

# طراحی آئرو دینامیکی توربین بادی محور عمودی به روش المان پره - تکانه و به کمک داده‌های وزش باد در استان خراسان جنوبی

داود سعیدی (کارشناس ارشد)

احمد صداقت\* (استادیار)

علی اکبر عالم رجبی (دانشیار)

پوریا علمداری (کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۲)  
دوره ۳ - ۲۹، شماره ۲، ص. ۹۷-۱۰۷، (پادداشت نشی)

در این نوشتار توربین‌های بادی محور عمودی به دلیل سادگی طراحی و ساخت در داخل کشور برای مصارف محدود مورد توجه قرار گرفته است. روش المان پره - تکانه برای تحلیل و طراحی آئرو دینامیکی یک توربین بادی محور عمودی با پره‌های مستقیم استفاده شده است. از هواپرنوع NACA۴۴۱۵ - که در آن نسبت نیروی برآ به نیروی پسا نسبتاً بالاست - نیز از مدل لوله جریان چندگانه‌ی دودیسکی برای تشکیل جریان بالادست و پایین دست توربین - که تطابق بهتری با نتایج تجربی دارد - استفاده شد. از نتایج داده‌های آماری وزش باد در ایستگاه فذشک، واقع در استان خراسان جنوبی، برای طراحی یک توربین بادی ۱/۵ کیلووات بهره‌برداری شد. نتایج طراحی با یک توربین بادی موجود اعتبارسنجی شد و ضمن بررسی پارامتری توربین بادی طراحی شده، جنبه‌ی اقتصادی نصب توربین بادی در منطقه‌ی فذشک و بازیافت سرمایه ارزیابی شد.

واژگان کلیدی: توربین بادی محور عمودی، روش المان پره - تکانه، هواپرنوع، استان خراسان، پتانسیل باد.

## ۱. مقدمه

راه حل جایگزین برای استفاده از انرژی فسیلی مطرح شود. علاوه بر این می‌توان از عوامل زیر به عنوان دلایل استفاده از انرژی باد یاد کرد:<sup>[۵]</sup>

- محدود بودن منابع فسیلی؛
- نیاز ایران به استفاده از انواع انرژی و افزایش ایمنی انرژی؛
- کارآفرینی برای آیندگان؛
- ایجاد بازار مواد خام توربین‌های بادی؛
- ایجاد فرصت‌های صدور فرآورده‌ها به بازارهای جهانی؛
- ممانعت از خروج سرمایه به خارج؛
- کاهش هزینه‌های انسانی و نقل و انتقال.

امروزه توربین‌های بادی مختلفی برای تولید انرژی در سرتاسر جهان وجود دارد. این توربین‌ها را می‌توان براساس راستای محور چرخش توربین به دو نوع کلی: توربین بادی محرافقی (HAWT) و توربین بادی محور عمودی (VAWT) تقسیم کرد.<sup>[۶]</sup> از جمله کاربردهای توربین‌های محور عمودی می‌توان اشاره کرد به: ۱. تولید الکتریسیته؛ ۲. پمپ‌کردن آب؛ ۳. تصفیه آب؛ ۴. گرمایش و سرمایش به وسیله‌ی

یکی از مسائل مهم بشر از دیرباز تاکنون تأمین انرژی بوده است؛ این مهم در قرن‌های اخیر با گسترش فعالیت‌های صنعتی، تجاری و دست‌یابی به فناوری‌های نوین که انرژی بیشتری نیاز دارند اهمیتی دوچندان یافته است. انتظار می‌رود میزان مصرف انرژی الکتریکی تا سال ۲۰۳۵ به دو برابر میزان استفاده شده در سال ۲۰۰۸ برسد.<sup>[۱]</sup> با کاهش ذخایر نفتی که منبع اصلی تأمین انرژی در جهان امروزد، موضوع استفاده از منابع جایگزین مطرح شده است. از همین رو در سال‌های اخیر بحث یافتن منابع جایگزین انرژی در میان کشورها با جدیت تمام پیگیری می‌شود. یکی از این منابع، انرژی حاصل از جریان باد است که بسیار ارزان، پاک و در دسترس است. از آنجا که ایران جزء ۲۰ کشور آزادکننده‌ی ۷۵٪ گازهای گلخانه‌یی جهان است<sup>[۲]</sup> و نیز استفاده از سوخت‌های فسیلی یکی از عوامل مهم تولید آلودگی در ایران است،<sup>[۳]</sup> مشکلات زیست‌محیطی فراوانی دامنگیر آن شده است. ظرفیت باد ایران حدود ۶/۵ گیگاوات تخمین زده می‌شود.<sup>[۴]</sup>

با توجه به مشکلات زیست‌محیطی موجود، استفاده از انرژی باد در ایران به عنوان

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۷/۹/۱۳۹۰، اصلاحیه ۱۷/۴/۱۳۹۱، پذیرش ۱۰/۶/۱۳۹۱.



شکل ۱. نقشه‌ی استان خراسان جنوبی و شهرهای این استان.<sup>[۱۵]</sup>

توان و بازده توربین طراحی شده برای ایستگاه فدشک در استان خراسان جنوبی که وضعیت باد آن در کار پژوهشی دیگری<sup>[۱۳]</sup> مورد بررسی قرار گرفته، محاسبه شده است. در ادامه‌ی کار جنبه‌ی اقتصادی توربین مذکور برای ایستگاه فدشک تحلیل شده و نتایج آن برای دو ارتفاع ۱۰ و ۴۰ متری آورده شده است.

### ۱.۱. ایستگاه بادی فدشک

ایستگاه بادی فدشک در شهرستان بیرجند، در استان خراسان جنوبی قرار دارد. این شهرستان از شمال به شهرستان قاینات، از شرق به شهرستان‌های درمیان و سریش، از جنوب به شهرستان نهندان و استان کرمان و از غرب به شهرستان‌های سراوان و طبس محدود شده است. بیرجند شهرستانی کوهستانی است و در آن کوه‌ها و دره‌هایی عمیق و حاصل‌خیز وجود دارد. کوه‌های عمده‌ی شهرستان عبارت‌اند از: رشته کوه باقران در جنوب، کوه شاه در غرب (حاشیه کویر)، رشته کوه مؤمن آباد. آب و هوای این شهرستان بیابانی و نیمه‌بیابانی است.<sup>[۱۴]</sup>

موقعیت شهرستان بیرجند در شکل ۱ نشان داده شده است. این شهرستان پرجمعیت‌ترین شهرستان خراسان جنوبی است و جمعیت آن طبق سرشماری سال ۱۳۸۵ برابر با ۲۲۱/۷۵۶ نفر بوده است.<sup>[۱۴]</sup> ایستگاه فدشک در طول جغرافیایی ۵۸° ۷۹' و عرض جغرافیایی ۳۲° ۷۸' و در ارتفاع ۱۴۷۰ متری از سطح دریا قرار دارد. داده‌های باد این ایستگاه در کار پژوهشی سعیدی و دیگران<sup>[۱۳]</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. ایستگاه فدشک از نظر بادی در موقعیت خوبی قرار دارد و مکان مناسبی برای نصب توربین‌های بادی است؛ لذا این ایستگاه برای بررسی بازده و توان توربین مورد نظر انتخاب شده است.

### ۲. توربین بادی با روتور محور عمودی

با توجه به پتانسیل خوب توربین‌های بادی محور عمودی در تولید انرژی به صورت جداگانه و یا به صورت شبکه امروزه تحقیقات زیادی بر روی این نوع توربین‌ها به منظور افزایش راندمان آن‌ها صورت می‌گیرد. در حال حاضر مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی زیادی در پی به‌کارگیری مدل‌های جدید و پربازده از توربین‌های محور عمودی و گسترش و طراحی مدل‌های اصلاح شده هستند. توربین‌های محور عمودی به سه نوع کلی: ۱. ساوینوس؛ ۲. داریوس؛ ۳. روتور H شکل تقسیم می‌شوند.

مپ‌های حرارتی بخار فشرده؛ ۵. هوادهی و مخلوط‌کردن؛ ۶. گرم کردن آب به وسیله‌ی توربولانس.<sup>[۷]</sup>

مزیت اصلی توربین‌های محور عمودی مستقل بودن روتور از جهت وزش باد و بی‌نیازی از سازوکار کنترل سمت (yaw) است. بنابراین طراحی کلی این نوع توربین‌ها بسیار ساده‌تر از توربین‌های محور افقی است. در توربین‌های محور عمودی با پره‌های مستقیم می‌توان از پره‌های با مقطع هوا بری ثابت و یکسان استفاده کرد که باعث ساخت ساده‌تر و توسعه‌ی این نوع پره‌ها نسبت به پره‌های توربین محور افقی خواهد شد. علاوه بر آن، تعمیر و نگهداری این نوع توربین‌ها آسان و کم‌هزینه است.

