

ترکیب نظری ممنتوم حجمی و تحلیل المان پره جهت مدلسازی آئرو دینامیک روتور

توربین‌های بادی

اسمعیل محمودی^{۱*}، علی جعفری^۲، علیرضا کیهانی^۲

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تهران

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تهران

* ایمیل نویسنده مسئول: esmahmoodi@shahroodut.ac.ir

چکیده

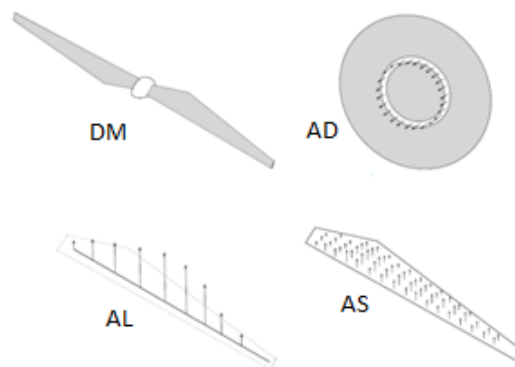
مدلسازی پسیاد^۱، عملکرد و بارهای آیرولاستیکی وارده بر پره توربین‌های بادی محور افقی، در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت. محاسبه و اعمال ممنتوم‌های حجمی بر المان‌های یک استوانه عملگر و جایگزین نمودن آن با کل روتور بررسی و انجام شد. تخمین ممنتوم‌های اعمالی از تحلیل المان پره، و همگرا نمودن مقادیر آن‌ها طی تکرارهای حل در فضای محاسبات دینامیک سیالات، نتایج قابل قبولی را در بر داشت. بار گستره و پسیاد روتور یک توربین به قطر ۴/۵ متر جهت ارزیابی نتایج محاسبات در سه سرعت باد ۱۰، ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه و عملکرد روتور در ۱۸ سرعت مختلف اندازه گیری شدند. مقایسه نتایج مدلسازی آیرودینامیکی و آزمون تجربی با جزئیات در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار گرفتند.

کلمات کلیدی: - بارهای آیرولاستیک - تحلیل المان پره - توربین‌های بادی محور افقی - مدلسازی آیرودینامیکی - ممنتوم حجمی .

^۱ Wake

مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل استفاده وسیع از توربین‌های بادی سه پره محور افقی، مدل‌های ریاضی زیادی توسط پژوهشگران توسعه یافته‌اند. نظریه تحلیل ممنتوم المان پره (BEM) به عنوان معمولترین روش (Burton *et al.*, 2001)، مدل‌سازی مستقیم (DM)^۱ به عنوان پرمصدترین روش، (Duque *et al.*, 2003; Sørensen and Shen, 2002)، و دیسک عملگر (AD)، خط عملگر (AL)^۲ و صفحه عملگر (AS)^۳ (شکل ۱) به عنوان روش‌های جدید توسعه یافته در فضای معادله‌های ناویه-استوکس، از جمله مدل‌هایی هستند که از گذشته تا به اکنون به طور قابل توجهی گسترش یافته‌اند (Sanderse *et al.*, 2011).



شکل ۱- روش‌های مدل‌سازی روتور در فضای معادله‌های ناویه-استوکس.

به استثناء مدل‌سازی مستقیم، سایر مدل‌ها، علاوه بر فضای ناویه-استوکس، وابسته به نظریه‌های مختلف شبیه‌سازی توربین‌های بادی دارند (Mahmoodi, 2012). در این پژوهش، مدل تعمیم یافته‌ای از دیسک عملگر، با عنوان استوانه عملگر، با نظریه تحلیل ممنتوم المان‌های پره ترکیب شده است.

