



طراحی آیرودینامیکی توربین بادی اینولاکس و تست مدل ساخته شده در تونل باد

محمد مهدی قرآنی^۱، محمد مختاری^۲، علیرضا ریاسی^۳

دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی مکانیک

mahdi.ghorani@gmail.com

چکیده

استفاده‌ی بهینه از انرژی باد، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین منابع انرژی در طبیعت از گذشته مورد توجه بوده است. با این وجود توربین‌های باد امروزی مشکلاتی دارند که مانع از محبوبیت استفاده از آن‌ها در برخی از مناطق، به ویژه مناطقی با سرعت باد پایین می‌گردد. اینولاکس با ایده‌گیری از بادگیرهای سنتی، باد را در قسمت فوقانی جمع‌آوری کرده و سپس با عبور آن از لوله‌های قیف مانند، باد را به یک قسمت همگرا-واگرا هدایت می‌کند که در نتیجه سرعت باد در گلوگاه افزایش می‌یابد. از آنجایی که توان تولید شده توسط توربین با توان سوم سرعت باد و مساحت روتور رابطه‌ی مستقیم دارد؛ با افزایش سرعت باد می‌توان از توربینی با ابعاد به مراتب کوچک‌تر برای تولید انرژی استفاده کرد. توربین‌ها در گلوگاه ونچوری قرار می‌گیرند. در این پژوهش، طراحی اینولاکسی که بتواند سرعت باد در ونچوری را به حدود دو برابر افزایش دهد، انجام شده است. برای بررسی نسبت افزایش سرعت، مدلی از اینولاکس طراحی شده، ساخته و در تونل باد تست شده است. در ادامه به طراحی و تحلیل آیرودینامیکی توربین باد مناسب جهت نصب در اینولاکس طراحی شده، با استفاده از تئوری اصلاح شده‌ی اندازه حرکت المان پره پرداخته می‌شود. همچنین مدل توربین باد طراحی شده، ساخته و در تونل باد تست شده است. تست اینولاکس طراحی شده نشان می‌دهد سرعت در گلوگاه ونچوری سیستم بادرسان، دو برابر شده است. همچنین مشخصات عملکردی توربین مدل، نظیر ضریب توان با نتایج حاصل از تئوری المان پره مقایسه می‌شود. بررسی نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که طراحی انجام شده به روش تئوری المان پره از اعتبار و دقت لازم برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: اینولاکس، تونل باد، طراحی توربین باد، تئوری اندازه حرکت المان پره

^۱ دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

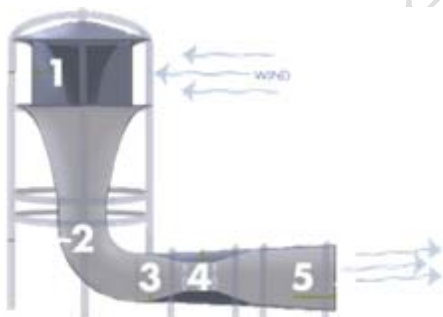
^۳ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران





۱- مقدمه

ایده‌ی استفاده از یک دیفیوزر برای افزایش توان خروجی توربین بادی محور افقی از چند دهه پیش مطرح بوده است [1,2]. اعلائی و آندریولوس با ایده‌گیری از بادگیرها که باد را از هر طرف جذب کرده و به داخل می‌آورند، استفاده از سیستم بادرسان اینولاکس را پیشنهاد کردند [3]. کومار و همکارانش [4] مدلی از سیستم اینولاکس را ساخته و تست کردند که قادر بود سرعت باد را به ۱/۷۶ برابر افزایش دهد. اینولاکس قادر است که باد را از جهات مختلف جذب کرده و پس از عبور آن از بخش همگرا-واگرا، سرعت باد در ونچوری را افزایش دهد. گلوگاه ونچوری اینولاکس، محل نصب توربین(ها) است. بسته به سرعت باد منطقه، ارتفاع و هندسه اینولاکس و نوع توربین باد، امکان استفاده از چند توربین به صورت سری نیز در ونچوری وجود دارد. با این کار، عملاً می‌توان از توربین‌های کوچک با دور زیاد به جای توربین‌های بزرگ و با دور کم استفاده کرد. اساس کار اینولاکس به این صورت است که در ورودی خود، باد را جمع‌آوری نموده و پس از افزایش سرعت، باد از توربین عبور کرده و در نهایت انرژی الکتریکی تولید می‌شود. پنج قسمت اصلی سیستم اینولاکس در شکل ۱ نشان داده شده است. این اجزاء به ترتیب عبارت‌اند از: ۱- ورودی باد، ۲- هدایت و تمرکز باد، ۳- افزایش سرعت باد با استفاده از ونچوری، ۴- افزایش سرعت باد و محل نصب توربین و ۵- دیفیوزر.



