



Aerodynamics and surface roughness study on Invelox wind turbine

Mahdi Montazeri Saniji, Sahar Noori*

Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Today, many efforts have been done to extract power from wind energy and increase the efficiency of wind turbines. The energy extraction started with blade rotation in wind turbines. Ducted wind turbines are turbines in which the airflow is directed towards the turbine blades using a built-in duct. The Invelox wind turbine is one of the ducted wind turbines, which directs the airflow towards the throat of the duct where the turbine is. In this research, an experimental study has been conducted on the Invelox wind turbine to improve the performance and efficiency of the turbine's duct. Also, to check the performance of the Invelox wind turbine's duct, the effect of placing a surface roughness in the inlet of the duct has been investigated for flow control. According to this research, adding a suitable roughness in invelox leads to a 7% increase in the local velocity at the throat of the invelox wind turbine. This leads to an increase in the efficiency of the invelox duct and increases the rate of energy extraction from the turbine.

Review History:

Received: Oct. 26, 2024

Revised: Jan. 15, 2025

Accepted: Jan. 17, 2025

Available Online: Jan. 23, 2025

Keywords:

Wind Turbine

Invelox

Wind Tunnel

Energy

Surface Roughness

1- Introduction

Today, electrical energy has become an integral part of people's lives. After solar energy, wind is the most important renewable energy. With wind turbines, wind energy can be converted into electrical energy. The Invelox wind turbine is a new type of ducted wind turbine that concentrates the airflow inside and increases speed. The benefit of Invelox wind turbine is its omnidirectional inlet, which regardless of the direction of the airflow, has the required efficiency for energy extraction. Allaei [1] introduced the concept of the Invelox ducted wind turbine in 2013. The name Invelox is a combination of the words "increase" and "velocity". Inspired by the design of wind deflectors in Yazd, this turbine has a funnel-shaped axi-symmetric inlet duct which is not dependent on the wind direction. After the air enters from the inlet funnel while increasing the speed, airflow is directed to the nozzle-diffuser. The turbines are situated within the nozzle-diffuser, where the kinetic energy of the airflow is converted into mechanical energy. In continuation of his research [2] in 2015, Allaei investigated the effect of installing several generators instead of one generator. In this research, he concluded that by placing two or three generators in the throat of the turbine, more energy can be received from the duct. Anbarsoz et al. [3], in 2018, investigated the aerodynamic impact of installing curtain plates in the

turbine inlet to enhance turbine performance and prevent airflow leakage from the opposite side of the duct. In order to increase the flow rate of the inlet air by preventing air leakage from other inlets, grid-shaped plates are used. According to the results obtained in this research, an average of about 25% increase in speed is achieved due to the placement of the curtains. Noori et al. [4], in 2021, investigated an Invelox wind turbine experimentally. In this research, the local velocity increase in the throat of the Invelox wind turbine duct has been observed and investigated.

To evaluate the aerodynamic performance of the turbine, this research focused on comparing velocity measurements at the throat and exit of the duct. Then, the effect of surface roughness at the inlet of the invelox duct has been investigated by placing a roughness at the inlet of the duct to increase the amount of disturbances and increase the efficiency of the duct.

2- Experimental Methodology

The dimensions of the geometry can be seen in the figure 1. The geometry includes an upper funnel, lower funnel, guide vanes, and nozzle diffuser.

The effect of surface roughness at the inlet on the performance of the wind turbine has also been studied experimentally. To change the surface roughness, three

*Corresponding author's email: s_noori@aut.ac.ir



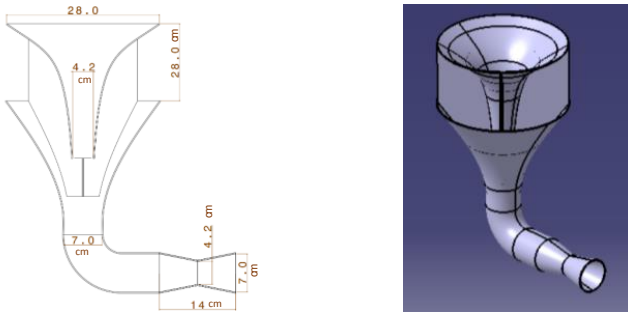


Fig. 1. Invelox duct dimensions in this research

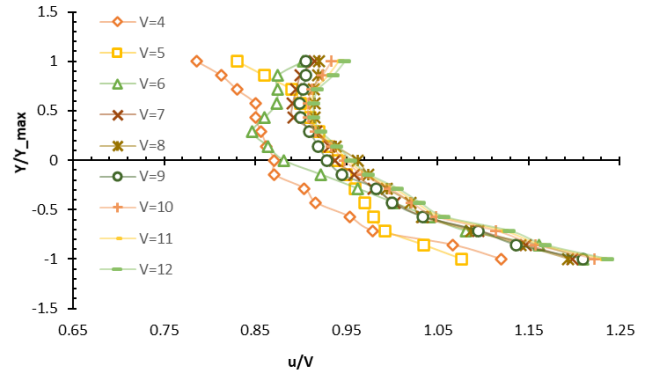


Fig. 3. Velocity profile from 4 m/s to 12 m/s



Fig. 2. Place of surface roughness at the inlet

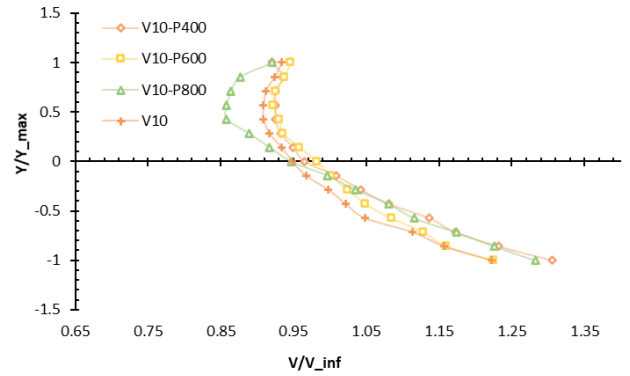


Fig. 4. Effect of roughness on velocity profile at 10 m/s

sandpapers with different roughness were used (P400, P600, and P800), where P400 sandpaper is the roughest and P800 is the softest sandpaper. In Figure 2, the location of the surface roughness can be seen (marked parts).

3- Results and Discussion

In this section, at first, the results related to the effect of velocity on the throat velocity are examined. Then, the effect of roughness is determined by installing sandpaper with different roughness, and finally, using the relationships related to the turbulence intensity values are calculated. These values are analyzed in the desired location in the presence and absence of surface roughness.

According to the extracted results, the rate of increase in speed in the invelox duct are investigated and the dimensionless speed profile converges over time and approaches a constant value. In this place, the turbine is placed to extract energy (figure 3).

With the increase of the surface roughness, the velocity profile in the throat and the exit opening keeps its form and shifting along the +x direction. The velocity values increase according to the increase of the surface roughness (figure 4).

Increasing the velocity and roughness of the surface affects the intensity of disturbances; But the turbulence intensity profile is the same, this increase in roughness does not have

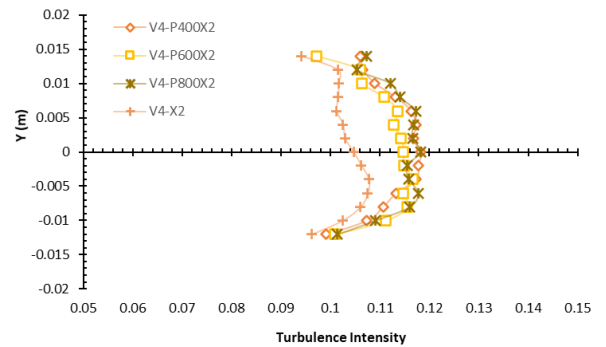


Fig. 5. Effect of roughness on turbulence intensity at 4 m/s

much effect on the turbulence intensity and the flow is still turbulent. The stability of the turbulence intensity profile at different points of the throat represents the deviation of the velocity vector from the uniform flow (figure 5).

