



بررسی تأثیر سرعت جریان آزاد باد بر عملکرد توربین باد محور عمودی مقیاس کوچک

فرید سپهریان آذر^{۱*}، رحیم حسن‌زاده^۱، ایرج میرزایی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۱
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰

کلمات کلیدی:

توربین باد
سرعت جریان باد
دنباله
ضریب مومنوم
ضریب توان

خلاصه: در تحقیق حاضر، تأثیر عوامل مختلف در شبیه‌سازی جریان اطراف یک توربین باد محور عمودی نوع H با پره‌هایی از مقطع ایرفویل NACA0018 مورد مطالعه قرار گرفته است. تمامی محاسبات با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و روش حجم محدود انجام شده‌اند. سرعت‌های جریان باد ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه و نسبت سرعت نوک‌های ۳ و ۵ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. استقلال نتایج عددی از شبکه بندی، گام زمانی، قطر ناحیه‌ی چرخشی و ابعاد دامنه محاسباتی مطالعه شده است. تمامی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و تطابق خوبی را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش سرعت جریان آزاد باد، ماکزیمم مقدار ضریب مومنوم در زوایای بزرگ‌تری اتفاق می‌افتد. همچنین با کاهش نسبت سرعت نوک، به دلیل نفوذ حجم هوای بیشتر به درون روتور، میزان نوسانات افزایش یافته و در نتیجه عمر مفید اجزای روتور و راندمان توربین باد کاهش می‌یابد. همچنین، تأثیر نسبت سرعت نوک در راندمان توربین باد چشمگیرتر از تأثیر سرعت جریان آزاد باد می‌باشد به طوری که با افزایش نسبت سرعت نوک از ۳ به ۵ در سرعت جریان باد ثابت ۱۰ متر بر ثانیه، ضریب توان ۸۱/۸۷٪ و با افزایش سرعت جریان آزاد باد از ۵ به ۱۰ متر بر ثانیه در نسبت سرعت نوک ثابت ۳، ضریب توان ۵۸/۲٪ افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

پذیر مانند انرژی خورشید، انرژی باد، انرژی امواج دریا، زمین گرمایی و... استفاده کنیم. از میان این منابع انرژی تجدید پذیر، انرژی باد یکی از در دسترس‌ترین منابع برای تأمین انرژی مورد نیاز است. انرژی باد در اکثر نقاط کره‌ی زمین، در مناطق خشکی و دریایی، در شب و روز و در اکثر شرایط آب و هوایی به طوری که میزان سرعت باد در محدوده‌ی مناسب برای توربین باد مورد نظر قرار داشته باشد، قابل بهره‌برداری است. برای بهره‌برداری از انرژی باد، توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. توربین‌های باد معمولاً در دو نوع محور افقی و محور عمودی ساخته می‌شوند. توربین‌های محور افقی دارای راندمان بیشتر ولی هزینه‌ی نصب و تعمیر و نگهداری بیشتری هستند. همچنین، توربین‌های محور افقی نیاز به فضای بیشتر و

با افزایش جمعیت کره‌ی زمین، استفاده از منابع انرژی برای تأمین انرژی مورد نیاز، افزایش می‌یابد. از میان منابع انرژی، سوخت‌های فسیلی به دلیل منافع مالی و همچنین سازگار بودن دستگاه‌ها و ماشین‌آلات با این نوع سوخت‌ها، در اکثر کشورهای جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع تأمین انرژی معایب زیادی دارد از جمله، افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش میزان آلاینده‌ها، گرم شدن کره‌ی زمین، خشک شدن منابع آب، باران‌های اسیدی، ذوب شدن یخ‌های قطبی و... . برای جلوگیری از معایب ذکر شده، باید از منابع انرژی تجدید

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sep.farid@yahoo.com



به اندازه‌ی ۵۶/۵۵٪ کاهش می‌یابد. لی و همکاران^۸ [۱۳] نشان دادند که با اتصال انحرافی پره‌ها به شفت، عملکرد توربین باد افزایش می‌یابد. میزان انحراف، بستگی به نوع ایرفویل دارد.

مشخصات جریان‌های گردابه‌ای و جریان‌های آشفته و سایر پارامترهای فیزیکی جریان توسط نویسندگان مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. لی و همکاران [۱۴] با بررسی تأثیر اضافه‌شدن مواد خارجی مانند برف و یخ بر روی پره‌های توربین باد، نشان داد که با افزایش میزان مواد خارجی، عملکرد توربین باد کاهش می‌یابد. بارگاو و همکاران^۹ [۱۵] تأثیر نوسانات سرعت جریان باد را بر عملکرد یک نوع توربین باد محور عمودی با ۳ پره‌ی NACA0015 را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که سرعت جریان باد با دامنه‌ی نوسانات ۵۰٪ منجر به ماکزیمم عملکرد توربین باد می‌شود. دانو و همکاران^{۱۰} [۱۶] با بررسی نوسانات سرعت جریان باد نشان دادند که در نسبت سرعت نوک‌های پایین، با افزایش نوسانات، راندمان توربین باد کاهش می‌یابد و در نسبت سرعت نوک‌های بالا، نوسانات سرعت باد تأثیر چندانی بر عملکرد توربین باد ندارد. بوساس و دانو^{۱۱} [۱۷] تأثیر نوسانات جریان باد را بر عملکرد توربین باد محور عمودی با پره‌های خمیده بررسی کردند و با مقایسه‌ی عملکرد آن با پره‌های متقارن، نشان دادند که با افزایش نوسانات جریان باد، عملکرد توربین باد با پره‌های خمیده کاهش می‌یابد. تسیونی و همکاران^{۱۲} [۱۸] مشخصه‌های جریان آشفته توربین باد در ناحیه پشت توربین را با استفاده از روش سرعت سنجی تصویری ذرات^{۱۳} در یک تونل باد جت باز بررسی کردند. آن‌ها دنباله‌ی جریان را در صفحات افقی و عمودی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در فواصل بزرگ‌تر از ۳ برابر شعاع توربین باد، ساختارهای گردابه‌ای قابل تشخیص نیستند.

در این تحقیق، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در حل عددی به‌منظور شبیه‌سازی دقیق و همچنین عملکرد یک نوع توربین باد محور عمودی نوع H در سرعت‌های مختلف جریان آزاد باد و نسبت سرعت‌های نوک مختلف پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا استقلال از شبکه‌بندی، گام زمانی، تعداد دوران‌ها و ابعاد دامنه‌ی محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه

نسبت به جهت وزش باد دارای حساسیت زیادی هستند. در مقابل، توربین‌های محور عمودی هزینه نصب و راه‌اندازی کمتری دارند و مستقل از جهت وزش باد هستند. همچنین، این نوع توربین‌ها حساسیت کمتری نسبت به نوسانات سرعت جریان باد دارند. در ادامه به مرور چند نمونه از تحقیقات انجام‌گرفته در مورد توربین باد محور عمودی پرداخته شده است.

مشخصات هندسی توربین باد مانند، تعداد پره‌ها، نوع پره‌ها، نوع روتور و... توسط نویسندگان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. لی و همکاران^۱ [۴-۱] تأثیر نیروهای آئرو‌دینامیک، تعداد پره‌ها و زاویه‌ی حمله‌ی پره‌ها را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که با افزایش تعداد پره‌ها، راندمان توربین باد کاهش می‌یابد و همچنین، ماکزیمم راندمان در زاویه‌ی استقرار^۲ ۶ درجه اتفاق می‌افتد. هول و همکاران^۳ [۵] نشان دادند که با افزایش میزان صافی سطح پره‌های توربین باد، راندمان آن در اعداد رینولدز پایین (رینولدزهای کمتر از ۳۰۰۰۰) کاهش می‌یابد. مکفی و بین^۴ [۶] نشان دادند که پره‌های انعطاف‌پذیر در یک نوع توربین باد محور عمودی باعث افزایش راندمان توربین باد می‌شود. رضاییها و همکاران^۵ [۷-۹] حداقل شرایط عددی موردنیاز برای شبیه‌سازی توربین باد را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش گام زمانی محاسبات از ۰/۵ تا ۰/۰۵ درجه دوران توربین باد، نتایج عددی تفاوت چندانی نمی‌کنند. عبدالهی فر و کریمیان [۱۰] یک نوع توربین باد ترکیبی داریوس-ساوونیوس را به‌صورت عددی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با قراردادن یک دیواره در پره‌های پشت به باد ساوونیوس، نشان دادند که گشتاور متوسط توربین باد افزایش می‌یابد. الخوری و همکاران^۶ [۱۱] با مطالعه‌ی پره‌های با زوایای استقرار تغییرپذیر در یک توربین باد محور عمودی نشان دادند که پره‌های نازک‌تر (NACA0018) در نسبت سرعت نوک^۷‌های پایین دارای عملکرد بهتری نسبت به پره‌های ضخیم‌تر (NACA0021) هستند. محمد [۱۲] میزان انتشار صوت را در یک توربین باد با پره‌های دو-ایرفویل را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که با وجود ۶۰٪ فاصله در بین دو ایرفویل، میزان انتشار صوت

- 1 Li et al.
- 2 Pitch angle
- 3 Howell et al.
- 4 Macphee and Beyene
- 5 Rezaeiha et al.
- 6 Elkhoury et al.
- 7 Tip Speed Ratio (TSR)

- 8 Li et al.
- 9 Bhargav et al.
- 10 Danao et al.
- 11 Bausas and Danao
- 12 Tescione et al.
- 13 Particle Image Velocimetry (PIV)

۳- معادلات حاکم

بسیاری از نویسندگان [۶، ۱۵، ۱۹-۲۲] صحت نتایج ارائه شده با استفاده از مدل‌های آشفتگی انتقال تنش برشی گذرا^۲ و انتقال تنش برشی کا-امگا^۳ را به اثبات رسانده‌اند. در این تحقیق مدل آشفتگی انتقال تنش برشی گذرا [۲۳، ۲۴] برای بررسی اثرات آشفتگی در میدان جریان استفاده شده است. معادلات بنیادی حاکم بر میدان جریان برای بقای جرم و مومنتوم و معادلات حاکم بر آئرودینامیک توربین باد به صورت زیر می‌باشند.

