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

رضا کمالی منفرد[۱] ، حمید احمدی اصل [۱*] ، منوچهر راد [۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، واحد تهران‌جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، hamid.ahmadiasl@gmail.com
[۲] استاد دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران‌جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی

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

چکیده

وجود مناطق ساحلی در شمال و جنوب ایران موجب پدید آمدن مناطق مستعد تولید برق‌آبی با انرژی امواج و جزرومد 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. به‌علاوه 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.

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

Reza Kamali Monfared[1], Hamid Ahmadi Asl[1*], Manouchehr Rad[2]

[1] M.sc Student, Dept. of Mechanical Eng., South Tehran Branch, Islamic Azad University; hamid.ahmadiasl@gmail.com
[2] 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.10.5]

۱ – مقدمه

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 تجدیدناپذیر فسیلی و کاهش سریع این منابع شده که عامل ایجاد بحران انرژی و بوجود آمدن خطری بزرگ برای ادامه حیات بشری در آینده‌ای نه چندان دور خواهد شد. از سویی دیگر، آلودگی‌های شدید محیط‌زیستی باعث برهم خوردن تعادل طبیعت، ایجاد محیطی 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 برده است.

انرژی‌های تجدیدپذیر مانند جزرومد، 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 متربرثانیه است. مناطقی با باد دائمی ولی با سرعت های 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 ایرودینامیکی 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 ۱۰ 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 ناقص تو خالی با زاویه ۱۶ درجه و زاویه خمیدگی ۰ تا ۴۵ درجه شبیه‌سازی و مدل مطلوب در رینولدزهای مختلف به صورت تجربی آزمایش شد. این پژوهش ثابت کرد که کمترین نیروی درگ درجریان آرام در مدل با زاویه خمیدگی ۳۰ درجه و کمترین نیروی درگ در جریان مغشوش در مدل با زاویه ۴۰ درجه است[۵].

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. به‌علاوه 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 مجراهای افزایش دهنده سرعت باد، ده‌ها مخروط ناقص توخالی متفاوت، طراحی و شبیه‌سازی شدند[۷]. در ادامه آزمایشات تجربی متعددی در رابطه با یک مخروط ناقص توخالی انجام شدکه 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 درغیراینصورت 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 تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود چرا که به علت پایین بودن سرعت سیال، عدد ماخ کمتر از ۰.۳ است. همچنین اگر عدد رینولدز بیش از ۱۰۰۰۰ ($Re > 10^4$) باشد لایه مرزی شکل گرفته بر پوسته داخلی مخروط ناقص، ضخامت بسیار کمی داشته و لذا فشار در خروجی مخروط تقریبا برابر فشار دوردست است. همچنین جریان خارج از لایه‌مرزی، غیرچرخشی بوده و می‌توان برای حالت جریان ورودی از دهانه بزرگ شکل۱(الف)، بین جریان آزاد دوردست و مقطع ۲ رابطه برنولی را به صورت زیر نوشت و سرعت را در مقطع ۱ به دست آورد.

$$Z_\infty + \frac{P_\infty}{\rho g} + \frac{U_\infty^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} \qquad (1)$$

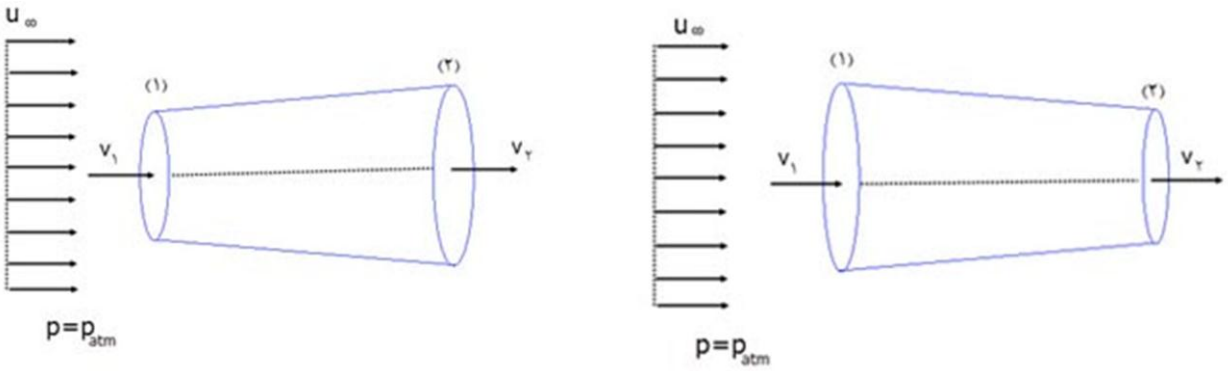
$$Z_\infty = Z_2; \qquad P_{\infty} = P_2$$
$$v_2 = U_\infty$$

