

# طراحی و ساخت یک غلاف جهت افزایش سرعت سیال با قابلیت استفاده برای توربین‌های آبی محوری

رضا کمالی منفرد<sup>۱</sup>، حمید احمدی اصل<sup>۱\*</sup>، منوچهر راد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، hamid.ahmadiasl@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی

## چکیده

وجود مناطق ساحلی در شمال و جنوب ایران موجب پدید آمدن مناطق مستعد تولید برق آبی با انرژی امواج و جزرمود شده است. لذا برای افزایش بهره‌برداری از انرژی در این مناطق نیاز به افزایش سرعت سیال وجود دارد. با طراحی و ساخت یک غلاف جهت افزایش سرعت سیال، توربین‌های نسل جدیدی بوجود می‌آیند که می‌توانند انرژی جنبشی سیال را افزایش داده و در سواحل دریاها و بستر رودخانه‌های بزرگ انرژی الکتریکی بیشتری تولید کنند.

براساس خواص ایرفویل‌ها، غلافی با سطح مقطع ایرفویلی طراحی شد که سرعت آب را تا حدود ۲.۸ برابر سرعت جریان دوردست در حل عددی افزایش داد. غلاف طراحی شده ساخته و آزمایش شد. به علاوه چندین نوع پروانه در داخل غلاف نصب شد. سرعت‌های دورانی پروانه‌ها در دو حالت با غلاف و بدون غلاف مقایسه شد که متناسب با نسبت افزایش سرعت جریان بودند. درنتیجه با قرار دادن یک توربین در این غلاف، توان بیشتری تولید می‌شود.

## اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۱۶

کلمات کلیدی:

توربین آبی غلافدار

افزایش سرعت سیال

نسل جدید توربین‌ها

## Designing and Building of a Shroud to Increase Fluid Velocity with Capability to Use for Axial Water Turbines

Reza Kamali Monfared<sup>1</sup>, Hamid Ahmadi Asl<sup>1\*</sup>, Manouchehr Rad<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.sc Student, Dept. of Mechanical Eng., South Tehran Branch, Islamic Azad University; hamid.ahmadiasl@gmail.com

<sup>2</sup> Professor, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received: 5 Jan. 2016

Accepted: 4 Apr. 2016

#### Keywords:

Shrouded water turbine  
Increasing fluid velocity  
New generation of turbines

### ABSTRACT

Existence of the coasts in the north and south of Iran cause to create potential areas to produce electricity by tidal and wave energies. Therefore, increase of fluid velocity is required to exploit these areas. A new generation of turbines is created by designing and building a shroud to increase fluid velocity which it increases kinetic energy of flow and generates more electricity at coastlines and riverbeds.

Based on airfoils characteristics, a shroud with an airfoil cross-section form was designed which increases water velocity approximately 2.8 times greater than far field flow numerically. The shroud was built and tested experimentally. Moreover, several propellers were installed in the shroud. Rotational speeds of the propellers in two states of with and without shroud were compared and they were proportional to increase ratio of flow velocity. Consequently, more power is generated by installing a turbine in the shroud.

## ۱ - مقدمه

هدف تحقیقات پیشین بیشتر بر اندازه‌گیری نیروی درگ بوده و تلاش‌های انجام شده نیز برای کاهش نیروی درگ بوده است. همچنین مدل‌های قبلی یک مخروط ناقص توخالی با ضخامت ثابت و بدون سطح مقطع ایرفویلی بوده و یا به دلیل داشتن طول زیاد و گلوگاه کوچک کاربردی نبودند. به علاوه تمامی مدل‌های تجربی مورد بررسی گذشته در ابعاد کوچک بوده که این امر می‌تواند باعث تداخل لایه‌های مرزی سیال در مقطع داخلی مخروط ناقص توخالی شده و از افزایش سرعت در نزدیکی مقطع ورودی آن بکاهد [۶]. یکی از موضوعات مورد توجه، پیدا کردن شکل مطلوب برای یک مخروط ناقص توخالی است. بررسی‌هایی جهت پیدا کردن شکل بهینه برای مجرای افزایش دهنده سرعت باد، دهای مخروط ناقص توخالی متفاوت، طراحی و شبیه‌سازی شدند [۷]. در ادامه آزمایشات تجربی متعددی در رابطه با یک مخروط ناقص توخالی انجام شد که نتایج مشابهی را با نتایج شبیه‌سازی عددی نشان دادند [۸].

## ۲ - مباحث تئوری اولیه

بررسی‌های روی مخروط ناقص و جریان عبوری از آن نشان می‌دهد که در یک مخروط ناقص توخالی با عبور سیال از دهانه کوچکتر به سمت دهانه بزرگتر، دارای افزایش سرعت در مقطع ورودی آن می‌شود در غیر اینصورت با عبور سیال از دهانه بزرگتر به دهانه کوچکتر، سیال دچار افت سرعت می‌شود. برای بیان اجمالی مطلب فوق از معادله برنولی و پیوستگی استفاده می‌شود. جریان تراکمن‌پذیر در نظر گرفته می‌شود چرا که به علت پایین بودن سرعت سیال، عدد ماخ کمتر از  $10^3$  است. همچنین اگر عدد رینولدز بیش از  $10^4$  ( $Re > 10^4$ ) باشد لایه مرزی شکل گرفته بر پوسته داخلی مخروط ناقص، ضخامت بسیار کمی داشته و لذا فشار در خروجی مخروط تقریباً برابر فشار دوردست است. همچنین جریان خارج از لایه‌مرزی، غیر چرخشی بوده و می‌توان برای حالت جریان ورودی از دهانه بزرگ شکل ۱(الف)، بین جریان آزاد دوردست و مقطع ۲ رابطه برنولی را به صورت زیر نوشت و سرعت را در مقطع ۱ به دست آورد.

