

کنترل فعال جریان روی پرهی توربین باد محور عمودی داریوس با استفاده از عملگر پلاسما

مجید زارع جاوشی (دانشجوی دکتری)

عباس ابراهیمی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۴۰۱ (پژوهشی)
دردی ۳-۳، شماره ۱، ص. ۸۳-۷۳ (پژوهشی)

یکی از مشکلات اصلی توربین باد محور عمودی داریوس که باعث کاهش راندمان آن‌ها شده پدیده‌ی واماندگی دینامیکی است که با کنترل آن می‌توان عملکرد این توربین‌ها را بهبود داد. در این پژوهش، اثر عملگر پلاسما بر عملکرد توربین باد محور عمودی داریوس به صورت عددی با روش حجم محدود فشار مینا بررسی شده است. پس از شناخت دقیق جریان حول پره توربین در حالت بدون کنترل، سه چیدمان عملگر پلاسما شامل عملگر سطح داخلی، سطح بیرونی و دوطرفه با حالت بدون عملگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد گشتاور حول محل اتصال پره به نگهدارنده آن به صورت محلی می‌تواند تا ۲۵ درصد در ناحیه‌ی بالادست و تا ۵۰ درصد در ناحیه‌ی پایین دست پره تأثیرگذار باشد. عملگر پلاسما با کنترل واماندگی و کوچک‌تر کردن گردابه سطح مکش در طی حرکت رو به پایین پره باعث افزایش ضریب نیروی برآ و کاهش پسا شده و مقدار گشتاور مثبت حول محل اتصال را افزایش می‌دهد. در نهایت، عملگر سطح داخلی و دوطرفه باعث بهبود توان خروجی توربین تا ۱۰ درصد شده است.

واژگان کلیدی: توربین باد محور عمودی، واماندگی دینامیکی، کنترل جریان فعال، عملگر پلاسما.

۱. مقدمه

توربین‌های باد محور عمودی برای استفاده در مناطق شهری از مزایای زیادی برخوردارند؛ از جمله عدم حساسیت به جهت باد، آلودگی صوتی کمتر،^[۱] کارایی بیشتر در باد با آشفتگی بالا^[۲] و راحتی در تعمیر و نگهداری.^[۳] توربین‌های باد محور عمودی به دو دسته توربین‌های برآ - مینا و پسا - مینا تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از توربین‌های برآ - مینا، توربین داریوس است که راندمان بالایی دارد ولی جدایش جریان و واماندگی دینامیکی روی پره آن، باعث کاهش عملکرد آیرودینامیکی می‌شود.^[۴]

واماندگی دینامیکی با پدیده‌هایی مانند تشکیل و ریزش گردابه‌ها از لبه‌ی حمله و لبه فرار همراه است.^[۵] تشکیل این گردابه‌ها باعث افزایش موضعی نیروی برآ و ریزش آن‌ها باعث کاهش ناگهانی این نیرو می‌شود. در نتیجه‌ی نوسان نیروی برآ، گشتاور وارد بر محور توربین نیز نوسانی شده که موجب لرزش‌های سازه، آلودگی صوتی و افت عملکرد می‌شود.^[۶] با کنترل این پدیده‌ها می‌توان مشکلات مطرح شده و عملکرد توربین باد را بهبود بخشید. تاکنون از روش‌های کنترل جریان فعال و غیرفعال زیادی برای کنترل پدیده‌ی واماندگی دینامیکی توسط پژوهش‌گران استفاده شده است. روش‌های کنترل جریان غیرفعال، ساده‌تر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۸/۸، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۱/۵، پذیرش ۱۴۰۰/۱۱/۹

DOI:10.24200/J40.2022.59189.1623

zare@ae.sharif.ir
abraimi.a@sharif.ir

بوده و نیازی به صرف انرژی ندارند، اما کارایی آن‌ها نسبت به روش‌های فعال کم‌تر است؛ به‌ویژه در پدیده‌هایی که مانند واماندگی دینامیکی به شدت ناپایا و پیچیده‌اند.^[۷] از جمله روش‌های غیرفعال که تاکنون برای کنترل واماندگی دینامیکی توسط پژوهش‌گران بررسی شده می‌توان به مولد گردابه،^[۸] حفره، سیم با فاصله از سطح^[۹] و فلپ گارنی^[۱۰] اشاره کرد. روش‌های کنترل جریان فعال اگرچه کارایی بالاتری نسبت به روش‌های غیرفعال دارند اما نیازمند صرف انرژی هستند و لازم است شناخت کاملی نسبت به پدیده‌ی مورد نظر وجود داشته باشد. روش‌های کنترل فعالی که تاکنون توسط پژوهش‌گران استفاده شده عبارت‌اند از: مکش لبه‌ی حمله،^[۱۱] دمش،^[۱۲] نوسان^[۱۳] لبه‌ی حمله،^[۱۴] جت مصنوعی^[۱۵] و عملگر پلاسما.^[۱۶]

در بین روش‌های کنترل جریان فعال، تاکنون فقط دو روش جت مصنوعی و عملگر پلاسما در توربین باد محور عمودی داریوس و آن هم به صورت بسیار محدود استفاده شده است. جت مصنوعی ابتدا توسط ولاسکو و همکاران^[۱۶] در یک بررسی عددی دوبعدی، با قرار دادن جت مصنوعی در قسمت داخلی پره توربین باد محور عمودی داریوس استفاده شد. نتایج نشان داد که جت مصنوعی می‌تواند باعث تأخیر واماندگی دینامیکی در زاویه‌ی حمله‌ی بالاتری شود که این عامل منجر به افزایش توان خروجی توربین شده است. ژو و همکاران^[۱۷] در یک بررسی عددی با بهبود پارامترهای جت مصنوعی و به‌کارگیری سناریوهای مختلف

کنترل جریان، کارایی جت مصنوعی را افزایش دادند به نحوی که توان تولیدی تا ۱۵ درصد افزایش یافت.

گرینبلت و همکاران^[۱۸] در یک نمونه آزمایشگاهی توربین باد محور عمودی داریوس، با نصب عملگر پلاسما در قسمت داخلی پرهی توربین، توان خروجی را تا ۳۸ درصد بهبود دادند. در این فعالیت، شناختی نسبت به فیزیک جریان و نحوه عملکرد عملگر حاصل نشد ولی در کار بعدی^[۱۹] آن‌ها سعی کردند میدان جریان حول پره را با روش سرعت‌سنجی ذرات^۲ استخراج کنند. مشاهدات نشان داد که عملگر پلاسما باعث شده گردابه‌ی واماندگی دینامیکی شکل گرفته روی پره، کوچک‌تر و به سطح نزدیک‌تر شود. همین عامل باعث کنترل و به تأخیر افتادن واماندگی دینامیکی و افزایش توان خروجی شد. نتایج این پژوهش به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی فقط برای زاویه‌ی پره ۱۲۰ درجه انجام شد. در مقاله‌ی دیگر، بن هاراو و گرینبلت^[۲۰] یک کنترل‌گر پیش‌رو^۳ روی توربین باد محور عمودی نصب کردند تا عملگر پلاسما فقط در زوایای پره خاص روشن شود و از این طریق در انرژی مصرف شده توسط پلاسما صرفه‌جویی شود. این اقدام در نهایت باعث بهبود ۱۰ درصدی در توان خالص تولیدی شد. گرینبلت و لوتمن^[۲۱] نصب عملگر پلاسما روی دو طرف پره توربین باد محور عمودی را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نصب عملگر روی قسمت داخلی پره تا ۵۰ درصد بهبود بیشتری نسبت به نصب روی قسمت خارجی پره دارد. آن‌ها همچنین با تلفیق هر دو روش، به نحوی که عملگر قسمت داخلی پره در ناحیه‌ی بالادست و عملگر قسمت خارجی در ناحیه‌ی پایین دست فعال باشد، موفق به بهبود بسیار جزئی در توان خروجی شدند. در یک بررسی عددی دیگر^[۲۲] اثر عملگر پلاسما بر کنترل واماندگی دینامیکی در توربین باد محوری عمودی با استفاده از مدل شای^۵ شبیه‌سازی شد. برای این منظور محققین اثر موقعیت طولی قرارگیری عملگر بر توان خروجی را بررسی کرده و بهبود ۳۶ درصدی در حالت بهینه را گزارش کردند.

مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از عملگر پلاسما به منظور بهبود کارایی توربین باد محوری عمودی امکان‌پذیر است. از آن‌جا که کنترل مؤثر جریان توسط روش‌های کنترل فعال، مستلزم شناخت کامل نسبت به پدیده و نحوه اثرگذاری آن است، باید فیزیک جریان با حضور پلاسما و بدون حضور پلاسما شناسایی شود. تاکنون نحوه‌ی اثرگذاری عملگر پلاسما بر پدیده‌ی واماندگی دینامیکی فقط در مرجع^[۱۹] به صورت محدود انجام شده است. همچنین اطلاعاتی در مورد فیزیک جریان ارائه شده،^[۲۲] اما این بررسی نیز متمرکز بر اثر موقعیت طولی عملگر بوده و تنها مقدار گشتاور لحظه‌ی تولیدی را گزارش کرده است. بنابراین تاکنون شناخت فیزیک اثرگذاری عملگر پلاسما محدود به میدان سرعت اطراف پره یا گشتاور لحظه‌ی بوده است. علاوه بر این، تاکنون تمامی پژوهش‌های صورت گرفته از اثر گشتاور حول نقطه‌ی اتصال پره به نگهدارنده صرف نظر کرده‌اند؛ در صورتی که این اثر برای پره‌های ضخیم که از محل یک چهارم وتر به نگهدارنده متصل نشده باشند، اهمیت پیدا خواهد کرد.

