

به نام خدا



Market Code

شبیه سازی عددی کارایی استفاده از یکسو کننده بر توربین باد

عمود محور

 دانشگاه صنعتی امیرکبیر	مهدی اصغریان: کارشناسی ارشد، هوافضا-آیروپنایمیک	توسعه دهنده:
مهدی اصغریان		تهیه کننده مستند:
۹۳/۰۶/۰۴		تاریخ تنظیم سند:

چکیده

با توجه به مفهوم انرژی باید مدیریت و دانش بشری منجر به استفاده حداکثری از منابع انرژی شود. یکی از راه‌های رسیدن به این مهم افزایش بازدهی و بهینه‌سازی رفتار مولدهای انرژی تحت شرایط مختلف جوی و محیطی است.

وظیفه توربین‌های بادی، تبدیل انرژی باد به کار مکانیکی و تولید الکتریسیته می‌باشد. این نوع توربین‌ها به دو دسته کلی محور افقی و محور عمودی تقسیم می‌شوند. توربین‌های محور افقی دارای ساختمان و نصب پیچیده بوده و نصب آنها فقط در مناطق با باد دائمی و سرعت‌های بالای آن ارزش اقتصادی دارد. در این توربین‌ها سرعت دوران روتور بسیار بالا بوده ولی گشتاور آن‌ها کم است و از آنها بیشتر برای تولید برق استفاده می‌شود. اما توربین‌های محور عمودی دارای ساختمان و نصب بسیار ساده‌ای بوده و در سرعت‌ها و جهت‌های مختلف باد قابل استفاده می‌باشند. در توربین‌ها یا روتورهای محور عمودی (ساوینیوس)، محور دوران بر راستای افق و جریان باد عمود است و به همین دلیل سطحی که توسط باد به حرکت در می‌آید پس از نیم دور چرخش مجبور است در جهت عکس جریان باد به حرکت خود ادامه دهد و این مشکل سبب پایین آمدن ضریب توان آنها می‌شود. تاکنون مطالعات زیادی بر روی منحنی پره این روتورها با هدف کاهش ضریب پسای سطح در حال حرکت در جهت خلاف وزش باد و افزایش ضریب پسای سطح در حال حرکت در جهت وزش باد انجام شده است.

هدف از این پروژه شبیه‌سازی عددی اثر یکسو کننده بر توربین باد عمود محور بوسیله نرم افزار فلوئنت است. برای این کار از هندسه توربین باد در ابعاد واقعی استفاده می‌شود و مدلی ساده از توربین عمود محور در نرم افزار گمبیت تولید شده سپس در نرم افزار فلوئنت جریان هوا در حال حرکت بروی توربین شبیه‌سازی می‌شود. سپس نتایج شامل توزیع فشار بروی بدنه و گشتاور و ... بروی توربین در

شرایط خاص جریان بررسی میشوند. در مرحله بعد از یکسو کننده یا استاتور برای افزایش کارایی توربین استفاده خواهد شد و این دو حالت با هم در انتها مقایسه می‌شوند و طرح مناسب با کارایی بالاتر ارائه می‌شود.

تامین انرژی امروزه اهمیت استراتژیکی زیادی برای سیستم های نظامی دارند و بهینه بودن توربین های بادی می تواند تاثیر زیادی در افزایش بهره‌وری انرژی داشته باشد. خصوصیات هندسی توربین بادی نقش مهمی در کارایی آنها ایفا می‌کند. بنا براین دانش کافی از کارکرد یک طرح خاص و جدید از توربین بادی قبل از مرحله ساخت کمک زیادی به بهینه سازی و افزایش کارایی آنها و توسعه طرح های جدید می‌کند.

امروزه در کشور های پیشرفته روش های دینامیک سیالات محاسباتی^۱ در کنار آزمایشگاه های ساخت، یک ابزار پر قدرت در فرآیند طراحی توربین بادی و دیگر سامانه های انرژی نظامی محسوب می‌شود و از آنجا که هزینه روش های عددی در مقابله با آزمایشات تجربی بسیار پایین است در بسیاری از موارد روش های عددی جایگزین روش های تجربی نیز شده اند بنابراین استفاده از روش های مدلسازی این امکان را میدهد تا با هزینه کمتر نسبت به شرایط واقعی بتوان به درک بهتری از شرایط و فیزیک جریان بروی توربین پی برد. به طور خلاصه ضرورت انجام این تحقیق را میتوان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱. کاهش اساسی در زمان و قیمت طراحی های جدید تامین انرژی در مناطق نظامی

۲. تسریع در توانایی مطالعه و شبیه سازی مدل‌هایی از توربین که انجام آزمایشات روی آن

مشکل و یا غیر ممکن باشد.

۳. توانایی شبیه سازی توربین بادی در حالتی خاص یا بحرانی.

۴. بدست آوردن اطلاعات کامل و جزئیات بسیار دقیق از حل: میتوان در هر نقطه از

جریان تمام کمیت های مورد نظر را محاسبه کرد ولی در آزمایش فقط در چند نقطه محدود

میتوان اطلاعات محدود بدست آورد.

امروزه در کشور پتانسیل مناسبی برای مطرح شدن طرح‌ها و ایده‌های جدید برای گسترش و بهینه سازی توربین‌های بادی وجود دارد. بنابراین وجود یک مدل عددی مناسب و کامل به عنوان مرجع برای بسط طرح های جدید دیگر و بهینه سازی قبل از مرحله ساخت توربین بادی لازم و ضروری می‌باشد.

هدف اصلی از این پروژه شبیه سازی عددی توربین عمود محور ساده و همراه با یکسو کننده یا استاتور برای افزایش کارایی توربین می‌باشد در انتها این دو حالت با هم مقایسه می‌شوند و طرح مناسب با کارایی بالاتر ارائه می‌شود. در این پروژه از تعداد پره های بیشتری نسبت به حالت معمول برای توربین عمود محور استفاده خواهد شد. برای این کار از هندسه در ابعاد واقعی استفاده می‌شود و مدلی از توربین عمود محور در نرم افزار گمبیت تولید شده سپس در نرم افزار فلوئنت جریان هوا در حال حرکت بروی توربین شبیه سازی می‌شود. سپس نتایج شامل توزیع فشار بروی بدنه و گشتاور بروی توربین در شرایط خاص جریان بررسی می‌شوند.

لغات کلیدی: واماندگی، واماندگی دینامیکی، ایرفویل، توربین باد، جریان آشفته.

فهرست مطالب

مقدمه.....	۱
تعاریف و اصول اولیه.....	۳
۱.۱- نگاه تحقیقاتی به عملکرد توربین های بادی.....	۳
۲.۱- اصول اساسی ارزیابی منبع بادی.....	۳
۳.۱- نحوه عملکرد توربین بادی.....	۴
۴.۱- ترتیب اجزا اصلی توربین بادی.....	۴
۵.۱- منابع بادی و فرانگري.....	۷
۶.۱- مزارع بادی.....	۸
۷.۱- میزان برق توليدي توسط يك توربین بادی.....	۹
۸.۱- اجزاء، جنس و سايز توربین های بادی.....	۹
۱.۸.۱- تعداد توربین لازم برای تولید يك مگاوات برق.....	۱۰
۲.۸.۱- میزان برق توليدي منازل توسط يك مگاوات الكتریسیته حاصل از انرژی بادی.....	۱۰
۹.۱- مختصري از نیروگاه برق بادی.....	۱۱
۱۰.۱- ضريب ظرفیت.....	۱۱
۱۱.۱- قابلیت استفاده یا ضريب قابلیت استفاده.....	۱۲
۱۲.۱- انتقال و توزيع انرژی باد.....	۱۲
۱۳.۱- دسته بندی توربین های بادی.....	۱۵
۱۴.۱- مقدم های بر نرم افزار فلوئنت.....	۱۶
۱۵.۱- معرفی نرم افزار فلوئنت.....	۱۷
۲- تاريخچه پژوهش.....	۲۲
توليد شبکه محاسباتی.....	۳۰
۱.۲- انواع شبکه بندی.....	۳۱

۳۷	۲.۲- شبکه بندی پره‌های توربین ساونیوس.....
۳۸	تئوری‌های حاکم بر مسأله
۳۸	۱.۳- فیزیک جریان.....
۳۹	۲.۳- معادلات حاکم بر فرایند حل.....
۴۱	۳.۳- مدل اغتشاشی.....
۴۱	۱.۳.۳- مدل اغتشاشی $k - \varepsilon$
۴۳	۴.۳- معادلات حاکم بر انرژی جنبشی متوسط جریان.....
۴۴	۵.۳- معادلات حاکم بر انرژی جنبشی اغتشاش جریان.....
۴۵	۱.۵.۳- معادلات مدل اغتشاشی $k - \varepsilon$
۴۶	۶.۳- مدل استاندارد $k - \varepsilon$
۴۶	۱.۶.۳- معادلات انتقال مدل استاندارد $k - \varepsilon$
۴۷	۷.۳- مدل آر. إن. جی. $k - \varepsilon$
۴۸	۱.۷.۳- معادلات انتقال برای مدل آر. إن. جی. $k - \varepsilon$
۴۸	۸.۳- مدل تحقق‌پذیر $k - \varepsilon$
۴۸	۱.۸.۳- معادلات انتقال برای مدل تحقق‌پذیر $k - \varepsilon$
۴۹	۹.۳- معادلات حاکم در نرم افزار فلوئنت.....
۴۹	۱.۹.۳- مراحل حل مسأله.....
۵۰	۲.۹.۳- انتخاب شیوهی محاسباتی و فرمولبندی حل.....
۵۱	۳.۹.۳- دسته‌بندی انواع نواحی و تنظیم شرایط مرزی.....
۵۴	۴.۹.۳- شرایط مرزی ورودی فشار.....
۵۶	۵.۹.۳- شرایط مرزی ورودی سرعت.....
۵۷	۶.۹.۳- شرط مرزی ورودی جریان جرمی.....
۵۷	۷.۹.۳- شرط مرزی Inlet Vent.....
۵۸	۸.۹.۳- شرط مرزی Intake Fan.....
۵۹	۹.۹.۳- شرط مرزی خروجی فشار.....

۵۹	Pressure Far-Filed	شرط مرزی
۶۰	.....	شرط مرزی جریان خروجی
۶۰	Outlet Vent	شرط مرزی
۶۰	.....	شرط مرزی دیوار
۶۱	.....	شرایط مرزی متقارن
۶۱	.....	شرایط سیال
۶۲	.....	شرایط جامد
۶۳	.....	نحوه حل مسأله
۶۳	.....	۱.۴- تولید شبکه
۶۷	.....	نتایج حل عددی
۶۷	.....	۱.۵- نتایج توربین بادی در حالت بدون استاتور
۷۱	.....	۲.۵- نتایج توربین بادی در حالت با استاتور
۷۶	.....	۳.۵- نتیجه گیری
۷۸	.....	جمع بندی
I	.....	فهرست مراجع

فهرست علائم

سرعت محیطی	U
سرعت مماسی	V_θ
ضریب برا	C_l
ضریب مومنتوم	C_m
ضریب نیروی برآ	C_l
دما	T
زمان	t
فشار	P
آنتالپی کل	H
آنتالپی سکون	h
چگالی سیال	ρ
بردار سرعت	$\vec{U}$
نیروی حجمی	B
ضریب انبساط حرارتی	β
لزجت دینامیکی	μ
لزجت حجمی	ζ
تانسور تنش	σ
ویسکوزیته گردابه‌ای	μ_t
نرخ تغییر شکل	e_{ij}
تنش	τ_{ij}

مقدمه

انرژی بادی بیش از ۲۰۰۰ سال است که مورد استفاده قرار گرفته است. اولین آسیاب‌های بادی در ایران مورد استفاده قرار گرفتند که از باد برای تولید انرژی مکانیکی استفاده می‌کردند. نام *آسیاب بادی* به این دلیل به کار رفت که هدف اصلی آن‌ها آسیاب و خرد کردن غلات و تبدیل آن به آرد بود. باد یک پروانه (توربین) بادی را می‌چرخاند که این پروانه به قرقره‌ها و تسمه‌هایی وصل بود و چرخ‌های آسیاب را به گردش در می‌آورد. در آغاز سال‌های ۱۹۰۰ آسیاب‌های بادی تغییر و بهبود یافتند و برای کشیدن آب از زیر زمین مورد استفاده قرار گرفتند و امروزه هنوز بدین منظور مورد مصرف قرار می‌گیرند. پس از گسترش ژنراتورهای بادی، طولی نکشید که برای سرویس‌دهی در مناطق دور افتاده استرالیا یعنی جاهایی که برق از ژنراتورهای شهری تامین نمی‌شد، مورد استفاده قرار گرفت [۱].

از زمان‌های نخستین، بشر با ساخت اولین آسیاب‌ها، که قدمت آن‌ها سال ششم میلادی ثبت شده است، نیروی باد را تحت کنترل خود درآورده است. به مرور زمان این تکنولوژی از تنوع برخوردار شده است از جمله کشیدن آب از چاه، آسیاب کردن غلات و تامین نیروی برق کارخانجات چوب بری و الوارسازی. در اواسط قرن نوزدهم تنها در انگلستان بیش از ۱۰۰۰۰ آسیاب بادی کار می‌کرد. آخرین دگرگونی در طول سال‌های ۱۸۸۰ به وقوع پیوست زمانی که عمل گردش بادبان‌ها به محرک و گرداننده یک ژنراتور الکتریکی تبدیل گشت. رشد این تکنولوژی ادامه داشت اما انگیزش تجاری واقعی زمان بحران نفت در ۱۹۷۰ رخ داد که توجه بشر را به تولید نیروی برق مداوم و ایمن معطوف ساخت. که این مستقیماً به استقرار نیروی باد به عنوان منبع انرژی جهانی که سریع‌ترین میزان رشد را داشته، منجر شد با بازاری که تنها در اروپا رشد متوسط سالانه ۳۰ درصدی داشته است؛ یعنی نرخ رشدی که فقط با صنعت کامپیوتر و ارتباطات از راه دور برابری می‌کند. هم اکنون تغییرات جوی و موضوعات امنیتی انگیزش بیشتری برای بوجود آوردن منابع انرژی متنوع که ادامه یافتنی باشند و آلودگی ایجاد نکنند را فراهم می‌سازد.

تکنولوژی انرژی بادی در سال‌های اخیر به سرعت رشد کرده است و اروپا در راس این صنعت دارای تکنولوژی رفیع قرار گرفته است. توربین‌ها در حال ارزان‌تر و قدرتمندتر شدن هستند، با طول پره بیشتر که

قادر است از مقدار باد زیادتري استفاده کند و بنابراین الکتریسیته بیشتری تولید نماید و هزینه تولید برق از منابع قابل تجدید را کاهش دهد.

در این پروژه برآنیم تا در ابتدا به بررسی سیر تحول این صنعت (توربین‌های بادی عمود محور) پرداخته و نگاهی کلی بر کارهای انجام شده در سال‌های گذشته داشته باشیم. سپس به بررسی تئوری‌های حاکم بر مسأله پرداخته و با ایجاد دانشی پایه و معرفی ایده نوآورانه خود به سوی شبیه‌سازی گام برداریم. پس از آن نتایج را ارائه داده و به جمع‌بندی نتایج حاصله پرداخته می‌شود و مسیری برای ادامه کار مشخص می‌گردد.

۱. تعاریف و اصول اولیه

اولین مزرعه بادی تجاری در انگلستان در سال ۱۹۹۱ میلادی در دلابول واقع در کرن وال ساخته شد که از توربین‌های ۴۰۰ کیلوواتی استفاده می‌کرد، در حالی که آخرین دستاوردها در بردارنده توربین‌هایی است که ده برابر از توربین‌های ۴۰۰ کیلوواتی قدرتمندترند. حتی بعد از این که به طور متوسط ۲۵-۲۰ سال از عمر کاری توربین‌های بادی گذشت، این ارزش را دارند که به صورت آهن قراضه می‌توانند فروخته شوند.

۱.۱- نگاه تحقیقاتی به عملکرد توربین‌های بادی

ژنراتورهای توربین بادی می‌توانند برای تولید الکتریسته مورد استفاده قرار گیرند. باد باعث می‌شود توربین و پروانه آن بچرخد. یک باد نما جهت اطمینان از این که توربین همیشه به سمت باد باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پروانه توربین به آلترناتوری وصل است که برق تولید می‌کند.

۲.۱- اصول اساسی ارزیابی منبع بادی

ارزیابی منبع بادی یک عامل حساس و مهم در طرح ریزی سطح کارائی توربین در یک مکان معین می‌باشد. انرژی موجود در جریان باد، نسبتی است از مکعب سرعت آن، که بدین معناست که دو برابر شدن سرعت باد، انرژی قابل دسترس را به صورت فاکتوری از هشت، افزایش می‌دهد. علاوه بر این، خود منبع باد به ندرت یک جریان مداوم و پایدار است و بسته به زمان روز، فصل، ارتفاع از سطح زمین و نوع سرزمین تغییر می‌یابد. مکان مناسب در جاهای بادخیز و دور از موانع بزرگ و قابل ملاحظه، میزان کارائی یک توربین بادی را افزایش می‌دهد. بطور کلی متوسط سرعت باد سالانه ۵ متر در ثانیه (۱۱ مایل در ساعت) برای مواردی که به شبکه اتصال دارند، لازم می‌باشد. متوسط سرعت باد سالانه ۳ تا ۴ متر در ثانیه (۷-۹ مایل در ساعت) ممکن است برای موارد استعمال الکتریکی و مکانیکی غیرمتصل نظیر شارژ باتری و پمپ آب مناسب باشد. در بسیاری از نقاط جهان منابع بادی با بیش از این سرعت‌ها موجود است.

۳.۱- نحوه عملکرد توربین بادی

توربین‌های بادی، با استفاده از نیروی طبیعی باد برای به حرکت درآوردن ژنراتور، الکتریسیته تولید می‌کنند. باد یک منبع سوخت پاک و پایدار است که مواد دفعی ندارد و هرگز تمام نخواهد شد؛ چون دائماً توسط انرژی خورشید تجدید می‌شود. از بسیاری جهات، توربین‌های بادی تکامل طبیعی آسیاب‌های بادی سنتی می‌باشند، اما توربین‌های بادی افقی اکنون معمولاً سه پره دارند که حول یک حلقه مرکزی افقی می‌چرخند و به نیروی الکتریکی واقع در موتورخانه که در نوک برج فولادی قرار دارد، اتصال دارند. بیشتر توربین‌های بادی زمانی که سرعت باد حدود ۳-۴ متر در ثانیه می‌باشد، شروع به تولید برق می‌نمایند و حداکثر مجاز برق را در حدود ۱۵ متر در ثانیه تولید می‌کنند و برای جلوگیری از خسارات حاصل از توفان در ۲۵ متر در ثانیه و یا بیشتر متوقف شده و از کار می‌افتند. باد از پره‌ها عبور کرده و یک نیروی چرخش دهنده، ایجاد می‌کند تا روند زیر حاصل شود:

۱. پره‌های چرخان،
۲. پروانه داخل موتور که به جعبه دنده می‌رود را می‌چرخاند؛
۳. جعبه دنده سرعت چرخش برای ژنراتور را افزایش می‌دهد؛
۴. ژنراتور از میدان مغناطیسی برای تبدیل انرژی چرخشی به انرژی الکتریکی استفاده می‌کند. نیروی خروجی تولید شده به یک ترانسفورماتور می‌رود؛
۵. ترانسفورماتور انرژی حاصل از ژنراتور که حدود ۷۰۰ ولت است را به ولتاژ مناسب برای سیستم توزیع، که معمولاً ۳۳۰۰۰ ولت (۳۳ کیلو ولت) است، تبدیل می‌کند؛
۶. شبکه‌های توزیع برق منطقه‌ای یا شبکه ملی الکتریسیته را به سرتا سر کشور انتقال می‌دهند.

۴.۱- ترتیب اجزا اصلی توربین بادی

توربین‌های بادی از نظر اندازه متفاوت می‌باشند. اندازه‌های گوناگون توربین‌ها و مقدار الکتریسیته‌ای که هر کدام از آن‌ها قادرند تولید کنند نمایش دهنده ظرفیت توربین یا سنجش توان آن‌ها است. معمولاً

الکتریسیته‌ای که توسط یک توربین بادی تولید می‌شود، جمع‌آوری شده و به خطوط فشار قوی وارد گردیده و در آنجا با الکتریسیته حاصل از نیروگاه‌های دیگر ترکیب شده و به مصرف کنندگان تحویل می‌شود. کارکرد و نگهداری و تعمیرات همه توربین‌های بادی روی خشکی و داخل دریا، ابزارآلاتی در بالای موتورخانه دارند، یک باد سنج و یک بادنما که به ترتیب سرعت باد را اندازه گرفته و جهت آن را تعیین می‌کنند. زمانی که باد تغییر جهت می‌دهد، موتورها، قسمت موتورخانه و پره‌ها را می‌چرخانند تا به سمت باد قرار گیرند. تمام این اطلاعات توسط کامپیوترها ثبت گردیده و به مرکز کنترل ارسال می‌شوند که این مرکز می‌تواند کیلومترها دورتر باشد، بدین معنا که توربین‌های بادی به طور فیزیکی توسط نیروی انسانی (کارگران) اداره نمی‌شوند، هر چند بطور دوره‌ای بررسی‌های مکانیکی بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد که این بررسی‌ها اغلب توسط کمپانی‌های محلی انجام می‌شود. همچنین کامپیوترهای روی عرشه بر عملکرد هر یک از اجزای توربین بخصوص پره‌ها نظارت دارند و در صورتی که هرگونه مشکلی دیده شود، توربین را به طور اتوماتیک خاموش خواهد ساخت و به یک مهندس اعلام خواهد کرد که به یک بررسی در محل نیاز می‌باشد. در واقع برای بسیاری از توربین‌های بادی، ولتاژهای بیشتر، انواع مختلف ژنراتورها و سیستم‌های امنیتی، وضعیت پیچیده‌تر می‌باشد اما این راهنمای خوبی برای اصول اولیه و مقدمات است. مقدار الکتریسیته تولید شده از یک توربین بادی به سه عامل بستگی دارد.

الف) باد خیزی مکان

نیروی برق حاصل از باد تابعی از مکعب سرعت باد می‌باشد. بنابراین اگر سرعت باد دو برابر شود، حجم انرژی آن هشت برابر افزایش خواهد یافت. توربین‌های واقع در محل‌هایی که سرعت متوسط باد ۸ متر در ثانیه است به نسبت جاهایی که سرعت متوسط باد ۶ متر در ثانیه می‌باشد، حدود ۱۰۰ - ۷۵ درصد بیشتر الکتریسیته تولید می‌کنند چون همه انرژی اضافی قابل ذخیره نمی‌باشد.

ب) میزان دسترسی به توربین‌های بادی

این به معنای توانایی بهره‌برداری در زمان وزش باد می‌باشد. به عبارت دیگر در دسترس بودن توربین برای عمل کردن است که این امر معمولاً برای دستگاه‌های مدرن اروپایی ۹۸٪ یا بیشتر می‌باشد.

ج) شیوه قرار دادن توربین‌ها

توربین‌ها در مزارع بادی به ترتیبی قرار می‌گیرند که یک توربین مانع رسیدن باد به توربین دیگر نشود. موضوعات مربوط به نمای زمین (زمین‌آرایی) نیز باید مورد ملاحظه قرار گیرد. به طور کلی توافق بر این است که محل ایده‌آل برای یک ژنراتور توربین بادی، نوک یک تپه صاف در سطحی صاف و شفاف حداقل در جهتی که باد بیشتر می‌وزد، باشد.

برخلاف آسیاب‌های بادی که در قرن نوزدهم رواج داشتند، یک توربین بادی مدرن تولید کننده برق طوری طراحی شده است که هر زمان باد به اندازه کافی وجود داشته باشد، برق فرکانس شبکه با کیفیت بالا را تولید کند. توربین‌های بادی می‌توانند به طور مداوم و خودکار و با میزان تعمیرات پایین با حدود ۱۲۰۰۰۰ ساعت عملکرد فعالانه برای طول عمر طرح شده حدود ۲۰ سال، کارکنند. در مقایسه، یک موتور ماشین معمولی یک طول عمر طرح شده در حدود ۶۰۰۰ ساعت دارد.

معمولاً پروانه‌های توربین‌های بادی مدرن از سه پره تشکیل شده‌اند که سرعت و قدرت آن‌ها به وسیله تنظیم واماندگی یا Pitch کنترل می‌شود. تنظیم واماندگی شامل کنترل چرخش مکانیکی پره‌ها بوده و تنظیم Pitch (که هم اکنون استفاده از آن متداول‌تر است) شامل تغییر زاویه خود پره‌ها می‌باشد. پره‌های چرخ گردان از مواد مرکب ساخته می‌شوند که از فایبرگلاس و پلی‌استر و اپوکسی استفاده می‌شود و گاهی اوقات با چوب و کربن هم ترکیب می‌شود.

انرژی بدست آمده از چرخش پیوسته پره‌ها، از طریق یک گیربکس و سیستم انتقال توان به یک ژنراتور الکتریکی منتقل می‌شود. متناوباً ژنراتور می‌تواند مستقیماً با روش رانش مستقیم به چرخ گردان وصل شود. توربین‌هایی که قادرند در سرعت‌های مختلف کار کنند، بیش از پیش رایج هستند که این ویژگی سازش‌پذیری با شبکه الکتریسیته را بهبود می‌بخشد. گیربکس، ژنراتور و دیگر تجهیزات کنترل، درون یک موتورخانه محافظ قرار گرفته‌اند. برج‌های لوله‌ای شکلی که موتورخانه و چرخ گردان را پشتیبانی می‌کنند

معمولا از فولاد ساخته شده‌اند و از پایه به طرف نوک مخروطی شکل می‌شوند. تمام موتورخانه و چرخ گردان به منظور رویارویی با باد شدید طوری طراحی شده‌اند که دایره‌وار حرکت کنند یا دوران حول محور قائم داشته باشند.

ساخت توربین‌های بادی تجاری با جدیت و تلاش بیشتر در سال‌های ۱۹۸۰ با رهبریت تکنولوژی دانمارک آغاز شد. ظرفیت ژنراتورهای توربین بادی از دستگاه‌های ۲۰-۶۰ کیلوواتی با قطر پروانه حدود ۲۰ متر به دو مگاوات و بالاتر با قطر پروانه ۹۰-۶۰ متر افزایش یافته است. اکنون بزرگترین ماشینی که ساخته شده است دارای ظرفیت ۴۵۰۰ کیلو وات و قطر پروانه ۱۱۲ متر می‌باشد. حتی بعضی از طرح‌های آزمایشی توربین‌های دریایی، ژنراتورها و چرخ گردان‌های بزرگتری دارند. بهسازی مداوم در زمینه قدرت توربین‌های بادی صورت می‌پذیرد تا بیشترین میزان ممکنه انرژی را از باد بدست آورند. از جمله مزایای آن‌ها پروانه‌های قدرتمندتر، پره‌های بزرگتر، انرژی الکترونیکی پیشرفته‌تر، استفاده بهتر از مواد مرکب و همچنین برج‌های بلندتر می‌باشد. یکی از نتایج این است که توربین‌های بسیار کمتری برای کسب همان میزان بازده انرژی، مورد نیاز است و صرفه‌جویی در استفاده از زمین. بسته به مکان آن، یک توربین ۱ مگاواتی می‌تواند الکتریسیته کافی برای ۶۵۰ خانه را تولید کند. بعد از آغاز سال‌های ۱۹۸۰، برق یک توربین بادی با ضریبی بیش از ۲۰۰ افزایش یافته است. توربین‌های بادی بسیار قابل اطمینان هستند، و قابلیت عملکرد آن‌ها ۹۸٪ می‌باشد و هیچ تکنولوژی تولید برق دیگری قابلیت استفاده بالاتری ندارد.

