



دانشکدهی مکانیک

پایاننامهی کارشناسی ارشد

مدلسازی آزمون توربین بادی مکزیکو با نظریه خط عملگر، تحت ضرایب آئرودینامیکی تصحیح شده با جریان شعاعی

سلمان صادقی

استاد راهنما: دکتر محمدحسن کیهانی

استاد مشاور: دکتر اسماعیل محمودی

> ماه و سال انتشار: شهریور ۹۶

	م المجلي المرود.	
تكميل	تحصيلات	مدىرىت

باسمەتعالى

شماره: ۱۴۹ / ۲۹۷ ردم تاریخ: ۷ / ۹۱۸ ۹

فرم شماره (۳) صور تجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای سلمان صادقی با شماره دانشجویی ۹۳۱۰۸۳۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش مهندسی سیستم های انرژی تحت عنوان مدل سازی آزمون توربین بادی مکزیکو با نظریه خط عملگرا، تحت ضرایب آئرودینامیکی تصحیح شده با جریان شعاعی در تاریخ ۱۳۹۶/۶/۲۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

امضاء	مرتبة علمي	<mark>نام و</mark> نام خانوادگی	عضو هيأت داوران
H	استاد	دکتر محمد حسن کیهانی	۱_استادراهنمای اول
-	-	-	۲- استادراهنمای دوم
5/9/	استاديار	دکتر اسماعیل محمودی	۳-استاد مشاور
Tat	استاديار	دكتر محمد ضامن	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
Aler 1	استاديار	دکتر محمود چهارطاقی	۵- استاد ممتحن اول
0/0	استاديار	دکتر علی عباس نژاد	۶استاد ممتحن دوم

vier D.

تقديم به :

این کوشش ناچیز تقدیم میشود به مادرم، هم او که تصویرش چون قایقی ست، رقصان بر آبیِ .

دور

تشکر و قدردانی:

تشکر میکنم از حمایتهای سخاوتمندانه و بیدریغ پدرم، و همچنین از صبر و مهربانی اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر محمودی و جناب آقای دکتر کیهانی

تعهدنامه

اینجانب سلمان صادقی دانشجوی دورهی کارشناسی ارشد رشتهی مهندسی مکانیک-گرایش سیستم های انرژی دانشکدهی مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسندهی پایاننامهی مدلسازی آزمون توربین بادی مکزیکو با نظریه خط عملگر، تحت ضرایب آئرودینامیکی تصحیح شده با جریان شعاعی، تحت راهنمایی دکتر محمد حسن کیهانی متعهد میشوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
 - در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایاننامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی
 در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایاننامه تأثیر گذار بودهاند در مقالات مستخرج از پایاننامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایاننامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه ی مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته
 یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاريخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامههای رایانهای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
 - استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر اصلاح سهبعدی ضرایب آئرودینامیکی پرهی آزمون توربین بادی مکزیکو بر جوابهای بهدستآمده از مدل خط عملگر پیاده شده در نرمافزار متنباز اوپس فوم است. روشهای مختلفی برای اصلاح ضرایب برآ و پسای دوبعدی وجود دارد. در این پژوهش با شبیهسازی پرهی آزمون مکزیک و در نرمافزار فلوئنت و با استفاده از روش سرعت محوری کاهشیافته، ابتدا ضرایب برآ و پسا برای سه مقطع خاص از پره و برای سه سرعت ۱۰، ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه اصلاح گردیدند. بررسی نتایج حاصل از اصلاح سهبعدی نشان داد که در مقاطع نزدیک به ریشه، ضرایب بهدستآمده تفاوت بیشتری با ضرایب اصلاحنشده دارند. ضریب بـرآی محاسبه شده در نزدیک ترین مقطع انتخابی به ریشه و برای حالت تلاطم، ۸ درصد کمتر از ضریب برآی دوبعدی محاسبه شده است. با افزایش فاصله از ریشه به دلیل شکل گیری گردابههای نوک، نتایج اصلاحشده همگرایی بیشتری با ضرایب دوبعدی از خود نشان دادند بهطوری که در نزدیکترین مقطع به نوک پره، ضریب برآی بهدستآمده برای حالت تلاطـم ۵ درصـد بیشـتر از ضریب دوبعدی گزارش شده است. مدل خط عملگر در پیش بینی رفتار جریان حول توربین های بادی محور افقی بسیار قدرتمند عمل می کند. به دلیل عدم نیاز به شبکهبندی جریان حول لايهمرزي سرعت، سرعت محاسبات بالانيز از ديگر ويژگيهاي مدل خط عملگر است. با اعمال ضرایب اصلاحشده به مدل خط عملگر، نتایج بهدستآمده برای پارامترهای عملکردی توربین مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال ضرایب اصلاحشده، دقت پیش بینی نتایج مربوط به ترمهای سرعت افزایش پیدا کرد. در m ۱.۳۷۷ r = 1نتیجه مربوط به تخمین ترم محوری سرعت r درصد بهبود یافت. این کاهش خطای محاسبات در نتایج مربوط به تخمین توزیع نیروهای محوری و ومماسی روی پره نیز مشاهده شد به طوری که مدل توسعه یافته توانست ۱۶ نیوتن از اختلاف نیروی محوری تخمین زدهشده بکاهد. استفاده از ضرایب اصلاح شده باعث شد پارامترهای

عملکردی توربین نظیر گشتاور کل و نیروی محوری کل نیز اختلاف کمتری با نتایج آزمایشگاهی پیدا کنند. میزان بهبود نتایج برای سرعت طراحی در محاسبهی نیروی محوری کل ۲ درصد و در تخمین گشتاور کل تولیدی توربین ۳ درصد بوده است.

واژگان کلیدی: توربین بادی مکزیکو، شبیهسازی روتور کامل، ضرایب آئرودینامیکی اصلاحشده، روش میانگین رینولدز، مدل خط عملگر، شبیهسازی گردابههای بزرگ، پسباد

مقالات مستخرج از پایاننامه

 ۱) اصلاح سهبعدی ضرایب آئرودینامیکی پرهی آزمون توربین بادی مکزیکو تحت جریان شعاعی، هفدهمین کنفرانس دینامیک شارهها، دانشگاه صنعتی شاهرود، شهریور ۹۶

۲) توسعهی مدل خط عملگر با استفاده از اصلاح سهبعدی ضرایب آئرودینامیکی برای توربین بادی آزمون مکزیکو، پنجمین کنفرانس ملی انرژی بادی ایران، مرکز پژوهشهای وزارت نیرو، مهر ۹۶

	فهرست مطالب	
۱	ىل اول: مقدمه و اهداف تحقيق	۱) فص
۲	مقدمه	۱–۱
۳	توزيع جهانى باد	۲-۱
۳	۲-۱ جریان چرخشی هادلی	- 1
۳	۲-۲- جریان چرخشی راسبی	- 1
۴	صنعت انرژی بادی در جهان و چشماندازهای آن	۳-۱
۶	صنعت انرژی باد در ایران و چشماندازهای آن	4-1
۷	انواع مبدلهای انرژی باد	۵-۱
۷	۵-۵۰ توربینهای بادی محور عمودی	- 1
λ	۵-۲-۲ توربینهای بادی محور افقی	- 1
۱۰	فرضيهها و اهداف تحقيق	8-1
۱۰	طرح کلی فصول پایاننامه	۷–۱
۱۳	ىل دوم: پيشينەى پژوهش	۲) فص
14	مقدمه	۱-۲
14	۱–۱- منشأ پيدايش باد	-7
14	۱-۲-۲ تعاریف بنیادی	-۲
۱۷	مروری بر روشهای عددی شبیهسازی توربینهای بادی	۲-۲
۱۷	-۲-۱ نظریه تکانه اجزاء پره	-۲

۲۳	۲-۲-۲ نظریهی دیسک عملگر
۲۵	۲-۲-۳ نظریهی خط عملگر
۲۹	۲-۲-۴ نظریهی سطح عملگر
۲۹	۲-۳ مروری بر پیشینهی پژوهش
۳۵	۲-۴٪ روش، اهداف و نوآوریهای تحقیق
٣٩	۳) فصل سوم: معرفی شرایط و نحوهی مدلسازی مسئله
۴۰	۱-۳ مقدمه
۴	۲-۳ آزمون توربین بادی مکزیکو
۴۱	۳–۲–۱ روتور و پرهی توربین بادی مکزیکو
۴۵	۳-۲-۲ ابزارهای اندازهگیری فشار وتکانه
۴۷	۳-۳ تصحیح سه بعدی ضرایب آئرودینامیکی هوابرها
۴۷	۳-۳-۱ روش تجربی اسنیل
۴۹	۳-۳-۲ مدل روتور کامل
۶۵	۴-۳ روند حل و الگوریتم شبیهسازی مدل خط عملگر
۶۵	۳–۴–۱ نرمافزار شبیهسازی
99	۳-۴-۲ معادلات، روند حل و الگوریتم شبیهسازی
Υ٨	۴) فصل چهارم: نتایج
٧٩	۱-۴ مقدمه
٧٩	۴-۲ اعتبارسنجی و مطالعهی استقلال از شبکهبندی

رایب آئرودینامیکی اصلاحشده	۴–۳ ض
ايج تخمين پسبادها	۴–۴ نت
ايج تخمين نيروها	۴–۵ نت
ایج پارامترهای عملکردی	۴–۶ نت
۱ خطاهای تخمین فیزیکی	-9-4
۲ خطاهای گردسازی رایانه۲	-9-4
۳ خطای همگرایی تکراری۳	-9-4
۴ خطای گسستهسازی	-9-4
پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادها	۵) فصل
ندمه	۵–۱ مغ
يجەگىرى كلى	۵–۲ نت
۱۰۵	۵-۳ پي
111	پيوست

فهرست شكلها

۵	شكل ۱-۱ هزينه هر كيلووات ساعت برق توليدى [۴]
۶	شکل ۲-۱ ظرفیت تجمعی نیروگاههای بادی نصبشده در دنیا [۵]
۸	شکل ۱-۳ انواع توربینهای بادی محور عمودی: (الف) داریوس، (ب) ساونیوس
١٠	شکل ۱-۴ توربینهای بادی محور افقی
۱۸	شکل ۲-۱ نمایش مقاطع طولی جریان جهت اعمال قانون برنولی در نظریه تکانه خطی
۲۱	شکل ۲-۲ نمایش اجزاء پره و نحوهی سازماندهی ضرایب برا و پسای هوابر
۲۵	شکل ۲-۳ معرفی چهار مقطع و شماتیک روش دیسک عملگر
۲٩	شکل ۲-۴ توزیع بیضوی پارامتر ۶
۴۱	شكل ۳-۱ الف)تونل باد DNW/LLF ب)توربين بادى مكزيكو
۴۲	شکل ۳-۲ هندسه سه هوابر استفاده شده در توربین بادی مکزیکو[۳۸]
	شکل ۳-۳ تغییرات ضرایب برآ و پسا از سمت مرکز دوران هوابر اول، DU91-W2-250، پره
۴۲	توربين مورد مطالعه[٣٨]
	شکل ۳-۴ تغییرات ضرایب برآ و پسا از سمت مرکز دوران هوابر دوم، RISØ A1-21، پره توربین
۴۳	مورد مطالعه[۳۸]
	شکل ۳-۵ تغییرات ضرایب برآ و پسا از سمت مرکز دوران هوابر سوم، NACA64-418، پره
۴۳	توربین مورد مطالعه[۳۸]
44	شکل ۳-۶ تغییرات زاویه گام محلی در طول پره توربین بادی[۲۳]
۴۴	شکل ۳-۷ تغییرات کورد در طول پره توربین[۲۳]
۴۵	شکل ۳-۸ پره روتور طراحی شده توسط تیم طراحی پره. به ترتیب تفکیک هوابرهای پره[۲۳]

	شکل ۳-۹ (الف) ۲۵ و ۳۵ درصد فاصله از ابتدای پره و همچنین فضای موجود درون پره را نشان
	میدهد، (ب) حسگرهای فشار کولیت که در لبه جلوی هوابر به صورت نصب داخل حفره و در
49	پهنای هوابر به صورت همسطح با دیواره نصب شده اند[۲۳]
۴۸	شکل ۳-۱۰ اصلاح ضرایب برا برای پره توربین بادی مکزیکو[۲۳]
۵۰	شکل ۳-۱۱ پره و توپی آزمون مکزیکو طراحیشده توسط نرمافزار سالیدورک
۵۱	شکل ۳-۱۲ دامنهی شبکهبندی شده برای تحلیل جریان حول یک پرهی آزمون مکزیکو
۵۱	شکل ۳-۱۳ دامنهی شبکهبندی شده برای شبیهسازی
۵۲	شکل ۳-۱۴ توپی شبکهبندی شده برای شبیهسازی
۵۳	شکل ۳-۱۵ نوک مش خوردهی پرهی طراحیشده مکزیکو
۵۳	شکل ۳-۱۶ شبکهبندی حول ریشهی پرهی آزمون مکزیکو
۵۹	شکل ۳-۱۷ شماتیک شرایط مرزی قرار داده شده برای شبیهسازی
۷۱	شکل ۳-۱۸ ابعاد دامنه حل و محل قرار گیری توربین
۷۱	شكل ۳-۱۹ ابعاد كلي دامنه و نحوه شبكهبندي
۷۲	شکل ۳-۲۰ استفاده از شبکه بهبودیافته در اطراف توربین
	شکل ۳-۲۱ الگوریتم به کاررفته در برنامه جهت مدلسازی خط عملگر با استفاده از حل گر
٧۶	PisoFoam
۸۱	شکل ۴-۱ ضرایب برآ در حالت اصلاحنشده برای سه هوابر مورداستفاده در پرهی مکزیکو[۲۳]
	شکل ۴-۲ ضرایب برآی اصلاحشده درمقطع ۳۵ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب برآی
۸۲	دوبعدی هوابر Du
	شکل ۴-۳ ضرایب برآی اصلاحشده در مقطع ۶۰ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب برآی
۸۲	دوبعدی هوابر Riso

شکل ۴-۴ ضرایب برآی اصلاحشده در مقطع ۸۲ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب برآی
دوبعدی هوابر Naca
شکل ۴-۵ ضرایب پسا در حالت اصلاحنشده برای سه هوابر مورد استفاده در پرهی مکزیکو[۲۳]۸۴
شکل ۴-۶ ضرایب پسای اصلاحشده در مقطع ۳۵ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب پسای
دوبعدی برای هوابر Du
شکل ۴-۷ ضرایب پسای اصلاحشده در مقطع ۶۰ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب پسای
دوبعدی هوابر Riso
شکل ۴-۸ ضرایب پسای اصلاحشده در مقطع ۸۲ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب پسای
دوبعدی هوابر Naca
شکل ۴-۹ توزیع سرعت محوری برای مقطع ۱٬۳۷۷ متر در طول پره برای شبیهسازی و حل
عددی در مقایسه با نتایج تجربی[۳۶]
شکل ۴-۱۰ توزیع سرعت شعاعی در مقطع ۱٫۳۷۷ متر در طول پره برای شبیهسازی و حل
عددی در مقایسه با نتایج تجربی
شکل ۴-۱۱ توزیع سرعت محوری در فاصلهی ۲۰۶۵۱۴ x بعد از روتور برای شبیهسازی و
حل عددی در مقایسه با نتایج تجربی
شکل ۴-۱۲ توزیع سرعت شعاعی در فاصلهی ۲۰۶۵۱۴ = x بعد از روتور برای شبیهسازی و
حل عددی در مقایسه با نتایج تجربی۹۱
شکل ۴-۱۳ تشکیل گردابهها در پشت روتور و توپی۹۲
شکل ۴-۱۴ توزیع فشار روی پره
شکل ۴-۱۵ نمایش خطوط جریان برای پرهی شبیهسازی شده در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه۹۳
شکل ۴-۱۶ خطوط جریان در پشت توپی طراحی شده برای سرعت ۲۴ متر بر ثانیه۹۴
شکل ۴-۱۷ توزیع نیروی عمودی در امتداد طول پره در مقایسه با نتایج تجربی۹۴

شکل ۴-۱۸ توزیع نیروی مماسی در امتداد طول پره در مقایسه با نتایج تجربی۹۹	
شکل ۴-۱۹ نیروی محوری کل بهدست آمده در مقایسه با نتایج تجربی۹۷	
شکل ۴-۲۰ توزیع گشتاور بهدست آمده از شبیهسازی و حل عددی در مقایسه با نتایج تجربی۹۸	

فهرست علائم انگلیسی

Α	مساحت
a	شاخص القايى محورى
a	شاخص دورانی
ā	شتاب ذره
В	تعداد پرمهای توربین بادی
С	وتر پره
C_d	ضريب پسا
Cl	ضريب برآ
dA	المان مساحت
dD	جزء نیروی پسا
dl	جزء نیروی برآ
dFx	جزء نيروى محورى
dFθ	جزء نیروی مماسی
dL	جزء تكانه زاویه ای
dP	جزء توان خروجی توربین بادی
dt	جزء زمان
dT	گشتاور روی هر جزء هوابر
\vec{f}	نمایندهی نیروهای حجمی روی سیال
Ι	اینرسی دورانی
L	تکانه زاویهای

جرم	т
نرخ جرم	'n
توان خروجی توربین بادی	Р
فشار جريان باد	Р
شعاع کل پرہ توربین بادی	R
شعاع پره در هر نقطه مشخص	r
گشتاور	Т
سرعت محوری در راستای طولی جریان	u
سرعت جریان باد در صفحهی روتور	V
سرعت شعاعی در راستای امتداد طول پرهها	ν
سرعت جریان آزاد باد	V_{∞}
برآیند سرعت باد برخورد کرده با توربین	W

فهرست علائم يونانى

	α	زاويه حمله
	β	زاویه گام محلی
	δ	زاويه مچ
	γ	زاویه گام
	θ	زاویه دوران
	λ_r	نسبت سرعت نوک محلی
	ϕ	زاویه جریان
	ρ	چگالی هوا
	ό	ضریب پری محلی
	$ec{\sigma}$	تانسور تنش
,	Ω	سرعت دورانی روتور توربین بادی
	ω	سرعت دوارنی گردابه
	- abla p	گرادیان فشار
	$ abla. \vec{\Gamma}$	نیروهای حجمی ناشی از گرانروی سیال
	fdist(ζ)	توزیع نیرو در روش سطح عملگر

فصل اول: مقدمه و اهداف تحقیق

1-1 مقدمه

انرژی باد ازجمله نخستین منابعی است که بشر برای رفع نیازهای خود از آن استفاده می کرده است. تاریخ استفاده از این انرژی در ایران در آسیابهای بادی به ۶۴۴ سال قبل از میلاد مسیح برمی گردد[۱]. این انرژی تا پیش از انقلاب صنعتی بهعنوان یک منبع انرژی بهطور گستردهای مورد بهرهبرداری قرار می گرفت. ولی در دوران انقلاب صنعتی استفاده از سوختهای فسیلی به دلیل ارزانی و قابلیت اطمینان بالا، جایگزین انرژی باد شد. در این دوره توربینهای بادی قدیمی دیگر ازنظر اقتصادی قابل قابت با بازار انرژیهای نفت و گاز نبودند. در سالهای ۱۹۷۳ و ۱۹۷۸ دو شوک بزرگ نفتی، ضربه بزرگی به اقتصاد انرژیهای حاصل از نفت و گاز وارد آورد. بهاینترتیب هزینه انرژی تولیدشده بهوسیله توربینهای بادی در مقایسه با نرخ جهانی قیمت انرژی بهبود یافت. پسازآن مراکز و مؤسسات تحقیقاتی و آزمایشگاهی متعددی در سراسر دنیا به بررسی فناوریهای مختلف جهت استفاده از انرژی باد بهعنوان یک منبع بزرگ انرژی پرداختند. بهعلاوه این بحران باعث ایجاد تمایلات جدیدی درزمینهی کاربرد فناوری انرژی باد جهت تولید برق متصل به شبکه ، یمیاژ آب و تأمین انـرژی الکتریکـی نـواحی دورافتـاده شـد. همچنـین در سالهای اخیر، مشکلات زیستمحیطی و مسائل مربوط به تغییر آبوهوای کره زمین به علت استفاده از منابع انرژی فسیلی بر شدت این تمایلات افزوده است.

از سال ۱۹۷۵ پیشرفتهای شگرفی درزمینهی توربینهای بادی در جهت تولید برق بهعمل آمده است. در سال ۱۹۸۰ اولین توربین برق بادی متصل به شبکه سراسری نصب گردید. بعد از مدت کوتاهی اولین مزرعه برق بادی چند مگاواتی در آمریکا نصب و به بهرهبرداری رسید. پیشرفتهای اخیر درزمینهی انرژی باد باعث افزایش بازده انرژی توربینهای بادی و درنتیجه کاهش قیمت تمامشده انرژی شده است و این کاهش قیمت تمامشده و افزایش راندمان باعث شده است که انرژی باد بهعنوان یکی از منابع انرژیهای تجدید پذیر با سرعتی قابل توجه نسبت به سایر انرژیهای تجدید پذیر در دهههای اخیر رشد کند. به گونهای که اکنون کشورهای صنعتی و بادخیز مانند آلمان، دانمارک، انگلستان، اسپانیا، چین، ایالات متحده امریکا و... با افزایش مزارع بادی خود مقدار قابل توجه از انرژی موردنیاز خود را از این نیروگاهها تأمین میکنند به طوری که کشور ایالات متحده ی آمریکا به عنوان بزرگ ترین مصرف کننده انرژی در جهان تا سال ۲۰۳۰ برای تولید بیست درصد انرژی موردنیاز خود از مزارع بادی هدف گذاری کرده است.[۲]

ادامهی این فصل نگاهی می اندازد به توزیع جهانی باد، ظرفیت انرژی بادی نصب شده و چشم اندازهای آن در جهان و ایران و در انتها به معرفی انواع مبدل های انرژی باد می پردازد.

1-2 توزيع جهاني باد

به طور کلی جریان باد در جهان دارای دو نوع توزیع است:

۱-۲-۱ جریان چرخشی هادلی^۱

بین عرضهای جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی و ۳۰ درجه جنوبی، هوای گرم شده در استوا به بالا صعود کرده و هوای سردتری که از شمال و جنوب میآید جایگزین آن می شود. ایـن جریـان را چرخش هادلی مینامند. در سطح کره زمین این جریـان بـدین معنـی اسـت کـه بادهـای سـرد بهطرف استوا میوزند و از طرف دیگر هوایی که در ۳۰ درجه شمالی و ۳۰ درجه جنوبی به پایین میآید خیلی خشک است و به دلیل آنکـه سـرعت دوران زمـین در ایـن عرضهـای جغرافیـایی بهمراتب کمتر از سرعت دوران زمین در استوا است، به سمت شرق حرکـت میکنـد. معمـولاً در این عرضهای جغرافیایی نواحی بیابانی مانند صحرا قرار دارند.

۲-۲-۱ جریان چرخشی راسبی^۲

Hadly' Rossby' بین عرضهای جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی (جنوبی) و ۲۰ درجه شمالی (جنوبی) عمدتا بادهای غربی در جریان هستند. این بادها تشکیل یک چرخش موجی را میدهند و هوای سرد را به جنوب و هوای گرم را به شمال انتقال میدهند. این الگو را جریان راسبی مینامند.

