

اثر پروفیل مقطع پره یک میکرو توربین بادی بر زمان راه‌اندازی آن

ابوالفضل پوررجبیان^۱

استادیار

مرتضی رحمانپور^۲

استادیار

در این پژوهش به محاسبه زمان راه‌اندازی یک میکرو توربین بادی پرداخته می‌شود. به این منظور از نظریه‌ی اندازه حرکت المان پره استفاده شده و پس از صحت سنجی کد تهیه شده، پارامتر زمان راه‌اندازی محاسبه می‌شود. سپس با توجه به محدودیت کاری رینولدز، چهار ایرفویل *NACA4412*، *SD7062*، *SG6040* و *SG6043* انتخاب و اثر بهره‌گیری از آن‌ها بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد استفاده از ایرفویل *SG6043* نه تنها توان بیشتری را به همراه داشته بلکه زمان راه‌اندازی کمتری نیز دارد. نسبت بالای برآ به پس‌آی ایرفویل *SG6043* به همراه کم بودن مساحت سطح از عوامل اصلی برتری این ایرفویل می‌باشد.

واژه‌های راهنما: میکرو توربین بادی، زمان راه‌اندازی، پره، ایرفویل، ضریب توان

۱- مقدمه

بر مبنای استاندارد IEC 61400-2 [۱]، که فقط توربین‌های بادی محور افقی را شامل می‌شود، توربین بادی کوچک به توربینی گفته می‌شود که سطح جاروب شده توسط روتور کمتر از 200 m^2 باشد که متناسب با توان نامی 50 kW است. در یک تقسیم‌بندی جزئی‌تر، توربین‌های بادی کوچک در سه گروه مینی، متوسط و میکرو با توان کمتر از 50 ، 5 و 1 کیلووات قرار می‌گیرند [۲]. اغلب اوقات توربین‌های بادی کوچک برای استفاده خانگی و کشاورزی (جهت آب‌کشی) و همچنین برای شارژکردن باتری جهت استفاده در منطقه‌های دورافتاده که دسترسی به شبکه برق شهری ندارند به کار می‌روند. برخلاف توربین‌های بادی بزرگ که در منطقه‌های بادخیز مورد استفاده قرار می‌گیرند، این توربین‌ها در مکان‌هایی که پتانسیل مناسبی برای وزش باد مداوم با سرعت بالا وجود ندارد نیز نصب می‌شوند [۳]. نبود مکانیزم کنترلی گام^۲ در توربین‌های بادی کوچک جهت کاهش هزینه، مهم‌ترین تفاوت بین توربین‌های بادی کوچک و بزرگ است.

^۱نویسنده مسئول، استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج a.pourrajabian@merc.ac.ir
^۲استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز ac.rahmanpour@azaruniv.edu

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۰۷، تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۲۳

به کمک این مکانیزم کنترلی، پره حول محور طولی خود به چرخش در آمده و با تغییر دادن زاویه‌ی تاب^۱ پره، زاویه‌ی بین صفحه‌ی چرخش و وتر ایرفویل، سعی در نگهداری مقدار زاویه‌ی حمله در حد بهینه دارد. به ازای مقدار بهینه‌ی زاویه حمله، گشتاور آیرودینامیکی بیشتری توسط مقطع‌های پره (ایرفویل‌ها) تولید می‌شود. توربین‌های بادی کوچک به دلایل اقتصادی فاقد این سیستم کنترلی بوده و از این رو امکان قرارگیری مناسب مقطع‌های پره در جهت باد وجود ندارد [۳]. این مسأله به هنگام راه‌اندازی توربین‌های کوچک از حالت سکون بسیار مهم می‌باشد زیرا در حین راه‌اندازی زاویه حمله‌ی ایجاد شده در طول پره بالا بوده که کاهش نیروی برآ و گشتاور آیرودینامیکی را به همراه داشته و در نتیجه پره دیرتر به چرخش درآمده و تولید توان به تأخیر می‌افتد [۴]. موضوع تأخیر زمانی راه‌اندازی توربین در پژوهش‌های تجربی انجام گرفته مورد تأیید قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی دو فاز مهم در حین راه‌اندازی پره‌ی توربین بادی را آشکار کردند: فاز طولانی سکون^۲ به همراه فاز شتاب سریع^۳ که بر خلاف فاز ابتدایی زمان کمتری را به همراه دارد [۶ و ۵]. در ابتدا و با آغاز وزش باد چرخش توربین بسیار کند بوده و زاویه حمله‌های ایجاد شده روی پره‌ی توربین بالا می‌باشد. به دلیل مقدار بالای زاویه حمله، گشتاور آیرودینامیکی لازم و مورد نیاز جهت چرخش پره ایجاد نشده و در نتیجه توربین هیچ توانی را تولید نمی‌کند. شروع فاز دوم با کاهش زاویه حمله همراه بوده و پره‌ی توربین شتاب بیشتری گرفته و به نقطه‌ای می‌رسد که قادر به تولید توان می‌باشد. بازه‌ی زمانی فاز دوم بسیار کمتر از فاز ابتدایی بوده و بنابراین زمان راه‌اندازی توربین را برابر با بازه زمانی فاز ابتدایی در نظر می‌گیرند [۶ و ۵]. در حین فاز ابتدایی حرکت (فاز سکون)، توربین بادی کوچک هیچ توانی را تولید نکرده و در این بازه قابل استفاده نمی‌باشد. اگرچه زمان این بازه به سرعت باد بستگی داشته اما نشان داده شده است که برای بادهای با سرعت بالا، زمان قابل توجهی صرف رسیدن توربین به نقطه‌ای می‌شود که بتواند توان مطلوب را تولید کند [۶ و ۵]. جهت رفع این مشکل، پژوهشگران به تغییر هندسه‌ی خارجی پره پرداخته و سعی در کاهش زمان راه‌اندازی داشتند [۸ و ۷]. در این راستا به بررسی نقش دو بخش مختلف پره‌ی توربین بادی کوچک، ریشه و نوک، پرداخته شده است. نتایج نشان داده است که بخش قابل توجهی از توان توربین توسط قسمت نوک پره بدست آمده و بخش ریشه می‌تواند در تسریع راه‌اندازی توربین کمک کند. در واقع گشتاور آیرودینامیکی ایجاد شده توسط المان‌های ابتدایی پره و در ریشه‌ی آن نقش مهمی در حرکت پره از حالت سکون داشته و راه‌اندازی پره بیشتر توسط گشتاور تولید شده توسط این المان‌ها انجام می‌گیرد [۹ و ۱۰]. هندسه‌ی ایرفویل تعیین کننده‌ی ضرایب آیرودینامیکی آن بوده و نقش مهمی در تولید گشتاور آیرودینامیکی تولید شده به کمک پره‌ی توربین بادی و توان خروجی از آن دارد. حوزه رینولدز کاری توربین‌های بادی کوچک بر خلاف توربین‌های بزرگ و همچنین هواپیما، بسیار پایین (زیر پانصد هزار) بوده و از این رو، ایرفویل‌های متنوع و قابل توجهی برای استفاده وجود ندارد [۳]. سلیگ و گیگوتر [۱۱] به طراحی خانواده‌ای از ایرفویل‌های سری SG پرداختند که مختص استفاده در پره توربین‌های بادی کوچک می‌باشد.

