



## بهبود عملکرد توربین باد محور عمودی با مقیاس واقعی با به کارگیری عملگر پلاسمایی

حمیدرضا یزدانی، محمد سفید\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۵  
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۰۴  
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۰۳

### کلمات کلیدی:

کنترل فعال  
عملگر پلاسمایی  
توربین باد عمود-محور  
توربین باد مقیاس - واقعی

**خلاصه:** هدف از این تحقیق شبیه‌سازی سه بعدی جریان حول توربین باد عمود محور در ابعاد واقعی تحت تأثیر نیروهای حجمی حاصل از عملگر پلاسمایی می‌باشد. بدین منظور، ابتدا عملگر پلاسمایی بر روی یک صفحه تخت که در شرایط هوای ساکن قرار دارد، شبیه‌سازی شده و نتایج با مدل مرجع اعتبارسنجی گردید. سپس به منظور کاربرد عملگر بر روی توربین باد و به دلیل حساسیت جریان و تأثیر نامطلوب حضور عملگر بر روی سطح پره‌ها، ایده‌ی اعمال آن درون سطح پره‌های توربین اولین بار در این پژوهش به کار گرفته شد. بدین منظور ابتدا توربین باد ابعاد واقعی  $G = 530$  بصورت دو بعدی و سه بعدی شبیه‌سازی و با نتایج تجربی اعتبارسنجی گردید. در آخر، عملگر پلاسمای درون سطح پره‌های توربین عمود محور و بر روی تمام سطح آن‌ها بصورت متوالی و همزمان اعمال شد. نتایج نشان داد اعمال عملگر با این شرایط خاص، سبب تغییر الگوی جریان بر روی پره‌ی توربین باد واقعی شده و در نتیجه توان خروجی به میزان ۳ درصد افزایش می‌یابد. نکته حائز اهمیت این است که توان در یک توربین بادی محور عمودی مقیاس واقعی با استفاده از تکنولوژی عملگر پلاسمای می‌تواند افزایش یابد. همچنین اعمال عملگر درون سطح پره‌ها تأثیر در کارایی عملگر نخواهد داشت.

### ۱- مقدمه

بیش از ۴۰ درصد افزایش در استفاده از توربین‌های بادی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵، سبب شده است سازندگان توربین‌های باد انگیزه زیادی برای افزایش بازده توربین و کاهش هزینه‌های تولید داشته باشند [۱]. توانایی کنترل جریان، به منظور ایجاد تغییری دلخواه، دارای اهمیت تکنولوژیکی و کاربردی قابل ملاحظه‌ای است. روش‌های متفاوتی برای افزایش توان خروجی از طریق کنترل جریان وجود دارد که هر کدام دارای مزایا و معایب مخصوص خود می‌باشند. در چند سال گذشته به منظور افزایش بازده، روش‌های متفاوتی مانند تولیدکننده‌های گردابه، عملگر جت مصنوعی<sup>۱</sup> و عملگرهای پلاسمایی به کار رفته است [۲ و ۳]. عملگر پلاسمایی به دلیل مزایای ارزشمند خود در زمینه کنترل جریان، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. از ویژگی‌های مهم این عملگر پلاسمایی می‌توان به نداشتن قطعات متحرک، قابلیت پاسخگویی سریع و تاخیر زمانی

اندک، سادگی ساختار، مصرف کم انرژی و کاهش هزینه‌های اجرایی اشاره نمود. عملگر پلاسمایی به دلیل ویژگی‌های بیان شده پتانسیل بالایی نسبت به سایر روش‌ها در آینده برای استفاده در توربین‌های بادی تجاری دارد [۴].

میلک و همکاران<sup>۲</sup> [۵] نخستین کسانی بودند که از نیروی جت حاصل از یک تخلیه توسط جریان مستقیم به منظور ایجاد یک ناحیه پلاسمای و در نهایت کاهش نیروی پسا بر روی صفحات تخت استفاده کردند. پس از آن‌ها افراد دیگری از عمل تخلیه الکتریکی به منظور به‌کارگیری تولید بردار نیروی حجمی و کنترل جدایش لایه مرزی جریان و افزایش نیروی برآ بر روی اجسام مختلف اقدام نمودند. گراندمن و همکاران<sup>۳</sup> [۶] تأثیر عملگر پلاسمایی را بر روی جریان لایه مرزی بر روی صفحه تخت به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها در بررسی‌هایشان دریافتند که استفاده از این نوع عملگر باعث می‌شود لایه مرزی بر روی صفحه تخت کاهش یافته و سبب

2 Malik et al.

3 Grundmann et al.

1 synthetic jets

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mhsefid@yazd.ac.ir

همکاران<sup>۸</sup> [۱۴] استفاده از عملگر پلاسما بر روی توربین محور افقی تجاری در ابعاد بزرگ را به کار بردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملگر می‌تواند افزایش ۴/۹ درصدی در توان توربین باد ایجاد کند. همانگونه که بیان شد عملگر پلاسما تاکنون بر روی توربین باد عمود محور ابعاد واقعی پیاده‌سازی نشده است و گرین بلت تنها عملگر بر توربین باد مقیاس کوچک را مورد بررسی قرار داده است و تنها پژوهشی هم که به بررسی افزایش بازده توربین با استفاده از این روش پرداخته شده است، مربوط به توربین باد محور افقی است که افزایش بازده به میزان ۴/۹ درصدی را در پی داشته است.

هدف اصلی در پژوهش حاضر، بررسی امکان استفاده از عملگر پلاسما جهت کنترل جدایش جریان درون پره توربین باد محور عمودی مقیاس واقعی و افزایش گشتاور و توان خروجی آن است. برای این منظور، توربین باد محور عمودی مرجعی انتخاب و جریان بر روی آن به صورت دوبعدی و سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی عملگر پلاسما بر اساس مدل سوزن<sup>۹</sup> صورت گرفته و اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عملگر پلاسما و توربین باد با مقایسه نتایج با مراجع انجام شده است. با چینش چندین عملگر درون سطح پره توربین برای اولین بار، الگوی جریان و در نتیجه افزایش گشتاور تولیدی توربین بررسی شده است.

## ۲- توربین باد مبنا

به منظور بررسی اثر کنترل جریان به وسیله عملگر پلاسما، توربین باد محور عمودی تجاری  $G = 530$  به عنوان توربین باد مبنا انتخاب شده است. مشخصات این توربین در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات توربین باد مبنا

Table 1. Properties of baseline wind turbine

مشخصات	ابعاد
تعداد پرها	۴
قطر روتور	۵/۳۸۵۸۱۶ m
طول پره	۳ m
وتر پره	۰/۴۴۷۰۴ m
سرعت دورانی روتور	۸۰

تاخیر در گذار شود. اورلو و همکاران<sup>۱</sup> [۷] کنترل جدایش و پدیده واماندگی را بر روی لبه ایرفویل با عملگر بررسی کردند. سوسا و همکاران<sup>۲</sup> [۸] کاهش نیروی پسا حول یک استوانه در حال دوران را با قرار دادن عملگر پلاسمایی بر روی آن به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که استفاده از این نوع عملگر باعث می‌شود نیروی پسای استوانه ۲۵ درصد کاهش یابد. در زمینه استفاده از عملگر پلاسما برای کنترل جریان عبوری از پره روتور توربین باد، فعالیت‌های اندکی صورت گرفته است. نلسون و همکاران<sup>۳</sup> [۹] پژوهشی را در راستای طراحی پره‌های هوشمند توربین باد به کمک عملگر پلاسما روی ایرفویل‌های S۸۲۷ و S۸۲۲ را با هدف کنترل جدایش جریان از لبه حمله برای افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تاثیر عملگر پلاسما در کنترل جدایش محلی جریان معادل به‌کارگیری سطوح متحرک برآزا در لبه فرار یا لبه حمله است.

گرین بلت و همکاران<sup>۴</sup> [۱۰] به روش تجربی از عملگر پلاسما در لبه حمله پره‌های یک توربین باد محور عمودی کوچک استفاده کردند تا به کمک کنترل جدایش دینامیکی جریان، عملکرد آن را بهبود ببخشند. کوتسنیس و همکاران<sup>۵</sup> [۱۱] در فعالیتی تجربی به مطالعه کنترل جریان روی ایرفویل متقارنی با لبه فرار منحنی شکل پرداختند. آن‌ها با قراردادن عملگر پلاسما در لبه فرار، نشان دادند که این روش ضمن کارایی، نسبت به روش کنترل جریان با جت می‌تواند سبب حذف افزایش وزن و دیگر مسائل پیچیده شود. نتایج اولیه، افزایش در حدود ۰/۱ برای ضریب برآ در اعداد رینولدز پایین را نشان داد.

آنو و همکاران<sup>۶</sup> [۱۲] در فعالیتی عددی و تجربی، آیرودینامیک پره یک مدل ساده از توربین باد محور افقی را در حضور عملگر پلاسما بررسی کردند. نتایج مشخص کرد که استفاده از عملگر پلاسما، موجب افزایش ۱۴ درصدی گشتاور تولیدی می‌شود. همچنین کنی و همکاران<sup>۷</sup> [۱۳] سه نوع عملگر را برای کنترل جریان روی یک توربین باد ۲۰ کیلوواتی و بهبود عملکرد آن توسعه دادند. اخیراً ماتسودا و

- 1 Orlov et al.
- 2 Sosa et al.
- 3 R. C. Nelson
- 4 D. Greenblatt et al.
- 5 M. Kotsoniset al.
- 6 Aono et al.
- 7 Cooney et al.

