

## تحلیل توربین بادی ساونیوس پیشرفته توسط نرم افزار FLUENT و مقایسه آن با نتایج حاصل از آزمایش در تونل باد

حسین خسروی، دانشجوی دکتری مهندسی سیستم های انرژی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال؛ khosravi1986@gmail.com  
 میترا امانی، استادیار گروه مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال؛ mitra\_amani@yahoo.com  
 فرزوان ارکیان، استادیار گروه مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال؛ f.arkian@gmail.com  
 امیر حسین اشراقی، دانشجوی دکتری مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال؛ eshraghi.ah@gmail.com

مدل شده در محیط نرم افزار GAMBIT مش بندی و سپس در نرم افزار FLUENT تحلیل شده است، در انتها یک نمونه آزمایشگاهی از پره مدل شده ساخته و در تونل باد تست شده است و نتایج حاصل از تست با نتایج شبیه سازی مقایسه شده است.

### استفاده عملی از نیروی باد

#### توان باد

انرژی جنبشی باد (انرژی موجود در جرم هوای دارای سرعت)، متناسب با مربع سرعت آن است. در اثر برخورد باد با یک سطح، انرژی جنبشی آن تبدیل به فشار (نیرو) روی آن سطح می شود. نیروی باد متناسب با مربع سرعت آن و توان، معادل حاصل ضرب نیرو در سرعت است بنابراین قدرت باد متناسب با مکعب سرعت آن خواهد بود. به این ترتیب با دوبرابر شدن سرعت باد، توان آن هشت برابر و با سه برابر شدن سرعت آن، توان بیست و هفت برابر خواهد شد [۲].

### فرمول های پایه: قدرت نظری توربین بادی

انرژی جنبشی باد با فرمول زیر بیان می شود:

$$K.E = 1/2mv^2 \quad (1)$$

K.E : انرژی جنبشی (kg.m/s)

m : جرم هوای در حرکت (kg)

v : سرعت جرم هوا (m/s)

P : قدرت نظری توربین، از برخورد جرم هوا به توربین در واحد زمان به دست می آید.

$$P = KE / \text{واحد زمان} \quad (2)$$

$$m = \rho.A.v \quad (3)$$

$\rho$  = دانسیته هوا (kg/cm<sup>3</sup>)

A = سطح جاروب شده به وسیله پره های توربین (m<sup>2</sup>)

در شرایط متعارفی درجه حرارت و فشار، دانسیته هوا تقریباً ۱/۲۱ kg/m<sup>3</sup> است. از ترکیب فرمول های (۱)، (۲) و (۳)، فرمول نظری قدرت توربین بادی به دست می آید.

$$P = 1/2.\rho.A.v^3 \quad (4)$$

$$p = 0.605A.v^3$$

بازده پره های توربین بادی به صورت نسبت انرژی جنبشی جذب شده باد توسط پره ها به انرژی جنبشی کل باد عبوری از مقابل پره ها تعریف می شود. البته پره های توربین فقط بخشی از انرژی جنبشی باد را جذب می کنند زیرا در غیر این صورت، سرعت باد پس از برخورد به پره ها صفر شده

### چکیده

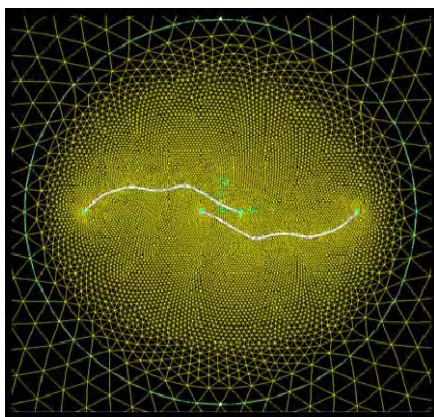
یکی از بزرگترین چالش ها در زمینه ساخت توربین های بادی، پتانسیل سنجی و شبیه سازی عددی و تحلیلی قبل از ساخت این توربین ها در ابعاد بزرگ و عملیاتی توسط نرم افزار های شبیه ساز نظیر FLUENT است. نیاز به صرف وقت و هزینه بسیار برای ساخت توربین های بادی در مقیاس واقعی، لزوم و ضرورت شبیه سازی درست و تحلیل دقیق نتایج آن را آشکار می سازد. مقایسه نتایج شبیه سازی انجام شده توسط نرم افزار با نتایج حاصل از تست در تونل باد می تواند موجب اعتبار بیشتر تحلیل های کامپیوتری شود. همچنین نتایج حاصل از این شبیه سازی می تواند موجب پیشرفت استفاده از نرم افزار های شبیه ساز و تحلیلی قبل از ساخت توربین در مقیاس واقعی و بزرگ باشد. در این تحقیق ابتدا یک توربین بادی از نوع روتور ساونیوس پیشرفته در محیط نرم افزار GAMBIT و FLUENT شبیه سازی شده و کانتورهای فشار و بازدهی این توربین محاسبه شده است. سپس این توربین در مقیاس کوچک و آزمایشگاهی ساخته شده و در تونل باد تست شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی و تست در تونل باد با هم مقایسه شده و مشخص شده است که نتایج حاصل از شبیه سازی و تست در تونل باد با تقریب خوبی با یکدیگر همخوانی دارند.