۵.۱- منابع بادی و فرانگری

منابع بادی، سوخت یک ایستگاه برق بادی می‌باشند و تنها تغییراتی اندک، اثرات بزرگی بر ارزش تجاری آن دارد. هر زمان که سرعت متوسط باد دو برابر می‌شود، انرژی موجود در باد به صورت ضریبی از ۸ افزایش می‌یابد، بنابراین حتی تغییرات اندک در سرعت متوسط می‌تواند تغییرات بزرگی در میزان کارایی ایجاد کند. به عنوان مثال اگر سرعت متوسط باد در یک مکان معین از ۶ متر در ثانیه به ۱۰ متر در ثانیه افزایش یابد، مقدار انرژی تولید شده توسط یک مزرعه بادی بیش از ۱۳۰٪ افزایش خواهد یافت. بنابراین جزئیات و اطلاعات قابل اطمینان در مورد میزان قدرت و سمت وزش باد و اینکه چقدر باد به طور مرتب می‌وزد، برای

هرگونه برنامه توسعه احتمالی، حیاتی و مهم می‌باشد. در سطح ملی و منطقه‌ای، اطلس‌های بادی اروپا تهیه گردیده است که سرعت باد مورد انتظار در مناطق خاص را ثبت می‌نماید. برای برخی مکان‌های خاص، ارزیابی‌های مفصل‌تری مورد نیاز می‌باشد که از اطلاعات حاصل از ایستگاه‌های هوای مجاور منطقه و متخصص نرم‌افزار کامپیوتر برای نمونه‌سازی منبع بادی استفاده می‌گردد. سرانجام اینکه، اندازه‌گیری‌های خاص مکان، با استفاده از یک دکل بادسنج صورت می‌گیرد که بر روی آن تعدادی بادسنج، سرعت و جهت باد را در ارتفاعات مختلف بالای زمین، اندازه‌گیری می‌کنند. به طور کلی، تخمین زده شده است که منابع بادی قابل بهره‌گیری واقع در خشکی برای اتحادیه اروپا (EV-۲۵) قادر به تولید و بازدهی ۶۰۰ تراوات ساعت باشد. منبع بادی در آب‌های دریایی تا ۳۰۰۰ تراوات ساعت ارزیابی شده است. که این به تنهایی فراتر از کل مصرف الکتریسیته کنونی اروپا خواهد بود.

۶.۱- مزارع بادی

محدودیت‌ها و موانع چندی بر مکان گروهی از توربین‌های بادی که معمولاً به عنوان یک پارک یا مزرعه بادی توصیف می‌شوند، تاثیر می‌گذارند که شامل این موارد است: مالکیت زمین، مکان در رابطه با ساختمان‌ها و جاده‌ها، و اجتناب از مکان‌هایی که دارای اهمیت محیطی خاصی می‌باشند. هرگاه این محدودیت‌ها تعیین شدند، نقشه اولیه خود توربین‌های بادی می‌تواند طرح‌ریزی شود. هدف کلی این است که تولید الکتریسیته را به حداکثر رساند در حالی که هزینه‌های زیر بنایی، عملکرد و تعمیرات (O&M) و اثرات محیطی را به حداقل رساند. تخصص نرم افزار، توسعه یافته است تا تجسمی از چگونگی پدیدار شدن توربین‌ها در نمای زمین را ارائه نماید و توسعه دهندگان و طراحان را قادر سازد که بهترین راه‌های تاثیرگذار را قبل ساخت پروژه، انتخاب نمایند.

جدا از خود توربین‌های بادی، دیگر اجزاء اصلی یک مزرعه بادی، برای پشتیبانی از برج‌های توربین، جاده‌های اتصالی و زیرسازه برای صدور الکتریسیته تولیدی به شبکه، به عنوان یک پایه مهم محسوب می‌شوند. یک مزرعه بادی ۱۰ مگاواتی به سهولت می‌تواند در عرض دو ماه ساخته شود و برق کافی برای مصرف بیش از ۵۰۰۰ خانه متوسط اروپایی را تولید نماید. به محض شروع به کار، می‌توان از راه دور یک

مزرعه بادی را کنترل و نظارت نمود. یک تیم سیار با تقریباً دو پرسنل برای هر ۲۰ تا ۳۰ توربین، کارهای تعمیرات و نگهداری را انجام می‌دهند. زمان معمول تعمیرات برای یک توربین بادی مدرن تقریباً ۴۰ ساعت در سال می‌باشد. مزارع بادی می‌توانند از نظر اندازه از چند مگاوات تا بزرگترین مزرعه‌ای که تا کنون وجود داشته است، ۳۰۰ مگاوات در ایالات متحده غربی، متفاوت باشند.

۷.۱- میزان برق تولیدی توسط یک توربین بادی

قابلیت تولید الکتریسیته با واحد اندازه‌گیری وات سنجیده می‌شود. وات واحد بسیار کوچکی است و به همین خاطر معمولاً بیشتر اصطلاحات کیلووات، مگاوات و گیگاوات برای توصیف ظرفیت تولید واحدهایی نظیر توربین‌های بادی یا دیگر نیروگاه‌های تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تولید و مصرف الکتریسیته معمولاً بیشتر با کیلو وات ساعت (KWH) سنجیده می‌شود. یک کیلووات ساعت یعنی یک کیلووات (۱۰۰۰ وات) الکتریسیته که در یک ساعت تولید یا مصرف می‌شود. یک لامپ روشنایی ۵۰ واتی که به مدت بیست ساعت روشن باشد، یک کیلووات ساعت برق مصرف می‌کند. بازده یک توربین بادی بستگی به اندازه توربین و سرعت باد در روتور دارد. توربین‌های بادی که امروزه ساخته می‌شوند دارای توان قدرت حدود ۲۵۰ وات تا ۱/۸ مگاوات می‌باشند.

۸.۱- اجزاء، جنس و سازه توربین‌های بادی

برج‌ها بیشتر لوله‌ای شکل هستند و از فولاد ساخته شده‌اند. پره‌ها از فایبر گلاس - پلی استر مستحکم یا چوب - اپوکسی ساخته شده‌اند. توربین‌های بادی مصارف همگانی جهت مزارع بادی واقع در خشکی دارای سازه‌های مختلفی هستند با قطر چرخ گردان از حدود ۵۰ متر تا حدود ۹۰ متر و با برجی تقریباً به همان سازه. یک توربین ۹۰ متری که دارای یک برج ۹۰ متری باشد، ارتفاع کلی آن از پایه برج تا نوک چرخ گردان تقریباً ۱۳۵ متر (۴۴۲ فوت) خواهد بود. توربین‌های دریایی که طراحی می‌گردند و هم اکنون در حال توسعه یافتن می‌باشند چرخ گردان‌های بزرگتری خواهند داشت. در حال حاضر بزرگترین آن‌ها دارای قطر چرخ گردان ۱۱۰ متر است به این دلیل که حمل و نقل پره‌های گردان بزرگ به وسیله کشتی آسانتر از

راه زمینی می‌باشد. توربین‌های بادی کوچک که برای مصارف خانگی یا تجاری جزئی طرح‌ریزی شده‌اند بسیار کوچکتر می‌باشند. بیشتر آن‌ها دارای قطر چرخ گردان ۸ متر یا کمتر می‌باشند و بر روی برج‌هایی به ارتفاع ۴۰ متر یا کمتر نصب می‌گردند.

۱.۸.۱- تعداد توربین لازم برای تولید یک مگاوات برق

بیشتر سازندگان توربین‌های مصارف همگانی، دستگاه‌هایی در محدوده ۷۰۰ کیلو وات تا یک هشتم مگاوات را پیشنهاد می‌کنند. ده واحد ۷۰۰ کیلوواتی یک نیروگاه بادی ۷ مگاواتی را می‌سازد در صورتیکه ۱۰ دستگاه ۱/۸ مگاواتی یک تاسیسات ۱۸ مگاواتی را فراهم می‌سازد. در آینده دستگاه‌هایی با اندازه بزرگتر موجود خواهد بود، هر چند احتمالاً در دریا نصب خواهند شد یعنی جایی که تجهیزات عظیم‌تر ساخت و حمل و نقل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. هم اکنون واحدهای بزرگتر از ظرفیت ۴ مگاوات در حال ساخت و توسعه می‌باشند.

۲.۸.۱- میزان برق تولیدی منازل توسط یک مگاوات الکتریسیته حاصل از انرژی بادی

متوسط مصرف یک واحد مس در آمریکا حدود ۱۰۰۰۰ کیلو وات ساعت (KWH) برق در سال می‌باشد. یک مگاوات انرژی بادی می‌تواند سالانه بین ۲/۴ و ۳ میلیون کیلووات ساعت برق تولید کند. بنابراین یک مگاوات انرژی بادی به اندازه مصرف ۳۰۰-۲۴۰ خانه برق تولید می‌کند. مهم است به این نکته توجه داشته باشیم از آنجا که باد به طور تمام وقت نمی‌وزد نمی‌تواند بدون نوعی سیستم ذخیره، تنها منبع انرژی برای آن همه خانه باشد. تعداد خانه‌ها فقط به این دلیل به کار رفته است که روشی راحت برای تفسیر مقدار الکتریسیته به صورتی ملموس و قابل فهم باشد (معمولاً نیازی به ذخیره‌سازی نیست زیرا ژنراتورهای بادی فقط بخشی از نیروگاه‌های برق در یک سیستم مصرف همگانی می‌باشند و زمانی که باد نمی‌وزد از دیگر منابع سوخت استفاده می‌گردد).

۹.۱- مختصری از نیروگاه برق بادی

مقرون به صرفه‌ترین روش استفاده از توربین‌های برق بادی این است که به صورت گروهی از ماشین آلات بزرگ (۶۶۰ کیلووات و بالاتر) به کار روند که نیروگاه برق بادی یا مزارع بادی نامیده می‌شوند. به عنوان مثال یک مزرعه بادی ۱۰۷ مگاواتی نزدیک به لیک بنتن در مینه سوتا متشکل از توربین‌هایی است که در کشتزاری در امتداد تپه باد خیز بوفالو به فواصل از یکدیگر احداث شده‌اند. مزرعه بادی در حال تولید برق است در حین اینکه استفاده کشاورزی نیز بدون هیچگونه اختلالی ادامه دارد.

نیروگاه‌های بادی از نظر اندازه و ظرفیت می‌توانند در محدوده چند مگاوات تا صدها مگاوات قرار گیرند. نیروگاه‌های برق بادی بخش به بخش می‌باشند، یعنی از بخش‌ها (توربین‌های) منفرد کوچکی تشکیل شده‌اند و در صورت نیاز به آسانی می‌توان آن‌ها را کوچکتر یا بزرگتر ساخت. همراه با افزایش تقاضای برق می‌توان به تعداد توربین‌ها افزود. امروزه ساخت یک مزرعه بادی ۵۰ مگاواتی در ظرف مدت ۱۸ ماه تا دو سال می‌تواند به اتمام برسد. که بیشتر این زمان برای اندازه‌گیری میزان باد و کسب مجوز ساخت مورد نیاز است - خود مزرعه بادی در کمتر از شش ماه می‌تواند ساخته شوند.

۱۰.۱- ضریب ظرفیت

به عنوان یک تعریف کلی می‌توان بیا داشت که ضریب ظرفیت عاملی است در سنجش بهره‌وری یک توربین بادی یا هرگونه تاسیسات تولید برق دیگر. ضریب ظرفیت، تولید واقعی نیروگاه در مدت زمان معین را با مقدار انرژی که نیروگاه می‌بایستی تولید می‌کرد در صورتی که با ظرفیت کامل در همان مدت زمان کار می‌کرد را مقایسه کند.

یک نیروگاه برق معمولی همگانی از سوخت استفاده نمی‌نماید. بنابراین معمولاً در بیشتر مواقع کار می‌کند مگر این که به دلیل خرابی دستگاه‌ها یا برای تعمیرات بلا استفاده شود. یک ضریب ظرفیت ۴۰ تا ۸۰ درصدی برای نیروگاه‌های معمولی، چیز متعارفی است. یک نیروگاه بادی به وسیله باد تغذیه می‌گردد که باد هم گاهی پیوسته می‌وزد و در مواقعی هم اصلاً نمی‌وزد. هر چند توربین‌های بادی مدرن مصارف همگانی معمولاً در ۶۵ تا ۸۰ درصد مواقع کار می‌کنند، اغلب این توربین‌ها در سطحی کمتر از ظرفیت کامل عمل

می‌کنند. بنابراین یک ضریب ظرفیت ۲۵ تا ۴۰ درصدی متعارف می‌باشد هر چند ممکن است طی ماه‌ها یا هفته‌های پر باد به ضریب ظرفیت‌های بالاتر هم برسند.

توجه داشته باشیم که در حالیکه ضریب ظرفیت تقریباً برای یک نیروگاه سوختی موضوعی کاملاً قابل اطمینان است برای یک نیروگاه بادی این‌گونه نیست، ضریب ظرفیت برای یک نیروگاه بادی موضوع مقرون به صرفه بودن طراحی توربین می‌باشد.

با یک چرخ گردان خیلی بزرگ و یک ژنراتور بسیار کوچک هر زمان که باد بوزد، یک توربین بادی با ظرفیت کامل کار می‌کند و ضریب ظرفیت ۸۰-۶۰ درصد را دارا خواهد بود اما الکتریسیته بسیار اندکی را تولید خواهد نمود. بیشترین الکتریسیته‌ای که از هر دلار سرمایه‌گذاری شده بدست خواهد آمد، با استفاده از یک ژنراتور بزرگتر و قبول این واقعیت که نتیجتاً ضریب ظرفیت آن پایین‌تر خواهد بود، حاصل خواهد شد. توربین‌های بادی از این لحاظ اساساً با نیروگاه‌های برق سوختی تفاوت دارند.

۱۱.۱- قابلیت استفاده یا ضریب قابلیت استفاده

ضریب قابلیت استفاده (یا به صورت مختصر فقط قابلیت استفاده) سنجش قابلیت اطمینان یک توربین بادی یا دیگر نیروگاه‌های برق می‌باشد. این ضریب اشاره دارد به مقدار درصد زمانی که یک نیروگاه آمادگی تولید برق را دارد (یعنی به دلیل تعمیرات خارج از سرویس نباشد). توربین‌های بادی مدرن قابلیت استفاده‌ای بیش از ۹۸٪ را دارا می‌باشند که بالاتر از اکثر نیروگاه‌های برق دیگر است. بعد از دو دهه بهسازی مهندسی مداوم، توربین‌های بادی امروزی بسیار قابل اطمینان می‌باشند.

۱۲.۱- انتقال و توزیع انرژی باد

خواه توربین بادی در روی خشکی یا دریا قرار گرفته باشد، نیاز است الکتریسیته‌ای که تولید می‌کند به مصرف‌کننده نهایی به عبارت دیگر به مشتری برسد. یک عامل استراتژیک کلیدی در نفوذ موفقیت آمیز انرژی بادی، ادغام موثر آن در شبکه انتقال و توزیع برق اروپا می‌باشد. افزایش نفوذ تولید انرژی بادی در

شبکه پاره‌ای از مسائل را بوجود می‌آورد. که بیشتر موضوعاتی در زمینه وضعیت شرکت های برق می باشد تا موضوعاتی نظیر ضرورت مهندسی.

- بازده یک مزرعه بادی به میزان معینی مطابق با شرایط آب و هوایی تغییر می‌نماید. مزارع بادی اغلب در انتهای شبکه‌های توزیع واقع شده‌اند؛
- بیشتر شبکه‌های اروپا برای تولید الکتریسیته به مقدار زیاد از تعداد نسبتاً کمی از تاسیسات بزرگ، طراحی شده‌اند که برق را به طرف بیرون بسوی پیرامون ارسال می‌دارند به جای آنکه آن را در جهت معکوس بفرستند؛
- ویژگی‌های تکنیکی تولید بادی با ویژگی‌های ایستگاه‌های انرژی متداول، تفاوت دارد که پیرامون آن سیستم‌های موجود متحول گردیده‌اند.

نیاز اپراتورهای شبکه برای به کار انداختن نسبت فزاینده چنین "تولید توزیع شده‌ای" تنها از انرژی بادی تامین نمی‌شود. ملاحظات محیطی و آزاد سازی بازار الکتریسیته، علاقه‌مندی به تولید تجاری در مقیاس کم را افزایش داده است. تغییراتی در روش خدمات شهری و همچنین عملیات شبکه مورد لزوم می‌باشد تا این رشد و توسعه را فراهم سازد. موضوعات و مسائل تناوب نیاز به درک تغییرپذیری و قابلیت تنظیم و پیش‌بینی پذیری دارد. تکنیک‌های پیش‌بینی باد در مراحل اولیه رشد و توسعه قرار دارند و پیشرفت‌ها می‌تواند به استحکام انرژی بادی برای اپراتورهای سیستم از طریق کم کردن و مشخص ساختن اشتباهات پیش‌بینی، کمک نماید. به دلیل تناوب آن، اظهار شده است که موضوعات ثبات و استحکام شبکه، ممکن است با نفوذ انرژی بادی بیش از یک سطح معین، بوجود آید. چنین موضوعاتی نیاز به این دارد که در مقایسه با منفعت‌های بالقوه از جمله تقویت شبکه‌های محلی و قابلیت توربین‌های با سرعت متغیر برای کمک به ثبات و پایداری شبکه، مورد سنجش قرار گیرند. همچنانکه مزارع بادی بیشتری در یک منطقه جغرافیایی وسیع به سیستم اتصال می‌یابند، مجموع بازده آن‌ها احتمالاً حتی بیش از الگوی تولید کلی می‌شود که نتیجه آن نیاز کمتر برای استفاده اضافی از ایستگاه‌های انرژی متداول خواهد بود. برای تعادل یک سیستم جهت انطباق پذیری با متغیر حاصل از انرژی بادی، مجموعه تکنیک‌هایی برای اپراتور شبکه موجود

می‌باشد. به عنوان مثال، در شرایطی که باد زیادی وجود دارد، اپراتور می‌تواند سایر دستگاه‌های تولید را در میزان بازدهی کم نگه دارد. احتمالاً همچنانکه نفوذ انرژی بادی توسعه می‌یابد، راه‌حل‌های دیگری به میزان فزاینده نیاز اهمیت برخوردار می‌شوند. همانگونه که ذیلاً شرح داده شده است، این موارد عبارتند از پیش-بینی و استفاده از اتصال‌دهندگان به شبکه‌های برق مجاور. با استفاده از چنین تکنیک‌هایی، همچنین تقویت خود شبکه و افزایش پراکندگی جغرافیایی انرژی بادی، این امکان وجود دارد که از نفوذ باد در سطح بسیار بالایی در سیستم الکتریسیته اروپا برخوردار باشیم بدون اینکه بر کیفیت تولید تاثیر گذارد.

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در پیش‌بینی بازده انرژی از مزارع بادی، صورت گرفته است. به طور کلی مشخص شده است که با دوره‌های کوتاه اندازه‌گیری در یک محل، این امکان وجود دارد که با استفاده از ضریب همبستگی با اطلاعات هواشنجی اندازه‌گیری شده از ایستگاه‌های هوای مجاور، بازده را به طور بسیار دقیقی پیش‌بینی کرد. یک عامل اصلی در ساختن انرژی بادی این است که اطمینان یافت الکتریسیته تولید شده می‌تواند به سیستم شبکه تغذیه شود و به مصرف کنندگان الکتریسیته برسد. تجربه نشان داده است که ترکیب کردن یک مخلوط متنوع از تقاضای سازنده و راه‌حل‌های تولید، نفوذ انرژی بادی به طور وسیع در یک شبکه الکتریسیته را بدون اثرات نامطلوب ممکن می‌سازد. به عنوان مثال در سیستم الترا در غرب دانمارک، استفاده از اتصال‌دهندگان به ژنراتورهای مولد برق عظیم در نروژ به شمال و آلمان در جنوب، نفوذ ۳۰ درصدی انرژی بادی را با تغییرات جزئی در عملکرد شبکه ممکن ساخته است. تغییرپذیری باد مشکلات بسیار کمتری نسبت به آنچه مخالفان پیش‌بینی کرده بودند برای مدیریت شبکه برق ایجاد کرده است.

تا اینجا مروری کلی بر پیدایش توربین‌های بادی بدون توجه به نوع آن و سیر تحولی آن‌ها ارائه گشت. در ادامه سعی بر آن است تا کمی در رابطه با تفاوت‌های توربین‌های بادی افقی و عمودی بحث شود و در ادامه با داشتن این اطلاعات در ذهن به معرفی نرم‌افزار فلوئنت و قابلیت‌های منحصر به فردش به عنوان ابزار حل مسأله مورد نظر پرداخته شد. از آنجایی که هدف اصلی در این پروژه شبیه‌سازی یک پدیده فیزیکی (واماندگی دینامیکی) بر روی یک و دو توربین بادی است لذا در ادامه پس از مطالعه تاریخچه پژوهش و

تئوری‌های حاکم بر مسأله با نگاه دینامیک سیالات عددی به ارائه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی پرداخته می‌شود و در نهایت بحث بر روی این نتایج جمع‌بندی می‌شود.

۱۳.۱- دسته‌بندی توربین‌های بادی

بیشتر توربین‌های بادی از دو دیدگاه اساسی تقسیم‌بندی می‌شوند. اولین تقسیم‌بندی مربوط به شیوه تولید توان می‌باشد. بر این اساس توربین‌ها بسته به منابع پیشران اصلی خود بر دو پایه برآیی و پسایی^۲ تفکیک می‌شوند. دومین تقسیم‌بندی بر اساس محور گردش توربین می‌باشد. در گونه افقی ترجیح داده می‌شود تا توربین موازی با جریان باد قرار گیرد در حالی که در گونه عمودی، توربین در عرض جریان باد و گاهی به صورت اریب نصب می‌گردد. هر نوع پیکربندی از شیوه تولید توان و مسیر محورها مزایا و معایب خود را دارند که در ادامه به صورت مختصر توضیح داده می‌شوند.

توربین‌های بادی برآیی (به خصوص توربین‌های افقی) متداول‌ترین نوع توربین مورد استفاده برای تولید توان در ابعاد بزرگ می‌باشند. این توربین‌ها معمولاً سرعت گردشی بسیار بالایی دارند به نحوی که اتلاف توان هنگامی که توربین به مولد متصل می‌شود را کاهش می‌دهد. همچنین مساحت سطحی نسبی کوچک پره‌های نازک آن‌ها باعث شده است تا توربین‌های برآیی نسبت توان به وزن بالایی داشته باشند. ایراد توربین‌های برآیی شامل نیازمندی آن‌ها به شکل‌دهی دقیق پره‌ها و بالانس آن‌هاست و در نمونه توربین‌های افقی منجر به ناکارآمدی‌هایی در ابعاد کوچک می‌گردد.

از سوی دیگر توربین‌های پسایی به علت گشتاور بالای روتور معمولاً برای کاربردهایی که نیاز به کار مکانیکی کاربردی مستقیم دارند (به عنوان مثال آسیاب بادی برای خرد کردن ذرت) و یا برای نازمندی‌های توان در ابعاد کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

توربین‌های افقی معمولاً از لحاظ ساختاری ساده‌تر و کارآمدتر از لحاظ ابعادی در مقایسه به چیدمان‌های عمودی هستند. همچنین جریان به علت برخورد در میان پره‌ها شاهد تغییرات کمی است که برای یک توربین با محور عمودی این برخورد مستقیم و اجتناب ناپذیر است. با این وجود توربین‌های عمودی از لحاظ

^۲ - Lift-based or Drag-based

نصب و تعمیر ساده‌تر هستند و به همین خاطر برای تولید توان مکانیکی معمولاً بر روی زمین قرار می‌گیرند، در حالیکه ماشین‌هایی با توربین‌های افقی در ارتفاعاتی بالاتر از سطح زمین قرار می‌گیرند [۲].

مثال‌هایی از این نوع توربین‌ها شامل توربین‌های بادی مولد توان مدرن (افقی-برایی)، آسیاب‌های بادی اروپایی قرن ۱۲ میلادی (افقی-پسایی)، توربین‌های بادی دریوس^۳ (عمودی-برایی) و توربین‌های ساونیوس^۴ (عمودی-پسایی) می‌باشند.

۱۴.۱- مقدمه‌های نرم‌افزار فلوئنت^۵

همان‌طور که بیان شد عمده این پروژه با نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است لذا می‌بایست در ابتدا با کلیات آن آشنا شویم. امروزه، استفاده از روش‌های عددی در محاسبات کامپیوتری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و به عنوان ابزاری کارآمد در طراحی وسایل مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدون شک، قسمت عمده‌ای از پیشرفت تکنولوژی در صنعت در سال‌های اخیر مدیون کاربرد کامپیوتر و گسترش و تکامل تکنیک‌های عددی می‌باشد. می‌دانیم خصوصیات فیزیکی جریان یک سیال به وسیله ۳ اصل اساسی کنترل می‌شود:

۱- بقای جرم،

۲- بقای ممنتوم،

۳- بقای انرژی.

این سه اصل اساسی فیزیکی را می‌توان بر حسب معادلات پایه ریاضی بیان نمود که در عمومی‌ترین حالت یا معادلات انتگرالی هستند یا معادلات جزئی. هنر جایگزین کردن انتگرال‌ها یا مشخصات جزئی در این معادلات با عبارات ساده جبری است. این معادلات در فرم جدید قابل حل بوده و جواب‌های عددی برای مشخصه‌های میدان جریان در نقاط مشخصی از زمان یا فضا ارائه می‌دهند. محصول نهایی دینامیک سیالات محاسباتی^۶ مجموعه‌ای از اعداد در حالی که راه حل‌های تحلیلی به فرم بسته‌ای منجر می‌شوند. به طور کلی

۳ - Darrius

۴ - Savonius

۵ - Fluent

۶ - CFD

دینامیک سیالات محاسباتی عبارت است از تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و سایر پدیده‌های همراه آن، نظیر واکنش‌های شیمیایی بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتری است. دینامیک سیالات محاسباتی روش بسیار توانایی می‌باشد به طوریکه طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی را در برمی‌گیرد. برای طراحی، بهینه‌سازی یا اشکال‌زدایی یک سیستم سیالاتی همیشه نیاز است تا رفتار سیال در داخل سیستم مشخص باشد.

هزینه یک کار تجربی برای مشخص کردن رفتار سیال اغلب بسیار زیاد و در بعضی از موارد این کار بسیار سخت است. دینامیک سیالات محاسباتی در طراحی سیستم‌های سیالاتی چند مزیت منحصر به فرد نسبت به روش‌های تجربی دارد.

۱. کاهش اساسی در زمان و قیمت طراحی های جدید،
۲. توانایی مطالعه کردن سیستم‌هایی که انجام آزمایشات کنترل شده روی آن‌ها مشکل و یا غیرممکن می‌باشد (نظیر سیستم‌های خیلی بزرگ)؛
۳. توانایی مطالعه سیستم‌ها تحت شرایط تصادفی و بالاتر از حدود معمول آن‌ها؛
۴. عملاً سطح جزئیات نتایج نامحدود است.

