

بررسی عددی پدیده دنباله در توربین‌های دو و سه پره‌ی جریان جزر و مدی

روزبه علی پور*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران، r.alipour@mhriau.ac.ir

رامین علی پور

دستیار تحقیق، گروه مهندسی مکانیک، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران، ra.alipour@mhriau.ac.ir

چکیده

در این مقاله پدیده دنباله، در توربین‌های جریان جزر و مدی دو پره و سه پره مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تحلیل، از روش دینامیک سیالات محاسباتی در قالب نرم‌افزار ANSYS-FLUENT استفاده شده است. در ابتدا، توربین‌ها در مقادیر مختلف سرعت نسبی نوک پره مورد ارزیابی قرار گرفتند و بیشینه توان تولیدی آن‌ها محاسبه گردید. سپس، ناحیه دنباله برای شرایط بیشینه توان تولیدی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در سرعت نسبی نوک پره برابر با ۵، بیشینه ضریب توان برای هر دو توربین قابل استحصال است که مقدار آن برای توربین سه پره معادل با ۰/۳۵ و برای توربین دو پره برابر با ۰/۲۸ می‌باشد. همچنین، پدیده دنباله در توربین‌های دو پره نسبت به توربین سه پره زودتر به پایان می‌رسد به گونه‌ای که؛ در فاصله‌ای معادل با سیزده برابر قطر توربین نسبت به محل قرارگیری آن، مقدار سرعت برای توربین دو پره به ۰/۸۷٪ سرعت اولیه و برای توربین سه پره به ۰/۸۱٪ سرعت اولیه خود بازگشته است. بنابراین، با در نظر گرفتن توان تولیدی بالاتری که از توربین‌های سه پره قابل استحصال است، زمانی که مساحت به کار گرفته شده به منظور ایجاد مزرعه اهمیت کمتری داشته باشد، می‌توان با چیدمان سه پره توان بیشتری را از مزرعه برداشت کرد. بالعکس، زمانی که مساحت مزرعه از اهمیت خاصی برخوردار باشد، توربین‌های دو پره برای استفاده مناسب تر به نظر می‌رسند.

واژه‌های کلیدی: توربین، جریان جزر و مدی، پدیده دنباله، دینامیک سیالات محاسباتی، سرعت نسبی نوک پره، ضریب توان.

Numerical Investigation of Wake Phenomenon for 2-bladed and 3-bladed Tidal Current Turbines

R. Alipour

Department of Mechanical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

R. Alipour

Department of Mechanical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

Abstract

In this paper, the effect of wake phenomenon on the performance of 2 and 3 bladed tidal current turbines have been investigated. Computational fluid dynamics analysis using ANSYS-FLUENT has been conducted. Initially, turbines were evaluated at the different values of the tip speed ratio and the maximum power coefficient was estimated. Then, the wake distance was evaluated for this maximum power coefficient. Results showed that at the tip speed ratio of 5, the maximum power coefficient for both turbines was achievable which were 0.35 and 0.28 for a 3 and 2-bladed turbines, respectively. Also, the wake phenomenon in 2-bladed turbine terminated earlier than 3-bladed, so that; at a distance after the turbine which was equal to the thirteen times more than the turbine diameter, the flow velocity returned to 87% and 81% of initial flow velocity for 2 and 3-bladed turbines, sequentially. Considering the results, 3-bladed turbines are justified to use when there is no restriction for the area of the tidal farm while the maximum power extraction is the main objective. Conversely, 2-bladed turbines seem to be more appropriate where the tidal farm area is the particular of importance.

Keywords: Turbine, Tidal current, Wake phenomenon, CFD, Tip speed ratio, Power coefficient.

۱- مقدمه

امروزه، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به منظور بهبود در وضعیت آب و هوا و عوامل زیست محیطی از جمله مواردی است که در دستور کار کشورهای گوناگون قرار گرفته است [۱، ۲]. بر این اساس، تولید الکتریسیته از طریق منابع تجدیدپذیر به منظور کاهش استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر نظیر سوخت‌های فسیلی در میان کشورهای پیشرفته و صنعتی، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار گردیده است. توربین‌های جزر و مدی محور افقی که با استفاده از جریان جزر و مد، انرژی هیدرولیکی ناشی از سیال را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نمایند، در میان کشورهای توسعه یافته جهان از محبوبیت فراوانی برخوردار گردیده‌اند، به طوری که نیروگاه‌های فراوانی با توان تولیدی بالا، در حال ساخت، بهره‌برداری و توسعه می‌باشند. پیش‌بینی‌ها حاکی از این است که تا سال ۲۰۵۰ ظرفیتی بالغ بر ۱۰۰ گیگاوات با استفاده از امواج و انرژی جزر و مدی در اروپا ایجاد می‌گردد [۳]، که توان تامین برق ۶۶ میلیون خانه را داراست و موجب کاهش قابل توجه گازهای

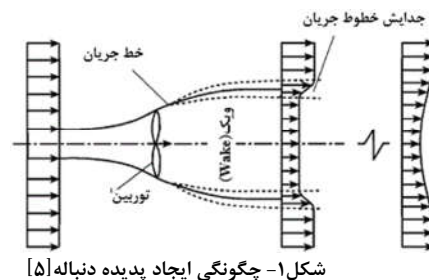
گلخانه‌ای در دنیا خواهد شد. عملکرد توربین‌های جریان جزر و مدی محور افقی، بر اساس چرخش افقی روتور استوار است که موجب می‌گردد انرژی جنبشی سیال به الکتریسیته تبدیل شود. این توربین‌ها در مقادیر بالای سرعت نسبی نوک پره (TSR)، عمل نموده و در انواع گوناگون شناور با ژنراتور مستغرق^۱، ژنراتور غیرمستغرق^۲، محور مایل^۳ و نیز ثابت شده در کف اقیانوس^۴ به تولید الکتریسیته می‌پردازند [۴]. اگر چه تمایل به استفاده از توربین‌های جریان جزر و مدی محور افقی روز به روز در حال افزایش است، اما بعضی از محدودیت‌های موجود، مانع رشد و توسعه سریع نیروگاه‌های مبتنی بر این توربین‌ها می‌گردد. بطور مثال، بخش قابل توجهی از منابع انرژی جزر و مد در سراسر جهان در مناطق محدود و عمدتاً در مجاورت سرزمین‌ها و

1 Submerge generator
 2 Non- Submerge generator
 3 Inclined-axis
 4 Rigid mooring

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: r.alipour@mhriau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۰۰/۱۱/۰۴



شکل ۱- چگونگی ایجاد پدیده دنباله [۵]

تنگه‌هایی که جریان آب را تسریع می‌کنند، یافت می‌شود [۶]. این حال، نصب توربین در این مکان‌ها، محدودیت‌های زیست محیطی و عملیاتی، از جمله ترافیک شدید کشتی‌ها، عمق محدود آب و یا توپوگرافی نامنظم بستر دریا را در پی دارد [۷]. بنابراین، با توجه محدودیت مناطق مستعد برای نصب توربین‌های جزر و مدی، لازم است آن‌ها را در آرایشی کنار هم قرار دهیم که ضمن اشغال کمترین فضای موجود، بیشترین مقدار بازدهی را در تولید انرژی دارا باشند. در نتیجه، طراحی بهینه یک مزرعه از توربین‌های جریان جزر و مدی محور افقی، علاوه بر کاهش مساحت اشغال شده، به کمتر شدن تعداد توربین‌های مورد نیاز برای رسیدن به یک خروجی هدفمند کمک شایانی می‌کند. این امر، تأثیر به‌سزایی در پایین آوردن هزینه‌های ساخت، نصب و نگهداری خواهد داشت. در زمینه طراحی بهینه، دیدگاه‌های متعددی ارائه شده است. ولی عمده این دیدگاه‌ها در قالب دو رویکرد قابل دسته بندی هستند. رویکرد نخست مبتنی بر به حداکثر رساندن توان تولیدی یک مزرعه، با انتخاب تعداد بهینه توربین‌ها می‌باشد. اما در رویکرد ثانویه، موقعیت بهینه یک توربین در آرایش یک مزرعه، به منظور استحصال بیشینه انرژی مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد [۸].

