

بررسی عددی و تجربی تاثیرهای غلاف یک توربین داکتی بر روی جریان‌های بالادست و پایین‌دست

حمید احمدی اصل^۱، رضا کمالی منفرد^{۱*}، منوچهر راد^۲

^۱ گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران reza.kamalimonfared@gmail.com

^۲ استاد دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷	وجود مناطق ساحلی گسترده در ایران، این کشور را تبدیل به منطقه‌ای بالقوه برای تولید برق آبی کرده است. توربین‌های داکتی یا غلافدار با افزایش سرعت سیال، توان تولیدی توربین را بالا برده و لذا مناطق بالقوه تولید برق را به مناطق بالفعل تبدیل می‌کند. هدف از این مقاله بررسی اثرات یک غلاف با سطح مقطع ایرفویلی بر جریان بالادست و پایین‌دست است که از جمله موارد مهم جهت شناخت عملکرد و بکارگیری این نوع توربین‌ها است. از این‌رو، سرعت سیال مجموعاً در هشت مقطع در جلو و پشت غلاف در یک تونل باد اندازه‌گیری و پروفیل‌های حاصله با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه شد. نتایج نشان دادند که افزایش ناچیز فشار در جلو و از بین رفتن سریع اثرات غلاف در پشت آن به دلیل طراحی خط جریانی خاص، از جمله مزایای آن است که باعث می‌شود بتوان تعداد بیشتری از این غلاف در یک منطقه مشخص نصب نمود.
کلمات کلیدی: تأثیر غلاف بر جریان یکنواختی جریان پایین‌دست پروفیل سرعت توربین داکتی	

Numerical and Experimental Investigation of Shroud Effects of a Ducted Turbine on Upwind and Downwind Flows

Hamid Ahmadi Asl¹, Reza Kamali Monfared^{1*}, Manouchehr Rad²

¹ Dept. of Mechanical Eng., South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; reza.kamalimonfared@gmail.com

² Professor, Faculty of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 25 Jun. 2016

Accepted: 27 Nov. 2016

Keywords:

Shroud effects on flow

Downwind flow uniformity

Velocity profile

Ducted turbine

ABSTRACT

Existence of coastal regions in Iran has made this country a potential area to produce hydro-electric. Ducted or shrouded turbines generate more output power by increasing fluid velocity; therefore, they turn potential areas to actual areas to produce electricity. The purpose of this study is to investigate effects of a shroud with airfoil cross-section form on upwind and downwind streams which is a vital parameter of performance and usage of this kind of turbines. To do this, the fluid velocity was measured at eight sections behind and in front of the shroud in total and the velocity profiles were compared with numerical simulation results. The results showed that the inconsiderable increase of pressure in front and fast disappearance of the effects of shroud behind it, which is as a result of specific streamed-line design, are some advantages that cause to install more shrouds in a defined area.

۱ - مقدمه

توربین‌های آبی و بادی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. از پارامترهای مهم در مورد کارآمدی این توربین‌ها، انرژی جنبشی و سرعت سیال است.

امروزه تقاضای روزافزون برای انرژی بیشتر، بهره‌برداری از انرژی‌های نو را در کانون توجه قرار داده است. انرژی‌های جزرومد، آبی و بادی که از انواع این انرژی‌های پاک هستند توسط

توربین‌های غلاف‌دار یا همان توربین‌های داکتی که اخیراً بسیار مورد توجه و بررسی واقع شده، نسل جدیدی از توربین‌ها هستند که با افزایش سرعت سیال باعث افزایش بهره‌برداری از انرژی جریان و تولید توان بالاتری می‌شوند. در این توربین‌ها که از یک توربین آبی یا بادی و یک مجرای واگرا یا همگرا-واگرا تشکیل می‌شوند، سرعت سیال توسط مجرا بالا رفته و در محلی که جریان بیشترین سرعت را دارد، توربین قرار می‌گیرد. این نوع توربین‌ها را می‌توان از نظر طراحی، اثرات آن‌ها بر روی جریان عبوری و پدیده‌های مربوط به آن بررسی نمود.