1-3 صنعت انرژی بادی در جهان و چشماندازهای آن

توربینهای بادی یکی از راههای تهیه انرژی پاک هستند که قدمتی چند صدساله دارند و میتوانند تأثیری قابلتوجه بر اقتصاد کشورهای دنیا بگذارند. پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۰ کشورهای اروپایی ۱۸۰ گیگاوات ظرفیت برق قابلنصب داشته و ۱۶ درصد برق مصرفی جهان را نیروگاههای بادی تولید و عرضه کنند. طبق آمار انجمن انرژی بادی آمریکا^۱هزینه پرداختی مزارع بادی بهطور میانگین ۴ تا ۸ هزار دلار آمریکا برای هر توربین است. طبق پژوهش های منتشرشده در مجله اقتصاد انرژی^۲برای هر مگاوات برق تولیدی از نیروگاههای بادی نیم شغل با درآمد ۱۱ هزار دلار آمریکا در سال ایجاد می شود. هزینهی انرژی باد در دنیا غالبا تابعی از منابع باد است بدینصورت که با چه سرعتی، در چه مدتی و در چه زمانی میوزد. پارامتر مههم اینجا ظرفیت میانگین ^۳است که به صورت درصد قدرت تولیدی توربین نسبت به ظرفیت تولیدی توربین در شرایط چرخش همیشگی تعریف می شود. هزینههای ثابت تمامشده برای یک مزرعه بادی شامل هزینهی توربین بادی، ارتباط شبکهای و کارهای عمرانی و ساختمانی است. این

همان طور که در شکل ۱-۱ مشخص است از ابتدای دههی نود میلادی تا سال ۲۰۰۵ قیمت تمامشده هر کیلووات برق تولیدی روندی نزولی داشته است. در طول سالهای ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ قیمت توربینهای بادی در پاسخ به تقاضای رو به رشد جهانی و به دلیل افزایش هزینههای مواد

American wind energy association' Energy economic magazine^{*} Average capacity^{*}

اولیه (فولاد و مس) و بحرانهای مالی جهانی افزایش یافت. بااینحال مجددا با حل مشکلات مذکور شاهد روند کاهش قیمتها باعرضه چشمگیر توربین بادی به بازار جهانی بودهایم بهطوریکه تنها در سال ۲۰۱۲ قیمت توربینهای بادی در بازار جهانی ۲۰ تا ۳۵ درصد کاهش داشته است.



شکل ۱-۱ هزینه هر کیلووات ساعت برق تولیدی [۴]

با اقتصادی تر شدن برق تولیدی از باد در سالهای اخیر همان طور که در شکل ۱-۲ مشاهده می شود از سال ۲۰۱۱ مجموع ظرفیت برق نصب شده در نیرو گاههای بادی تا سال ۲۰۱۵ به بیش از سه برابر افزایش یافته است.



شکل ۲-۱ ظرفیت تجمعی نیروگاههای بادی نصب شده در دنیا [۵]

1-4 صنعت انرژی باد در ایران و چشماندازهای آن

جمهوری اسلامی ایران در بخش غربی فلات و در جنوب غرب آسیا واقعشده است. این کشور با تنوع آب و هوایی زیادی روبروست. نواحی شمالی ایران دارای آبوهوای معتدل با بارنـدگیهای فراوان است. نواحی غربی در فصول سرد، سرد و مرطوب و در فصول گرم، خشک و معتدل است. در نواحی جنوبی، دما و رطوبت بیشتر و تابستانها بسیار گرم و زمستانها معتدل و نواحی شرقی و جنوب شرقی دارای آبوهوای بیابانی با تغییرات قابل ملاحظه دما در طول روز است. برای اینکه بتوان از منابع باد موجود جهت تولید برق استفاده نمود، وجود اطلاعات باد قابل اعتماد در خصوص پتانسیل باد منطقهی موردنظر جهت احداث نیروگاه بادی ضروری است. در سالهای اخیر با تهیهی اطلس بادی کشور نواحی مستعد بادخیز شناساییشدهاند. بر اساس اطلاعات دریافتی از ۲۰۰ ایستگاه در مناطق مختلف کشور، میزان ظرفیت اسمی سایتها در حدود ۲۰۰۰۰ مگاوات است. بر پایه پیش بینیهای صورت گرفته، میزان انـرژی قابـل استحصال بادی کشـور ازلحاظ اقتصادی بالغبر ۱۸۰۰۰ مگاوات تخمین زده میشود که مؤید پتانسیل قابل توجـه کشـور درزمینه احداث نیروگاههای بادی و همچنین اقتصادی بودن سرمایه گذاری در صنعت انرژی بادی است. در وزارت نیرو، نصب پنج هزار مگاوات نیروگاه تجدید پذیر در قانون برنامه پنجم توسعه هدف گذاری شده است که از این میزان ۴۵۰۰ مگاوات آن برای توسعه باد در نظر گرفته شده است. اشتغالزایی و تحول اجتماعی در مناطق محروم از مباحث موردتوجه برای توسعه انرژی های نو در کشور است. ازآنجاکه غالبا نقاط بادخیز ایران در مناطقی واقعاند که ازنظر توسعه اجتماعی محروم به شمار میروند بنابراین توسعه نیروگاه های بادی بادی بهطور مستقیم در شرایط اجتماعی این مناطق تحول ایجاد خواهد کرد. نکته مهم دیگر اینکه، با توجه به مشکلات بهرهبرداری و حفظ پایداری شبکههای گسترده، به وسیله تولید پراکنده برق از میزان اتکا به شبکههای طولانی کاسته خواهد شد که این فعالیت به عنوان یکی از مهم ترین تدابیر پدافند غیرعامل محسوب می شود. [۶]

1-5 انواع مبدلهای انرژی باد

امروزه انواع مختلفی از مبدلهای انرژی باد مورداستفاده قرار می گیرند. توربین بادی ^۱اصطلاح رایجی است که به این مبدلهای انرژی جنبشی به مکانیکی اطلاق می شود. پرهی توربینهای بادی می تواند به دور محور عمودی یا افقی دوران کند. توربینهای بادی محور افقی^۲پیشینهی بیشتری داشته و امروزه نیز کاربرد بیشتری دارند. توربینهای بادی محور عمودی^۲نیز به خاطر عدم حساسیت به جهت وزش باد کاربرد گستردهای یافتهاند. در ادامه به بررسی ساختار و نحوهی عملکرد متفاوت این دو نوع توربین پرداخته خواهد شد.

۱-۵-۱ توربینهای بادی محور عمودی

توربینهای بادی محور عمودی یکی از انواع توربینهای بادی است که چرخش روتور حول یک

Wind turbine ' Horizontal axis wind turbine' Vertical axis wind turbine'

محور عمودی صورت می گیرد. دو گروه اصلی این نوع توربینها ساونیوس و داریوس ^۲میباشند که در نوع ساونیوس پارامتر مهم برای تولید برق نیروی پسا و در نوع داریوس نیروی برآ است[۷]. این توربینها در ارتفاع کمی از سطح زمین نصب میشوند. هرچند که به سبب شدت باد کمتر، برق کمتری تولید خواهد شد اما امکان قرار دادن تجهیزات سنگین آن ازجمله گیربکس و ژنراتور نزدیک به سطح زمین را فراهم کرده که این خود مشکلات ساختمانی مزارع بادی را کاهش میدهد. آنها همچنین در مزارع بادی فضای کمتری نسبت به دیگر توربینها اشغال میکنند. از دیگر مزایای این نوع توربینها میتوان به استقلال از سیستم یاو اشاره کرد چراکه این نوع توربینها، باد را ازهرجهت مهار میکنند. از معایب آن میتوان به ایـن مورداشاره نمود که این نوع توربینها به طور خودکار مانند توربینهای محور افقی شروع به کار نمیکنند. در شکل ۱–۳ دو نوع مختلف توربینهای بادی محور عمودی مشاهده میشوند.



شکل ۱-۳ انواع توربینهای بادی محور عمودی: (الف) داریوس، (ب) ساونیوس.

۲-۵-۲ توربینهای بادی محور افقی

در توربینهای بادی محور افقی ژنراتور و روتور در بالای برج قرار دارند. نحوهی طراحی روتور این توربینها به صورتی است که سطح پره بیشترین برخورد با باد را برای چرخش طبیعی داشته

Savonius' Darrieus'

باشد. به همین دلیل است که مکانیزم یاوینگ برای تنظیم روتور در جهت وزش باد طراحی می گردد بهطوری که کل ناسل آبهوسیلهی سنسورهای تعیین کنندهی جهت باد و موتورها به سمت باد تغییر جهت یافته، می چرخند این مبدل ها از تعداد معدودی پرهی آئرودینامیکی بهینهشده ساخته می شوند. هرچه تعداد پرههای توربینهای بادی بیشتر باشد گشتاور بیشتر و سرعت دورانی کمتر می شود، اما توربین هایی که برای تولید الکتریسیته بکار می روند نیاز به عملکرد در سرعتهای بالاتری دارند و درواقع گشتاور بیشتری نیاز ندارند؛ بنابراین توربینهای بادی با دو پره بهترین حالت طراحی و بازده را خواهند داشت. مشکل طراحی با دوپره این است که در این حالت توربینهای بادی تحت تأثیر پدیده لرزش، همانند انحراف در ژیروسکوپها قـرار می گیرند. همچنین از آنجایی که توربینهای بادی همیشه باید در مقابل باد قرار گیرند، پرهها باید توانایی تغییر جهت عمودی را زمانی که تغییری در جهت باد ایجاد می شود داشته باشند. این پدیده به حرکت یاو اشاره دارد. در دستگاههای با دو پره، وقتی پرهها به صورت عمودی قرار می گیرند (در یک خط با برج و محور دوران توربین بادی)، مقاومت خیلی کمی در برابـر حرکـت یاو وجود خواهد داشت. با افزایش تعداد پرهها شدت ارتعاشات کاهش می یابد؛ بنابراین در توربینهای سه پره در مقایسه با دو پره میزان سروصدا و استهلاک کمتر است [۸]. در شکل ۱-۴ نمایی از یک مزرعهی توربین بادی محور افقی در ایالت کالیفرنیای آمریکا نشان دادهشده است.

Yawing' Nacelle'



شکل ۱-۴ توربینهای بادی محور افقی

1-6 فرضيهها و اهداف تحقيق

یکی از روش هایی که توسط آن رفتار آئرودینامیکی یک توربین بادی را می توان مورد تجزیه و تحلیل قرارداد، شبیه سازی در محیط های عددی است که باعث می شود هزینه های مربوط به مطالعه و بررسی رفتار توربین های بادی بدون نیاز به ساخت مدل واقعی توربین کاهش یابد. در این پایان نامه قرار است با استفاده از شبیه سازی توربین بادی یک آزمون تجربی خاص، ضرایب آئرودینامیکی هوابرهای توربین اصلاح شود و از آن ضرایب برای تحلیل دقیق تر نیرو و بارهای وارد بر پره توربین بادی استفاده شود. در پایان قرار است با مقایسه ی نتایج با داده های تجربی آزمون، اعتبار سنجی پژوهش انجام گیرد و با مقایسه ی آن ها با نتایج بدون استفاده از ضرایب اصلاح شده، بر روی اهمیت توسعه مدل توسط اصلاح سه بعدی ضرایب تأکید شود.

1-7 طرح كلى فصول پاياننامه

در این پایاننامه مطالب در پنج فصل به ترتیب شامل مقدمه (فصل حاضر)، پیشینه پژوهش، مواد و روشها، نتایج و بحث روی آنها و پیشنهادها ارائه می گردد. در فصل اول به تشریح مقدماتی از باد، لزوم سرمایه گذاری علمی و مالی روی باد، چشم اندازهای انرژی باد در ایران و جهان، معرفی انواع توربینهای بادی پرداخته شد و در انتها تعریفی کلی و مختصر از مسئله پروژه حاضر ارائـه شد. در فصل دوم تعاریف بنیادی علمی به منظور آشنایی خواننده با آنها گردآوری شد و پـس از آن مختصری بر روشهای مختلف حل عددی توربینهای بادی محور افقی ارائه شد. در پایان این فصل با ارائه کارهای علمی گذشته سـعی شـد تـا تعریـف دقیـق تری از مسئلهی پروژه حاضر، نوآوریهای آن و پرسشهایی که درنهایت قرار است این پروژه به آنها پاسخ دهد ارائه شـود. در فصل سوم روش شبیه سازی به طور کامل مورد معرفی و بحث قرار گرفت. فصل چهارم بـه نتایچ شبیه سازی و تجزیه و تحلیل روی آنها اختصاص می یابد و در پایان در فصل پنجم پیشـنهادهایی برای کارهای علمی آینده ارائه می گردد.

۲) فصل دوم: پیشینهی پژوهش

2-1 مقدمه

در این بخش سعی شده است مختصری در رابطه با مفاهیم بنیادی، تعاریف و اصطلاحات رایج در این حیطهی علمی بحث شود و به روششناسی علمی تحلیل جریان حول پرههای توربین بادی محور افقی پرداخته شود تا بتوان در انتها با مروری بر ادبیات تلاشهای علمی گذشته، به گونهای علمی و روشمند به بیان دقیق تر مسئلهی پروژهی حاضر نزدیک شد.

۱-۱-۲ منشأ پيدايش باد

انرژی باد، انرژی حاصل از هوای متحرک است. هنگامی که تابش خورشید به طور نامساوی به سطوح ناهموار زمین می سد سبب ایجاد تغییرات دما و فشار می گردد و در اثر این تغییرات باد به وجود می آید. همچنین اتمسفر کره زمین به دلیل حرکت وضعی زمین، گرما را از مناطق گرمسیری به مناطق قطبی انتقال می دهد که این امر نیز باعث به وجود آمدن باد می گردد. جریانات اقیانوسی نیز به صورت مشابه عمل نموده و عامل ۳۰ درصد انتقال حرارت کلی در جهان می باشند. در مقیاس جهانی این جریانات اتمسفری به صورت یک عامل قوی جهت انتقال حرارت و گرما عمل می نمایند. دوران کره زمین نیز می تواند در برقراری الگوهای نیمه دائم جریانات سیاره ای در اتمسفر، انرژی مضاعف ایجاد نماید.

۲-۱-۲ تعاریف بنیادی

با عبور جریان باد از میان روتور توربین، یک گشتاور و رانش در پرهها ایجاد می شود که تولید توان بهوسیله آنها صورت می گیرد. افزایش انرژی جنبشی پرهها باعث افزایش نیروی اعمالی رو پرهها و کاهش فشار جریان می شود که این یعنی افزایش توان تولیدی پره است. پارامترهای مشخص کننده ی توربین های بادی و همچنین پارامترهای به کاررفته در روابط تولید توان عبارتاند از:

نسبت سرعت نوک پره ۱

نسبت بین سرعت نوک پره یا همان سرعت مماسی بهسرعت باد اولیه توربین را گویند.

$$\lambda = rac{r\Omega}{V_\infty}$$
 (۱-۲)
در رابطه (۲-۱)، Ω سرعت دورانی، r شعاع پره و \sqrt{N} سرعت جریان آزاد باد است. مقدار متداول
این پارامتر برای توربینهای جدیدتر بین ۶ تا ۸ است.

ضریب القایی محوری عبارت است از کاهش نسبی سرعت باد در صفحهی روتور توربین باد بهسرعت جریان آزاد

$$a = \frac{V_{\cdot} - V}{V_{\cdot}} \tag{(7-7)}$$

در رابطه (۲-۲)، V سرعت جریان آزاد و V سرعت در صفحه روتور است و به صورت رابط هی V. (۲-۳) محاسبه می شود:

$$V = \frac{V_{\cdot} + V_{\tau}}{\tau} \tag{(7-7)}$$

ضریب توان و حد بتز^۳

نسبت توان استخراجشده توسط روتور به کل توان باد را ضریب توان می گویند که توسط رابط می (۲-۲) معرفی می شود.

Tip speed ratio' Induction factor' Betz limit[°]

$$C_p = \frac{\Upsilon \Box}{\rho A V^{\Upsilon}} \tag{(f-\Upsilon)}$$

که در آن ho چگالی هوا A مساحت پوشش دادهشده توسط پرهها است. ضریب توان بر اساس فاکتور القایی عبارت است از:

$$C_p = f \Box (1 - a)^{\gamma}$$
بر اساس نظریهی تکانه یکبعدی ضریب توان یک توربین بادی با رابطهی (۲-۵) ارتباط مستقیم
دارد. با مشتق گرفتن از رابطه (۲-۵) نسبت به شاخص محوری، برای شاخص محوری یکسوم،
ضریب توان ماکزیمم ۵۹۳ /۰ به دست میآید که این همان حد بتز است[۹].

گردابههای دور، گردابههای نزدیک و ناحیه گذار ^۳

گردابه از برخورد جریان باد با روتور توربین که باعث کاهش سرعت جریان میشود تشکیل میشود. بهطور متداول برای بررسی گردابهها سه ناحیه تقسیم بندی شده موجود است. در ناحیهی نزدیک به توربین گردابهها مستقیما تحت تأثیر هندسه روتور و آئرودینامیک پرهها است. منظور از آئرودینامیک پرهها تعداد آنها و سطح مقطع هر قسمت است. بسته به شرایط ورودی جریان طول این ناحیه از یک برابر با قطر روتور تا چند برابر آن متغیر است. برای تحلیل جریان در این ناحیه باید به پارامترهای عملکردی توربین و نحوهی گسترش و پیشروی گردابهها توجه کرد. ناحیهای بعد از گردابههای نزدیک که تا ناپدید شدن کامل گردابهها ادامه پیدا میکند را ناحیه دور می گویند. مدل سازی گردابهها و بررسی تأثیرات توربین بر محیط اطراف از مباحثی است که تمرکز مطالعه در این ناحیه بر روی آنهاست.

Far wake' Near wake' Transient'

2-2 مروری بر روشهای عددی شبیهسازی توربینهای بادی

شبیهسازی توربینهای بادی در محیطهای عددی یکی از راههایی است که می توان به تجزیهوتحلیل رفتار آئرودینامیکی پرهها پرداخت. از آنجایی که هزینهی انجام آزمایشهای تجربی روی توربینهای بادی و اعمال شرایط متفاوت و بررسی تأثیر آنها بر پارامترهای عملکردی بسیار زیاد است تمرکز و توسعهی روشهای عددی بسیار موردتوجه است. در این بخش به معرفی اجمالی روشهای مختلف عددی و بررسی عملکرد توربینهای بادی محور افقی پرداخته می شود.

۱-۲-۲ نظریه تکانه اجزاء پره^۱

اگرچه روشهای عددی متعددی برای پیشبینی عملکرد و نیروهای توربینهای بادی محور افقی وجود دارد تنها روشی که امروزه در کارخانههای تولید پره مورداستفاده قرار میگیرد روش تکانه اجزاء پره است که توسط گلارت ارائه شد. فرض اساسی در این نظریه این است که جریان بر روی اجزاء مستقلی اتفاق میافتد که بر این اساس میتوان گشتاور اعمالی روی توربین و نیروی محوری را تخمین زد. این نظریه از ترکیب دو روش به دست میآید. روش اول تعادل تکانه خطی و روش دوم المان پره برای یک روتور ایدئال است[۱۰].

۱-۱-۲-۲ نظریه تکانه خطی

این مدل اولین بار توسط بتز و همکارانش ارائه شد. این مدل ساده برای تحلیل توربینهای بادی بر اساس نظریه مومنتوم خطی بناشده است و دارای فرضیات زیر است[۱۱].

- جریان غیر چرخشی، غیر لزج و تراکم ناپذیر است.
 - روتور با یک دیسک همقطر تخمین زده می شود.
 - توزيع سرعت در هر مقطع يكنواخت است.

Blade element momentum theory'
در فواصل دور از دیسک فشار و سرعت با مقادیر جریان آزاد آن برابر است.

با در نظر گرفتن چهار مقطع شکل ۲-۱ برای جریان و اعمال قانون برنولی^۱و با فرض فاقد اصطکاک داخلی بودن مقاطع و بعد از ساده شدن معادله ۲-۶ به دست میآید.



شکل ۲-۱ نمایش مقاطع طولی جریان جهت اعمال قانون برنولی در نظریه تکانه خطی

همان طور که در شکل ۲-۱ مشاهده می شود بر اساس فرض های اساسی نظریه سرعت در مقطع ۲ و ۳ و فشار در مقاطع ۱ و ۴ باهم برابرند.

$$(V_1^{\ r} - V_r^{\ r})p_r - p_r = \frac{1}{r}
ho$$
 (۶-۲)
با توجه به اینکه نیرو از ضرب فشار در سطح مقطع به دست میآید و ترکیب آن با رابطـه (۶-۲)
رابطه (۲-۲) به دست میآید.

$$dAdF_x = \frac{1}{2} \rho(V_1^{Y} - V_{\epsilon}^{Y})$$
 (۷-۲)
با فرض اینکه سرعت ناحیه روتور از میانگین سرعت بالادستی و پاییندستی جریان به دست
میآید و با استفاده از تعریف شاخص القایی محوری و جایگذاری آنها در رابطه (۲-۷)، رابطه

Bernoulli's law'

$$L = I\omega^{r}$$

برای محاسبهی جزء گشتاور از رابطهی (۲-۱۱) میتوان استفاده کرد.

$$T = \frac{dL}{dt} \tag{11-T}$$

$$T = \frac{dm}{dt} r^r \omega$$
 (۱۲-۲)
حال گشتاور برای جزء حلقوی خیلی کوچک از رابطهی (۲-۱۳) به دست میآید.

$$dT = dm \cdot \omega r^{\gamma}$$
 (۱۳-۲)
از طرفی برای خود جسم دوار شکل ۱-۲ رابطهی فیزیکی (۲-۱۴) برقرار است:

$$dm = \rho A V^{\tau} \tag{14-7}$$

$$dT = \rho 2\pi r dr V_{\rm Y} \omega r^{\rm Y} \tag{12-Y}$$

a' =
$$\frac{\omega}{T \Box}$$

و با جایگذاری آن در رابطهی (۲-۱۵) رابطه (۲-۱۷) که همان معادلهی گشتاور اعمالی بـر جـزء
حلقوی روتور بر اساس نظریهی تکانه خطی است، به دست میآید.

$$dT = fa'(1-a)\rho V\Omega r^{r}\pi dr \tag{1V-T}$$

۲-۱-۲ نظریه المان پره

نظریهی المان پره بر دو فرض اساسی زیر استوار است:

- از برهم کنش آئرودینامیکی بین اجزاء مختلف پره صرفنظر می شود.
 - تنها نیروهای وارد بر اجزا پره نیروهای برا و پسا هستند.