تا کنون چندین مدل تحلیلی [۹-۱۱] برای بهینه کردن آرایش توربین‌ها در یک مزرعه جزر و مدی ارائه شده است. این مدل‌های تحلیلی، اطلاعات نسبتاً خوبی در زمینه کنترل فرآیند کاری توربین‌ها، به خصوص مقدار فشار یا سرعت در خروجی توربین را در اختیار قرار می‌دهند. اما این مدل‌ها، شرایط جریان بالادستی توربین را بسیار ایده‌آل در نظر گرفته و از اثرات آشفتگی در بازبایی جریان صرف‌نظر کرده‌اند. در واقع مطابق شکل ۱، جریان بالادستی پس از برخورد به توربین دچار جدایش شده، خطوط جریان از یکدیگر فاصله گرفته، سرعت جریان کاهش می‌یابد و گردابه‌های ایجاد شده موجب ایجاد اثرات آشفتگی می‌گردد [۱۲، ۱۳]. به پدیده اخیر اصطلاحاً دنباله^۱ گفته می‌شود و پیش بینی اتفاقات ناشی از آن در ناحیه پایین دست توربین، توسط مدل‌های تحلیلی به راحتی امکان پذیر نیست. اهمیت پیش‌بینی طول ناحیه دنباله از این جهت است که در یک مزرعه از توربین‌های جزر و مدی، جریان پایین دست هر توربین به عنوان جریان بالادست برای توربین دیگری که پشت آن قرار گرفته عمل می‌کند و لذا چنانچه توربین دوم در ناحیه دنباله توربین اول واقع شود، جریانی که به آن می‌رسد از انرژی لازم برای ایجاد گشتاور و نهایتاً بالا بردن سطح عملکرد توربین برخوردار نیست. به همین دلیل، بررسی این

پدیده و عوامل موثر بر آن، تأثیر قابل تاملی بر عملکرد توربین‌ها در یک مزرعه جزر و مدی و افزایش توان تولیدی را دارد [۱۲، ۱۳].

با توجه به نقاط ضعف مدل‌های تحلیلی، تعدادی از پژوهشگران جهت بهینه سازی آرایش مزرعه‌های جزر و مدی به روش‌های آزمایشگاهی روی آورده‌اند. اساس کلی این روش‌ها، بر استقرار توربین‌های جزر و مدی در مقیاس کوچک درون یک فلوم آزمایشگاهی^۲ است. از جمله‌ی این تحقیقات می‌توان به به استقرار دسته‌های دوتایی [۱۴]، دسته‌های سه تا ده‌تایی [۱۵] و آرایش‌های چند ردیفه [۱۶] در مقیاس‌های متفاوت درون فلوم اشاره کرد. آزمایش‌های مزبور با هدف بررسی پدیده دنباله و تأثیر آن‌ها بر عملکرد یک توربین درون مزرعه انجام شدند. اگرچه انجام این آزمایش‌ها داده‌های ارزشمندی را در اختیار محققان قرار می‌دهد، اما وجود بعضی از محدودیت‌ها، استفاده از آن‌ها را در مقیاس وسیع سخت و گاهی ناممکن می‌سازد. بطور مثال، پژوهش‌های بالا در اعداد رینولدز مشابه انجام نشده و همین امر مقایسه آرایش‌های متفاوت را با هم غیر ممکن می‌سازد. مضافاً این‌که به دلیل شرایط آزمایشگاهی متفاوت، نتایج به دست آمده از قابلیت تعمیم پذیری بالایی برخوردار نیستند [۱۲]. علاوه بر این در بیشتر داده‌های آزمایشگاهی فوق، طول ناحیه دنباله بصورت غیر مستقیم و بر مبنای اندازه‌گیری پارامترهای واسطه‌ای نظیر سرعت یا فشار جریان پایین دست توربین تخمین زده شده [۱۱، ۱۷، ۱۸]. که همین امر موجب ایجاد خطای محاسباتی بعضاً زیاد می‌گردد. دلایل مذکور در کنار هزینه‌های بالای مطالعات آزمایشگاهی، منجر به ایجاد تمایل زیاد برای گسترش مطالعات در زمینه توربین‌های جزر و مدی بر مبنای روش‌های عددی شده‌اند. استفاده از این روش‌ها، علاوه بر صرفه‌جویی در زمان و هزینه، قابلیت مطالعه مستقیم پدیده دنباله بدون دخالت پارامترهای واسطه‌ای و با تنوع گسترده‌تری از هندسه و چیدمان توربین‌ها را در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد.

در میان روش‌های عددی متفاوت ارائه شده، روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، از مقبولیت و محبوبیت زیادی برای بررسی شرایط عملکرد توربین‌های جریان جزر و مدی برخوردار است [۱۹]. یکی از مزایای روش سی.اف.دی، پتانسیل بالای این روش در به-کارگیری معادلاتی نظیر شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۳ یا متوسط‌گیری زمانی معادلات ناویر-استوکس (رنز)^۴ [۲۰، ۲۱] برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان سیال، حین وقوع پدیده دنباله می‌باشد [۱۷، ۲۲، ۲۳]. با این وجود، بررسی پدیده دنباله با تکیه بر روش‌های عددی از قدمت زیادی برخوردار نیست. شاید بتوان از هریسون و همکاران [۲۴] و همچنین تورنوک و همکاران [۲۵] به عنوان پیشگامان این قضیه نام برد. آن‌ها توربین را به صورت یک دیسک عملگر^۵ در نظر گرفته و پارامترهای طراحی را که از روش نظریه مومنتم المان پره (BEMT) بدست آورده بودند توسط معادلات رنز تحلیل کردند. در سال‌های اخیر نیز مطالعات عددی چندی بر روی پدیده دنباله در مزارع توربین‌های جریان جزر و مدی انجام شده است. بطور مثال، نورنبرگ و تاو [۲۶] اثر

2 Experimental flumes
3 large-eddy simulation (LES)
4 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)
5 Actuator disks

1 Wake

مشخص این مسئله مدنظر است که در چه فاصله‌ای از پشت توربین مقدار سرعت جریان، به مقدار اولیه و ورودی جریان خواهد رسید. به موازات این موضوع مقدار گشتاور و ضریب توان، برای توربین‌های دو و سه پره و در مقادیر مختلف TSR مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. جهت دستیابی به درکی عمیق از عواملی که خروجی‌های مذکور را تحت تاثیر قرار می‌دهند، کانتورهای فشار و سرعت مورد موشکافی و تحلیل قرار خواهند گرفت. نتایج این تحقیق به پژوهشگران این عرصه کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن پدیده‌ی دنباله، استدلال‌های منطقی برای انتخاب نوع توربین مناسب در شرایط مختلف جریان و مساحت‌های متفاوت برای احداث مزرعه داشته باشند. به عبارت ساده‌تر، این تحقیق به دنبال این است که با ارائه نتایج مبتنی بر مفاهیم فیزیکی پدیده دنباله، انتخابی که رویکرد مناسب را برای احداث مزرعه‌ی جزر و مدی تسهیل نماید. به بیان دیگر، با توجه به شرایط واقعی بایستی رویکرد مبتنی بر به حداکثر رساندن توان تولیدی یک مزرعه با انتخاب تعداد بهینه توربین‌ها دنبال شود، یا باید موقعیت بهینه یک توربین در آرایش یک مزرعه، به منظور استحصال بیشینه انرژی مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی هندسی و شبیه‌سازی عددی

برای انجام این تحقیق، ابتدا از روش BEMT برای استخراج داده‌های مربوط به طراحی پره‌های توربین استفاده می‌گردد. سپس، مدل هندسی توربین در نرم‌افزار SOLIDWORKS رسم می‌گردد. در ادامه، فرآیند شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-FLUENT و در قالب روش سی.اف.دی انجام می‌شود. پس از انجام شبیه‌سازی، صحت‌سنجی نتایج با استفاده از مدل آزمایشگاهی سایر محققان صورت خواهد گرفت. جهت اطمینان از همگرایی جواب‌ها، فرآیند استقلال از شبکه بر روی مقدار گشتاور خروجی پیاده‌سازی می‌گردد. پس از انجام صحت‌سنجی و بررسی ماکزیمم توان حاصل شده در مقادیر مختلف TSR، به ارزیابی پدیده دنباله در ناحیه پشت توربین پرداخته خواهد شد و جواب‌های استخراج گردیده با یکدیگر می‌گردند.

۲-۱- دامنه محاسباتی و مدل‌سازی آن

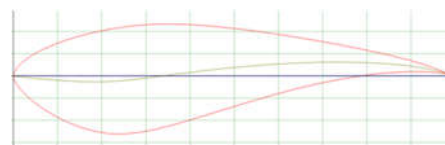
توربین مورد بحث در این تحقیق دارای روتوری با قطر ۰/۵ متر می‌باشد که درون استوانه‌ای بنام قاب مرجع متحرک به منظور بیان چرخش توربین و ایجاد سطح مشترک بین سیال و توربین قرار داده شده است. قاب مرجع ایجاد شده یک استوانه به قطر ۰/۵۵ و طول ۰/۱۱ متر می‌باشد. دامنه سیال نیز از یک استوانه به طول ۱۶ متر و قطر ۲ متر تشکیل شده است. دامنه سیال به همراه توربین و محیط استوانه‌ای اطراف توربین در شکل ۲، نشان داده شده است. در این تحقیق، از ایرفویل S814، جهت طراحی توربین استفاده شده است. دلیل این انتخاب، پرکاربرد بودن این نوع ایرفویل به دلیل ضخامت کافی و مقدار نیروی برآ مناسب آن می‌باشد [۳۱]. همچنین، این ایرفویل در پروژه‌های معروفی نظیر پروژه SeaGen [۳۲] به کار گرفته شده است. شکل ۳، نمونه ایرفویل انتخابی را نشان می‌دهد.