در این مقاله ابتدا ساختار پدیده واماندگی دینامیکی پره توربین باد محور عمودی داریوس در کل سیکل حرکت شناسایی شده است. با توجه به شناخت حاصل شده، محل نصب مناسب عملگر برای کنترل جریان تعیین شده و میزان اثر بخشی عملگر پلاسما بر کنترل واماندگی دینامیکی ارزیابی شده است. در بررسی حاضر علاوه بر توان خروجی توربین، گشتاور لحظه‌ی و میدان جریان اطراف پره، اثر عملگر پلاسما بر ضرایب برآ و پسای لحظه‌ی پره نیز مطالعه شده است. همچنین برای اولین بار گشتاور حول محل اتصال پره در نظر گرفته شده و اهمیت آن در تولید گشتاور لحظه‌ی پره نشان داده شده است.

۲. مبانی عملکرد توربین و فرمول‌بندی

گشتاور ایجاد شده (T) توسط پره‌های توربین از طریق محور میانی به ژنراتور منتقل می‌شود و توان خروجی (P) را تولید می‌کند. این دو پارامتر با استفاده از روابط ۱ و ۲ به صورت رابطه‌ی ۱ بی‌بعد می‌شوند:

$$C_p = \frac{P}{\rho V^3 R H} \quad (۱)$$

$$C_T = \frac{T}{\rho V^2 R^2 H} \quad (۲)$$

که در آن ρ چگالی هوا (kg/m^3)، V سرعت باد (m/s)، R شعاع توربین (m) و H ارتفاع پره‌های توربین (۱ متر در شبیه‌سازی دوبعدی) بوده و گشتاور و توان خروجی در این روابط به ترتیب برحسب نیوتن‌متر ($N.m$) و وات (W) جایگذاری می‌شود. توان خروجی توربین وابستگی شدیدی به سرعت دورانی بی‌بعد توربین دارد که نسبت سرعت دورانی پره نام‌گذاری شده و با رابطه‌ی ۳ بیان می‌شود.^[۲۳] در این رابطه ω سرعت دورانی توربین (rad/s) و V_b سرعت مماسی پره توربین است.

$$\lambda = \frac{V_b}{V} = \frac{\omega R}{V} \quad (۳)$$

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر عملکرد توربین، ضریب پری توربین است. این پارامتر مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{Nc}{2R} \quad (۴)$$

که در آن N تعداد پره‌های توربین و c طول وتر (m) هر پره است.

در توربین باد محور عمودی داریوس پره‌ها تغییر زیادی در سرعت نسبی (W) و زاویه‌ی حمله مؤثر (α) تجربه می‌کنند. با چرخش پره توربین و قرارگیری در زاویه‌ی پره‌های مختلف (θ) سرعت نسبی و زاویه‌ی حمله مؤثر نیز تغییر می‌کند که مقدار آن به نسبت سرعت دورانی نیز وابسته است. با فرض این که پره در حرکت ناحیه‌ی بالادست اثری بر روی ناحیه‌ی پایین دست نداشته باشد می‌توان مقادیر سرعت نسبی و زاویه‌ی حمله مؤثر را مطابق روابط ۵ و ۶ برحسب زاویه‌ی پره و نسبت سرعت دورانی به دست آورد.^[۲۴]

$$W = V \times \sqrt{\lambda^2 + 2\lambda \cos\theta + 1} \quad (۵)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sin\theta}{\lambda + \cos\theta} \quad (۶)$$

در توربین‌های باد محور عمودی، نیروهای وارد بر پره توربین در دو جهت مماسی و عمود بر پره حائز اهمیت است. نیروی مماسی در راستای وتر پره بوده و همان نیرویی است که باعث ایجاد گشتاور حول محور و تولید توان خروجی می‌شود. از طرفی نیروی عمودی که عمود بر نیروی مماسی است به محور و نگهدارنده‌های پره وارد شده و از لحاظ سازه‌ی اهمیت دارد. این دو مؤلفه‌ی نیرو می‌توانند به راستاهای مختلف از جمله راستای محورهای مختصات کارتزین (x, y) و راستای سرعت نسبی باد و عمود بر آن تجزیه شوند. در عمل ابتدا مقادیر نیروها در راستای محورهای مختصات کارتزین (F_x, F_y) از شبیه‌سازی عددی استخراج شده و با استفاده از روابط مثلثاتی مقادیر نیروها در سایر راستاها محاسبه می‌شود. رابطه‌ی ۷ و ۸ بیان‌گر ارتباط بین نیروهای مماسی و عمودی با نیروهای در راستای محورهای مختصات هستند. در این روابط جهت مثبت نیروی مماسی به سمت لبه‌ی حمله و جهت

واماندگی دینامیکی کاربرد دارد، در این پژوهش با استفاده از سرعت باد نسبی، طول وتر و ارتفاع مطابق روابط ۱۵ تا ۱۷ بی‌بعد شده‌اند تا با نتایج سایر تحقیقات در زمینه‌ی واماندگی دینامیکی در ایرفویل قابل مقایسه باشد. در این روابط ضریب نیروی عمودی، C_t ضریب نیروی مماسی، C_l ضریب نیروی برآ، C_d ضریب نیروی پسا و $C_{m,c.p.}$ ضریب گشتاور حول نقطه‌ی اتصال را معرفی می‌کند.

$$C_n = \frac{F_n}{\rho V^2 RH} \quad (13)$$

$$C_t = \frac{F_t}{\rho V^2 RH} \quad (14)$$

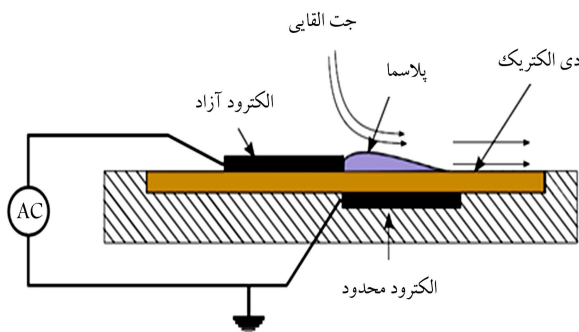
$$C_l = \frac{F_l}{\rho W^2 cH} \quad (15)$$

$$C_d = \frac{F_d}{\rho W^2 cH} \quad (16)$$

$$C_{m,c.p.} = \frac{M_{c.p.}}{\rho W^2 c^2 H} \quad (17)$$

۳. مدل عملگر پلاسما

عملگر پلاسما با ایجاد یک جت القایی در لایه‌ی مرزی می‌تواند به جلوگیری از جدایش جریان کمک کند.^[۲۵] این عملگر مزایایی از جمله پاسخ زمانی سریع، نداشتن قسمت متحرک و وزن کم دارد. مطابق شکل ۲ عملگر پلاسما با ایجاد میدان الکتریکی بین دو الکترود عمل می‌کند. با اعمال اختلاف ولتاژ زیاد بین الکترودها، میدان الکتریکی شکل می‌گیرد و باعث القای باد الکتریکی یا یونی در نزدیکی سطح می‌شود. این جریان به دلیل برخورد یونها و ذرات خنثی در محدوده‌ی الکترود به وجود می‌آید. جریان القایی مانند نیروی حجمی عمل می‌کند و سیال نزدیک الکترودها را به حرکت درمی‌آورد. این جت تولیدی، پروفیل سرعت در لایه‌ی مرزی را بهبود بخشیده و جدایش را به تعویق می‌اندازد. طی سال‌های گذشته مدل‌های مختلفی برای مدل‌سازی اثر عملگر پلاسما بر روی ساختار جریان ارائه شده که از میان آن‌ها مدل الکترواستاتیک سوزن و هوانگ^[۲۶] به دلیل دقت مناسب در این پژوهش استفاده شده است. در این مدل، توزیع غلظت شارژ بر روی دی الکتریک به صورت یک توزیع گوسی در نظر گرفته شده و میدان الکتریکی کل به دو ناحیه تقسیم شده است. ناحیه‌ی اول شامل میدان الکتریکی ناشی از ذرات باردار و ناحیه‌ی دوم، میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اعمالی به الکترودهاست. با تفکیک میدان الکتریکی و اعمال آن بر معادلات ماکسول، دو معادله‌ی بیضوی برای میدان پتانسیل الکتریکی ϕ (ولت) و توزیع غلظت شارژ ρ_c (C/m^3) مطابق روابط ۱۸ و ۱۹ به



شکل ۲. شماتیک اجزای مختلف عملگر پلاسما.

