محاسبه پروفیل سرعت در فواصل مختلف پشت توربین‌های بادی تحت تاثیر جریان‌های آشفته

راضیه حامدی [۱]، فرشاد ترابی [۲]

تهران- میدان ونک- خیابان ملاصدرا- خیابان پردیس- پلاک ۱۵،۱۷،۱۹- دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

rhamedi@mail.kntu.ac.ir

چکیده

در این مقاله تلاش می‌شود که پروفیل سرعت در فواصل مختلف پشت توربین‌های بادی تحت تاثیر جریان‌های آشفته محاسبه شود. با محاسبه این پروفیل سرعت می‌توان از تکنیک جمع آثار استفاده کرده و فاصله بهینه توربین‌ها در مزارع بادی را جهت دست‌یابی به حداکثر توان موردبررسی قرار داد. در این مقاله ابتدا پروفیل سرعت دقیقا در پشت توربین‌های بادی با استفاده از روش مومنتوم المان پره(BEM) محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از مدل لزجت گردابه‌ای و تخمین ترم تنش رینولدز معادلات ناویراستوکس حل می‌شوند و شکل کلی پروفیل سرعت با ضرایب مجهول به‌دست می‌آید. در مرحله بعد با استفاده از معادله پیوستگی بین فاصله صفر و فاصله دلخواه و هم‌چنین استفاده از شرط مرزی سرعت باد در انتهای شعاع دنباله‌های پشت توربین ضرایب مجهول پروفیل سرعت محاسبه می‌شوند. پروفیل سرعت تحلیلی به دست آمده با داده‌های تجربی دیگر محققان مطابقت خوبی دارد و از دقت بالایی برخوردار است.

واژه های کلیدی:پروفیل سرعت، توربین بادی، جریان آشفته، تنش رینولدز، لزجت گردابه‌ای، معادله پیوستگی

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم‌های انرژی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۱- مقدمه

به دلیل ظرفیت پایین نیروگاه‌های بادی برای تولید برق به مقدار مورد نیاز به‌طوری که بتواند شبکه سراسری برق را تغذیه کند، نیاز به ایجاد مزارع یا پارک‌های بادی است که از مجموعه‌ای از توربین‌های بادی تشکیل شده است. یکی از اساسی‌ترین مسائل در طراحی مزارع بادی یافتن فاصله بهینه توربین‌های بادی جهت استفاده حداکثر از زمین و باد موجود در منطقه است. طراحی مزارع بادی باید به‌گونه‌ای باشد که توربین‌های بادی کم‌ترین اثر را بر روی یکدیگر داشته باشند زیرا در اثر برخورد باد به توربین در پشت آن گردابه‌هایی تولید می‌شود که باعث می‌شود سرعت باد در هنگام برخورد به توربین‌های پایین‌دستی کاهش یابد و در نتیجه تاثیر توربین‌ها بر روی یکدیگر به‌دلیل تولید گردابه است. در یک مزرعه بادی که بیش از یک ردیف توربین نصب می‌شود باد پس از عبور از یک توربین به توربین دیگری می‌وزد و مقداری از انرژی جنبشی آن کاهش می‌یابد. بنابراین توربین‌های پایین‌دستی با کاهش انرژی باد مواجه هستند.

یافتن پروفیل سرعت در پشت یک توربین بادی، به طور کلی فرآیند بسیار پیچیده‌ای است و نیازمند انجام شبیه‌سازی‌های سه بعدی عددی است. اما محققان زیادی تلاش کرده‌اند که بتوانند تخمین مناسبی از این پروفیل به دست بیاورند تا بتوان طراحی یک مزرعه بادی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی صورت بگیرد. چنین کاری، یعنی به دست آوردن پروفیل سرعت در پشت توربین‌های بادی ابتدا توسط جنسن و همکاران [۱] با در نظر گرفتن یک پروفیل ثابت در پشت توربین بادی با فرض ضریب القایی ثابت ۰/۳۲۴ به دست آمد. جنسن فرض کرد که شکل پروفیل سرعت در پشت توربین بادی به صورت یک موج پله‌ای است اگرچه نتایج تجربی نشان می‌دهد که پروفیل واقعی شکلی شبیه زنگوله دارد. با این وجود، مدل جنسن هنوز نیز به عنوان یکی از بهترین مدل‌ها در بسیاری از مسائل طراحی مزرعه بادی به کار می‌رود [۲-۴]. علاوه براین، جنسن بازهم فرض کرد که گسترش جبهه دنباله به صورت خطی با فاصله از توربین تغییر می‌کند. بنابراین پروفیل سرعت دقیقا در پشت توربین‌های بادی به‌صورت یک خط راست در نظر گرفته شد که از دقت پایین‌تری برخوردار بود. روش دیگر برای شبیه‌سازی دنباله توسط فرندسن [۵] ارائه شد که با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشت. در این مدل شکل دنباله تابعی از ضریب تراست بود که خود ضریب تراست نیز تابعی از ضریب القایی بود. با وجود این که این روش تطابق خوبی با واقعیت داشت ولی بسیاری از محققان از مقدار ثابت ضریب القایی ۰/۳۲۴ برای محاسبه ضریب تراست استفاده کردند. محققان دیگر از مدل‌های دیگری نیز استفاده کردند. به‌طور مثال بعضی از آن‌ها از مدل دینامیک سیالات محاسباتی(CFD) برای مدل سازی دنباله استفاده کردند [۶] . سون (Son) و همکاران [۷] نیز از مدل لزجت گردابه‌ای برای محاسبه پروفیل سرعت در دنباله‌های پشت توربین استفاده کردند.

