

مروری بر روش‌های شبیه‌سازی دنباله در مزارع بادی

شایان نادری^۱، فرشاد ترابی^۲ و*

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*مسئول مکاتبات: ftorabi@kntu.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

انرژی تجدیدپذیر
توربین بادی
مزرعه بادی
دنباله
شبیه‌سازی عددی
شبیه‌سازی تحلیلی

با توجه به اثرات مخرب گرمایش زمین و همچنین آلودگی‌های ایجاد شده در محیط زیست که قسمت عمده آن به علت استفاده از سوخت‌های فسیلی است، بشر به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه انرژی بادی حرکت کرده است. توربین‌های بادی را می‌توان به صورت منفرد و همچنین به صورت مجموعه‌ای از توربین‌ها تحت عنوان مزرعه بادی نصب نمود. در مزارع بادی، توربین‌هایی که در ردیف‌های پایین دست قرار دارند همواره تحت تاثیر دنباله ناشی از توربین‌های بالادست قرار می‌گیرند و میزان توان تولید آن‌ها نسبت به توربین‌هایی که در جریان آزاد قرار دارند کاهش می‌یابد. به این دلیل، پژوهشگران و صنعتگران روش‌های متعددی را مورد استفاده قرار می‌دهند تا با استفاده از آن‌ها دنباله توربین‌ها و همچنین اثر آن‌ها بر توربین‌های مختلف در ردیف‌های پایین دست را بررسی کنند و در نهایت میزان توان تولیدی یک مزرعه بادی را پیش‌بینی نمایند. در این مطالعه روش‌های مختلف شبیه‌سازی دنباله شامل روش تمام روتور، خط محرک، دیسک محرک و روش‌های تحلیلی بررسی شده‌اند و مزایا و معایب هرکدام به اختصار بیان شده است.

۱ مقدمه

می‌کنند. جریان به وجود آمده آشفتگی بیشتری نسبت به جریان آزاد دارد که برای توربین‌های پایین دست یک نکته منفی محسوب می‌شود. زیرا که با جریانی کم‌سرعت‌تر از جریان آزاد مواجه می‌شوند که به تولید انرژی کمتری منتج می‌شود و هم به علت آشفتگی بیشتر، نیروهای مخرب بیشتری به آن‌ها اعمال شده و تنش‌های خستگی افزایش می‌یابد. به منظور پیش‌بینی و همچنین بهینه‌سازی میزان انرژی تولیدی توسط یک مزرعه بادی باید رفتار جریان بعد از توربین‌های بادی که تحت عنوان دنباله^۳ شناخته می‌شود، بررسی شود. بعد از جذب انرژی جریان آزاد توسط یک توربین بادی، انرژی موجود در جریان باد کاهش یافته و این پدیده خود را به صورت کاهش سرعت باد نشان می‌دهد. این پدیده با ایجاد گردابه‌هایی در لبه پره‌های توربین همراه است و میزان آشفتگی جریان بعد از عبور از توربین به شدت افزایش می‌یابد. آشفتگی و کاهش سرعت ایجاد شده که تحت عنوان دنباله شناخته می‌شوند، در تمام توربین‌های بادی شکل کلی قابل پیش‌بینی دارد و با الگوی مشخصی به پایین دست توربین منتقل می‌شود. کاهش سرعت ایجاد شده در فواصل نزدیک بعد از توربین حداکثر مقدار خود را داشته و با افزایش فاصله پایین دست توربین، جریان انرژی از دست رفته خود را در تعامل با جریان آزاد باز می‌یابد. شکل ۱ چگونگی تشکیل دنباله در پایین دست یک توربین بادی را نشان می‌دهد و در شکل ۲ نحوه گسترش دنباله‌ها در یک مزرعه بادی و تاثیر آن‌ها بر توربین‌های

