladed Variable-Pitch VAWT Concept for Improved Power Generation. *AIAA Paper 2003-0524*, 22nd ASME Wind Energy Symposium held in conjunction with the 41st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV.
- Hsieh, W., Miao, J., Lai, C., Tai, C. (2012). Wind Tunnel Analysis on Performance of H-rotor VAWTs with NAC 64xx Blades. *Advanced Materials Research*, Vol. 488-489, pp. 1213-1218.
- Bos, R. (2012). Self-starting of small urban Darrieus rotor PhD Thesis. Delft University of Technology.
- Mohamed, M., Jniga, G., Pap, E., Thevenin, D. (2011). Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade. *Energy Convers Manage*, 52 (1): 236-242.