$$Z_{\infty} + \frac{P_{\infty}}{\rho g} + \frac{U_{\infty}^2}{2g} = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} \quad (1)$$

$$Z_{\infty} = Z_1; \quad P_{\infty} = P_1 \\ v_1 = U_{\infty}$$

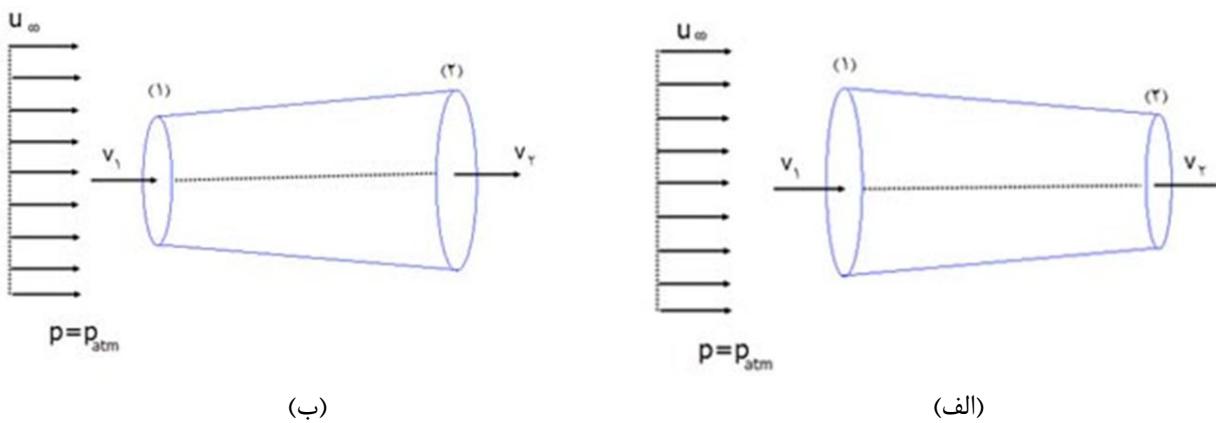
همچنین طبق رابطه پیوستگی:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \Rightarrow v_1 = \frac{A_1}{A_2} v_2 \quad (2)$$

با گذر زمان و صنعتی شدن جوامع بشری، احتیاج روز افزون به انرژی اجتناب‌ناپذیر است. این مساله از یک سو باعث استفاده بیش از حد از منابع تجدیدنپذیر فسیلی و کاهش سریع این منابع شده که عامل ایجاد بحران انرژی و بوجود آمدن خطрی بزرگ برای ادامه حیات بشری در آینده‌ای نه چندان دور خواهد شد. از سوی دیگر، آلودگی‌های شدید محیط‌زیستی باعث برهم خوردن تعادل طبیعت، ایجاد محیط‌زیستی ناسالم برای زندگی انسان، ضربه به محیط‌زیست و حیات‌وحش، خطر انقراض گونه‌های نباتی و جانوری شده و آینده حیات زمینی را در هاله‌ای از ابهام فرو برد است.

انرژی‌های تجدیدپذیر مانند جزرومود، امواج و باد منابع انرژی‌های پاک هستند که برای تولید برق توسط توربین‌های آبی و بادی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. به عنوان نمونه جهت تولید برق اقتصادی از توربین‌های بادی نیاز به بادی با سرعت ۷ تا ۱۲ متر بر ثانیه است. مناطقی با باد دائمی ولی با سرعت‌های پایین وجود دارند که این مناطق را به مناطق بالقوه تولید برق بادی تبدیل کرده است ولی با توربین‌های متداول کنونی نمی‌توان برقی به صورت اقتصادی تولید کرد و هزینه برای آن توجیح اقتصادی ندارد.

بررسی‌هایی در ارتباط با طراحی یک شکل هندسی افزاینده سرعت سیال در گذشته انجام شده است. مشاهدات نشان داد نیروی درگ هندسه‌های ابی‌رودینامیکی برای کاهش اتلاف انرژی حائز اهمیت است، از این‌رو هندسه‌های طراحی شده باید ضریب نیروی پسای کمی داشته باشد. نخستین پژوهش‌ها با بررسی تغییرات نیروی پسا اطراف استوانه (پایه سکوهای دریایی) و بدنه شناورها شروع شد [۱]. سپس بررسی عددی ضریب نیروی پسای یک مخروط ناقص توخالی با زاویه راس  $10^\circ$  درجه، برای دستیابی به هندسه‌ای که سرعت جریان سیال را افزایش داده و نیروی درگ کمی داشته باشد، در سرعت‌های بالا حول اجسام در داخل آب انجام شد [۲]. سپس ضریب درگ فشاری آن در دو حالت مختلف ورودی جریان از دهانه کوچک و دهانه بزرگ در حوضچه کشش به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت [۳]. در ادامه نیروی درگ یک نیم‌مخروط ناقص توخالی در دو حالت ورودی جریان از دهانه کوچک و دهانه بزرگ با زاویه راس مشابه در تونل باد بررسی شد و همچنین تاثیرات زبری سطح تست و نتایج با مدل بدون زبری مقایسه شد [۴]. افزون بر آن برای حصول کمترین ضریب درگ ممکن، یک مخروط شبیه‌سازی و مدل مطلوب در رینولدزهای مختلف به صورت درجه شیوه‌سازی شد. این پژوهش ثابت کرد که کمترین نیروی درگ در جریان آرام در مدل با زاویه خمیدگی  $30^\circ$  درجه و کمترین نیروی درگ در جریان مغشوش در مدل با زاویه  $40^\circ$  درجه است [۵].



