



Performance of Ducted Wind Turbine in a Wind Tunnel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Keramat Siavash N.¹ PhD,
Najafi Gh.H.^{*1} PhD,
Tavakoli T.¹ PhD,
Ghobadian B.¹ PhD,
Mahmoodi I.² PhD

How to cite this article

Keramat Siavash N, Najafi Gh.H, Tavakoli T, Ghobadian B, Mahmoodi I. Performance of Ducted Wind Turbine in a Wind Tunnel. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(5):1297-1305.

ABSTRACT

In this study, the performance of a ducted wind turbine is compared with a bare one using wind tunnel results. Ducted turbines are a type of small wind turbines, which consist of a diffuser surrounding the rotor. The duct makes more air flow in rotor plain and as a result augments power production. The blade was fabricated, using resin polyester armed by glass fiber. Duct is formed by sheet metal rolling in slope to have an acceptable appearance. According to BEM design, predicted power for the bare turbine is 300W in wind velocity 10 m/s considering 20% loss due to bearing resistant, rotor inertia, and generator efficiency. Wind tunnel investigation revealed 165W power experimentally for bare wind turbine. The evaluation of the system in the wind tunnel showed that the power augmentation of the ducted system compared to the bare one was 37% higher on average. The maximum power augmentation of the ducted turbine was 286W. The rotor speed of ducted turbine was 61% more than the bare turbine, which increased the speed of the tip of the blade.

Keywords Wind Turbine; Shrouded Wind Turbine; Power Augmentation Ratio; Betz Limit

¹Mechanic of Biosystems Department, Agricultural Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran Iran

²Mechanic of biosystems Department, Agriculture Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

*Correspondence

Address: Agriculture Faculty, Tarbiat Modares University, Nasr Bridge, Jalel-Al-Ahmad Highway, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 44580500
Fax: +98 (21) 44196524
g.najafi@modares.ac.ir

Article History

Received: November 08, 2018

Accepted: December 16, 2018

ePublished: May 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Renewablea 2017, The global status ... [2] A preliminary report on the design and performance of ducted ... [3] Shrouded aerogenerator design ... [4] Design and performance of a turbine suitable for an ... [5] Shrouds for aerogenerators ... [6] Compact shrouds for wind turbines ... [7] The shrouded aerogenerator ... [8] Research and development for shrouded wind ... [9] Preliminary design and economic investigations of diffuser augmented wind ... [10] Size effects in DAWT innovative wind energy system ... [11] Diffuser augmentation of wind ... [12] New airfoils for small horizontal axis wind ... [13] Experimental demonstration of the diffuser-augmented wind turbine ... [14] Experiments with a diffuser-augmented model wind ... [15] Fluid dynamics of diffuser-augmented wind ... [16] Computational analysis of diffuser-augmented wind ... [17] An investigation on diffuser augmented wind turbine ... [18] Effect of placing a diffuser around a wind ... [19] The science of making more torque from wind: Diffuser experiments and ... [20] Small-scale wind energy portable turbine ... [21] Performance analysis of open and ducted wind ... [22] Effects of the duct thrust on the performance of ducted ... [23] Optimal design of a thin-wall diffuser for ... [24] Aerodynamic optimization of shrouded ... [25] Power augmentation of shrouded wind turbines ... [26] Aerodynamic interaction of diffuser augmented wind ... [27] Wind energy ... [28] Wind turbines-part 1: Design ... [29] A shrouded wind turbine generating high output power with ... [30] Experimental and numerical investigations of flow ... [31] An extension of the blade element momentum method ...

بررسی عملکرد توربین بادی پوشش‌دار در تونل باد

نعمت کرامت سیاوش PhD

گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

غلامحسن نجفی * PhD

گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تیمور توکلی PhD

گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

برات قبادیان PhD

گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

اسمعیل محمودی PhD

گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر عملکرد یک توربین بادی پوشش‌دار در مقایسه با توربین بادی معمول در تونل باد بررسی شده است. توربین‌های پوشش‌دار نوعی از توربین‌های بادی کوچک هستند که یک دیفیوزر در اطراف روتور قرار گرفته و باعث افزایش دبی جریان هوا از میان پره‌ها شده است و در نتیجه توان بیشتری را جذب می‌کنند. پره توربین از کامپوزیت رزین پلی‌استر با الیاف شیشه و به صورت توخالی ساخته شده است. پوشش مورد استفاده نیز به روش نورد نوارهای فولادی روی سطح شیب‌دار ساخته شده است تا بتواند شکل ظاهری قابل قبولی نیز داشته باشد. طبق طراحی BEM، توان توربین بدون پوشش با در نظر گرفتن ۲۰٪ افت توان به علت اصطکاک، اینرسی و بازده ژنراتور، ۳۰۰ وات در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه است که نتایج تونل باد، ۱۶۵ وات را در این سرعت نشان داد. ارزیابی سامانه در تونل باد نشان داد که توان تولیدی سامانه پوشش‌دار نسبت به توربین معمولی به طور متوسط ۳۷٪ بیشتر است. بیشترین توان تولیدی توربین پوشش‌دار ۲۸۶ وات به دست آمد. سرعت روتور توربین پوشش‌دار به طور متوسط ۶۱٪ بیشتر از توربین بدون پوشش بود که باعث بالارفتن نسبت سرعت نوک پره می‌شود.

کلیدواژه‌ها: توربین بادی، توربین بادی پوشش‌دار، ضریب تقویت‌کنندگی، حد بتز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۵

* نویسنده مسئول: g.najafi@modares.ac.ir

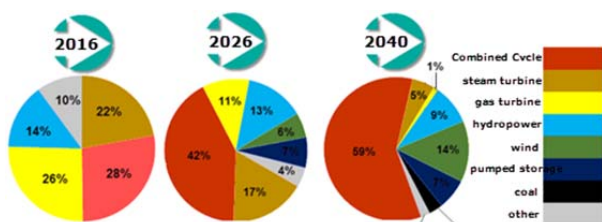
۱- مقدمه

کشورهای توسعه‌یافته به منظور تنوع‌بخشی به منابع انرژی، توسعه پایدار و ایجاد امنیت انرژی و حذف مشکلات زیست‌محیطی اقبال خوبی به منابع تجدیدپذیر انرژی نظیر خورشید، باد، زیست توده (بیوماس) و غیره از خود نشان داده‌اند که باعث افزایش سهم این منابع در سبد انرژی جهانی شده است. قابل پیش‌بینی است که در اثر افزایش روند گرم‌شدن زمین، مشکلات زیست‌محیطی فزاینده و بی‌نیاز شدن کشورهای قدرتمند جهان از منابع فسیلی به لحاظ توسعه منابع انرژی‌های جایگزین، به زودی کنوانسیون‌های بین‌المللی به وجود خواهند آمد که استفاده از منابع فسیلی را محدود خواهند کرد. البته قابل ذکر است که هم‌اکنون نیز با پیوستن به توافق‌نامه اقلیمی پاریس متعهد هستیم تا سال ۲۰۲۰ میلادی، ۱۲٪ مصرف سوخت فسیلی برای تولید برق را کم کنیم که اثرات آن در قطعی‌های برق در تابستان ۱۳۹۷ در ایران کاملاً مشهود بود. جزئیات بیشتری از این توافق‌نامه و تحلیل آن در روزنامه وطن امروز به تاریخ ۹۷/۴/۲۰ قابل دسترسی است.

