

بررسی عددی اثر حضور توربین انرژی جنبشی آب بر میدان جریان یک کانال روباز با مقطع مرکب

مهتا سمیع^۱

سیدحسین مهاجری^{۲*}

سیدعباس حسینی^۳

چکیده

امروزه به دلیل مشکلات محیط زیستی در نیروگاه‌های برق-آبی، استفاده از توربین انرژی جنبشی آب بیش از پیش رواج یافته است. حضور این نوع توربین در رودخانه‌ها، ساختار طبیعی جریان را تحت تأثیر قرار دهد. مطالعات پیشین بر این نوع توربین، اغلب در کانال ساده (با مقطع مستطیلی) انجام شده است و اثر حضور توربین در یک کانال مستقیم با مقطع پیچیده‌تر که مشابه مقطع رودخانه‌ها باشد، مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مطالعه، اثر حضور توربین در یک کانال مرکب به روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی‌ها در ابزار فلونت نرم‌افزار Ansys 16 انجام شده است. به منظور مدل‌سازی نحوه حرکت توربین انرژی جنبشی از روش دستگاه مرجع متحرک بهره برده شده است. نتایج نشان داد که میدان جریان و توزیع فشار کانال مرکب در اثر حضور توربین به‌طور کلی تغییر می‌کند، به نحوی که به‌جای تشکیل سلول‌های رایج جریان ثانویه در کانال مرکب، یک جریان ثانویه قوی از سمت سیلاب‌دشت مخالف به سمت سیلاب‌دستی که توربین در آن قرار دارد، تشکیل می‌شود. به‌علاوه مشاهده شد که حضور توربین موجب تشکیل یک ناحیه با سرعت کم در پشت و نواحی پرسرعت در اطراف توربین می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که با تغییر سرعت جریان ورودی، میدان جریان به‌شدت تأثیر می‌پذیرد به نحوی که در سرعت‌های پائین میدان جریان شبیه به میدان جریان رایج در کانال‌های مرکب هست و در سرعت‌های بالا حضور توربین کل میدان جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر این اساس، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در سرعت‌های پائین جریان، تأثیر حضور توربین انرژی جنبشی آب بر میدان جریان کمتر باشد، هرچند که میزان تولید انرژی با کاهش سرعت جریان کاهش می‌یابد که در چنین شرایطی نصب توربین به‌صرفه نیست.

واژه‌های کلیدی:

توربین انرژی جنبشی آب، کانال مستقیم با مقطع مرکب، میدان جریان، روش دستگاه مرجع متحرک.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران-آب، دانشکده عمران هنر و معماری، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی hossein.mohajeri@khu.ac.ir

۳. استادیار، گروه مهندسی عمران-آب، دانشکده عمران، هنر و معماری، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران

$$TSR = \frac{R\omega_s}{U} \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق R شعاع توربین و ω_s سرعت دورانی محور (rad/s) است.

به‌منظور توسعه فناوری‌های نوین در توربین هیدروکینتیکی آب، مطالعات بین‌رشته‌ای فراوانی انجام شده است. به این منظور در بسیاری از این مطالعات توربین هیدروکینتیکی آب به‌صورت عددی مدل‌سازی شده‌اند. گانی^{۱۰} و کایگوسوز^{۱۱} در سال ۲۰۱۰ یک مطالعه کلی درباره‌ی انواع انرژی محرکه آب (جزر و مد، رودخانه، موج و ...) ارائه دادند. خان و همکاران در سال ۲۰۰۹ جزئیاتی از ارزیابی انواع سیستم‌های توربین (با محور افقی و عمودی) و طبقه‌بندی آن‌ها ارائه کردند. همار^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۱۴ با توجه به این‌که انواع گوناگونی از توربین جریان آبی در رودخانه‌ها و مناطق جزر و مدی و اقیانوس‌ها در حال توسعه می‌باشند و به خاطر این‌که بعضی از این توربین در مقیاس بزرگی هستند، احتمال برخورد با جانوران دریایی را مورد بررسی قرار دادند. کلکار و بنرجی در سال ۲۰۱۵ با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی اثر انسداد، وابستگی به عدد رینولدز و اثر نزدیکی به مرز، بر میدان جریان و همچنین عملکرد یک توربین هیدروکینتیکی آب در یک کانال مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. نسبت انسداد زیر ۱۰٪ هیچ‌گونه تأثیر مثبتی بر عملکرد توربین را نشان نداد. نسبت انسداد را از ۱۰٪ تا ۴۲٪ افزایش دادند و بهبود ۳۵ درصدی در ضریب نیرو تولیدی مشاهده شد. همچنین با توجه به نتایج آزمایشگاهی برای عملکرد بهینه پیشنهاد شد که توربین حداقل با یک شعاع فاصله از دیواره و نیم شعاع فاصله از سطح آزاد قرار گیرد. موتول^{۱۳} و کالناکس^{۱۴} در سال ۲۰۱۴ به مطالعه مروری پتانسیل‌های موجود در جریان آزاد رودخانه و مزیت‌های تولید توان از جریان آزاد رودخانه نسبت به جریان جزر و مدی اشاره کرده است. در ادامه به روش‌های ارزیابی رودخانه و همچنین اندازه‌گیری‌ها و محاسبات اشاره شده است. از نتایج این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

انرژی تولیدی ناشی از توربین هیدروکینتیکی آب^۱ موضوع مهمی است که در سال‌های اخیر به طرز قابل توجهی مورد مطالعه قرار گرفته است (خان^۲ و همکاران، ۲۰۰۹) و (روپ^۳ و همکاران، ۲۰۱۴). توربین هیدروکینتیکی آب، توربینی است که در مسیر آب در یک آبراهه مانند کانال انتقال آب و یا رودخانه قرار می‌گیرند قرار می‌گیرند و انرژی خود را مستقیم از جریان آب می‌گیرند (لوپز^۴، ۲۰۱۵). در حقیقت در این نوع از توربین از هد استاتیکی آب استفاده نمی‌شود و انرژی مستقیم از جریان سیال استخراج می‌شود. اهمیت استفاده از این فناوری به تجدیدپذیر بودن آن و سازگاری بالای آن با محیط‌زیست مربوط است. ضمن این‌که در این نوع انرژی مشکلات محیط زیستی ناشی از ساخت سدها و جمع شدن آب در مخزن سدها به‌طور کامل از بین می‌رود.

با توجه به استخراج انرژی از جریان سیال، در این نوع توربین، قدرت استخراجی از جریان آب از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (آنی^۵ و کیرکه^۶، ۲۰۱۰):

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A U^3 \quad (1)$$

در این رابطه C_p ضریب توان توربین است که مقدار آن بستگی به نوع توربین داشته و در عمل معیار سطح بازده توربین را مشخص می‌کند. چگالی سیال است که از 1000 kg/m^3 (برای آب رودخانه‌ها) تا 1025 kg/m^3 (برای آب دریاها) متغیر می‌باشد. در واقع وجود املاح و اختلاف دما آب دریا سبب می‌شود که چگالی آب متغیر باشد. U سرعت سیال است و در نهایت A سطح توربین است.