به علت اینکه با فاصله گرفتن از سطح زمین میزان سرعت باد بیشتر شده و در نتیجه توان قابل استحصال بیشتر است، روتور توربین‌های بادی محور افقی و همچنین ژنراتور الکتریکی آن‌ها را در بالای یک برج بلند قرار می‌دهند. وقتی این توربین‌ها در مسیر جریان باد قرار می‌گیرند، مانند یک چاه انرژی عمل می‌کنند و مقداری از انرژی باد را جذب می‌کنند. این میزان انرژی جذب شده به ویژگی‌های عملکردی و هندسی توربین و همچنین سرعت باد جریان بالادست بستگی دارد. زمانی که یک توربین به صورت منفرد مورد مطالعه قرار می‌گیرد، سرعت جریان ورودی به آن برابر با جریان آزاد^۱ است. در این شرایط هدف بهینه ساختن طراحی توربین مورد نظر است به صورتی که دارای بیشترین تولید انرژی الکتریکی باشد. این مهم با بهینه‌سازی ویژگی‌های آیرودینامیک^۲ توربین صورت می‌پذیرد. در این حالت، سرعت ورودی به توربین بادی حداکثر میزان ممکن است. اما زمانی که هدف طراحی مجموعه‌ای از توربین‌ها در کنار یکدیگر به صورت یک مزرعه بادی است، باید رفتار متقابل توربین‌ها بر یکدیگر در نظر گرفته شود. بعد از عبور جریان باد از یک توربین، سرعت آن افت چشمگیری می‌نماید. همچنین گردابه‌هایی در اطراف پره‌ها شکل می‌گیرد که همراه با جریان به سمت پایین دست حرکت

¹Free stream velocity ²Aerodynamic ³Wake

همچنین خروجی‌های مورد نیاز مساله می‌تواند روش مناسب را انتخاب نمود.

پایین دست مشاهده می‌شود. همچنین با دقت به شکل ۲ می‌توان تفاوت توربین‌های در حال کار و توربین‌های ثابت را در تولید دنباله مشاهده نمود.

۱.۲ روش تمام روتور

در این روش که می‌توان از آن به عنوان دقیق‌ترین روش یاد کرد، یک توربین با تمام جزئیات شبیه‌سازی می‌شود. ابتدا هندسه‌ی توربین با تمام ویژگی‌ها، ابعاد و مواد مورد استفاده توسط نرم افزارهای طراحی به کمک رایانه ایجاد می‌شود. سپس یک دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده، هندسه ایجاد شده در آن قرار داده می‌شود و تمام دامنه محاسباتی جهت آماده‌سازی برای حل عددی شبکه‌بندی می‌شود. در مرحله بعد معادلات حاکم بر فیزیک جریان مانند ناور-استوکس^۵ و معادله پیوستگی^۶ در تمام دامنه محاسباتی با اعمال شرایط مرزی مناسب حل می‌شوند. بدین منظور باید از مفاهیم دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کرد. به علت پیچیدگی‌های هندسی توربین، شبیه‌سازی لایه مرزی اطراف پره‌ها و همچنین دوران آن‌ها، به تعداد زیادی شبکه و همچنین شبکه‌های متحرک نیاز است. این ویژگی‌ها هزینه محاسباتی سنگینی را تحمیل می‌کنند و زمانی که هدف شبیه‌سازی یک مزرعه بادی باشد، منابع محاسباتی زیادی نیاز خواهد بود و در صورت زیاد بودن تعداد توربین‌ها، عملاً نمی‌توان از این روش استفاده نمود. در عین حال، دقت بالای این روش استفاده از آن را در برخی از موارد توجیه‌پذیر می‌کند. در زمان طراحی، باید میزان هزینه محاسباتی و دقت مورد نیاز را بررسی نمود و در صورت نیاز از این روش استفاده نمود.