مثبت نیروی عمودی به سمت سطح خارجی پره است. جهات مثبت قراردادی در شکل ۱ نیز نشان داده شده است.

$$F_t = -F_x \cos \theta - F_y \sin \theta \quad (7)$$

$$F_n = -F_x \sin \theta + F_y \cos \theta \quad (8)$$

یکی دیگر از مؤلفه‌های نیرو که در بحث واماندگی دینامیکی نیز بسیار مهم است نیروهای برآ و پسا هستند. این دو نیرو به ترتیب عمود و در راستای سرعت نسبی هستند. جهت مثبت نیروی برآ به سمت داخل پره و جهت مثبت نیروی پسا به سمت لبه‌ی فرار پره است (شکل ۱). رابطه‌های ۹ و ۱۰ بیان‌گر ارتباط مقادیر نیروهای برآ و پسا (F_l , F_d) با نیروهای در راستای محورهای مختصات است که در آن زاویه‌ی حمله‌ی مؤثر بوده و از رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود.

$$F_l = F_x \sin(\theta - \alpha) - F_y \cos(\theta - \alpha) \quad (9)$$

$$F_d = F_x \cos(\theta - \alpha) + F_y \sin(\theta - \alpha) \quad (10)$$

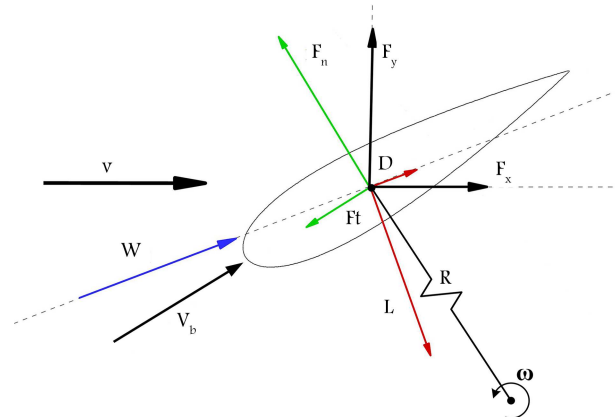
نیروی مماسی مؤثرترین عامل در تولید گشتاور پره در توربین‌های باد محور عمودی است. اما علاوه بر نیروی مماسی، گشتاور ایجاد شده حول نقطه‌ی اتصال پره به بدنه‌ی توربین نیز مؤثر است. گشتاور لحظه‌ی ایجاد شده توسط یک پره (M) با استفاده از رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود. در این رابطه $M_{c.p.}$ گشتاور حول نقطه‌ی اتصال پره است و جهت مثبت قراردادی آن مانند گشتاور کل خلاف عقربه‌های ساعت در نظر گرفته شده است.

$$M = F_t R + M_{c.p.} \quad (11)$$

در رابطه‌ی ۱۱ مقدار F_t از رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود. اما با جایگذاری مقدار معادل آن برحسب نیروهای برآ و پسا رابطه‌ی ۱۱ به رابطه‌ی ۱۲ تبدیل می‌شود که در آن جمله‌ی اول نقش نیروی برآ، جمله‌ی دوم نقش نیروی پسا و جمله‌ی سوم نقش گشتاور حول نقطه‌ی اتصال در گشتاور تولیدی پره است.

$$M = F_l R \sin(\alpha) - F_d R \cos(\alpha) + M_{c.p.} \quad (12)$$

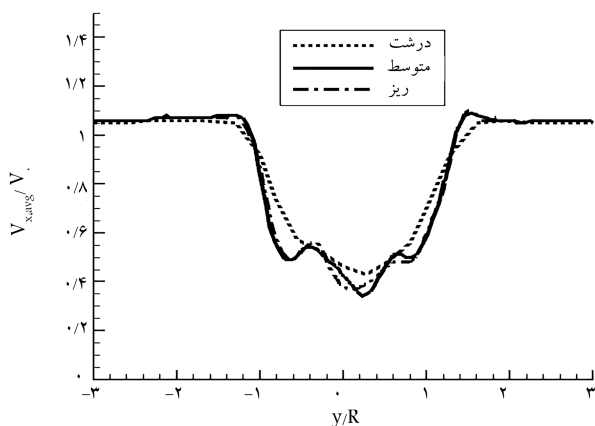
یکای نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی به ترتیب نیوتن (N) و نیوتن‌متر ($N.m$) بوده اما معمولاً به صورت بی‌بعد بیان می‌شوند. برای بی‌بعد کردن نیروهای عمودی و مماسی از سرعت باد، شعاع و ارتفاع توربین مطابق روابط ۱۳ و ۱۴ استفاده می‌شود. اما از آنجا که مقادیر ضرایب نیروی برآ، پسا و گشتاور حول نقطه‌ی اتصال برای تحلیل‌های



شکل ۱. شماتیک نیروهای وارد بر پره توربین و جهات مثبت قراردادی.

جدول ۱. مشخصات هندسه‌ی مورد بررسی.

مقدار	مشخصه
NACA ۰۰۲۱	ایرفویل پره
۰٫۵ و وتر ایرفویل	محل اتصال پره به نگهدارنده
۳	تعداد پره توربین
۱٫۰۲۸	قطر توربین (m)
۰٫۲۵	ضریب پری توربین
۰٫۰۸۵	طول وتر ایرفویل (m)
۴۰۰	سرعت دورانی (RPM)



شکل ۳. استقلال حل از شبکه‌ی محاسباتی در پروفیل سرعت پایین دست توربین.

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه‌ی محاسباتی، سه شبکه‌ی درشت، متوسط و ریز به ترتیب با تعداد کل ۵۳۷، ۱۰۶، ۴۴۵، ۷۰۰ و ۱،۴۵۱ سلول در نظر گرفته شده است. در شکل ۳، پروفیل نسبت مؤلفه‌ی سرعت محوری میانگین $(V_{x,avg})$ به سرعت باد (V_∞) در فاصله‌ی دو برابر شعاع در پایین دست روتور برای هر سه شبکه نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت بین شبکه‌ی متوسط با شبکه‌ی درشت زیاد بوده و در بعضی نقاط به ۲۵ درصد می‌رسد. از طرفی تفاوت شبکه‌ی متوسط با شبکه‌ی ریز در بدترین حالت کم‌تر از حدود ۱۰ درصد است. بنابراین با در نظر گرفتن هزینه‌ی محاسباتی و همچنین دقت محاسباتی، شبکه‌ی متوسط برای این بررسی انتخاب شده است که در آن مقدار y^+ روی سطح ایرفویل کم‌تر از ۱ است. نمایی از شبکه‌ی محاسباتی در نزدیکی سطح ایرفویل در شکل ۴ نمایش داده شده است.

به دلیل ناپایا بودن حل عددی باید استقلال حل از گام زمانی به منظور انتخاب مناسب‌ترین گام زمانی نیز انجام شود. در توربین باد محور عمودی داریوس پدیده‌های حاکم بستگی به نسبت سرعت دورانی دارند، بنابراین گام زمانی بهینه برای نسبت‌های سرعت دورانی مختلف متفاوت است. برای رفع این مشکل به جای بررسی گام زمانی بهینه بهتر است زاویه‌ی پره‌ی روتور در یک گام زمانی طی می‌کند را به عنوان معیار مقایسه انتخاب کرد. به این ترتیب می‌توان ابتدا زاویه‌ی مناسب را تعیین کرد و بعد در هر نسبت سرعت، گام زمانی معادل آن را به دست آورد. برای این منظور سه گام زمانی به ترتیب معادل حرکت پره به اندازه‌ی ۴، ۱ و ۰٫۲۵ درجه انتخاب شده است. در شکل ۵ پروفیل نسبت مؤلفه‌ی سرعت محوری به سرعت باد در فاصله‌ی دو برابر شعاع در پایین دست روتور برای گام‌های زمانی مختلف مقایسه شده است. چنان که مشاهده می‌شود گام زمانی معادل حرکت پره به اندازه ۱ درجه از لحاظ هزینه‌ی محاسباتی و همچنین دقت، مناسب است.

دست می‌آید که در آن ε_T ضریب نفوذ نسبی و λ_d طول دمای برحسب متر است.

$$\nabla \cdot (\varepsilon_T \nabla \phi) = 0 \quad (18)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon_T \nabla \rho_c) = \frac{\rho_c}{\lambda_d^2} \quad (19)$$

با فرض این که فقط میدان الکتریکی خارجی باعث اعمال نیرو به ذرات باردار می‌شود و صرف نظر از نیروهای مغناطیسی، میدان الکتریکی (ولت‌متر) برابر با گرادیان پتانسیل الکتریکی بوده $(\vec{E} = -\nabla \phi)$ نیروی حجمی ظاهر شده در معادلات اندازه حرکت سیال (رابطه‌ی ۱۹) توسط معادله‌ی لورنتز محاسبه می‌شود:

$$\vec{f}_b = \rho_c (-\nabla \phi) \quad (20)$$

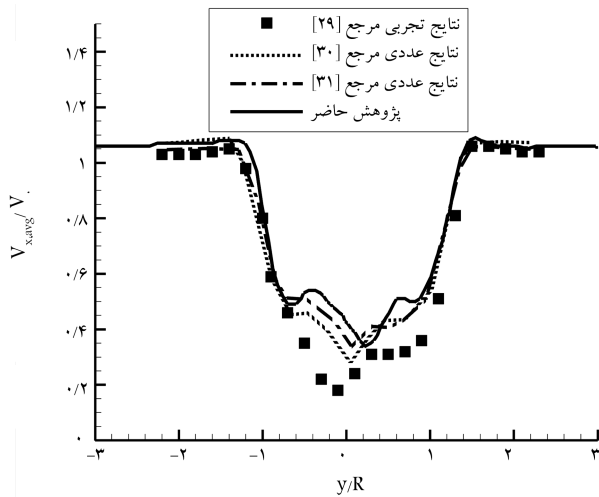
در این پژوهش با توجه به الزامات ابعاد و فضای داخل ایرفویل پره، عملگر پلاسمای مرجع [۲۷] انتخاب شده که در آن الکترودها از جنس مس با ضخامت ۷۰ میکرومتر و طول الکتروده محدود ۵ میلی‌متر و طول الکتروده آزاد ۲۰ میلی‌متر است. دی‌الکتریک به کار رفته از جنس اکریلیک با ثابت دی‌الکتریک نسبی ۳ بوده و ۳ میلی‌متر ضخامت دارد. با توجه به این که توربین باد در حالت عملکردی خود زوایای حمله‌ی زیاد را تجربه می‌کند (بسته به نسبت سرعت دورانی) جدایش جریان از لبه‌ی حمله اتفاق می‌افتد و در نتیجه مناسب‌ترین حالت کنترلی حالتی است که عملگر در لبه‌ی حمله نصب شده باشد. [۱۸]