به‌طور کلی توربین‌های محور عمودی در مناطقی که دارای کمینه سرعت باد باشند قابل استفاده‌اند. از این نوع توربین‌ها می‌توان به صورت سیستمی مستقل به منظور تولید الکتروسیسته یا گرما بهره برد. همچنین با ترکیب چند توربین بادی محور عمودی و دیگر سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر، و یک سیستم پشتیبانی می‌توان یک شبکه‌ی برق محلی کوچک با مصرف پایین راه‌اندازی کرد.

توربین‌های محور عمودی اولین بار در سال ۱۹۳۱ مورد استفاده قرار گرفت.<sup>[۸]</sup> این توربین‌ها دو نوع پره‌ی انحنایی و مستقیم دارند که تعداد پره‌های آن مجموعاً دو عدد یا بیشتر است. در مصارف کم، از نوع پره‌مستقیم این توربین‌ها استفاده می‌شود که خود دو مدل -- زاویه گام ثابت و متغیر -- را شامل می‌شود؛ به این ترتیب که با تغییر ارتفاع از ایرویل به صورت ثابت و بدون تغییر در راستا امتداد می‌یابد یا با انحنای خاصی در امتداد طولی پره قرار می‌گیرد.<sup>[۹]</sup> بیشتر تحقیقات انجام شده در این مدل‌ها روی نوع زاویه گام ثابت بوده است. مشکل اساسی این نوع توربین این است که شروع به چرخش خود به خودی ندارد.<sup>[۱۰]</sup>

اولین تجربه در زمینه‌ی نصب و استفاده از توربین‌های بادی مدرن در ایران به سال ۱۹۹۴ برمی‌گردد که دو دستگاه توربین بادی NORD-TANK در منجیل و رودبار (در شمال ایران) نصب شدند. این دو توربین ۱/۸ میلیون کیلووات ساعت برق در سال تولید می‌کنند. سرعت متوسط باد در رودبار ۱۵ متر بر ثانیه برای ۳۷۰۰ ساعت در سال است. بعد از این تجربه‌ی موفقیت‌آمیز ۲۷ توربین بادی دیگر در سال ۱۹۹۹ در منجیل، رودبار و هرزویل نصب شد.<sup>[۱۰]</sup> هرزویل در نزدیکی منجیل قرار دارد. مزرعه بادی بزرگ بعدی در دیزباد در کوه‌های بینالود در استان خراسان شمالی در شمال شرق ایران احداث شد.<sup>[۱۰]</sup> جریان بادی در این منطقه به طول ۵۰ کیلومتر و به عرض ۵ کیلومتر وجود دارد که باد به صورت یکنواخت و با سرعت متوسط ۸/۹ متر بر ثانیه در آن جریان دارد. این مزرعه شامل ۴۳ توربین ۶۶۰ کیلو وات با ظرفیت مجموع ۲۸/۴ مگا وات می‌شود. همچنین در مطالعه‌ی دیگر امکان نصب توربین فراساحلی در ایران و مقایسه‌ی آن با دنیا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌داد که منابع فراساحلی (offshore) ایران در جزایر مسکونی و در خط ساحلی خلیج فارس، دریای عمان و دریاچه خزر امیدوارکننده است.<sup>[۱۱]</sup>

تحلیل اقتصادی و بررسی نرخ بازگشت سرمایه برای نصب توربین بادی در ترغیب دولت‌ها و کارخانجات به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی باد، اهمیت به‌سزایی دارد. یکی از کارهایی که در زمینه‌ی تحلیل اقتصادی برای نصب توربین باد در ایران انجام شد، تحلیل اقتصادی به منظور بررسی امکان نصب توربین‌های بادی کوچک در شهر بابک است.<sup>[۱۲]</sup> در پژوهش حاضر ابتدا طراحی یک توربین بادی محور عمودی پره مستقیم داریوس با استفاده از مدل لوله چندگانه‌ی دودیسکی مد نظر قرار داشته است. سپس

آن در پایین دست توربین، انرژی جریان آزاد باد به علت مقاومت دیسک حذف و از سرعت آن در این نواحی کاسته می‌شود. در این مدل این مفهوم با استفاده از سرعت القاء شده‌ی جریان در بالادست و پایین دست توربین بیان می‌شود، به طوری که می‌توان این سرعت‌های القاء شده (مطابق شکل ۲) را با استفاده از رابطه‌های ۲ و ۴ بیان کرد. همچنین در ناحیه‌ی تعادل بین بالادست و پایین دست جریان نیز می‌توان سرعت باد را با استفاده از رابطه ۳ به دست آورد.<sup>[۱۵]</sup>

$$V = u V_{\infty} \quad (2)$$

$$V_e = (2u - 1) V_{\infty} \quad (3)$$

$$V' = u'(2u - 1) V_{\infty} \quad (4)$$

در این روابط  $u$  ضریب القاء در جریان بالادست و  $u'$  ضریب القاء شده در جریان پایین دست است و همواره  $u' < u$ .

با توجه به شکل ۴ در ناحیه‌ی بالادست سرعت نسبی پره با توجه به سرعت دورانی لبه پره ( $\omega$ ) از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$W = V_{\infty} \sqrt{(\lambda_0 + u \sin \theta)^2 + (u \cos \theta)^2} \quad (5)$$

که در آن  $\lambda_0 = \frac{R\omega}{V_{\infty}}$  است. همچنین زاویه‌ی حمله در این ناحیه از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید.

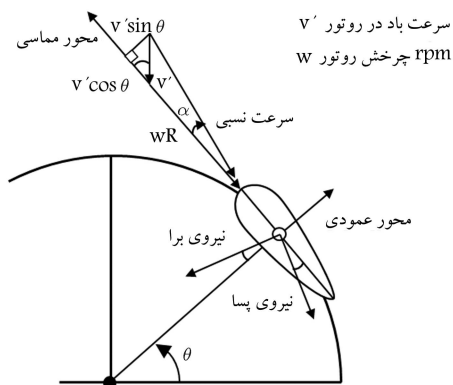
$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{u \cos \theta}{\lambda_0 + u \sin \theta} \right) \quad (6)$$

در نظریه‌ی المان پره برای لحاظ کردن اثرات نیروی پسا که در نظریه‌ی تکانه نادیده گرفته شد، با تقسیم پره‌ی توربین به تعدادی المان و استخراج ضرایب برآ و پسای هر مقطع هوا بر از نتایج تجربی می‌توان ترکیبی از نظریه‌ی تکانه و المان پره را به کار برد که نتایج دقیق‌تری را به همراه خواهد داشت.<sup>[۱۵]</sup> با استفاده از نظریه‌ی المان پره و معادله‌ی تکانه در هر لوله‌ی جریان یک ضریب نیرو تعریف می‌شود که در رابطه‌ی ۷ صدق می‌کند:

$$F_{up} u = \pi(\lambda - u) \quad (7)$$

در این رابطه چنین محاسبه می‌شود:

$$F_{up} = \frac{\sigma}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left( \frac{W}{V_{\infty}} \right)^2 \left( C_N \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|} - C_T \frac{\sin \theta}{|\cos \theta|} \right) d\theta \quad (8)$$



شکل ۴. بردارهای سرعت در جریان بالادست.



شکل ۲. توربین بادی محور عمودی H شکل.

### ۱.۲. توربین بادی محور عمودی با روتور H شکل

این توربین‌ها در سال ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ در انگلستان طراحی و ساخته شد (شکل ۲). در این توربین با استفاده از اثر واماندگی و پسا بیشینه سرعت دورانی کنترل می‌شود و پره‌یی که در خارج مسیر باد است پره‌ی مستقر در مسیر باد را به حرکت درمی‌آورد. لذا این توربین‌ها بسیار سریع به بیشترین سرعت نامی خود می‌رسند و حرکت خود به خودی دارند.

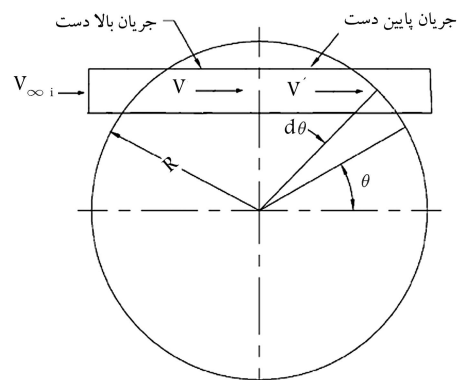
### ۲.۲. مدل لوله‌ی جریان چندگانه‌ی دودیسی

در این مدل ناحیه‌ی روتور را به دو قسمت کلی بالادست و پایین دست تقسیم می‌کنیم. جریان باد عبوری در لوله‌ها از دو دیسک فعال پشت سر هم عبور می‌کند. زاویه‌ی چرخش در قسمت بالادست  $-\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$  و در قسمت پایین دست شامل  $\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{4}$  است (شکل ۳). همچنین سرعت جریان آزاد باد با ارتفاع تغییر می‌کند؛ این تغییرات را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۱ به دست آورد.

$$\frac{U_z}{U_{eq}} = \left( \frac{Z}{Z_{eq}} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

که در آن  $U_{eq}$  سرعت باد مرجع در ارتفاع مرجع  $Z_{eq}$ ؛  $U_z$  سرعت در ارتفاع  $Z$ ؛ و  $\alpha$  ضریب توان برشی باد است که برای منطقه فذشک برابر ۱۸۴۸٫۰ گزارش شده است.<sup>[۱۴]</sup>

با توجه به برخورد جریان باد با پره‌های در حال گردش در بالادست و پس از



شکل ۳. مدل لوله‌ی جریان چندگانه دودیسی.