کلمات کلیدی: تونل باد، گشتاور، ساونیوس، توربین بادی، انرژی بادی.

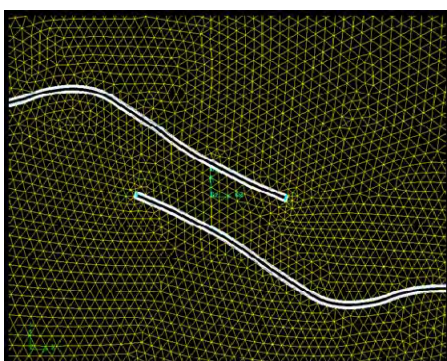
### مقدمه

در حال حاضر انرژی نقش تعیین کننده ای در اقتصاد و سیاست جهانی ایفا می کند. همان طور که انرژی های فسیلی در قرن بیستم موجب تحولات عظیم صنعتی شده است، برای قرنهای آینده نیز انرژی از محورهای اصلی توسعه فناوری خواهد بود. نیاز روزافزون به انرژی از یک سو و محدودیت منابع انرژی های فسیلی از سویی دیگر تاثیر متقابلی بر بخش انرژی گذاشته و این امر نقش و اهمیت انرژی های نو و تجدیدپذیر را در جهان در بالاترین درجه اهمیت قرار داده است. بر اساس محاسبات موسسات معتبر بین المللی، مصرف نفت جهان در سال ۱۹۹۳ میلادی، ۶۷ میلیون بشکه در روز بوده است [۱]. بر این مبنای ذخایر کشف شده نفت در دنیا برای حدود ۴۰ سال دیگر قابل استفاده خواهد بود. با توجه به رشد روز افزون مصرف انرژی، پایان پذیر بودن منابع انرژی فسیلی و موانع زیست محیطی آنها و همچنین اهمیت دستیابی به فن آوری های نوین استفاده از انرژی های نو، به خصوص انرژی بادی، نیاز به فراهم آوردن روش های علمی و عملی در این زمینه، بسیار پر اهمیت جلوه می کند. در این تحقیق سعی شده است گامی در راستای توسعه توانایی های علمی و تحقیقاتی در حوزه انرژی های نو، برداشته شود. در این راستا بعد از بررسی نحوه محاسبه توان باد، پره توربین

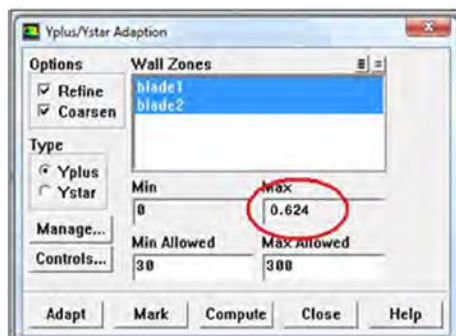
شده و اندازه مش ها برای مدل یکسان در نظر گرفته شده است. شبیه سازی در وضعیت Enhanced Wall Function مورد استفاده قرار گرفته است. متغیر  $y^+$  به عنوان نشان دهنده اندازه گره ها باید مقداری کمتر از یک داشته باشد [۶]. متغیر  $y^+$  در مدل شبیه سازی شده حدود ۰/۶ بوده و از این لحاظ از دقت بسیار بالایی برخوردار است. در شکل (۱و۲) مدل مش بندی شده پره توربین مورد نظر و در شکل (۳) مقدار  $y^+$  متناظر آن نمایش داده شده است.



