

CFD برای توربین های بادی و جزرومدی (کشندی) ساحله

استبان فر، ادلین مونتلاٹر

مترجم : مهندس رئوف خسروی

مقدمه مترجم

امروزه انرژی‌های تجدیدپذیر، منبعی مناسب جهت سرمایه‌گذاری در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. با گذشت زمان با به دلایل مختلفی نظیر، آلودگی‌های ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، گران‌تر بودن و کاهش منابع فسیلی استفاده از این انرژی پاک و ارزان را شایع‌تر نموده است.

یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، توربین‌های بادی و جزری و مدی (کشندی) است که با توجه به ظرفیت‌های فراوان در این حوزه، مورد توجه و حمایت نهادهای بین‌المللی و صنعتی قرار گرفته است.

با این حال چالش‌های موجود در طراحی و تحلیل در این حیطه، نیاز به مطالعه بیشتر میان مهندسان و پژوهشگران را حیاتی کرده است. ترجمه کتاب حاضر، به تحلیل دینامیک سیالات محاسبات عددی CFD، جهت محاسبات در توربین‌های بادی و جزری و مدی پرداخته که در آن مجموعه‌ای از مطالعات و پژوهش‌های جدید مهندسان و محققان صاحب‌سبک در این صنعت گردآوری شده است.

رئوف خسروی

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

تقدیم به

مقدسترین واژه‌ها در لغت نامه دلم، مادر مهربانم که زندگیم را مدیون مهر و عطوفت آن می‌دانم.
پدر، مهربانی مشفق، بردبار و حامی.
همسرم که نشانه لطف الهی در زندگی من است.
برادرم همراه همیشگی و پشتوانه زندگیم

فهرست مطالب

مقدمه	صفحه ۶
فصل ۱ - مقیاس‌های جریان در توربین‌های جریان متقابل	صفحه ۷
فصل ۲ - مطالعه عددی توربین‌های بادی و جزرومدی محور عمودی دوبعدی با روش گالرکین ناپیوسته با قابلیت هیبریدی و تطبیق درجه	صفحه ۱۶
فصل ۳ - روش شبکه لغزشی با حفظ مرتبه بالا مبتنی بر مربعات حداقل متحرک بدون فصل مشترک	صفحه ۲۹
فصل ۴ - راه اندازی توربین محور عمودی که با حل کننده عددی مرتبه بالا مدل‌سازی شده است	صفحه ۳۷
فصل ۵ - شبیه سازی گردابه‌های بزرگ یک توربین جزر و مدی با محور عمودی با استفاده از یک روش مرزی غوطه ور	صفحه ۴۸
فصل ۶ - مطالعه محاسباتی تعامل بین هیدرودینامیک و دینامیک بدنه صلب مربوط به یک توربین نوع H	صفحه ۵۶
فصل ۷ - فیزیک فرآیند راه اندازی برای توربین‌های بادی محور عمودی	صفحه ۶۵
فصل ۸ - ابزار تغییر شکل مش ترکیبی برای پیش بینی آیروالاستیسیته (هوا کش سانی) توربین‌های بادی خطوط ساحلی	صفحه ۷۷
فصل ۹ - شبیه سازی عددی بارگذاری موج روی سازه‌های دریایی استاتیک	صفحه ۸۸
فصل ۱۰ - محدودیت انتخابی بر مبنای کمترین مربعات متحرک برای معادلات آبهای کم عمق	صفحه ۹۹
فصل ۱۱ - مقایسه روش پنل و محاسبات روش میانگین گیری رینولدز معادلات ناویر استوکس برای توربین جریان دریایی محور افقی	صفحه ۱۰۹

مقدمه

سازمان بین‌المللی انرژی (IEA) در چشم‌انداز انرژی جهانی ۲۰۰۸ اعلام کرد که تولید و مصرف انرژی فعلی از نظر زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی ناپایدار است. نگرانی اجتماعی و توافقات بین‌المللی (مثلاً کیوتو، ۱۹۹۷، کوپنهاگ، ۲۰۰۹ یا دوربان، ۲۰۱۱) باعث توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر برای تولید انرژی پایدار و تجدیدپذیر شد.

توربین‌های بادی و جزرومدی (کشندی) ساحلی طی سال‌های اخیر مورد توجه طرف سازمان‌های دولتی، علمی و صنعت قرار گرفته‌اند چون سایت‌های ساحلی، ظرفیت انرژی بسیاری دارند. چالش‌های مهندسی جدید ارائه شده توسط این فناوری‌ها همراه با مشکل در اجرای آزمایشی در محیط‌های ساحلی، توجه به دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای طراحی توربین‌ها و پره‌های مناسب، درک پدیده جریان سیال مرتبط با محیط‌های ساحلی و پیش‌بینی تولید برق، افزایش داده است.

این کتاب شامل روش‌های CFD جدید برای محاسبه کاربردهای جزرومدی و بادی ساحلی است. همه مقالات موجود در یازدهمین کنگره بین‌المللی مکانیک محاسباتی (WCCM XI) ارائه شده‌اند که همراه با ششمین کنفرانس اروپا درباره دینامیک سیالات محاسباتی (ECFD VI) ۲۰۱۴ در بارسلونا سازماندهی شد. این کتاب شامل مقاله محققان علم و صنعت است.