با استفاده از نظریه‌ی المان پره و معادله‌ی تکانه مانند بالادست در هر لوله جریان، یک ضریب نیرو برای پایین دست تعریف می‌شود که در رابطه ۱۸ صدق می‌کند:

$$F_{dw} u' = \pi(1 - u') \quad (18)$$

که در آن  $F_{dw}$  از رابطه‌ی ۱۹ به دست می‌آید:

$$F_{dw} = \frac{\sigma}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{W'}{V_\infty}\right)^2 \left(C'_N \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|} - C'_T \frac{\sin \theta}{|\cos \theta|}\right) d\theta \quad (19)$$

ضرایب  $C'_N$  و  $C'_T$  برحسب ضرایب برآ و پسا از معادله‌های ۲۰ و ۲۱ به دست می‌آید.

$$C'_N = C_L \cos \alpha' + C_D \sin \alpha' \quad (20)$$

$$C'_T = C_L \sin \alpha' - C_D \cos \alpha' \quad (21)$$

برای ضریب بی‌بعد نیروی عمودی ( $F_N$ ) و نیروی مماسی ( $F_T$ ) در جریان پایین دست و برحسب زاویه چرخش  $\theta$  داریم:

$$F_N(\theta) = \frac{A_P}{A_S} C'_N \left(\frac{W'}{V_\infty}\right)^2 \quad (22)$$

$$F_T(\theta) = \frac{A_P}{A_S} C'_T \left(\frac{W'}{V_\infty}\right)^2 \quad (23)$$

همچنین گشتاور ایجادشده توسط هر پره برحسب زاویه چرخش روتور در پایین دست برابر است با:

$$T_{dw}(\theta) = \frac{1}{4} \rho c R H C'_T W'^2 \quad (24)$$

برای به دست آوردن ضریب عملکرد یا توان روتور در ناحیه‌ی پایین دست از روابط ۲۵ و ۲۶ استفاده می‌شود:

$$\bar{C}_{Pdw} = \frac{\sigma}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} C'_T \left(\frac{W'}{V_\infty}\right)^2 d\theta \quad (25)$$

$$C_{Pdw} = \lambda \cdot \bar{C}_{Pdw} \quad (26)$$

و در نهایت ضریب عملکرد کل توربین از مجموع  $C_{Pup}$  و  $C_{Pdw}$  حاصل می‌شود:

$$C_P = C_{Pup} + C_{Pdw} \quad (27)$$

### ۳.۲. روش حل عددی

برای به دست آوردن ضریب القای سرعت ابتدا برای جریان بالادست مقدار حدس اولیه ضریب القای سرعت را برابر ۱ در نظر می‌گیریم. سپس با استفاده از معادله‌های ۵، ۶، ۸-۱۰ و در نهایت با معادله‌ی ۷ مقدار ضریب القایی جدید را به دست می‌آوریم و این کار را ادامه می‌دهیم تا اختلاف این دو مقدار از عدد  $0.0001$  کم‌تر شود. آنگاه مقدار به دست آمده صحیح را در نظر می‌گیریم. برای حدس اولیه ضریب القایی جریان پایین دست از مقدار نهایی ضریب القایی جریان بالادست استفاده می‌کنیم. مجدداً با روش تکرار ضریب القایی جریان پایین دست را به دست می‌آوریم.

در رابطه ۸ ضریب صلیبیت برابر است با سطح جاروب شده توسط پره‌ها تقسیم بر تصویر سطح پره‌ها یا  $\sigma = \frac{A_{sweep}}{A_{total}}$ ؛ ضرایب  $C_N$  و  $C_T$  برحسب ضرایب برآ و پسا از معادله‌های ۹ و ۱۰ حاصل می‌شود:

$$C_N = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (9)$$

$$C_T = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (10)$$

ضرایب برآ و پسا نیز با توجه به نوع هواپر و از داده‌های تجربی تونل باد به دست می‌آید. برای به دست آوردن نیروهای مماسی و عمودی مؤثر بر پره‌ها در نیمه‌ی بالادست می‌توان از معادلات زیر استفاده کرد (شکل ۵).

برای ضریب بی‌بعد نیروی عمودی ( $F_N$ ) و نیروی مماسی ( $F_T$ ) در جریان بالادست و برحسب زاویه چرخش  $\theta$  داریم:

$$F_N(\theta) = \frac{A_P}{A_S} C_N \left(\frac{W}{V_\infty}\right)^2 \quad (11)$$

$$F_T(\theta) = \frac{A_P}{A_S} C_T \left(\frac{W}{V_\infty}\right)^2 \quad (12)$$

همچنین گشتاور ایجادشده توسط هر پره برحسب زاویه چرخش روتور در بالادست برابر است با:

$$T_{up}(\theta) = \frac{1}{4} \rho c R H C_T W^2 \quad (13)$$

برای به دست آوردن ضریب عملکرد یا توان روتور در ناحیه‌ی بالادست از روابط ۱۴ و ۱۵ استفاده می‌شود:

$$\bar{C}_{Pup} = \frac{\sigma}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} C_T \left(\frac{W}{V_\infty}\right)^2 d\theta \quad (14)$$

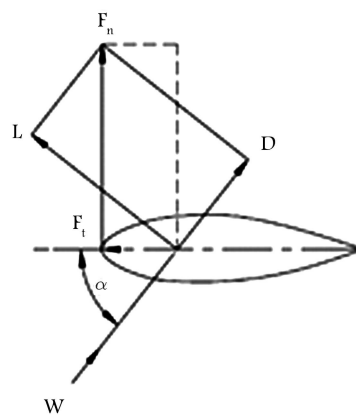
$$C_{Pup} = \lambda \cdot \bar{C}_{Pup} \quad (15)$$

در ناحیه‌ی پایین دست سرعت نسبی پره با توجه به سرعت دورانی لبه‌ی پره و براساس رابطه‌ی ۱۶ به دست می‌آید:

$$W' = (2u - 1)V_\infty \sqrt{\left(\frac{\lambda_s}{2u - 1} + u' \sin \theta\right)^2 + (u' \cos \theta)^2} \quad (16)$$

همچنین زاویه‌ی حمله در این ناحیه از رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید.

$$\alpha' = \tan^{-1} \left( \frac{u' \cos \theta}{\frac{\lambda_s}{2u - 1} + u' \sin \theta} \right) \quad (17)$$



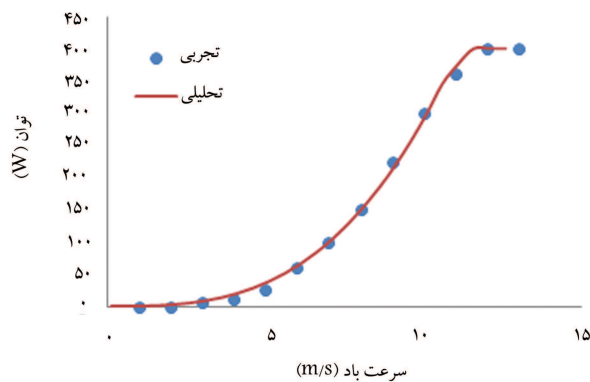
شکل ۵. بردارهای نیرو اعمالی بر یک المان پره [۹]

جدول ۲. نتایج حاصل از برنامه رایانه و نتایج تجربی.

۶/۵	گشتاور متوسط محاسبه شده (N.m)
۱۰۲/۲	توان تولید شده برای یک پره (W)
۵۱۱	توان تولید شده کل (W)
۶۰۰	توان ارائه شده شرکت سازنده (W)
۱۴/۸	درصد خطای توان

جدول ۳. داده‌های مربوط به توربین شرکت Urbangreenenergy CO. [۱۸]

۳۰۰ (W) VAWT	مدل
۳۰۰	توان نامی (W)
۴۰۰	توان حداکثر (W)
۱۲	سرعت باد نامی (m/s)
۲	قطر روتور (m)
۱/۳۸	ارتفاع روتور (m)



شکل ۷. تغییرات توان برحسب سرعت باد.

چنان که در شکل ۷ نیز مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد.