فرض اینکه پره به تعداد محدودی جزء تقسیمشده است. طبق شکل ۲-۲ به دلیل وجود تفاوت در سرعت مماسی (Ω)، طول وتر(C)، و زاویه گام(γ) هر جزء با جریان متفاوتی از سیال برخورد می کند. در این روش جریان روی هر جزء به صورت جداگانه محاسبه می شود .در جزء مشخص شده در شکل ۲-۲، با توجه به تعریف مؤلفه ی محوری سرعت نسبی هوابر به جریان هوا و مؤلفه ی مماسی سرعت نسبی هوابر به جریان هوا، معادله ی زاویه جریان طبق رابطه ی (۲-۱۸) عبارت است از:



شکل ۲-۲ نمایش اجزاء پره و نحوهی سازمان دهی ضرایب برا و پسای هوابر

$$tan\phi = \frac{V(1-a)}{r\Omega(1+a')}$$
 (۱۸-۲)
زاویه جریان از جزئی به جزئی دیگر تغیر میکند. حال با تعریف نسبت سرعت نوک محلی
بهصورت رابطه (۲–۱۹):

$$\lambda_r = \frac{r\Omega}{V}$$
 (۱۹-۲)
زاویهی جریان بهصورت رابطهی (۲-۲۰) به دست میآید.

$$tan\phi = \frac{(1-a)}{\lambda_r(1+a')} \tag{(Y-Y)}$$

نیروهای برآ و پسا به ترتیب در راستای عمود و موازی با سرعت نسبی تعریف میشوند؛ بنابراین با توجه به شکل ۲-۲ برای هر جزء پره برای جزء نیروی دورانی رابطه (۲-۲۱)

$$dF_{\theta} = dLsin\phi - dDcos\phi$$
 (۲۱-۲)
و جزء نیروی محوری رابطهی (۲-۲۲) برقرار است.

$$dF_x = dL\cos\phi + dD\sin\phi \tag{(YY-Y)}$$

$$dL = C_l \frac{1}{r} \rho w^r c dr$$
 (۲۳-۲)
D جزء نیروی پسا روی هوابر پره است که به صورت معادله ی (۲-۲) محاسبه می شود.

$$dL = C_d \frac{1}{r} \rho w^r c dr \tag{14-7}$$

چنانچه تعداد پرهی روتور B باشد با ترکیب معادلههای (۲-۲۱) تا (۲-۲۴)، رابطهی (۲-۲۵) به دست میآید:

$$dF_x = B \frac{1}{\tau} \rho W^{\tau} [C_1 \cos(\phi) + C_d \sin(\phi)] C_c dr$$
(Ya-Y)

و برای جزء دورانی نیرو رابطهی (۲-۲۶) برقرار است.

$$dF_{\theta} = B \frac{1}{r} \rho W^{r} [C_{1} s in(\phi) - C_{d} cos(\phi)] C_{c} dr$$

$$(79-7)$$
si Z a clumble constant of the size of the siz

$$dT = B \frac{1}{7} \rho W^{r} [C_{1} s in(\phi) - C_{d} cos(\phi)] C_{c} r dr$$
 (۲۷-۲)
از رابطه (۲-۲۷) واضح است که با افزایش نیروی پسا بارمحوری وارد بر روتور افزایش مییابد اما
گشتاور تولیدی و درنهایت توان تولیدی کاهش خواهد یافت. با تعریف ضریب پری محلی ' σ
مطابق رابطهی (۲-۲۸)

σ' =
$$\frac{Bc}{TUD}$$
 (۲۸-۲)
برای محاسبهی مقدار جزء نیروی محوری می توان از رابطهی (۲-۲۹) استفاده کرد.

$$dF_{x} = \sigma' \pi \rho \frac{V^{r}(1-a)^{r}}{\sin^{2} \emptyset} [C_{l} \cos \emptyset + C_{d} \sin \emptyset] r dr$$
(۲۹-۲) و برای محاسبه جزء گشتاور رابطه (۲-۳۰) برقرار است.

$$dT = \sigma \pi \rho \frac{V(1-a)r\Omega(1+a')}{\sin \phi \cos \phi} [C_l \sin \phi - C_d \cos \phi]c(r)r^2 dr$$
 (۳۰-۲)
در این تئوری علاوہ بر چرخشی بودن جریان، اثر توپی روتور و نوک پرہھا نیز در نظر گرفتہ
میشود. گردابہھای شکل گرفتہ در نوک بہ دلیل اختلاف فشار سطح رویین و زیرین پرہ پسایی

ایجاد میکنند که به پسای القایی معروف است. این پسا وابسته به ضریب برآ و نسبت منظری^۱ است[۱۲]. در دنبالهی پیرامونی توپی روتور به خاطر دوارن توپی گردابه ای موسوم به گردابهی توپی تشکیل میشود که باعث شکل گیری یک جریان گردابهای پیچیده پس از روتور و کاهش ضریب توان میشود. تئوری المان پره با در نظر گرفتن هندسه پره، تعداد آنها و مقطع هوابر تخمین بهتری از ضریب توان میدهد. اکنون با برابر قرار دادن نیروی محوری حاصل از روش اول و دوم، معادلهی تخمین شاخص محوری توربین (۲-۳۱) به دست میآید.

$$\frac{1-a}{a} = \frac{4 \sin^2 \emptyset}{\sigma'(C_l \cos \emptyset + C_d \sin \emptyset)}$$
 (۳۱-۲)
و از برابر قرار دادن گشـتاورهای حاصـل از روش اول و دوم معادلـهی تخمـین شـاخص دورانـی
(۳۲-۲) بهصورت زیر به دست میآید.

$$\frac{1+a'}{a'} = \frac{f \sin \phi \cos \phi}{\sigma'(C_l \sin \phi - C_d \cos \phi)}$$
(77-7)
yac l; asleLawlo (79-7) e (7-7) e (7-7) e (7-7)
yac l; asleLawlo (7-7) e (7-7) e (7-7)
yac l; asleLawlo (7-7) e (7-7) e (7-7)

۲-۲-۲ نظریهی دیسک عملگر

متداول ترین روش برای مدلسازی روتور توربینها، امروزه به کاربرده تئوری های عملگر شامل دیسک، مفحه و خط عملگر است که در آن پره ها توسط نیروهای حجمی که روی یک

Aspect Ratio' Actuator Disk' دیسک یا صفحه تعریفشدهاند نمایش داده میشوند. نظریهی دیسک عملگر بهطور مستقیم از توسعهی تکانه اجزاء پره بهدست میآید با این تفاوت که اجزاء مستقل حلقوی نظریه بی ای ام با حل کامل معادلههای ناویراستوکس یا اویلر جایگزین میشوند. این روش مبتنی بر میانگین زمانی است که در آن بهجای روتور، دیسک که یک صفحهی مدور قابلنفوذ است جایگزین میشود. بر اساس مشخصات آئرودینامیکی هوابر که شامل ضریب رانش (C_a) ضریب برا و پسا است و بر اساس زاویهی حمله تعیین میشوند، نیروی اعمالی محاسبه میشود[۱۴]. سرعت جریان هوا نسبت به هوابر طبق رابطهی (۲-۳۳) تعیین میشود.

$$U_{rel} = \sqrt{V_z^{\ Y} + (\Omega r - V_{\theta})^{\ Y}}$$
با استفاده از ضریب رانش امکان تعریف یک دیسک عملگر با توزیع نیـروی یکنواخـت بـر واحـد
حجم وجود دارد. رابطهی (۲-۳۴) این امکان را فراهم میکند.

$$D = \frac{1}{7} \rho U_{rel}{}^{r}C_{d}B = fC_{d}B$$
 (۳۴-۲)
برای یک دیسک عملگر با توزیع غیریکنواخت مطابق رابطهی (۲-۳۵) نیـروی متغیـر بـر اسـاس
طول وتر پره محاسبه میشود.

$$D = \frac{1}{7} \rho U_{rel} C_d B_c = f C_d B_c$$
 (۳۵-۲)
بااینحال رایجترین روش برای تعیین مشخصات عملکردی دیسک عملگر استفاده از ضرایب برا و
پسا هوابر مطابق با رابطهی (۲-۳۶) است.

(C₁e₁ + C_de_d)D =
$$\frac{1}{7} \rho U_{rel}{}^{r}C_{d}B_{c}$$

در این رابطه $e_{d}e_{1}$ و اع بردارهای یکه برای تعیین جهت نیروهای پسا و برآ هستند که امکان اعمال

Actuator Surface¹ Actuator Line^r اثرات چرخشی را نیز فراهم می آورند که این کار با اعمال نیروهای مماسی و محوری به دیسک صورت می گیرد و باعث بهبود چشمگیری در نتایج شبیه سازی می شود. در شکل ۲-۳ شماتیکی از مبانی روش دیسک عملگر نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ معرفی چهار مقطع و شماتیک روش دیسک عملگر

۲-۲-۳ نظریهی خط عملگر

مدل خط عملگر که اولینبار توسط شن و سورنسن معرفی شد، یک مدل سهبعدی و غیر پایای آئرودینامیکی برای مطالعهی جریان حول پرهی توربینهای بادی است[۱۵]. در این روش چرخش پرهها با یک مجموعه خطوط چرخان شبیهسازی میشود با این فرض که اثر پرههای توربین با نیروهای حجمی اعمالشده به نواحی خاصی از جریان جایگزین شود. این فرض باعث تشکیل یک شبکهی حل ساده میشود. این نظریه در پیشبینی پس بادهای به وجود آمده در اثر چرخش پرههای توربین در جریان متلاطم بسیار دقیق است. این مدل به علت عدم نیاز به حل جریان لایهمرزی مدلی بسیار کارا است. اساس کار مدل خط عملگر معادلات ناویراستوکس غیر تراکم پذیر است[۱۶]. در این روش نقاط تعریفشده روی خطوط عملگر نماینده مقاطع مختلف پره از ریشه تا نوک هستند و هرکدام دارای زاویهی مچ و طول وتر متفاوت، پس دارای ضرایب برآ و پسای مخصوص به خود هستند. با استفاده از تعریف سرعت نسبی و رابطهی (۲-۳۳) و با تعریف زاویه جریان طبق رابطه (۲-۳۷)

$$\varphi = \tan^{-1}(\frac{V_z}{\Omega r - V_{\theta}})$$
 (۳۷-۲)
زاویه حمله محلی به صورت (۳۸-۲) تعیین می شود.

$$f_{r \square} = \frac{1}{7} \rho V_{rel} \, ^{r} c(C_{l} e_{l}, C_{D} e_{D})$$
 (۳۹-۲)
در رابطهی (۲ - ۳۵) C طول کورد، $e_{d} \, e_{d}$ بردارهای واحد یکه در جهت به دست آمدن نیـروی
برا و پسا هستند.

$$F_i^A(x, y, x, t) = \sum_{j=1}^r f_i^A(x_j, y_j, z_j, t) \frac{1}{\varepsilon^r \pi^{r/r}} \left[-\left(\frac{d}{\varepsilon}\right)^r \right]$$
(f-r)

که در آن b فاصله بین المان j و نقطه (x,y,z,t) در میدان جریان است و ع عرض تصویر نیرو است. برای انتخاب پارامتر ع روشهای مختلفی موجود است. این پارامتر نیروی محاسبه شده المان پره را روی شبکهبندی توزیع می کند. به این تر تیب اندازه نیروی تصویر شده و فاصله محل اعمال نیرو از مرکز المان مربوط به همان نیرو تعیین می شود. انتخاب این پارامتر اهمیت ویژه ای دارد زیرا هم باید تخمینی کمتر یا بیشتر از میزان توان خروجی توربین ندهد و هم از بروز اغتشاشات و نوسانات احتمالی جلوگیری کند. روشهای مختلفی برای انتخاب پارامتر ع وجود دارد که در زیر به آن ها اشاره شده است.

- انتخاب بر اساس وضوح شبکهبندی^۱
 - انتخاب بر اساس طول وتر پره
 - انتخاب بر اساس توزیع بیضوی^۲

ترولدبرگ نشان داد برای پرهیز از نوسانات و بروز اغتشاشات عددی، با انتخاب بر اساس وضوح شبکهبندی، 3 باید حداقل دو برابر اندازه طولی سلول در جهت جریان باشد[۱۶]. کرافورد نشان داد که با استفاده از طول وتر محلی پره و استفاده از رابطهی ۲۵. $= \frac{3}{c}$ می توان به تقریب مناسبی از پارامتر 3 رسید[۱۷].

از آنجایی در این پژوهش برای انتخاب پارامتر ٤ از توزیع بیضوی استفادهشده است در زیر به شرح دقیق این روش پرداختهشده است. ایده اصلی توزیع بیضوی این است که پارامتر ٤ باید با اندازه واقعی نیرو در سطح مقطع موردنظر متناسب باشد نه با وضوح شبکه و طول وتر پره و هندسهی آن. برای محاسبه این پارامتر ابتدا باید با استفاده از رابطه (۲-۴۱) نسبت منظری پره را به دست آورد.

Grid Resolution' Elliptic distribution'

$$\bar{C} = \frac{1}{R} \int_{C}^{r} C(r) dr \tag{(f)-T}$$

که در آن $ar{C}$ طول متوسط وتر پره و R طول کلی پره است.با استفاده از رابطهی (۲-۴۲)

$$AR = \frac{R}{\overline{C}} \tag{(47-7)}$$

(۴۳-۲)
$$C_{\cdot} = -\frac{\epsilon}{\pi} \overline{C}$$
و با یافتن یک سطح بیضوی فرضی برابر باحالت قبل رابطهی (۲-۴۴) بهدست میآید.

$$C^{*}(r) = C. \sqrt{1 - (\frac{T \square}{R})^{r}}$$
 (۴۴-۲)
از طرفی با فرض ثابت بودن نسبت پارامتر ع به .C *به* رابطهی (۲-۴۵) بهدست میآید.

$$arepsilon_{r}={
m n}_{
m min}\Delta r$$
 (۴۵-۲)
که در آن $n_{min}=n_{min}$ است و همیشه باید برای آنیک عدد صحیح انتخاب شود.

$$\varepsilon_{\rm e} = n_{\rm max} \Delta r \tag{$7.5}$$

$$n_{max} = \frac{\Delta r}{R} \approx \dots \wedge \dots \dots \tag{(fV-T)}$$

در روابط (۲-۴۷) و (۲-۴۶)، *۲*۲ اندازه شبکه در قسمت موردنظر و *n_{min} و n_{max} برای مقید* کردن بیشینه و کمینه پارامتر ع است.

$$(\pi AR) = const^{\mathcal{E}}/_{\mathcal{C}^*} = f(r, \Delta r, AR) = \frac{\Delta r}{\mathfrak{r}_{\square}} n_{max}$$
 (۴۸-۲)
شکل ۲-۴ شماتیک توزیع بیضوی پارامتر ۶ را نشان میدهد.



شکل ۲-۴ توزیع بیضوی پارامتر ۶ ۲-۲-۴ نظریهی سطح عملگر^۱

از توسعهی نظریه خط عملگر، نظریهی سطح عملگر به دست میآید. در این روش پرهها توسط یک صفحه بیان میشوند درحالیکه درروش خط عملگر توسط یک خط معرفی میشوند. استفاده از نظریهی سطح عملگر نیازمند دانستن توزیع فشار و اصطکاک سطحی روی سطح هوابر است درحالیکه در روش خط عملگر دانستن ضرایب برا و پسا هوابرها کفایت میکند. در این روش نیروهای حجمی وابسته به وتر هستند و توسط رابطهی (۲-۴۹) معرفی میشوند.

$$f_{r \square}^{AS}(\zeta) = f_{r \square} F_{dist}(\zeta)$$
 (۲۹-۲)
در این رابطه ک جهت وتر هوابر است و $F_{dist}(\zeta)$ با تقریب توابع توزیع فشار در راستای وتـر پـره
تعیین میشود.

3-2 مروری بر پیشینهی پژوهش

از اوایل قرن نوزدهم با به کار گیری تئوری تکانه، متدهای عددی در طراحی توربینهای بادی شروع شد و به تدریج با ارائه مدلهای تکاملیافته تر مانند تئوری تکانه اجزاء پره توسعه یافت[۱۸]. ابتدا بتز و همکارانش در سال ۱۹۲۶ یک مدل برای تحلیل ساده یک توربین بادی پیشنهاد کردند که می توانست توان یک توربین بادی ایدئال را محاسبه کند. این مدل ساده بر

Actuator Surface

اساس تئوری مؤمنتم خطی بنانهاده شده بود [۱۹]. گلارت تئوری تکانه اجزاء پره را برای اولین بار معرفی کرد که روشی سریع و ساده جهت محاسبه سرعت جریان محلی و بارهای آئرودینامیکی وارده بر روتور و عملکرد توربین بادی است. روش گلارت معایبی نیز داشت که ازآنجمله میتوان به عدم معرفی مشخصات و جزئیات گردابه ها اشاره کرد. همچنین این مدل تنها برای گسترهی محدودی از شرایط جریان قابل قبول است [۱۱]. مدل دیگر، طراحی هندسه کامل ^ادر نرمافزارهای محاسباتی دینامیک سیالات است. این روش برای مطالعه جریان باد بر روی پره و شناخت گردابه های تولیدشده در پشت توربین بادی مناسب است اما هزینه ی محاسباتی بالایی دارد و زمان زیادی را برای تحلیل جریان صرف میکند [۲۰].

اولین شبیه سازی توربین بادی با استفاده از مدل سازی مستقیم توسط سورنسن و هانسن در سال ۱۹۸۸ جهت تخمین عملکرد دو توربین به انجام رسید[۲۱]. در پژوهشی بر روی روتور توربین بادی مکزیکو⁷که توسط پلازا و همکارانش صورت گرفت، نتایج دو روش طراحی هندسه کامل و تکانه اجزاء پره باهم مقایسه شد و نشان داده شد که در سرعتهای پایین و متوسط، روش تکانه اجزاء پره سرعتر و با دقت نزدیک تری به نتایج آزمایشگاهی عمل می کند[۲۲]. روش تکانه اجزاء پره سرعتر و با دقت نزدیک تری به نتایج آزمایشگاهی عمل می کند[۲۲]. محمودی و همکاران در پژوهشی با استفاده از روش تکانه اجزاء پره روتور توربین بادی مکزیکو را به معیل می کند[۲۲]. محمودی و همکاران در پژوهشی با استفاده از روش تکانه اجزاء پره روتور توربین بادی مکزیکو را شبیه سازی کردند و نتایج را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. در این پژوهش مشخص شد که محمودی و همکاران در پژوهشی با استفاده از روش تکانه اجزاء پره روتور توربین بادی مکزیکو را شبیه سازی کردند و نتایج را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. در این پژوهش مشخص شد که معمودی استفاده از ضریب آئرودینامیکی اصلاح شده باعث بهبود دقت محاسبهی نیروهای وارد بر پره می شود[۳۲]. خنجری و همکاران به بررسی عملکرد توربین بادی مکزیکو در استفاده از ضریب آئرودینامیکی اصلاح شده باعث بهبود دقت محاسبهی نیروهای وارد بر پره می شود[۳۲]. خنجری و همکاران به بررسی عملکرد توربین بادی مکزیکو در شرایط زاویه یاو بر اساس نظریه تکانه اجزاء پره پرداختند[۴۴]. هدف این پژوهش بررسی و مقایسه توزیع بار هماس نظریه تکانه اجزاء پره پرداختند[۴۴]. هدف این پژوهش بررسی و مقایسه توزیع بار اساس نظریه تکانه اجزاء پره پرداختند[۴۲]. هدف این پژوهش بررسی و مقایسه توزیع بار می ساس نظریه تکانه اجزاء پره پرداختند[۴۲]. هدف این پژوهش بررسی و مقایسه توزیع بار می می شود زمان بر می مورد و نشان و مقایسه نوره با استفاده از ضریب تصحیح سهبعدی اساس نظریه تکانه اجزاء پره پرداختند[۴۲]. هدف این پژوهش بررسی و مقایسه برای پره موری و سرعری تصحیح سهبعدی مساندی بر اساس پدیدهی تأخیر واماندگی بود. نتایج شبیه سازی کار آنها در مقایسه با ساین

Full Rotor Modeling'

Mexico(Model Experiment In Controlled Condition)^{*}

مدلها، توانست رفتاری کاملا قابلقبول و نزدیک به نتایج آزمایشگاهی را کسب نماید [۲۵].

از روشهای دیگر تحلیل توربین بادی، روش عددی المان مرزی است. این روش به دلیل تولید شبکه سطحی بر روی سطح جسم بهعنوان یک روش کارا در تحلیل سهبعدی اشکال پیچیده ائرودینامیکی شناخته می شود. در پژوهشی بهبهانی نژاد و همکارانش با سهبعدی در نظر گرفتن جریان و غیرقابل تراکم فرض کردن آن به تحلیل آئرودینامیکی یک توربین بادی محور افقی بهروش المان مرزی پرداختند و منحنیهای توزیع فشار و گشتاور وارد بر پره را با نتایج کارکرد واقعي مقايسه كردند [٢۶]. بهمنظور مطالعهي اغتشاشات شديد جريان چرخشي اطراف پرهها و تأثير آن بر عملکرد توربين بادي محور افقي خلفي و همکاران طي پژوهشي، به تحليل و شبیهسازی گردابههای بزرگ پرداختند و دریافتند که در محدوده سرعت ۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه با افزایش سرعت باد ضریب توان تولیدی افزایش می یابد اما این افزایش همیشگی نیست و بعد از سرعتی مشخص توان تولیدی به عدد ثابتی میل میکند که این مقدار بیشینه توان تولیدی است[٢٧]. چون بررسی تأثیرات مربوط به حالت جریان سهبعدی، اثرات لایهمرزی، توزیـع فشـار در طول پره و پدیدههای مربوط به گردابهها با استفاده از روش BEM امکان پذیر نیست و تنها مزیت این تئوری دقت قابل قبول نتایج بارهای وارد بر پره و سرعت بالای پیشبینی ایس بارها است، پس برای رسیدن به نتایج واقعیتر باید از مدلهای پیچیدهتری استفاده کرد. مدل دیسک عملگر با جایگزین کردن معادلات ناویر استوکس با معادلات حاکم بر جریان روتور دقت بیشتری نسبت به روش بی ای ام را نشان میدهد. پیادهسازی مدل دیسک عملگر در نرمافـزار اوپـن فـوم ٔ برای اولین بار توسط سونینگ انجام شد [۲۸]. جرومین و همکارانش برای روتور توربین بادی مکزیکو مدل دیسک عملگر را توسعه دادند و نتایج را با مدل تکانه اجزاء پره و مدل دیسک

Navier-Stokes Equation' OpenFoam[°]

عملگر در نرمافزار فلوئنت و نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند [۱۸]. محمودی و همکاران به مدل سازی توربین بادی محور افقی با استفاده از مدل دیسک عملگر و مدل سازی میدان جریان با استفاده از دو مدل توربولانسی متفاوت RANS⁷ و RANS و الحتند و نتایج را با دادههای آزمایشگاهی مکزیکو مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مدل LNS دقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. [۲۹] امینی و همکاران در پژوهشی با استفاده از مدل دیسک عملگر و با استفاده از نرمافزار محاسباتی اوپن فوم توربین بادی محور افقی مکزیکو را در شرایط مختلف با استفاده از نرمافزار محاسباتی اوپن فوم توربین بادی محور افقی مکزیکو را در شرایط مختلف با استفاده از نرمافزار محاسباتی اوپن فوم توربین بادی محور افقی مکزیکو را در شرایط مختلف با استفاده از نرمافزار محاسباتی اوپن فوم توربین بادی محور افقی مکزیکو را در شرایط مختلف با استفاده از نرمافزار محاسباتی اوپن فوم توربین بادی محور افقی مکزیکو را در شرایط مختلف با استفاده از نرمافزار محاسباتی اوپن فوم توربین بادی محور افقی مکزیکو را در شرایط مختلف با استفاده از مرایب تصحیح سهبعدی آئرودینامیکی هوابرها جهت تبدیل ضرایب دوبعدی به سهبعدی، شبیه سازی و بار وارده بر پره توربین و میدان سرعت پس بادها را محاسبه کردند. نتیجه بهبود پارامترهای عملکردی توربین به معنای نزدیک شدن آنها به نتایج تجربی بود [۳۰]. به منظور بررسی سهبعدی پدیده ی واماندگی³وانگ و همکارانش با استفاده از مدل خط بالا برد به اصلاح سهبعدی ضرایب آئرودینامیکی پرداختند و نتایج کارشان را با نتایج مکزیکو مقایسه کردند[۳۱].