شکل ۱: قسمت‌های مختلف اینولاکس [5]

توربین(ها) درون ونچوری اینولاکس قرار داده شده است. در ونچوری فشار دینامیک بسیار بالا است؛ در حالی که فشار استاتیک پائین است. توربین، فشار دینامیک یا انرژی جنبشی باد را به انرژی مکانیکی تبدیل و سرانجام با استفاده از یک ژنراتور آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. افزایش سرعت باد در اینولاکس تولید انرژی بیشتری را به وسیله پره‌های بسیار کوچک‌تر امکان‌پذیر می‌نماید. توان تولیدی توربین باد با استفاده از رابطه‌ی $P = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 C_p \eta_g \eta_a$ به دست می‌آید. با توجه به این که این توان تولیدی با توان سوم سرعت و توان دوم قطر رابطه‌ی مستقیم دارد، با ۲ برابر شدن سرعت باد امکان استفاده از پره‌هایی با ابعاد ۸۴ درصد کوچک‌تر برای تولید انرژی وجود دارد. این مسأله باعث کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری نسبت به توربین‌های باد سنتی می‌شود [6].

۱-۱- مزایای اینولاکس

به طور کلی مزایای به‌کارگیری تکنولوژی اینولاکس در مقایسه با توربین‌های بادی رایج عبارت است از:

- توجیه اقتصادی و زمان بازگشت سرمایه کم
- عدم نیاز به سیستم کنترل جهت‌یابی باد
- قابل بهره‌گیری در مناطقی با سرعت باد کم؛ به صورتی که حداقل سرعت باد ورودی برای کارکرد توربین بادی اینولاکس ۲ مایل بر ساعت بوده، در حالی که این عدد برای توربین‌های باد سنتی برابر ۸/۵ مایل بر ساعت است [5].





- عدم وجود مشکلات محیط‌زیستی مانند آلودگی صوتی و صدمه به پرندگان
 - عدم یخ زدن ژنراتور و پره‌های توربین با توجه به نصب توربین در نزدیکی زمین
 - کارکرد توربین کوچک در سرعت‌های بالا و عدم نیاز به جعبه‌دنده
 - عدم تداخل الکترومغناطیسی با سیستم‌های راداری
 - امکان استفاده از چند توربین در ونچوری و قابلیت کنترل قدرت باد
 در این پژوهش، در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز^۱ یک نمونه اینولاکس با ۴ پره هادی جریان و با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به ونچوری طراحی شده است. در ادامه مدل اینولاکس در داخل تونل باد مورد تست قرار گرفته و میزان افزایش سرعت باد در ونچوری در حالت‌های مختلف قرارگیری اینولاکس نسبت به راستای باد مشخص شد که این افزایش در حالت‌های مختلف حدود ۲ برابر بوده است.

در ادامه به طراحی توربین باد مناسب جهت قرارگیری در گلوگاه سیستم اینولاکس طراحی شده، پرداخته شده است. برای طراحی پره توربین باد از سه ایرفویل S833، S834 و S835 در مقاطع مختلف استفاده شده است. برای تعیین طول خط وتر^۲ ایرفویل‌ها و هم‌چنین زاویه پیچش^۳، در مقاطع مختلف از تئوری اش‌میتز^۴ استفاده شده است. پره‌ی طراحی شده با استفاده از تئوری اصلاح شده‌ی اندازه حرکت المان پره^۵ تحلیل و مشخصات عملکردی توربین معین شده است. مدلی از توربین باد طراحی شده به کمک پرینتر سه بعدی ساخته شده و در تونل باد تست شده است تا نتایج حاصل از روش تئوری المان پره با نتایج به دست آمده از تست آزمایشگاهی مقایسه شود.

۲- تست مدل اینولاکس ساخته شده در تونل باد

در شکل ۲ نمایی از اینولاکس طراحی شده به کمک نرم‌افزار سالیدورکز نشان داده شده است. ارتفاع اینولاکس طراحی شده ۲۱ متر، قطر گلوگاه ونتوری ۱/۸ متر و ارتفاع مکش هوا ۶ متر است. در این طراحی از ۴ پره هادی با زاویه قرارگیری ۴۵ درجه استفاده شده است. این پره‌ها به هدایت جریان و افزایش سرعت نهایی در گلوگاه ونچوری کمک می‌کنند [7]. مدلی از اینولاکس طراحی شده با مقیاس ۱:۵۰ به روش پرینت سه بعدی ساخته شده است. شکل ۳ مدل ساخته شده را نشان می‌دهد که در مقاطع a و b دو سوراخ برای اندازه‌گیری فشار استاتیک جریان هوا تعبیه شده است. با اندازه‌گیری اختلاف فشار استاتیک جریان هوا در این دو مقطع، می‌توان سرعت در گلوگاه ونچوری را اندازه‌گیری کرد.