4- Conclusion

In the aerodynamic study of the Invelox wind turbine, increasing the surface roughness at the inlet of the turbine leads to an increase in the velocity inside the duct. However, a sufficient degree of surface roughness is required to achieve a notable velocity increment. In this study, the addition of roughness has led to a 7% increase in the maximum velocity at the throat with appropriate roughness. To further improve the Invelox duct, alternative methods can be explored. For example, increasing the input mass flow rate to the duct by changing the geometry of the inlet is one of the ways to increase the performance of the Invelox wind turbine.

References

- [1] D. Allaei, Y. Andreopoulos, INVELOX: Description of a new concept in wind power and its performance evaluation, *Energy*, 69 (2014) 336-344.
- [2] D. Allaei, D. Tarnowski, Y. Andreopoulos, INVELOX with multiple wind turbine generator systems, *Energy*, 93 (2015) 1030-1040.
- [3] M. Anbarsooz, M. Amiri, I. Rashidi, A novel curtain design to enhance the aerodynamic performance of Invelox: A steady-RANS numerical simulation, *Energy*, 168 (2019) 207-221.
- [4] S. Noori, G. Asgari, Building INVELOX wind turbine model and study on peculiarities of flow in that experimentally, Amirkabir University of Technology, 2021. (in Persian)



مطالعه آیرودینامیک و بررسی اثر زبری سطح بر عملکرد توربین باد اینولاکس

مهدی منتظری سانجی، سحر نوری*

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴

کلمات کلیدی:

توربین باد
اینولاکس
تونل باد
انرژی
زبری سطح

خلاصه: در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی انجام شده است. توربین‌های بادی از چرخش پره‌ها و جریان هوا برای تولید برق استفاده می‌کنند. توربین‌های محفظه‌دار، با هدایت جریان هوا از طریق محفظه‌ای خاص به سمت پره‌ها، بازدهی بالاتری نسبت به توربین‌های متداول دارند. توربین باد اینولاکس یکی از این نوع توربین‌هاست که با یک سیستم ورودی دایره‌ای، جریان هوا را به گلوگاه محفظه هدایت می‌کند و انرژی را کارآمدتر استخراج می‌کند. این پژوهش بر عملکرد توربین اینولاکس با هدف بهبود بازدهی آن متمرکز شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد افزودن زبری مناسب به دهانه ورودی محفظه باعث افزایش سرعت جریان هوا می‌شود. نتایج نشان دادند که محفظه اینولاکس با ورودی ۳۶۰ درجه، سرعت جریان را تا ۳۳/۶ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، افزودن زبری در ورودی، منجر به افزایش ۷ درصدی سرعت موضعی در گلوگاه و ۳/۶ درصدی سرعت میانگین مقطع محفظه شده است. این افزایش سرعت، عملکرد توربین و بهره‌وری استخراج انرژی را بهبود می‌بخشد.

۱- مقدمه

محفظه‌دار اینولاکس توسط اعلائی [۱] مطرح شد. نام اینولاکس از دو کلمه "افزایش" و "سرعت" منتج شده است. این توربین با الهام‌گرفتن از طراحی بادگیرهای شهر یزد دارای محفظه ورودی متقارن محوری قیفی شکل است که سبب شده تا توربین خاصیت ۳۶۰ درجه داشته باشد و وابسته به جهت باد نباشد. بعد از ورود هوا از قیف ورودی ضمن افزایش سرعت، سیال توسط یک زانوپی به سمت نازل همگرا واگرا هدایت می‌شود. در گلوگاه نازل همگرا واگرا ژنراتورها قرار گرفته و فرایند تولید برق صورت می‌گیرد.

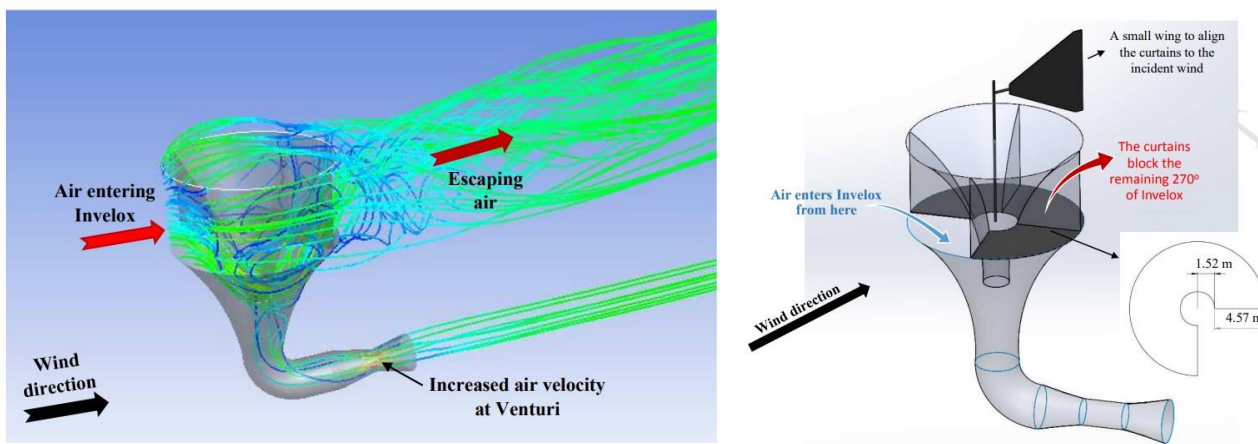
اعلائی در ادامه تحقیقات خود [۲] در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر قراردادن چند ژنراتور بجای یک ژنراتور پرداخت. او در این تحقیق به این نتیجه رسید که با قراردادن دو یا سه ژنراتور در گلوگاه توربین می‌توان مجموعاً انرژی بیشتری را از سیستم دریافت کند.

در سال ۲۰۱۷، سولانکی و همکاران [۳] با ایجاد تغییراتی در نازل همگرا - واگرا، سعی بر دریافت توان بیشتر از ژنراتور دوم و سوم را داشتند. در این تحقیق با کاهش قطر لوله در طول نازل، توان دریافتی از ژنراتور دوم و سوم افزایش قابل توجهی می‌یابد. انبارسوز و همکاران [۴] در مطالعات

امروزه انرژی الکتریکی تبدیل به عضو جدایی‌ناپذیر در زندگی افراد شده است. به دلیل رشد روزافزون جمعیت در جهان و افزایش تقاضا برای استفاده از این انرژی، تولید آن افزایش یافته تا جوابگوی نیازهای بشر امروز باشد. یکی از انواع این انرژی، انرژی باد است. با استفاده از توربین می‌توان انرژی باد به انرژی الکتریکی تبدیل و به جهت برقرسانی از آن استفاده کرد. در توربین‌های بادی برخورد جریان هوا با پره‌های توربین باعث چرخش پره‌های توربین شده و این چرخش با استفاده از محور توربین به ژنراتور برای تولید انرژی الکتریکی منتقل می‌شود. توربین باد اینولاکس نوع جدیدی از توربین‌های بادی محفظه‌دار است که جریان هوا را در داخل خود متمرکز کرده و سرعت آن را افزایش می‌دهد. توربین باد اینولاکس جزء دسته توربین‌های چند جهته است که فارغ از جهت جریان هوا، بازدهی لازم برای افزایش سرعت جریان هوا را داراست. بعلاوه این توربین بازدهی مناسبی در برابر جریان با سرعت‌های کم نیز دارد. در سال ۲۰۱۳ مفهوم توربین باد

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s_noori@aut.ac.ir





شکل ۱. مکانیزم قرارگیری صفحه توری جهت کاهش نشتی هوا و مدل سازی عددی نشتی هوا در جهت مخالف محفظه اینولاکس [۴]

Fig. 1. Mechanism curtain plates to reduce air leakage and numerical modeling of air leakage in front of free stream direction of the Invelox duct [4]

اثر آیرودینامیکی و آیرودینامیکی توربین تک طبقه در ارتفاعات مختلف به صورت عددی و تجربی پرداختند. در این تحقیقات با افزایش ارتفاع از ۱۰ متر تا ۴۰ متر، توان توربین ۸۷/۵٪ و صدای توربین نزدیک به ۳۹/۳٪ افزایش می یابد. دیگر روش مورد استفاده در این تحقیق، استفاده از توربین دوطبقه است. طبق داده های به دست آمده در این تحقیق، حدود ۴۴٪ افزایش توان نسبت به توربین تک طبقه حاصل می شود.

