

تحلیل و بررسی میدانی عملکرد توربین بادگیر اینولاکس

در این مقاله نتایج تحلیل دینامیک سیالات و نتایج داده برداری های میدانی از یک نمونه کوچک توربین بادی اینولاکس^۴ ارائه شده است. توربین بادی اینولاکس طرح جدیدی از توربین های بادی پوشش دار است که باد را متمرکز کرده، آن را سرعت میدهد. طراحی توربین مورد نظر به گونه ای بوده است که انتظار میرفته سرعت باد در محل قرارگیری توربین نزدیک به ۱/۷ برابر سرعت باد در فضای آزاد باشد که این مساله مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته و در نهایت برای بررسی اثر محفظه^۵ عملکرد توربین اینولاکس با یک توربین با همان ابعاد در بیرون از محفظه مقایسه و عملکرد بهتر آن شامل توان و انرژی تولیدی بیشتر نمایش داده شده است.

هنگامه فرح پور^۱

کارشناسی ارشد

پویا صنیعی^۲

کارشناسی ارشد

احمدعلی خلیب زاده^۳

دانشجوی دکترا

واژه های راهنما: تحلیل دینامیک سیالاتی، توربین بادی محفظه دار^۶، اینولاکس، داده برداری

۱- مقدمه

اولین ارزیابی از توربین های بادی محفظه دار بوسیله Lilley و Rainbird [۱] در سال (۱۹۵۶) انجام گرفته است. همچنین در دهه هفتاد، Foreman در دپارتمان هوافضای Grumman در امریکا [۴ و ۲] و Kogan و همکاران [۳] در دانشگاه بن گوریون آزمایشات زیادی در تونل باد انجام دادند و به نتایج متفاوتی دست یافتند. Lilley و Rainbird [۱] به این نتیجه رسیدند که اگر عملکرد توربین را به سطح خروجی توربین نسبت دهیم عملکرد بهبود نمی یابد؛ در حالی که Foreman [۲] نتیجه گرفت توربین های محفظه دار ۴/۲۵ برابر توربین مشابه در فضای آزاد توان تولید می کنند. Igra [۳] نیز به این نتیجه رسید که عملکرد توربین های محفظه دار بهتر از توربین های مشابه محور افقی با قطر مشابه است. این محققان جدا از انجام آزمایشات عملی، مدل های تئوریک پایه را نیز برای تحلیل نتایج ایجاد نمودند؛ اگرچه مدل های تئوریک توسعه یافته فاقد انسجام و جامعیت لازم برای توضیح پدیده های اساسی در میدان جریان توربین های محفظه دار بوده اند.

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، سازه های هوایی، دانشگاه شریف farahpour@pacificwind.co.nz

^۲ نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد هوافضا، سازه های هوایی، دانشگاه امیرکبیر saniei@pacificwind.co.nz

^۳ دانشجوی دکترا مهندسی برق قدرت، دانشگاه شاهد a.khatibzadeh@pacificwind.co.nz

^۴ INVELOX

^۵ Duct

^۶ Ducted wind turbine

در کنفرانس "سیستم های نوآورانه انرژی بادی" در سال (۱۹۷۹) در امریکا، دانشمندان پس از بحث بر روی هندسه و پیکربندی توربین های بادی محفظه دار به این نتیجه رسیدند که به طور کلی افزایش توان به مقدار دلخواه امکان پذیر است اما کاربرد تجاری توربین های محفظه دار به نظر اقتصادی نمی رسد چرا که هزینه های پیکربندی آنها بر دیگر هزینه ها افزوده می شود [۵]. پس از آن بسیاری از گروه های تحقیقاتی این ایده را به اشتراک گذارده ولی با توسعه سریع تکنولوژی توربین های بادی محور افقی در دهه هشتاد و نود، برنامه ریزی ها برای تحقیق و توسعه توربین های بادی محفظه دار متوقف شد.

۲۰ سال پس از اولین پژوهش های Foreman [۲] و Igra [۳]، مفهوم توربین بادی محفظه دار توسط شرکت Vortec Energy در نیوزلند دوباره احیا شد و به سرعت توسعه یافت. این کمپانی براساس آزمایشات تونل باد دپارتمان هوا فضای Grumman مدعی ضریب توان بالای ۲ برای پره شد که این ادعا پیش تر در آزمایشات تونل باد در دانشگاه اوکلند ارائه شده بود. در سال (۱۹۹۷) شرکت Vortec Energy یک توربین بادی محفظه دار با پره ای به قطر ۷/۳ متر ساخت و آزمایشهایی را در ابعاد واقعی آغاز نمود. فاکتورهای عملکردی که از داده برداری میدانی بر روی این توربین بادی با ابعاد واقعی بدست آمد مقادیر کمتری نسبت به مقادیر ارائه شده توسط Grumman را نشان داد. این نتایج در مقاله ای در وب سایت رسمی شرکت Vortec Energy منتشر شد. شبیه سازی های محاسبات دینامیک سیالات انجام شده حداکثر ضریب توان پره را در حدود یک نشان می داد که در مقایسه با سطح خروجی دیفیوزر، ضریب توان را خیلی کمتر از مقدار بتز ارائه می داد [۵]. با وجود تمام چالشهایی که در بررسی عملکرد و بازده توربین های بادی محفظه دار وجود داشت، تلاش برای توسعه آنها همچنان وجود داشته است. یکی از موانع موجود بر سر راه تجاری شدن این نوع توربین ها، قرار گرفتن توربین محفظه دار بر بالای برج است که باعث می شود هزینه های احداث و نصب توربین بسیار افزایش یابد. مساله دیگری که در این زمینه مطرح است نیاز به افزایش قطر محفظه همزمان با افزایش قطر پره و افزایش ظرفیت توربین می باشد که در عمل ساخت محفظه های بسیار بزرگ بر بالای یک برج را غیر ممکن می سازد. بدین ترتیب در سال (۲۰۱۲) مفهوم دیگری از توربین های بادی محفظه دار با نام اینولاکس توسط Allaei [۶] در شرکت Sheerwind آمریکا مطرح گردید که در آن محفظه توربین بر روی زمین قرار گرفته و در این تکنولوژی نوین، پره و محفظه به دلیل نوع پیکربندی نیازی به همسانی در قطر ندارند. این طرح مدعی است که با کاهش هزینه های نصب و نگهداری و افزایش تولید، راه را برای تجاری شدن توربین های بادی محفظه دار می گشاید. به نظر می رسد تکنولوژی توربین بادی اینولاکس که در سال های اخیر به دنیا معرفی شده و جنبه تجاری یافته است بتواند معضلات کنونی صنعت بادی دنیا را مرتفع نموده و انرژی بادی را به رقیبی برای انرژی فسیلی تبدیل نماید.

نام اینولاکس از دو کلمه "افزایش^۱" و "سرعت^۲" اقتباس شده و سیستم انتقال بادی است که اجازه کنترل مهندسی بیشتری در توربین بادی ایجاد نموده و با روشی شبیه به بادگیرهای یزد، باد را با ورودی قیفی شکل جمع آوری کرده و به سمت کانال افقی با سطح مقطع متغیر هدایت می کند و ضمن افزایش سرعت باد، آن را به سوی ژنراتورهای منتقل می نماید که به شکلی امن و اقتصادی بر روی زمین نصب شده اند.