شکل ۱ - جریان سیال در مخروط ناقص توخالی،

(الف): در حالت جریان ورودی از دهانه بزرگ، (ب): در حالت جریان ورودی از دهانه کوچک

تدریجی باشد، احتمال جدایش کم می‌شود. بنابراین یک مخروط ناقص واگرا (ورودی از دهانه کوچکتر) مبنای طراحی قرار گرفت. همچنین در ایرفویل‌های نامتقارن با فرض غیرچرخشی بودن سیال، طبق قانون برنولی فشار روی سطح بزرگتر نسبت به سطح کوچکتر کاهش و سرعت افزایش می‌یابد. از این‌رو با ایجاد سطح مقطع ایرفویلی برای مخروط واگرا گلوگاهی ایجاد می‌شود که باعث افزایش بیشتر سرعت و کاهش جدایش می‌گردد. به علاوه مدل طراحی شده باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا لایه‌های مرزی سیال با یکدیگر تداخل نکرده و باعث اتفاف انرژی نگردد. بدین ترتیب می‌توان به یک افزایش سرعت مطلوب دست یافت [۹].

### ۳- طراحی و شبیه‌سازی

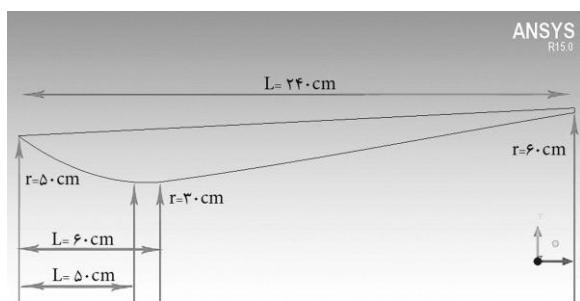
#### ۱-۳- طراحی غلاف

با طراحی و شبیه‌سازی طرح‌های متعددی، شکل‌هایی بدست آمد که سرعت باد را بیش از ۳ برابر نسبت به سرعت اولیه افزایش می‌دادند وی افزایش سرعت تنها هدف طراحی نبود زیرا با کاهش بیشتر قطر گلوگاه یا افزایش قطر دهانه‌های ورودی و خروجی نیز تا چندین برابر، سرعت افزایش می‌یافتد. به غیر از افزایش سرعت،

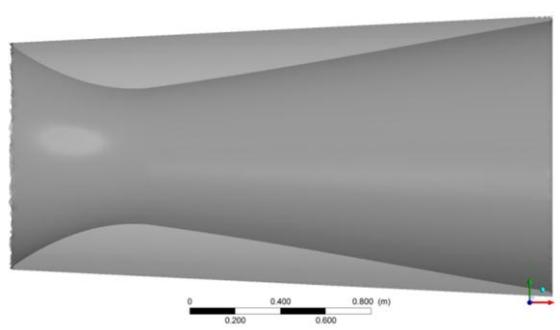
که  $v_1$  سرعت جریان در ورودی،  $v_2$  سرعت جریان در خروجی،  $P_1$  فشار در ورودی،  $P_2$  فشار در خروجی،  $A_1$  سطح مقطع ورودی و  $A_2$  سطح مقطع خروجی است. براساس روابط (۱) و (۲)، سرعت در مقطع ورودی با اندازه نسبت سطح مقطع‌ها رابطه دارد. در حالت ورودی از دهانه بزرگتر، به علت اینکه این نسبت کمتر از ۱ است، سرعت در ورودی کاهش می‌یابد.  
 $A_1 > A_2 \Rightarrow A_2/A_1 < 1 \Rightarrow V_1 < V_2$   
اگر روابط برنولی و پیوستگی برای حالت جریان ورودی از دهانه کوچک شکل (ب) نوشته شود به دلیل اینکه سطح مقطع خروجی بزرگتر از سطح مقطع ورودی است سرعت در مقطع ورودی افزایش می‌یابد.

$$A_1 < A_2 \Rightarrow A_2/A_1 > 1 \Rightarrow V_1 > V_2$$

مطلوب با آنچه بیان شد، با عبور جریان از دهانه بزرگ، سرعت در ورودی کاهش و فشار افزایش می‌یابد که باعث کاهش دبی ورودی می‌شود در حالیکه با ورود جریان سیال از دهانه کوچک، سرعت در ورودی افزایش و فشار کاهش می‌یابد که باعث افزایش دبی ورودی می‌شود. نکته قابل توجه این است که با ورود سیال، در سطح داخلی احتمال جدایش بوجود می‌آید اما اگر افزایش سطح مقطع