شکل ۱- مدل شبکه بندی شده حجم کنترل برای پره توربین مدل شده [۷]



شکل ۲- نحوه مش بندی در اطراف پره توربین مدل شده [۷]



شکل ۳- محاسبه  $y^+$  در نرم افزار FLUENT [۷]

و متوقف می‌شود. بر مبنای اصول نظری، حداکثر میزان تبدیل قدرت باد به انرژی مکانیکی در یک توربین حدود ۱۶/۲۷ و تقریباً معادل ۵۹/۳ درصد انرژی جنبشی باد است [۳] که آن را ضریب توان ماکزیمم نیز می نامند.

### محاسبه توان و بازدهی

راندمان توربین های بادی بر اساس قدرت آنها در استحصال انرژی جنبشی موجود در باد تعیین می‌شود. پره های توربین بادی انرژی جنبشی باد را به انرژی مکانیکی تبدیل کرده و سپس با استفاده از ژنراتور این انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. راندمان این تبدیل به چگونگی طراحی پره ها و روتور و نحوه مواجهه آنها با جریان باد بستگی دارد. بهترین شیوه محاسبه این بازدهی، اندازه گیری توان خروجی دستگاه و مقایسه آن با توان ایده آل موجود در باد است. در نرم افزار FLUENT نیروی وارد بر توربین و گشتاور تولیدی توسط آن قابل محاسبه است. توان تولیدی توسط توربین بادی پس از پایان تحلیل و در فرآیند آنالیز نتایج محاسبه می شود (Post-Processing). دو کمیت گشتاور (T) و ضریب گشتاور ( $C_m$ ) نیز با تعیین مقادیر مرجع مناسب در نرم افزار قابل اندازه گیری است. با استفاده از روابط زیر می توان از این کمیت ها برای محاسبه ضریب توان (بازده) توربین بادی محور قائم استفاده نمود [۴]:

$$T = 1/2 C_m \cdot \rho \cdot R A v^2 \quad (5)$$

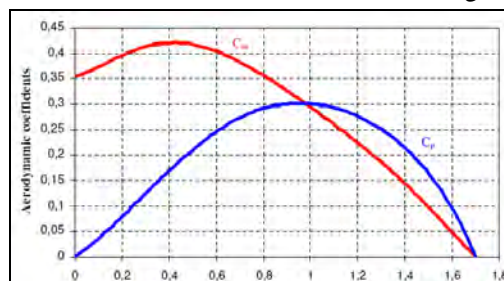
$$P = 1/2 C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (6)$$

$$\lambda = R\omega/v \quad (7)$$

در روابط فوق  $R$  شعاع توربین و  $C_p$  و  $C_m$  به ترتیب ضریب توان مکانیکی و ضریب گشتاور مکانیکی هستند که معمولاً به صورت تابعی از  $\lambda$  ارائه می-شوند. بر اساس قوانین الکتربسته، توان حاصلضرب گشتاور در سرعت دورانی محور است ( $P=T \cdot \omega$ ) بنابراین مقدار ضریب توان توربین بادی محور قائم بر اساس رابطه (۸) تعیین می‌شود:

$$C_p = \lambda \cdot C_m \quad (8)$$

در نمودار(۱)، نموداری از  $C_p$  و  $C_m$  در توربین بادی ساوننیوس پیشرفته (Benesh) شبیه سازی شده توسط منت (Menet) بر حسب  $\lambda$  به عنوان نمونه نمایش داده شده است [۴].



نمودار ۱- نمودار ضریب توان و ضریب گشتاور بر حسب  $\lambda$  در توربین ساوننیوس [۴].