۴. روش حل عددی

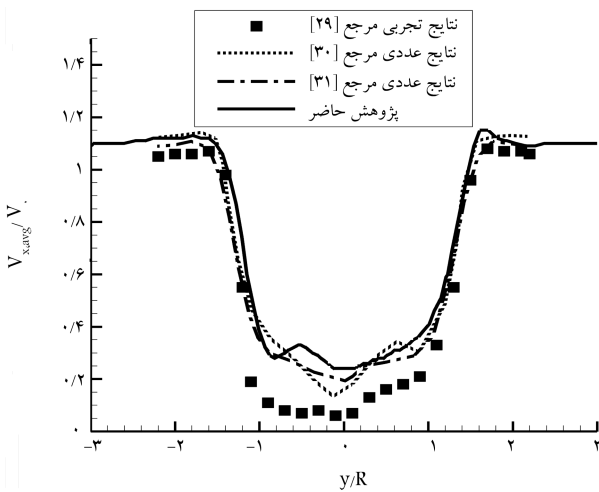
در این پژوهش معادلات کامل ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده رینولدز (RANS) به صورت ناپایا و تراکم‌ناپذیر استفاده شده است. جمله‌ی تنش رینولدز ظاهر شده در معادلات با استفاده از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST محاسبه شده است. [۲۸] دامنه‌ی محاسباتی به دو قسمت ثابت و چرخان تقسیم شده و چرخش توربین با استفاده از روش شبکه‌ی لغزنده^۶ شبیه‌سازی شده است. حل معادلات جریان به صورت کوپل بوده و گسسته‌سازی معادلات با استفاده از روش مرتبه دوم بالادستی^۷ و پیشروی در زمان با روش ضمنی مرتبه دوم محدود^۸ انجام شده است.

۵. شبکه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی

توربین استفاده شده در این پژوهش، توربین داریوس سه پره‌ی نوع H مرجع [۲۹] است که اطلاعات آن در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور شبیه‌سازی این توربین، دامنه‌ی محاسباتی به اندازه‌ی ۱۰ برابر قطر روتور به سمت بالادست، ۲۰ برابر به سمت پایین دست و ۱۰ برابر به سمت اطراف امتداد داده شده تا از عدم وجود اثرات شرایط مرزی بر حل عددی اطمینان حاصل شود. دامنه‌ی محاسباتی به دو بخش چرخان و ثابت تفکیک شده است. بخش چرخان که به منظور اعمال روش شبکه‌ی لغزنده در نظر گرفته شده دایره‌ی به قطر دو برابر قطر توربین است. شرط مرزی بالادست به صورت سرعت ورودی برابر با سرعت باد (۹ متر بر ثانیه)، شرط مرزی پایین دست به صورت فشار خروجی در نظر گرفته شده و برای دیواره‌های دو طرف دامنه‌ی محاسباتی از شرط مرزی تقارن استفاده شده است. روی دیواره‌های ایرفویل نیز شرط مرزی عدم لغزش اعمال شده که باعث می‌شود سرعت جریان در مجاورت سطح، برابر با سرعت حرکت پره باشد.



شکل ۶. مقایسه‌ی پروفیل سرعت میانگین دنباله برای نسبت سرعت دورانی ۲/۴.

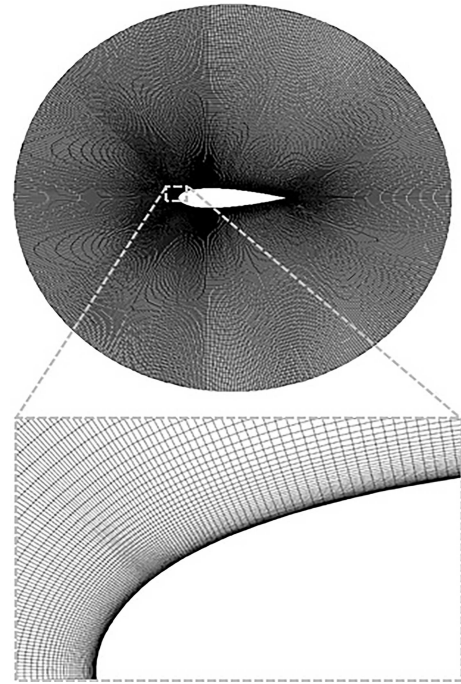


شکل ۷. مقایسه‌ی پروفیل سرعت میانگین دنباله برای نسبت سرعت دورانی ۳/۳.

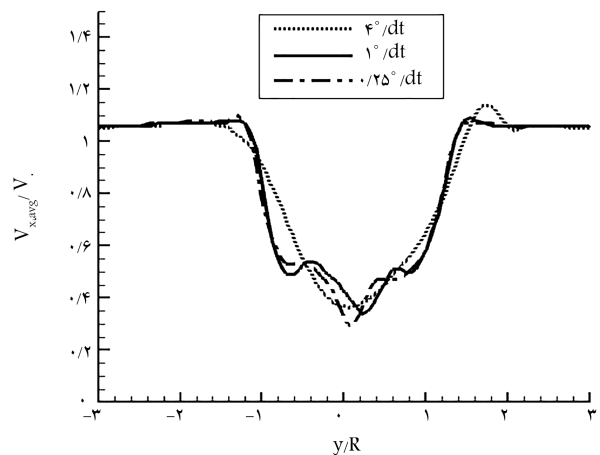
نشده است. نگهدارنده‌های پره باعث ایجاد دنباله و افت انرژی بیشتر و در نتیجه کاهش سرعت می‌شوند.^[۳۲] همچنین اثرات تلفات نوک پره در مدل سه بعدی باعث اتلاف بیشتر انرژی و کاهش سرعت در دنباله‌ی توربین، به ویژه در نسبت سرعت دورانی بالا می‌شود.^[۳۳]

۲.۶. اعتبارسنجی مدل عملگر پلاسما

به منظور اطمینان از درستی مدل‌سازی عملگر پلاسما، شبیه‌سازی عملگر روی صفحه‌ی تخت و در هوای ساکن صورت گرفته و نتایج حاصل با فعالیت‌های عددی مشابه^[۳۲،۳۶] مقایسه شده است. هندسه انتخاب شده برای این بررسی شامل دو الکتروتود مستطیلی به طول ۱۰ میلی‌متر و با ضخامت ۰/۱۰۲ میلی‌متر و فاصله‌ی ۰/۵ میلی‌متر از هم است. دی‌الکترونیک به ضخامت ۰/۱۲۷ میلی‌متر از جنس کاپتون با ضریب نفوذپذیری ۲/۷ دو الکتروتود را از هم جدا کرده است. الکتروتود بیرونی در تماس با هواست که الکتروتود آزاد نام دارد و الکتروتود دیگر در تماس با ماده‌ی دی‌الکترونیک است که الکتروتود محدود نامیده می‌شود. شماتیک و ابعاد این هندسه در شکل ۸ آمده است. پس از بررسی استقلال حل از دامنه‌ی محاسباتی، ابعاد دامنه‌ی محاسباتی برابر با ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و الکتروتودها در وسط مربع



شکل ۴. نمایی نزدیک از شبکه‌ی محاسباتی در نزدیکی ایرفویل.

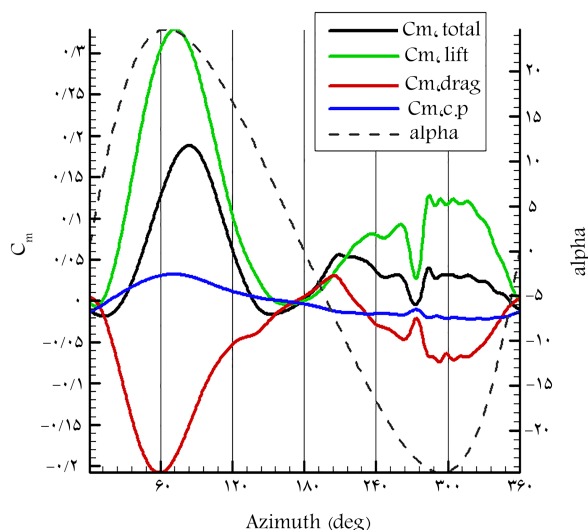


شکل ۵. استقلال حل از گام زمانی در پروفیل سرعت پایین دست توربین.

۶. اعتبارسنجی

۱.۶. اعتبارسنجی توربین باد محور عمودی

اعتبارسنجی حل عددی با مقایسه‌ی مقادیر عددی پژوهش حاضر با نتایج تجربی^[۲۹] و نتایج عددی^[۳۱،۳۰] برای توربین باد بدون عملگر پلاسما انجام شده است. پروفیل اندازه‌ی سرعت میانگین دنباله‌ی توربین در فاصله‌ی دوبرابر شعاع در پایین دست روتور به ترتیب برای نسبت سرعت دورانی ۲/۴ و ۳/۳ در شکل‌های ۶ و ۷ با نتایج عددی و تجربی مقایسه شده است. در هر دو شکل تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی پژوهش حاضر و نتایج عددی دیگر مراجع^[۳۱،۳۰] مشاهده می‌شود. هر سه پروفیل سرعت در نتایج عددی، روندی مطابق نتایج تجربی را طی می‌کنند اما مقدارشان نسبت به مقدار تجربی بیشتر است. این اختلاف بدان سبب است که شبیه‌سازی‌های عددی به صورت دوبعدی بوده و اثرات نگهدارنده‌های پره لحاظ

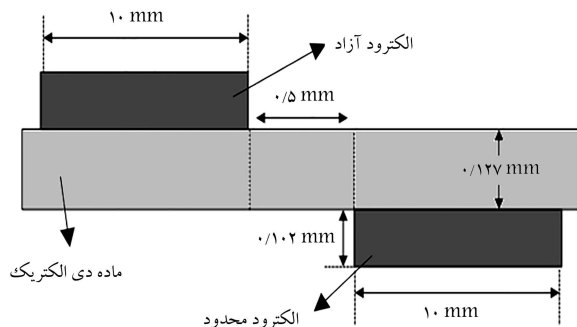


شکل ۹. نقش نیروهای برآ، پسا و گشتاور حول نقطه‌ی اتصال در یک دوران پره.