یکی از پارامترهای مهم که بر ضریب توان توربین هیدروکینتیکی آب اثر دارد، نسبت سرعت نوک^۷ است. این پارامتر یک عدد بی‌بعد است که برابر با نسبت سرعت نوک پره به سرعت جریان است و از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید (کلکار^۸ و بنرجی^۹، ۲۰۱۳):

^۱ Hydrokinetic Turbine

^۲ Khan

^۳ Roupp

^۴ Lopez

^۵ Anyi

^۶ Kirke

^۷ Tip-Speed Ratio (TSR)

^۸ Kolekar

^۹ Banerjee

^{۱۰} Ganey

^{۱۱} kaygusuz

^{۱۲} Hammar

^{۱۳} Mutule

^{۱۴} Kalnacs

بررسی مطالعات پیشین بیانگر این واقعیت است که در ارتباط با اثر حضور توربین بر میدان جریان، از اثر شکل مقطع عرضی کانال صرف نظر شده است و تنها به ویژگی‌ها، اجزای تشکیل دهنده و عملکرد هیدرولیکی توربین پرداخته شد. اغلب این مدل‌سازی‌ها در کانال با مقطع ساده مانند مستطیلی یا دایره‌ای انجام شده است. در این رابطه، اخیراً نیکوهمت و همکاران (۱۳۹۶) در یک کانال دوزنقه‌ای تنها به بررسی اثر زاویه پره توربین پرداخته‌اند. با این وجود تاکنون اثر قرارگیری یک توربین هیدروکینتیکی آب در یک کانال مرکب که به شرایط جریان در رودخانه‌ها شبیه است، بررسی نشده است. در این شرایط، پیچیدگی‌های خاص جریان مانند حضور جریان‌های ثانویه و ساختار آشفتگی در ناحیه تداخلی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت می‌تواند بر عملکرد توربین اثر مثبت یا منفی داشته باشد. به علاوه از نظر محیط زیستی تغییر رژیم طبیعی مقطع در شرایط حضور توربین در کانال مستقیم با مقطع مرکب نیاز به بررسی دقیق دارد که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

در این مقاله به بررسی عددی این اثر بر میدان جریان در حضور توربین پرداخته شده است. همچنین شرایط جریان ایجاد شده با شرایط طبیعی جریان در کانال‌های روباز مرکب مقایسه خواهد شد. به این منظور مدل-سازی‌های عددی انجام شده است که در ادامه این مدل-سازی توضیح داده خواهند شد.

معادلات حاکم:

این مطالعه به شبیه‌سازی حرکت سیال و توربین اختصاص دارد. معادلات حاکم بر حرکت سیال، معادلات پیوستگی (بقای جرم) و اندازه حرکت (مومنتم) در یک جریان آشفته می‌باشند. در این شرایط معادله پیوستگی به صورت معادله (۳) قابل بیان است:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho' u'_i) = 0 \quad (3)$$

(چگالی $\rho' = 0$ برای جریان تراکم ناپذیر از آنجایی که صفر است) است، معادله فوق به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

در روابط بالا، ρ چگالی سیال و u بیانگر سرعت جریان می‌باشد و اندیس i بیانگر مؤلفه جریان است. همچنین

- روش‌های مختلف افزایش سرعت جریان آب مانند استفاده از دیفیوزر، کانال داخلی.

- درحالی‌که رودخانه برای نقل و انتقال و تفریح استفاده می‌شود، می‌توان از نصف سطح مقطع آن برای تولید برق استفاده نمود.

- به وسیله تجهیزات هیدروکینتیکی آب در طول هر کیلومتر از رودخانه، طبق ارزیابی‌ها میزان جذب انرژی به وسیله توربین هیدروکینتیکی آب در رودخانه از ۱/۲ کیلومتر پهنا با عمق متوسط ۳ متر به شرح زیر است:

۱ مگاوات و ۷/۵ گیگاوات در سال وقتی سرعت جریان ۰/۸ متر بر ثانیه باشد.

۶ مگاوات و ۵۰ گیگاوات در سال به ازای جریانی با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه باشد.

توربین هیدروکینتیکی آب می‌تواند در محیط‌های گوناگون از دریا تا کانال‌های انتقال آب و توزیع آب در شهرها مورد استفاده قرار گیرند.

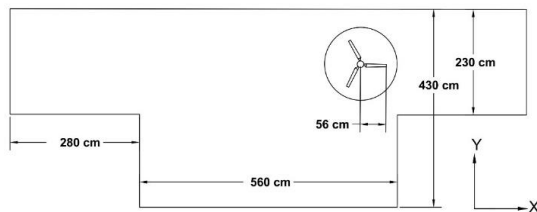
در محیط‌های رودخانه‌ای نیز استفاده از این نوع توربین در سال‌های اخیر رواج گسترده‌ای یافته است. جریان در رودخانه‌ها اغلب به صورت کانال مرکب شبیه‌سازی و مطالعه می‌شود. در کانال مرکب یک جریان عمیق در کانال اصلی و یک جریان با عمق کم در سیلاب‌دشت تولید می‌شود. در این شرایط گرادیان شدید سرعت بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت موجب تولید گردابه‌های بزرگ مقیاس و تبادل مومنتم شدید بین دو مقطع کم عمق و عمیق (منطق اندرکنش) می‌شود (شینو^۱ و نایت^۲، ۱۹۹۱). علی‌رغم پژوهش‌های انجام شده در مورد کانال مرکب، طبیعت سه‌بعدی گردابه‌ها و پیچیدگی‌های آشفتگی جریان در ناحیه اندرکنش به طور کامل مشخص نشده است (نبی‌پور و همکاران، ۱۳۹۵). در کانال مرکب سرعت طولی در کانال اصلی معمولاً بیشتر از سرعت در سیلاب‌دشت‌ها است که نتیجه آن به وجود آمدن یک تنش برشی ظاهری است که در اثر این اختلاف سرعت در محل اتصال کانال اصلی به سیلاب‌دشت‌ها به وجود می‌آید. تنش برشی ظاهری باعث ایجاد آشفتگی و گردابه‌های سه‌بعدی در مرز کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها می‌شود (الوادی^۳ و همکاران، ۲۰۱۸).

^۱Shiono

^۲Knight

^۳Alwadi

همانند آنچه در شکل (۱) نمایش داده شده است، قرار داده شد. در این مطالعه ارتفاع کانال اصلی ۲ متر، ارتفاع سیلابدشت ۲/۳ متر، شعاع توربین ۰/۵۶ متر و طول پره‌ها ۴۹/۹۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. این ابعاد و هندسه توربین با توجه به مطالعه‌ای کلکار و بنرجی در این زمینه انجام دادند انتخاب شد. آب در این مطالعه با چگالی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه و در دمای ۲۴/۸۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. ابعاد و هندسه کانال بر اساس مقادیر مشاهداتی در شرایط طبیعی رودخانه‌ها انتخاب شدند (وول^۳، ۲۰۱۳). همچنین به‌منظور اطمینان از برقراری شرایط توسعه‌یافتگی جریان لایه مرزی در کانال، طول کانال ۱۶ متر در نظر گرفته شد که با توجه به عمق آب در این کانال مرکب، در موقعیت قرارگیری توربین جریان به‌طور کامل توسعه‌یافته است. برای رسم پره و توربین و دامنه‌ی محاسباتی از نرم‌افزار دیزاین مودلر انسیس^۴ که بخش مربوط به طراحی هندسه نرم افزار انسیس است، استفاده شده‌است.



شکل (۱): مقطع عرضی کانال و محل قرارگیری توربین

شرایط مرز ورودی در این مطالعه بر اساس مرز ورودی سرعت ورودی ثابت^۵ است. در این شرایط سرعت و عمق جریان در ورودی برابر با ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. شرط مرزی خروجی از نوع خروجی^۶ در نظر گرفته شد. به‌منظور شبیه‌سازی سطح آزاد از مرز تقارن^۷ بهره برده شد. در نهایت برای پره و محور توربین دیواره متحرک با سرعت دورانی نسبی صفر و شرط عدم لغزش فرض شده است. مدل‌سازی در شرایط توصیف‌شده در دو حالت حضور و عدم حضور توربین مدل‌سازی و شبیه‌سازی شدند. در ادامه به‌منظور بررسی اثر سرعت ورودی بر نتایج مشاهداتی سرعت ورودی تغییر داده شدند. در این شرایط چهار سرعت ورودی متفاوت برابر با ۰/۳۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ متر بر ثانیه است. با توجه به‌سرعت رایج در رودخانه‌ها این مقادیر انتخاب شد.