8 Matsuda et al.

9 Suzen

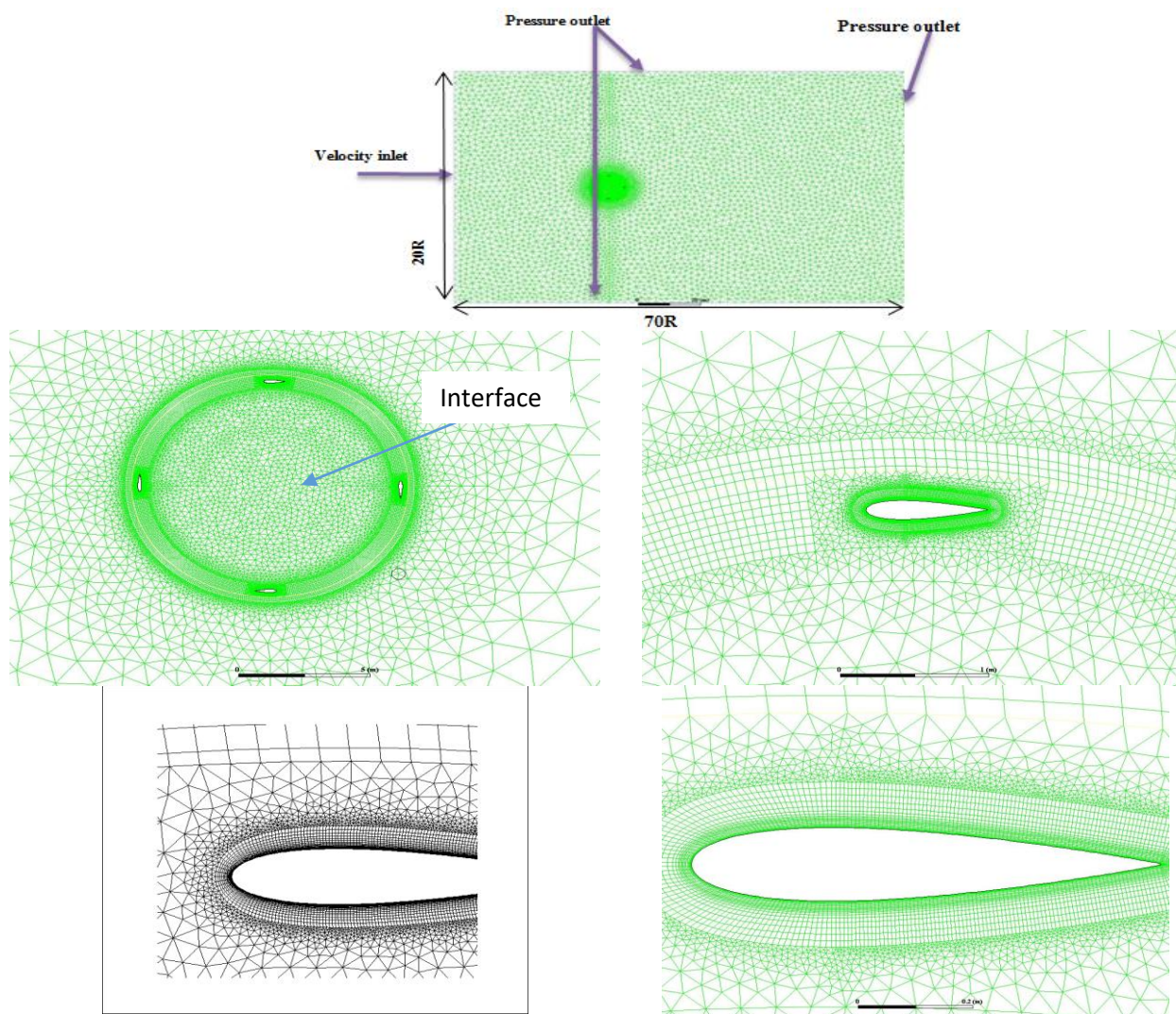


Fig. 1. Two Dimensional (2D) computational grid

شکل ۱: شبکه تولید شده دو بعدی

### ۲- شبیه‌سازی توربین باد

دارای قطری در حدود  $1/0.5$  برابر قطر توربین است که مقاطع توربین در داخل آن قرار می‌گیرند و یک محدوده بیرونی تقسیم می‌گردد. مرز بین این دو محدوده با شرط مرزی واسطه<sup>۵</sup> جدا می‌گردد. محدوده خارجی ایستا<sup>۶</sup> است. ولی محدوده داخلی می‌تواند بر حسب زمان بچرخد و شبکه داخلی به همراه بال‌ها که در داخل آن قرار دارد نسبت به محدوده خارجی دوران می‌کند. در طول حل پس از یک حل پایا و جواب اولیه مناسب، مسئله به صورت غیرپایا حل می‌گردد و پس از گذشت یک زمان اولیه نتایج برای هر بال در طول پریود چرخشی جریان تکرار شده و می‌توان داده‌برداری و انتگرال‌گیری را از روی آن انجام داد. همچنین از دو مدل مغشوش  $k-\epsilon$  واقعی شده<sup>۷</sup> و انتقال

برای شبیه‌سازی عددی جریان حول توربین باد محور عمودی، جریان در دو حالت دو و سه بعدی شبیه‌سازی می‌گردد. البته با توجه به اینکه طول مقطع بال نسبت به طول وتر عدد بزرگی است حتی فرض دو بعدی نیز فرض خوبی است. برای پیاده سازی دوران توربین، از مدل قاب مرجع چرخان<sup>۱</sup> در حالت پایا به عنوان جواب اولیه و سپس مدل شبکه متحرک<sup>۲</sup> برای حالت غیرپایا در نرم افزار فلوئنت<sup>۳</sup> نرم افزاری مهندسی برای مدل کردن جریان است، استفاده شده است. در این روش، محدوده حل عددی<sup>۴</sup> به یک استوانه داخلی که

- 5 Interface
- 6 Stationary
- 7 Realizable

- 1 Moving Reference Frame (MRF)
- 2 Dynamic Mesh
- 3 Fluent
- 4 Domain



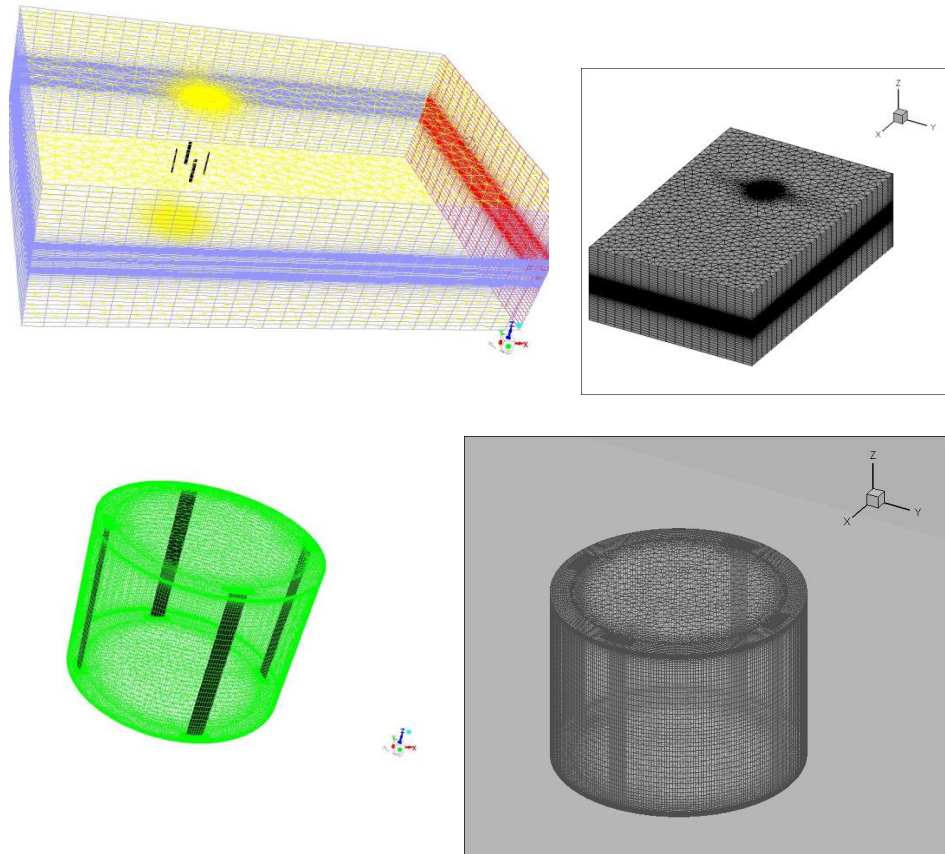


Fig. 2. Three dimensional computational grid  
شکل ۲: شبکه تولید شده سه بعدی

مومنوم، انرژی جنبشی آشفتگی<sup>۷</sup> و گسسته سازی نرخ پراکندگی ویژه<sup>۸</sup> از نوع بالادست مرتبه دوم<sup>۹</sup> به کار گرفته شده است. به منظور مطالعه استقلال از شبکه، نمودار ضریب توان بر حسب ضریب سرعت نوک برای شبکه‌های تولید شده در حل سه بعدی در شکل ۳ به نمایش گذاشته شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، نتایج ضریب توان برای شبکه‌های تولیدی، پروفیل یکسانی دارند اما برای شبکه‌های ریز و بسیار ریز نتایج به داده‌های تجربی [۱۵] بسیار نزدیک می‌باشد. لذا برای ادامه کار و با عطف به تعداد شبکه‌های تولیدی که تاثیر به سزایی در زمان حل دارند، شبکه ریز را ملاک قرار داده و مطالعات را بر اساس شبکه ریز ادامه داده‌ایم.

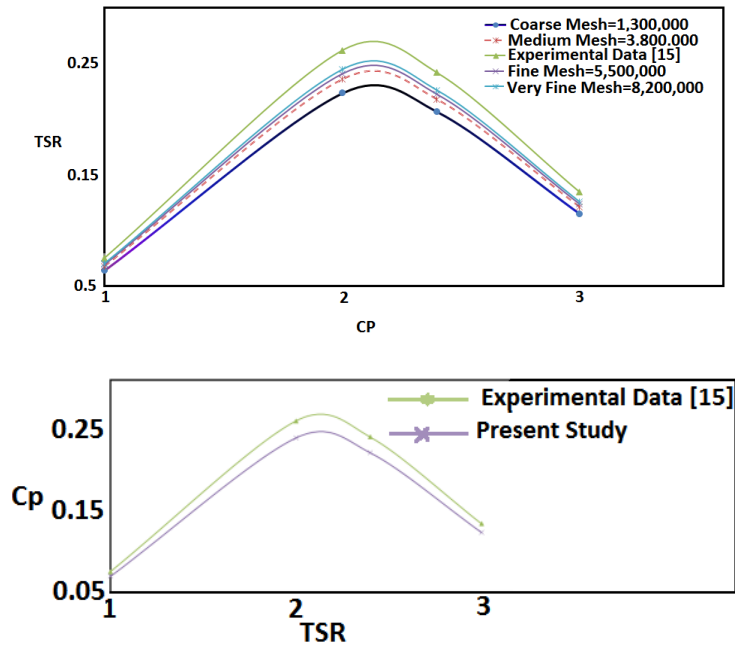
### ۳-۱- شبکه محاسباتی و اعتبار سنجی نتایج توربین باد:

برای شبیه‌سازی دو مدل مغشوش  $k-\epsilon$  واقعی شده و انتقال

تنش برشی<sup>۱</sup>  $k-\omega$  به‌منظور شبیه‌سازی استفاده شده است. شبکه در حالت دو بعدی حدود  $680,000$  سلول است. شبکه‌بندی در نزدیک دیواره ایرفویل به صورت سازمان یافته<sup>۲</sup> انجام شده است و در نزدیک دیواره به اندازه کافی ریز شده است تا  $y+$  حدود ۱ را برای دقت حل به خصوص در مدل توربولانس  $k-\omega$  ایجاد نماید. با فاصله گرفتن از ایرفویل به‌منظور سادگی، از شبکه مثلثی بی‌سازمان<sup>۳</sup> استفاده گردیده است. با فاصله گرفتن از بدنه، شبکه نیز درشت می‌شود. شبکه تولید شده در نمای دو بعدی در شکل ۱ و شبکه تولید شده در مدل سه بعدی در شکل ۲ به ترتیب آورده شده است. به منظور شبیه‌سازی، کوپلینگ فشار- سرعت<sup>۴</sup> در حلگر، از نوع ساده<sup>۵</sup> و گسسته‌سازی فشار از نوع پرستو<sup>۶</sup> انتخاب شده است. همچنین گسسته سازی

7 Turbulent Kinetic Energy Discritization  
8 Specific Dissipation Rate Discritization  
9 Second Order Upwind

1 Shear Stress Transport (SST)  
2 Structured Mesh  
3 Triangular unstructured mesh  
4 Pressure-Velocity Coupling Scheme  
5 Simple  
6 Presto



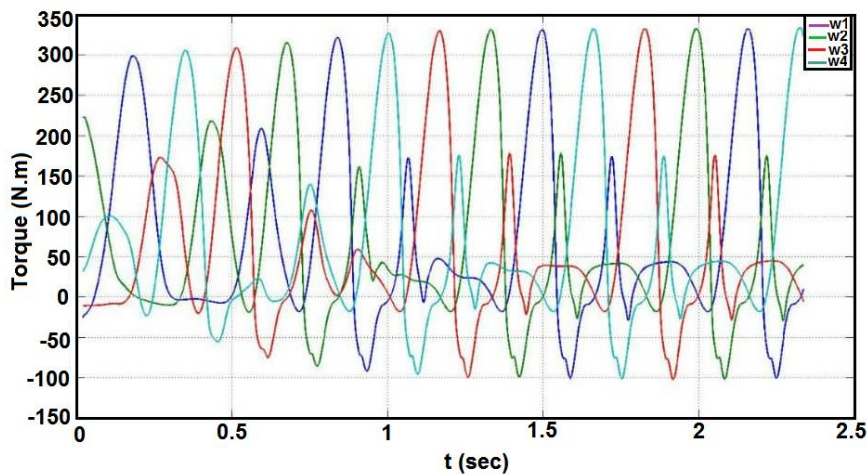
**Fig. 3. Power coefficient vs. Tip Speed Ratio (TSR) for different Mesh**  
 شکل ۳: ضریب توان بر حسب ضریب سرعت نوک برای شبکه‌های متفاوت

شکل ۷ مقایسه نتایج دو بعدی دو مدل  $k-\omega$  و  $k-\epsilon$  را نشان می‌دهد.

برای محاسبه مقادیر ضریب توان با به‌کارگیری نرم افزار متلب، از نتایج ضریب توان بر حسب زمان در یک سیکل زمانی، انتگرال‌گیری صورت گرفته است. برای هر دو مدل مغشوش در حالت دو بعدی با استفاده از بی بعدسازی به ترتیب به مقادیر  $0.24$  و  $0.31$  در مدل‌های  $k-\omega$  و  $k-\epsilon$  برای  $C_p$  می‌رسیم. مقدار تجربی  $C_p$  برابر با  $0.26$  است [۱۵]. شکل ۸ نتایج دو و سه بعدی برای مدل  $k-\epsilon$  را به‌صورت هم‌زمان نشان می‌دهد.

تنش برشی  $k-\omega$  به‌کار گرفته شده و همچنین برای بررسی دقیق از گام‌های زمانی مختلف استفاده شده است. در شکل ۴ نمودار گشتاور هر پره توربین ( $W$ ) بر حسب زمان در حالت دو بعدی نشان داده شده است. آنچه از شکل نیز مشخص است پس از گذشت یک زمان اولیه، نمودارها در یک سیکل تکرار می‌گردد.

شکل ۵ نشان دهنده نمودار هر پره بر حسب زمان در یک چرخش  $360^\circ$  درجه‌ای و شکل ۶ بر حسب زاویه  $\psi$  می‌باشد. همانگونه که انتظار می‌رود نمودار گشتاور برای هر چهار پره بر روی هم منطبق شده‌اند.



**Fig. 4. The 2D torque variation of each turbine blade vs. time**  
 شکل ۴: نمودار گشتاور هر پره بر حسب زمان

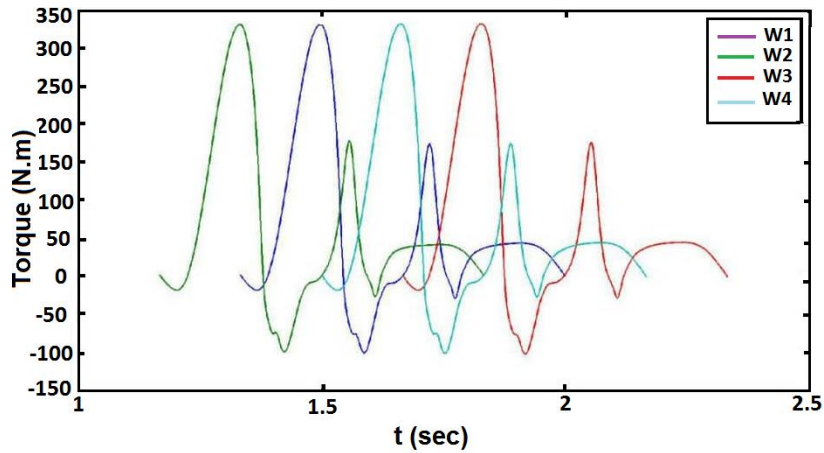


Fig. 5. Torque variation of each blade vs. time in a 360° rotation

شکل ۵: نمودار گشتاور هر پره بر حسب زمان

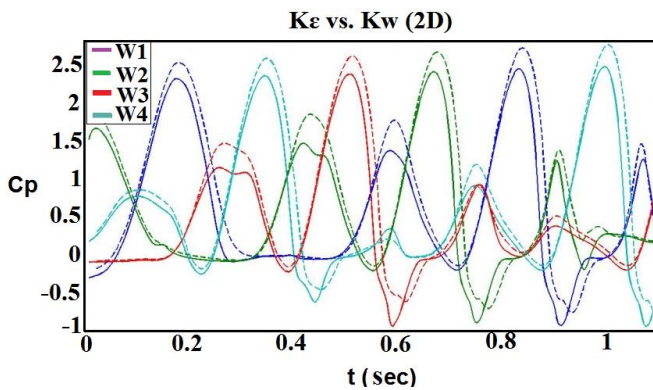


Fig. 7. The comparison of the results power coefficient vs. time between  $k-\epsilon$  and  $k-\omega$  for 2D

شکل ۷: مقایسه نتایج دو بعدی دو مدل  $k-\omega$  و  $k-\epsilon$

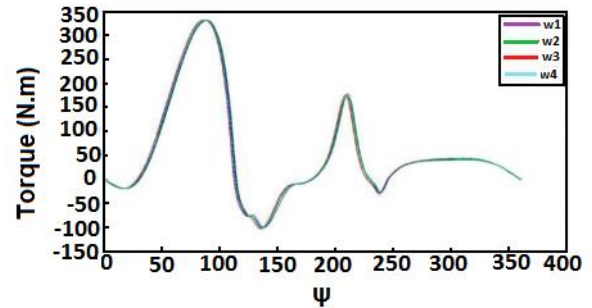


Fig. 6. Torque variation of each blade vs. azimuthal angle

شکل ۶: نمودار گشتاور هر پره بر حسب زاویه  $\psi$

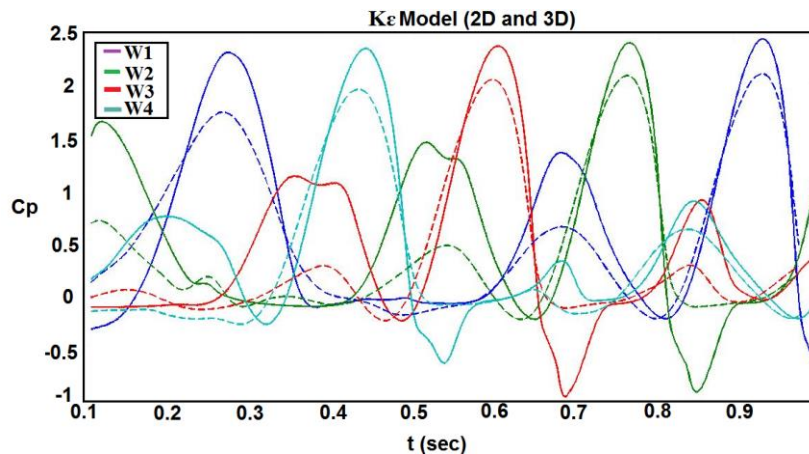


Fig. 8. The comparison of the results power coefficient vs. time between 2D and 3D for  $k-\epsilon$  model

شکل ۸: مقایسه نتایج دو بعدی و سه بعدی در مدل  $k-\epsilon$

در ادامه در شکل‌های ۹ تا ۱۲ کانتور سرعت و خط جریان در زمان‌های ۰/۵ و ۲ ثانیه برای شبیه‌سازی دوبعدی و در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ کانتور سرعت و خط جریان برای شبیه‌سازی سه بعدی ارائه

همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است اختلاف نتایج عددی با نتایج تجربی برای مدل  $k-\epsilon$  کمتر از ۸ درصد می‌باشد که نشان از دقت مدل‌سازی انجام شده دارد.

جدول ۲. مقایسه حل عددی و نتایج تجربی  
Table 2. Comparison of numerical and experimental results for  $C_p$

نتایج تجربی [۱۵]	نتایج عددی $(k-\epsilon)$	نتایج عددی $(k-\omega)$	مقدار $C_p$	حل دوبعدی
۰/۲۶۱	۰/۲۴	۰/۳۱		
۰/۲۶۱	۰/۲۵	-		

تغییرات ایجاد شده در پره دوم سبب ایجاد تاثیرات چشمگیر در پایین دست خود شده و سبب ساز جدایش و ایجاد گردابه بر روی پره سوم می‌گردد.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب کانتور سرعت ناپایای سه بعدی و خط جریان گذرنده از صفحه میانی پره‌ها در حالت ناپایای بدون پلازما را نشان می‌دهند. همانگونه که خط جریان به دست آمده نشان

شده است.