دسامبر ۲۰۱۴، بارسلونا، اسپانیا

استبان فرر، ادلین دی مونتلاثر

فصل ۱

مقیاس‌های جریان در توربین‌های جریان متقابل^۲

استبان فرر و سولداد له کلاینچه

چکیده

این کار، برآوردهای تحلیلی برای مقیاس‌های جریان مختلف در توربین‌های جریان متقابل (یعنی نوع داریوس یا محور عمودی) به منظور تولید انرژی تجدیدپذیر (بادی و جزرومدی) را ارائه می‌کند. با این برآوردها می‌توان برهمکنش‌های فضایی یا زمانی بین پدیده جریان را بررسی کرد و مرزهای کمی و کیفی از سه پدیده جریان اصلی فراهم کرد: مقیاس فویل، مقیاس گردابه و مقیاس دنباله. در نهایت با استفاده از آنالیز مقیاس، با یک مثال توضیحی نشان می‌دهیم روش‌های محاسباتی مرتبه برتر در زمان حل فیزیکی جریان در توربین‌های جریان متقاطع، چقدر مفید هستند.

۱.۱ مقدمه

مسائلی که در آنها باید نیروهای وارد بر اجسام چرخشی یا نوسانگر در سیال پیش‌بینی شوند، در کاربردهای مهندسی زیاد هستند و در نتیجه موقعیت‌های برهمکنش ساختار-سیال ایجاد می‌شوند. مثال‌های آن عبارتند از: جریان‌های اطراف اجسام و فویل‌های چرخشی جدا، کاربردهای توربوماشین، ایرودینامیک پرواز حشره، وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین، و اخیراً، جریان‌ها از دستگاه‌های انرژی تجدیدپذیر مثلاً توربین‌های بادی و جزرومدی.

مسئله چالش برانگیز با توربین‌های بادی و جزرومدی جریان متقابل برای تولید برق ارائه می‌شود (که با عنوان توربین‌های محور عمودی، روتورهای H یا داریوس نیز شناخته می‌شوند). این انواع توربین از پره‌های شبیه به فویل تشکیل می‌شوند که نیروهای برآ تولید می‌کنند به صورتی که یک شفت متصل به پره‌ها را می‌چرخانند. بنابراین تغییرات آرمیوتی در ایرودینامیک پره (یا هیدرودینامیک) زیاد است که پدیده‌های جریان پیچیده ایجاد می‌کنند مانند جریان‌های وامانده^۳، رهایی گردابه^۴ و برهمکنش‌های پره-گردابه.

توربین‌های جریان متقابل (CFT) گاهی توربین‌های محور عمودی نامیده می‌شوند، ولی عبارت توربین جریان متقابل ترجیح داده می‌شود چون در این اصطلاح، موقعیت توربین حذف می‌شود و بر هندسه نسبی محور جریان تاکید می‌شود.

تا به امروز این نوع پیکربندی توربین در بخش انرژی بادی کاربرد محدودی داشته است، ولی توربین‌های جریان محوری سه پره کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند. اما فرض می‌شود پیکربندیهای CFT برای بازارهای نوظهور و جدید مانند انرژی بادی و جزرومدی ساحلی و همین‌طور برای نصب در محیط‌های شهری مفید باشند. مرور خلاصه از برخی استدلالات در طرفداری و به مخالفت از این نوع پیکربندی در ادامه ارائه می‌شود. بحث کامل‌تر را می‌توانید در منبع [۶] بیابید.

از یک طرف، مشکل اصلی این است که CFT نسبت به توربین‌های جریان محوری، بازده کمتری دارد چون نیمه پایین دست توربین به دلیل ایجاد سایه از پره‌های بالادست، گشتاور کمتری ایجاد می‌کند. به علاوه چون در بخشی از چرخه، پره موازی با جریان حرکت می‌کند، نیروی برآ که پره‌ها را حرکت می‌دهد و متناسب با جذر سرعت جریان برخوردی است، کاهش می‌یابد.

² cross-flow turbines

³ stalled flow

⁴ vortex shedding

از طرف دیگر، مزیت این نوع دستگاه این است که جهت گیری خاصی نسبت به جریان لازم ندارد، چون می‌تواند مستقل از جهت جریان کار کند و بنابراین برخی از محققان بیان می‌کنند که این فناوری برای محیط ساحلی (باد و جزرومد ساحلی) مناسب‌تر است چون هزینه‌های نگهداری را با سیستم‌های کنترل کمتر (مثلاً مکانیزم انحراف) حداقل می‌کند [۱۱، ۱۲]. به علاوه، به دلیل سادگی هندسی، ژنراتور را می‌توان دور از پره‌های در حال چرخش قرار داد که پیچیدگی نصب و هزینه نگهداری را کاهش می‌دهد.

تا جایی که می‌دانیم، آنالیز ارائه شده در این مقاله، اولین تلاش برای ایجاد برآوردهای تحلیلی است که در آینده در مدل‌های ساده شده از نوع مومنتوم بخش پره به کار می‌رود. مرزهای تحلیلی به کار رفته در این مطالعه، شرایط محدودکننده ای برای مدل‌های تحلیلی ایجاد می‌کنند (مثلاً [۱۶، ۲۰، ۲۱، ۲۵]) برای توربین‌های بادی جریان متقابل یا [۵، ۱۳، ۲۴] در زمینه انرژی جزرومدی).

این فصل پدیده‌های فیزیکی مختلف مشاهده شده در توربین‌های جریان متقابل را بررسی می‌کند و اهمیت زمانی و فضایی آن را به صورت مقیاس‌های طول، زمان و سرعت تعیین می‌کند. تعیین پدیده‌های فیزیکی مختلف، راهنمایی برای شبیه سازی مناسب CFT با استفاده از روش‌های عددی فراهم می‌کند (مثلاً تفکیک فضایی و زمانی). در نهایت در بخش ۱،۴، ضرورت دقت زیاد در زمان محاسبه جریان‌های توربین جریان متقابل با استفاده از روش‌های عددی را بررسی می‌کند، مانند روش گالرکین ناپیوسته که توسط مولف اول ایجاد شد [۷-۱۰].

