

شبیه‌سازی عددی یک توربین بادی با محور عمودی و مقایسه با مدل تحلیلی DMST

سید عباس سادات سکاکی^۱، حامد باروتی‌ها^۲

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، sadatsakak@gmail.com

۲- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، h.barootiha@gmail.com

چکیده

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی یک توربین بادی با محور عمودی در حالت دوبعدی، ناپایا و در سرعت‌های دورانی مختلف انجام شده است. در ابتدا یک تحلیل یک بعدی ساده برای محاسبه رابطه تقریبی توان توربین‌های بادی ارائه شده است. در ادامه روش تحلیلی DMST^۱ برای محاسبه ضریب توان توربین بادی و مقایسه نتایج آن با نتایج عددی، آمده است. توربین بادی مورد مطالعه در این تحقیق دارای ۳ ایرفویل بوده که هر سه از نوع NACA ۰۰۱۸ می‌باشند. مدل‌سازی و تولید شبکه جهت حل عددی در نرم افزار گمبیت و تمام تحلیل‌های عددی در نرم افزار فلوئنت انجام شده است. برای اعمال شرط دورانی هر پره از روش مش لغزشی در نرم افزار فلوئنت استفاده شده و همچنین با توجه به وجود جدایش وسیع جریان، برای مدل‌سازی آشفتگی از روش $RNG k - \epsilon$ بهره برده شده است. در ضمن برای تحلیل عملکرد توربین در شرایط پایا از روش دستگاه مختصات چرخان استفاده شده است. در آخر مقادیر توان و گشتاور به دست آمده در سرعت‌های دورانی مختلف با روش DMST مورد ارزیابی قرار گرفته و عملکرد توربین در سرعت‌های دورانی مختلف بررسی شده است.

واژگان کلیدی: توربین بادی عمودی، شبیه‌سازی عددی، شبکه لغزشی، روش DMST

^۱ Double Multiple Stream Tube Model

۱-مقدمه

در ده‌های اخیر، توجه بسیاری به انرژی باد صورت گرفته و همچنین پیشرفت‌های چشم‌گیری نیز زمینه تبدیل نیروی باد به انرژی الکتریکی و یا مکانیکی صورت گرفته است. انرژی باد به عنوان یک انرژی پایدار می‌تواند نقش مهمی در افزایش تولید انرژی کشورها و همچنین سیاست‌های بین‌المللی در مواجهه با تغییرات آب و هوایی بازی کند [۱]. به طور کلی روش‌های متنوعی برای استفاده از انرژی باد وجود دارد که یکی از این روش‌ها، که براساس آشنایی با علم آیرودینامیک است، توربین‌های بادی می‌باشند. توربین‌های بادی اساساً بر دو نوع می‌باشند:

- توربین بادی با محور افقی^۱
- توربین بادی با محور عمودی^۲

توربین‌های دارای محور افقی هم‌اکنون در ابعاد وسیع در مناطق بادخیز مورد استفاده قرار می‌گیرند و بسیار توسعه یافته‌اند. به طور کلی توربین‌های بادی با محور عمودی دارای مزایایی نسبت به توربین‌های بادی افقی می‌باشند. برای مثال:

- توربین‌های بادی با محور عمودی ذاتاً نیاز به وجود یک مکانیزم که سیستم را همیشه به سمت باد نگه دارد را رفع می‌کند.
- به علت پایین بودن نسبی سرعت دورانی، توربین‌های بادی با محور عمودی نوعاً تولید صدای کمتری دارند.
- هزینه تولید توربین بادی عمودی می‌تواند بسیار ارزان‌تر از نمونه افقی باشد که علت آن سادگی تولید پره‌های توربین افقی (ایرفویل ساده) نسبت به پره‌های عمودی است. [۲-۵].

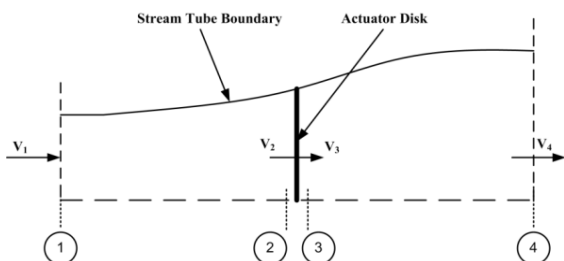
در این تحقیق یک توربین بادی با محور عمودی با روتور داریوس^۳ در سرعت‌های دورانی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در انتها نتایج عددی به دست آمده با نتایج تحلیل روش DSMT مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته و همچنین تاثیر پارامترهای مختلف بر روی میزان توان و گشتاور تولیدی بررسی شده است.