¹ Twist

² Idling

³ Rapid acceleration

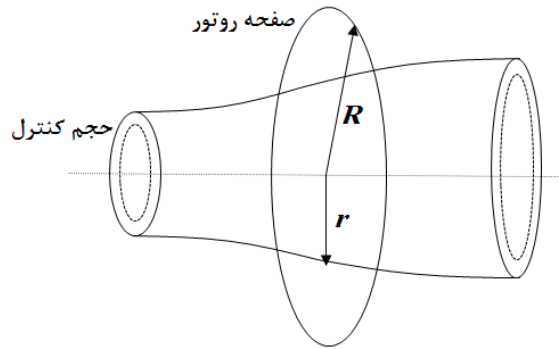
این خانواده از چهار ایرفویل SG6040، SG6041، SG6042 و SG6043 تشکیل شده که قابل استفاده در ریشه پره (به ویژه ایرفویل SG6040 به دلیل ضخامت بالا) و همچنین نوک پره (به ویژه SG6043) می‌باشد. ایرفویل‌های مذکور توسط محققان بسیاری در پره توربین بادی کوچک مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴-۱۷]. با این وجود از ایرفویل‌های مورد استفاده در صنعت هوانوردی مانند ایرفویل‌های خانواده ناکا [۱۶-۱۵] و [۳] و SD7062 (مورد استفاده در گلايدر) [۱۷ و ۳] نیز در پره توربین بادی کوچک استفاده می‌شود. با وجود اهمیت ایرفویل مورد استفاده در پره از منظر کارایی آیرودینامیکی، بررسی آن از جنبه راه‌اندازی نیاز به بررسی بیشتر دارد که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود. مطالعات انجام گرفته توسط پژوهشگران [۱۰-۷] در این زمینه بیشتر بر روی هندسه خارجی پره (تعیین طول وتر و زاویه تاب) متمرکز بوده و اثر نوع ایرفویل بکار گرفته شده از منظر راه‌اندازی بررسی نشده و نیاز به مطالعه بیشتر دارد. انگیزه این بررسی کاهش انرژی تولیدی سالانه محسوس حاصل از نبود مکانیزم کنترلی زاویه گام در توربین‌های بادی کوچک می‌باشد. به طور خاص نتایج مرجع [۴] نشان داده است که بسته به بار^۱ مورد استفاده و محل قرارگیری توربین، توان خروجی سالانه می‌تواند تا ۴۰٪ تغییر کند. از این رو در پژوهش حاضر اثر ایرفویل بکار رفته در مقطع پره بر زمان راه‌اندازی یک میکروتوربین بادی از حالت سکون پرداخته می‌شود. به این منظور یک میکروتوربین بادی با هندسه‌ی معلوم انتخاب شده و عملکرد آن از منظر توان خروجی و زمان راه‌اندازی برای چهار ایرفویل انتخابی ارزیابی می‌شود. در این راستا، چهار ایرفویل NACA4412، SD7062، SG6040 و SG6043 با توجه به رژیم جریان و رینولدز کاری توربین انتخاب شده‌اند. مطالعه‌ی پژوهش‌های انجام گرفته [۱۷-۷] نشان می‌دهد که این ایرفویل‌ها کارایی بالایی داشته و در صورت استفاده در پره توربین بادی کوچک عملکرد قابل قبولی دارند. جهت انجام ارزیابی عملکرد ایرفویل‌های مذکور و مقایسه آن‌ها از منظر راه‌اندازی، از نظریه‌ی اندازه حرکت المان پره^۲ استفاده شده که در بخش بعدی معرفی می‌شود. همچنین در بخش ۳ به نحوه‌ی محاسبه‌ی زمان راه‌اندازی به کمک نظریه‌ی مذکور پرداخته خواهد شد و در ادامه نتایج پژوهش ارائه می‌شود.

۲- نظریه اندازه حرکت المان پره

هدف اصلی از ارائه‌ی یک مدل آیرودینامیکی برای تحلیل جریان در اطراف پره‌ی توربین بادی تعیین گشتاور آیرودینامیکی وارد بر پره و توان خروجی از آن می‌باشد. در نظریه اندازه حرکت المان پره، پره به تعدادی المان تقسیم شده و برای هر المان پره از یک لوله جریان به عنوان حجم کنترل استفاده می‌شود (شکل ۱). در ادامه معادله‌ی بقای جرم به همراه معادله‌های اندازه حرکت خطی و اندازه حرکت زاویه‌ای برای حجم کنترل انتخابی نوشته می‌شود. سپس مقدار گشتاور و نیروی محوری برای المان پره (ایرفویل) محاسبه خواهد شد. با محاسبه‌ی ضرایب پسا و برآ در هر مقطع از پره به شعاع r ، توزیع نیروها و گشتاور آیرودینامیکی در طول پره، به شعاع R ، تعیین شده و در ادامه با داشتن سرعت گردش روتور، توان خروجی محاسبه می‌شود [۱۸].

¹ Load

² Blade Element Momentum (BEM)



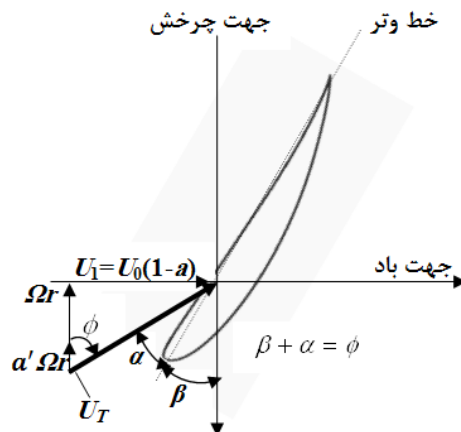
شکل ۱ - حجم کنترل در نظر گرفته شده در نظریه اندازه حرکت المان پره

شکل (۲) مثلث سرعت‌ها را بر روی مقطع پره در شعاع r نشان می‌دهد که در آن U_0 سرعت جریان آزاد و U_T سرعت برآیند می‌باشد که با توجه به مقدار سرعت ورودی در مقطع پره (U_1) و همچنین سرعت زاویه‌ای توربین (Ω) بدست می‌آید. در شکل (۲)، a ضریب القای محوری بوده که تعیین می‌کند چه کسری از سرعت جریان آزاد (U_0) به المان پره می‌رسد. همچنین a' ضریب القایی زاویه‌ای بوده و سبب القای جریان چرخشی به اندازه‌ی $a'r\Omega$ در مقطع پره می‌شود [۱۹]. زوایای نشان داده شده در شکل (۲) نیز زاویه حمله (α)، زاویه تاب توربین (β) و زاویه جریان (ϕ) می‌باشند. استفاده از نظریه‌ی اندازه حرکت المان پره در هر مقطع از پره به حل یک دستگاه غیرخطی با سه معادله و سه مجهول a ، a' و ϕ می‌انجامد. دو معادله از این دستگاه از برابری نیروی محوری و گشتاور وارده بر المان پره (شکل ۲) با مقادیر متناظر برای حجم کنترل انتخابی (شکل ۱) بدست می‌آیند که از رابطه‌های (۱) و (۲) تعیین می‌شوند [۳].

$$dF = 4\pi\rho U_0^2 a(1-a)dr \quad (1)$$

$$dQ = 4\pi\rho U_0 (1-a)a'\Omega r^3 dr \quad (2)$$

معادله سوم دستگاه مذکور با توجه به شکل (۲) و از رابطه‌ی مثلثاتی (۳) بدست می‌آید.



شکل ۲ - بردارهای سرعت روی المان پره در شعاع r

$$\tan \phi = \frac{U_0(1-a)}{\Omega r(1+a')} \quad (۳)$$

با معلوم بودن سه مجهول a ، a' و ϕ می‌توان نیروی محوری و گشتاور وارد بر المان پره را تعیین کرد. به این منظور با مقداردهی اولیه به a و a' ، مقدار ϕ به کمک رابطه (۳) تعیین و در ادامه مقدار زاویه حمله و ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل مربوطه محاسبه می‌شوند. با داشتن ضرایب آیرودینامیکی برای ایرفویل انتخابی، مقدار نیرو (dF) و گشتاور وارد بر المان پره (dQ) بدست می‌آیند. در مرحله آخر این مقادیر جایگزین مقادیر متناظر برای حجم کنترل انتخابی می‌شوند و مقادیر جدید a و a' به کمک روابط (۱) و (۲) تعیین می‌شوند. اکنون می‌توان مقدار جدید زاویه جریان (ϕ) را به کمک رابطه‌ی (۳) تعیین کرد و روند مذکور را تا رسیدن به دقت دلخواه ادامه داد. شکل (۳) الگوریتم محاسبه بارگذاری برای یک المان در نظریه‌ی اندازه حرکت المان پره را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که جهت تضمین همگرایی الگوریتم جزئیات زیر در روند عددی لحاظ شده است:

(۱) کد عددی در نرم‌افزار MATLAB تهیه شده است.
 (۲) از ۱۵ المان در سرتاسر پره (از ریشه تا نوک پره) استفاده شده است. خاطر نشان می‌شود که تعداد ۱۰ تا ۲۰ المان به منظور یافتن توزیع مناسبی از نیروهای آیرودینامیکی توسط پژوهشگران پیشنهاد می‌شود [۳، ۱۹].