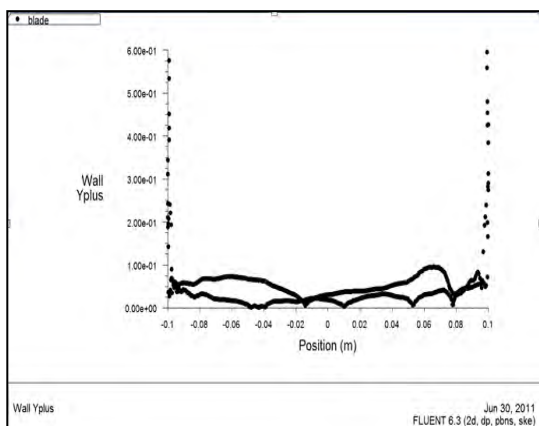
### شبکه بندی و تحلیل توسط نرم افزار GAMBIT و FLUENT:

نحوه شبکه بندی و کیفیت مش تولیدی در همگرایی نتایج و تحلیل ها بسیار تاثیر گذار است. در این پژوهش با توجه به مشخصات فیزیکی پره مدل شده، تعداد گره ها حدود ۷۵۰۰۰ گره بوده و شکل گره ها از نوع مثلثی است. با این وجود به منظور استقلال نتایج از مش بندی، نوع مش ایجاد

دینامیکی هوا و معادل  $10^{-5} \times 1/7894$  می باشند. از الگوریتم SIMPLE برای کوپلینگ سرعت و فشار، کمک به حفظ بقاء جرم و دستیابی به میدان فشار صحیح استفاده شده است. به منظور افزایش دقت پاسخ و نزدیکی شرایط شبیه سازی به شرایط واقعی از پارامترهای Second order implicit و Second order upwind برای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ پراکندگی استفاده شده است. خصوصیات شبیه سازی و تنظیمات تعیین شده در نرم افزار به منظور تحلیل عملکرد توربین های بادی به صورت خلاصه عبارت است از:

- استفاده از روش Finite volume method با استفاده از شیوه حل جدا شده (Segregat solver).
- مدل k-ε استاندارد.
- استفاده از گزینه Enhanced wall function جهت تحلیل رفتار جریان در نزدیکی دیواره ها.
- چگالی هوا ثابت و معادل  $1/225 \text{ kg/m}^3$
- لزجت هوا ثابت و معادل  $10^{-5} \times 1/7894 \text{ kg/m.s}$
- شدت توربولانس جریان پشت توربین معادل ۱۲٪
- استفاده از شرط مرزی سرعت ورودی برابر ورودی حجم کنترل تنظیم زبری دیواره ها معادل صفر
- استفاده از الگوریتم SIMPLE برای کوپلینگ سرعت و فشار
- نمایش Second order implicit و Second order upwind جهت انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ پراکندگی.

بدیهی است که، شکل هندسی پره توربین، تاثیر بسیاری در عملکرد و بازده خروجی توربین دارد. بر این اساس به منظور تعیین خصوصیات آیرودینامیکی مدل پیشنهادی، مدل هندسی پره توسط نرم افزار شبیه سازی شده است. شبیه سازی انجام شده بر روی مدل پره به ابعاد  $20 \times 36$  سانتی متر و به صورت دو بعدی بوده است. در این شبیه سازی از مدل آشفتگی (k-ε) استاندارد استفاده شده است. شبیه سازی جریان در نزدیکی دیواره به روش Enhanced Wall Function (یکی از با دقت ترین روش ها) انجام شده است. عدم افزایش  $Y^+$  از مقدار  $1/6$  نشان دهنده دقت بالای روش مورد استفاده است. برای تحلیل مدل از روش تحلیل مرتبه ۴، QUICK، استفاده شده است، که همگرایی نتایج این روش بسیار سریع تر از روش های دیگر است.



نمودار ۲- نمودار مقدار تغییرات  $Y^+$  نسبت به مکان

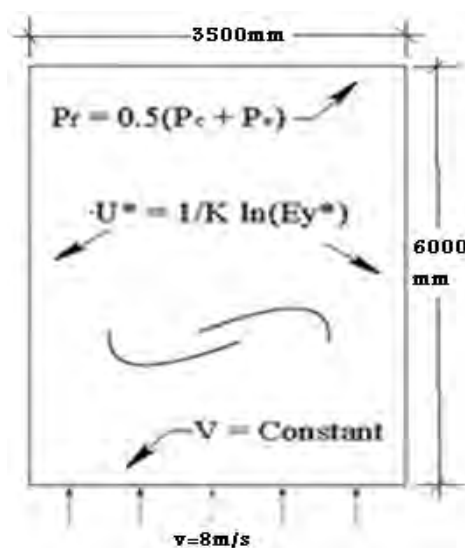
پس از اتمام آماده سازی شرایط، تحلیل توسط نرم افزار آغاز شده و به ترتیب نمودار توزیع فشار و سرعت سیال (شکل شماره ۵) و نمودار ضریب