بهمنظور بررسی مشخصههای مهم گردابههای تولیدی توربین بادی، برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ شن و همکارانش به نمایندگی از پرههای توربین بادی، خطوط عملگری را بهصورت شعاعی تحت نرمافزار Ellipsys ارائه کردند که در فضای سهبعدی معادلات ناویراستوکس در یک فرآیند تکرارشونده به محاسبه بار وارد بر توربین بادی میپرداخت و حل را تا همگرایی نهایی ادامه میداد.[۱۵] ترلدبرگ با هدف مقایسه ضریب توان محاسبهشده توسط نظریهی خط عملگر و نتایج تجربی با استفاده از مدل آشفتگی LES به مدلسازی گردابههای جریان پشت روتور توربین بادی پرداخت و به نتایج قابل قبولی رسید[۳۲]. در مقالهای رولف اریک و همکارانش بر

Fluent

Reynolds Average Navier Stokes^{*} Laminar Navier Stokes^{*} Stall[£]

اساس دور روش عددی خط عملگر و دیسک عملگر در محیط نرمافزار محاسباتی CFX، برای دستیابی به بهترین عملکرد توربین بادی محور افقے در شرایط آب و هوایی و مختلف به اسخراج رابطهای برای به دست آوردن ضریب سنجش باد پرداختند و با مقایسه نتایج با روش BEM به همگرایی مناسبی رسیدند[۱۷]. بهمنظور مقایسه نتایج روش خط عملگر در نرمافزار محاسباتی، Nek5000 و Ellipsys که پیش تر صورت گرفته بود، جین و همکارانش، مدل خط عملگر را در حل گر Nek5000 پیادهسازی کردند. هدف مطالعه در این پژوهش بررسی پارامتر هموارسازی و تقسیمبندی خط عملگر با استفاده از تفاوت توزیع گوسی دوبعدی و سهبعدی نیرو بود[۳۳]. هونگ مین و همکارانش با استفاده از ترکیب روشهای خط عملگر و روش لاگرانـژی دینامیکی گردابه بزرگ برای سرعتهای مختلف چرخش پره، به شبیهسازی گردابههای یک توربین بادی پرداختند. با هدف کسب نتایج دقیقتر و پایداری بیشتر، تعدادی از پارامترهای موجود در مدلسازی محاسبه نشده و عینا از دادههای تجربی که قبلاً اندازه گیری شده بود استفاده شد. نتايج تحقيق نشانگر يک رفتار مارپيچ گونه براي گردابههاي ايجادشده توسط روتور توربین بود. رفتاری که با کاهش نسبت سرعت نوک پرهها برجسـتهتر میگـردد[۳۴]. زیمـس و پروسپاتپولوس مدل دیسک عملگر و خط عملگر را در جهت پیشبینی بارهای وارد بر پره و میدان سرعت پس بادها در حل گر سیالاتی مکانیک سسالات محاسباتی پیادهسازی کردند و نتایج محاسبات را با دادههای آزمون تجربی مکزیکو و NREL مقایسه کردند. آنها در مدلسازی و محاسبات خود از دادههای دوبعدی ضرایب آئرودینامیکی استفاده کردند که باعث بروز اختلاف بین نتایج شبیهسازی و تجربی شد[۳۵]. بوجاری و همکاران با پیادهسازی مـدل خـط عملگـر در نرمافزار اپن فوم با استفاده از روشی نوین جهت توزیع نیروی اعمالی بر خط وط عملگر، توربین بادی آزمون مکزیکو را مدلسازی کردند. آنها همچنین جهت شبیهسازی میدان جریان اطراف توربین از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ استفاده کردند. نتایج حاصل از شبیهسازی و تخمین

Lagrangian Dynamic'

پس بادها و پارامترهای عملکردی توربین در کار آنها با دادههای آزمون تجربی مقایسه و همگرایی خوبی داشت. روش نوین پژوهش آنها استفاده از توزیع نیروی بیضوی برای اعمال روی خطوط عملگر بود[۳۶]. بچمن و سورنسن در پژوهشی به شبیهسازی توربین بادی مکزیکو در نرمافزار فلوئنت پرداختند. در این پژوهش آنها با استفاده از مدل آشفتگی RANS و مدلسازی کامل روتور توربین بادی مکزیکو، ضرایب آئرودینامیکی سهبعدی پره را استخراج کردند و به مقایسه نتایج شبیهسازی با دادههای تجربی پرداختند.[۳۷]

مطالعه و بررسی مدلهای مختلف شبیهسازی و تحلیل توربینهای بادی نشان داد که هرکدام از روشها دارای معایب و مزایایی هستند. بارای نمونه روش BEM در مقیاس صنعتی و بارای طراحی توربینهای بادی همچنان مورداستفاده قرار می گیرد. سرعت بالا در انجام محاسبات نیرو و بار وارد بر پره توربین، این روش را مناسب طراحی گسترده توربینها میسازد. از معیاب این روش می توان به مشخص نکردن جزئیات جریان و اعتبار داشتن برای شرایط محدودی از جریان اشاره کرد. مدل دیسک عملگر به دلیل این که کل روتور را به صورت پیوسته در نظر می گیرد و نمی تواند گردابهها را برای یک توربین بادی شبیهسازی کند اما با کاهش حجم محاسبات در اطراف روتور توربين مي تواند بسيار كارا عمل كند. نظريه آئروديناميكي خط عملكر بهواسطه تحلیل دقیق خصوصیات میدان جریان، همچنین پس بادهای به وجود آمده ناشی از چرخش پرههای توربین در جریان متلاطم، بسیار موردتوجه قرار گرفته است. در این مدل نیاز به حل جریان در لایهمرزی وجود ندارد به همین دلیل بسیار کاراتر از تحلیل کامل روتور است. تفاوت عمده بین این روش و روش دیسک عملگر، عدم نیاز به اعمال میدان نیرو به صورت یک صفحه متقارن محوری و جایگزینی آن با یک مدل کاملاً سهبعدی است که در آن چرخش پرهها با یک مجموعه خطوط چرخان شبیهسازی می شود. همچنین این روش کاملا ناپایا و وابسته به زمان است درحالی که روش دیسک عملگر مبتنی بر میانگین زمانی است. ایده کلی نظریه خط عملگر بدینصورت است که اثر پرههای توربین توسط نیروی حجمی اعمال شده به نواحی خاصی از جریان بیان می شود، بنابراین همان طور که ذکر شد نیازی به حل جریان داخل لایه مرزی وجود ندارد و برای حل می توان از یک شبکه بندی بسیار ساده استفاده کرد. روش خط عملگر نیز همانند سایر روش های تحلیل توربین دارای معایبی نیز است لذا پیاده سازی و توسعه آن در نرمافزارهای دینامیک سیالات محاسباتی مختلف و تصحیح پارامترهای مؤثر بر این روش مهم و ضروری به نظر می رسد.

4-2 روش، اهداف و نوآوریهای تحقیق

بوجاری و همکاران مدل خط عملگر را در نرمافزار سیالاتی اپنفوم با به کارگیری روش LES برای تحلیل میدان جریان اطراف روتور و نیز استفاده از یک الگوریتم جدید و هوشمند که در آن توزیع نیرو بر مبنای نسبت منظری پره، وضوح شبکهبندی و همچنین طول محلی وتر پره تعیین میشود، توربین بادی آزمون تجربی مکزیکو را مدلسازی کردند[۳۶].

با بررسی پژوهشهای انجامشده دریافتیم که تاکنون از ضرایب تصحیح آئرودینامیکی هوابرها جهت بهبود نتایج شبیهسازیشده با استفاده از تئوری خط عملگر در نرمافزار متنباز اوپین فوم برای توربین بادی مکزیکو پژوهشی صورت نگرفته است. روشهای مختلفی برای تصحیح ضرایب آئرودینامیکی پرهها موجود است. معادلات متعدد موجود برای تبدیل ضرایب برآ و پسای دوبعدی هوابرها به ضرایب سهبعدی تصحیحشده غالبا ماهیت تجربی دارند و با بررسی تأثیر هر ضریب بر عملکرد توربین مشخص میشوند. مدل تحلیلی روتور کامل با در نظر گرفتن دقیق شرایط جریان محاسبهی تـرم شـعاعی سـرعت در راسـتای پـره و اعمـال آن، ضـرایب سـهبعدی تصحیحشـده آئرودینامیکی را بهعنوان یکی از پارامترهای هدف، محاسبه میکند. مدل روتور کامل مشابه مدل خط عملگر، پس باد را واقعی و به شکل سایکلونی در پشت روتور شبیهسازی میکنـد امـا حجـم توجه به اینکه توسعه مدل خط عملگر پیادهسازی شده در نرمافزار اوپن فوم هدف پژوهش بوده است، توربین بادی مکزیکو در نرمافزار محاسباتی فلوئنت شبیهسازی شد و بعد از اعتبار سنجی شبیهسازی، ضرایب برا و پسا محلی به عنوان هدف استخراج گردید و از این ضرایب تصحیح شده به منظور توسعه مدل خط عملگر پیاده شده در نرمافزار اوپن فوم استفاده گردید. الگوریتم روش خط عملگر بدین صورت است که نخست، خطوط عملگر المان بندی شده و به چند قسمت تقسیم میشوند. حال اگر یک المان را روی این خط که جایگزین پره توربین شده است در نظر بگیریم، می توان موقعیت معادل با آن را در پره توربین واقعی پیدا کرد. در هر گام از محاسبات، حلگرسرعت محلی جریان برای این المان را محاسبه می کند. برای محاسبه ی نیروهای برا و پسا اين المان، مدل نيازمند مشخصات آئروديناميكي اين المان، با توجه به هندسه سطح مقطع پره و هوابر قرار گرفته در آن نقطه است. در مدل خط عملگر پیادهسازی شده توسط بوجاری و همکاران از دادههای موجود در جداول مشخصات هوابرها که به صورت دوبعدی تنظیم شده اند استفاده شده است. هدف این پروژه به دست آوردن این دادهها از مدل روتور کامل، بهصورت تصحیحشده و سهبعدی است. پس از خواندن این دادهها و محاسبه نیروهای برا و پسا بـرای المـان مشـخص و تصویر کردن نیروها در دو راستای عمودی و مماسی المان، نیروهای محاسبه شده به میدان جریان اعمال میشوند. در گام بعدی حل، میدان سرعت جریان بهروز خواهد شد و همچنـین در اثر آن نیروهای خط عملگر نیز بهروز خواهند شد. این روش که مبتنی بر تکرار است پس از تعداد معینی گام نیروهای خط عملگر را همگرا خواهد کرد و جریان تثبیت می شود. در پایان فرضیههایی که قرار است توسعه این مدل به آنها پاسخ بدهد از قرار زیر است:

• ضرایب آئرودینامیکی سهبعدی بهدستآمده از مدل روتور کامل چگونه نسبت به ضرایب

دوبعدی آزمون تجربی و ضرایب تصحیحشده توسط روشهای عددی تغییر میکند؟

• میدان پس باد محاسبه شده در ناحیه پشت روتور بعد از توسعه ی مدل چگونه داده های

PIV آزمون تجربی را تخمین میزند؟

- آیا نتایج بهدستآمده در مقایسه با سایر مدلها و سایر حل گرها منطقی است؟
- با اعمال اصلاحات روی ضرایب آئرودینامیکی هوابرها تا چه میزان میتوان به کسب

نتايج دقيقتر دستيافت؟

۳) فصل سوم: معرفی شرایط و نحوهی مدلسازی مسئله

3-1 مقدمه

در این بخش ابتدا به معرفی توربین بادی مورد مطالعه که همان توربین بادی آزمون مکزیکو است پرداخته شده است. سپس به معرفی نرمافزارهای مورد استفاده در شبیه سازی، نحوه بدست آوردن ضرایب تصحیح، بررسی انواع مدلهای آشفتگی و انتخاب یکی از آنها، دامنه حل و نحوه شبکه بندی، شرایط مرزی و نحوه حل معادلات حاکم بر مسئله پرداخته شده است.

3-2 آزمون توربین بادی مکزیکو

جهت مطالعه توربینهای بادی و بهبود کارآیی آنها، آزمونهای تجربی مختلفی تحت شرایط کنترل شده توسط مراکز صنعتی و پژوهشی مختلف صورت میگیرد. یکی از مهم *ت*رین این آزمونهای تجربی که تحت شرایط ویژهای انجام شده، آزمون توربین بادی مکزیکو (MEXICO) است. این نام از ابتدای کلمات Model Experiment In Controlled COndition به معنای (آزمایشات مدل تحت شرایط کنترل شده) گرفته شدهاست. در راستای سنجش اعتبار نتایج محاسبات، شبیهسازیها و تحقیقات مرتبط با توربینهای بادی، این آزمون در مجتمع تونل بادی آلمانی_هلندی'DNW/LLF در سال ۲۰۰۶ انجام شد و بودجهی مالی آن توسط اتحادیه اروپا تامین شد. مقطع آزمون این تونل باد متغیر بوده و با ابعاد ۵/۹× ۵/۹ متر مربع میتوانددر حالت بیشینه سرعتی معادل ۵۵ متر بر ثانیه تولید کند. این سرعت برابر با رینولدز ⁹ ۲۰۰×۲۹ است. کوچکترین مقطع این تونل قادر است که محدودهی ۲۰۱۱ تا ۱۶/۲ ماخ را پوشش دهد[۳۸]. مرکز تحقیقات انرژی هلند آمدیریت این پروژه را در دست داشت. در راستای اهداف پروژه، این موسسه با بستن قرارداد با دانشگاههای مطرح، مجموعه تحقیقاتی یکپارچهای به نام ایم ایم راه

German-Dutch Wind Tunnel/Large Low Speed Facility' Energy Research Center of Netherland'

شکل ۳-۱ تونل باد DNW/LLF و توربین بادی مکزیکو را نشان میدهد.



شكل ۳-۱ الف)تونل باد DNW/LLF ب)توربين بادى مكزيكو

۱–۲–۳ روتور و پرهی توربین بادی مکزیکو

با توجه به ابعاد مقطع آزمون تونل باد (۹/۵ × ۹/۵) متر مربع)، توربین محور افقی سه پره با قطر ۴/۵ متر و سرعت دورانی ۴۲۴ دور بر دقیقه جهت انجام آزمون مکزیکو در نظر گرفته شد و سپس طراحی پره، ابزارهای اندازه گیری قابل نصب روی آن، ناسل، توپی و سایر اجزاء سامانه به انجام رسید. با توجه به شرایط متوسط سرعت باد در نقاط مختلف دنیا و همچنین گستره سرعت هوای تونل باد، تصمیم بر آن شد که توربین برای سرعت مشخصه ۱۵ متر بر ثانیه باد طراحی گردد. پره توربین از ترکیب سه هوابر طراحی شد. با توجه به توزیع آئرودینامیکی، هوابرها از سمت مرکز دوران پره به ترتیب 2001-W1 ایت ایت ایت ایت ایت ایت ایت ایت ایت باد طراحی میشود و به صورت پیوسته به هوابر طراحی شد. با توجه به توزیع آئرودینامیکی، هوابرها از میشود و به صورت پیوسته به هوابر اول تغییر شکل مییابد و فاصله بین هر دو هوابر هم با یک ایتقال پیوسته خطی پر میشود. هوابر دوم توسط مرکز تحقیقاتی ریزو طراحی شده و استفاده از مختصات هندسی هوابر محرمانه است اما دو هوابر دیگر استاندارد بوده و استفاده از دادههای



شکل ۳-۲ هندسه سه هوابر استفاده شده در توربین بادی مکزیکو [۳۸]

پارامتر مشخصه مهم برای هوابرها، تغیرات ضرایب برآ^۱و پسای^۲آنها نسبت به زاویه حمله^۳ است. شکل ۳-۳ این تغییرات را برای هوابر DU نشان میدهد.



شکل ۳-۳ تغییرات ضرایب برآ و پسا از سمت مرکز دوران هوابر اول، 250-DU91 پره توربین مورد مطالعه[۳۸]

این ضریبها بخشی از مواد کار مدلسازی توربین های بادی بر اساس علوم پایه آئرودینامیک است. تغییرات این ضرایب را برای هوابر Riso در شکل ۳-۴ نشان داده شدهاست.

Lift Coefficient' Drag Coefficient' Angel of attack^r



شکل ۳-۴ تغییرات ضرایب براً و پسا از سمت مرکز دوران هوابر دوم، RISØ A1-21، پره توربین مورد مطالعه[۳۸]

همچنین تغییرات ضرایب برا و پسا برای هوابر Naca مطابق با شکل ۳-۵ است.



شکل ۳-۵ تغییرات ضرایب براً و پسا از سمت مرکز دوران هوابر سوم، NACA64-418، پره توربین مورد مطالعه[۳۸]

گروه طراحی پره، تابع تغییر زاویه یگام محلی را مطابق با شکل ۳-۶ ارائه کردهاست.



شکل ۳-۶ تغییرات زاویه گام محلی در طول پره توربین بادی[۲۳] برای طراحی یک پره، نیازبه دانستن طول کورد ^۱در هر مقطع از پره است. تابع تغییرات کورد بر حسب شعاع پره نیز در شکل ۳-۷ نشان داده شدهاست.



شکل ۳-۷ تغییرات کورد در طول پره توربین[۲۳]

با توجه به چیدمان هوابرهای انتخاب شده و توابع طراحی شده برای زاویه گام محلی و کورد مدل سه بعدی طراحی شده پره با جزئیات در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸ پره روتور طراحی شده توسط تیم طراحی پره. به ترتیب تفکیک هوابرهای پره[۲۳] ۲-۲-۳ ابزارهای اندازهگیری فشار وتکانه

با مشورت گروه طراحی اندازه گیری آزمون، نوع حسگرها، تعداد آنها و محل نصب آنها روی پره مشخص شد همچنین تصمیم بر آن شد که سیگنالهای خروجی از حسگرها در یک مدار درون پره هماهنگ شوند تا انتقال دادهها به سامانه تحصیل داده راحت تر صورت گیرد. ازایـنرو فضایی روی پره جهت نصب مدار هماهنگ کننـده و پایـه حسگرها در نظر گرفتـه شـد[۳۹]. همان طور که در شکل ۳-۹ نشان داده شدهاست برای اندازه گیری فشار، ۱۴۸ حسگر ساخته شده توسط شرکت کولیت، در پنج مقطع مختلف پره نصب شـدند. تعبیـه ایـن حسگرها بـه منظـور اندازه گیری توزیع فشارو محاسبه تکانههای وارد بر توربین است. مقاطعی که بر روی پره در نظر گرفته شدهاست به ترتیب در فواصل ۲۵ درصد، ۳۵ درصد، ۶۰ درصـد، ۸۲ درصـد و ۲۹ درصـد

Kulite'



شکل ۳-۹ (الف) ۲۵ و ۳۵ درصد فاصله از ابتدای پره و همچنین فضای موجود درون پره را نشان میدهد، (ب) حسگرهای فشار کولیت که در لبه جلوی هوابر به صورت نصب داخل حفره^۲و در پهنای هوابر به صورت هم سطح با دیواره^۳نصب شده اند[۲۳]

برای محاسبه ی ممانهای وارده در راستای کورد اولین هوابر[†]و عمود^مبر آن، بر ساقهای^{*}هر پره دو عدد کرنش سنج نصب شده است. به منظور اندازه گیری شتاب در راستای جریان باد و عمود بر آن از دو حسگر شتاب سنج که بر نوک یکی از پرهها نصب شده استفاده شده است. یک حسگر دما که در فاصله ۲۵ درصد از طول پره نصب شده برای اندازه گیری دما در صفحه روتور استفاده شده است. نصب این مجموعه از حسگرها و همچنین وسایل اندازه گیری سبب می شود بتوان به راحتی سرعت جریان باد، مقدار نیروی محوری^۷و سمتی^۸وارد شده به پره توربین بادی و در نهایت توان خروجی از توربین بادی را محاسبه کرد. داده های عملکردی توربین در محدوده ی سرعت ۷ متر بر ثانیه تا ۲۴ متر بر ثانیه، در ۱۱ سرعت مختلف و سایر پارامترها در سه سرعت

Spanwise ' Cavity mounted^{*} Flush mounted^{*} Edgewise[†] Flatwise^Δ Shank of Blade^{*} Axial Force^{*} Tangential Force^A ۰۱، ۲۴ متر بر ثانیه اندازه گیری و ثبت شده اند. با توجه به اینکه توربین برای سرعت مشخصه ۱۵ متر بر ثانیه طراحی شده است، لذا سرعت پایین تر ۱۰ متر بر ثانیه برای حالت تلاطم و سرعت بالاتر ۲۴ متر بر ثانیه برای حالت واماندگی توربین در نظر گرفته شده است[۲۳].

3-3 تصحيح سه بعدى ضرايب آئروديناميكي هوابرها

طی سالهای متمادی مهندسان و پژوهشگران و طراحان توربنهای بادی از هوابرهای ناکا ساخته شده توسط دانشگاه صنعتی دلف هلند^۱از قبیل NACA44 استفاده می کردهاند. با ایـن حـال از آغاز سال ۱۹۹۰هوابرهای مناسب متفاوتی برای پره تـوربین طراحـی و اسـتفاده شدهاست. داده های هوابر در محاسبهی توان و نیروی محوری به کمک نظریه خط عملگر اسـتفاده میشوند. دادههای دو بعدی هوابرهای مورد استفاده در پره تـوربین بـادی، کـه شـامل ضـرایب بـرآ و پسا هستند، به کمک آزمونهای تجربی اندازه گیری میشوند. چـون انـدازه گیریهای دادههای سه بعدی هزینه بالایی دارد بنابراین پژوهشگران روشهایی را جهت اصلاح دادههای دو بعدی هـوابر به دادههای سه بعدی هوابر توسعه دادهاند [۳۸]. در ادامه بـه معرفـی یکی از روشهـای تجربـی اصلاح سه بعدی این ضرایب پرداخته میشود و سپس درمورد روش اصلاح ایـن ضـرایب توسـط پروژه حاضر به تفصیل بحث میشود.

۱-۳-۳ روش تجربی اسنیل

اسنیل در سال ۱۹۹۳، نظریه خود را به صورت معادله (۳-۱) بیان کرد که در آن به اصلاح ضرایب برآ در هوابر پرداخته شده است.

$$C_{l,r_{\Box}} = C_{l,r_{\Box}} + J \left(\frac{c}{r}\right)^{H} (C_{l,inv} - C_{l,r_{\Box}})$$
(۱-۳)
 $C_{l,r_{\Box}}$ به کمک این معادله می توان دادههای دو بعدی ضرایب برآ، $C_{l,r_{\Box}}$ را به دادههای سه بعدی،

Delf University of Technology¹ ^YD airfoil data^Y تبدیل کرد. در معادله فوق، I ضریب ثابتی است که بین ۲ تا ۳ تغییر می کند، H ضریب ثابتی است که بین ۱ تا ۲ تغییر می کند. c کورد و ۲ شعاع می باشد. با توجه به مراجع علمی مطالعه شده بهترین مقدار برای این دو ضریب، مقدار ۳ برای ضریب I و ۲ برای ضریب H است. شده بهترین مقدار برای این دو ضریب، مقدار ۳ برای ضریب I و ۲ برای ضریب C است. $C_{l,inv}$ مریب برآ است زمانی که سیال کاملا غیر چسبنده در نظر گرفته شود که از دیدگاه ریاضی، از ادامه خط مماس بر ناحیه خط منحنی برآ در زاویه ای حمله پایین به دست می آید. همان طور که در نشان داده شده است به طور کلی، $C_{l,inv} - C_{l,inv}$ اختلاف بین خط مماس بر ناحیه خط منحنی برآ در زاویه ای حمله پایین به دست می آید. می از ادامه خط مماس بر ناحیه خط منحنی برآ در زاویه ای حمله پایین به دست می آید. می از ادامه خط منان داده شده است به طور کلی، $C_{l,inv} - C_{l,inv}$ اختلاف بین خط مماس بر ناحیه خط منحنی می باشد که این مقدار در ناحیه واماندگی می است می آید. می از حیه خط منحنی برآ با خود منحنی می باشد که این مقدار در ناحیه واماندگی می ایر افرایش



شکل ۳-۱۰ اصلاح ضرایب برا برای پره توربین بادی مکزیکو[۲۳]

Stall zone'

۲-۳-۳ مدل روتور کامل

یکی از روش های تحلیل پره توربین بادی شبیه سازی کامل آن در نرم افزارهای مکانیک محاسبتی است. در این پروژه به منظور دستیابی به ضرایب آئرودینامیکی سه بعدی آزمون توربین بادی مکزیکو، یک پرهی توربین بادی مکزیکو در نرمافزار فلوئنت مدل شد. در این بخش ابتدا مختصری در مورد این نرم افزار محاسباتی توضیح داده خواهدشد سپس دامنه حل و شبکه بندی، شرایط مرزی، مدل آشفتگی مورد استفاده و معادلات حاکم برای این شبیه سازی بررسی خواهد شد.