^۱ SolidWorks

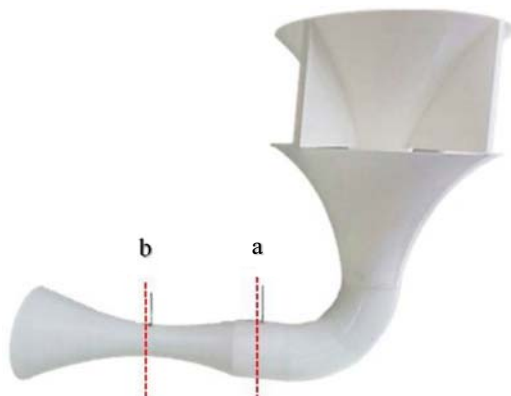
^۲ Chord

^۳ Twist Angle

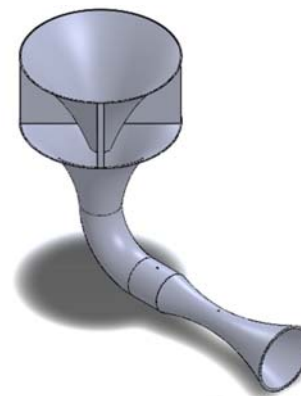
^۴ Schmitz

^۵ Blade Element Momentum (BEM)





شکل ۳: مدل اینولاکس ساخته شده



شکل ۲: اینولاکس طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورکز

طبق رابطه‌ی برنولی و با فرض جریان دائم، یکنواخت و غیر قابل تراکم می‌توان نوشت [8]:

$$P_a + \frac{1}{2}\rho V_a^2 + Z_a = P_b + \frac{1}{2}\rho V_b^2 + Z_b \quad (1)$$

با توجه به اختلاف ناچیز Z_a و Z_b داریم:

$$P_a - P_b = \Delta P = \frac{1}{2}\rho(V_b^2 - V_a^2) \quad (2)$$

با توجه به غیر قابل تراکم بودن جریان و معادله‌ی پیوستگی می‌توان نوشت:

$$V_a \times \pi \frac{D_a^2}{4} = V_b \times \pi \frac{D_b^2}{4} \quad (3)$$

حال می‌توان سرعت V_a را مطابق رابطه‌ی بالا، برحسب سرعت V_b در رابطه‌ی (۲) جایگذاری کرد؛ بنابراین:

$$V_b = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho(1 - (\frac{D_b}{D_a})^4)}} \quad (4)$$

مقادیری از انرژی در زیرلایه لزوج در نزدیکی دیواره‌ها به دلیل وجود لزجت و ایجاد تنش برشی به گرما تبدیل می‌شود. این اتلاف انرژی باعث کاهش سرعت در مقطع b می‌شود. برای در نظر گرفتن میزان کاهش سرعت، سرعت به دست آمده در رابطه‌ی (۴) باید در ضریب تخلیه^۱ ونچوری (C_d) ضرب شود. با توجه به استاندارد ISO 5167 مقدار ضریب تخلیه برای ونچوری طراحی شده، ۰/۹۸۴ در نظر گرفته شد. آزمایش برای سه حالت مختلف استقرار اینولاکس نسبت به جهت جریان باد در تونل انجام شده است. شکل ۴ این سه حالت را نشان می‌دهد.

^۱ Coefficient of Discharge



(۳)



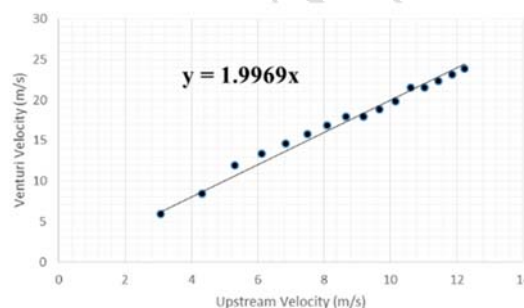
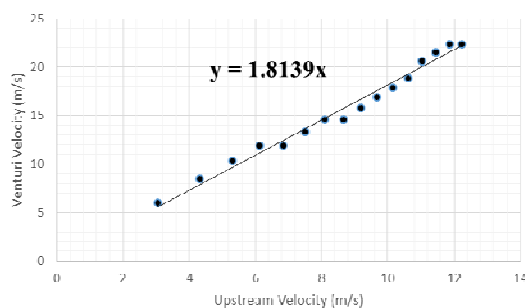
(۲)



(۱)

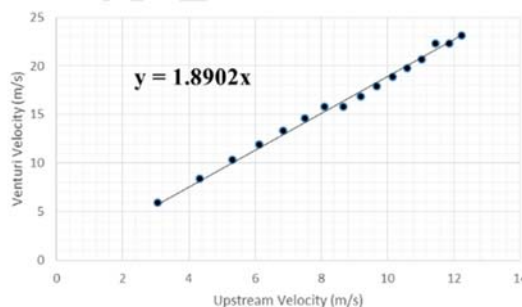
شکل ۴: تست اینولاکس ساخته شده در حالت‌های مختلف قرارگیری اینولاکس نسبت به راستای باد (۱) ونچوری موازی با راستای باد، (۲) زاویه ۴۵ درجه بین ونچوری و راستای باد و (۳) ونچوری عمود بر راستای باد

نتایج آزمایش در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است:



شکل ۶: سرعت باد در گلوگاه ونچوری بر حسب سرعت باد تونل در حالت (۲)

شکل ۵: سرعت باد در گلوگاه ونچوری بر حسب سرعت باد تونل در حالت (۱)



شکل ۷: سرعت باد در گلوگاه ونچوری بر حسب سرعت باد تونل در حالت (۳)

در هر حالت از تست‌های انجام شده، نمودار سرعت در گلوگاه ونچوری بر حسب سرعت تونل باد ترسیم شده است. با استفاده از روش حداقل مربعات مانده‌ها در هر حالت آزمایش، بهترین خط از داده‌ها عبور داده شده تا نسبت افزایش سرعت در گلوگاه ونچوری مشخص شود. سرعت باد در حالت‌های (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب ۲، ۱/۸۱ و ۱/۸۹ برابر شده است.

۳- طراحی آیرودینامیکی توربین باد





با توجه به دو برابر شدن سرعت باد در گلوگاه ونچوری طراحی شده و با فرض این‌که سرعت باد منطقه ۶/۲ متر بر ثانیه باشد، فرضیات طراحی توربین باد در جدول ۱ داده شده است.

جدول ۱: فرضیات طراحی توربین

λ [9]	D (m)	U_{∞} (m/s)
۵	۱/۳۱	۱۲/۵

ایرفویل‌های انتخاب شده برای مقاطع مختلف پره در جدول ۲ داده شده است.

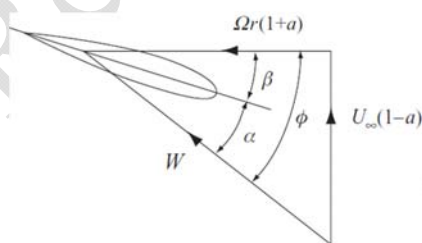
جدول ۲: ایرفویل‌های انتخاب شده برای مقاطع مختلف پره

مدل ایرفویل [10]	نسبت r/R	نوع ایرفویل	قسمت پره
S835	۰/۰۵ - ۰/۴۰	ضخیم	ریشه پره
S833	۰/۴۰ - ۰/۷۵	ضخیم	قسمت میانی پره
S834	۰/۷۵ - ۰/۹۵	ضخیم	نزدیک به نوک پره

عدد رینولدز در مقاطع مختلف پره با توجه به شکل ۱۰ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Re_{(r)} = \frac{\rho W c_{(r)}}{\mu} \quad (۵)$$

$$W_{(r)} = \sqrt{U_{\infty}^2(1-a)^2 + r^2\Omega^2(1+a')^2} \quad (۶)$$



شکل ۸: مثلث سرعت برای مقطعی از پره در شعاع r از هاب [11]

برای مقاطع $0.25 \leq \frac{r}{R} \leq 0.95$ عدد رینولدز تقریباً 2×10^5 است. برای طراحی آیرودینامیکی توربین باد و تحلیل صحیح عملکرد آن به روش اندازه حرکت المان پره نیاز است تا ضرایب نیروی برآ و پسا در گستره‌ی وسیعی از زوایای حمله در اختیار باشد. بدین منظور نیاز است تا این ضرایب در گستره‌ی زاویه حمله‌ی $-180 \leq \alpha \leq 180$ مشخص شود [12]. برای محاسبه این ضرایب از نرم‌افزار Qblade که برون‌یابی ضرایب آیرودینامیکی در آن بر اساس روش Montgomery است، استفاده شده



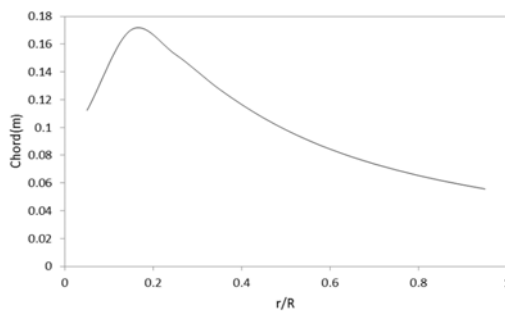


است. برای مشخص کردن طول خط وتر و زاویه پیچش ایرفول‌ها از تئوری اشمیتز مطابق روابط (۷) و (۸) استفاده شده است [13].

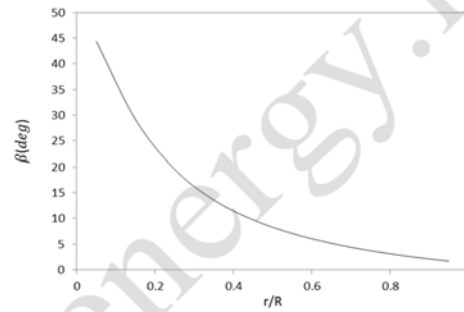
$$c(r)_{Schmitz} = \frac{1}{B} \frac{16\pi r}{C_{L,D}} \sin^2\left(\frac{1}{3} \tan^{-1}\left(\frac{R}{\lambda r}\right)\right) \quad (7)$$

$$\beta(r)_{Schmitz} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{R}{\lambda r} - \alpha_D \quad (8)$$

لازم به ذکر است که در این روابط مقدار زاویه‌ی حمله‌ی طراحی به گونه‌ای انتخاب شده که مقدار $\frac{C_L}{C_D}$ در طول پره بیشینه شود. شکل ۹ طول خط وتر و توزیع زاویه‌ی پیچش را در مقاطع مختلف پره نشان می‌دهد.