انرژی‌های تجدیدپذیر پاک، فراوان، مجانی و دردسترس همگان قرار

دارند. این منابع پایان‌ناپذیرند و کمیت و کیفیت آنها تا زمانی که نظام آفرینش پابرجاست، تغییر نخواهد کرد. بنابراین سرمایه‌گذاری مالی و پژوهشی روی این منابع برای همه کشورهای جهان عقلانی به نظر می‌رسد.

در وزارت نیرو، نصب ۵۰۰۰ مگاوات نیروگاه تجدیدپذیر در قانون برنامه پنجم توسعه هدف‌گذاری شده که از این میزان ۴۵۰۰ مگاوات آن برای توسعه باد در نظر گرفته شده است. بنابراین می‌توان گفت در پنج سال آینده نزدیک به ۴۰۰۰ مگاوات بازار برای توسعه بخش خصوصی وجود خواهد داشت^[۱]. برنامه اعلام‌شده از طرف وزارت نیرو برای منابع مختلف تولید انرژی در سال‌های آینده به شرح شکل ۱ است.



شکل ۱) آینده انرژی ایران^[۱]

هزینه انرژی حاصل از توربین‌های بادی نسبت به منابع مرسوم مانند نفت و گاز بالاتر است. علت این اختلاف، چگالی انرژی جنبشی موجود در جریان بادی نسبت به انرژی پتانسیل نهفته در منابع فسیلی است. محققان زیادی برای افزایش چگالی انرژی دریافتی از توربین‌های بادی تلاش کرده‌اند که شامل انواع توربین بادی ابداعی، بهینه‌سازی پره، توسعه ژنراتورهای تولید برق و همچنین توربین‌های بادی پوشش‌دار است. تحقیق پیش رو صرفاً روی توربین بادی محور افقی پوشش‌دار تمرکز دارد و در بخش‌های مختلف از جمله بررسی پیشینه پژوهش به این دسته پرداخته خواهد شد.

از زمان‌های گذشته تا به امروز، انرژی بادی فقط به یک صورت مورد استفاده بوده و آن هم تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی توسط یک محور گردنده است. در گذشته‌های دور، از انرژی بادی برای آسیاب غلات و بیرون‌کشیدن آب از قنات‌ها و چاه‌ها استفاده می‌شد. ولی اکنون، این انرژی برای تولید جریان الکتریسته مورد استفاده قرار می‌گیرد که به ماشین انجام این کار، توربین بادی اطلاق می‌شود^[۱].

توربین بادی پوشش‌دار مجهز به یک دیفیوزر است که روی روتور قرار می‌گیرد. ولی صرف اینکه پوشش روی توربین قرار بگیرد، باعث برتری آن نسبت به توربین‌های مرسوم نمی‌شود. برای اینکه توربین دارای مزیت اقتصادی شود، باید مشخصاتی شامل عملکرد ارتقا یافته، کاهش هزینه ساخت، طول عمر قابل توجه، قابلیت اطمینان، دسترسی، امکان تعمیر و نگهداری آسان، سازگاری با محیط زیست و کاربردی بودن، در آن لحاظ شده باشد: توربین‌های بادی پوشش‌دار نسبت به توربین‌های مرسوم دارای مزایای زیر هستند:

- ۱- افزایش توان خروجی در واحد سطح جاروب‌شده نسبت به توربین‌های مرسوم
 - ۲- تولید توان در سرعت‌های پایین باد
 - ۳- افزایش دور روتور که باعث کوچک‌تر شدن گیربکس می‌شود.
- با توجه به پایین بودن سرعت متوسط باد در اکثر نقاط ایران، جای توسعه یک توربین بادی که با سرعت‌های پایینی توان مورد نیاز را

این مدل، میزان تقویت‌کنندگی پوشش را وابسته به میزان افزایش دبی جریان هوا در مقطع روتور نشان می‌دهد. همچنین *ون‌باسل* و همکاران براساس مدل‌سازی تئوری ممنتم ادعا کرده‌اند که بیشترین ضریب توان ممکن برای یک توربین پوشش‌دار ۰/۷ یا کمی بیشتر است [19].

کیشیرو و همکاران در سال ۲۰۱۳، یک توربین بادی پوشش‌دار مخصوص بادهای کم‌سرعت طراحی و ساختند. تحلیل عددی و آزمایشگاهی نشان داد که قسمت دیفیوزر پوشش، تاثیر بیشتری نسبت به بخش نازل آن دارد [20]. در تحقیق فوق، ضریب تقویت‌کنندگی ۱/۴ تا ۱/۶ گزارش شده است. یادآور می‌شود ضریب تقویت‌کنندگی برابر با نسبت ضریب توان توربین بادی پوشش‌دار به حد بتز بوده که برابر با ۰/۵۹ است. بنتمپو و *ماتا* در سال ۲۰۱۴، یک روش نیمه‌تحلیلی غیرخطی ارایه کردند که قادر بود رفتارهای غیرخطی مانند پسیاد و تغییرات سرعت در راستای شعاعی را پوشش دهد [21]. این مدل به واسطه ارزیابی CFD مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است و همخوانی قابل قبولی را از خود نشان داد. این تیم تحقیقاتی، یک مدل غیرخطی براساس بقای ممنتم ارایه کردند تا بتوانند تاثیر نیروی فشاری وارده بر پوشش روی عملکرد توربین را مطالعه نمایند. این روش نسبت به روش‌های خطی، این برتری را داشت که می‌توانست چرخش پسیاد و همچنین اثرات درهم‌کنشی روتور و پوشش را نیز در بر داشته باشد [22].

شی و همکاران، یک زیردریایی ساخته‌اند که در اطراف فن‌کشنده آن یک پوشش قرار گرفته است. آنها به‌صورت عددی و آزمایشگاهی نشان داده‌اند که با این کار، ضریب جذب توان تا ۰/۸۳ بالا رفته است. همچنین بیان داشته‌اند که طول پوشش، میزان افزایش سرعت را با تغییر میزان وقوع جدایش و *EAR*، نیروی پسای وارد به پوشش را تحت کنترل دارند [23].

آراناک و دیوریسمی برای شبیه‌سازی رفتار جریان در توربین‌های پوشش‌دار از مقابله نتایج تحلیل عددی (حل معادلات ناویر-استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز به‌صورت متقارن) و مدل ریاضی (دیسک عملگر) بهره برده‌اند. آنها با استفاده از نتایج روش فوق، به یک طراحی بهینه از پره دست یافته‌اند که میزان تقویت‌کنندگی را بیشینه می‌نماید. نتایج این بررسی، میزان تقویت‌کنندگی برابر با ۲/۶۴ را نشان داده است. پیچیدگی‌های سازه‌ای باعث شده است که این محققان نیز پوشش را فقط برای توربین‌های کوچک توصیه نمایند [24].