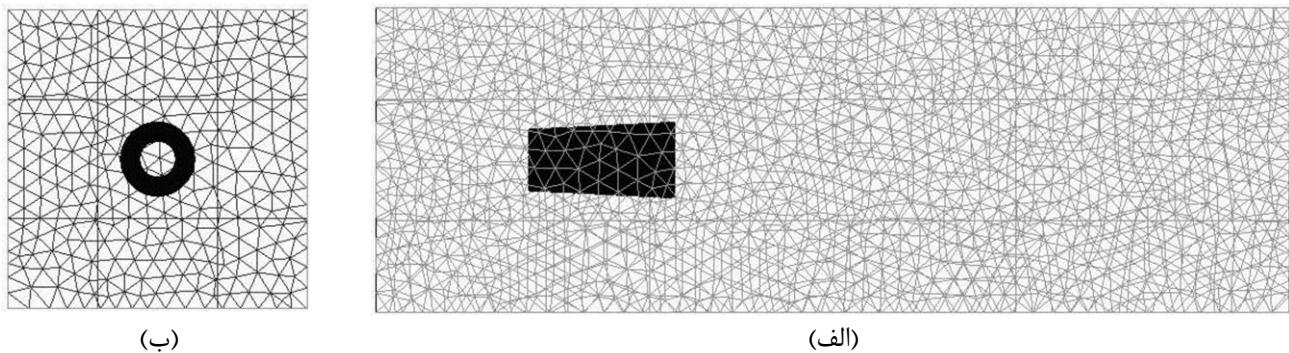


(ب)



(الف)

شکل ۲-(الف): هندسه سه بعدی طرح، (ب): مشخصات ابعادی طرح



شکل ۳- منطقه محاسباتی (الف) نمای پهلو، (ب) نمای رو به رو

فرض یکنواخت بودن جریان با بزرگی سرعت  $3 \text{ متر بر ثانیه}$  در شرایط استاندارد و شرط مرزی خروجی برابر با فشار استاندارد تعیین شد. روی سطح غلاف شرط عدم لغزش برقرار بود. با توجه به عدد رینولدز داخل و خارج از غلاف، حل در محیط مشوosh و با مدل آشفتگی K-epsilon استاندارد انجام شد. برای مدل کردن جریان نزدیک جداره روش Scalable wall function و برای ارتباط بین سرعت و فشار روش تصحیح فشار SIMPLE انتخاب گردید. برای فشار از دقت مرتبه دوم و برای مومنتوم از دقت مرتبه دوم بالا دست استفاده شد. برای جریان ورودی  $5\% / 5$  شدت آشفتگی و نسبت ویسکازیته آشفتگی  $10$  تعیین گردید. در شبیه‌سازی‌های انجام شده جریان دور دست  $3 \text{ متر بر ثانیه}$  مورد استفاده قرار گرفت تا بتوان کاربرد موثر غلاف را در سرعت‌های پایین و تبدیل آن به سرعت‌های مناسب جهت استفاده برای توربین تایید کرد.

### ۳-۳- تحلیل نتایج عددی

شکل ۲ گلوبال غلاف طراحی شده را نمایش می‌دهد. این طرح مطابق با شکل ۴(الف)، در شبیه‌سازی عددی برای آب سرعت در محدوده گلوبال در بیشترین افزایش به  $8.329 \text{ متر بر ثانیه}$  رسیده و به عبارت دیگر سرعت  $2.78$  برابر شده است. همچنین مطابق با شکل ۵(الف)، در شبیه‌سازی عددی برای هوا سرعت در محدوده گلوبال در بیشترین افزایش به  $7.392 \text{ متر بر ثانیه}$  رسیده و به عبارت دیگر سرعت  $2.46$  برابر شده است. همچنین نسبت افزایش سرعت در گلوبال به دهانه ورودی  $2.60$  است.

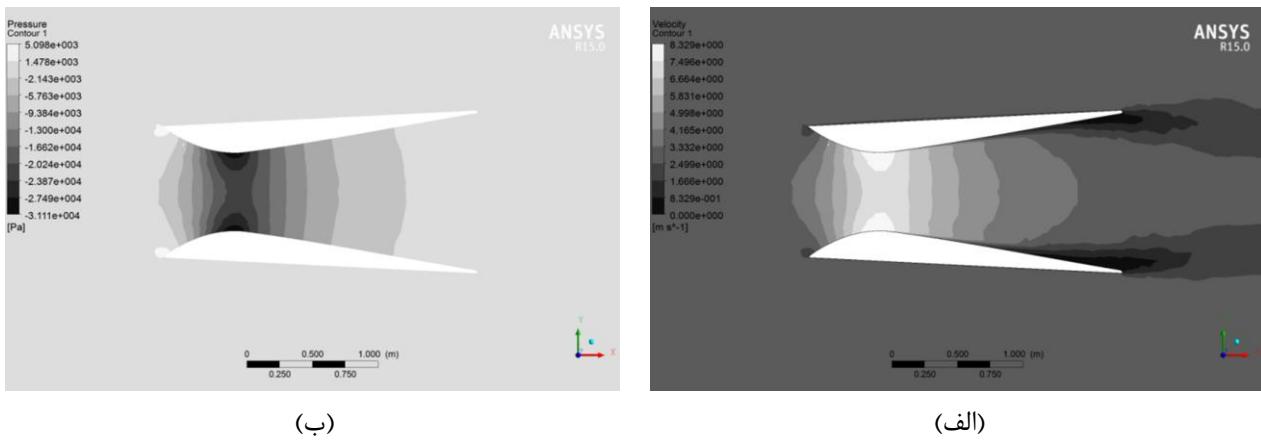
نتایج در هر دو شبیه‌سازی نشان می‌دهد جریان در مقطع ورودی غلاف با برخورد به لبه جداره ورودی دچار افزایش فشار و در نتیجه کاهش سرعت شده است. به تدریج با نزدیک شدن به مرکز همین مقطع، اثر افزایش فشار کمتر شده و در مرکز سرعتی نزدیک به سرعت جریان دور دست وجود دارد. با عبور از این مقطع و نزدیک شدن به گلوبال با کاهش قطر، سرعت رو به افزایش است. مشاهده