در این پژوهش از تحلیل دینامیکی به روش چند منبع چرخش (MRF) استفاده شده است. در این روش حجم کنترل به دو قسمت تقسیم می شود. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است دامنه ای دایره ای در اطراف توربین رسم شده که این محیط فصل مشترک دو زیر مجموعه ساکن و در حال چرخش به حساب می آید. در نرم افزار Fluent تحلیل با در نظر گرفتن یک حجم کنترل در اطراف توربین بادی و تعیین پارامتر های تاثیر گذار مانند شرایط مرزی انجام می شود. مقدار سرعت در ورودی حجم کنترل ثابت و برابر با سرعت باد در جریان آزاد در نظر گرفته می شود. برای محاسبه دبی جرمی در حجم کنترل شکل (۱) از رابطه (۹) استفاده میشود [۱]:

$$m = \int p v . dA \quad (9)$$

در این رابطه m دبی جرمی و چگالی هوا معادل  $1/225 \text{ kg/m}^3$  است. در خروجی حجم کنترل، فشار خروجی به عنوان کمیت تعیین کننده در نظر گرفته می شود. این مقدار فشار در صفحه خروجی ( $P_f$ ) به کمک رابطه (۱۰) محاسبه شده و سایر شرایط از طریق محاسبات انجام شده به وسیله مدل k-ε درون حجم کنترل مشخص می شود [۵].

$$P_f = 0.5(P_c + P_e) \quad (10)$$



شکل ۴-نمایی از حجم کنترل و شرایط مرزی اعمال شده در آن [۷]

در شکل فوق،  $p_c$  فشار داخل گره در نزدیکی صفحه خروجی و  $p_e$  فشار خروجی حجم کنترل و معادل فشار اتمسفر ( $101325$  پاسکال) است. به منظور در نظر گرفتن تاثیرات دیواره ها بر روی جریان از گزینه Standard wall function برای دیواره های حجم کنترل، پره ها و دیواره های توربین استفاده شده است. این تابع توسط  $U^*$  نمایش داده شده و از رابطه (۱۱) محاسبه می شود [۵]:

$$U^* = 1/k[\ln(Ey^*)] \quad (11)$$

$$y^* = [\rho . C_\mu^{0.25} . k_p^{0.5} . y_p] / \mu$$

در روابط فوق، E مقداری ثابت و تجربی و معادل  $9/793$ ، K به نام ثابت ون کارمن و معادل  $0.4187$ ،  $y^*$  واحد دیواره (Wall unit) در هر گره،  $k_p$  انرژی جنبشی آشفتگی در نقطه P،  $y_p$  فاصله نقطه P از دیواره و  $\mu$  لزجت

توان بر حسب سرعت نوک پره (نمودار شماره ۳) برای توربین ساونوس پیشرفته مدل شده رسم می شود.

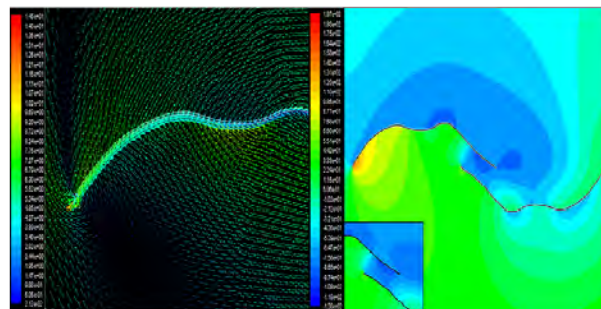


شکل ۶- نمایی از پره های روتور ساونوس مدل شده [۷]