(۳) مقدار صفر برای a و a' جهت حدس اولیه و آغاز الگوریتم در نظر گرفته شد [۲۰].
 (۴) مقدار خطای قابل قبول جهت همگرایی الگوریتم کمتر از 0.001 در نظر گرفته شد.
 (۵) از آن جا دقت نظریه‌ی اندازه حرکت المان پره به دقت ضریب برآ و پسای ایرفویل بستگی دارد، مقدار این ضرایب از داده‌های تجربی اندازه گیری شده در تونل باد بهره گرفته شد که در بخش ۴ به آن پرداخته شده است.

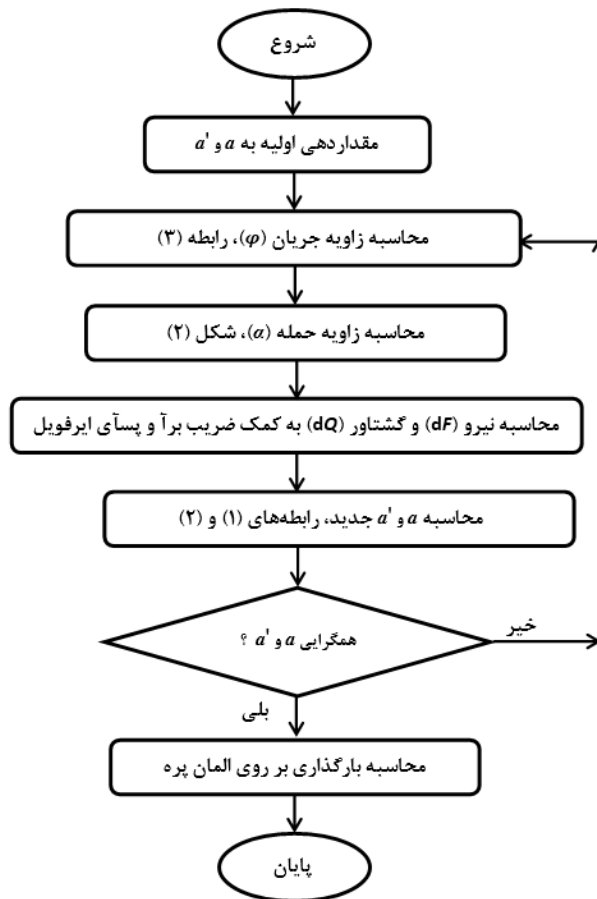
الگوریتم محاسبه بارگذاری برای تمام المان‌های پره انجام گرفته و پس از محاسبه‌ی گشتاور آیرودینامیکی (Q)، مقدار ضریب توان (C_p) توربین از تقسیم توان خروجی از توربین ($Q\Omega$) به توان موجود در جریان هوا قابل محاسبه است [۱۸ و ۱۹]

$$C_p = \frac{Q\Omega}{0.5\rho A U_0^3} \quad (۴)$$

که A مساحت روتور توربین و ρ چگالی هوا می‌باشد. جهت در نظر گرفتن اتلافات نوک پره از مدل پرانتل بهره گرفته شده است. هدف از این کار تعیین اثر اتلاف‌های ناشی از نوک پره در طول پره می‌باشد. این پارامتر که تابع تعداد پره (N)، زاویه‌ی جریان (ϕ) و همچنین موقعیت مکانی المان (r) می‌باشد به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]

$$F_p = (2/\pi) \cos^{-1}(e^{-f}) \quad (۵)$$

که مقدار f از رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۹]



شکل ۳ - الگوریتم محاسبه بارگذاری برای یک المان در نظریه‌ی اندازه حرکت المان پره

$$f = N(R - r) / (2r \sin \phi) \quad (۶)$$

اتلاف‌های نوک پره، نیرو و گشتاور بدست آمده توسط نظریه‌ی اندازه حرکت المان پره را تغییر می‌دهند. به کمک این مدل، پارامتر مثبت F_P (رابطه ۵) که کمتر از واحد می‌باشد به طور مستقیم وارد معادله‌های (۱) و (۲) مربوط به نظریه‌ی اندازه حرکت پره می‌شود اما تغییری در روند محاسبات ذکر شده جهت تعیین بارگذاری روی پره به وجود نمی‌آید [۱۸].

۳- تعیین زمان راه‌اندازی توربین

با وجود نیاز به پتانسیل مناسب باد جهت تولید برق به کمک مبدل‌های انرژی بادی، استفاده توربین‌های بادی کوچک در مناطق کم سرعت باد نیز توسط محققان [۲۱-۲۳] مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا کاهش زمان راه‌اندازی میکرو توربین‌های بادی از اهمیت مناسبی در مناطق کم سرعت باد مانند مکان‌های شهری برخوردار است. با بهره‌گیری از نظریه‌ی اندازه حرکت المان پره و استفاده از رابطه‌های تحلیلی ارائه شده برای ضرایب آیرودینامیکی در زاویه حمله‌ی بالا می‌توان به تعیین زمان راه‌اندازی توربین بادی کوچک از حالت سکون پرداخت. مقدار گشتاور ایجاد شده توسط المان پره (dQ) برابر است با [۳]

$$dQ = \frac{1}{2} N \rho U_T^2 c (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r dr \quad (۷)$$

که U_T مقدار سرعت برآیند می‌باشد (شکل ۲). در حین راه‌اندازی جهت تخمین ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل در زاویه حمله‌های بالا، می‌توان از روابط (۸) و (۹) با دقت قابل قبول و مستقل از نوع ایرفویل بهره گرفت [۷]

$$C_l = \sin(2\alpha) \quad (8)$$

$$C_d = 1 - \cos(2\alpha) \quad (9)$$

با جایگزینی روابط مربوط به ضرایب آیرودینامیکی در رابطه‌ی (۷) و پس از بی‌بعد کردن همه فاصله‌ها بر حسب طول پره (R) و همه سرعت‌ها بر حسب U_0 ، گشتاور آیرودینامیکی وارد بر پره در حین راه‌اندازی برابر است با [۷]

$$Q = N\rho U_0^2 R^3 \int_{r_h}^1 (1 + \lambda_r^2)^{1/2} cr \sin \beta (\cos \beta - \lambda_r \sin \beta) dr \quad (10)$$

که r_h شعاع ریشه‌ی پره و λ_r نسبت سرعت نوک محلی می‌باشد که با معلوم بودن نسبت سرعت نوک پره (λ) قابل محاسبه خواهد بود

$$\lambda_r = \lambda r / R, \quad \lambda = \frac{R\Omega}{U_0} \quad (11)$$

معادله‌ی (۱۰) مقدار گشتاور آیرودینامیکی راه‌انداز را که از طریق هوا به پره وارد می‌شود تعیین می‌کند. نکته‌ی قابل توجه در رابطه (۱۰) عدم وابستگی گشتاور آیرودینامیکی راه‌انداز به عدد رینولدز می‌باشد که به دلیل بهره‌گیری از رابطه‌های (۸) و (۹) جهت تعیین ضرایب آیرودینامیکی در زاویه حمله‌های بالا می‌باشد. در حین راه‌اندازی توربین از حالت ایستا و با فرض این‌که هیچ توانی در زمان راه‌اندازی پره تولید نشده و توربین هنوز زیر بار نرفته است، می‌توان تغییر نسبت سرعت نوک (λ) با زمان را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R(Q - Q_r)}{JU} \quad (12)$$

که در آن Q_r گشتاور مقاوم ژنراتور و J اینرسی روتور می‌باشد که با بی‌بعد کردن تمامی فواصل نسبت به طول پره (R) از رابطه (۱۳) قابل محاسبه است [۷]:

$$J = N\rho_b A_b R^5 \left[\int (cr)^2 dr + \frac{1}{12} \left(\int c^4 \cos^2 \beta dr + A_b^2 \int c^4 \sin^2 \beta dr \right) \right] \quad (13)$$

که در آن A_b و ρ_b به ترتیب مساحت ایرفویل مورد استفاده در پره (با فرض طول وتر واحد) و همچنین چگالی جنس پره می‌باشند.