مسئله داشتن کوتاه‌ترین طول ممکن، بزرگ بودن منطقی گلوبال جهت نصب پروانه، کمترین جدایش بعد از گلوبال برای کاهش نیروی درگ و ارتعاشات، کاهش آشفتگی در پشت غلاف و رسیدن سریعتر جریان خروجی به سرعت و شرایط جریان دور دست نیز جزء پارامترهای مهم طراحی بود. از میان طرح‌ها، یک طرح انتخاب شد که هندسه نهایی ایجاد شده حاصل از چرخش سطح مقطع ایرفویل آنها حول محور Xها است شکل ۲(الف). در این طراحی دهانه ورودی  $100 \text{ سانتیمتر}$ ، گلوبال  $60 \text{ سانتیمتر}$ ، طول  $240 \text{ سانتیمتر}$ ، محل گلوبال در فاصله  $50$  تا  $60 \text{ سانتیمتر}$  از دهانه ورودی و خروجی  $120 \text{ سانتیمتر}$  هستند شکل ۲(ب). بدین ترتیب در این طرح وتر ایرفویل زاویه‌ای  $2.5^\circ$  درجه‌ای با افق می‌سازد که موجب می‌شود جریان داخل و بیرون غلاف با زاویه‌ای نزدیک به هم خارج شوند تا حتی امکان از تداخل دو جریان با زاویه‌های مختلف و ایجاد جریان‌های گردابه‌ای جلوگیری شود. نکته دیگری که در طراحی این هندسه مورد توجه قرار گرفته است وجود لبه نوک‌تیز دهانه ورودی است تا نیروی درگ در ابتدای آنها را کاهش دهد.

### ۴-۲- فرضیات و روش حل

منطقه محاسباتی یک محیط مستطیلی شکل با طول  $1000$  و سطح مقطع  $300 * 300 \text{ سانتیمتر}$  در نظر گرفته شد تا مرزهای اطراف تاثیری در نتایج نداشته باشند. غلاف در فاصله  $300 \text{ سانتیمتر}$  از ورودی این منطقه محاسباتی قرار گرفت شکل ۳. اندازه بزرگ‌ترین المان برابر  $50 \text{ واحد} (\text{سانتیمتر})$  تعیین گردید و با نزدیک شدن به سطح غلاف، شبکه‌بندی ریزتر شد تا بر روی سطوح غلاف این اندازه  $2$  واحد لحاظ گردد. حدود  $3 \text{ میلیون}$  مش از نوع نامنظم تولید گردید. اولین ضخامت مش لایه‌مرزی با اندازه  $1.0 \text{ و نسبت رشد } 1.2 \text{ تا } 20 \text{ لایه تولید شد.}$

برای طراحی هندسه از نرم افزار ICEM CFD و برای حل عددی از نرم افزار FLUENT با دامنه حل  $3$ -بعدی استفاده شد. در مرزهای دیوارهای جانبی شرط لغزش برقرار بود. برای مرز ورودی



شکل ۴- نتایج حل عددی با فرض سیال آب (الف) کانتور سرعت، (ب) کانتور فشار

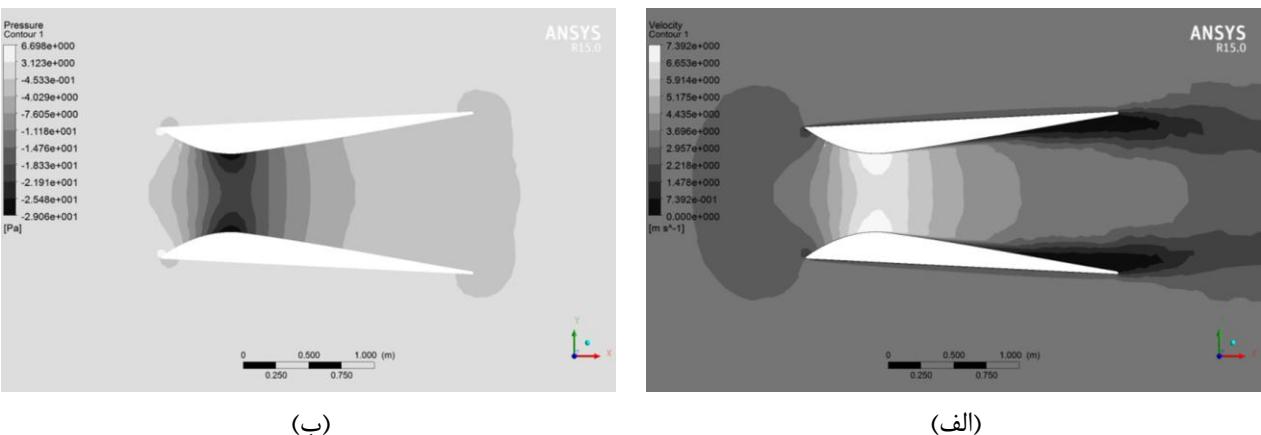
یکنواخت شدن است. بدینهی است با افزایش سرعت سیال انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد و با توجه به قرار داشتن بیشترین افزایش سرعت در گلوگاه، با قرار دادن یک توربین در آن می‌توان از حداقل افزایش سرعت جریان بهره‌برداری کرده و توان بالاتری از همان توربین در مقایسه با حالت بدون غلاف بدست آورد.