شکل ۱: تشکیل و گسترش دنباله پایین دست یک توربین بادی [۱]



شکل ۲: گسترش دنباله‌ها در یک مزرعه بادی [۱]

۲.۲ روش دیسک محرک

در این روش، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، توربین مانند یک سطح ثابت قابل نفوذ فرض می‌شود که در مسیر جریان آزاد قرار گرفته است. در واقع توربین مانند یک چاه اندازه حرکت فرض می‌شود که میزانی از اندازه حرکت جریان باد را به خود جذب می‌کند و رفتار پره‌های توربین به صورت نیروهای حجمی مدل‌سازی می‌شود. از معادلات بقای اندازه حرکت خطی و بقای جرم جهت به دست آوردن میزان انرژی جذب شده توسط دیسک استفاده می‌شود. به بیان دیگر دیسک محرک را می‌توان جهت ایجاد ناپیوستگی در معادلات حاکم بر فیزیک جریان در دامنه محاسباتی قرار داد و چون دیسک و سیال تاثیر متقابل بر یکدیگر دارند، شبیه‌سازی‌ها بصورت تکراری صورت می‌پذیرد. جهت بدست آوردن نیروهای حجمی، مدل‌های قدیمی‌تر از یک توزیع یکنواخت بر اساس نمودارهای عملکردی توربین استفاده می‌کردند [۲، ۳] ولی در مدل‌های بهبود داده شده [۴، ۵] از اطلاعات آیرودینامیکی دوبعدی ایرفویل‌ها و همچنین ویژگی‌های هندسی توربین استفاده می‌شود. از آنجایی که در مدل معرفی شده هندسه پیچیده‌ای تولید نمی‌شود و همچنین لایه مرزی اطراف پره‌ها بررسی نمی‌شود، می‌توان از شبکه‌های کمتر و ساده‌تری استفاده نمود. این امر هزینه محاسباتی را نسبت به روش تمام روتور به مراتب کاهش می‌دهد. البته باید اشاره کرد که ساده‌سازی‌های اعمال شده باعث کاهش دقت مدل می‌شود.

در روش دیسک محرک کلاسیک، هیچکدام از ویژگی‌های هندسی و عملکردی توربین در نظر گرفته نمی‌شود. روش ممنتوم المان پره^۷ با استفاده از

جریان برشی آزاد^۱ به حجم زیادی از سیال نامتناهی گفته می‌شود که دارای اندازه حرکت اضافی یا کسری اندازه حرکت هستند. تا زمانی که دنباله ایجاد شده توسط یک توربین به مانع یا توربین دیگری برخورد نکند، می‌توان آن را یک جریان برشی آزاد در نظر گرفت. همچنین با بررسی عدد رینولدز در جریان دنباله مشخص می‌شود که رژیم جریان آشفته است. بر اساس اصل خودتشابهی برای جریان آزاد آشفته، شکل کلی دنباله در فواصل مختلف پایین دست توربین یکسان است و تنها چیزی که تغییر می‌کند اندازه سرعت است. به منظور پیش‌بینی میزان انرژی مورد انتظار از یک مزرعه بادی باید چگونگی این تاثیرات مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور ارائه مدلی که بتواند به خوبی رفتار دنباله را در شرایط عملکردی مختلف پیش‌بینی کند سودمند خواهد بود. روش‌های مختلفی مانند روش‌های تحلیلی، عددی و روش‌های تجربی جهت مطالعه چگونگی تشکیل و گسترش دنباله توربین می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

جهت شبیه‌سازی دنباله یک توربین، ابتدا لازم است خود توربین و اندرکنش آن با جریان باد عبوری مدل شود. روش‌های زیادی جهت شبیه‌سازی دنباله توربین بادی محور افقی وجود دارد که از آن‌ها می‌توان به روش‌های عددی تمام روتور^۲، دیسک محرک^۳ و خط محرک^۴ و همچنین روش‌های تحلیلی اشاره نمود.