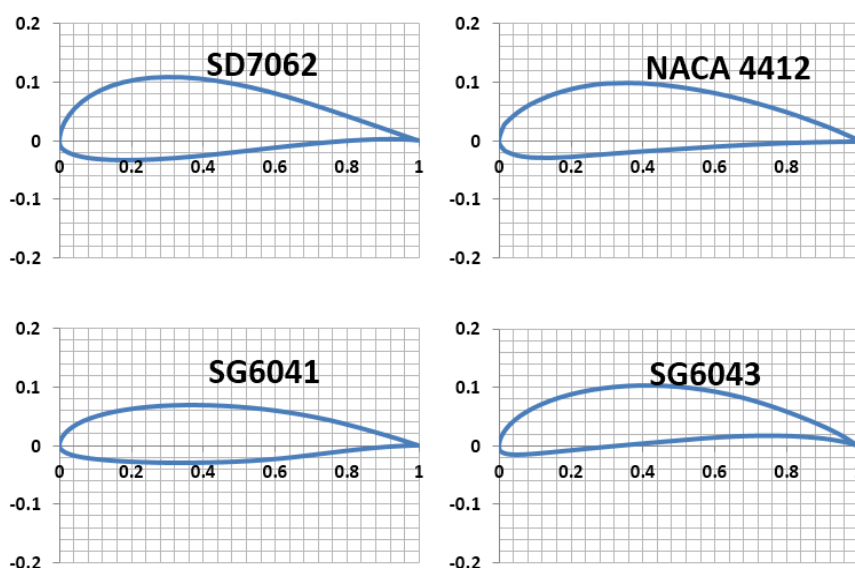
حل معادله دیفرانسیل (۱۲) معمولی منجر به تعیین زمان لازم برای راه‌اندازی توربین از حالت ایستا می‌شود. به این منظور با در نظر داشتن مقداری مشخص برای نسبت سرعت نوک (λ)، این معادله حل شده و زمان رسیدن سرعت نوک پره توربین از حالت ایستا ($\lambda=0$) تا مقدار مشخص λ (که از قبل در نظر گرفته شده است) محاسبه می‌شود.

مقدار $\lambda_f=1$ به عنوان نقطه‌ی انته‌ای راه‌اندازی در نظر گرفته شده و معادله‌ی (۱۲) به کمک این شرط حل می‌شود. بر مبنای این انتخاب، زمان راه‌اندازی، بازه‌ای می‌باشد که پره از حالت سکون ($\lambda=0$) شروع به دوران کرده و سرعت دورانی نوک آن تا زمانی که برابر با سرعت باد شود افزایش می‌یابد. این انتخاب ($\lambda_f=1$) بر این اساس می‌باشد که مقدار λ تعیین کننده‌ی زاویه حمله در طول پره می‌باشد. از آن‌جا که در تعیین گشتاور آیرودینامیکی راه‌انداز، رابطه‌ی (۱۰)، از معادله‌های مربوطه به تعیین ضرایب آیرودینامیکی در زاویه حمله بالا استفاده شد، بازه‌ی در نظر گرفته شده برای زمان راه‌اندازی تضمین کننده‌ی مقدار بالای زاویه حمله در طول پره بوده و صحت استفاده از روابط (۸) و (۹) تأیید می‌شود [۳]. لازم به ذکر است که برای محاسبه اینرسی روتور، رابطه (۱۳)، از روش انتگرال‌گیری ذوزنقه‌ای و برای حل معادله دیفرانسیل (۱۲) از گام زمانی ۰/۱ ثانیه بهره گرفته شده است.

۴- انتخاب ایرفویل برای مقطع پره میکرو توربین باد

با وجود ایرفویل‌های مختلف و متنوع برای استفاده در پره‌ی توربین‌های بادی بزرگ، ایرفویل‌های قابل توجهی برای توربین‌های بادی کوچک طراحی نشده است. برای پره‌ی توربین بادی بزرگ از ایرفویل‌های ضخیم‌تر در قسمت ریشه‌ی پره جهت بالا بردن استحکام سازه‌ی پره استفاده شده در حالی که از ایرفویل‌های نازک با کارایی بالای آیرودینامیکی در قسمت نوک بهره گرفته می‌شود. بر خلاف توربین‌های بادی بزرگ که در آن‌ها از چند نوع ایرفویل مختلف در طول پره استفاده می‌شود، نوع ایرفویل موجود در پره‌ی توربین بادی کوچک تغییری نکرده تا هزینه‌ی ساخت پره تا حد امکان کاهش یابد [۲۴ و ۳].

شکل (۴) ایرفویل‌های انتخابی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در انته‌ای بخش یکم اشاره شد، این ایرفویل‌ها با توجه به حوزه‌ی رینولدز کاری آن‌ها (زیر پانصد هزار) که متناسب استفاده در پره‌ی توربین بادی پژوهش حاضر است، انتخاب شده‌اند. در جدول (۱) به صورت مختصر به معرفی ایرفویل‌های انتخابی و ویژگی‌های آن‌ها به همراه مراجع مربوطه پرداخته شده است.



شکل ۴ - هندسه ایرفویل‌های انتخابی [۱۱ و ۳]

جدول ۱ - معرفی ایرفویل‌های بکاررفته در توربین انتخابی

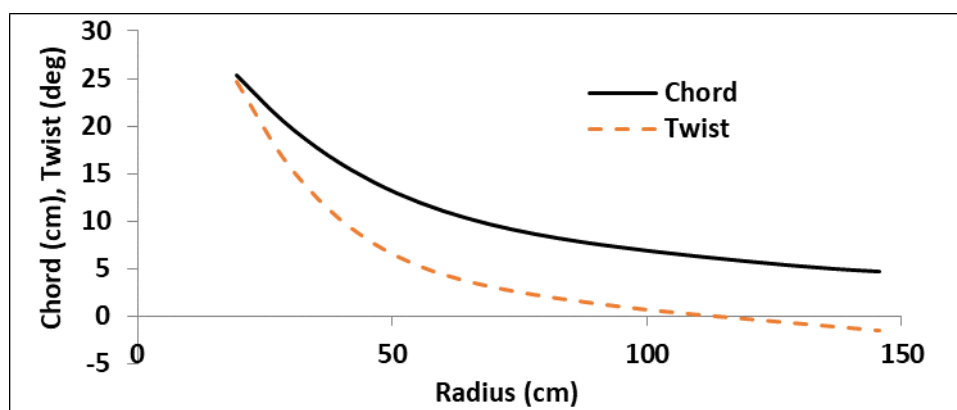
ایرفویل	مرجع مورد استفاده	مشخصه ویژه	کاربرد
NACA4412	[۱۵-۱۶ و ۳]	ایرفویل مبنا برای محاسبات بهینه‌سازی	بال هواپیما، پره توربین بادی
SD7062	[۲۵ و ۱۷ و ۱۲ و ۳]	ضخامت بالا (۰.۱۴) جهت استفاده در قسمت ریشه پره برای تحمل گشتاور خمشی	گلاپدر، پره توربین بادی
SG6041	[۳ و ۱۳-۱۱]	با ضخامت ۱۰٪ جهت استفاده در طول پره	پره توربین بادی
SG6043	[۲۶-۲۹ و ۱۴ و ۱۲-۷ و ۳]	با ضخامت ۱۰٪ جهت استفاده در طول پره	پره توربین بادی

۵- نتایج

توربین بادی محور افقی انتخابی توسط اندرسن و همکارانش [۳۰] معرفی و به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. قطر این توربین که مجهز به ژنراتور مغناطیس دائم بوده سه متر و دارای دو پره می‌باشد. همچنین نسبت سرعت نوک طراحی توربین ۱۰ و پروفیل مورد استفاده در طول پره این توربین NACA4412 است [۳۰]. شکل (۵) توزیع وتر و زاویه تاب را در طول پره توربین نشان می‌دهد. نظر به در دسترس بودن داده‌های تجربی موجود (اندازه‌گیری شده در تونل باد)، این توربین توسط پژوهشگران دیگر مانند وود [۳] و اسپرا [۳۱] نیز مورد بررسی قرار گرفته و در این پژوهش نیز به آن پرداخته شده است.