¹ Increase

² Velocity

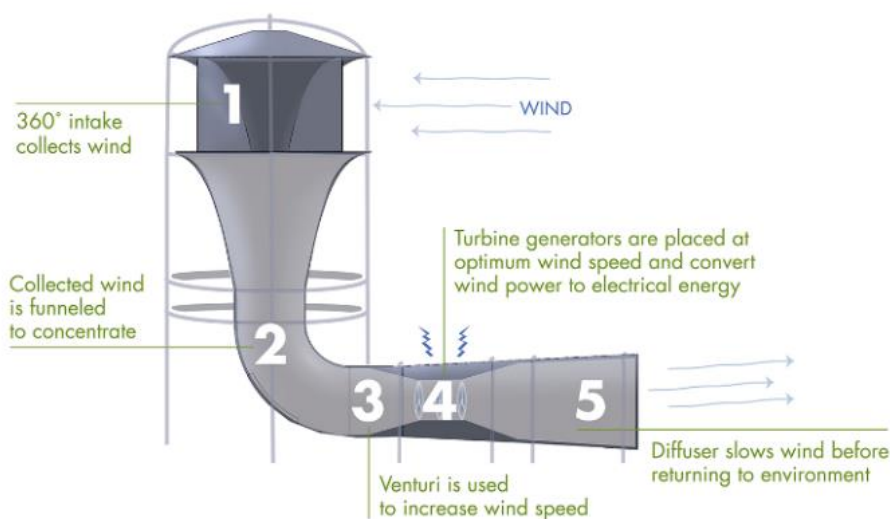
در این مقاله نتایج عملی بدست آمده از نمونه میدانی برای نخستین بار در کشور ایران گزارش شده و با نتایج بدست آمده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی قیاس گردیده است. تحلیل داده های عملکردی سیستم نشان می دهد که افزایش سرعت باد حتی وقتی که ژنراتور و پره درون کانال قرار می گیرد، رخ داده و بنابراین انرژی تولیدی در توربین بادی اینولاکس به طور قابل توجهی افزایش می یابد. این نتایج اندازه گیری شده، با آنچه در مدل های دینامیک سیالات محاسباتی بدست آمده، مطابقت دارد.

۲- نحوه عملکرد توربین بادی اینولاکس

اجزاء کلیدی سیستم اینولاکس که در شکل (۱) نمایش داده شده اند، عبارتست از: ۱- ورودی فوقانی، ۲- سیستم هدایت و تمرکز باد، ۳- افزایش سرعت باد به وسیله پدیده ونچوری، ۴- سیستم استحصال انرژی باد و ۵- خروجی باد می باشند. توربین بادی اینولاکس بوسیله ورودی فوقانی قیفی شکل، باد را جمع آوری نموده، با استفاده از لوله های مخروطی قیف مانند آنرا به بخش افقی هدایت می کند. بخش افقی توربین شامل یک بخش متمرکزکننده است که به ونچوری و سپس دیفیوزر منتهی می گردد. ژنراتور و پره درون بخش ونچوری اینولاکس قرار داده شده است.

۳- مفاهیم نظری

از آنجا که در توربین بادی اینولاکس فیزیک مساله با آنچه در توربین های بادی متداول متصور است تفاوت دارد، لذا لازم است در بررسی این سیستم نوین برخی ملاحظات نظری اضافه گردد. برای نوشتن معادلات بقای جرم و انرژی، معادله ممنوم خطی و زاویه ای بر روی یک حجم کنترل برای میدان سیال غیر لزج، تراکم ناپذیر و متقارن لازم است معادلات به فرم انتگرالی به شرح زیر نوشته شوند [۷]:



شکل ۱- نحوه عملکرد توربین بادی اینولاکس [۷]

$$\oint_A \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (۱-الف)$$

$$\oint_A \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (۱-ب)$$

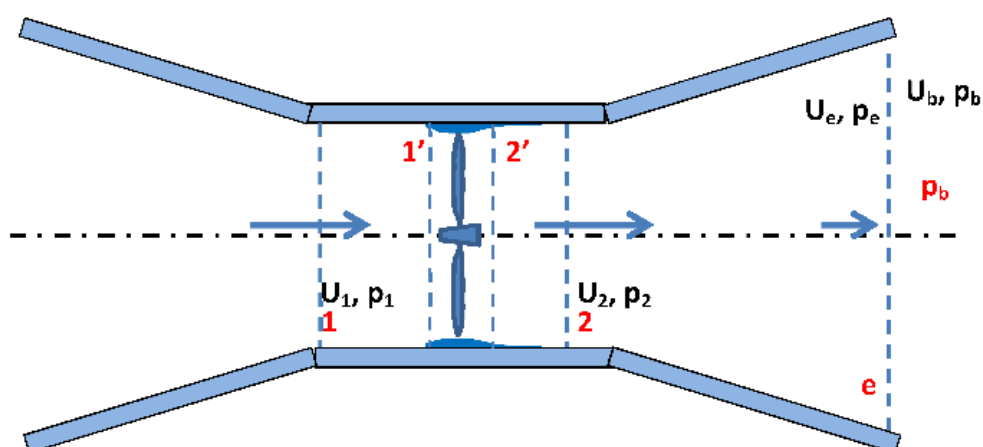
$$\oint_A r u_{\theta} \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = Q_T \quad (۱-ج)$$

$$\oint_A \left[\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} V^2 \right] \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = P \quad (۱-د)$$

که در این معادلات $\mathbf{V} = (u_r, u_{\theta}, u_z)$ بردار سرعت، r شعاع، ρ دانسیته هوا و A بردار مساحت سطح کنترل است. e_z بردار یکه محور z ، p فشار، T تراست یا نیروی محوری روی پره، Q_T گشتاور، و P توان استحصال شده از پره می‌باشد. اگر مطابق شکل (۲) سرعت متوسط باد در ونچوری U_1 در نظر گرفته شود، با توجه به معادله بقای جرم با عبور جریان از کانال با سطح مقطع ثابت، سرعت بدون تغییر باقی می‌ماند.

از آنجا که آنتالپی دبی جرمی جریان آزاد برابر $e = [p/\rho + 1/2 \|V^2\|] = P_0/\rho$ بیان می‌شود که در آن P_0 فشار کل و برابر $P_0 = p + 1/2 \rho V^2$ می‌باشد، لذا جریان باد به عنوان منبع انرژی نه تنها شامل انرژی جنبشی که شامل انرژی پتانسیل هم هست. این انرژی واحد جرم جریان پس از ورود به سیستم، با مقداری افت، که در لحظه می‌توان از آن صرف نظر نمود، به موقعیت بالادست جریان پره می‌رسد.

جریان داخل کانال شامل سه بخش متمرکز کننده، ونچوری و دیفیوزر می‌تواند به عنوان جریان داخل یک نازل - دیفیوزر در نظر گرفته شود که در آن گلوگاه نازل دقیقاً جایی است که پره قرار دارد و سطح مقطع آن برابر $A^* = A_1 - A_T$ است که در آن A_T مساحت تصویر شده پره ها روی صفحه عمود بر جهت جریان می‌باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- مدل یک بعدی جریان [۷]

توان استحصال شده توسط پره با معادله $P = \oint_A [P_0 / \rho] \rho V \cdot dA$ بیان می‌شود. مقدار متوسط P_0 / ρ در طول کانالی با سطح مقطع A_1 برابر $[P_0 / \rho]_{A_1} = \frac{1}{\dot{m}} \oint_A [P_0 / \rho] \rho V \cdot dA$ است که در آن \dot{m} دبی جرمی جریان در طول سیستم انتقال باد اینولاکس می‌باشد. در نتیجه مقدار توان مطابق معادله زیر بدست می‌آید:

$$P = \left(\left[\frac{P_0}{\rho} \right]_1 - \left[\frac{P_0}{\rho} \right]_2 \right) \dot{m} \quad (۲)$$