آخرین پیشرفت‌ها در توربین‌های بادی کوچک پوشش‌دار، استفاده از چند روتور بوده که توسط *ویا* و همکاران ابداع شده است. آنها دو و سه توربین را روی یک سازه قرار دادند. با تغییر فاصله افقی چینش و تعداد روتور به این نتیجه رسیده‌اند که چنانچه سه روتور را به صورت سری پشت سر هم قرار دهند، ۱۲٪ توان بیشتری کسب خواهند کرد [25]. در ادامه *گول‌تونبوت* و همکاران، اثر متقابل این روتورها را از نظر آیرودینامیک بررسی نمودند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داده است که استفاده از دو و سه روتور می‌تواند به‌ترتیب ۹ و ۵٪ توان استحصال را افزایش دهد. در این پژوهش، یک توربین بادی کوچک به‌صورت بدون پوشش، پوشش‌دار و پوشش‌دار مجهز به فلانچ و هر کدام با یک، دو و سه روتور بررسی شده است [26].

۲- مبانی نظری توربین بدون پوشش

زمانی که توربین بادی به چرخش در می‌آید، روتور به‌صورت یک

تامین‌کننده، خالی است. عملکرد پوشش به این صورت است که با ایجاد خلا نسبی در پشت روتور، جریان هوا به سمت پره‌ها مکیده می‌شود. مطالعات نشان داده است چنانچه پوشش درست طراحی شود، سرعت جریان باد در صفحه روتور به‌طور میانگین ۲ برابر می‌شود و توان تولیدی با توجه به طراحی ۵۰٪ نسبت به حد بتز فراتر می‌رود.

اولین مطالعه روی توربین بادی پوشش‌دار مدرن در سال ۱۹۵۶ توسط *لیلی* و *رینبرد* انجام گرفته است. وی به‌صورت ریاضی ثابت کرده است که پوشش می‌تواند ضریب جذب توان را ۵۰٪ از حد بتز عبور دهد [2]. در ادامه *کوگان* و همکاران یک سری بررسی تجربی را پیش بردند [3]. نفت فراوان و ارزان، این فعالیت‌ها را تا بحران نفتی ۱۹۷۳ فاقد توجیه اقتصادی کرده بود. این تحریم، کشورهای نیازمند به نفت منطقه خلیج فارس را به فکر فرو برد و در نتیجه، تصمیم به توسعه منابع جایگزین گرفتند. اولین تلاش بعد از بحران فوق در رابطه با توربین‌های پوشش‌دار در دانشگاه بن‌گورین سرزمین‌های اشغالی توسط *ایگر* انجام گرفت. وی توربین‌های بادی پوشش‌دار را به‌صورت تئوری و تجربی بررسی کرد و شکل‌های مختلفی را برای پوشش مورد ارزیابی قرار داد. او در این مطالعات به تقویت‌کنندگی ۲/۴ برابری نسبت به حد بتز دست یافت [4-8]. در سال ۱۹۷۹، *گیلبرت* و فورمن در مرکز مطالعات گرومن در نیویورک یکسری مطالعات را توسعه دادند که ضریب تقویت‌کنندگی ۴ برابری نسبت به حد بتز را نشان می‌داد [9-15]. این گروه برای توجیه نتایج آزمایش‌های خود، یک مدل ریاضی نیز گسترش دادند که البته قادر به توجیه همه جوانب کار از جمله پسیاد نبود. تلاش‌های *ایگر* و فورمن مسیر مشخصی پیش پای محققان باز کرد که تا امروز همچنان پایرجاست. *فلچرکاج* در سال ۱۹۸۱ با لحاظ جریان چرخشی پسیاد و تاثیر عدد رینولدز، یک مدل ریاضی براساس *BEM* ارایه داد که نشان می‌داد بازدهی پوشش و ضریب افت فشار خروجی آن، عملکرد توربین را کنترل می‌کنند [16]. توربین بادی پوشش‌دار *VORTEC 7* در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی براساس مطالعات محققان پیشین در نیویورک ساخته شد. این توربین دارای یک پوشش چندپارچه بود که باعث ایجاد مکش بیشتر هوا و مانع ایجاد پدیده جدایش می‌شد.

با گذشت زمان و ارتقای تکنولوژی، هزینه ساخت پوشش برای توربین‌های بادی توجیه‌پذیر شد. بنابراین تلاش‌ها در راستای توسعه این مدل از توربین‌های بادی، سرعت بیشتری به خود گرفت. *فیلیپس* طی رساله دکتری خود در دانشگاه اوکلند نیوزیلند، مطالعه جامعی روی توربین‌های بادی پوشش‌دار انجام داد و ضریب تقویت‌کنندگی پوشش را فرمول‌بندی کرد. با وجود تمام کاستی‌هایی که روش وی داشت، ولی یک روش مشخصی پیش پای محققان بعدی باز کرد [17].

هانسن و همکاران در سال ۲۰۰۰، یک مدل ریاضی 1-D براساس دیسک عملگر ارایه کردند و برای صحت‌سنجی آن از تحلیل CFD با استفاده از حلگر ناویر-استوکس بهره بردند. این مطالعه نشان داده است که با استفاده از پوشش می‌توان از حد بتز عبور کرد، ولی این مقدار از تقویت‌کنندگی، هرگز به مقدار افزایش سرعت جریان باد در مقطع روتور نخواهد بود [18]. نتیجه بررسی‌های تجربی *هانسن* و همکاران نشان می‌دهد که مقدار تقویت‌کنندگی از مقادیر پیش‌بینی‌شده در مدل ریاضی کمتر است. علت این اختلاف، عدم توانایی مدل ریاضی در پوشش پدیده جدایش توجیه شده است. *ون‌باسل* و همکاران در سال ۲۰۰۷، بر پایه قوانین پایستگی انرژی، یک مدل ریاضی برای توربین‌های بادی پوشش‌دار پیشنهاد نمودند.

با اعمال رابطه برنولی برای حجم کنترل فوق، افت فشار کل در طول پوشش و ضریب فشار در دهانه خروجی آن به صورت روابط ۶ و ۷ نوشته می‌شود:

$$\Delta p_d = (p_r^- - p_e) + \frac{1}{2} \rho (V_r^2 - V_e^2) \quad (6)$$

$$Cp_e = \frac{p_e - p_u}{\frac{1}{2} \rho V_u^2} \quad (7)$$

بازدهی پوشش نیز به شکل رابطه ۸ تعریف می‌شود [17]:

$$\eta_d = \frac{p_e - p_r^-}{\frac{1}{2} \rho (V_r^2 - V_e^2)} \quad (8)$$

برای ادامه مسیر حل، چند عبارت بی‌بعد که اکثر پژوهشگران از آنها استفاده کرده‌اند، به صورت زیر تعریف می‌شوند [17, 28, 29]:

$$\gamma = \frac{V_r}{V_u} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{A_r}{A_e} = \frac{V_e}{V_r} \quad (10)$$

با ترکیب روابط فوق، توان جذب شده توسط دیسک عبارت از رابطه زیر خواهد بود:

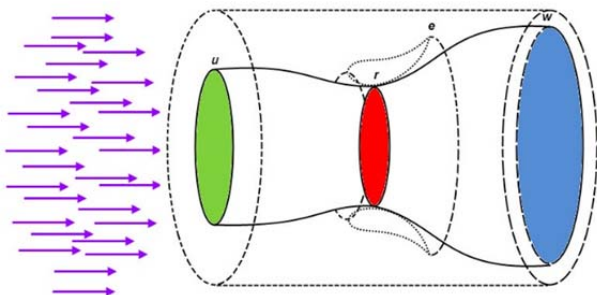
$$(11)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A_r V_u^3 \gamma [(1 - Cp_e + \gamma^2 \beta^2) - \gamma^2 (1 - \beta^2) (1 - \eta_d)]$$

بنابراین ضریب توان عبارت به صورت زیر خواهد بود:

$$Cp = \gamma [(1 - Cp_e + \gamma^2 \beta^2) - \gamma^2 (1 - \beta^2) (1 - \eta_d)] \quad (12)$$

با توجه به رابطه ۱۲، هندسه پوشش و مقدار افزایش سرعت مهم‌ترین عامل در میزان تقویت توان خواهد بود.