۱- توان تولید شده توسط توربین بادی

اولین مدل برای تحلیل ساده یک توربین بادی توسط بتز و همکارانش در سال ۱۹۲۶ ارائه شده است که می‌توان برای تعیین توان یک توربین بادی ایدال مورد استفاده قرار داد [۶]. این مدل ساده براساس تئوری مومنتوم خطی بنا نهاده شده است. در این مدل از یک حجم کنترل استفاده می‌شود که در چهار مقطع مختلف در نظر گرفته شده و در شکل ۱ نشان داده شده است. جریان فقط از مقطع ۱ وارد و از مقطع ۴ خارج می‌شود. توربین با یک دیسک فعال کننده^۴ که یک ناپوستگی فشاری در جریان تولید می‌کند، بیان می‌شود. فرضیات این تحلیل به قرار زیر است:

- جریان سیال همگن، تراکم‌ناپذیر و پایا می‌باشد.

- هیچ گونه نیروی پسای اصطکاکی وجود ندارد.
- تعداد پره‌ها بی‌نهایت است
- تراست یکنواخت بر روی سطح دیسک یا روتور وجود دارد.
- فشار استاتیکی بالادست و پایین دست جریان با هم برابر است و هر دوی آنها با فشار استاتیکی محیط برابرند.



شکل ۱: مدل توربین ایده‌آل ارائه شده توسط Betz در سال ۱۹۲۶

با اعمال معادله بقای مومنتوم خطی برای حجم کنترل نشان داده شده می‌توان مقدار نیروی خالص وارد شده به داخل حجم کنترل را محاسبه نمود. این نیرو مخالف نیروی تراست T است که مقدار نیروی وارده توسط باد به توربین بادی است. از معادله بقای مومنتوم خطی برای جریان یک بعدی و ناپایا، میزان نیروی تراست برابر با تغییرات مومنتوم جریان هوا می‌باشد:

$$T = V_1(\rho AV)_1 - V_4(\rho AV)_4 \quad (۱)$$

که در آن ρ چگالی هوا، A سطح مقطع، V سرعت هوا و اندیس‌ها مشخص کننده شماره سطح مقطع‌ها در شکل فوق می‌باشند. در یک جریان پایا، میزان دبی ورودی با دبی خروجی برابر است، بنابراین داریم:

$$T = \dot{m}(V_1 - V_4) \quad (۲)$$

مقدار نیروی تراست مثبت است لذا مقدار V_4 از V_1 کمتر است. هیچ‌گونه کاری روی وجه‌های مختلف و همچنین روتور توربین انجام نمی‌شود پس بنابراین می‌توان معادله برنولی را برای دو طرف دیسک فعال کننده نوشت. در بالادست دیسک داریم:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (۳)$$

در پایین دست دیسک داریم:

$$P_3 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 = P_4 + \frac{1}{2}\rho V_4^2 \quad (۴)$$

همان‌طور که گفته شد، فرض می‌شود که مقدار فشار در نقطه ۴ با ۱ برابر است و همچنین سرعت جریان در هنگام عبور از دیسک تغییر نمی‌کند ($V_3 = V_2$). در نتیجه میزان خالص تراست تولیدی به فرم زیر قابل بیان است:

$$T = A_2(P_2 - P_3) \quad (۵)$$

با استفاده از معادلات (۳) و (۴) و جایگذاری در معادله (۵) خواهیم داشت:

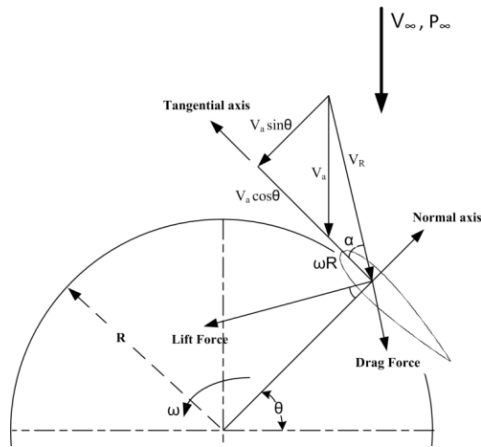
$$T = \frac{1}{2}\rho A(V_1^2 - V_4^2) \quad (۶)$$