نوری و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۱، نمونه ای از توربین باد اینولاکس طراحی و مختصات جریان در محفظه به روش تجربی در این محفظه بررسی شده است. در این پژوهش افزایش سرعت موضعی در گلوگاه محفظه توربین باد اینولاکس مشاهده و بررسی شده است.

در این پژوهش، اثر آیرودینامیکی توربین به منظور مقایسه افزایش توان با مقایسه مقادیر سرعت در داخل توربین و در قسمت گلوگاه بررسی شده است. نقطه عطف این تحقیق، بررسی اثر زبری سطح بر دهانه ورودی محفظه اینولاکس است. با قراردادن زبری در دهانه ورودی محفظه به جهت افزایش میزان اغتشاشات و کاهش افت ناشی از نشتی جریان، افزایش دبی و به تبع آن افزایش سرعت هنگام مواجهه با توربین در گلوگاه محفظه را به همراه دارد. افزایش سرعت در گلوگاه باعث افزایش انرژی استخراج شده و افزایش بازدهی توربین می شود.

خود در سال ۲۰۱۸، اثر آیرودینامیکی حضور توری در ورودی توربین برای افزایش عملکرد توربین و جلوگیری از خروج درصدی از هوای ورودی به توربین به صورت عددی بررسی شده است. زمانی که باد در یک جهت به توربین می وزد، درصدی از هوای ورودی به توربین از دیگر ورودی ها در جهات دیگر خارج می شود. در جهت افزایش دبی هوای ورودی با جلوگیری از نشتی هوا از دیگر ورودی ها، از صفحات توری شکل استفاده می شود. طبق نتایج به دست آمده در این تحقیق به طور میانگین حدود ۲۵٪ افزایش سرعت به علت قراردادن توری حاصل می شود. مکانیزم قرارگیری صفحه توربین در شکل ۱ نمایش داده شده است.

ویوو و همکاران [۵] در همان سال به بررسی اثر ایجاد تغییرات در ابعاد و فاصله ها در قیف ورودی و گلوگاه نازل پرداختند. در این تحقیق حل عددی اینولاکس با ابعاد و نسبت های مختلف ارائه شده و از بین ابعاد ارائه شده، بهترین ابعاد برای فاصله قیف ورودی و قطر گلوگاه ارائه شده است.

همچنین اثر قراردادن ورودی های متفاوت در ابتدای توربین اینولاکس روی مقادیر سرعت و فشار خروجی از توربین به صورت عددی توسط گوهر و همکاران [۶] بررسی شده است. با اعمال این تغییرات سرعت هوای خروجی از توربین بیش از ۴ برابر افزایش یافته و مقدار فشار نیز کاهش چشمگیری پیدا می کند.

ستوده و همکاران [۷] در تحقیقات خود در سال ۲۰۱۹ به بررسی

۲- معادلات حاکم بر جریان

به دلیل اینکه فیزیک جریان در توربین باد اینولاکس با توربین‌های بادی متداول متفاوت است، معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم به فرم انتگرالی برای حجم کنترل در یک میدان جریان پایا غیرلزج، تراکم‌ناپذیر و متقارن محوری استفاده شده است. این معادلات به فرم روابط (۱) الی (۴) هستند [۲].

$$\oint \rho V \, dA = 0 \quad (۱)$$

$$\oint u_z \rho V \, dA = T - \oint p dA e_z \quad (۲)$$

$$\oint r u_\theta \rho V \, dA = Q_T \quad (۳)$$

$$\oint [p / \rho + \frac{1}{2} \|V\|^2] V \, dA = P \quad (۴)$$

که در آن V بردار سرعت در دستگاه مختصات استوانه‌ای، r شعاع، ρ چگالی هوا، A مساحت خروجی، e_z بردار یکه در راستای z فشار، T نیرو در راستای محور، Q_T گشتاور و P توان خروجی توربین است. رابطه انتالپی برای جریان هوای عبوری به فرم رابطه (۵) است.

$$e = \left[\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \|V\|^2 \right] = P_0 / \rho \quad (۵)$$

که در آن P_0 معادل فشار کل است؛ بنابراین داریم:

$$P_0 = p + \frac{1}{2} \rho \|V\|^2 \quad (۶)$$

بنابراین، جریان هوا علاوه بر انرژی جنبشی انرژی پتانسیل نیز در خود ذخیره می‌کند. این انرژی تا قبل از برخورد جریان هوا با توربین به

دلیل اتلاف ویسکوز اندک، قابل‌صرف نظر است. از طرفی جریان هوا در داخل محفظه توربین مانند جریان در داخل یک نازل - دیفیوزر است که توربین در گلوگاه آن قرار می‌گیرد. مساحت در مقطع گلوگاه به فرم $A^* = A_1 - A_T$ است که در آن A_T مساحت مقطع پره‌های توربین و A_1 مساحت گلوگاه توربین است. بدین ترتیب توان خروجی از مقطع در رابطه (۷) درج شده است.

$$P = \oint_A [P_0 / \rho] V \, dA \quad (۷)$$

میانگین مقدار P_0 / ρ در سطح مقطع A_1 (قبل از توربین) را می‌توان به فرم رابطه (۸) بازنویسی کرد که در آن \dot{m} دبی جرمی جریان هوا در داخل محفظه اینولاکس است.

$$\left[\frac{P_0}{\rho} \right]_{(A_1)} = \frac{1}{\dot{m}} \oint_A [P_0 / \rho] V \, dA \quad (۸)$$

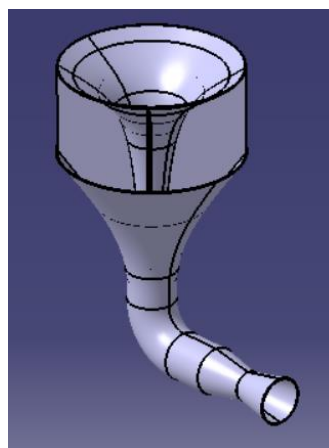
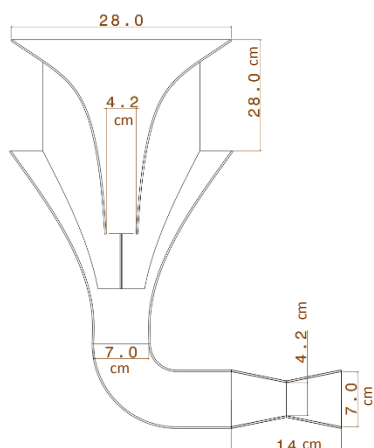
به همین ترتیب رابطه توان خروجی توربین در رابطه (۹) قابل مشاهده است.

$$P = ([P_0 / \rho]_1 - [P_0 / \rho]_2) \dot{m} \quad (۹)$$

رابطه تقریبی توان توربین به فرم $P = \eta \dot{Q} \Delta P_0$ است که در آن \dot{Q} دبی حجمی هوای محبوس، ΔP_0 اختلاف فشار کل در قبل و بعد توربین و η بازده توربین است. با جاگذاری رابطه فوق به فرم رابطه (۱۰) بازنویسی می‌شود.

$$P = \eta \dot{Q} \left[(P_{am} - P_e) + \frac{1}{2} \rho U_0^2 - \frac{1}{2} \rho U_e^2 \right] \quad (۱۰)$$

از رابطه فوق نتیجه گرفته می‌شود که توان استخراج شده از توربین شامل توان ناشی از انرژی جنبشی (عبارت $\frac{1}{2} \rho U_0^2 - \frac{1}{2} \rho U_e^2$) که برای رسیدن به مقدار حداکثر باید سطح خروجی محفظه اینولاکس به بیشترین مقدار خود برسد تا انرژی جنبشی خروجی توربین به حداقل خود برسد. برای رسیدن به حداکثر توان ناشی از انرژی پتانسیل (عبارت $P_{am} - P_e$) باید