مقدار انرژی کل واحد جرم در جریان بالادست بیرون سیستم، در جریان بادی که به سیستم نزدیک می‌شود، برابر $\left[\frac{P_0}{\rho} \right]_u = \left[\frac{P_0}{\rho} \right]_l$ می‌باشد. آنتالپی جریان پایین دست، در تمام طول مسیر به سوی خروجی دیفیوزر برابر $\left[\frac{P_0}{\rho} \right]_d = \left[\frac{P_0}{\rho} \right]_z$ و به تبع آن با توجه به قانون برنولی:

$$P = \eta \dot{Q} [(p_1 - p_2)] = \eta A_1 U_1 [(p_1 - p_2)] \quad (۳)$$

اگر دبی حجمی جریان با $\dot{Q} = A_1 U_1 = A_1 S_R U_0$ جایگزین شود که در آن $S_R = U_1 / U_0$ ضریب افزایش سرعت است و ضریب فشار به شکل $K = (p_1 - p_2) / (1/2) \rho U_1^2$ معرفی گردد، با توجه به رابطه ضریب توان $C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_1 U_0^3}$ و ضریب فشار مفروض K ، با استفاده از قانون بقای ممنتوم و احتساب معادله پیوستگی در داکت و همچنین با فرض بازده $\eta_{01} = \eta_{23} = 1$ و $C_{p_b} = 0$ مقدار C_p به صورت زیر بر حسب K بدست می‌آید:

$$C_p = \frac{\eta K}{(K/4 + 1)^3} \quad (۴)$$

که با فرض $\eta = 1$ ، حداکثر مقدار C_p در $K=2$ بدست می‌آید و حداکثر مقدار C_p برابر $16/27$ یا همان 0.593 و برابر مقدار بتز [۸] می‌باشد.

با توجه به اینکه رفتار سیستم اینولاکس مشابه رفتار یک جسم بلاف^۱ برآورد می‌شود، فشار خروجی سیستم اینولاکس برابر فشار پشت یک جسم بلاف [۷] و همواره زیر فشار اتمسفر است. لذا پیش بینی می‌گردد در توربین بادی اینولاکس مقادیر C_p بهبود یابد که نتایج تست میدانی انجام شده آن را تایید می‌کند [۹]. در نهایت با توجه به روابط ارائه شده، توان مورد انتظار خروجی برابر معادله زیر خواهد بود:

$$P = \eta A_1 K \frac{1}{2} \rho U_u^3 = \eta A_1 K \frac{1}{2} \rho (U_0 S_R)^3 \quad (۵)$$

که نشان می‌دهد توربین اینولاکس حداکثر $K S_R^3$ برابر بیش از توربین بادی همسان، توان تولید می‌نماید و ضریب K با فرضیات در نظر گرفته شده حداکثر معادل ۲ بدست می‌آید. قابل ذکر است پارامتر K افزایش توان توربین را به پارامترهای طراحی اینولاکس وابسته می‌نماید و نشان می‌دهد که هندسه توربین تاثیر به سزایی در بازده بخش های مختلف داکت، توزیع فشار استاتیک و دینامیک و توان خروجی استحصال شده دارد [۹ و ۱۰].

¹ Bluff body

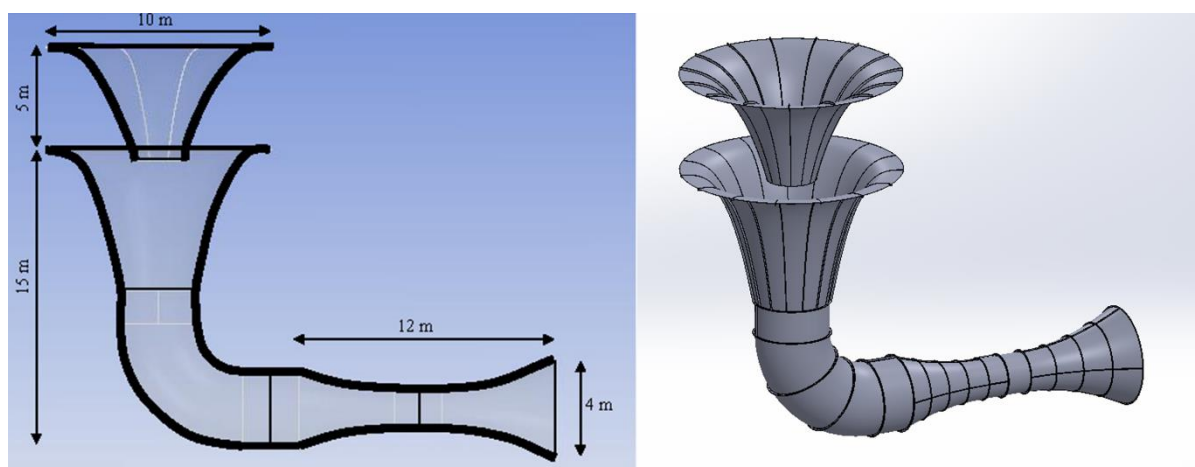
استحصال انرژی جریان متمرکز و فشرده و افزایش دبی جرمی تسخیر شده بوسیله ورودی فوقانی، در سیستم اینولاکس، دلایل اصلی افزایش توان استحصال شده در توربین بادی اینولاکس هستند که مفهومی نوینی برای استحصال انرژی جریان باد بوده که به صورت کلاسیک انجام می‌گرفته است.

۴- تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی

به منظور ایجاد امکان ارزیابی عملکرد توربین اینولاکس مورد نظر، شبیه سازی آن در محیط انسیس فلونت انجام گرفت تا محدوده افزایش سرعت S_p در سیستم مشخص گردد. نتایج طی بررسی های مختلف با سرعت های باد ورودی متفاوت و در زوایای مختلف نشان داد که انتظار می رود داکت توربین سرعت باد را بین $1/42$ تا $2/16$ برابر افزایش دهد. شکل (۳) ابعاد و هندسه اینولاکس با ورودی قیفی شکل چند جهته را نشان می‌دهد که باد را در 360° درجه جمع آوری می‌کند. قطر این نمونه در باریکترین محل در بخش ونچوری به نزدیکی ۲ متر می‌رسد. از آنجا که اینولاکس در بخش فوقانی خود پره و هاب ندارد، ارتفاع برج آن از مرکز دهانه ورودی تا سطح زمین اندازه گیری می‌شود.

در حل مدل دینامیک سیالاتی به وسیله نرم افزار انسیس فلونت، میدان جریان بوسیله 3970000 سلول چهاروجهی شبکه‌بندی شده و به منظور دستیابی به همگرایی در حل معادلات در مناطق نزدیک به دیواره ها با روش "Extra Fine mesh" بهبود یافته است. برای حل عددی میدان جریان مدل‌های مختلف نظیر $k-\omega$ ، $k-\epsilon$ و LES مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به هندسه توربین، شرایط جریان، دقت و سرعت همگرایی، در نهایت برای حل میدان جریان از معادلات ناویر-استوکس با دقت مرتبه دو و مدل توربولانس $k-\epsilon$ با توابع استاندارد دیواره، استفاده شده است.