^۱ Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

^۲ Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

^۳ Darrieus rotor

^۴ Actuator Disk



شکل ۲: دیاگرام نیروها و سرعت‌های ایرفویل

بی‌بعدسازی معادله،

$$\tan \alpha = \frac{\frac{V_a}{V_\infty} \sin \theta}{\frac{V_a}{V_\infty} \cos \theta + \frac{\omega R}{V_\infty}} \quad (17)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{(1-a) \sin \theta}{(1-a) \cos \theta + \lambda} \right) \quad (18)$$

ضرایب عمودی و مماسی را می‌توان به فرم زیر بیان نمود:

$$C_n = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (19)$$

$$C_t = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (20)$$

که در آن C_L ضریب برآ و C_D ضریب پسا در زاویه حمله α می‌باشد. مقدار نیروی تراست لحظه‌ای برای یک ایرفویل در زاویه θ برابر است با:

$$T_i = \frac{1}{2} \rho V_R^2 (hc) (C_t \cos \theta - C_n \sin \theta) \quad (21)$$

که در آن h ارتفاع ایرفویل و c طول وتر پره است. همچنین مقدار گشتاور لحظه‌ای برای یک ایرفویل در زاویه θ برابر است با:

$$Q_i = \frac{1}{2} \rho V_R^2 (hc) C_t R \quad (22)$$

۳- مدل‌های تحلیلی

تاکنون روش‌های تحلیلی زیادی برای بررسی عملکرد توربین‌های بادی با محور عمودی، توسط محققان ارائه شده است که همگی آن‌ها براساس یکی از سه اصل زیر می‌باشند:

- مدل مومنتوم
- مدل گردابه‌ای
- مدل آبشاری

در این تحقیق از مدل مومنتوم با توجه به دقیق بودن و همچنین سریعتر بودن آن استفاده شده است. اولین روش مومنتوم توسط تمپلین [۷] ارائه شده است. در این تحقیق از مدل استریکلند [۸] استفاده شده است که در این روش جریان به چندین کانال فرضی مستقل از هم تقسیم‌بندی می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. هر ایرفویل دو بار از هر کانال فرضی عبور می‌کند که یکی در

با استفاده از معادلات (۲) و (۶) و با توجه به آن که مقدار دبی برابر با $A_2 V_2$ است، خواهیم داشت:

$$V_2 = \frac{V_1 + V_4}{2} \quad (7)$$

بنابراین، سرعت باد در صفحه روتور برابر با میانگین سرعت جریان بالادست و پایین دست است. اگر یک فاکتور به نام فاکتور القایی (a) را به عنوان نسبت کاهش سرعت بین جریان آزاد و صفحه روتور تعریف کنیم، خواهیم داشت:

$$V_2 = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (8)$$

$$V_2 = V_1 (1 - a) \quad (9)$$

$$V_4 = V_1 (1 - 2a) \quad (10)$$

با استفاده از معادله (۶)، (۹) و (۱۰) تراست محوری روی دیسک برابر است با:

$$T = \frac{1}{2} \rho A V_1^2 [4a(1-a)] \quad (11)$$

ضریب تراست بی‌بعد به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A V^2} \quad (12)$$

از معادله (۱۲) مقدار ضریب تراست برای یک توربین باد ایده‌آل برابر است با $4a(1-a)$.

۲- تحلیل آیرودینامیکی توربین بادی با محور عمودی

تحلیل آیرودینامیکی یک توربین بادی، بسیار پیچیده، ذاتاً ناپایا و همچنین بسیار غیرخطی می‌باشد. در ادامه تحلیل آیرودینامیکی یک ایرفویل در موقعیت مشخص آمده است.

مطابق با شکل ۲، برای محاسبه مولفه سرعت نسبی جریان V_R از سرعت محوری و همچنین سرعت دورانی روتور استفاده می‌شود:

$$V_R = \sqrt{(V_a \sin \theta)^2 + (V_a \cos \theta + \omega R)^2} \quad (13)$$

که در آن V_a مولفه سرعت محوری در داخل روتور، ω سرعت زاویه‌ای روتور، R شعاع توربین و θ موقعیت زاویه‌ای ایرفویل می‌باشد. در ادامه سرعت نسبی را با استفاده از سرعت جریان آزاد نرمالایز می‌کنیم:

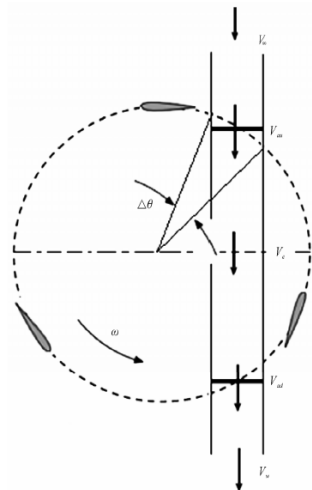
$$\frac{V_R}{V_\infty} = \sqrt{\left(\frac{V_a}{V_\infty} \sin \theta\right)^2 + \left(\frac{V_a}{V_\infty} \cos \theta + \frac{\omega R}{V_\infty}\right)^2} \quad (14)$$

با استفاده از معادله (۹) و جایگذاری V_2 با V_a و جایگذاری V_1 با V_∞ ، معادله (۱۴) به فرم زیر قابل بیان است:

$$\frac{V_R}{V_\infty} = \sqrt{\left((1-a) \sin \theta\right)^2 + \left((1-a) \cos \theta + \lambda\right)^2} \quad (15)$$

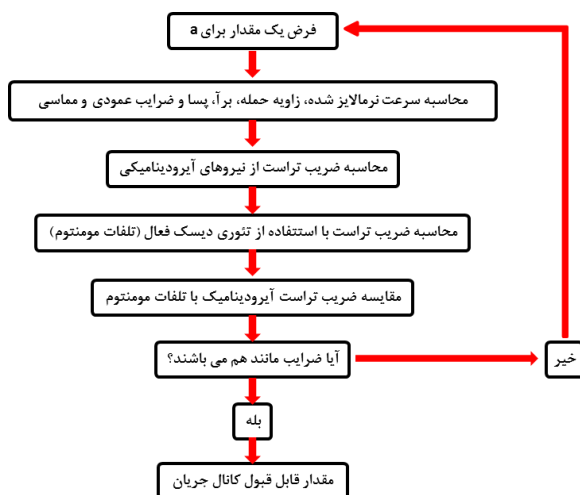
که در آن a را فاکتور القایی و λ را نسبت سرعت لبه پره توربین می‌نامند. با توجه به شکل ۲، زاویه حمله به فرم زیر بیان می‌شود:

$$\tan \alpha = \frac{V_a \sin \theta}{V_a \cos \theta + \omega R} \quad (16)$$



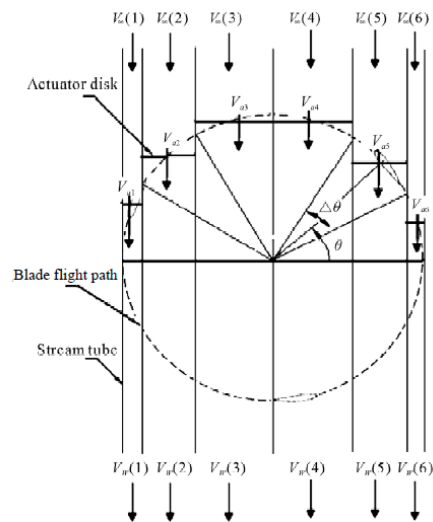
شکل ۴: نمایی از مدل کانال فرضی جریان دو گانه

فرض می شود که گردابه‌هایی که در بالادست به وجود می‌آیند تا قبل از رسیدن با پایین دست کاملاً منبسط می‌شوند و به نهایت سرعت خود می‌رسند. در نتیجه، ایرفویل‌های پایینی با یک جریان با سرعت کاهیده شده برخورد می‌کنند. این مدل دقیق‌تر از مدل‌های دیگر است و تغییرات سرعت جریان در اثر برخورد با توربین را در نظر می‌گیرد. در این روش هر توربین با یک سری دیسک فعال کننده پشت سر هم، جایگزین می‌شود. در این مدل دو معادله برای محاسبه نیروی وارد بر دیسک، حل می‌شود. یکی براساس بقای مومنتوم و دیگری بر اساس ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل و سرعت باد. این معادلات یک‌بار برای ناحیه بالادست و یک‌بار هم برای ناحیه پایین دست حل می‌شوند. حال بر طبق تئوری دیسک فعال که در معادله ۷ آمده است، سرعت القایی در بالادست برابر خواهد بود با میانگین سرعت هوا V_∞ و سرعت تعادلی در پایین دست V_e . در این تحقیق تلاش شده است برای صحت سنجی، نتایج روش DMST با نتایج عددی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد. در شکل ۵ الگوریتم روش DMST نشان داده شده است. ضریب القایی برای کانال جریان دو بار محاسبه می‌شود. از آن‌جا که معادله ۱۲ برای مقادیر α کوچکتر از ۰/۵ غیر قابل کاربرد است، بنابراین طبق رابطه تجربی [۱۰] مقدار این ضریب همواره بین ۰/۵ تا ۱ فرض می‌شود.