علامت بیان‌گر متوسط جریان است. معادله اندازه حرکت در جریان آشفته معادله میانگین‌گیری شده رینولدز موسوم به RANS است و این رابطه به‌صورت زیر است:

$$\left[\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} \right] = \overline{B}_i - \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \quad (5)$$

$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right]$ فشار، P بردار سرعت، اندیس i بیان‌گر مؤلفه جریان و μ لزجت سیال است. این معادلات بر اساس خواص جریان آشفته، تقریبی از حل‌های متوسط زمانی معادلات ناویراستوکس ارائه می‌دهند. سمت چپ این معادله تغییراتی را در مومنتوم اجزای سیال با توجه به ناپایداری و جابجایی در جریان متوسط نمایش می‌دهد. این تغییرات به‌وسیله نیروهای بدنه‌ای، تنش‌های همسانگرد مربوط به میدان فشار، تنش‌های لزجی و تنش‌های ظاهری مربوط به‌سرعت نوسانی (که به تنش‌های رینولدز معروف هستند) متوازن می‌شوند. این عبارت تنش رینولدز غیرخطی، نیاز به مدل‌سازی اضافی به‌منظور نزدیکی به معادله RANS برای حل شدن دارد و مدل‌های آشفتگی مختلفی را ایجاد می‌کنند.

مدل عددی:

در این مطالعه به جهت حل عددی میدان جریان، از نرم‌افزار فلونت (در نرم‌افزار انسیس ۱۶^۱) بهره برده شد. فلونت یکی از نرم‌افزارهای بسیار قوی در دینامیک سیالات محاسباتی است که کاربرد آن در محاسبه پارامترهای میدان جریان در توربومشین‌ها بسیار رایج است (گالیندو^۲ و همکاران، ۲۰۱۳). معادلات RANS، معادلات متوسط زمانی برای حرکت جریان سیال هستند. ایده تشکیل‌دهنده این معادلات، تجزیه رینولدز است که به‌وسیله آن، یک مقدار لحظه‌ای، به مقادیر متوسط زمانی و نوسانی خود تجزیه شده‌است.

مدل‌سازی از شبیه‌سازی یک کانال مرکب تشکیل شده است که در شرایط حضور و عدم حضور توربین مطالعه می‌شود. شکل کلی هندسه مطالعاتی در مقطع عرضی در شکل (۱) همراه با ابعاد هندسی نمایش داده شده است. به این منظور، ابتدا یک کانال مرکب در نرم‌افزار مدل شد و سپس یک توربین سه پره‌ای در مسیر جریان

^۳ Wohl

^۴ Ansys Design Modeler

^۵ Velocity Inlet

^۶ Outflow

^۷ Symmetry

^۱ Ansys 16

^۲ Galindo

مدل $K-\omega$ در نشان دادن این سلول‌های عملکردی مشابه مدل SST از خود نشان داد و در نهایت مدل SSG بهترین عملکرد را نشان داد و نتایج آن تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. بر این اساس در این مطالعه نیز از این نسخه از مدل RSM بهره برده شد. زمان پردازش و حافظه بیشتری مورد نیاز است که به جهت شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه در این مطالعه به اجبار از این مدل استفاده شد.

ناحیه محاسباتی به دو قسمت ساکن و متحرک تقسیم شده است. برای شبکه‌بندی از نرم‌افزار مشینگ‌انسیس^۲ استفاده شده است. تعداد المان‌های کل دامنه‌ی محاسباتی بیش از ۲/۷ میلیون المان است. برای ابتدا و انتهای کانال از شبکه‌بندی سازمان‌یافته^۳ (المان منشوری) و جهت شبکه‌بندی ناحیه میانی که شامل ناحیه چرخان است، از شبکه‌بندی غیرساختاری^۴ استفاده شده است. همچنین به منظور انسجام شبکه و کاهش خطا برای سطح مشترک این دو ناحیه از شبکه‌بندی تطبیقی^۵ استفاده شده است. شبکه‌بندی اطراف پره تأثیر زیادی بر دقت نتایج دارد. بدین منظور از مش لایه‌ای مناسب استفاده شده است تا مقدار y^+ (فاصله اولین گره از دیواره) کمتر شده و نتایج دقیق‌تر باشد. همچنین برای دیواره پایین کانال از مش لایه مرزی استفاده شده است. در شکل‌های (۲) تا (۴) شبکه‌بندی این قسمت از شبیه‌سازی نشان داده شده است. همچنین در این شکل‌ها محور مختصات مورد استفاده در این مطالعه نمایش داده شده است.

یکی از مهم‌ترین بحث‌ها در مطالعه حرکت توربین‌ها، شبیه‌سازی حرکت پره‌های توربین است. برای این هدف، دو روش وجود دارد. در روش نخست به روش مش‌های متحرک^۶ است. این روش بسیار کارا و با دقت بالا نتایج خروجی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. با این وجود هزینه محاسباتی بسیار بالا و نیز مشکل فراوان در محل اتصال مش‌های متحرک به شبکه ثابت استفاده از این روش را در این نوع مطالعات بسیار محدود کرده است. در روش دوم، استفاده از روش دستگاه مختصات متحرک است.

انتخاب مقادیر کمتر برای سرعت ورودی منجر به بازدهی بسیار کمی می‌شود بنابراین انتخاب این سرعت-ها مناسب به نظر می‌رسد. میزان باقیمانده‌ای که با رسیدن به آن انجام مراحل تکراری حل معادلات متوقف می‌شود، ۵-۱۰ در نظر گرفته شده است. محاسبات برای سرعت دورانی ۲/۵ تا ۱۴ رادیان بر ثانیه انجام شده و در نتیجه TSRهای (نسبت سرعت نوک) متغیر به دست آمد.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی‌ها در این مطالعه انتخاب مدل آشفتگی مناسب است. تاکنون تعداد فراوانی مدل آشفتگی ارائه شده است که هر یک برای رژیم‌های خاص جریانی و حتی در ناحیه‌ای خاص از میدان جریان معتبر و دقیق می‌باشند. انتخاب این مدل باید بر اساس ملاحظات از قبیل محصورشدگی فیزیکی جریان، منابع محاسباتی موجود و زمان شبیه‌سازی صورت پذیرد (حجتی و همکاران، ۱۳۹۵). در این بین باید توجه داشت که از بین مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار تنها مدل‌های آشفتگی برای این مطالعه مناسب می‌باشند که قادر به تولید جریان‌های ثانویه ناشی از آشفتگی تشکیلی در کانال مرکب باشند؛ که این مورد از مشکلات این مدل‌سازی است. در حقیقت به جهت مدل‌سازی جریان ثانویه ناشی از آشفتگی (جریان ثانویه نوع ۲) به ناچار باید سراغ مدل‌های آشفتگی پیچیده‌تر رفت که با توجه به ابعاد کانال، ابعاد شبکه‌بندی و نیز چرخش توربین، هزینه محاسباتی بالایی را داشت.