در این رابطه مطالعه‌ای عددی با روش توربولانسی کی‌اِپسیلون بر روی عملکرد دیفیوزرها جهت بالا بردن انرژی جنبشی توربین‌های آبی انجام گرفت. نتایج نشان داد که توربین با مجرای واگرا $3/1$ برابر توان بیشتری در مقایسه با حالت بدون مجرا تولید می‌کند [۱]. به طور مشابه، چندین نوع مجرا جهت بالا بردن سرعت جریان و بالا بردن توان تولیدی توربین‌های آبی محوری طراحی شد که با روش توربولانسی کی‌اِپسیلون مدل شدند [۲]. همچنین در پژوهشی دیگر، یک مجرا برای توربین‌های آبی محوری طراحی و به روش کدنویسی شبیه‌سازی عددی شد. داده‌های حاصل از دو حالت با مجرا و بدون مجرا با هم مقایسه شدند که یک بهبود قابل توجه در بازده توربین با مجرا مشاهده گردید [۳]. در همین رابطه، یک شبیه‌سازی عددی با کدنویسی برای محاسبه توان خروجی توربین‌های آبی محوری داکتی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت [۴]. در تحقیقی دیگر، عملکرد یک توربین بادی با مجرای واگرا و بدون آن بررسی شد. نتایج به وضوح نشان دادند که یک واگرایی مطلوب می‌تواند دبی جرمی بالاتری را بر روی توربین اعمال کند. در نتیجه توربین‌های داکتی می‌تواند توان خروجی بالاتری را تولید کنند [۵]. نوع دیگری از توربین‌های داکتی که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند شیپوره‌های فلنج‌دار هستند. مجرای این نوع توربین‌ها شامل یک مجرای واگراست که در انتهای ناحیه واگرایی آنها یک فلنج متصل است. در این رابطه یک شیپوره فلنج‌دار با یک توربین بادی در داخل آن بررسی شد. مطابق با داده‌ها، توان توربین داکتی فلنج‌دار بین 2 تا 5 برابر حالت بدون آن می‌شد [۶]. سپس پارامترهایی از جمله ارتفاع فلنج، نسبت هاب، زاویه بازشدگی پوسته و شکل پوسته به روش تجربی بهینه‌سازی شد [۷]. همچنین در پژوهش عددی RANS و تجربی دیگری مشخص شد که ضریب توان در توربین‌های داکتی فلنج‌دار بالاتر از ضریب بتز است [۸]. در ادامه بررسی‌های عددی انجام شده بر روی یک نوع توربین داکتی فلنج‌دار با مدل‌های توربولانسی کی‌اِپسیلون و اسپالارت‌آلماراس نشان داد سرعت جریان $1/6$ تا $2/1$ برابر افزایش می‌یابد [۹]. بطور مشابه در بررسی‌های انجام شده بصورت عددی با روش توربولانسی K- ω و اعتبارسنجی تجربی افزایش چشمگیر

سرعت جریان در این نوع توربین‌ها مشاهده شد و یک نسبت بحرانی برای دهانه ورودی به ارتفاع فلنج تعیین گردید [۱۰]. در یک تحقیق عددی با روش توربولانسی کی‌اِپسیلون، با بررسی رفتار جریان، محل بهینه نصب توربین در مجراهای واگرا بررسی شد [۱۱]. در مطالعه دیگری یک مجرای واگرا، سرعت جریان تا $1/7$ برابر جریان دوردست بالا رفت [۱۲]. همچنین با اعمال پله‌های ابتکاری در داخل یک مجرای واگرا با شبیه‌سازی RANS، تاثیرهای آن بررسی و نتایج مثبت آن مشاهده شد [۱۳]. همچنین چندین نوع توربین بادی داکتی طراحی و به روش کی‌اِپسیلون شبیه‌سازی عددی شد و نشان داد که سرعت جریان بین 2 تا 3 برابر سرعت اولیه افزایش می‌یابد [۱۴]. سپس یکی از طرح‌های برگزیده به صورت تجربی ساخته و آزمایش شد. نتایج مطابق با شبیه‌سازی عددی بود [۱۵].

در مطالعه تجربی انجام شده بر روی یک نوع توربین داکتی نشان داد توان خروجی آن 4 برابر بیشتر از حالت بدون داکت بود [۱۶]. بنابراین یک غلاف جهت افزایش سرعت سیال طراحی و ساخته شده است. پوسته این غلاف با سطح مقطع ایرفویلی شکل سرعت باد را تا $2/46$ برابر و سرعت جریان آب را $2/78$ برابر جریان دور دست می‌کند [۱۷]. در این مقاله هدف، بررسی اثرات یک غلاف با سطح مقطع ایرفویلی بر جریان بالادست و پایین‌دست است که از جمله موارد مهم جهت شناخت عملکرد و بکارگیری این نوع توربین‌ها است. در کارهای انجام شده پیشین تمرکز بر روی طراحی یک غلاف مطلوب بوده و توجهی به اثرات آن بر روی جریان عبوری نشده است درحالی که اثر غلاف بر روی جریان علی‌الخصوص در پشت آن حائز اهمیت بوده و تعیین کننده تعداد نصب آنها در یک منطقه مشخص و محدود می‌باشد. از این رو، سرعت سیال به صورت تجربی مجموعاً در هشت مقطع در جلو و پشت غلاف در یک تونل باد اندازه‌گیری و پروفیل‌های حاصله با نتایج شبیه‌سازی عددی که از روش کی‌اِپسیلون بدست آمده بود مقایسه شد. همچنین باید اشاره شود که در این مقاله مجرای توربین داکتی خاص مورد بررسی، غلاف نامیده می‌شود.

۲- شبیه‌سازی عددی

۲-۱- معادلات حاکم

برای سیالات نیوتنی که تنش‌ها با نرخ کرنش رابطه‌ای خطی دارند، معادلات بقای اندازه حرکت خطی یا همان معادلات ناویراستوکس صادق است.

معادلات ناویراستوکس (۱) همراه با معادله پیوستگی (۲) می‌تواند به طور ریاضی، جریان غیرقابل تراکم سیال نیوتونی را کاملاً تشریح کند. دانسته و لزجت در جریان غیرقابل تراکم با درجه حرارت ثابت مقادیر ثابتی می‌باشند. چهار مجهول (سه مولفه سرعت و یک

مولفه فشار) وجود دارند که با سه معادله فوق و معادله پیوستگی قابل حل هستند.

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

در جریانی که تنش برشی صفر باشد، معادلات ناویراستوکس تبدیل به معادلات اوایلر (۳) می‌شوند.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z \end{aligned} \quad (3)$$

در ادامه با فرض شرایط غیرلزج، دائمی، غیرقابل تراکم و غیرچرخشی در جریان سیال، رابطه برنولی (۴) حاصل می‌گردد. رابطه برنولی بین هر دو نقطه در میدان جریان غیر چرخشی صادق است.

$$Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} = cte \quad (4)$$

بدین ترتیب می‌توان بیان داشت که سیال در خارج از ناحیه لایه مرزی و نواحی دوردست غیرچرخشی، غیرلزج و دائمی بوده ولی در ناحیه لایه مرزی این شرایط صادق نیستند.