#### ۴. ویژگی‌های توربین بادی طراحی شده برای ایستگاه فذشک

توربینی دارای ۳ پره طراحی شد که توان تولیدی توسط این سه پره با یکدیگر اختلاف فاز ۱۲۰ درجه دارند. ضریب سختی ۰/۴، سرعت نوک پره ۴، و شعاع پره ۱/۵ متر انتخاب شد. همچنین ارتفاع پره‌های توربین ۳ متر انتخاب شد.

##### ۱.۴. انتخاب هوابر و پارامترهای آن

ایرفویل انتخابی در این پروژه NACA۴۴۱۵ است. برای به دست آوردن ضرایب برآ و پسای مربوط به این هوابر از برازش نمودارهای تجربی استفاده شد و این روابط براساس زاویه‌ی حمله مطابق معادله‌های ۲۸ و ۲۹ به دست آمد. در این معادلات زاویه‌ی حمله برحسب رادیان است.

$$C_L = -14756\alpha^2 + 87309\alpha + 074262 \quad (28)$$

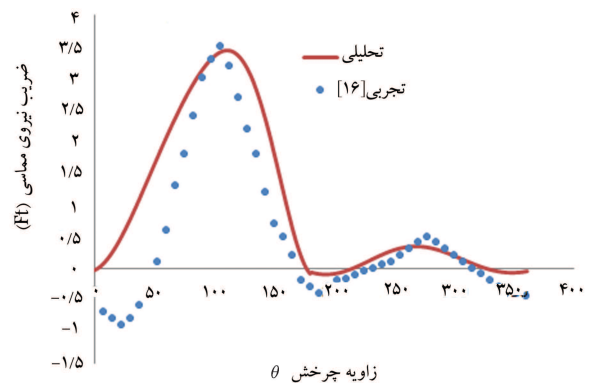
$$C_D = 47814\alpha^2 - 17052\alpha + 0708317\alpha + 07006212 \quad (29)$$

### ۳. اعتبارسنجی

برای بررسی صحت برنامه رایانه نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB، نمودارهای به دست آمده با نتایج تجربی که از یک هوابر NACA۰۰۱۲ برای سختی  $\sigma = 0.15$  و نسبت سرعت نوک (نسبت سرعت پره  $r.\omega$  به سرعت جریان آزاد باد) پره  $5 = \lambda_0$  که در دست بود [۱۶] در شکل ۶ مقایسه شده است. این نتایج برای ضریب بی‌بعد نیروی مماسی است. چنان که مشاهده می‌شود نتایج تقریباً از دقت خوبی برخوردار است.

برای مقایسه‌ی توان تولیدی، یک توربین محورعمودی با پره‌های مستقیم از شرکت Greenergy Technology CO انتخاب شد [۱۷] که داده‌های مربوط به آن (در جدول ۱) با نتایج عددی موجود مقایسه شده است. این توربین دارای ۵ پره است. نتایج مربوط به حل انجام شده و مقایسه‌ی نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

چنان که مشاهده می‌شود خطای توان ۱۴/۸ درصد است که با توجه به صنعتی بودن سیستم و ایده‌آل بودن مدل ریاضی مسئله، می‌تواند تخمین قابل قبولی ارائه دهد. همچنین یادآور می‌شود به دلیل تجاری بودن توربین بادی مذکور، اطلاعاتی در مورد نوع ایرفویل آن ذکر نشده است. به همین دلیل به عنوان یک تقریب کلی از ایرفویل NACA۰۰۱۲ در این مورد استفاده شد که خطای نسبتاً زیاد حاصل از تحلیل را نیز می‌توان به همین امر نسبت داد. در ادامه، تغییرات توان برحسب سرعت جریان باد آزاد مربوط به یک توربین بادی محورعمودی ۳۰۰ واتنی که به صورت تجاری در حال استفاده است [۱۸] با نتایج کار حاضر در شکل ۷ مقایسه شد. ویژگی‌های توربین بادی در جدول ۳ آمده است.



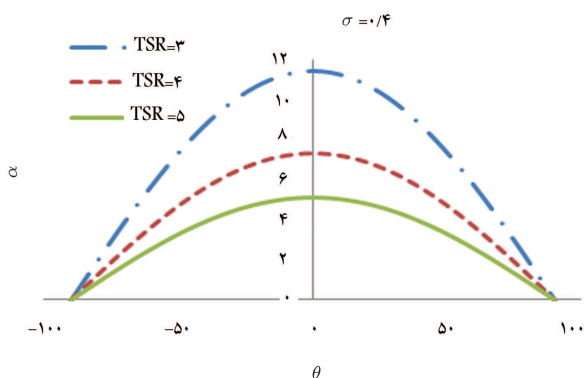
شکل ۶. تغییرات نیروی مماسی برحسب زاویه‌ی چرخش برای ضریب سختی ۰/۱۵ و سرعت نوک پره ۵.

جدول ۱. داده‌های توربین بادی ۶۰۰ واتنی محورعمودی اج ۵ پره‌ی مربوط به شرکت Greenergy Technology CO. [۱۷]

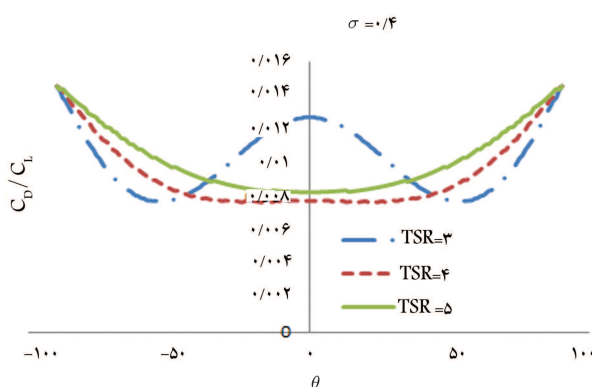
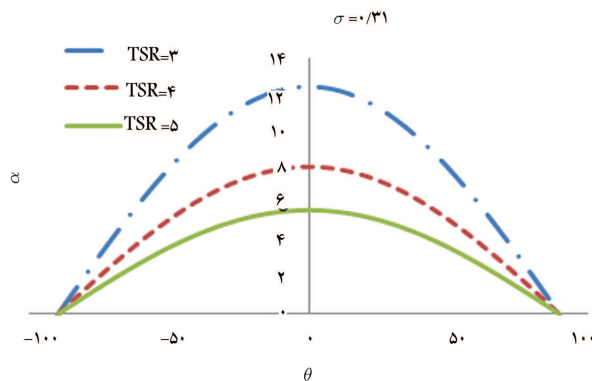
۶۰۰	مدل
۶۰۰	توان نامی (W)
۷۰۰	توان حداکثر (W)
۸-۷	سرعت باد نامی (m/s)
۲	قطر روتور (m)
۳/۶	سطح جاروب شده (m <sup>2</sup> )
۱۵۰	سرعت دورانی (rpm)

جدول ۴. داده‌های باد مربوط به ایستگاه فدشک [۱۳].

متغیرها	ارتفاع (m)		
	۱۰	۳۰	۴۰
میانگین سرعت باد (m/s)	۵٫۲۷۱	۶٫۲۰۴	۶٫۳۳۰
ریشه سوم متوسط مکعب سرعت‌ها ( $V_{rated}$ )	۶٫۶۲۰	۷٫۶۵۶	۷٫۸۰۸
انحراف استاندارد ( $\sigma_u$ )	۲٫۸۷۱	۳٫۲۴۵	۳٫۳۱۸
بیشینه سرعت ( $V_{max}$ ) (m/s)	۲۱٫۳	۴۰	۳۱٫۱
احتمال تجمعی (%)	۸۲٫۹۳۰	۸۸٫۲۸۹	۸۸٫۶۷۱
$2.5 \text{ m/s} \leq U \leq 25 \text{ m/s}$			
ضریب شکل برای تابع ویبول (k)	۱٫۹۳۳	۲٫۰۲۱	۲٫۰۱۶
ضریب بزرگی برای تابع ویبول (c)	۵٫۹۴۶	۷٫۰۰۶	۷٫۱۴۷



شکل ۸. تغییرات زاویه حمله برحسب زاویه دوران در نسبت‌های سرعت نوک پرهی مختلف برای سختی ۰٫۴ در جریان بالادست.

شکل ۹. تغییرات  $C_D/C_L$  برحسب زاویه چرخش برای نسبت سرعت نوک پرهی مختلف برای سختی ۰٫۴.

شکل ۱۰. تغییرات زاویه حمله برحسب زاویه دوران در نسبت‌های سرعت نوک پرهی مختلف برای سختی ۰٫۳۱ در جریان بالادست.

نوک پره‌های مختلف از میزان نوسانات  $C_d/C_l$  کاسته می‌شود، به طوری که برای نسبت سرعت نوک پره ۴ این تغییرات کمیته می‌شود. تغییرات نیروی‌های مماسی تک‌تک پره‌ها با توجه به تغییر زاویه‌ی چرخش برای ضریب سختی ۰٫۴ و سرعت نوک پره ۴ برای توربین بادی با ۳ پره در شکل ۱۲ آمده است.