۲ روش‌های شبیه‌سازی دنباله

هر یک از روش‌های اشاره شده، دارای ویژگی‌ها، مزایا و معایب مربوط به خود هستند. با توجه به دقت مورد نیاز مساله، منابع محاسباتی در دسترس و

¹Free shear flow ²Full rotor simulation ³Actuator Disc (AD) Momentum (BEM)

⁴Actuator Line (AL) ⁵Navier-Stokes ⁶Continuity ⁷Blade Element

که هدف مطالعه ویژگی‌های دنباله در فواصل نزدیک توربین است، دقت قابل قبول خط محرک نسبت به دیسک محرک و همچنین هزینه محاسباتی به مراتب کمتر آن نسبت به روش تمام روتور، این روش را بسیار مناسب می‌سازد.

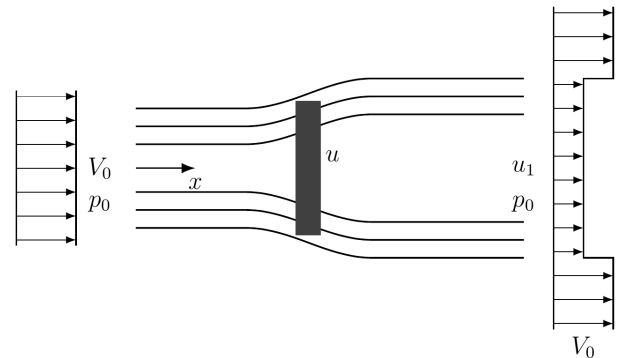
۴.۲ روش‌های تحلیلی

تا به امروز، اغلب مدل‌های تحلیلی دنباله بر اساس معادلات پایه حاکم بر جریان سیال مانند معادلات بقای جرم و معادلات بقای ممنتوم بوده‌اند. اولین مدل تحلیلی دنباله توسط جنسن [۸] جهت شبیه‌سازی مزارع بادی و بر اساس قانون پایستگی جرم ارائه شد. شکل ۵ شماتیک مدل ارائه شده توسط جنسن را نشان می‌دهد که با وجود سادگی، سال‌ها توسط پژوهشگران در مدل‌سازی و بهینه‌سازی مزارع بادی استفاده شده است و همچنان هم در برخی نرم‌افزارها استفاده می‌شود. از آنجایی که دنباله توربین‌ها جریان‌های برشی آزاد محسوب می‌شوند، از قانون خودتشابهی پیروی می‌کنند و رفتار آن‌ها به طول موضعی و مقیاس سرعت وابسته است. در صورتی که دنباله بعد از توربین به مانع یا توربین دیگری برخورد نکند، می‌توان آن را جریان متقارن محوری در نظر گرفت. سپس با استفاده از اصل خودتشابهی شکل دنباله و اندازه سرعت را در فواصل گوناگون بدست آورد. برای استفاده از اصل خودتشابهی باید شکل دنباله بلافاصله بعد از توربین بادی مشخص باشد که به عنوان یک روش ساده و کارآمد می‌توان از ممنتوم المان پره استفاده نمود و جریان خروجی از توربین را به عنوان شرایط اولیه دنباله مورد استفاده قرار داد [۹]. همچنین برای افزایش دقت مدل‌سازی دنباله می‌توان اثرات آشفتگی را در نظر گرفت. آشفتگی عامل مهمی در بازیابی انرژی از دست رفته دنباله است و با نادیده گرفتن اثرات آن، معمولاً توان تولیدی در ردیف‌های پایین دست کمتر از مقدار واقعی بدست می‌آید. در بسیاری از مدل‌های تحلیلی تغییرات شدت آشفتگی در نواحی مختلف لحاظ نمی‌شود و تبادل انرژی دنباله با جریان آزاد مستقل از شدت آشفتگی است که این فرض باعث افزایش خطای مدل‌سازی می‌شود. باید توجه داشت که به علت ساده‌سازی، دقت این روش‌ها در مقایسه با روش‌های عددی کمتر است. شکل ۶ یک مدل تحلیلی که توسط حامدی و همکاران ارائه شده است را نشان می‌دهد. در این مدل از روش ممنتوم المان پره برای محاسبه پروفیل سرعت بلافاصله بعد از توربین استفاده شده است و سپس با استفاده از اصل خودتشابهی، شکل دنباله در فواصل پایین دست بدست آمده است.