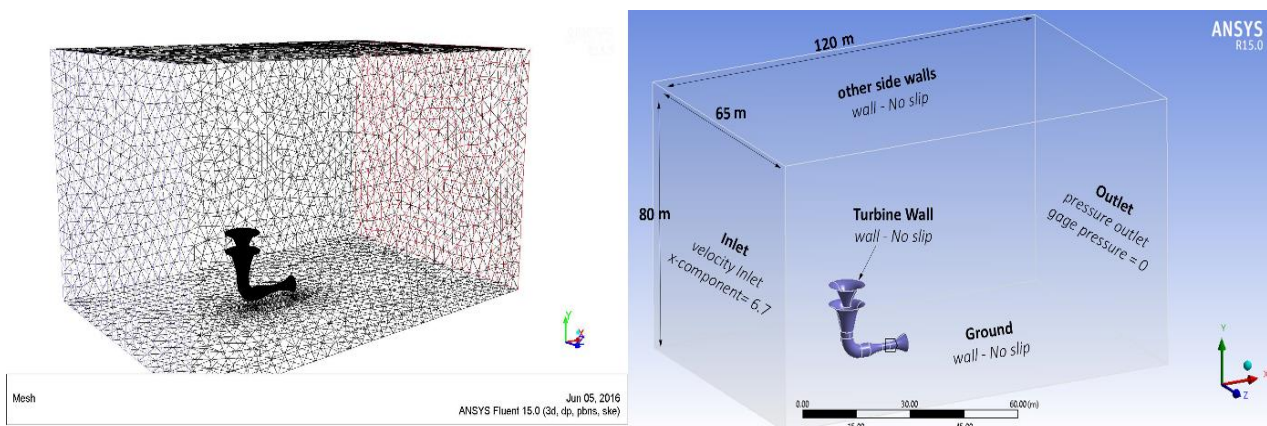
جریان ورودی، که تصویرکننده جریان باد در فضای آزاد است، با سرعت ثابت $6/7$ متر بر ثانیه به صفحه جلویی میدان جریان اعمال گردیده و زمین، دیواره بدون لغزش و فشار مرجع در تمام میدان، فشار اتمسفر است. شکل (۴) میدان جریان را به همراه شرایط مرزی در این نمونه مقیاس کوچک توربین بادی اینولاکس که به کمک نرم افزار های دینامیک سیالات محاسباتی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است، نشان می‌دهد.



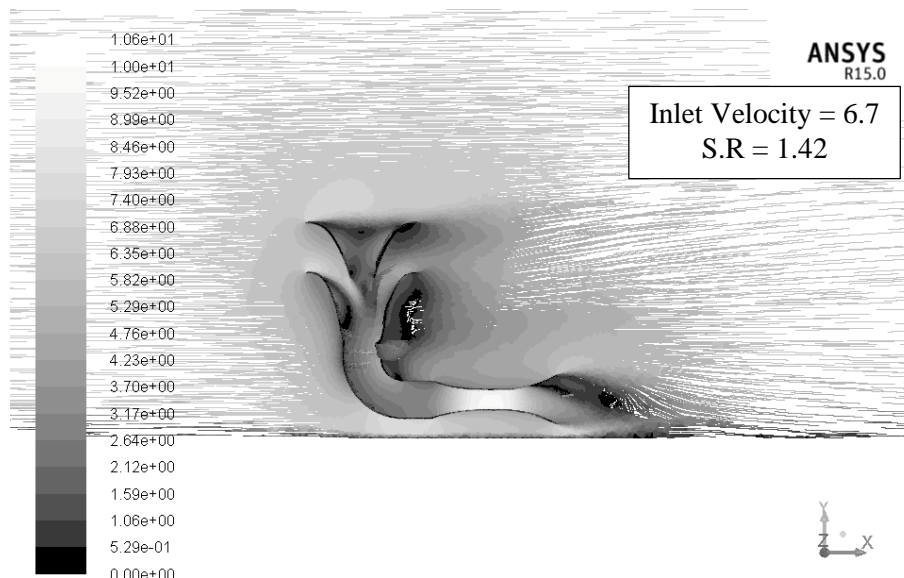
شکل ۳- ابعاد و هندسه مدل تحلیلی اینولاکس

ابعاد در نظر گرفته شده برای میدان جریان ۱۲۰، ۶۵ و ۸۰ متر است. قطر بیرونی قیف فوقانی با قطر قیف زیرین یکسان و برابر ۱۰ متر می‌باشد. قابل ذکر است که نتایج تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده براساس معادلات حالت پایدار^۱ بوده و ملاحظات ناپایداری را در سیستم اینولاکس و توربین آن، در نظر نمی‌گیرد و شامل چرخش توربین نیست.

شکل (۵) و (۶) مقادیر توزیع سرعت را برای دو شرایط مرزی دیواره با اصطکاک و بدون اصطکاک در مدل شبیه سازی شده در نرم افزار انسیس فلوئنت نشان می‌دهد. در صفحه تقارن برج اینولاکس می‌توان دید که جریان جمع آوری شده، به وسیله ورودی فوقانی، به سمت پایین به بخش گلوبی سیستم رسیده و سپس با چرخش ۹۰ درجه به بخش ونچوری در سطح زمین انتقال داده شده و سرعت گرفته است.

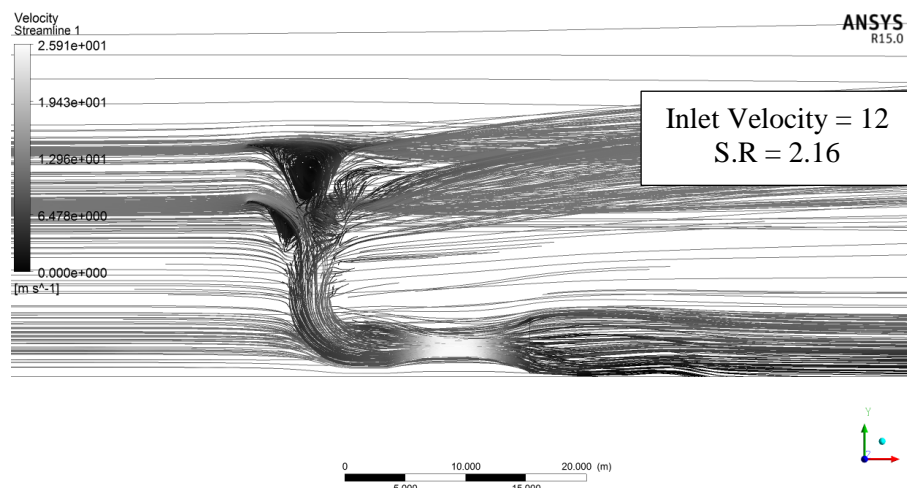


شکل ۴- میدان جریان در مدل محاسباتی

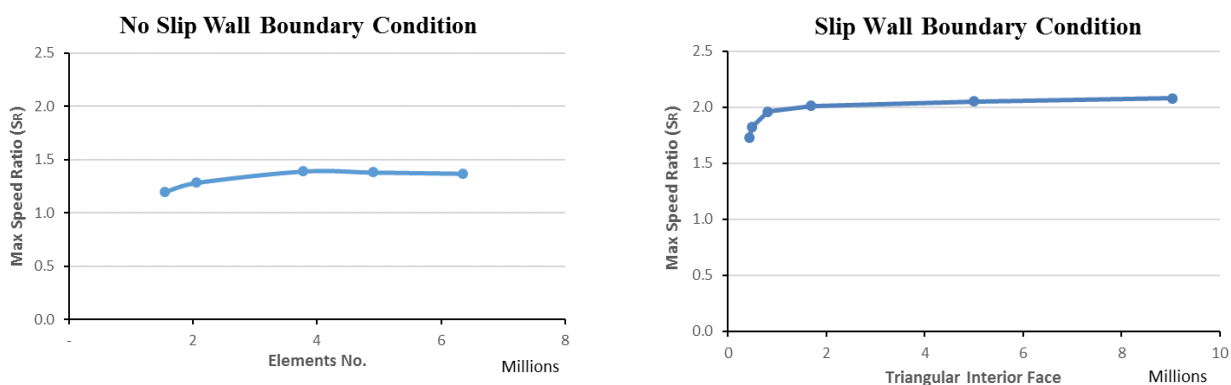


شکل ۵- پروفایل سرعت در نمای برش خورده با شرایط مرزی دیواره با اصطکاک

¹ Steady state



شکل ۶- پروفایل سرعت در نمای برش خورده با شرایط مرزی دیواره بدون اصطکاک



شکل ۷- استقلال نتایج از شبکه بندی

به منظور حصول اطمینان از دقت نتایج و استقلال نتایج از شبکه بندی، مدل مورد نظر با شرایط مرزی مختلف و با یک تعداد امان شبکه بندی شده و به تدریج با افزایش تعداد و کوچکتر کردن شبکه بندی، نتایج مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می شود با افزایش تعداد شبکه، سرعت باد در محفظه به یک عدد ثابت میل میکند و افزایش تعداد شبکه تاثیر چشمگیری در نتایج ندارد.