تغییرات نیروی مماسی و عمودی برای ضریب سختی‌های ۰٫۴، ۰٫۳۱ و ۰٫۲۱ در نسبت سرعت نوک پره‌های ۲، ۳ و ۴ در شکل‌های ۱۳ تا ۱۸ آورده شده است. چنان‌که در شکل‌های ۱۳ تا ۱۸ دیده می‌شود با افزایش نسبت سرعت نوک پره

از روابط ۲۸ و ۲۹ نسبت  $C_L/C_D$  بیشینه در زاویه حمله ۱۳ درجه و برابر ۱۳ به دست می‌آید.

#### ۲.۴. پارامترهای ایستگاه باد مورد مطالعه

پس از بررسی پتانسیل انرژی باد [۱۳] برای دو استان خراسان شمالی و جنوبی در چهار ایستگاه بجنورد، اسفراین، فدشک و نهبندان، ایستگاه فدشک در استان خراسان جنوبی که براساس داده‌های دوره یک‌ساله سرعت باد در فاصله زمانی‌های ۱۰ دقیقه‌یی توسط سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) [۱۹] در اختیار قرار گرفت، بهترین پتانسیل برای احداث نیروگاه بادی پیشنهاد شد و از این ایستگاه برای طراحی توربین بادی محور عمودی استفاده شد. خلاصه تحلیل آماری داده‌های باد این ایستگاه در جدول ۴ آمده است.

#### ۵. بررسی نتایج

در این تحقیق به بررسی طراحی توربین بادی محور عمودی اج‌شکل، بررسی نوسان‌های حاصل از طراحی، میزان توان تولیدی از توربین طراحی شده و تحلیل اقتصادی این توربین در منطقه‌ی فدشک پرداخته شد.

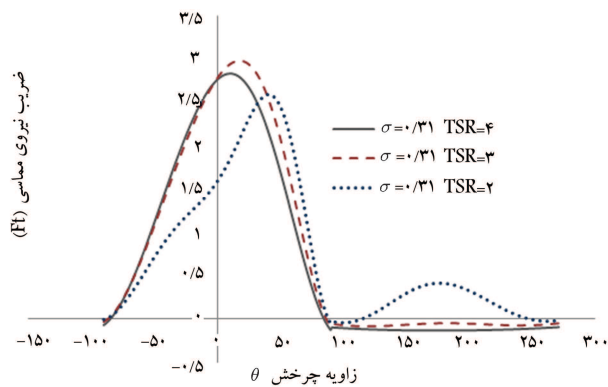
#### ۱.۵. نتایج طراحی آئروپنایمیکی و بررسی عملکرد

ابتدا برای ضریب سختی ۰٫۴ تغییرات زاویه حمله برحسب زاویه‌ی چرخش در بالادست مورد بررسی قرار گرفت که نمودار آن در شکل ۸ آمده است.

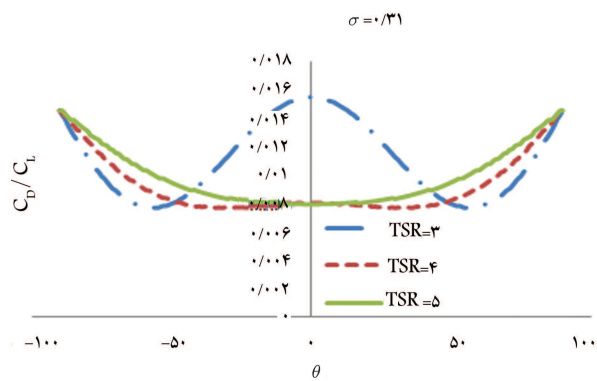
در ادامه نسبت ضریب پسا به ضریب برآ برحسب تغییرات زاویه‌ی چرخش در قسمت بالادست مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن در شکل ۹ آمده است. هرچه این نسبت کم‌تر باشد ضریب توان بیشتر شده و باعث افزایش کارایی سیستم می‌شود. چنان‌که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، برای نسبت سرعت نوک پره ۳ این مقدار با نوسان همراه است و در زاویه چرخش صفر به مقدار بالایی می‌رسد ولی با افزایش نسبت سرعت نوک پره به ۴ و ۵ مقدار این ضریب کاهش داشته و همچنین از میزان نوسان آن کاسته می‌شود.

این دو نمودار برای ضریب سختی ۰٫۳۱ نیز به دست آمده است که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آمده است.

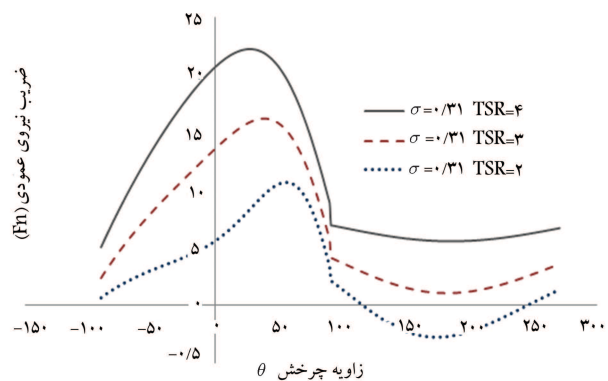
چنان‌که مشاهده می‌شود برای ضریب سختی ۰٫۳۱ مقدار زاویه حمله و نسبت ضریب پسا به برآ افزایش یافته است. همچنین با افزایش نسبت سرعت



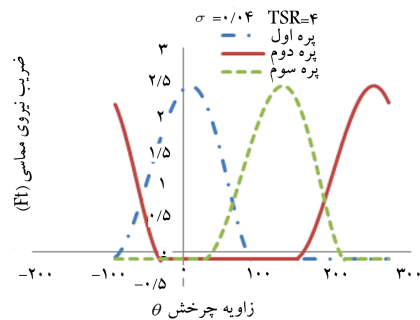
شکل ۱۵. تغییرات نیروی مماسی برحسب زاویه چرخش برای ضریب سختی ۰/۳۱ و سرعت نوک پره ۲، ۳، ۴.



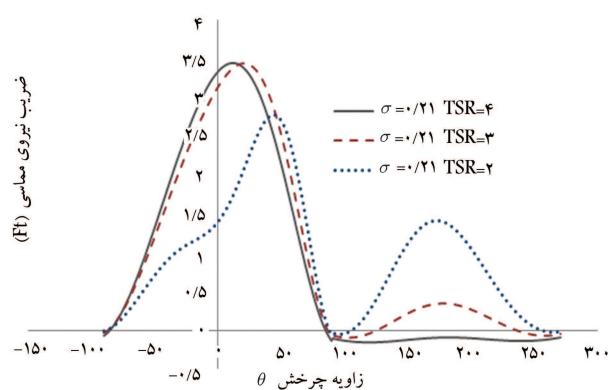
شکل ۱۱. تغییرات  $C_D/C_L$  برحسب زاویه چرخش برای نسبت سرعت نوک پره مختلف برای سختی ۰/۳۱.



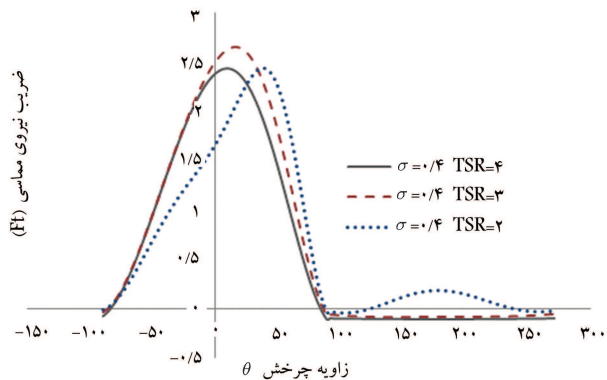
شکل ۱۶. تغییرات نیروی عمودی برحسب زاویه چرخش برای ضریب سختی ۰/۳۱ و سرعت نوک پره ۲، ۳، ۴.



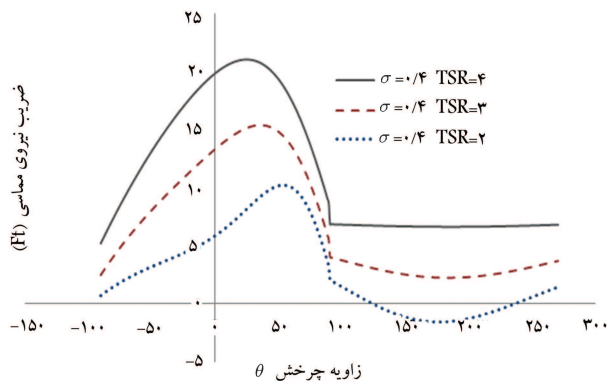
شکل ۱۲. تغییرات نیروی مماسی برحسب زاویه چرخش برای ضریب سختی ۰/۴ و سرعت نوک پره ۴ برای سه پره.