شکل ۵: الگوریتم تکراری مدل کانال جریان دو گانه

بالادست جریان است و دیگری در پایین دست جریان. مقدار نیروی تراست آنی برای هر پره در معادله ۲۱ آمده است



شکل ۳: بیان اصل مدل DMST با ۶ کانال جریان به اندازه $\Delta\theta$

با میانگین‌گیری زمانی بر روی نیروی تراست و برای تعداد N ایرفویل، داریم:

$$T_a = N * \text{instantaneous thrust} * \frac{\Delta\theta}{\pi} * 2 \quad (23)$$

مقدار تراست را می‌توان به فرم زیر بی‌بعد نمود:

$$C_T = \frac{T_a}{0.5\rho V^2 (hR\Delta\theta \sin\theta)} = \quad (24)$$

$$\left(\frac{NC}{2R}\right) \left(\frac{V_R}{V_\infty}\right)^2 \frac{2}{\pi} \left(C_t \frac{\cos\theta}{\sin\theta} - C_n\right)$$

گشتاور میانگین برای N ایرفویل، در یک دور کامل برابر است با:

$$Q_a = N * \sum_{i=1}^{2m} \frac{0.5\rho V_R^2 (hc) C_t * R}{2m} \quad (24)$$

که در آن m تعداد کانال‌های فرضی است و $2m$ نیز برابر با همان $\Delta\theta$ مقدار ضریب گشتاور و ضریب تراست توسط روابط زیر به محاسبه می‌شوند:

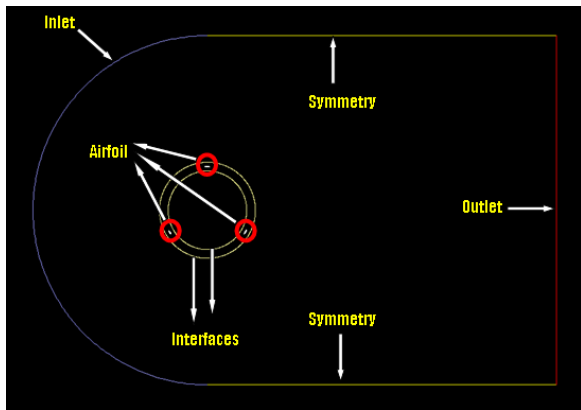
$$C_Q = \frac{Q_a}{0.5\rho V^2 (Dh) * R} = \left(\frac{NC}{D}\right) \sum_{i=1}^{2m} \frac{\left(\frac{V_R}{V_\infty}\right)^2 C_t}{2m} \quad (25)$$

$$C_p = C_Q \lambda \quad (26)$$

که در آن D قطر توربین است.

۴- مدل کانال جریان دو گانه

مدل کانال فرضی دو گانه توسط پاراچو [۹] توسعه پیدا کرده است. در این روش هر کانال به دو ناحیه بالایی و پایینی تقسیم می‌شود و این دو قسمت می‌توانند متفاوت نیز باشند که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۵: شرایط مرزی اعمال شده به مسئله

جدول ۱: شرایط جریان

نسبت سرعت لبه حمله $[\lambda]$	سرعت باد [m/s]	سرعت زاویه‌ای توربین [rad/s]
۰/۲۵	۴	۰/۵
۰/۵	۴	۱
۰/۷۵	۴	۱/۵
۱	۴	۲
۲	۴	۴
۳	۴	۶
۴	۴	۸
۵	۴	۱۰

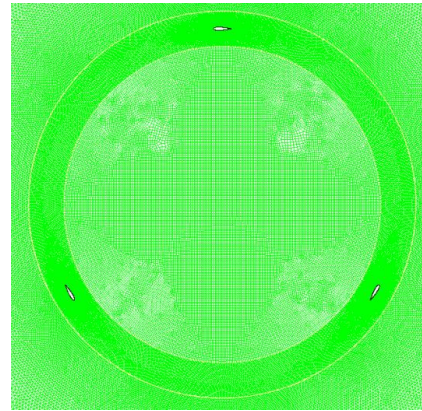
برای تحلیل از نرم افزار تجاری آنسیس فلونت^۶ استفاده شده که در آن از معادلات RANS^۷ با استفاده از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ و همچنین روش مش لغزشی برای تحلیل جریان بهره برده شده است. البته برای تحلیل آزمایش‌ها در حالت پایا از روش دستگاه مختصات متحرک^۸ استفاده شده است. همچنین برای آن که بتوان مقادیر گشتاور تولیدی در هر گام زمانی را به ست آورد، از یک UDF^۹ در نرم افزار فلونت بهره برده شده است که مقادیر گشتاور تولید شده توسط هر ایرفویل را در هر گام زمانی در یک فایل متنی، چاپ می‌کند.