پدیده دنباله را بر یک آرایه متشکل از چهار توربین جریان جزر و مدی محور افقی سه پره بررسی کردند. آن‌ها برای بررسی بحث آشفتگی از مدل $k-\omega$ SST که زیر مجموعه معادلات رنژ است استفاده نمودند. به عنوان خروجی، سرعت و ویژگی‌های جریان آشفته مورد بررسی قرار گرفت و البته این خروجی‌ها با نتایج تجربی که پیش‌تر توسط محققان دیگر گزارش شده بود مورد مقایسه واقع شد. هدف اصلی از این مقایسه، بررسی دقت روش عددی بود که نورنبرگ و تاو برای کار انتخاب کرده بودند. این مقایسه نشان داد، که اگرچه روش عددی مورد استفاده، روند پدیده دنباله را به درستی پیش‌بینی می‌کند، اما برای به دست آوردن مقادیر دقیق‌تر، نیازمند بررسی و توسعه بیشتر است. در تحقیقی مشابه، جینگ و همکاران [۱۸] به بررسی پدیده دنباله بر روی توربین‌های جریان جزر و مدی سه پره با استفاده از معادلات رنژ پرداختند. الگوریتم‌های حل متفاوت نشان داد که استفاده از مش‌های لغزنده^۱ موجب می‌شود تا جواب‌های روش عددی از مطابقت بهتری با نتایج آزمایشگاهی برخوردار باشند از آنجایی که استفاده از توربین‌های جریان جزر و مدی در مقیاس صنعتی هنوز نوپاست، گزارشات زیادی در رابطه با ارزیابی عددی پدیده دنباله در آن‌ها منتشر نشده است. در پارگراف قبل به بخش مهمی از آن‌ها اشاره گردید. با این حال جهت آشنایی بیشتر با ماهیت پدیده دنباله می‌توان مقالاتی را که به ارزیابی آن در مزارع توربین باد پرداخته‌اند مطالعه کرد. به‌طور مثال، گونزالس و همکارانش [۲۷] با استفاده از روش‌های عددی به ارزیابی تأثیر پدیده دنباله بر عملکرد پایدار یک مزرعه بادی پرداختند. نتایج مربوط به دو آرایش متفاوت از توربین‌ها نشان داد که فاصله بین توربین‌ها و سرعت باد تأثیر بسزایی بر کاهش عوارض پدیده دنباله و پایداری عملکرد مزرعه دارد. مطالعات بیشتر در این رابطه در مراجع [۲۸-۳۰] قابل دسترسی می‌باشد.

جمع‌بندی پیشینه‌ی تحقیق نشان می‌دهد که در زمینه مطالعه و شناسایی پدیده دنباله، روش‌های تحلیلی از دقت کافی برخوردار نیستند. همچنین، مطالعات آزمایشگاهی هم صرف زمان زیاد و هزینه بالا می‌طلبند و هم قابلیت تعمیم‌پذیری آزمایشات چندان بالا نیست. در چنین شرایطی استفاده از روش‌های عددی، امری معقول و مقرون به صرفه به نظر می‌رسد. از طرفی، جستجو در مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بررسی پدیده دنباله بیشتر محدود به توربین‌های باد بوده و در توربین‌های جریان جزر و مدی به مراتب نتایج کمتری یافت می‌شود. عمده‌ی مطالعات عددی انجام شده تاکنون، بر روی انتخاب نوع روش عددی تمرکز کرده‌اند. به عبارت بهتر، مطالعات پارامتری که در آن‌ها، اثر فاکتورهای تاثیرگذار بر توان و انرژی قابل استحصال از مزرعه‌ی جزر و مدی به صورت دقیق مورد بررسی قرار گرفته شده باشد، به ندرت یافت می‌شوند. به‌طور خاص اثر تعداد پره‌های توربین جریان جزر و مدی محور افقی، بر روی طول ناحیه دنباله بصورت مستقیم در هیچ مرجعی گزارش نشده است. در تحقیق حاضر به بررسی عددی تأثیر تعداد پره‌های توربین جریان جزر و مدی محور افقی بر روی طول ناحیه‌ی دنباله پرداخته خواهد شد و مقاطع متعددی از جریان پایین دست توربین، مورد بررسی و پژوهش قرار خواهد گرفت. به طور



شکل ۲- دامنه محاسباتی و اجزای آن

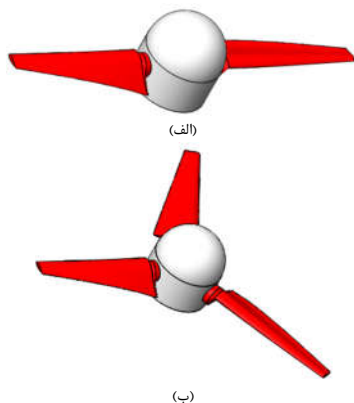


شکل ۳- هندسه ایرفویل S814

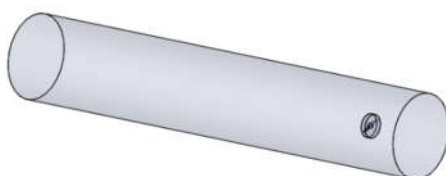
پس از چیدن ایرفویل‌ها کنار یکدیگر و متصل کردن آن‌ها به هاب (شکل ۴)، طراحی توربین تکمیل می‌گردد. شکل ۵، توربین‌های دو پره و سه پره‌ی طراحی شده جهت استفاده در این مقاله را نشان می‌دهد. استفاده از توربین‌های چهار پره و بیشتر در مزرعه‌های جزر و مدی به‌ندرت مشاهده شده است. به‌علت هزینه‌های سنگین ساخت، مونتاژ، نصب و نگهداری در مقایسه با درصد افزایش گشتاور خروجی و در نتیجه عدم وجود توجیه اقتصادی، معمولاً از توربین‌های با تعداد پره‌ی بالا، به‌صورت تکی و در ابعاد هندسی بزرگ استفاده نمی‌شود [۳۳]. به‌همین دلیل در این تحقیق صرفاً بر روی عملکرد توربین‌های دوپره و سه‌پره تمرکز شده است. دامنه سیال و محیط قاب مرجع نیز در نرم‌افزار SOLIDWORKS ترسیم گردیده و با یکدیگر مونتاژ شده‌اند. شکل ۶، نمونه مونتاژ شده توربین، دامنه سیال و محیط قاب مرجع اطراف آن را برای توربین سه‌پره نشان می‌دهد. از آن‌جایی که دامنه سیال بایستی نامحدود فرض شود، ابعاد آن دارای اهمیت است. اما شکل هندسی مقطع آن در نتایج تحلیل تاثیرگذار نیست [۳۱]. لذا به دلیل سهولت ترسیم، شکل هندسی دامنه محاسباتی به صورت یک استوانه با قطر سطح مقطع ۴ متر در نظر گرفته شده و توربین‌ها در فاصله‌ی ۱ متری ورودی استوانه مستقر گردیده‌اند با قرارگیری ایرفویل‌ها به صورت متوالی و با زوایای پیچش بدست آمده از BEMT. پروفیل پره توربین مورد نظر رسم به‌دست می‌آید. شکل (۴)، نحوه قرارگیری ایرفویل‌ها را نشان می‌دهد



شکل ۴- قرارگیری ایرفویل‌ها در کنار هم و تشکیل پره



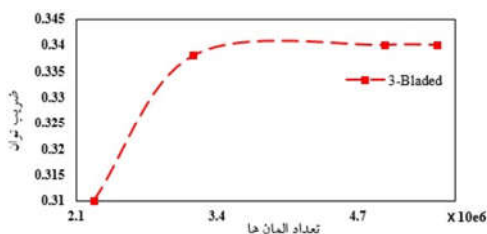
شکل ۵- توربین‌های جریان جزر و مدی ساخته شده به منظور انجام تحلیل: الف) توربین دوپره، ب) توربین سه‌پره