۱،۲ مشخصات فیزیکی جریان‌های توربین جریان متقابل

فناوری‌های CFT جزرومدی و بادی، در مقایسه با سرعت صوت در محیط مشابه، در سرعت نسبتاً کمی کار می‌کنند که اثرات تراکم پذیری سیال را حداقل می‌کند. جریان‌های CFT عادی را می‌توان با استفاده از معادلات ناویر-استوکس بدون تراکم مشخص کرد. این سیستم معادلات تفاضلی ناقص غیرخطی را می‌توان به شکل همرفتی نوشت:

$$\text{Continuity :} \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1.1)$$

$$\text{Momentum :} \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (1.2)$$

که $\mathbf{u} = (u, v, w)^T$ بردار اجزای سرعت در سه بعد است، p فشار استاتیک را نشان می‌دهد، ρ چگالی است و $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ویسکوزیته سینماتیک است که μ ویسکوزیته دینامیک را نشان می‌دهد.

معادلات ناویر-استوکس قبلی را می‌توان با استفاده از متغیرهای بدون بُعد زیر به شکل بدون بُعد نوشت:

$$\mathbf{u}^* = \frac{\mathbf{u}}{U}, \quad p^* = \frac{p}{\rho U^2}, \quad t^* = t \frac{U}{L}, \quad \nabla^* = L \nabla, \quad (1.3)$$

که علاوه بر متغیرهای تعریف شده، این اسکالرها معرفی می‌شوند: U به عنوان سرعت جریان مشخصه (مثلاً سرعت جریان آزاد) و L به عنوان طول جریان مشخصه. جایگذاری مقادیر بدون بعد در معادله (۱،۲)، معادله مومنتوم بدون بُعد ایجاد می‌کند:

$$\frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} + (\mathbf{u}^* \cdot \nabla^*) \mathbf{u}^* = -\nabla^* p^* + \frac{1}{Re} \nabla^{*2} \mathbf{u}^*, \quad (1.4)$$

که $Re = LU/\nu$ عدد رینولدز است.

اعداد رینولدز را برآورد می‌کنیم تا جریان‌های توربین‌های بادی و جزرومدی مشخص شوند. جدول ۱،۱ ویژگی‌های سیال مشخصه را برای هوا (در ۱۵ درجه سانتیگراد) و آب دریا (در صفر درجه سانتیگراد و شوری متوسط) نشان می‌دهد. این جدول شامل میانگین سرعت‌های جریان در سایت‌های بادی [۲] و جزرومدی [۵،۱۸] است. همانطور که مشاهده می‌شود، کینماتیک این سیالات مشابه است: $U_{air}/v_{air} \sim U_{sea}/v_{sea}$. برای برآورد اعداد رینولدز، یک توربین جریان متقابل کوچک با شعاع $R=\delta m$ را در نظر می‌گیریم (مثلا یک توربین بادی برای محیط شهری و یک توربین جزرومدی عادی)، آنگاه عدد رینولدز مبتنی بر قطر توربین برابر است با $Re_D^{air} \approx Re_D^{water} \approx 4 \times 10^6$ که نشان می‌دهد از دیدگاه دینامیک جریان، این دو فناوری به روش‌های مشابهی کار می‌کنند.

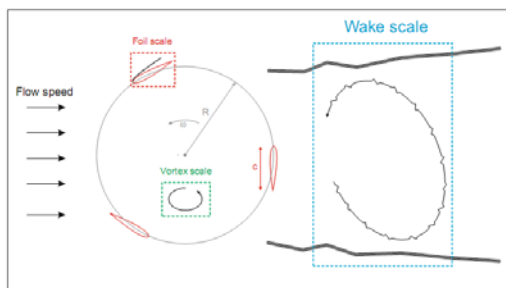
جدول ۱،۱: ویژگی‌های جریان و سیال هوا و آب دریا

ویژگی سیال	واحد	هوا	آب دریا
چگالی (ρ)	kg/m^3	$\sim 1,225$	$\sim 1,027$
ویسکوزیته دینامیک (μ)	$Pa \cdot s$	10^{-4}	10^{-3}
ویسکوزیته سینماتیک (ν)	m^2/s	$\sim 1,45 \times 10^{-5}$	$\sim 1,83 \times 10^{-6}$
ویژگی جریان			
میانگین سرعت جریان	m/s	~ 12	$\sim 1,5$

نکته: وقتی جریان‌های توربین جزرومدی در نظر گرفته می‌شوند، عدد فرود $Fr = U/\sqrt{gL}$ اهمیت دارد. اما برای پیکربندی‌های مسدود شده (یعنی نسبت کم قطر توربین به عمق کم آب)، این پارامتر اهمیت نسبتاً کمی دارد [۵،۱۵] و در این فصل در نظر گرفته نمی‌شود.