#### ۴- ساخت و آزمایش غلاف در تونل باد

##### ۱-۴- غلاف بدون توربین

طرح دقیقا با همان ابعاد طراحی شده ساخته شد تا با انجام آزمایشاتی، درستی نسبت بدست آمده در شبیه‌سازی بررسی شود. این غلاف با اسکلتی فلزی و پوشش‌هایی از جنس پلی‌کربنات و چندین نوع مواد شیمیایی دیگر ساخته شد که در تمامی مراحل سعی شد ساخت فیزیکی دقیقا با طراحی کامپیوتروی مطابق باشد شکل ۶ (ب). آزمایش‌ها در شهر تهران و در نیمه اول سال ۱۳۹۴ انجام شدند. به دلیل بزرگ بودن ابعاد داکت و احتیاج به یک حوضچه کشش بزرگ، غلاف در یک تونل باد تست شد چرا که اگر

می‌شود در گلوگاه کمترین قطر و بیشترین افزایش سرعت وجود دارد. بالاترین مقدار سرعت در این ناحیه نزدیک جداره غلاف می‌باشد که دلیل آن ناشی از شکل ایرفویلی غلاف است. در مرکز گلوگاه سرعت کمترین نسبت افزایش را دارد زیرا با دور شدن از سطح ایرفویلی اثرات آن کمتر می‌شود. بعد از گلوگاه با افزایش قطر، جریان دچار انبساط شده و با افزایش فشار و کاهش سرعت مواجه می‌شود. در شبیه‌سازی هوا با واگرا شدن جداره، در فاصله‌ای بعد از گلوگاه جدایش شروع به شکل‌گیری کرده و یک جریان گردابی بوجود آورده است درحالیکه در شبیه‌سازی برای آب جدایش بسیار کم است و نکته حائز اهمیت احتمال بوجود آمدن کاویتاسیون در گلوگاه می‌باشد که باید مورد توجه قرار گیرد. در ادامه با نزدیک شدن به انتهای غلاف، با افزایش قطر، انبساط بیشتر شده و باعث افزایش فشار و افت بیشتر سرعت شده است. در فاصله کوتاهی بیرون از غلاف به دلیل اختلاط جریان‌های داخلی و خارجی، تاثیرات ناشی از جدایش از بین رفته و جریان درحال



شکل ۵- نتایج حل عددی با فرض سیال هوا (الف) کانتور سرعت، (ب) کانتور فشار



شكل ٦- (الف) بادسنج (ب) غلاف

فاصله ۵۰ سانتیمتری از مقطع ورودی، جدول ۳ برای مقطع پایان گلوگاه در فاصله ۶۰ سانتیمتری از مقطع ورودی و جدول ۴ برای مقطع خروجی، ائه شده‌اند.

نقاط در هر مقطع، در مرکز و سه شعاع اندازه‌گیری می‌شدند. محل شعاع سوم کنار جداره داکت بود و دو شعاع دیگر بین مرکز و شعاع سوم متناسب با فاصله این دو قرار می‌گرفت به نحوی که این فاصله به قسمت‌های یکسان تقسیم می‌شد. در کنار جداره غلاف ۱۶ نقطه با اختلاف زاویه ۲۲.۵ درجه‌ای از هم نسبت به مرکز و دو شعاع دیگر هر کدام در ۸ نقطه با اختلاف زاویه ۴۵ درجه‌ای تعیین و اندازه‌گیری شدند و در آخر نقطه مرکز هر مقطع اندازه‌گیری می‌شد. بدین ترتیب در هر مقطع، ۳۳ نقطه اندازه‌گیری شد.

همانطور که انتظار می‌رفت نتایج در ورودی (جدول ۱) افت سرعتی در کنارها دارد که با نزدیک شدن به سمت مرکز ورودی، مقدار آن بیشتر می‌شود.

طبق جدول ۲ سرعت در مرکز و ناحیه کنار جداره نسبت به سایر نقاط مقدار کمتری دارد. سرعت پایینتر نقاط نزدیک جداره به دلیل اثرات وجود لایه مرزی ضخیم شکل گرفته در این ناحیه

نتایج تجربی در تونل باد نتایج شبیه‌سازی عددی با هوا را تایید کند، می‌توان به نتایج شبیه‌سازی در آب نیز استناد کرد. محیط تست، تونل بادی با مقطع  $160 \times 160$  سانتیمتر و طول ۱۰ متر بود. غلاف در مقطعی از تونل با باد نسبتاً یکنواخت و سرعت متوسط ۳.۱۸ متر بر ثانیه قرار گرفت. اندازه گیری سرعت توسط بادسنج AVM-07 مدل PROVA که دقต آن ۱۰۰ متر بر ثانیه است انجام حداقل میزان قابل اندازه گیری با آن ۳.۰ متر بر ثانیه است گرفت شکل ۶(الف). همچنین قطر پروانه این دستگاه ۶ سانتیمتر است. در طول آزمایش هر نیم ساعت فشار، دما و رطوبت هوا همراه با ساعت و تاریخ ثبت می‌شد. آزمایش غلاف در ۱۶ مقطع و ۵۲۸ نقطه با ۷ بار تکرار تست شد که در هر اندازه گیری یک مقدار ماکریم و یک مقدار مینیمم توسط دستگاه نمایش داده می‌شد و مجموعاً تعداد ۷۳۹۲ سرعت ثبت گردید. با میانگین گیری از تمامی نتایج ۷ بار تکرار که بسیار به هم نزدیک بودند، برای هر نقطه یک سرعت متوسط بدست آمد. به دلیل زیاد بودن تعداد مقاطع، در اینجا تنها نتایج نهایی ۴ مقطع اصلی در ۴ جدول آورده شده‌اند. جدول ۱ برای مقطع ورودی، جدول ۲ برای مقطع شروع گلوگاه در