همانگونه که در شکل ۹ واضح است، پره‌های توربین نقاط جدایش را تجربه می‌کنند و با چرخش بیشتر و در ثانیه دوم این جدایش بر روی سطح ایرفویل پره‌ها مشخص‌تر و نمایان‌تر می‌باشد. همچنین در چرخش و دوران پره‌ها از زمان ۰/۵ تا ۲ ثانیه، گردابه‌های ایجاد شده در خطوط جریان را می‌توان مشاهده نمود. قابل ذکر است که

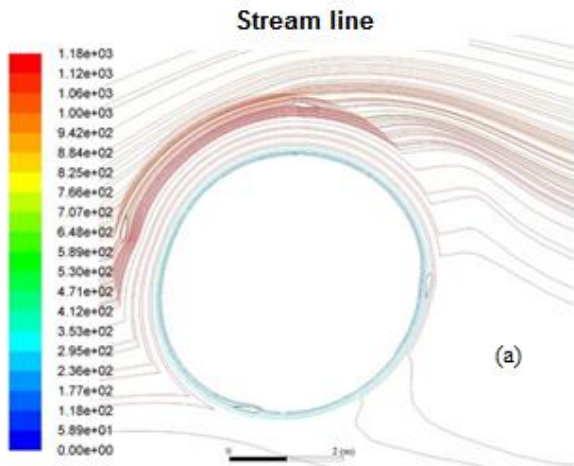


Fig. 11. 2D stream line around of turbine at  $t=0.5$  s  
شکل ۱۱: خط جریان در زمان ۰/۵ ثانیه

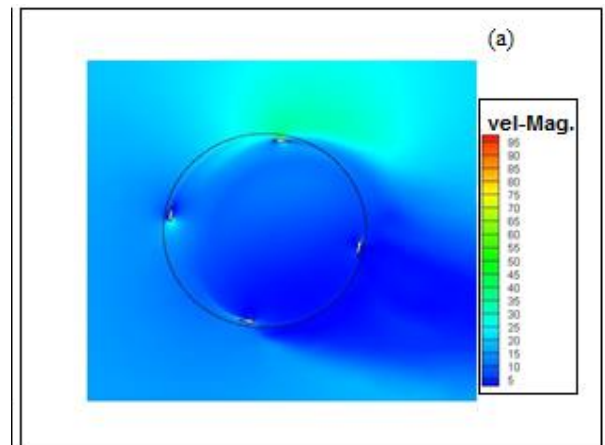


Fig. 9. 2D velocity magnitude around of turbine at  $t=0.5$  s  
شکل ۹: کانتور سرعت حول توربین در زمان ۰/۵ ثانیه در حالت غیر پایا

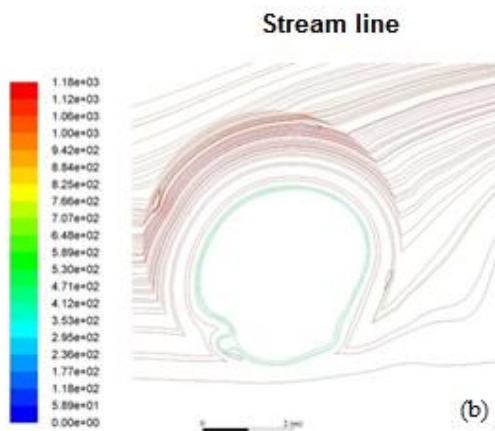


Fig. 12. 2D stream line around of turbine at  $t=2$  s  
شکل ۱۲: خط جریان در زمان ۲ ثانیه

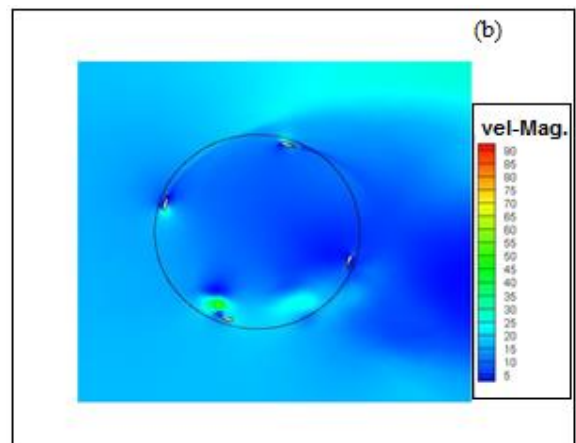


Fig. 10. 2D velocity magnitude around of turbine at  $t=2$  s  
شکل ۱۰: کانتور سرعت حول توربین در زمان ۲ ثانیه



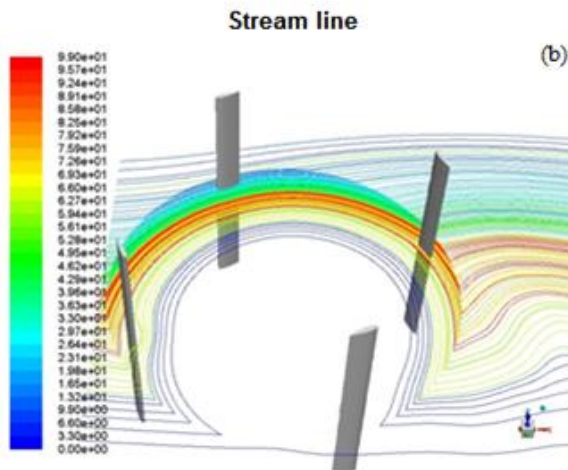


Fig. 14. 3D stream line around of turbine without plasma actuator

شکل ۱۴. خط جریان سه بعدی عبوری از صفحه میانی پره در حالت غیر پایا و بدون پلاسما

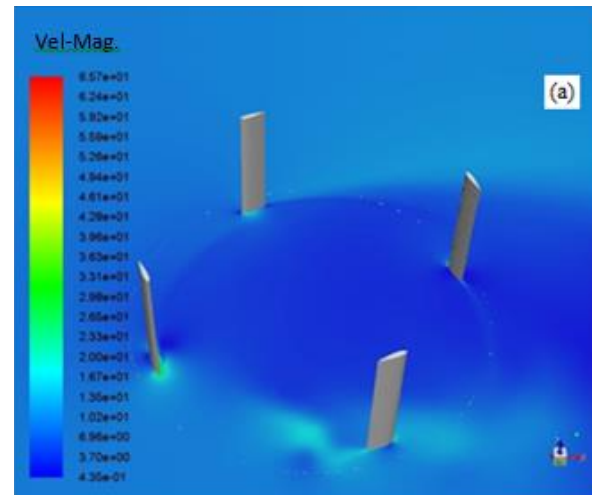


Fig. 13. 3D velocity contour around of turbine without plasma actuator

شکل ۱۳: کانتور سرعت غیر پایا سه بعدی در حالت بدون پلاسما

عملگر پلاسمایی استفاده می‌کنند که مقدار آن به اندازه الکترودها، فرکانس، ولتاژ ورودی عملگر و برخی خواص ثابت هوا بستگی دارد. اورلو و همکاران<sup>[۱۸]</sup>، مدل دقیق دیگری جهت مدل‌سازی عملگر پلاسمایی ارائه کردند که وابستگی زمانی نیروی حجمی در طول چرخه را با دقت بالاتری شبیه‌سازی می‌کنند. برای این منظور آن‌ها ناحیه فوقانی سطح دی الکتریک را بر یک شبکه مدارهای الکتریکی تقسیم‌بندی نمودند تا بدین وسیله بتوانند توزیع پتانسیل الکتریکی در امتداد سطح فوقانی الکتروود پوشیده شده را در هر گام زمانی چرخه محاسبه کنند. شایان ذکر است که هر اندازه پیچیدگی این مدل‌ها افزایش یابد، تاثیرات عملگر پلاسمایی بر روی جریان با دقت بیشتری مدل‌سازی می‌شود. سوزن و همکاران<sup>[۱۹]</sup> مدلی پیچیده‌تر و در سطحی بالاتر ارائه کردند که در آن به کمک حل توزیع فضایی پتانسیل الکتریکی و چگالی بار در اطراف عملگر که به عنوان تابعی از مقدار ولتاژ ورودی عملگر، هندسه و خواص ماده دی الکتریک تعریف می‌شوند، توزیع نیروی حاصل از عملگر، به صورت واقع بینانه‌تری مدل‌سازی می‌شود. به این ترتیب دامنه لحظه‌ای بردارهای نیروی حجمی با توجه به نوع ولتاژ ورودی تغییر می‌کند تا تغییرات توزیع نیرو بر حسب زمان حاصل شود.

عملگرهای پلاسما به وسیله یک جفت الکتروود که توسط یک ماده عایق الکتریکی از هم جدا می‌شوند، شکل می‌گیرند. در نوعی

می‌دهد، پره دوم جدایش را تجربه می‌کند. همچنین گردابه‌های ایجاد شده مابین پره‌های دوم و سوم را می‌توان به وضوح در شکل ۱۳ مشاهده کرد. لازم به ذکر است دلیل اصلی شکستگی خطوط جریان به علت شرط مرزی واسط می‌باشد. علاوه بر آن علت دیگر را می‌توان جریان اصلی دانست که بیرون مرز دایره حرکت می‌کند و یک جریان ثانویه در همین ناحیه حول خود می‌چرخد. لذا نظر به اینکه شرط مرزی واسط یک سری خطای عددی را تولید می‌کند و همچنین با توجه به لغزیدن شبکه‌ها نسبت به هم، چنین پدیده‌ای قابل انتظار می‌باشد. همانگونه که می‌توان انتظار داشت، پره‌های توربین باد به دلیل ماهیت و تجربه کردن زوایای حمله متفاوت در یک دور کامل، جدایش را تجربه خواهند کرد. جدایش بر روی هر پره سبب تاثیر بر روی میدان و الگوی جریان بر روی پره‌های دیگر می‌شود.

#### ۴- معادلات حاکم بر عملگر پلاسما

چگونگی مدل‌سازی تاثیر عملگر پلاسمایی بر روی جریان عبوری کماکان یک چالش به شمار می‌رود. به همین دلیل تاکنون مدل‌های متفاوتی جهت شبیه‌سازی تاثیر عملگر بر جریان پیرامون آن مطرح شده است.