۱. تفاوت مقیاس‌های جریان و شبیه‌سازی آنها

این بخش مجموعه‌ای از مقیاس‌های جریان را توصیف می‌کند که در زمان شبیه‌سازی جریان‌های توربین جریان متقابل در ارتباط با دقت تفکیک لازم برای شبیه‌سازی آن انتظار می‌رود. شکل ۱،۱ تصویری شماتیک از سه مقیاس فضایی فیزیکی نشان می‌دهد که در جریان‌های CFT وجود دارند: مقیاس فویل، مقیاس گردابه و مقیاس دنباله. مقیاس بندی فویل شامل مقیاس‌های نزدیک دیوار و لایه‌های مرزی است، مقیاس بندی گردابه، رهایی گردابه و اثرات برهمکنش پره-گردابه را در نظر می‌گیرد و در نهایت مقیاس بندی دنباله شامل اثرات سایه به دلیل انسداد توربین [۵،۱۵،۲۳] و ساختار دنباله مرتبط با پره‌های چرخشی است. در این بخش، برآوردها برای مقیاس‌های طول، زمان و سرعت در پدیده‌های متفاوت معرفی می‌شوند.



شکل ۱،۱: مقیاس‌های جریان در جریان‌های توربین جریان متقابل. پره‌های توربین وتر c با سرعت زاویه‌ای ω در فاصله R از مرکز توربین می‌چرخند.

۱،۳،۱ مقیاس بندی فویل

در حضور شرایط غیرلزسی در سطح دیواره، جریان باید آهسته شود تا در دیواره، سرعت صفر داشته باشد. این مورد لایه مرزی معروف (تعریف شده توسط پراتدل در سال ۱۹۰۴) را ایجاد می‌کند که در پره‌های توربین ایجاد می‌شود. نمایه لگاریتمی سرعت‌های تانژانتی ایجاد شده در دیواره (اگر جریان متصل در نظر گرفته شود) باید در شبیه سازی عددی به درستی مدلسازی شود، چون بر نیروهای ایرودینامیک روی پره‌ها تاثیر مستقیم دارد. لایه مرزی فویل، یک بخش آرام دارد که با کمی فاصله در پایین دست، به جریان متلاطم تبدیل می‌شود (با فرض عدد رینولدز زیاد)، این فاصله تحت تانی شیب فشار روی سطح، زبری سطح دیواره و تلاطم جریان آزاد بیرون از لایه مرزی است. لایه‌های مرزی متلاطم ضخامت بیشتری دارند و مومنتوم بیشتری حمل می‌کنند، و بنابراین بیش از لایه‌های مرزی آرام تفکیک می‌شوند. لایه‌های مرزی، موضوع تحقیق گسترده‌ای هستند و در اینجا فقط مشخصات اصلی بیان می‌شوند. برای توضیح دقیق، خواننده به تحقیق تک موضوعی توسط شلیچینگ [۱۹] ارجاع داده می‌شود.

می‌توان مقیاس‌های طول CFT برای لایه مرزی را با استفاده از تقریب بلاسیوس [۱۹] برای جریان در صفحه صاف با شیب فشار صفر برآورد کرد. ابتدا سرعت چرخشی پره‌ها $U_{rot} = \omega R$ را در نظر می‌گیریم که ω سرعت زاویه‌ای اس و R شعاع توربین است. به علاوه، نسبت سرعت نوک را به صورت $\lambda = U_{rot}/U$ تعریف می‌کنیم که U سرعت جریان آزاد را نشان می‌دهد. برای سادگی، سرعتی که فویل تجربه می‌کند را می‌توان به صورت $U_{foil} = \sqrt{U_{rot}^2 + U^2} \approx U$ برآورد کرد که فرضیه معتبری برای $\lambda \gg 1$ است (یعنی نادیده گرفتن سرعت جریان آزاد U). آنگاه تقریب بلاسیون، لایه مرزی با ضخامت $\delta \approx x / (\frac{x U_{foil}}{\nu})^\gamma = x / (\frac{x \lambda U}{\nu})^\gamma$ فراهم می‌کند که x فاصله از لبه پیشرو است و جزء γ با روش لایه مرزی ارتباط دارد: برای روش آرام $\gamma = 1/2$ و برای لایه مرزی متلاطم $\gamma = 1/5$. با تعیین $x=c$ (یعنی وتر فویل)، می‌توان مقیاس طول مشخصه برای فویل به دست آورد: $\ell_{foil} = \frac{c}{(Re_{foil})^\gamma}$ که $Re_{foil} = \frac{c U_{foil}}{\nu}$ عدد رینولدز مبتنی بر وتر فویل است. می‌توان برآوردی برای این مقیاس زمانی به دست آورد: $\tau_{foil} = \frac{\ell_{foil}}{U_{foil}} = \frac{c}{U \lambda (Re_{foil})^\gamma}$. خلاصه این مقیاس‌ها در جدول ۱،۲ ارائه شده است.

جدول ۱،۲: مقیاس‌های فویل مشخصه در توربین‌های CFT

مقیاس طول	مقیاس زمان	مقیاس سرعت	عدد رینولدز
ℓ_{foil}	τ_{foil}	U_{foil}	Re_{foil}
$\frac{c}{(Re_{\text{foil}})^2}$	$\frac{c}{U\lambda(Re_{\text{foil}})^2}$	λU	$\frac{c\lambda U}{\nu}$

۱،۳،۲ مقیاس بندی گردابه و برهمکنش پره-گردابه

رهایی گردابه و برخورد گردابه نقش مهمی در عملکرد توربین دارند. برای توربین‌های جریان متقابل، گردابه ایجاد شده با نیمه بالادست توربین را می‌توان به پایین دست منتقل کرد که با نیمه پستی توربین تماس دارد. دقت عددی بر این پدیده تاثیر قابل توجهی دارد چون گردابه‌ها پخش می‌شوند و ساختار خود را از دست می‌دهند که نیروهای مشاهده شده توسط پره عبوری پستی را تغییر می‌دهد. معمولا روش‌های مرتبه پایین تر (مثلا حجم محدود) برای محاسبه جریان‌های CFT به کار می‌روند (مثلا [۴،۱۴،۱۷])، اما این مورد خطاهای پراکندگی و پخش قابل توجه ایجاد می‌کند که ساختارهای جریان را مختل می‌کنند (مثلا گردابه‌ها یا دنباله‌ها، برای توضیح منبع [۷] را ببینید). در شبیه سازی‌های عددی، روش‌های مرتبه بالاتر (با خطاهای عددی کمتر، مثلا [۷،۹])، برای بررسی دقیق تغییر گردابه و پدیده برهمکنش پره-گردابه ترجیح داده می‌شوند.

