مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کار آمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ – (۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶ مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ISC ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام www.Renewenergy.ir



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

محمد مهدی قرآنی<sup>۱</sup>، محمد مختاری<sup>۲</sup>، علیرضا ریاسی<sup>۳</sup> دانشگاه تهران، پردیس دانشکدههای فنی، دانشکده مهندسی مکانیک mahdi.ghorani@ymail.com

### چکیدہ

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 می گردد. اینولاکس با ایده گیری از باد گیرهای سنتی، باد را در قسمت فوقانی جمع آوری کرده و سپس با عبور آن از لولههای قیف مانند، باد را به یک قسمت همگرا-واگرا هدایت می کند که در نتیجه سرعت باد در گلوگاه افزایش می یابد. از آنجایی که توان تولید شده توسط توربین با توان سوم سرعت باد و مساحت روتور رابطهی مستقیم دارد؛ با افزایش سرعت باد می توان از توربینی با ابعاد به مراتب کوچکتر برای تولید انرژی استفاده کرد. توربین(ها) در گلوگاه ونچوری قرار می گیرد. 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 است شده است. در ادامه به طراحی و تحلیل آیرودینامیکی توربین باد مناسب جهت نصب در اینولاکس طراحی شده، با استفاده از تنوری اصلاحی و تحلیل آیرودینامیکی توربین باد مناسب جهت نصب در اینولاکس طراحی شده، با تول در تونل باد تست شده است. برای بررسی نسبت افزایش سرعت، مدلی از اینولاکس طراحی شده، ساخته و در تونل باد استفاده از تئوری اصلاح شده ی اندازه حرکت المان پره پرداخته می شود. همچنین مدل توربین باد طراحی شده، ساخته و در تونل باد تست شده است. تست اینولاکس طراحی شده نشان می دهد سرعت در گلوگاه ونچوری سیستم بادرسان، و در تونل باد تست شده است. تست اینولاکس طراحی شده نشان می دهد سرعت در گلوگاه ونچوری سیستم بادرسان، و در تونل باد تست شده است. تست اینولاکس طراحی شده نشان می دهد سرعت در گلوگاه ونچوری سیستم بادرسان، و در تونل باد تست شده است. تست اینولاکس طراحی شده نشان می دهد کر حریب توان با نتایچ حاصل از تئوری المان پره مقایسه می شود. بررسی نتایچ حاصل از تستهای آزمایشگاهی نشان می دهد که طراحی انجام شده به روش تئوری المان پره رو از اعتبار و دقت لازم برخوردار است.

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

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران <sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران <sup>۳</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران





مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کارآمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ – (۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶ ۱۹۷۵ مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ISC ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام www.Renewenergy.ir



### ۱– مقدمه

ایده ی استفاده از یک دیفیوزر برای افزایش توان خروجی توربین بادی محور افقی از چند دهه پیش مطرح بوده است [1,1]. اعلایی و آندرپولوس با ایده گیری از بادگیرها که باد را از هر طرف جذب کرده و به داخل می آورند، 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 سرعت باد منطقه، ارتفاع و هندسه اینولاکس و نوع توربین باد، امکان استفاده از چند توربین به صورت سری زها) 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 می توان 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 اساس کار اینولاکس به این صورت است که در ورودی خود، باد را جمعآوری نموده و پس از افزایش سرعت، باد از توربین عبور اساس کار اینولاکس به این صورت است که در ورودی خود، باد را جمعآوری نموده و پس از افزایش سرعت، باد از توربین عبور اساس کار اینولاکس به این صورت است که در ورودی خود، باد را جمعآوری نموده و پس از افزایش سرعت، باد از توربین عبور سرعت بود و در نهایت انرژی الکتریکی تولید می شود. 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 می کند. افزایش سرعت باد در اینولاکس تولید انرژی بیشتری را به وسیله پرههای بسیار کوچکتر امکانپذیر مینماید. توان تولیدی توربین باد با استفاده از رابطهی  $C_p \eta_g \eta_a$  ه دست میآید. با توجه را توجه این که این توان تولیدی با توان دوم قطر رابطهی مستقیم دارد، با ۲ برابر شدن سرعت باد امکان استفاده 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 می شود[6].