۲-۲-۳ نرمافزار شبیه سازی

انسیس فلوئنت^۲ یک برنامه کامپیوتری برای مدلسازی جریان سیال، انتقال حرارت، و واکنشهای شیمیایی در هندسههای پیچیده است. این نرم افزار به زبان برنامه نویسی C نوشته شده است و به همین دلیل امکان استفاده از حداکثر توان و قابلیت ارائه شده توسط این نرم افزار به وجود آمده است. در نتیجه، امکان تخصیص حافظهی دینامیک به شکل صحیح، و به وجود آوردن ساختار داده ها به صورتی که حداکثر کارایی را داشته باشند، وجود دارد. این نرم افزار به کاربر اجازه دستکاری شبکه (مثلا ریزکردن یا درشت کردن شبکه در مرز و مکانهای لازم در هندسه) را می دهد. این بهینه سازی برای حل شبکه ، قابلیتی در اختیار کاربر قرار می دهدکه نتایج را در نواحی که دارای گرادیان های بزرگ (مثل لایه مرزی و...) باشند، دقیق تر سازد. این قابلیت ها مدت زمانی را که برای تولید یک شبکه خوب مورد نیاز است در مقایسه با حل در شبکه های با سازمان به صورت قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. این نرم افزار بر پایه روش حجـم محدود که یک روش بسیار قوی و مناسب در روشهای دینامیک سیالات محاسباتی است، بنا

Fluent' Ansys fluent^r شدهاست. قابلیتهای فراوانی نظیر مدلسازی جریانهای دائم و غیر دائم ، جریان لزج و غیر لزج، احتراق، جریان مغشوش، حرکت ذرات جامد و قطرات مایع در یک فاز پیوسته و ده ها قابلیت دیگر Fluent را تبدیل به یک نرمافزار بسیار قوی و مشهور نموده است.

۲-۲-۳-۳ دامنه حل و شبکه بندی

در فرآیند شبیهسازی پره توربین بادی مکزیکو از سیستم مختصات کارتزین استفاده شد. راستای جریان در جهت Y، راستای طولی پرهها در جهت X و راستای عمودی (ارتفاع) در جهت Z انتخاب شد. دامنه حل برای انجام محاسبات یک کمان ۱۲۰ درجه از استوانهای به طول ۲۸۳ و شعاع ۱۰۳ در نظر گرفته شد. به دلیل نیاز به ریزتر بودن شبکه مش بندی حول پره و توپی^۱ برای تحلیل دقیقتر جریان اطراف پره، پره و توپی در یک کمان ۱۲۰ درجهای از یک استوانه کوچکتر به طول ۱۲۳ و شعاع ۳۳ قرار داده شد. پره و توپی توربین بادی مکزیکو با استفاده از مشخصات فیزیکی موجود از آن، مطابق با شکل ۳-۱۱ در نرمافزار سالید ورک^۲طراحی شده است.



شکل ۳-۱۱ پره و توپی آزمون مکزیکو طراحی شده توسط نرم افزار سالیدورک سپس این پره و توپی در فاصله ۴R (چهار برابر طول پره مکزیکو) از ورودی شبکه کوچک تر و فاصله ۱۲R (دوازده برابر طول پره مکزیکو) از ورودی شبکه بزرگ تر قرار داده شد. شکل ۳-۱۲ شماتیکی از دامنه انتخاب شده برای تحلیل جریان را نشان می دهد.

Hub[\] Solidwork[\]



شکل ۳-۱۲ دامنهی شبکهبندی شده برای تحلیل جریان حول یک پرهی آزمون مکزیکو

بعد از طراحی پره، توپی و دامنه حل، پره توسط نرمافزار انسیس با مـش بـدون سـاختار مثلثی^۱ شبکهبندی شد. شکل ۳-۱۳ تصویر دامنهی شبکهبندی شده را نشان میدهد.





شکل ۳-۱۳ دامنهی شبکهبندی شده برای شبیهسازی

لازم به ذکر است که انتخاب ابعاد دامنهی شبکهبندی بر اساس ابعاد رایج در سایر پژوهش های علمی و سعی و خطا برای مشاهدهی هرچه بهتر گردابه ها و سایر مشخصه های قابل مشاهدهی

Unstructured Traingular mesh'

جریان روی توربینهای بادی محور افقی بر اساس شبیهسازی روتور کامل صورت گرفته است.

به دلیل اهمیت ناحیه نزدیکتر به پره، با اندازهی پایه ۱۰ سانتیمتر و ضریب رشد ۱،۲، شبکهبندی صورت گرفته است. این ناحیه از روتور شروع می شود و تا چهار برابری طول شعاع پره در جهت ورودی و هشت برابری طول پره در پشت روتور گسترش می یابد. برای دامنه بزرگتر نیز همین ساختار با ضریب رشد ۱٫۲ ادامه پیداکرده است. این ناحیه از پایان ناحیه کوچکتر تا انتهای دامنه ی حل را شامل می شود. برای این دو ناحیه از مش بدون ساختار مثلثی استفاده شده است.

شکل ۳-۱۴ توپی طراحی شده را در حالت مش خورده نشان میدهد. توپی ساخته شده برای آزمون مکزیکو ۳٫۴ متر طول دارد. شبکهبندی با اندازه پایهی ۱۰ سانتی متر و ضریب رشد ۱٫۲ انجام گرفته است.



شکل ۳-۱۴ توپی شبکهبندی شده برای شبیهسازی

در شکل ۳-۱۵ تصویر شبکهبندی شدهی نوک پره مکزیکو نشان دادهشده است. برای این ناحیه و

به دلیل حساسیت هندسه، اندازه هر ضلع سلول ۵ میلیمتر در نظر گرفتهشده است.



شکل ۳-۱۵ نوک مش خوردهی پرهی طراحی شده مکزیکو

مقطع مهم دیگر برای مش بندی که به علت هندسهی پیچیده اهمیت پیدا میکند ریشهی پره و مقطع انتقال ریشه به اولین هوابر پره مکزیکو، یعنی هوابر Du است. شکل ۳-۱۶ نحوهی مش بندی در این ناحیه را نشان میدهد.



شکل ۳-۱۶ شبکهبندی حول ریشهی پرهی آزمون مکزیکو

در این ناحیه نیز فاصله هر دو گره از هم ۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. بر روی سطح خود
پره و در نواحی حساسی مانند نقاط انتهایی کورد هوابرها، فاصلهی گرهها از هم ۳ میلیمتر و گرهها در نواحی دیگر سطح پره ۱۰ میلیمتر از هم فاصله دارند.

در دیوارهی پره، سرعت جریان صفر فرض می شود و به دلیل وجود گرادیان سرعت در فاصله کوچکی از دیواره و تشکیل لایه مرزی در سطح نزدیک به پره، بحث روی نحوهی مش بندی نزدیک پره اهمیت خاصی می یابد.

۳-۲-۳ لایهمرزی سرعت و شبکهبندی

به دلیل شرط عدم لغزش،^۱ جریان سیال نزدیک دیواره تحت تـ أثیر حضـور خـود خواهـد بـود. در دیواره سرعت باید صفر باشد که این باعث تشکیل گرادیان سرعت عمود بـر دیـواره و در نتیجـه تشکیل تنش برشی خواهد شد. این تنش از رابطهی (۲-۳) به دست خواهد آمد.

واضح است که وجود تنش برشی نزدیک دیواره باعث کاهش سرعت جریان نزدیک به دیواره خواهد شد که این باعث رشد ضخامت لایهمرزی خواهد شد. این تأخیر در رسیدن به ویژگیهای جریان در نزدیکی دیواره شروع به تأثیرگذاری در فواصلی دورتر خواهد کرد. رشد لایهمرزی باعث ایجاد جابهجایی در سیال غیر لزج حول جسم میشود. اگر این ضخامت جابهجایی (δ^*) به ضخامت جسم اضافه شود شکل مؤثر جسم از رابطهی (۳-۳) به دست خواهد آمد[۴۰].

$$\delta^* = \int_{\cdot}^{\delta} \left(v - \frac{U}{U_{\infty}} \right) dy' \tag{(7-7)}$$

No slip Condition

بحث روی لایهمرزی سرعت آنجایی اهمیت پیدا میکند که برای یک شبکهبندی مناسب باید بهمنظور تحلیل دقیقتر، اولین گره در لایهمرزی اتفاق بیفتد. پارامتر تأثیر گذار اینجا فاصلهی بیبعد دیواره است که از رابطهی (۳-۴) به دست میآید.

$$y^+ \equiv rac{u_* y}{v}$$
 (۴-۳)
در این رابطه u_* سرعت مالشی^۲ y فاصله از نزدیکترین دیواره v لزجت دینامیکی سیال است.
سرعت مالشی از رابطهی (۳–۵) به دست میآید.

$$u_* \equiv \sqrt{\frac{ au}{
ho}}$$
 (۵-۳)
برای شبکهبندی در این ناحیه اولین گره در فاصلهی ۰٫۰۰۰۰۱ از سطح پره قرار گرفت. با ایجاد
چهار لایه با ضریب رشد ۱٫۱۵ شبکهبندی در این ناحیه تکمیل شدهاست[۴۱].

۲-۲-۴ معادلات حاکم و نحوهی حل آنها

معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر همدما، معادلهی پیوستگی و مومنتوم است که شکل کلی این معادلات تانسوری به صورت (۳-۶) است.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \cdot \tag{(7-7)}$$

معادلهی (۳-۶) را معادلهی پیوستگی می گویند. رابطهی (۳-۷) معادلهی مومنتوم برای سرعت در جهت i است.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho b_i \tag{Y-T}$$

Dimensionless Wall distance' Friction Velocity'

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \tag{A-T}$$

در این رابطه au_{ij} تنشهای انحرافی هستند که برای یک سیال نیوتونی از رابطهی (۳-۹) بهدست میآیند.

$$\tau_{ij} = \propto \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{9-7}$$

معادلهی پیوستگی تنها یک قید ریاضی برای حل جریان محسوب می شود و بیان می کند که اگر از میدان فشار درستی در حل معادلات مومنتوم استفاده شود، میدان سرعت به دست آمده فاقد دیورژانس خواهد بود. برای محاسبه یمیدان فشار مناسب معادلات پیوستگی و مومنتوم را ترکیب و سپس از معادله ی مومنتوم دیورژانس گرفته می شود. با دیورژانس گرفتن از معادله ی مومنتوم و استفاده از معادله ی پیوستگی، معادله پواسون فشار به شکل رابطه ی (۳-۱۰) به دست می آید.

$$\frac{\partial^{\mathsf{r}} p}{\partial x_i \partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j u_i \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho b_i \right) \tag{1.-7}$$

در حالت عدم وجود نیروهای حجمی و برای خصوصیات ثابت و با توجه به تعریف تنشهای انحرافی دو عبارت آخر صفر خواهند شد.

$$\frac{\partial^{\mathsf{r}} p}{\partial x_i \partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) \right] \tag{11-7}$$

معادلات (۳-۱۰) و (۳-۱۱) به معادلات پواسون فشار معروفاند و برای حل آنها میتوان از یک روش عددی مناسب استفاده کرد. باید توجه شود که اپراتور لاپلاسین که بر فشار عمل میکند حاصل ضرب دو اپراتور گرادیان و دیورزانس از معادله ی پیوستگی است؛ بنابراین در تخمین عددی اپراتور لاپلاسین باید سازگاری بین این دو اپراتور در گسسته سازیها حفظ شود در غیر این صورت موجب ارضا نشدن معادله ی پیوستگی توسط میدان سرعت به دست آمده خواهد شد. برای حفظ این سازگاری بهتر است که معادله ی پیوستگی توسط میدان سرعت به دست آمده تاید تا

اگر معادلهی (۳-۷) توسط یک روش عددی دلخواه و مناسب گسسته سازی شود برای هر گره در شبکه محاسباتی یک معادلهی جبری بهدست میآید و با حل آن مجه ولات یعنی سرعت را میتوان محاسبه کرد. معادلهی جبری حاصل برای هر نقطهی دلخواه P در شبکه بهصورت کلی (۱۲-۳) است.

$$A^{u_{i}}{}_{p}u^{n+\nu}{}_{i,p} + \sum A^{u_{i}}{}_{L}u^{n+\nu}{}_{i,L} = S^{n+\nu}{}_{u_{i}} - \left(\frac{\delta P^{n+\nu}}{\delta x_{i}}\right)_{P}$$
(17-7)

-) با کمک مقادیر و بهعنوان اولین حدس U_i^{n+1} و p^{n+1} حل آغاز میشود. (۱
-). تشکیل و حل دستگاه مومنتوم خطی که منجر به محاسبه $U_i^{m^*}$ می شود. (۲

-) به کمک ${{m^{st}} \over U_i}$ معادله پواسون تصحیح فشار تشکیل مییابد و حل میشود. (۳
 - ۴) مقادیر تصحیح سرعت محاسبه اما فشار محاسبه نمی شود.
 - ۵) به کمک معادلهی پواسن فشار محاسبه میشود.
 - ۶) بازگشت به گام ۲ تا ارضای معادلهی مومنتوم
 - ۷) ابتدای گام زمانی بعدی و بازگشت به گام ۱
 - ۵-۲-۳-۳ شرایط مرزی

به منظور ادامه روند مدل سازی، تعیین شرایط مرزی برای سطوح مختلف دامنه حل ضروری به نظر می رسد. شرایط مرزی، متغیرهای حرارتی و جریان سیال را روی مرزهای دامنه محاسباتی را مشخص می کند؛ بنابراین تعیین شرایط مرزی یک موضوع حساس در شبیه سازی عددی جریان سیال بوده و تعریف مناسب آن از اهمیت بسیار زیادی بر خوردار است.

شرایط مرزی مورداستفاده در نرمافزار فلوئنت برای شبیهسازی پره توربین شامل مرزهای ورودی و خروجی جریان، شرط مرزی دیواره و شرط مرزی سطوح داخلی است.

شرط مرزی سرعت ورودی برای ورودی جریان و فشار خروجی برای خروجی جریان قرار داده شد. استفاده از شرط مرزی سرعت ورودی برای تعیین سرعت و خواص اسکالر جریان در مرزهای ورودی و استفاده از شرط مرزی فشار خروجی برای تعیین فشار استاتیک و سایر متغیرهای اسکالر جریان در مرز خروجی استفاده میشود. استفاده از این شرط مرزی اغلب موجب بهتر شدن نرخ همگرائی درزمانی که جریان برگشتی در طول مراحل تکرار اتفاق میافتد، می گردد. برای دیوارههای جانبی ثلث استوانه بزرگتر از شرط مرزی پریودیک ^۱استفاده شد. طبیعت جریان در

Periodic

توربینهای محور افقی از ماهیت تناوبی برخوردار است. به بیان دیگر خصوصیات جریان بهطور متناوب تکرار میشود. استفاده از شرط مرزی پریودیک در کاهش زمان محاسبه و همچنین حافظه موردنیاز بسیار مؤثر است. با استفاده از شرط مرزی پریودیک، کافی است تنها جریان حول یک پره شبیهسازیشده و نتایج بهدستآمده را برای سایر پرهها نیز در نظر گرفت که این باعث کاهش سلولهای موردنیاز برای شبکهبندی به مقدار یکسوم میشود.

برای دیوار بالایی شرط مرزی تقارن⁽در نظر گرفته شد. همچنین تمامی سطوح داخلی با شرط مرزی دیوارهی درونی^۲مشخص شدند. استفاده از شرط مرزی درونی بدین معناست که سطح انتخابشده هیچگونه مانعی در جریان سیال نداشته و درواقع سطح انتخابشده جزء مرز نیست. شرایط مرزی مورداستفاده در مدلسازی پره در فلوئنت در شکل ۳-۱۷ و بهصورت جدول ۲-۱ نشان داده شدهاست.



شکل ۳-۱۷ شماتیک شرایط مرزی قرار داده شده برای شبیهسازی

 $\begin{array}{l} Symmetry`\\ Interior` \end{array}$

نام مرز	نوع شرایط مرزی
Inlet	Velocity inlet
Outlet	Pressure outlet
Per1	Periodic
Per2	Periodic
Symmetry	Symmetry

جدول ۲-۳ شرایط مرزی مورداستفاده برای شبیه سازی پره در فلوئنت

۶–۲–۳–۳ مدلسازی آشفتگی

مدلهای مختلفی برای شبیه سازی پسبادهای به وجود آمده در پشت روتور و نیز تحلیل جریان آشفته حاصل از دوران پرهها وجود دارد. مرسوم ترین این روش ها، روش میانگین رینول دز و شبیه سازی گردابه های بزرگ آست. روش شبیه سازی گردابه بزرگ، گردابه های بزرگ تر را تجزیه می کند و فقط زمانی مورد نیاز است که در مدل موردنظر جدایش و یا نواحی بزرگی با جریان بازگشتی وجود داشته باشد. در این روش هزینه محاسبات وابستگی زیادی با مربع عدد رینولدز دارد. همچنین در مجاورت مرزهای جامد که لایه مرزی تشکیل می شود، بی نهایی موزینه بر می باشد. در این روش هزینه محاسبات وابستگی زیادی با مربع عدد مزینولدز دارد. همچنین در مجاورت مرزهای جامد که لایه مرزی تشکیل می شود، بی نهاییت رینولدز با متوسط گیری زمانی، مقادیر متوسط متغیرها محاسبه می شود. همچنین پارامترها به دو جمله نوسانی و متوسط که شامل تمامی مقادیر نوسان است تجزیه می شوند. مدل های مختلف این روش، به مدتزمان پردازش بسیار کم تری نیاز دارند و عموماً بیش تر مورداستفاده قرار می گیرند. در این قسمت از شبیه سازی با توجه به مزایا و معایب ذکر شده، روش میانگین رینولدز می کنید به

Reynolds-averaged Navier–Stokes' Large Eddy Simulation^{*} می شکند. این کار منجر به تولید یک مجهول می شود که به تنش رینولدز معروف است. با تجزیه رینولدز سرعت سیال معادلهی (۳-۱۳) را داریم:

(۱۳-۳۱)
در این معادله (
$$\vec{V}(x,t)$$
 مقدار میانگین سرعت است و ($\vec{V}(x,t)$ مقدار نوسانی آن میباشد. با قرار
دادن معادله ($\vec{V}(x)$ مقدار میانگین سرعت است و ($\vec{V}(x,t)$ مقدار نوسانی آن میباشد. با قرار
معادله تانسور تنش رینولدز ^۱تولید میشود ($\overline{\vec{V}}$, $\overline{\vec{V}}$) که از تجزیه رینولدز پارامتر غیر خطی شتاب
همرفت بهدست میآید و به عنوان نیروهای منشا تلاطم^۲تفسیر میشود. یکی از روشهای رایج
مدل سازی تانسور تنش رینولدز، استفاده از فرضیه بوسینسک^۳است. بنابر این روش براساس یک
شباهت انگاری[‡]با جریان آرام تانسور تنش رینولدز میتواند به کمک گرانروی ادی مـتلاطم^۴به
میانگین جریان سیال بهصورت معادله (۳–۱۴) ربط داده شود.

(۱۴-۳)
$$\overline{\vec{V}} = v_T (\nabla \overline{\vec{V}} + (\overline{\vec{V}})^T)$$
 (۱۴-۳) در این رابطه v_T گرانروی ادی متلاطم نام دارد. عمدتا دو روش برای محاسبهی این پارامتر توسط پژوهشگران توسعه یافتهاست. در روش اول که لزجت گردابه نام دارد و نسبت به روش دوم متداول تر است، برای مقدار لزجت آشفتگی یک مقدار همسانگرد درنظر گرفته می شود، اما در روش دوم دوم، برای حل هر یک از شش تنش رینولدز به طور جداگانه از مدل تنش رینولدز استفاده می شود و استفاده می شود است. در زیر مدلهای لزجت گردابه از مدل تنش رینولدز استفاده می شود، اما در بیش تر استفاده است. در برش اول که از جت گردابه نام دارد و نسبت به روش دوم متداول تر است. برای مقدار لزجت آشفتگی یک مقدار همسانگرد درنظر گرفته می شود، اما در بوش دوم، برای حل هر یک از شش تنش رینولدز به طور جداگانه از مدل تنش رینولدز استفاده می شود و بنابراین این روش غیر همسانگرد است. در زیر مدلهای لزجت گردابه ای که عموماً بیش تر استفاده می شوند آورده شده است:

k-epsilon دمدل دو معادلهای است که برای رفتار جریان در ناحیههایی که با دیواره

Reynolds Stress Tensor' Turbulent Diffusive Forces' Boussinesq Hypothesis' Analogy[£] Turbulent Eddy Viscosity[°]

محدود نشده است و نتیجتاً شرط عدم لغزشی وجود ندارد، مورداستفاده قـرار میگیـرد. (استاندارد صنعتی قدیمی)

- Spalart-Allmaras: مـدل تـک معادلـهای اسـت کـه بـهطور خـاص بـرای کاربردهـای هوافضایی طراحی شده است و در مسائل توربوماشین هم توانسـته محبوبیـت بـه دسـت بیاورد.
- k-omega: مدل دو معادلهای است که برای جریان های که با دیواره محدود شدهاند مورداستفاده قرار می گیرد، البته این مدل خیلی متداول نیست.
- K-ɛ این مدل دو معادلهای ترکیبی از مزایای جریان آزاد مدل ٤-٤ و جریان محدود به دیوارهی مدل k-omega است. این مدل، استاندارد صنعتی جدید است.

در این قسمت از شبیه سازی برای محاسبه ی گرانروی ادی متلاطم از مدل SST استفاده شده است [۴۲].

۷-۲-۳ استخراج ضرایب آئرودینامیکی اصلاح شده

در این قسمت بر روی روشی که نحوهی استخراج ضرایب اصلاحشده از محاسبات سهبعدی روتور توسط فلوئنت را شرح میدهد تمرکز شده است. با توجه به مطالعات پیشین انجامشده تأثیر حرکت چرخشی سهبعدی پره بر مقادیر ضریب برا در مقاطع نزدیک به ریشه بیشتر است و با نزدیک شدن به نوک پره این مقادیر به علت کاهش اثر چرخش پره توسط گردابههای نوک، به مقادیر دوبعدی گزارششده توسط آزمون تجربی نزدیک میشود و حتی ممکن است به مقادیری کمتر از آن نیز برسد[۴۳].

بحث روی تأثیر چرخش بر مقادیر ضریب پسای اصلاحشده نیز موضوع جذابی برای پژوهش های

Shear Stress Transport'

بسیار بوده است. برمستر ^۱و گایدون^۲در پژوهشی نشان دادند کـه مقـادیر ضـریب پسـا در مقـاطع نزدیک به ریشه افزایش و در نزدیکی نوک پره کاهش اندکی را نشان میدهد[۴۴].

در این قسمت برای بهدست آوردن ضرایب اصلاحشده از روشی استفادهشده است که در ابتـدا زاویه حمله محلی^۳را محاسبه میکند. این روش اساسش بـر بهدستآمده آوردن توزیـع سـرعت محوری برای صفحه روتور است و روش سرعت محوری کاهشیافته^۴نـام دارد. در ایـن روش کـه اولین بار توسط هانسن^۹رائه شد از توزیع جریان محوری که به علت نزدیک شـدن بـه صفحهی روتور کاهشیافته است برای محاسبهی زاویه حمله استفاده میشود. ابتـدا شـاخص محوری بـا استفاده از نمودار میانگین سرعت محوری بهعنوان تابعی از فاصـله بـا روتـور، (کـه از محاسـبات فلوئنت بهدست می آید) و رابطهی(۳–۱۵)، محاسبه میشود.

$$a = \frac{V - V}{V}$$
 (۱۵-۳)
سپس با صرفنظر کردن از شاخص دوارنی('a) (به علت ناچیز بودن در این پژوهش از آن
صرفنظر شده است[۴۵]) و دانستن مقدار سرعت دورانی (ω) و زاویه چرخش محلی(θ)،
میتوان زاویه جریان را از رابطهی (۳-۱۶) محاسبه نمود.

$$\alpha = \phi - \theta \tag{1V-r}$$

Burmester'

Guedon^r

Local Angle of Attack^{*}

Reduced Axial Velocity Method^{*}

Hansen[△]

برای به دست آوردن توزیع نیرو ابتدا به کمک اطلاعات هندسی پرهها و استفاده از جداول طراحی مشخصات هندسی پره مکزیکو، سه مقطع خاص از طول پره به عنوان هدف محاسبه ضرایب آئرودینامیکی قرار داده شد. این مقاطع به ترتیب در فواصل ۳۵، ۶۰ و ۸۲ درصد از طول پره قرار دارند. در انتخاب این سه مقطع سعی شد تا هر سه هوابر به کاررفته در طراحی پره مکزیکو وجود داشته باشند. سپس با استفاده از مشخصات هندسی هوابرها و زاویه چرخش محلی مشخصات هندسی جدید این هوابرها در سه مقطع موردنظر محاسبه شد. با انتخاب ۱۵ نقط ه دوران یافت ه توسط ماتریس انتقال، مقدار فشار نقطه ای برای هر کدام از آن ها از فلوئنت استخراج گردید و با استفاده از مشخصات نقاط اطراف آن کمیت اسکالر فشار به کمیت برداری تبدیل شد. جدول ۲-۳ نوع هوابر، طول کورد و زاویه پیچش محلی را در آن مقطع خاص نشان میدهد.