معادله‌ی پیوستگی:

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

ضرایب بی‌بعد پسا (C_D)، برا (C_L) و مومنتوم (C_m) به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۵]:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \times \rho U^2 S} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \times \rho U^2 S} \quad (4)$$

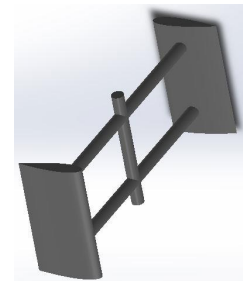
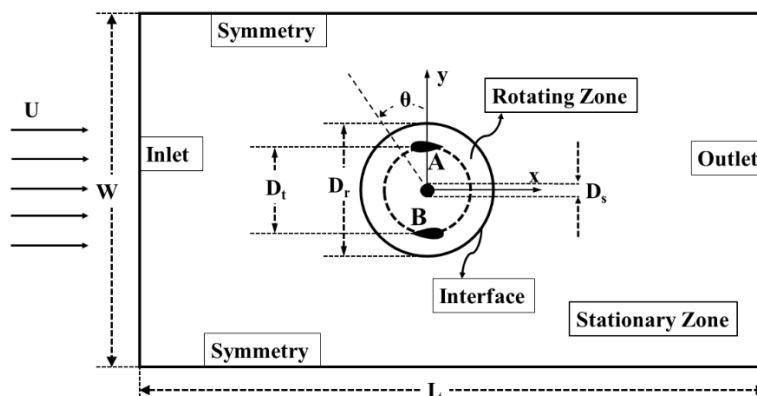
می‌شوند. برای بررسی تأثیر سرعت جریان باد و نسبت سرعت نوک بر عملکرد توربین باد، سرعت‌های جریان باد ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه و نسبت سرعت نوک‌های ۳ و ۵ مطالعه می‌شوند.

۲- مدل عددی

یک توربین باد محور عمودی نوع H دارای دو پره برای شبیه‌سازی دوبعدی استفاده شده است. پره‌های متقارن NACA0018 در یک توربین باد به قطر یک متر، ارتفاع یک متر با سطح جاروب شده‌ی یک مترمربع در نظر گرفته شده است. طول وتر^۱ پره‌ها ۶۰ میلی‌متر می‌باشند و قطر شفت، ۴۰ میلی‌متر است. ابعاد ذکر شده، با توجه به کار آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [18] در نظر گرفته شده است. در شکل ۱، توربین باد محور عمودی نوع H و فضای محاسباتی دوبعدی به همراه شرایط مرزی برای مطالعه عددی، نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در ورودی، خروجی و دیواره‌های کناری به ترتیب از شرط مرزی سرعت ورودی، فشار خروجی و شرط مرزی متقارن استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات هندسی و پارامترهای فیزیکی مدل عددی نشان داده شده است. مرکز محورهای مختصات در نقطه‌ی میانی دامنه‌ی محاسباتی و در مکان L برابر $15D_t$ و W برابر $10D_t$ قرار دارد. در تحقیق حاضر برای بررسی تأثیر سرعت جریان آزاد باد، سرعت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه مطالعه شده‌اند.

2 Transition SST
3 SST k- ω

1 Chord Length



شکل ۱: شماتیک سه‌بعدی توربین باد و دامنه محاسباتی دوبعدی

Fig. 1. Three-dimensional schematic of wind turbine and two-dimensional computational domain

جدول ۱: مشخصات هندسی و عملکردی توربین باد مدل مورد مطالعه
Table 1. Geometric and functional specifications of studied wind turbine model

پارامتر	مقدار
نوع پره	<i>NACA0018</i>
تعداد پرها	۲
L	$3 \cdot D_t$
W	$2 \cdot D_t$
قطر توربین باد (D_t)	۱ متر
قطر ناحیه دورانی (D_r)	۱/۵ متر
ارتفاع توربین باد	۱ متر
طول وتر پره	۶۰ میلی‌متر
قطر شفت (D_s)	۴۰ میلی‌متر

برای مطالعه‌ی دقیق استقلال نتایج از شبکه‌بندی، پنج شبکه‌بندی با تعداد حجم کنترل‌های مختلف در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ شبکه تولیدشده برای مدل عددی دوبعدی نشان داده شده است. در تمام دامنه‌ی محاسباتی (به‌جز نزدیک دیواره‌های پرها و شفت) برای شبکه‌بندی میدان جریان از شبکه‌های نامنظم استفاده شده است. در نواحی نزدیک دیواره‌های پرها و شفت از شبکه‌بندی منظم استفاده شده به‌طوری‌که در نزدیکی دیواره‌ها اندازه‌ی شبکه‌بندی به‌گونه‌ای انتخاب شده تا اندازه‌ی فاصله‌ی بی‌بعد دیواره^۱ کمتر از ۵ باشد. برای مطالعه‌ی استقلال نتایج عددی از شبکه‌بندی، پارامتر ضریب توان^۲ معیار مطالعه قرار گرفته است. با توجه به شکل ۳، مقدار ضریب توان برای مدل‌های با بیش از ۳۷۵ هزار حجم کنترل تقریباً ثابت بوده و افزایش تعداد حجم کنترل، تأثیری در نتایج ندارد. در جدول ۲ جزئیات مربوط به شبکه‌بندی‌های مختلف، مقادیر ضریب توان و درصد خطاهای مربوطه برای شبکه‌بندی‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این جدول درصد خطای تغییر ضریب توان برای شبکه‌های ۳، ۴ و ۵ کمتر از ۱/۰۴٪ است. بنابراین، با توجه به پایداری و ثابت ماندن نتایج به‌دست آمده، انتخاب شبکه‌بندی شماره ۳ با تعداد ۳۷۵۰۰۰ حجم کنترل جواب‌های قابل قبولی ارائه خواهند شد.

$$C_m = \frac{M}{0.5\rho U^2 S} \quad (5)$$

در روابط فوق، S مساحت سطح ایرفویل، ρ چگالی هوا و U سرعت جریان آزاد می‌باشند. همچنین ضریب توان و نسبت سرعت نوک بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho U^3 S} \quad (6)$$

$$TSR = \frac{R\omega}{U} \quad (7)$$

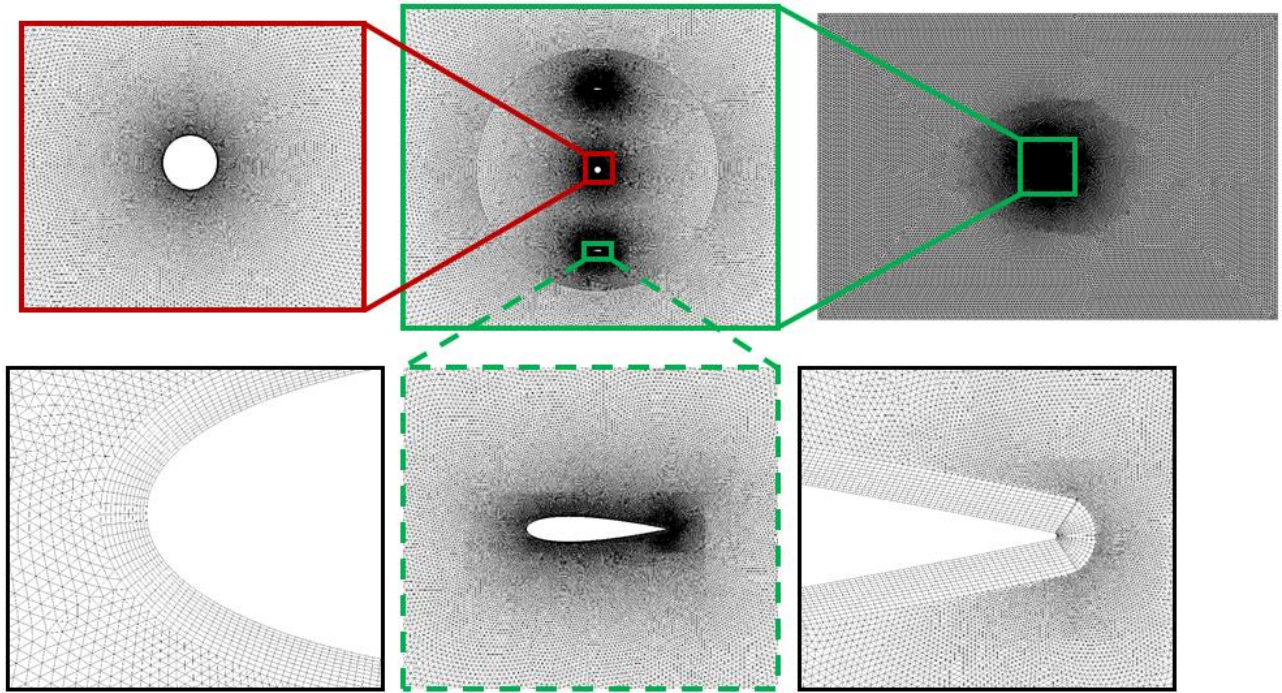
در رابطه فوق، R شعاع روتور می‌باشد.

تمامی ترم‌های جابجایی و آشفتگی به‌صورت بالادست مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند. همچنین ترم‌های زمانی به‌صورت مرتبه دوم ضمنی گسسته‌سازی شده‌اند.

۴- استقلال نتایج عددی از شبکه‌بندی

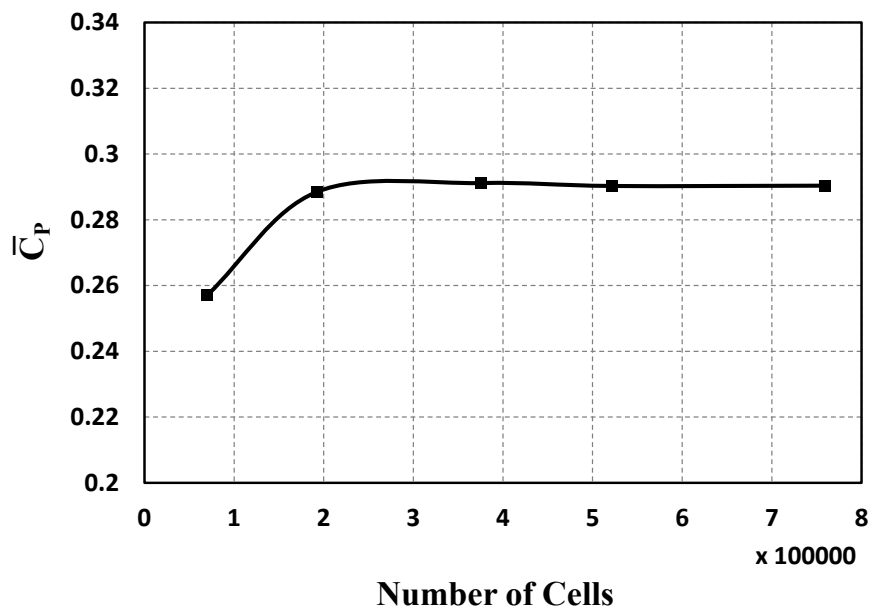
جهت کاهش خطاهای محاسباتی به دلیل ابعاد نامناسب و درشت شبکه‌بندی میدان سیال و همچنین استقلال نتایج عددی از تأثیرات اندازه‌ی شبکه، مدل عددی توربین باد محور عمودی با تعداد شبکه‌های مختلف تحلیل شده است. مطالعه استقلال از شبکه‌بندی برای حالت سرعت جریان آزاد ۹/۳ متربرثانیه و نسبت سرعت نوک ۳/۵ انجام شده است. در این تحلیل‌ها تمامی شرایط هندسی و پارامترهای فیزیکی جریان مطابق با کار آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [۱۸] است.