۱۵.۱- معرفی نرم‌افزار فلوئنت

فلوئنت نرم‌افزار مربوط به دینامیک سیالات محاسباتی است. با این نرم‌افزار می‌توان مسایل سیالات، انتقال حرارت و احتراق از حالت ساده تا پیچیده را حل کرد. نرم‌افزارهای دیگری هم هستند که برخی از این قابلیت‌ها را دارند ولی فلوئنت مختص CFD است. این نرم‌افزار در اکثر دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی به عنوان نرم‌افزاری معتبر به کار می‌رود. آماده‌سازی مدل و شبکه‌بندی برای این نرم‌افزار در نرم‌افزارهای دیگر از جمله GAMBIT، TGrid و ICEM CFD انجام می‌پذیرد.

نرم‌افزار Fluent یکی از نرم‌افزارهای صنعتی مشهور می‌باشد که دارای قابلیت‌های فراوانی است. این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی جریان‌های دو و سه بعدی را داراست. برای استفاده از این نرم‌افزار ابتدا توسط یک نرم‌افزار کمکی مانند Gambit یا Mechanical Desktop هندسه جریان مشخص می‌گردد و عمل مش‌بندی

نیز صورت می‌گیرد. نرم افزار Fluent از خروجی نرم‌افزار Gambit استفاده می‌نماید. این نرم‌افزار قابلیت انجام محاسبات با دقت معمولی و دقت مضاعف را دارد و به عنوان یک اختیار، کاربر می‌تواند هر کدام را انتخاب نماید. این نرم افزار بر پایه روش حجم محدود که یک روش بسیار قوی و مناسب در روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد، بنا شده است. قابلیت‌های فراوانی نظیر مدل‌سازی جریان‌های دائم و غیر دائم، جریان لزج و غیرلزج، احتراق، جریان مغشوش، حرکت ذرات جامد و قطرات مایع در یک فاز پیوسته و ده‌ها قابلیت دیگر فلوئنت را تبدیل به یک نرم افزار بسیار قوی و مشهور نموده است. آزمایشات عملی و محاسبات تئوری، دو روش اصلی و مشخص برای پیش‌بینی میزان انتقال حرارت و چگونگی جریان سیال در کاربردهای مختلف صنعتی و تحقیقاتی می‌باشند. در اندازه‌گیری‌های تجربی به دلیل هزینه‌های زیاد ترجیح داده می‌شود که آزمایش‌ها بر روی مدلی با مقیاس کوچکتر از نسخه اصلی انجام پذیرد. حذف پیچیدگی‌ها و ساده‌سازی آزمایش‌ها، خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری و بعضی موانع در راه اندازه‌گیری از جمله مشکلاتی هستند که روش‌های عملی با آن‌ها رو به رو هستند و کارایی این حالت‌ها را در بعضی موارد مورد سوال قرار می‌دهند. مهم‌ترین امتیاز محاسبات تئوری در مقایسه با آزمایش‌های تجربی، هزینه کم آن است. گرچه در بسیاری موارد ترجیح داده می‌شود با استفاده از روش‌های محاسباتی، آنالیز جریان و انتقال حرارت صورت گیرد ولی تایید تحلیل‌های عددی نیاز به مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و یا نتایج تایید شده دیگری دارد. در میان محققان، انجام پژوهش‌های تجربی ارزش بسیار بالایی دارد و اگر بتوان آزمایش مطلوبی انجام داد، تحلیل‌های زیادی را بر محور آن‌ها می‌توان گسترش داد و اطلاعات فراوانی بدست آورد. در هر صورت با دسترسی به دستگاه‌های محاسبه‌گر و رایانه‌های قوی، امروزه در بسیاری از موارد آنالیز دینامیک سیالات و انتقال حرارت با روش‌های عددی انجام می‌پذیرد. هرچه پدیده مورد بررسی پیچیدگی بیشتری داشته باشد، روش‌های عددی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند.

علاوه بر سرعت بیشتر محاسبات عددی، می‌توان با این روش‌ها اطلاعات کامل با جزئیات بیشتر، از قبیل تغییرات سرعت، فشار، درجه حرارت و غیره را در سراسر حوزه مورد نظر به دست آورد. در مقابل، اغلب اوقات شبیه‌سازی آزمایشگاهی جهت بدست آوردن این گونه اطلاعات مشکل و مستلزم صرف زمان

زیاد بوده و در بعضی شرایط غیرممکن است. در اکثر مسایل مربوط به مکانیک سیالات به دلیل پیچیدگی معادلات مربوطه، استفاده از حل تحلیلی امکان پذیر نمی باشد. در این تحقیق نیز به کمک نرم افزار و با استفاده از مدل سازی، به بررسی یک پدیده فیزیکی اقدام کرده ایم. جهت انجام این تحقیق نیاز است تا معادلات دیفرانسیل پاره ای را حل کنیم که این عمل تنها با استفاده از روش های عددی امکان پذیر است. حل عددی این معادلات از طریق دانش مکانیک سیالات محاسباتی صورت می گیرد. در پروژه حاضر حل این معادلات به کمک نرم افزار فلوئنت، انجام می شود که در ادامه به شرح قسمتی از کارایی های این نرم افزار می پردازیم.

فلوئنت یک نرم افزار کامپیوتری چندمنظوره برای مدل سازی جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی در هندسه های پیچیده است، که به زبان برنامه نویسی C نوشته شده است. با توجه به محیط مناسب این نرم افزار جهت تعریف مسأله و شرایط مرزی گوناگون، مسایل پیچیده شامل اثرات مختلف به کمک این نرم افزار قابل حل می باشد. در عین حال برای مدل سازی مسائل خاص می توان از UDF، UDS و UDM استفاده نمود. UDS به معنی User Defined Scalar می باشد که با استفاده از آن می توان معادله انتقال^۷ تعریف نمود که این معادلات در کنار معادلات اصلی فلوئنت همچون جریان، آشفتگی، انتقال حرارت و سایر معادلات حل خواهد شد. UDM به معنی User Defined Memory می باشد که همان طور که از نام آن پیداست، برای تعریف حافظه استفاده می شود. در صورتی که از این حافظه ها استفاده شود، در منوهای Post Processing این حافظه ها هم به لیست اضافه شده و کانتور مربوط نمایش داده می شود. UDF نیز زبان برنامه نویسی فلوئنت می باشد. برای نوشتن UDF بایستی از توابع تعریف شده در این نرم افزار استفاده نمود.

نرم افزار فلوئنت برای آنالیز و حل مسایل طراحی خاص، روش های شبیه سازی کامپیوتری متفاوتی را بکار می برد. برای راحتی کار امکان تعریف مسأله، محاسبه و دیدن نتایج از طریق منوهای مختلف وجود دارد. وقتی نیاز باشد، نرم افزار فلوئنت می تواند مدل مورد نظر را از دیگر برنامه ها (نرم افزارهای) تولید مدل

۷- Transport Equation

که با آن‌ها سازگاری دارد وارد کند. این نرم‌افزار امکان تغییر شبکه را به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه‌های بی‌سازمان برای هندسه‌های پیچیده را فراهم می‌سازد. نوع شبکه‌های قابل تولید و دریافت توسط این گروه نرم‌افزاری شامل شبکه‌هایی با المان‌های مثلثی و چهار ضلعی (برای هندسه‌های دو بعدی) و چهار وجهی، شش وجهی، هرمی یا گوه‌ای (برای هندسه‌های سه بعدی) می‌باشد. همچنین فلونتت به کاربر اجازه دستکاری شبکه (مثلاً ریزکردن یا درشت کردن شبکه در مرز و مکان‌های لازم در هندسه) را می‌دهد. این بهینه‌سازی برای حل و شبکه، قابلیت در اختیار کاربر قرار می‌دهد که نتایج را در ناحیه‌هایی که دارای گرادیان‌های بزرگ (مثل لایه مرزی و...) باشند، دقیق‌تر سازد. این قابلیت‌ها مدت زمانی را که برای تولید یک شبکه خوب احتیاج می‌باشد در مقایسه با حل در شبکه‌های با سازمان به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. همانطور که گفته شد این نرم افزار با زبان برنامه نویسی C نوشته شده است و از تمامی توان و قابلیت انعطاف این زبان بهره می‌برد. در نتیجه این نرم‌افزار با استفاده از حافظه دینامیک، ساختار مناسب داده‌ها و اطلاعات و کنترل انعطاف‌پذیر محاسبات را ممکن می‌سازد. نرم افزار فلونتت قابلیت شبیه‌سازی و مدل کردن موارد زیر را دارد:

- جریان در هندسه‌های پیچیده دو بعدی و سه بعدی،
- جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر،
- جریان‌های دائمی و گذرا،
- جریان‌های لزج آرام و متلاطم،
- سیال‌های نیوتنی و غیر نیوتنی،
- انتقال حرارت جابجایی/ هدایتی،
- انتقال حرارت تشعشعی،
- انتقال حرارت جابجایی، شامل جابجایی آزاد و اجباری،
- مدل فریم‌های چرخان یا ساکن،
- شبکه‌های لغزان و متحرک،

- واکنش‌ها و ترکیبات شیمیایی شامل احتراق و مدل‌های واکنشی،
- اضافه کردن ترم‌های اختیاری حجمی از گرما، جرم، ممنتوم، اغتشاش و ترکیبات شیمیایی،
- جریان‌های درون ناحیه متخلخل،
- مدل‌های مبدل / فین یک بعدی،
- جریان‌های دو فازی، شامل حباب سازی^۸
- جریان‌های سطحی آزاد یا اشکال سطوح پیچیده.

^۸- Cavitation

۲- تاریخچه پژوهش

صنعت توربین‌های بادی در حال حاضر با مشکلات فراوانی در مورد ساخت ماشین‌های توربین بادی کارآمد به دلیل عدم توانایی پیش‌بینی بارهای سازه‌ای، توان خروجی و اثرات جریان پشت پره‌ها بر روی پره‌های سایر توربین‌ها مواجه است. در سال‌های گذشته تلاش‌های فراوانی به جهت فهم رفتار توربین‌های بادی صورت پذیرفته است اما کمبود شبیه‌سازی‌های عددی به خصوص به صورت سه‌بعدی بر روی چند توربین به صورت هم‌زمان محسوس می‌باشد. از آنجایی که بارهای کاری مربوطه و توان خروجی به علت نیروهای ایرودینامیکی است، به منظور تعیین نیازمندی‌های ساختاری و توانی، دینامیک سیالات حاکم می‌بایست به خوبی فهمیده شود. برای امکان‌سنجی، از شبیه‌سازی سه بعدی حالت ناپایا و داده‌های تونل باد برای تخمین نیروهای ایرودینامیکی روی پره‌های توربین بادی استفاده می‌نمایند.

تلاش‌هایی بر پایه تئوری‌های محاسباتی جریان پتانسیل - ناویراستوکس هیبرید سه بعدی بر روی روتور چرخ‌بال و کاربردهای ملخ آن در توربین‌های بادی افقی انجام شده است [۲]. در این رهیافت معادلات ناویراستوکس تراکم‌پذیر ناپایای سه بعدی در یک ناحیه کوچک بر روی یک شبکه چسبنده به سطح که پره روتور را احاطه کرده، در نظر گرفته شده است و در دوردست پره‌ها معادلات جریان پتانسیل حل شده‌اند. اثر گردابه‌های پره‌ها در اثر استال دینامیکی و تغییرات چرخش در راستای افق و دهانه پره‌ها با استفاده از رشته‌های گردابه‌ای که آزادانه در نواحی جریان جابجا می‌شوند، ثبت شده است.

همانطور که بیان شد انرژی باد بیانگر یک منبع پاک انرژی در دسترس انسان‌هاست. پیشرفت‌های اخیر در زمینه ایرفویل و روتورها، فن‌آوری مواد، سیستم‌های تولید توان و ساخت، سیستم‌های توربین بادی را در حالت کلی و سیستم‌های توربین بادی محور عمودی را در حالت خاص به صورت اقتصادی و ملموس جایگزین مناسبی برای سیستم‌های تولید توان بر پایه سوخت‌های هیدروکربنی تبدیل کرده است. مراجع مختلفی همچون [۴-۲] درباره فن‌آوری و جنبه اقتصادی انرژی باد بحث کرده‌اند. مقالات بسیاری به شبیه‌سازی این سیستم‌های تولید توان بر اساس ابزار ایرفویل دو بعدی [۹-۶] و المان‌های پره سه بعدی و تئوری مومنوم [۱۰] پرداخته‌اند. تعدادی کدهای جامع کامپیوتری با استفاده از این روش‌شناسی در حاضر برای

طراحان قابل دسترسی هستند. در این شیوه‌ها، اثرات جریان ناپایا نادیده گرفته می‌شود و یا با استفاده از داده‌های دو بعدی مطابقت داده شده‌اند [۱۱]. در نتیجه این شیوه‌ها در تبیین دقیق فرایند استال دینامیکی سه بعدی، اثرات سایه برج، اثرات برجستگی‌های نوک و عقب‌روندگی ناتوان هستند. با این وجود هزینه بالای مطالعات سه بعدی معادلات ناویر استوکس کاربرد آن‌ها را محدود ساخته است [۱۲].

شایان ذکر است که مهم‌ترین موضوعی که در این زمینه بسیار بدان پرداخته شده است تاکید بر پره‌های چرخ‌بال‌هاست [۱۵۱۳]. با این وجود همچنان کارهای زیادی به منظور مطالعه پدیده استال پره‌های بادی انجام می‌شود. لارسن و همکارانش در مقاله‌ای [۱۶] خلاصه‌ای از مدل‌های مختلف واقعی مورد استفاده برای مدل‌سازی استال ارائه کرده است و آن‌ها را به سه گروه اصلی طبقه‌بندی نموده است.

۱- اثرات تغییر شرایط جریان مدل‌سازی شده است؛ به عنوان مثال کاهش نیروی برا به علت جدایش، تاخیر زمانی که بر پیش‌روندگی لبه جدایش اثر می‌گذارد و غیره؛

۲- تعیین مشخصات منحنی برا و مدل کردن آن‌ها با و بدون سازوکارهای تولید فیزیکی؛ به عنوان مثال منحنی رشد خطی در زوایای حمله کم، کاهش ناگهانی نیروی برا در یک زاویه استال داده شده و غیره؛

۳- اصلاح زاویه حمله که زاویه حمله دینامیک را ایجاد می‌نماید.

لیشمن و بدوئس^۹ در یک سری مقالاتشان مدلی برای شبیه‌سازی استال که شامل تاخیر جریان و اثرات جدایش بود اما بر اساس دینامیک روتور چرخ‌بال بنا نهاده شده بود را توسعه دادند. لارسن و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۰۷ میلادی بیان داشتند که تنها مدل آن‌ها، مدل لیشمن و بدوئس و مدل ریسو توانایی تولید مجدد داده‌های تجربی را در شرایط جریان کاملاً چسبیده و رژیم استال دارد. علاوه بر این‌ها چندین کار دیگر نیز ارائه گشته‌اند اما عمده کارهای آن‌ها بر روی توزیع فشار یا کمک به تعیین قابلیت اطمینان مدل‌های دینامیک سیالات عددی می‌باشد. مدل احمدی، شریف و جمشیدی [۱۷] در سال ۲۰۰۹ رفتار جریان را اطراف ایرفویل NACA ۰۰۱۲ که با اعداد مختلف رینولدز با دامنه‌های مختلف نوسان می‌کند را

^۹ - Leishman-Beddoes

شبیه‌سازی کرده است. وولفکن-موهلن و همکارانش [۱۸] توزیع فشار را برای رژیم استال با استفاده از شیوه‌های تجربی تحلیل نمودند در حالیکه یووس و دیزن [۱۹] نتایج مشابهی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-CFX بدست آوردند. گاش و بآندر [۲۰] در یک نمونه مشابه معادلات تحلیلی را نیز ضمیمه کردند. ایمامورا [۲۱] خلاصه‌ای از انواع تحلیل عملکرد روتور که شامل شیوه مومنتوم المانی پره، دنباله‌های گردابه‌ای و دینامیک سیالات عددی است را منتشر نمودند. علاوه بر این وی کدهای دینامیک سیالات عددی‌ای را که به صورت فعال توسعه یافته‌اند را با ذکر جزئیات بیان نموده و مزیت کارش آن است که بیان می‌دارد هر کدام برای چه کاری مناسب هستند و نتایج این کارها در مراجع مختلف [۲۲-۲۶] آمده است. دوو و سلیگ [۲۷-۲۸] اثرات سه بعدی جریان لایه مرزی را برای پره توربین بادی در حال چرخش را مطالعه نمودند و دریافتند که جدایش به علت چرخش پره که نیروی برای تولید شده را افزایش می‌دهد به تاخیر می‌افتد.

همانطور که قبلاً نیز بیان شد انرژی بادی موجود در جهان بسیار بیشتر از میزان مصرف انرژی کنونی دنیا می‌باشد. میزان بالقوه‌ی انرژی بادی موجود در طبیعت ۷۲ هزار گیگاوات تخمین زده شده است، که این مقدار تقریباً ۵ برابر مصرف کنونی انرژی در تمام اشکال مختلف است [۲۹]. پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است ظرفیت تولید انرژی الکتریکی بادی تا پایان سال ۲۰۱۴ میلادی به مقدار ۴۰۹ گیگاوات خواهد رسید. لازم به ذکر است که این ظرفیت تا پایان سال ۲۰۰۸ میلادی برابر ۱۵۸ گیگاوات بوده است [۳۰]. توربین‌های باد افقی ارزان‌ترین و پاک‌ترین راه برای رسیدن به این انرژی هستند.

جریان در توربین‌های باد، حتی در توربین‌های بسیار بزرگ نیز همچنان تراکم‌ناپذیر می‌باشد و عدد ماخ در نوک پره‌های توربین به ندرت از ۰/۲۵ ماخ، بیشتر می‌شود. این امر دلیل استفاده از حل‌کننده‌های تراکم‌ناپذیر جریان در توربین‌های بادی را نشان می‌دهد. شیوه‌های مختلفی با سطوح پیچیدگی‌های متفاوت در زمینه‌ی پیش‌بینی رفتار آیرودینامیک توربین‌های بادی توسعه پیدا کرده‌اند. یکی از روش‌های کم هزینه و کارآمد در این زمینه تئوری مومنتم می‌باشد که در زمینه‌ی طراحی‌های مهندسی بسیار محبوب می‌باشد که دلیل آن اطلاعات موجود ضرایب لیفت و درگ، برحسب زاویه‌ی حمله برای ایرفویل‌های مختلف می‌باشد

[۳۱]. مدل‌ها و نرم‌افزارهای متعددی بر اساس تئوری مومنتم توسعه داده شده‌اند و برای بهبود عملکرد این مدل‌ها و نرم‌افزارها، مدل‌های تصحیح‌کننده‌ای مانند تصحیح‌های واماندگی دینامیکی و تصحیحات افت نوک پره انجام شده است [۳۲ و ۳۳]. برای احراز فیزیک‌های بیشتری از آیرودینامیک توربین باد و حفظ راندمان محاسباتی بالا، مدل‌های آیرودینامیکی ۳ بُعدی غیر لزج با شیوه‌هایی از قبیل خط برا [۳۴]، پانل [۳۵]، گردابه [۳۶] و معادلات انتگرالی مرزی [۳۷] معرفی شده‌اند. کارهای مشابه دیگری نیز در برخی مراجع [۳۸-۴۲] ارجاع داده شده است.

شیوه‌های دینامیک سیالات عددی گوناگونی بر روی توربین باد اجرا شده‌اند. در مرجع [۴۳] رفتار توربین در سرعت‌های باد مختلف و با زوایای سمتی متفاوت توسط حل‌کننده‌ی حجم محدود PUMA_۲ با مش‌های چرخنده بی‌سازمان، حل شده است و نتایج آن مطابقت خوبی با آزمایش داشته است، اما طبیعت غیرلزج نرم‌افزار باعث محدود شدن پیش‌بینی‌های آن هنگام جدایش‌های حجیم می‌شود. در مرجع [۴۴] تأثیرات آیرودینامیکی ۳ بُعدی به عنوان تابعی از سرعت باد مورد مطالعه قرار گرفته شده است و در حل آن از روش حجم محدود چند بلوکی و از نرم‌افزار حل‌کننده‌ی EllipSys_{۳D} استفاده شده و فقط روتور مدل شده است. مطابقت‌های کمی و کیفی مناسب این مدل با نتایج آزمایشگاهی حاکی از مزایای روش‌های دینامیک سیالات عددی در شبیه‌سازی توربین باد می‌باشد.

شاید فراگیرترین مطالعات آیرودینامیکی در این زمینه در مرجع [۴۵] آمده است که نویسنده در آن جریان روی توربین باد به وسیله‌ی حل‌کننده‌ی تراکم‌پذیر NASA compressible RANS Overflow-D بر مبنای روش تفاضل محدود و با مش‌های Overset حل کرده است [۴۶]. در این مرجع کامل ([۴۵]) نویسندگان نتایج Overflow-D را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده‌اند و به طور مفصل در مورد عملکرد دینامیکی توربین باد اعم از توان شفت، نیروی نرمال و ضریب فشار بحث کرده‌اند. در مرجع [۴۷] برای پیش‌بینی رفتار آیرودینامیک روتور یک توربین باد ایزوله از روش چند مشی بی‌سازمان در حل‌کننده‌ی NSU_{۳D} استفاده شده و نتایج هم با نتایج آزمایشگاهی و هم با نتایج Overflow مقایسه شده‌اند. در مرجع

[۴۸] روتور توربین باد ۵ MW NREL با استفاده از دو روش المان محدود و $NURB^{10}$ برای هندسه، مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که نرم افزار NURB برای تحلیل های آیرودینامیکی-سازه ای بسیار مناسب می باشد [۴۹].

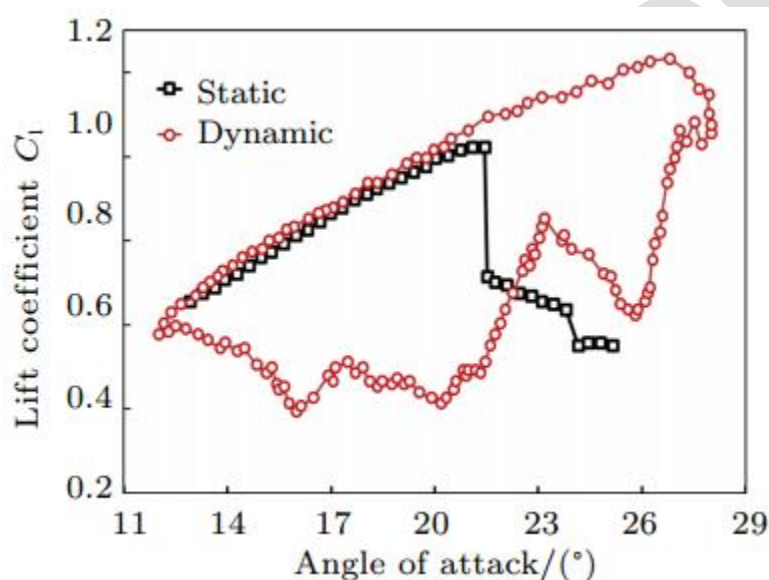
همان طور که واضح است اغلب مراجع فقط روتور توربین را مدل کرده اند و در برخی موارد حتی فقط تیغه ی روتور مدل شده است که با توجه به فیزیک نسبتا پیچیده ی مسأله و با هدف کم کردن هزینه های محاسباتی و صرفه جویی در زمان منطقی می باشد، اما ممکن است در نتایج مدل سازی برخی از اثرات مهم جریان جا انداخته شوند. یک روش محاسباتی مناسب برای اجسامی که نسبت به هم حرکت می کنند روش DMOG می باشد. این روش اثرات مربوط به تغییر شکل الاستیک را نیز در بر می گیرد [۵۰].

هنوز مسائل کلیدی فراوانی در مورد آیرودینامیک توربین باد وجود دارد که باید حل شوند. آیرودینامیک توربین باد به شدت پیچیده می باشد. اول به خاطر اینکه سرعت و جهت باد هر لحظه در حال تغییر است و توربین های باد همواره آشفتگی و برش بالای جریان باد را تجربه می کنند و این توربین ها همواره در شرایط ناپایا کار می کنند. دوم بر خلاف یک بال ثابت که می توان جریان روی آن را با آیرودینامیک خطی مطالعه کرد، آیرودینامیک توربین باد با هیچ عنوان با آیرودینامیک خطی هم خوانی ندارند. این امر باعث بروز مسائل و مشکلات در زمینه ی توربین باد می شود که از جمله ی آنها می توان به نیاز به تکرارهای فراوان در حل کننده های عددی اشاره کرد. سوم توربین های باد از برهم کنش های سنگین تری رنج می برند. برای یک توربین در مسیر باد، برج توربین باد گردابه هایی تولید می کند که روتور توربین در هر گردش از میان این گردابه ها عبور می کند. یا مثلا در مزارع توربین باد (مکان هایی که در آنها چندین توربین باد هم زمان و در فاصله ی نسبتا کمی از هم، کار می کنند) هر یک از توربین ها در گردابه های توربین های دیگر قرار می گیرند. چهارم زاویه ی حمله ی پره های توربین باد نسبتا بالا است. یک توربین باد علاوه بر دینامیک جریان داخلی^{۱۱}، بسیار بیشتر از یک بال ثابت با استال عمیق استاتیکی و دینامیکی رو به رو است.