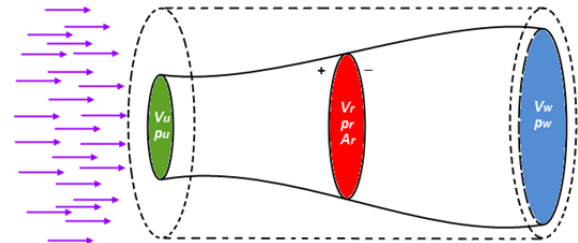


شکل ۳ حجم کنترل برای دیسک عملگر بدل از روتور توربین بادی پوشش‌دار

۴- طراحی و ساخت براساس الزامات استاندارد IEC 61400-2

توربین‌های بادی در درجه اول براساس متغیرهای محیطی مانند رژیم باد، شرایط جوی، شرایط ناهمواری و پوشش (گیاهی و سازه‌ای) زمین و همچنین شبکه برق در دسترس طراحی می‌شوند. برای طراحی توربین بادی، سرعت باد در دو حالت مختلف عادی و طوفانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای طراحی توربین، اطلاعات باد منطقه در بلندمدت (از ۲ تا ۵۰ سال) مورد استفاده قرار می‌گیرد و با توجه به جدول ۱، کلاس آن تعیین می‌شود. برای تعیین کلاس توربین بادی، ابتدا سرعت متوسط باد منطقه از روی نمودار توزیع ویبول آن استخراج می‌شود.

دیسک (عملگر) در می‌آید. با توجه به این مطلب و در نظر گرفتن شکل ۲ می‌توان مدل مورد نظر را ارایه نمود. با این حال ساده‌سازی‌هایی برای شروع به کار لازم است که اعمال شود. همه فرآیند در عدد ماخ کوچک در نظر گرفته می‌شود که چگالی هوا در آن ثابت فرض می‌شود. همچنین جریان آرام، غیرقابل تراکم و بدون اصطکاک بوده است و هیچ نیروی خارجی چه در بالادست و چه پایین دست به حجم کنترل در نظر گرفته شده اعمال نمی‌شود.



شکل ۲ حجم کنترل برای دیسک عملگر بدل از روتور توربین بادی بدون پوشش

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، دیسک عملگر، یک نیروی پسا به جریان باد وارد می‌کند و سرعت آن را از V_u در فاصله‌ای قبل از دیسک، به V_r در صفحه دیسک کاهش می‌دهد. فشار نیز در صفحه روتور به دلیل فوق به شدت کاهش می‌یابد. این تغییرات فشار و سرعت در جلو و پشت دیسک را می‌توان توسط رابط برنولی به هم مرتبط کرد.

رابطه برنولی برای بالادست دیسک و صفحه مثبت آن به شرح رابطه ۱ است [27]:

$$p_u + \frac{1}{2} \rho V_u^2 = p_r^+ + \frac{1}{2} \rho V_r^2 \quad (1)$$

این رابطه برای پشت دیسک به صورت رابطه ۲ نوشته خواهد شد:

$$p_r^- + \frac{1}{2} \rho V_r^2 = p_u + \frac{1}{2} \rho V_w^2 \quad (2)$$

از آنجایی که فشار در بالادست و پایین دست برابر است، لذا از همین مساله استفاده می‌شود و با ترکیب دو معادله ۱ و ۲، نیروی وارده بر دیسک به صورت رابطه ۳ خواهد بود:

$$F_r = (p_r^+ - p_r^-) A_r = \frac{1}{2} \rho (V_u^2 - V_w^2) A_r \quad (3)$$

بنابراین توان جذب شده توسط دیسک به شرح معادله ۴ به دست می‌آید:

$$P = F_r V_r = \frac{1}{2} \rho (V_u^2 - V_w^2) A_r V_r \quad (4)$$

این در حالی است که کل توان موجود در جریان باد وارد شده به دیسک برابر با $\frac{1}{2} \rho A_r V_r^3$ است. بتتر ثابت کرده که بیشترین مقدار توان جذب شده توسط دیسک (رابطه ۴)، ۵۹/۳٪ است [27]. لذا محققان مختلف تلاش کرده‌اند با قراردادن پوشش در اطراف روتور توربین و استفاده از مکانیزم تقویت پسیاد و ایجاد مکش در پشت آن، از حد بتتر عبور نمایند.

۳- مبانی نظری توربین بادی پوشش‌دار

با همان شرایط اولیه که در بخش قبلی بیان شد، مدل یک‌بعدی برای دیسکی ارایه می‌شود که در دهانه یک پوشش دیفیوزرگون قرار گرفته است. بالانس انرژی برای حجم کنترل توربین پوشش‌دار (شکل ۳) را می‌توان به صورت رابطه ۵ نوشت:

$$\frac{1}{2} \rho Q V_u^2 - \frac{1}{2} \rho Q V_w^2 = V_r F_r + Q \Delta p_d \quad (5)$$

SG6043 است. قطر روتور ۱/۴ متر و شعاع دماغه ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. توزیع طول وتر و زاویه تابیدگی پره با در نظر گرفتن ضرایب تصحیح اسنل و پرنتل و با استفاده از روابط ۱۸ و ۱۹ محاسبه شده است [27].

$$\beta = \operatorname{atan} \left[\frac{1 - \frac{a}{f}}{\lambda \tau \left(1 + \frac{a \left(1 - \frac{a}{f} \right)}{\lambda^2 \tau^2 f} \right)} \right] - \alpha \quad (18)$$

$$c = \frac{8\pi r}{N\lambda C_L} \frac{a(1-a)}{\sqrt{(1 - \frac{a}{f})^2 + (\lambda \tau (1 + \frac{a(1 - \frac{a}{f})}{\lambda^2 \tau^2 f}))^2}} \quad (19)$$

با در نظر گرفتن روابط فوق و همچنین معادلات آیرودینامیک در طراحی پره، توربین بادی کوچک پوشش‌دار موسوم به TMWT طراحی و ساخته شده است. این توربین از ۷۵ قطعه تشکیل شده است که مدل نهایی آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۴) TMWT نصب‌شده در محوطه دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۵- آزمون و ارزیابی

تمامی ارزیابی عملکرد TMWT در تونل باد انجام گرفته است. این تونل که جریان هوای داخل آن توسط یک فن به قطر ۴/۵ متر و توان حداکثر ۱/۲ مگاوات ایجاد می‌شود، دارای مقطع آزمون اصلی با ابعاد ۲/۸×۲/۲ متر و حداکثر سرعت اسمی آن با مقطع آزمون باز، ۵۰ متر بر ثانیه است. نتایج کالیبراسیون تونل باد فوق رضایت‌بخش بوده و جریان در مقطع آزمون از کیفیت قابل قبولی برخوردار است. تغییرات سرعت نسبت به مقدار متوسط آن کمتر از حدود ۲٪ و آشفتگی جریان در مرکز مقطع آزمون کمتر از ۱۳٪ است.