1 Y-plus – Dimensionless Wall Distance
 2 Power Coefficient



شکل ۲: شبکه تولید شده برای مدل عددی دوبعدی

Fig. 2. Generated mesh for two-dimensional numerical model



شکل ۳: استقلال نتایج عددی از شبکه‌بندی

Fig. 3. Grid size independence study

جدول ۲: مقادیر ضریب توان و میزان خطای آن‌ها نسبت به شبکه قبلی برای مطالعه استقلال از شبکه‌بندی

Table 2. Power coefficient and deviations of grids for grid size independence study

شماره شبکه	تعداد شبکه	ضریب توان	میزان خطا (%)	y_{max}^+ روی پره	y_{max}^+ روی شفت
۱	۷۰۰۰۰	۰/۲۵۷	—	۲/۸۶	۰/۴۵۶
۲	۱۹۲۰۰۰	۰/۲۸۸	۱۲/۰۶	۲/۸۶	۰/۴۵۶
۳	۳۷۵۰۰۰	۰/۲۹۱	۱/۰۴	۲/۸۶	۰/۴۵۶
۴	۵۲۲۰۰۰	۰/۲۹۰	-۰/۳۴	۲/۸۶	۰/۴۵۶
۵	۷۵۹۰۰۰	۰/۲۹۰	۰/۰۰	۲/۸۶	۰/۴۵۶

۱۵ میانگین‌گیری زمانی شده‌اند. تعداد قابل توجه دوران روتور در وضعیت شبه پایا نشانگر متوسط گیری زمانی دقیق در این تحقیق می‌باشد. در شکل ۶ نمودار ضریب توان برای دوره‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل ضریب توان توربین باد بعد از دور دهم تغییر چندانی نمی‌کند به طوری که اختلاف مقدار ضریب توان دور ۱۰ و دور ۲۵، ۷٪، اختلاف ضریب توان برای دوره‌های ۱۵ و ۲۵، ۲/۸٪ و اختلاف ضریب توان برای دوره‌های ۲۰ و ۲۵، ۰/۵۳٪ می‌باشد. با توجه به شکل ۶، مقدار ضریب توان بعد از دور ۲۰ تغییر چندانی نمی‌کند. در شکل ۷ ضریب مومنتوم لحظه‌ای پره‌ی A و پره‌ی B برای دور آخر دوران روتور نشان داده شده است. با توجه به این شکل نمودار ضریب مومنتوم برای دوره‌های ۲۰ و ۲۵ مشابه هم بوده و بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و این یعنی بعد از دور ۲۰ مقادیر مربوط به ضریب مومنتوم تغییر چندانی نمی‌کنند.

۷- استقلال نتایج عددی از ابعاد دامنه محاسباتی

برای بررسی و مطالعه‌ی دقیق ابعاد دامنه‌ی محاسباتی تأثیر طول و عرض ناحیه‌ی محاسباتی و همچنین قطر ناحیه‌ی چرخشی مطالعه شده است. در شکل ۸ تأثیر طول و عرض دامنه‌ی محاسباتی و در شکل ۹ تأثیر قطر ناحیه چرخشی بر ضریب مومنتوم پره‌های A و B نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل‌ها، با افزایش طول و عرض دامنه محاسباتی و همچنین با افزایش قطر ناحیه‌ی چرخشی، نمودارهای ضریب مومنتوم مشابه هم بوده و بر روی هم قرار گرفته‌اند. حداکثر میزان اختلاف ضریب مومنتوم در شکل ۸، ۱/۲٪ و حداکثر میزان اختلاف ضریب مومنتوم در شکل ۹، ۱/۱٪ می‌باشد.

۸- اعتبارسنجی

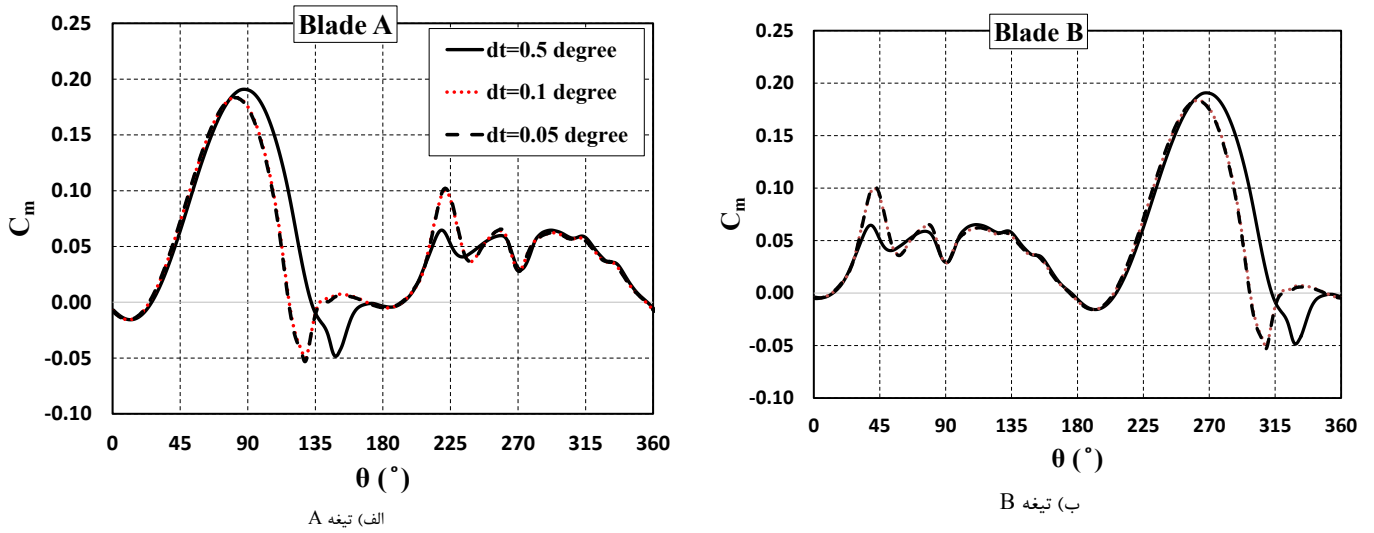
۵- استقلال نتایج عددی از گام زمانی

برای کاهش خطای محاسباتی ناشی از گام زمانی و کاهش زمان محاسبات، استقلال نتایج عددی از گام زمانی مطالعه شده است. در تحلیل جریان اطراف توربین باد، گام زمانی محاسبات را با توجه به سرعت دورانی و میزان افزایش زاویه‌ی سمتی^۱ دوران توربین باد محاسبه می‌کنند. بسیاری از نویسندگان زاویه سمتی ۰/۱ الی ۱ درجه از دوران روتور را برای گام زمانی پیشنهاد داده‌اند. در شکل ۴ نمودار ضریب مومنتوم لحظه‌ای توربین باد برای یک دور آخر دوران روتور برای زوایای سمتی مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴، مقادیر لحظه‌ای مومنتوم برای پره A و پره B در گام‌های زمانی معادل با دوران به اندازه‌ی ۰/۱ درجه و ۰/۰۵ درجه مشابه هم بوده و اختلاف اندکی با گام زمانی معادل دوران ۰/۵ درجه دارند. بنابراین با توجه به پایداری و ثابت شدن نتایج که استقلال نتایج را از گام زمانی نشان می‌دهد، گام زمانی معادل دوران برابر ۰/۱ درجه در نظر گرفته شده است.

۶- استقلال نتایج عددی از تعداد دوران‌های روتور

برای دستیابی به حالت شبه پایای زمانی و همگرایی پربودیک، توربین باد ۲۵ دور کامل را انجام داده است. در شکل ۵ نمودار ضریب مومنتوم لحظه‌ای روتور برحسب زمان بی‌بعد $\left(t^* = \frac{t.U}{D_r}\right)$ برای ۲۵ دور کامل نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقادیر ضریب مومنتوم بعد از زمان بی‌بعد مساوی ۶ به صورت تناوبی تکرار می‌شوند که این امر حکایت از عملکرد توربین باد در حالت شبه پایا و پربودیک است. در شبیه‌سازی‌های عددی، تمامی داده‌ها بعد از دور