شکل ۶- نمونه‌ای از مدل مونتاژ شده دامنه محاسباتی

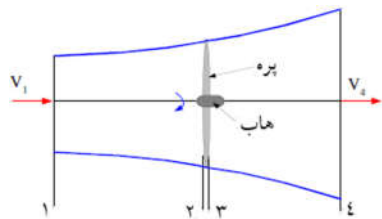
۲-۲- شبیه‌سازی عددی

بعد از طراحی هندسی دامنه‌ی محاسباتی در محیط SOLIDWORKS، مدل ساخته شده به محیط ANSYS-FLUENT انتقال می‌یابد تا فرآیند مش‌بندی، اعمال شرایط مرزی و تنظیم شرایط حل عددی انجام شده و سپس مسئله با استفاده از روش سی.اف.دی حل شود. المان‌بندی کل دامنه محاسباتی و توربین با استفاده از المان-بندی نامنظم^۱ توسط ANSYS-MESHING انجام شده است. تنها در قسمت لایه مرزی، به دلیل تغییرات زیاد و ناگهانی گرادیان سرعت و فشار و حساسیت فرآیند تعامل سازه و سیال بر روی پاسخ‌ها، از المان-های سازمان یافته^۲ استفاده شده است [۳۴]. فرآیند بررسی استقلال از شبکه بر مبنای ضریب توان انجام شده است و نمودار آن در شکل (۷) برای توربین سه پره قابل ملاحظه می‌باشد. شکل ۸، مدل مش‌بندی شده‌ی دامنه‌ی سیال را نشان می‌دهد. مقطع مش‌بندی شده دامنه سیال به همراه توربین و قاب مرجع در شکل ۹، مشاهده می‌گردد. شرط مرزی در ورودی دامنه سیال با استفاده از سرعت ورودی برابر ۱ متر بر ثانیه تعریف گردیده است. همچنین به منظور بیان



شکل ۷- بررسی استقلال از شبکه بر مبنای ضریب توان

1 Unstructured meshes
2 Structured meshes



شکل ۱۰- دامنه سیال

۳- محاسبه خروجی‌ها

۳-۱- محاسبه نیروی محوری [۴۵]

با مشاهده شکل ۱۰ و با در نظرگیری نقطه ۱ به عنوان بالادست و نقطه ۲ درست قبل از توربین، نقطه ۳ درست بعد از توربین و نقطه ۴ در قسمت پایین دست، استحصال انرژی بین نقاط ۲ و ۳ ایجاد و به همین علت اختلاف فشار ایجاد می‌گردد. با در نظر گرفتن P و V به عنوان فشار، سرعت و چگالی و همچنین لحاظ کردن $P_1=P_4$ و $V_2=V_3$ و این فرض که بین نقاط ۱ و ۲ در بالادست و نقاط ۳ و ۴ در پایین دست، جریان بدون افت اصطکاکی می‌باشد، با استفاده از معادله برنولی می‌توان نوشت:

$$P_2 - P_3 = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) \quad (1)$$

با توجه به این موضوع که مقدار نیرو (F_x) برابر با فشار در سطح مقطع (A) می‌باشد می‌توان نوشت:

$$dF_x = (P_2 - P_3) dA \quad (2)$$

با جایگذاری رابطه (۱)، در رابطه (۲)، می‌توان نتیجه گرفت:

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) dA \quad (3)$$

با تعریف α به عنوان ضریب تداخل محوری می‌توان نوشت:

$$\alpha = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (4)$$

از سوی دیگر داریم:

$$V_4 = V_1 (1 - 2\alpha) \quad (5)$$

با جایگزینی رابطه (۵) در معادله (۳) و در نظر گرفتن سطح مقطع گرد به شعاع r مقدار زیر برای نیروی محوری حاصل خواهد شد:

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho V_1^2 [4\alpha(1 - \alpha)] 2\pi r dr \quad (6)$$

۳-۲- محاسبه گشتاور

برای یک جرم متمرکز به شعاع r_1 و جرم m مقدار ممان اینرسی (I) از رابطه (۷)، محاسبه خواهد شد:

$$I = mr_1^2 \quad (7)$$

چنانچه مقدار سرعت زاویه ای را ω در نظر بگیریم، مقدار گشتاور زاویه‌ای (L) از رابطه (۸)، قابل محاسبه خواهد بود:

$$L = I\omega \quad (8)$$

با در نظر گرفتن t به عنوان زمان، مقدار گشتاور (T) نیز از رابطه زیر، قابل محاسبه خواهد بود:

$$dT = \frac{dL}{dt} \quad (9)$$

با جایگذاری روابط (۷) و (۸) در رابطه (۹)، مقدار گشتاور از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$dT = \frac{d(I\omega)}{dt} = \frac{d(mr^2\omega)}{dt} = \frac{dm}{dt} r^2\omega \quad (10)$$

برای مقادیر کم و در نظرگیری المان به صورت کوچک می‌توان



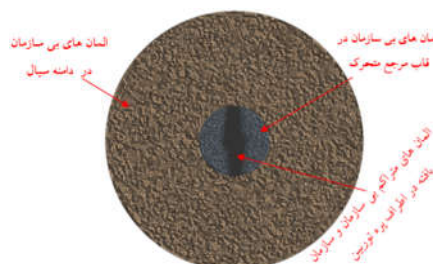
شکل ۸- مدل مش‌بندی دامنه سیال در نرم‌افزار ANSYS-FLUENT

خروج سیال از دامنه، شرط مرزی فشار خروجی به کار گرفته شده است. با توجه به این مسئله که محیط دریا از گستردگی بی‌نهایت برخوردار است، بر روی دامنه سیال، شرط مرزی تقارن اعمال شده است. با در نظر گرفتن ماهیت عملکردی توربین، از شرط مرزی دیواره روی جداره‌های توربین استفاده شده است. برای توصیف حرکت دورانی توربین، در سطح مشترک توربین و سیال شرط قاب مرجع متحرک به کار گرفته شده است.

۳-۲-۲- حل عددی

در فرآیند حل عددی، معادلات ناویر-استوکس با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی و حل میشوند. سیال (آب) به صورت تراکم‌ناپذیر، لزجت و چگالی آن به ترتیب برابر با 1025 و 1000 کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته می‌شود [۳۳]. به منظور مدل‌سازی آشفتگی، از مدل $k-\omega$ SST [۳۶، ۳۵] استفاده شده است. این مدل با استفاده از ترکیب معادلات $k-\omega$ Standard برای محیط نزدیک به جداره‌ها و $k-\epsilon$ در محیط دور از جداره به دست آمده است و اصلاح تعاریف مربوط به ویسکوزیته آشفتگی باعث شده تا طیف گسترده‌تری از جریان‌ها به کمک آن قابل شبیه‌سازی باشند [۳۵]. در مش‌بندی مربوط به لایه مرزی پارامتر $Y+$ با دقت زیادی انتخاب شده است. در واقع این پارامتر بیانگر فاصله‌ی بی‌بعد اولین گره از جداره‌ی ثابت می‌باشد [۳۷]. اگرچه برخی از مطالعات ثابت کرده‌اند که مقدار $Y+\leq 15$ هنگام استفاده از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST قابل قبول است [۳۹، ۳۸]. در این مطالعه برای جلوگیری از بروز هرگونه اشتباه محاسباتی و طبق توصیه‌ی مراجع متعدد [۴۰-۴۲]، $Y+\leq 1$ در نظر گرفته شده است.

برای کوپل معادلات فشار و سرعت از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است [۱]. استفاده از این الگوریتم با همگرایی سریعتر در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر مانند SIMPLEC، PISO و یا Coupled که در ANSYS-FLUENT موجود است به لحاظ زمانی مقرون به صرفه‌تر به نظر می‌رسد [۴۳]. علاوه بر این به منظور گسسته‌سازی معادلات مومنتوم، از روش Second-Order-Upwind استفاده شده است [۴۴].