در مواردی که در بالا اشاره شد، شکل پروفیل سرعت در ناحیه دنباله از روی موازنه جرم به همراه فرض شکل‌های ساده برای پروفیل سرعت به دست می‌آید. همچنین شکل اولیه پروفیل سرعت درست بعد از توربین بادی درنظر گرفته نمی‌شود. این در حالی است که شکل پروفیل سرعت درست بعد از توربین بادی، به پارامترهای زیادی نظیر شکل هندسی توربین و پروفیل پره شرایط کارکرد نظیر دما، سرعت باد در بینهایت و شرایط عملکردی نظیر سرعت دورانی به شدت وابسته است. همچنین بعد از آنکه سرعت درست در پشت توربین محاسبه شد، در ادامه دنباله به صورت یک دنباله بدون برش (free shear wake) گسترش می‌یابد.

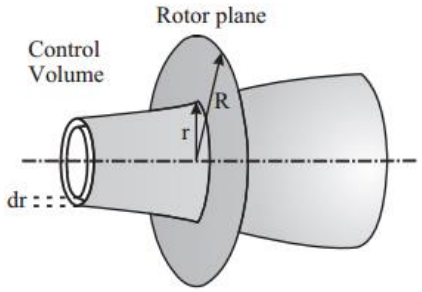
در این مقاله، ابتدا با استفاده از روش مومنتوم المان پره پروفیل سرعت دقیقا در پشت توربین‌های بادی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از مدل لزجت گردابه‌ای و تخمین ترم تنش رینولدز معادلات ناویراستوکس حل می‌شوند و شکل کلی پروفیل سرعت با ضرایب مجهول به‌دست می‌آید. در مرحله بعد با استفاده از معادله پیوستگی بین پروفیل سرعت به‌دست آمده از روش مومنتوم المان پره و پروفیل سرعت در فاصله دلخواه در پشت توربین بادی و هم‌چنین استفاده از شرط مرزی سرعت باد در انتهای شعاع دنباله‌های پشت توربین بادی مقدار ضرایب مجهول محاسبه می‌شوند. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پروفیل سرعت تحلیلی به‌دست آمده از این روش با داده‌های آزمایشگاهی محققان دیگرمطابقت خوبی دارد.

۲- محاسبه پروفیل سرعت در پشت توربین بادی

جهت محاسبه پروفیل سرعت در فواصل مختلف پشت توربین‌های بادی از مطالعات پیشین انجام شده نیز استفاده شده است که به‌طور مختصر راجع به آن‌ها توضیحاتی را خواهیم داد.

۲-۱- مراحل محاسبه ضرایب القای محوری و دورانی با استفاده از روش مومنتوم المان پره

روش مومنتوم المان پره، روشی است که با استفاده از آن می‌توان ضرایب القای محوری و دورانی در فواصل مختلف شعاعی یک پره توربین را محاسبه کرد. این روش توسط محققان زیادی برای محاسبه نیروهای وارده به یک توربین بادی به کار رفته که از جمله می‌توان به کارهای آقای هانسن [۸] در سال ۲۰۰۸ اشاره کرد. در این روش، مطابق با شکل ۱ با استفاده از المان‌های حلقوی در سطح روتور روابطی برای محاسبه ضرایب القای محوری و دورانی به‌دست می‌آید. این روش شامل هشت مرحله است که به‌صورت زیر بیان می‌شود.



شکل۱.حجم کنترل حلقوی در سطح روتور

۱- مقادیر ضرایب القایی محوری و دورانی صفر فرض می‌شود.