1 Azimuthal Increment



شکل ۴: استقلال نتایج عددی از گام زمانی

Fig. 4. Time-step size independence study

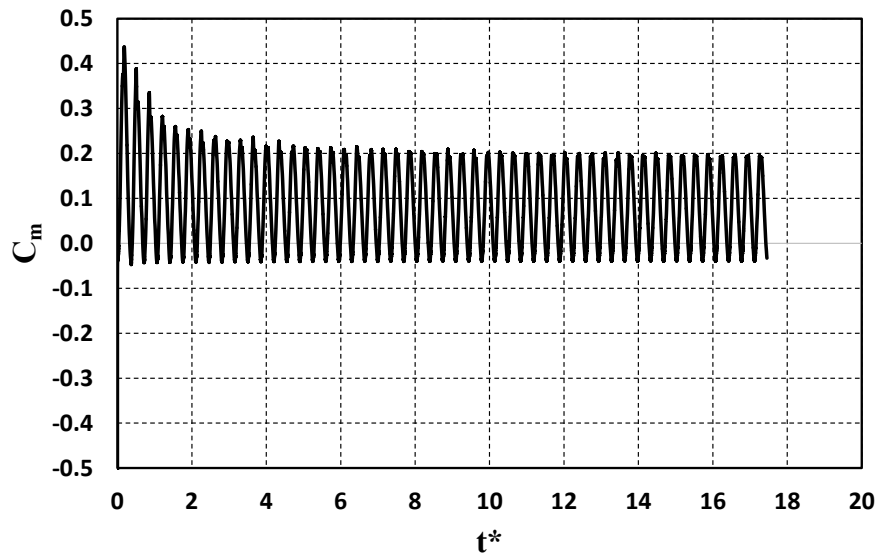
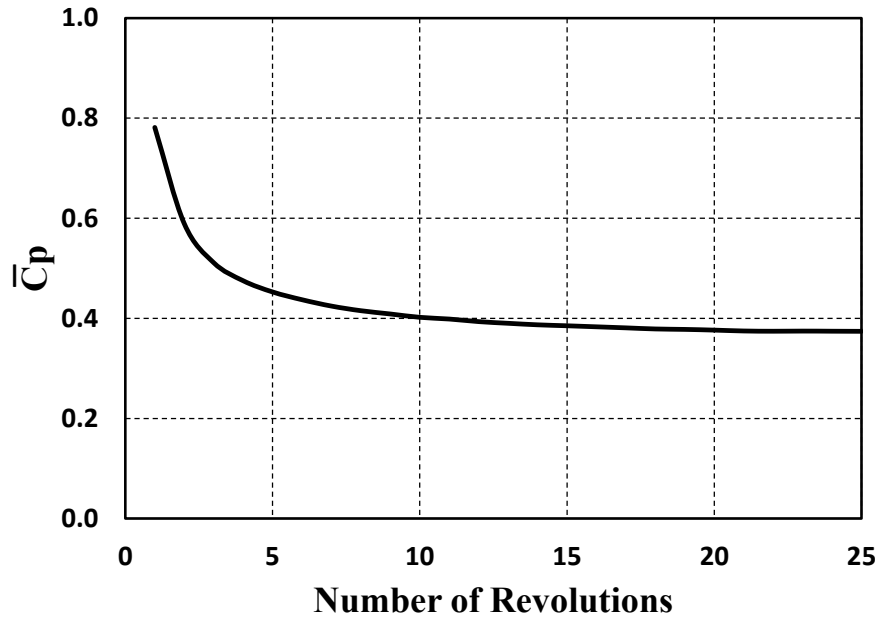
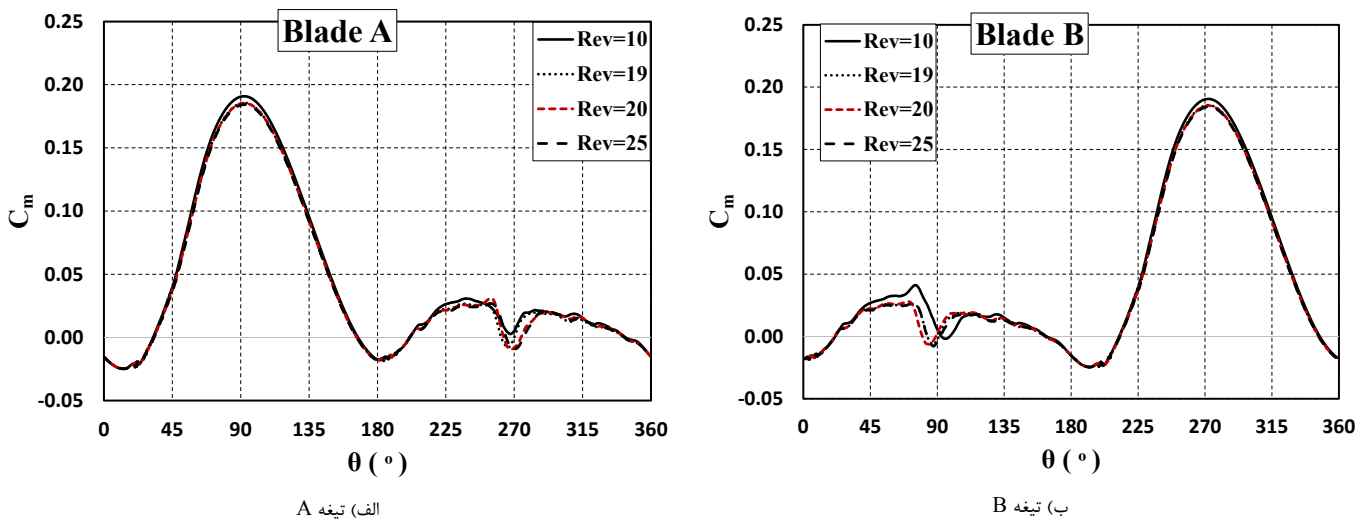


Fig. 5. Instantaneous momentum coefficient of rotor for number of revolutions independence study



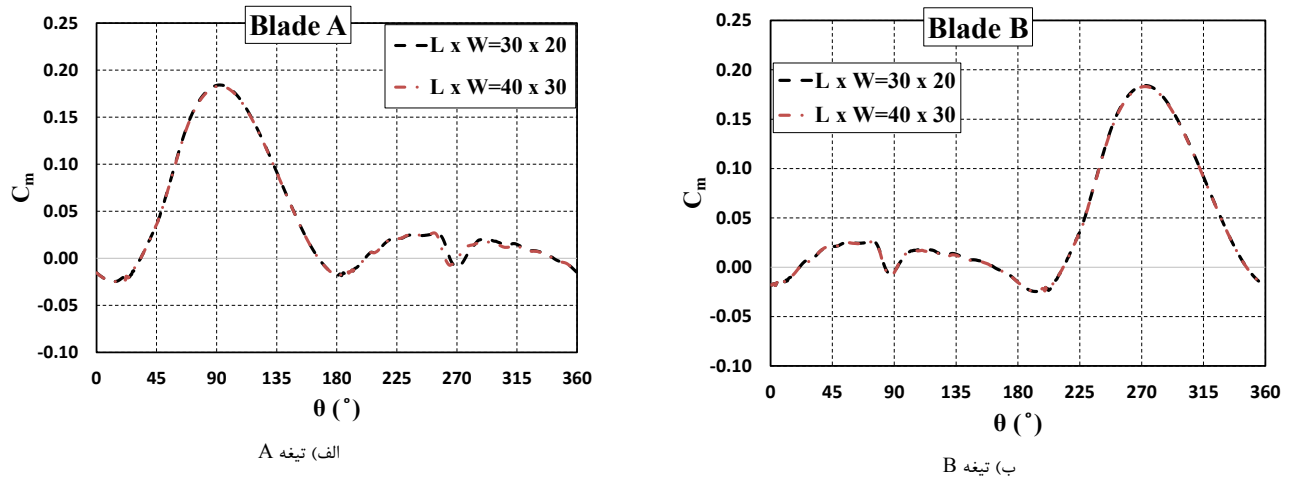
شکل ۶: متوسط زمانی ضریب توان روتور برای دوره‌های مختلف برای مطالعه‌ی استقلال نتایج عددی از تعداد دوران‌های روتور

Fig. 6. Time-averaged power coefficient of rotor for various revolutions for number of revolutions independence study



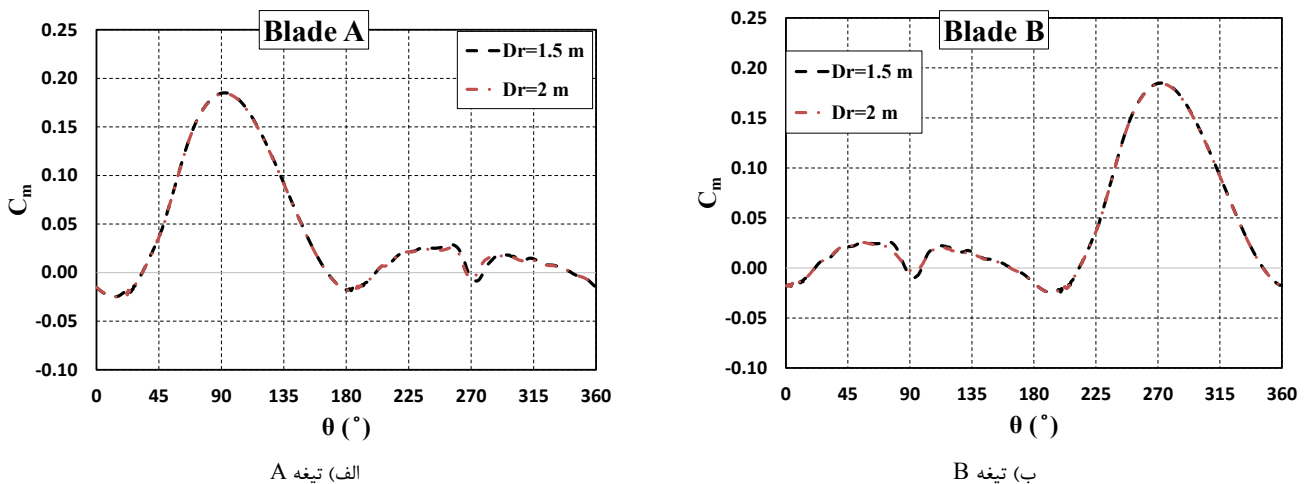
شکل ۷: ضریب مومنتوم لحظه‌ای پره‌ها برای مطالعه‌ی استقلال نتایج عددی از تعداد دوران‌های روتور

Fig. 7. Instantaneous momentum coefficient of blades for number of revolutions independence study



شکل ۸: ضریب مومنوم لحظه‌ای پره‌ها برای مطالعه‌ی استقلال نتایج عددی از ابعاد دامنه‌ی محاسباتی

Fig. 8. Instantaneous momentum coefficient of blades for domain-size independence study