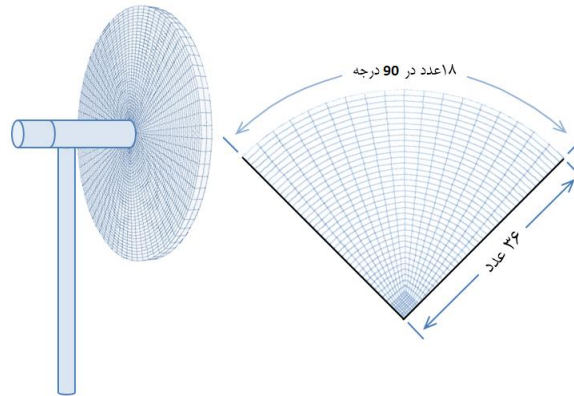
مواد و روش‌ها

روتور توربین با یک استوانه فیزیکی نفوذپذیر هم‌اندازه با روتور در فضای معادله ناویه-استوکس جایگزین شد (شکل ۲). این دیسک در راستای شعاعی به ۳۶ المان، در راستای سمتی به ۷۲ المان و در راستای محوری به دو المان تقسیم شد تا فضای منظم و مناسب برای اعمال ممنتوم‌های حجمی ایجاد شود.

^۱ Direct Model (DM)

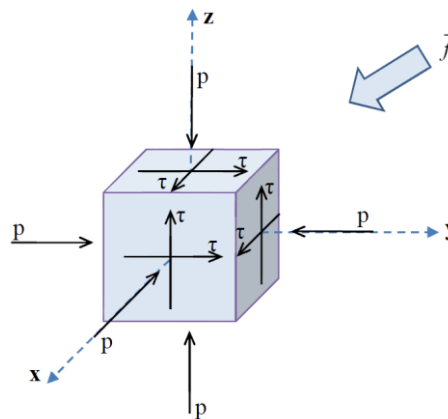
^۲ Actuator Line Technique

^۳ Actuator Surface Technique



شکل ۲- روتور توربین بادی با یک استوانه هم حجم با روتور توربین جایگزین شد.

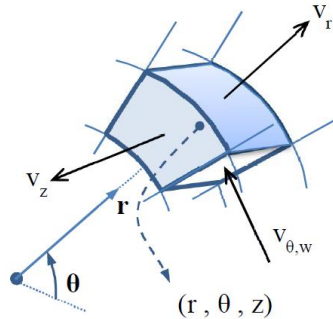
در فیزیک، معادله‌های ناویر-استوکس مرجع اصلی بیان حرکت سیال می‌باشند. با اعمال قانون دوم نیوتن، $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ ، بر یک جزء سیال (شکل ۲) شکل برداری این معادله بدست می‌آید.



شکل ۳- استخراج معادله ناویر - استوکس از اعمال قانون دوم نیوتن بر یک جزء سیال.

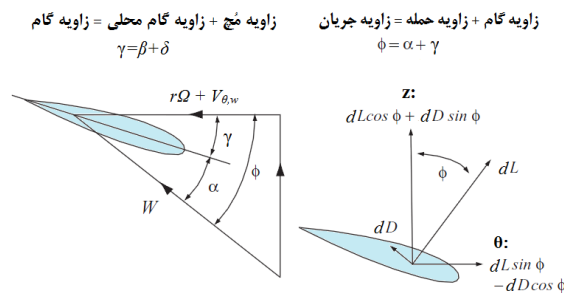
از این رو، شکل برداری معادله به صورت $\rho\vec{a} = \vec{\sigma} + \vec{f}$ بدست می‌آید. در این معادله، $\rho\vec{a}$ اینرسی حاصل از مجموع شتاب زمانی و همرفتی ذره در مسیر شارش است، $\vec{\sigma}$ تانسور تنش و \vec{f} نماینده تمام نیروهای خارجی وارده بر حجم سیال است. در این تحقیق، مقدار \vec{f} به عنوان ممنتوم حجمی در فرآیند همگرایی مسئله، بر گره‌های میانی المان‌های استوانه عملگر اثر می‌کند.

به دلیل قطبی بودن فضای مدل، جهت محاسبه ممنتوم‌های حجمی، مولفه‌های سرعت و موقعیت مکانی هر المان استوانه از مختصات کارتزین به مختصات استوانه‌ای انتقال داده شدند (شکل ۴).



شکل ۴- مولفه‌های فیزیکی و سیالاتی المان‌های استوانه عملگر در مختصات استوانه‌ای.

مقادیر ممنتوم‌های حجمی هر المان، از ضرایب آیرودینامیکی برا و پسای هر ایرفویل که در آزمون‌های دوبعدی تونل‌های باد اندازه‌گیری شده‌اند، در ترکیب با مولفه‌های فیزیکی هر المان، محاسبه شدند. روابط حاصل از تحلیل ممنتوم المان‌های پره (ایرفویل‌های پره)، جهت محاسبه این ممنتوم‌ها به کار گرفته شد (شکل ۵).