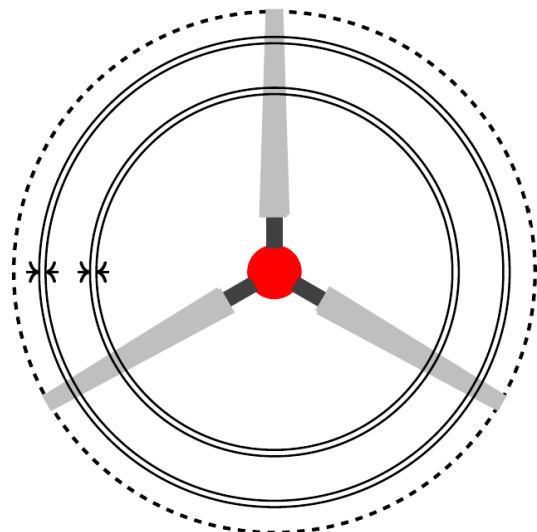
۳ بحث و نتیجه‌گیری

تمامی روش‌های معرفی شده مزایا و معایبی دارند. گاهی اوقات به علت در دسترس نبودن منابع محاسباتی کافی، پژوهشگران از روش‌های ساده‌تر استفاده می‌کنند. به عنوان مثال برای طراحی اولیه و تخمین حدود توان تولیدی در یک مزرعه بادی می‌توان از روش‌های تحلیلی استفاده نمود. اما گاهی اوقات نیازمند شبیه‌سازی جزئیات زیادی هستیم که این امر استفاده از مدل‌های پرسرعت را محدود می‌سازد. ویژگی دنباله در فواصل نزدیک در پایین دست یک توربین به شدت

مفاهیم ممنتوم یک‌بعدی و همچنین اتفاقات محلی که روی پره‌ها رخ می‌دهد، با تقسیم صفحه روتور به تعدادی المان مطابق شکل ۴ به محاسبه توان و نیروی محوری وارد بر توربین می‌پردازد [۶]. مهم‌ترین مزیت این روش در نظر گرفتن تمامی ویژگی‌های عملکردی و هندسی توربین با تمام جزئیات است. با اعمال نیروهای بدست آمده از روش ممنتوم المان پره بر روی دیسک محرک [۴]، می‌توان تاثیر شرایط هندسی و عملکردی توربین بر روی تشکیل و گسترش دنباله را مشاهده و شبیه‌سازی را به واقعیت نزدیک تر نمود. دیسک محرک را می‌توان در شبیه‌سازی‌های پایا و ناپایا به کار برد.