همچنین طبق رابطه پیوستگی:

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.10.5]



(ب) (الف)

شکل ۱ - جریان سیال در مخروط ناقص توخالی،
(الف): در حالت جریان ورودی از دهانه بزرگ، (ب): در حالت جریان ورودی از دهانه کوچک

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.

$$A_1 > A_2 \quad => \quad A_2/A_1 < 1 \quad => \quad V_1 < V_2$$

اگر روابط برنولی و پیوستگی برای حالت جریان ورودی از دهانه کوچک شکل۱(ب) نوشته شود به دلیل اینکه سطح مقطع خروجی بزرگتر از سطح مقطع ورودی است سرعت در مقطع ورودی افزایش می‌یابد.

$$A_1 < A_2 \quad => \quad A_2/A_1 > 1 \quad => \quad V_1 > V_2$$

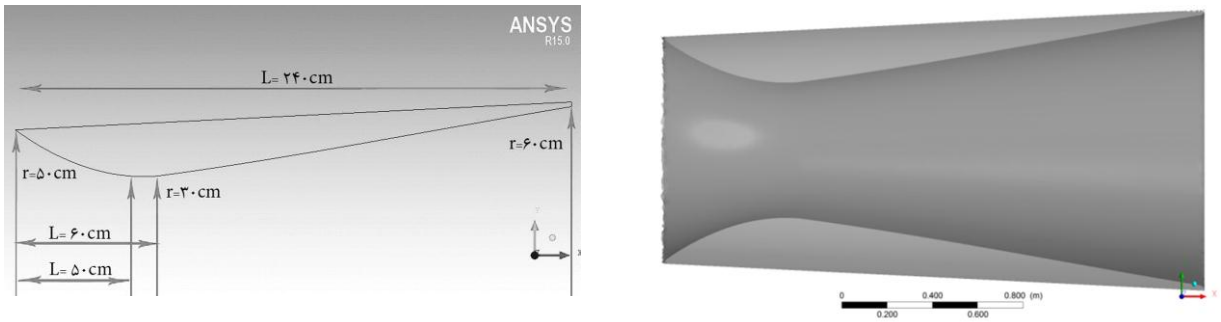
مطابق با آنچه بیان شد، با عبور جریان از دهانه بزرگ، سرعت در ورودی کاهش و فشار افزایش می‌یابد که باعث کاهش دبی ورودی می‌شود درحالیکه با ورود جریان سیال از دهانه کوچک، سرعت در ورودی افزایش و فشار کاهش می‌یابد که باعث افزایش دبی ورودی می‌شود. نکته قابل توجه این است که با ورود سیال، در سطح داخلی احتمال جدایش بوجود می‌آید اما اگر افزایش سطح مقطع 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. ازاین‌رو 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 اتلاف انرژی نگردد. بدین ترتیب می‌توان به یک افزایش سرعت مطلوب دست یافت[۹].