شکل ۱۷. تغییرات نیروی مماسی برحسب زاویه چرخش برای ضریب سختی ۰/۲۱ و سرعت نوک پره ۲، ۳، ۴.



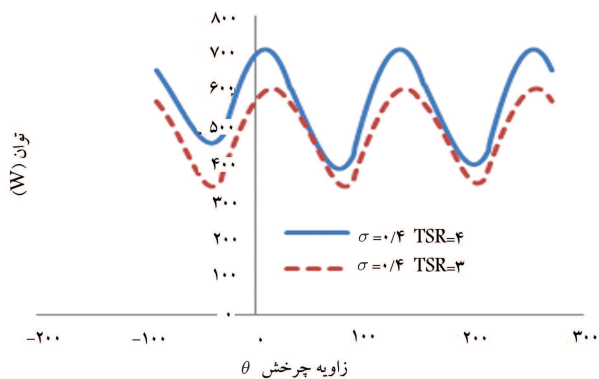
شکل ۱۳. تغییرات نیروی مماسی برحسب زاویه چرخش برای ضریب سختی ۰/۴ و سرعت نوک پره ۲، ۳، ۴.



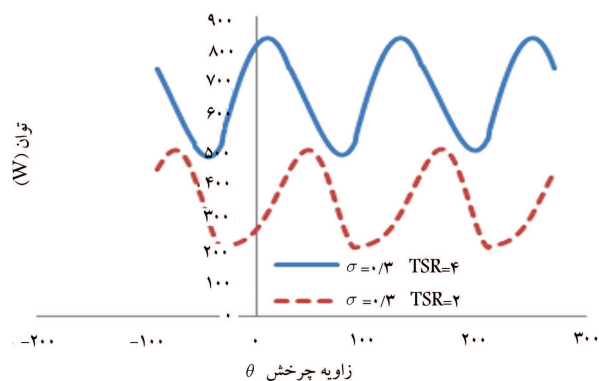
شکل ۱۴. تغییرات نیروی عمودی برحسب زاویه چرخش برای ضریب سختی ۰/۴ و سرعت نوک پره ۲، ۳، ۴.

در نیمه‌ی پایین دست تغییرات برای نیروی مماسی و عمودی بسیار کم می‌شود و با کاهش آن در نیمه‌ی پایین دست نیز ضریب نیروی مماسی مثبت داریم. این تغییر با کاهش میزان سختی بیشتر قابل مشاهده است. ضریب نیروی عمودی نیز با کاهش نسبت سرعت نوک پره کاهش یافته و در نیمه‌ی پایین دست به اعداد منفی میل می‌کند. همچنین با کاهش میزان سختی مقدار کلی ضریب نیروی عمودی کاهش می‌یابد.

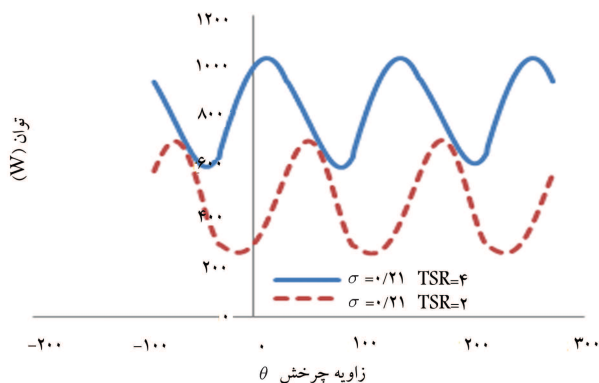
با توجه به نتایج حاصله، ضریب توان برای سختی‌های متفاوت برحسب مقادیر مختلف سرعت نوک پره در شکل ۱۹ مقایسه شده است. چنان که مشخص است



شکل ۲۰. تغییرات میزان توان تولیدی برای توربین با سه پره و برای طول وتر هواپر ۲۰ سانتی متر و شعاع ۱٫۵ متر.

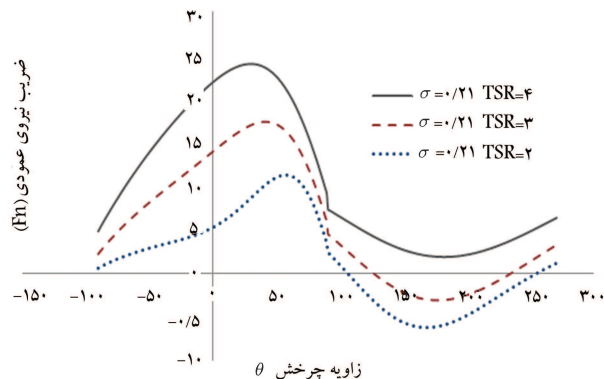


شکل ۲۱. تغییرات میزان توان تولیدی برای توربین با سه پره و برای طول وتر هواپر ۲۰ سانتی متر و شعاع ۲ متر.

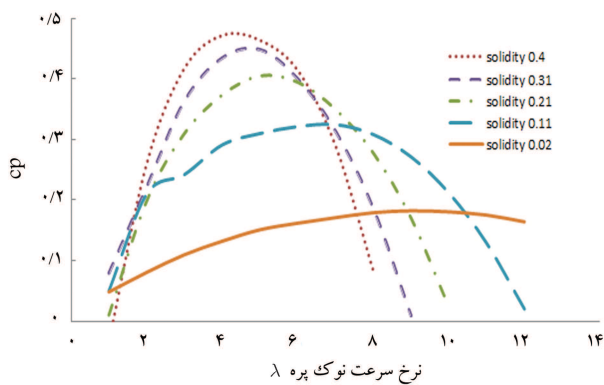


شکل ۲۲. تغییرات میزان توان تولیدی برای توربین با سه پره و برای طول وتر هواپر ۲۰ سانتی متر و شعاع ۳ متر.

در شکل ۲۳ اثر تغییر میزان سختی در یک نسبت سرعت نوک پره خاص،  $TSR = 4$ ، مورد مطالعه قرار گرفته است. چنان که در شکل ۲۳ مشاهده می شود با کاهش میزان سختی برای توربین با شعاع پره یکسان (۳ متر)، از میزان نوسانات کم شده است به طوری که برای ضریب سختی  $0.21$  کم ترین میزان نوسان و برای ضریب سختی  $0.4$  بیشترین فاصله ی قله را داریم. میزان طول وتر برای سه ضریب سختی  $0.21$ ،  $0.31$  و  $0.4$  به ترتیب برابر  $20^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $40^\circ$  سانتی متر است.



شکل ۱۸. تغییرات نیروی عمودی برحسب زاویه چرخش برای ضریب سختی  $0.21$  و سرعت نوک پره ۲، ۳ و ۴.



شکل ۱۹. تغییرات ضریب توان برحسب نسبت های مختلف سرعت نوک پره برای مقادیر مختلف سختی.

در ضریب سختی برابر  $0.4$  به بیشترین میزان ضریب توان در نسبت سرعت نوک پره پایین تر خواهیم رسید که برای نسبت سرعت نوک پره ۴ این مقدار برابر  $0.472$  است. بنابراین محاسبات را در این ضریب سختی انجام خواهیم داد. در شکل ۱۹ همچنین مشاهده می شود که با کاهش سختی علاوه بر کاهش میزان ضریب توان این مقدار در نسبت سرعت نوک پره های بالاتر به سمت صفر میل می کند.

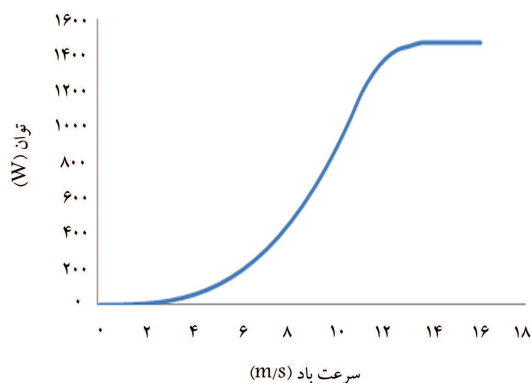
## ۲.۵. بررسی نوسان های توربین محور عمودی در یک سیکل

توربین محور عمودی به علت حرکت چرخشی که نسبت به جهت وزش باد انجام می دهد در تولید توان نوسان دارد. وجود این نوسانات برای عملکرد یک توربین مطلوب نیست و باعث وجود نوسان در جریان برق تولیدی می شود. توربین طراحی شده دارای ۳ پره است که توان تولیدی توسط این سه پره با یکدیگر اختلاف فاز  $120^\circ$  درجه دارند. با توجه به این مسئله اثر ضریب سختی و نسبت سرعت نوک پره در نوسانات توان توربین طراحی شده بررسی می شود.