۱-۱- مزایای اینولاکس

به طور کلی مزایای به کارگیری 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 بهره گیری 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 توربین های باد سنتی برابر ۸/۵ مایل بر ساعت است [5].





www.SID.ir

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کارآمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ – (۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶ ۱۹۷۷۵۵۶۴۲۶ – ۲۲۲۵۵۶ (۲۱) – ۰۹۲۹۵۵۵۶۲۱۶ ۱۹۰۶ مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ۱۹۷۶ شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ۱۹۹۶ www.Renewenergy.ir



- 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<sup>۱</sup> یک نمونه اینولاکس با ۴ پرهی 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 حالت-های مختلف حدود ۲ برابر بوده است.

در ادامه به طراحی توربین باد مناسب جهت قرار گیری در گلوگاه سیستم اینولاکس طراحی شده، پرداخته شده است. برای طراحی پره توربین باد از سه ایرفویل 3835، 8333 و 3834 در مقاطع مختلف استفاده شده است. برای تعیین طول خط وتر<sup>۲</sup> ایرفویلها و همچنین زاویه پیچش<sup>۳</sup>، در مقاطع مختلف از تئوری اشمیتز<sup>۴</sup> استفاده شده است. پرهی طراحی شده با استفاده از تئوری اشمیتز<sup>۴</sup> استفاده شده است. پرهی طراحی شده با استفاده از تئوری اصلاح محتلف از تئوری اشمیتز<sup>9</sup> استفاده شده است. برای تعیین طول خط وتر<sup>۲</sup> ایرفویلها و همچنین زاویه پیچش<sup>۳</sup>، در مقاطع مختلف از تئوری اشمیتز<sup>۴</sup> استفاده شده است. پرهی طراحی شده با استفاده از تئوری اصلاح شده محتلف از تروری اشمیتز<sup>9</sup> استفاده شده است. پره محتلف از توربین باد ایرفویلها و همچنین زاویه پیچش<sup>۳</sup>، در مقاطع مختلف از مخصات 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 ارتقاع 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.

- <sup>\</sup> SolidWorks
- ۲ Chord
- <sup>r</sup> Twist Angle
- <sup>\*</sup> Schmitz
- <sup>a</sup> Blade Element Momentum (BEM)





مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کار آمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۱۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ – (۲۰۱۰) ۸۸۶۷۱۶۷۶ مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ISC مجریان: انجمن علمی مهندسی شده در پایگاه استنادی جهان اسلام www.Renewenergy.ir





N مقادیری از انرژی در زیرلایه لزج در نزدیکی دیوارهها به دلیل وجود لزجت و ایجاد تنش برشی به گرما تبدیل می شود. این اتلاف انرژی باعث کاهش سرعت در مقطع b می شود. برای در نظر گرفتن میزان کاهش سرعت، سرعت به دست آمده در رابطهی (۴) باید در ضریب تخلیه ونچوری (Ca) 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



<sup>1</sup> Coefficient of Discharge



مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کار آمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۱۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ (۲۰۱) - ۲۹۱۹۷۵۵۶۴۲۶ مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ISC مجریان: انجمن علمی مهندسی شده در پایگاه استنادی جهان اسلام www.Renewenergy.ir





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





شکل ۵: سرعت باد در گلوگاه ونچوری بر حسب سرعت باد تونل شکل ۶: 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 برحسب 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





مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کار آمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ – ۲۰۱۱ ۸۸۶۷۱۶۷۶ مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ISC ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام www.Renewenergy.ir



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

ل ۱: فرضيات طراحی توربين	جدو
--------------------------	-----

λ [9]	D (m)	$U_{\infty} (m/s)$
۵	١/٣١	١٢/۵

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

جدول ۲: ایرفویلهای انتخاب شده برای مقاطع مختلف پره

مدل ايرفويل [10]	<sup>r</sup> / <sub>R</sub> نسبت	نوع ايرفيل	قسمت پره
S835	۰/•۵ - •/۴۰	ضخيم	ریشه پره
S833	۰/۴۰ – ۰/۷۵	ضخيم	قسمت میانی پرہ
S834	۰/۷۵ – ۰/۹۵	ضخيم	نزدیک به نوک پره

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

$$\begin{aligned} Re_{(r)} &= \frac{\rho W c_{(r)}}{\mu} \\ W_{(r)} &= \sqrt{U_{\infty}^2 (1-a)^2 + r^2 \Omega^2 (1+a')^2} \end{aligned}$$

(۵)

(۶)