۳ – طراحی و شبیه‌سازی

۳-۱- طراحی غلاف

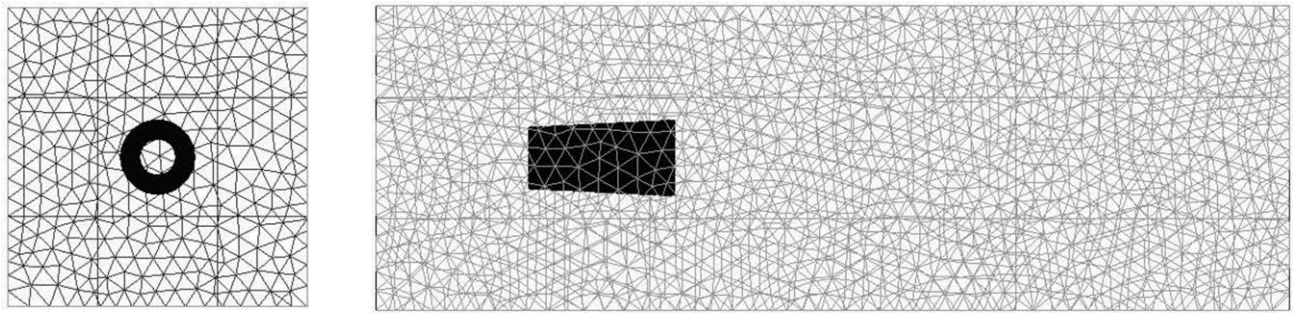
با طراحی و شبیه‌سازی طرح‌های متعددی، شکل‌هایی بدست آمد که سرعت باد را بیش از ۳ برابر نسبت به سرعت اولیه افزایش می‌دادند ولی افزایش سرعت تنها هدف طراحی نبود زیرا با کاهش بیشتر قطر گلوگاه یا افزایش قطر دهانه‌های ورودی و خروجی نیز تا چندین برابر، سرعت افزایش می‌یافت. به غیر از افزایش سرعت،



(ب) (الف)

شکل۲-(الف): هندسه سه بعدی طرح، (ب): مشخصات ابعادی طرح

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.10.5]



(ب) (الف)

شکل۳- منطقه محاسباتی (الف) نمای پهلو، (ب) نمای روبه‌رو

مساله داشتن کوتاه‌ترین طول ممکن، بزرگ بودن منطقی گلوگاه جهت نصب پروانه، کمترین جدایش بعد از گلوگاه برای کاهش نیروی درگ و ارتعاشات، کاهش آشفتگی در پشت غلاف و رسیدن سریعتر جریان خروجی به سرعت و شرایط جریان دوردست نیز جزء پارامترهای مهم طراحی بود. از میان طرح‌ها، یک طرح انتخاب شد که هندسه نهایی ایجاد شده حاصل از چرخش سطح مقطع ایرفویلی آنها حول محور xها است شکل۲(الف). در این طراحی دهانه ورودی ۱۰۰ سانتیمتر، گلوگاه ۶۰ سانتیمتر، طول ۲۴۰ سانتیمتر، محل گلوگاه در فاصله ۵۰ تا ۶۰ سانتیمتری از دهانه ورودی و خروجی ۱۲۰ سانتیمتر هستند شکل۲(ب). بدین ترتیب در این طرح وتر ایرفویل زاویه‌ای ۲.۵ درجه‌ای با افق می‌سازد که موجب می‌شود جریان داخل و بیرون غلاف با زاویه‌ای نزدیک به هم خارج شوند تا حتی‌الامکان 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.

۳-۲- فرضیات و روش حل

منطقه محاسباتی یک محیط مستطیلی شکل با طول ۱۰۰۰ و سطح مقطع ۳۰۰*۳۰۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد تا مرزهای اطراف تاثیری در نتایج نداشته باشند. غلاف در فاصله ۳۰۰ سانتیمتری از ورودی این منطقه محاسباتی قرار گرفت شکل۳. اندازه بزرگترین المان برابر۵۰ واحد (سانتیمتر) تعیین گردید و با نزدیک شدن به سطح غلاف، شبکه‌بندی ریزتر شد تا بر روی سطوح غلاف این اندازه ۲ واحد لحاظ گردید. حدود ۳ میلیون مش از نوع نامنظم تولید گردید. اولین ضخامت مش لایه‌مرزی با اندازه ۰.۱ و نسبت رشد ۱.۲ تا ۲۰ لایه تولید شد.

برای طراحی هندسه از نرم افزار ICEM CFD و برای حل عددی از نرم افزار FLUENT با دامنه حل ۳بعدی استفاده شد. در مرزهای دیواره‌های جانبی شرط لغزش برقرار بود. برای مرز ورودی فرض یکنواخت بودن جریان با بزرگی سرعت ۳ متربرثانیه 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 مغشوش 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 بالادست استفاده شد. برای جریان ورودی ۵٪ شدت آشفتگی و نسبت ویسکازیته آشفتگی ۱۰ تعیین گردید. در شبیه‌سازی‌های انجام شده جریان دوردست ۳ متربرثانیه 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.