^{۱۰} - Non-Uniform Rational B-splines

^{۱۱} - Dynamic Inflow

زمانی که یک توربین باد در معرض نوسانات باد و یا عملیات کنترلی با افت و خیز بالا قرار می‌گیرد، پدیده‌ی استال دینامیکی رخ می‌دهد. مراجع [۵۷۵۱] و متدهای CFD ذکر شده در مراجع [۶۳۵۸] نشان می‌دهند که مشخصه‌های استال دینامیکی هنگام بازگشت جریان از سطح مکش به صورت پی در پی انتشار پیدا می‌کنند و به ترتیب تولید و جابجایی گردابه‌های بزرگ در لبه‌ی حمله پس از جدایش حجیم و پس از آن چسبیدن مجدد جریان^{۱۲} به بدنه تیغه می‌باشد (یک سیکل استال دینامیکی). **Error! Reference source not found.** [۶۴] نمونه‌ای از تغییرات ضریب لیفت در اثر استال دینامیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ نمونه‌ای از تغییرات ضریب برا در اثر استال دینامیکی

استال دینامیکی در توربین‌های باد به دلیل چرخش و همچنین فشار بالای محیطی که در آن کار می‌کند، بسیار پیچیده‌تر می‌باشند و بدین طریق موجب گردش عظیم بارهای آیرودینامیکی در هنگام وقوع گردابه می‌گردد که این امر باعث بروز ارتعاشات و شکست‌های سازه‌ای می‌شود [۶۵ و ۶۶]. بنابراین توسعه‌ی مدل‌های مهندسی برای استال دینامیکی ضروری می‌باشد. چندین مدل تجربی و نیمه تجربی برای تحلیل رفتار روتور توربین باد در استال دینامیکی در دسترس می‌باشند که در مرجع [۶۷] مستندسازی شده‌اند. در

^{۱۲} - Flow reattachment

بین این مدل‌ها، مدل استال دینامیکی لی‌شمن-بدوس [۶۸] و نسخه اصلاح شده‌ی آن [۶۹]، بیشترین استفاده را در صنعت توربین‌های بادی دارد. به هر حال نتایج به دست آمده از به کار بردن این مدل‌ها اختلافات گسترده‌ای را با اطلاعات اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد [۷۰ و ۷۱]. این اختلاف می‌تواند ناشی از دو عامل باشد. اول اینکه ایرفویل‌های مورد استفاده در این مدل‌ها با ایرفویل‌هایی که در عمل برای توربین باد ساخته می‌شوند کمی متفاوتند. دلیل دیگر مربوط به دو بعدی بودن اطلاعات آزمایشگاهی می‌باشد چراکه اثرات چرخشی به شدت بر روی توسعه‌ی لایه‌ی مرزی تاثیرگذار است. برای حل این نوع مسائل تلاش‌های فراوانی در راستای بهبود مدل‌های ذکر شده برای استفاده در توربین باد انجام شده است. یک مدل استال دینامیکی اصلاح شده‌ی لی‌شمن-بدوز برای اعداد ماخ پایین در مرجع [۷۲] ارائه شده است، همچنین در مراجع [۷۳ و ۷۴] نیز کارهای مشابهی انجام شده است. مرجع [۷۵] یک مدل استال دینامیکی جدید ارائه می‌کند که در آن جریان چسبیده و جدایش لایه‌ی مرزی نیز به حساب آورده شده‌اند. آقایان لو و وانگ نیز در مرجع [۷۶] یک مدل استال دینامیکی ۳ بعدی بر مبنای داده‌های آزمایشگاه دینامیکی یک بال ۳ بعدی ارائه کرده‌اند. یکی از بهترین کارهایی که در این زمینه انجام شده است در مرجع [۷۷] آمده است که به صورت موضوعی و خلاصه ایرودینامیک توربین باد و پیچیدگی‌های آن را مورد بررسی قرار داده است. مدل‌های ایرودینامیکی شامل تئوری مومنتوم پره، مدل دنباله گردابه‌ها، استال دینامیکی و اثرات چرخش و همچنین کاربردهایشان در پیش‌بینی عملکرد ایرودینامیک توربین باد در این مقاله [۷۷] به همراه کارهای جدیدی که در این زمینه‌ها انجام گرفته، آدرس داده شده است.

تا اینجا بحث اصلی پدیده‌های کلی حاکم بر توربین‌های بادی بوده است. در ادامه بحثی بر کارهای خاصی که در زمینه توسعه توربین‌های ساونیوس انجام شده است بیان می‌گردد. تبسم و پروبرت [۷۸] یک طراحی باریکه‌ای^{۱۳} را مورد بررسی قرار داده‌اند و دریافتند که این نوع طراحی گشتاور اولیه را در توربین‌های بادی ساونیوس استاندارد را به میزان ۳۵٪ افزایش می‌دهد و تایید گردید که گشتاور استاتیک اصلی بر روی روتور در ازای تغییرات جهتی دلخواه روتور مثبت می‌باشد. ریپک و پروبرت [۷۹] تحقیقات خود را ادامه

۱۳ - Slatted Design

دادند و تایید کردند که این نوع توربین‌ها به خودی خود شروع به کار می‌کنند و نسبت سرعت لبه آن‌ها (در حدود ۰/۸) کمی بهینه‌تر از توربین‌های ساونیوس معمولی (در حدود ۰/۷) می‌گردد. این طراحی باریکه‌ای منجر به گشتاور بیشتری در سرعت‌های پایین توربین ساونیوس می‌گردد اما نیروهای گریز از مرکزی پره‌های چرخان به شدت بازدهی توربین را در سرعت‌های بالای توربین کاهش می‌دهد. در نتیجه پیک بازده توان تنها به ۰/۰۵ در مقایسه با ۰/۱۸ برای توربین‌های ساونیوس ساخته شده مشابه می‌رسد.

۲. تولید شبکه محاسباتی

نرم افزار گمبیت برای کمک به طراحان در تولید هندسه و تولید شبکه اطراف هندسه جسم در کاربردهای دینامیک سیالات محاسباتی طراحی شده است.

در واقع بسته نرم افزاری گمبیت، یک پیش پردازنده برای نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی نظیر فلوئنت است که خروجیهای این برنامه به شکل فایل های ورودی برای نرم افزار فلوئنت می باشد.

نرم افزار گمبیت شامل سه بخش می باشد

- تولید هندسه:

در این مرحله هم می توان هندسه را در این نرم افزار تولید کرد و هم می توان از نرم افزارهای دیگر تولید کننده هندسه مانند Solid Work, Auto Cad, CATIA, ... هندسه تولید شده را به این نرم افزار فرستاد.

- تولید شبکه:

در این مرحله با استفاده از امکانات منحصر بفرد این نرم افزار، اقدام به تولید شبکه در اطراف هندسه جسم می شود.

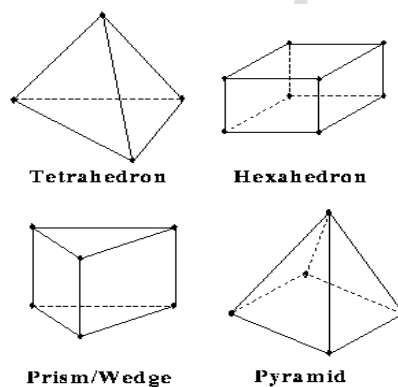
- تعریف نواحی مختلف:

در این مرحله ساختار مناسب به شبکه تولید شده برای قابل فهم شدن در حلالهای مختلف، نظیر فلوئنت اعطا می شود. مانند تعریف کردن مرزها و نواحی مختلف.

۱.۲- انواع شبکه بندی

معمولا قلمرو محاسبات به شکل مستطیلی انتخاب می شود و نقاط داخلی شبکه بر روی خطوط شبکه توزیع می شوند. این نوع شبکه را با سازمان می گویند. دسته دیگری از شبکه ها به گونه ای است که نقاط شبکه آنها را نمی توان بر روی خطوطی از شبکه که بصورت منظم تعریف شده اند، مرتبط نمود. به این شبکه ها، بی-سازمان می گویند. اینکه چه شبکه ای بهتر است بستگی به سادگی و پیچیدگی هندسه جسم و یکسری ملاحظات دیگر دارد.

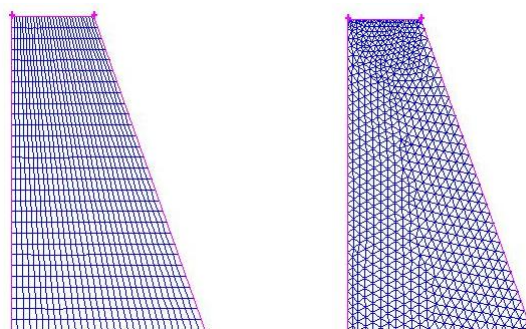
این نرم افزار برای هندسه های دو بعدی، سل های مثلثی و چهارضلعی، و برای هندسه های سه بعدی سل های چهار وجهی، شش وجهی، هرمی و گوه ای تولید می کند.



شکل ۲-۱ سل های سه بعدی

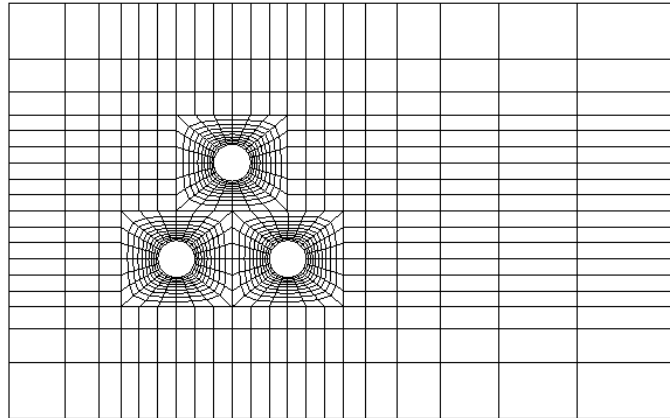
کنترل تولید شبکه های باسازمان نسبتا آسان است ولی تولید این نوع شبکه برای اجسام با هندسه پیچیده، مشکل بوده و زمان فوق العاده زیادی را می گیرد و در بعضی از موارد تقریبا غیر ممکن است. همین موضوع مهمترین عامل در گرایش کاربران به استفاده از شبکه های بی سازمان است. اما اشکال شبکه های بی-سازمان نیز دشواری کنترل آنها است. کاربر نمی تواند به دلخواه خود آنچنان که باید و شاید شبکه را تولید کند، بعنوان مثال چنانچه از شبکه بی سازمان بر روی پره بالگرد یا بال هواپیما استفاده شود نمی توان سل ها

را در نقاط حساس مانند لبه حمله و لبه فرار در طول پره یا بال زیاد کرد (شکل ۲-۲). بلکه این ازدیاد تنها در نقاط انتهایی و ابتدایی پره یا بال (tip & root) قابل کنترل است.



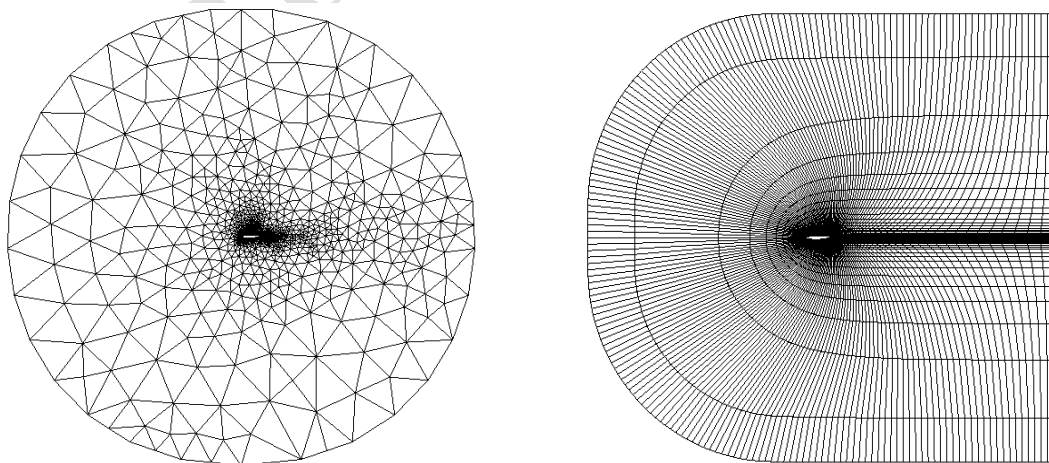
شکل ۲-۲ نمونه‌ای از شبکه با سازمان و بی‌سازمان

البته می‌توان برای کنترل بیشتر بر تولید شبکه میدان را به چند قسمت تقسیم کرد و بدین وسیله تعداد مرزهای داخل میدان را افزایش داده و برای هر یک از مرزها شبکه‌بندی خاصی ارائه داد و از آنجا که شبکه جسم مورد نظر باید با توجه به تمامی مرزها تولید شود لذا می‌توان کنترل بیشتری بر شبکه داشت. با این کار هم شبکه بهتری درست شده و هم تعداد سل‌های شبکه کمتر می‌شود (شکل ۲-۳). همچنین می‌توان برای تولید شبکه قسمتی از آن را با سازمان و قسمتی از آن را بی‌سازمان تعریف نمود.



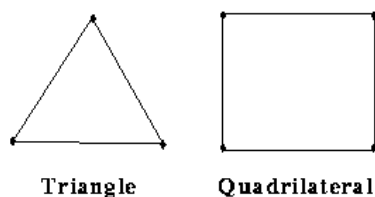
شکل ۲-۳ تقسیم شبکه

یکی از مهمترین مزیت‌های شبکه‌های باسازمان این است که می‌توان سل‌ها را تا حدی عمود بر جهت جریان قرار داد که این موضوع هم روند رسیدن به جواب‌ها را تسهیل نموده و هم دقت جوابها را بالا می‌برد. اهمیت این مسأله تا آنجاست که به شرط عمود بودن سل‌ها بر جهت جریان، تفاوت نامحسوسی بین نتایج حل عددی معادلات گسسته شده درجه اول و درجه دوم جریان در نرم‌افزار فلوئنت بوجود می‌آید. اما چنانچه از شبکه بی‌سازمان استفاده شود از آنجایی که سل‌ها بر جهت جریان عمود نیستند بین نتایج حل درجه اول و درجه دوم، اختلاف بوجود می‌آید. تفاوت بین این دو در شکل ۲-۴ قابل مشاهده است.



شکل ۲-۴ مقایسه شبکه بی‌سازمان و باسازمان

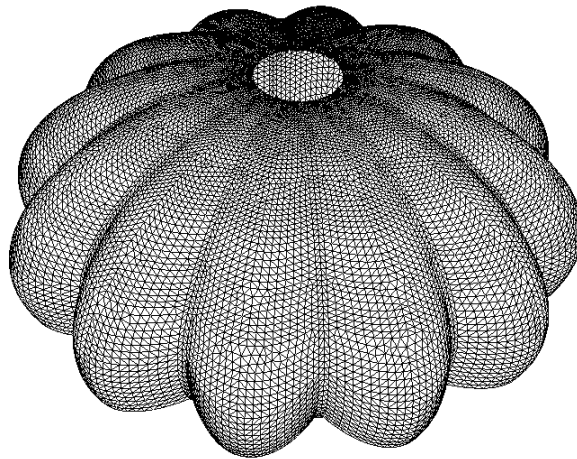
شکل سل‌ها اعم از قائم یا اریب بودن و نسبت منظری (skewness & aspect ratio) تاثیر بسزایی بر نتایج حل عددی دارد. کجی بیش از حد سل‌ها در دقت و ثبات حل اثر منفی دارد. بعنوان مثال همانطور که در شکل ۲-۵ دیده می‌شود سل‌های مربعی زوایای حدود ۹۰ درجه و سل‌های مثلثی زوایای حدود ۶۰ درجه دارند که در این مورد اخیر سل دچار کجی شده است.



شکل ۲-۵ سل‌های دوبعدی

نسبت منظری نیز مبین میزان کشیدگی سل‌ها است. برای جریان‌های آرام یا جریان‌های یکنواخت نسبت منظری سل‌ها می‌تواند تا حد زیادی افزایش یابد بدون اینکه تاثیر چندانی بر دقت حل داشته باشد. اما این مسأله با پیچیده شدن جریان تحت الشعاع قرار می‌گیرد تا آنجا که از نسبت منظری بیش از ۵:۱ حذر می‌شود.

هنگامی که هندسه پیچیده یا از لحاظ ابعاد طولی در یکی از جهات گسترده باشد، چنانچه از شبکه بی-سازمان استفاده شود تعداد سل کمتری تولید می‌گردد. این موضوع به این خاطر است که سل‌های بی-سازمان راحت‌تر می‌توانند خود را با هندسه شکل وقف دهند که نمونه‌ای از آن در شکل (۶-۲) قابل مشاهده است. اما از طرف دیگر استفاده از شبکه باسازمان این امکان را بوجود می‌آورد تا بتوان نسبت سطح منظری سل‌ها را بیشتر افزایش داد درحالیکه استفاده از سطح منظری زیاد برای سل‌های بی‌سازمان منجر به اریب شدن آنها می‌شود.



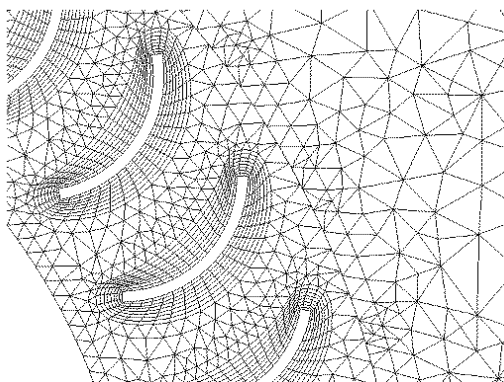
شکل ۲-۶ قدرت شبکه بی‌سازمان در وقف یافتن با هندسه جسم

چنانچه مرزهای جریان توسط دیواره محصور شده باشد یا دیواره بر جریان اثر قابل توجه داشته باشد بایستی در مورد تولید شبکه در نزدیک دیواره دقت مضاعف نمود. یعنی اینکه باید از تولید شبکه فوق العاده ریز (هنگام استفاده از قانون دیواره) یا شبکه فوق العاده درشت (هنگام استفاده از مدل دولایه‌ای) در نزدیک دیواره خودداری نمود. همواره تعدادی از لایه‌های سل می‌بایستی داخل لایه مرزی دیواره قرار بگیرد. مشخص کردن ضخامت اولین لایه (y_p) بسیار مهم است، بخاطر اینکه بقیه لایه‌ها روی همین لایه سوار شده و اصولاً ضخامت آنها نیز بر اساس ضخامت همین لایه اول شکل می‌گیرد. بر اساس فرضیه بلازیوس، برای صفحه تخت رابطه زیر برقرار است.

$$y_p \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} \leq 1$$

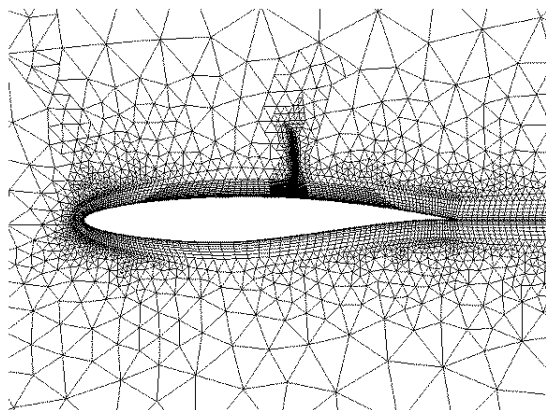
معادله ۲-۱ :

بر این اساس تعداد لایه‌های سل داخل لایه مرزی نباید کمتر از ۵ لایه باشد.



شکل ۲-۷ نمونه‌ای از شبکه ریز شده در نزدیکی دیواره (پره‌های روتور)

تجمع شبکه در نقاطی که گرادیان فشار زیاد وجود دارد از جمله محل رخداد شوک، داخل لایه مرزی، نواحی تداخل جریان، نواحی جدایش جریان، نواحی لغزنده روی هم و ... نیز مسأله مهمی است. از آنجایی که در بسیاری از موارد نمی‌توان شبکه را در نقاط مورد نظر ریز یا درشت کرد (بعلت اینکه قبل از تحلیل از محل دقیق رخداد این وقایع اطلاعی در دست نیست) می‌توان پس از چند مرحله حل در نرم‌افزار فلوئنت به اصلاح شبکه (Adaptation) پرداخت. در شکل زیر نمونه‌هایی از ریز شدن شبکه قابل مشاهده است.



شکل ۲-۸ نمونه‌ای از اصلاح شبکه در محل رخداد شوک

۲.۲- شبکه بندی پره های توربین ساونیوس

از آنجایی که هندسه پره های توربین ساونیوس منظم و قطاعی از یک دایره یکسان می باشند و همچنین جریان از یک سمت این پره ها که ورودی توربین بوده وارد و از سوی دیگر خارج می شود، لذا بهتر است تا از شبکه بی سازمان استفاده شود. چرا که تولید شبکه با سازمان، باعث ایجاد تراکم مناسب در ورودی و خروجی نمی شد و در نهایت هم در بعضی از قسمتهای مدل، شبکه ایجاد نمی شد (Small Gap).

همانطور که در شکل در فصل چهارم نشان داده می شود برای شبکه سطح پره از سل های مثلثی شکل استفاده شده است.

مرزهای دور دست جریان نیز بصورت مستطیلی در نظر گرفته شده، که فاصله ها بصورت نسبت گیری شده با شعاع دایره مماس بر لبه های تمام پره های خارجی می باشد. فاصله از ورودی جریان ۶ برابر و از خروجی ۱۲ برابر شعاع دایره مورد نظر می باشد. همچنین فاصله از بال و پایین مرزها ۵ برابر این مقدار می باشد.

همانطور که در شکل های فوق دیده می شود برای شبکه روی سطح اجسام هر چقدر از جسم فاصله گرفته می شود، ابعاد سل ها می شوند. این کار بدین خاطر است که با دور شدن از جسم، تغییرات فشار داخل هر سل کم می شود و دیگر احتیاجی نیست تا سل های دوردست به اندازه سل های نزدیک جسم باشند. در دو مدل مورد نظر بصورت ساده و دارای استاتور نیز این مسأله در اطراف پره ها و استاتورها رعایت شده است.

۳. تئوری‌های حاکم بر مسأله

همانطور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد لازم است قبل از ورود به بحث‌های شبیه‌سازی و ارائه نتایج لازم است تا با تئوری‌های پایه و حاکم بر مسأله آشنا شویم. در حقیقت هدف اصلی این فصل ایجاد دانشی پایه به منظور فهم بهتر فیزیک حاکم بر مسأله و نحوه مدل‌سازی این فیزیک با روابط ریاضیاتی است. مهمترین نکته در تحلیل عددی جریان درک کامل از فیزیک جریان حل می‌باشد. زیرا روش حل در فیزیک‌های جریانی متفاوت یکسان نیست. اگر نوع جریان به درستی تعیین نشود نمی‌توان روش عددی مناسب را به آن اعمال کرد. بنابراین ابتدا به امر فیزیک جریان مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱.۳- فیزیک جریان

هدف از استفاده از توربین‌های بادی تولید برق با استفاده از جریان عبوری هوا می‌باشد. پس نوع سیال عبوری جریان هوا است. سیال هوا سیالی تراکم‌پذیر است ولی با توجه به سرعت آن می‌توان فرض تراکم‌پذیری یا تراکم‌ناپذیری را برای آن در نظر گرفت. این تقسیم‌بندی با توجه ماخ جریان عبوری تعیین می‌شود. ماخ عبوری اگر کمتر از 0.3 باشد جریان را می‌توان تراکم‌ناپذیر در نظر گرفت ولی با افزایش ماخ به بیشتر از 0.3 دیگر شرط تراکم‌ناپذیری صادق نیست پس جریان را تراکم‌پذیر در نظر می‌گیرند.

در توربین‌های بادی با توجه به این که جریان هوا با سرعت پایین به پره‌ها برخورد می‌کند جریان تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود. پس باید الگوریتم حل مناسب با آن اعمال شود.

در تقسیم‌بندی‌های جریانی دو جریان لزج و غیر لزج وجود دارد. تفاوت این دو جریان در میزان اثر لزجت است. در طبیعت در واقع جریان غیر لزج وجود ندارد. اما در مهندسی اگر اثر لزجت بسیار کم باشد می‌توان جریان را غیر لزج فرض کرد. در این مسأله با توجه به اینکه لزجت نقش مهمی در نیروهای آیرودینامیکی بازی می‌کند نمی‌توان جریان را غیر لزج فرض کرد.

حال که جریان لزج در نظر گرفته شد، ماهیت آرام و یا آشسته بودن نیز مطرح می‌شود. زمانی جریانی را می‌توان آرام در نظر گرفت که خطوط جریان مسیر مستقیم و بدون نوسان طی کنند. ولی در

جریان آشفته جریان انرژی بیشتری دارد و جریان دیگر خطوط مستقیم را طی نمی‌کند و نوسان می‌کند. با توجه به اینکه در جریان مسأله حاضر از روی ایرفویل توربین بادی عبور می‌کند حتماً دچار آشفتگی خواهد شد. اما قسمت ابتدایی عبوری را می‌توان آرام فرض کرد ولی بعد از گذشتن از مقداری از قطر ایرفویل جریان آشفته می‌شود پس ماهیت جریان آرام و آشفته است.

در دسته بندی دیگر جریان سیالات به پایا و ناپایا بودن آن‌ها می‌توان اشاره کرد. مشخصاً حرکت پره توربین بادی یک حرکت ناپایا است زیرا نسبت به زمان متغیر است اما می‌توان جریان آن را متناوب در نظر گرفت و و به حل نیمه پایا رسید. حتی می‌توان به جای حل کل پره‌ها یک پره از توربین مورد حل قرار گیرد.

بعد از شناسایی فیزیک مسأله باید مسأله به درستی مدل‌سازی شود تا جوابی درست بدهد. اگر در شناسایی فیزیک مسأله اشتباهی رخ دهد، هر چه قدر هم که مدل‌سازی درست و دقیق باشد یا به جوابی غلط می‌رسد یا اصلاً جواب نمی‌دهد. پس دوباره بر اهمیت شناسایی فیزیک جریان تاکید شد.

۲.۳- معادلات حاکم بر فرایند حل

حل کننده عددی که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است، نرم‌افزار Fluent می‌باشد که توسط کمپانی ANSYS توسعه یافته است. این حل کننده قادر به حل معادلات بقاء، یا همان معادلات سه بعدی ^{۱۴} RANS می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی عددی جریان یک توربین باد از مجموع معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت (معادله تراکم ناپذیر سه بعدی RANS) و انرژی کل برای گاز ایده‌آل استفاده می‌شود. از آنجایی که عدد ماخ جریان بسیار پایین بوده، لذا از شکل تراکم ناپذیر معادلات بقاء استفاده می‌شود. در این بخش معادلات حاکم بر فرایند حل عددی و همچنین معادلات مدلی که برای شبیه‌سازی فرایند اغتشاش در نظر گرفته شده است، توضیح داده می‌شود.

۱۴ - Reynolds-Averaged Navier-Stokes

معادله جابه‌جایی و انتشار اسکالر در شکل بقاء به صورت معادله ۲-۳ تعریف می‌شود، که با توجه به این رابطه معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی، به ترتیب به صورت روابط ۲-۳، ۳-۳ و ۵-۳ تعریف می‌شوند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\phi - \Gamma\nabla\phi) = S \quad \text{معادله ۲-۳}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{U}) = 0 \quad \text{معادله ۳-۳}$$

$$\frac{\partial(\rho\vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\otimes\vec{U}) = \mathbf{B} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad \text{معادله ۴-۳}$$

در معادله ۲-۳ که معادله اندازه حرکت می‌باشد، σ تانسور تنش بوده که به صورت رابطه ۴-۳ بیان می‌گردد.

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\delta + \left(\zeta - \frac{2}{3}\mu\right)\nabla \cdot \vec{U}\delta + \mu\left(\nabla\vec{U} + (\nabla\vec{U})^T\right) \quad \text{معادله ۵-۳}$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{U}H) - \nabla \cdot (\lambda\nabla T) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{معادله ۶-۳}$$

در رابطه ۵-۳، H آنتالپی کل می‌باشد که به صورت رابطه ۶-۳ تعریف می‌گردد.

$$H = h + (1/2)\vec{U}^2 \quad \text{معادله ۷-۳}$$

در رابطه ۶-۳، h آنتالپی سکون^{۱۵} می‌باشد. در روابط بالا، ρ چگالی سیال، $\vec{U}$ بردار سرعت، p فشار،

T دما، t زمان، B نیروی حجمی^{۱۶}، μ لزجت دینامیکی و ζ لزجت حجمی^{۱۷} را نشان می‌دهند.

به دلیل داشتن اختلاط بین دو جریان اصلی و جریان خنک‌کننده که دارای دماهای متفاوتی

می‌باشند، با اثر نیروی شناوری حرارتی سر و کار خواهیم داشت. تقریب بوزینسک^{۱۸} برای چگالی سیال به

صورت رابطه ۷-۳ بیان می‌گردد، که در رابطه ۷-۳، ρ و T به ترتیب نشان دهنده چگالی و دمای مرجع

بوده و β نیز نشان دهنده ضریب انبساط حرارتی است.