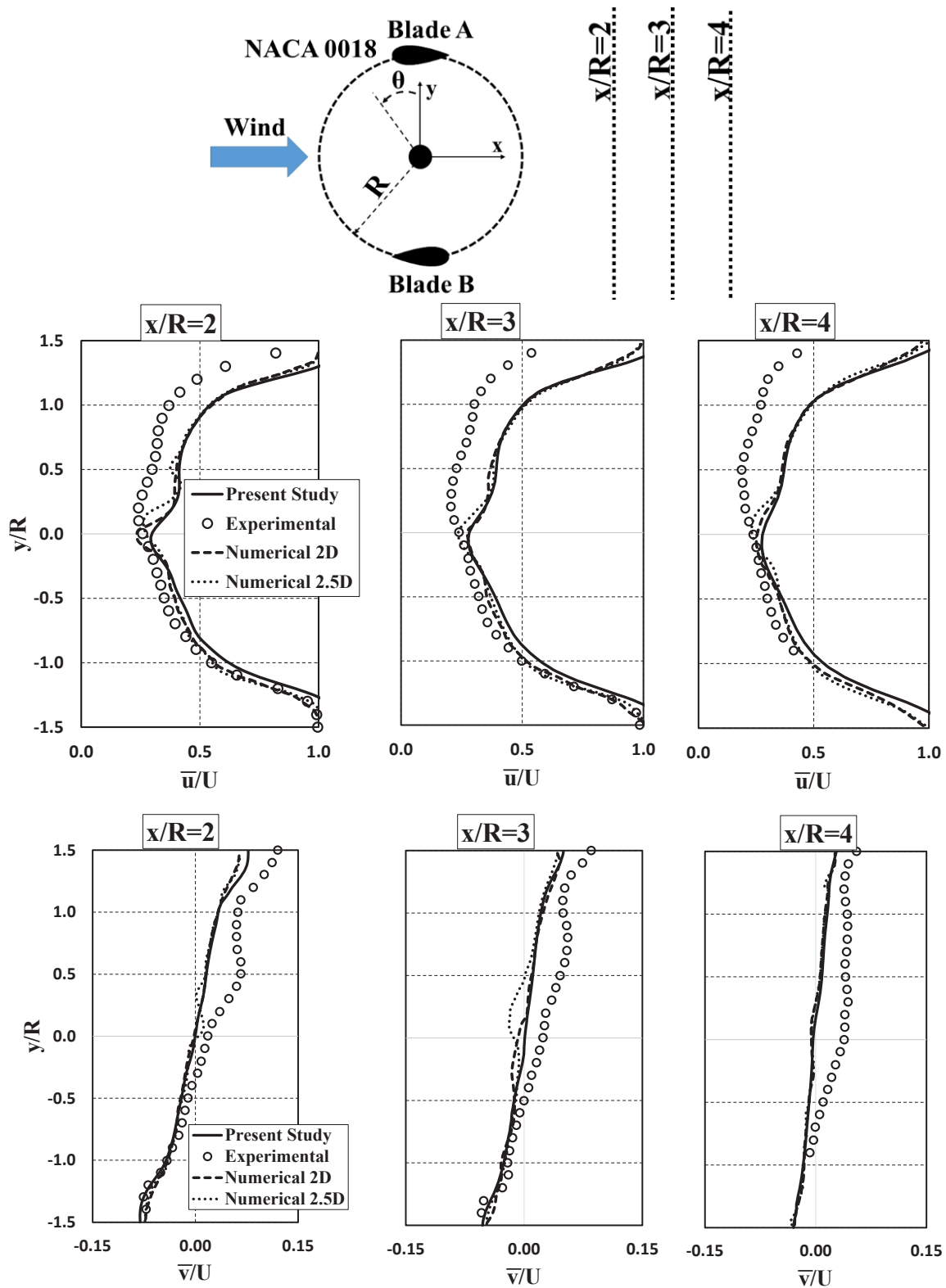


شکل ۹: ضریب مومنوم لحظه‌ای پره‌ها برای مطالعه‌ی استقلال نتایج عددی از قطر ناحیه‌ی چرخشی

Fig. 9. Instantaneous momentum coefficient of blades for rotating zone diameter independence study

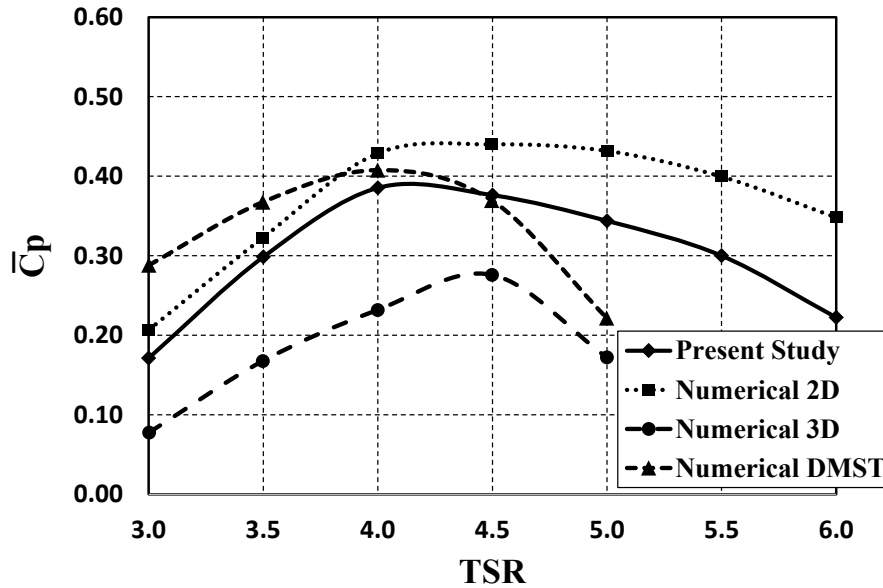
پروفیل‌های میانگین‌گیری شده سرعت در جهت جریان و پروفیل‌های میانگین‌گیری شده سرعت عمود بر جهت جریان نشان داده شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده برای پروفیل‌های سرعت با نتایج آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [۱۸] و نتایج عددی رضاییها و همکاران [۷] مقایسه شده و تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهند. همچنین متوسط زمانی ضریب توان روتور در تحقیق حاضر با

نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی، با نتایج آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [۱۸] مقایسه شده و تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهند. تمامی شرایط هندسی و ترموفیزیکی جریان در مدل عددی مطابق با کار آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [۱۸] می‌باشد. داده‌های تجربی بر اساس پروفیل‌های میانگین‌گیری شده سرعت در جهت جریان و عمود بر جهت جریان بیان شده‌اند. در شکل ۱۰



شکل ۱۰. اعتبارسنجی نتایج عددی با نتایج کار آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [۱۸] و کار عددی رضاییها و همکاران [۷]

Fig. 10. Validation of numerical results with experimental results of Tescione et al. [18] and numerical results of Rezaeiha et al. [7]



شکل ۱۱: اعتبارسنجی نتایج عددی تحقیق حاضر با کار عددی لام و پنگ [۲۱]

Fig. 11. Validation of present numerical study with numerical study of Lam and Peng [21]

پره A در موقعیت زاویه‌ی فضایی تقریبی 90° درجه اتفاق می‌افتد. کمترین مقدار ضریب مومنتوم پره A در موقعیت زاویه‌ی فضایی 180° تا 270° درجه اتفاق می‌افتد. در زاویه‌های فضایی 20° تا 315° درجه برای پره A ، نوساناتی در نمودار ضریب مومنتوم مشاهده می‌شود. این نوسانات می‌تواند به دلیل دنباله‌های ناشی از شفت روتور و پره مقابل (پره B) باشد. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ ضریب برا و پسای لحظه‌ای پره A در یک دور آخر دوران روتور برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، با افزایش سرعت جریان آزاد باد، ماکزیمم مقدار ضرایب برا و پسا در زوایای بزرگ‌تری اتفاق می‌افتد. در حالت نسبت سرعت نوک برابر ۵ (شکل ۱۵)، ماکزیمم مقدار ضریب پسا برای پره‌ی A در موقعیت‌های زاویه‌ای $82/6^\circ$ درجه، 85° درجه و $88/2^\circ$ درجه به ترتیب برای سرعت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ متربرثانیه قرار دارد. مقدار ضریب پسا برای پره‌ی A در زاویه 180° درجه، به صفر می‌رسد. با افزایش سرعت جریان آزاد باد، ماکزیمم مقدار ضریب برا افزایش می‌یابد. این افزایش در ضرایب برا و پسا، برای افزایش سرعت جریان آزاد از ۵ به ۱۰ متربرثانیه محسوس‌تر است.

در شکل ۱۶ کانتورهای سرعت لحظه‌ای در دور آخر دوران روتور

به همراه خطوط جریان نشان داده شده‌اند.

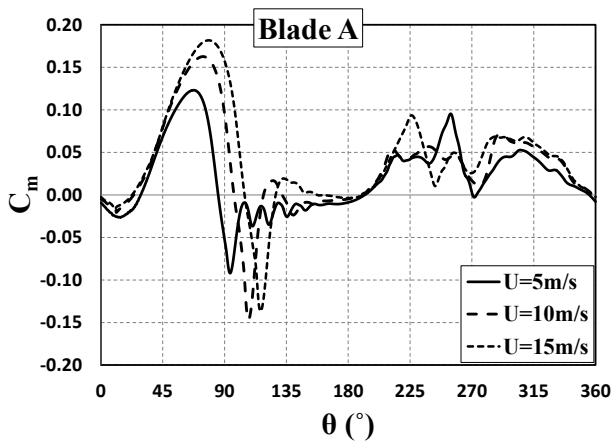
نتایج عددی لام و پنگ [۲۱] مقایسه شده‌اند. در شکل ۱۱ نتایج این مقایسه نشان داده شده است. با توجه به این شکل، روند نمودار ضریب توان متوسط برای تحقیق عددی حاضر مطابق با روند کار عددی لام و پنگ [۲۱] نشان می‌دهد. به طوری که میزان انحراف نتایج عددی دوبعدی در نسبت سرعت نوک ۵ تقریباً برابر ۲۰٪ می‌باشد.