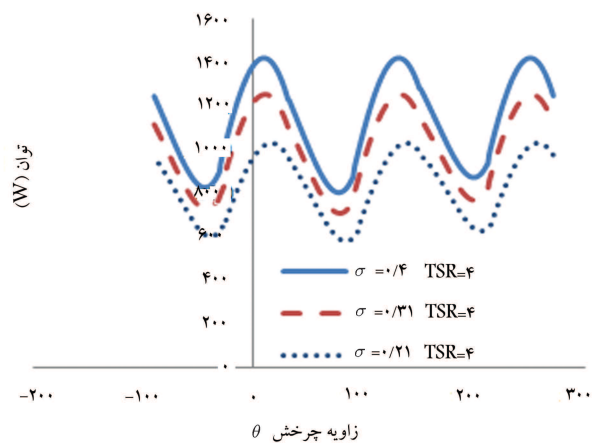
ابتدا برای ضریب سختی  $0.21$ ،  $0.31$  و  $0.4$  در دو حالت نسبت سرعت نوک پره ۳ و ۴، نوسانات توان تولیدی بررسی شد که نتایج آن در شکل های ۲۰ تا ۲۲ آمده است.

چنان که در این شکل ها مشاهده می شود در ضریب سختی های یکسان با تغییر نسبت سرعت نوک پره، تفاوت چندانی در میزان نوسانات ایجاد نمی شود ولی هر چه میزان نسبت سرعت نوک پره کاهش می یابد از توان تولیدی به شدت کاسته می شود.

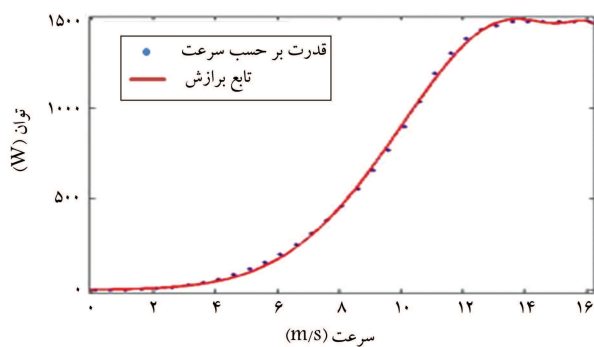




شکل ۲۴. نمودار توان تولیدی برحسب تغییرات سرعت برای توربین طراحی شده.



شکل ۲۳. تغییرات میزان توان تولیدی برای توربین با سه پره، برای شعاع ۳ متر و نسبت سرعت نوک پره ۴.



شکل ۲۵. برازش داده‌های توان برحسب سرعت توسط تابع گوسین.

توان برحسب سرعت باد، از سرعت ۱۲ متر بر ثانیه به بعد این مقدار ثابت (با اعمال فرض کنترل پیچ) در نظر گرفته شد، تا بتوان نتایج را با داده‌های تجربی<sup>[۱۸]</sup> اعتبارسنجی کرد و تحلیل صحیحی از لحاظ میزان توان تولیدی در یک سال به دست آورد. برای برازش نمودار فوق از تابع گوسین استفاده شد که هماهنگی خوبی با نتایج داشت. این تابع (شکل ۲۵) و معادله‌ی آن در ادامه آمده است.

$$Power(v) = 302.2 \exp\left(-\left(\frac{v - 16.5}{17.42}\right)^2\right) + 1484 \exp\left(-\left(\frac{v - 13.69}{5.2}\right)^2\right) \quad (31)$$

حال با داشتن تابع توزیع توان برحسب سرعت و همچنین تابع توزیع سرعت ویبول<sup>f(v)</sup> (رابطه‌ی ۳۲) برای ناحیه‌ی فذشک (که اطلاعات مربوط به آن در جدول ۴ آمده)، و با استفاده از رابطه‌ی ۳۳ توان کل برای داده‌های یک ساله به دست می‌آید.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{v}{c}\right)^k \quad (32)$$

$$\bar{P}_{total} = \left(\int_0^{\infty} f(v) Power(v) dv\right) N \Delta t \quad (33)$$

در رابطه‌ی ۳۳،  $N$  برابر ۵۲۵۶۰ و با تعداد داده‌های یک سال است و  $\Delta t$  برابر ۱۰ دقیقه است. با حل معادله‌ی ۳۳، و با استفاده از تابع ویبول برای ارتفاع ۴۰ متری،

### ۳.۵. توان تولیدی توربین

با توجه به مطالب بیان شده و ویژگی‌های به دست آمده برای انواع توربین‌ها با ضرایب صلیبیت و نوک پره متفاوت، توربین باد طراحی شده برای سایت بادی فذشک دارای مشخصاتی است که در جدول ۵ آمده است.

به منظور محاسبه‌ی توان تولیدی توربین طراحی شده، گشتاور متوسط توربین را توسط برنامه‌ی رایانه‌ی نوشته شده به دست آورده و توان تولیدی مطابق رابطه‌ی ۳۰ محاسبه می‌شود.

$$P = \bar{T} \cdot \omega \quad (30)$$

در رابطه‌ی ۳۰،  $w$  سرعت دورانی توربین برحسب رادیان بر ثانیه است و  $\bar{T}$  گشتاور متوسط توربین در یک سیکل است. برای ضریب سختی ۰/۴، سرعت نوک پره ۴ (در این حالت بیشترین ضریب توان را طبق نمودار شکل ۱۹ داریم) و شعاع برابر ۱/۵ متر، طول وتر ۲۰ سانتی متر خواهد شد. لازم به ذکر است ارتفاع پره‌های توربین ۳ متر در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه‌ی توان کل برای ناحیه‌ی فذشک ابتدا باید تابع تغییرات توان توربین را برحسب سرعت جریان باد آزاد به دست آورد. برای این منظور ابتدا گشتاور متوسط توربین در هر سرعت باد محاسبه و با استفاده از رابطه‌ی ۳۰، تغییرات توان برحسب سرعت باد حاصل می‌شود (شکل ۲۴). از آنجا که تغییرات توان با افزایش سرعت جریان آزاد باد افزایش می‌یابد، و این موجب افزایش بیش از حد نیرو شده و باعث آسیب به توربین می‌شود، توسط سیستم‌های کنترلی و طراحی هواپر با فرض واماندگی و یا پیچ این افزایش سرعت کنترل می‌شود. به همین علت در این پژوهش، با توجه به مطالعات<sup>[۱۷، ۱۸]</sup> و نمودارهای جدول ۵. مشخصات توربین باد طراحی شده برای سایت بادی فذشک.

۳	تعداد پره‌ها
NACA۴۴۱۵	نوع ایرفویل
۰/۴	ضریب صلیبیت
۳ متر	قطر
۳ متر	ارتفاع باله‌ها
۰/۲ متر	طول کورد

میزان توان تولیدی در یک سال برابر ۳۷۱ مگاوات ساعت شد:

$$\bar{P}_{total} = 353.4 \left( \frac{52562}{6} \right) \approx 371 \text{ MWh}$$

همچنین با استفاده از تابع ویبول برای ارتفاع ۱۰ متری میزان توان تولیدی در یک سال برابر ۲۷۰۱ مگاوات ساعت شد.

$$\bar{P}_{total} = 230.13 \left( \frac{52562}{6} \right) \approx 2701 \text{ MWh}$$

#### ۴.۵. تحلیل اقتصادی

سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) هرکیلووات ساعت برق تولیدی از سیستم‌های تجدیدپذیر مثل زمین گرمایی، خورشیدی یا بادی را به قیمت هرکیلووات ساعت، ۱۳۰۰ ریال از بخش خصوصی خریداری می‌کند. همچنین توربین بادی برای هر کیلووات برق با استفاده از سیستم‌های بادی حدود ۱۰۰۰ دلار یا ۱۲/۳۰۰۰۰۰ ریال هزینه در بر دارد (با در نظر گرفتن ارزش دولتی که به گسترش استفاده از انرژی‌های نو تعلق می‌گیرد). به منظور بررسی دقیق‌تر هزینه‌های نصب و راه‌اندازی توربین بادی، ابتدا هزینه‌های سالانه برای این توربین‌ها را باید به سال اول منتقل کرد:

$$C_{OM} = mC_I \quad (34)$$

در این رابطه  $C_I$  هزینه سرمایه‌گذاری اولیه این توربین‌ها، و  $C_{OM}$  هزینه تعمیر و نگهداری توربین بوده که کسری از هزینه اولیه آن است. به منظور برآورد معادل هزینه‌های نگهداری و تعمیر توربین در سال اول می‌توان از رابطه‌ی ۳۵ استفاده کرد:

$$PW(C_{OM})_{1-n} = mC_I \left[ \frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \quad (35)$$

درصد ارزش خالص کلیه‌ی هزینه‌ها شامل هزینه‌های نگهداری و نیز تعمیر و هزینه اولیه طبق رابطه‌ی ۳۶ بیان می‌شود:

$$NPW(C_A)_{1-n} = C_I \left[ 1 + m \left( \frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \quad (36)$$