گشتاور ناشی از نیروی برآ توسط گشتاور مخالف نیروی پسا مستهک می‌شود. گشتاور حول نقطه‌ی اتصال نیز تأثیر منفی بر گشتاور تولیدی ناشی از نیروی برآ دارد ولی مقدار آن کم‌تر از ۲ درصد گشتاور کل است. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت نیروی برآ عامل اصلی تولید گشتاور در توربین باد داریوس بوده که نیروی پسا و گشتاور حول نقطه‌ی اتصال با آن مقابله می‌کنند.

به‌منظور بررسی تغییرات گشتاور تولیدی توربین با دوران و تغییر زاویه پره، گشتاور کل ایجاد شده برای یک پره برای نسبت سرعت دورانی $2/4$ در شکل ۹ رسم شده است (نمودار مشکی رنگ). همچنین گشتاور ناشی از نیروی برآ با رنگ سبز، نیروی پسا با رنگ قرمز و گشتاور حول نقطه‌ی اتصال با رنگ آبی در کنار زاویه‌ی حمله‌ی نظری (محاسبه شده از رابطه‌ی ۶) نشان داده شده است. بیشتر گشتاور تولیدی توسط پره در ناحیه‌ی بالادست حرکت پره (یعنی زاویه‌ی پره صفر تا 180° درجه) ایجاد می‌شود. با افزایش زاویه‌ی حمله مقادیر نیروهای برآ و پسا نیز افزایش می‌یابد تا در نهایت بیشترین زاویه‌ی حمله و همچنین بیشینه‌ی نیروها و گشتاورهای آبرودینامیکی در زاویه‌ی پره حدود 70° تا 90° درجه رخ دهد. در این ناحیه گشتاور حول نقطه‌ی اتصال مثبت شده و تا ۲۵ درصد از گشتاور کل را ایجاد می‌کند. بیشینه‌ی زاویه‌ی حمله‌ی مؤثر پره در این ناحیه حدود 25° درجه است. این مقدار از زاویه و اماندگی استاتیکی ایرفویل پره $NACA 4021$ که در اعداد رینولدز متوسط (حدود $80,000$ تا $150,000$) برابر 13° درجه است [۲۵] بسیار بزرگ‌تر بوده که نشان‌دهنده‌ی وقوع پدیده‌ی واماندگی دینامیکی است. در پدیده‌ی واماندگی دینامیکی حرکت رو به بالای پره^۹ باعث می‌شود گردابه‌ی سطح مکش به سطح چسبیده و واماندگی پره در زاویه‌ی بالاتر از زاویه‌ی واماندگی استاتیکی آن رخ دهد. [۲۶]

به‌منظور مشاهده‌ی پدیده‌های واماندگی دینامیکی در توربین باد، کانتورنسیسته در زوایای مختلف پره از 160° تا 180° درجه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همچنین مقادیر ضرایب نیروی برآ، پسا و گشتاور لحظه‌ی حول نقطه‌ی اتصال برحسب زاویه‌ی حمله‌ی مؤثر در شکل ۱۱ رسم شده است. پس از رسیدن پره به بیشترین زاویه‌ی حمله، فاز حرکت رو به پایین^{۱۰} پره با کاهش زاویه‌ی حمله شروع می‌شود. در این فاز گردابه با جهت پادساعت‌گرد که روی سطح مکش شکل گرفته، شروع به تقویت و بزرگ‌تر شدن کرده و در زاویه‌ی پره 140° درجه (معادل زاویه‌ی حمله‌ی مؤثر حدود 10° درجه) از سطح فاصله گرفته و شروع به جدا شدن



شکل ۸. ابعاد الکترودهای عملگر پلاسمای استفاده شده برای اعتبارسنجی.

جدول ۲. مقایسه‌ی نیروی حجمی بی بعد بیشینه و سرعت القایی بیشینه، حاصل از پژوهش حاضر با سایر مراجع.

مشخصه	پژوهش حاضر		درصد اختلاف
	مرجع [۳۴]	مرجع [۲۶]	
نیروی حجمی بی بعد بیشینه	۱۴۰۶	۱۲۵۰	۱۱٪
سرعت القایی بیشینه	۰٫۹۲۷	۰٫۹۳۴	۷٪

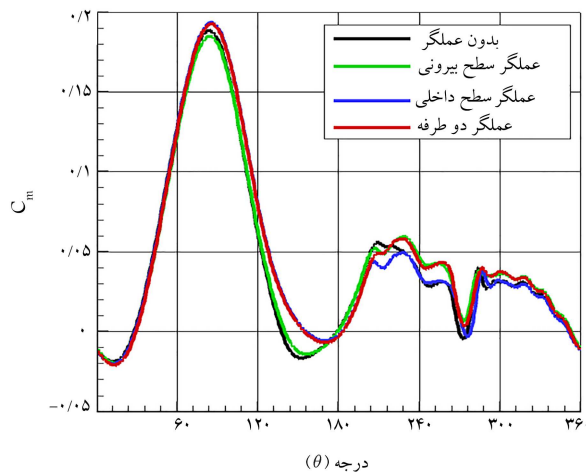
حاصل قرار داده شده‌اند. شبکه‌ی سازمان یافته درون این میدان تولید شده که تمرکز سلول‌ها در نزدیکی لبه‌های مجاور الکترودها بیشتر است. با بررسی استقلال حل از شبکه‌ی محاسباتی، شبکه‌ی بی با تعداد کل 17480° سلول انتخاب شده که در نزدیکی سطح، ارتفاع کوچک‌ترین سلول حدود ۴ میکرومتر است. ارتفاع نزدیک‌ترین سلول به سطح باید از طول دمای کم‌تر باشد تا اثرات تشکیل جت پلازما به خوبی شبیه‌سازی شود. با توجه به مقادیر موجود، [۲۶] طول دمای 100° میکرومتر و بیشینه غلظت شارژ 8×10^8 کولمب بر مترمکعب است (معادل ولتاژ اعمالی به الکترودها ۵ کیلوولت) که نشان می‌دهد تعداد کافی سلول در ناحیه‌ی طول دمای قرار گرفته است.

در جدول ۲ نیز، بیشینه‌ی نیروی حجمی بی بعد و بیشینه‌ی سرعت القایی، حاصل از مدل‌سازی حاضر با داده‌های مشابه بوجمال [۳۴] و سوزن و همکارانش [۲۶] مقایسه شده است که نشان می‌دهد مقدار خطای حل حاضر با سایر نتایج در بدترین حالت کم‌تر از 10° درصد بوده که مقدار قابل قبولی است.

۷. نتایج و بحث

۷.۱. فیزیک جریان بدون عملگر پلازما

یکی از مشخصه‌های اصلی آبرودینامیک توربین باد مجوری عمودی داریوس وجود پدیده‌های به‌شدت ناپایاست که عوامل مختلفی بر آن تأثیرگذار بوده و رفتار آن‌ها با تغییر زاویه پره نیز عوض می‌شود. گشتاور کل ایجاد شده در هر زاویه‌ی پره مطابق رابطه‌ی ۱۱ ناشی از سه عامل نیروی برآ، نیروی پسا و گشتاور حول نقطه‌ی اتصال است. با میانگین‌گیری از رابطه‌ی ۱۱ برای دوران کامل یک پره از سه پره‌ی توربین، نتایج حل عددی ضریب گشتاور میانگین ناشی از یک پره در نسبت سرعت دورانی $2/4$ (معادل سرعت باد ۹ متر بر ثانیه) را برابر با 0.43 نشان می‌دهد. نقش نیروی برآ در این گشتاور برابر 0.12 ، نقش نیروی پسا برابر 0.57 و نقش گشتاور حول نقطه‌ی اتصال برابر 0.2 است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد و از قبل نیز انتظار می‌رفت، عمده‌ی گشتاور تولیدی ناشی از نیروی برآست. بیش از 50° درصد



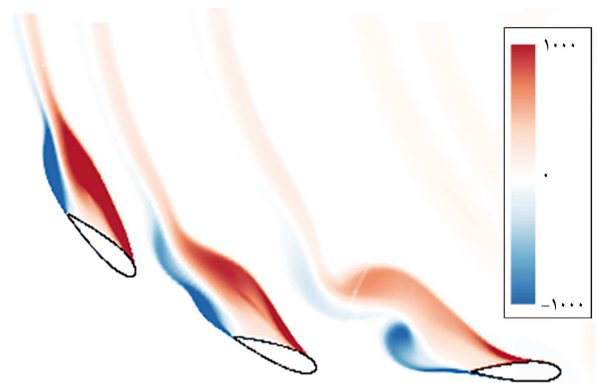
شکل ۱۲. تأثیر چیدمان نصب عملگر روی ضریب گشتاور لحظه‌یی.

گردابه پادساعت‌گرد سطح مکش شده و به کاهش نیروی پسا کمک کند. از طرفی با نصب عملگر روی سطح بیرونی گردابه کارمن معکوس تقویت شده و نیروی پیشران بیشتری تولید می‌کند.