ابعاد مقطع آزمون اصلی ۲/۸ متر عرض و ۲/۲ متر ارتفاع و طول آن در حالت باز، ۴ متر و در حالت بسته ۶/۵ متر است. این تونل دارای محفظه آرامش با نسبت انقباضی ۹ به یک است که مجهز به دو توری و یک لانه زنبوری است. فن تونل باد فوق به وسیله موتور آسنکرون ۶ فاز با حداکثر قدرت ۱/۳ مگاوات راه‌اندازی می‌شود. دور فن توسط یک مبدل کنترل می‌شود که از سرعت دورانی ۶۰ تا ۵۶۰ دور بر دقیقه با دقت یک‌دور بر دقیقه قابل کنترل است.

جدول ۱) کلاس مختلف باد برای توربین‌های کوچک بادی [28]

کلاس	I	II	III	IV
V_{ref}	۵۰	۴۲/۵	۳۷/۵	۳۰
V_{ave}	۱۰	۸/۵	۷/۵	۶
I_{15}	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸
a	۲	۲	۲	۲

کلاس "S" توسط طراح تعیین می‌شود.

این کلاس‌بندی، مخصوص توربین‌های بادی کوچک است که دارای سطح جاروب‌شده کمتر از ۲۰۰ متر مربع (قطر روتور کمتر از ۱۶ متر) یا توان تولیدی کمتر از ۱۰۰ کیلووات هستند. کلاس S که در جدول ۱ آورده شده است، برای برآورد نیازهای موردی و شرایط خاص مانند سواحل، مناطق گرمسیری، مناطق پُر از گرد و غبار و غیره در این استاندارد گنجانده شده است تا دست طراح باز باشد. در این پژوهش نیز با توجه به اینکه از پوشش استفاده می‌شود، کلاس S در آن مد نظر قرار گرفته است.

در شرایط عادی، احتمال وقوع سرعت (V_{hub}) در ارتفاع مرکز روتور به شکل رابطه ۱۳ بوده که به توزیع رایلی معروف است.

$$P_R(V_{hub}) = 1 - e^{(-\pi(V_0/2V_{ave})^2)} \quad (13)$$

در چنین شرایطی، سرعت باد در ارتفاع (H) از سطح زمین به شکل رابطه ۱۴ خواهد بود.

$$V(H) = V_{hub} \left(\frac{H}{H_{hub}} \right)^{0.2} \quad (14)$$

پس از استخراج سرعت متوسط باد منطقه و در نظر گرفتن ارتفاع هاب، سرعت طراحی براساس استاندارد ۱/۴ برابر سرعت متوسط در آن ارتفاع در نظر گرفته می‌شود.

در طراحی توربین بادی کوچک براساس استاندارد IEC 61400-2، ده عامل مختلف از جمله محدوده دمایی، رطوبت، میزان تابش آفتاب، چگالی هوا، شرایط بارش نزولات آسمانی، مواد شیمیایی فعال در منطقه، تاثیر ذرات معلق، برخورد صاعقه، زلزله و خوردگی قطعات در اثر هوای نمک‌آلود در نظر گرفته می‌شود. با در نظر داشتن شروط ده‌گانه مندرج در استاندارد مذکور، طراحی منجر به ساخت یک توربین بادی کوچک با عملکرد ایمن خواهد شد.

مطابق استاندارد فوق و براساس مدل بارگذاری‌سازی شده، تنش پیشینه در طراحی قطعات باید در محدوده رابطه ۱۵ بگنجد:

$$\sigma \leq \frac{f_k}{\gamma_m \gamma_f} \quad (15)$$

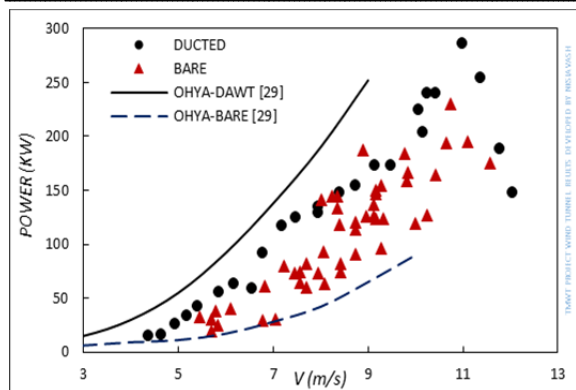
در پره، بار خستگی و نهایی در ریشه یا محل اتصال آن به هاب در نظر گرفته شده است و تنش برشی ناچیز انگاشته می‌شود. تنش کل در ریشه پره از رابطه ۱۶ قابل محاسبه است:

$$\sigma = \frac{F_{Zb}}{A_b} + \frac{\sqrt{M_{xb}^2 + M_{yb}^2}}{W_b} \quad (16)$$

در محور اصلی نیز، بار خستگی و نهایی در نزدیک‌ترین نقطه به اولین یاتاقان در نظر گرفته می‌شود. تنش کل محور اصلی از رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{F_{xs}}{A_s} + \frac{M_s}{W_s} \right)^2 + 3 \left(\frac{M_{xs}}{2W_s} \right)^2} \quad (17)$$

پره توربین براساس تئوری BEM طراحی و از رزین پلی‌استر با الیاف‌های تقویت‌کننده شیشه‌ای ساخته شده است. هوابر مورد استفاده در پره، در قسمت ریشه SG6040 و در قسمت بدنه پره

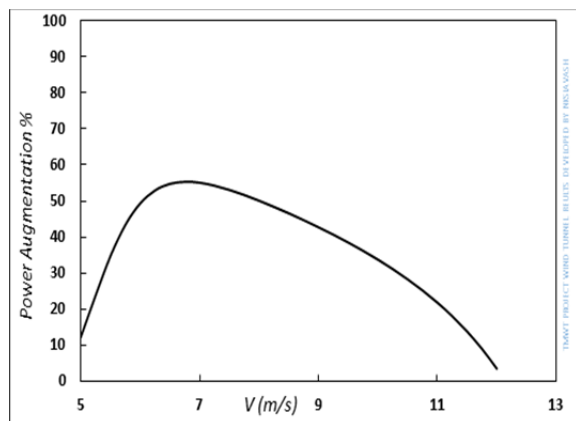


نمودار ۱) مقایسه توان تولیدی دو مدل با پوشش و بدون پوشش در سرعت‌های مختلف باد

در نمودار ۲، میزان تقویت‌کنندگی (AR)، تولید توان در توربین پوشش‌دار نسبت به توربین بادی بدون پوشش به‌صورت تابعی از سرعت باد نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که توربین پوشش‌دار در دامنه سرعت باد آزمایش‌شده، نسبت به توربین بدون پوشش برتری داشته است و همواره توان بالاتری تولید می‌نماید.

اگر میزان تقویت‌کنندگی برابر یا بیشتر از ۲۰٪ باشد، برای ما راضی‌کننده باشد، این پوشش در محدوده ۵/۲ تا ۱۱/۲ متر بر ثانیه از سرعت باد این کار را انجام می‌دهد. لازم به یادآوری است که در این بخش، منظور از تقویت‌کنندگی، میزان تقویت نسبت به حد بت‌ر نیست، بلکه نسبت به توان تولیدی توربین واقعی است.