ساده‌ترین مدل، مدل شای و همکاران<sup>[۱۷]</sup> از یک توزیع خطی متوسط زمانی جهت شبیه‌سازی برداری نیروی حجمی حاصل از

2 Orlov et al.

3 Suzen et al

1 Shyy et al.



فضای آزاد مساوی با  $12 \text{ N.m}^2/\text{C}^2 - 10 \times 8/854 \times \epsilon_0$  می‌باشد. با این شرایط مکانیزم فیزیکی عملگر پلاسما و نحوه اثر آن بر روی جریان اطراف آن می‌بایست به طور کامل روشن شود. روشن است که نیروی بدنه توسعه داده شده به وسیله رابطه (۱) اثر زیادی بر روی میدان جریان دارد. اما اثر افزایش دمای موضعی و کاهش ویسکوزیته روی لایه مرزی روشن نیست. از آنجا که تنش ویسکوز باید ثابت بماند، این موارد منجر به افزایش سرعت در ناحیه پلاسما از طریق کاهش تنش برشی می‌شود [۲۰]. اما اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی که اخیراً توسط محققان صورت گرفته، ثابت کرده است که چنین اتفاقی رخ نخواهد داد [۲۱]، بلکه ناحیه پلاسما بیشتر شبیه یک ترم منبع در رابطه ممنتوم اثر می‌کند:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U}\vec{U}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \vec{U}) = -\frac{1}{\rho} (\nabla p - \vec{f}_B) = -\frac{1}{\rho} (\nabla p + \rho_c \vec{\nabla} \Phi) \quad (5)$$

همانطور که از رابطه (۵) مشخص است نیروی الکترودینامیکی و گرادیان فشار هر دو به سان ترم‌های منبع در رابطه ممنتوم اثر می‌کنند.

#### ۴-۱- شبکه محاسباتی و اعتبار سنجی نتایج عملگر پلاسما:

شبکه محاسباتی و شبکه در اطراف و نزدیک الکترودهای عملگر در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. به منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی عملگر پلاسما، مشخصات

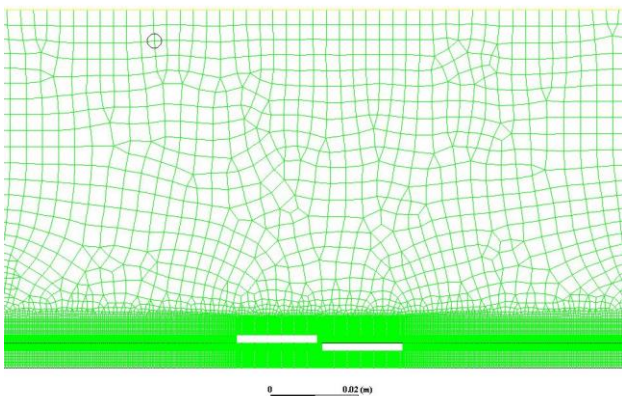


Fig. 15. Computational grid around of electrodes  
شکل ۱۵: شبکه در اطراف الکترودها

از پیکربندی الکترودها، یکی از الکترودها در تماس با محیط و الکتروود دیگر در زیر ماده عایق جای‌گذاری می‌شوند. در نوع دیگری از پیکربندی، هر دو الکتروود در تماس با محیط قرار می‌گیرند (مانند فیلترهای الکترواستاتیک). وقتی که یک ولتاژ متناوب زیاد به الکترودها اعمال می‌شود، هوا در مجاورت آن‌ها (معمولاً بالای الکتروود متصل به زمین) یونیزه می‌شود. هوای یونیزه شده در حضور میدان الکتریکی تولید شده به وسیله الکترودها تحت اثر یک نیروی بدنه برداری قرار می‌گیرد که این نیرو در معادلات ممنتوم باعث ایجاد مؤلفه‌های سرعت پایا یا ناپایا می‌گردد. چنین نیرویی می‌تواند به صورت ترم‌های ولتاژ اعمال شده و چگالی بار تولیدی بیان شده و در معادلات ناویر-استوکس<sup>۱</sup> ادغام شود. با صرف‌نظر از نیروهای مغناطیسی، نیروی الکتروهایدرودینامیکی حاصل به صورت زیر قابل بیان است:

$$\vec{f}_B = \rho_c \vec{E} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $f_B$  نیروی بدنه در واحد حجم،  $p_c$  چگالی بار خالص و  $E$  میدان الکتریکی است. در محیط پلاسما تغییرات زمانی میدان مغناطیسی اغلب قابل صرف‌نظر می‌باشد. این امر منجر به این می‌شود که رابطه ماکسول<sup>۲</sup> به صورت  $\nabla \times E \approx 0$  ساده شود [۱۹]. در نتیجه می‌توان میدان الکتریکی را با استفاده از گرادیان پتانسیل اسکالر استخراج نمود:

$$\vec{E} = -\nabla \Phi \quad (2)$$

با استفاده از قانون گاوس می‌توان نوشت:

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_c \text{ or } \nabla \cdot (\epsilon \nabla \Phi) = -\rho_c \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $\epsilon$  ضریب نفوذپذیری الکتریکی می‌باشد که به صورت زیر قابل بیان است:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (4)$$

که  $\epsilon_r$  ضریب نفوذپذیری نسبی محیط و  $\epsilon_0$  ضریب نفوذپذیری

1 Novier-Stokes  
2 Maxwell

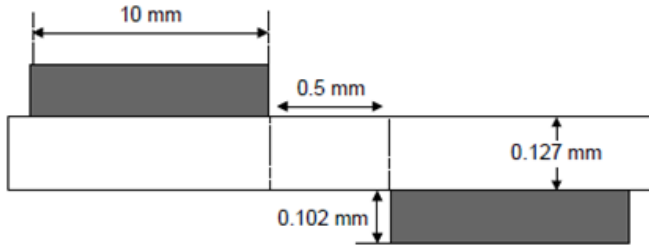


Fig. 17. Computational set up and details of the plasma actuator

شکل ۱۷: مشخصات و فواصل در حل پلاسما

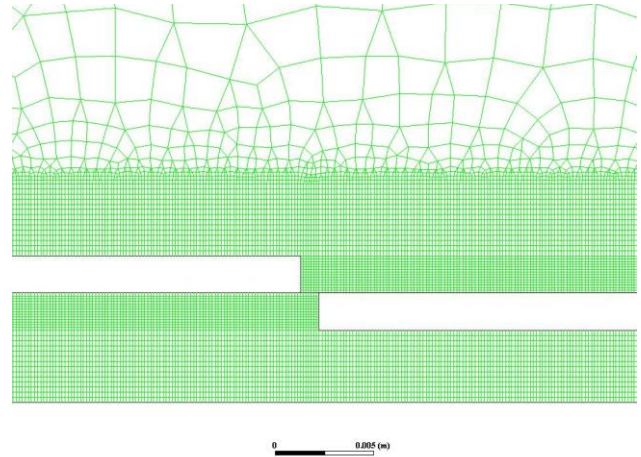


Fig. 16. Computational grid around of electrodes

شکل ۱۶: نمایی از شبکه نزدیک الکترودها

نشان داده شده است.

همانطور که در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ مشاهده می‌شود خطوط چگالی بار، نیروی حجمی و خطوط پتانسیل الکتریکی مقادیر و روند مشابهی را طی می‌کنند. همچنین شکل ۲۱ جریان جت حاصل از عملگر در داخل جریان ساکن را نشان می‌دهد که حاکی از دقت بالای شبیه‌سازی است. برای به‌دست دادن معیاری کمی جهت

و فواصل عملگر مطابق شکل ۱۷ مطابق مرجع [۱۹] انتخاب و مدل‌سازی انجام گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملگر پلاسما و مقایسه آن با مدل سوزن و همکاران [۱۹] در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱

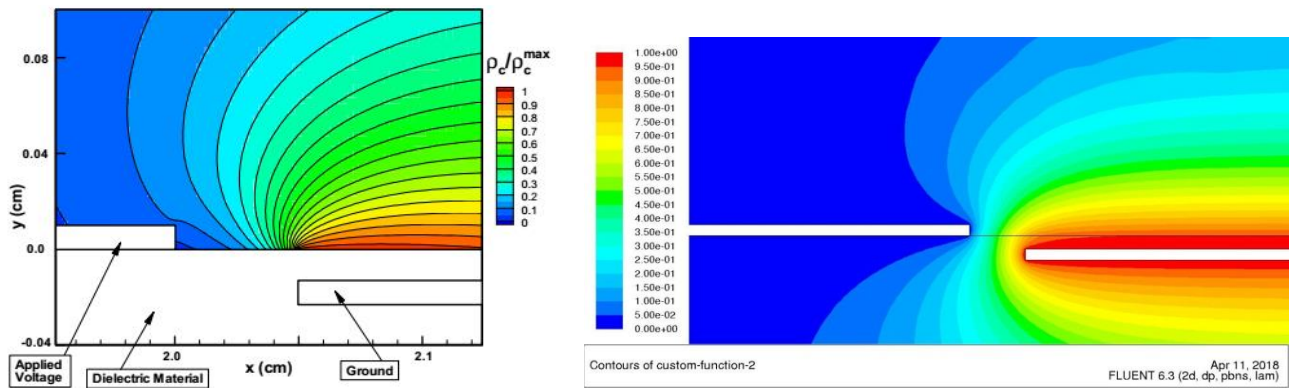


Fig. 18. The comparison of distributions of the net charge density around electrodes between the current model (right side) and reference model [19] (left side)

شکل ۱۸: مقایسه کانتور چگالی بار شبیه‌سازی صورت گرفته (سمت راست) با مدل مرجع [۱۹] (سمت چپ)

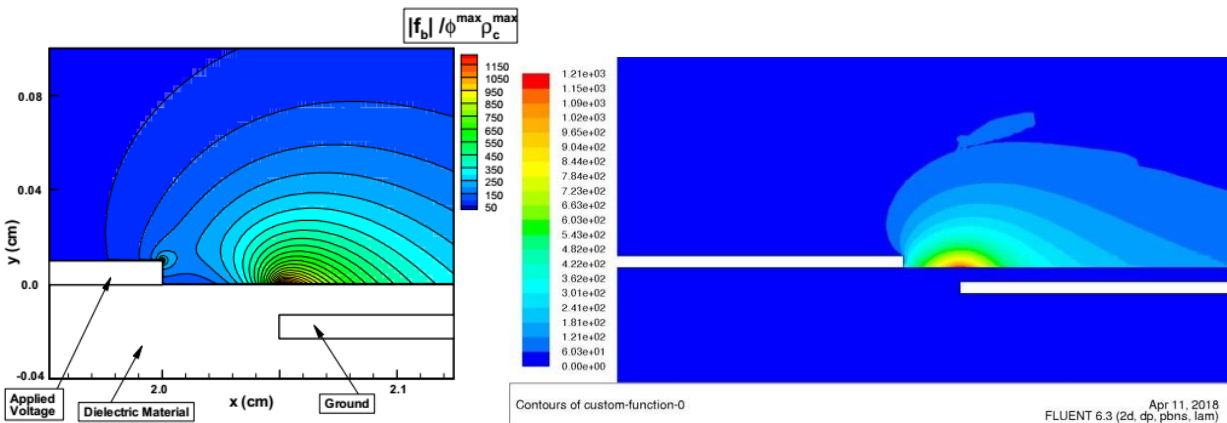


Fig. 19. The comparison of distributions of the body force around electrodes between the current model (right side) and reference model [19] (left side)