نتایج بدست آمده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، ضریب افزایش سرعت در درون محفظه توربین را بین ۱/۴۲ تا ۲/۱۶ پیش بینی نموده است. با توجه به داده های میدانی، مقدار متوسط این ضریب بر اساس اندازه گیری های میدانی معادل ۱/۷ بدست آمده است که تطابق خوبی را با نتایج شبیه سازی شده نشان داد. داده های بدست آمده در سطح مقطع ونچوری و در دو موقعیت بالادست و پایین دست جریان، تجمیع شده اند تا سرعت متوسط، دبی جرمی و دبی حجمی سیستم بدست آید. همانطور که از شکل (۵) و (۶) بر می آید، مقدار حداکثر سرعت در درون ونچوری شکل گرفته و یک تقارن نسبی در این بخش ملاحظه می گردد که در اثر چرخش ۹۰ درجه ای جریان است. با بررسی رفتار ورودی فوقانی توربین بادی اینولاکس، می توان دریافت که در این بخش، جریان باد و اندر کنش جریان درون و بیرون کاملا پیچیده است.

بطوریکه بخشی از جریان ورودی به دیواره داخلی برخورد می‌کند و به سمت پایین جهت گرفته، وارد برج می‌شود. در حالی که بخش دیگر جریان ورودی پس از برخورد به دیواره‌های جانبی قیف از آن جدا می‌شود. به نظر می‌رسد که جریان داخل قیف‌ها غیر یکنواخت بوده و در بخش پشتی آن مناطقی از جدایش جریان مشاهده می‌شود. در مجموع می‌توان گفت که ورودی فوقانی در برج اینولاکس، مقدار قابل توجهی از جریان آزاد، به جز بخش جدا شده آن، را جمع‌آوری می‌کند.

بازده سیستم اینولاکس به شکل قابل توجهی به دبی جرمی جریان تسخیر شده بوسیله ورودی فوقانی بستگی دارد و هندسه ورودی در آن نقش مهمی بازی می‌کند.

۵- مطالعه میدانی

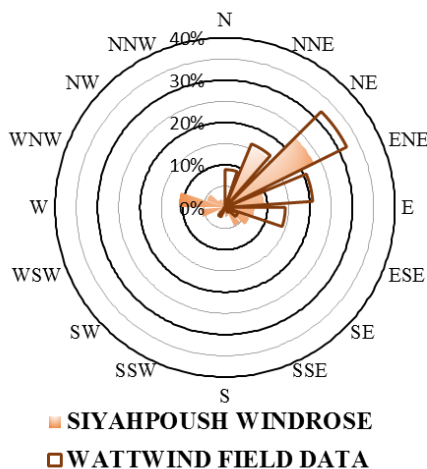
شکل (۸) نمونه مقیاس کوچک توربین‌های بادی اینولاکس، توربین بادی متداول همسان، وضعیت قرارگیری پره و ژنراتور و سیستم کنترلی را نشان می‌دهد. این توربین با ضریب افزایش سرعت $1/7$ ، به ارتفاع $19/2$ متر، طول 23 متر و طول پره 1 متر، به عنوان اولین نمونه توربین بادی اینولاکس در کشور ایران، با کمک متخصصان داخلی ساخته شده و پس از رایزنی با شرکت آراین مه باد در سایت این شرکت در منطقه سیاهپوش منجیل، در زمستان سال (۱۳۹۴)، نصب و راه‌اندازی گردید.

دیفیوزر این سیستم در جهت جنوب غربی قرار گرفته است. سیستم اندازه‌گیری شامل دو عدد سنسور باد درون ونچوری و دو عدد سنسور سرعت و جهت برای جریان آزاد می‌باشد. همچنین دور ژنراتور توسط سنسور دورسنج اندازه‌گیری شده است. در نمودار گلباد شکل (۹) داده‌های باد مربوط به سایت اینولاکس و داده‌های مربوط به ایستگاه هواشناسی سانا در بازه زمانی مورد نظر نشان داده شده‌اند. همانطور که از نمودار گلباد پیداست داده‌های اندازه‌گیری شده در محوطه سایت اینولاکس از مطابقت خوبی نسبت به داده‌های هواشناسی برخوردار بوده است و تفاوتی که در داده‌های شمال غربی باد مشاهده می‌گردد مربوط به وجود مانع تپه در شمال غرب سایت است که با ارتفاع بیش از 30 متر، وزش باد از آن سو را تحت تاثیر قرار داده است.



شکل ۸- نمونه آزمایشی مقیاس کوچک توربین بادی

WINDROSE COMPARISON



شکل ۹- مقایسه نمودار گل باد داده برداری محلی و سانا

پس از نصب اینولاکس و قبل از نصب توربین در داخل کانال، ابتدا بوسیله یک بادسنج بر روی سقف سازه و دو بادسنج در درون ونچوری سرعت باد جریان آزاد و سرعت باد درون ونچوری اندازه گیری شد. سپس به لحاظ ایجاد امکان مقایسه، دو مجموعه ژنراتور- پره بادی متداول^۱ با پره ای به طول یک متر و توان نامی ۳۰۰ وات در سرعت نامی باد ۹ متر بر ثانیه، جدول (۱)، تهیه گردید و یک مجموعه آن بیرون از برج اینولاکس، در فضای آزاد، و مجموعه دوم در درون کانال ونچوری توربین بادی اینولاکس قرار داده شد.

از آنجا که پیش بینی می شد سرعت باد در درون ونچوری توربین بادی اینولاکس افزایش یافته و به بیش از ۱/۷ برابر سرعت باد در فضای آزاد برسد و پره را با سرعتی بیش از ۱۳۰۰ دور بر دقیقه به چرخش وا دارد، ژنراتور سیصد واتی داخل کانال ونچوری با ژنراتور ده کیلو واتی تعویض گردید (بدون ایجاد تغییر در پره) تا امکان بررسی افزایش عملکرد توربین اینولاکس نسبت به توربین بادی متداول مشابه آن، فراهم گردد. قابل ذکر است که یک بانک بار برای مصرف انرژی تولید شده توسط ژنراتور در سیستم قرار گرفت.