زاویه پیچش محلی(θ)	طول کورد(C)	نوع هوابر	مقطع موردنظر
٨,٢	•,175	Du91-w2-250	۳۵%
۴,۲	۰,۱۴۰	RisoA1-21	۶۰٪
۲,۵	•,117	Naca-64-418	٨٢٪.

جدول ۳-۲ مشخصات هندسی مقاطع موردنظر برای محاسبه ضرایب آئرودینامیکی[۲۳]

رابطهی (۳-۱۸) ماتریس انتقال برای محاسبهی مختصات جدید هوابرها نشان داده شده است.

$$\begin{cases} y_{new} \\ z_{new} \end{cases} = c \begin{bmatrix} \cos(\theta - \beta) & -\sin(\theta - \beta) \\ \sin(\theta - \beta) & \cos(\theta - \beta) \end{bmatrix} \begin{cases} x_{old} \\ y_{old} \end{cases}$$
(۱۸-۳)
Cos($\theta - \beta$) x_{old}

$$y_{new} e^{y_{old}} e^{y_{old}}$$

با استفاده از توزیع نیرو بر روی هوابر و دانستن زاویه حمله و با توجه به اینکه نیروی برا از تصویر نیرو بر راستای عمود بر راستای جریان و نیروی پسا در راستای مماس بر جریان بهدست میآیند ضریب برا از رابطهی (۳-۱۹) بهدست میآید.

$$C_l = C_z \cos \emptyset - C_x \sin \emptyset$$
 (۱۹-۳)
ضریب پسا نیز از رابطه (۳-۲۰) بهدست میآید

 $C_d = C_z \sin \phi + C_x \cos \phi$ (۲۰-۳) لازم به ذکر است که برای انجام محاسبات فوق و به دلیل تکراری بودن انجام محاسبات برای سه سرعت ۱۰، ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه در نرمافزار متلب^۲کدی برای سهولت انجام کار نوشته شد. الگوریتم محاسبه ضرایب برا و پسا که در بالا توضیح داده شد بهطور کامل در نوشتن برنامه رعایت شد و نتایج بهدستآمده در فصل چهار بهطور کامل گزارش شده است.

3-4 روند حل و الگوریتم شبیهسازی مدل خط عملگر

در این بخش به معرفی نرمافزار مورداستفاده در شبیه سازی، روش حل معادلات حاکم بر مسئله و شرایط مرزی، نحوه اعمال ضرایب تصحیح شده بر روند حل، بررسی مدل آشفتگی مورد استفاده، دامنه حل و نحوه شبکه بندی پرداخته شده است.

۱-۴-۳ نرمافزار شبیهسازی

اپن فوم یکی از گسترشیافته ترین حل گرهای متنباز درزمینه مسائل دینامیک سیالات محاسباتی در جهان است. از این نرمافزار تقریبا برای اکثر کاربردهای صنعتی استفاده و نتایج حاصل از آن اعتبار سنجی شده است. هر کاربر میتواند کدهای اصلی نرمافزار را استخراج و آنها را تغییر و بهبود دهد و از این طریق در پروژه گسترش اپن فوم شرکت کند. اپن فوم بر اساس زبان

Matlab¹

برنامهنویسی ++C و سیستمعامل لینوکس بناشده است. در حقیقت این نرمافزار یک کتابخانه عظیم از کلاسها (مجموعه) است که بهصورت افقی و از طریق فراخوانی باهم مرتبط میشوند. با استفاده از این روش، برنامهنویسی بسیار آسان تر میشود زیرا برای توسعه کدهای قبلی، تنها همان قسمتهای موردنیاز تغییر مییابند و نیازی نیست تا کل کدهای اساسی برنامه تغییر کنند. همین امر باعث بهبود و یا افزودن هرچه راحت تر انواع حل گرها، مدل های آشفتگی، شرایط مرزی و روشهای جدید حل عددی معادلات میشود. نرمافزار کاملاً برای کار به شیوه محاسبات موازی طراحی شده و می تواند با تعداد نامحدودی هسته پرداز شگر، موازی سازی شود. بررسیهای اولیه نشانگر آن بوده که امکان استفاده تا ۱۰۰۰ هسته برای انجام محاسبات با این نرمافزار وجود دارد. علاوه بر این، ابزارهایی کاربردی برای انجام عملیات مختلف بـر روی دادههای حاصل از محاسبات همانند wanit که جهت مشاهده نتایج است، در ایـن نرمافزار تهیه شده است. این فوم بر اساس روش حجم محدود طراحی شده است و شامل تکنیکهای عددی متنوعی بـرای انتگرال گیری در حوزههای زمان و فضا است. برخی از حل گرهای این نرمافزار عبارت اند از:

icoFoam: حل گر جریانهای آرام، تراکم ناپذیر و ناپایا

pisoFoam: حل گر جریانهای آشفته، تراکم ناپذیر و ناپایا

simpleFoam: حل گر جریانهای پایا

۲-۴-۲ معادلات، روند حل و الگوریتم شبیهسازی

معادلات فیلتر شده و تراکم ناپذیر ناویر –استوکس که در مدلسازی خط عملگر استفاده می شود در فرم تعمیمیافته آن مطابق با رابطهی (۳-۲۱) است.

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{U}_i \overline{U}_j)}{\partial x_j} = -\frac{v}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + v \frac{\partial^{\mathsf{v}} \overline{U}_i}{\partial x^{\mathsf{v}}_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \vec{f}_z \tag{(Y1-Y)}$$

که در این رابطه
$$ec{f_z}$$
 نیروی خارجی بهدستآمده از خطوط عملگر است. همچنین رابطـه (۲۲-۲۲)
را نیز داریم.

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_i} = \cdot$$

در روابط بالا au_{ij} نشانگر تنشهای درهمی است و توسط رابطه (۳-۲۳) محاسبه می شود.

$$\tau_{ij} = v_t \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{r}{r} k \delta_{ij}$$
(17-7)
c, lui (1946) v_t like the second seco

$$v_t = C_s \left| \overline{\vec{\omega}} \right|^{\alpha} k^{\gamma - \alpha/\gamma} \Delta^{\gamma + \alpha} \tag{(Yf-T)}$$

$$lpha=\cdot$$
.۵ در این رابطه \oplus ورتیسیته، $^{/\prime}$ ($\Delta_x+\Delta_y+\Delta_z$) در این رابطه \oplus ثابت مدل آشفتگی، $lpha=\cdot$.۵ در این رابطه k انرژی جنبشی درهمی است که رابطهی آن بهصورت معادله (۳-۲۵) است[۴۶].

$$K = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{r} (U_j - \overline{U}_j)^r \tag{7\Delta-T}$$

1-۲-۴-۳ روند حل معادلات و انتخاب حل گر

به دلیل اعمال مومنتوم خارجی در فضای ناویر-استوکس، پدیده جدایش پارامتر سرعت از پارامتر فشار دور از انتظار نیست و با توجه به اینکه در نظریه خط عملگر، تمرکز مومنتوم بهصورت خطی خواهد بود و نه حجمی، احتمال بروز جدایش بیشتر است. الگوریتمهای مختلفی برای حل معادلات ناویر- استوکس همراه با یک میدان سرعت و فشار کوپل شده به یکدیگر وجود دارند. با توجه به نکته بالا و نیز ناپایا بودن مسئله، در این پژوهش از الگوریتم PISO برای حل معادلات استفاده شد. مراحل حل معادلات در الگوریتم پیزو به طور خلاصه به ترتیب زیر است:

- تخمین میدان فشار
- ۲. محاسبهی سرعتها

- ۳. حل معادله تصحيح فشار
- ۴. تصحیح مقدار فشار و سرعتها
- ۵. حل مجدد معادله تصحیح فشار
- ۶. تصحیح مجدد مقدار فشار و سرعتها
- دامه حل از مرحله ۲ تا رسیدن به همگرایی

در ادامه به شرح بیشتر و دقیق تر این مراحل می پردازیم. نخست، یک میدان فشار اولیه (*p) تخمین زده می شود که در ادامه از آن جهت حل معادلات مؤمنتم در راستای X و Y و به منظور یافتن سرعت در این راستاها (به ترتیب *u و *v) استفاده می شود. برای معادله مؤمنتم در راستای X که عبارت نیروی حجمی نیز به آن اضافه شده، معادله (۳-۲۶) راداریم:

$$a_{R}u_{R}^{*} = \sum_{nb} (a_{nb}u_{nb}^{*}) - (p_{e}^{*}A_{e} - p_{w}^{*}A_{w}) + b_{R}$$
(19-17)

در این رابطه *nb* مخفف همسایگی *است. سرعت*ها و نیز عبارت نیـروی حجمـی در مرکـز سـلول شبکهبندی^۲قرار دارند درحالی که جملات مربوط به فشار روی سطح سلولها وجود دارد. ضـرایب a بهعنوان معادلات جابجایی – پخش ^تعریف میشوند. برای فشار، یک فاکتور تصـحیح بهصورت $p = p^*+p^c$ تعریف میشود. به همین ترتیب فاکتورهای تصحیح سرعتها نیز تبیین میشوند. بـا جایگزین کردن u بجای *u در معادله (۲۶-۲) معادله تصحیح سرعت بـه شـکل (۳-۲۷) حاصـل میشود.

$$a_{R}u^{c}{}_{R} = \sum_{nb} (a_{nb}u^{c}{}_{nb}) - \left(p^{c}{}_{e}A_{R} - p^{c}{}_{w}A_{R}\right)$$
(YY-Y)

Neighbor[\] Grid Cell^{\v} Convection-Diffusion^{\v}
$$+a_{P,N}p^{c}_{N} + a_{P,S}p^{c}_{S} + b_{P,R}a_{P,R}p^{c}_{R} = a_{P,W}p^{c}_{W} + a_{P,E}p^{c}_{E}$$
 (۲۸-۳)
که جملات آن بهصورت (۲۹-۳) تعریف میشوند:

$$a_{P,W} = \rho A^r_{u,R} / a_{u,R}, a_{P,S} = \rho A^r_{v,R} / a_{v,R}$$
 (۲۹-۳)
 $\alpha_{p,w}$ ضریب متعلق به مرز غربی سلول شبکهبندی است که فشار در مرکز آن قرارگرفته است.
ضرایب u و v نیز مشابه q هستند. . ضریب α_q برای بهبود همگرایی استفاده میشود که از آن با
عنوان under-relaxation یاد میشود. زیرا این ضریب تغییرات در متغیرها را برای هر مرحله
تکرار در حل محدود میکند و میدان فشار جدید به صورت $p = p^* + \alpha_p$ م $p = q$ حاصل می شود.
ضریب به صورت α_q تجربی انتخاب میشود و معمولاً مقداری برابر ۳/۰ را به خود اختصاص
می دهد. همچنین برای تعریف ترم آخر معادلهی (۳-۲۸)،رابطهی (۳-۳۰) را داریم:

$$b_{P,R} = -[(\rho A u^*)_e + (\rho A u^*)_w + (\rho A u^*)_n + (\rho A u^*)_s]$$
(r.-r)

بهطور مشابه با در نظر گرفتن ضریب α_u برای معادله سرعت در راستای X داریم:

$$u^{*(k+1)} = u^{*k} + \alpha_u(u^{*(k+1)} - u^{*k})$$
 (۳۱-۳)
در رابطهی (۳۱-۳)، مقدار $u^{*,*} = u^{*,*}$ انتخاب میشود. اندیس (k) و (k+1) به گامهای تکرار حل
اشاره دارد. پس از محاسبه میدانهای سرعت و فشار جدید، برای بار دوم عملیات تصحیح بر روی
این میدانها انجام میشود. معادله تصحیح فشار مجدد مشابه همان معادله اول محاسبه میشود.
پس از اعمال اولین تصحیح، مقادیر سرعت و فشار بهصورت رابطهی (۳۲-۳) درآمدند:

$$p^{**} = p^* + p^c, u^{**} = u^* + u^c, V^{**} = V^* + V^c$$
 (۳۲-۳)
در معادله تصحیح مجدد فشار، یک فاکتور تصحیح جدید بهصورت p^{cc} تعریف میکنیم. بنابراین
داریم: $p = p^{**} + p^{cc}$. این روند برای میدانهای سرعت نیز دقیقا به همین شکل خواهد بود. حال
معادله گسسته سازی شده مؤمنتم در جهت X بهصورت (۳۳-۳۳) درمیآید.

$$a_{u,R}u^{**}{}_{R} = \sum_{nb} (a_{u,nb}u^{*}{}_{nb}) - (p^{**}{}_{e}A_{R} - p^{**}{}_{w}A_{R}) + b_{R}$$
(٣٣-٣)
همچنین معادله پس از اعمال دو مرحله تصحیح سرعت به شکل حاصل میشود.

$$a_{u,R}u_R = \sum_{nb} (a_{u,nb}u^{**}{}_{nb}) - (pA_R - p_wA_R) + b_R$$
 (۳۴-۳)
توجه شود که سرعتها در اولین جمله سـمت راسـت معـادلات بـالا بـا توجـه بهسـرعت هـای
اصلاحنشده محاسبه میشوند. $u^* = u^* = u^*$ و u^{cc} و $u^* = u^* + u^*$. بـا تفاضـل دو رابطـه بـالا از هـم
رابطه (۳۵-۳) بهدست میآید :

$$u_{R} = u^{**}{}_{R} + \frac{\sum_{nb} a_{u,nb} (u^{**}{}_{nb} - u^{*}{}_{nb}) + b_{R}}{a_{u,R}} - \frac{A_{R}}{a_{u,R}} (p - p_{w})$$
(٣٥-٣)
Isotromodeling in the probability of the probabilit

۲-۲-۴-۳ دامنه حل و شبکهبندی

در فرآیند حل این پژوهش از سیستم مختصات کارتزین استفاده شد؛ بهطوری که راستای جریان در جهت X، راستای طولی پرهها در جهت Y و راستای عمودی (ارتفاع) در جهت Z انتخاب شد. دامنه حل برای انجام محاسبات یک مکعب مستطیل با ابعاد ۵۴×۱۸×۱۸ متر است. توربین در فاصله ۴ برابر قطر یعنی ۱۸ متر از قسمت ورودی قرار دارد و نسبت به دو راستای دیگر در مرکز دامنه حل قرار دارد. شکل ۳-۱۸ دامنه حل و محل قرارگیری توربین برای مدلسازی خط عملگر را نشان میدهد.



شکل ۳-۱۸ ابعاد دامنه حل و محل قرار گیری توربین

بهمنظور انجام یک شبکهبندی منظم، این مکعب به ۱۲ بلوک (۳بلوک در راستای X، ۲بلوک در راستای X و ۲بلوک در راستای Y و ۲بلوک در راستای Z) تقسیم شد. در این پژوهش از آنجایی که هدف بررسی تأثیر اصلاح ضرایب آئرودینامیکی بر مدل پیاده شده خط عملگر بوده است از دامنه بهبودیافته در نواحی منتهی به توربین استفاده شده است. بدینصورت که ، ابتدا یک شبکهبندی اولیه، با تقسیم هر بلوک به ۳۳ قسمت در هرکدام از راستاهای Y و Z و نیز ۶۷ قسمت در راستای X، انجام شد و پس از ایجاد این شبکهبندی اولیه، با تقسیم اول یس از ایجاد این شبکهبندی اولیه، از ایزار snappyHexMesh که یکی از ابزارهای کمکی این فوم است، جهت ریزتر کردن شبکهبندی در ناحیه اطراف روتور توربین استفاده شد. شکل این فوم است، جهت رانشان میدهد.







شکل ۳-۲۰ استفاده از شبکه بهبودیافته در اطراف توربین

۳-۲-۴ شرایط مرزی

در ادامه روند مدلسازی، نیاز است تا شرایط مرزی برای سطوح مختلف دامنه حل تعیین شود. شرایط مرزی مورداستفاده در این پژوهش جدول ۳-۳ شرایط مرزی مورداستفاده در مدلسازی خط عملگر است.

نام مرز	نوع شرایط مرزی سرعت	نوع شرایط مرزی فشار	
ورودى	Fixed Value	ZeroGradient	
	Value: (15,0,0)(m/s)		
خروجى	ZoroGradient	fixedValue	
	ZeroGradient	value: 0.0(pa)	
المرامع	Fixed Value	ZaraGradiant	
فيوارقلف	Value: (0,0,0)(m/s)		

جدول ۳-۳ شرایط مرزی مورداستفاده در مدلسازی خط عملگر

۴-۲-۴-۳ مدلسازی آشفتگی

با توجه به توضیحاتی که در بخش ۳–۳–۲–۴ در مورد انواع مدلهای موجود برای شبیهسازی پس بادهای به وجود آمده در پشت روتور و نیز تحلیل جریان آشفته حاصل از دوران پرهها داده

شد و با توجه به مزایا و معایب آنها در این قسمت از پژوهش از مـدل شبیهسـازی گردابـههای بزرگ استفادهشده است. ازآنجاییکه در روش LES، محاسبات بـرای لایـهمرزی بسـیار هزینـهبر است و با توجه به اینکه مدل خط عملگر به محاسبات لایهمرزی احتیاجی ندارد پس استفاده از این روش و بهرهمندی از مزایای آن عاقلانه به نظر میرسد. روش شبیهسازی گردابههای بزرگ مبتنی بر نظریه آبشار کولموگروف است. در این نظریه، انرژی به بزرگترین مقیاس دادهشده و سپس این انرژی به مقیاسهای کوچکتر منتقل میشود. این فرآیند تا آنجا ادامه میابد که انرژی در کوچکترین مقیاسها تلفشده و موازنه انرژی برقرار شود. همانطور که قبلاً هم گفته شد، در روش LES، ابتدا مقیاسهای بزرگ که انرژی به آنها داده میشود، حل میشوند. ازآنجاکه تنها با حل مقیاسهای بزرگ، موازنه انرژی برقرار نمی شود، لذا لازم است تا اثر مقیاس-های کوچک که تلف کننده انرژی هستند نیز در نظر گرفته شود. بدین منظور، از مدلهای مقیاسزیرشبکه که در راستای تخمین نرخ اتلاف انرژی توسعه یافتهاند، استفاده مـیشـود.[۴۷] بنابراین در این روش، حرکتهای مقیاس بزرگ دقیقتر حل می شود و حرکتهای مقیاس کوچک بهجای حل شدن، مدلسازی می شود. به منظور مدل سازی جمله های مربوط به لزجت و تنشهای درهمی در معادله مومنتم، مدلهای زیادی پیشنهادشده است که معتبرترین و مناسبترین آنها، مدلهای وابسته به جریان و هندسه است. البته این موضوع همچنان بهعنوان زمینهای قـوی جهـت تحقیقات، از پتانسیل بالایی برخـوردار اسـت. معـادلاتی کـه در روش LES حل می شوند به طور معمول از تعمیم و فیلتر کردن معادلات ناویر - استوکس به منظور جداسازی گردابههای کوچک و بزرگ به دست می آیند. در نتیجه معادلات حاصله سیر تکامل گردابههای بزرگ را توصیف می کند و شامل تانسور تنش مقیاس زیر شبکه (SGS)^۱است که این تانسور اثرات گردابههای مقیاس کوچک حلنشده را نشان می دهد. روش LES به شبکهبندی حساس است اما در مورد جدایش و جریان بازگشتی جوابهای بسیار بهتری میدهد. یک متغیر

Sub-Grid Scale

فیلتر شده بهصورت (۳-۳۶) تعریف میشود :

$$\overline{\emptyset}(x) = \int \emptyset(x')G(x,x')dx'$$
 (۳۶-۳)
که در آن \emptyset یک متغیر فضا و ' \emptyset به معنی پارامتر فیلتر شده \emptyset است. همچنین انتگرال گیری حول
دامنه سیال صورت می گیرد و G تابع فیلتر کننده است که مقیاس ادی های حل شونده را تعیین
می کند. با انجام فرآیند فیلتر کردن، فقط تنشهای با مقیاس کوچکتر مدل می شوند. با استفاده
از تئوری بوسینسک تنشهای درهم SGS تولید می شوند.

$$au_{ij} - rac{1}{r} au_{kk} \delta_{ij} = - au \mu_t ar{S}_{ij}$$
 (۳۷-۳)
در رابطه (۳۲-۳) μ_t لزجت درهم SGS است. بخش همسان تنشهای SGS یعنی au_{kk} مدل
نمیشوند اما به عبارت فشار ایستا فیلتر شده افزوده میشوند. *Sij* تانسور نرخ کرنش برای مقیاس
حل شده است و توسط رابطهی (۳۸-۳) تعیین میشود.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \tag{(7.4-7)}$$

برای مدل SGS ، ۴ گزینه اصلی به صورت زیر وجود دارد :

- dynamic Smagorinsky-Lilly مدل
 - Smagorinsky-Lilly مدل
- WALE (Wall Adapting Local Eddy-viscosity) مدل
 - مدل Spalart-Allmaras

شار درهمی SGS برای یک متغیر عددی (اسکالر) مثل Ø با استفاده از عدد پرانتل درهم SGS که به صورت (۳-۳۹) تعریف می شود، مدل می شوند.

$$q_j = -\frac{\mu_t}{\sigma} \frac{\partial \emptyset}{\partial x_j} \tag{(4.47)}$$

که در آن *q_j* شار SGS است. در این پژوهش از مدل dynamic Smagorinsky برای شبیهسازی پسبادهای روتور توربین بادی استفاده شد. لزجـت ادی در ایـن مـدل بهصـورت (۳-۴۰) تعریـف می شود:

$$\mu_t =
ho L^r{}_s |ar{S}|$$
 (۴۰-۳)
که در آن L_s طول اختلاط SGS است و توسط رابطه (۳-۴۱) محاسبه می شود.

$$L_s = \min(kd, C_s\Delta) \tag{f1-T}$$

که در آن k ثابت ون کارمن، d فاصله تا نزدیکترین دیواره، C_s ثابت Smagorinsky و Δ مقیاس شبکهبندی محلی است. پارامتر Δ ، توسط رابطه (۳-۴۲) محاسبه می شود که در آن V، حجم سلول شبکهبندی است.

$$\Delta = V^{\frac{1}{r}} = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{\frac{1}{r}}$$

همچنین برای تانسور تنش \overline{S} داریم:
(۴۳-۳)
(۴۳-۳)
و در پایان لازم به ذکر است که C_s یک ثابت جهانی نیست اما مقـدار ۲, ۰ تـا ۱۹٫ ۰ بـرای بـازهی

وسیعی از جریانها به کار میرود.

۵-۲-۴-۳ الگوریتم شبیهسازی

پس از انتخاب حل گر مناسب جهت حل معادلات، حال اقدام به شبیه سازی توربین طبق الگوریتم نشان داده شده در شکل ۳-۲۱ می کنیم.



شکل ۳-۲۱ الگوریتم به کاررفته در برنامه جهت مدلسازی خط عملگر با استفاده از حل گر PisoFoam

۴) فصل چهارم: نتایج

4-1 مقدمه

در این فصل نتایج شبیهسازی پرهی آزمون مکزیکو در پنج بخش ارائه و با دادههای آزمون تجربی اعتبار سنجی شده است.