با توجه به اهمیت جریان آشفته در اطراف توربین انتخاب مدل آشفتگی مناسب در این تحقیق مسئله مهمی است. به این منظور مدل فیزیکی همراه با مدل‌های آشفتگی مختلف مانند مدل $K-\omega$ ، RSM و ASM مدل‌سازی شدند و نتایج آن‌ها با یکدیگر و نیز جریان رایج در کانال مرکب مقایسه گشتند. در نهایت مدل RSM برای شبیه‌سازی‌های اصلی به کار برده شد. این مدل برای جریان بسیار چرخشی استفاده می‌شود. تاج نسایی^۱ و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثر مدل‌های آشفتگی مختلف با تأکید بر نسخه‌های مدل‌های RSM بر جریان ثانویه، سرعت و تنش برشی در یک کانال دوزنقه‌ای پرداختند. مدل آشفتگی SST در نشان دادن سلول‌های جریان ناتوان بود، مدل آشفتگی LRR در نشان دادن سلول‌های جریان عملکرد بهتری نشان داد.

^۲ Ansys Meshing

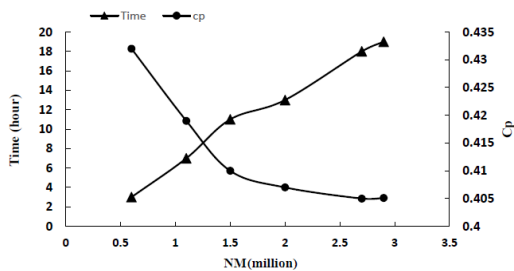
^۳ Structured Mesh

^۴ Unstructured Mesh

^۵ Conformal Mesh

^۶ Moving Mesh

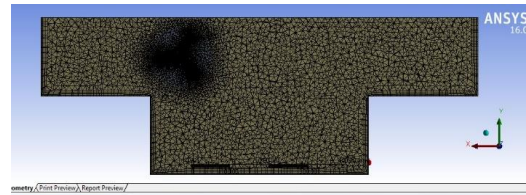
المان‌های مش برحسب میلیون و محور عمودی نشان-دهنده زمان و ضریب توان است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، بعد از تعداد ۲/۷ میلیون المان، با ریزتر شدن تعداد شبکه تغییر چندانی در ضریب توان توربین ایجاد نشده است، لذا در این مقدار نتایج بهینه می‌باشند. واضح است که با افزایش تعداد المان‌ها زمان محاسبات به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. به طوری که برای تعداد المان ۲/۷ میلیون ۱۸ ساعت و برای شش صد هزار المان به ۳ ساعت برای محاسبات و شبیه‌سازی زمان نیاز بود (با استفاده از یک سیستم ۵ هسته‌ای).



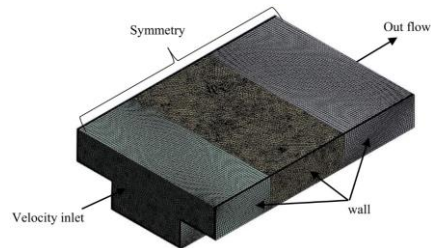
شکل (۵): بررسی اثر تعداد مش‌ها در شبکه بر مقدار C_p و زمان محاسباتی

اعتبار سنجی:

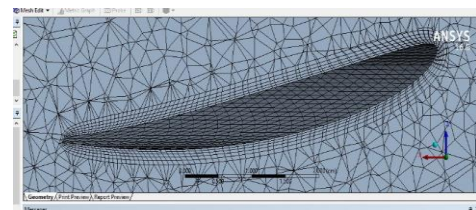
جهت صحت سنجی از اطلاعات تجربی که توسط کلکار و بنرجی (۲۰۱۵) گزارش شده، استفاده شده است. آزمایش تجربی آن‌ها در یک کانال روباز آب با توربین سه پره‌ای و ضرایب عملکرد این توربین در شرایط مختلف اندازه‌گیری شده است. ابعاد کانال مربعی شکل با ابعاد برابر $0.61 \text{ m} \times 0.61 \text{ m}$ و طول کانال 1.98 m است. سرعت جریان در ورودی 0.9 m/s و نسبت نوک به سرعت (TSR) متغیر است. شعاع پره‌ها 14 cm و سرعت دورانی توربین بین 30 rpm تا 300 rpm است. بار گشتاور سنج 500 نمونه در ثانیه نمونه‌برداری می‌کند. در شکل (۶) مقایسه نتایج تجربی و دینامیک سیالاتی کلکار و بنرجی با مطالعه حاضر برای پارامتر ضریب توان نشان داده شده است. محور افقی نشان‌دهنده TSR است که از رابطه (۲) به دست آمده و محور عمودی ضریب توان (C_p) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده در قسمت پیشینه ضریب توان تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد و حداکثر خطای مشاهده شده در این قسمت ۷ درصد است، اما با کاهش نسبت سرعت نوک خطا افزایش می‌یابد. خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) از قیاس نتایج آزمایشگاهی با نتایج دینامیک سیالاتی مطالعه حاضر و همچنین دینامیک سیالاتی



شکل (۲): نمایی از شبکه‌بندی مقطع کانال



شکل (۳): نمایی از شبکه‌بندی کل مدل



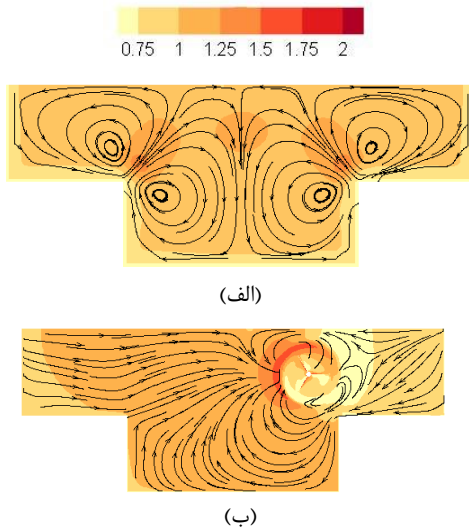
شکل (۴): شبکه‌بندی اطراف پره

این روش، یک روش مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی نسبتاً ساده، قوی و کارآمد است که برای شبیه‌سازی ماشین‌های دوار استفاده می‌شود (ANSYS Fluent UDF Manual, 2013). در روش دستگاه مختصات متحرک، فرض می‌شود که حجم متحرک دارای سرعت ثابت چرخش و مرزهای غیر جداره اطراف آن، سطوح ناشی از دوران محوری (مانند استوانه‌ای، کروی، مخروطی) می‌باشند. به بیان دیگر در این روش، توربین در جای خود ثابت می‌ماند اما سیال نیروهایی را که ناشی از حرکت توربین است را احساس می‌کند (ANSYS Fluent UDF Manual, 2013).

در حقیقت روش دستگاه مختصات متحرک، معادل اجرای یک شبیه‌سازی چرخشی و سپس مشاهده نتایج در لحظه‌ای معادل با موقعیت روتور در دستگاه مختصات متحرک است. در این مطالعه نیز به منظور شبیه‌سازی حرکت توربین از این روش بهره برده شد.

جهت بررسی عدم وابستگی نتایج به شبکه‌بندی از تعداد متفاوتی المان مش برای محاسبه ضریب توان استفاده شد. در این بررسی سرعت زاویه‌ای ۹ رادیان بر ثانیه و سرعت ورودی ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل (۵) تأثیر تغییر تعداد المان بر ضریب توان (C_p) و زمان محاسباتی را نشان داده است. محور افقی تعداد

مشاهدات بامطالعه حاضر در این است که ایشان در مطالعه خود از روش DNS استفاده کرده‌اند ولی در اینجا معادله میانگین‌گیری شده رینولدز با مدل آشفتگی RSM استفاده شده است.