(۲)

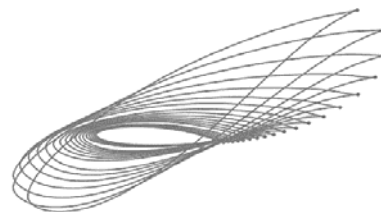


(۱)

شکل ۹: نمودار (۱) مقدار زاویه‌ی پیچش در مقاطع مختلف پره

نمودار (۲) طول خط وتر در مقاطع مختلف پره

شکل ۱۰: نمایی از نحوه‌ی چینش ایرفیل‌ها و پره‌ی طراحی شده در نرم‌افزار سالی‌دورکز را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: (۱) چینش ایرفویل‌ها، (۲) نمایی از پره‌ی طراحی شده در نرم‌افزار سالی‌دورکز

۴- تحلیل آیرودینامیکی توربین باد به روش تئوری المان پره

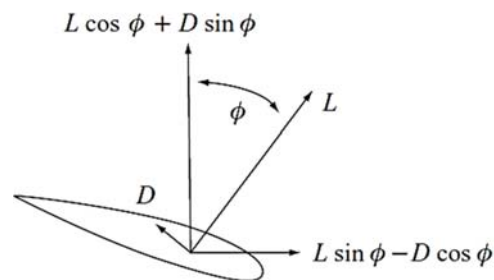
در این پژوهش، از روش اصلاح شده‌ی اندازه حرکت المان پره برای تحلیل آیرودینامیکی توربین باد طراحی شده، استفاده شده است. ابتدا پره‌ی طراحی شده به هشت المان $(0.25 \leq \frac{r}{R} \leq 0.95)$ تقسیم شده است. نمایی از المان واقع شده در شعاع r به همراه نیروهای وارد بر المان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نیروی محوری و گشتاور وارد شده بر المان به صورت تابعی از ضریب القایی محوری a و ضریب القایی جریان مماسی a' به صورت روابط (۹) و (۱۰) است [14]

$$dT = \frac{\rho U^2 (1-a)^2}{2 \sin^2 \varphi} B (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) c dr \quad (9)$$





$$dM = \frac{\rho U(1-a)}{2 \sin\phi} \cdot \frac{\omega r(1+a')}{\cos\phi} B(C_L \sin\phi - C_D \cos\phi) cr dr \quad (10)$$



شکل ۱: نیروهای وارد بر المان پره در شعاع r [11]

با توجه به قانون بقای مومنتم می‌توان مقدار نیروی محوری و گشتاور وارد شده بر هر المان را به صورت زیر نیز محاسبه کرد [13].

$$dT = 4\pi r \rho U_\infty^2 a(1-a) dr \quad (11)$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho U_\infty \omega (1-a) a' dr \quad (12)$$

با برابر قرار دادن این روابط می‌توان مقدار ضریب القایی محوری و ضریب القایی مماسی را به صورت زیر به دست آورد.

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma_r (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)} + 1} \quad (13)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma_r (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)} - 1} \quad (14)$$

در معادلات بالا σ_r یک عدد بی بعد به نام ضریب صلبیت وتر^۱ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_r = \frac{B c}{2\pi r} \quad (15)$$

در روابط فوق F ضریب تصحیح افت نوک پراوتل است که به صورت رابطه (۱۶) تعریف می‌شود [13]:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(\frac{B(r-R)}{2r \sin \phi} \right) \right) \quad (16)$$

معادله (۱۳) برای مقادیری از a که بیشتر از ۰/۴ باشند فاقد اعتبار است [8]. برای اصلاح ضریب القایی محوری از رابطه (۱۷) استفاده می‌شود [15]:

$$a = \frac{18F - 20 - 3\sqrt{C_N(50 - 36F) + 12F(3F - 4)}}{36F - 50} \quad (a > 0.4) \quad (17)$$

الگوریتم تحلیل هر المان به کمک تئوری اندازه حرکت المان پره را می‌توان در مراحل زیر خلاصه کرد:

۱- حدس اولیه برای مقادیر a و a'

^۱ Chord Solidity





۲- محاسبه‌ی زاویه جریان^۱ به کمک رابطه‌ی (۱۸):

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{U_{\infty}(1-a)}{\omega r(1+a)} \right) \quad (18)$$

۳- محاسبه‌ی زاویه حمله محلی المان به کمک رابطه‌ی (۱۹):

$$\alpha = \varphi - \beta \quad (19)$$

۴- محاسبه ضرایب برا و پسا

۵- محاسبه مقادیر جدید a' و a با استفاده از روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۷).