۲- محاسبه زاویه بین سرعت نسبی باد و صفحه روتور مطابق فرمول شماره (۱).

$$tan\varphi = \frac{(1-a)u}{(1+a')\omega r} \quad (۱)$$

که در آن u، ω و r به‌ترتیب برابر است با سرعت باد در بی‌نهایت،سرعت دورانی روتور و فاصله شعاعی دلخواه. a و a' نیز به‌ترتیب ضریب القای محوری و ضریب القای دورانی هستند.

۳- محاسبه زاویه حمله مطابق فرمول شماره (۲).

$$\alpha = \varphi - \theta_{local\ twist} - \theta_{pitch} \quad (۲)$$

که در آن $\theta_{local\ twist}$، θ_{pitch} و α به‌ترتیب زاویه پیچش محلی، زاویه گام و زاویه حمله هستند.

۴- محاسبه ضرایب لیفت و درگ از روی نمودار ضرایب لیفت و درگ نسبت به زاویه حمله.

۵- محاسبه ضرایب بار نرمال و مماسی مطابق فرمول شماره (۳) و (۴).

$$C_n = C_l\, cos\varphi + C_d\, sin\varphi \quad (۳)$$

$$C_t = C_l\, sin\varphi - C_d\, cos\varphi \quad (۴)$$

که در آن C_l و C_d به‌ترتیب ضریب لیفت و ضریب درگ هستند. C_n و C_t نیز به‌ترتیب برابر هستند با ضریب بار نرمال و ضریب بار مماسی.

۶- با داده‌های جدید به‌دست آمده در مراحل قبل مقادیر ضرایب القای محوری (a) مجددا به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$a = \begin{cases} \dfrac{1}{\dfrac{4Fsin\varphi^2}{\sigma C_n} + 1} & a < a_c \\ \dfrac{1}{2}\left[X - \sqrt{X^2 + 4(Ka_c{}^2 - 1)}\right] & a > a_c \end{cases} \quad (۵)$$

که در آن

$$X = 2 + K(1 - 2a_c) \quad (۶)$$

و

$$K = \frac{4Fsin\varphi^2}{\sigma C_n} \quad (۷)$$

که در این فرمول‌ها F و σ به‌ترتیب برابر هستند با ضریب افت نوک پره پرانتل و نسبت مساحت پره‌ها به مساحت جاروشده توسط روتور.

به طور مشابه، ضرایب القای دورانی(a') نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$a' = \frac{1}{\dfrac{4Fsin\varphi\, cos\varphi}{\sigma C_n} + 1} \quad (۸)$$

۷- از مقادیر جدید ضرایب القای محوری و دورانی استفاده کرده و مراحل ۲ تا ۶ تکرار می‌شود تا جایی که این مقادیر همگرا شوند.

۸- بنابراین با استفاده از مقادیر ضرایب القایی همگرا شده نیروهای محلی در سطح هر المان محاسبه خواهد شد.

با استفاده از ضرایب القایی محوری محاسبه شده در مرحله ۷ در فواصل شعاعی مختلف می‌توان پروفیل سرعت دقیقا درپشت توربین‌های بادی را مطابق فرمول شماره (۹) محاسبه کرد.

$$V = (1 - a)u \quad (۹)$$

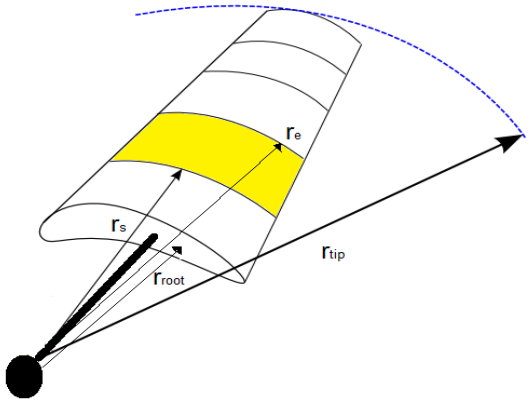
جزئیات بیشتر در این زمینه را می‌توان از مرجع [۸] مطالعه نمود.

۲-۲- محاسبه ضریب القای محوری کلی

همانگونه که قبلا اشاره شد، روش ممنتوم المان پره ضریب القایی در طول پره را به دست می‌دهد. اما برای محاسبه پروفیل سرعت در پشت توربین، به ضریب القایی کل توبین نیز نیاز است. قدیریان و همکاران [۹] روشی را برای محاسبه ضریب القای محوری کلی با استفاده از ضرایب القای محوری به‌دست آمده در فواصل مختلف شعاعی روتور با استفاده از روش مومنتوم المان پره ارائه کرده‌اند که رابطه آن به‌صورت زیر است:

$$a_{tot} = \frac{\sum_1^{N_s}(r_e{}^2 - r_s{}^2)(1 - a_{loc})}{r_{tip}{}^2 - r_{root}{}^2} \quad (۱۰)$$

که در آن همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، r_e، r_s، r_{tip} و r_{root} برابر هستند با فاصله شعاعی انتهایی هر مقطع، فاصله شعاعی ابتدایی هر مقطع، فاصله شعاعی انتهایی پره و فاصله شعاعی ابتدایی پره. a_{loc} و a_{tot} به‌ترتیب ضریب القای محوری محلی در فاصله شعاعی دلخواه و ضریب القای محوری کلی هستند.