شکل ۲. ابعاد و مشخصات محفظه اینولاکس

Fig. 2. Dimensions and specifications of the Invelox duct

۳- شرایط آزمایش و روش‌های اندازه‌گیری

در شکل ۲ ابعاد هندسه قابل‌مشاهده است. هندسه شامل قیف بالا، قیف پایین، پره هدایت‌کننده جریان، زانویی و نازل-دیفیوزر است. در پژوهش حاضر، علاوه بر بررسی تجربی اثر سرعت بر عملکرد محفظه اینولاکس به بررسی تجربی اثر زبری سطح در دهانه ورودی بر عملکرد توربین بادی نیز پرداخته شده است. برای تغییر در زبری سطح از سه سنبله با زبری متفاوت استفاده شده است (سنبله ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰) که در آن سنبله ۴۰۰ زبرترین و ۸۰۰ نرم‌ترین سنبله مورداستفاده است. در شکل ۳ محل قرارگیری زبری سطح قابل‌مشاهده است (قسمت‌های مشخص شده). تمامی آزمایش‌ها تونل باد در تونل باد مدار باز مادون صوت دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه امیرکبیر انجام خواهند شد. همان‌طور که اشاره گردید، این تونل باد از نوع مدار باز مکشی با ابعاد اتاق آزمون ۱۸۰×۱۰۰×۱۰۰ سانتیمتر است که کنترل سرعت آن توسط تغییر دور موتور جریان مستقیم ساخت شرکت کورفمن^۱ و توسط کنترل پنل متصل به اینورتر صورت می‌گیرد. موتور تونل باد دارای توان ۱۳۲ کیلووات و قطر ۱/۶ متر بوده و از ۸ پره متحرک و ۹ پره ثابت بهره می‌برد. حداکثر دور موتور مذکور ۱۷۰۰ دور بر دقیقه و حداکثر دبی حجمی آن حدود ۵۴ مترمکعب بر ثانیه است. میزان افزایش فشار توسط این موتور در حدود ۶۵۰

فشار در دهانه خروجی محفظه اینولاکس با فشار هوای بیرون از محفظه برابر باشد. در انتهای محفظه توربین ($U_e = U_b$ و $P_e = P_b$) توان خروجی طبق رابطه (۱۱) برابر است با:

$$P = \eta \dot{Q} [(P_{atm} - P_b) + \frac{1}{2} \rho U_0^2 - \frac{1}{2} \rho U_b^2] \quad (11)$$

در صورتی که چند توربین در داخل گلوگاه قرار گرفته باشد، رابطه توان به صورت رابطه (۱۲) تغییر می‌کند:

$$\begin{aligned} P_1 &= \eta ([P_0 / \rho]_1 - [P_0 / \rho]_2) \dot{m} \\ P_2 &= \eta ([P_0 / \rho]_2 - [P_0 / \rho]_3) \dot{m} \\ P_3 &= \eta ([P_0 / \rho]_3 - [P_0 / \rho]_4) \dot{m} \end{aligned} \quad (12)$$

در صورتی که بازده توربین‌ها یکسان باشد، رابطه (۱۲) به صورت رابطه (۱۳) بازنویسی می‌شود:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = P_1 = \eta ([P_0 / \rho]_1 - [P_0 / \rho]_4) \dot{m} \quad (13)$$

1 Korfmann

مدل کف و سقف تونل دارای پنجره‌های پلکسی گلس به ابعاد 97×34 سانتیمتر بوده و در طرفین پنجره‌های پلکسی گلس باز شو امکان دسترسی به مدل را فراهم می‌نمایند.

برای جابه‌جایی سنسورهای سیم داغ در طول و عرض نمونه‌های تحت آزمایش از دستگاهی با عنوان تراورس استفاده خواهد شد. دستگاه موجود در سه جهت X, Y, Z قابلیت جابه‌جایی با دقت ۱ میلی‌متر را داراست که توسط نرم‌افزاری مخصوص کنترل می‌شود. در شکل ۶ تصاویری از این دستگاه خارج از تونل باد و داخل آن قابل مشاهده است.

در ابتدا موقعیت محور خروجی محفظه مشخص شده و با استفاده از تراورس جریان سنج سیم داغ در راستای محور خروجی قرار می‌گیرد. سپس با توجه به مقطع مورد بررسی، ابعاد حرکت تراورس مشخص می‌شود. در ادامه تونل باد روشن شده و با استفاده از کیمو^۱ سرعت جریان آزاد روی سرعت مدنظر تنظیم می‌شود. سپس با استفاده از مکانیزم تراورس سنسور هات‌وایر در پایین‌ترین قسمت در هر مقطع قرار گرفته و شروع به داده‌برداری می‌کند. داده‌ها به صورت مقادیر ولتاژ توسط کامپیوتر ذخیره می‌شود. دامنه زمانی در هر نقطه در هر سرعت ۱۰ ثانیه است. پس از داده‌برداری از تمام نقاط موردنیاز در هر مقطع، سرعت تونل باد تغییر کرده و داده‌برداری در سرعت جدید آغاز می‌شود. در نهایت زمانی که داده‌برداری در تمامی سرعت‌ها در یک مقطع به اتمام رسید، سنسور جابه‌جا شده و همین فرآیند برای مقطع بعدی نیز صورت می‌گیرد. بعد از اتمام داده‌برداری، داده‌ها توسط نرم‌افزار مربوطه خروجی گرفته شده و آماده استخراج داده‌های موردنیاز است.

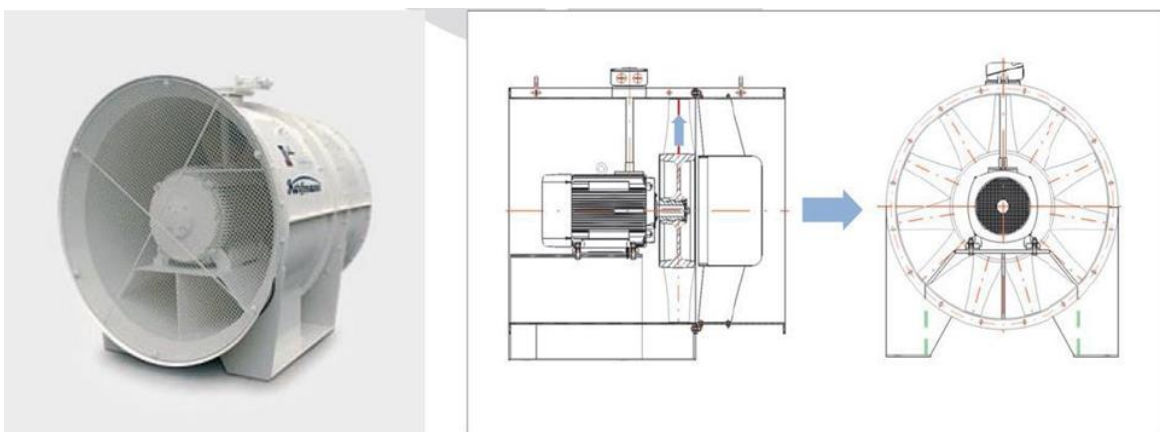


شکل ۳. محل قرارگیری زبری سطح در دهانه ورودی اینولاکس

Fig. 3. Location of surface roughness at the Invelox inlet

تا ۲۴۵۰ پاسکال است. تصویری از مجموعه فن بدون کاهنده صدا و دیفیوزر دوم در شکل ۴ قابل مشاهده است. قابل ذکر است نسبت واگرایی دیفیوزر اول تونل ۱.۲۵ درجه بوده و زاویه واگرایی آن نیز $3/5$ درجه با طول $3/5$ متر است. همچنین زاویه واگرایی دیفیوزر دوم ۲۰ درجه است. سطح اغتشاشات تونل نیز به ترتیب برابر با $0/27\%$ و $0/24\%$ در سرعت‌های ۱۵ و ۳۵ متر بر ثانیه است.