شکل ۹- مقطع مدل مش‌بندی شده به همراه توربین و قاب مرجع

مقدار دبی جرمی سیال عبوری از توربین (\dot{m}) را از رابطه زیر بدست آورد:

$$\dot{m} = \rho AV_2 \quad (11)$$

و یا به فرم دیفرانسیلی و بسط داده شده می‌توان نوشت:

$$\dot{m} = \rho 2\pi r dr V_2 \quad (12)$$

با قرار دادن رابطه (۱۲)، در رابطه (۱۰)، رابطه (۱۳)، به شکل زیر ظاهر می‌گردد:

$$dT = \rho V_2 r^2 \omega 2\pi r dr \quad (13)$$

۳-۳- محاسبه ضریب توان توربین

به منظور بررسی عملکرد توربین‌ها در شرایط مختلف، پارامتری بنام TSR (λ)، وجود دارد که بر اساس سرعت زاویه‌ای توربین، شعاع روتور (R) و سرعت ورودی سیال به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_2} \quad (14)$$

مقدار ω در رابطه (۱۴)، با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\omega = \frac{V_b}{r} \quad (15)$$

در رابطه بالا، V_b سرعت حرکت پره‌ی توربین و r مقدار شعاع روتور در یک مقطع دلخواه از توربین می‌باشد. توان حاصل شده از توربین (P_t) نیز با استفاده از رابطه (۱۶)، بدست خواهد آمد:

$$P_t = T \cdot \omega \quad (16)$$

به این ترتیب، مقدار ضریب توان توربین (C_p) نیز با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} \quad (17)$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی

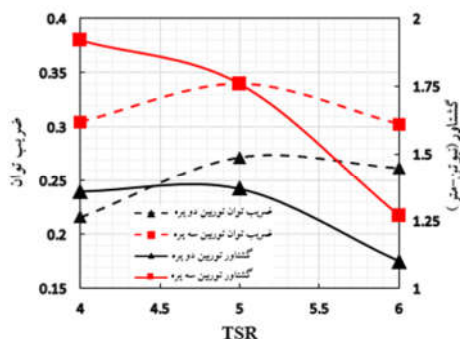
در تحقیق حاضر، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج مستخرج از تحقیقات تجربی سایر محققان [۴۶، ۳۳] مقایسه و میزان صحت نتایج حاصله مورد بررسی قرار گرفته است. این صحت‌سنجی بر اساس مقدار ضریب توان بدست آمده برای توربین سه‌پره در مقدار TSR برابر با ۵ صورت گرفته است. جدول ۱، مقدار ضریب توان بدست آمده را برای توربین نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول ۲ پیداست، خطای مدل عددی نسبت مدل‌های آزمایشگاهی در حدود ۱۰٪ می‌باشد که این امر مبین دقت قابل قبول مدل عددی حاضر در این تحقیق برای پیش‌بینی عملکرد توربین می‌باشد.

جدول ۱- ضرایب توان مستخرج از حل عددی با نتایج تجربی

مدل	بیشینه ضریب توان	درصد خطا نسبت به تحقیق حاضر
مدل عددی تحقیق حاضر با در نظر گرفتن شرایط مدل جوهی [۳۳]	۰/۳۶	۱۰
مدل آزمایشگاهی جوهی [۳۳]	۰/۴	
مدل عددی تحقیق حاضر با در نظر گرفتن شرایط مدل ژینگ [۴۶]	۰/۲۶۸	۱۰/۶۰
مدل آزمایشگاهی ژینگ [۴۶]	۰/۳	

۴-۲- مقدار گشتاور و بیشینه ضریب توان توربین

با توجه به این مسئله که در نواحی مختلف و تحت شرایط متفاوت، مقدار گشتاور و ماکزیمم توان‌های به دست آمده برای توربین‌های جریان جزر و مدی که با ایرفویل S814 طراحی گردیده‌اند، در مقادیر TSR بین ۴ تا ۶ به وقوع پیوسته است [۱، ۳۱، ۳۳، ۴۶]. در تحقیق حاضر نیز به بررسی عملکرد توربین در این بازه پرداخته خواهد شد. شکل ۱۱، مقدار گشتاور بدست آمده برای توربین‌های دو و سه پره در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برای توربین سه پره، مقدار ماکزیمم گشتاور در TSR برابر ۴ حاصل می‌شود. چرا که در این مقدار TSR، اندازه‌ی زاویه حمله بیشتر بوده و در نتیجه نیروی برآ افزایش می‌یابد. اما با افزایش مقدار TSR، زاویه حمله با کاهش مواجه گردیده، مقدار نیروی برآ را کاهش داده است که منجر به کاهش گشتاور شده است. برای توربین دو پره، مقدار ماکزیمم گشتاور در TSR برابر ۵، رخ می‌دهد. زیرا که در مقادیر TSR کمتر از ۵، اگر چه نیروهای پسا از مجموع کمتری برخوردار خواهند بود، اما افزایش زاویه بیش از اندازه زاویه حمله باعث می‌شود تا نیروهای برآ نیز کاهش یابند. در مقادیر TSR بیشتر از ۵ نیز افزایش نیروهای پسا ناشی از انرژی جنبشی توربولانس که در اثر کاهش زاویه حمله رخ می‌دهد منجر گردیده نسبت برآ به پسا کاهش یافته و در نتیجه گشتاور حاصله کاهش پیدا کند. همچنین در توربین سه پره، وجود بازوی اضافی (پره سوم)، منجر به ایجاد گشتاور بیشتر و در نهایت توان تولیدی بیشتر شده است. شکل ۱۱، همچنین مقدار ضریب توان به دست آمده از توربین‌ها را در شرایط متفاوت حاضر در تحقیق نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که مقادیر ماکزیمم توان به دست آمده برای هر دو نوع توربین، در TSR برابر با ۵ حاصل شده است. اگرچه برای توربین سه پره مقدار بیشینه گشتاور در مقدار TSR معادل با ۴ بدست آمده است، اما افزایش سرعت زاویه‌ای منجر گردیده است تا مقدار بیشینه ضریب توان در TSR برابر با ۵ حاصل گردد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در پژوهش حاضر نیز مانند تحقیقات پیشین [۱، ۳۱، ۳۳، ۴۶]، بیشینه ضریب توان در TSR مساوی با ۵ (بین ۴ و ۶) حاصل گردیده است که مقدار آن برای توربین سه پره معادل با ۰/۳۵ و برای توربین دو پره برابر با ۰/۲۸ می‌باشد. از این رو پدیده دنباله در شرایطی که بیشینه مقدار ضریب توان حاصل شده مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.



شکل ۱۱- مقدار گشتاور و ضریب توان حاصله در مقادیر مختلف TSR

۴-۳- بررسی پدیده‌ی دنباله

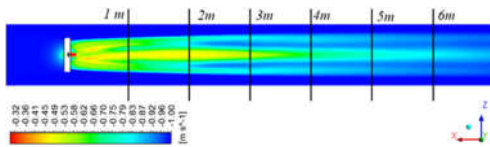
شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب کانتورهای سرعت سیال برای توربین‌های دو و سه پره را نشان می‌دهند. با نگاهی به ناحیه پایین-دست توربین‌ها ملاحظه می‌گردد، مقادیر سرعت برای توربین دو پره، نسبت به توربین سه پره، طی مسافت کمتری در حال بازگشت به سرعت ورودی جریان است به گونه‌ای که؛ در فاصله‌ای معادل با سیزده برابر قطر توربین نسبت به محل قرارگیری آن، مقدار سرعت برای توربین دو پره به ۰.۸۷٪ سرعت اولیه و برای توربین سه پره به ۰.۸۱٪ سرعت اولیه خود بازگشته است. دلیل این امر وجود پره اضافی در توربین سه پره نسبت به توربین دو پره می‌باشد که منجر گردیده تا فرآیند بازگشت سرعت به حالت اولیه کندتر شود. همچنین عدم تقارن هندسی از جانب توربین سه پره باعث شده تا کانتور سرعت در پشت توربین نامتقارن گردد. شکل ۱۴ کانتورهای فشار را برای توربین‌های دو و سه پره، در مقاطع متوالی پایین‌دست توربین نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد برای هر دو توربین، مقادیر فشار به صورت منفی می‌باشد و با افزایش فاصله از محل قرارگیری توربین، از مقدار فشار منفی کاسته شده و به مقادیر مثبت میل می‌نماید. علت ایجاد فشار منفی در ناحیه دنباله، که اصولاً ناحیه پایین دست توربین است، ایجاد گردابه‌های موجود در اثر جدایش جریان و نواحی برگشتی جریان می‌باشد [۴۷]. به عبارت ساده‌تر، فشار ایجاد شده در پشت هر مانعی که به نوعی در مسیر جریان آزاد انسداد ایجاد کرده و همزمان پشت آن گردابه تشکیل شود، منفی است. فشار منفی ایجاد شده در نواحی پایین‌دست، در سایر اجسام مسدود کننده جریان مانند ورق‌ها [۴۸]، توربین‌های محور عمودی [۴۹] و توربین‌های محور افقی نیز مشاهده می‌شود [۱]. وسعت ناحیه‌ی فشار منفی ایجاد شده، به خصوصیات جریان و ابعاد انسداد ایجاد شده که همگی بر ایجاد نواحی گردابه‌ای موثرند، وابسته است و با افزایش فاصله‌ی افقی از پشت مانع، میزان فشارهای منفی همانند تحقیق حاضر بهبود می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد کانتورهای فشار برای ناحیه پایین‌دست در توربین سه پره نسبت به توربین دو پره، از بی‌نظمی بیشتری برخوردار است. به نظر می‌رسد که علت این امر، عدم وجود تقارن در توربین سه پره، به دلیل دارا بودن یک پره اضافی است. همچنین همانگونه که مشاهده شد، مقادیر فشار به دست آمده در هر دو توربین منفی است. به نظر می‌رسد دلیل این امر در این واقعیت نهفته باشد که به هنگام برخورد جریان با توربین، سیال از مرکز به سمت خارج از مرکز منحرف شده و مقدار فشار بدست آمده افزایش می‌یابد. بعد از گذر جریان از روی توربین، خطوط جریان مجدداً در حالت برگشت به حالت اولیه خود هستند و به گونه‌ای فشار در مرکز کاهش می‌یابد و موجب ایجاد گردابه‌های فشار منفی می‌گردند. همچنین سیال بعد از برخورد با توربین دچار کاهش سرعت شده و بعد از گذر از توربین مجدداً سرعت آن افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار فشار کاهش پیدا می‌کند. از دیگر عوامل فشار منفی می‌توان به نواحی جریان‌های برگشتی و گردابه‌های ایجاد شده ناشی از ناحیه دنباله به وجود آمده اشاره نمود. همچنین با توجه به شکل ۱۴، می‌توان ملاحظه نمود که فشار در توربین سه پره بعد از برخورد به توربین از مقدار بیشتری برخوردار است. زیرا وجود پره اضافی منجر گردیده است تا مسیر حرکت خطوط جریان از بین پره‌ها بسته شده و