شکل ۲.نمایش فواصل مختلف شعاعی یک پره توربین بادی

۲-۳- محاسبه رابطه نرخ کاهش نقصان سرعت در مرکز دنباله‌های پشت توربین و نرخ رشد شعاع دنباله های پشت توربین نسبت به فاصله

در مرجع شماره [۱۰] با در نظر گرفتن ترم تنش رینولدز روابطی برای نرخ کاهش نقصان سرعت در مرکز دنباله‌های پشت توربین‌های بادی و هم چنین نرخ رشد شعاع دنباله‌های پشت توربین‌های بادی نسبت به فاصله محاسبه شده که به‌صورت زیر است:

$$r_1 = r_e\left(\frac{x}{4r_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (۱۱)$$

که در این رابطه

$$r_e = r_0\sqrt{\frac{1-a_{tot}}{1-2a_{tot}}} \quad (۱۲)$$

و نقصان سرعت برابر می‌شود با:

$$U_s = 2a_{tot}u\left(\frac{x}{4r_0}\right)^{\frac{-2}{3}} \quad (۱۳)$$

که در فرمول‌های بالا r_1، r_0، x، a_{tot} و u به‌ترتیب شعاع دنباله در فاصله دلخواه، شعاع روتور، فاصله دلخواه در پشت توربین بادی، ضریب القای محوری کلی و سرعت باد در بی‌نهایت هستند.

۳- محاسبه پروفیل سرعت در فواصل مختلف پشت توربین‌های بادی

در مرجع شماره [۱۱] با استفاده از تخمین ترم تنش رینولدز و استفاده از مدل لزجت گردابه‌ای وسپس حل معادلات ناویراستوکس با استفاده از روش خودتشابهی (self similarity) شکل کلی پروفیل سرعت به‌صورت تابع نمایی با ضرایب مجهول محاسبه شد، که به صورت زیر است.

$$U = u - AU_s\exp(B\eta^2) \quad (۱۴)$$

اما به‌دلیل خطای به‌وجود آمده در اثر فرض مقدار ویسکوزیته اغتشاشی ثابت، پروفیل به‌دست آمده کمی با واقعیت اختلاف داشت. بنابراین در مقاله حاضر شکل کلی پروفیل سرعت به‌صورت یک تابع نمایی ضرب در یک چندجمله‌ای با ضرایب مجهول فرض شده است و از معادله پیوستگی و شرط مرزی برای محاسبه این ضرایب مجهول استفاده شده که به صورت زیر است:

$$U = u - U_s(A\eta^2 + 1)\exp(B\eta^2) \quad (۱۵)$$

در این روابط، U_s نقصان سرعت است که از رابطه (۱۳) به دست می‌آید. u نیز سرعت باد در بی‌نهایت است. همچنین η فاصله شعاعی بی بعد بوده که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{r}{r_1} \quad (۱۶)$$

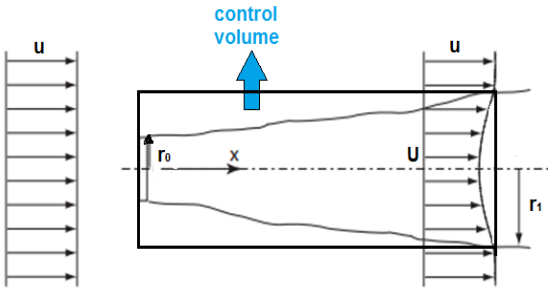
همچنین r_1 شعاع دنباله در محل مورد نظر است. شایان ذکر است که پروفیل U که از رابطه‌ی فوق حساب می‌شود، هم تابعی از شعاع و هم فاصله طولی از توربین یا x است. تابعیت x این رابطه در دل رابطه نقصان سرعت نهفته که با معادله (۱۳) بیان شد.

همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در پروفیل سرعتی که در این تحقیق ارائه شده، دو مجهول A و B وجود دارد که باید به دست بیایند. برای این کار ابتدا با استفاده از پروفیل سرعت به‌دست آمده دقیقا در پشت توربین‌های بادی با روش مومنتوم المان پره مقدار دبی مطابق فرمول (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$Q_{BEM} = \int \rho V.dA = \int_0^{r_0} \rho V(2\pi r dr) \quad (۱۷)$$

این مقدار برابر با کل دبی سیال عبور کرده از توربین است. طبق شکل ۳، این مقدار برابر با دبی سیال عبوری از حجم کنترل بوده که در فاصله x پروفیل آن طبق رابطه (۱۵) داده شده است.

$$Q_{BEM} + \rho\pi({r_1}^2 - {r_0}^2)u = \int_0^{r_1} \rho U(2\pi r dr) \quad (۱۸)$$



شکل۳. نمایش حجم کنترل در استفاده از معادله پیوستگی

رابطه (۱۸) یک معادله برای بدست آوردن ضرایب مجهول معادله (۱۵) ارائه می‌دهد و بنابراین برای محاسبه ضریب دیگر به یک معادله دیگر نیاز داریم. برای این کار می‌توان فرض کرد که در لبه دنباله سرعت به سرعت بینهایت رسیده است. به عبارت دیگر

$$r = r_1 \rightarrow U = u \quad (۱۹)$$

معادلات (۱۸) و (۱۹) روابط مورد نیاز برای به دست آوردن پروفیل سرعت در هر فاصله از توربین بادی را ارائه می‌دهند.

۴- نتایج

در این مقاله ضرایب القای محوری و دورانی با استفاده از روش مومنتوم المان پره برای توربین بادی با مشخصات پره مطابق جدول ۱ و تحت تاثیر جریان باد با سرعت ۸ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۳۰ دور بر دقیقه محاسبه شد و سپس با استفاده از این اطلاعات پروفیل سرعت در فاصله صفر پشت توربین بادی به‌دست آمد.

جدول۱.مشخصات پره [۲]

r(m)	Twist(deg)	Chord(m)
۴/۵	۲۰	۱/۶۳
۵/۵	۱۶/۳	۱/۵۹۷
۶/۵	۱۳	۱/۵۴
۷/۵	۱۰/۰۵	۱/۴۸۱
۸/۵	۷/۴۵	۱/۴۲
۹/۵	۵/۸۵	۱/۳۵۶
۱۰/۵	۴/۸۵	۱/۲۹۴
۱۱/۵	۴	۱/۲۲۹
۱۲/۵	۳/۱۵	۱/۱۶۳
۱۳/۵	۲/۶	۱/۰۹۵
۱۴/۵	۲/۰۲	۱/۰۲۶
۱۵/۵	۱/۳۶	۰/۹۵۵
۱۶/۵	۰/۷۷	۰/۸۸۱
۱۷/۵	۰/۳۳	۰/۸۰۶
۱۸/۵	۰/۱۴	۰/۷۰۵
۱۹/۵	۰/۰۵	۰/۵۴۵
۲۰/۳	۰/۰۲	۰/۲۶۵

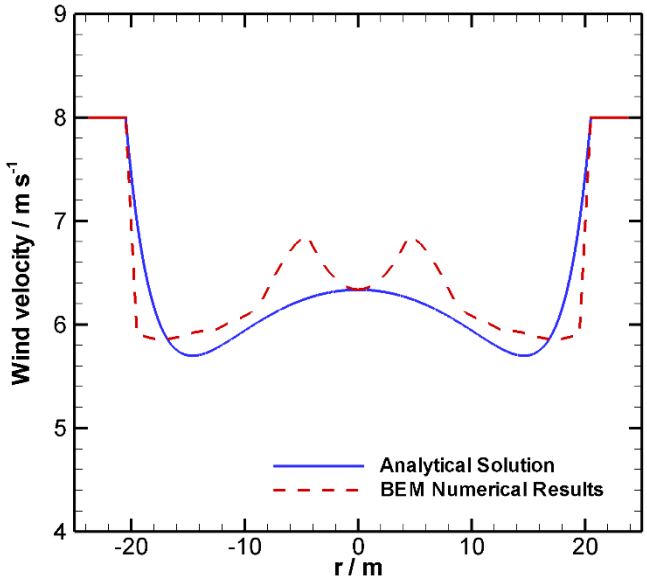
برای محاسبه پروفیل سرعت تحلیلی در فاصله صفر مقدار نقصان سرعت در مرکز دنباله (U_s) مساوی با نقصان سرعت به‌دست آمده از روش مومنتوم المان پره در نظر گرفته شد، که V_c مقدار سرعت در مرکز دنباله با استفاده از روش مومنتوم المان پره و u سرعت باد در بی‌نهایت است.

$$U_s = u - V_c \qquad (۲۰)$$

و مقدار شعاع دنباله در فاصله صفر پشت توربین برابر با شعاع روتور در نظر گرفته شد.

$$x = 0 \rightarrow r_1 = r_0 \qquad (۲۱)$$

با قرار دادن معادلات (۲۰) و (۲۱) در معادلات (۱۸) و (۱۹) بار دیگر به یک دستگاه دو معادله دو مجهول برحسب A و B خواهیم رسید که با حل این دستگاه پروفیل سرعت تحلیلی دقیقا در پشت توربین بادی محاسبه می‌شود.