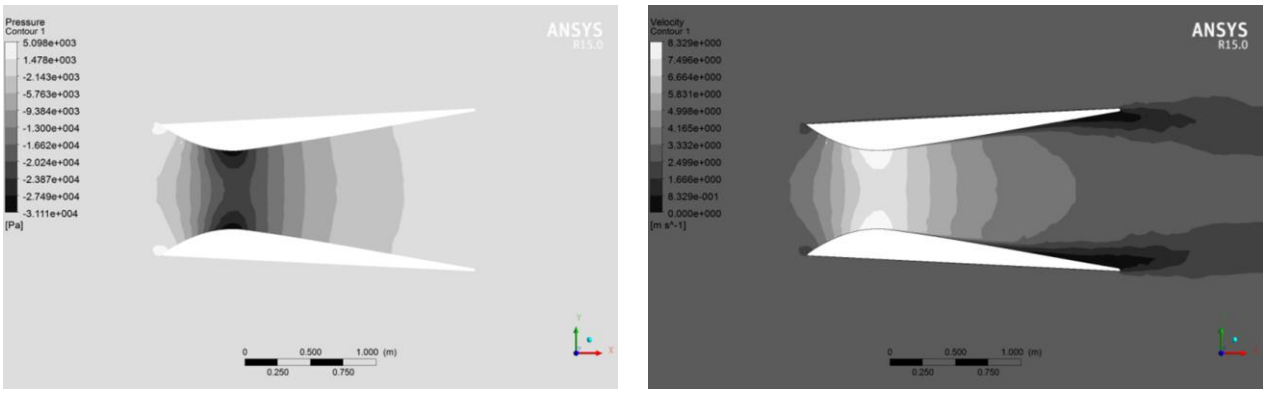
۳-۳- تحلیل نتایج عددی

شکل۲ الگوی غلاف طراحی شده را نمایش می‌دهد. این طرح مطابق با شکل۴(الف)، در شبیه‌سازی عددی برای آب سرعت در محدوده گلوگاه در بیشترین افزایش به ۸.۳۲۹ متربرثانیه رسیده و به عبارت دیگر سرعت ۲.۷۸ برابر شده است. همچنین مطابق با شکل۵(الف)، در شبیه‌سازی عددی برای هوا سرعت در محدوده گلوگاه در بیشترین افزایش به ۷.۳۹۲ متربرثانیه رسیده و به عبارت دیگر سرعت ۲.۴۶ برابر شده است. همچنین نسبت افزایش سرعت در گلوگاه به دهانه ورودی ۲.۶۰ 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 دوردست وجود دارد. با عبور از این مقطع و نزدیک شدن به گلوگاه با کاهش قطر، سرعت رو به افزایش است. مشاهده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.10.5]



(ب) (الف)

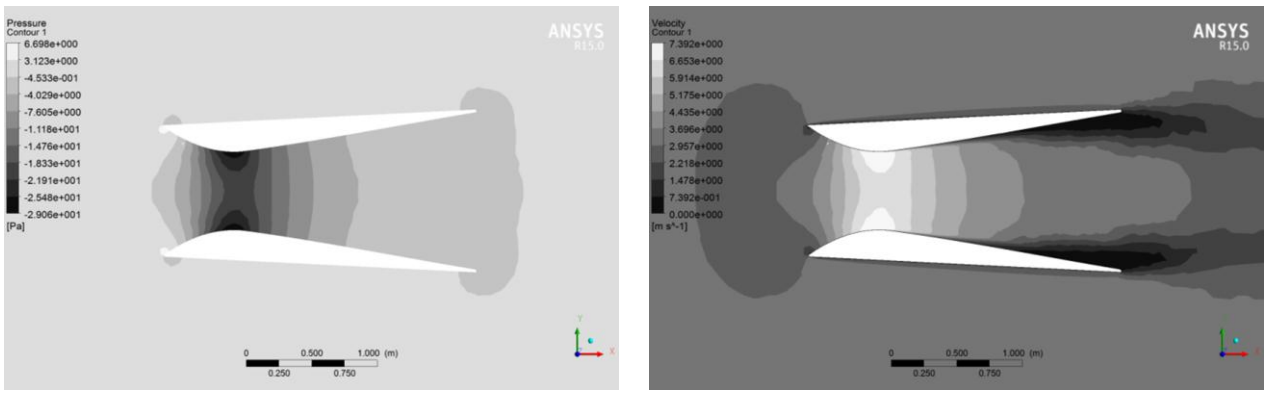
شکل۴- نتایج حل عددی با فرض سیال آب (الف) کانتور سرعت، (ب) کانتور فشار