۶- نتایج

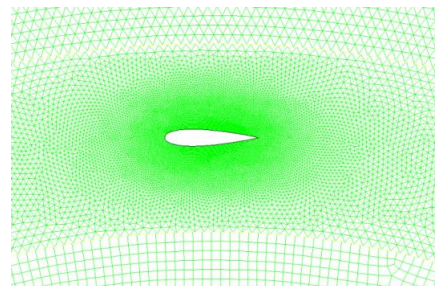
در شکل ۹ نتایج مقادیر ضریب توان به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و روش تحلیلی DMST با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقدار ضریب توان محاسبه شده در شبیه‌سازی عددی، از تقسیم توان توربین به توان جریان باد به دست آمده است. نتایج حاصل از روش DMST در شکل ۹ نشان می‌دهد که این توربین برای λ های کوچکتر از ۲/۶ توان منفی تولید می‌کند در حالی که نتایج عددی نشان می‌دهد که این توربین همواره تولید توان مثبت دارد ولی در λ های کوچک، مقدار توان بسیار ناچیز است. می‌توان نتیجه گرفته که روش DMST با توجه به فرضیات ساده‌کننده بسیاری که در

۵- شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق از ایرفویل NACA۰۰۱۸ با طول وتر ۰/۲ و همچنین شعاع برابر با ۲ متر استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از نرم افزار گمبیت^۱ هندسه و شبکه مورد نظر مطابق شکل ۳ تولید شده است. در شکل ۴ نمایی نزدیک از شبکه تولید شده در نزدیک ایرفویل نمایش داده شده است.



شکل ۶: شبکه تولید شده در ناحیه نزدیک به ایرفویل‌ها



شکل ۷: نمایی از شبکه تولید شده نزدیک ایرفویل

شرایط مرزی این مسئله مطابق شکل ۵ تعریف شده است. شرط ورودی سرعت^۲ برای ورودی جریان یکنواخت با سرعت مشخص در نظر گرفته شده است. در انتها نیز شرط مرزی فشار خروجی^۳ به کار برده شده است. برای مرزهای افقی بالا و پایین شرط مرزی تقارن^۴ تعریف شده است. همانند تمام مسائل لزج در این جا نیز شرط مرزی دیواره بدون لغزش برای ایرفویل‌ها به کار رفته است. برای اعمال روش مش لغزشی، از شرط مرزی فصل مشترک^۵ مابین ناحیه دایروی داخلی و ناحیه استوانه‌ای چرخشی و همچنین یک فصل مشترک دیگر مابین ناحیه استوانه‌ای چرخشی و میدان خارج، بهره برده شده است (مطابق شکل ۵).

جدول ۱ شرایط جریان در تمامی حالات مختلف را نشان می‌دهد.

^۶ ANSYS Fluent

^۷ Reynolds Averaged Navier Stokes

^۸ Moving Reference Frame

^۹ User Define Function (UDF)