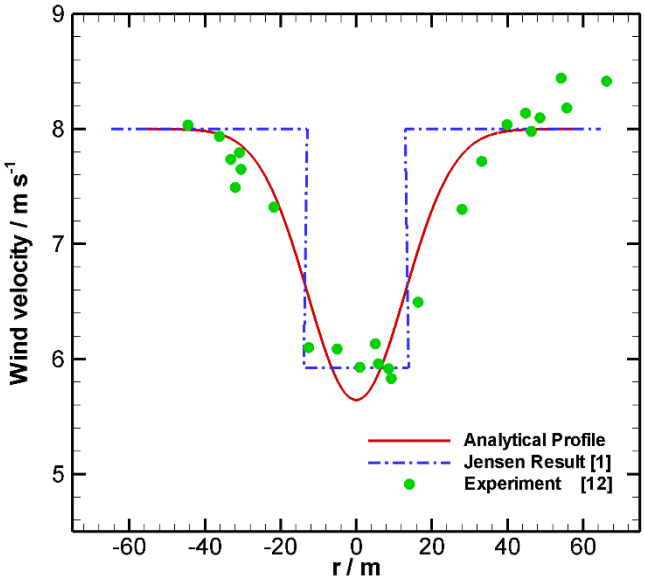
شکل۴.مقایسه پروفیل سرعت تحلیلی با پروفیل سرعت به‌دست آمده از روش BEM در فاصله صفر در پشت توربین بادی

در شکل ۴ پروفیل سرعت تحلیلی و پروفیل سرعت محاسبه شده با روش مومنتوم المان پره رسم شده است. در این شکل، خط‌چین‌ها نشانگر پروفیل سرعت به‌دست آمده از روش ممنتوم المان پره بوده و خط توپر نتایج تحلیلی هستند. همانگونه که مشخص‌است، پروفیل سرعت در پشت توربین دارای افت می‌شود که با توجه به شکل پروفیل پره‌ی توربین، سرعت باد در بینهایت، سرعت دورانی و دیگر مشخصات سیال این پروفیل می‌تواند متفاوت باشد. مزیت روشی که در اینجا ارائه شده این است که با این روش می‌توان این پروفیل را به دست آورد در حالی که در کارهای محققان گذشته پروفیل سرعت ثابت درنظر گرفته شده‌است.

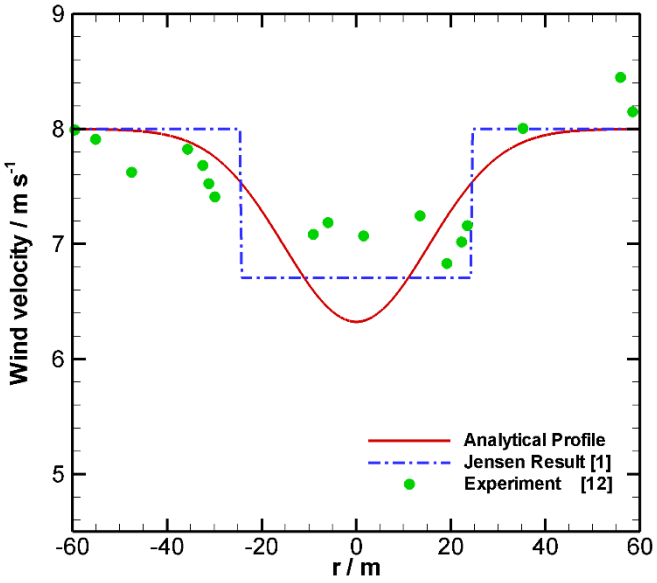
در همین شکل پروفیل سرعت تحلیلی که از رابطه (۱۵) به دست آمده نیز آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این دو پروفیل تطابق خوبی با یکدیگر دارند. مزیت استفاده از یک پروفیل تحلیلی نسبت به پروفیل عددی آن است که با استفاده از معادله پروفیل تحلیلی می‌توان سرعت در فواصل دور از توربین را به صورت یک رابطه تحلیلی درآورد در حالی که از نتایج عددی چنین کاری نمی‌توان کرد.