اتاق آزمون تونل، همان‌طور که ذکر گردید، دارای ابعاد $180 \times 100 \times 100$ سانتیمتر است که زاویه واگرایی $0/5$ درجه جهت جریان رشد لایه مرزی به کف و سقف اتاق آزمون اعمال گردیده است. جهت دسترسی اپتیکال به



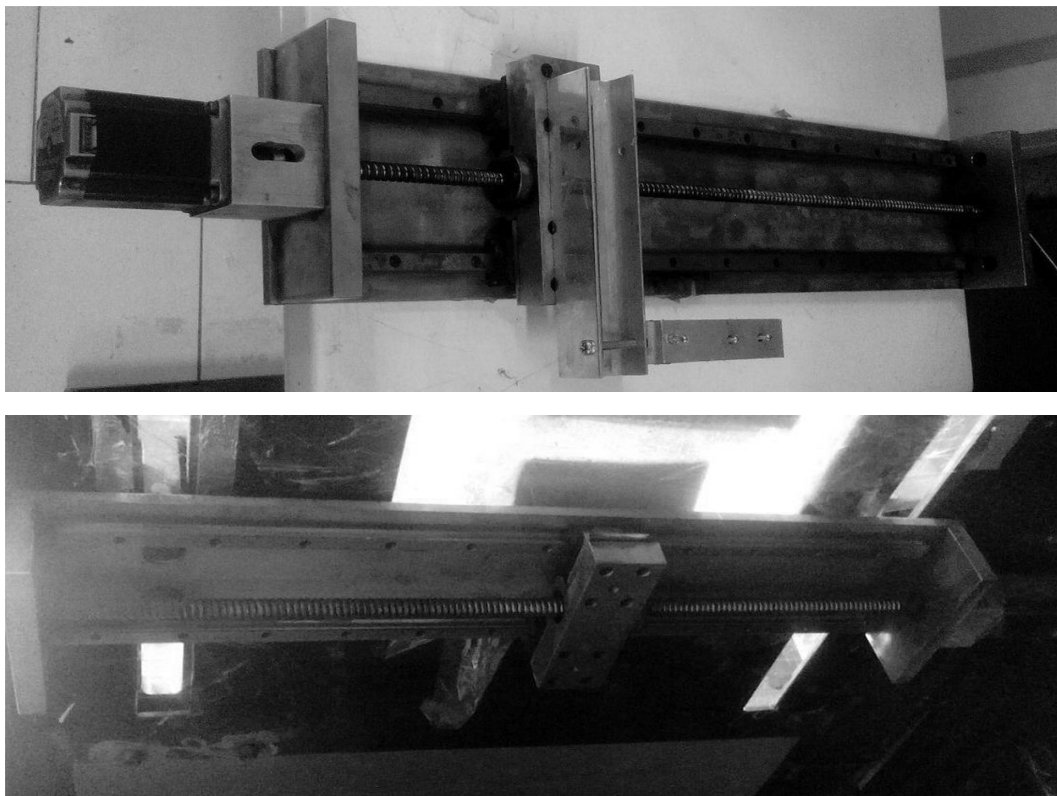
شکل ۴. مجموعه فن تونل مدار باز

Fig. 4. Open-circuit fan tunnel assembly



شکل ۴. تونل باد مدار باز در آزمایشگاه دانا

Fig. 4. Open-circuit wind tunnel in Dana Laboratory



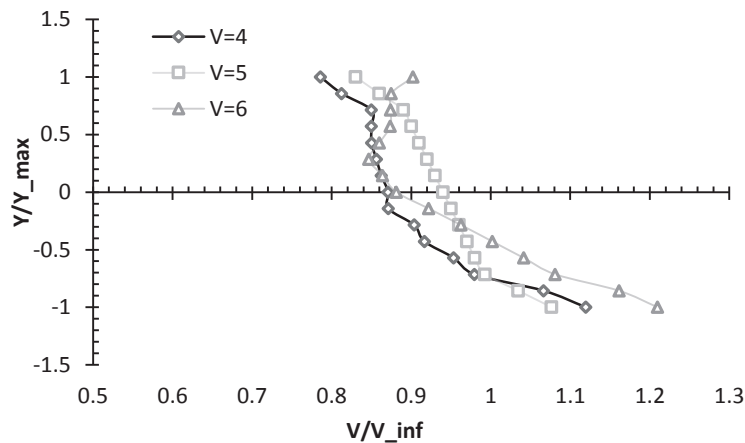
شکل ۶. قسمت جداشونده (عکس بالا) و قسمت ثابت در داخل تونل باد (عکس پایین)

Fig. 6. Detachable section (top image) and fixed section inside the wind tunnel (bottom image)



شکل ۷. قرارگیری محفظه اینولاکس در تونل باد

Fig. 7. Placement of the Invelox duct in the wind tunnel



شکل ۸. نمودار سرعت در دهانه خروجی اینولاکس در سرعت ۴ الی ۶ متر بر ثانیه

Fig. 8. Velocity profile at the Invelox outlet at free-stream velocity of 4 to 6 m/s

حداکثر ارتفاع بی بعد شده است. مقادیر به صورت نمودار شامل سه سرعت در هر مختصات ارائه شده است. در این قسمت مقادیر سرعت از مقدار جریان آزاد بیشتر است. همان طور که از نمودار قابل مشاهده است، در سرعت های کم میان مقادیر سرعت بی بعد اختلاف وجود دارد و بعد از گذر از سرعت ۶ متر بر ثانیه، اختلاف بین مقادیر سرعت بی بعد قابل صرف نظر شده و عملکرد محفظه پایدار می شود. بعد از همگرایی پروفیل سرعت حداکثر سرعت در گلوگاه محفظه حدود ۲۳/۶ درصد از سرعت جریان آزاد بیشتر است.

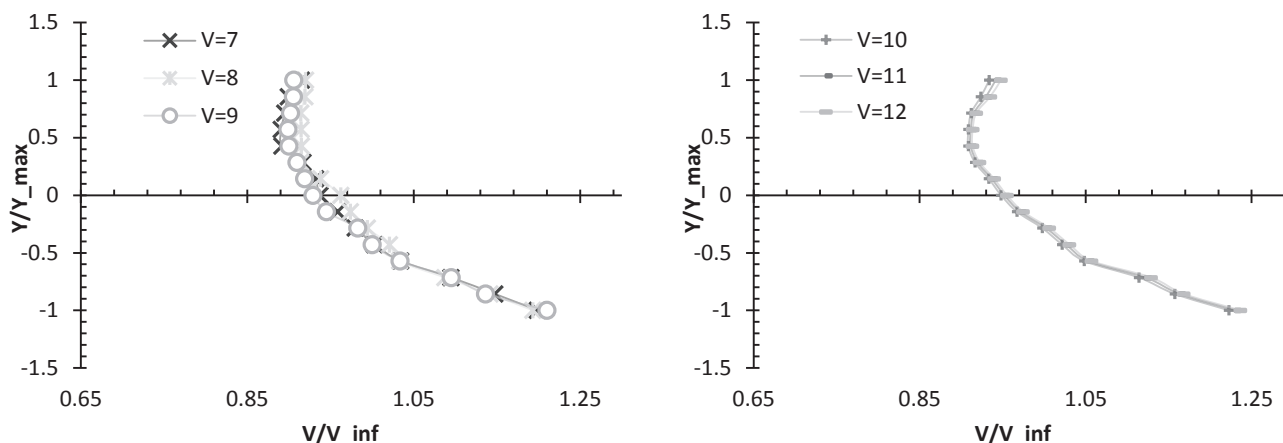
همان طور که در شکل ۹ قابل مشاهده است هر سه پروفیل سرعت بی بعد شده بر یکدیگر منطبق شده و عملکرد محفظه در این شرایط به

۴- نتایج تست تجربی

در این بخش در ابتدا نتایج مربوط به اثر افزایش سرعت بر سرعت در محل گلوگاه بررسی می شود. سپس اثر زبری با نصب سنباده با زبری مختلف قرار گرفته و در نهایت با استفاده از روابط مربوط به شدت اغتشاشات، این مقادیر در محل مورد نظر در شرایط حضور و عدم حضور زبری سطح ارائه و تحلیل می شود.