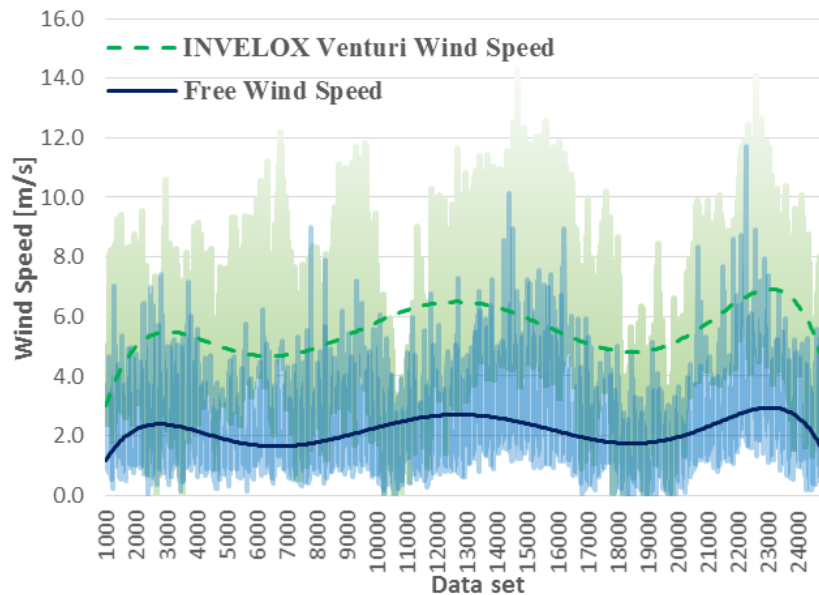
۶- نتایج داده برداری

داده های میدانی اندازه گیری شده در شکل (۱۰) در بازه زمانی دی و بهمن ماه سال (۱۳۹۴)، نشان دهنده سرعت باد در درون داکت ونچوری، سرعت باد در جریان آزاد و ضریب افزایش سرعت است و نشان می دهد این سیستم، ضریب افزایش سرعت پیش بینی شده در طراحی را ایجاد کرده است. همانطور که پیش تر نیز اشاره گردید، مقدار متوسط اندازه گیری شده برای ضریب افزایش سرعت با مقدار ۱/۷، مطابقت مناسبی با آنچه با کمک محاسبات دینامیک سیالاتی پیش بینی شده بود، در بازه ۱/۴۲ تا ۲/۱۶، دارد.

¹ Conventional

جدول ۱- مشخصات توربین بادی متداول

مشخصه‌ها	
توان نامی	۳۰۰ W
قطر روتور	۱/۸۶ m
سرعت باد راه انداز	۲/۵ m/s
سرعت باد نامی	۹ m/s
دور نامی	۵۰۰ rpm
سرعت باد ایمن	۵۰ m/s

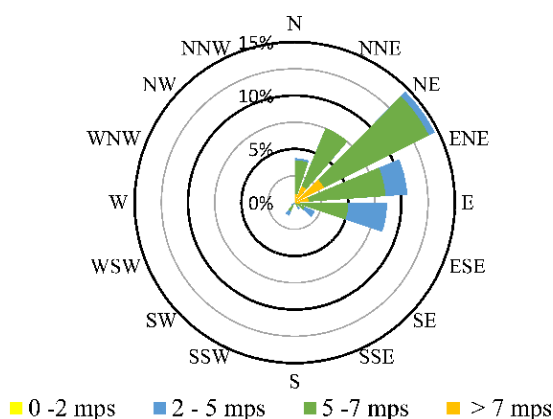


شکل ۱۰- افزایش سرعت باد در درون کانال ونچوری نسبت به سرعت باد جریان آزاد، برگرفته از اندازه گیری های میدانی

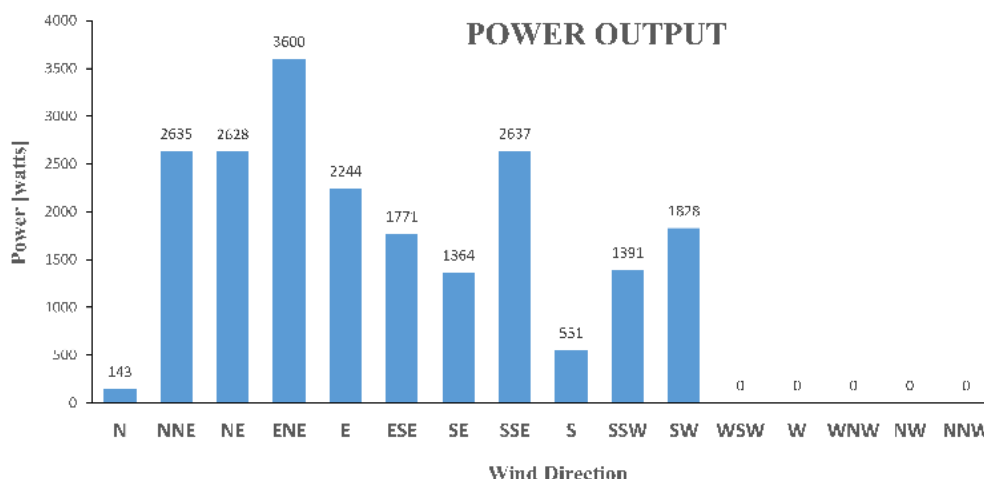
در نمونه نصب شده در منجیل دیفیوزر در جهت جنوب غربی قرار داده شده است و دهانه آن زوایای ۲۲۰ تا ۲۷۰ درجه را پوشش می‌دهد. همچنین یک تپه در فاصله ۵۰ متری و به ارتفاع ۳۰ متر در جهت شمال غربی و شمال، وزش باد از آن را سو تحت تاثیر قرار داده است (شکل (۱۱)).

بررسی داده های توان ژنراتور براساس جهات وزش باد نشان می‌دهد که ورودی فوقانی ۳۶۰ درجه را پوشش داده و سیستم عملکرد مناسبی را در جهات مختلف وزش باد از خود نشان داده است (شکل (۱۲)).

همانطور که گفته شد، به منظور ایجاد مقایسه معنی دار توربین بادی اینولاکس با توربین بادی همسان، دو توربین مشابه یکی در سیستم بادی اینولاکس و دیگری در بالای برج یک توربین متداول قرار گرفته و سیستم های الکتریکی و اندازه گیری مشابهی برای داده برداری از دو سیستم به کار گرفته شده است.