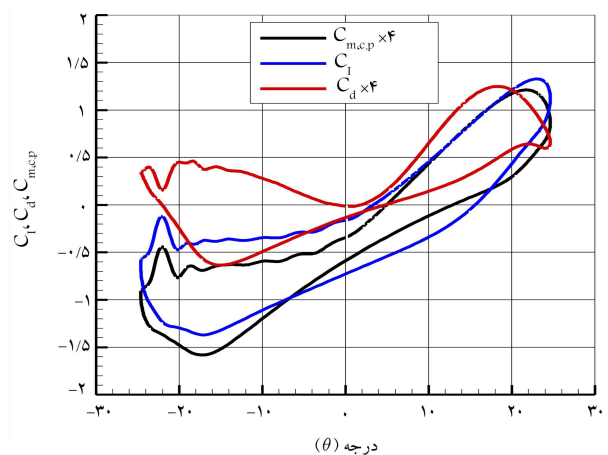
۲.۷. اثر عملگر پلاسما

به منظور بررسی پارامتری اثر محل قرارگیری عملگر پلاسما بر روی عملکرد توربین، سه حالت مختلف قرارگیری عملگرها در نظر گرفته شده و با حالت بدون عملگر مقایسه شده است. این حالت‌ها به ترتیب عبارتند از نصب عملگر روی سطح بیرونی، نصب عملگر روی سطح داخلی و نصب دو عملگر به صورت همزمان روی هر دو سطح. ضریب توان کل توربین برای حالت بدون عملگر، عملگر بیرونی، درونی و دوطرفه به ترتیب برابر 0.31 ، 0.32 ، 0.34 و 0.34 محاسبه شد که نشان‌گر افزایش حدود 1% درصدی برای دو حالت درونی و دوطرفه نسبت به حالت بدون عملگر است.

به منظور شناخت نحوه‌ی اثرگذاری عملگر پلاسما، ضریب گشتاور لحظه‌یی یک پره در طول یک دور کامل دوران در نسبت سرعت دورانی $2/4$ (معادل بیشینه‌ی ضریب توان توربین) برای هر سه حالت در شکل ۱۲ با حالت بدون عملگر مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود عملگر دوطرفه به طور کلی مقدار گشتاور را افزایش داده است و مقدار گشتاور آن در ناحیه‌ی بالادست حرکت پره (زوایای دوران صفر تا 180° درجه) نزدیک به عملگر درونی و در ناحیه‌ی پایین زاویه‌ی پره بین صفر تا 180° درجه پدیده‌های مربوط به واماندگی دینامیکی از جمله تشکیل گردابه پادساعت‌گرد روی سطح داخلی پره اتفاق می‌افتد. در ناحیه‌ی پایین دست حرکت پره این پدیده‌ها در سطح بیرونی اتفاق می‌افتد. جت تشکیل شده توسط عملگر پلاسما باعث کوچک‌تر شدن گردابه‌ی تولید شده و در نتیجه جدایش جریان ناشی از آن می‌شود. بنابراین عملگر سطح درونی در ناحیه‌ی بالادست حرکت و عملگر بیرونی در ناحیه‌ی پایین دست حرکت، مؤثر است (شکل ۱۲). همچنین، عملگر دوطرفه باعث کنترل جدایش به طور همزمان در کل دوران پره خواهد شد. برای درک بهتر نحوه‌ی کنترل جدایش جریان توسط عملگر پلاسما، شکل ۱۳ کانتور رتیسیتیه را برای دو حالت بدون عملگر پلاسما و عملگر پلاسما روی سطح درونی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود عملگر پلاسما



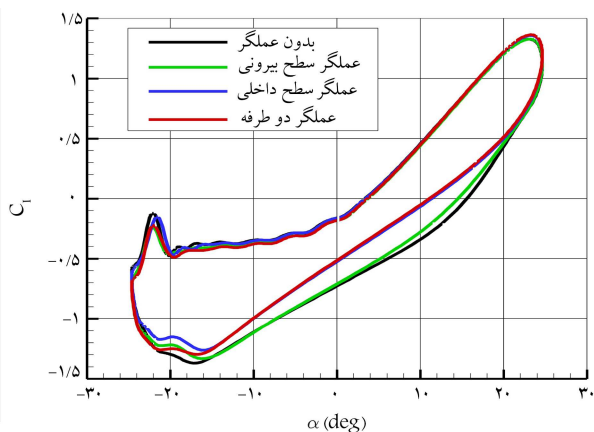
شکل ۱۰. فیزیک واماندگی دینامیکی در کانتور رتیسیتیه.



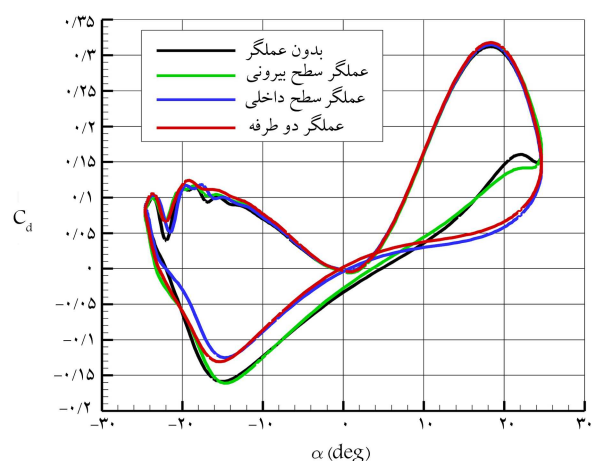
شکل ۱۱. ضرایب نیروی برآ، پسا و گشتاور حول نقطه اتصال بر حسب زاویه‌ی حمله مؤثر.

می‌کند. همین عامل باعث رول شدن لایه‌ی برشی لبه‌ی فرار شده و موجب تولید و تقویت گردابه‌ی دوم با جهت ساعت‌گرد می‌شود. در همین حال نیروی برآ کاهش یافته و نیروی پسا افزایش مجددی خواهد داشت که در شکل ۱۱ مشهود است. در ادامه با کاهش بیشتر زاویه‌ی حمله، گردابه‌ی پادساعت‌گرد از سطح جدا شده و باعث می‌شود مقدار نیروی پسا کاهش یابد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در زاویه‌ی پره 180° درجه گردابه‌ی ساعت‌گرد به طور کامل شکل گرفته و گردابه‌ی پادساعت‌گرد رو به اضمحلال است. وجود گردابه‌ی ساعت‌گرد وقتی به سمت سطح مکش پره باشد باعث ایجاد نیروی پسای منفی یا به عبارتی نیروی پیشران می‌شود. تولید نیروی پیشران توسط این گردابه (موسوم به «گردابه‌ی کارمن معکوس») توسط سایر پژوهش‌گران نیز مشاهده و گزارش شده است. [۲۷، ۲۸] وجود نیروی پسای منفی در شکل ۱۱ در زاویه‌ی حمله‌ی مؤثر صفر تا 10° درجه مشهود است. همچنین در شکل ۹ نیز در زاویه‌ی پره حدود 170° تا 220° درجه نیروی پسا، تولید گشتاور مثبت کرده که به دلیل وجود پدیده‌ی گردابه‌ی کارمن معکوس است.

پدیده‌ی واماندگی دینامیکی در زاویه‌ی پره حدود 130° تا 180° درجه باعث کاهش شدید نیروی برآ و افزایش نیروی پسا می‌شود به طوری که گشتاور تولیدی کل در این ناحیه مطابق شکل ۹، منفی شده و باید توسط سایر پره‌ها جبران شود. با توجه به شناخت صورت گرفته از فیزیک جریان، می‌توان پیش‌بینی کرد در صورتی که عملگر پلاسما روی سطح داخلی وجود داشته باشد جت تشکیل شده باعث تضعیف



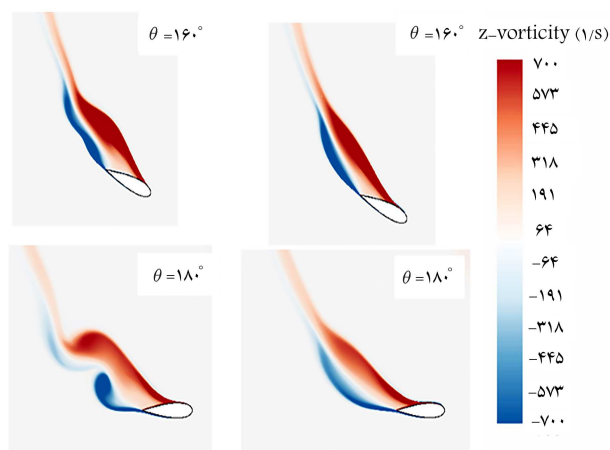
شکل ۱۴. تأثیر چیدمان نصب عملگر بر روی ضریب برای لحظه‌یی.



شکل ۱۵. تأثیر چیدمان نصب عملگر روی ضریب پسای لحظه‌یی.

داده شده است؛ چنان که مشاهده می‌شود مقادیر آن تقریباً بر حالت عملگر دوطرفه منطبق است. از زاویه‌ی حمله -8° (زاویه پره حدود 20° درجه) به بعد کارایی عملگر سطح داخلی کاهش یافته و مقدار ضریب نیروی برای آن بر حالت بدون عملگر منطبق می‌شود. دلیل این امر قرارگیری پره در ناحیه‌ی پایین دست است که با منفی شدن زاویه‌ی حمله‌ی سطح مکش از سطح داخلی پره به سطح خارجی منتقل می‌شود. در این شرایط تشکیل گردابه در سطح خارجی افتاده و در سطح داخلی جریان کاملاً چسبیده به سطح خواهد بود و عملگر پلاسما‌ی سطح داخلی، کارایی خود را از دست می‌دهد. از این زاویه به بعد عملگر سطح بیرونی باعث افزایش مقدار نیروی برآ شده (البته نیروی برآ در این ناحیه به دلیل منفی بودن زاویه‌ی حمله منفی است اما باعث ایجاد گشتاور مثبت می‌شود) که مقدار آن منطبق بر عملگر دوطرفه است.