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

برای مقاطع 0.95  $\geq \frac{r}{R} \geq 0.25$  عدد رینولدز تقریباً 10<sup>5</sup> × 2 است. برای طراحی آیرودینامیکی توربین باد و تحلیل صحیح عملکرد آن به روش اندازه حرکت المان پره نیاز است تا ضریب 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  $\geq \alpha \geq 0.85$  مشخص شود [12]. برای محاسبه این ضرایب از نرمافزار Qblade که برونیابی ضرایب آیرودینامیکی در آن بر اساس روش Montgomery است، استفاده شده





مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کار آمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۱۹۹۷۵۵۶۴۲۴ – (۲۱۰) ۸۸۶۷۱۶۷۶ مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ISC ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام www.Renewenergy.ir



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

$$c(r)_{Schimtz} = \frac{1}{B} \frac{16\pi r}{C_{L.D}} \sin^2(\frac{1}{3} \tan^{-1}(\frac{R}{\lambda r}))$$
(V)

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

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



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 ( $\frac{r}{R} \leq 0.95$ ) تقسیم شده است. نمایی از المان واقع شده در شعاع r شده است. ابتدا پرهی طراحی شده به هشت المان ( $0.95 \leq \frac{r}{R} \leq 0.95$ ) 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 محوری a و ضریب القایی جریان مماسی a' به صورت روابط (۹) و (۱۰) است [14]

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





www.SID.ir

مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کار آمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۱۹۹۷۵۵۶۴۲۶ – ۱۹۷۵۵۶۴۲۶ مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ISC ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام www.Renewenergy.ir



$$dM = \frac{\rho}{2} \frac{U(1-a)}{\sin\varphi} \cdot \frac{\omega r(1+a')}{\cos\varphi} B(C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi) crdr \tag{(1.)}$$

 $L\cos\phi + D\sin\phi$ 



شکل ۱۱: نیروهای وارد بر المان پره در شعاع r [11]

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

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

$$dM = 4\pi r^3 \rho U_{\infty} \omega (1-a) a' dr$$
(11)

$$dM = 4\pi r^3 \rho U_{\infty} \omega (1-a)a^r dr \tag{17}$$

با برابر قرار دادن این روابط میتوان مقادر ضریب القایی محوری و ضریب القایی مماسی را به صورت زیر به دست آورد. 1

$$a = \frac{1}{\frac{4F\sin^2\varphi}{\sigma_r(C_L\cos\varphi + C_D\sin\varphi)} + 1}$$
(17)

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

در معادلات بالا 
$$\sigma_r$$
 یک عدد بی بعد به نام ضریب صلبیت وتر<sup>۱</sup> است که به صورت زیر تعریف می شود:  

$$\sigma_r = \frac{B}{2\pi} \frac{c}{r}$$
(۱۵)

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

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \exp(\frac{B(r-R)}{2r\sin\varphi}) \right)$$
(۱۶)

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

$$a = \frac{18F - 20 - 3\sqrt{C_N(50 - 36F) + 12F(3F - 4)}}{36F - 50} \qquad (a > 0.4)$$
 (1Y)

<sup>\</sup> Chord Solidity





مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کارآمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما •9197009474 - (•71) \*\*\*\*\*\* مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC www.Renewenergy.ir

در این مقاله الگوریتم فوق برای هشت المان  $0.95 \ge rac{1}{R} \ge 0.25$  و  $\left(rac{1}{R}
ight) = \left(rac{1}{R}
ight)$ ، حل شده است و در نهایت به کمک انتگرال گیری 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

سرعت دورانی[RPM]	ضريب توان	نیروی محوری[N]	توان خروجي[W]
٩١١/١٩	٠/۴٣	٩۵/۴۵	۷۰۵

# ۵- تست مدل توربین اینولاکس در تونل باد

### ۵-۱-۵ محاسبه بازده روتور ضریب انسداد

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

(٢٩)

 $P_{out} = P_{in} \times C_p \times \eta_{Gen} \times \eta_{rotor} \times BF^3$ 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 برآبر ۱/۸۹، ۱/۹۶ و ۱/۸۹ می باشد. بازده روتور که حاصل ضرب سه بازده فوق است، برابر با ۷۶/۰ 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.