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 حایز 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 یکنواخت شدن است. بدیهی 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 حداکثر 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

۴-۱- 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 کامپیوتری مطابق باشد شکل۶ (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



(ب) (الف)

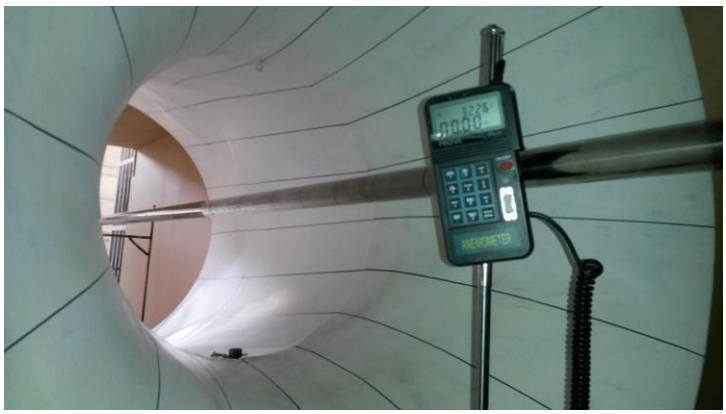
شکل۵- نتایج حل عددی با فرض سیال هوا (الف) کانتور سرعت، (ب) کانتور فشار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.10.5]



(الف)



(ب)

شکل۶- (الف) بادسنج (ب) غلاف

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 ۱۶۰*۱۶۰ سانتیمتر و طول ۱۰ متر بود. غلاف در مقطعی از تونل با باد نسبتا یکنواخت و سرعت متوسط ۳.۱۸متربرثانیه قرار گرفت. اندازه‌گیری سرعت توسط بادسنج PROVA مدل AVM-07 که دقت آن ۰.۰۱ متربرثانیه و حداقل میزان قابل اندازه‌گیری با آن ۰.۳ متربرثانیه است انجام گرفتشکل۶(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 اندازه‌گیری یک مقدار ماکزیمم و یک مقدار مینیمم توسط دستگاه نمایش داده می‌شد و مجموعا تعداد ۷۳۹۲ سرعت ثبت گردید. با میانگین‌گیری از تمامی نتایج ۷بار 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. جدول۱ برای مقطع ورودی، جدول۲ برای مقطع شروع گلوگاه در فاصله ۵۰ سانتیمتری از مقطع ورودی، جدول۳ برای مقطع پایان گلوگاه در فاصله ۶۰ سانتیمتری از مقطع ورودی و جدول۴ برای مقطع خروجی ارائه 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 هرکدام 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 (جدول۱) افت سرعتی در کنارها دارد که با نزدیک شدن به سمت مرکز ورودی، مقدار آن بیشتر می‌شود.

طبق جدول۲ 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

جدول۱- مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده در مقطع ورودی

شعاع ۳	۲.۳۶	۲۳۲	۲.۲۴	۲.۲۰	۲.۲۲	۲.۲۰	۲.۳۸	۲.۳۲	۲.۳۸	۲.۲۰	۲.۱۳	۲.۱۰	۲.۳۸	۲.۲۱	۲.۲۷	۲.۲۱	۲.۱۹	۲.۴۲
شعاع ۲	۳.۱۵		۲.۹۸		۳.۰۵		۳.۲۳		۳.۲۱		۳.۰۸		۳.۰۶		۳.۰۵		
شعاع ۱	۳.۴۶		۳.۳۷		۳.۳۷		۳.۴۸		۳.۵۰		۳.۴۵		۳.۳۵		۳.۳۲		
مرکز	۳.۵۱																	