#### جدول ۱- مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده در مقطع ورودی

٢.٤٤	٢.١٩	٢.٢١	٢.٢٧	٢.٢١	٢.١٣	٢.١٠	٢.٣٨	٢.٣٢	٢.٣٨	٢.٢٠	٢.٢٢	٢.٢٠	٢.٢٤	٢٣٢	٢.٣٦	٣ ساعي
٣.٠٥		٣.٠٨			٣.٠٨		٣.٢١		٣.٢٣		٣.٠٥		٢.٩٨		٣.١٥	٢ ساعي
٣.٣٢		٣.٣٥			٣.٤٥		٣.٥٠		٣.٤٨		٣.٣٧		٣.٣٧		٣.٤٦	١ ساعي

جدول ۲- مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده در ابتدای گلوگاه

٦.٧٧	٦.٧٦	٦.٦٨	٦.٨٣	٦.٨٠	٦.٨٤	٦.٧٣	٦.٦٩	٦.٥٧	٦.٩٨	٧.٠٣	٧.٠١	٧.٠٤	٦.٩٣	٦.٨٣	٦.٨١	٣ ساعع
٧.٩٢		٧.٩٨		٧.٨٩		٧.٨٥		٧.٩٨		٧.٩٤		٧.٨٩		٧.٧٩		٢ ساعع
٧.٧٨		٧.٨٠		٧.٨٥		٧.٧٢		٧.٧٣		٧.٦٦		٧.٧٠		٧.٧٠		١ ساعع

جدو، ۳- مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده در انتهای گلوگاه

| النوع  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| ٦.٢٦  | ٥.٩١  | ٦.١٢  | ٦.١٥  | ٦     | ٦.٢٨  | ٦.١٠  | ٥.٧٦  | ٦.٣٢  | ٦.٦٩  | ٦.٩٩  | ٦.٦٩  | ٦.١١  | ٥.٨٧  | ٥.٩٣  | ٦.٢٧  | ٣ شعاع |
| ٧.٧٩  |       | ٨     |       |       | ٧.٩٤  |       | ٧.٧٦  |       | ٧.٩٦  |       | ٧.٩٦  |       | ٧.٧٩  |       | ٧.٧٦  | ٢ شعاع |
| ٧.٥٩  |       | ٧.٦٢  |       |       | ٧.٥٧  |       | ٧.٦٢  |       | ٧.٦٩  |       | ٧.٧٠  |       | ٧.٦٥  |       | ٧.٦١  | ١ شعاع |
|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | ٧.١٤  | مركز   |

#### جدول ۴- مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده در خروجی

## جدول ۵- سرعت‌های دورانی پروانه‌ها داخل و بیرون غلاف و نسبت

افزایش آنها

پروانه چهارپرهای	پروانه سهپرهای	پروانه دوپرهای	سرعت دورانی - داخل غلاف (RPM)
نسبت افزایش	۲.۳۸	۲.۳۱	۲.۳۰
سرعت دورانی - بیرون غلاف (RPM)	۳۲۹	۳۰۴	۲۵۴
	۷۸۳	۷۰۲	۵۸۴

مشاهده می‌شود نسبت افزایش سرعت دورانی وابسته به تعداد پره‌هاست ولی همگی نزدیک به نسبت افزایش سرعت در گلوگاه هستند. اگرچه با افزایش تعداد پره‌ها سرعت دورانی کاهش یافته ولی افزایش سطح پره‌ها باعث ایجاد نیروی لیفت بیشتر و افزایش گشتاور می‌شود. افت سرعت دورانی پروانه‌های با پره بیشتر به دلیل ایجاد خفقات بیشتر در جلوی پروانه‌هاست که باعث افت سرعت باد قبل از پروانه می‌شود. شایان ذکر است این پدیده در هر دو حالت برای توربین بادی بدون غلاف و با غلاف اتفاق می‌افتد.



٢١٦

نسبت به شبیه‌سازی است و در مرکز به دلیل داشتن بیشترین  
فاصله از سطح ایرفویل کمترین اثر افزایش سرعت مشاهده  
می‌شود. در ناحیه بعد از لایه‌مرزی بیشترین افزایش سرعت وجود  
دارد که با تزدیک شدن به مرکز روندی کاهشی دارد.

در جدول ۳ یعنی پایان گلوبه همانطور که پیداست سرعت در کنار جداره غلاف در این مقطع نسبت به مقطع قبلی افت سرعت داشته است. دلیل این امر شروع جدایش است و اثر آن به صورت کاهش سرعت در این ناحیه پروز پیدا کرده است

در جدول ۴ مقادیر اندازه‌گیری شده در ناحیه جداره غلاف جدایش بوجود آمده را به خوبی نشان می‌دهد. در حین آزمایش‌ها پروانه بادسنج به صورت کاملاً ساکن بود و یا چرخش‌های جزئی و متناوبی به صورت ساعتگرد و پاد ساعتگرد داشت که نشان از قرار گرفتن د. ناحیه حدایش داشت.