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، باعث افزایش سرعت در مقطع ورودی آن 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 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 لایه مرزی، غیرچرخشی بوده و می‌توان برای حالت جریان ورودی از دهانه کوچک (مقطع ۱)، بین جریان آزاد دوردست و دهانه بزرگ (مقطع ۲) رابطه برنولی را به صورت زیر نوشت و سرعت را در مقطع ۱ به دست آورد.

$$Z_{\infty} + \frac{P_{\infty}}{\rho g} + \frac{U_{\infty}^2}{2g} = Z_r + \frac{P_r}{\rho g} + \frac{U_r^2}{2g} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Z_{\infty} &= Z_r; & P_{\infty} &= P_r \\ v_r &= U_{\infty} \end{aligned}$$

همچنین طبق رابطه پیوستگی:

$$v_1 A_1 = v_r A_r \quad \Rightarrow \quad v_1 = \frac{A_r}{A_1} v_r \quad (6)$$

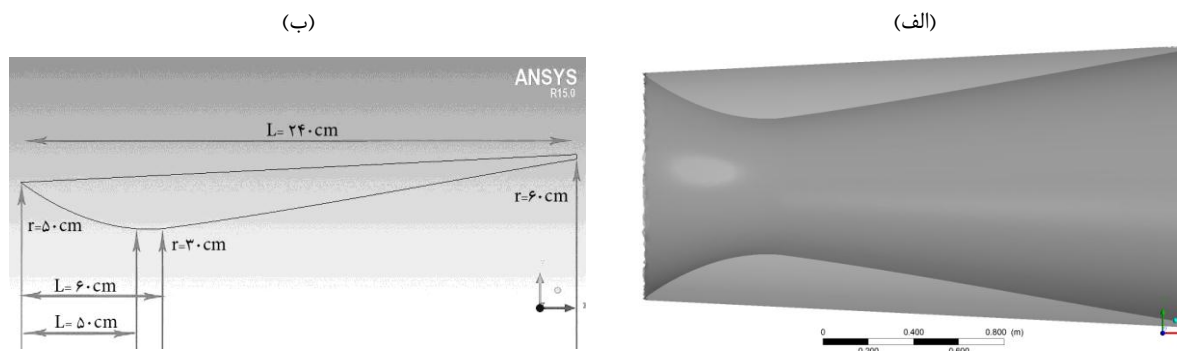
که v_1 سرعت جریان در ورودی، v_r سرعت جریان در خروجی، P_1 فشار در ورودی، P_r فشار در خروجی، A_1 سطح مقطع ورودی و A_r سطح مقطع خروجی است. براساس روابط (۵) و (۶)، سرعت در مقطع ورودی با اندازه نسبت سطح مقطع‌ها رابطه دارد. در حالت ورودی از دهانه کوچکتر، به علت اینکه این نسبت بیشتر از ۱ است، سرعت در ورودی افزایش می‌یابد.

$A_1 < A_r \quad \Rightarrow \quad A_r/A_1 > 1 \quad \Rightarrow \quad V_1 > V_r$
مطابق با آنچه بیان شد، با ورود جریان سیال از دهانه کوچک، سرعت در ورودی افزایش و فشار کاهش می‌یابد که باعث افزایش دبی ورودی می‌شود.

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 این رو با ایجاد سطح مقطع ایرفویلی برای مخروط ناقص 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.

۲-۲- فرضیات اولیه و روش حل

پیش از بررسی نتایج عددی غلاف مذکور که در شکل ۱ مشخصات ابعادی آن نمایش داده شده، ابتدا فرضیات اولیه در نظر گرفته شده بیان می‌گردد. در شبیه‌سازی صورت گرفته که با نرم‌افزار Ansys



شکل ۱- (الف): هندسه سه بعدی طرح، (ب): مشخصات ابعادی طرح [۱۷]