اگر سرعت باد در صفحه روتور توربین بدون پوشش، به‌عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شود، با برابر قراردادن توان‌های تولیدی، مقدار افزایش سرعت در صفحه روتور نیز به دست خواهد آمد. البته این مقدار، مقدار قطعی نخواهد بود، چرا که ممکن است عامل دیگری به‌جز افزایش سرعت نیز باعث افزایش توان شده باشد.



نمودار ۲) میزان تقویت‌کنندگی پوشش با توجه به سرعت باد

مقایسه توان تولیدی در سرعت‌های دورانی مختلف روتور در نمودار ۳ نشان داده شده است. حداکثر سرعت دورانی توربین بدون پوشش، ۲۰۰ دور بر دقیقه از حداکثر دوری که توربین پوشش‌دار در آن توان تولید کرده، کمتر است. به عبارت دیگر، در دور روتور مشابه، توربین بدون پوشش، توان بیشتری تولید کرده است. بنابراین گشتاور تولیدی آن در این نواحی بیشتر از مدل پوشش‌دار است. با توجه به این مطالب می‌توان به توربین‌های پوشش‌دار، توربین‌های پُرسرعت هم اطلاق نمود.

پارامترهای فن با انتقال سیگنال‌های کنترلی و هشداردهنده به داخل اتاق فرمان، کنترل می‌شود و دور فن به‌صورت دستی و اتوماتیک با کامپیوتر قابل تغییر است.

برای اندازه‌گیری توان تولیدی توربین از تابلوی چراغ استفاده شد. اجزای این تابلو عبارت از یک کنترل‌کننده جریان، کلیدهای قطع و وصل، چراغ‌های ۱۲ ولتی با توان‌های مختلف، مولتی‌متر روی پنبلی و غیره بوده و در شکل ۵، نمای ظاهری این تابلو نشان داده شده است.

همچنین برای اندازه‌گیری دور روتور از فرکانس جریان متناوب تولیدشده در ژنراتور استفاده شده است. برای این کار، رابطه بین دور روتور، ولتاژ ایجادشده و بار روی ژنراتور با استفاده از تابلوی چراغ و دستگاه تراش کالیبره شده است.



شکل ۵) ست‌آپ آزمون

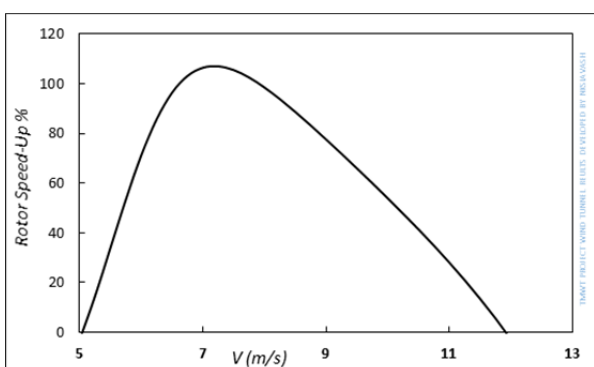
۶- نتایج و بحث

در شکل ۶، نحوه قرارگیری توربین در حالت پوشش‌دار و حالت بدون پوشش نشان داده شده است. در نمودار ۱، توان تولیدی توربین بدون پوشش و توربین پوشش‌دار نشان داده شده است. این نمودار تقویت‌کنندگی پوشش را به‌خوبی نشان می‌دهد. محدوده انتهایی نمودار اذعان می‌دارد که در سرعت‌های بالای باد، وجود پوشش کامل نمی‌تواند از افت توان جلوگیری نماید. پوشش به‌طور متوسط، ۳۷٪ تولید توان را افزایش داده است. در نمودار ۱ توان تولیدی توربین بادی ۵۰۰ واتی /ویا نیز در دو حالت پوشش‌دار و بدون پوشش نشان داده شده است [29]. روند تولید توان در هر دو حالت پوشش‌دار و بدون پوشش انطباق دارد. از آنجایی که روتور توربین بادی /ویا مخصوص توربین پوشش‌دار طراحی و ساخته شده، لذا توان تولیدی آن بدون پوشش، بسیار کمتر از نوع پوشش‌دار است. می‌توان چنین نتیجه گرفت که در صورت طراحی روتور با در نظر داشتن پوشش برای توربین مورد مطالعه پژوهش حاضر، همین اتفاق برای TMWT نیز افتاده و توان تولیدی آن با پوشش افزایش پیدا کرده و بدون پوشش، کاهش چشمگیری داشته است. قابل ذکر بوده که پوشش مورد استفاده در توربین /ویا از نوع فلانچ‌دار بوده و ضریب توان بیشینه آن ۱/۴ گزارش شده است [29].

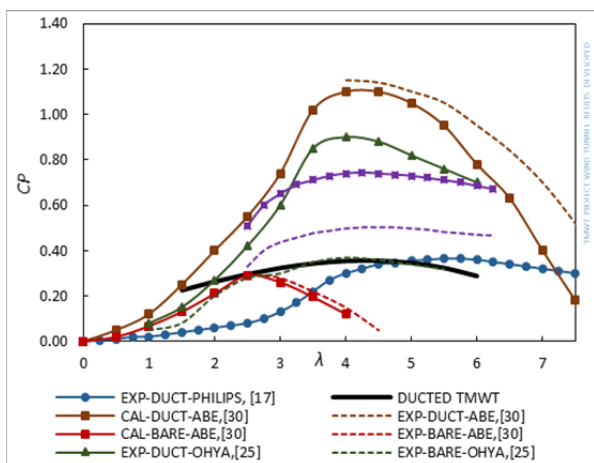


شکل ۶) چگونگی قرارگیری TMWT در دهانه تونل باد

در نمودار ۶، دامنه تغییرات TSR توربین TMWT در مقایسه با چند نمونه از پژوهش‌های گزارش‌شده از طرف پژوهشگران مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار نشان داده شده، ضریب توان تولیدی توربین ساخته‌شده در تحقیق حاضر، کمتر از موارد گزارش‌شده است. علت این تفاوت در دو موضوع است؛ روتور توربین ساخته‌شده در تحقیق حاضر، مخصوص پوشش ساخته نشده، لذا با پوشش به بیشترین عملکرد خود دست نیافته است. در نمودار ۶، توربین پوشش‌دار/ویا بازدهی بسیار بالایی نسبت به کار حاضر داشته، ولی در نمودار ۱، توربین بدون پوشش تحقیق حاضر از توربین بدون پوشش/ویا موفق‌تر عمل کرده است. مورد دیگر اینکه برخی از کارهای اشاره‌شده در نمودار ۶، از پوشش فلانچ‌دار استفاده کرده‌اند که ذاتاً از پوشش مورد استفاده در این پژوهش، عملکرد بالاتری دارد. مدل‌های تئوری و آزمایشگاهی/یب و همکاران^[30] و تاورس‌دیس‌دوریوز و همکاران^[31] نیز به همان دلایل نسبت به توربین توسعه‌داده شده برتری دارند.