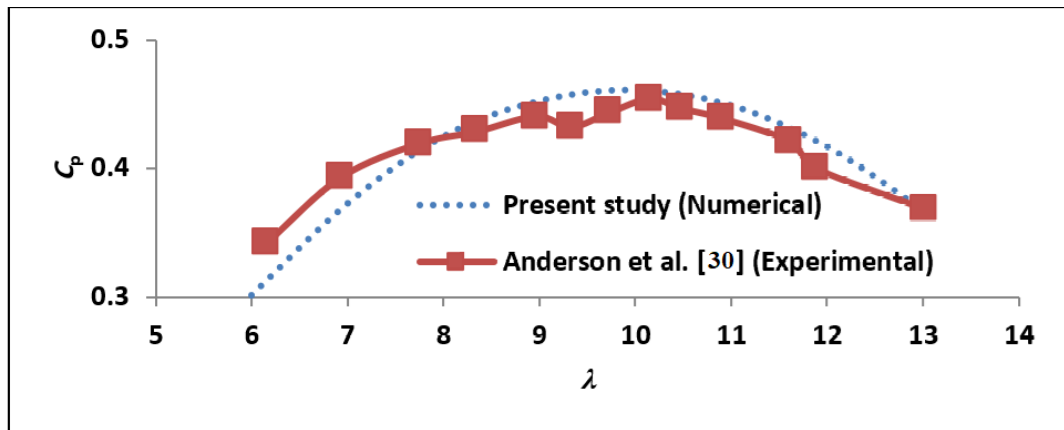
۱-۵- اعتبارسنجی مدل عددی

جهت بررسی صحت کد محاسباتی نوشته شده، این بخش به مقایسه‌ی بین نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی اندرسن و همکارانش [۳۰] با نتایج حاصل از پژوهش حاضر که مبتنی بر نظریه‌ی اندازه حرکت المان پره می‌باشد می‌پردازد. نتایج ارائه شده توسط اندرسن و همکارانش در سرعت ۱۰ m/s بدست آمده و بر حسب نسبت سرعت نوک (λ) ارائه شده‌اند. با جایگذاری مشخصه‌های هندسی توربین مذکور و به کمک ضرایب برآ و پساً برای ایرفویل NACA4412، کد نوشته شده برای λ های مختلفی اجرا شد که نتایج آن در شکل (۶) آورده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده توسط کد عددی نوشته شده با داده‌های تجربی همخوانی قابل قبولی دارد.

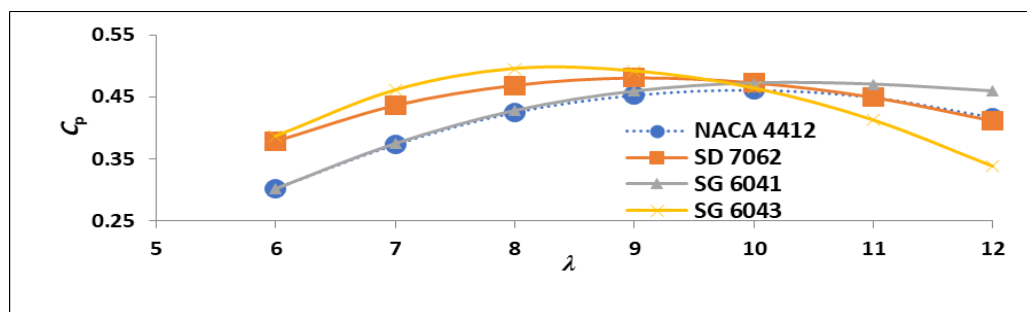


شکل ۵ - توزیع طول وتر و زاویه تاب در طول پره‌ی توربین بادی در پژوهش اندرسن و همکارانش [۳۰]

نکته‌ی قابل توجه آن است که ضریب توان توربین با نسبت سرعت نوک افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. در نسبت‌های سرعت نوک پایین بارگذاری روی توربین سبک می‌باشد و سرعت در مقطع توربین کاهش کمی دارد. در این حالت آهنگ جریان سیال عبوری از توربین بالا بوده اما بخش قابل توجهی از انرژی موجود در ذرات سیال از فواصل بین پره‌ها عبور کرده و در دنباله توربین هدر رفته و تلف می‌شود. از طرف دیگر و در نسبت‌های سرعت نوک بالا، بارگذاری روی توربین سنگین می‌باشد و کاهش سرعت جریان در مقطع توربین قابل توجه است. در این حالت فضای ممکن برای عبور ذرات سیال از فواصل بین پره‌های کاهش یافته و این امکان وجود دارد که بخش اعظمی از انرژی جنبشی موجود در ذرات سیال به انرژی مکانیکی تبدیل شود. با این حال از آنجا که سرعت جریان در مقطع توربین کاهش قابل توجهی داشته است آهنگ جریان سیال عبوری از توربین کم می‌باشد و بنابراین نمی‌توان از انرژی موجود در ذرات سیال به نحو قابل توجهی بهره برد. در نتیجه ضریب توان توربین در نسبت سرعت نوکی مشخص به بیشترین مقدار خود می‌رسد (شکل ۶).



شکل ۶ - مقدار ضریب توان بر حسب λ برای پژوهش حاضر و پژوهش اندرسن و همکارانش [۳۰]

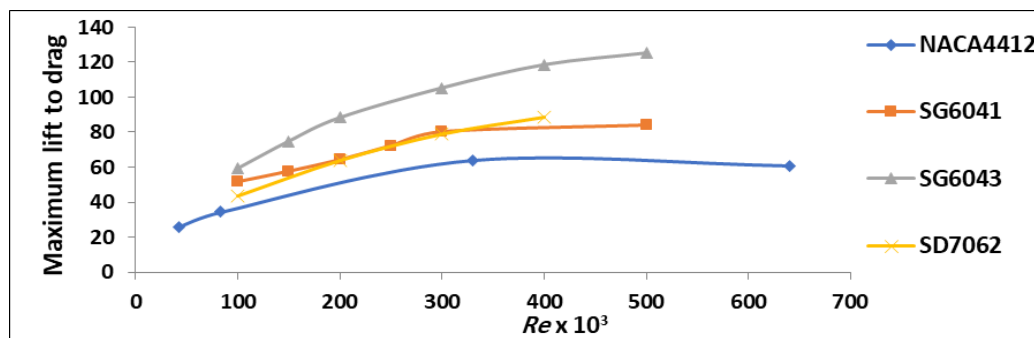


شکل ۷ - تغییر ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک برای چهار ایرفویل مختلف