جدول۲- مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده در ابتدای گلوگاه

شعاع ۳	۶.۸۱	۶.۸۳	۶.۹۳	۷.۰۴	۷.۰۱	۷.۰۳	۶.۹۸	۶.۵۷	۶.۶۹	۶.۷۳	۶.۸۶	۶.۸۰	۶.۸۳	۶.۶۸	۶.۷۶	۶.۷۷
شعاع ۲	۷.۷۹		۷.۸۹		۷.۹۴		۷.۹۸		۷.۸۵		۷.۸۹		۷.۹۸		۷.۹۲	
شعاع ۱	۷.۷۰		۷.۷۰		۷.۶۶		۷.۷۳		۷.۷۲		۷.۸۵		۷.۸۰		۷.۷۸	
مرکز	۷.۴۸															

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.10.5]

جدول۳- مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده در انتهای گلوگاه

شعاع ۳	۶.۲۷	۵.۹۳	۵.۸۷	۶.۱۱	۶.۶۹	۶.۹۹	۶.۶۹	۶.۳۲	۵.۷۶	۶.۱۰	۶.۲۸	۶	۶.۱۵	۶.۱۲	۵.۹۱	۶.۲۶
شعاع ۲	۷.۷۶		۷.۷۹		۷.۹۶		۷.۹۶		۷.۷۶		۷.۹۴		۸		۷.۷۹	
شعاع ۱	۷.۶۱		۷.۶۵		۷.۷۰		۷.۶۹		۷.۶۲		۷.۵۷		۷.۶۲		۷.۵۹	
مرکز	۷.۱۴															

جدول۴- مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده در خروجی

شعاع ۳	۱.۴۱	۱.۳۱	۱.۱۶	۱.۱۳	۰.۶۹	۰.۴۱	۰.۳۴	۰.۲۹	۰.۳۶	۰.۳۷	۰.۳۸	۰.۳۹	۰.۵۰	۰.۵۵	۰.۸۰	۱.۰۹
شعاع ۲	۲.۸۱		۲.۷۹		۲.۵۲		۲.۵۹		۲.۵۲		۲.۴۶		۲.۳۱		۲.۶۵	
شعاع ۱	۳.۳۹		۳.۲۱		۳.۲۲		۳.۲۲		۳.۳۰		۳.۲۸		۳.۳۱		۳.۲۹	
مرکز	۳.۳۶															

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

در جدول۳ یعنی پایان گلوگاه 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 بروز پیدا کرده است

در جدول۴ مقادیر اندازه‌گیری شده در ناحیه جداره غلاف جدایش بوجود آمده را به خوبی نشان می‌دهد. در حین آزمایش‌ها پروانه بادسنج به صورت کاملا ساکن بود و یا چرخش‌های جزئی و متناوبی به صورت ساعتگرد و پادساعتگرد داشت که نشان از قرار گرفتن در ناحیه جدایش داشت.

متناسب با سرعت‌های نقاط و نسبت مساحت هرکدام، برای هر مقطع یک سرعت متوسط محاسبه شد. نسبت سرعت متوسط گلوگاه به ورودی ۲.۵۷ و نسبت سرعت متوسط گلوگاه به باد دوردست۲.۳۲ بدست آمد که این مقادیر بسیار نزدیک به نتایج شبیه‌سازی بود. مطابق با معادله توان توربین با افزایش ۲.۳۲ برابری سرعت، توان ۱۲.۵ برابر افزایش می‌یابد.

۴-۲- غلاف با توربین

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. دقیقا همان پروانه‌ها بدون غلاف در شرایط یکسان در مقطعی از تونل که گلوگاه قرار داشت تست شدند. در جدول۵ سرعت دورانی هریک از پروانه‌ها در حالت بدون غلاف، با غلاف و نسبت افزایش سرعت هریک آمده است.

جدول۵- سرعت‌های دورانی پروانه‌ها داخل و بیرون غلاف و نسبت افزایش آنها

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

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 خفقان 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.



شکل۷: غلاف با پروانه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.10.5]

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 هوا، این غلاف‌ها در مناطقی که باد با سرعت پایین و در حدود ۳ تا ۵ متربرثانیه وجود دارد را به حدود ۷ تا ۱۲ متربرثانیه 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 ۱متربرثانیه) 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*, 12th National Conference of Marine Industries of Iran, Tehran, Iran. (In Persian)
2. Azimi, A. and Rad, M., (2009), *Investigation flow around super cavitation under water bodies*, 17th 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.10.5]