شکل ۵- تحلیل ممنتوم یک المان (ایرفویل) از پره توربین

نتیجه این محاسبات، ممنتوم‌های حجمی در مختصات استوانه‌ای است. جهت بازگرداندن و اعمال آن‌ها بر گره‌های میانی هر المان سیالاتی در استوانه، مولفه‌های بردار ممنتوم مجدداً به مختصات کارتزین x، y و z انتقال داده شدند (معادله ۱).

$$\vec{f} = f_x \vec{i} + f_y \vec{j} + f_z \vec{k} \quad (1)$$

$$f_x = -\frac{\rho}{2t_h} W^2 \sigma' (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) \sin \theta \quad (2)$$

$$f_y = \frac{\rho}{2t_h} W^2 \sigma' (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) \cos \theta \quad (3)$$

$$f_z = -\frac{\rho}{2t_h} W^2 \sigma' (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) \quad (4)$$

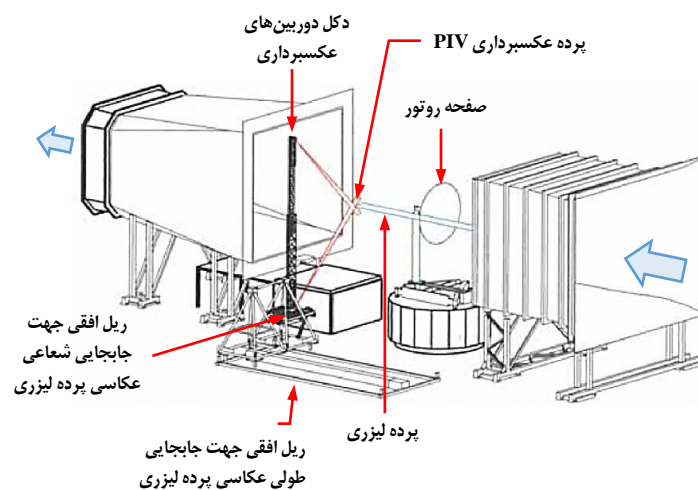
$$\rho \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{V} + \bar{f} \Big|_{Cyl.} \quad (5)$$

بردار ممنتوم تحت جریان آرام در معادله (۵) به جای \bar{f} قرار داده شد. در فرآیند تکرارهای حل مسئله، همگرایی ممنتوم

برداری \bar{f} نیز به عنوان یکی از شرایط حل مسئله در نظر گرفته شد.

با همکاری مرکز تحقیقات انرژی هلند، موسسه ریزو دانمارک و دانشگاه کیل آلمان، طی قراردادی با دانشگاه تهران، از

آزمون توربین بادی مکزیکو، (Mahmoodi, 2012)، جهت ارزشیابی نتایج حاصل از محاسبات استفاده شد (شکل ۶).



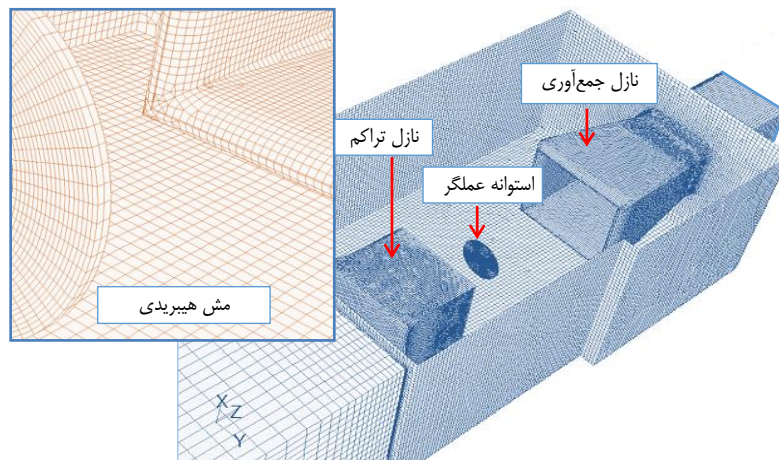
شکل ۶- شماتیک آزمون توربین بادی مکزیکو در شرایط کنترل شده در تونل باد مدار بسته DNW/LLF