در بخش اول به بررسی استقلال از شبکهی شبیهسازی فلوئنت پرداختهشده است. در این بخش پارامتر مهم برای بررسی، نیروی محوری کل بوده است. در بخش دوم نتایج مربوط به اصلاح ضرایب آئرودینامیکی بیانشده است. ابتدا این ضرایب در حالت اصلاحنشده و برای زوایای حمله • تا ۲۵ درجه رسم گردیده و سپس نتایج اصلاحشده در ادامه گزارششده است. در بخش سوم نتایج مربوط به تخمین پسبادهای توربین، توسط دو روش شبیهسازی روتور کامل و خط عملگر بهبودیافته گردآوریشده است. در بخش چهارم، نتایج بهدستآمده برای نیروهای عمودی و مماسی ارائهشده است و در بخش پنجم، به تحلیل پارامترهای عملکردی توربین پرداخته شده

4-2 اعتبارسنجی و مطالعهی استقلال از شبکهبندی^۱

در فرآیند شبیهسازی پرهی توربین بادی، برای اطمینان از صحت حل ابتدا باید استقلال از شبکه صورت گیرد. استقلال از شبکه بدین معناست که بررسی شود آیا ریزتر کردن مشها و افزایش تعداد سلولها در بهدست آوردن جوابهای دقیقتر بیاثر است یا خیر.

برای اطمینان از بی تأثیر بودن اندازه و تعداد سلولها در شبکهبندی بـر دقـت جوابهـا، بعـد از

Mesh Independency

ایجاد یک شبکهی منطقی و مقایسه نتایج بهدستآمده با نتایج آزمایشگاهی، فرآیند شبیهسازی برای شبکهای ریزتر تکرار گردید. فرآیند ریزتر کردن شبکهبندی بهمنظور حصول جوابهای دقیق تر تا آنجا ادامه یافت که در نتایج بهدستآمده از مدل، تغییر محسوسی مشاهده نگردید. در جدول ۴-۱ نیروی محوری کل تولیدشده برای شبکهبندیهای مختلف برای سرعت ۱۵ متر بر ثانیه گردآوریشده است. در این قسمت از نتایج مربوط به شبکهبندی شماره ۲ استفاده شده است.

درصد خطا	نیروی محوری کل (N)	تعداد سلولها	شماره
77	1981	4201	شبکه ۱
١٢	۱۲۰۰	812.20.	شبکه ۲
١.	١٧٦٨	٨٠٠١۵٠۵	شبکه ۳

جدول ۴-۱ مقایسهی نیروی محوری کل تولیدشده در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه برای شبکهبندیهای مختلف

4-3 ضرايب آئروديناميكي اصلاحشده

در این بخش در ابتدا با استفاده از نتایج گزارششده توسط گروه طراحی هوابرهای آزمون مکزیکو، ضرایب اصلاحنشده ی برآ و پسا برای سه هوابر مورداستفاده در طراحی پره مکزیک و گزارششده است. سپس نتایج اصلاح ضرایب برآ و پسا ارائه گردیده است. برای بهدست آوردن ضرایب اصلاحشده همان طور که در فصل سوم توضیح داده شد، سه مقطع مختلف از پره مکزیکو انتخاب شدند. این مقاطع به ترتیب در فواصل ۳۵، ۶۰ و ۸۲ درصد از طول پره قرار دارند. سپس برای سه سرعت ۱۰، ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه و با استفاده از روش سرعت محوری کاهش یافته، ضرایب برآ و پسای اصلاح شده بهدست آمدند. لازم به ذکر است که در انتخاب مقاطع فوق برای اصلاح ضرایب آئرودینامیکی، سعی شد که هر سه هوابر مورداستفاده در آزمون انتخاب شوند. گردابههای نوک بر مقادیر اصلاحشده را نیز موردتوجه قرار داد. شکل ۴-۱ ضرایب برآ برای سه هوابر را در حالت اصلاحنشده نشان میدهد.



شکل ۴-۱ ضرایب برآ در حالت اصلاحنشده برای سه هوابر مورداستفاده در پرهی مکزیکو[۲۳]

در شکل ۴-۲ نتایج ضرایب برآی اصلاحشده در مقایسه با ضرایب برآی دوبعدی هوابر Du رسم شده است. همان طور که در شکل ۴-۲ مشاهده میشود، تأثیر حرکت چرخشی سهبعدی پره بر مقادیر ضریب برآ در مقاطع نزدیک به ریشه بیشتر است. نزدیکترین مقطع به ریشه در این پژوهش در ۳۵ درصد طول پره قرار دارد که هوابر مورداستفاده در آزمون در این مقطع هوابر Du است. برای این مقطع در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، زاویه حمله ۲٫۷ درجه خواهد بود که مقدار ضریب برآی پیشبینی شده ۸ درصد اختلاف نسبت به ضریب دوبعدی را گزارش می کند. در همین مقطع و با افزایش سرعت باد به ۱۵ متر بر ثانیه، زاویه حمله ۹٫۶ درجه می شود. ضریب برآ با افزایش زاویه حمله افزایش سرعت باد به ۱۵ متر بر ثانیه، زاویه حمله ۹٫۶ درجه می شود. ضریب برآ با افزایش زاویه حمله افزایش سرعت باد به ۱۵ متر بر ثانیه، زاویه حمله ۱۹٫۶ درجه می شود. ضریب برآ با افزایش زاویه حمله افزایش یافته و اختلاف ضریب برآی اصلاحشده و دوبعدی ۲۲ درصد است.

Himmelskamp effect'



شکل ۴-۲ ضرایب برآی اصلاحشده درمقطع ۳۵ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب برآی دوبعدی هوابر Du همان طور که در شکل ۴-۳ مشخص است با نزدیک شدن به مقطع دوم که در فاصلهی بیشـتری نسبت به ریشه قرار دارد، به علت شروع اثر گذاری گردابههای نـوک و بـه طبـع آن کـاهش اثـر چرخش پره، مقادیر اصلاحشده به مقادیر دوبعدی گزارششده توسط آزمون نزدیک میشود.



شکل ۴-۳ ضرایب برآی اصلاحشده در مقطع ۶۰ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب برآی دوبعدی هوابر Riso

در این مقطع که هوابر پرهی مکزیکو Riso است، برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیـه و زاویـه حملـهی ۲٫۶ درجه اختلاف ۶ درصدی مشاهده میشود. با افزایش سرعت جریان باد به ۱۵ متر بر ثانیـه و زاویهی حملهی ۷٫۴ درجه اختلاف ضریب برای سه بعدی بـا دو بعـدی ۹ درصـد بهدسـت آمـده است.

با توجه به شکل ۴-۴، با نزدیک شدن بیشتر به نوک پره گردابههای نوک شکل کاملتری به خود می گیرند و این باعث می شود تأثیر حرکت چرخشی پره از بین برود و نتایج تصحیح شده همگرایی بیشتری نسبت به نتایج دوبعدی هوابرها را نشان بدهند. به طوری که برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و زاویه ی حمله ی ۳٫۵ درجه، اختلاف مقادیر اصلاح شده و دوبعدی ۵ درصد گزارش شده است.



شکل ۴-۴ ضرایب برآی اصلاحشده در مقطع ۸۲ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب برآی دوبعدی هوابر Naca

در این مقطع نیز با افزایش زاویه حمله، مقادیر ضرایب اصلاحشده بیشتر از نتایج دوبعدی است که این به علت در نظر گرفتن ترم سرعت شعاعی در تحلیل فلوئنت و بزرگتر شدن این ترم در

زواياي حمله بالاتر است.

تغییرات ضرایب اصلاحنشدهی پسا برای هوابرهای آزمون مکزیکو با تغییرات زاویه حمله در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ ضرایب پسا در حالت اصلاحنشده برای سه هوابر مورد استفاده در پرهی مکزیکو[۲۳] شکل ۴-۶ تأثیر اصلاح ضرایب بر مقادیر ضرایب پسا را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۴-۶ مشاهده می شود ضرایب پسای اصلاح شده نیز رفتاری مشابه با ضرایب برا از خود نشان می دهند. برای مقطع نزدیک به ریشه، در نظر گرفتن ترم شعاعی سرعت باعث خواهد شد که مقدار اصلاح شده از مقدار دوبعدی کمتر باشد. برای زاویه ی حمله ی ۲٫۷ درجه در این مقطع، یک اختلاف ۱۰ درصدی با ضریب پسای دوبعدی هوابر DU مشاهده می شود؛ و هرچه باد با سرعت بیشتری به هوابر برخورد کند زاویه حمله ی بیشتری شکل خواهد گرفت که این باعث بیشتر شدن مقادیر اصلاح شده از مقادیر دوبعدی می شود. به عنوان نمونه در همین مقطع و با زاویه ی جمله ۲۲٫۵ درجه ضریب پسای تصحیح شده ۲۱ درصد بیشتر از مقدار دوبعدی گزارش شده



شکل ۴-۶ ضرایب پسای اصلاحشده در مقطع ۳۵ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب پسای دوبعدی برای هوابر Du

با دور شدن از ریشه و قرار گرفتن در محدودهی هوابر Riso، گردابههای نوک شروع به تأثیر گذاری می کنند و باعث می شوند نتایج اصلاح شده به نتایج دوبعدی نزدیک شود. در این مقطع برای زاویهی حملهی ۲٫۶ درجه اختلاف مقدار اصلاح شده و مقدار دوبعدی ۸ درصد است.



شکل ۴-۲ ضرایب پسای اصلاحشده در مقطع ۶۰ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب پسای دوبعدی هوابر Riso

همان طور که در شکل ۴-۷ مشخص است، با افزایش سرعت باد به ۲۴ متر بر ثانیه زاویه حملهی ایجاد شده ۱۶٫۹ درجه خواهد شد که در این شرایط ضریب پسای پیشبینیشده ۱۰ درصد نسبت به مقدار دوبعدی بیشتر شده است.



شکل ۴-۸ ضرایب پسای اصلاحشده در مقطع ۸۲ درصد از طول پره در مقایسه با ضرایب پسای دوبعدی هوابر Naca

با توجه به شکل ۴-۸، در مقطع ۸۲ درصد طول پره و در محدودهی هوابر Naca همچنان کاهش تأثیر اصلاح ضرایب مشاهده میشود به طوری که برای زاویه حمله ی ۳٫۵ درجه تنها ۶ درصد کاهش ضریب پسا مشاهده میشود. در این مقطع اختلاف ضرایب اصلاح شده با ضرایب دوبعدی به کمترین حد خود بین این سه مقطع رسیده است ولی برای زوایای حمله ی بزرگتر، مقادیر بازهم نسبت به دوبعدی بیشترند که باید در مقطعی نزدیکتر به نوک حتی به مقادیری کمتر و همگراتر نیز برسند[۴۴].

4-4 نتايج تخمين پسبادها

در این بخش نتایج پیشبینی میدان پس بادها که از شبیهسازی توسط مدل خط عملگر

توسعه یافته به دست آمده است، در مقایسه با نتایج به دست آمده از شبیه سازی روتور کامل ارائه و اعتبار سنجی شده است. شرایط شبیه سازی در این پژوهش ک املا مط ابق با ضوابط حاکم بر آزمون تجربی مکزیکو است. آزمون مکزیکو برای شرایط مختلفی طراحی و انجام شد که در این پژوهش از نتایج مربوط به شرایط طراحی توربین یعنی سرعت محوری ۱۵ متر بر ثانیه، سرعت دورانی ۴۲۴٫۵ دور بر دقیقه، نسبت سرعت نوک ۶٫۷ و زاویه گ م ۲٫۳ - درجه استفاده و نتایج برای حالت جریان غیر یاو بررسی شد. در آزمون تجربی مکزیکو برای ثبت نتایج، حسگری در راستای طولی جریان و در فاصلهی ۱٫۳۷۷ متر از ریشه پره قرار داده شده است که داده ها را در بازه ۵٫۴ متر قبل از توربین تا ۶ متر بعد از توربین ثبت کند. از همین رو برای دو توزیع سرعت محوری و شعاعی و برای شبیه سازی انجام شده، نتایج حاصل با نتایج آزمون تجربی در این مقطع طولی مقایسه خواهد شد. همچنین حسگری در راستای شعاعی در فاصله ی ۳٫۰ متر بعد از توربین برای ثبت داده ها در بازهی ۱٫۳۲۳ تا ۲٫۲۳۳ قرار داده شده است که داده ها را در

برای محاسبهی نتایج پس بادها خطوط عملگر به ۶۰ قسمت تقسیم بندی شده و از شبکه بندی غیریکنواخت و بهبودیافته در ناحیهی اطراف توربین استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش، از سلولهای مکعبی شکل در شبکه بندی استفاده شده و سلولها در هر سه راستا دارای یک اندازه می باشند.

شکل ۴-۹، توزیع سرعت میدان پس بادها در راستای طولی جریان و در فاصلهی ۱٫۳۷۷ متـر از ریشهی پره را نشان میدهد.



شکل ۴-۹ توزیع سرعت محوری برای مقطع ۱٬۳۷۷ متر در طول پره برای شبیهسازی و حل عددی در مقایسه با نتایج تجربی[۳۶]

نتایج حاصل از شبیهسازی فلوئنت، خط عملگر و خط عملگر توسعهیافته در مقایسه با نتایج آزمون تجربی در شکل ۴-۹ مشخص گردیده است. مطابق شکل در نتایج تجربی یک کاهش قابل ملاحظه در سرعت محوری، درست بعد از صفحه روتور مشاهده می شود و نوساناتی در سرعت پسبادهای این ناحیه وجود دارد. این نوسانات ناشی از تغییر هندسه سطح مقطع پره و عبور از هوابر Du به هوابر Riso است. هوابر Riso دارای ضریب آئرودینامیکی متفاوتی برای نیروی برا در زاویه حملهی صفر درجه نسبت به دو هوابر دیگر است که همین امر منجر به تغییراتی در قدرت گردابه های تشکیل شده در نزدیکی این ناحیه و بروز نوسان می شود.

نتایج پیشبینیشده توسط شبیهسازی فلوئنت با دقت مناسبی میدان سرعت پسباد را تخمین میزند. دقت جوابها در شبیهسازی فلوئنت با افزایش فاصله از روتور کاهش مییابد بهطوری که بیشترین اختلاف برای شبیهسازی و نتایج آزمایشگاهی ۱۹ درصد مشاهده شده است که این به دلیل افزایش سایز سلولها در شبکهبندی است. استفاده از شبکهبندی غیریکنواخت و بهبودیافته باعث شده است دقت مناسبی از روش خط عملگر مشاهده شود. با اعمال ضرایب اصلاحشده به مدل، مدل توسعهیافته نتایج واقعیتری را نشان میدهد که دقت مدل خط عملگر پیاده شده را دقیقتر آشکار میکند. در نزدیکی روتور به دلیل استفاده از شبکهی مناسبتر و بهبودیافته نتایج همگرایی بیشتری را گزارش میدهند. با اعمال ضرایب اصلاحشده بیشینه خطای مدل خط عملگر کاهش یافته است. بهطوریکه از ۱۶ درصد برای مدل خط عملگر به ۱۱ درصد برای مدل توسعهیافته کاهش پیدا کرده است.

شکل ۴-۱۰ توزیع سرعت میدان پس بادها در راستای شعاعی را برای شبیهسازی فلوئنت، خط عملگر توسعه نیافته و توسعهیافته نشان میدهد. نتایج آزمایشگاهی توسط حسگر طولی نصب شده در فاصلهی ۱٬۳۷۷ متر در طول پره ثبتشدهاند.



شکل ۴-۱۰ توزیع سرعت شعاعی در مقطع ۱٬۳۷۷ متر در طول پره برای شبیهسازی و حل عددی در مقایسه با نتایج تجربی

همانطور که در شکل ۴-۱۰ مشخص است، شبیهسازی فلوئنت و مدل عملگر توانستهاند با دقت مناسبی الگوی رفتاری ترم شعاعی سرعت را پیشبینی کنند. با اعمال ضرایب اصلاحشده به مدل عملگر تغییر محسوسی در نتایج مشاهده نشد. در ۰ = mx بیشینه خطای پیشبینی برای خط عملگر توسعه یافته ۱۱ درصد می باشد که ۶ درصد بهبود را نسبت به قبل از اصلاح ضرایب نشان
میدهد. شبیهسازی پره نیز با ۱۰ درصد خطا در همین مکان، نتایج سرعت شعاعی را پیشبینی کرده است.

شکل ۴-۱۱ توزیع سرعت جریان پسباد را در راستای طولی جریان برای شبیهسازی، مـدل خـط عملگر توسعهیافته و توسعهنیافته نشان میدهد. نتایج این شکل مربوط به حسگر راستای شعاعی که در فاصلهی x = ..7 m پاییندست توربین قرار دارد، است.

همان طور که در شکل ۲۰۴۴ مشخص است در موقعیت m = 1.7 m در امتداد پره یک افت بزرگ در سرعت اندازه گیری شده برای آزمون تجربی مشاهده می شود. این امر به دلیل وقـوع پدیـدهی ریزش گردابه ⁽توسط ناحیهی انتقال بین هوابرهای Du و Riso است.



شکل ۲-۱۱ توزیع سرعت محوری در فاصلهی ۲۰۶۵۱۴ = x بعد از روتور برای شبیهسازی و حل عددی در مقایسه با نتایج تجربی

وجود گردابههایی با چنین شدت به تغییر گردش^۲روی پره مربوط می شود که منجر به بروز خطا در اندازه گیری و ثبت دادهها توسط حسگرهای آزمون تجربی شده است. برای این قسمت از نتایج

Vortex Shedding^{γ} Circulation^{γ}

اصلاح سهبعدی ضرایب آئرودینامیکی، بیشینه خطای مدل خط عملگر را از ۲۱ درصد به ۱۸ درصد کاهش داده است. این خطا مربوط به ۲.۱*m* است. شبیهسازی پره در فلوئنت نیـز در همین فاصله بیشترین خطا را برابر با ۱۷ درصد گزارش میکند.

شکل ۴-۱۲ توزیع سرعت شعاعی را در فاصله یx = ... m برای شبیه سازی و مدل عملگر توسعه یافته و توسعه نیافته نشان می دهد. نتایج این قسمت نیز توسط حسگری که در پایین دست توربین قرار دارد ثبت شده است.



شکل ۴-۱۲ توزیع سرعت شعاعی در فاصلهی ۲۰۰۶۵۱۴ = x بعد از روتور برای شبیهسازی و حل عددی در مقایسه با نتایج تجربی

همان طور که در شکل مشخص است مدل خط عملگر توسعه یافته نسبت به مدل خط عملگر در کل تخمین مناسب تری را ارائه می کند. بیشینه خطای شبیه سازی در ۲.۴.۳ = ۲ ثبت شده است که برای مدل عملگر ۲۳ درصد است. اصلاح ضرایب آئرودینامیکی در همین فاصله نتایج را ۳ درصد نزدیک تر به نتایج تجربی پیش بینی می کند. شبیه سازی فلوئنت هرچند در بسیاری از مقادیر R تخمین مناسب تری نسبت به دو مدل قبلی ارائه می دهد اما بیشینه خطای شبیه سازی آن ۲۵ درصد مشاهده شده است که در همین فاصله است. به طور کل می توان گفت خطی شبیهسازی و حل عددی در پیشبینی ترم شعاعی سرعت بیشتر است و این بیشینهی خطا در مقاطعی اتفاق میافتد که نواحی انتقال هوابرها را شامل میشود . همچنین با نزدیک شدن به نوک پره این خطا افزایشیافته و اختلاف مقادیر به دست آمده از مدل عملگر و توسعه یافته آن کاهش مییابد. با توجه به کاهش تأثیر اصلاح ضرایب در مقاطع نزدیک به نوک، این کاهش منطقی به نظر می سد.

شکل ۴-۱۳ گرادبههای تشکیل شده در پشت توپی و روتور را برای سرعت ۱۵ متر بر ثانیه نشان میدهد.



شکل ۴-۱۳ تشکیل گردابهها در پشت روتور و توپی

شکل ۴-۱۴ توزیع فشار در ناحیهی نوک پرهی مکزیکو را برای سرعت ۲۴ متر بر ثانیه نشان میدهد. همان طور که در شکل مشخص است به دلیل سرعت بالا در جلوی پره فشار مقدار کمتری دارد. در پشت پره به دلیل کمتر بودن بردار سرعت، فشار بیشتری تولید می گردد که این اختلاف فشار ایجاد شده باعث بهوجود آمدن نیروی برا در راستای عمود بر جریان می شود که اساس کار توربین های بادی محور افقی است.



شکل ۴-۱۴ توزیع فشار روی پره

شکل ۴-۱۵ خطوط جریان برای پرهی شبیهسازی شده در سرعت ورودی ۲۴ متر بر ثانیه را

نشان میدهد.



شکل ۴-۱۵ نمایش خطوط جریان برای پرهی شبیهسازی شده در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه همچنین خطوط جریان شکل گرفته در پشت توپی در فواصل دور از روتور نیز در شکل ۴-۱۶ نمایش داده شدهاست.



شکل ۴-۱۶ خطوط جریان در پشت توپی طراحی شده برای سرعت ۲۴ متر بر ثانیه

4-5 نتايج تخمين نيروها

در این بخش نتایج تخمین نیروهای عمودی و مماسی برای شبیهسازی پره در فلوئنت، مدل خط عملگر و خط عملگر توسعهیافته با نتایج تجربی آزمون مقایسه شده است. شکل ۴-۱۷ توزیع نیروی عمودی در امتداد طول پره برای شبیهسازی، مدل عملگر و عملگر اصلاحشده را نشان میدهد.



شکل ۴-۱۷ توزیع نیروی عمودی در امتداد طول پره در مقایسه با نتایج تجربی

شکل ۴-۱۸ توزیع نیروی مماسی در امتداد طول پره برای شبیهسازی، مدل خط عملگر توسعهیافته و توسعهنیافته را نشان میدهد. با توجه به نتایج بهدستآمده، شبیهسازی فلوئنت توانست بهترین تخمین را در این قسمت نسبت به دو مدلسازی دیگر ارائه کند. بیشترین اختلاف برای شبیهسازی و نتایج تجربی ۱۳ نیوتن است.



شکل ۴-۱۸ توزیع نیروی مماسی در امتداد طول پره در مقایسه با نتایج تجربی

4-6 نتایج پارامترهای عملکردی

در بخش قبل به بررسی نتایج مربوط به نیروهای مماسی و عمودی پرداخته شد. در این بخش نتایج مربوط به پارامترهای عملکردی توربین موردبحث و بررسی قرار خواهد گرفت. در توربینهای بادی محور افقی نیروی محوری^۱کل از نیروی پسایی که توسط پره، برج، توپی و کمربندهای انتقالی^۲در پشت روتور ایجاد میشود حاصل میشود. سهم عمدهی تولید نیروی محوری را پره و توپی دارند. بررسی نتایج نیروی محوری کل و گشتاور⁷کل به دست آمده از شبیه سازی، مدل خط عملگر و عملگر توسعه یافته نشان میدهد که مدل خط عملگر توسعه یافته مبیه سازی، مدل خط عملگر و عملگر توسعه یافته نشان میدهد که مدل خط عملگر توسعه یافته به خاطر دقت بیشتری که در تخمین نیروهای عمودی پره دارد، با تقریب بهتری نتایج را شبیه سازی، مدل خط عملگر توسعه یافته نشان میدهد که مدل خط عملگر توسعه یافته می مدودی پره دارد. با تقریب بهتری نتایج را می مرود یا می مدودی پره دارد. با تقریب بهتری نتایج را می مرود یا می مدودی پره دارد. با تقریب بهتری نتایج را می می مدودی پره دارد. با تقریب بهتری نتایج را می مرود یا مرودی مدودی پره دارد. با تقریب بهتری نتایج را می مدودی پره دارد. با تقریب بهتری نتایج را می مرودی مرودی کمان می مدود مدل خط عملگر توسعه یافته بین می کند. شکل ۴-۱۹ این نتایج را برای سه حالت تلاطم، طراحی و واماندگی نشان می دهد. همان طور که در شکل ۴-۱۹ می نتایج را سرای شبیه سازی فلوئنت نتایج مربوط به

Thrust¹ Transmission belt⁷ Torgue⁷ نیروی محوری برای سه سرعت ۱۰، ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه در مقایسه با نتایج تجربی رسم شده است. برای سرعت طراحی آزمون مکزیکو این نتایج با خروجی های مدل خط عملگر و مدل توسعه یافته مقایسه شده اند. بررسی نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش سرعت جریان باد از دقت نتایج کاسته شده است. برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ۶ درصد اختلاف با نتایج تجربی مشاهده شد. با افزایش سرعت باد و رسیدن به ناحیه ی طراحی این اختلاف به ۱۲ درصد رسیده است. در ناحیه ی واماندگی مطابق انتظار این اختلاف افزایش یافته و به ۲۲ درصد رسیده است.