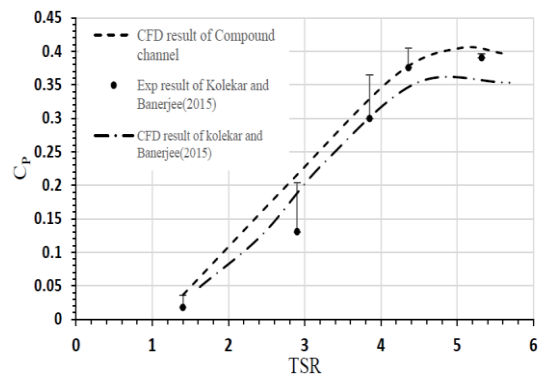
شکل (۷): مقایسه میدان جریان و توزیع سرعت طولی (متر بر ثانیه) به همراه خطوط جریان در مقطع عرضی، (الف) بدون توربین (ب) با توربین

همان‌طور که در شکل ۷-ب) در شرایطی که توربین در کانال قرار داده می‌شود، مشاهده می‌شود توربین تأثیر محسوسی بر میدان جریان گذاشته است و عملاً میدان جریان متفاوت است. در این شرایط گردابه‌های جریان ثانویه به‌طور کامل از بین می‌روند و به ازای آن یک جریان عرضی شدید از سیلاب‌دشت سمت مخالف محل قرارگیری توربین به سمت توربین تشکیل می‌شود. این مشاهده ناشی از حرکت توربین است. به بیان دقیق، حرکت پره‌های توربین جریان سیال را به سمت توربین منحرف می‌سازد. لذا ناحیه تحت تأثیر توربین بستگی به ابعاد پره دارد و در این جا نسبت طول پره به عرض کانال تقریباً برابر با ۰/۰۵ است. از طرف دیگر، در اثر چرخش توربین سرعت در سمت راست توربین به‌شدت در قیاس با شکل (۷-الف)) کاهش می‌یابد.

همچنین شمارگر سرعت طولی نیز در اطراف پره‌های توربین مقادیر بسیار زیاد و در حول محور توربین مقادیر نزدیک به صفر را در قیاس با شرایط عدم حضور توربین (شکل (۷-الف)) نشان می‌دهد که ناشی قرار گرفتن توربین در مسیر جریان است.

مطالعه کلکار و بنرجی (۲۰۱۵) از رابطه (۶) محاسبه شد. y_i نتایج پیش‌بینی‌شده از دینامیک سیالات محاسباتی و \hat{y}_i نتایج آزمایشگاهی است. n نیز تعداد نمونه‌های بررسی‌شده است. این مقدار برای مطالعه حاضر ۴/۶ درصد و برای مطالعه کلکار و بنرجی ۳/۷ درصد به‌دست آمد. با توجه به میزان کم خطا و نیز در محدوده مطالعه کلکار و بنرجی (۲۰۱۵) بودن این عدد می‌توان به صحت مدل‌سازی‌ها اطمینان داشت. میزان تفاوت مقادیر پیش‌بینی‌شده از CFD با مقادیر آزمایشگاهی نیز روی شکل (۶) نشان داده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

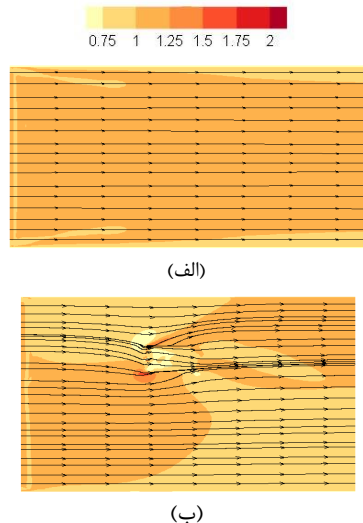


شکل (۶): مقایسه نتایج با نتایج تجربی کلکار، بنرجی

بررسی اثر حضور توربین

در شکل (۷) شمارگرهای سرعت طولی همراه با خطوط جریان در مقطع عرضی کانال مرکب در شرایط بدون حضور توربین (شکل ۶-الف)) و با حضور توربین (شکل ۷-ب)) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۷-الف)) مشخص است، حداکثر سرعت در ناحیه برخورد سیلاب‌دشت با کانال اصلی و همچنین ناحیه میانی کانال تشکیل شده است که با نزدیک شدن به مرز، این مقدار به دلیل خصوصیات لایه مرزی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، خطوط جریان دو گردابه را (یکی ساعت‌گرد و دیگری پادساعت‌گرد) در ناحیه اندرکنش سیلاب‌دشت و کانال اصلی تشکیل داده است. چنین گردابه‌هایی موسوم به گردابه‌های جریان ثانویه در کانال مرکب می‌باشند که در مطالعات پیشین جریان در کانال مرکب مشاهده شده‌اند (جونگ^۱ و جوی^۲، ۲۰۰۸). تفاوت

مسافتی روی میدان جریان اثر می‌گذارد، چراکه در این مطالعه با وجود طول زیاد کانال قابل بررسی نیست و در مطالعات بعدی این موضوع باید به‌طور خاص مورد بررسی قرار گیرد.



شکل (۸): مقایسه میدان جریان در مقطع طولی و توزیع سرعت طولی (متر بر ثانیه) به همراه خطوط جریان، (الف) بدون توربین (ب) با توربین (جهت جریان از چپ به راست)

از جمله پارامترهای مهم در کانال‌های روباز مرکب، پروفیل لگاریتمی جریان است که می‌تواند به‌واسطه قرار گرفتن توربین هیدروکینتیکی در مسیر جریان تحت تأثیر قرار گیرد. به‌منظور بررسی این موضوع در شکل ۹، پروفیل سرعت طولی در عمق برای سه ناحیه مختلف؛ در محل قرارگیری توربین ($Z=0$)، یک متر قبل از توربین ($Z=-1$) و یک متر بعد از توربین ($Z=1$) را نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، با وجود عدم تأثیرپذیری پروفیل جریان در نزدیکی کف کانال، هر ۳ پروفیل تحت تأثیر حضور توربین قرار گرفته‌اند. با این وجود پروفیل جریان در محل توربین بسیار بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته است. پروفیل جریان در محل توربین و قبل از توربین نشان می‌دهد که در ارتفاع قرارگیری توربین سرعت جریان به خاطر حرکت توربین افزایش پیدا نموده است، ولی با افزایش ارتفاع و نزدیک شدن به سطح آب مجدد سرعت کاهش پیدا نموده است. مشاهده می‌شود که پروفیل سرعت در محل قرارگیری توربین به $1/4$ متر بر ثانیه رسیده است که در قیاس با سرعت طولی در همان ارتفاع و در موقعیت قبل و بعد از توربین که برابر با $1/1$ متر بر ثانیه است، افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این موضوع حاکی از تشکیل جریان‌های ثانویه قوی در اطراف توربین است.