۹- نتایج و بحث

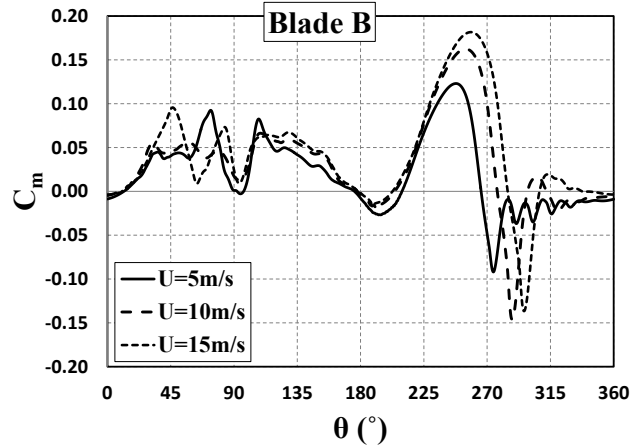
در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ضریب مومنتوم لحظه‌ای پره‌های A ، B و روتور به ترتیب برای حالت‌های نسبت سرعت نوک ۳ و ۵ برای یک دور آخر دوران توربین باد نشان داده شده‌اند. با تغییر سرعت زاویه‌ای روتور، نسبت سرعت نوک نیز تغییر می‌کند. با توجه به شکل ۱۳، با افزایش سرعت جریان آزاد، نوسانات مقدار ضریب مومنتوم کاهش می‌یابد و ماکزیمم مقدار ضریب مومنتوم برای یک پره افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت جریان آزاد، ماکزیمم مقدار ضریب مومنتوم در زوایای بزرگ‌تری مشاهده می‌شود. ضریب مومنتوم پره A در موقعیت 270° درجه به دلیل جریان گردابه‌ای ناشی از پره B و شفت روتور، کاهش می‌یابد. ماکزیمم مقدار ضریب مومنتوم برای

1 Lam and Peng

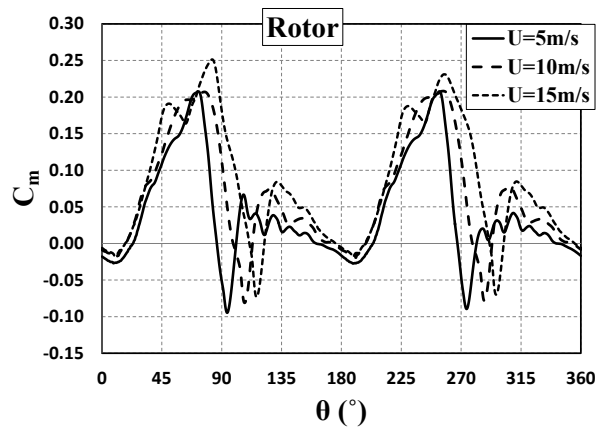
2 Vortical flow



الف) تیغه A



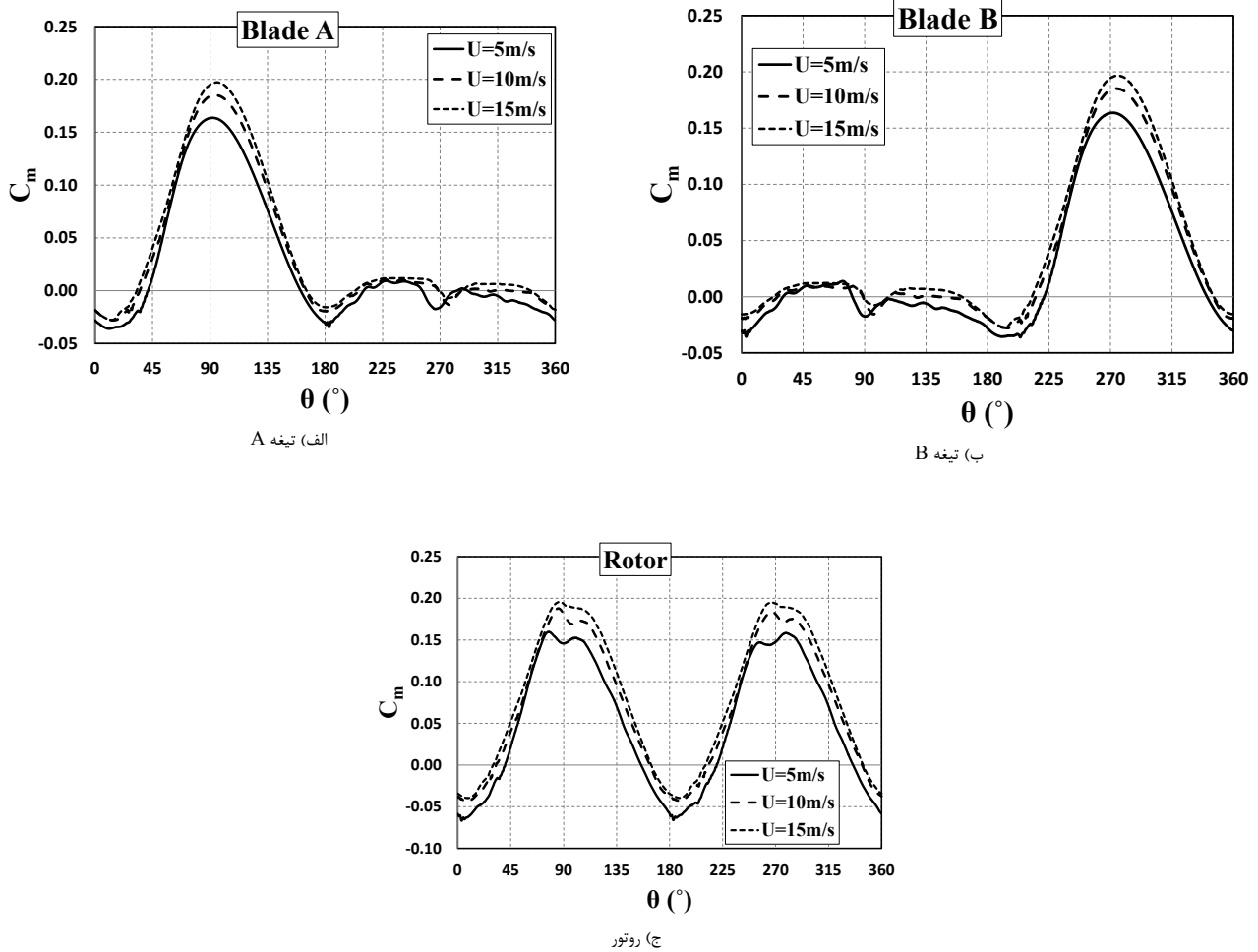
ب) تیغه B



ج) روتور

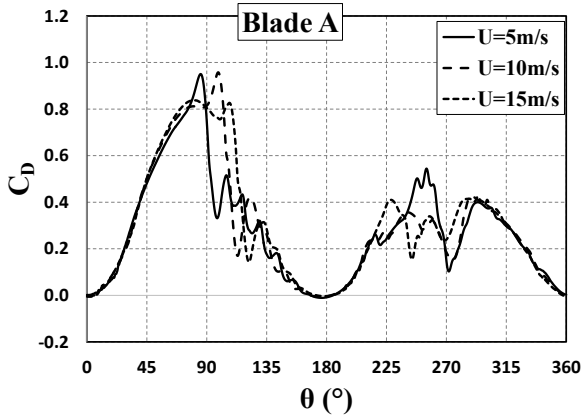
شکل ۱۲: ضریب مومنتوم لحظه‌ای برای یک دور آخر دوران روتور برای حالت $TSR=3$

Fig. 12. Instantaneous momentum coefficient for the last revolution of rotor for $TSR=3$

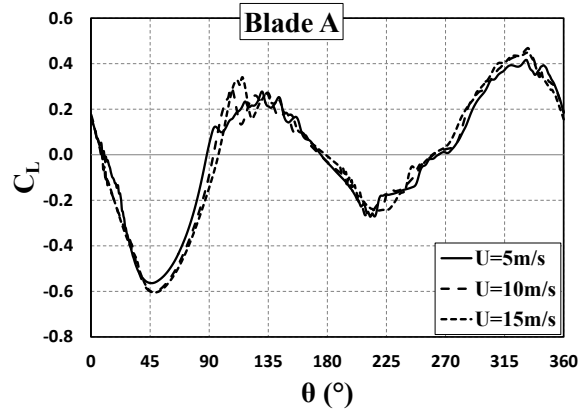


شکل ۱۳: ضریب مومنتوم لحظه‌ای برای یک دور آخر دوران روتور برای حالت $TSR=5$

Fig. 13. Instantaneous momentum coefficient for the last revolution of rotor for $TSR=5$