برآوردی برای مقیاس‌های برابر با انتقال گردابه و پدیده برهمکنش پره-گردابه فراهم می‌شود. ابتدا، یک گردابه دوبعدی با مساحت $A \approx \frac{\pi}{4}c^2$ را در نظر می‌گیریم (مساحت مدور تحت پوشش گردابه دوبعدی) که c طول مشخصه است (وتر فویل

و قطر گردابه) و زمان چرخش مشخص $\tau_{\text{vortex}} \approx \frac{2\pi}{\omega_z}$ است که ω_z اندازه حالت گردابی را نشان می‌دهد. با تقریب حالت گردابی به صورت تابعی از چرخش فویل و بنابراین نیروی برای تولید شده توسط فویل (قضیه کوتا-جوکوسکی [۲])، می‌توان نوشت $\omega_z \approx \frac{\Gamma}{A}$ که $\Gamma = \frac{L}{\rho U_{\text{foil}}}$ چرخش و L نیروی برای فویل را نشان می‌دهد. چون $L = \frac{1}{2}\rho U_{\text{foil}}^2 c C_L$ است

که C_L ضریب برای فویل را نشان می‌دهد، زمان مشخصه گردابه را می‌توان به این صورت بیان کرد: $\tau_{\text{vortex}} \approx \frac{\pi^2 c}{\lambda U C_L}$

. در نهایت سرعت مشخصه گردابه به این صورت برآورد می‌شود: $U_{\text{vortex}} = \frac{\ell_{\text{vortex}}}{\tau_{\text{vortex}}} \approx \frac{\lambda U C_L}{\pi^2}$

برای برآورد طول و زمان پدیده‌های برهمکنش پره-گردابه (BV)، گردابه ای با قطر c را در نظر می‌گیریم که با سرعت

$U_{\text{axial}} = \beta U$ در توربین منتقل می‌شود که $\beta < 1$ کاهش سرعت در توربین را نشان می‌دهد و U_{axial} میانگین جزء

سرعت جریان در توربین است. زمان برای انتقال گردابه از نیمه جلویی به نیمه پستی (یعنی حرکت در فاصله $D=2R$) را می

توان به صورت $\tau_{BV} = \frac{\ell_{BV}}{U_{\text{axial}}} = \frac{D}{\beta U}$ برآورد کرد. جدول ۱،۳ این مقیاس‌ها را خلاصه می‌کند.

جدول ۱،۳: مقیاس‌های گردابه مشخصه در توربین‌های CFT

مقیاس طول	مقیاس زمان	مقیاس سرعت	عدد رینولدز
ℓ_{vortex}	τ_{vortex}	U_{vortex}	Re_{vortex}
c	$\frac{\pi^2 c}{(\lambda U C_L)}$	$\frac{\lambda U C_L}{\pi^2}$	$\frac{c\lambda U C_L}{\pi^2 \nu}$
ℓ_{BV}	τ_{BV}	U_{BV}	Re_{BV}
D	$\frac{D}{\beta U}$	βU	$\frac{D\beta U}{\nu}$

۱,۳,۳ مقیاس بندی دنباله

ایجاد و اتلاف دنباله توربین جریان متقابل، اهمیت بسیاری دارند چون عملکرد توربین‌های پایین دست تحت تاثیر ساختار و طول ساختارهای ایجاد شده در بالادست است. به علاوه ایجاد دنباله، سرعت جریان ورودی و در نتیجه زاویه برخورد پره‌های توربین را اصلاح می کند. این مورد، عملکرد و بازده توربین را تغییر می دهد و بنابراین پیش بینی دقیق آن مهم است. دنباله‌های نامحدود به مدت طولانی در زمینه توربین‌های بادی مطالعه شده اند. مثلا مقاله ارائه شده توسط ورمیر و همکاران [۲۲]، مروری کامل از نتایج عددی و آزمایشی برای دنباله‌های توربین بادی محوری است. اگرچه مدل‌های تجربی مختلفی برای پیش بینی گسترش دنباله پشت توربین بادی فعال وجود دارد، و قوانین عددی بسیاری برای توصیف ساختار دنباله به کار می روند، ولی این مطالعه نتیجه گیری می کند که داده آزمایشی بیشتری لازم است و مشخصات دنباله هنوز به خوبی درک نشده اند. اما مشخص است که دنباله را می توان به دو بخش تقسیم کرد: دنباله نزدیک که ساختارهای منسجم ایجاد می شوند و دنباله دور، که ترکیب شدن، کاهش سرعت تقریبا یکنواختی ایجاد می کند.

مقیاس‌های طول و زمان را برای دنباله نزدیک برآورد می کنیم که قطر دنباله $D=2R$ و سرعت در منطقه دنباله $U_{wake}=\beta\beta'U$ است، که علاوه بر ضریب القای β معرفی شده در بخش قبلی، $\beta' < 1$ به صورت کاهش سرعت به دلیل عبور از پره نیمه عقبی تعریف می شود. مقیاس‌های مشخصه در جدول ۱,۴ ارائه شده اند.