با مشاهده‌ی نمودار ضریب پسا مربوط به حالت بدون عملگر در شکل ۱۵ دیده می‌شود که با شروع فاز حرکت رو به پایین پره با کاهش زاویه‌ی حمله از 25° درجه نیروی پسا نیز روندی کاهشی داشته است. در زاویه‌ی حمله حدود 15° درجه (معادل زاویه پره 16° درجه) این روند معکوس شده و نیروی پسا مجدداً شروع به افزایش می‌کند. دلیل این افزایش، بزرگ‌تر شدن گردابه‌ی پادساعت‌گرد در سطح مکش است. در حالتی که عملگر پلاسما در سطح داخلی (که در این زاویه پره معادل سطح مکش است) فعال است گردابه‌ی پادساعت‌گرد ضعیف شده و باعث کاهشی شدن روند نیروی پسا در حرکت رو به پایین پره می‌شود.



شکل ۱۳. خطوط هم‌تراز ورتیسسته برای حالت بدون عملگر (سمت چپ) و عملگر سطح درونی (سمت راست) برای دو زاویه‌ی پره مختلف.

باعث شده نقطه‌ی شروع لایه‌ی برشی لایه‌ی حمله در هر دو زاویه پره 16° و 18° درجه به سمت لایه‌ی فرار حرکت کند و در نتیجه‌ی آن، گردابه‌ی پادساعت‌گرد کوچک‌تر و ضعیف‌تر شده است. وجود گردابه‌ی پادساعت‌گرد در سطح مکش پره باعث کاهش برآ و افزایش پسا می‌شود. عملگر پلاسما با ضعیف کردن این گردابه باعث کم‌تر شدن میزان پسا، افزایش برآ و در نتیجه میزان گشتاور تولیدی پره شده است.

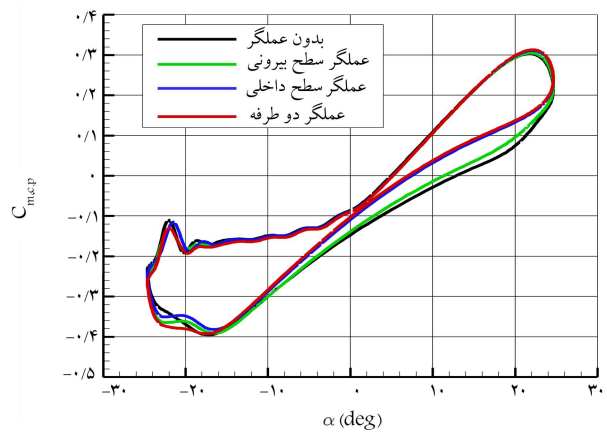
به منظور بررسی دقیق اثر عملگر پلاسما بر پدیده واماندگی دینامیکی مقادیر ضرایب نیروی برآ، پسا و گشتاور لحظه‌یی حول نقطه اتصال بر حسب زاویه‌ی حمله‌ی مؤثر به ترتیب در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ در سه حالت مختلف قرارگیری عملگر با حالت بدون عملگر مقایسه شده است. در هر سه شکل دیده می‌شود که در مسیر حرکت رو به بالای پره که معادل افزایش زاویه‌ی حمله است (زاویه‌ی پره صفر تا 115° درجه و 245° تا 36° درجه برای نسبت سرعت دورانی $2/4$) هیچ‌کدام از چیدمان‌های عملگر پلاسما تأثیری بر نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی نداشته است. دلیل عدم تأثیر عملگر پلاسما در این نواحی این است که در حرکت رو به بالای پره، ورتیسسته تولیدی و ریزش آن روی سطح مکش مانع جدا شدن جریان از سطح بالا می‌شود (همین عامل باعث بالاتر بودن زاویه‌ی واماندگی دینامیکی نسبت به واماندگی استاتیکی است). در جریان چسبیده عملگر پلاسما کارایی اصلی خود را که حذف ناحیه‌ی جدایش جریان است از دست می‌دهد. بنابراین می‌توان عملگر کنترلی را در این ناحیه غیرفعال کرد تا در مصرف انرژی صرفه جویی شود. اما در ناحیه‌ی حرکت رو به پایین پره که در نسبت سرعت دورانی $2/4$ از زاویه‌ی حمله حدود 25° درجه شروع شده و تا زاویه‌ی حمله -25° درجه ادامه می‌یابد (زاویه‌ی پره 115° تا 245° درجه) عملگر پلاسما تأثیر زیادی بر روی نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی داشته است. به طور کلی عملگر سطح بیرونی تأثیر چشمگیری نداشته ولی عملگر سطح داخلی باعث تغییر ساختار جریان و همچنین بهبود آیرودینامیک پره شده است. همچنین عملگر دوطرفه اگرچه باعث بهبود بیشتری نسبت به عملگر سطح داخلی می‌شود اما در بیشتر نقاط، نیروهای و گشتاورهای آیرودینامیکی این دو حالت بر هم منطبق‌اند.

در شکل ۱۴ افزایش مقدار ضریب نیروی برآ در اثر وجود عملگر سطح داخلی برای فاز حرکت رو به پایین پره با کاهش زاویه‌ی حمله از 25° درجه تا -8° درجه نشان

بدون تأثیر بوده و در نتیجه گشتاور کل تولیدی نیز همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود تغییری نمی‌کند. در ناحیه‌ی بالادست فاز حرکت رو به پایین پره یعنی زوایای پره ۱۱۵ تا ۱۸۰ درجه، اثرات عملگر پلاسما‌ی سطح داخلی بر روی نیروی برآ و پسا عامل اصلی و تأثیرگذار بر گشتاور کل بوده است. مهم‌ترین دستاورد استفاده از عملگر پلاسما نیز در این ناحیه رخ داده که باعث شده با کاهش اثرات منفی و اماندگی دینامیکی گشتاور منفی تولیدی در زاویه پره حدود ۱۵۰ درجه تا حد زیادی حذف شود. در ناحیه‌ی پایین دست فاز حرکت رو به پایین در زوایای پره ۱۸۰ تا ۲۴۵ درجه اثرات عملگر پلاسما‌ی سطح خارجی بر ضرایب نیروی برآ و پسا، عامل تأثیرگذار بر افزایش گشتاور کل تولیدی است. البته در ناحیه‌ی پایین دست به دلیل کوچک بودن مقادیر نیروهای برآ و پسا، گشتاور حول نقطه اتصال نیز اهمیت پیدا کرده و باعث استهلاک درصد قابل توجهی از گشتاور تولیدی توسط نیروی برآ می‌شود.

۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کنترل فعال جریان در توربین باد محور عمودی داریوس به‌وسیله عملگر پلاسما به‌صورت عددی ارزیابی شد. از روش حجم محدود فشار مبتنا و مدل عملگر پلاسما‌ی سوزن - هوانگ استفاده شد. ابتدا شناخت کاملی نسبت به پدیده‌ی و اماندگی دینامیکی در حالت بدون عملگر صورت گرفت. نتایج نشان داد گشتاور حول نقطه‌ی اتصال می‌تواند تا ۲۵ درصد در ناحیه‌ی بالادست و تا ۵۰ درصد در ناحیه‌ی پایین دست بر گشتاور لحظه‌ی پره اثرگذار باشد؛ اما مجموع گشتاور ایجاد شده توسط آن کم‌تر از ۲ درصد گشتاور کل پره است. همچنین وجود گردابه پادساعت‌گرد روی سطح مکش به‌عنوان عامل تأثیرگذار بر ساختار جریان تشخیص داده شد که می‌توان با کنترل آن عملکرد توربین را تحت تأثیر قرار داد. عملگر پلاسما باعث کنترل این گردابه شد به‌طوری که باعث افزایش برآ و کاهش پسا در فاز حرکت رو به پایین پره شد. اما در فاز حرکت رو به بالا به دلیل چسبیده بودن جریان، عملگر پلاسما کارایی خود را از دست داده و تأثیری بر ساختار جریان و گشتاور تولیدی ندارد. در زوایای پره ۱۱۵ تا ۱۸۰ درجه، عملگر پلاسما‌ی سطح داخلی و در زوایای پره ۱۸۰ تا ۲۴۵ درجه عملگر پلاسما‌ی سطح خارجی مؤثر بوده است. در نهایت عملگر سطح داخلی و دوطرفه باعث افزایش توان خروجی تا ۱۰ درصد شده اما عملگر سطح بیرونی تغییر قابل ملاحظه‌ی در توان خروجی ایجاد نکرده است.



شکل ۱۶. تأثیر چیدمان نصب عملگر بر روی ضریب گشتاور لحظه‌ی حول نقطه اتصال.

کوچک‌تر شدن گردابه‌ی پادساعت‌گرد باعث کوچک‌تر شدن گردابه‌ی کارمن معکوس می‌شود و مقدار پسا منفی یا نیروی پیشران نیز کاهش می‌یابد. در حالت بدون عملگر و عملگر فعال روی سطح بیرونی، بیشینه نیروی پسا منفی برابر ۰/۱۶ بوده در صورتی که در حالت عملگر داخلی یا دوطرفه فعال، این مقدار به ۰/۱۲ می‌رسد.