دهانه مقطع آزمون تونل باد $9/5 \times 9/5$ مترمربع بود. توربین مورد مطالعه از نوع سه پره محور افقی به قطر $4/5$ متر بود که در فاصله 10 متری نازل تراکم نصب شده بود. هر پره از ترکیب سه ایرفویل DU91-W2-250 در ریشه، RISOE A1-21 در وسط و NACA 64-418 در انتهای پره ساخته شده بود. گرادیان فشار توسط 148 حسگر پیزوالکتریک در پنج مقطع 25% ، 35% ، 60% ، 82% و 92% فاصله از ریشه پره اندازه گیری شدند. بار محوری روتور و توان تولیدی آن در ناسل توربین اندازه گیری شدند. پسپاد با استفاده از تکنیک سرعت‌سنجی تصویری ذرات^۱، توسط دو عدد دوربین با سرعت شاتر 200 نانوثانیه و پرده های لیزری محوری و شعاعی، پایش شد. اندازه‌گیری بار گسترده آیروالاستیکی در طول پره و همچنین پایش پسپاد، در سه سرعت، 10

^۱ Particle Image Velocimetry (PIV)

متربرثانیه (حالت تلاطم^۱)، ۱۵ متربرثانیه (حالت طراحی^۲) و ۲۴ متربرثانیه (حالت استال^۳) به انجام رسید. اما عملکرد روتور در ۱۸ سرعت مختلف بین ۱۰ تا ۲۴ متربرثانیه اندازه گیری شد تا دقیق تر مورد ارزیابی قرار گیرد.

روش عددی مطالعه شده در این تحقیق جهت ارزیابی، روی توربین بادی آزمون تجربی اعمال شد. تونل باد با ترکیب مش های منظم و نامنظم (هیبرید) آماده شد. استوانه فعال در فضای تونل باد قرار داده شد و سپس ممنتوم های محاسبه شده بر گره های میانی هر المان استوانه فعال اعمال شدند. از حلگر سیالاتی فلوئنت جهت همگرایی مسئله استفاده گردید. با استفاده از زبان کدنویسی یو-دی-اف^۴ ممنتوم های حجمی محاسبه و بر استوانه جایگزین روتور اعمال شدند.



شکل ۷- مش هیبریدی تونل باد و محل قرار گیری دیسک در مقابل نازل تراکم باد.

به استثناء استوانه روتور، مدل تونل باد چهار مرحله ویرایش گردید تا در نهایت، مش بندی کل مدل همگرا شد. همچنین در مرحله ویرایش مش مدل، مقدار Y^+ در لایه های مرزی به کمتر از ۱۰٪ رسید. سپس مدل در هر سه سرعت همگرا شد. از طرفی، برای بحث دقیق تر در خصوص عملکرد روتور، مدل ریاضی این تحقیق در ۱۸ سرعت دیگر آزمون تجربی نیز محاسبه و باندازه گیری‌ها مقایسه شد. در هر حل، به طور متوسط بعد از ۱۵۰۰ تکرار مسئله همگرا می شد.

نتایج و بحث

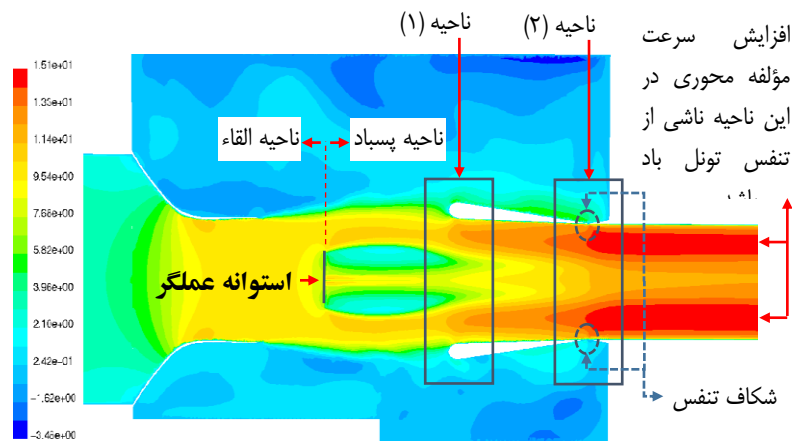
^۱ Turbulent State

^۲ Design State

^۳ Stall State

^۴ User Defined Functions (UDF)