۱,۳,۴ مقایسه مقیاس و تفکیک عددی

می توان مقیاس‌های طول و زمان متفاوت به دست آمده برای پدیده‌های متفاوت را مقایسه کرد (جدول ۱,۲، ۱,۳ و ۱,۴) تا مناطقی که تفکیک فضایی و زمانی بیشتری برای شبیه سازی عددی لازم دارند، برآورد شوند. دقیق ترین مقیاس‌های طول و زمان، مقیاس فویل هستند چون با افزایش عدد رینولدز Re_{foil} ، هر دو کاهش می یابند. مقیاس زمان گردابه بعد از مقیاس زمان فویل، کمترین مقدار را دارد، ولی مرتبه اندازه یکسان با مقیاس برهمکنش پره-گردابه دارد.

در مقایسه مقیاس‌های زمانی برای برهمکنش پره-گردابه و تفکیک دنباله نزدیک، مشاهده می شود $\ell_{wake} \approx \ell_{BV}$ و $\tau_{wake} \approx \frac{\ell_{BV}}{\beta'}$ است که یعنی برای $\beta' < 1$ ، پدیده برهمکنش پره-گردابه، تفکیک زمانی کمتری نسبت به تفکیک دنباله لازم دارد.

به علاوه، می توان عوامل تاثیرگذار بر تفکیک مقیاس‌ها را با استفاده از نسبت‌های کوچکترین به بزرگترین مقیاس بررسی

کرد. نسبت مقیاس‌های طول را به صورت $r_{\ell} = \frac{\ell_{foil}}{\ell_{wake}}$ تعریف کرد. جایگذاری مقیاس‌های طول مناسب (از جدول ۱,۲ و ۱,۴)، $r_{\ell} = \frac{c}{D(Re_{foil})^{\gamma}}$ ایجاد می کند. این عبارت را می توان با استفاده از تعریف حالت صلب توربین $\sigma/N = 2c/D$ ساده کرد که N تعداد پره‌های توربین است. عبارت نهایی برای نسبت مقیاس‌های طول می دهد: $r_{\ell} = \frac{\sigma}{2N(Re_{foil})^{\gamma}}$. بررسی عبارت آخر نشان می دهد که تفکیک این مقیاس‌های طول بیشتر می شود (یعنی نسبت کوچکتر)، اگر تعداد پره‌ها (N) و عدد رینولدز (Re_{foil}) افزایش یابد یا حالت صلب (σ) کاهش یابد.

همین طور نسبت مقیاس‌های زمان ایجاد می شود که می دهد $r_{\tau} = \frac{\tau_{foil}}{\tau_{wake}} = \frac{\sigma\beta\beta'}{2N\lambda(Re_{foil})^{\gamma}}$. در این مورد تفکیک مقیاس زمان بیشتر می شود اگر تعداد پره‌ها (N)، عدد رینولدز (Re_{foil}) و نسبت سرعت نوک (λ) افزایش یابد یا حالت صلب

(σ) افزایش یابد و ضرایب القا ($\beta\beta'$) کاهش یابند. از عبارات ایجاد شده باید بیان کرد که تفکیک مقیاس زمانی محدودیت بیشتری از تفکیک مقیاس دارد: چون با $\beta\beta' < 1$ و $\lambda \gg 1$ $r_\tau = \frac{\beta\beta'}{\lambda} r_\ell$ است. در پایان این بخش، برآورد کمی از مقیاس‌های مختلف (جدول ۱، ۲، ۳، ۴) در جدول ۱، ۵ برای CFT عادی با استفاده از شرایط محیطی هوا و آب ارائه شده در بخش ۱، ۲ فراهم شده است. فرض کنید توربین جریان متلاطم با شعاع $R = 5m$ را در نظر می‌گیریم که از ایرفویل‌هایی با وتر $c = 1m$ تشکیل می‌شود (یعنی حالت صلب $\sigma/N = 0.2$). برای ارزیابی مقیاس‌های طول، زمان و سرعت، تقریب زدن این پارامترها ضروری است: $\gamma = 1/5$ برای لایه مرزی متلاطم، نسبت سرعت نوک $\lambda \approx 3$ ، ضریب برآ $C_L \approx 1$ (مثلا حداکثر C_L برای $NACA 0015$ در $Re = 1 \times 10^6$) و ضرایب القای $\beta \approx \beta' \approx 0.5$. به علاوه، محاسبات برای دو سرعت جریان $U = 12$ و $15m/s$ انجام می‌شوند که به ترتیب برای محیط‌های هوا و آب هستند (یعنی توربین‌های بادی و جزرومدی). دقت کنید که این دو محیط، مقادیر متفاوتی برای ویسکوزیته سینماتیک لازم دارند: $\nu = 1.45 \times 10^{-5}$ و $\nu = 1.83 \times 10^{-6} m^2/s$ برای هوا و آب شور. بررسی جدول ۱، ۵ نشان می‌دهد که وقتی توربین‌های بادی به جای توربین‌های جزرومدی در نظر گرفته می‌شوند، مقیاس‌های زمانی کوچکتری وجود دارند. اما مشخص است که نسبت‌های مقیاس‌های زمانی (یعنی r_τ) برای دو نوع توربین مرتبه یکسانی دارند.