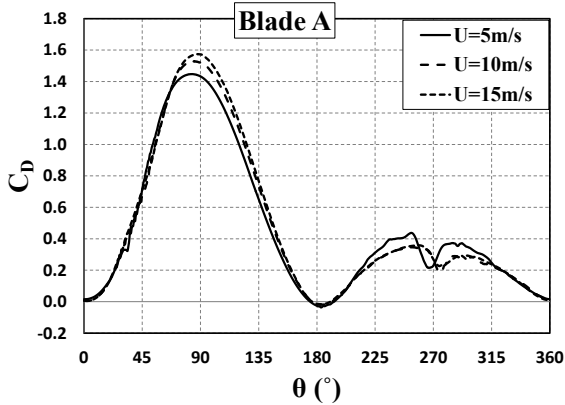
الف) ضریب پسا



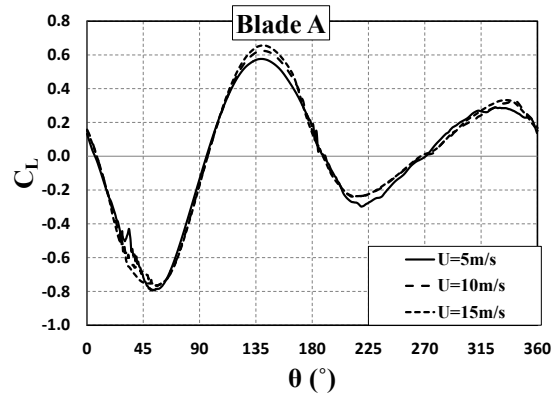
ب) ضریب برا

شکل ۱۴: ضرایب پسا و برا برای یک دور آخر دوران روتور برای حالت $TSR=3$

Fig 14. Drag and lift coefficients for the last revolution of rotor for $TSR=3$



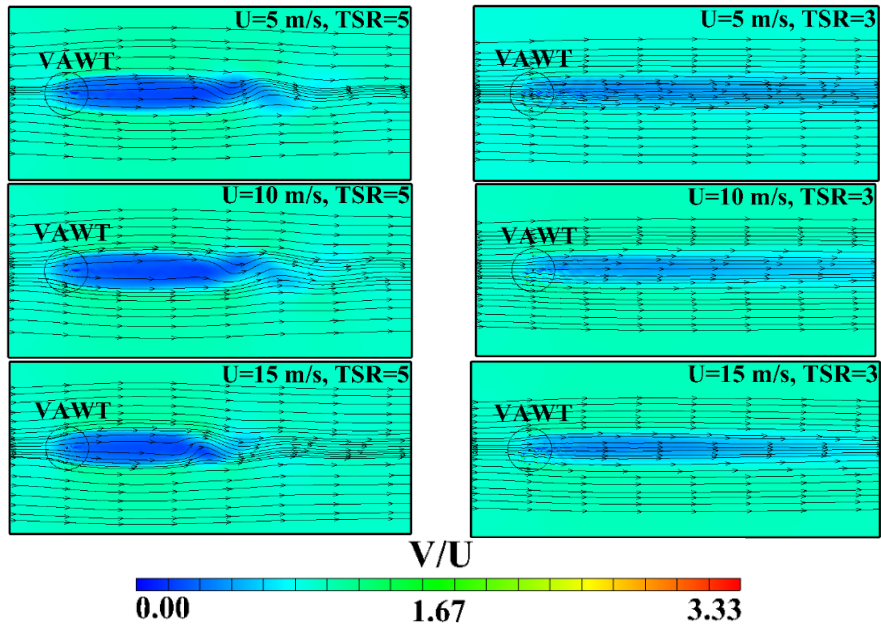
الف) ضریب پسا



ب) ضریب برا

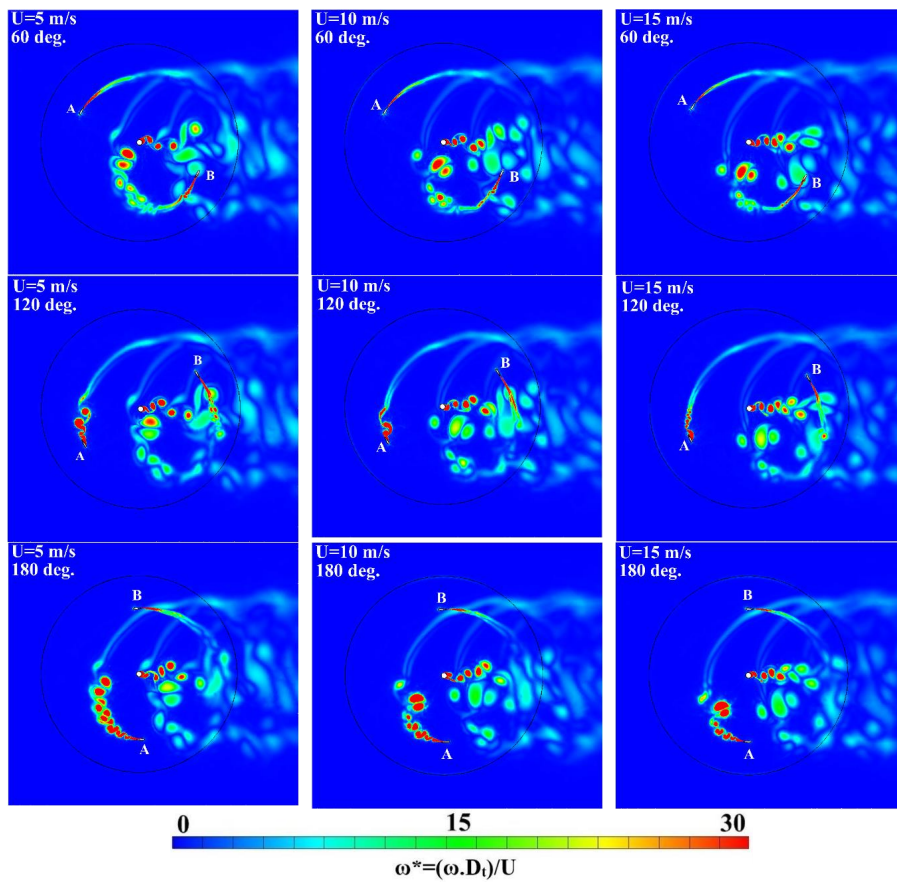
شکل ۱۵: ضرایب پسا و برا برای یک دور آخر دوران روتور برای حالت $TSR=5$

Fig 15. Drag and lift coefficients for the last revolution of rotor for $TSR=5$



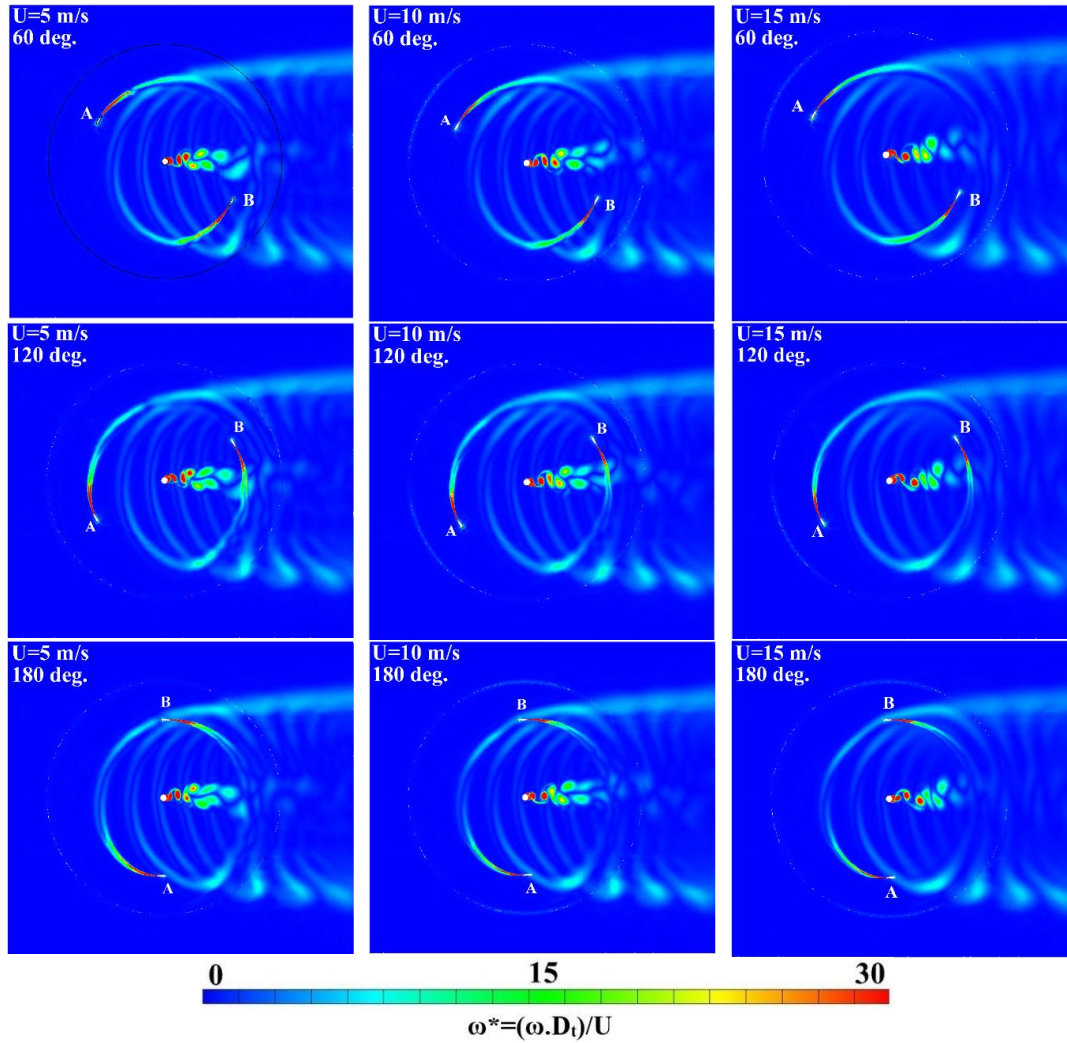
شکل ۱۶: سرعت لحظه‌ای در دور آخر دوران روتور به همراه خطوط جریان برای حالت‌های مختلف

Fig. 16. Instantaneous velocity with streamlines for the last revolution of rotor for various cases



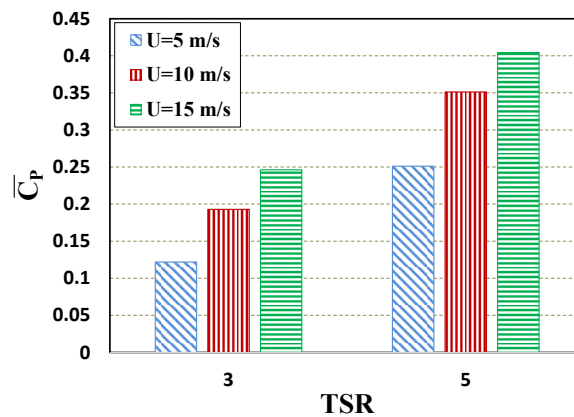
شکل ۱۷: دنباله‌های جریان درون روتور در زوایای فضایی مختلف برای حالت TSR=3

Fig. 17. Vorticity Patterns inside rotor at different azimuthal angles for TSR=3



شکل ۱۸: دنباله‌های جریان درون روتور در زوایای فضایی مختلف برای حالت $TSR=5$

Fig. 18. Vorticity Patterns inside rotor at different azimuthal angles for $TSR=5$



شکل ۱۹: ضریب توان روتور برای حالت‌های مختلف سرعت جریان باد

Fig. 19. Power coefficient of rotor for different free-wind speeds

جریان باد و سرعت دورانی روتور نشان داده شده است. در یک سرعت جریان باد ثابت، با افزایش نسبت سرعت نوک، ضریب توان روتور افزایش می‌یابد. همچنین در نسبت سرعت نوک ثابت، با افزایش سرعت جریان باد، ضریب توان روتور افزایش می‌یابد. افزایش نسبت سرعت نوک، تأثیر بیشتری نسبت به سرعت جریان باد در افزایش ضریب توان روتور دارد به طوری که ضریب توان روتور در حالت نسبت سرعت نوک ۳ و سرعت جریان آزاد ۱۰ متربرثانیه، برابر ۰/۱۹۳، در حالت نسبت سرعت نوک ۵ و سرعت جریان آزاد ۱۰ متربرثانیه، برابر ۰/۳۵۱ و در حالت نسبت سرعت نوک ۳ و سرعت جریان آزاد ۵ متربرثانیه، برابر ۰/۱۲۲ می‌باشد. یعنی با افزایش نسبت سرعت نوک از ۳ به ۵ در سرعت ثابت ۱۰ متربرثانیه، ضریب توان روتور ۸۱/۸۷٪ افزایش یافته و با افزایش سرعت جریان باد از ۵ به ۱۰ متربرثانیه در نسبت سرعت نوک ثابت ۳، ضریب توان روتور ۵۸/۲٪ افزایش می‌یابد. بنابراین توربین باد باید به گونه‌ای طراحی شود تا برای دستیابی به حداکثر راندمان، در سرعت‌های پایین جریان باد دارای نسبت سرعت نوک بالا باشد.