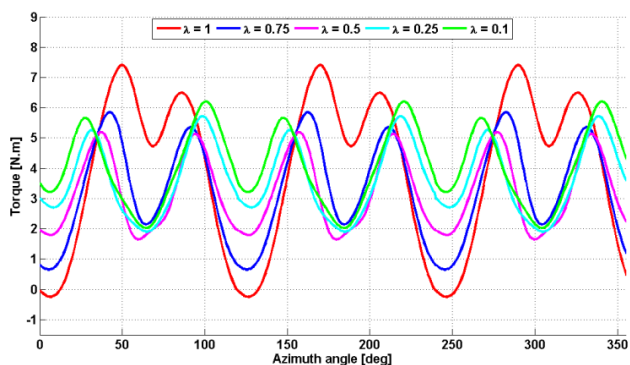
^۱ Gambit

^۲ Velocity Inlet

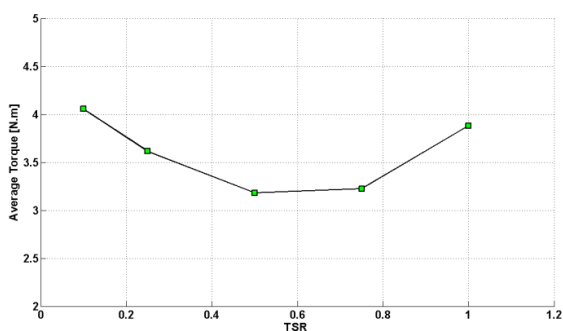
^۳ Pressure Outlet

^۴ Symmetry

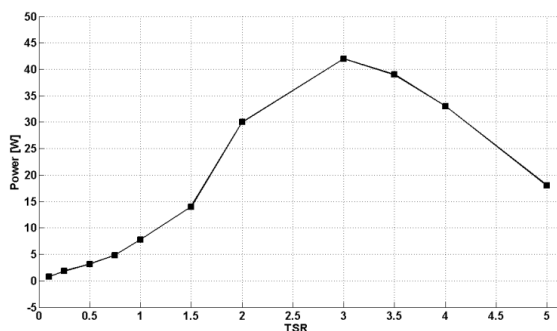
^۵ Interface



شکل ۱۱: مقدار گشتاور در زوایای مختلف و در پنج λ متفاوت



شکل ۱۲: مقدار میانگین گشتاور در λ های مختلف

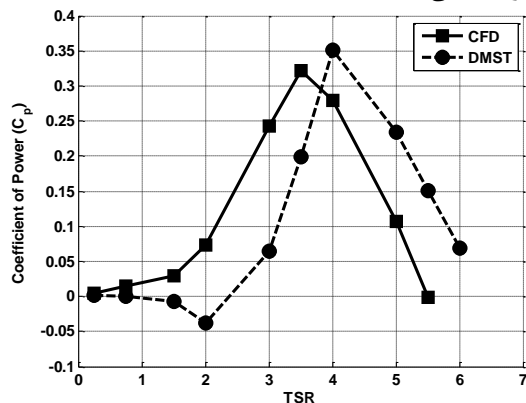


شکل ۹: مقدار توان تولیدی در λ های مختلف

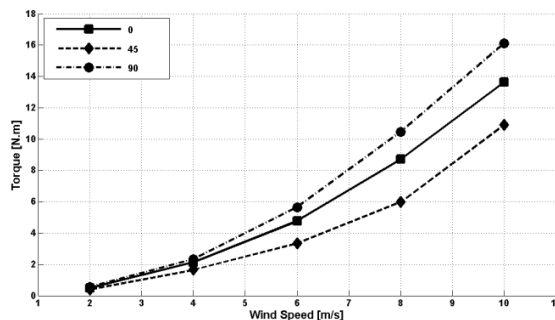
۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق یک توربین بادی با سه ایرفویل ۰۰۱۸ NACA در سرعت‌های دورانی مختلف و در حالت دوبعدی مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این تحلیل از نرم افزار فلونت و از روش مش لغزشی برای حل حالت‌های وابسته به زمان و همچنین از روش‌های دستگاه مختصات چرخان برای بررسی عملکرد پایای توربین بهره برده شده است. در ابتدا برای بررسی عملکرد توربین در حالت پایا، از تحلیل توربین در حالت عدم چرخش استفاده شده است. در ادامه قابلیت و قدرت تولید توان توسط توربین، در سرعت‌های دورانی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین روش تحلیلی DMST نیز به عنوان یک روش ساده ولی معتبر، کاملاً ارائه شده است و برای صحت سنجی نتایج عددی، مقادیر ضریب توان به دست آمده با روش DMST مورد مقایسه قرار گرفته است.