شکل ۱۹: مقایسه کانتور اندازه نیروی حجمی شبیه‌سازی صورت گرفته (سمت راست) با مدل مرجع [۱۹] (سمت چپ)

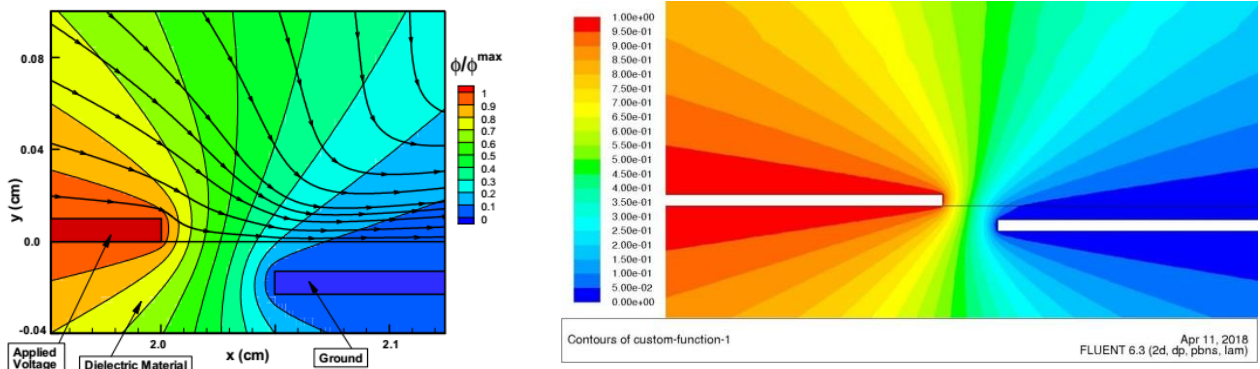


Fig. 20. The comparison of distributions of the electric potential around electrodes between the current model (right side) and reference model [19] (left side)

شکل ۲۰: مقایسه کانتور پتانسیل الکتریکی و خطوط جریان شبیه‌سازی صورت گرفته (سمت راست) با مدل مرجع [۱۹] (سمت چپ)

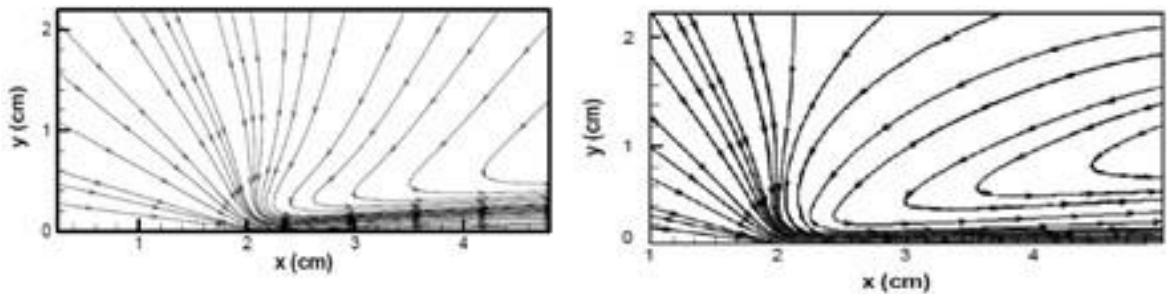


Fig. 21. The comparison of distributions of streamlines for the plasma actuator in quiescent flow between the current model (right side) and reference model [19] (left side)

شکل ۲۱: مقایسه خطوط جریان عملگر در جریان هوای ساکن شبیه‌سازی انجام گرفته (سمت راست) و مدل مرجع [۱۹] (سمت چپ)

بر روی ایرفویل به تنهایی مشاهده گردد و در صورت کنترل جدایش و موثر بودن، آن را بر روی توربین اعمال نماییم. سپس در بخش ۵-۲ اثرات عملگر پلاسما را بر روی توربین باد به‌طور کلی مورد تدقیق دقیق قرار دادیم. همچنین جهت اعمال عملگر پلاسما در نرم افزار کد یودی اف با قابلیت محاسبه اندازه میدان الکتریکی و چگالی بار که منتج به محاسبه نیروی حجمی القاء شده می‌باشد، نوشته و اعمال گردید.

اعتبارسنجی، باید ماکزیمم سرعت القایی توسط عملگر را با مقدار مرجع سنجدید. ماکزیمم سرعت القایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی حاضر برابر با ۱ متر بر ثانیه می‌باشد که عینا مطابق با نتیجه به‌دست آمده توسط مدل سوزن و همکاران [۱۹] می‌باشد.

#### ۵- نتایج اعمال عملگر بر روی توربین باد:

به منظور بررسی دقیق، در بخش ۵-۱ ابتدا چندین عملگر پلاسما بر روی ایرفویل نصب و مدل‌سازی جریان انجام گرفت تا نتایج عملگر

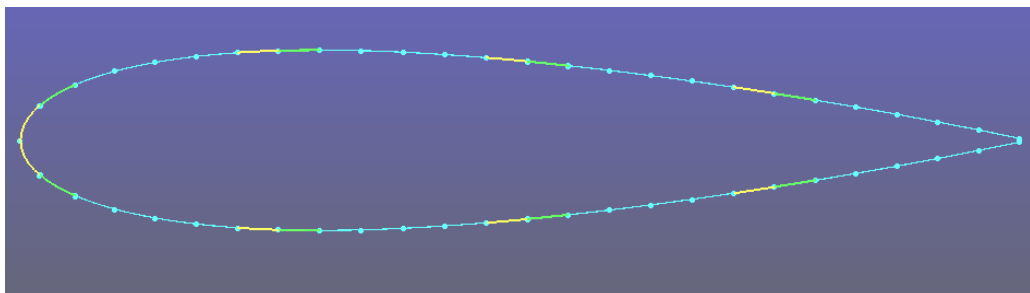


Fig. 22. Location of plasma actuators on blade

شکل ۲۲: شیوه چینش الکترودها بر روی ایرفویل

ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است.

همانگونه که پیشتر و در مقدمه بیان شد، نکته حائز اهمیت این است که تعدد عملگر سبب افزایش سرعت القایی و در نتیجه افزایش نیروی حجمی می‌شود. برای اثبات این مهم، شبیه‌سازی با چندین عملگر صورت پذیرفت و نتایج آن با نتایج تجربی فورث و همکارانش [۲۲] در شکل ۲۷ مقایسه گردید.

جهت مشاهده تاثیر عملگر به صورت مبرهن، اعمال آن بر روی ایرفویل در زاویه حمله ۲۰ درجه در شکل‌های ۲۸ و ۲۹ نشان داده شده است.

همانگونه که از مقایسه شکل‌های ۲۸ و ۲۹ مشهود است، عملگر بر روی کانتور سرعت و کنترل جدایش بر سطح ایرفویل تأثیر مثبت دارد. در ادامه به منظور اینکه بتوانیم مقیاس کمی جهت نتیجه‌گیری در اختیار داشته باشیم و اثرات عملگر را بهتر بررسی نماییم، نمودار ضریب برآ و پسا در شکل ۳۰ آورده شده است. همانگونه که از نمودارها کاملاً مشهود است، عملگرهای پلاسما زمانی که فعال می‌شوند سبب افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا می‌شوند.

آنچه در این شکل‌ها مبرهن است در زاویه حمله ۲۰ درجه که جدایش روی ایرفویل رخ می‌دهد، عملگرها تأثیر بسزایی در کنترل جدایش و در نتیجه افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا دارند.

#### ۵-۲- نتایج حاصل از اعمال عملگر بر روی توربین باد با چیدمان چندین عملگر پلاسما:

به منظور حل سه بعدی توربین باد از روش  $k-\epsilon$  واقعی شده استفاده شده است. اطلاعات و شرایط انتخاب شده برای حل در جدول ۵ آمده است.

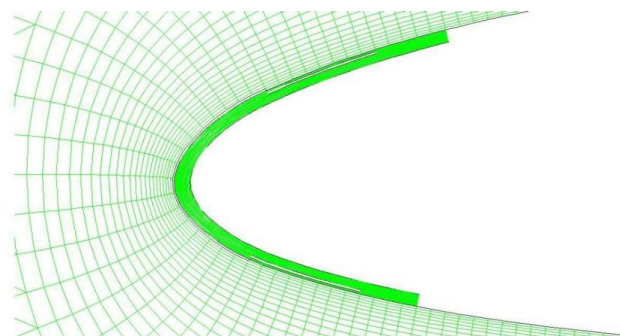


Fig. 23. Computational grid and location of plasma actuators on angle of attack

شکل ۲۳: شبکه محاسباتی و محل قرارگیری عملگرهای پلاسمایی بر روی لبه حمله ایرفویل

#### ۵-۱- نتایج حاصل از اعمال عملگر بر روی ایرفویل با چیدمان چندین عملگر پلاسما:

۵-۱-۱- نحوه جای‌گذاری عملگر بر روی ایرفویل توربین باد: در شکل ۲۲ نحوه قرارگیری عملگرهای پلاسمایی نشان داده شده است. در این شکل الکترودهای کاتد با رنگ زرد و الکترودهای آنود با رنگ سبز مشخص شده است. همچنین شکل ۲۳ شبکه محاسباتی عملگر را نشان می‌دهد.