۴-۱- اثر سرعت

در این بخش اثر افزایش سرعت ورودی بر سرعت در گلوگاه محفظه بررسی می شود. مقادیر سرعت و موقعیت بر اساس سرعت جریان آزاد و



شکل ۹. نمودار سرعت در دهانه خروجی اینولاکس در سرعت ۷ الی ۱۲ متر بر ثانیه

Fig. 9. Velocity profile at the Invelox outlet at free-stream velocity of 7 to 12 m/s

قسمت‌های پروفیل سرعت یکسان نیست. با این حال با قراردادن زبری در دهانه ورودی محفظه اینولاکس، سرعت در برخی نقاط به دلیل وجود زبری کاهش یافته ولی به صورت کلی این افزایش زبری منجر به افزایش حداکثر سرعت در گلوگاه محفظه نسبت به شرایط بدون زبری سطح شده است.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، با افزایش سرعت جریان آزاد پروفیل سرعت در راستای محور افقی جابه‌جا شده و مقادیر بیشتری را نمایش می‌دهد. قرارگیری زبری در دهانه ورودی محفظه نیز باعث ایجاد رفتار مشابهی در مقیاس کمتر در پروفیل سرعت بی‌بعد می‌شود. این جابه‌جایی پروفیل در شکل ۱۱ نیز قابل مشاهده است.

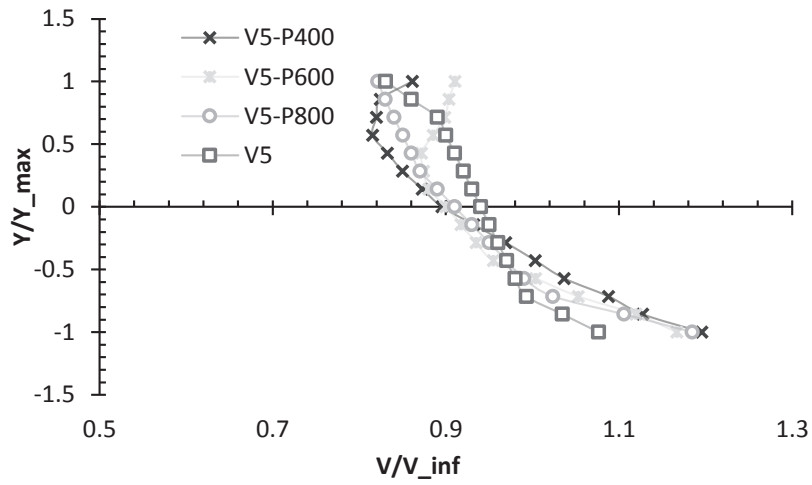
افزون بر موارد پیشین، با مقایسه میانگین سرعت بی‌بعد در هر پروفیل سرعت می‌توان اثر زبری سطح بر سرعت در گلوگاه محفظه را مشاهده کرد. با توجه به اینکه داده‌ها در فواصل یکسان از یکدیگر قرار دارد، میانگین سرعت را می‌توان با میانگین سرعت این نقاط به دست آورد. همان‌طور که در جدول ۱ قابل مشاهده است، مقادیر سرعت در مقطع گلوگاه محفظه اینولاکس در سرعت جریان آزاد ۱۰ متر بر ثانیه در سه حالت با زبری سطح مختلف و یک حالت بدون در نظر گرفتن زبری سطح قرار گرفته است. با افزایش زبری سطح در ورودی محفظه میانگین سرعت در مقطع گلوگاه نیز افزایش می‌یابد. این افزایش میانگین سرعت در پروفیل گلوگاه محفظه اینولاکس حدود ۳/۶ درصد نسبت به حالتی که در آن زبری سطح در ورودی محفظه وجود ندارد، است.

میزان حداکثر خود رسیده است. با این اوصاف می‌توان گفت که محدوده عملکرد مناسب برای این محفظه در سرعت بالای ۶ متر بر ثانیه است. در سرعت‌های کمتر رفتار محفظه مشابه است؛ اما بازدهی محفظه کاهش یافته و به تبع آن توان خروجی توربین نیز کاهش می‌یابد. این رفتار را می‌توان برای دیگر محفظه‌های اینولاکس که ابعاد و مقیاس متفاوتی تعمیم داد و با همین روش محدوده عملکرد محفظه را تشخیص داد.

۴-۲- اثر زبری

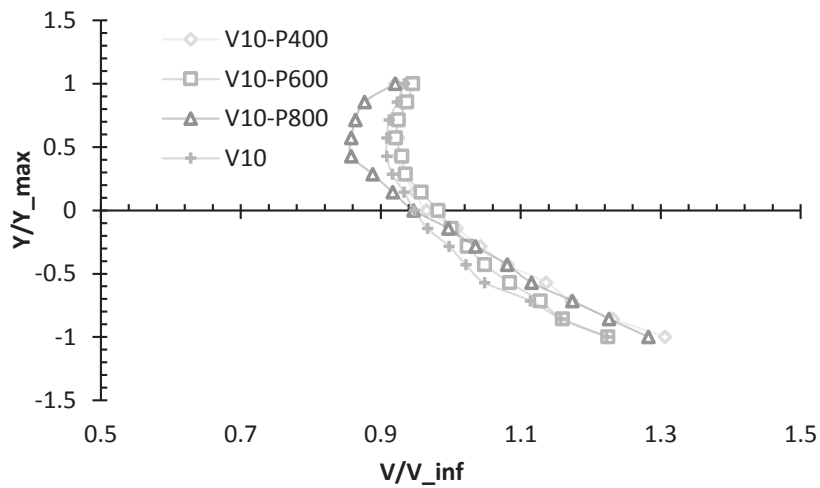
اثر زبری سطح با قراردادن سنبله با زبری مختلف در دهانه ورودی محفظه صورت گرفته است. همان‌طور که در نمودار قابل مشاهده است، افزایش زبری سطح منجر تغییر در رژیم جریان شده و باعث افزایش ناحیه جدایش شده است. افزایش ناحیه جدایش منجر به معشوش شدن جریان در دهانه ورودی شده و این افزایش اغتشاشات باعث کاهش میزان هوای نشت شده در قسمت مخالف دهانه ورودی می‌شود. این امر سبب افزایش دبی جرمی ورودی به درون محفظه گشته و بازدهی توربین افزایش می‌یابد. میزان افزایش بازدهی توربین وابسته به میزان زبری سطح و میزان ناحیه زیر است. در صورتی که افزایش زبری منجر به کندی جریان و کاهش بازدهی توربین شود، استفاده از زبری سطح توصیه نمی‌شود. در این پژوهش از سه سنبله با زبری مختلف که در آن زبری ۴۰۰ زبرترین سنبله و سنبله ۸۰۰ نرم‌ترین سنبله مورداستفاده است.

باتوجه به نتایج، میزان تغییرات در اثر تغییر در زبری سطح در تمامی



شکل ۱۰. نمودار اثر زبری سطح بر سرعت گلوگاه محفظه اینولاکس در سرعت ۵ متر بر ثانیه

Fig. 10. Effect of surface roughness on throat velocity of the Invelox at 5 m/s



شکل ۱۱. نمودار اثر زبری سطح بر سرعت گلوگاه محفظه اینولاکس در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

Fig. 11. Effect of surface roughness on throat velocity of the Invelox at 10 m/s

جدول ۱. مقایسه اثر زبری سطح بر سرعت در گلوگاه اینولاکس

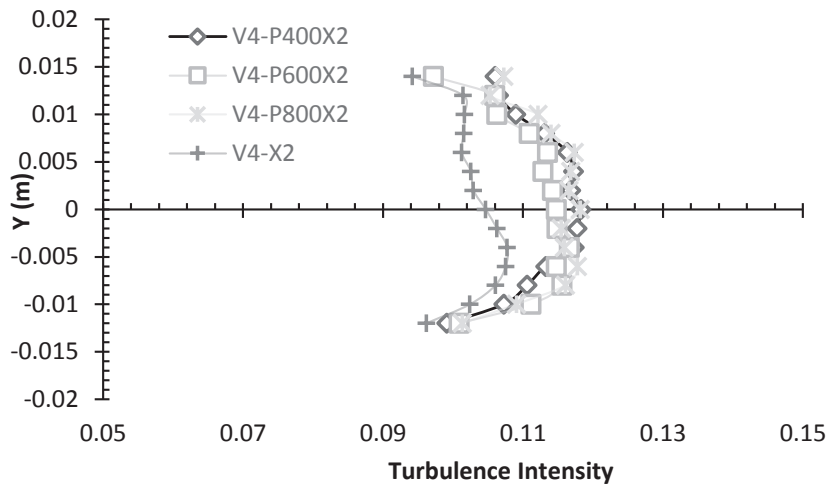
Table 1. Comparison of surface roughness effect on throat velocity of the Invelox