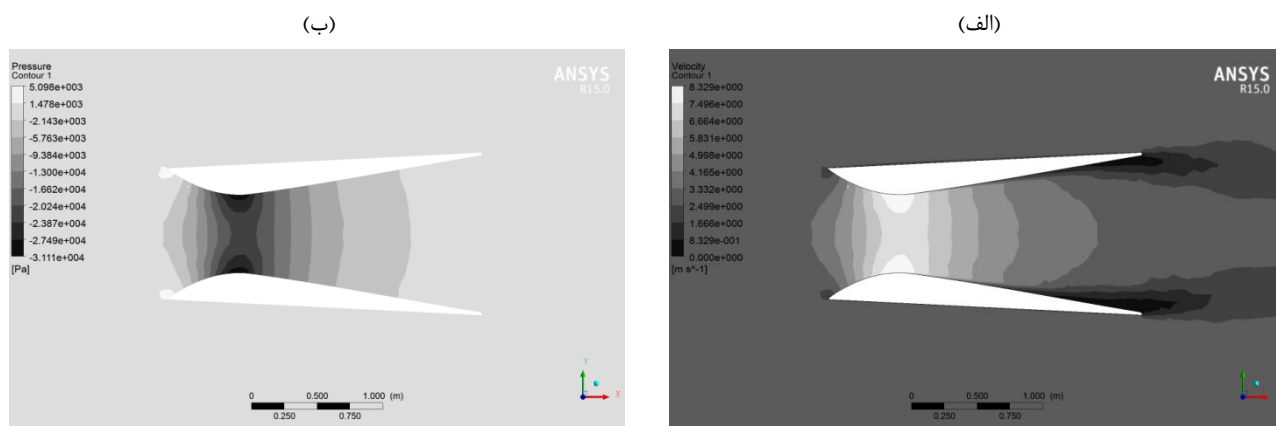
لایه مرزی با اندازه 0.1 و نسبت رشد $1/2$ تا 20 لایه تولید شد. برای ورودی فرض یکنواخت بودن جریان در شرایط استاندارد و شرط مرزی خروجی برابر با فشار استاندارد انتخاب گردید. برای دیوارهای جانبی شرط تقارن و برای جدار غلاف شرط عدم لغزش برقرار بود. حل در محیط مغشوش و با مدل آشفتگی کی‌آپسیلون استاندارد انجام شد. برای مدل کردن جریان نزدیک جداره روش Scalable wall function و برای ارتباط بین سرعت و فشار روش تصحیح فشار SIMPLE تعیین شد. برای فشار و مومنوم از دقت مرتبه دوم استفاده شد. برای جریان ورودی 5% شدت آشفتگی و نسبت ویسکوزیته آشفتگی 10 تعیین گردید.

۲-۳- بحث و بررسی نتایج

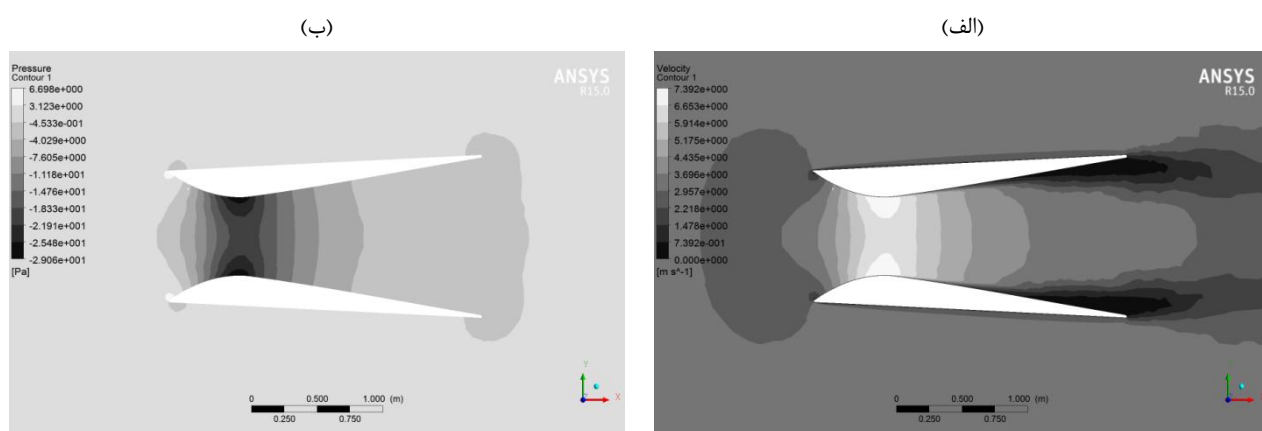
طبق نتایج بدست آمده، غلاف سرعت آب را به طور عددی حداکثر تا $2/78$ و سرعت باد را $2/46$ برابر سرعت جریان دوردست بالا می‌برد. فشار در هر دو سیال پیش از ورود، در ناحیه جلوی غلاف به صورت جزئی افزایش می‌یابد که باعث ایجاد افتی ناچیز در سرعت سیال ورودی می‌گردد. در ناحیه پشت غلاف نیز، به دلیل اثرات ناشی از واگرایی پوسته خروجی و ناحیه برخاستگی، کانتورهای سرعت و فشاری به صورت شکل ۲ و ۳ پدید می‌آورد.

در ناحیه برخاستگی سرعت نزدیک به صفر است و اختلاف زیادی با سرعت ناحیه مرکزی پشت غلاف دارد. تغییرات سرعت و فشار در پشت غلاف از آن جهت حائز اهمیت است که تعیین کننده فاصله یکنواختی جریان از پشت آن بوده که در تعیین فواصل نصب این غلاف‌ها در پشت یکدیگر تاثیرگذار است. با توجه به سطح مقطع ایرفویلی، طراحی غلاف خط جریانی بوده و لذا جریان در نزدیکترین فاصله ممکن بعد از غلاف شروع به یکنواخت شدن می‌کند. به عبارت دیگر، ناحیه برخاستگی در کمتر از 1 متر بعد از غلاف از بین می‌رود. بنابراین توربین‌های قرار گرفته در ردیف‌های بعدی نیز عملکردی نزدیک به توربین‌های ردیف اول خواهند داشت. جریان غیریکنواخت باعث تغییرات شدید در سرعت جریان