شکل ۳: شماتیک تئوری دیسک محرک

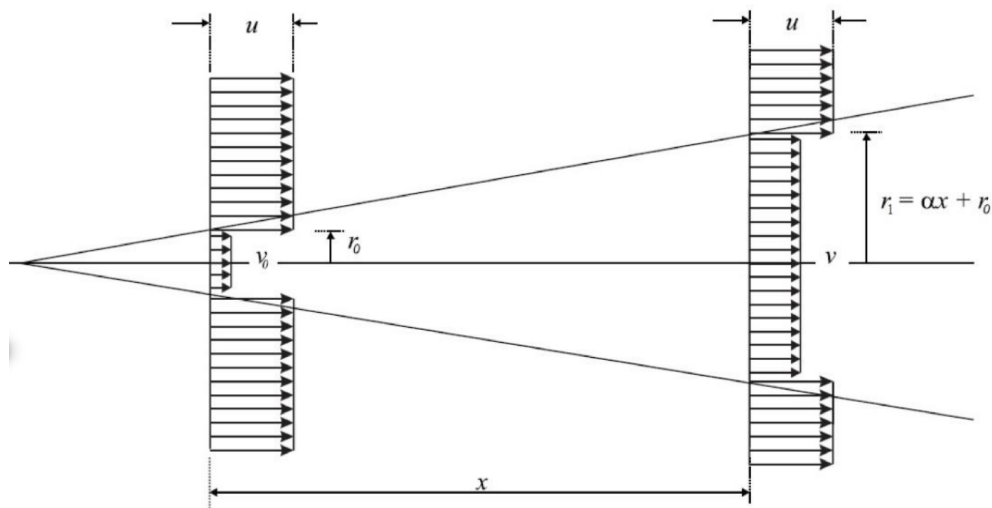


شکل ۴: المان‌های دایروی در نظر گرفته شده در روش ممنتوم المان پره

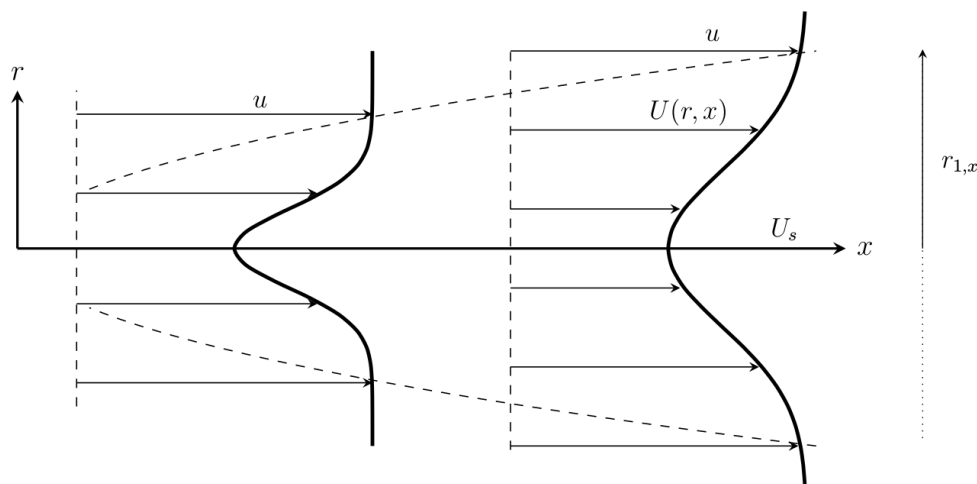
۳.۲ روش خط محرک

این روش همانند دیسک محرک برای اعمال اثرات توربین به دامنه محاسباتی از نیروهای حجمی استفاده می‌کند که در آن فرض تقارن محوری که در روش دیسک محرک استفاده می‌شود از بین می‌رود. در این روش اثر پره‌های توربین توسط خطوطی بر دامنه حل اعمال می‌شود و معادلات ناویر استوکس به همراه آن‌ها در دامنه محاسباتی حل می‌گردد [۷]. فقط در شبیه‌سازی‌های ناپایا می‌توان از خط محرک استفاده نمود که این امر هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد. نکته قابل توجه آن در برابر دیسک محرک، شبیه‌سازی گردابه‌های نوک پره است که دیسک محرک در آشکارسازی آن‌ها ناتوان است. زمانی

¹Chord



شکل ۵: شماتیک مدل ارائه شده توسط جنسن [۸]



شکل ۶: شماتیک مدل ارائه شده توسط حامدی و همکاران [۹]

خط محرک است. در مدل خط محرک دوران پرها در نظر گرفته شده است و گردابه‌های ناشی از دوران تا حدودی شبیه‌سازی می‌شوند. دیسک محرک را هم می‌توان با روش‌های ناپایا مانند شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مورد استفاده قرار داد اما به علت یکنواخت بودن سطح دیسک و عدم در نظر گرفتن دوران، دنباله با ساده‌سازی‌های زیادی شبیه‌سازی می‌شود. معمولاً وقتی تعداد توربین‌ها کم است و علاوه بر توان خروجی، ویژگی‌های دنباله و نیروهای خستگی نیز مورد نیاز است، از خط محرک استفاده می‌شود ولی وقتی تعداد توربین‌ها افزایش می‌یابد، دیسک محرک توان خروجی از مزرعه بادی را با دقت مناسب و هزینه محاسباتی کم شبیه‌سازی می‌نماید.