حال که پروفیل سرعت درست پشت توربین به دست آمد، مسأله‌ی اصلی که محاسبه‌ی پروفیل سرعت در فواصل دور از توربین‌هست شروع می‌شود. برای این منظور، پروفیل سرعت بازهم از رابطه (۱۵) پیروی می‌کند با این تفاوت که میزان نقصان سرعت از رابطه‌ی (۱۳) محاسبه‌شده است. برای صحت‌سنجی در شکل‌های ۵ تا ۷ پروفیل سرعت تحلیلی به‌دست آمده، با داده‌های واقعی تجربی هویستروپ [۱۲] مقایسه شده است. در همین شکل‌ها نیز پروفیل سرعت به دست‌آمده از روش جنسن نیز برای مقایسه آورده شده است.

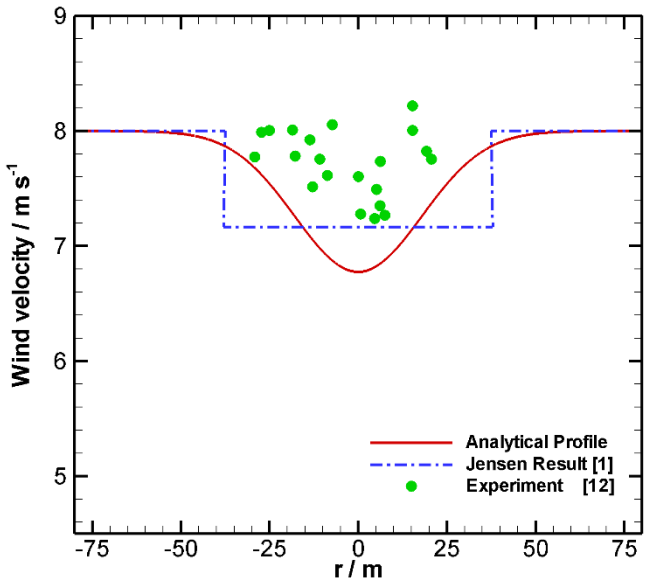
نتایج تجربی در میدان‌های مختلف نشان می‌دهد که پروفیل به‌دست آمده به صورت زنگوله‌ای شکل است. همان‌گونه که مشخص است، پروفیل سرعت به دست آمده از روش حاضر توزیع مناسب‌تری نسبت به روش جنسن ارایه می‌دهد زیرا این پروفیل مبتنی بر تئوری جریان آشفته بر پایه‌ی جریان بدون برش بوده و از روش خودتشابهی به‌دست آمده است.



شکل۵.مقایسه پروفیل سرعت تحلیلی با داده‌های هویستروپ در فاصله ۶ برابر شعاع روتور



شکل۶.مقایسه پروفیل سرعت تحلیلی با داده‌های هویستروپ در فاصله ۱۰ برابر شعاع روتور



شکل۷.مقایسه پروفیل سرعت تحلیلی با داده‌های هویستروپ در فاصله ۱۶برابر شعاع روتور

۵- نتیجه گیری

توربین‌های بادی به‌دلیل تولید گردابه در اثر حرکت روتور بر روی یکدیگر تاثیر می‌گذارند و بنابراین توربین‌های پایین‌دستی با کاهش سرعت باد مواجه هستند. با به‌دست آوردن پروفیل سرعت در پشت توربین‌های بادی می‌توان از تکنیک جمع آثار استفاده کرده و اثرات آن‌ها بر روی یکدیگر را مورد مطالعه قرار داد و درنتیجه از زمین و باد موجود در منطقه استفاده حداکثر کرد. پروفیل سرعت در نواحی مختلف متفاوت است و از معادلات متفاوتی محاسبه می‌شود. پشت توربین‌های بادی به دو ناحیه دور و نزدیک تقسیم می‌شود. در اکثر کارهای انجام شده قبلی، روشی برای به‌دست آوردن پروفیل سرعت در ناحیه نزدیک دقیقا پشت توربین‌های بادی ارایه نشده است. همچنین پروفیل سرعت در ناحیه دور توسط مدل لزجت گردابه‌ای و جنسن محاسبه می‌شود، که روش مومنتوم المان پره و روش لزجت گردابه‌ای از دقت بالاتری نسبت به روش جنسن برخوردارند.