مشخصات عملگرهای پلاسمایی و جریان حول ایرفویل توربین به

جدول ۳. مشخصات عملگر پلاسمایی

Table 3. Properties of plasma actuators

واحد	مقدار	مشخصات عملگر
Volt	۱۰۰۰	پتانسیل بیشینه
C/m <sup>3</sup>	۰/۰۲	چگالی بار بیشینه
m	۰/۰۰۱	طول دبای

جدول ۴. مشخصات جریان بر روی ایرفویل توربین باد

Table 4. Properties of flow on airfoil of wind turbine

واحد	مقدار	مشخصات جریان ایرفویل
m/s	۱۲	سرعت ( $U$ )
m	۰/۴۴۵۱۳	طول کورد ( $C$ )
kg/m <sup>3</sup>	۱/۲۲۵	چگالی هوا ( $\rho$ )
kg/m.s	$1/7894 \times 10^{-5}$	ویسکوزیته هوا ( $\mu$ )
-	$3/657 \times 10^{-5}$	عدد رینولدز ( $Re$ )



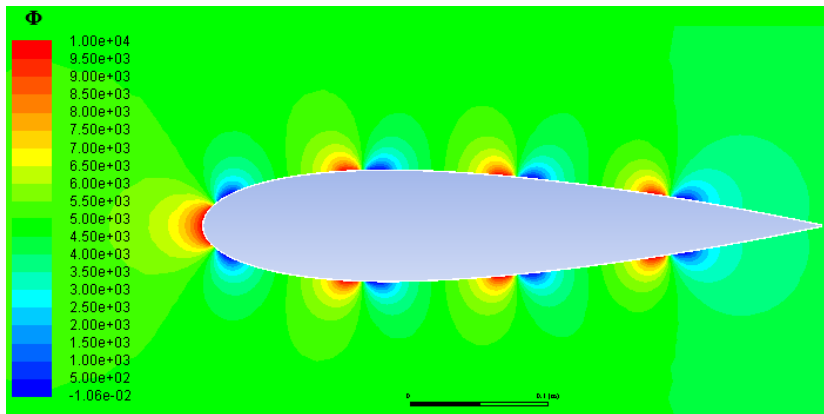


Fig. 24. Electric potential contours in the vicinity of the blades

شکل ۲۴: کانتور پتانسیل الکتریکی

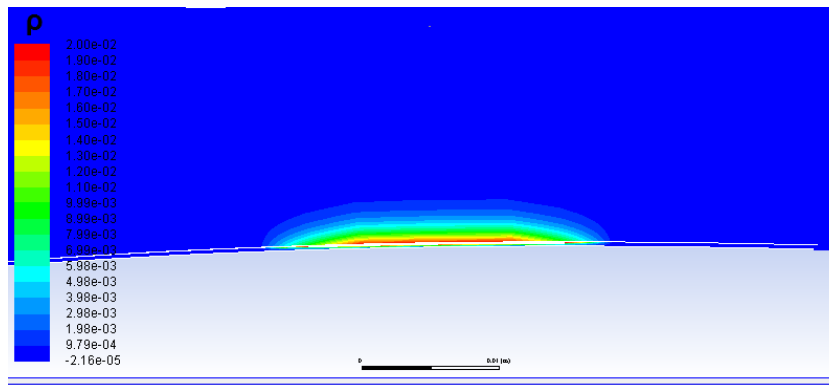


Fig. 25. The net charge density the vicinity of the airfoil

شکل ۲۵: کانتور چگالی بار الکتریکی نزدیک دیواره ایرفویل

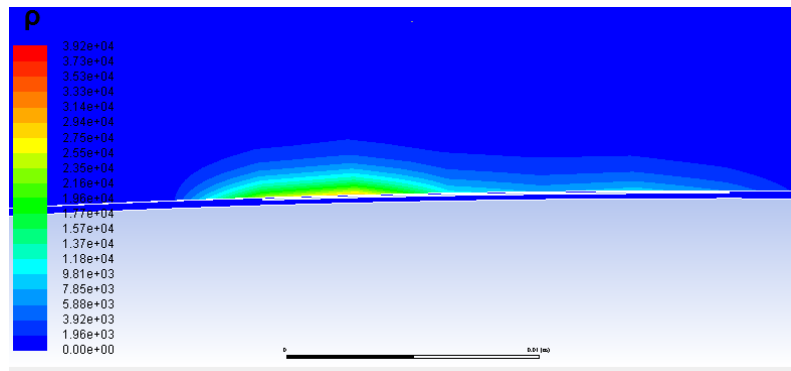


Fig. 26. The net charge density on the airfoil

شکل ۲۶: نیروی حجمی تولید شده بر روی ایرفویل از طریق پلاسما

سبب افزایش گشتاور تولیدی توربین باد شده است. نکته‌ی حائز اهمیت در این شکل‌ها این است که نظر به چرخش ۳۶۰ درجه‌ای پره، عملگر عملا در نیمه بالایی یعنی از زاویه صفر تا ۱۸۰ درجه تاثیر مطلوب و بیشینه اثر خود را دارد اما در نیمه دوم که زاویه پره تغییر می‌کند و عملگر اثر خود را از دست خواهد داد. با این وجود اگر از تمام نمودار نسبت به زمان انتگرالگیری نماییم، نشان میدهد توان

نتایج نهایی اعمال عملگر پلاسما بر روی توربین باد و افزایش گشتاور تولیدی توربین در شکل‌های ۳۱ و ۳۲ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل‌ها مشخص است، حضور عملگر پلاسما سبب افزایش گشتاور تولیدی و در نتیجه توان توربین باد به میزان ۳ درصد شده است. همانطور که از این شکل‌ها مشخص است، حضور عملگر پلاسما

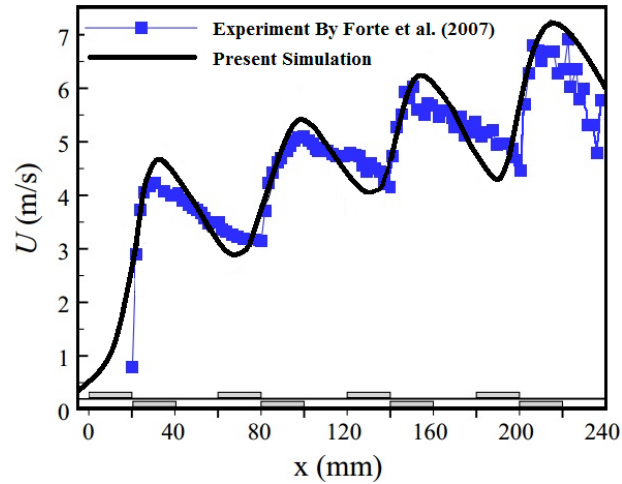


Fig. 27. The comparison between numerical solution and experimental result for multiple plasma actuator [22]  
 شکل ۲۷: مقایسه حل عددی و نتایج تجربی برای تعدد عملگر پلاسمایی [۲۲]

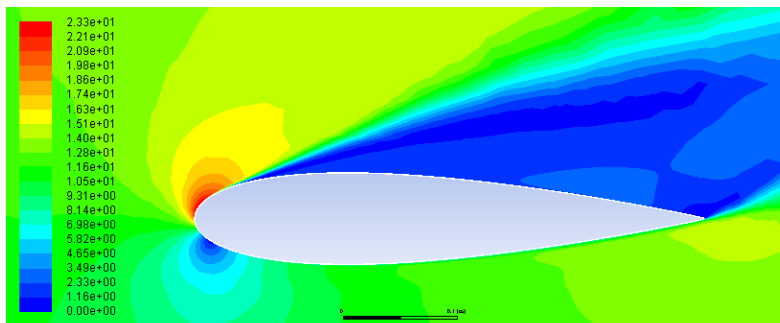


Fig. 28. Velocity contour at 20 degrees angle of attack without plasma actuator  
 شکل ۲۸: کانتور سرعت در زاویه حمله ۲۰ درجه بدون اعمال عملگر پلازما

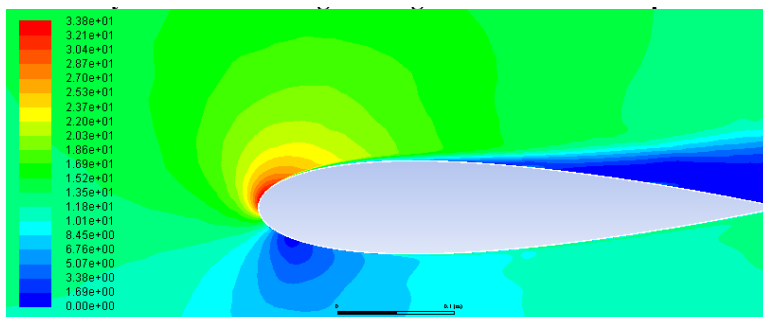


Fig. 29. Velocity contour at 20 degrees angle of attack with plasma actuator  
 شکل ۲۹: کانتور سرعت در زاویه حمله ۲۰ درجه با اعمال عملگر پلازما

#### ۶- نتیجه گیری:

در این پژوهش، امکان استفاده از عملگر پلازما به عنوان ابزاری جهت کنترل فعال جریان بر روی توربین باد محور عمودی با مقیاس واقعی مدل  $G = 530$  و افزایش توان خروجی آن بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا عملگر پلاسمایی بر روی یک صفحه تخت که در

خروجی توربین باد به میزان ۳ درصد افزایش یافته است که با نظر به ابعاد و شرایط واقعی کاری، نتیجه‌ی بسیار مطلوب و دارای اهمیتی می‌باشد.

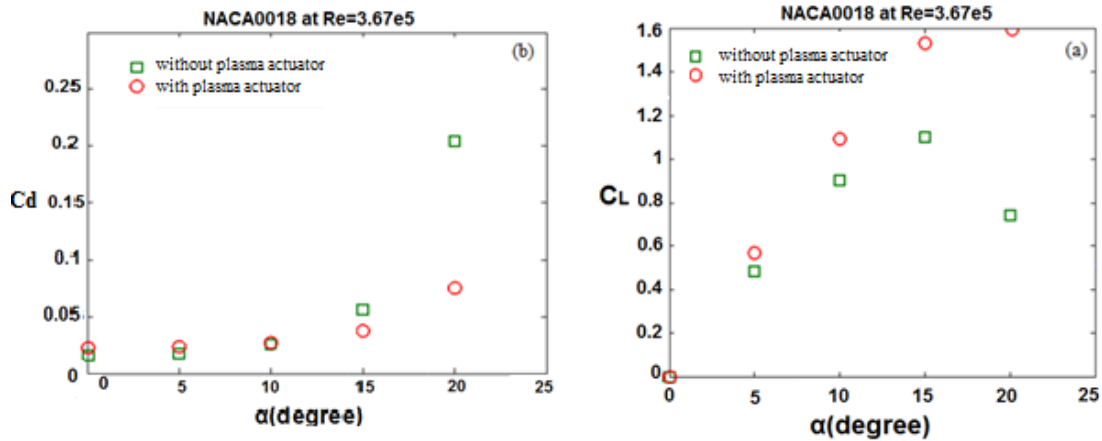


Fig. 30. Drag and lift coefficient vs. angles of attack with and without the plasma actuators