ارتفاع بی بعد	$V=10\text{ m/s}$	حد اقل زبری ($V=10\text{ m/s}$)	زبری متوسط ($V=10\text{ m/s}$)	حد اکثر زبری ($V=10\text{ m/s}$)
۱	۰/۹۳۴	۰/۹۲۱	۰/۹۴۶	۰/۹۲۱
۰/۸۵۷	۰/۹۲۴	۰/۸۷۷	۰/۹۳۷	۰/۹۳۵
۰/۷۱۴	۰/۹۱۲	۰/۸۶۴	۰/۹۲۵	۰/۹۲۶
۰/۵۷۱	۰/۹۰۹	۰/۸۵۸	۰/۹۲۱	۰/۹۲۵
۰/۴۲۹	۰/۹۰۸	۰/۸۵۸	۰/۹۳۰	۰/۹۲۶
۰/۲۸۶	۰/۹۱۶	۰/۸۸۹	۰/۹۳۵	۰/۹۳۲
۰/۱۴۳	۰/۹۳۳	۰/۹۱۷	۰/۹۵۸	۰/۹۵۰
۰	۰/۹۴۸	۰/۹۴۷	۰/۹۸۲	۰/۹۶۵
-۰/۱۴۳	۰/۹۶۷	۰/۹۹۷	۱/۰۰۰	۱/۰۰۸
-۰/۲۸۶	۰/۹۹۸	۱/۰۳۵	۱/۰۲۴	۱/۰۴۳
-۰/۴۲۹	۱/۰۲۲	۱/۰۸۱	۱/۰۴۹	۱/۰۸۱
-۰/۵۷۱	۱/۰۴۸	۱/۱۱۵	۱/۰۸۴	۱/۱۳۶
-۰/۷۱۴	۱/۱۱۴	۱/۱۷۴	۱/۱۲۸	۱/۱۷۲
-۰/۸۵۷	۱/۱۵۷	۱/۲۲۶	۱/۱۶۰	۱/۲۳۲
-۱	۱/۲۲۳	۱/۲۸۳	۱/۲۲۵	۱/۳۰۶
میانگین	۰/۹۹۴	۱/۰۰۳	۱/۰۱۴	۱/۰۳۰

۴-۳- اثر شدت اغتشاشات

دسته شدت اغتشاشات پایین (کمتر از ۱ درصد)، متوسط (بین ۱ الی ۵ درصد) و بالا (۵ الی ۲۰ درصد) تقسیم می‌شود. به‌عنوان مثال تونل باد در دسته شدت اغتشاشات پایین، جریان در لوله با رینولدز کم در دسته شدت متوسط و جریان با سرعت بالا در هندسه‌های پیچیده در دسته شدت اغتشاشات بالا قرار می‌گیرد. در محفظه اینولاکس شدت اغتشاشات در قسمت‌های مختلف بسته به سرعت و محل موردنظر متفاوت است. در این پژوهش نتایج شدت اغتشاشات در محل گلوگاه در سرعت‌های ۴ الی ۱۲ متر بر ثانیه همراه با زبری سطح متفاوت (بدون سنباده، سنباده ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰) ارائه شده است. همان‌طور که در نمودار قابل مشاهده است، در تمامی نقاط گلوگاه محفظه شدت اغتشاشات مقدار تقریباً یکسانی دارد. این بدین معنا است که

شدت اغتشاشات در واقع نسبت درصد میزان اغتشاشات سرعت در نقطه موردنظر نسبت به سرعت میانگین را نشان می‌دهد. هر قدر که شدت اغتشاشات افزایش یابد، میزان نوسان سرعت در آن نقطه در طول زمان بیشتر است. در یک جریان ایده‌آل بدون هیچ‌گونه نوسانات سرعت، شدت اغتشاشات صفر است. در عمل شدت اغتشاشات صفر روی کره زمین ممکن نیست و مقادیر از صفر بیشتر است. با افزایش میزان نوسانات سرعت، شدت اغتشاشات افزایش یافته و حتی ممکن است در جریان‌هایی که سرعت نوسانات بسیار از سرعت میانگین بیشتر است شدت اغتشاشات به مقداری بیش از صد برسد. به طور معمول جریان بسته به شدت اغتشاشات به سه



شکل ۱۲. نمودار شدت اغتشاشات در راستای عمود بر جریان در گلوگاه محفظه اینولاکس در سرعت ۴ متر بر ثانیه

Fig. 12. Turbulence intensity profile along the normal direction at the throat of the Invelox at 4 m/s

درصد است. این میزان خطا نشان از برخورداری آزمایش‌ها صورت گرفته از دقت مناسب است. علاوه بر این، با مشخص بودن میزان اختلاف بین سرعت مرجع و سرعت اندازه‌گیری شده می‌توان مقدار عدم قطعیت را برای هر روز از آزمایش با استفاده از روابط (۱۴) الی (۱۶) محاسبه کرد.

$$X_n = (\bar{x}_n) + \Delta x_n \quad (14)$$

$$y = f(X_1, \dots, X_n) \quad (15)$$

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (16)$$

عدم قطعیت در روز اول آزمایش معادل ۰/۱۲۴ متر بر ثانیه، در روز دوم آزمایش معادل ۰/۱۰۲ متر بر ثانیه، در روز سوم بخش اول معادل ۰/۰۸۷ متر بر ثانیه و در بخش دوم روز سوم معادل ۰/۱۴۱ متر بر ثانیه است.

جریان در گلوگاه محفظه مشابه جت عمل کرده و جهت بردار سرعت در نقاط مختلف گلوگاه یکسان و در راستای جریان است. از طرفی زبری سطح باعث افزایش در پروفیل شدت اغتشاشات در محفظه اینولاکس شده اما این افزایش منجر به تغییر کلی در پروفیل نشده و نمودار شدت اغتشاشات در حضور زبری سطح با حفظ پروفیل اندکی در محور افقی جابه‌جا می‌شود.

بعلاوه باید در نظر داشت که این به این معنا نیست که جریان بدون اغتشاشات است، بلکه به دلیل هندسه پیچیده محفظه و گردش جریان به واسطه زانویی قرار گرفته، شدت اغتشاشات در محل گلوگاه به مقدار ۱۰ درصد رسیده و جریان آشفته است. صرفاً در پروفیل گلوگاه مقادیر شدت اغتشاشات یکسان هستند که یکدست بودن جریان در گلوگاه را نمایش می‌دهد. به همین دلیل هندسه محفظه در دسته شدت اغتشاشات بالا قرار گرفته است.