۲-۵- ارزیابی ایرفویل‌های انتخابی

جهت بررسی بیشتر عملکرد ایرفویل‌های انتخابی، ایرفویل NACA4412 مورد استفاده در پرهی توربین پژوهش اندرسن و همکارانش [۳۰] با ایرفویل‌های دیگر جایگزین و مقدار ضریب توان توربین بر حسب نسبت سرعت نوک محاسبه شد. در محاسبه‌های انجام گرفته توزیع طول وتر و زاویه‌ی تاب تغییری نکرده و مطابق شکل (۵) می‌باشد. شکل (۷) تغییر ضریب توان توربین را بر حسب نسبت سرعت نوک برای ایرفویل‌های مختلف نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود تا نسبت سرعت نوک طراحی توربین ($\lambda=10$)، ایرفویل SG6043 به نسبت دیگر ایرفویل‌ها عملکرد بهتری داشته و پس از آن عملکرد ایرفویل SG6041، از دیگر ایرفویل‌ها بهتر می‌باشد. برتری این دو ایرفویل ناشی از نسبت بالای برآ به پس‌آ می‌باشد. مقدار ماکزیمم نسبت برآ به پس‌آ بر حسب رینولدزهای مختلف برای ایرفویل‌های انتخابی، در شکل (۸) نشان داده شده است. این مقادیر بر مبنای داده‌های تجربی ارائه شده در مراجع مرتبط [۱۱ و ۳] تهیه شده است. مشاهده می‌شود که این مقدار برای ایرفویل SG6043 به نسبت سایر ایرفویل‌ها بالاتر است. نظر به این که بازه طراحی برای نسبت سرعت نوک توربین‌های بادی محور افقی در بازه ۴ تا ۱۰ می‌باشد [۱۸]، بنابراین انتظار می‌رود که استفاده از ایرفویل SG6043 به نسبت دیگر ایرفویل‌ها بهتر بوده و پرهی توربین عملکرد بهتری داشته باشد. خاطر نشان می‌شود که در نسبت سرعت نوک‌های بالا ($\lambda > 10$)، بار روی توربین کاهش یافته و عدم وجود گشتاور مخالف ژنراتور سبب افزایش بیش از اندازه سرعت چرخشی توربین شده که با گذشت زمان، شکستگی پره‌ها را به همراه خواهد داشت.



شکل ۸ - مقدار ماکزیمم نسبت برآ به پس‌آ بر حسب رینولدز برای ایرفویل‌های انتخابی [۳]

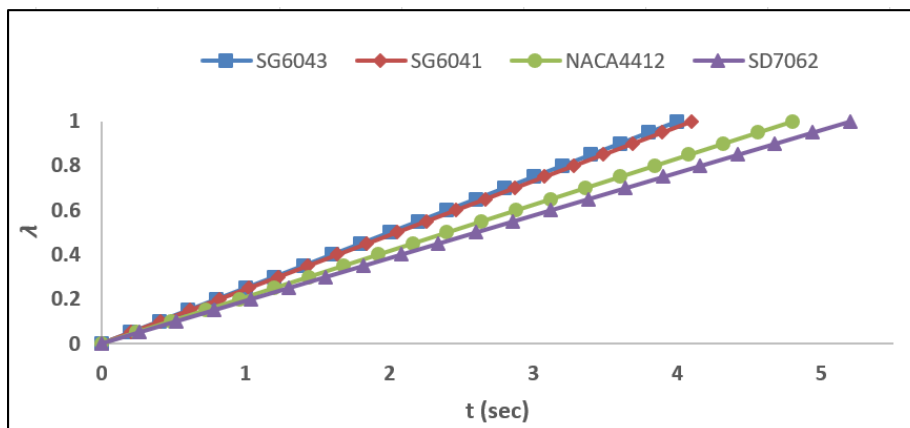
جدول ۲ - زمان راه‌اندازی توربین برای ایرفویل‌های انتخابی در سرعت راه‌انداز 5 m/s ($Q_r=0 \text{ Nm}$)

ایرفویل	مساحت برای طول وتر یک (m^2) [۳]	اینرسی روتور (kgm^2)	زمان راه‌اندازی (s)
NACA4412	۰/۰۸۲	۱/۱۸	۴/۸
SD7062	۰/۰۸۸	۱/۲۷	۵/۲
SG6041	۰/۰۷	۱	۴/۱
SG6043	۰/۰۶۸	۰/۹۸	۴

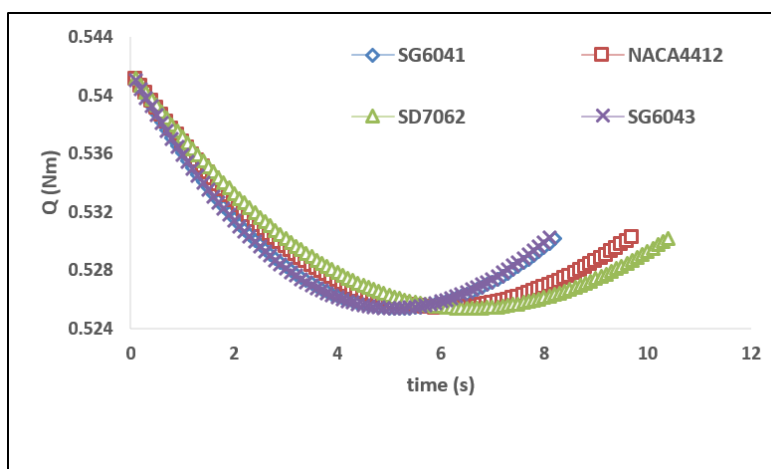
۳-۵- ارزیابی عملکرد ایرفویل‌های انتخابی از منظر راه‌اندازی

با در نظر گرفتن ایرفویل‌های انتخابی به محاسبه‌ی زمان راه‌اندازی از حالت سکون تا نسبت سرعت نوک مشخص (که مقدار یک در نظر گرفته شد) پرداخته شد. فرض شد که گشتاور مقاومی به هنگام راه‌اندازی وجود نداشته ($Q_r=0 \text{ Nm}$) و چگالی جنس مورد استفاده در پره 550 kgm^{-3} است [۳].

جدول (۲) زمان راه‌اندازی به همراه اینرسی پره‌ها را نشان می‌دهد. در جدول (۲) مقدار مساحت ایرفویل‌های انتخابی نیز آورده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت کاهش مساحت، اینرسی پره را کاهش داده و در نتیجه زمان راه‌اندازی طبق رابطه‌ی (۱۲) کم شده است. مشاهده می‌شود که عملکرد ایرفویل SG6043 به نسبت سایر ایرفویل‌ها بهتر بوده و توربینی که از آن بهره می‌برد در زمان کوتاه‌تری به حرکت در می‌آید. شکل (۹) مقدار نسبت سرعت نوک پره را به هنگام راه‌اندازی برای ایرفویل‌های انتخابی نشان می‌دهد. مقدار بالای مساحت ایرفویل SD7062 نسبت به دیگر ایرفویل‌ها ناشی از ضخامت بالای آن (۱۴٪) می‌باشد (شکل ۴ و جدول ۱) که افزایش اینرسی و در نتیجه افزایش زمان راه‌اندازی را به همراه دارد.

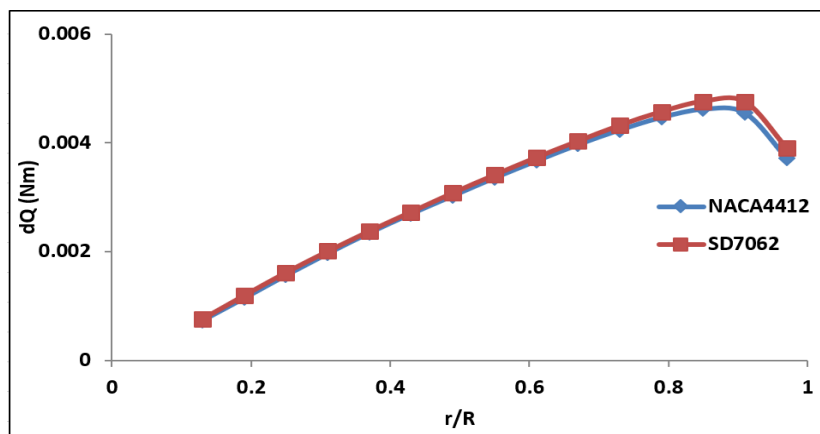


شکل ۹ - تغییرات نسبت سرعت نوک، λ ، در حین راه‌اندازی برای چهار ایرفویل مختلف



شکل ۱۰ - تغییرات مقدار گشتاور راه‌انداز با گذشت زمان برای ایرفویل‌های مختلف (سرعت راه‌انداز: 5 m/s)