نمودار ۵) درصد افزایش سرعت روتور در توربین پوشش‌دار با توجه به سرعت باد



نمودار ۶) ضریب توان به‌ازای TSRهای مختلف در تحقیق حاضر و چند پژوهش مشابه

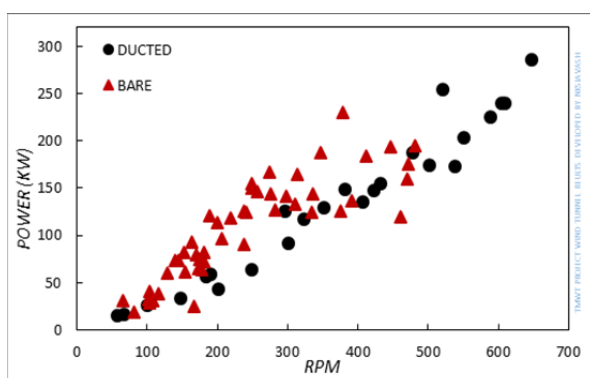
قابل ذکر است که ماکزیمم ضریب توان گزارش‌شده توسط مطالعات^[30, 31] با توجه به نتایج حاصل از مدل تئوری ارائه‌شده در مطالعه حاضر قابل نقد است. طبق مدل ریاضی ارائه‌شده، حداکثر ضریب توان قابل دسترسی با توجه به ملاحظات عملی، کمتر از یک خواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

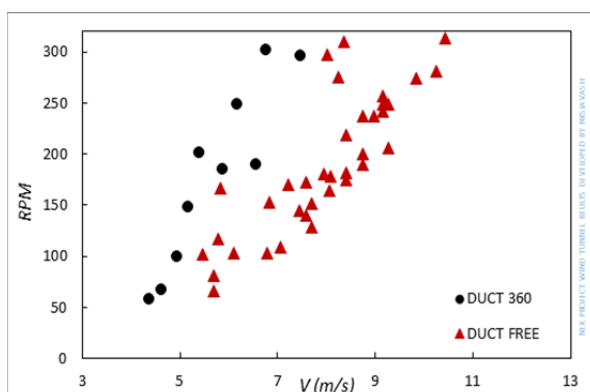
در این مقاله، تاثیر قرارگیری یک پوشش دوطرفه روی عملکرد توربین بادی در تونل باد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ارزیابی

در نمودار ۴، اختلاف سرعت دورانی روتور برای دو مدل مذکور نشان داده شده است. سرعت توربین با پوشش کامل به‌طور متوسط ۶۱٪ بیشتر از توربین معمولی است. سرعت بالاتر روتور، دارای مزایا و معایب به‌صورت زیر هستند:

مزایا: دور بالاتر روتور به‌معنی افزایش نسبت سرعت نوک پره است که در محدوده کار روتور مذکور، هرچه این نسبت بیشتر باشد، توان بیشتری نیز تولید خواهد شد. از طرف دیگر، بالارفتن دور روتور آن هم به این مقدار، باعث رفع نیاز از هر گونه گیربکسی و یا در بدترین حالت باعث کوچک‌شدن اندازه آن می‌شود. یکی دیگر از مزایای افزایش سرعت، کاهش گشتاور تولیدی متناظر با توان برابر است. با کم‌شدن گشتاور تولیدی، اندازه محور کوچک‌تر می‌شود و تمرکز کردن روتور آسان‌تر خواهد شد.



نمودار ۷) مقایسه توان تولیدی دو مدل با پوشش و بدون پوشش در دورهای مختلف روتور



نمودار ۸) مقایسه دور روتور دو مدل با پوشش و بدون پوشش در سرعت‌های مختلف باد

معایب: یکی از معایب عمده افزایش سرعت روتور، افزایش نیروی گریز از مرکز وارده به پره و مخصوصاً میج آن است. بنابراین پره در قسمت میج و ریشه باید تقویت شود و در نتیجه، وزن و قیمت تمام‌شده آن بالاتر می‌رود. یکی دیگر از معایب روتور با دور بالاتر، افزایش استهلاک آن است. عمر قطعاتی مانند بلبرینگ‌ها با تعداد دوران آنها تعیین می‌شود. لذا بدیهی است روتور با سرعت بالاتر زودتر به پایان عمر خواهد رسید. از طرف دیگر، مباحثی مانند خستگی مخصوصاً برای ریشه و میج پره قابل بررسی خواهد بود.

در نمودار ۵، درصد افزایش دور روتور در توربین بادی پوشش‌دار نسبت به توربین بادی بدون پوشش نشان داده شده است. یکی از پارامترهای بسیار مهم در تحلیل توان تولیدی، ضریب نسبت سرعت نوک پره است. این ضریب، نسبت سرعت خطی نوک پره به سرعت باد در بالادست است که به‌اختصار با TSR نشان داده می‌شود.

نیوتن در متر	گشتاور روی محور اصلی	M_{Yb}
پاسکال	فشار در بالادست	p_u
پاسکال	فشار در دهانه خروجی پوشش	p_e
پاسکال	فشار در جلوی صفحه روتور	p_r^-
پاسکال	فشار در پشت صفحه روتور	p_r^+
متر بر ثانیه	سرعت باد	V_u
متر بر ثانیه	سرعت باد در دهانه خروجی پوشش	V_e
متر بر ثانیه	سرعت باد در پایین دست	V_w
متر بر ثانیه	سرعت باد در صفحه روتور	V_r
----	نسبت سطح مقطع دهانه خروجی پوشش به مساحت روتور	β
----	ضریب افزایش سرعت	γ
----	ضریب ایمنی نسبی برای بار	γ_f
----	ضریب ایمنی نسبی برای جنس قطعات	γ_m
----	بازدهی پوشش	η_d
پاسکال	تنش کل	σ

منابع

- 1- Satba. Renewablea 2017, The global status report [Internet]. Tehran: Satba; 2018 [cited 2018 Nov 01]. Available from: http://www.satba.gov.ir/suna_content/media/image/2018/01/5925_orig.pdf. [Persian]
- 2- Lilley GM, Rainbird WJ. A preliminary report on the design and performance of ducted windmills [Internet]. Cranfield: College of Aeronautics Cranfield; 1956 [cited 2018 Nov 01]. Available from: <https://repository.tudelft.nl/view/aereports/uuid:d7e0a307-9e15-46d9-9972-621ba121881c>
- 3- Kogan A, Nissim E, Seginer A. Shrouded aerogenerator design study. Haifa: Technion Research and Development Foundation; 1961.
- 4- Igra O. Design and performance of a turbine suitable for an aerogenerator. Energy Conversion. 1976;15(3-4):143-151.
- 5- Igra O. Shrouds for aerogenerators. AIAA Journal. 1976;14(10):1481-1483.
- 6- Igra O. Compact shrouds for wind turbines. Energy Conversion. 1977;16(4):149-157.
- 7- Igra O. The shrouded aerogenerator. Energy. 1977;2(4):429-439.
- 8- Igra O. Research and development for shrouded wind turbines. Energy Conversion and Management. 1981;21(1):13-48.
- 9- Foreman KM. Preliminary design and economic investigations of diffuser augmented wind turbines (DAWT). Bangi: Solar Energy Research Institute; 1982.
- 10- Foreman KM. Size effects in DAWT innovative wind energy system design. Journal of Solar Energy Engineering. 1983;105(4):401-407.
- 11- Foreman KM, Gilbert B, Oman RA. Diffuser augmentation of wind turbines. Solar Energy. 1978;20(4):305-311.
- 12- Giguere P, Selig MS. New airfoils for small horizontal axis wind turbines. Journal of Solar Energy Engineering. 1998;120(2):108-114.
- 13- Gilbert BL, Foreman KM. Experimental demonstration of the diffuser-augmented wind turbine concept. Journal of Energy. 1979;3(4):235-240.
- 14- Gilbert BL, Foreman KM. Experiments with a diffuser-augmented model wind turbine. Journal of Energy Resources Technology. 1983;105(1):46-53.
- 15- Gilbert BL, Oman RA, Foreman KM. Fluid dynamics of diffuser-augmented wind turbines. Journal of Energy. 1978;2(6):368-374.