افت سرعت جریان نسبت به توربین دو پره بیشتر باشد. علاوه بر این، سیال از روی توربین سه پره با هد بیشتری نسبت به توربین دو پره عبور نموده و بنابراین بعد از عبور جریان از روی توربین سه پره اختلاف فشار بیشتری در مقایسه با توربین دو پره مشاهده می‌گردد. کانتورهای فشار نشان می‌دهند با پیشروی در ناحیه پایین‌دست مقدار فشار مینیمم در مرکز با کاهش بیشتری مواجه گردیده است که این امر حاکی از افزایش سرعت سیال و همگام شدن آن با سرعت در نواحی بالایی و پایینی می‌باشد. این مسئله تطابق خوبی با تحقیقات ژو و همکارانش [۳۱]، در این زمینه دارد. آنها به بررسی پدیده دنباله پرداخته‌اند و کار خود را با مدل جنسن، مورد مقایسه قرار داده‌اند. مدل جنسن، یک روش نیمه تجربی برای بررسی پدیده دنباله ارائه داده است که روند تغییرات سرعت را در ناحیه پشت توربین به صورت شکل ۱۵، ارائه کرده است.

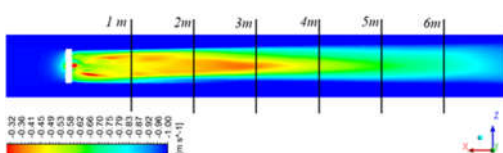
شکل ۱۶، نمودارهای سرعت سیال در مرکز دامنه سیال در ناحیه پایین‌دست را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌گردد، مقدار سرعت‌های بدست آمده برای توربین دو پره در ناحیه پایین‌دست، نسبت به توربین سه پره از مقدار بالاتری برخوردار است، زیرا که اختلاف فشار ایجاد شده برای توربین سه پره از مقدار بیشتری برخوردار گردیده است. همچنین آشفتگی جریان به هنگام برخورد به توربین با تعداد پره بیشتر و توربین حجیم‌تر، موجب گردیده است تا طول ناحیه دنباله در پایین دست توربین سه پره از طولانی‌تر باشد.

شکل ۱۷، کانتور سرعت سیال برای مقاطع مختلف واقع در ناحیه دنباله را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش فاصله قرارگیری مقاطع از محل قرارگیری توربین، مقدار سرعت سیال افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افت سرعت سیال در مقاطع مختلف، برای توربین سه پره نسبت به توربین دو پره به سبب حضور پره مضاعف و ایجاد انسداد بیشتری برخوردار است.

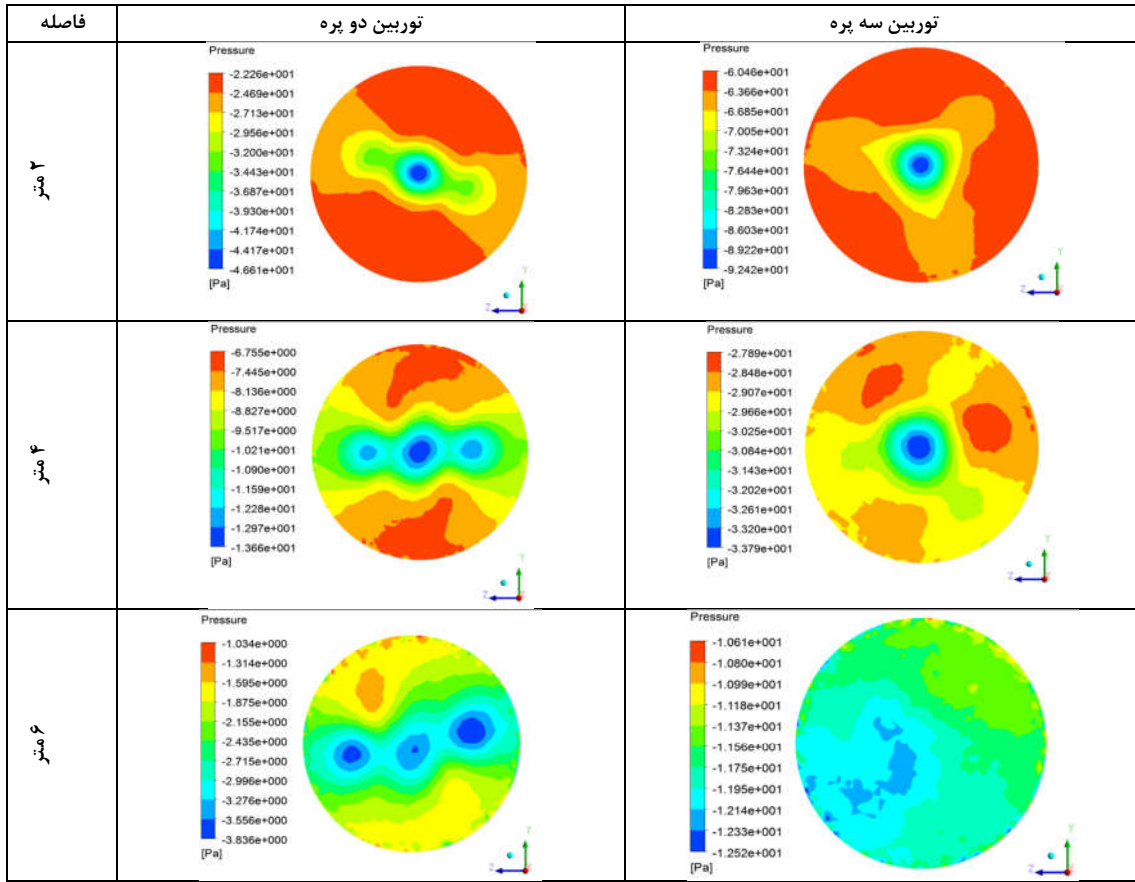
شکل ۱۸، نتایج به دست آمده بر اساس مدل ژو و همکاران [۳۳]، و مدل جنسن [۳۱] را برای پدیده دنباله در قسمت پایین‌دست توربین-های دو پره نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در هر دو مدل، سرعت مرکز دامنه سیال، با افزایش فاصله از محل توربین، به سمت ناحیه پایین دست در حال افزایش است. با مقایسه روند نشان داده شده در شکل ۱۸ و شکل ۱۶، می‌توان مشاهده کرد که علیرغم تفاوتی که در سبب توربین و سرعت سیال در تحقیق حاضر و تحقیقات ژو و جنسن وجود دارد، روند پیش‌بینی شده در تحقیق حاضر با نتایج عددی و تحلیلی تحقیقات جنسن و ژو در تطابق است.