^{۱۵} - Static entalpy

^{۱۶} - Body force

^{۱۷} - Bulk viscosity

^{۱۸} - Boussinesq's

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$$

معادله ۳-۸:

۳.۳- مدل اغتشاشی

به منظور مدل سازی اغتشاشات از معادلات ناویر-استوکس^{۱۹} استفاده می شود. دو روش متوالی برای مدل سازی اغتشاش توسط معادلات ناویر-استوکس به وجود آمده است که دلیل این امر را می توان چنین ذکر کرد که نوسانات اغتشاشی کوچک را نمی توان به صورت مستقیم با استفاده از روش متوسط گیری رینولدز^{۲۰} مدل کرد. هرکدام از روش ها عباراتی به معادلات حاکم بر جریان آرام اضافه می کنند که بستگی به تعداد ناشناخته های ما دارد. معادلات RANS بر مقادیر میانگین کمیت های انتقالی میدان حاکم می باشند. در مجموع هدف تعیین ویسکوزیته گردابه ای^{۲۱} می باشد، که این کار با ربط دادن تانسور تنش رینولدز توسط مدل های اغتشاشی به مقادیر میانگین در میدان جریان که قابل محاسبه می باشند، صورت می گیرد و ویسکوزیته گردابه ای را با μ_t نشان می دهند. همچنین μ_t پارامتری است که وابسته به جریان می باشد و به نوع ماده بستگی نداشته و در کل قلمرو مقدارش متفاوت است. پس به طور کلی می توان چنین بیان کرد که به منظور ربط دادن تانسور تنش رینولدز به پارامترهای میدانی قابل محاسبه از معادلات اغتشاشی کی - اپسیلون^{۲۲} استفاده می شود.

۱.۳.۳- مدل اغتشاشی $k - \varepsilon$

این مدل اغتشاشی بر روی مکانیزمی که بر انرژی جنبشی اغتشاش تاثیرگذار است، متمرکز می باشد و منظور از k و ε معادلاتی هستند که برای انرژی جنبش ناشی از اغتشاش و تلفات ایجاد شده توسط اغتشاش تعریف می شوند. معادله انرژی جنبشی اغتشاش را با k و معادله تلفات ناشی از اغتشاش را با ε نشان داده می شود. انرژی جنبشی لحظه ای $K(t)$ برای یک جریان مغشوش به صورت مجموع دو انرژی جنبشی متوسط و اغتشاش در نظر گرفته می شود که در روابط ۳-۸ و ۳-۹ به ترتیب مشاهده می شوند، که

^{۱۹} - Navier-Stokes

^{۲۰} - Reynolds-averaging

^{۲۱} - Eddy viscosity

^{۲۲} - k-Epsilon ($k - \varepsilon$)

در این روابط U ، V و W به ترتیب نشان دهنده مقادیر سرعت متوسط و $\bar{u}$ ، $\bar{v}$ و $\bar{w}$ به ترتیب نشان دهنده مقادیر سرعت ناشی از اغتشاش در راستای x ، y و z می باشند.

$$K = \frac{1}{2}(U^2 + V^2 + W^2) \quad \text{معادله ۹-۳}$$

$$k = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) \quad \text{معادله ۱۰-۳}$$

که در این صورت خواهیم داشت:

$$K(t) = K + k \quad \text{معادله ۱۱-۳}$$

به منظور بسط دادن روابط نیاز به نرخ تغییر شکل و تنش اغتشاش می باشد، که نرخ تغییر شکل را با e_{ij} و تنش را با τ_{ij} به شکل ماتریسی نشان داده می شود.

$$e_{ij} = \begin{pmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{معادله ۱۲-۳}$$

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{معادله ۱۳-۳}$$

نرخ تغییر شکل المان سیال در یک جریان مغشوش به مؤلفه های متوسط و نوسانی تجزیه می گردد که رابطه ۱۳-۳ نشان دهنده این امر می باشد.

$$e_{ij}(t) = E_{ij} + \acute{e}_{ij} \quad \text{معادله ۱۴-۳}$$

که در نهایت المان های ماتریس نرخ تغییر شکل به صورت روابط ۱۴-۳ الی ۱۹-۳ نشان داده می شوند.

$$e_{xx}(t) = E_{xx} + \dot{e}_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} \quad \text{معادله ۳-۱۵:}$$

$$e_{yy}(t) = E_{yy} + \dot{e}_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \dot{v}}{\partial y} \quad \text{معادله ۳-۱۶:}$$

$$e_{zz}(t) = E_{zz} + \dot{e}_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial z} \quad \text{معادله ۳-۱۷:}$$

$$e_{xy}(t) = E_{xy} + \dot{e}_{xy} = e_{yx}(t) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \dot{u}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} \right] \quad \text{معادله ۳-۱۸:}$$

$$e_{xz}(t) = E_{xz} + \dot{e}_{xz} = e_{zx}(t) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \dot{u}}{\partial z} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} \right] \quad \text{معادله ۳-۱۹:}$$

$$e_{yz}(t) = E_{yz} + \dot{e}_{yz} = e_{zy}(t) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \dot{v}}{\partial z} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial y} \right] \quad \text{معادله ۳-۲۰:}$$

۴.۳- معادلات حاکم بر انرژی جنبشی متوسط جریان

انرژی جنبشی متوسط با تقسیم کردن مؤلفه‌های در راستای X معادله رینولدز بر U و مؤلفه‌های در راستای Y بر V و مؤلفه‌های در راستای Z بر W بدست خواهد آمد. به عنوان نمونه معادله رینولدز در راستای X پس از تقسیم به صورت معادله ۳-۲۰ خواهد شد.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(UU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v \text{div grad} U + \left[-\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right] \quad \text{معادله ۳-۲۱:}$$

که در نهایت پس از عملیات جبری معادلات زمانی میانگین حاکم بر انرژی جنبشی متوسط جریان به صورت معادله ۳-۲۱ خواهد شد.

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div}(-PU + 2\mu U E_{ij} - \rho U \bar{u}_i \bar{u}_j) - \quad \text{معادله ۳-۲۲:}$$

$$2\mu E_{ij} \cdot E_{ij} + \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \cdot E_{ij}$$

$$(I) \quad (II) \quad (III) \quad (IV) \quad (V) \quad (VI) \quad (VII)$$

ترم‌های معادله ۳-۲۱ را می‌توان به صورت زیر معنی کرد:

محصولات + نرخ تلفات - انتقال K توسط + انتقال K توسط + انتقال K = انتقال K توسط + نرخ تغییرات

K

اغتشاش K تنش رینولدز تنش‌های لزجی توسط فشار جابه‌جایی

اثر تنش برشی سیال بر روی K به دو قسمت تقسیم می‌شود، ترم (IV)، که بیان کننده جابه‌جایی K به علت تنش برشی سیال و ترم (VI)، که بیانگر پراکندگی لزجت انرژی جنبشی متوسط می‌باشد. دو ترمی که شامل تنش رینولدز هستند به منظور محاسبه اثر اغتشاش در نظر گرفته شده‌اند، که ترم (V)، جابه‌جایی اغتشاش K به وسیله تنش رینولدز و ترم (VII)، ترم تولید اغتشاش و یا ترم کاهنده انرژی جنبشی متوسط به علت تغییر شکل به وسیله تنش برشی در لایه مرزی خطی در سیال ناروان می‌باشد.

۵.۳- معادلات حاکم بر انرژی جنبشی اغتشاش جریان

به منظور بدست آوردن این معادلات، معادلات ناویراستوکس لحظه‌ای را مانند حالت قبل بر مؤلفه‌های سرعت نوسانی تقسیم کرده و پس از انجام یک سری عملیات جبری، معادلات انرژی جنبشی اغتشاش به صورت معادله ۲۲-۳ بدست خواهند آمد.

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left(-\overline{p' u'} + 2\overline{\mu u' e'_{ij}} - \overline{\rho^2 u'_i u'_i u'_j} \right) - \text{معادله ۲۳-۳}$$

$$2\overline{\mu e'_{ij} \cdot e'_{ij}} - \overline{\rho u'_i u'_j} \cdot E_{ij}$$

(I)
(II)
(III)
(IV)
(V)
(VI)
(VII)

که ترم‌های معادله ۲۲-۳ را می‌توان به صورت زیر معنی کرد:

محصولات - نرخ تلفات - انتقال k توسط + انتقال k توسط + انتقال k = انتقال k توسط + نرخ تغییرات k
 اغتشاش k تنش رینولدز تنش‌های لزجی توسط فشار جابه‌جایی

با توجه به سمت راست معادله ۲۲-۳ مشخص است که انرژی جنبشی اغتشاش به شدت تابع فعل و انفعال اغتشاش می‌باشد و این بیان‌های ریاضی نشان دهنده تبدیل انرژی جنبشی متوسط به انرژی جنبشی اغتشاش می‌باشد. ترم (VI) که بیانگر نرخ تلفات ناشی از ویسکوزیته است به صورت رابطه ۲۳-۳ بیان می‌گردد.

$$2\mu \overline{e'_{ij} \cdot e'_{ij}} = -2\mu (\overline{e'_{11}}^2 + \overline{e'_{22}}^2 + \overline{e'_{33}}^2 + \overline{2e'_{12}}^2 + \overline{2e'_{13}}^2 + \overline{2e'_{23}}^2) \quad \text{معادله ۲۴-۳}$$

اتلاف انرژی جنبشی به علت به وجود آمدن گردابه‌هایی است، که خود این گردابه‌ها به علت تنش برشی سیال به وجود می‌آیند. نرخ اتلاف بر واحد جرم که به شدت هم به دینامیک اغتشاش وابسته است، به صورت رابطه ۲۴-۳ نشان داده می‌شود.

$$\varepsilon = 2\nu \overline{e'_{ij} \cdot e'_{ij}} \quad \text{معادله ۲۵-۳}$$

که این اتلاف در معادله انرژی اغتشاش همیشه ترم اصلی اتلاف می‌باشد.

۱.۵.۳- معادلات مدل اغتشاشی $k - \varepsilon$

از k, ε برای تعریف مقیاس سرعت ϑ و مقیاس طول l برای اغتشاشات در مقیاس بزرگ به صورت رابطه ۲۵-۱ استفاده می‌شود.

$$\vartheta = k^{\frac{1}{2}} \quad \square = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad \text{معادله ۲۶-۳}$$

ویسکوزیته گردابه‌ای را نیز به صورت رابطه ۲۶-۳ تعریف می‌شود.

$$\mu_t = C\rho\vartheta\square = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{معادله ۲۷-۳}$$

مدل استاندارد $k - \varepsilon$ از دو معادله یکی برای k و دیگری برای ε تشکیل شده است که معادله ۲۷-۳

مربوط به k و معادله ۲۸-۳ مربوط به ε می‌باشد.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] - 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \quad \text{معادله ۲۸-۳}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } \varepsilon \right] - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{معادله ۲۹-۳}$$

ترم‌های معادله $k - \varepsilon$ را نیز می‌توان به صورت زیر معنی کرد:

نرخ اتلاف ε یا k - نرخ تولید ε یا k + انتقال ε یا k = انتقال ε یا k + نرخ تغییرات ε یا k

توسط انتشار توسط جابه‌جایی

۶.۳- مدل استاندارد $k - \varepsilon$

در این مدل فرض بر آن است که جریان کاملاً مغشوش بوده و لزجت مولکولی نیز در نظر گرفته نمی‌شود. این مدل تنها برای جریان‌های اغتشاشی کاملاً توسعه یافته کاربرد دارد.

۱.۶.۳- معادلات انتقال مدل استاندارد $k - \varepsilon$

معادلات انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ تلفات به ترتیب از معادلات ۲۹-۳ و ۳۰-۳ بدست می‌آیند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + \quad \text{معادله ۳۰-۳:}$$

$$S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - \quad \text{معادله ۳۱-۳:}$$

$$C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

در معادلات ۲۹-۳ و ۳۰-۳، G_k نشان دهنده انرژی جنبشی اغتشاش است که این انرژی به دلیل

گرادیان سرعت تولید می‌شود.

G_b نیز نشان دهنده انرژی جنبشی اغتشاش که به علت نیروی شناوری تولید شده است، می‌باشد.

Y_M نشان دهنده توزیع انبساط نوسانی در اغتشاش تراکم پذیر نسبت به نرخ کلی تلفات می‌باشد.

$C_{1\varepsilon}$ و $C_{2\varepsilon}$ ضرایب ثابت می‌باشند.

σ_k و σ_ε اعداد اغتشاشی پرنتل به ترتیب برای k و ε می‌باشند.

S_k و S_ε ترم‌هایی هستند که توسط خود کاربر تعریف می‌شوند.

ویسکوزیته گردابه‌ای نیز به صورت رابطه ۲۶-۳ تعریف می‌گردد.

ثابت‌های این مدل نیز به صورت زیر مقداردهی می‌شوند:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

از جمله مزایای این مدل آن است که پیچیدگی خاصی ندارد و در زمینه همگرایی، مدل خوش رفتاری می‌باشد. همچنین مدل اغتشاشی‌ای که تخمین می‌زند تا حد زیادی قابل قبول می‌باشد و نسبت به دو مدل دیگر که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهیم کرد، به علت سابقه بیشتر قابل اطمینان‌تر می‌باشد.

از جمله معایب این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. در مسأله‌هایی که چرخش و جدایش شدید است تا حدودی ضعیف عمل می‌کند.
۲. همچنین این مدل برای شبیه‌سازی جت سیال زیاد مناسب نمی‌باشد.
۳. برای شبیه‌سازی جریان در کانال‌های غیر دایره‌ای ضعیف عمل می‌کند.
۴. برای شبیه‌سازی در ناحیه گذر^{۲۳} زیاد مناسب نمی‌باشد و هرچه جریان اغتشاشاتش بیشتر باشد مدل مورد نظر بهتر عمل می‌نماید.
۵. مدل استاندارد به دلیل ساده‌سازی در زمینه ε ممکن است ضعیف عمل کند. علت این امر این است که این مدل یک سری از ضرایب را در معادله اصلی ثابت در نظر می‌گیرد.

ذکر این نکته ضروری است که تمامی مدل‌های اغتشاشی $k - \varepsilon$ در معادلات ε بایکدیگر متفاوت هستند.

۷.۳- مدل آر. إن. جی. $k - \varepsilon$

این مدل از معادلات لحظه‌ای ناویراستوکس با استفاده از تکنیکی ریاضی به نام RNG مشتق شده است و شبیه به مدل استاندارد بوده، با این تفاوت که دارای تغییراتی به صورت زیر می‌باشد:

۱. این مدل دارای ترم‌های اضافی در معادله ε می‌باشد که باعث افزایش دقت در جریان‌های متراکم پرسرعت شده است؛

۲. این مدل نسبت به مدل استاندارد از میزان دقت بیشتری برای جریان‌های چرخشی برخوردار است؛

۳. این مدل برای تعیین عدد اغتشاش پرنتل از رابطه تحلیلی استفاده می‌کند در حالی که در روش

استاندارد بایستی خود کاربر ضرایب را تعیین کند؛

^{۲۳} - Transient

^{۲۴} - RNG (Renormalization Group)

۴. همچنین این مدل برای اعداد رینولدز پایین نیز قابل استفاده می‌باشد.

۱.۷.۳- معادلات انتقال برای مدل آر. إن. جی. $k - \varepsilon$

معادلات انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ تلفات به ترتیب از معادلات ۳-۳۱ و ۳-۳۲ بدست می‌آیند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad \text{معادله ۳-۳۲}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) -$$

$$C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

۸.۳- مدل تحقق‌پذیر $k - \varepsilon^{25}$

این مدل نسبت به مدل استاندارد دارای دو تفاوت مهم می‌باشد که عبارتند از:

۱. این مدل شامل فرمول جدیدی برای ویسکوزیته اغتشاش است؛

۲. در این مدل معادله جدیدی برای نرخ تلفات ε که از معادلات دقیق جابه‌جایی برای نوسانات

میانگین گردابه مشتق شده است، استفاده می‌شود.

ترم تحقق‌پذیر به این معنی است که این مدل برخی قیود ریاضی در تنش رینولدز را که سازگار با

فیزیک جریان مغشوش است را ارضاء می‌کند. این روش نسبت به دو روش قبلی برای مدل‌سازی جت‌های

خروجی بهتر عمل می‌کند. همچنین این مدل برای مدل‌سازی جریان‌های چرخشی یا گردابه‌ای، لایه مرزی

تحت گرادیان‌های شدید فشار معکوس و جدایش‌های شدید بهتر از مدل‌های قبلی عمل می‌نماید.

۱.۸.۳- معادلات انتقال برای مدل تحقق‌پذیر $k - \varepsilon$

معادلات انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ تلفات به ترتیب از معادلات ۳-۳۳ و ۳-۳۴ بدست می‌آیند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + \quad \text{معادله ۳-۳۴:}$$

$$S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + \quad \text{معادله ۳-۳۵:}$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

۹.۳- معادلات حاکم در نرم افزار فلوئنت

همانطور که قبلاً نیز بیان شد این نرم افزار با زبان برنامه نویسی C نوشته شده است و از تمامی توان و قابلیت انعطاف این زبان بهره می برد. در نتیجه این نرم افزار استفاده از حافظه‌ی دینامیک، ساختار مناسب داده‌ها و اطلاعات و کنترل انتعطاف پذیر محاسبات را ممکن می سازد. به علاوه استفاده از ساختار Client/Server موجب اجرای کارآمد برنامه، کنترل سیستم و انعطاف پذیری کامل سیستم عامل می گردد.

تمامی توابعی که برای انجام محاسبات و نمایش نتایج لازم اند از طریق منوهای برنامه به سادگی قابل دسترسی می باشند. صفحات کاربردی برنامه همگی با استفاده از زبان Scheme که یکی از شاخه‌های LISP است، برنامه نویسی شده اند. البته نرم افزار این قابلیت را در اختیار کاربران حرفه‌ای قرار می دهد که بتوانند صفحات کاربردی را با تعریف توابع و ماکروهای جدید به دلخواه تنظیم نمایند.

۱.۹.۳- مراحل حل مسأله

هنگامی که حل یک مسأله مورد نظر باشد، باید مراحل زیر رعایت شود:

۱- تولید شکل (هندسی)،

۲- شبکه بندی در نرم افزارهای پیش پردازنده،

۳- اجرای برنامه با توجه به هندسه (دو بعدی یا سه بعدی)،

۴- انتقال شبکه از پیش پردازنده به نرم افزار محاسبه گو،

۵- بررسی شبکه تولید شده،

۶- انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل،

۷- انتخاب معادلات اساسی که باید حل شوند مثل آرم یا متلاطم (یا لزج)، واکنش‌ها با ترکیب

شیمیایی، مدل‌های انتقال حرارت و غیره، مشخص کردن مدل‌های دیگر اگر لازم و ضروری باشد.

مثل: فن‌ها، مبدل‌های حرارتی، محیط‌های متخلخل و غیره.

۸- تعیین خواص،

۹- تعیین شرایط مرزی،

۱۰- تنظیم کردن پارامترهای کنترل کننده ی حل،

۱۱- مقداردهی اولیه به میدان جریان،

۱۲- شروع کردن محاسبات،

۱۳- امتحان کردن نتایج محاسبات،

۱۴- ذخیره نتایج،

۱۵- بهینه‌سازی شبکه، حل و مدل فیزیکی (اگر نیاز باشد).

۲.۹.۳- انتخاب شیوهی محاسباتی و فرمول‌بندی حل

فلوئنت سه روش برای فرمول‌بندی حل کننده تدارک دیده است:

- Coupled Explicit
- Coupled Implicit
- Segregated

این سه نوع فرمول‌بندی حل کننده نتایج بسیار دقیقی را در بازه‌ی وسیعی از انواع سیال‌ها ارائه

می‌دهد. در بعضی موارد ممکن است یکی از فرمول‌بندی‌ها بهتر باشد (به طور مثال با به کار بردن یکی از

شیوه‌ها نسبت به شیوه‌های دیگر ممکن است حل، سریع‌تر همگرا شود) روش‌های Coupled و Segregated

چشم‌اندازی متفاوت در راه حل معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی (اگر موجود باشد) و معادلات ترکیبات

شیمیایی ارائه می‌دهند. شیوه‌ی Segregated معادلات را پی در پی حل می‌کند (به عبارتی جدا از همدیگر)

اما شیوهی Coupled معادلات را به صورت هم زمان و وابسته به یکدیگر حل می‌کند. Implicit و Explicit بودن این شیوه راهی است که معادلات خطی می‌شوند.

شیوهی Segregated ترجیحا برای جریان‌های غیرقابل تراکم و یا به طور ملایم قابل تراکم به کار برده می‌شود. اما شیوهی Coupled به طور اختصاصی برای جریان‌های قابل تراکم سرعت بالا طراحی شده است. هر دو شیوه برای کل بازه‌ی جریان‌ها به کار برده می‌شوند. (از غیر قابل تراکم تا خیلی تراکم پذیر) اما استفاده از شیوه Coupled مزیت بسیار زیادی بر استفاده از شیوه Segregated برای جریان‌های قابل تراکم سرعت بالا دارد. به صورت پیش فرض فلونت، شیوه Segregated را به کار می‌برد، اما برای جریان‌های قابل تراکم سرعت بالا و نیروهای شناوری یا چرخشی، بهتر است از شیوهی Coupled Implicit استفاده شود. این شیوه حل معادلات جریان و انرژی اغلب سریع‌تر باعث همگرایی و دستیابی به نتایج مورد نظر می‌شود.

۳.۹.۳- دسته‌بندی انواع نواحی و تنظیم شرایط مرزی

شرایط مرزی تعیین کننده جریان و خاصیت‌های حرارتی در مرزها با توجه به فیزیک مسأله می‌باشد. شرایط مرزی اجرا بسیار مهم و تعیین کننده‌ای در نرم‌افزار شبیه‌سازی فلونت است. شرایط مرزی در نرم افزار فلونت به صورت زیر دسته‌بندی می‌شود:

- جریان خروجی و ورودی به مرز: فشار ورودی، فشار خروجی، سرعت ورودی، سرعت خروجی، جریان جرم ورودی، جریان جرم خروجی، ورودی آزاد (تهویه)، خروجی آزاد (تهویه)، فن یا هواکش؛

- دیوار و مرزهای جفت و تکرار شونده: دیوار، مرز متقارن، تکرار شونده و محوری؛
- نواحی و سلول‌های داخلی: سیال، جامد (متخلخل نیز نوعی از ناحیه سیال می‌باشد)؛
- مرزهای صفحه‌های داخلی: فن، رادیاتور، مرز متخلخل، دیوار، ناحیه داخلی (داخل).

مرزها را می‌توان با توجه به لیست جدول ۱ تغییر داد. (ناحیه صفحه‌ای است که دو قسمت متفاوت را جدا می‌کند).

جدول ۳-۱ شرایط مرزی در فلوئنت

Category	Zone Types
Faces	Axis,outflow,mass flow inlet,presure far field,presure inlet,presure outlet,symmetry,velocity inlet,wall,inlet vent , intake fan ,outlet vent,exhaust fan
Double-Sided Faces	Fan, interior,porous jump,radiator,wall
perodic	Periodic
Cell	Fluid,solid(porous is a type of fluid cell)

جهت تنظیم نمودن شرایط مرزی برای یک ناحیه خاص باید یکی از دستورالعمل‌های زیر را انجام

داد:

الف) انتخاب ناحیه در منوی شرایط مرزی در قسمت لیست ناحیه‌ها؛

ب) کلیک کردن بر روی کلید Set.

یا

۱) انتخاب ناحیه در لیست نواحی؛

۲) انتخاب بر روی نوع ناحیه در قسمت Type list؛

یا

۱) با انتخاب کردن دو بار پی در پی بر روی لیست نواحی.

در این صورت منویی برای انتخاب کردن ناحیه مرزی باز خواهد شد و شما می‌توانید نوع خاص و

مناسبی از شرایط مرزی را انتخاب کنید. منوی شرایط مرزی برای ورود و خروج در نرم‌افزار فلوئنت به شرح

زیر می‌باشد:

✓ شرط مرزی سرعت ورودی، که برای تعریف سرعت و خاصیت‌های اسکالری از جریان در مرز ورودی

به کار گرفته می‌شود.

✓ شرط مرزی فشار ورودی، که برای تعریف فشار کل^{۲۶} و دیگر کمیت‌های اسکالر در ورودی جریان به کار گرفته می‌شود.

✓ شرط مرزی جریان جرمی، که در جریان تراکم‌پذیر برای بیان میزان جریان جرمی در ورودی در نظر گرفته می‌شود. به کارگیری ورودی جریان جرمی در جریان غیرقابل تراکم ضروری نمی‌باشد، زیرا هنگامی که چگالی ثابت باشد، این شرط مرزی با شرط مرزی سرعت در ورودی یکسان خواهد بود.

✓ شرط مرزی فشار خروجی، که برای تعریف کردن فشار استاتیک در خروجی جریان (و همچنین متغیرهای اسکالر، مانند جریان برگشتی) به کار گرفته می‌شود. به کارگیری شرط مرزی فشار خروجی نسبت به دیگر شرایط خروجی، زمانی که جریان برگشتی رخ می‌دهد، اغلب نتیجه بهتری در همگرایی دارد.

✓ شرط مرزی Pressure – Far Field، که برای مدل کردن جریان آزاد قابل تراکم در بی‌نهایت به کار می‌رود. این شرط فقط برای جریان قابل تراکم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

✓ شرط مرزی Out Flow، که برای مدل کردن جریان در خروجی در حالتی که جزییات جریان از قبیل شرایط در خروج کاملاً توسعه یافته باشد، به طوری که گرادیان نرمال برای تمام متغیرها به جز فشار صفر در نظر گرفته می‌شود، به کار رود. این شرط را نمی‌توان در جریان‌های قابل تراکم مورد استفاده قرار داد.

✓ شرط مرزی Intel Vent، که برای مدل کردن ورودی آزاد با مشخص بودن ضریب افت خاص، جهت جریان، فشار کل محیط ورودی و دما به کار گرفته می‌شود.

✓ شرط مرزی Intake Fan، که برای Intake Fan خارجی با معلوم بودن یک تغییر ناگهانی فشار خاص، جهت جریان، فشار کل محیط و دما به کار گرفته می‌شود.

^{۲۶}- Total Pressure

✓ شرط مرزی Outlet Vent، که برای مدل کردن خارجی آزاد و تهویه در صورت معلوم بودن ضریب افت خاص، فشار استاتیک تخلیه و دما به کار گرفته می‌شود.

✓ شرط مرزی Exhaust Fan، که برای مدل کردن فن اگزوست خارجی با معلوم بودن تغییر ناگهانی فشار و فشار استاتیک تخلیه به کار گرفته می‌شود.