در تونل باد نشان داد که وجود پوشش، سرعت دورانی روتور را بالا می‌برد و توربین را قادر می‌سازد تا ۲۰۰ دور بر دقیقه سریع‌تر از حالت عادی بچرخد. این مقدار افزایش که تقریباً ۳۰٪ دور نامی روتور است، باعث می‌شود طراح بتواند دامنه وسیع‌تری از ژنراتورهای موجود در بازار را برای انتخاب در اختیار داشته باشد. مقدار متوسط افزایش توان و دور روتور برای توربین پوشش‌دار نسبت به توربین بدون پوشش به ترتیب ۳۷ و ۶۱٪ به دست آمد. مقایسه ضریب توان TMWT با نتایج گزارش شده از سایر پژوهشگران (نمودار ۶ [17, 25, 30] نشان می‌دهد که پره باید با توجه به پوشش‌داربودن توربین طراحی و ساخته شود.

این مطالعه، برتری فنی توربین بادی پوشش‌دار نسبت به توربین بادی بدون پوشش را نشان داده، ولی انتخاب آن از نظر قیمت تمام شده بسته به اندازه توربین تغییر کرده است و لذا طراح علاوه بر محاسبات فنی، باید ملاحظات هزینه‌ای را نیز مد نظر داشته باشد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مقاله از جناب آقای دکتر فتح‌اللهی معاون پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس، به‌خاطر حمایت مالی پروژه، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان مقاله با اعلام با موافقت خود مبنی بر ارسال این مقاله به نشریه مکانیک مدرس تعهد نموده‌اند این مقاله در زمان ارسال برای این نشریه در هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی ارسال نشده است. همچنین آقای غلامحسین نجفی را به عنوان نویسنده رابط معرفی نموده و وکالت تام ایشان را در کلیه امور مرتبط با این مقاله به‌ویژه انجام اصلاحات احتمالی نزد نشریه مکانیک مدرس را پذیرفته‌اند.

تعارض منافع: ما نویسندگان با اختیار و آگاهی کامل، کلیه حقوق مادی مربوط به انتشار این مقاله (صرفاً انتشار مقاله نه محتوای آن) را به نشریه مکانیک مدرس واگذار می‌نماییم و نشریه در انتشار این مقاله به هر صورت (نسخه کاغذی، آنلاین، لوح فشرده، نمایه‌های بین‌المللی و داخلی و غیره) اختیار تام دارد و منافع مادی احتمالی متعلق به نشریه است. این حق تنها با رد انتشار این مقاله در نشریه یا انصراف نویسندگان از ادامه همکاری تا قبل از تعیین تکلیف قطعی مقاله سلب خواهد شد.

سهم نویسندگان: نعمت کرامت‌سیاوش (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۶۰٪)؛ غلامحسین نجفی (نویسنده دوم)، روش‌شناس (۱۰٪)؛ تیمور توکلی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه (۱۰٪)؛ برات قبادیان (نویسنده چهارم)، روش‌شناس (۱۰٪)؛ اسمعیل محمودی (نویسنده پنجم)، تحلیلگر آماری (۱۰٪)

منابع مالی: منابع مالی این پروژه از محل بودجه پژوهشی دکتری نویسنده اول و همچنین گرنت جناب آقای دکتر تیمور توکلی در دانشگاه تربیت مدرس تامین شده است.

۸- پی‌نوشت

علامت	توضیحات	واحد
A_r	سطح جاروب شده توسط روتور	متر مربع
C_p	ضریب توان	----
C_{p_e}	ضریب فشار دهانه خروجی پوشش	----
f_k	تنش نهایی	pa
m	جرم	کیلوگرم
m_b	جرم پره	کیلوگرم
M_s	گشتاور روی محور اصلی	نیوتن در متر
M_{sb}	گشتاور خمشی روی ریشه پره	نیوتن در متر
M_{xs}	گشتاور روی محور اصلی	نیوتن در متر

augmentation of shrouded wind turbines in a multirotor system. *Journal of Energy Resources Technology*. 2017;139(5):051202.

26- Göltenbott U, Ohya Y, Yoshida Sh, Jamieson P. Aerodynamic interaction of diffuser augmented wind turbines in multi-rotor systems. *Renewable Energy*. 2017;112:25-34.

27- Burton T, Jenkins N, Sharpe D, Bossanyi E. *Wind energy handbook*. 2nd Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 2011.

28- International Electrotechnical Commission. *Wind turbines-part 1: Design requirements* [Internet]. Geneva: International Electrotechnical Commission; 2005 [cited 2018 Nov 01 cited 2018 Nov 01]. Available from:

<https://www.saiglobal.com/pdftemp/previews/osh/iec/iec61000/61400/iec61400-1%7Bed3.0%7Den.pdf>

29- Ohya Y, Karasudani T. A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology. *Energies*. 2010;3(4):634-649.

30- Abe K, Nishida M, Sakurai A, Ohya Y, Kihara H, Wada E, et al. Experimental and numerical investigations of flow fields behind a small wind turbine with a flanged diffuser. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2005;93(12):951-970.

31- Tavares Dias do Rio Vaz DA, Amarante Mesquita A, LuizAmarante Mesquita A, Pinheiro Vaz JR, Cavalcante Blanco CJ. An extension of the blade element momentum method applied to diffuser augmented wind turbines. *Energy Conversion and Management*. 2014;87:1116-1123.

16- Fletcher CAJ. Computational analysis of diffuser-augmented wind turbines. *Energy Conversion and Management*. 1981;21(3):175-183.

17- Phillips DG. An investigation on diffuser augmented wind turbine design [Dissertation]. Auckland: The University of Auckland; 2003.

18- Hansen MOL, Sørensen NN, Flay RGJ. Effect of placing a diffuser around a wind turbine. *Wind Energy*. 2000;3(4):207-213.

19- Van Bussel GJW. The science of making more torque from wind: Diffuser experiments and theory revisited. *Journal of Physics Conference Series*. 2007;75(75):012010.

20- Kishore RA, Coudron T, Priya Sh. Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013;116:21-31.

21- Bontempo R, Manna M. Performance analysis of open and ducted wind turbines. *Applied Energy*. 2014;136:405-416.

22- Bontempo R, Manna M. Effects of the duct thrust on the performance of ducted wind turbines. *Energy*. 2016;99:274-287.

23- Shi W, Wang D, Atlar M, Guo B, Seo KC. Optimal design of a thin-wall diffuser for performance improvement of a tidal energy system for an AUV. *Ocean Engineering*. 2015;108:1-9.

24- Aranake A, Duraisamy K. Aerodynamic optimization of shrouded wind turbines. *Wind Energy*. 2017;20(5):877-889.

25- Ohya Y, Miyazaki J, Göltenbott U, Watanabe K. Power