شکل (۱۰) مقدار گشتاور آیرودینامیکی راه‌انداز را به هنگام راه‌اندازی برای ایرفویل‌های انتخابی نشان می‌دهد. در ابتدا و به هنگام راه‌اندازی پره از حالت سکون ($\lambda=0$)، مقدار گشتاور آیرودینامیکی کمی کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در حالت سکون و زمانی که پره به چرخش در نیامده است، نیروی پسا هیچ اثری بر گشتاور آیرودینامیکی ندارد اما با چرخش پره، مقدار نیروی پسا کاهش Q شده اما در ادامه مقدار کلی گشتاور آیرودینامیکی افزایش می‌یابد. بررسی شکل (۱۰) نشان می‌دهد که تغییرات گشتاور راه‌انداز برای دو ایرفویل SG6041 و SG6043 بسیار به مانند هم بوده و زمان راه‌اندازی یکسانی را به همراه داشته است (جدول ۲). اگرچه هندسه این دو ایرفویل کاملاً با هم متفاوت بوده (شکل ۴) اما مقدار مساحت سطح آن‌ها تقریباً برابر است (جدول ۲). تحلیل راه‌اندازی انجام گرفته در بخش (۳) بر مبنای استفاده از روابط (۸) و (۹) بوده که فقط تابع زاویه حمله بوده و مستقل از عدد رینولدز است. از این رو به هنگام محاسبه گشتاور آیرودینامیکی راه‌انداز، مشخصات آیرودینامیکی ایرفویل انتخابی تأثیری نداشته و فقط مساحت سطح ایرفویل در کنار دیگر پارامترها (طول و جنس پره به همراه توزیع طول وتر و زاویه تاب) سبب تعیین مقدار اینرسی روتور توربین شده (رابطه ۱۳) و در نتیجه در تعیین زمان راه‌اندازی (رابطه ۱۲) مؤثر واقع می‌شود. در نتیجه هر مقدار که مساحت سطح ایرفویل کم باشد، مقدار اینرسی روتور کمتر شده و زمان راه‌اندازی آن کاهش خواهد یافت. مقایسه دو ایرفویل NACA4412 و SD7062 نشان می‌دهد توربینی که از ایرفویل NACA4412 بهره می‌برد عملکرد بهتری نسبت به ایرفویل SD7062 از منظر راه‌اندازی دارد (جدول ۲، شکل ۹ و شکل ۱۰). این در حالی است که از منظر ضریب توان، روند برعکس است (شکل ۷). افزایش ضریب توان ایرفویل SD7062 نسبت به ایرفویل NACA4412 ناشی از مقدار بیشتر گشتاور آیرودینامیکی تولیدی توسط المان‌های پره بوده که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بخش قابل توجهی از گشتاور آیرودینامیکی توسط المان‌های نزدیک به نوک پره تولید شده و سهم المان‌های نزدیک به ریشه به مراتب کمتر است. این امر ناشی از افزایش بازوی گشتاور آیرودینامیکی و همچنین افزایش رینولدز در مقاطع نزدیک به نوک پره در مقایسه با مقاطع ریشه پره می‌باشد. خاطر نشان می‌شود که کاهش گشتاور آیرودینامیکی در انتهای نوک پره به سبب در نظر گرفتن اتلاف‌های نوک پره، رابطه (۵)، می‌باشد. با توجه به این که اختلاف زمان راه‌اندازی برای این دو ایرفویل کم می‌باشد (جدول ۲)، بهره‌گیری از ایرفویل SD7062 بهتر از ایرفویل NACA4412 می‌باشد.



شکل ۱۱ - تغییرات گشتاور آیرودینامیکی در طول پره برای دو ایرفویل مختلف ($U_0=10$ m/s, $\lambda=10$)

۴-۵- اثر گشتاور مقاوم ژنراتور

تحلیل راه‌اندازی صورت گرفته تا کنون با فرض ناچیز بودن مقدار گشتاور مقاوم ژنراتور بود. این در حالی است که ژنراتورهای مورد استفاده در توربین‌های بادی کوچک گشتاور مقاوم قابل توجهی داشته که می‌بایست توسط گشتاور آیرودینامیکی بر آن‌ها غلبه شود [۳]. با در نظر گرفتن مقدار 0.5 Nm برای گشتاور مقاوم ژنراتور توربین حاضر [۳۰ و ۳]، راه‌اندازی توربین تحلیل و مقدار زمان راه‌اندازی برای ایرفویل‌های انتخابی به کمک رابطه (۱۲) محاسبه شد. نتایج بررسی شده نشان داد که با در نظر گرفتن سرعت 5 m/s برای راه‌اندازی، توربین مورد نظر صرف‌نظر از نوع ایرفویل مورد استفاده قادر به چرخش نمی‌باشد. جهت بررسی بیشتر، سرعت 6 m/s به عنوان سرعت راه‌انداز در نظر گرفته شد. در این حالت توربین قادر به چرخش بوده و زمان راه‌اندازی بدست آمده در جدول (۳) ارائه شده است. کاهش زمان راه‌اندازی در حالت نبود گشتاور مقاوم ژنراتور در جدول (۳) (در مقایسه با جدول ۲) ناشی از افزایش سرعت راه‌انداز می‌باشد. نتایج ارائه شده حاکی از آن است که با اضافه شدن گشتاور مقاوم ژنراتور مقدار زمان راه‌اندازی به صورت قابل توجهی در مقایسه با فرض نبود گشتاور مقاوم، افزایش می‌یابد (جدول ۳). با این وجود همان‌طور که انتظار می‌رفت بهره‌گیری از ایرفویل SG6043 ارتقای عملکرد راه‌اندازی را به همراه خواهد داشت.

اگرچه طراحی هندسه پره (شامل توزیع طول وتر و زاویه تاب) مورد استفاده در توربین بادی اندرسن و همکارانش [۳۰] بر مبنای ایرفویل NACA4412 صورت گرفته است، اما نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با فرض عدم تغییر هندسه و فقط با جایگزینی ایرفویل، عملکرد توربین هم از منظر توان خروجی و همچنین راه‌اندازی ارتقا می‌یابد (شکل ۷، جدول ۲ و جدول ۳). این در حالی است که طراحی هندسه پره بر مبنای مشخصات هندسی و ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل‌های جدید سبب ارتقاء عملکرد مذکور نیز شود. به این منظور با انتخاب ایرفویل مورد نظر، طراحی هندسه پره به کمک یک فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه (افزایش ضریب توان و کاهش زمان راه‌اندازی) قابل انجام می‌باشد [۳].