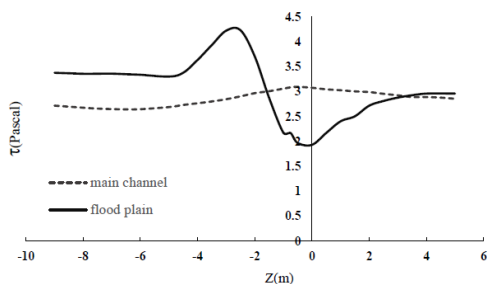
به‌منظور بررسی اثر حضور توربین هیدروکینتیکی در راستای کانال، در شکل (۸) شمارگر سرعت طولی همراه با خطوط جریان در مقطع طولی در یک صفحه افقی در مقطع محل قرارگیری توربین (در فاصله $3/15$ متری از کف کانال) نمایش داده شده است. در شکل (۸) به‌وضوح مشاهده می‌شود که تغییر میدان جریان در حالت بدون توربین سرعت پس از طی مسافتی کوتاه توسعه یافته شده و اثر ورودی در همان ابتدای مسیر از بین رفته و به مقدار ثابتی می‌رسد. در حالتی که توربین حضور دارد کاهش سرعت در سیلاب‌دستی که توربین در آن قرار دارد، مشهود است. طبق مطالعه-ای که ون پروژن^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۵ انجام داده‌اند، مشاهده شده است که در کانال مرکب بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی انتقال مومنوم وجود دارد؛ که ناشی از تأثیر آشفتگی سه‌بعدی در کف و وجود ساختارهای آشفته سه‌بعدی است که باعث تشکیل لایه اختلاطی بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی می‌شوند. زمانی که توربین در کانال با مقطع مرکب قرار می‌گیرد، شرایط به میزان محسوسی تغییر می‌کند به طوری که از سیلاب‌دشت سمت مخالف به سمت سیلاب‌دشت محل قرارگیری توربین یک جریان خیلی قوی ایجاد می‌شود. علت این پدیده می‌تواند ناشی از تشکیل یک گردابه سه‌بعدی به‌واسطه قرار گرفتن توربین در مسیر کانال باشد. همچنین در حالتی که توربین قرار دارد، جریان به اطراف منحرف می‌شود که این انحراف جریان در سمت راست توربین بیشتر مشاهده می‌شود. در پشت توربین ناحیه‌ای با سرعت کم به وجود آمده و به دلیل اثر انسداد جریان و تشکیل دنباله^۲ در پشت توربین است. تشکیل چنین دنباله‌ای در پشت توربین هیدروکینتیکی آب، در مطالعات پیشین نیز مشاهده شده است. کلکار و بنرجی در مطالعه خود تشکیل این دنباله‌ها را مشاهده نمودند. آن‌ها به مقایسه توربینی با سرعت نوک متفاوت پرداختند و دنباله ناشی از انسداد را در تمامی مدل‌های خود مشاهده نمودند. طول دنباله تشکیل شده در شکل (۸)، بیش از سه برابر شعاع توربین است. علاوه بر اثر دنباله، اثر توربین تا مسافت‌های پایین دست هم مشاهده شده است، نکته‌ای که به همراه دارد این است که باید دید توربین تا چه

^۱ Van Prooijen

^۲ Wake

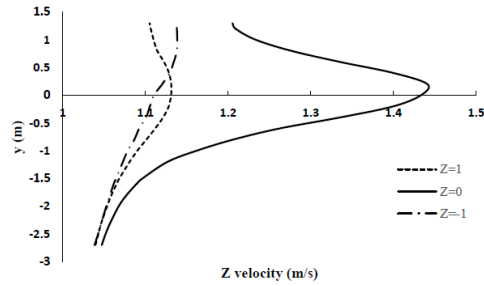
است) در شرایط (الف) بدون حضور توربین (ب) با حضور توربین (جهت جریان از چپ به راست)

به منظور بررسی نحوه تغییرات تنش برشی در اطراف توربین و در کانال مرکب، شکل (۱۱) نیز پروفیل تنش برشی در بستر سیلابدشت (خط پررنگ) و کانال اصلی (خط چین) را در طول نشان می‌دهد (توجه شود همان‌طور که در بخش روش انجام تحقیق ذکر شد، محور طولی Z است). همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تنش برشی در طول کف کانال اصلی ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است به طوری که در نزدیکی توربین ($Z=-0.5$) به بیشترین مقدار خود یعنی $3/0.94$ پاسکال رسیده است؛ اما در بستر سیلابدشت تنش برشی قبل از رسیدن به توربین به شدت افزایش یافته ($4/22$ پاسکال)، در نزدیکی توربین کاهش یافته ($1/93$ پاسکال) و سپس به مقدار نسبتاً ثابتی رسیده است. علت تغییرات بیشتر این پروفیل در سیلابدشت نسبت به کانال اصلی به این موضوع مربوط است که جریان‌های ثانویه در کف سیلابدشت بسیار قوی‌تر از کف کانال اصلی هستند و لذا تنش برشی بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته است. با توجه به اهمیت جریان ثانویه در انتقال رسوب و نیز مسائل محیط زیستی این مشاهده می‌تواند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. براین اساس می‌توان بیان داشت که تنش برشی به تبع آن توزیع رسوب و آبریزان در سیلابدشت بیشتر از کانال اصلی به جهت قرارگیری توربین تغییر خواهد نمود.

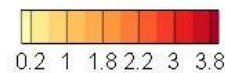


شکل (۱۱): پروفیل‌های تنش برشی در عرض کانال برای کانال اصلی و سیلابدشت

در شکل (۱۲) نیز شمارگرهای فشار هیدرودینامیکی در حالت بدون حضور توربین (شکل (۱۲)-الف)) و در حضور توربین (شکل (۱۲)-ب)) نمایش داده شده است. در شکل (۱۲)-الف)) مشاهده می‌شود که بیشترین فشار در ناحیه برخورد سیلابدشت با کانال اصلی (ناحیه اندرکنش) ناشی از جریان ثانویه رخ می‌دهد و این حالت به جهت تقارن کانال، در دو طرف کانال برقرار است؛ اما



شکل (۹): پروفیل‌های سرعت طولی در عرض کانال، برای سه موقعیت قبل، بعد و در محل حضور توربین شکل (۱۰) تنش برشی بستر در کف سیلابدشت‌ها و کانال اصلی در شرایط عدم حضور توربین (شکل ۱۰-الف)) و حضور توربین (شکل ۱۰-ب)) نشان داده شده است. قیاس این دو شکل بیان می‌دارد که قرار گرفتن توربین در کانال توزیع تنش برشی در بستر را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و توزیع تنش برشی بستر در شرایط حضور توربین یکنواخت نیست. در شکل ۱۰-ب) تنش برشی در سیلابدشت سمت راست، در پشت توربین افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که تنش برشی در کف کانال اصلی نیز (با وجود پایین‌تر بودن کف کانال اصلی نسبت به کف سیلابدشت) به شدت تحت تأثیر قرارگیری توربین تغییر نموده است و در قسمت پیشانی توربین افزایش مقادیر تنش برشی به روشنی قابل مشاهده است. با توجه به تغییر محسوس توزیع تنش برشی بستر در کانال اصلی و سیلابدشت، اثر زیست‌محیطی نصب توربین در کانال‌ها و رودخانه باید به نحو مطلوب مورد بررسی قرار گیرد.