Fluent انجام شده، سرعت جریان ورودی 3 متر بر ثانیه فرض شده است. ابعاد میدان حل و محل قرارگیری غلاف در آن بر مبنای مطالعات و بررسی‌هایی طی مراحل شبیه‌سازی عددی تعیین شد به نحوی که اثرات دیوارهای جانبی میدان، باعث ایجاد خطا و تاثیر در نتایج نشده و در ضمن تمامی پدیده‌ها در جلو، عقب و اطراف غلاف به طور کامل نمایان گردند. بدین ترتیب منطقه محاسباتی یک محیط مستطیلی شکل با سطح مقطع 300×300 و طول 1000 سانتیمتر در نظر گرفته شد. غلاف در فاصله 300 سانتیمتری از ورودی این منطقه محاسباتی قرار گرفت. اندازه بزرگترین المان برابر 50 واحد (سانتیمتر) تعیین گردید و با نزدیک شدن به سطح غلاف، شبکه‌بندی ریزتر شد تا بر روی سطوح غلاف این اندازه 2 واحد لحاظ گردید. کیفیت شبکه‌بندی نقش مهمی در افزایش دقت حل عددی و کاهش خطاهای محاسباتی ایفا می‌کند. یکی از شاخص‌های کیفیت شبکه، نسبت منطری است که از تقسیم ماکزیمم به مینیمم فاصله یک گره به دیگر گره‌ها بدست می‌آید و نباید از 200 بیشتر گردد. از آنجایی که دامنه حل سیال به صورت گسسته در نظر گرفته می‌شود، در نواحی که گرادیان‌های شدید وجود دارد، شبکه‌بندی باید به قدر کافی ریز باشد تا تغییرات پارامترهای جریانی به خوبی در نظر گرفته شوند. همچنین نتایج باید نسبت به تعداد المان‌های شبکه محاسباتی استقلال داشته باشند. جهت ارزشیابی نتایج و تخمین خطای گسسته‌سازی از روش شاخص همگرایی شبکه استفاده شده است. این روش که به نوعی برگرفته از روش رینولدز است اختلاف نسبی نتایج بین چند حل گسسته‌سازی شده را نشان می‌دهد. با توجه مدل کردن جریان نزدیک جداره، عدد رینولدز و این مسئله که y^+ باید بین 30 تا 300 باشد، شبیه‌سازی در شبکه‌های مختلف بررسی شد و نتایج نشان داد که برای شبکه‌های با مش درشت‌تر نتایج با اختلاف قابل توجه همراه بوده و برای شبکه با مش‌های ریزتر نتایج نادرستی به دلیل کمتر شدن y^+ از مقدار 30 حاصل می‌شود، لذا حدود 3 میلیون مش از نوع نامنظم تولید گردید. اولین ضخامت مش



شکل ۲- نتایج حل عددی با فرض سیال آب (الف) کانتور سرعت، (ب) کانتور فشار [۱۷]



شکل ۳- نتایج حل عددی با فرض سیال هوا (الف) کانتور سرعت، (ب) کانتور فشار [۱۷]

همان ابعاد شبیه‌سازی شده ساخته شد (شکل ۴). به دلیل بزرگ بودن ابعاد غلاف و احتیاج به یک حوضچه کشش بزرگ، غلاف در یک تونل باد تست شد چرا که اگر 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

ورودی به غلاف شده و علاوه بر ایجاد دور متغیر برای پروانه، احتمالا موجب لرزش پروانه و غلاف می‌گردد.

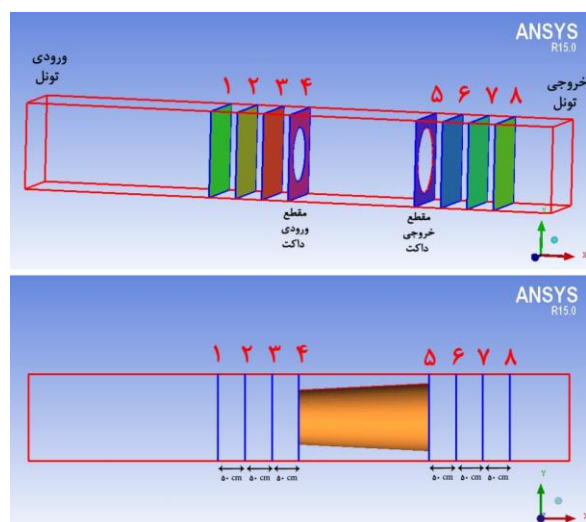
۳- آزمایشات تجربی

۳-۱- اندازه‌گیری مقاطع قبل و بعد از غلاف

جهت اعتبارسنجی صحت نتایج شبیه‌سازی عددی، غلاف دقیقا با



شکل ۴- (الف) نمای پهلوی (ب) نمای روبه‌رو

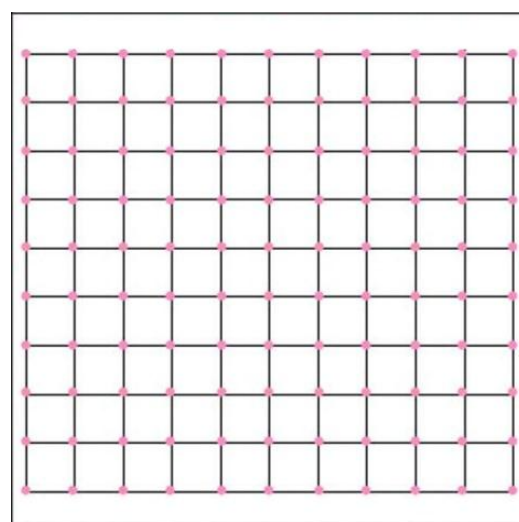


شکل ۶: محل مقاطع اندازه‌گیری شده در تونل

مقدار می‌باشد. یکای سرعت برحسب متربرثانیه و مقاطع برحسب سانتیمتر است.