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می شود، ممتوم های استوانه عملگر در مسیر جریان باد در فاصله ۱۰ متری از دهانه نازل، بر سیال اثر کرده است و پسبادی مشابه یک روتور واقعی بوجود آورده است. تونل جریان بالادستی^۱ که بر روتور وارد می شود، ناحیه القاء^۲ نامیده شده و تونل جریان پایین دستی^۳، ناحیه پسباده^۴ نامیده شده است.



شکل ۸- توزیع مولفه محوری سرعت باد در مقطع آزمون

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می شود، پسباده در ناحیه (۱) توسط نازل جمع آوری و در ناحیه (۲) توسط شکاف تنفس تونل باد منقبض شده است. این مسئله نشان می دهد که از نتایج این آزمون جهت شبیه سازی پسباده دور دست^۵ نمی توان استفاده کرد.

به طور قطع، تفاوت هایی در جزئیات بین نتایج حاصل از این نوع شبیه سازی، یعنی جایگزینی روتور با یک استوانه عملگر، با مدل واقعی وجود دارد. شکل (۹) به این موضوع پرداخته است. همانطور که مشاهده می شود، برخلاف مدل واقعی که وُرتکس های حجمی به شکل هلیس از ریشه و نوک پره به سمت ناحیه پسباده رها می شوند، در مدل استوانه عملگر، وُرتکس از لبه استوانه و مرکز آن، پیوسته و به شکل یک تونل به سمت پسباده رها می شود.

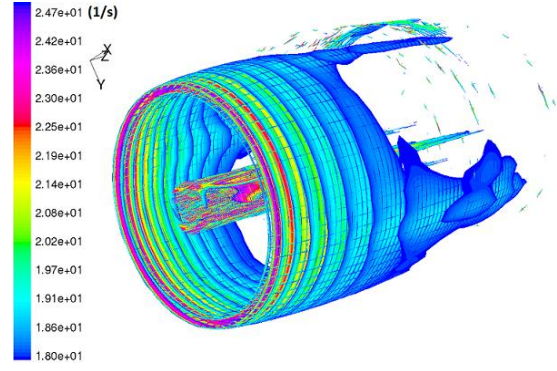
^۱ Up-Stream Tube

^۲ Induction Region

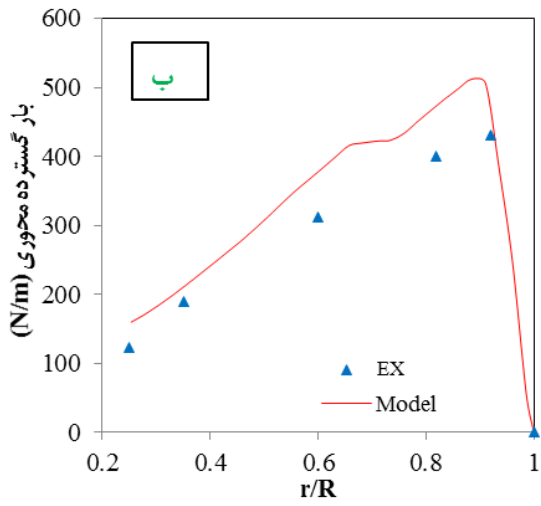
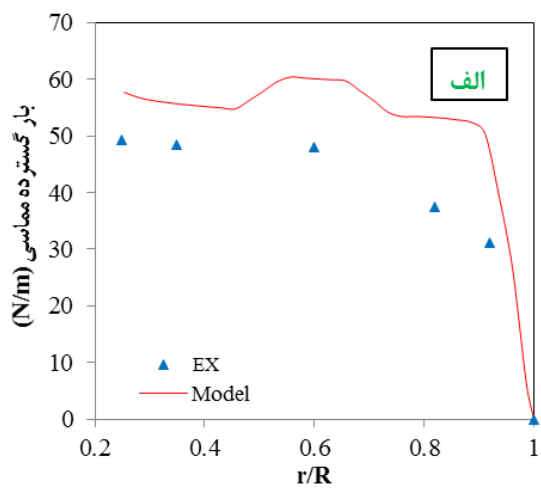
^۳ Down-Stream Tube