۶- در صورتی که اختلاف مقادیر جدید و قدیمی a' و a از 10^{-6} بیشتر باشد؛ بازگشت به مرحله ۲، در غیر این صورت ادامه الگوریتم.

۷- محاسبه نیروهای آیرودینامیکی وارد بر المان

در این مقاله الگوریتم فوق برای هشت المان $0.25 \leq \frac{r}{R} \leq 0.95$ و $\Delta \left(\frac{r}{R} \right) = 0.1$ حل شده است و در نهایت به کمک انتگرال‌گیری عددی مقدار توان، ضریب توان و نیروی محوری توربین باد طراحی شده محاسبه شده است. جدول ۳ نتایج تحلیل توربین طراحی شده را نشان می‌دهد:

جدول ۳: نتایج تحلیل توربین باد طراحی شده با روش BEM

توان خروجی [W]	نیروی محوری [N]	ضریب توان	سرعت دورانی [RPM]
۷۰۵	۹۵/۴۵	۰/۴۳	۹۱۱/۱۹

۵- تست مدل توربین اینولاکس در تونل باد

۵-۱- محاسبه بازده روتور ضریب انسداد

در هنگام تست توربین باد مقدار توان خروجی به صورت رابطه‌ی (۲۹) قابل محاسبه است.

$$P_{out} = P_{in} \times C_p \times \eta_{Gen} \times \eta_{rotor} \times BF^3 \quad (29)$$

محاسبات بازده روتور در این مقاله با توجه به روابط ارائه شده در مرجع [13] انجام شده است. با توجه به محاسبات انجام شده مقدار بازده پروفیل، بازده گردابه و بازده نوک برای توربین طراحی شده به ترتیب برابر ۰/۸۹، ۰/۹۶ و ۰/۸۹ می‌باشد. بازده روتور که حاصل ضرب سه بازده فوق است، برابر با ۰/۷۶ محاسبه شده است.

در رابطه‌ی (۲۹) BF ضریب انسداد بوده و دلیل وجود آن این است که در شرایط واقعی، توربین در فضای آزاد قرار دارد، در حالی که در تونل باد، توربین در یک فضای بسته که از چهار طرف احاطه شده، قرار گرفته است و به همین دلیل توان خروجی از آن بایستی در توان سوم ضریب انسداد ضرب شود تا توان خروجی به دست آید. مطابق توضیحات بالا نسبت سرعت نوک پره نیز باید در ضریب انسداد ضرب شود.

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \times BF \quad (30)$$

وقتی یک مدل برای تست در تونل باد با دیواره صلب قرار می‌گیرد، در محاسبات نیروی حاصل و یا اندازه‌گیری‌های دیگر به دلیل شتاب هوا در فاصله بین دیوار و خود مدل خطا رخ می‌دهد. این افزایش فشار دینامیکی در این فاصله باعث افزایش افت

^۱ Flow Angle





فشار نسبت به هوای آزاد می‌گردد و این امر باعث افزایش اختلاف فشار در جلو و عقب توربین، و در نتیجه افزایش نیروی درگ می‌شود [16]. نحوه‌ی محاسبه‌ی ضریب انسداد برای تست توربین باد توسط ویلسون و همکاران بحث شده است [17]. در این پژوهش با بهره‌گیری از نتایج ارائه شده توسط گلوئرت [18]، محاسبه‌ی ضریب انسداد انجام شده است. برای تست انجام شده مقدار ضریب انسداد با توجه به محاسبات انجام گرفته برابر ۰/۸۹ است.

۵-۲- نحوه‌ی انجام تست

برای انجام تست، مدلی از توربین باد طراحی شده با مقیاس ۱:۴ به روش پرینت سه بعدی ساخته شده است. در شکل ۱۴ نمایی از توربین ساخته شده که جهت انجام تست در تونل باد نصب شده، آمده است. در جدول ۵ تمامی اجزاء به کار رفته در آزمایش به همراه مشخصات فنی آن‌ها ملاحظه می‌گردد.



شکل ۱۴: نمایی از توربین باد ساخته شده

جدول ۴: اجزای به کار رفته در آزمایش به همراه مشخصات فنی آن‌ها

توضیحات	مشخصات	اجزاء به کار رفته در آزمایش
SM-3055	حداکثر ولتاژ خروجی ۱۲ ولت	ژنراتور
از جنس PLA	قطر خارجی ۳۶ سانتی‌متر	مدل توربین باد اصلی
-	۱۰۷ اهم	مقاومت
مدل نوری	برای اندازه‌گیری سرعت دورانی توربین	تاکومتر