۳-۲- بحث و مقایسه نتایج

با کنار هم گذاشتن و مقایسه پروفیل‌های سرعت می‌توان تاثیرهای غلاف روی جریان را به خوبی مشاهده نمود. جریان در مقطع اول چندان یکنواخت نیست. با گذر از آن، در مقطع بعدی یکنواختی بیشتر شده و در مقطع سوم سرعت تا حد قابل قبولی یکنواخت شده است. همچنین می‌توان شکل مقعر این پروفیل‌ها را به دلیل بالا بودن فشار در جلوی دهانه ورودی غلاف دانست. در مقطع ۴ دقیقاً جایی از تونل که جریان سرعت یکنواخت و قابل قبولی داشت، ورودی غلاف واقع شده است. در مقطع ۴ و ۵ در قسمت میانی، حالت محدب شکل پروفیل ناشی از تاثیرهای غلاف روی جریان است. در مقطع ۵ یک ناحیه فرو رفته به شکل دایره وجود دارد که نشان‌دهنده محل جداره خروجی و ناحیه برخواستگی است. در پروفیل سرعت این مقطع به راحتی می‌توان ناحیه برخواستگی و اثرات آن که در شبیه‌سازی عددی نیز وجود داشت به خوبی مشاهده نمود. سرعت‌هایی که در این ناحیه اندازه‌گیری شده بسیار مقادیر کمی داشتند و به صفر نزدیک بودند. در عمل نیز در حین انجام آزمایشات پروانه بادنچ به صورت متناوب تکان می‌خورد به نحوی که لحظاتی چرخش‌های جزئی ساعتگرد و پادساعتگرد داشت و لحظاتی در حالت سکون کامل بود. در مقطع ششم، پروفیل سرعت جریان خروجی از غلاف همچنان حالت محدب شکل خود را حفظ کرده است. شکل پروفیل حاصله نشان می‌دهد که اگرچه همچنان اثرات غلاف بعد از خروج از آن تا حدی شکل خود را حفظ می‌کند ولی در حقیقت جریان‌های بیرونی و داخلی سرعت یکنواختی بالایی دارند. در مقطع هفتم یعنی ۱ متر بعد از غلاف

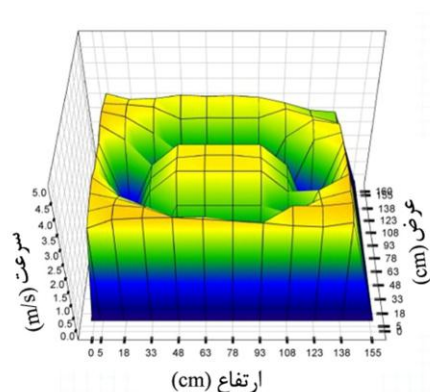
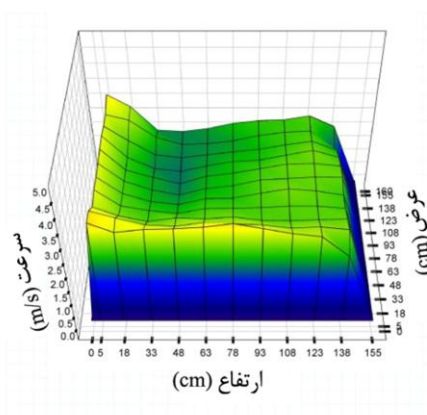
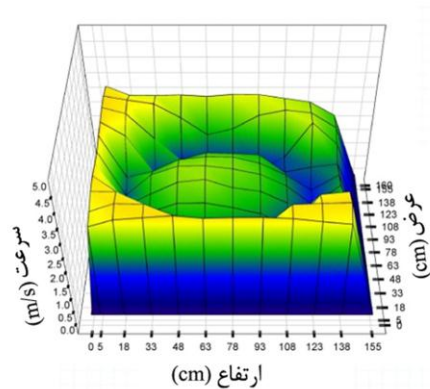
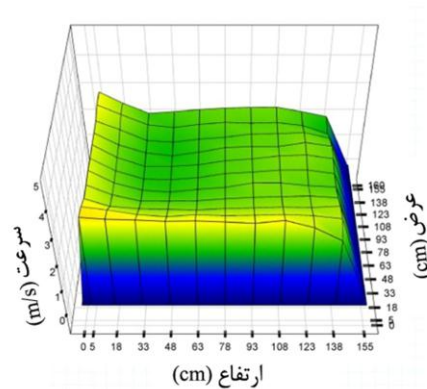
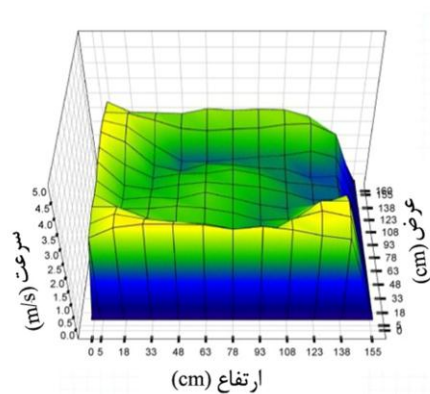
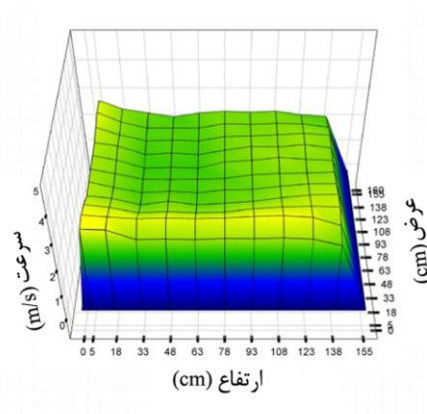
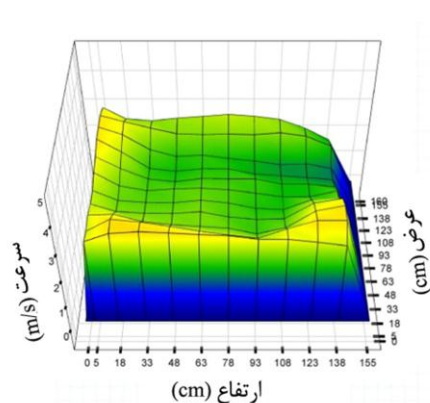
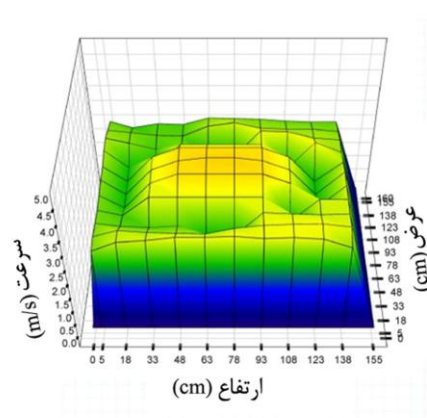