جهت طراحی مزارع بادی، باید مجموعه‌ای از توربین‌ها به بهترین حالت در کنار یکدیگر قرار گیرند. به گونه‌ای که علاوه بر به حداقل رساندن تاثیر دنباله بر توربین‌های پایین دست، مساحت اشغال شده توسط توربین‌ها نیز کاهش یابد. این کار توسط انواع روش‌های بهینه‌سازی انجام می‌گردد. نکته قابل توجه این است که به علت هزینه محاسباتی بالای روش‌های عددی و همچنین تعداد تکرارهای زیاد در الگوریتم‌های بهینه‌سازی، علیرقم دقت

تحت تاثیر پارامترهای آیرودینامیکی توربین مانند اندازه وتر^۱ مقاطع مختلف توربین، نوع ایرفویل و ضرایب آیرودینامیکی آن و همچنین جنس مواد استفاده شده در پرها است. علاوه بر پارامترهای مذکور، شرایط عملکردی توربین از قبیل سرعت دورانی، نسبت سرعت نوک و زاویه پیش‌پرها نیز تاثیر زیادی در نحوه تشکیل و گسترش دنباله دارند. لذا زمانی که هدف مطالعه دنباله در فواصل نزدیک است، روش تمام روتور که جزئیات بیشتری از توربین را در شبیه‌سازی دخیل می‌کند، می‌تواند ویژگی‌های بیشتری از دنباله را شبیه‌سازی نماید. البته لازم به ذکر است که مدل آشفستگی استفاده شده در شبیه‌سازی نقش بسیار زیادی در نتایج نهایی دارد. روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به عنوان یکی از روش‌های کارآمد بسیار مورد استفاده قرار گرفته و می‌تواند چگونگی رفتار گردابه‌های درون دنباله را از زمان تشکیل تا زمان از بین رفتن آن‌ها به خوبی نشان دهد. روش‌های متوسط‌گیری رینولدز دقت مناسب ولی به مراتب کم‌تری نسبت به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ دارند.

دو مدل خط و دیسک محرک اگرچه به ظاهر شباهت‌های زیادی دارند، اما یک تفاوت اساسی دارند و آن هم پایا بودن دیسک محرک و ناپایا بودن

پایین تر، از روش های تحلیلی استفاده می شود.

مراجع

- [1] Ivanell, Stefan S. A. *Numerical computations of wind turbine wakes and wake interaction*. Ph.D. thesis, KTH, 2009.
- [2] Crasto, G., Gravdahl, A.R., Castellani, F., and Piccioni, E. Wake modeling with the actuator disc concept. *Energy Procedia*, 24:385–392, 2012.
- [3] Castellani, F. and Vignaroli, A. An application of the actuator disc model for wind turbine wakes calculations. *Applied Energy*, 101:432–440, 2013.
- [4] Naderi, Shayan and Torabi, Farschad. Numerical investigation of wake behind a HAWT using modified actuator disc method. *Energy Conversion and Management*, 148:1346 – 1357, 2017.
- [5] Naderi, Shayan, Parvanehmasiha, Sogand, and Torabi, Farschad. Modeling of horizontal axis wind turbine wakes in horns rev offshore wind farm using an improved actuator disc model coupled with computational fluid dynamic. *Energy Conversion and Management*, 171:953 – 968, 2018.
- [6] Hansen, Martin O.L. *Aerodynamics of Wind Turbines*. Earthscan, 22883 Quicksilver Drive, Sterling, VA 20166-2012, USA, 2 ed. , 2008.
- [7] Mikkelsen, Robert. *Actuator Disc Methods Applied to Wind Turbines*. Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, 2003.
- [8] Jensen, N. O. *A Note on Wind Generator Interaction*. Riso National Laboratory, 1983.
- [9] Hamed, R., Javaheri, A., Dehghan, O., and Torabi, F. A semi-analytical model for velocity profile at wind turbine wake using blade element momentum. *Energy Equipment and Systems*, 3(1):13–24, 1 2015.