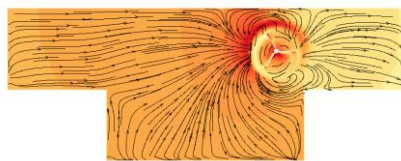
(الف)



(ب)

شکل (۱۰): مقایسه تنش برشی (پاسکال) بستر سیلابدشت و کانال اصلی (ناحیه بالا و پایین نشان‌دهنده کف سیلابدشت و ناحیه میانی نشان‌دهنده کف کانال اصلی

میل می‌کند (نبی پور، ۱۳۹۶). همان‌طور که در شکل (۱۳) مشخص است با قرار گرفتن توربین اثر لایه مرزی همچنان وجود دارد و سرعت طولی با نزدیک شدن به دیواره‌ها کاهش یافته است. ولی چرخش توربین باعث به وجود آمدن یک سرعت خیلی کم در سیلاب‌دستی که توربین در آن قرار گرفته شده است و سرعت نسبتاً زیاد در سمت چپ توربین یعنی در قسمت کانال اصلی رخ داده است، این تغییرات در تمام حالت‌ها مشهود است و فقط مقدارشان با توجه به متفاوت بودن سرعت ورودی و با یکدیگر فرق دارد. همان‌طور که گفته شد در ناحیه اندرکنش یک گردابه در کانال اصلی (پادساعت‌گرد) و یک گردابه در سیلاب‌دست (ساعت‌گرد) به وجود می‌آید که سیال با مومنوم کم را از اطراف دیواره‌ها (کف سیلاب‌دست و دیواره قائم محل اتصال) به ناحیه اندرکنش منتقل کرده و سرعت در این ناحیه را کاهش می‌دهد (نبی پور، ۱۳۹۶). در حالی که توربین قرار گرفت، اثری از تشکیل گردابه‌ها نیست و فقط در سرعت‌های ورودی ۰/۷۵ و ۱ یکی از گردابه‌های کانال اصلی در پایین توربین تشکیل شده است. به این معنی که وقتی سرعت ورودی زیاد می‌شود، توربین کل میدان جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ اما هنگامی که مقدار سرعت ورودی کم است، شرایط خاصی به وجود می‌آید. به نظر می‌رسد که جریان ثانویه سمت چپ میل به تشکیل شدن دارد و در طرف مقابل توربین نیز جریان را به حرکت درمی‌آورد و باعث می‌شود جریان ماهیت سه‌بعدی پیدا کند. شکل (۱۴) میدان جریان در مقطع طولی (صفحه عمودی) را نشان می‌دهد، در این شکل‌ها مانند حالت اول (در حضور توربین و بدون حضور توربین) یک ناحیه با سرعت کم در پشت توربین و نواحی با سرعت زیاد در اطراف توربین تشکیل می‌شود.



(ب)

با حضور توربین در شکل (۱۲-ب)، اثری از تشکیل این نواحی مشاهده نمی‌شود و فشار جریان را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، به طوری که در سیلاب‌دست مقابل هم این فشار بیشینه مشاهده نمی‌شود.



(الف)

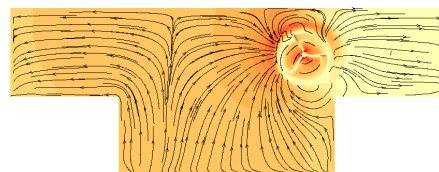


(ب)

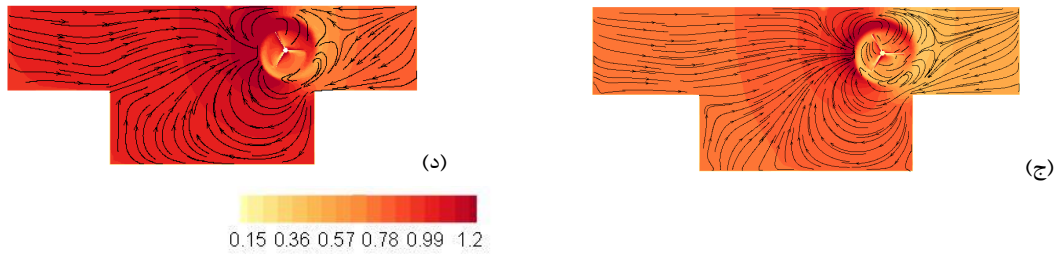
شکل (۱۲): مقایسه فشار دینامیکی (پاسکال)، (الف) بدون توربین (ب) با توربین

بررسی اثر سرعت ورودی

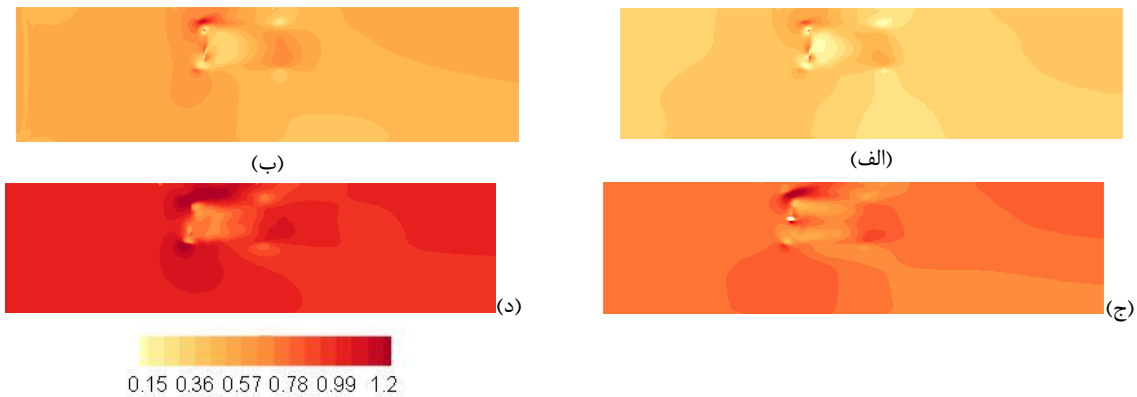
به منظور بررسی اثر سرعت ورودی بر نتایج مشاهداتی شبیه‌سازی‌ها در چهار سرعت مختلف تکرار گردیدند و نتایج آن‌ها در این قسمت بررسی می‌شود. در شکل (۱۳) سرعت طولی به همراه میدان جریان برای سرعت‌های مختلف را نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود توزیع سرعت طولی به عوامل مختلفی از جمله هندسه و عمق نسبی کانال بستگی دارد. سرعت طولی جریان در کانال اصلی دارای یک مقدار حداکثر است که با نزدیک شدن به دیواره‌ها کاهش می‌یابد. گرادیان نیم‌رخ عرضی سرعت در مرز مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دست، به‌ویژه در عمق‌های نسبی کم بسیار شدید است. با افزایش عمق نسبی، این گرادیان سرعت کاهش می‌یابد. با دور شدن از ناحیه اندرکنش در سیلاب‌دست، مقدار سرعت کاهش یافته و سپس به مقدار تقریباً ثابتی



(الف)



شکل (۱۳): مقایسه میدان جریان و توزیع سرعت طولی در مقطع عرضی به همراه خطوط جریان، (الف) سرعت ۰/۳۵، (ب) سرعت ۰/۵، (ج) سرعت ۰/۷۵ و (د) سرعت ۱ متر بر ثانیه



شکل (۱۴): مقایسه میدان جریان (سرعت طولی) در مقطع طولی، (الف) سرعت ۰/۳۵، (ب) سرعت ۰/۵، (ج) سرعت ۰/۷۵ و (د) سرعت ۱ متر بر ثانیه

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی اثر قرارگیری یک توربین هیدروکینتیکی آب در یک کانال مستقیم با مقطع مرکب پرداخته می‌شود. به این منظور، پس از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار فلوئنت با استفاده از مدل آشفتگی RSM به جهت شبیه‌سازی جریانات ثانویه در کانال مرکب، نتایج زیر به دست آمد:

۱- حضور توربین به شدت میدان جریان رایج در کانال مرکب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این شرایط، گردهای تشکیل شده در کانال مرکب نه تنها در محل نصب توربین تغییر کرده، بلکه میدان جریان را در سیلاب‌دشت سمت مخالف تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین نصب توربین، توزیع فشار در کانال مرکب را به طور کلی تغییر داده است به نحوی که فشار ماکزیمم تشکیل شده در نواحی اندرکنش کانال مرکب، در حضور توربین تشکیل نمی‌شود.

۲- حضور توربین باعث به وجود آمدن یک ناحیه دنباله در پشت توربین می‌گردد که طول این ناحیه حدود سه و نیم برابر ابعاد توربین است.