شکل ۵- توزیع نقاط اندازه‌گیری شده در هر مقطع

یکنواخت و سرعت متوسط $3/18$ متربرثانیه قرار گرفت. با آزمایش غلاف با ابعاد واقعی مشخص شد که سرعت جریان در گلوگاه به طور میانگین تا $2/32$ برابر جریان دوردست افزایش می‌یابد. جهت بررسی تجربی رفتار جریان در بالادست و پایین دست غلاف، سرعت در ۸ مقطع از تونل و در هر مقطع در ۱۱۰ نقطه اندازه‌گیری شد به نحوی که هر نقطه از نقاط همجوار خود ۱۵ سانتیمتر فاصله داشت. چگونگی توزیع نقاط در هر مقطع در شکل ۵ نمایش داده شده است. مطابق شکل ۶ سه مقطع از تونل در جلوی غلاف و سه مقطع در پشت غلاف اندازه‌گیری شد. این

مقاطع از یکدیگر ۵۰ سانتیمتر فاصله داشتند و در فواصل ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ سانتیمتری از ورودی و خروجی غلاف قرار گرفتند. همچنین سرعت‌های مقاطع روی دهانه‌های ورودی و خروجی غلاف اندازه‌گیری شد که در مجموع ۸ مقطع بوجود آمد که از ۱ تا ۸ نامگذاری شدند. اندازه‌گیری سرعت توسط بادنچ PROVA مدل AVM-07 که دقت آن $0/01$ متربرثانیه و حداقل میزان قابل اندازه‌گیری با آن $0/3$ متربرثانیه است، انجام گرفت. برای حصول نتایج دقیق و تکرارپذیر، اندازه‌گیری این مقاطع ۷ بار تکرار و در طول آزمایش هر یک ساعت یکبار دما، فشار و درصد رطوبت هوا با ساعت و تاریخ ثبت شد. در مجموع ۸۸۰ نقطه اندازه‌گیری شد و ۶۱۶۰ سرعت ثبت شد. مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر نقطه (که بسیار به هم نزدیک بودند) میانگین‌گیری شده و به آن نقطه یک سرعت میانگین اختصاص داده می‌شد.

در پایان با استفاده از مقادیر بدست آمده برای هر مقطع، یک پروفیل سرعت تهیه گردید. پروفیل سرعت این ۸ مقطع در شکل ۷ ارائه می‌گردند. قابل ذکر است که تغییرات رنگ پروفیل‌های سرعت باد رسم شده برای مقاطع تونل باد از آبی تا نارنجی به معنای تغییرات سرعت از کمترین مقدار (صفر روی جداره‌ها) تا بیشترین



شکل ۷: تمامی ۸ مقطع قبل و بعد از غلاف

که خط جریانی بودن شکل تا چه حد می‌تواند در بهبود طراحی و حصول نتایج مطلوب تاثیرگذار باشد.

۵- مراجع

- 1- Gaden D. and Bibeau E.L., (2010), *A numerical investigation into the effect of diffusers on the performance of hydro kinetic turbines using a validated momentum source turbine model*, Renewable Energy, Vol. 35, p.1152–1158.
- 2- Zahedi N. A., Rad M. and Khayyat M., (2016), *Conceptual duct shape design for horizontal axis hydro-kinetic turbines*, Scientia Iranica, Vol. 23, p.2113-2124.
- 3- Laurens J.-M., Ait-Mohammed M. and Tarfaoui M., (2016), *Design of bare and ducted axial marine current turbines*, Renewable Energy, Volume 89, p.181–187.
- 4- Alidadi M. and Calisal S., (2014), *A numerical method for calculation of power output from ducted vertical axis hydro-current turbines*, Computers & Fluids, Vol. 105, p.76–81.
- 5- Bontempo R. and Manna M., (2014), *Performance analysis of open and ducted wind turbines*, Applied Energy, Vol. 136, p.405–31.
- 6- Ohya Y. and Karasudani T., (2010), *A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology*, Energies, Vol. 3, p.634-649.
- 7- Ohya Y. and Karasudani T., Sakurai, A., (2008), *Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, p.524-539.
- 8- Abe K., Nishida M., Sakurai A., Ohya Y., (2005), Kihara H., Wada E. and et al., *Experimental and numerical investigations of flow fields behind a small wind turbine with a flanged diffuser*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 93, p.951-970.
- 9- Mansour, K. and Meskinkhoda, P., (2014), *Computational analysis of flow fields around flanged diffusers*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 124, p.109-120.
- 10- Kardous M., Chaker R., Aloui F., Nasrallah S.B., (2013), *On the dependence of an empty flanged diffuser performance on flange height: Numerical simulations and PIV visualizations*, Renewable Energy, Vol. 56, p.123-128.
- 11- Amer A., Ali A.H.H., ElMahgary Y. and Ookawara S., (2013), *Effect of diffuser configuration on the flow field pattern inside wind concentrator*, International Renewable and Sustainable Energy Conference, p. 212-217.
- 12- Matsushima T., Takagi S. and Muroyama, S., (2006), *Characteristics of a highly efficient propeller*