شکل ۳۰: تغییرات ضریب پسا و برآ با و بدون اعمال عملگر پلاسمایی

جدول ۵. شرایط انتخاب شده برای حل توربین باد

Table 5. Properties of flow

واحد	مقدار	شرایط جریان
m/s	۱۲/۷۱۱۹	سرعت ( $U$ )
kg/m <sup>3</sup>	۱/۱۷۷۴	چگالی هوا ( $\rho$ )
kg/m.s	$5/7 \times 10^{-5}$	ویسکوزیته هوا ( $\mu$ )
rpm	۹۰	سرعت دورانی ( $\omega$ )

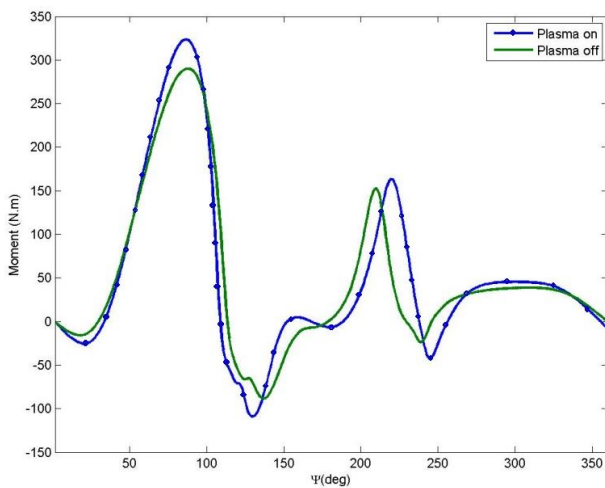


Fig. 32. Torque variation vs. azimuthal angle with and without plasma actuator

شکل ۳۲: مقایسه گشتاور تولید شده بر حسب زمان در حالت با و بدون عملگر پلازما در یک بازه زمانی

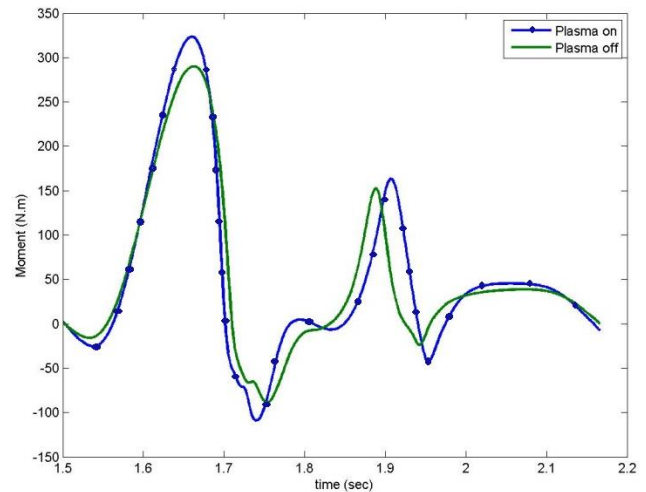


Fig. 31. Torque variation vs. time with and without plasma actuator

شکل ۳۱: مقایسه گشتاور تولید شده بر حسب زمان در حالت با و بدون عملگر پلازما در یک بازه زمانی

درون سطح پره‌های توربین برای نخستین بار به کار گرفته شد و عملگر درون سطح پره قرار گرفت. توربین باد ابعاد واقعی  $530\text{ G}$  بصورت دو بعدی و سه بعدی شبیه‌سازی و با نتایج تجربی اعتبارسنجی گردید. برای حل دوبعدی توربین باد از دو روش  $k-\epsilon$  واقعی شده و  $k-\omega$

شرایط هوای ساکن قرار دارد، شبیه‌سازی شده و اثر عملگر بر هوای ساکن با نتایج مدل مرجع مقایسه و اعتبارسنجی گردید. سپس به منظور کاربرد عملگر بر روی توربین باد و به دلیل حساسیت جریان و تاثیر نامطلوب حضور عملگر بر روی سطح پره‌ها، ایده‌ی اعمال آن

- [2] C. Van Dam, D.E. Berg, S.J. Johnson, Active load control techniques for wind turbines, Sandia National Laboratories, University of California, USA, (2008).
- [3] S.J. Johnson, J.P. Baker, C. VanDam, D. Berg, An overview of active load control techniques for wind turbines with an emphasis on microtabs, *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 13(2-3) (2010) 239-253.
- [4] A. Ebrahimi, M. Movahhedi, Wind turbine power improvement utilizing passive flow control with microtab, *Energy (elsevier)*, 150 (2018) 575-582.
- [5] M. Malik, L. Weinstein, M. Hussaini, Ion wind drag reduction, in: 21st Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, U.S.A., )1983( 231.
- [6] S. Grundmann, S. Klumpp, C. Tropea, Experimental and numerical investigations of boundary-layer influence using plasma-actuators, *Active Flow Control*, Springer, )2007( 56-68.
- [7] D. Orlov, T. Apker, C. He, H. Othman, T. Corke, Modeling and experiment of leading edge separation control using SDBD plasma actuators, in: 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, U.S.A., )2007( 877.
- [8] R. Sosa, G. Artana, E. Moreau, G. Touchard, Stall control at high angle of attack with plasma sheet actuators, *Exp Fluids*, 42(1) (2007) 143-167.
- [9] R. Nelson, T. Corke, H. Othman, M. Patel, S. Vasudevan, T. Ng, A smart wind turbine blade using distributed plasma actuators for improved performance, in: 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, U.S.A., )2008( 1312.
- [10] D. Greenblatt, M. Schulman, A. Ben-Harav, Vertical axis wind turbine performance enhancement using plasma actuators, *Renewable Energy*, Elsevier, 37(1) (2012) 345-354.
- [11] M. Kotsonis, R. Pul, L.L. Veldhuis, Experimental study on airfoil circulation control using plasma actuators, in: 31st AIAA Applied Aerodynamics Conference, San Diego, CA, )2013( 3164.
- [12] H. Aono, T. Nonomura, M. Sato, A. Yakeno, K. Okada, Y. Abe, K. Fujii, Flow control using a DBD plasma actuator for horizontal-axis wind turbine blades of simple experimental model, in: The 11th World Congress on

استفاده شد که پس از مقایسه با نتایج تجربی و با توجه به اینکه روش  $k-\epsilon$  واقعی شده نتایج بهتری را به دست می‌داد، در حل سه بعدی از این روش استفاده شد. در ادامه به دلیل ابعاد واقعی توربین باد عملگرها به صورت متوالی شبیه‌سازی و درون سطح ایرفویل توربین قرار داده شدند. ابتدا نتایج بر روی ایرفویل توربین به تنهایی و سپس بر روی تمام پره‌های توربین به صورت متوالی بررسی شد. نتایج نشان داد اعمال عملگر درون سطح هندسه‌ی مورد بررسی علاوه بر اینکه تاثیری در کارایی عملگر نخواهد داشت، سبب جلوگیری از اثرات منفی عملگر بر روی سطح خواهد شد. همچنین عملگر پلاسما سبب تغییر الگوی جریان بر روی پره‌ی توربین باد واقعی شده و در نتیجه گشتاور تولیدی و در نهایت توان خروجی به میزان ۳ درصد افزایش می‌یابد. آنچه حائز اهمیت می‌باشد این است که توان در یک توربین بادی محور عمودی مقیاس واقعی با کنترل جدایش جریان با استفاده از تکنولوژی عملگر پلاسما می‌تواند افزایش یابد.

## فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$N$	تعداد پره توربین باد
$D$	قطر روتور، m
$P$	فشار، $N/m^2$
$C$	وتر پره، m
$Re$	عدد رینولدز
$E$	بردار میدان الکتریکی، V/m
$f_B$	نیروی حجمی در واحد حجم، $N/m^3$
$C_L$	ضریب برآ
$C_D$	ضریب پسا

### علائم یونانی

$\rho$	چگالی هوا، $kg/m^3$
$\rho_c$	چگالی بار الکتریکی، $C/m^3$
$\phi$	پتانسیل الکتریکی، V
$\lambda_d$	طول دباب، m
$\epsilon$	ضریب نفوذپذیری الکتریکی، $C^2/N.m^2$
$\epsilon_r$	ضریب نفوذپذیری نسبی محیط، $C^2/N.m^2$
$\epsilon_0$	ضریب نفوذپذیری فضای آزاد، $C^2/N.m^2$
$\omega$	سرعت دورانی توربین، rpm
$\mu$	ویسکوزیته هوا، Pa.s

## مراجع:

- [1] W. Europe, The European offshore wind industry— Key trends and statistics 2016, Wind Europe: Brussels, Belgium, (2017) 37.



- [18] D. Orlov, T. Corke, M. Patel, Electric circuit model for aerodynamic plasma actuator, in: 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, (2006) 1206.
- [19] Y. Suzen, G. Huang, J. Jacob, D. Ashpis, Numerical simulations of plasma based flow control applications, in: 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Toronto, Ontario, Canada, (2005) 4633.
- [20] S. Leonov, V. Bituryn, N. Savischenko, A. Yuriev, V. Gromov, Influence of surface electrical discharge on friction of plate in subsonic and transonic airflow, in: 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, U.S.A., (2001) 640.
- [21] J. Jacob, R. Rivir, C. Carter, J. Estevadeordal, Boundary layer flow control using AC discharge plasma actuators, in: 2nd AIAA Flow Control Conference, Portland, Oregon, (2004) 2128.
- [22] M. Forte, J. Jolibois, J. Pons, E. Moreau, G. Touchard, M. Cazalens, Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control. *Exp Fluids*, (2007) 917-28.
- [13] J.A. Cooney, C. Szlatenyi, N.E. Fine, The development and demonstration of a plasma flow control system on a 20 kW wind turbine, in: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, California, USA, )2016( 1302.
- [14] H. Matsuda, M. Tanaka, T. Osako, K. Yamazaki, N. Shimura, M. Asayama, Y. Oryu, Plasma Actuation Effect on a MW class Wind Turbine, *International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems*, 9(1) (2017).
- [15] S. Naghib Zadeh, Mesh Requirement Investigation for 2D and 3D Aerodynamic Simulation of Vertical Axis Wind Turbines, M.Sc. Thesis, Concordia University, )2013(.
- [16] S. Lemire, H.D. Vo, M.W. Benner, Performance improvement of axial compressors and fans with plasma actuation, *International Journal of Rotating Machinery*, 2009 (2009).
- [17] W. Shyy, B. Jayaraman, A. Andersson, Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics, *Journal of applied physics*, 92(11) (2002) 6434-6443.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

H. Yazdani, M. Sefid, *Power Improvement of a Commercial Large Scale Vertical-Axis Wind Turbine Using Plasma Actuators*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(3) (2021) 1487-1504.

DOI: [10.22060/mej.2020.16968.6487](https://doi.org/10.22060/mej.2020.16968.6487)