جدول ۱، ۵: خلاصه و ارزیابی مقیاس‌های CFT برای انرژی باد و جزرمد

	مقیاس طول ℓ (m)	مقیاس زمان τ (s)	مقیاس سرعت U (m/s)	عدد رینولدز Re
توربین بادی				
فویل	0.053	0.001	36.000	2.5×10^6
گردابه	1.000	0.274	3.648	2.5×10^5
BV	10.000	1.667	6.000	4.1×10^6
دنباله	10.000	3.333	3.000	2.1×10^6
توربین جزرومدی				
فویل	0.053	0.012	4.500	2.5×10^6
گردابه	1.000	2.193	0.456	2.5×10^5
BV	10.000	13.333	0.750	4.1×10^6
دنباله	10.000	26.667	0.375	2.0×10^6

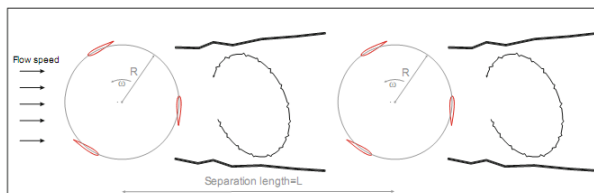
نتایج این آنالیز ساده شده، استدلال درباره تفکیک مقیاس را تأیید می‌کنند. اما مفید به نظر می‌رسد چون دامنه وسیعی از مقیاس‌های طول و زمان را نشان می‌دهد که برای بررسی دقیق فیزیک جریان پیچیده در شبیه‌سازی‌های توربین جریان متقابل لازم هستند. به علاوه، با این آنالیز می‌توان اهمیت نسبی پدیده‌های جریان مختلف را مشخص کرد.

۱، ۴ دقت مهندسی و دقت بالا

اغلب بیان می‌شود دقت بالا برای بیشتر کاربردهای مهندسی اجباری نیست چون خطای ۱۰-۵ درصد قابل قبول است و روش‌های مرتبه بالا لازم نیستند. در این بخش نشان می‌دهیم انتشار خطاها، بی‌دقتی‌های غیرقابل قبولی در زمان ارزیابی عملکرد CFT‌ها ایجاد می‌کند. برای توضیح این موضوع که چرا دقت بالا مهم است، پیکربندی ارائه شده در شکل ۱، ۲ در نظر گرفته می‌شود. این شکل مجموعه‌ای از دو توربین را نشان می‌دهد که توربین دوم در دنباله توربین اول کار می‌کند. فرض می‌کنیم میدان جریان اطراف اولین توربین با خطای $U = U^{\text{exact}}(1 \pm 0.05)$ 5% به دقت تفکیک می‌شود.

با فرض خطای ۵ درصد در زمان محاسبه U_{axial} ، خطا در ضریب القای $\frac{U_{\text{axial}}}{U} = \beta$ (بخش ۱، ۳ را ببینید) را می‌توان به صورت $\beta \approx \beta^{\text{exact}}(1 \pm 0.07)$ محدود کرد. اگر ضریب القای نیمه پستی $\beta' = \frac{U_{\text{wake}}}{U_{\text{axial}}}$ خطاهای یکسانی در ارتباط

با β دارد (که مشخصاً یک برآورد محافظه کارانه است) و $\beta' \approx \beta'^{\text{exact}}(1 \pm 0.07)$ به دست می‌آید. سرعت دنباله را می‌توان به این صورت برآورد کرد: $U_{\text{wake}} = \beta\beta'U$ و این مرزها وجود دارند $U_{\text{wake}} = \beta\beta'^{\text{exact}}U^{\text{exact}}(1 \pm 0.07)(1 \pm 0.05) \approx U_{\text{wake}}^{\text{exact}}(1 \pm 0.11)$. این مورد برابر با ۱۱ درصد خطا در سرعت ورودی برای توربین دوم است. مثال‌ها نشان می‌دهند خطای مهندسی قابل قبول اولیه ۵ درصد، بعد از یک ردیف توربین‌ها، سطوح غیرقابل قبولی ایجاد می‌کند. اگر آنالیز مشابهی برای ردیف دوم انجام شود، می‌توان نشان داد که خطا در دنباله به ۱۵ درصد افزایش می‌یابد (با فرض خطاهای یکسان در ضرایب القا).



شکل ۱، ۲: مجموعه توربین‌ها (شماتیک)

مرزهای خطا را می‌توان برای نیروهای پره و خروجی توان این توربین‌ها برآورد کرد. در زمان محاسبه نیروی برآ، خطای $L = L^{\text{exact}}(1 \pm 0.07)$ را در نظر می‌گیریم که با ۵ درصد خطا در سرعت U ارتباط درجه دو دارد. توان ایجاد شده توسط دستگاه برابر است با $Power = \omega T$ که T گشتاور است (یعنی نیروی فویل در جهت مماس بر مسیر مدور) و ω سرعت چرخشی بدون خطا در نظر گرفته می‌شود. برای سادگی، بیان می‌کنیم $T = f(L)$ که f تابع خطی وابسته به زاویه برخورد است. بنابراین می‌توان توان را به این صورت بیان کرد: $Power = \omega f(L^{\text{exact}}(1 \pm 0.07))$. در توربین‌ها معمولاً

ضریب بدون بُعد توان $C_p = \frac{Power}{1/2\rho AU^3}$ محاسبه می‌شود که $A = D = 2R$ بخش جلویی CFT را نشان می‌دهد که ایجاد می‌کند. دوباره خطای ۵ درصد در متغیر مدنظر به ۱۱ درصد افزایش می‌یابد. همانطور که در توربین پایین دست مشاهده می‌شود، در جریان ورودی و سرعت دنباله توربین اول، خطا در $C_p = C_p^{\text{exact}} \frac{(1 \pm 0.15)}{(1 \pm 0.11)^3}$ یعنی ۲۵ درصد افزایش می‌یابد.