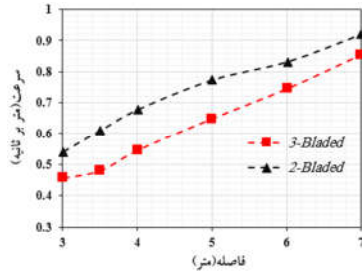
شکل ۱۱- کانتور سرعت در دامنه سیال برای توربین دو پره



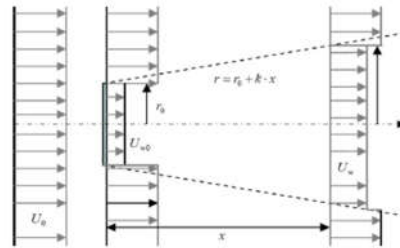
شکل ۱۲- کانتور سرعت در دامنه سیال برای توربین سه پره



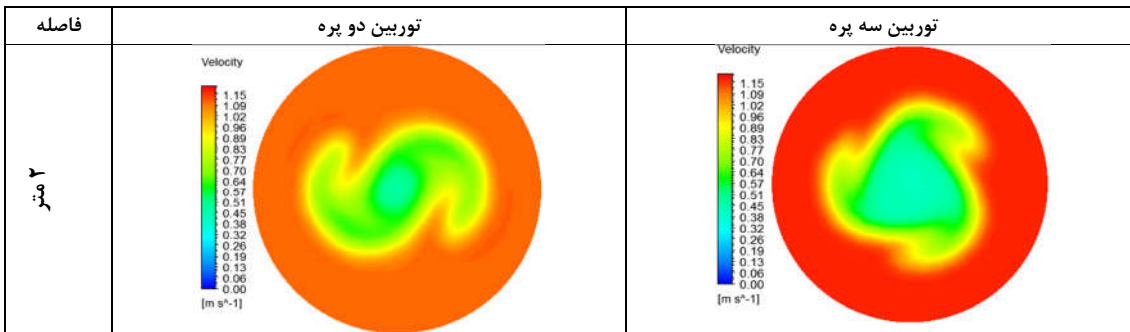
شکل ۱۳- کانتور فشار در مقاطع مختلف در پایین دست توربین‌های دو پره و سه پره

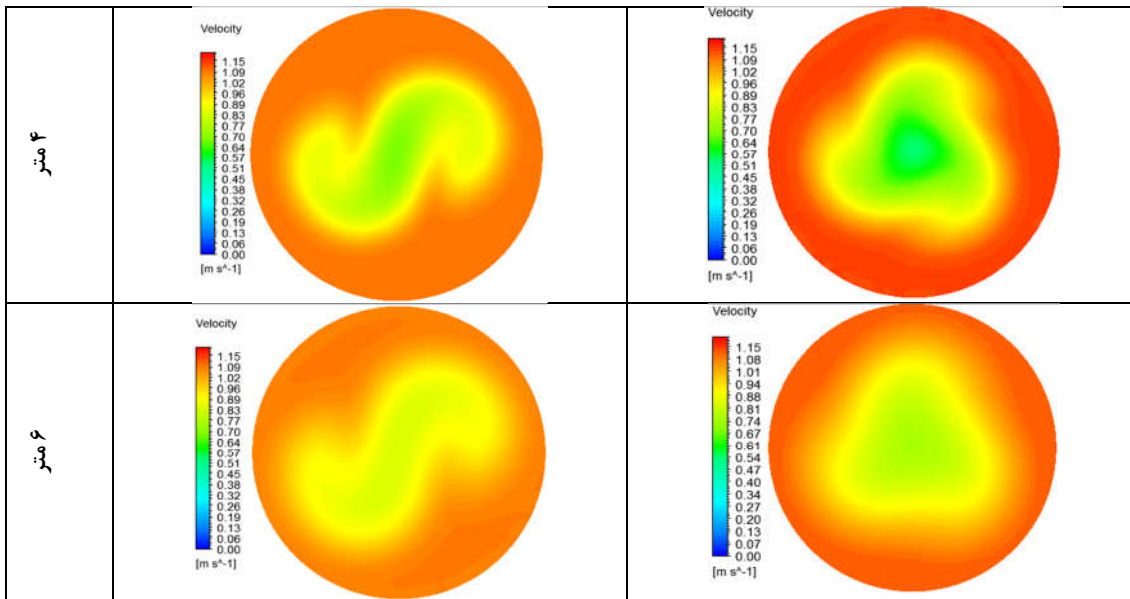


شکل ۱۴- طرحواره مدل جنسن



شکل ۱۵- سرعت جریان در مرکز دامنه سیال



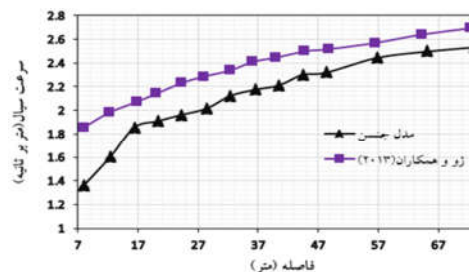


شکل ۱۶- کانتور سرعت در مقاطع مختلف در پایین دست توربین های دو و سه پره

که محدوده مورد استفاده حائز اهمیت می باشد، می توان از توربین های جریان جزر و مدی دوپره که پدیده دنباله در آنها زودتر به پایان می رسد استفاده نمود. در غیر این صورت استفاده از توربین های جریان جزر و مدی سه پره، می تواند منجر گردد تا توان بدست آمده از مقدار بالاتری برخوردار گردد.

۶- مراجع

- [1] Alipour R., Alipour R., Rahimian Kolor S.S., Petrú M., Ghazanfari S.A., On the Performance of Small-Scale Horizontal Axis Tidal Current Turbines. Part 1: One Single Turbine. *Sustainability*, Vol. 12, No. 15, pp. 5985, 2020.
- [2] Alipour R., Alipour R., Fardian F., Kolor S.S.R., Petrú M., Performance improvement of a new proposed Savonius hydrokinetic turbine: a numerical investigation. *Energy Reports*, Vol. 6, No., pp. 3051-3066, 2020.
- [3] Ocean S., Wave and Tidal Energy Market Deployment Strategy for Europe. 2014, June.
- [4] Alipour, R., Alipour, R., Fardian, F., & Tahan, M. H., Optimum performance of a horizontal axis tidal current turbine: A numerical parametric study and experimental validation. *Energy Conversion and Management*, Vol. 258, 115533, 2022.
- [5] González-Longatt F., Wall P., Terzija V., Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior. *Renewable Energy*, Vol. 39, No. 1, p.p. 329-338, 2012.
- [6] Neill S.P., Hashemi M.R., Lewis M.J., Tidal energy leasing and tidal phasing. *Renewable Energy*, Vol. 85, No., pp. 580-587, 2016.
- [7] Thiébot J., Guillou N., Guillou S., Good A., Lewis M., Wake field study of tidal turbines under realistic flow conditions. *Renewable Energy*, Vol. 151, No., pp. 1196-1208, 2020.
- [8] Vennell R., An optimal tuning strategy for tidal turbines. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 472, No. 2195, pp. 20160047, 2016.
- [9] Garrett C., Cummins P., The efficiency of a turbine in a tidal channel. *Journal of fluid mechanics*, Vol. 588, No., pp. 243, 2007.
- [10] Alipour R. Finite element analysis of elongation in free explosive forming of aluminum alloy blanks using CEL method. *International review of mechanical engineering*, Vol. 5, No. 6, pp. 1039-1042, 2011.
- [11] Alipour R. Physically-based modelling for sheet metal cone parts forming under blast loading. *Mechanics & Industry*, Vol. 22, No. 3, 2021.



شکل ۱۷- نتایج به دست آمده از مدل های ژو و جنسن [۳۱، ۳۳]

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

در تحقیق حاضر به بررسی عددی پدیده دنباله به منظور آرایش هر چه بهتر در توربین های جریان جزر و مدی پرداخته شده است. در این راستا با استفاده از ایرفویل S814، به مدل سازی هندسی توربین های دوپره و سه پره، جریان جزر مدی پرداخته شده است و سپس فرآیند شبیه سازی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفته است. دقت خطای حاصل شده در حدود ۱۰ درصد به دست آمد که نشان داد رویکرد شبیه سازی از دقت بالایی برخوردار است. نتایج نشان داد که:

- ۱- همانند مطالعات پیشین [۱، ۳۳، ۴۶]، در توربین هایی که با ایرفویل S814، طراحی می گردند، بیشینه مقادیر توان و گشتاور در محدوده TSR بین ۴ تا ۶، به دست خواهند آمد.
- ۲- مقدار بیشینه ضریب توان برای توربین سه پره بیشتر از دو پره می باشد.
- پس از آن به بررسی ناحیه دنباله در توربین های جریان جزر و مدی دوپره و سه پره پرداخته شد و نتایج نشان داد:
- ۳- پدیده دنباله در توربین های جریان جزر و مدی دوپره، زودتر از توربین های جریان جزر و مدی سه پره به سرانجام خواهد رسید.
- با استفاده از نتیجه گیری های ۱ و ۲ و ۳ می توان بیان نمود:
- ۴- به هنگام چیدمان توربین در یک مزرعه جریان جزر و مدی،