بنابراین هزینه‌ی سالانه‌ی عملکرد توربین از رابطه‌ی ۳۷ به دست می‌آید. مقدار انرژی

تولیدشده توسط توربین بادی برای یک سال نیز از رابطه‌ی ۳۸ محاسبه می‌شود:

$$NPW(C_A) = \frac{NPW(C_A)_{1-n}}{n} = \frac{C_I}{n} \left[ 1 + m \left( \frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \quad (37)$$

$$E_I = 8760 P_R C F \quad (38)$$

که در آن معادله‌ی  $P_R$  و  $C_F$  توان نامی و فاکتور ظرفیت هستند. ضریب ظرفیت عبارت است از: نسبت توان واقعی تولید شده به توان نامی. بنابراین هزینه‌ی تولید یک کیلووات ساعت برق با استفاده از انرژی بادی از رابطه‌ی ۳۹ به دست می‌آید:

$$C = \frac{NPW(C_A)}{E_I} = \frac{C_I}{8760n} \left( \frac{1}{P_R C F} \right) \left[ 1 + m \left( \frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \quad (39)$$

باقی هزینه‌ها -- شامل هزینه‌ی نصب، حمل و نقل، و هزینه‌ی اتصال برق به شبکه‌ی توزیع نیرو -- معادل ۴۰ درصد هزینه‌ی اولیه در نظر گرفته می‌شود. همچنین هزینه‌ی تعمیر و نگهداری سالانه برای توربین بادی برابر ۶ درصد هزینه‌ی اولیه در نظر گرفته شده و عمر مفید توربین ۱۵ سال تخمین زده می‌شود.

با توجه به این که توان نامی توربین ۱/۵ کیلووات ساعت است، هزینه‌ی اولیه‌ی آن برابر با ۱۸/۴۵۰۰۰۰ ریال است که با توجه به اضافه‌شدن هزینه‌های جاری و نصب و نگهداری معادل ۶۰ درصد این مقدار که به هزینه‌ی اولیه افزوده می‌شود، هزینه‌ی اولیه‌ی کل برابر با ۲۹/۵۲۰۰۰۰ ریال می‌شود. بنابراین هزینه‌ی تولید برق با استفاده از انرژی باد برای هرکیلووات ساعت ۸۱۳ ریال خواهد شد:

$$C = \frac{29520000}{8760(15)} \left( \frac{1}{1.5(0.236)} \right) \left[ 1 + 0.06 \left( \frac{(1+0.2)^{15} - 1}{0.2(1+0.2)^{15}} \right) \right] \approx 813$$

با توجه به قیمت خرید برق که برابر ۱۳۰۰ ریال است تولید برق سودآوری دارد.

#### ۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تحلیل و طراحی آژودینامیکی یک توربین باد محور عمودی ۱/۵ کیلووات با پره‌های مستقیم اج‌شکل، با استفاده از داده‌های آماری ایستگاه فشدک، واقع در استان خراسان جنوبی انجام شد. با طراحی انجام‌شده توان سالانه‌ی توربین در ارتفاع ۴۰ متری، ۳۷۱ MWh، و در ارتفاع ۱۰ متری ۲۷۰۱ MWh خواهد بود. در صورتی که از این نوع توربین در منطقه استفاده شود هزینه‌ی برق تولیدی برابر ۸۱۳ ریال برای هرکیلووات ساعت برق خواهد بود.

#### منابع (References)

1. International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook*, Paris, OECD/IEA (2010).
2. Parker, L. and Blodgett, J. "Greenhouse gas emission: Conflicting situations, conflicting perspectives," congressional research service, *Library of Congress* (2005).
3. Mazandarani, A., Mahlia, T.M.I., Chong, W.T. and Moghavvemi, M. "A review on the pattern of electricity generation and emission in Iran from 1967 to 2008", *Re-*

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 1814-1829 (2010).
4. Fadai, D. "The feasibility of manufacturing wind turbines in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, pp. 536-542 (2007).
  5. Moghaddam, N.B., Mousavi, S.M., Nasiri, M., Moallemi, E.A. and Yousefdehi, H. "Wind energy status of Iran: Evaluating Iran's technological capability in manufacturing wind turbines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, pp. 4200-4211 (2011).
  6. Eriksson, S. Bernhoff, H. Leijon, M. "Evaluation of different turbine concepts for wind power", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, pp. 1419-1434 (2008).
  7. Islam, M., Ting, D.S.K. and Fartaj, A. "Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, pp. 1087-1109 (2008).
  8. Darrieus, G.J.M. "Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current", United States Patent Office. Patent no. 1835018 (1931).
  9. Kirke, B.K. "Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications", PhD thesis, Griffith University, Australia (1998).
  10. Kazemi Karegar, H., Zahedi, A., Ohis, V., Taleghani, G. and Khalaji, M. "Wind and solar energy development in Iran", North Amir Abad, Tehran/Iran: Centre of Renewable Energy Research and Application (2006).
  11. Mostafaiepour, A. "Feasibility study of offshore wind turbine installation in Iran compared with the world", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, pp. 1722-1743 (2010).
  12. Mostafaiepour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A.A. and Kalantar, V. "Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, pp. 2545-2556 (2011).
  13. Saeidi, D., Mirhosseini, M., Sedaghat, A. and Mostafaiepour, A. "Feasibility study of wind energy potential in two provinces of Iran: North and South Khorasan", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, pp. 3558-3569 (2011).
  14. South Khorasan Province: [http://en.wikipedia.org/wiki/South\\_Khorasan\\_Province](http://en.wikipedia.org/wiki/South_Khorasan_Province)
  15. Paraschivoiu, I. "Double-multiple stream tube models for Darrieus wind turbine", Second DOE/NASA Wind Turbine Dynamics Workshop, NASA CP-2186, Cleveland, OH, pp. 10-25 (February 1981).
  16. Ponta, F.L. and Jacovkis, P.M. "A vortex model for Darrieus turbine using finite element techniques", *Renewable Energy*, **24**, pp. 1-18 (2001).
  17. Nile series Vertical Axis Wind Turbine (VAWT): [www.windgreenergy.com](http://www.windgreenergy.com).
  18. 300W Vertical Axis Wind Turbine: [www.urbangreenenergy.com](http://www.urbangreenenergy.com).
  19. Renewable Energies Organization of Iran, <http://www.sun.org.ir/executivewindandwaveswindenergy-en.html>.

# AERODYNAMIC DESIGN OF VERTICAL AXIS WIND TURBINES USING BLADE ELEMENT MOMENTUM THEORY AND WIND DATA IN THE PROVINCE OF SOUTH KHORASAN

**D. Saeidi**

davoodsae@yahoo.com

**A. Sedaghat**(corresponding author)

sedaghat@cc.iut.ac.ir

**A.A. Alemrajabi**

rajabi@cc.iut.ac.ir

**P. Alamdari**

p.alamdari@me.iut.ac.ir

**Department of Mechanical Engineering  
Isfahan University of Technology**

Sharif Mechanical Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 97-107, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 18 December 2011; received in revised form 7 July 2012; accepted 26 December 2012.

## Abstract

Recent works in design of small stall regulated wind turbines has indicated the need to provide site-specific small wind turbines which incorporate innovative design and new materials of construction leading to better performance. In this paper, vertical axis wind turbines are considered for simplicity and ease of manufacturing for limited applications in Iran. Blade element momentum (BEM) theory is employed for aerodynamic design and analysis of a vertical axis wind turbine. The design algorithm was programmed in MATLAB routines using an iterative method for calculating axial and swirl induction factors,  $u$  and  $u'$ , respectively. NACA4415 aerofoil is used to provide higher lift to drag ratio and a double multiple stream tube model is used to properly model upstream and downstream of wind turbine in better agreement with some experimental observations. For the airfoil section NACA4415, the lift to drag ratio of 130 is obtained at the angle of attack of 13 degrees. A parabolic fitting function for lift and a cubic fitting function for drag coefficients are used with respect to angle of attack. This approach allows better predictions in high angle of attacks when partial stall may occur over airfoil surfaces. Studying wind energy potential in four stations, Bojnord, Esfaraein, Fadashk and Nehbandan in two provinces of North and South Khorasan in Iran, the results indicated that Fadashk station has better wind potential for setting up wind turbine in the studied provinces. The study was performed based on the

annual wind speed data obtained from renewable organization (SUNA) in Iran. Statistical analysis based upon wind data in Fadashk in the province of south Khorasan is used for designing a 1.5 kW vertical axis (H-rotor) wind turbine. Our results for the wind turbine are verified with an existing wind turbine and are parametrically studied. Furthermore, economical aspects of installing wind turbines in Fadashk and re cup from wind energy are investigated. The economical feasibility of the designed VAWT is finally evaluated to predict annual production of electricity that shows 6 cent profit for each kW h generated power.

**Key Words:** vertical axis wind turbines, blade element momentum theory, aerofoil, Khorasan province, wind potential.