در مدار آزمایش، یک مولتی‌متر به صورت سری با بار قرار گرفته است تا جریان مدار اندازه‌گیری شود. به همین ترتیب مولتی‌متری موازی با مقاومت ۱۰۷ اهمی قرار دارد تا ولتاژ دو سر بار در طول آزمایش ثبت شود. در این آزمایش، به تدریج سرعت هوا در تونل باد زیاد می‌گردد و مقادیر ولتاژ، جریان، دور توربین و مقدار سرعت هوا در تونل باد اندازه‌گیری شده که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۵: مقادیر ولتاژ، جریان، دور توربین و سرعت هوا در تونل باد

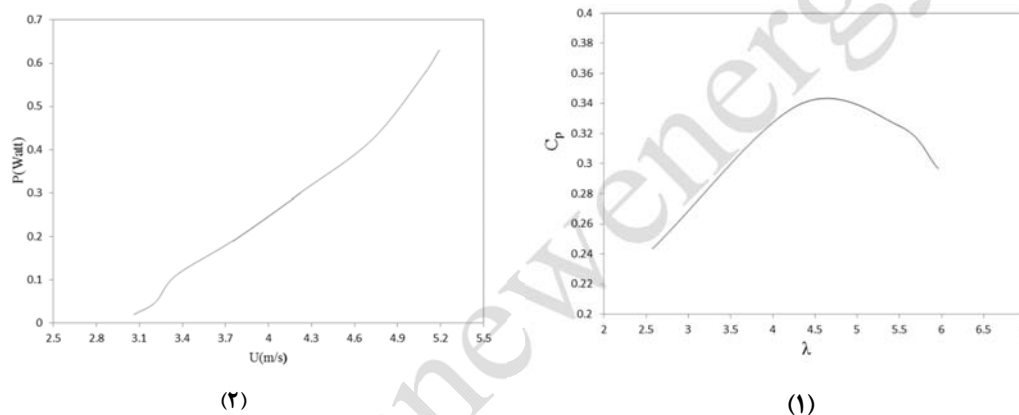
سرعت هوا در تونل باد	دور توربین	جریان	اختلاف پتانسیل
m/s	RPM	A	V
3.06	860	0.03	3.58
3.21	950	0.03	3.85
3.35	1050	0.03	4.20
3.49	1170	0.04	4.64
3.62	1270	0.04	4.95
3.75	1360	0.04	5.32





3.87	1440	0.04	5.57
3.99	1500	0.05	5.85
4.11	1560	0.05	6.05
4.22	1600	0.05	6.25
4.33	1700	0.05	6.65
4.46	1800	0.06	6.85
4.59	1850	0.06	7.10
4.72	1920	0.06	7.61
4.84	2050	0.07	7.95
4.96	2200	0.07	8.80
5.08	2500	0.08	9.85
5.19	2700	0.09	10.45

با توجه به رابطه‌ی (۲۹) و (۳۰) محاسبات برای تعیین مقادیر توان خروجی، ضریب توان و سرعت نوک پره انجام شده است. بازده ژنراتور از کاتالوگ شرکت سازنده بدست آمده است. در شکل ۱۵ منحنی‌های ضریب توان C_p برحسب سرعت نوک پره λ و منحنی توان P برحسب سرعت باد بالادست U_{∞} آمده است.



شکل ۱۴: نمودار (۱) ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره و (۲) توان برحسب سرعت باد بالادست

با توجه به شکل ۱۵، مقدار ضریب توان در نقطه‌ی طراحی ($\lambda = 5$) برابر 0.34 و مقدار سرعت هوای مورد نیاز برای شروع چرخش توربین ۳ متر بر ثانیه است. با توجه به این موضوع که سرعت باد در گلوگاه ونچوری دو برابر می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت سرعت باد راه اندازی^۱ توربین حدود $1/5$ متر بر ثانیه خواهد بود. این سرعت در مقایسه با توربین‌های بادی سنتی محور افقی بسیار کمتر بوده که امکان به‌کارگیری توربین اینولاکس طراحی شده در مناطقی با سرعت باد پایین را فراهم می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا سیستم اینولاکس طراحی شده در تونل باد مورد تست قرار گرفت. اینولاکس طراحی شده قادر است باد را مستقل از جهت وزش آن جذب کند و سرعت آن را تا حدود دو برابر افزایش دهد. با توجه به دو برابر شدن سرعت باد، توربین بادی با قطر $1/31$ متر برای قرارگیری در گلوگاه ونچوری اینولاکس طراحی شده است. توربین طراحی شده به کمک تئوری اندازه حرکت المان پره تحلیل شده است. ضریب تصحیح افت نوک پیرانتل و تصحیح گلوثرت مربوط به ضریب القایی محوری به این روش اضافه شده است تا تحلیل صورت گرفته دقت و اعتبار کافی داشته باشد. نتایج تحلیل توربین باد نشان

^۱ Cut-in Wind Speed





میدهد هنگامی که سرعت باد منطقه ۶/۲ متر بر ثانیه و نسبت سرعت نوک پره ۵ است، توان تولید شده توسط توربین ۷۰۵ وات و ضریب توان ۰/۴۳ است. مدلی از توربین در مقیاس ۱:۴ ساخته و در تونل باد تست شده است. نتایج تست آزمایشگاهی نشان می‌دهد ضریب توان توربین طراحی شده، در نسبت سرعت نوک پره ۵، برابر ۰/۳۴ است. اختلاف مقدار ضریب توان حاصل از تست و ضریب توان حاصل از تئوری المان پره می‌تواند ناشی از در نظر نگرفتن اثرات سه‌بعدی جریان و وجود هاب در تئوری المان پره باشد. همچنین خطاهای پیش آمده در هنگام آزمایش را می‌توان از دیگر عوامل این اختلاف دانست. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت تست تونل باد از روش‌های قابل اطمینان و در عین حال پرهزینه برای تحلیل عملکرد توربین بادی است.