شکل ۴-۱۹ نیروی محوری کل بهدست آمده در مقایسه با نتایج تجربی

برای سرعت طراحی، اصلاح ضرایب آئرودینامیکی باعث شد خطای پیشبینی نیروی محوری کل ۲ درصد کاهش پیدا کند. با توجه به افزایش دقت مدل اصلاح شده در پیشبینی نتایج نیروهای عمودی و مماسی این کاهش درصد خطا منطقی بهنظر میرسد. لازم به ذکر است که در محاسبهی پارامترهای عملکردی توربینبادی مکزیکو مدل خط عملگر و توسعهیافتهی آن دقت بالاتری نسبت به شبیهسازی پره آزمون از خود نشان دادند. نمودار گشتاور کل بهدست آمده برای شبیهسازی پره، برای سه حالت تلاطم، طراحی و واماندگی آزمون مکزیکو در مقایسه با نتایج تجربی در شکل ۴-۲۰ رسم شدهاست. مقایسه این نتایج با جوابهای بهدست آمده از مدل عملگر نشان میدهد که برای سرعت ۱۵ متر بر ثانیه، اصلاح ضرایب آئرودینامیکی باعث بهبود گشتاور محاسبه شده به میزان ۳ نیوتن شدهاست. در این سرعت بهترین جواب شبیهسازی پره در فلوئنت ۱۳ درصد خطا را گزارش میکند. حال آنکه این درصد برای مدل عملگر توسعه یافته ۷ درصد بودهاست.



شکل ۴-۲۰ توزیع گشتاور بهدست آمده از شبیهسازی و حل عددی در مقایسه با نتایج تجربی

با افزایش سرعت جریان باد، خطای شبیه سازی پره در فلوئنت افزایش یافته به طوری که برای سرعت ۲۴ متر بر ثانیه ۲۰ درصد خطا برای محاسبه ی گشتاور کل مشاهده شده است. با توجه به اهمیت شبکه بندی و مدل آشفتگی انتخاب شده ، افزایش خطای شبیه سازی با افزایش عدد رینولدز منطقی به نظر می رسد. به طور کلی در اعتبار سنجی مسائل مکانیک سیالات محاسباتی با توجه به راهنمای AIAA ، خطاهای زیر میتواند از علـل اخـتلاف نتـایج شبیهسـازی بـا نتـایج آزمایشگاهی باشد.

۱–۶–۴ خطاهای تخمین فیزیکی

خطاهای تخمین فیزیکی متعددی در شبیهسازی وجود دارد. مهمترین آنها فرض رژیم جریان به صورت ایستاده، مغشوش و چرخشی تناوبی است. فرض چرخش تناوبی پره به این معنی است که برج باید از مدل جدا شود و تونل باد به عنوان یک سیلندر دایروی فرض شود. فرض جریان ایستا همهی تاثیرات دینامیکی را از بین میبرد. با توجه به این که این ویژگیها در نتایج آزمایشگاهی در نظر گرفته میشود، قسمت عمده ی خطا، ناشی از همین فرض میباشد. فرض جریان مغشوش نیز باعث چشم پوشی از خواص جریان آرام میشود که در پیش بینی واماندگی دینامیکی مخصوصا در نسبت سرعت نوک پایین تأثیر گزار خواهد بود.

۲-۶-۲ خطاهای گردسازی رایانه^۵

نسبت تأثیر این خطا بر شبیهسازی نسبت به خطاهای دیگر معمولا ناچیز است.

۳-۶-۴ خطای همگرایی تکراری^۶

پروسهی حل تکراری تا آنجا ادامه پیدا میکند که هیچ پرش بزرگی در باقی ماندهها مشاهده نشود با این حال برای بعضی از مقادیر λ^γتغییراتی در جوابهای باقی مانده ها مشاهده میشود. تاثیر این خطا بیشتر بر روی محاسبه نیروی محوری و گشتاور گزارش شده است.

A recognizable deficiency in any phase or activity of modeling and simulation that is not due ' to lack of knowledge

- Physical approximation errors^r
- Stationary regime"
- Rotatinally periodic*
- Computer round off errors $^{\scriptscriptstyle \Delta}$
- Iterative convergence error⁶

Tip speed ratio^{ν}

۴-۶-۴ خطای گسستهسازی^۱

برای رسیدن به نتایجی با تخمین بهتر و خطای کمتر نمیتوان از تأثیر یک شبکهبندی مناسب چشمپوشی کرد. در ناحیه لایهمرزی و نقاط انتهایی اتصال هوابرها یک شبکهبندی دقیق و مناسب میتواند منجر به تخمین مناسبتر جوابهای مورد انتظار شود. با افزایش λ برای رسیدن به یک همگرایی مناسب اهمیت شبکهبندی افزایش مییابد.

Descritization error

۵) فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادها

5-1 مقدمه

در این فصل نتایج بهدست آمده از شبیه سازی پره و تأثیر اعمال این نتایج بر مدل خط عملگر به طور خلاصه و کلی گزارش شده است. در ادامه پیشنهادهایی برای کارهای پژوهشی آینده ارائه گردیده است.

2-5 نتيجەگىرى كلى

در این پژوهش بهمنظور توسعهی مدل خط عملگر پیادهسازی شده در نرمافزار متنباز اوپنفوم، بر روی ضرایب آئرودینامیکی پرهی توربین بادی مکزیکو اصلاح سهبعدی صورت گرفت. روشهای مختلفی برای اصلاح ضرایب برآو پسای دوبعدی وجود دارد. در این پژوهش با شبیهسازی پـرهی آزمون مکزیکو در نرمافزار فلوئنت و با استفاده از روش سرعت محوری کاهشیافته، در سه مقطع که به ترتیب در فواصل ۳۵، ۶۰ و ۸۲ درصد طول پره قرار دارند و برای سه سرعت ۱۰، ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه ضرایب اصلاحشده استخراج گردیدند. ضرایب اصلاحشده در مقاطع نزدیک به ریشه تفاوت بیشتری با مقادیر دوبعدی دارند. برای نزدیکترین مقطع به ریشهی پره و سرعت ۱۰ متر بر ثانیه مقایسه نتایج با ضرایب برآی هوابر Du یک اختلاف ۸ درصدی را گزارش میکند. با نزدیک شدن به نوک پره به دلیل شکل گیری گردابههای نوک از تأثیر اصلاح کم شده بهطوریکه برای مقطع ۸۲ درصد و سرعت ۱۰ متر بر ثانیه تنها ۵ درصد افزایش در مقادیر ضریب برآ مشاهده شد. ضرایب پسای اصلاحشده نیز از الگویی مشابه به ضرایب برآ پیروی میکنند. با افزایش فاصلهی مقطع پره از ۳۵ درصد به ۸۲ درصد، ۴ درصد از اختلاف ضرایب اصلاحشده با ضرایب دوبعدی کم شده است. بررسی نتایج بهدستآمده در این بخش نشان میدهد که با افزایش سرعت جریان باد و بالطبع آن افزایش زاویهی حمله، اصلاح ضرایب تاثیر گزاری بیشـتری را از خود نشان میدهد. در مقطع ۳۵ درصد و با افزایش سرعت باد از ۱۰ به ۲۴ متر بر ثانیه اختلاف ضریب برآی اصلاحشده با دوبعدی از ۶ درصد به ۲۲ درصد افزایش پیدا می کند. بعد از بررسی نحوهی اثر گذاری شبیه سازی پره بر ضرایب آئرودینامیکی، ازین ضرایب اصلاح شده به منظور توسعه ی مدل خط عملگر پیاده سازی شده در اوپن فوم استفاده گردید.

مدل خط عملگر، یک روش حل عددی جدید با دقت و سرعت بسیار بالا است که به علت ساختار متفاوت محاسبهی نیروها و عدم نیاز به محاسبات جریان در لایهمرزی به شدت موردتوجه پژوه شگران قرار گرفته است. با استفاده از ضرایب اصلاح شده و اعمال این ضرایب به حلگر، مدل پیاده شده در تخمین ویژگی های جریان و محاسبه ی پارامترهای عملکردی عملکرد بهتری پیدا کرد. توسعه ی مدل توانست بیشینه درصد اختلاف نتایج سرعت محوری برای راستای شعاعی جریان در m ۱.۳۷۷ مدل توانست بیشینه درصد اختلاف نتایج سرعت محوری برای راستای شعاعی این کاهش ۶ درصد بوده است. بررسی نتایج در راستای طولی جریان و برای m در استای شعاعی پایین دست جریان، بهبود اعمال ضرایب اصلاح شده بر بیشینه اختلاف مدل عملگر با نتایج تجربی ۳ درصد بوده است.

بررسی نتایج مربوط به تخمین نیروهای عمودی در طول پره نشان داد که با افزایش فاصله از ریشه از تأثیر اصلاح ضرایب کاسته میشود. با استفاده از ضرایب اصلاحشده، خطای بیشینه مدل خط عملگر در تخمین نیروی عمودی از ۳۰ نیوتن به ۱۴ نیوتون کاهش پیدا کرده است. برای نیروی مماسی و به دلیل کوچکتر بودن مقادیر این نیرو، تأثیر اصلاح نیز کوچک بوده است به طوری که در m به طوری که در m اصلاح تربی نزدیک بوده است.

مشاهدهی تأثیر استفاده از ضرایب اصلاحشده بر مقادیر نیروی محوری و گشتاور کل در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه نشان داد که خطای تخمین نیروی محوری کل ۲ درصد کاهش پیدا کردهاست. این درصد بهبود برای گشتاور کل در همین سرعت ۳ نیوتن بودهاست.

5-3 پیشنهادها

با توجه به نوپا بودن تئوریهای عملگر و بهطور خاص خط عملگر برای تحلیل توربینهای بادی محور افقی، پتانسیل بالایی برای کارهای پژوهشی در آینده دیده میشود. بررسی نحوهی تأثیر متفاوت روشهای مختلف اصلاح ضرایب آئرودینامیکی بر روی نتایج مدل خط عملگر، بررسی تأثیر نحوهی توزیع نیروها بر روی نتایج مدل عملگر، بررسی تأثیر اصلاح ضرایب در مقاطع نزدیک به شروع پدیدهی واماندگی، بررسی تأثیر اصلاح ضرایب بر پدیدهی تأخیر واماندگی یا تأثیر هیملسکمپ ازجمله این پیشنهادها برای کارهای پژوهشی آینده میتواند باشد.

- [1] H.-J. M. Wagner/, Introduction to wind energy system. Springer, 2009.
- B. K. Sandercock, "Effects of Wind Energy Development on Nesting Ecology of Greater Prairie-Chickens in Fragmented Grasslands," vol. 28, no. 4, pp. 1089–1099, 2014.
- [3] I. Blanco, "The economics of wind energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 1372–1382, 2009.
- [4] J. Kostyack, "wind energy economics," *The Wind Energy Foundation*.
 [Online].Available:http://windenergyfoundation.org/about-windenergy/economics/.
- [5] GWEC, "global wind statistics," *Global wind energy council*, 2015.
 [Online]. Available: http://www.gwec.net/global-figures/graphs/. [Accessed: 10-Feb-2016].
- [6] M. of Energy, "overview of wind energy in iran," *Renewable Energy and EnergyEfficiencyOrganization*,2017.[Online].Available:http://www.satba.gov.ir/fa/wind/perspective-overview of wind energy in iran.
- [7] P. Dvorak, "Vertical-axis wind turbines: what makes them better?," windpower engineering and development, 2014. [Online]. Available: http://www.windpowerengineering.com/design/vertical-axis-wind-turbines/.
- [8] Y. Aksu, "Horizontal Axis Wind Turbines HAWT," Sakarya University, 2011. [Online]. Available: http://www.turbinesinfo.com/horizontal-axiswind-turbines-hawt/. [Accessed: 05-Jul-2017].
- [9] P. J. Schubel and R. J. Crossley, "Wind turbine blade design," *Energies*, vol. 5, no. 9, pp. 3425–3449, 2012.
- [10] J. N. Sørensen, Blade-Element/Momentum Theory. Springer, 2015.
- [11] H. Glauert, Aerodynamic Theory. Springer Berlin Heidelberg, 1935.

- [12] M. O. L. Hansen, Aerodynamics of wind turbines. Taylor & Francis, 2008.
- [13] J. N. Sørensen, "Blade-Element/Momentum Theory," Springer, Cham, 2016, pp. 99–121.
- [14] T. Burton, Wind Energy Handbook. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [15] J. N. Sorensen and W. Z. Shen, "Numerical Modeling of Wind Turbine Wakes," J. Fluids Eng., vol. 124, no. 2, p. 393, 2002.
- [16] N. Troldborg, Actuator Line Modeling of Wind Turbine Wakes, phd thesis. Technical University of Denmark, 2008.
- [17] R.-E. Keck, "A numerical investigation of nacelle anemometry for a HAWT using actuator disc and line models in CFX," *Renew. Energy*, vol. 48, pp. 72–84, 2012.
- [18] A. Jeromin, A. Bentamy, and A. P. Schaffarczyk, "Actuator disk modeling of the Mexico rotor with OpenFOAM *," vol. 6001, no. march 2013, p. 6001, 2014.
- [19] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind energy explained : theory, design and application.* Wiley, 2009.
- [20] H. Yang, W. Shen, H. Xu, Z. Hong, and C. Liu, "Prediction of the wind turbine performance by using BEM with airfoil data extracted from CFD," *Renew. Energy*, vol. 70, pp. 107–115, 2014.
- [21] J. N. Sørensen, W. Z. Shen, and X. Munduate, "Analysis of wake states by a full-field actuator disc model," *Wind Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 73–88, Dec. 1998.
- [22] B. Plaza, R. Bardera, and S. Visiedo, "Journal of Wind Engineering Comparison of BEM and CFD results for MEXICO rotor aerodynamics," *Jnl. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 145, pp. 115–122, 2015.

[25] A. Khanjari and A. Sarreshtehdari, "Modeling of Energy and Exergy Efficiencies of a Wind Turbine Based on the Blade Element Momentum Theory Under Different Roughness Intensities," journal of energy resourse technology, vol. 139, no. March, pp. 1–8, 2017.

- [28] E. Svenning and J. Magnusson, "Chalmers University of Technology Implementation of an actuator disk in OpenFOAM Developed for openfoam," 2010.
- [29] E. Mahmoodi and A. P. Schaffarczyk, "Actuator Disc Modeling of the MEXICO Rotor," Wind Energy, pp. 29–30.

[31] Q. Wang, Y. Xu, J. J. Song, C. F. Li, P. F. Ren, and J. Z. Xu, "3D stall delay effect modeling and aerodynamic analysis of swept-blade wind turbine," J. *Renew. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 6, p. 63106, Nov. 2013.

- [32] N. Troldborg, "Actuator line modeling of wind turbine wakes," Technical University of Denmark, 2008.
- [33] W. Jin, "Numerical Simulation of Wind Turbine Wakes based on Actuator Line Method in NEK5000," 2013.
- [34] H. Zhong, P. Du, F. Tang, and L. Wang, "Lagrangian dynamic large-eddy simulation of wind turbine near wakes combined with an actuator line method," *Appl. Energy*, vol. 144, pp. 224–233, 2015.
- [35] M. Tzimas and J. Prospathopoulos, "Wind turbine rotor simulation using the actuator disk and actuator line methods," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 753, no. 3, p. 32056, Sep. 2016.

[۳۶] م. بوجاری، "مدلسازی پسباد توربین بادی آزمون مکزیکو با استفاده از توزیع نیروی بینوی بینوی در مدل خط عملگر در نرم افزار اپن فوم،" *مهندسی مکانیک مدرس* , vol. ۱۶, no. ۹ , ۱۳۹۵.

- [37] A. Bechman, N. Sørensen, and F. Zahle, "CFD simulations of the MEXICO rotor," Wind ENERGY, 2011.
- [38] H. Snel, J. G. Schepers, and B. Montgomerie, "The MEXICO project (Model Experiments in Controlled Conditions): The database and first results of data processing and interpretation," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 75, no. 1, p. 12014, Jul. 2007.
- [39] M. Carrion, M. Woodgate, R. Steijl, G. Barakos, S. Gomez-Iradi, and X. Munduate, "CFD and Aeroelastic Analysis of the MEXICO Wind Turbine," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 555, no. 1, p. 12006, Dec. 2014.
- [40] J. J. Bertin and R. M. (Russell M. Cummings, Aerodynamics for engineers. .
- [41] F. Porté-Agel, H. Lu, and Y.-T. Wu, "Interaction between Large Wind Farms and the Atmospheric Boundary Layer," *Proceedia IUTAM*, vol. 10, no. 0, pp. 307–318, 2014.

- [42] A. C. Vladut, C. I. Cosoiu, A. M. Georgescu, M. Degeratu, and R. M. Damian, "Wind Tunnel and Numerical Modeling of Atmospheric Boundary Layer Flow over Bolund Island," *Energy Procedia*, vol. 85, no. November 2015, pp. 603–611, 2016.
- [43] S. J. Schreck, N. N. Sorensen, and M. C. Robinson, "Aerodynamic structures and processes in rotationally augmented flow fields," *Wind Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 159–178, Mar. 2007.
- [44] S. Burmester, S. Gueydon, and M. Make, "Determination of Scaled Wind Turbine Rotor Characteristics from Three Dimensional RANS Calculations," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 753, p. 82003, Sep. 2016.
- [45] J. Johansen and N. N. Sørensen, "Aerofoil characteristics from 3D CFD rotor computations," *Wind Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 283–294, Oct. 2004.
- [46] K. Nilsson, W. Z. Shen, J. N. Sørensen, S. Breton, and S. Ivanell, "Validation of the actuator line method using near wake measurements of the MEXICO rotor," no. February 2014, pp. 499–514, 2015.
- [47] G. Heidarinejad and T. Sedaghat, "Simulation of Turbulent Flow using LES Method with Localized Dynamic Sub Grid Scale Model," مهندسی مکانیک vol. 10, no. 0, pp. 31–41, Sep. 1937.
- [48] H. Dumitrescu and V. Cardouo, "Delayed stall modelling of the rotating blades," *Proc. Rom. Acad. Ser. A - Math. Phys. Tech. Sci. Inf. Sci.*, vol. 12, no. 2, pp. 100–108, 2011.

پيوست

پیوست۱ فهرست اسامی لاتین

Spera	اسپرا
Óskarsdóttir	اسکارزدتر
Snel	اسنیل
Andersson	اندرسون
Herráez	ايرائيز
Emanuel	ايمانول
Burton	برتن
Bak	بک
Beurskens	بورسكنز
Boorsma	بورسما
Beaumier	بيومير
Prospathopoulos	پروسپاتپولوس
Plaza	پلازا
Troldborg	ترلدبرگ
Tummala	تومالا
Jeromin	جرومين
Jin	جين
Chaviaropoulos	چاويروپولوس
Schluntz	چلانز
Chu	چو
Chuiton	چوشن
Rosen	رزن
Reynier	رينير
Tzimas	زيمس
Gsänger	سانگر
Sørensen	سورنسن
Svenning	سونينگ
Sanderse	سندرز
Schaffarczyk	شافارزيک
Schreck	شریک

Schepers	شيپرز
Christopher	كريستفر
Keck	کک
Kulunk	كولانك
Grasso	گراسو
Glauert	گلارت
Leung	لنگ
Liu	لى
Leishman	ليشمن
Manwell	مانول
Myken	مایکن
Müller	مولر
Micallef	میکالف
Mikkelsen	مىكلسن
Snel	نل
Nelson	نلسون
Wang	وانگ
Hansen	ھانسن
Hau	هايو
Yang	۔ یانگ
Leung	يونگ

پیوست ۲ کد متلب

Clear all

Clc

File name ='du.xlsx' ;

AA=xlsread(filename);

y=AA(:,1);

z=AA(:,2);

chord=0.2; % chord Length

teta=10; % twist angle

landa=-2.3; % pitch angle

 $beta{=}teta+landa$

alfa=5;angle of attack

phi=alfa + teta + landa; % Flow angle

T=chord*[cosd(beta),-sind(beta);sind(beta),cosd(beta)];

B=T*[y,z]';

Y=B(1,:)';

Z=B(2,:)';

P=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 8 7 6 5 4 3 2 1]; %Pressure

for i=1:1:18 % x y selection

ysel(i)=Y(3*i);

zsel(i)=Z(3*i);

m = (Z(3*i+1)-Z(3*i-1))/(Y(3*i+1)-Y(3*i-1));

n=(-1)/m;

gama=atand(n);

P_i(i)=sind(gama);

P_j(i)=cosd(gama);

End

P_it=0;

P_jt=0;

for i=1:1:18

 $P_i = P_i t + P_i(i);$

 $P_{j}=P_{j}t+P_{j}(i);$

end

 $P_i = P_i t / 18;$

 $P_j = P_j t/18;$

TT=[cos(phi),sin(phi;-sin(phi),cos(phi)];

 $C=TT*[P_iP_j];$

 $F_d = C(1);$

F1=C(2);

 $C_d = (2*F_d)/(ro*A*(V^2));$

 $Cl=(2*F_L)/(ro*A*(V^2));$

Abstract

The use of the two-dimensional Aerodynamic coefficient in a numerical method which analyzes horizontal axis wind turbine such as Actuator line has caused an increase in the calculation errors. Investigating the effect of a 3D correction of the Aerodynamic coefficient on results obtained from Actuator line modeling of the Mexico rotor on OpenFoam is the aim of this study. There are various methods to correct two-dimensional coefficients. In this study, by simulating the blade of the Mexico rotor on Fluent and using the Reduced Velocity Method, lift and drag coefficients for three particular sections of the blade have been corrected. This method has been adopted in order to correct three different speeds 10, 15 and 24 meters per second. Results of the three-dimensional correction have demonstrated that in the nearroot sections, the coefficients differed noticeably from the 2D coefficients. The calculated lift coefficient at the nearest section to the root has been estimated 8% less than the two-dimensional coefficients. By increasing distance from the root due to the formation of tip vortices, corrected results and the two-dimensional coefficients converged into the expected results. In the closest section to the blade's tip, the lift coefficient obtained from the turbulence model has been calculated 5% higher than the 2-D coefficient. The Actuator line model is very powerful to predict the flow behavior around horizontal axis wind turbines. Since it is unnecessary to generate mesh around the boundary layer, the high speed of computation is another feature of the Actuator line model. Corrected coefficients have been applied in the Actuator line model and the results of performance parameters were investigated. At r = 1.377 meters, the result of axial velocity has improved to have an error of 4%. This decrease in the calculated error has also been observed in the estimation of axial and tangential distributed forces on the blade. The developed model was able to reduce the error of axial velocity about 16 N. The improvement rate of the design speed was 2% for the thrust calculation and 3% for the torque estimation.

Keywords: Mexico rotor, full rotor simulation, corrected aerodunamic coefficient, Reynolds average naveir stoks, Actuator line model, large Eddy simulation, farwake



Shahrood University of Technology Faculty of Mechanical Engineering

Developed Actuator Line modeling of Horizontal Axis Wind Turbine under Redial Flow

Salman Sadeghi

Supervisor:

Mohammad Hassan Keyhani

Adviser:

Esmaeel Mahmoodi

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)

September, 2017