۴.۹.۳- شرایط مرزی ورودی فشار

شرط مرزی ورودی فشار، برای تعریف فشار سیال در ورودی جریان با تمامی خواص اسکالر جریان، به کار می‌رود. این شرط ورودی برای هر دو نوع جریان قابل تراکم و غیرقابل تراکم مناسب می‌باشد. شرط مرزی ورودی فشار، وقتی که فشار ورودی معلوم باشد اما میزان جریان یا سرعت آن معلوم نیست، به کار می‌رود. این موضوع ممکن است در بسیاری از موارد مانند جریان‌های بالا برنده‌ی ارشمیدسی، اتفاق بیفتد. شرط مرزی ورودی فشار می‌تواند برای تعریف مرز آزاد در جریان خارجی یا جریان غیرمحدود به کار رود. باید اطلاعات زیر را در مرزهای ورودی فشار وارد کرد:

- فشار کل؛
- پارامترهای اغتشاش (برای محاسبات اغتشاش)؛
- دمای کل؛
- تغییر فاز (برای محاسبات تغییر فاز)؛
- جهت جریان؛
- نسبت جرمی ترکیب شیمیایی (برای محاسبه‌ی ترکیب)؛
- فشار استاتیک؛
- نسبت مخلوط و واریانس (برای محاسبات PDF احتراق)؛
- پارامترهای تشعشی (برای محاسبه مدل $P-1$, DTRM یا مدل DO)؛
- نسبت حجمی برای جریان‌های چند فازی (برای محاسبات چند فازی)؛

مقدار فشار کل را باید در قسمت Gauge Total Pressure از مجموعه مشخصات فشار ورودی وارد نمود و همچنین دمای کل نیز باید در قسمت Total Temperature وارد گردد. باید به خاطر داشت که مقداری از فشار، که فشار نسبی بر حسب آن اندازه گرفته می‌شود در منوی فشار کارکرد^{۲۷} وارد شده است. فشار کل برای سیال غیرقابل تراکم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_0 = P_s + \frac{1}{2} \rho |v|^2 \quad \text{معادله ۳-۳۶:}$$

و برای جریان قابل تراکم:

$$P_0 = P_s \left[1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right]^{k/(k-1)} \quad \text{معادله ۳-۳۷:}$$

اگر مدل کردن یک چرخش ایزومتريک مورد نظر باشد v در معادله‌ی (۳-۳۵) شامل مقادیر چرخش نیز می‌شود. اگر جریان ورودی مافوق صوت باشد و یا اینکه کاربر خواسته باشد برای شرایط مرزی ورودی فشار مقداردهی اولیه را انجام دهد فشار استاتیک^{۲۸}، باید وارد شود. باید به خاطر داشت که مقدار فشار استاتیکی که وارد می‌گردد باید با فشار کارکردی، که در منوی فشار کارکرد تنظیم می‌شود، متناسب باشد. از فشار فراصوتی یا فشار نسبی اولیه زمانی که جریان زیر صوتی باشد، چشم‌پوشی می‌شود. هنگامی که جریان در مرز ورودی فشار داخل می‌شود، فلوننت، فشار ورودی توسط کاربر را به عنوان فشار کل مورد استفاده قرار می‌دهد. در جریان غیرقابل تراکم، فشار کل ورودی و فشار استاتیک به سرعت ورودی در معادله‌ی برنولی نسبت داده می‌شود:

$$P_0 = P_s + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{معادله ۳-۳۸:}$$

با منتج شدن اندازه‌ی سرعت و بردار جهت سرعت که به ورودی نسبت داده می‌شود، مولفه‌های سرعت محاسبه می‌شوند. برای جریان‌های غیرقابل تراکم، چگالی در صفحه‌ی ورودی می‌تواند هم ثابت بوده و هم تابعی از دما یا نسبت‌های جرمی اجزا که به عنوان ورودی توسط کاربر داده می‌شود، باشد. اگر جریان از

^{۲۷}- Operating Condition

^{۲۸}- Supersonic/Intel Gauge Pressure

یک ورودی فشار خارج می‌شود فشار کل همانند فشار استاتیک به کار می‌رود. برای جریان غیرقابل تراکم دمای کل مساوی دمای استاتیک می‌باشد. در جریان‌های قابل تراکم، روابط ایزنتروپیک برای گاز ایده‌آل جهت نسبت دادن فشار، فشار استاتیک و سرعت در مرز فشار ورودی به کار می‌رود.

$$\frac{P_0 + P_{op}}{P_s + P_{op}} = \left[1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{معادله ۳-۳۹:}$$

$$\frac{T_0}{T_s} = 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \quad \text{معادله ۳-۴۰:}$$

۵.۹.۳- شرایط مرزی ورودی سرعت

شرط مرزی سرعت برای تعریف سرعت جریان، با تمام خاصیت‌های اسکالر جریان، در ورودی به کار می‌رود. خواص کل (یا سکون) جریان ثابت نیستند، بنابراین آن‌ها می‌توانند به هر مقداری که برای توصیف توزیع سرعت نیاز باشد، افزایش یابند.

این شرط مرزی در جریان‌های غیرقابل تراکم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جریان‌های قابل تراکم استفاده از این شرایط مرزی به نتیجه‌های غیرفیزیکی منتهی خواهد شد زیرا این شرط ورودی اجازه می‌دهد که شرایط سکون به هر اندازه‌ای افزایش یابد.

در یک نمونه‌ی به خصوص، ورودی سرعت ممکن است در فلوننت برای تعریف سرعت جریان در خروجی به کار می‌رود (در این گونه از مسایل داده‌های اسکالر به کار نمی‌رود) در این نمونه‌ها باید از صحت پیوستگی در تمامی دامنه مطمئن بود. می‌توان اطلاعات زیر را در مورد مرز ورودی سرعت وارد نمود:

- اندازه سرعت و جهت آن یا مولفه‌های سرعت؛
- سرعت چرخش (برای مسایل دو بعدی متقارن، همراه با چرخش)؛
- دما (جهت محاسبه معادله‌ی انرژی)؛
- فشار نسبی جریان خروجی^{۲۹} (برای محاسبات به وسیله‌ی حل کننده پیوسته)؛
- پارامترهای اغتشاش؛

می‌توان سرعت ورودی جریان را به کمک معین ساختن اندازه سرعت و جهت آن و سایر مشخصاتش تعریف کرد. اگر ناحیه سلولی از این شرط مرزی استفاده می‌کند و از مدل‌های چرخش یا مش‌های لغزان نیز استفاده می‌شود، می‌توان هر دو سرعت نسبی یا مطلق را به کار برد. برای مسایل متقارن همراه با چرخش^{۳۰} در فلوئنت می‌توان سرعت چرخش را نیز معین نمود.

۶.۹.۳- شرط مرزی ورودی جریان جرمی

شرط مرزی ورودی جریان جرمی در فلوئنت برای فراهم کردن شار جرمی معین شده در ورودی به کار می‌رود. فشار کل ورودی به طور محلی برای رسیدن به سرعتی که شار جرمی تعیین شده را فراهم نماید، تنظیم می‌شود. توجه شود که تنظیم کردن فشار کل ورودی ممکن است به کندتر شدن همگرایی منتج شود. بنابراین اگر انتخاب هر دو شرط مرز فشار ورودی و ورودی جریان جرمی قابل قبول باشد باید اولی انتخاب شود. همچنین توجه شود که لازم نیست ورودی جریان جرمی در جریان‌های غیرقابل تراکم به کار رود زیرا هنگامی که چگالی ثابت باشد، شرط مرزی سرعت، جریان جرمی را نتیجه خواهد داد. باید اطلاعات زیر را در مرز ورودی جریان جرمی وارد کرد:

- شار جرمی یا نرخ جریان جرمی؛
- دمای کل؛
- فشار استاتیک؛
- جهت جریان؛
- پارامترهای اغتشاش.

۷.۹.۳- شرط مرزی Inlet Vent

شرط مرزی Inlet Vent برای مدل کردن ورودی آزاد همراه تهویه با ضریب افت معین، جهت جریان و فشار محیط (ورودی) و دما به کار می‌رود. اطلاعات زیر باید برای مرزهای Inlet Vent وارد گردد:

^{۳۰} - Swirl

- فشار کل؛
- دمای کل؛
- جهت جریان؛
- فشار استاتیک؛
- پارامترهای اغشتاش؛
- ضریب افت.

۸.۹.۳ - شرط مرزی Intake Fan

شرط مرزی Intake Fan برای مدل کردن فن هواکش خروجی با تغییر فشار ناگهانی (جهش فشار) معین، جهت جریان، دما و فشار محیط به کار می‌رود. می‌توان اطلاعات زیر را برای شرط مرزی Intake Fan وارد کرد:

- دمای کل؛
- جهت جریان؛
- فشار استاتیک؛
- فشار کل؛
- پارامترهای اغشتاش (برای محاسبات جریان مغشوش)؛
- پرش فشار^{۳۱}.

فن هواکش به صورت بی‌نهایت نازک در نظر گرفته می‌شود و فشار به طور غیرپیوسته افزایش می‌یابد. در مورد جریان‌های برگشتی، فن رفتاری شبیه به تهویه خروجی با یک ضریب افت واحد خواهد داشت. در حین عبور از فن این افزایش فشار به صورت تابعی از سرعت عبوری می‌باشد. می‌توان پرش فشار

^{۳۱} - Pressure Jump

را به صورت توابعی ثابت، چند جمله‌ای و چند تکه‌ای خطی و چند تکه‌ای چند جمله‌ای از سرعت عمودی بیان کرد.

۹.۹.۳- شرط مرزی خروجی فشار

شرط مرزی خروجی فشار احتیاج به بیان فشار استاتیک در مرز خروجی دارد. مقادیر فشار استاتیک معلوم، فقط وقتی که جریان مادون صوت باشد، به کار می‌رود. اگر جریان به طور محلی مافوق صوت شود، فشار معلوم زیاد به کار می‌رود و فشار از مقادیر درونی جریان برون‌یابی می‌شود. می‌توان خلاصه پارامترهای زیر را برای مرزهای خروجی فشار وارد کرد:

- فشار استاتیک؛
- شرایط جریان برگشتی؛
- دمای کل (برای محاسبات انرژی)؛
- پارامترهای اغتشاش (برای محاسبات اغتشاش).

۱۰.۹.۳- شرط مرزی Pressure Far-Filed

این شرط مرزی برای مدل کردن جریان خارجی حول جسم (مثلاً ایرفویل) به کار می‌رود. توجه شود که این شرط مرزی فقط وقتی که چگالی از قانون گاز ایده‌ال محاسبه می‌شود قابل استفاده است. می‌توان اطلاعات زیر را در مرز Pressure Far-Field وارد نمود:

- فشار استاتیک؛
- عدد ماخ؛
- دما؛
- جهت جریان؛
- پارامترهای اغتشاش.

۱۱.۹.۳- شرط مرزی جریان خروجی

شرط مرزی جریان خروجی در فلوئنت برای مدل کردن جریان‌های خروجی که جزییات مربوط به جریان از قبیل سرعت، فشار و دانسیته قبل از حل مسأله موجود نیست، به کار می‌رود. با توجه به ماهیت این شرط مرزی نمی‌توان هیچ گونه اطلاعاتی را برای این مرز تعیین کرد. فلوئنت اطلاعات مورد نیاز برای حل را به صورت برون‌یابی از داخل دامنه به دست می‌آورد. توجه شود که شرط مرزی جریان خروجی برای موارد زیر نمی‌تواند به کار رود:

- اگر مسأله شامل مرزهای ورودی فشار شود؛
- اگر مدل‌سازی جریان‌های قابل تراکم مورد نظر باشد؛
- اگر تحلیل جریان‌های ناپایا همراه با چگالی متغیر مد نظر باشد، حتی اگر جریان غیرقابل تراکم باشد.

۱۲.۹.۳- شرط مرزی Outlet Vent

شرط مرزی Outlet Vent برای مدل کردن خروجی‌های تهویه با ضریب افت مخصوص و فشار تخلیه معلوم می‌باشد. اطلاعات زیر را در مرز Outlet Vent باید وارد نمود:

- فشار استاتیک؛
- شرایط جریان برگشتی؛
- دمای کل (برای انجام محاسبات انرژی)؛
- پارامترهای اغتشاش (برای محاسبات اغتشاش)؛
- پرش فشار.

۱۳.۹.۳- شرط مرزی دیوار

شرط مرزی دیوار برای محدود کردن نواحی سیال با جامد به کار می‌رود. در سیال‌های لزج، شرط عدم لغزش در دیواره‌ها، به وسیله پیش‌فرض‌های نرم‌افزار اجرا می‌شود، اما می‌توان مولفه سرعت مماسی در

حرکت‌های انتقالی و چرخشی از مرز دیوار را بیان کرد، یا لغزش دیوار را به وسیله نیروی برش معین مدل نمود. می‌توان لغزش دیوار را در فلوئنت با به کار بردن مرز متقارن مدل کرد، اما به کار بردن مرز متقارن، شرایط تقارن را برای تمام معادلات در نظر می‌گیرد. تنش برشی و انتقال حرارت بین سیال و دیوار بر پایه جزییات سیال در ناحیه جریان محلی محاسبه می‌شوند. می‌توان اطلاعات زیر را در مرز دیوار وارد کرد:

- شرایط مرزی حرارتی (برای محاسبات انتقال حرارت)؛
- شرایط مرزی سرعت (برای دیوارهای چرخان یا متحرک)؛
- تنش برشی (برای دیوارهای لغزان)؛
- زبری دیوار (برای جریان مغشوش).

۱۴.۹.۳- شرایط مرزی متقارن

شرط مرزی تقارن وقتی که هندسه فیزیکی و الگوی مورد نظر از تحلیل در مورد جریان سیال و دما دارای تقارن آینه‌ای باشد، به کار می‌رود. همچنین می‌توان از آن‌ها برای مدل کردن دیوارهای لغزان در جریان‌های لزج استفاده کرد. در خط میانی از هندسه متقارن، باید مرز محوری^{۳۲} بر مرز متقارن ترجیح داده شود.

۱۵.۹.۳- شرایط سیال

ناحیه سیال گروهی از سلول‌هاست که همه معادلات فعال در آن حل می‌شود. تنها ورودی ضروری برای یک ناحیه سیال نوع ماده سیال می‌باشد. باید مشخص نمود که ناحیه سیال شامل چه ماده‌ای است تا خواص مناسب آن مورد استفاده قرار گیرد. برای ناحیه سیال باید ورودی‌ها را تنظیم کرد. این ورودی‌ها ترم‌های اصلی انتقال حرارت، مومنتوم، اغتشاش و دیگر مقادیر اسکالر می‌باشند. همچنین می‌توان حرکت را برای ناحیه سیال در نظر گرفت.

۳۲- Axis

۱۶.۹.۳- شرایط جامد

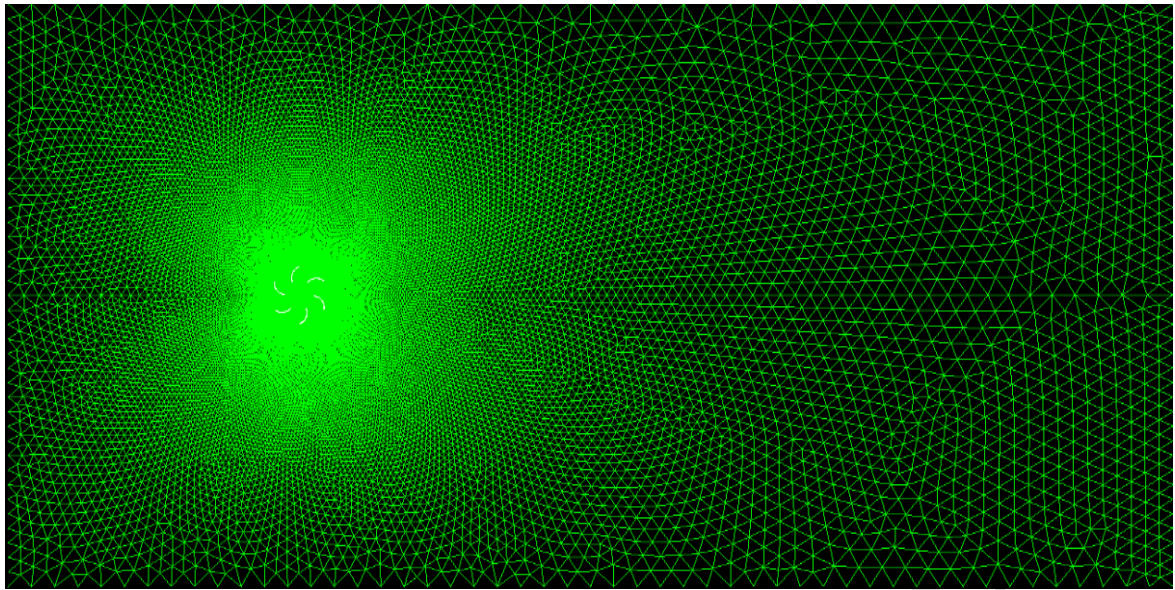
ناحیه جامد دسته‌ای از سلول‌هاست که فقط معادله هدایت در آن حل می‌شود. هیچ معادله‌ای مربوط به جریان سیال در شرایط جامد حل نمی‌شود. مواد ممکن است مانند جامد رفتار کنند اگر چه واقعا سیال باشند، اما فرض می‌شود که هیچ‌گونه جابجایی اتفاق نمی‌افتد، ورودی‌ها برای ناحیه سیال فقط نوع ماده می‌باشد همچنین می‌توان میزان تولید گرما را وارد نمود. حرکت برای ناحیه جامد امکان‌پذیر است و باید محور چرخش آن معین شود.

۴. نحوه حل مسأله

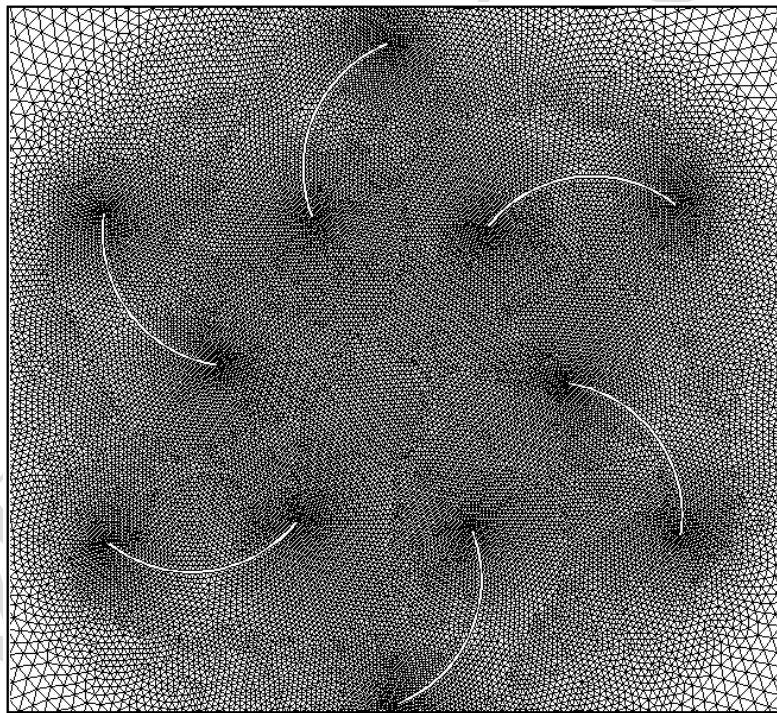
هدف از این پروژه بررسی اثرات وجود استاتور در کارایی توربین باد عمودی (ساونیوس) شش پره می باشد. به منظور شبیه سازی رفتار حرکتی این مسأله لازم است تا دو مدل توربین (با و بدون استاتور) مدل سازی شده و پس از مش زدن بر طبق روندی که در فصل گذشته بیان گردید به صورت دوبعدی در نرم افزار فلونت شبیه سازی شود. در این شبیه سازی از مدل کا-ا پسilon استفاده شده است و شرایط مرزی و اولیه مطابق با خواسته های مسأله تعیین شده است.

۱.۴- تولید شبکه

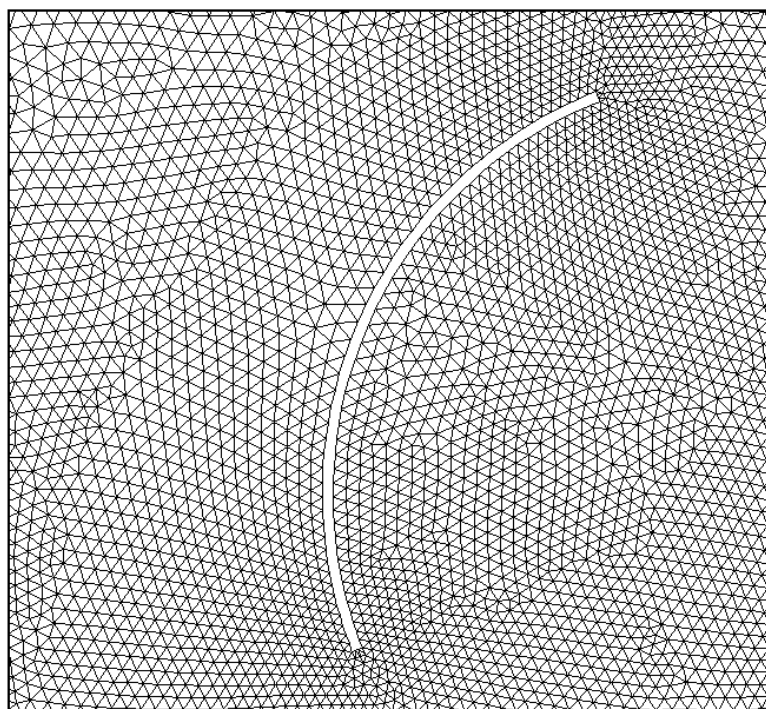
شبکه ی تولیدی از نوع بی سازمان و برای دو حالت به شکل زیر است. شبکه ی تولیدی از نوع مثلثی است که برای اعتبار سازی نتایج در اطراف پره ها ریزتر شده است. از شکل ۱-۴ تا ۳-۴ این شبکه ها برای حالت بدون استاتور همچنین شکل های ۴-۴ و ۵-۴ نیز برای حالت با استاتور را به نمایش درآورده شده است.



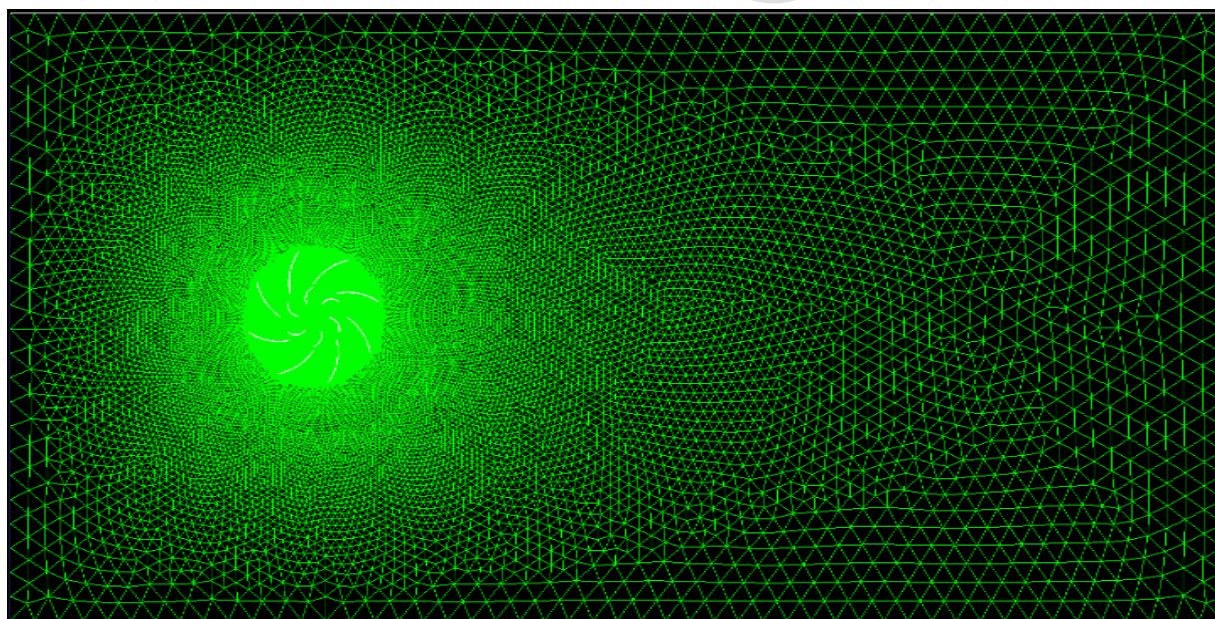
شکل ۴-۱ شبکه بی‌سازمان مثلثی کل میدان برای حالت بدون استاتور



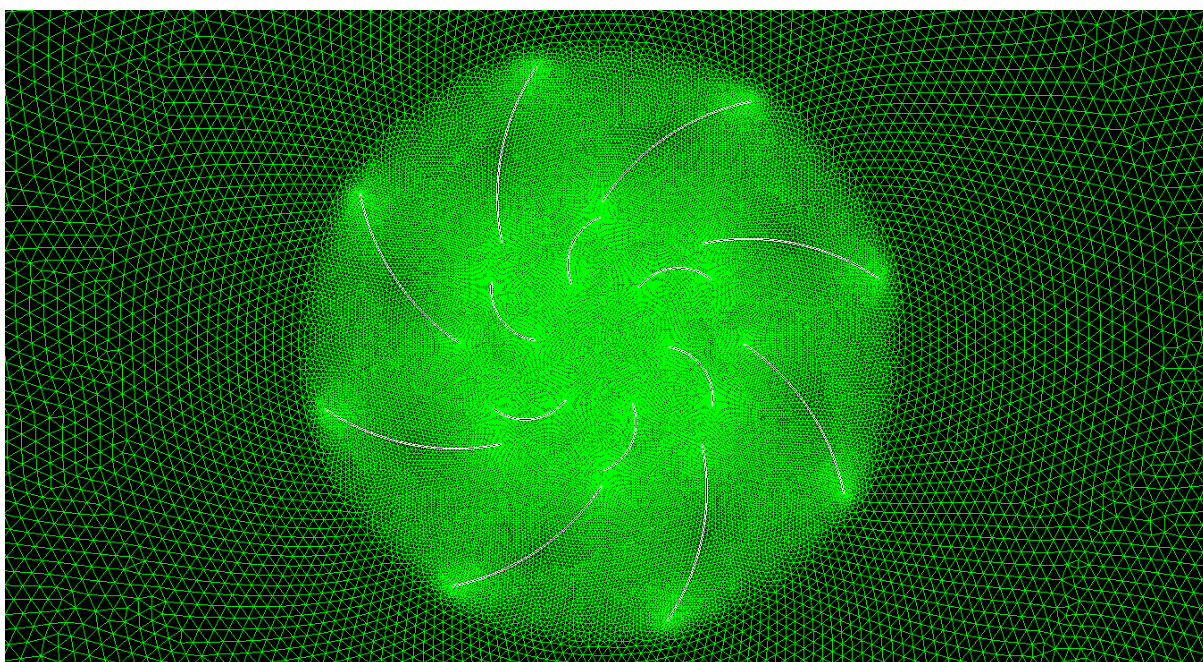
شکل ۴-۲ شبکه ریزشده در اطراف پره‌ها در حالت بدون استاتور



شکل ۴-۳ شبکه ریزشده در اطراف یک پره در حالت بدون استاتور



شکل ۴-۴ شبکه بی سازمان کل ناحیه در حالت با استاتور



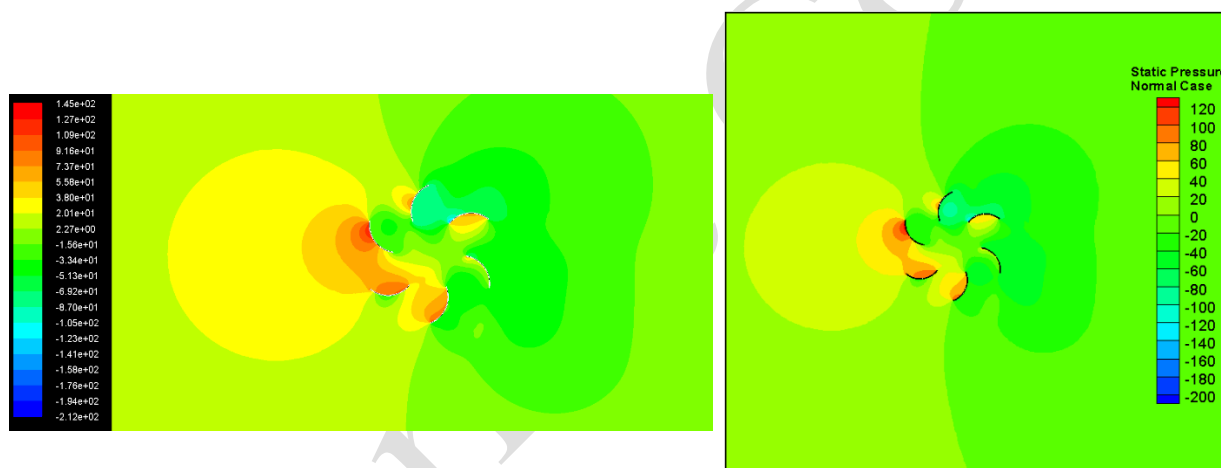
شکل ۴-۵ ساختار شبکه ریزشده در اطراف پره‌ها در حالت با استاتور

۵. نتایج حل عددی

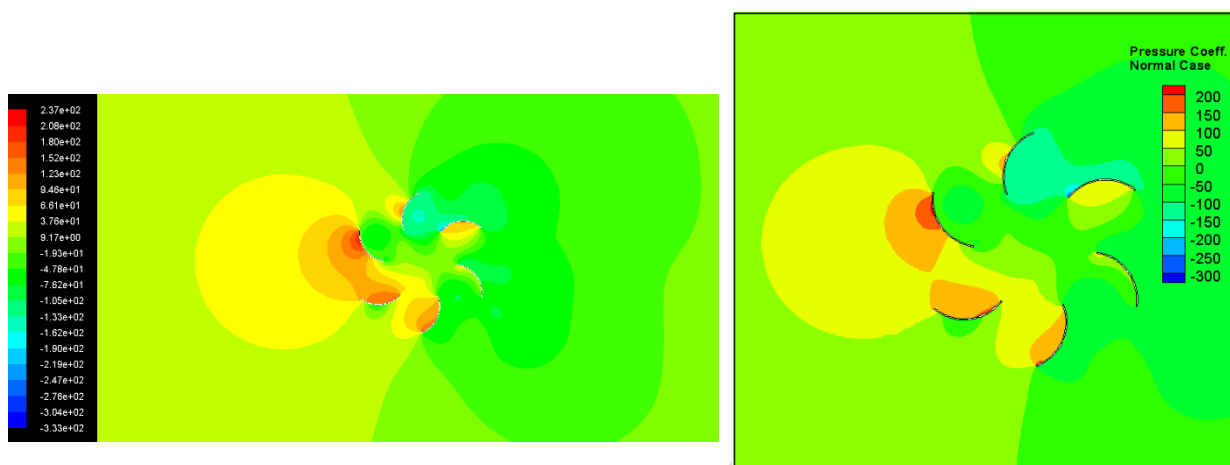
همان‌طور که بیان شد هدف از این پروژه محاسبه اثرات کارایی استاتور در توربین‌های عمودی چندپره می‌باشد. به منظور دستیابی به این مقایسه بایستی اثرات استاتور بر میزان گشتاور تولیدی و تغییرات پروفیل سرعت و فشاری مد نظر قرار گیرد. در ادامه این نتایج به نمایش درآمده‌اند.