۱۰- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر پارامترهای هندسی و عددی برای شبیه‌سازی صحیح یک نوع توربین باد محور عمودی نوع H مورد بررسی قرار گرفت. سرعت‌های جریان آزاد باد ۵، ۱۰ و ۱۵ متربرثانیه و نسبت سرعت نوک‌های ۳ و ۵ مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی صحت شبیه‌سازی‌ها، مطالعات استقلال نتایج عددی از شبکه‌بندی، استقلال نتایج عددی از گام زمانی، استقلال نتایج عددی از تعداد دوران‌های روتور و استقلال نتایج عددی از ابعاد دامنه محاسباتی انجام گرفت و نتایج عددی حاصل با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. برای بررسی عملکرد توربین باد در شرایط مختلف سرعت جریان باد و نسبت سرعت نوک، پارامترهای ضریب مومنتوم، ضریب برا، ضریب پسا و دنباله‌های تشکیل‌شده درون روتور مورد بررسی دقیق قرار گرفتند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ماکزیمم مقدار ضریب مومنتوم برای پره A در اطراف زاویه‌ی فضایی ۹۰ درجه و برای پره B در اطراف زاویه‌ی فضایی ۲۷۰ درجه اتفاق می‌افتد. همچنین ضریب مومنتوم پره A در اطراف زاویه ۲۷۰ درجه و ضریب مومنتوم پره B در اطراف زاویه ۹۰ درجه دارای نوساناتی می‌باشد که اندازه‌ی این نوسانات برای

با توجه به خطوط جریان در این شکل، در حالت‌های نسبت سرعت نوک برابر ۳، جریان باد از درون روتور عبور می‌کند و به دلیل برخورد با اجزای روتور (شفث و پره‌ها) در پایین‌دست روتور یک جریان نوسانی با دامنه‌ی کوچک دیده می‌شود. کوچک بودن دامنه‌ی نوسانات به دلیل کوچک بودن ابعاد هندسی اجزای درون روتور می‌باشد که سیال هوا با عبور از درون روتور به آن‌ها برخورد کرده است. ولی در حالت‌های نسبت سرعت نوک برابر ۵، به دلیل سرعت دورانی بالای روتور، جریان هوا به راحتی نمی‌تواند از درون روتور عبور کند و حجم کمی از هوا از درون روتور عبور می‌کند. در این حالت روتور مانند یک استوانه در برابر جریان عمل می‌کند و نوساناتی در پایین‌دست جریان مشاهده می‌شود ولی دامنه‌ی این نوسانات در مقایسه با حالت‌های نسبت سرعت نوک برابر ۳ بزرگ‌تر است و در فاصله‌ی دورتری نسبت به روتور شکل می‌گیرند.

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ کانتورهای دنباله‌های جریان درون روتور به ترتیب برای حالت‌های نسبت سرعت نوک های ۳ و ۵ و زوایای فضایی مختلف نشان داده شده‌اند. وجود اندازه‌ی زیاد دنباله‌ها درون روتور باعث ایجاد نوسانات زیاد در اجزای درونی روتور می‌شود که این امر باعث کاهش راندمان و کاهش عمر مفید اجزا به دلیل ارتعاشات می‌شود. با توجه به این شکل‌ها، مساحت بیشتری از فضای درون روتور در حالت نسبت سرعت نوک ۳ دارای نوسانات سرعت باد می‌باشد و اندازه‌ی دنباله‌ها در حالت نسبت سرعت نوک ۳ بیشتر از حالت نسبت سرعت نوک ۵ می‌باشد. در حالت نسبت سرعت نوک ۳ به دلیل سرعت دورانی پایین روتور، حجم هوای بیشتری به درون روتور نفوذ می‌کند و با برخورد با اجزای درونی روتور دنباله‌های جریان بیشتری ایجاد می‌شود ولی در حالت نسبت سرعت نوک ۵ به دلیل سرعت دورانی بالای روتور، حجم هوای کمتری به درون روتور نفوذ می‌کند و روتور مانند یک استوانه در برابر جریان عمل می‌کند. در این حالت به دلیل اندرکنش کم سیال با اجزای درونی روتور، دنباله‌های جریان درون روتور کمتر از حالت نسبت سرعت نوک ۳ می‌باشند. همچنین با توجه به موقعیت پره‌ها در زوایای مختلف، نوسانات موجود در نمودارهای ضریب مومنتوم، برا و پسا (شکل‌های ۱۲ تا ۱۵) در زوایای فضایی خاص، به دلیل برخورد دنباله‌های جریان با پره‌ها در این زوایا می‌باشد.

در شکل ۱۹، ضریب توان روتور برای حالت‌های مختلف سرعت

- [3] Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, T. Kawabata, K. Shimizu, T. Ogasawara, A. Nakai, T. Kasuya, Wind tunnel and numerical study of a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine in three-dimensional analysis (Part II: For predicting flow field and performance), *Energy*, 104 307-295 (2016).
- [4] Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, M. Yamamoto, T. Ogasawara, K. Shimizu, T. Kogaki, Study on power performance for straight-bladed vertical axis wind turbine by field and wind tunnel test, *Renewable Energy*, (2016) 90 300-291.
- [5] R. Howell, N. Qin, J. Edwards, N. Durrani, Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, *Renewable Energy*, 422-412 (2010) (2)35.
- [6] D.W. MacPhee, A. Beyene, Fluid-structure interaction analysis of a morphing vertical axis wind turbine, *Journal of Fluids and Structures*, 159-143 (2016) 60.
- [7] A. Rezaeiha, I. Kalkman, B. Blocken, CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment, *Renewable Energy*, -373 (2017) 107 385.
- [8] A. Rezaeiha, I. Kalkman, B. Blocken, Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine, *Applied Energy*, 150-132 (2017) 197.
- [9] A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence, *Energy Conversion and Management*, 316-301 (2018) 156.
- [10] A. abdolahifar, S.M.H. Karimian, Aerodynamic Performance Improvement of Hybrid Darrieus-Savonius Vertical Axis Wind Turbine, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2019) -. (in Persian)
- [11] M. Elkhoury, T. Kiwata, E. Aoun, Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (2015) 139 123-111.
- [12] M.H. Mohamed, Reduction of the generated aero-

حالت نسبت سرعت نوک ۳ بیشتر از حالت نسبت سرعت نوک ۵ می‌باشد. در نسبت سرعت نوک‌های پایین، حجم بیشتری از هوا به درون روتور نفوذ می‌کند و به دلیل افزایش اندرکنش بین سیال و اجزای درونی روتور، گردابه‌های بیشتری درون روتور شکل می‌گیرد. این گردابه‌ها باعث افزایش نوسانات و ارتعاشات اجزا شده و عمر مفید اجزا و راندمان توربین باد کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
C_D	ضریب پسا
C_L	ضریب برا
C_m	ضریب مومنتوم
C_p	ضریب توان
dt^*	گام زمانی بی‌بعد
P	توان، J/s
Re	عدد رینولدز
TI	شدت آشفتگی (%)
TSR	نسبت سرعت نوک
t^*	زمان بی‌بعد
U	سرعت جریان آزاد، m/s

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
μ	ویسکوزیته دینامیک، $kg/m.s$
ζ	طول سلول
ω	ورتیسیته، rad/s
ω^*	ورتیسیته بی‌بعد

زیرنویس

max ماکزیمم

بالانویس

- میانگین زمانی

منابع و مراجع

- [1] Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, K. Furukawa, M. Yamamoto, Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine, *Energy*, 90, Part 795-784 (2015) 1.
- [2] Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, T. Kawabata, K. Shimizu, T. Ogasawara, A. Nakai, T. Kasuya, Wind tunnel and numerical study of a straight-bladed vertical axis wind turbine in three-dimensional analysis (Part I: For predicting aerodynamic loads and performance), *Energy*, 452-443 (2016) 106.

- [19] W.-H. Chen, C.-Y. Chen, C.-Y. Huang, C.-J. Hwang, Power output analysis and optimization of two straight-bladed vertical-axis wind turbines, *Applied Energy*, 185, Part 232-223 (2017) 1.
- [20] M. Jafaryar, R. Kamrani, M. Gorji-Bandpy, M. Hatami, D.D. Ganji, Numerical optimization of the asymmetric blades mounted on a vertical axis cross-flow wind turbine, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 104-93 (2016) 70.
- [21] H.F. Lam, H.Y. Peng, Study of wake characteristics of a vertical axis wind turbine by two- and three-dimensional computational fluid dynamics simulations, *Renewable Energy*, 398-386 (2016) 90.
- [22] S. Wang, D.B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Z. Tao, Turbulence modeling of deep dynamic stall at relatively low Reynolds number, *Journal of Fluids and Structures*, 209-191 (2012) 33.
- [23] F.R. Menter, R. Langtry, S. Völker, Transition Modelling for General Purpose CFD Codes, *Flow, Turbulence and Combustion*, 303-277 (2006) (1)77.
- [24] F.R. Menter, R.B. Langtry, S.R. Likki, Y.B. Suzen, P.G. Huang, S. Völker, A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables—Part I: Model Formulation, *Journal of Turbomachinery*, 422-413 (2006) (3)128.
- [25] J.D. Anderson Jr, *Fundamentals of aerodynamics*, Tata McGraw-Hill Education, 2010.
- acoustics noise of a vertical axis wind turbine using CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques, *Energy*, 96 544-531 (2016).
- [13] Y. Li, S. Zhao, C. Qu, F. Feng, T. Kotaro, Effects of Offset Blade on Aerodynamic Characteristics of Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine, *Journal of Thermal Science*, 339-326 (2019) (2)28.
- [14] Y. Li, K. Tagawa, W. Liu, Performance effects of attachment on blade on a straight-bladed vertical axis wind turbine, *Current Applied Physics*, 2)10, Supplement) (2010) S-335S338.
- [15] M.M.S.R.S. Bhargav, V. Ratna Kishore, V. Laxman, Influence of fluctuating wind conditions on vertical axis wind turbine using a three dimensional CFD model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 108-98 (2016) 158.
- [16] L.A. Danao, O. Eboibi, R. Howell, An experimental investigation into the influence of unsteady wind on the performance of a vertical axis wind turbine, *Applied Energy*, 411-403 (2013) 107.
- [17] M.D. Bausas, L.A.M. Danao, The aerodynamics of a camber-bladed vertical axis wind turbine in unsteady wind, *Energy*, 93, Part 1164-1155 (2015) 1.
- [18] G. Tescione, D. Ragni, C. He, C.J. Simão Ferreira, G.J.W. van Bussel, Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry, *Renewable Energy*, 61-47 (2014) 70.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Sepehrianazar , R. Hassanzadeh, I. Mirzaee. Investigation of the effect of free-wind velocity on the performance of small-scale vertical axis wind turbine. *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(special issue 3) (2021).1709-1728.

DOI: [10.22060/mej.2020.17269.6557](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17269.6557)