نمودار ضریب گشتاور حول نقطه اتصال که در شکل ۱۶ نشان داده شده برای فاز حرکت رو به پایین پره از زاویه‌ی حمله ۲۵ تا ۸- درجه روندی شبیه به ضریب نیروی برآ را نشان می‌دهد. مقدار گشتاور مثبت تولیدی در اثر وجود عملگر پلاسما‌ی سطح داخلی و عملگر دو طرفه افزایش می‌یابد. از زاویه‌ی حمله ۸- درجه به بعد نیز مانند روند مشاهده شده در نمودار ضریب برآ، ضریب گشتاور حول نقطه اتصال عملگر سطح داخلی منطبق بر حالت بدون عملگر است. عملگر سطح بیرونی و دو طرفه در زوایای حمله کم‌تر از ۸- درجه باعث افزایش مقدار گشتاور منفی تولیدی شده و از این طریق اثر نامطلوب بر تولید گشتاور کل پره خواهند داشت.

در مجموع اثر هر سه پارامتر نیروی برآ، نیروی پسا و گشتاور حول نقطه‌ی اتصال مطابق رابطه‌ی ۱۲ باعث ایجاد گشتاور کل حول یک پره توربین می‌شود. در فاز حرکت رو به بالای پره عملگر پلاسما بر روی نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی

پانویس‌ها

1. Gurney Flap
2. Buzzing
3. Particle Image Velocimetry (PIV)
4. Feed-Forward
5. Shyy
6. Sliding Mesh
7. Upwind

8. Bounded Second Order Implicit
9. Up-Stroke
10. Down-Stroke

منابع (References)

1. Wang, Y., Sun, X., Dong, X. and et al. "Numerical investigation on aerodynamic performance of a novel vertical

- axis wind turbine with adaptive blades”, *Energy Convers. Manag.*, **108**, pp. 275-286 (Jan 2016).
2. Wekesa, D.W., Wang, C., Wei, Y. and et al. “A numerical analysis of unsteady inflow wind for site specific vertical axis wind turbine: a case study for marsabit and garissa in Kenya”, *Renew. Energy*, **76**, pp. 648-661 (Apr 2015).
 3. Sagharichi, A., Maghrebi, M.J. and ArabGolarcheh, A. “Variable pitch blades: an approach for improving performance of darrieus wind turbine”, *J. Renew. Sustain. Energy*, **8**(5), p. 053305, (Sep 2016).
 4. Zhong, J., Li, J., Guo, P. and et al. “Dynamic stall control on a vertical axis wind turbine aerofoil using leading-edge rod”, *Energy*, **174**, pp. 246-260 (2019).
 5. Buchner, A.J., Soria, J., Honnery, D. and et al. “Dynamic stall in vertical axis wind turbines: scaling and topological considerations”, *J. Fluid Mech.*, **841**, pp. 746-766 (2018).
 6. Rezaeiha, A., Montazeri, H. and Blocken, B. “CFD analysis of dynamic stall on vertical axis wind turbines using scale-adaptive simulation (SAS): comparison against URANS and hybrid RANS/LES”, *Energy Convers. Manag.*, **196**, pp. 1282-1298 (2019).
 7. Collis, S.S., Joslin, R.D., Seifert, A. and et al. “Issues in active flow control: theory, control, simulation, and experiment”, *Prog. Aerosp. Sci.*, **40**, (4-5), pp. 237-289 (2004).
 8. Mai, H., Dietz, G., Geißler, W. and et al. “Dynamic stall control by leading edge vortex generators”, *J. Am. Helicopter Soc.*, **53**(1), p. 26 (2008).
 9. Choudhry, A., Arjomandi, M. and Kelso, R. “Methods to control dynamic stall for wind turbine applications”, *Renew. Energy*, **86**, pp. 26-37 (Feb 2016).
 10. Joo, W., Lee, B.-S., Yee, K. and et al. “Combining passive control method for dynamic stall control”, *J. Aircr.*, **43**, (4), pp. 1120-1128 (Jul 2006).
 11. Karim, M.A. and Acharya, M. “Suppression of dynamic-stall vortices over pitching airfoils by leading-edge suction”, *AIAA J.*, **32**(8), pp. 1647-1655 (Aug 1994).
 12. Müller-Vahl, H.F., Nayeri, C.N., Paschereit, C.O. and et al. “Dynamic stall control via adaptive blowing”, *Renew. Energy*, **97**, pp. 47-64 (Nov 2016).
 13. Park, Y.W., Lee, S.-G., Lee, D.-H. and et al. “Stall control with local surface buzzing on a NACA 0012 Airfoil”, *AIAA J.*, **39**(7), pp. 1400-1402 (Jul 2001).
 14. Yen, J. and Ahmed, N.A. “Enhancing vertical axis wind turbine by dynamic stall control using synthetic jets”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **114**, pp. 12-17 (Mar 2013).
 15. Post, M.L. and Corke, T.C. “Separation control using plasma actuators: dynamic stall vortex control on oscillating airfoil”, *AIAA J.*, **44**(12), pp. 3125-3135 (Dec 2006).
 16. Velasco, D., López Mejia, O. and Lain, S. “Numerical simulations of active flow control with synthetic jets in a darrieus turbine”, *Renew. Energy*, **113**, pp. 129-140 (Dec 2017).
 17. Zhu, H., Hao, W., Li, C. and et al. “Simulation on flow control strategy of synthetic jet in an vertical axis wind turbine”, *Aerosp. Sci. Technol.*, **77**, pp. 439-448 (Jun 2018).
 18. Greenblatt, D., schulman, M. and Ben-Harav, A. “Vertical axis wind turbine performance enhancement using plasma actuators”, *Renew. Energy*, **37**(1), pp. 345-354 (Jan 2012).
 19. Greenblatt, D., Ben-Harav, A. and Mueller-Vahl, H. “Dynamic stall control on a vertical-axis wind turbine using plasma actuators”, *AIAA J.*, **52**(2), pp. 456-462 (Feb 2014).
 20. Ben-Harav, A. and Greenblatt, D. “Plasma-based feed-forward dynamic stall control on a vertical axis wind turbine”, *Wind Energy*, **19**(1), pp. 3-16 (Jan 2014).
 21. Greenblatt, D. and Lautman, R. “Inboard/outboard plasma actuation on a vertical-axis wind turbine”, *Renew. Energy*, **83**, pp. 1147-1156 (Nov 2015).
 22. Ma, L., Wang, X., Zhu, J. and et al. “Dynamic stall of a vertical-axis wind turbine and its control using plasma actuation”, *Energies*, **12**(19), p. 3738 (Sep 2019).
 23. Mohamed, O.S., Elbaz, A.M.R. and Bianchini, A. “A better insight on physics involved in the self-starting of a straight-blade darrieus wind turbine by means of two-dimensional computational fluid dynamics”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **218**, p. 104793 (Nov 2021).
 24. Du, L. “Numerical and experimental investigations of darrieus wind turbine start-up and operation”, University of Durham, Phd Thesis, Ann Arbor (2015).
 25. Greenblatt, D. and Wagnanski, I. “Dynamic stall control by periodic excitation, part 1: NACA 0015 parametric study”, *J. Aircr.*, **38**(3), pp. 430-438 (May 2001).
 26. Suzen, Y., Huang, G., Jacob, J. and et al. “Numerical simulations of plasma based flow control applications”, *In 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit* (2005).
 27. Durscher, R. and Roy, S. “Evaluation of thrust measurement techniques for dielectric barrier discharge actuators”, *Exp. Fluids*, **53**(4), pp. 1165-1176 (2012).
 28. Menter, F.R. “Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective”, *Int. J. Comput. Fluid Dyn.*, **23**(4), pp. 305-316 (Apr 2009).
 29. Battisti, L., Persico, G., Dossena, V. and et al. “Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures”, *Renew. Energy*, **125**, pp. 425-444 (2018).
 30. Franchina, N., Persico, G. and Savini, M. “2D-3D computations of a vertical axis wind turbine flow field: modeling issues and physical interpretations”, *Renew. Energy*, pp. 1-20 (2018).
 31. Silva-Llanca, L. and Inostroza-Lagos, S. “Optimum power generation assessment in an H-Darrieus vertical axis wind turbine via exergy destruction minimization”, *Energy Convers. Manag.*, **243**, pp. 1-13 (2021).
 32. Castelli, M.R., Pavesi, G., Battisti, L. and et al. “Modeling strategy and numerical validation for a darrieus vertical axis micro-mind turbine”, *Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, **7**(IMECE2010-39548), *Fluid Flow, Heat Transfer and Thermal Systems, Parts A and B*. Vancouver, British Columbia, Canada. November, pp. 409-418, ASME (May 2010). <https://doi.org/10.1115/IMECE2010-39548>.

33. Lam, H.F. and Peng, H.Y. "Study of wake characteristics of a vertical axis wind turbine by two-and three-dimensional computational fluid dynamics simulations", *Renew. Energy* 90, pp.386-398 (May 2016).
34. Bouchmal, A. "Modeling of dielectric-barrier discharge actuator", Master Science Thesis (Delft University) (2011).
35. Balduzzi, F., Bianchini, A., Ferrara, G. and et al. "Static and dynamic analysis of a NACA 0021 airfoil section at low reynolds numbers based on experiments and CFD", *In Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO2 Power Cycles; Wind Energy*, p. V009T48A004 (2018).
36. Zou, S., Gao, A., Shi, Y. and et al. "Causal mechanism behind the stall delay by airfoil's pitching-up motion", *Theor. Appl. Mech. Lett*, 7(5), pp. 311-315 (Sep 2017).
37. Sarkar, S. and Venkatraman, K. "Numerical simulation of thrust generating flow past a pitching airfoil", *Comput. Fluids*. 35(1), pp. 16-42 (Jan 2006).
38. Hosseini, A.A. and Ashrafizadeh, A. "Numerical simulation of the wake structure and thrust/lift generation of a pitching airfoil at low reynolds number via an immersed boundary method", *J. Aerosp. Technol. Manag*, 7(3), pp. 334-350 (Sep 2015).