۱.۵- نتایج توربین بادی در حالت بدون استاتور

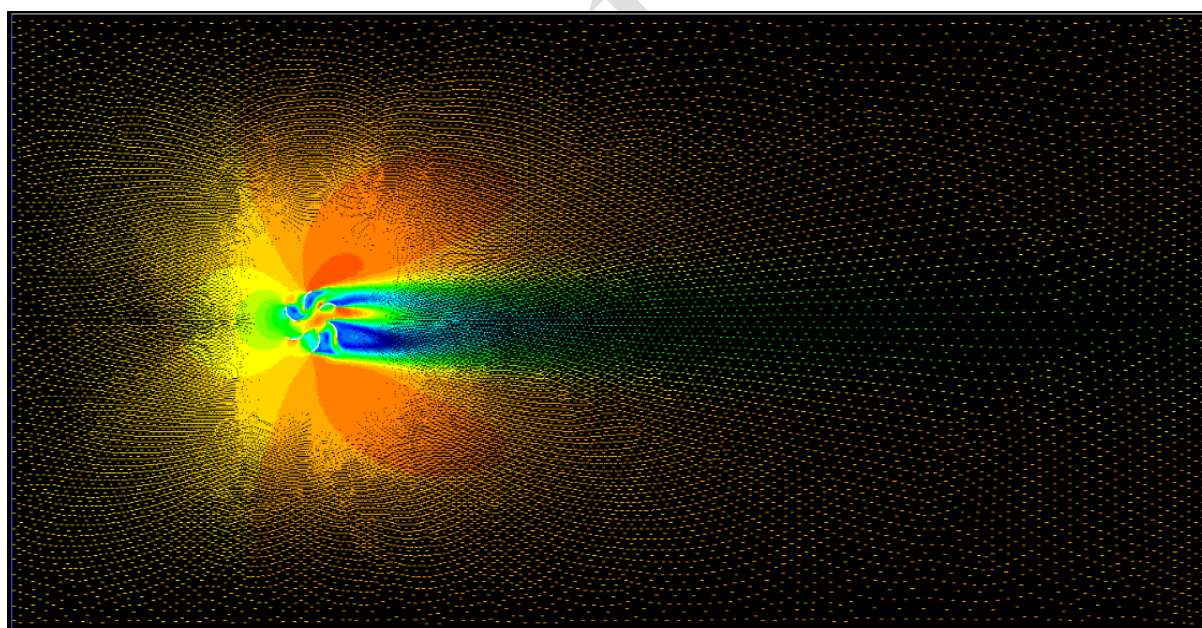
بر اساس بحث‌های بیان شده در بخش‌های قبلی به حل مسأله پرداخته شد و در این بخش به ارائه نتایج آن برای حالت توربین عمودی بدون استاتور پرداخته می‌شود.



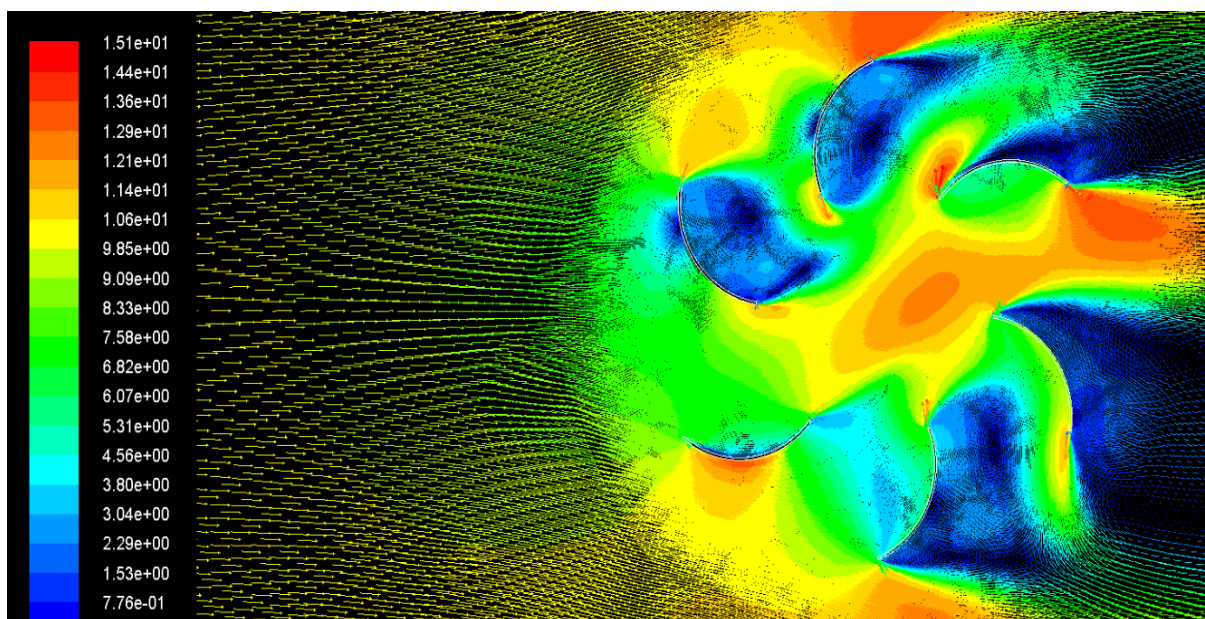
شکل ۵-۱ پروفیل فشار استاتیک اطراف پره‌ها در حالت بدون استاتور



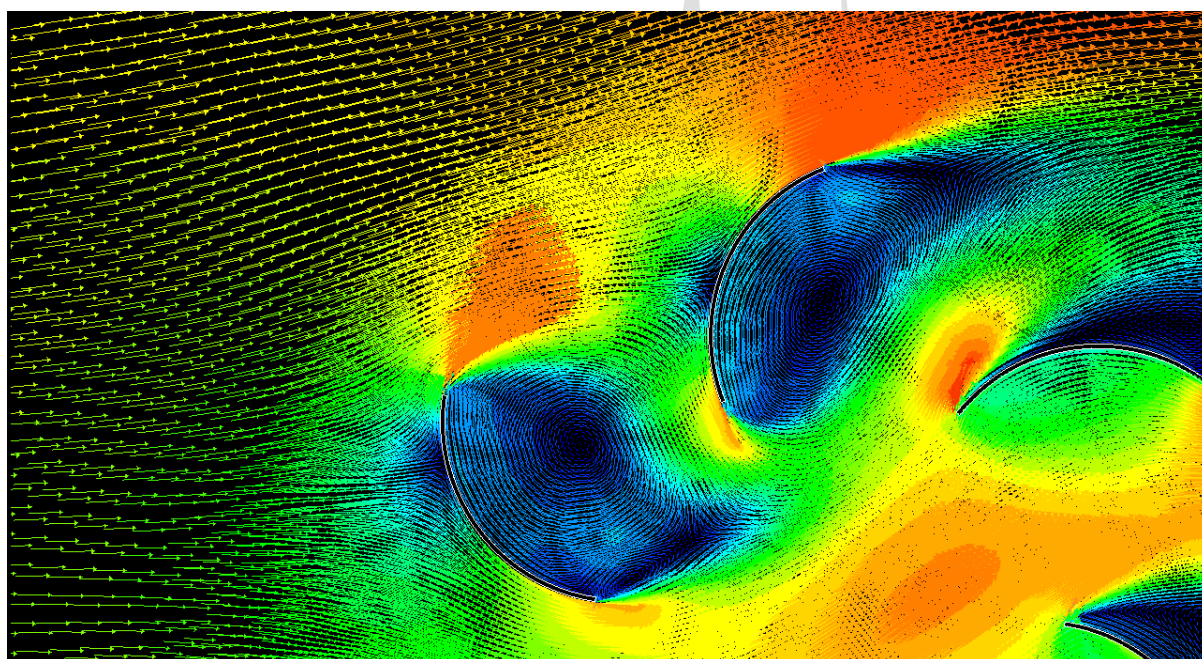
شکل ۵-۲ پروفیل ضرایب فشار اطراف توربین در حالت بدون استاتور



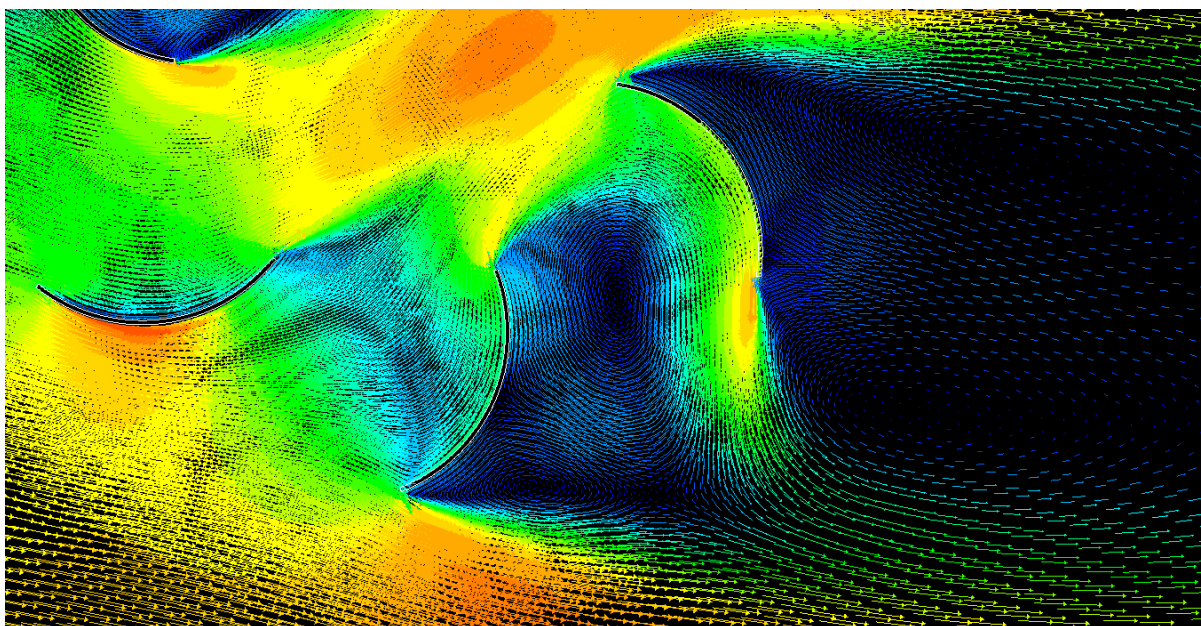
شکل ۵-۳ پروفیل سرعت در کل میدان در حالت بدون استاتور



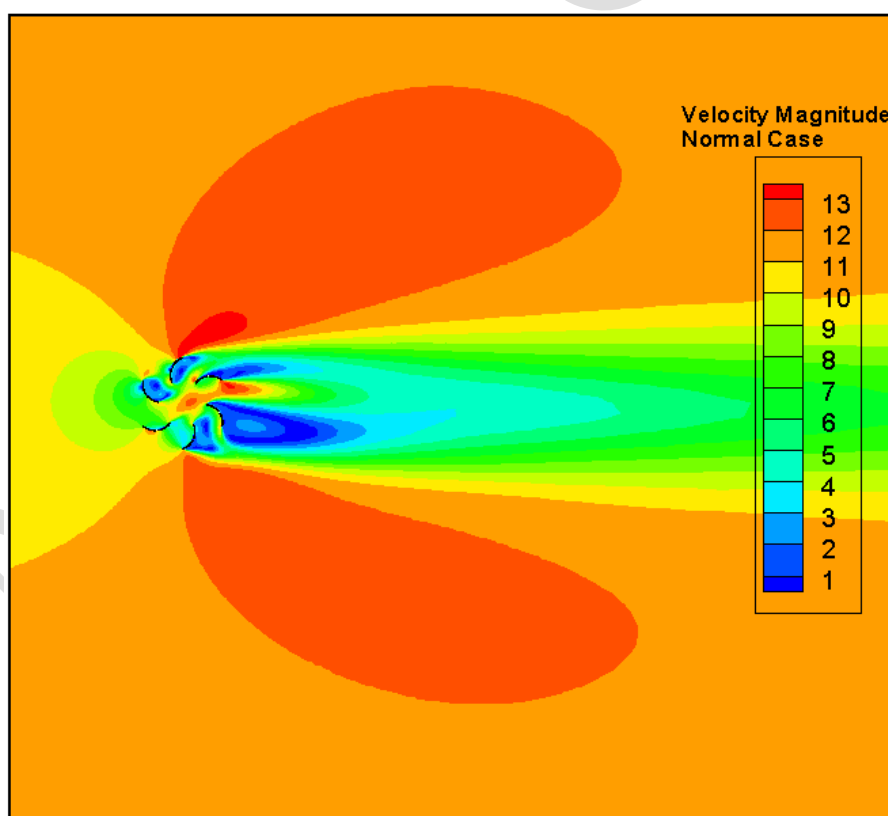
شکل ۴-۵ بردارهای سرعت اطراف پره‌ها در حالت بدون استاتور



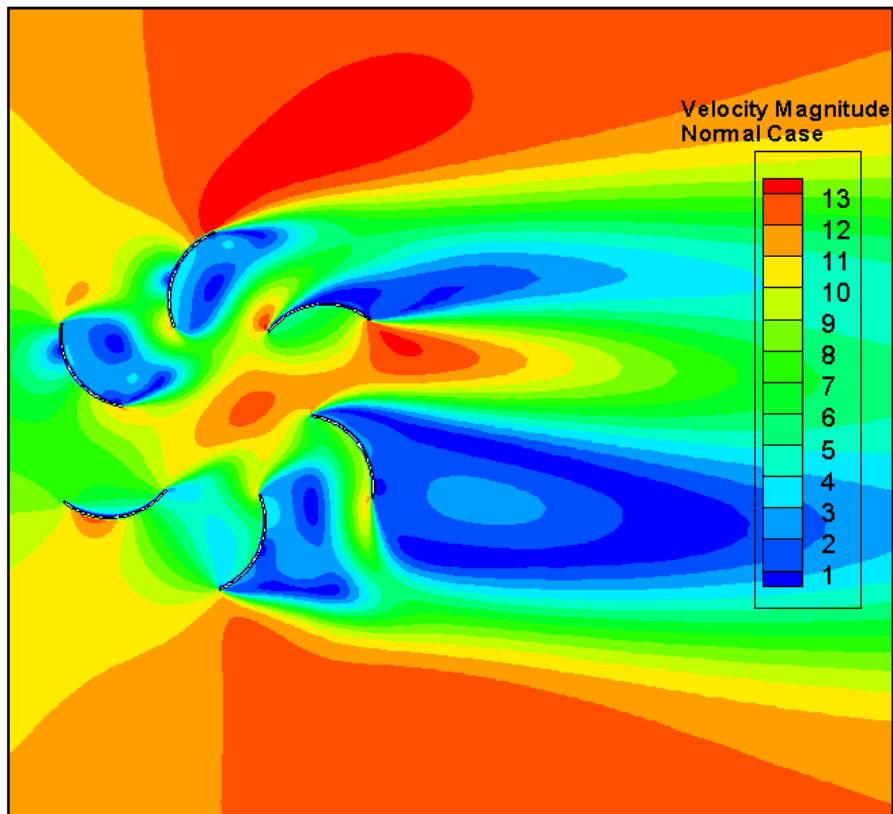
شکل ۵-۵ بردارهای سرعت در بالادست میدان جریان توربین در حالت بدون استاتور



شکل ۵-۶ بردارهای سرعت در پایین دست میدان جریان توربین در حالت بدون استاتور



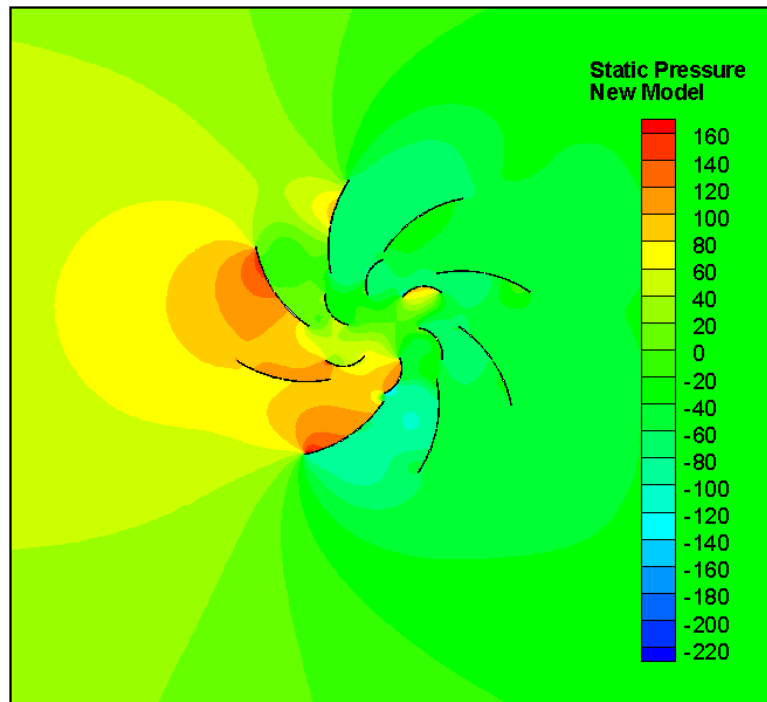
شکل ۵-۷ پروفیل اندازه سرعت کل میدان در حالت بدون استاتور



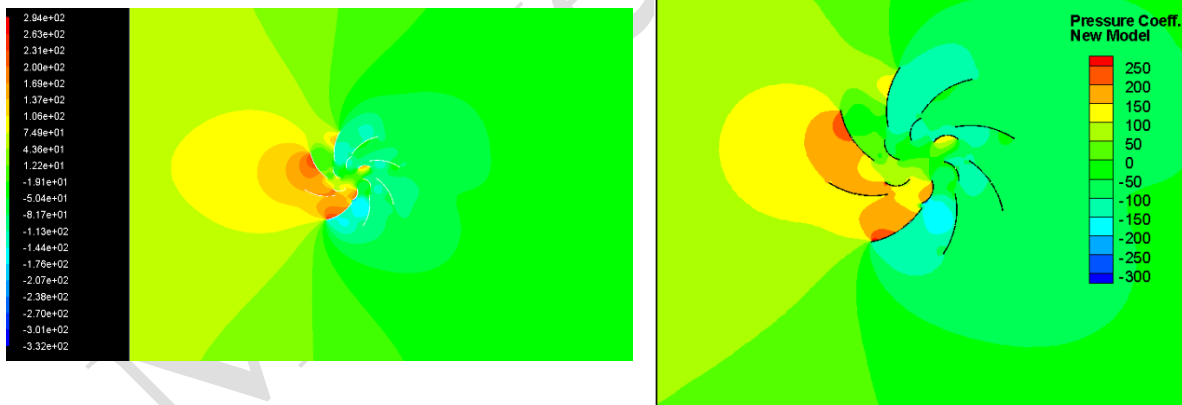
شکل ۵-۸ پروفیل اندازه سرعت اطراف توربین در حالت بدون استاتور

۲.۵- نتایج توربین بادی در حالت با استاتور

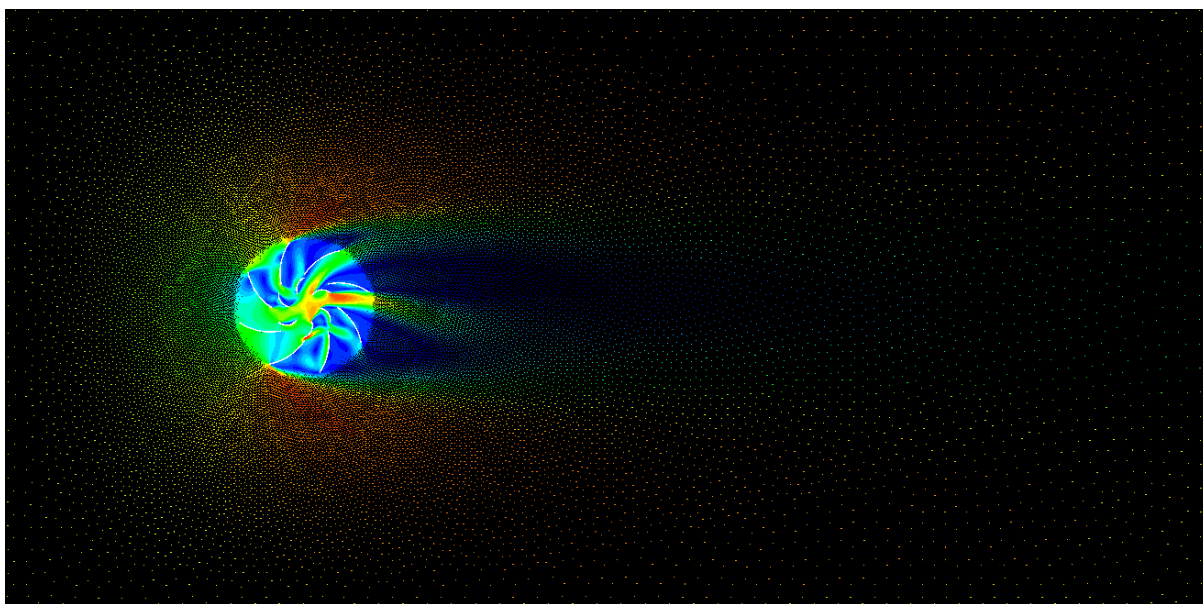
در این قسمت حل بخش قبلی برای مدل جدید تکرار می‌گردد. دقت شود که در این حالت به توربین بادی عمودی تعدادی استاتور افزوده شده است تا اثرات آن بر کارایی مشاهده شود.