متناسب با سرعت‌های نقاط و نسبت مساحت هر کدام، برای هر  
قطعه یک سرعت متوسط محاسبه شد. نسبت سرعت متوسط  
گلوگاه به ورودی ۲.۵۷ و نسبت سرعت متوسط گلوگاه به باد  
دور دست ۲.۳۲ بدست آمد که این مقادیر بسیار نزدیک به نتایج  
شیوه‌سازی بود. مطابق با معادله توان توربین با افزایش  
۲.۳۲ باری، سرعت، توان ۱۲.۵ بار افزایش، می‌باشد.

٤-٢- غلاف با ته و سی

عملکرد غلاف با قرار دادن چندین نوع پروانه در محدوده گلوگاه تست و سرعت دورانی آنها ثبت شدند(شکل). پروانه‌های مورد آزمایش دوپرهای، سهپرهای و چهارپرهای با زاویه حمله ۷۵ درجه بودند. دقیقاً همان پروانه‌ها بدون غلاف در شرایط یکسان در مقطعی از تونل که گلوگاه قرار داشت تست شدند. در جدول ۵ سرعت دورانی هریک از پروانه‌ها در حالت بدون غلاف، با غلاف و نسبت افزایش سرعت هر یک آمده است.

2. Azimi, A. and Rad, M., (2009), *Investigation flow around super cavitation under water bodies*, 17<sup>th</sup> Annual International Conference on Mechanical Engineering, ISME, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Niknafs, A., (2010), *Experimental investigation of drag on tubular frustum immersed in water moving in different directions and variation of drag coefficient*, Master of Science Thesis, IAU (South Tehran Branch), Tehran, Iran. (In Persian)
4. Ghasempour, V. and Rad, M., (2012), *Investigation of drag force on half tubular frustum with and without roughness*, Mechanical Engineering Sharif, Vol.28 , p. 95-100. (In Persian)
5. Lotfi, A. and Rad, M., (2012), *Drag performance of divergent tubular-truncated cones: a shape optimization study*, International Journal of Environmental Science and Technology, Vol. 9, p. 105-112.
6. Sanei, H. and Rad, M., (2012), *Numerical optimization and experimental analysis of an annulus truncated conoid airfoil body in realistic dimensions and its effect on wind speed increase*, Master of Science Thesis, IAU (Science and research Branch), Tehran, Iran. (In Persian)
7. Kamali Monfared, R., (2016), *Designing of new wind turbines to generate electricity at affordable prices with condition in Iran*, Master of Science Thesis, IAU (South Tehran Branch), Tehran, Iran. (In Persian)
8. Ahmadi Asl, H., (2016), *Building of new wind turbines to generate electricity at affordable prices with condition in Iran*, Master of Science Thesis, IAU (South Tehran Branch), Tehran, Iran. (In Persian)
9. Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M., (2010), *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*, First Ed, McGraw-Hill.

## ۵- نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی‌ها با مدل ساخته شده با درصد جزیی اختلاف، منطبق با آزمایش‌ها مشاهده گردید. این انطباق ثابت کرد که طرح کاربردی بوده و می‌توان با ساخت آن برای آب نیز به سرعت بالاتری نزدیک به نتایج شبیه‌سازی دست یافت. مطابق با نتایج تجربی در هوای این غلاف‌ها در مناطقی که باد با سرعت پایین و در حدود ۳ تا ۵ متر بر ثانیه وجود دارد را به حدود ۷ تا ۱۲ متر بر ثانیه افزایش می‌دهند که سرعت مورد نیاز برای توربین‌های بادی جهت تولید برق اقتصادی است. همچنین آستانه شروع چرخش توربین کم شده و در جریان‌های با سرعت‌های بسیار کم (در محدوده ۱ متر بر ثانیه) نیز شروع به حرکت می‌کند. به علاوه متناسب با شرایط محیطی، با تغییر اندازه دهانه خروجی و ورودی می‌توان به نسبت افزایش سرعت مورد نیاز دست یافت.

در آزمایش غلاف با پروانه، تناسب سرعت‌های دورانی هریک از حالت‌ها با نسبت افزایش سرعت باد ثابت کرد که این طرح تنها یک طرح مفهومی نبوده و می‌توان از این غلاف برای توربین‌های بادی و آبی استفاده نمود. لذا با نصب یک توربین کوچک‌تر در آن به توانی معادل با توربین‌های بزرگ‌تر دست یافت. همچنین براساس محل بیشترین افزایش سرعت در گلوگاه، شکل و تعداد پره یکی از پارامترهای تاثیرگذار در بهره‌برداری بهینه از حداکثر سرعت است. با توجه به سرعت دورانی بالای پروانه‌ها می‌توان با حذف گیربکس و یا استفاده از گیربکس‌های ساده‌تر موجب کاهش اتلاف انرژی و بالاتر رفتن راندمان خروجی شد. بعلاوه این مساله باعث کاهش هزینه ساخت نیز می‌گردد. شایان ذکر است که این غلاف قابل استفاده در سیالات و صنایع دیگر نیز می‌باشد.

## ۶- مراجع

1. Akhlaghi, M. S., Rad, M. and Seif, M. S., (2010), *An investigation of drag force around cylinder and floaters by emphasizing on specific colors*, 12<sup>th</sup> National Conference of Marine Industries of Iran, Tehran, Iran. (In Persian)