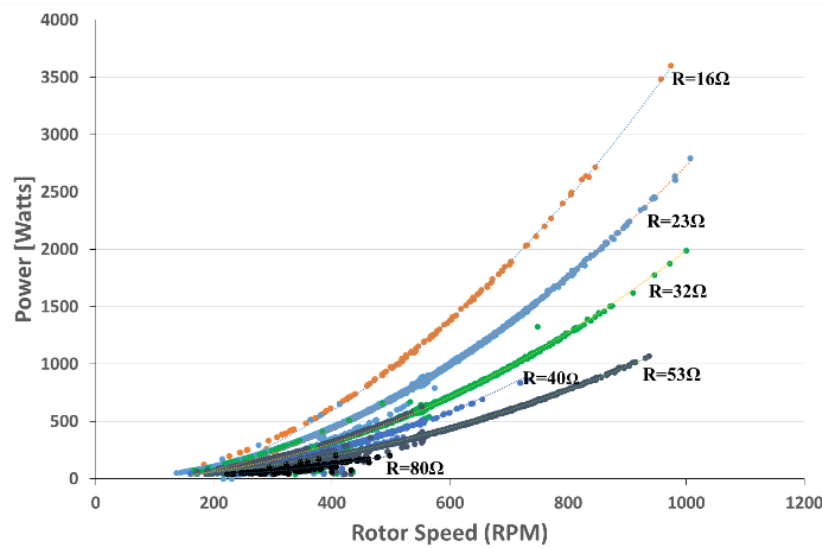


شکل ۱۱ - نمودار گلباد داده برداری محلی، براساس اندازه گیری های میدانی



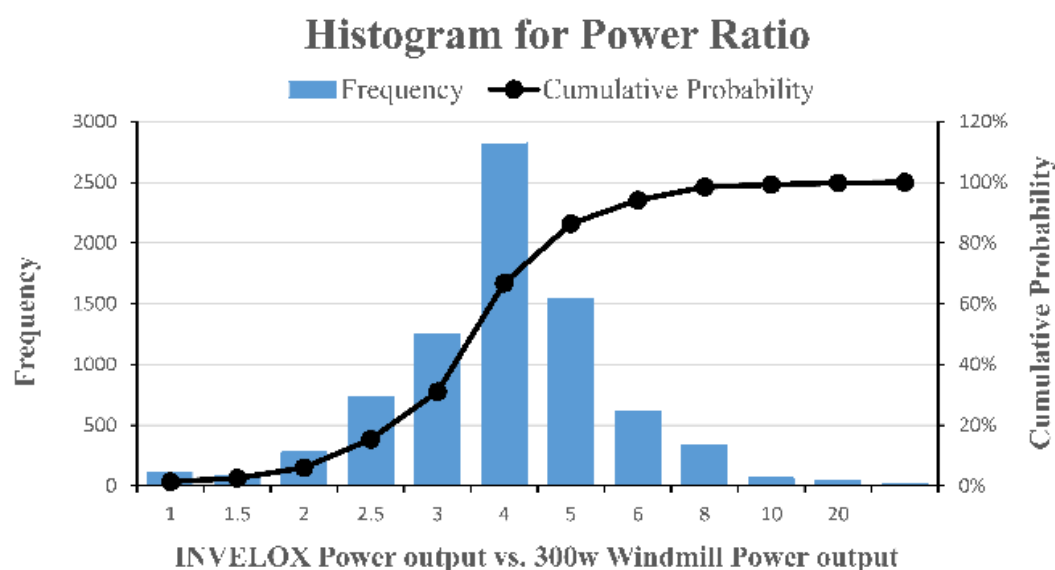
شکل ۱۲ - عملکرد توربین براساس زاویه وزش باد، براساس اندازه گیری های میدانی

بانک بار قرار داده شده در سیستم در ۶ حالت ۱۶ اهم، ۲۳ اهم، ۳۲ اهم، ۴۰ اهم، ۵۳ اهم و ۸۰ اهم قرار داده و توان توربین با این ۶ بار اعمالی به ترتیب به مقادیر ۲، ۳، ۴، ۵، ۷ و ۱۰ کیلو وات محدود شد. شکل (۱۳) برخی از نتایج داده برداری در حالت های مختلف را نشان میدهد. همانطور که از شکل (۱۳) بر می آید نتایج اندازه گیری های میدانی در توربین بادی اینولاکس، نسبت به توربین بادی معمول با قطر روتور یکسان، توان بالاتری را نشان می دهد و بیانگر آن است که عملکرد توربین در داخل محفظه بهبود یافته است. این نمودار می تواند به آسانی نشان دهد، همانطور که در نمونه های میدانی گذشته به اثبات رسیده [۷۰]، سیستم انتقال باد اینولاکس حتی با قرارگیری توربین در داخل کانال، سرعت باد را در داخل ونچوری افزایش داده و سبب شده تا پره مشابه تحت شرایط بادی همسان با سرعتی بیش از دو برابر به چرخش درآید. داده ها نشان می دهد در زمان اعمال بار ۱۶ اهم حداکثر توان ۳۶۰۰ وات ثبت گردیده که بیانگر ۱۲ بار توان استحصالی بیشتر است.

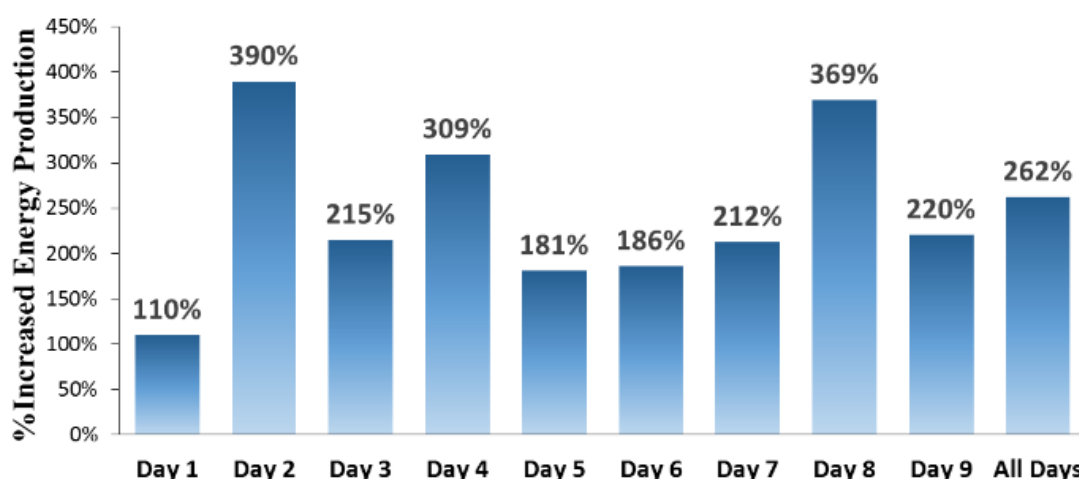


شکل ۱۳- نمودار توان خروجی توربین اینولاکس، براساس اندازه گیری های میدانی

همچنین مقایسه توان استحصال شده توسط دو توربین بادی مورد نظر نشان می‌دهد که استحصال توان توسط توربین بادی اینولاکس به طور متوسط 3-4 بار بیش از توربین بادی متداول مشابه توان بوده است. (شکل ۱۴)). از آنجا که با توجه به مفاهیم نظری، مقدار حداکثر K برابر ۲ می‌باشد، به نظر می‌رسد توربین اینولاکس مورد مطالعه با $S_r = 1.7$ قادر است حداکثر $2 \times 1.7^3 = 9.8$ برابر بیش از توربین متداول همسان، توان تولید کند. تفاوت بین نتایج نظری و مقدار $K = 1.05$ بدست آمده از داده برداری میدانی، به حساسیت مقدار K به پارامترهای طراحی توربین و پره مربوط است. این پارامترها شامل هندسه توربین، بازده داکت انتقال هوا و طراحی مناسب پره می‌باشند که تأثیر مستقیم بر روی فشار پشت سیستم، جدایش جریانهای لایه مرزی، رشد گردابه‌های درون سیستم و در نهایت استحصال انرژی باد دارند. در این میان آنچه به عنوان نقطه قوت توربین بادی اینولاکس بر شمرده می‌شود، ضریب ظرفیت بالا و در نتیجه استحصال انرژی بیشتر و قابلیت اطمینان مناسب این سیستم است. بدین منظور در دو سیستم مورد نظر مقادیر انرژی استحصالی در طول بازه داده- برداری شده در نمودار شکل (۱۵) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که توربین بادی اینولاکس با توانایی انتقال و افزایش سرعت باد قادر است حدود سه برابر توربین بادی متداول مشابه تحت شرایط بادی همسان انرژی تولید نماید. بسیاری از نتایجی که در این بررسی، محاسبات و اندازه گیری های میدانی توربین بادی اینولاکس بدست آمده تاییدی بر نتایج عملکرد حاصل از سایر توربین های بادی محفظه دار می‌باشد که قبلا در مطالعات و بررسی ها به اثبات رسیده است [۹ و ۱۰]. اما این توربین ها با مسایل حل نشده فنی و اقتصادی روبرو بوده اند که فناوری نوظهور اینولاکس آنها را مرتفع نموده است. توربین های محفظه دار با وجود مزایای عملکردی بسیار، نتوانسته اند به شکلی مناسب توسعه یابند چرا که چالش های بسیاری درباره چگونگی نصب، اجرا و هزینه در برابرشان بوده است. یکی از این مسایل فنی نصب و اجرای مکانیزمی بوده است که بتواند توربین بادی محفظه دار را چرخانده و در جهت حرکت باد قرار دهد. بعلاوه این توربین ها به مانند توربین های بادی متداول در ارتفاع زیاد نصب شده و پیچیدگی فنی و هزینه را افزایش داده بودند.