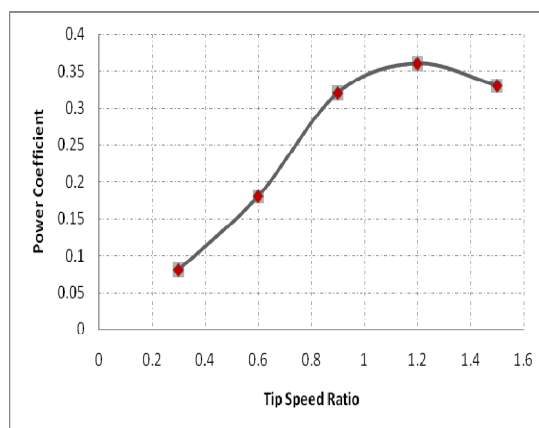
ضریب توان پره ها با اندازه گیری مستقیم سرعت زاویه ای روتور حول محور خود و گشتاور خروجی (به وسیله یک گشتاور سنج دینامیکی که در دورهای مختلف، گشتاور خروجی شفت را اندازه می گیرد) محاسبه شده است. آزمایش در سرعت باد ۸ متر بر ثانیه انجام شده است. در این آزمایش پره ساخته شده داخل محفظه تونل باد با دهانه تست ۱۰۰\*۱۰۰ سانتی متر، مطابق شکل (۷)، قرار داده شده، دستگاه روشن و در سرعت باد ۸ متر بر ثانیه تنظیم می شود. در دورهای مختلف، گشتاورهای تولیدی خاص هر دور اندازه گیری شده و با استفاده از اطلاعات بدست آمده، نمودار تغییرات ضریب توان (Cp) (نمودار (۴)) و ضریب گشتاور (Cm) (نمودار (۵)) نسبت به ضریب سرعت نوک پره (Tip speed ratio) رسم می شود.



شکل ۷- نمایی از پره های روتور ساونوس مدل شده داخل تونل باد [۷]



شکل ۵- نمودار توزیع فشار و سرعت سیال در تحلیل توربین مدل شده [۷]



نمودار ۳- نمودار Cp بر حسب  $\lambda$  توربین مدل شده [۷]

همانطور که در نمودار دیده می شود، بیشترین بازده این توربین معادل ۰/۳۶ در ضریب سرعت نوک پره ۱/۲ بدست آمده است.

**معرفی نمونه ساخته شده و آزمایش پره ساخته شده در تونل باد**  
 آزمایش روتور ساونوس پیشرفته به دو صورت آزمایش در تونل باد و شبیه سازی در محیط نرم افزار FLUENT انجام و نتایج حاصله با هم مقایسه شده اند. منحنی هر پره قطری معادل ۲۰ سانتی متر و فاصله تداخل ۵ سانتی متر دارد. این فاصله تداخل موجب تغییر مقدار نیروی پسای وارد بر پشت و جلوی پره در زوایای مختلف نسبت به جریان باد می شود. ارتفاع مدل ساخته شده حدود ۳۶ سانتی متر و ضخامت پره ها حدود ۱ الی ۲ میلی متر و از جنس فیبر شیشه می باشد. نمایی از پره توربین ساخته شده در شکل (۶) نشان داده شده است.

همانطور که در نمودار های (۳) و (۴) اشاره شد، مقادیر ضریب توان روتور در دو روش مختلف تست در تونل باد و تحلیل توسط نرم افزار بر حسب سرعت نوک پره مسیر مشابهی را طی کرده و تنها به دلایل مذکور از نظر عددی اختلاف جزئی بین آنها مشاهده می شود. بنابراین نتایج حاصله در شبیه سازی کامپیوتری، به خوبی با نتایج حاصله از تست در تونل باد همخوانی دارد.

به منظور انجام پژوهش های تکمیلی در این زمینه، موارد ذیل می توانند در خصوص تکمیل بحث در خصوص توربین های بادی محور قائم از نوع روتور ساوونیوس مدنظر قرار گیرند.

۱- با توجه به پایین بودن راندمان این توربین ها به نظر می رسد

هیبرید کردن این توربین ها با سایر مولدهای انرژی نظیر

توربین های H-Rotor و یا سیستم های فتوولتائیک می تواند

مفید واقع شود.

۲- با توجه به قرار گیری پره موافق و پره مخالف توربین در راستای

مسیر جریان باد در هنگام تست و امکان ایجاد نیروی ترمزی در

مجموعه توربین، طراحی دیواره های به منظور جلوگیری از

برخورد جریان باد با پره مخالف و تمرکز جریان ورودی به

توربین بر روی پره موافق می تواند قابل مورد بررسی قرار گیرد.