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \times BF \tag{(7.)}$$

وقتی یک مدل برای تست در تونل باد با دیواره صلب قرار می گیرد، در محاسبات نیروی حاصل و یا اندازه گیریهای 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

<sup>1</sup> Flow Angle





مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کارآمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ – ۲۰۱۱ ۸۸۶۷۱۶۷۶ ۱۹۷۵ مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ISC ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام www.Renewenergy.ir



فشار نسبت به هوای آزاد می گردد و این امر باعث افزایش اختلاف فشار در جلو و عقب توربین، و در نتیجه افزایش نیروی درگ می شود [16]. نحوهی محاسبهی ضریب انسداد برای تست توربین باد توسط ویلسون و همکاران بحث شده است [17]. در این پژوهش با بهره گیری 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 می گردد.



شکل ۱۲: نمایی از توربین باد ساخته شده

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

توضيحات	مشخصات	اجزاء به کار رفته در آزمایش
SM-3055	حداكثر ولتاژ خروجي ١٢ ولت	ژنراتور
از جنس PLA	قطر خارجي ۳۶ سانتيمتر	مدل توربين باد اصلى
-	۱۰۷ اهم	مقاومت
مدل نورى	برای اندازه گیری سرعت دورانی توربین	تاكومتر

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.

سرعت هوا در تونل باد	دور توربين	جريان	اختلاف پتانسيل
m/s	RPM	А	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

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



مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کار آمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ – ۲(۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ISC ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام

www.Renewenergy.ir



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 ۸ و منحنی توان P برحسب سرعت باد بالادست *D* آمده است.



شکل ۱۳: 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 ۱۳۴ 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<sup>۱</sup> توربین حدود ۱/۵ متر برثانیه 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 ۱/۳۱ 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 پرانتل و تصحیح گلوئرت 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







مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کارآمد دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ – ۲۰۱۶ ۸۸۶۷۱۶۷۶ ۱۹۷۵ مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ۱۹۷۲ ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام www.Renewenergy.ir



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 ۲/۴۳ 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 ۳۴/۰ 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.

یکا	نماد	توضيح
_	а	ضريب القايى محورى
[m]	r	فاصله هاب تا مقطع پره
$[m^2]$	Α	مساحت روتور
_	В	تعداد پرەھا
_	BF	ضريب انسداد
_	$C_d$	ضريب تخليه
_	C <sub>D</sub>	ضريب پسا
-	$C_L$	ضريب برآ
_	$C_{L,D}$	ضریب برآ در زاویه حمله طراحی
-	$C_p$	ضريب فشار
[ <i>m</i> ]	D	قطر روتور
-	F	ضريب تصحيح پرانتل
-	GR	نسبت گلاید
[ <i>N</i> . <i>m</i> ]	М	گشتاور
[W]	Р	توان خروجي
[ <i>m</i> ]	R	شعاع روتور
	Re	رينولدز
[N]	Т	نيروى محورى
$[m. s^{-1}]$	$U_\infty$ ي $V$	سرعت باد در بالادست
$[m. s^{-1}]$	W	سرعت باد نسبی
[m]	Ζ	ارتفاع از سطح مبناء
_	<i>a</i> ′	ضريب القايي مماسي
$[rad.s^{-1}]$	Ω یا ω	سرعت زاویهای
[deg]	α	زاويه حمله
[deg]	$\alpha_D$	زاويه حمله طراحي
[deg]	β	زاويه پيچش
$[kg.m^{-3}]$	ρ	چگالی
[ <i>kg</i> · <i>m</i> ]	P	

۷- فهرست علايم





مجموعه مقالات دهمین همایش ملی انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کارآمد

دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما ۹۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ (۰۲۱) – ۹۱۹۷۵۵۶۴۲۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم اندیشان انرژی کیمیا ISC ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام

www.Renewenergy.ir



[deg]	arphi	زاويه جريان
$[N. s. m^{-2}]$	μ	ويسكوزيته ديناميكي
-	λ	نسبت سرعت نوک پره
_	$\sigma_r$	ضريب صلبيت
-	η	بازده
_	$\eta_d$	بازده جعبهدنده
_	$\eta_g$	بازدہ ژنراتور 👝

- [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", 1<sup>st</sup> edition, McGraw-Hill, 2006.
- J. F. Manwell, J. G. Mcgowan, A. L. Rogers, "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application", John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> 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, 2<sup>nd</sup> edition, 2011.
- [12] A. Hassanzadeh, A. Hassanzadeh Hassanabad, and A. Dadvand, "Airodynamic shape optimazation and analysis of a small wind turbine blades emploing the viterna approach a for a post-stall region", Alecsanderia University Journal, 2016.
- [13] S. Gundtoft, "Wind Turbines", University Collage of Aarhus, 2<sup>nd</sup> 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.