^۴ Wake Region

^۵ Far Wake



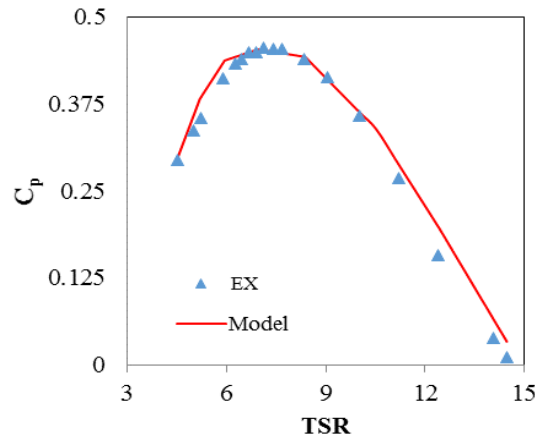
شکل ۹- ورتکس در ناحیه پس‌باد پشت روتور که تفاوت اصلی این نوع شبیه‌سازی با مدل واقعی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- الف) توزیع بار گسترده در راستای مماسی و ب) در راستای محوری در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه.

تخمین بار گسترده وارده بر پره در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه در راستای مماسی در شکل (۱۰-الف) و در راستای محوری در شکل (۱۰-ب) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، همانطور که مشاهده می‌شود، دقت نتایج قابل قبول است اما صحت

آن جای بحث دارد. مقایسه نتایج مدل مرجع (Mahmoodi *et al.*, 2014) نشان می‌دهد که در سرعت طراحی پره، تخمین بار توسط روش BEM بهتر بوده است.

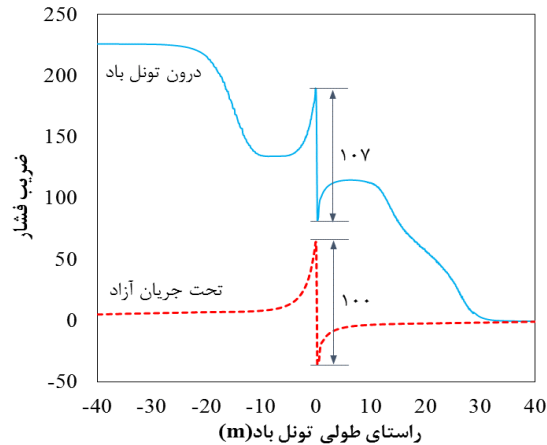


شکل ۱۱- تخمین عملکرد، توان تولیدی توربین. محور افقی نسبت سرعت نوک پره توربین به سرعت باد^۱ را نشان می‌دهد و محور عمودی، نسبت توان تولیدی توربین به توان باد جاری شده به سمت روتور را نشان می‌دهد.

تخمین توان توسط مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق قابل قبول می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، در نقطه $TSR=7$ ، که در سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه رخ داده است، یعنی همان سرعتی که توربین برای آن طراحی شده است، بیشینه توان بدست آمده است. مدل نظری نیز این را به خوبی مدل کرده است.

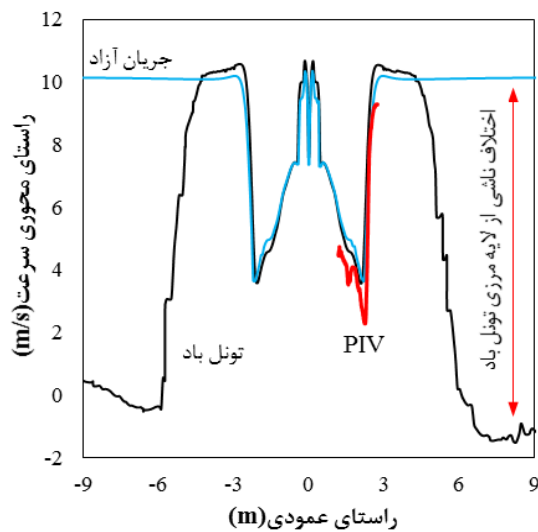
جهت مشاهده اثر تونل باد بر توربین بادی مورد نظر، نتایج این پژوهش با یک مدل جریان آزاد که در مرجع (Mahmoodi, 2012) به آن پرداخته شده است، مقایسه شد. همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد، افت فشار در مدل درون تونل باد در سطح بالاتری از فشار نسبت به مدل تحت جریان آزاد رخ داده است. اما همانطور که مشاهده می‌شود، استحصال انرژی پتانسیل در هر دو حالت با اختلاف حدود ۷٪ نسبتاً به قابل قبول تخمین زده است. هرچند بدیهی است که مدل درون تونل باد به نتایج اندازه‌گیری نزدیک‌تر است.