شکل ۱۴- نسبت توان تولیدی توربین اینولاکس به نمونه مشابه متداول براساس اندازه گیری های میدانی



شکل ۱۵- نمودار تولید انرژی توربین بادی اینولاکس براساس اندازه گیری های میدانی

در فناوری بادی اینولاکس نیاز به مکانیزم های خودکار برای چرخاندن توربین در جهت باد حذف شده است و ورودی چند جهته آن باد را از ۳۶۰ درجه جمع می نماید و به سوی توربین هدایت می کند. از طرفی توربین و همه بخش های متحرک اینولاکس بر روی زمین قرار گرفته اند که پروسه راه اندازی، تعمیرات و نگهداری را آسان می نماید.

۷- نتیجه گیری

مقاله حاضر قابلیت توربین بادی اینولاکس با ورودی چند جهته را برای جمع آوری و افزایش سرعت باد بیان نموده و نشان می دهد این سیستم از حساسیت کمی نسبت به جهت وزش باد برخوردار است.

در این مقاله همچنین به منظور بررسی اثر محفظه، مقایسه ای بین توربین بادی اینولاکس و توربین بادی متداول تحت شرایط مشابه انجام گرفته است. طراحی یک مقایسه مناسب معنی دار بین دو سیستم متفاوت روندی پیچیده و وابسته به انتخاب پارامترهای ورودی (متغیرهای مستقلی که دو سیستم را تحت تاثیر خود قرار می دهند)، انتخاب متغیرهای وابسته و قیود به عنوان معیار مشاهده و ارزیابی تابع موردنظر است. به شکل ایده ال می توان اینطور در نظر گرفت که در بازه زمانی موردنظر، تغییرات متغیر وابسته خروجی تنها متاثر از یک متغیر مستقل بوده است.

در مطالعه حاضر برای بررسی توان خروجی دو سیستم، قطر پره توربین مشابه و یکسان فرض شده در حالی که سرعت باد متغیر بوده است. چنین مقایسه ای بر اساس اندازه گیری های میدانی انجام شده نشان می دهد سیستم توربین بادی اینولاکس نسبت به سیستم توربین بادی متداول با طول پره مشابه و همسان به طور قابل توجهی انرژی بیشتری تولید می کند و لذا پتانسیل زیادی برای توسعه این محصول پیش بینی می گردد.

از آنجا که لازمه توسعه هر سیستم صنعتی و مهندسی مقیاس پذیری آن است، مقیاس پذیری توربین بادی اینولاکس نیز یکی از ملزومات رشد و توسعه این سیستم می باشد. مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده نشان داده است که اینولاکس، به عنوان یک سیستم انتقال باد، دبی جرمی جریان و سرعت هوا را به شکلی مقیاس پذیر افزایش می دهد. از طرف دیگر زیرمجموعه توربین - ژنراتور نیز به صورت جداگانه مقیاس پذیر بوده و از این لحاظ اثبات شده است. انتظار می رود اینولاکس در مقایسه با توربین های بادی متداول بطور موثرتری در سرعت های بسیار پائین تر باد، انرژی تولید نماید و بدین ترتیب به لحاظ جغرافیائی در گستره وسیعی از کشورمان کارایی مناسبی داشته باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بدینوسیله از حمایت ها و همراهی های نزدیک جناب پروفیسور داریوش اعلایی مخترع تکنولوژی اینولاکس و جناب آقای مسعود سه دهی، کارآفرین و صاحب امتیاز تکنولوژی در ایران، در روند انجام این تحقیقات نظری و میدانی، مراتب قدردانی و سپاسگذاری خود را ابراز می نمایند. همچنین این پروژه با پشتیبانی شرکت توسعه نیروگاه های بادی توان گستر رامان (وات ویند) انجام گرفته است.

مراجع

- [1] Lilley, G.M., and Rainbird, W.J., "A Preliminary Report on the Design and Performance of a Ducted Windmill", Report 102, College of Aeronautics, Cranfield U.K., (1956).
- [2] Oman, R.A., Foreman, K.M., and Gilbert, B.L., "A Progress Report on the Diffuser Augmented Wind Turbine", Proc. 3rd Biennial Conference and Workshop on Wind Energy Conversion Systems, Washington DC, USA, pp. 829-826, (1975)
- [3] Igra, O., "Shrouds for Aerogenerators", AIAA Journal, Vol. 14, No. 10, pp. 1481-1483, (1976).
- [4] Gilbert, B.L., Oman, R.A., and Foreman, K.M., "Fluid Dynamics of DAWT's", Journal of Energy, Vol. 2, pp. 368-374, (1978).

- [5] Van Bussel, G.J.W., "The Science of Making More Torque from Wind: Diffuser Experiments and Theory Revisited", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 75, No. 012010, pp. 1-12, (2007)
- [6] Allaei, D., and Andreopoulos, Y., "INVELOX: A New Concept in Wind Energy Harvesting", ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability & 11th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference ES-fuel Cell, July 14-19, Minneapolis, MN, USA, (2013).
- [7] Allaei, D., Tarnowski, D., and Andreopoulos, Y., "INVELOX with Multiple Wind Turbine Generator Systems", Energy Journal, Vol. 93, Part 1, pp. 1030–1040, (2015).
- [8] Al-Bahadly, I.H., and Petersen, A.F.T., "A Ducted Horizontal Wind Turbine for Efficient Generation", InTech, (2011).
- [9] Abu-El-Yazied, T.G., Ali, A.M., Makady, A.M., and Hassan, I.M., "Optimizing the Duct Shape and Location for Improving Performance of Darrieus Wind Turbine", International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 1-8, (2015).
- [10] Shives, M., and Crawford, C., "Computational Analysis of Ducted Turbine Performance", Third International Conference on Ocean Energy, October 6, Bilbao, Spain, (2010).

فهرست نمادهای انگلیسی

- A : مساحت بر حسب متر مربع
 T : نیروی تراست بر حسب نیوتن
 Q_T : گشتاور بر حسب نیوتن متر
 \dot{m} : دبی جرمی
 \dot{Q} : دبی حجمی
 U : سرعت سیال بر حسب متر بر ثانیه
 p : فشار بر حسب پاسکال
 P : توان بر حسب وات
 e : آنتالپی
 C_p : ضریب توان
 K : ضریب فشار
 S_R : نسبت سرعت

نمادهای یونانی

- ρ : چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب
 η : بازده

Abstract

INVELOX wind turbine is a new concept in harnessing wind energy. This technology gathers wind by omnidirectional or unidirectional intakes and increases wind velocity by concentrating wind in the venturi section. Then return it back to the environment through the diffuser. INVELOX technology offers suitable financial indicators and solves windmills environmental issues, like noise. Therefore, INVELOX becomes an opponent of fossil fuels. This technology uses 84% smaller blade compare to windmills, so it overcomes installation difficulties and it is an economically feasible system in wind energy industries.

In this paper, CFD simulations are used to evaluate the speed ratio of 1.7 of the system and field data of a small scale INVELOX, installed in Siahpoush, Manjil was reported. In order to evaluate duct effects on the turbine performance, INVELOX turbine was compared to the traditional wind turbine with the same blade diameter. So output power and energy were recorded for both turbines. This study shows INVELOX has the ability to harness, deliver and accelerate free wind and produces more power and energy with a higher performance.