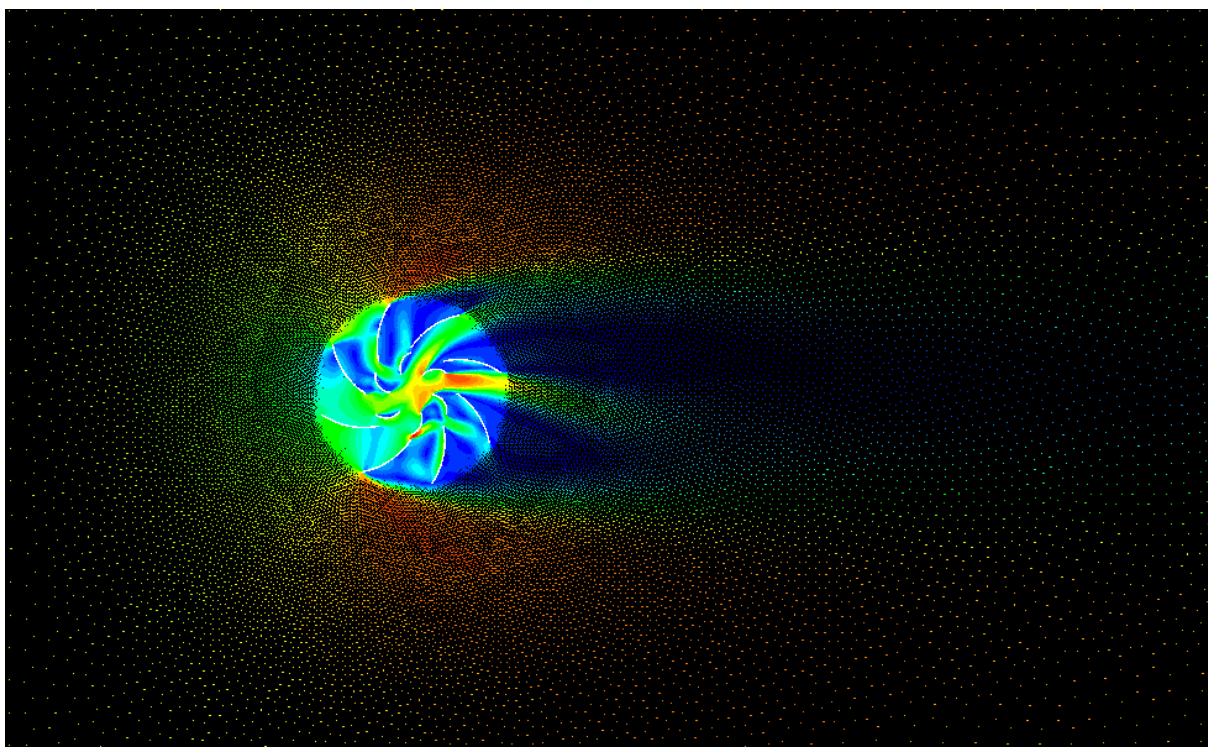
شکل ۵-۹ پروفیل فشار استاتیک در اطراف پره‌های توربین در حالت با استاتور



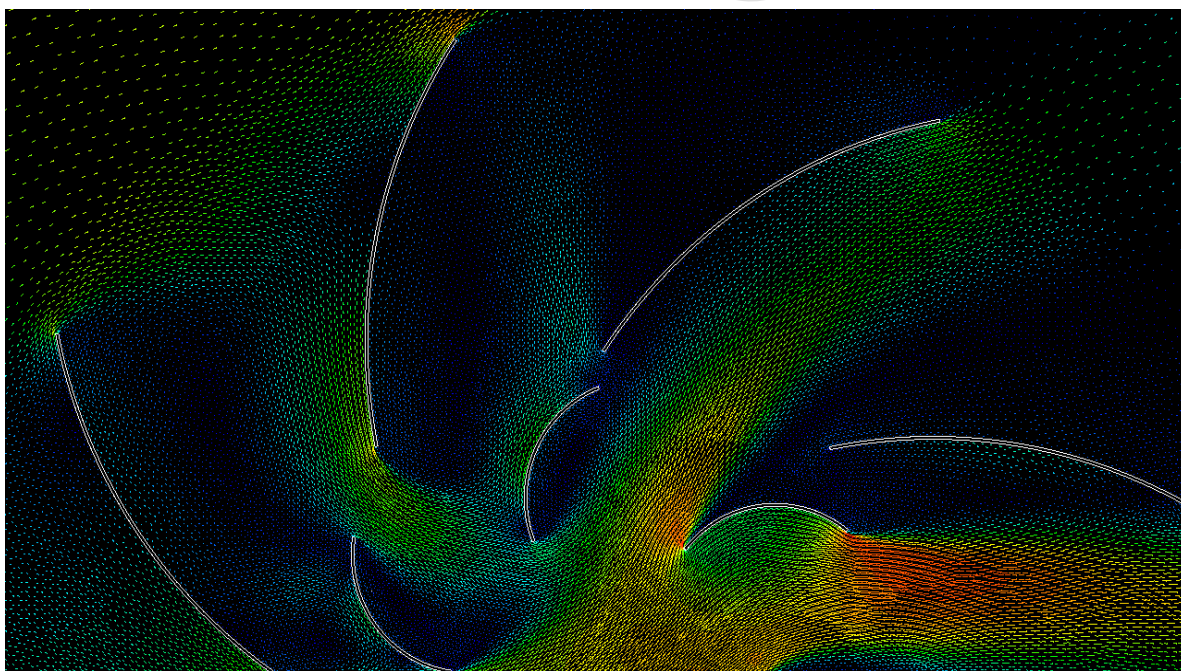
شکل ۵-۱۰ تغییرات ضریب فشار در اطراف توربین در حالت با استاتور



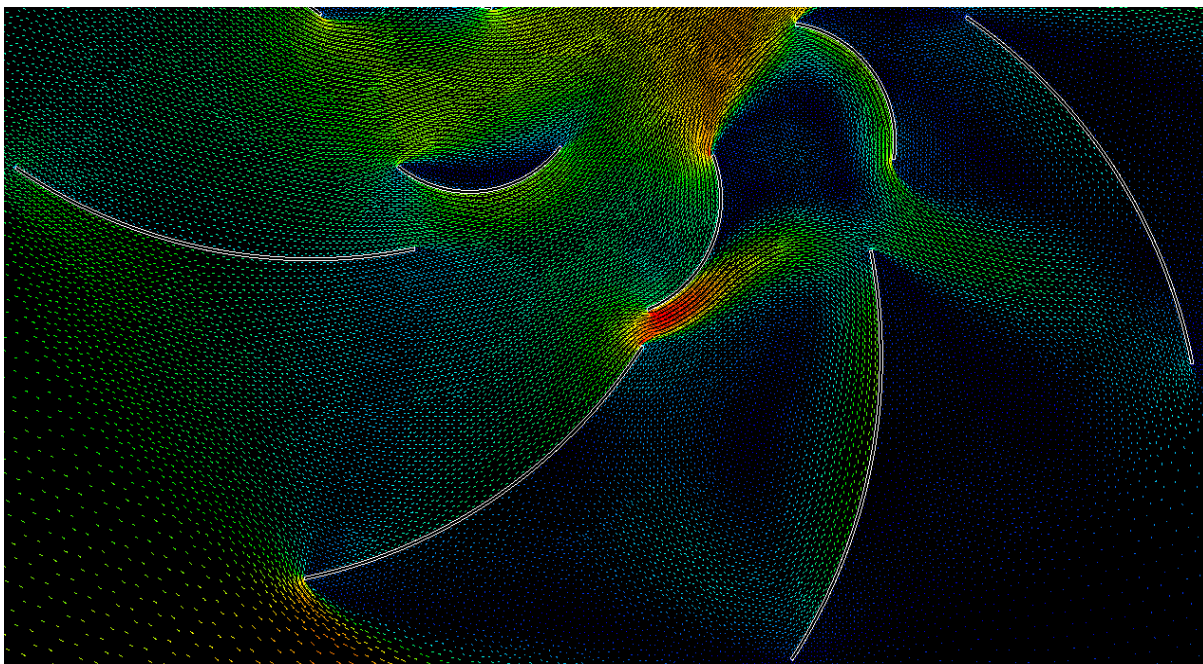
شکل ۵-۱۱ نمودارهای سرعت در تمام میدان برای حالت با استاتور



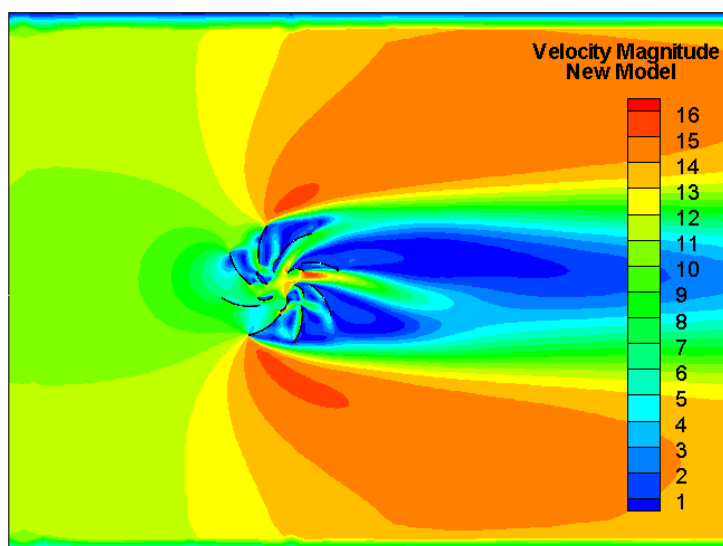
شکل ۵-۱۲ نمودارهای سرعت در اطراف توربین برای حالت با استاتور



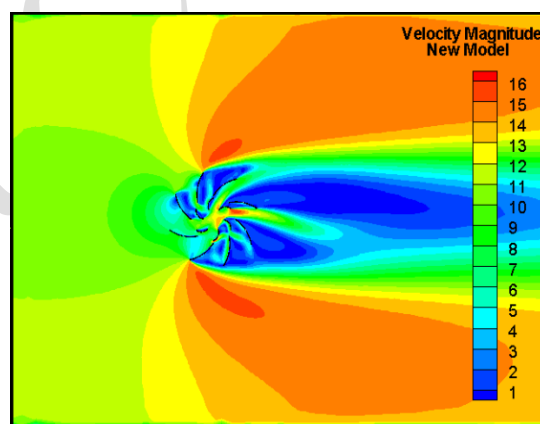
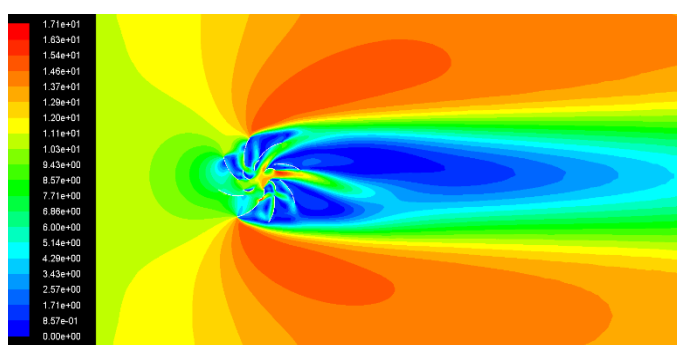
شکل ۵-۱۳ نمودارهای سرعت در بالادست پره‌ها و استاتور در حالت با استاتور



شکل ۵-۱۴ نمودارهای سرعت در پایین دست پره‌ها و استاتور در حالت با استاتور



شکل ۵- ۱۵ پروفیل اندازه سرعت در اطراف توربین برای حالت با استاتور



شکل ۵- ۱۶ پروفیل تغییرات اندازه سرعت در میدان حل برای حالت با استاتور

۳.۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده با افزوده شدن استاتور به توربین شاهد تغییر رفتار جریان در اطراف پره‌ها هستیم. این قضیه خود را در نمودارهای فشار استاتیک نشان می‌دهد و با مقایسه پروفیل فشار استاتیک در اطراف پره‌های دو حالت موجود دریافت می‌شود که افزودن استاتور باعث کاهش شدید فشار استاتیک می‌گردد و به تبع آن ضریب فشار در اطراف پره‌ها به خصوص در نواحی نزدیک به پایین‌دستی بیشتر افت می‌کند.

یابد. در حقیقت با افزودن استاتور به توربین باد عمودی، فشار استاتیک در نزدیکی بالادست جریان تغییر زیادی نمی‌کند اما در نواحی نزدیک به پایین‌دست تغییرات محسوس است. این اختلاف فشار در حالت با استاتور باعث می‌شود تا جریان به پره‌ها چسبیده و کارایی آن‌ها را افزایش دهد. همچنین این اختلاف فشار باعث می‌شود تا بردارهای سرعت در اطراف پره‌ها یکنواخت‌تر شوند.

نکته قابل توجه دیگر کم شدن گردابه‌های اطراف پره‌ها در حالت با استاتور است. در حقیقت هنگامی که از استاتور استفاده می‌شود، علاوه بر اینکه کارایی پره‌های توربین افزایش می‌یابد، اثرات آن بر توربین‌های مجاور نیز کاهش خواهد یافت. این امر به معنای افزایش تعداد توربین‌ها در یک مساحت مشخص می‌باشد. در نتیجه با استفاده از استاتورها می‌توان انرژی بیشتری از یک منطقه مشخص دریافت نمود.

جدول ۵-۱ مقایسه مقادیر گشتاور حاصل از حل عددی

مدل توربین عمود محور پنج پره ساده	ممان فشاری (Nm)	ممان ناشی از لزجت (Nm)	ممان کل (Nm)
ساده	۱۷/۷۳۸	۰/۰۰۲۳۴	۱۷/۷۴۰۳
همراه با استاتور	۴۰/۲۴۲۹	۰/۳۴۸۷۹	۴۰/۵۹۱۶۹

۶. جمع‌بندی

در این پروژه به صورت عددی اثرات توربین‌های بادی عمود محور عادی با پنج پره و همراه با استاتور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از میزان کارایی این توربین‌ها در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه که بیشینه سرعت باد میانگین کشور ایران می‌باشد، بصورت گشتاور مرکزی این توربین‌ها در جدول فوق آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان گشتاور که در نهایت این پروسه به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود بهبود بسیار مناسبی پیدا کرده است. بنابراین دستاوردهای حاصل از این تحقیق عبارتند از:

۱- افزایش میزان گشتاور توربین بادی عمود محور (ساوونیوس) به کمک یکسوسازهای جریان ۲/۲۸۸

برابر حالت ساده آن می‌باشد.

۲- استاتورها موجب افزایش میزان گشتاور ناشی از لزجت در حدود صد و پنجاه برابر حالت قبل شده اند.

۳- کاهش میزان گردابه‌ها در پشت پره‌های توربین که موجب، کاهش اثرات جریان‌های بعد از پره‌های قبلی می‌شود.

۴- استفاده از این نوع توربین‌ها در مناطق مرزی، پادگان‌های صحرایی و همچنین مناطقی که با مشکلات تولید و انتقال برق همراه می‌باشند و همچنین برای تولید برق مورد نیاز آنتن‌های تلفن همراه در چنین محدوده‌هایی برای ایجاد ارتباط، بسیار مناسب می‌باشد.

۵- افزایش استفاده از نیروهای جدید بیش از پیش به حفظ ذخایر نفتی کشورمان، به عنوان مهمترین سرمایه طبیعی، کمک خواهد نمود، که در این تحقیق نمونه‌ای از بهبود کارایی این ابزار توسط ایده‌ای جدید نمود یافته است.

۶- در این تحقیق پره‌ها با سه سرعت دورانی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ رادیان بر ثانیه حول مرکز توربین مجدداً در سرعت جریان باد ۱۰ متر بر ثانیه قرار گرفت تا به حالت واقعی نزدیکتر باشد، آنچه نتایج نشان داد، تغییرات بسیار ناچیز و قابل صرف نظر نسبت به حالت انجام شده بود.

۱. <http://www.mhmbargh.blogfa.com/post-۶.aspx> (visited at November ۲۰۱۳)
۲. Paraschivoiu, I., "Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept", *Montreal Polytechnic International Press*, ۲۰۰۲.
۳. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 'AIAA' Report, 'Computational Study of Horizontal Axis Wind Turbines', the ۱۲th International Conference on Machine Design and Production, Kuadasi, Turkey, ۱۹۹۹.
۴. Annual Report IEA, International Energy Agency (IEA), 'Wind Energy', NREL/SP-۴۴۰-۷۸۱۰, ۱۹۹۴.
۵. M.S. Brower, M.W. Tennis, E.W. Denzler and M. Kaplan, 'Powering the Midwest: Renewable Electricity for the Economy and the Environment', Cambridge, MA: Union of Concerned Scientists, ۱۸۸, ۱۹۹۳.
۶. A.J. Cavallo, S.M. Hock and D.R. Smith, 'Wind Energy: Technology and Economics', Chapter ۳ in Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity, Edited by Washington, DC: Island Press, ۱۲۱-۱۵۶, ۱۹۹۳.
۷. J.L. Tangler, B. Smith and D. Jager, 'SERI Advanced Wind Turbine Blades', NREL/TP-۲۵۷- ۴۴۹۲, Golden, CO, ۱۹۹۲.
۸. R. Eppler, 'Airfoil Design & Data', New York, NY, Springer-Verlag, ۵۶۲, ۱۹۹۰.
۹. M.S. Selig, J.F. Donovan and D.B. Fraser, 'Airfoils at Low Speeds', Soartech ۸, Virginia Beach, VA: H. A. Stokely, ۳۹۸, ۱۹۸۹.
۱۰. A.C. Hansen and C.P. Butterfield, 'Aerodynamics of Horizontal-Axis Wind Turbines', Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. ۲۵, pp. ۱۱۵ - ۱۴۹, ۱۹۹۳.
۱۱. J.G. Leishman and T.S. Beddoes, 'A Semi-Empirical Model for Dynamic Stall', Journal of the American Helicopter Society, Vol. ۳۴, pp. ۳ - ۱۷, ۱۹۸۹.

١٢. I. Yous et R. Dizene, “Numerical Investigations on Rotor Dynamic Stall of Horizontal Axis Wind Turbine”, *Revue des Energies Renouvelables CICME’٠٨ Sousse*, ١١٩ – ١٢٦, ١١٩, ٢٠٠٨.
١٣. Ham, Norman D., “A stall Flutter of Helicopter Rotor Blades: A Special Case of the Dynamic Stall Phenomenon”, *Massachusetts Inst of Tech*, Cambridge, May ١٩٦٧.
١٤. K. Hideki, Y.Hidenorihayama, “Numerical Simulations of ٣-Dimensional Dynamic Stall Phenomena of Blade Tip”, *Proceedings of Aircraft Symposium*, Z.٩٠٢A.
١٥. P. Bowles, T.Corkey, and E.Matlisz, “Stall Detection on a Leading-edge Plasma Actuated Pitching Airfoil Utilizing Onboard Measurement”, *Center for Flow Physics and Control (FlowPAC)*, University of Notre Dame.
١٦. J.W. Larsena, S.R.K. Nielsena, and S. Krenkb, “Dynamic Stall Model for Wind Turbine Airfoil”, *Journal of Fluids and Structures*, ٢٣, ٩٥٩–٩٨٢, ٢٠٠٧.
١٧. S. A. Ahmadi, S. Sharif, and R. Jamshidi, “A Numerical Investigation on the Dynamic Stall of a Wind Turbine Section Using Different Turbulent Models”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, ٥٨, ٢٠٠٩.
١٨. G.W Möhlmann, S.Barth, and J. Peinke, “Dynamic Stall Measurements on Airfoils”, *University of Oldenburg*, Germany.
١٩. Yous and R. Dizene. “Numerical Investigations on Rotor Dynamic Stall of Horizontal Axis Wind Turbine”, *Revue des Energies Renouvelables CICME’٠٨ Sousse*, ١١٩ – ١٢٦, ٢٠٠٨.
٢٠. D. Ghosh and Dr.J.Baeder, “Numerical Simulation of Dynamic Stall”, *Alfred Gersow Rotorcraft Center*, Dept of Aerospace Engineering.

٢١. H. Imamura. "Aerodynamics of Wind Turbines", *Department of Mechanical Engineering and Material Science, Yokohama National University*, ٢٤٠-٨٥٠١.
٢٢. Bisplinghoff R.L. Aeroelasticity. Dover Publications: New York, ١٩٥٥.
٢٣. Somers, D.M. "Design and Experimental Results for the S٨٠٩ Airfoil". NREL/SR-٤٤٠-٦٩١٨, ١٩٩٧
٢٤. Reuss Ramsay R., Hoffman M. J., Gregorek G. M. "Effects of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the S٨٠٩ Airfoil." *Master thesis*, NREL Ohio State University, Ohio, NREL/TP-٤٤٢-٧٨١٧, December ١٩٩٥.
٢٥. Nathan Logsdon. "A Procedure for Numerically Analyzing Airfoils and Wing Sections Thesis", University of Missouri, Columbia, December ٢٠٠٦.
٢٦. ANSYS CFX, Release ١١.٠.
٢٧. Du, Z., Selig, "A ٣-D Stall-delay Model for Horizontal Axis Wind Turbine Performance Prediction", *In: AIAA-٩٨-٠٠٢١*, pp. ٩-١٩.
٢٨. Du, Z., Selig, M.S. "The Effect of Rotation on the Boundary Layer of a Wind Turbine Blade", *Renewable Energy*, ٢٠, ١٦٧-١٨١, ٢٠٠٠.
٢٩. Archer CL. Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research* ٢٠٠٥.
٣٠. GWEC Global Wind Energy Council (GWEC). Global wind ٢٠٠٩ report; ٢٠٠٩.
٣١. Glauert H. Airplane propellers. In: Durand WF, editor. *Aerodynamic theory*. New York: Dover Publications; ١٩٦٣.
٣٢. Shen WZ, Mikkelsen R, Sørensen JN, and Bak C. "Tip Loss Corrections for Wind Turbine Computations", *Wind Energy*, ٢٠٠٥.
٣٣. Leishman JG., "A Semi-empirical Model for Dynamic Stall", *Journal of the American Helicopter Society*, ١٩٨٩.
٣٤. Langtry RB, Gola J, and Menter FR., "Predicting ٢D Airfoil and ٢D Wind Turbine Rotor Performance Using a Transition Model for General CFD

- Codes”, *In: 44th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit*, Reno, Nevada, 2006.
30. Whale J, Fisichella CJ, and Selig S. “Correcting Inflow Measurements from Haws Using a Lifting-surface Code”, *In: Proceedings 1999 ASME wind energy symposium*, 1999.
 31. Hess JL. “Review of Integral-equation Techniques for Solving Potential-flow Problems with Emphasis on the Surface-source Method”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1970.
 32. Landahl MT and Stark VJE. “Numerical Lifting-surface Theory-problems and Progress”, *AIAA Journal*, 1977.
 33. Preuss RD, Morino L, and Suciu EO., “Unsteady Potential Aerodynamics of Rotors with Applications to Horizontal-axis Windmills”, *AIAA Journal*, 1980.
 34. Johansen J, Sørensen NN, Michelsen JA, and Schreck S., “Detached-eddy Simulation of Flow around the NREL Phase VI Blade”, *Wind Energy*, 2002.
 35. Fingersh LJ, Sinuns D, Hand M, Jager D, Cotrell J, and Robinson M, “Wind Tunnel Testing of NREL’s Unsteady Aerodynamics Experiment”, *In: Proceedings 2001 ASME wind energy symposium*, 2001.
 36. Hand MM, Simms DA, Fingersh LJ, Jager DW, Cotrell JR, and Schreck S, “Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns”, *National Renewable Energy Laboratory*, 2001.
 37. Schreck S. “The NREL Full-scale Wind Tunnel Experiment”, *Introduction to the special issue. Wind Energy*, 2002.
 38. Sezer-Uzol N, and Long L., “3-D Time-accurate CFD Simulations of Wind Turbine Rotor Flow Fields”, *In: 44th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit*, Reno, Nevada, 2006.

44. Sørensen NN, Michelsen JA, and Schreck S. “Navier-Stokes Predictions of the NREL Phase VI Rotor in the NASA Ames 80 ft * 120 ft Wind Tunnel”, *Wind Energy*, 2002.
45. Duque EPN, Burklund MD, and Johnson W., “Navier-Stokes and Comprehensive Analysis Performance Predictions of the NREL Phase VI Experiment”, *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003.
46. Buning PG, Parks SJ, Chan WM, and Renze KJ., “Application of the Chimera Overlapped Grid Scheme to Simulation of Space Shuttle Ascent Flows”, *In: The 4th international symposium on computational fluid dynamics*, Davis, California, 1991.
47. Potsdam MA, and Mavriplis DJ., “Unstructured Mesh CFD Aerodynamic Analysis of the NREL Phase VI Rotor”, *In: 4th AIAA aerospace sciences meeting including the New Horizons Forum and aerospace exposition*, Orlando, Florida, 2009.
48. Bazilevs Y, Hsu MC, Akkerman I, Wright S, Takizawa K, and Henicke B, “3D Simulation of Wind Turbine Rotors at Full Scale. Part I: Geometry Modeling and Aerodynamics”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2010.
49. Jonkman J, Butterfield S, Musial W, and Scott G., “Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development”, *National Renewable Energy Laboratory*, 2009.
50. Yuwei Li, Kwang-Jun Paik, Tao Xing, and Pablo M. Carrica, “Dynamic Overset CFD Simulations of Wind Turbine Aerodynamics”, *Renewable Energy*, 37, 280–298, 2012.
51. S. J. Schreck, *J. Aircraft*, 33, 279, 1996.
52. L. W. Carr, *J. Aircraft*, 25, 6, 1988.
53. C. Shih, L. Lourenco, and L. Van Dommelen, *AIAA J.*, 30, 11–53, 1992.
54. S. J. Schreck, W E. Faller, and M. C. Robinson, *J. Aircraft*, 39, 868, 2002.
55. D. Rival, and C. Tropea, *J. Aircraft*, 47, 80, 2010.

56. G. Z. McGowan, K. Granlund, and M. V. Ol, *AIAA J.* 49, 1011, 2011.
57. M. V. Ol, L. Bernal, and C. K. Kang, et al., *Exp. Fluids* 46, 883, 2009.
58. E. Dumlupinar, and V. Murthy, in: *Proc. 24th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Hawaii, 2011.
59. A. Spentzos, G. Barakos, and K. Badcock, et al., *AIAA J.* 43, 1023, 2005.
60. C. Marongiu, and R. Tognaccini, in: *Proc. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Florida, 2010.
61. M. R. Visbal, *AIAA J.* 49, 2102, 2011.
62. T. Xu, P. Sullivan, and M. Paraschivoiu, *J Aircraft* 47, 328, 2010.
63. M. Sanchez-Rocha, M. Kirta, and S. Menon, in: *Proc. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Nevada, 2006.
64. K. Mulleners, and M. Rael, *Exp. Fluids* 52, 779 (2012).
65. A. C. Hansen, X. Cui, and C. P. Butterfield, *J. Solar Energ. Eng.* 112, 310, 1990.
66. S. Schreck, M. Robinson, and M. Hand, et al., *Wind Energy* 3, 210, 2000.
67. J. G. Leishman, *Wind Energy* 6, 80, 2002.
68. J. G. Leishman, and T. S. Beddoes, *J. Am. Helicopter Soc.* 34, 3, 1989.
69. K. Pierce, and A. C. Hansen, *J. Solar Energ. Eng.* 3, 200, 1990.
70. W. Sheng, R. A. McD. Galbraith, and F. N. Coton, *J. Sol. Energ. Eng.* 130, 13, 2008.
71. R. Pereira, G. Schepers, and M. D. Pavel, in: *Proc. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Florida, 2011.
72. W. Sheng, R. A. McD. Galbraith, and F. N. Coton, in: *Proc. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Nevada, 2008.
73. S. Gupta, and J. G Leishman, *Wind Energy* 9, 521, 2006.

٧٤. M. H. Hansen, M. Gaunaa, and H. Aagaard, "A B-L Type Dynamic Stall Model in State-Space and Indicial Formulations", *Ris-R-1٣٥٤ Ris National Laboratory*, Roskilde, Denmark, ٢٠٠٤.
٧٥. J. W. Larsena, S. R. K. Nielsen, and S. Krenk, *J. Fluid Struct.* ٢٣, ٩٥٩, ٢٠٠٧.
٧٦. C. Lu, and T. G. Wang, *Appl. Math. Mech-Engl.* ٣٢, ٣٩٣, ٢٠١١.
٧٧. Tongguang Wang, "A brief review on wind turbine aerodynamics", *THEORETICAL & APPLIED MECHANICS LETTERS* ٢, ٠٦٢٠٠١, ٢٠١٢.
٧٨. Tabassum, S.A. and Probert, S. D., "Vertical-Axis Wind Turbine: A Modified Design", *Applied Energy*, ٢٨ (١), ١٩٨٧, pp. ٥٩-٦٧.
٧٩. Reupke, P. and Probert, S.D., "Slatted-Blade Savonius Wind-Rotors", *Applied Energy*, ٤٠ (١), ١٩٩١, pp. ٦٥-٧٥.