۳- حضور توربین توزیع تنش برشی بستر را نیز به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سیلاب‌دشت و در پشت توربین تنش برشی به شدت زیاد می‌گردد. به علاوه در کانال اصلی نیز نواحی با تنش برشی افزایش یافته مشاهده شدند.

۴- با توجه به طول زیاد ناحیه دنباله و نیز تغییر محسوس توزیع تنش برشی بستر در کانال اصلی و سیلاب‌دشت، اثر زیست‌محیطی نصب توربین در کانال‌ها و رودخانه باید به نحو مطلوب مورد بررسی قرار گیرد.

۵- بررسی میدان جریان در صفحه افقی (مقطع طولی) نشان داد که حضور توربین ناحیه‌ای با سرعت کم در سیلاب‌دشت سمت توربین ایجاد می‌کند و همچنین میدان جریان توربین تا نواحی اطراف سیلاب‌دشت سمت مخالف تحت تأثیر قرار می‌گیرد. از طرفی دیگر نواحی پرسرعت اطراف توربین ایجاد می‌شود. به این معنی که سرعت طولی به جهات مختلف منحرف می‌شود و موجب حرکت توربین می‌شود.

۶- نتایج تا حدودی به سرعت ورودی بستگی دارد، در سرعت ورودی با مقادیر بیشتر، کل میدان جریان تحت اثر توربین قرار می‌گیرد، اما در سرعت ورودی-

12. Kolekar, N.; Banerjee A. (2013) "A coupled hydro-structural design optimization for hydrokinetic turbines". *Journal Renewable Sustainable Energy*. 5, 053146
13. Kolekar, N.; Banerjee, A. (2015). "Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects". PA18015, United States, *Applied Energy*. 148 121–133.
14. Lopes, J. (2015). "An Approach for the Dynamic Behavior of Hydrokinetic Turbines". *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015*.
15. Mutule, A.; Kalnacs, A. (2014). "Hydro Energy Potential Estimation for Hydrokinetic Power Plants". *IEEE*
16. Ruopp, A.; Ruprecht, A.; Riedelbauch, S.; Arnaud, G.; Hamad, I. (2014). "Development of a hydro kinetic river turbine with simulation and operational measurement results in comparison". *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*.
17. Shino, K.; Knight D.W. (1991). Turbulent open channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*.
18. Tajnesaie, M.; Jafari Nodoushan, E.; Barati, R.; Azhdary Moghadam, M. (2018). "Performance comparison of four turbulence models for modeling of secondary flow cells in simple trapezoidal channels". *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1-11.
19. Van Prooijen, Bram C.; Battjes, Jurjen A.; Uijttewaal, Wim S. J. (2005). "Momentum Exchange in Straight Uniform Compound Channel Flow".
20. Wohl, E., (2013), *Mountain Rivers*, Washington, D. C, American Geophysical Union.
21. Younghoon Joung and Sung-Uk Choi. (2008). "Investigation of Twin Vortices near the Interface in Turbulent Compound Open-Channel Flows Using DNS Data"

های کمتر جریان ماهیت سه بعدی و پیچیده‌ای ناشی از سرعت کم ورودی در قیاس با سرعت دوران توربین پیدا می‌کند.

مراجع

۱. حجتی، س.ح. محمدیون، س. صالحی نیشابوری، س.ع.ا. (۱۳۹۵). بررسی عملکرد مدل‌های مختلف آشفتگی در جریان عبوری از جام پرتابی مثلثی، نشریه عمران مدرس، جلد ۱۶ (شماره ۴)، ص ۶۹-۸۱.
۲. نبی‌پور، م. صالحی نیشابوری، س.ع. مهاجری، س.ح.؛ زراتی، ا.؛ ضابطیان طرقی، م. (۱۳۹۶). مطالعه تجربی جریان آشفته در یک کانال مرکب با عمق کم سیلاب‌دشت به کمک سرعت سنجی تصویری ذرات، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، جلد ۱۷ (شماره ۸)، ص ۱۶۴-۱۷۲.
۳. نبی‌پور، م. (۱۳۹۶). مطالعه آزمایشگاهی حرکت ذره بستر تحت تأثیر ساختارهای آشفتگی در کانال مرکب مستطیلی با عمق کم در سیلاب‌دشت، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس.
۴. نیکوهمت، م.م.؛ خزایی، ا.؛ محسنی، آ.؛ مهاجری، س.ح. (۱۳۹۶). بررسی اثر زاویه گام و طول وتر پره بر ضریب توان توربین انرژی جنبشی آب، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، جلد ۱۷ (شماره ۶)، ص ۵۱-۵۸.
5. Ansys Inc. (2013). ANSYS Fluent UDF Manual.
6. Alawadi, W.; S. Al-Rekabi, W.; Al-Aboodi, A.H. (2018). "Application of the Shiono and Knight Method in asymmetric compound channels with different side slopes of the internal wall". *Applied Water Science*.
7. Anyi, M.; Kirke, B. (2010). "Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities Sustainable Energy Centre". Australia, Energy for Sustainable Development. 14 110–116.
8. Galindo, J.; Fajardo, P.; Navarro, R.; García-Cuevas, L. M. (2013). "Characterization of a radial turbocharger turbine in pulsating flow by means of CFD and its application to engine modeling". *Applied Energy*.
9. Guney, M.s; Kaygusuz, k. (2010). "Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 2996–3004.
10. Hammar, L.; Eggertsen, L.; Andersson, S.; Ehnberg, J.; Arvidsson, R.; Ilström, M.; Molander, S. (2014). "A Probabilistic Model for Hydrokinetic Turbine Collision Risks: Exploring Impacts on Fish, Chalmers University of Technology", Department of Energy and Environment, Gothenburg, Sweden.
11. Khan, M. J.; Bhuyan, G.; Iqbal, M. T.; Quaicoe, J. E. (2009). "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review". *Applied Energy*.

Numerical analysis of on the effects of Hydrokinetic turbine presence in flow structure of a compound open-channel

Mahta Samie³⁸

Seyed Hossein Mohajeri^{2*}

Seyed Abbas Hoseini³

Abstract

In the recent years, due to the hydropower plants environmental problems, hydrokinetic turbine usages has been significantly increased. Using such turbines in rivers modify natural flow-field. In previous studies, the impacts of turbine presence on the flow-field just only in rectangular open-channel is studied and the effects of hydrokinetic turbine on more complicated circumstances such as compound open-channel has not been studied. In this work, the effects of hydrokinetic turbine in a straight compound channel has been numerically studied using Fluent extension of Ansys 16. To simulate the turbine rotation, Moving Reference Frame (MRF) method has been implemented. Results showed that due to the turbine presence, natural flow structure and pressure distribution has been drastically changed. More precisely, instead of compound channel natural secondary currents, a strong secondary flow from the right back to left bank (where the turbine installed) is formed. Also our results show that a wake region behind the turbine and regions with high velocity around turbine can be notified. In low velocity inlet, the flow field is intact and natural condition is preserved, while high inlet velocity causes drastic changes. Therefore, it can be concluded that in this situation, considering low effects of turbine presence in flow structure the inlet velocity should be low, while in this condition, the efficiency due to the low velocity would be not be impressive.

Keywords

Hydrokinetic turbine, Straight Compound channel, Flow field, Moving Reference Frame M

1. Student of master degree, faculty of Civil Engineering, Architecture and Art, Islamic Azad university of Tehran, science and research branch.

2*. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran. Hossein.mohajeri@khu.ac.ir

3. Assistant Professor, faculty of Civil Engineering, Architecture and Art, Islamic Azad university of Tehran, science and research branch.