خود دارد ولی تا حدودی جواب‌های قابل قبولی در سرعت‌های بالا، ارائه می‌کند. در شکل ۱۰ مقادیر گشتاور تولیدی در $\lambda = 0$ و برای سرعت‌های باد مختلف و در سه موقعیت زاویه‌ای مختلف ایرفویل‌ها نمایش داده شده است. موقعیت ایرفویل‌ها در سه زاویه صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. به کمک این نمودار می‌توان عملکرد توربین بادی را در حالت‌های پایا درک کرد. در شکل ۸ مقادیر گشتاور تولید شده در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف نشان داده شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که مقدار گشتاور میانگین تولید شده در تمام نسبت سرعت لبه، مقدار مثبتی می‌باشد. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که مقدار گشتاور تولید شده توسط این سیستم با افزایش سرعت دوران افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نسبت سرعت لبه پایین و در بعضی موقعیت‌های زاویه‌ای شاهد تولید گشتاور منفی هستیم که به معنای عدم کارایی از این توربین بادی در محدوده سرعت‌های دورانی پایین می‌باشد. در سرعت‌های دورانی بالاتر این توربین عملکرد بهتری در تولید گشتاور از خود نشان می‌دهد. شکل ۸ مقادیر گشتاور تولیدی توسط توربین بادی در نسبت سرعت لبه پایین نشان داده شده است. برای محاسبه این مقادیر از روش دستگاه مختصات چرخان استفاده شده است تا نتایج حاصل شده معادل با نتایج میانگین‌گیری در حالت وابسته به زمان باشد. شکل ۹ مقادیر توان تولیدی را برای تمام نسبت‌های سرعت لبه نشان می‌دهد. این ضریب از ضرب گشتاور تولیدی در سرعت دورانی توربین به دست آمده است. این نمودار نشان می‌دهد که میزان توان تولیدی توسط این توربین در تمام نسبت سرعت لبه همواره مثبت بوده و همچنین در محدوده $\lambda = 3$ دارای بیشترین توان تولیدی می‌باشد.



شکل ۹: مقایسه مقادیر ضریب توان در λ های مختلف



شکل ۱۰: گشتاور تولیدی به ازای سرعت باد در سه موقعیت مختلف

wind energy association conference. eptember ۱۹۸۹.

- [۵] Berg DE, Klimas PC, Stephenson WA. *Aerodynamic design and initial performance measurements for the Sandia ۳۴-m vertical axis wind turbine*. Ninth ASME wind energy symposium. January ۱۹۹۰. SED-VOL ۹, ASME.
- [۶] J. F. Manwell, J. G. McGowan and A. L. Rogers, "Wind Energy Explained: Theory Design and Application," John Wiley & Sons, Hoboken, ۲۰۰۲.
- [۷] R. Templin, "Aerodynamic Performance Theory for the NRC Vertical-Axis Wind Turbine," National Aeronautical Establishment Laboratory Technical Report LTR- LA-۱۶۰, Canada, ۱۹۷۴.
- [۸] J. Strickland, "The Darrieus Turbine: A Performance Prediction Model Using Multiple Stream Tubes," Technical Report SAND۷۵-۰۴۱, Sandia National Laboratories, Albuquerque, ۱۹۷۵.
- [۹] I. Paraschivoiu, "Aerodynamic Loads and Performance of the Darrieus Rotor," *Journal of Energy*, Vol. ۶, No. ۶, ۱۹۸۱.
- [۱۰] B. Hurley, "A Novel Vertical Axis Sail Rotor," *Proceedings of ۱st Wind Energy Workshop*, London, ۱۹-۲۰ April ۱۹۷۹, pp. ۴۰-۴۷.

این توربین در تمام نسبت سرعت لبه (حتی مقادیر کمتر از ۱) همواره تولید گشتاور میانگین مثبت می‌نماید اما بازده چندان مناسبی در سرعت‌های پایین از خود نشان نمی‌دهد ولی در نسبت سرعت لبه بالاتر از ۱ به خوبی توانایی تولید توان کافی را دارا می‌باشد. طبق تحلیل‌های مختلف انجام شده در سرعت‌های مختلف چرخشی، این توربین در محدوده نسبت سرعت لبه برابر با ۳ بیشترین بازده را از خود به نمایش می‌گذارد و در نسبت سرعت لبه بالاتر و پایین‌تر از ۳ همواره تولید توان کمتری دارد.

۸- مراجع

- [۱] UK energy in brief, DTI Publication. URN۰۶/۲۲۰. [Accessed online ۰۲,۰۳,۰۷], <http://www.dti.gov.uk>; July ۲۰۰۶.
- [۲] The history of the DoE program. U.S. Department of Energy, Sandia National Laboratories, American Wind Energy Association.
- [۳] Dodd HM. *Performance predictions for an intermediate-sized VAWT based on performance of the ۳۴-m VAWT test bed*. Ninth ASME wind energy symposium. January ۱۹۹۰.
- [۴] *Dodd HH, Ashwell TD, Berg DE, Ralph ME, Stephenson WA, Veers PS. Test results and status of the DOE/Sandia ۳۴-M VAWT test bed, Canadian*