۷- فهرست علائم

یکای	نماد	توضیح
-	a	ضریب القایی محوری
[m]	r	فاصله هاب تا مقطع پره
[m ²]	A	مساحت روتور
-	B	تعداد پره‌ها
-	BF	ضریب انسداد
-	C_d	ضریب تخلیه
-	C_D	ضریب پسا
-	C_L	ضریب برآ
-	$C_{L,D}$	ضریب برآ در زاویه حمله طراحی
-	C_p	ضریب فشار
[m]	D	قطر روتور
-	F	ضریب تصحیح پرائتل
-	GR	نسبت گلاید
[N.m]	M	گشتاور
[W]	P	توان خروجی
[m]	R	شعاع روتور
-	Re	رینولدز
[N]	T	نیروی محوری
[m.s ⁻¹]	U_{∞} یا V	سرعت باد در بالادست
[m.s ⁻¹]	W	سرعت باد نسبی
[m]	Z	ارتفاع از سطح میناء
-	a'	ضریب القایی مماسی
[rad.s ⁻¹]	ω یا Ω	سرعت زاویه‌ای
[deg]	α	زاویه حمله
[deg]	α_D	زاویه حمله طراحی
[deg]	β	زاویه پیچش
[kg.m ⁻³]	ρ	چگالی





[deg]	φ	زاویه جریان
[N.s.m ⁻²]	μ	ویسکوزیته دینامیکی
-	λ	نسبت سرعت نوک پره
-	σ_r	ضریب صلبیت
-	η	بازده
-	η_d	بازده جعبه‌دنده
-	η_g	بازده ژنراتور

مراجع

- [1] W. J. Rainbird, and G. M. Lilley, "A Preliminary Report on the design and performance of a ducted windmill", Report 102, College of Aeronautics Cranfield, 1956.
- [2] B. L. Gilbert, and K. M. Foreman, "Fluid dynamics of diffuser-augmented wind turbines", J Energy 1978; 2(6):368e74.
- [3] D. Allaei, and Y. Andreop, "INVELOX: description of a new concept in wind power and its performance evaluation", Elsevier, Energy 69, 2014, pp 336-344.
- [4] N. Manoj Kumar, et. al, "Design and Wind Tunnel Testing of Funnel Based Wind Energy Harvesting System", Elsevier-Procedia Technology, Vol. 21, pp.33-40, November 2015 (Science Direct).
- [5] <http://sheerwind.com/>, revised at 20 August 2016.
- [6] <http://www.wattwind.ir/>, revised at 20 August 2016.
- [7] D. Allaei, "Using CFD to predict the performance of innovative wind power generators", Sheer Wind, Inc., 2012.
- [8] Y. A. Cengel, and J. M. Cimbala, "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications", 1st edition, McGraw-Hill, 2006.
- [9] J. F. Manwell, J. G. Mcgowan, A. L. Rogers, "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application", John Wiley & Sons, 2nd edition, 2009.
- [10] <http://wind.nrel.gov/airfoils/AirfoilFamilies.html>, revised at 6 July 2012.
- [11] Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe, and Ervin Bossanyi, "Wind Energy Handbook", John Wiley & Sons, 2nd edition, 2011.
- [12] A. Hassanzadeh, A. Hassanzadeh Hassanabad, and A. Dadvand, "Aerodynamic shape optimization and analysis of a small wind turbine blades employing the viterna approach a for a post-stall region", Alecsandria University Journal, 2016.
- [13] S. Gundtoft, "Wind Turbines", University Collage of Aarhus, 2nd edition, June 2009.
- [14] S. L. Dixon, C. A. Hall, "Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery", Elsevier, 7th edition, 2014.
- [15] L. Buhl, "A new empirical relationship between thrust coefficient and induction factor for the turbulent windmill state", technical report NREL/TP-500-36834, August 2005.
- [16] R. G.J. Flay, "model test of wind turbines in wind tunnels", Technical Transaction, 2015.
- [17] R. E. Wilson, P. B. S. Lissaman, S. N. Walker, "Aerodynamic performance of wind turbines", - Final report, Report ERDA/NSF/04014-76/1, Department of Mechanical Engineering, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
- [18] H. Glauert, W.F. Durand, "Airplane propellers", Vol. IV, Division I, Chapter VII, Section 4, Julius Springer, Berlin 1935.