این دو مثال ساده نشان می‌دهند چرا دقت بالا مهم است. چون پدیده‌ها و برهمکنش‌های فیزیکی (مثلاً جریان‌های وامانده، برهمکنش پره-گردابه) بیشتر از آنچه در این رویکرد ساده ارائه شده است، نقش دارند، اگر دقت پایین برای محاسبه فیزیکی پیچیده مرتبط با توربین‌های جریان متقابل استفاده شود، سطوح خطای غیرقابل قبولی انتظار می‌روند.

۱,۵ نتیجه گیری

این فصل جریان‌های CFT را به صورت مقیاس‌های زمان، طول و سرعت برای پدیده‌های متفاوت مشاهده شده در زمان شبیه سازی این نوع دستگاه‌ها ارائه و بررسی می کند. یعنی مقیاس‌های فویل، گردابه و دنباله مشخص می شوند. به علاوه، عوامل اصلی تاثیرگذار بر مقیاس‌ها آنالیز می شوند و برای تعیین اهمیت نسبی پدیده‌های فیزیکی مختلف به کار می روند. به علاوه، ضرورت دقت زیاد در زمان محاسبه جریان‌های CFT بررسی می شود که ظرفیت مفید استفاده از روش‌های عددی را نشان می دهد که راهکار دقیقی با حداقل خطاهای اتلافی و اختلافی فراهم می کنند (مثلا روش‌های گالرکین ناپیوسته یا طیفی)، مانند قانون گالرکین ناپیوسته مرتبه بالا که توسط مولف اول ایجاد شد [۷-۱۰].

References

1. Abbott I, Von-Doenhoff A (1959) Theory of wing sections: including a summary of airfoil data. Dover, New York
2. Anderson JD (2005) Fundamentals of aerodynamics, 4th edn. McGraw-Hill, New York
3. Burton T, Jenkins N, Sharpe D, Bossanyi E (2001) Wind energy handbook. Wiley, New York
4. Consul CA, Willden RHJ, Ferrer E, McCulloch MD (2009) Influence of solidity on the performance of a cross-flow turbine. In: Proceedings of the 8th European wave and tidal energy conference
5. Draper S (2011) Tidal stream energy extraction in coastal basins. Ph.D. thesis, University of Oxford
6. Eriksson S, Bernhoff H, Leijon M (2008) Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renew Sust Energ Rev* 12(5):1419–1434
7. Ferrer E (2012) A high order Discontinuous Galerkin-Fourier incompressible 3D Navier-Stokes solver with rotating sliding meshes for simulating cross-flow turbines. Ph.D. thesis, University of Oxford
8. Ferrer E, Willden RHJ (2011) A high order discontinuous Galerkin finite element solver for the incompressible Navier–Stokes equations. *Comput Fluids* 46(1):224–230
9. Ferrer E, Willden RHJ (2012) A high order discontinuous Galerkin-Fourier incompressible 3D Navier-Stokes solver with rotating sliding meshes. *J Comput Phys* 231(21):7037–7056
10. Ferrer E, Moxey D, Willden RHJ, Sherwin S (2014) Stability of projection methods for incompressible flows using high order pressure-velocity pairs of same degree: continuous and discontinuous galerkin formulations. *Commun Comput Phys* 16(3):817–840
11. Grettton GI, Bruce T (2005) Preliminary results from analytical and numerical models of a variable-pitch vertical-axis tidal current turbine. In: 6th European wave and tidal energy conference, Glasgow
12. Grettton GI, Bruce T (2006) Hydrodynamic modelling of a vertical-axis tidal current turbine using a Navier–Stokes solver. In: Proceedings of the 9th world renewable energy congress, Florence
13. Houlisby GT, Draper S, Oldefield MLG (2008) Application of linear momentum actuator disc theory to open channel flows. Technical report, Oxford University Engineering Library Report
14. Howell R, Qin N, Edwards J, Durrani N (2010) Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renew Energ* 35(2):412–422
15. McAdam R (2011) Studies into the technical feasibility of the transverse horizontal axis water turbine. Ph.D. thesis, University of Oxford
16. Newman BG (1983) Actuator-disc theory for vertical-axis wind turbines. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 15(1–3):347–355
17. Paraschivoiu I (2002) Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept. Polytechnic International Press, Montreal
18. Savage A (2007) Tidal power in the UK - tidal technologies overview, Technical Report Sustainable Development Commission, 2007
19. Schlichting H (1979) Boundary layer theory. McGraw-Hill, New York
20. Strickland JH (1975) Darrieus turbine: a performance prediction model using multiple streamtubes. Technical report. Report No. SAND-75-0431, Sandia Labs
21. Templin RJ (1974) Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine. NASA STI/Recon Technical Report N, 76
22. Vermeer LJ, Sørensen JN, Crespo A (2003) Wind turbine wake aerodynamics. *Prog Aerosp Sci* 39(6–7):467–510
23. Whelan J, Thomson M, Graham JMR, Peiró J (2007) Modelling of free surface proximity and wave induced velocities around a horizontal axis tidal stream turbine. In: 7th European wave and tidal energy conference, Porto
24. Whelan JI, Graham JMR, Peiro J (2009) A free-surface and blockage correction for tidal turbines. *J Fluid Mech* 624:281–291
25. Wilson RE, Lissaman PBS (1974) Applied aerodynamics of wind power machines. NASA STI/Recon Technical report 75:22669