حالت محذب به شدت افت کرده و دو جریان داخلی و خارجی در حال اختلاط باهم هستند به طوری که در مقطع هشتم یعنی تنها ۵۰ سانتیمتر عقب‌تر، شکل محذب پروفیل محو شده و اثری ناچیز از آن دیده می‌شود. این مقطع نشان می‌دهد که بعد از فاصله‌ای حدود ۱۵۰ سانتیمتر از پشت غلاف به بعد، اثرات آن بر روی جریان از بین می‌رود. این نکته بسیار مهمی است چرا که هنگام بهره‌برداری از این غلاف می‌توان آنها را در فواصل نسبتاً نزدیکی به هم نصب و راه‌اندازی نمود و در یک محیط مشخص، با نصب تعداد بیشتری از این نوع غلاف، بهره‌برداری بالاتری از انرژی موجود نمود.

باید اشاره شود که وجود فرورفتگی در قسمت پایینی پروفیل سرعت در مقاطع ۶، ۷ و ۸ به دلیل وجود دستگیره‌ای بلند و قطور بود که در زیر غلاف جهت حمل و نقل نصب شده بود. این دستگیره باعث انسداد محوطه بین زمین و غلاف شده و مانع از عبور باد از زیر دهانه خروجی می‌شد و بدین صورت در نتایج آزمایش و رسم پروفیل اثر خود را نشان داد.

مطابق انتظار، با مقایسه پروفیل‌های سرعت تجربی بدست آمده و مقایسه نتایج آن با شبیه‌سازی عددی باید گفت که نتایج هر دو باهم مطابقت داشته و شبیه‌سازی پیش‌بینی درستی از رفتار جریان سیال داشته است. خط جریانی بودن غلاف تاثیر زیادی در کاهش میزان افزایش فشار در جلوی غلاف، بوجود آمدن کمترین جدایش و از بین رفتن سریع اثرات آن در پشت غلاف داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

در پایان می‌توان بیان داشت که پروفیل‌های سرعت حاصل از آزمایش تجربی ۸ مقطع در جلو و پشت غلاف در تونل باد در اندازه واقعی، نتایج شبیه‌سازی عددی را تایید می‌کند. با مقایسه نتایج هر دو بررسی تجربی و عددی، تطابق قابل قبولی مشاهده گردید و لذا نتایج شبیه‌سازی عددی در هر دو سیال قابل استناد می‌باشد؛ به عبارت دیگر، شبیه‌سازی‌های انجام گرفته پیش‌بینی درستی از رفتار جریان داشته‌اند.

از بین رفتن سریع اثرات غلاف یکی از مهمترین آیتم‌های عملکرد این نوع توربین‌ها می‌باشد. این غلاف با عملکرد مناسبی که به دلیل طراحی هوشمندانه آن از خود نشان داد، می‌توان تعداد بیشتری از آن در یک محیط مشخص جهت بهره‌برداری بیشتر از انرژی جریان در آن ناحیه به کار گرفته شود. کم بودن میزان افزایش فشار در جلوی غلاف، داشتن ناحیه برخاستگی کوچک در پشت آن، اختلاط سریع جریان با سرعت‌های متفاوت و رسیدن سریع به یکنواختی از مزایای این غلاف است که تنها با بررسی رفتار جریان در پشت و جلوی آن قابل حصول، بحث و بررسی است. این بررسی نشان داد

- 15- Ahmadi Asl. H., (2016), *Building of new wind turbines to generate electricity at affordable prices with conditions in Iran*, M.Sc thesis, IAU, South Tehran Branch, Iran. (In Persian)
- 16- Gilbert B.L. and Foreman K.M., (1983), *Experiments with a diffuser-augmented model wind turbine*, Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the ASME, Vol. 105, p.46-53.
- 17- Kamali Monfared R., Ahmadi Asl H. and Rad M., (2016), *Designing and building of a shroud to increase fluid velocity with capability to use for axial water turbines*, Journal of Marine Engineering, Vol. 12, p.37-44. (In Persian)
- type small wind turbine with a diffuser*, Renewable Energy, Vol. 31, p.1343-1354.
- 13- Zabihzade Roshan S., Alimirzazadeh S. and Rad M., (2015), *RANS simulations of the stepped duct effect on the performance of ducted wind turbine*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 145, p.270-279.
- 14- Kamali Monfared. R., (2016), *Designing of new wind turbines to generate electricity at affordable prices with conditions in Iran*, M.Sc thesis, IAU, South Tehran Branch, Iran. (In Persian)