^۱ Tip Speed Ratio (TSR)



شکل ۱۲- افت فشار در صفحه روتور در مدل درون تونل باد در سطح بالاتری از فشار نسبت به مدل جریان آزاد رخ داده است.

پسپاد جاری شده از روتور در مدل درون تونل باد تفاوت چندانی با مدل تحت جریان آزاد در نزدیکی روتور نداشت (شکل ۱۳). در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری، مشاهده می‌شود که مدل درون تونل باد توانسته است رفتار پسپاد نزدیک روتور را مدل کند. اما همانطور که مشاهده می‌شود، تونل باد در پسپاد دوردست اثر قابل توجهی به جای گذاشته است، به طوری که لایه مرزی حتی در جهت معکوس سرعت باد نیز پیشروی داشته است.



شکل ۱۳- پایش پسپاد پشت روتور در راستای عمود بر جریان باد و مقایسه مدل درون تونل باد با مدل تحت جریان آزاد و اندازه

گیری PIV.

نتیجه گیری

محاسبه ممنتوم‌های حجمی به کمک تحلیل المان‌های پره جهت مدلسازی توربین‌های بادی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. جهت ارزیابی نتایج، مدل ریاضی مورد نظر بر یک آزمون تجربی توربین بادی اعمال شد و نتایج محاسبات با اندازه

گیری های تجربی مقایسه شدند. بار گسترده وارده بر پره های توربین، عملکرد و همچنین پسیاد جاری شده از توربین مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج با مدل های سایر مطالعات نیز مقایسه گردید. مدل تحت تونل باد شبیه سازی شد و با یک مدل جریان آزاد نیز مقایسه گردید تا اثر تونل باد نیز مشخص گردد.

نتایج نشان داد که دقت مدل در مدلسازی غالب پارامترهای آبرودینامیکی روتور قابل قبول است. در تخمین بار گسترده نتایج مقدار بیشینه ای را نشان دادند. توان تولیدی روتور، با دقت و صحت قابل ملاحظه ای توسط مدل ریاضی این پژوهش محاسبه شد. همچنین در کنار تایید نتایج شبیه سازی پسیاد با اندازه گیری های تجربی، اثر تونل باد نیز در ناحیه دوردست (پسیاد دوردست) قابل توجه بود. لایه مرزی تونل باد از گسترش پسیاد در راستای شعاعی جلوگیری کرده بود و جریان معکوسی در نزدیکی دیواره های تونل باد بوجود آورده بود.

منابع

- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., (2001). *Handbook of wind energy*. John Wiley & Sons, London.
- Duque, E.P.N., Burklund, M.D., Johnson, W., (2003). Navier-Stokes and comprehensive analysis performance predictions of the NREL phase VI experiment. *Journal of Solar Energy Engineering* 125(4), 457-468.
- Mahmoodi, E., (2012). Implementation of Blade Element Momentum and Actuator Disc Theories on Modeling of MEXICO Rotor Aerodynamic, *Department of Mechanical Engineering of Biosystems*. University of Tehran, Karaj, p. 183.
- Mahmoodi, E., Jafari, A., Schaffarczyk, A.P., Keyhani, A., Mahmoudi, J., (2014). A new correlation on the MEXICO experiment using a 3D enhanced blade element momentum technique. *International Journal of Sustainable Energy* 33(2), 448-460.
- Sanderse, B., Van Der Pijl, S.P.V., Koren, B., (2011). Review of CFD for wind-turbine wake aerodynamics. *Wind Energy* 14(7), 799–819.
- Sørensen, J.N., Shen, W.Z., (2002). Numerical modeling of wind turbine wakes. *Journal of Fluids Engineering* 124(2), 393-399.