برای محاسبه پروفیل سرعت در فواصل مختلف پشت توربین‌های بادی می توان از مدل لزجت گردابه‌ای برای تخمین ترم تنش رینولدز استفاده کرده و به حل معادلات ناویراستوکس پرداخت. سپس با استفاده از معادله پیوستگی بین پروفیل سرعت به‌دست آمده در فاصله صفر و فاصله دلخواه و هم‌چنین استفاده از شرط مرزی سرعت باد در انتهای شعاع دنباله‌های پشت توربین می‌توان مقدار ضرایب مجهول پروفیل سرعت را محاسبه کرد. برای این کار لازم است پروفیل سرعت درست پشت سر توربین نیز به دست بیاید که همانگونه که بیان شد در کارهای قبلی روشی برای به‌دست آوردن آن ارائه نشده است. اما در تحقیق حاضر، این پروفیل با استفاده از روش مومنتوم المان پره محاسبه شده‌است. پروفیل سرعت به‌صورت تابع نمایی ضرب در یک چندجمله‌ای درجه دو می‌باشد (معادله (۱۵)). از آن‌جایی که ترم تنش رینولدز در معادلات ناویراستوکس در نظر گرفته شد، پروفیل‌های سرعت تحلیلی به‌دست آمده با این روش با داده‌های تجربی هویستروپ تطابق زیادی دارد.

علایم و متغیرها

φ : زاویه بین سرعت نسبی باد و صفحه دوران روتور

a : ضریب القای محوری در فاصله شعاعی دلخواه

a' : ضریب القای دورانی در فاصله شعاعی دلخواه

u : سرعت باد قبل از برخورد به توربین بادی

ω : سرعت دورانی روتور

r : فاصله شعاعی دلخواه

α : زاویه حمله

$\theta_{local\ twist}$: زاویه پیچش محلی

θ_{pitch} : زاویه گام

C_l : ضریب لیفت

C_D : ضریب درگ

C_t : ضریب بی‌بعد برای محاسبه نیروی مماسی

C_n : ضریب بی‌بعد برای محاسبه نیروی عمودی

F : ضریب افت نوک پره پرانتل

V : سرعت باد در فاصله صفر پشت توربین بادی

a_{tot} : ضریب القای محوری کلی

N_s : تعداد مقاطع در روش مومنتوم المان پره

r_e : فاصله شعاعی انتهایی هر مقطع

r_s : فاصله شعاعی ابتدایی هر مقطع

r_{tip} : فاصله شعاعی انتهایی پره

r_{root} : فاصله شعاعی ریشه پره

a_{loc} : ضریب القای محوری محلی در فاصله شعاعی دلخواه

Q_{BEM} : دبی محاسبه شده با استفاده از روش مومنتوم المان پره

r_0 : شعاع روتور

r_1 : شعاع دنباله پشت توربین در فاصله دلخواه

U : پروفیل سرعت در فاصله دلخواه

U_s : نقصان سرعت در مرکز دنباله‌های پشت توربین

A : ضریب مجهول در پروفیل سرعت

B : ضریب مجهول در پروفیل سرعت

x : فاصله در پشت توربین بادی

σ : نسبت مساحت پره‌ها به مساحت جارو شده توسط روتور

ρ : چگالی هوا

V_c : سرعت در مرکز دنباله محاسبه شده توسط روش مومنتوم المان پره

مراجع

[۱]. Jensen N.O. “A Note on Wind Generator Interaction “.RisΦ National Laboratory;1983.
[۲].Chan T.C.Y., Romero, D.A., Zhang P.Y., Turner S.D.O., Amon C.H.,”A new mathematical programming approach to optimize wind farm layouts.”.Renew. Energy 63,674-680;2014.
[3].Pookpunt, S., Ongsakul, W.,”Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time varing acceleration coefficients”. Renew.Energy 55,266-276;2013.
[۴].Chen, Y., Li, H., Jin, K., Song, Q.,”wind farm layout optimization using genetic algorithm with different hub height wind turbines.”Energy Convers.Manag.70,56-65;2013
[۵].Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann, O., Larsen, S., Hojstup, J., Thogersen, M., “Analytical moddeling of wind speed deficit in large offshore wind farms.” Wind Energy 9 (1-2), 39-53;2006.
[۶].Song, M.X., Chen,K., He, Z.Y., Zhang, X.,”Bionic optimization for micro-siting of wind farm on complex terrain.” Renew.Energy.50,551;2013.
[۷].Son, E., Lee, S., Hwang, B., Lee, S. “Characteristics of turbine spacing in a wind farm using an optimal design process.”Renew. Energy 65,245;2014.
[۸].Hansen M.O.L. “Aerodynamics of Wind Turbines” . 2 nd ed. Earthscan Publishes, London , UK ;2008.
[۹].A.Ghadirian, M.Dehghan, F.Torabi .”Considering induction factor using BEM method in wind farm layout optimization”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics;2014.
[۱۰].Ajay K. Prasad .”Analytical Solution for the Optimal Spacing of Wind Turbines”. Journal of Fluids Engineering;2014.
[۱۱]. Tennekes H ,Lumley JL. “A FIRST COURSE IN TURBULENCE”.The MIT Press ;1972.
[۱۲].Hoistrop, J. “Nibe Wake , part one”.Internal technical report , Riso;1983.