۴-۴ خطای اندازه‌گیری و عدم قطعیت

خطای اندازه‌گیری معرف میزان اختلاف میان داده‌های اندازه‌گیری شده توسط در جدول ۲ داده‌های مربوط به بررسی خطای اندازه‌گیری بررسی شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، در سه روز آزمایش، درصد خطای اندازه‌گیری جریان سنج سیم داغ نسبت به سرعت مرجع کمتر از یک

جدول ۲. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت جریان آزاد با سرعت مرجع

Table 2. Comparison of measured free-stream velocities with reference velocities

روز دوم				روز اول			
درصد خطا	خطا	سرعت سیم داغ (m/s)	سرعت جریان آزاد (m/s)	درصد خطا	خطا	سرعت سیم داغ (m/s)	سرعت جریان آزاد (m/s)
۰/۹۵	۰/۰۳۷	۳/۹۶۳	۴	۰/۶۲	۰/۰۲۴۶	۳/۹۷۵۴	۴
۰/۴۱	۰/۰۲۴۸	۶/۰۲۴۸	۶	۰/۴۴	۰/۰۲۶۲	۵/۹۷۳۸	۶
۰/۵۳	۰/۰۴۲	۷/۹۵۸	۸	۰/۶۴	۰/۰۵۱۳	۸/۰۵۱۳	۸
۰/۴۹	۰/۰۴۸۸	۹/۹۵۱۲	۱۰	۰/۹۶	۰/۰۹۵۷	۹/۹۰۴۳	۱۰
۰/۵۵	۰/۰۶۵۵	۱۲/۰۶۵۵	۱۲	۰/۴۱	۰/۰۴۹	۱۲/۰۴۹	۱۲
روز سوم (بخش دوم)				روز سوم (بخش اول)			
درصد خطا	خطا	سرعت سیم داغ (m/s)	سرعت جریان آزاد (m/s)	درصد خطا	خطا	سرعت سیم داغ (m/s)	سرعت جریان آزاد (m/s)
۰/۶۹	۰/۰۲۷۶	۳/۹۷۲۴	۴	۰/۴۷	۰/۰۱۸۸	۳/۹۸۱۲	۴
۰/۸۸	۰/۰۵۲۵	۵/۹۴۷۵	۶	۰/۸۵	۰/۰۵۱۲	۵/۹۴۸۸	۶
۰/۵۳	۰/۰۴۲	۸/۰۴۲	۸	۰/۴۳	۰/۰۳۴	۸/۰۳۴	۸
۰/۳۹	۰/۰۳۸۹	۱۰/۰۳۸۹	۱۰	۰/۲۷	۰/۰۲۶۹	۹/۹۷۳۱	۱۰
۰/۹۶	۰/۱۱۴۷	۱۱/۸۸۵۳	۱۲	۰/۴۴	۰/۰۵۲۲	۱۱/۹۴۷۸	۱۲

۵- جمع بندی

در این تحقیق به بررسی مقادیر سرعت و شدت اغتشاشات در محفظه توربین باد اینولاکس در قسمت گلوگاه در محفظه اینولاکس صورت گرفته است. باتوجه به نتایج استخراج شده میزان افزایش سرعت در محفظه اینولاکس مورد بررسی قرار گرفته و پروفیل سرعت بی بعد شده به مرور زمان همگرا شده و به مقدار ثابتی نزدیک می شود. پروفیل همگرا شده در قسمت گلوگاه بیشترین افزایش سرعت را تجربه می کند. در همین محل توربین به منظور استخراج انرژی قرار می گیرد. با افزایش زبری سطح پروفیل سرعت در گلوگاه و دهانه خروجی با حفظ فرم خود به جهت مثبت محور افقی انتقال یافته و مقادیر سرعت باتوجه به افزایش زبری سطح، افزایش می یابد. افزایش سرعت و زبری سطح بر مقدار شدت اغتشاشات تأثیر می گذارد؛ اما پروفیل شدت اغتشاشات یکسان بوده این افزایش زبری تأثیر چندانی بر شدت اغتشاشات ندارد و همچنان جریان در دسته شدت اغتشاشات بالا قرار می گیرد. ثبات پروفیل شدت اغتشاشات در نقاط مختلف گلوگاه معرف میزان انحراف بردار سرعت از جریان یکنواخت (جت) است.

۶- نتیجه گیری و پیشنهادها

در مطالعه آیرودینامیکی توربین باد اینولاکس به روش تجربی، افزایش زبری سطح در دهانه ورودی توربین یک راهکار برای افزایش سرعت در داخل محفظه است. با افزایش زبری سطح، اغتشاشات جریان در داخل محفظه اینولاکس افزایش یافته و جدایش صورت می گیرد. افزایش اغتشاشات منجر به کاهش افت ناشی از نشتی جریان شده و باعث افزایش دبی سیال در داخل محفظه می شود. این افزایش دبی باعث افزایش جریان در مقطع محفظه شده و بازدهی توربین افزایش می یابد. بعلاوه باید در نظر داشت که میزان سطح زیر باید به اندازه‌ای باشد که افزایش سرعت قابل توجهی را فراهم کند. در این مطالعه افزودن زبری منجر به ایجاد تغییر در پروفیل سرعت و میزان شدت اغتشاشات جریان شده و بر عملکرد محفظه تأثیر می گذارد. در این تحقیق، حداکثر سرعت در گلوگاه به صورت کلی به میزان ۳۳/۶ درصد سرعت جریان آزاد است. در صورتی که در ورودی محفظه زبری قرار گیرد سرعت به میزان ۷ درصد نسبت به حالت عدم حضور زبری افزایش یافته و به صورت میانگین سرعت پروفیل حدود ۳/۶ درصد نسبت به

- [6] G.A. Gohar, T. Manzoor, A. Ahmad, Z. Hameed, F. Saleem, I. Ahmad, A. Sattar, A. Arshad, Design and comparative analysis of an INVELOX wind power generation system for multiple wind turbines through computational fluid dynamics, *Advances in Mechanical Engineering*, 11(4) (2019) 1687814019831475.
- [7] F. Sotoudeh, R. Kamali, S.M. Mousavi, Field tests and numerical modeling of INVELOX wind turbine application in low wind speed region, *Energy*, 181 (2019) 745-759.
- [8] S. Noori, G. Asgari, Building INVELOX wind turbine model and study on peculiarities of flow in that experimentally, *Amirkabir University of Technology*, 2021. (in Persian)
- [9] T.R. Reddy, C.I. Priyadarsini, M. Krishna, Guide vane height effect on performance of sheer wind turbine, *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 482-489.
- [10] M.K. Johari, M. Jalil, M.F.M. Shariff, Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT), *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4.13) (2018) 74-80.
- [11] S. Eriksson, H. Bernhoff, M. Leijon, Evaluation of different turbine concepts for wind power, renewable and sustainable energy reviews, 12(5) (2008) 1419-1434.
- [12] R. Venters, B.T. Helenbrook, K.D. Visser, Ducted wind turbine optimization, *Journal of Solar Energy Engineering*, 140(1) (2018) 011005.

شرایط بدون زبری سطح افزایش می‌یابد. باتوجه به نتایج این تحقیق، بهتر است برای افزایش عملکرد محفظه از راه‌های دیگری علاوه بر افزودن زبری سطح استفاده کرد. به این منظور می‌توان از روش‌های دیگری برای افزایش عملکرد محفظه استفاده کرد. به‌عنوان مثال افزایش دبی جرمی ورودی به محفظه با تغییر در فرم هندسه دهانه ورودی یکی از راه‌های افزایش عملکرد محفظه توربین باد اینولاکس است.

منابع

- [1] D. Allaei, Y. Andreopoulos, INVELOX: Description of a new concept in wind power and its performance evaluation, *Energy*, 69 (2014) 336-344.
- [2] D. Allaei, D. Tarnowski, Y. Andreopoulos, INVELOX with multiple wind turbine generator systems, *Energy*, 93 (2015) 1030-1040.
- [3] A.L. Solanki, B.D. Kayasth, H. Bhatt, Design modification & analysis for venturi section of INVELOX system to maximize power using multiple wind turbine, *Int J Innovat Res Sci Technol*, 3 (2017) 125-127.
- [4] M. Anbarsooz, M. Amiri, I. Rashidi, A novel curtain design to enhance the aerodynamic performance of Invelox: A steady-RANS numerical simulation, *Energy*, 168 (2019) 207-221.
- [5] T.T. Wibowo, F.H. Daulay, K. Suryopratomo, R. Budiarto, Numerical study of the effect of geometry variation on the performance of innovative design wind speed enhancer, in: *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018, pp. 01013.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Montazeri Saniji, S. Noori. Aerodynamics and surface roughness study on Invelox wind turbine, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 56(9) (2024) 1211-1226.

DOI: [10.22060/mej.2025.23622.7789](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23622.7789)