- in tidal arrays. *Renewable Energy*, Vol. 177, No., pp. 482-494, 2021.
- [31] Jo C.H., Lee J.H., Rho Y.H., Lee K.H., Performance analysis of a HAT tidal current turbine and wake flow characteristics. *Renewable energy*, Vol. 65, No., pp. 175-182, 2014.
- [32] Savidge G., Ainsworth D., Bearhop S., Christen N., Elsaesser B., Fortune F., Inger R., Kennedy R., McRobert A., Plummer K.E., Strangford Lough and the SeaGen tidal turbine, in *Marine renewable energy technology and environmental interactions*. 2014, Springer. p. 153-172.
- [33] Farokhi Nejad A., Alipour R., Shokri Rad M., Yazid Yahya M., Rahimian Koloor S. S., & Petrú M., Using finite element approach for crashworthiness assessment of a polymeric auxetic structure subjected to the axial loading. *Polymers*, Vol. 12, No. 6, pp. 1312, (2020).
- [34] Alipour, R., & Nejad, A. F., . Creep behaviour characterisation of a ferritic steel alloy based on the modified theta-projection data at an elevated temperature. *International Journal of Materials Research*, Vol. 107, No 5., pp. 406-412, 2016.
- [35] Menter F.R., Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [36] Mortazavi M., Razaghi R., Numerical investigation of air suction and blow mechanism for passive control flow over a wind turbine airfoil. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 51, No. 3, pp. 201-210, 2021.
- [37] Stringer R., Zang J., Hillis A., Unsteady RANS computations of flow around a circular cylinder for a wide range of Reynolds numbers. *Ocean Engineering*, Vol. 87, No., pp. 1-9, 2014.
- [38] Ramana Murthy S., Kishore Kumar S. Effect of different turbulence models on the numerical analysis of axial flow turbine stage of a typical turbofan engine. in *Gas Turbine India Conference*. 2013. American Society of Mechanical Engineers.
- [39] Moshfeghi M., Song Y.J., Xie Y.H., Effects of near-wall grid spacing on SST-K- ω model using NREL Phase VI horizontal axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 107, No., pp. 94-105, 2012.
- [40] Ghasemian M., Nejat A., Aerodynamic noise prediction of a horizontal axis wind turbine using improved delayed detached eddy simulation and acoustic analogy. *Energy Conversion and Management*, Vol. 99, No., pp. 210-220, 2015.
- [41] Al-Dabbagh M., Yuce M., Numerical evaluation of helical hydrokinetic turbines with different solidities under different flow conditions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 16, No. 8, pp. 4001-4012, 2019.
- [42] Ostos I., Ruiz L., Gajic, M., Gómez W., Bonilla A., Collazos C., A modified novel blade configuration proposal for a more efficient VAWT using CFD tools. *Energy conversion and management*, Vol. 180, No., pp. 733-746, 2019.
- [43] Talukdar P.K., Sardar A., Kulkarni V., Saha U.K., Parametric analysis of model Savonius hydrokinetic turbines through experimental and computational investigations. *Energy Conversion and Management*, Vol. 158, No., pp. 36-49, 2018.
- [44] Borkowski D., Węgiel M., Ocloń P., Węgiel T., CFD model and experimental verification of water turbine integrated with electrical generator. *Energy*, Vol. 185, No., pp. 875-883, 2019.
- [45] Ingram G., Wind turbine blade analysis using the blade element momentum method. version 1.1. Durham University, Durham, No., 2011.
- [46] Jing F.M., Ma W.J., Zhang L., Wang S.Q., Wang X.H., Experimental study of hydrodynamic performance of full-scale horizontal axis tidal current turbine. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Vol. 29, No. 1, pp. 109-117, 2017.
- [47] Cresswell N., Ingram G., Dominy R., The impact of diffuser augmentation on a tidal stream turbine. *Ocean engineering*, Vol. 108, No., p.p. 155-163, 2015.
- [48] Hemmati A., Wood D.H., Martinuzzi R.J., Wake dynamics and surface pressure variations on two-dimensional normal flat plates. *AIP Advances*, Vol. 9, No. 4, pp. 045209, 2019.
- [49] Layeghmand K., Tabari N.G., Zarkesh M., Improving efficiency of Savonius wind turbine by means of an airfoil-shaped deflector. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42, No. 10, pp. 1-12, 2020.
- [12] Chen L., Yao Y., Wang Z.I., Development and validation of a prediction model for the multi-wake of tidal stream turbines. *Renewable Energy*, No., 2020.
- [13] Li X., Li M., Amoudry L.O., Ramirez-Mendoza R., Thorne P.D., Song Q., Zheng P., Simmons S.M., Jordan L.B., McLelland S.J., Three-dimensional modelling of suspended sediment transport in the far wake of tidal stream turbines. *Renewable Energy*, Vol. 151, No., pp. 956-965, 2020.
- [14] Mycek P., Gaurier B., Germain G., Pinon G., Rivoalen E., Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. Part II: Two interacting turbines. *Renewable Energy*, Vol. 68, No., pp. 876-892, 2014.
- [15] Stallard T., Collings R., Feng T., Whelan J., "Interactions between tidal turbine wakes: experimental study of a group of three-bladed rotors". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 371, No. 1985, pp. 20120159, 2013.
- [16] Coles D., Blunden L., Bahaj A., Experimental validation of the distributed drag method for simulating large marine current turbine arrays using porous fences. *International journal of marine energy*, Vol. 16, No., pp. 298-316, 2016.
- [17] Baba-Ahmadi M.H., Dong P., Numerical simulations of wake characteristics of a horizontal axis tidal stream turbine using actuator line model. *Renewable Energy*, Vol. 113, No., pp. 669-678, 2017.
- [18] Liu J., Lin H., Purimitla S.R., Wake field studies of tidal current turbines with different numerical methods. *Ocean Engineering*, Vol. 117, No., pp. 383-397, 2016.
- [19] Ahmed U., Apsley D., Afgan I., Stallard T., Stansby P., Fluctuating loads on a tidal turbine due to velocity shear and turbulence: Comparison of CFD with field data. *Renewable Energy*, Vol. 112, No., pp. 235-246, 2017.
- [20] Mahmoodi E., Rafee R., Effect of the nozzle shape on its off-design performance in the presence of shock wave and boundary layer separation. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 51, No. 2, pp. 205-213, 2021.
- [21] Eghghaghi M.B., Ghiyasi K.K., Vajdi M., The Effect of Changes in Impeller geometry of Centrifugal Pump in Cavitation Phenomena. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 48, No. 3, pp. 9-18, 2018.
- [22] Ahmadi, M.H., Yang Z., The evolution of turbulence characteristics in the wake of a horizontal axis tidal stream turbine. *Renewable Energy*, Vol. 151, No., pp. 1008-1015, 2020.
- [23] Gu J., Cai F., Müller N., Zhang Y., Chen H., Two-Way Fluid-Solid Interaction Analysis for a Horizontal Axis Marine Current Turbine with LES. *Water*, Vol. 12, No. 1, pp. 98, 2020.
- [24] Harrison M.E., Batten W.M.J., Myers L.E., Bahaj A.S., Comparison between CFD simulations and experiments for predicting the far wake of horizontal axis tidal turbines. *IET Renewable Power Generation*, Vol. 4, No. 6, pp. 613-627, 2010.
- [25] Turnock S.R., Phillips A.B., Banks J., Nicholls-Lee R., Modelling tidal current turbine wakes using a coupled RANS-BEMT approach as a tool for analysing power capture of arrays of turbines. *Ocean Engineering*, Vol. 38, No. 11, pp. 1300-1307, 2011.
- [26] Nuernberg M., Tao L., Three dimensional tidal turbine array simulations using OpenFOAM with dynamic mesh. *Ocean Engineering*, Vol. 147, No., pp. 629-646, 2018.
- [27] Ebdon T., Allmark M.J., O'Doherty D.M., Mason-Jones A., O'Doherty T., Germain G., Gaurier B., The impact of turbulence and turbine operating condition on the wakes of tidal turbines. *Renewable Energy*, Vol. 165, No., pp. 96-116, 2021.
- [28] Zhang Z., Zhang Y., Zhang J., Zheng Y., Zang W., Lin X., Fernandez-Rodriguez E., Experimental study of the wake homogeneity evolution behind a horizontal axis tidal stream turbine. *Applied Ocean Research*, Vol. 111, No., pp. 102644, 2021.
- [29] Chen Y., Sun J., Lin B., Lin J., Guo J., Spatial evolution and kinetic energy restoration in the wake zone behind a tidal turbine: An experimental study. *Ocean Engineering*, Vol. 228, No., pp. 108920, 2021.
- [30] Modali P.K., Vinod A., Banerjee A., Towards a better understanding of yawed turbine wake for efficient wake steering