۳- بررسی تحلیل سه بعدی به جای تحلیل دوبعدی انجام شده در

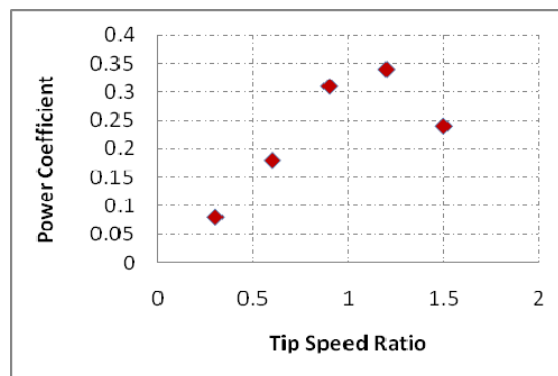
این تحقیق.

۴- بررسی نتایج شبیه سازی در صورت استفاده از روش هایی به جز

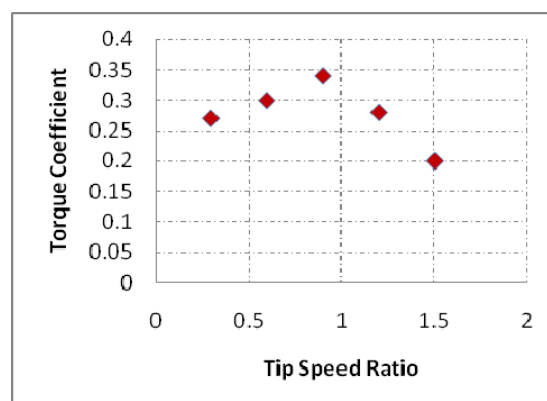
CFD.

## منابع و مراجع

- [1] Savonius, S. J., "The S-Rotor and its Applications", Mechanical Engineering, Vol. 53, 1931.
- [2] Benesh, A.H., Wind Turbine system Using a Vertical Axis Savonius Type Rotor, US. Pat. No. 4, 838, 757.
- [3] Betz, A., "Das Maximum der theoretisch moglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren", Zeitschrift fur das gesamte Turbinenwesen, Heft 26, Sept.26, 1920.
- [4] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L., "Wind Energy Explained; Theory, Design and Application", John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [5] Saha, U.K and Rajkumar M.Jaya. "On the Performance Analysis of Savonius Rotor with Twisted B.
- [6] پیام صبائی فرد. بهینه سازی توربین بادی پرشین نوین. کارشناس ارشد مهندسی انرژی های نو و تجدید پذیر، پژوهشگاه مواد و انرژی کرج، ۱۳۸۹؛ ۳۸-۳۵.
- [7] حسین خسروی، تاثیر شکل آیرودینامیکی، وضعیت قرار گیری و تعداد پره های روتور ساوونیوس روی بازدهی و گشتاور توربین بادی ساوونیوس پیشرفته، کارشناس ارشد مهندسی انرژی های نو و تجدید پذیر، پژوهشگاه مواد و انرژی کرج، ۱۳۹۰؛ ۷۳-۲۶.



نمودار (۴)- نمودار تغییرات ضریب توان نسبت به سرعت نوک پره، توربین مدل شده [۷]



نمودار (۵)- نمودار تغییرات ضریب گشتاور نسبت به سرعت نوک پره، توربین مدل شده [۷]

## نتایج و جمع بندی

بیشینه بازده توربین بادی در دو روش شبیه سازی کامپیوتری و آزمایش در تونل باد در جدول (۱) مقایسه شده است.

جدول ۱- مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایش پره توربین بادی مدل شده [۷]

V = 8 m/s			
نوع توربین	بازده بیشینه شبیه سازی	بازده بیشینه تست در تونل باد	درصد خطا (%)
ساوونیوس پیشرفته با فاصله هم پوشانی ۵٪	۰/۳۶	۰/۳۳	۸/۳٪

همانطور که ملاحظه می شود میزان خطای شبیه سازی در این پژوهش نسبت به آزمایش در تونل باد حدود ۸/۳ می باشد که تقریباً عددی قابل قبول است. اما به طور کلی دلایل اصلی اختلاف بین نتایج آزمایش و شبیه سازی را می توان در نکات زیر جستجو کرد:

- دو بعدی بودن تحلیل CFD
- چشم پوشی از دیسک های دو سر پره در شبیه سازی کامپیوتری
- چشم پوشی از محور مرکزی در شبیه سازی کامپیوتری
- خطای ساخت پره و تفاوت های جزئی ایجاد شده در فرآیند ساخت نسبت به مدل کامپیوتری
- تلفات اصطکاکی موجود در حین کار توربین
- خطای احتمالی در اندازه گیری