جدول ۳ - زمان راه‌اندازی ایرفویل‌های انتخابی برای سرعت راه‌انداز 6 m/s با توجه به مقدار گشتاور مقاوم ژنراتور (Q_r)

ایرفویل	زمان راه‌اندازی (s) ($Q_r=0 \text{ Nm}$)	زمان راه‌اندازی (s) ($Q_r=0.5 \text{ Nm}$)	افزایش (%)
NACA4412	۴	۱۲/۵۵	۲۱۴
SD7062	۴/۳۵	۱۱/۷	۱۶۹
SG6041	۳/۴	۹/۷۲	۱۸۶
SG6043	۳/۳	۹/۵۸	۱۹۰

۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر به بررسی اثر ایرفویل مورد استفاده در پره میکروتوربین بادی بر عملکرد راه‌اندازی آن از حالت سکون پرداخته شد. توربین بادی انتخابی از نوع محور افقی بوده و شامل دو پره با مشخصات هندسی معلوم بود. چهار ایرفویل NACA4412، SD7062، SG6040 و SG6043 که حوزه رینولدز آن‌ها متناسب استفاده در پره توربین بود، انتخاب و به بررسی عملکرد توربین در صورت استفاده از ایرفویل‌های مذکور پرداخته شد. جهت محاسبه ضریب توان و زمان راه‌اندازی از نظریه‌ی اندازه حرکت المان پره بهره گرفته شد و به منظور ارزیابی صحت کد عددی مورد استفاده، نتایج آن با داده‌های تجربی موجود مقایسه و صحت عملکرد آن مورد تأیید قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که از میان ایرفویل‌های انتخابی، ایرفویل SG6043 در صورت استفاده در توربین سبب افزایش ضریب توان و همچنین کاهش زمان راه‌اندازی آن می‌شود. تحلیل نتایج حاکی از آن است که بالا بودن نسبت برآ به پسا و همچنین کم بودن مساحت سطح ایرفویل SG6043 سبب عملکرد بهتر این ایرفویل به نسبت دیگر ایرفویل‌های انتخابی است. با این وجود، نتایج نشان داد در صورت وجود گشتاور مقاوم ژنراتور، راه‌اندازی توربین بستگی به مقدار سرعت راه‌انداز باد دارد به گونه‌ای که برای سرعت‌های پایین (مانند ۵ m/s)، نوع ایرفویل بکار رفته نمی‌تواند در تسریع فرآیند راه‌اندازی مؤثر باشد اما برای سرعت‌های بالاتر (مانند ۶ m/s)، انتخاب مناسب ایرفویل سبب کاهش قابل توجه زمان راه‌اندازی شده و تسریع این فرآیند را به همراه دارد. از آن‌جا که علاوه بر ایرفویل، توزیع طول وتر و زاویه تاب نیز نقش مهمی در راه‌اندازی توربین دارد، تعیین توزیع بهینه‌ی این دو پارامتر با هدف افزایش ضریب توان توربین و همچنین کاهش زمان راه‌اندازی می‌تواند سبب ارتقای عملکرد توربین در حضور گشتاور مقاوم ژنراتور و همچنین در مناطقی که سرعت باد پایین است، شود.

مراجع

- [1] IEC. IEC 61400-2 ed2.0 (2006-03) "Wind Turbines, Part 2 – Design Requirements for Small Turbines", Geneva, Switzerland, (2006).
- [2] Clausen, P.D., and Wood, D.H., "Recent Advances in Small Wind Turbine Technology", *Wind Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 189-201, (2000).
- [3] Wood, D.H., "*Small Wind Turbines: Analysis, Design, and Application, Green Energy and Technology*", Springer-Verlag, London, UK, (2011).
- [4] Worasinchai, S., Ingram, G.L., and Dominy, R.G., "Effects of Wind Turbine Starting Capability on Energy Yield", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 134, No. 4., 042603, (2012).
- [5] Ebert, P.R., and Wood, D.H., "Observations of the Starting Behaviour of a Small Horizontal Axis Wind Turbine", *Renewable Energy*, Vol. 12, No. 3, pp. 245-257, (1997).

- [6] Mayer, C., Bechly, M.E., Hampsey, M., and Wood, D.H., "The Starting Behaviour of a Small Horizontal-axis Wind Turbine", *Renewable Energy*, Vol. 22, No. 1-3, pp. 411-417, (2001).
- [7] Wood, D.H., "Dual Purpose Design of Small Wind Turbine Blades", *Wind Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 511-527, (2004).
- [8] Pourrajabian, A., Dehghan, M., Javed, A., and Wood, D., "Choosing an Appropriate Timber for a Small Wind Turbine Blade: A Comparative Study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 100, pp. 1-8, (2019).
- [9] Amir Nazmi Afshar, P., Gooya, M., Hosseini, S. V., and Pourrajabian, A., "Starting Improvement of Micro-wind Turbines Operating in Low Wind Speed Regions", *International Journal of Green Energy*, Vol. 14, No. 11, pp. 868-877, (2017).
- [10] Pourrajabian, A., Ebrahimi, R., and Mirzaei, M., "Applying Micro Scales of Horizontal Axis Wind Turbines for Operation in Low Wind Speed Regions", *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, pp. 119-127, (2014).
- [11] Giguere, P., and Selig, M.S., "New Airfoils for Small Horizontal Axis Wind Turbines", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 120, No. 2, pp. 108-114, (1998).
- [12] Sessarego, M., and Wood, D., "Multi-dimensional Optimization of Small Wind Turbine Blades", *Renewables: Wind, Water, and Solar*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-11, (2015).
- [13] Karthikeyan, N., and Suthakar, T., "Computational Studies on Small Wind Turbine Performance Characteristics", In *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, Vol. 759, No. 1, pp. 1-6, (2016).
- [14] Göçmen, T., and Özerdem, B., "Airfoil Optimization for Noise Emission Problem and Aerodynamic Performance Criterion on Small Scale Wind Turbines", *Energy*, Vol. 46, No. 1, pp. 62-71, (2012).
- [15] Koca, K., Genç, M. S., Açikel, H. H., Çağdaş, M., and Bodur, T. M., "Identification of Flow Phenomena Over NACA 4412 Wind Turbine Airfoil at Low Reynolds Numbers and Role of Laminar Separation Bubble on Flow Evolution", *Energy*, Vol. 144, pp. 750-764, (2018).
- [16] Vardar, A., and Alibas, I., "Research on Wind Turbine Rotor Models using NACA Profiles", *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 7, pp. 1721-1732, (2008).
- [17] Traub, L. W., "Aerodynamic Impact of Aspect Ratio at Low Reynolds Number", *Journal of Aircraft*, Vol. 50, No. 2, pp. 626-634, (2013).
- [18] Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L., *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons, New York, (2010).
- [19] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., and Bossanyi, E., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, (2011).

- [20] Hansen, M.O., "*Aerodynamics of Wind Turbines*", Earthscan, London, UK, (2015).
- [21] Yang, Han, Jin Chen, and Xiaoping Pang., "Wind Turbine Optimization for Minimum Cost of Energy in Low Wind Speed Areas Considering Blade Length and Hub Height", *Applied Sciences*, Vol. 8.7, No. 1202, (2018).
- [22] Akour, S. N., Al-Heymari, M., Ahmed, T., and Khalil, K. A., "Experimental and Theoretical Investigation of Micro Wind Turbine for Low Wind Speed Regions", *Renewable Energy*, Vol. 116, pp. 215-223, (2018).
- [23] Loganathan, B., Chowdhury, H., Mustary, I., Rana, M. M., and Alam, F., "Design of a Micro Wind Turbine and its Economic Feasibility Study for Residential Power Generation in Built-up Areas", *Energy Procedia*, Vol. 160, pp. 812-819, (2019).
- [24] Li, X., Yang, K., Liao, C., Bai, J., Zhang, L., and Xu, J., "Overall Design Optimization of Dedicated Outboard Airfoils for Horizontal Axis Wind Turbine Blades", *Wind Energy*, Vol. 21, No. 5, pp. 320-337, (2018).
- [25] Mamouri, A. R., Bak Khoshnevis, A.A., and Lakzian, E., "Entropy Generation Analysis of S825, S822, and SD7062 Offshore Wind Turbine Airfoil Geometries", *Ocean Engineering*, Vol. 173, pp. 700-715, (2019).
- [26] Alaskari, M., Oday I, A., and Majeed, M., "Analysis of Wind Turbine using QBlade Software", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 518, No. 3, IOP Publishing, Bristol, UK, (2019).
- [27] El-Okda, Y., Adref, K., Chikhalsouk, M., and Al Hajjar, H., "Design of a Small Horizontal Axis Wind Turbine", 2019 *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, IEEE, New Jersey, US, (2019).
- [28] Siavash, N. K., Najafi, G., Tavakoli, T., Ghobadian, B., and Mahmoodi, E., "An Innovative Variable Shroud for Micro Wind Turbines", *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 1061-1072, (2019).
- [29] Wibowo, K. M., Rudiyanto, B., Pambudi, N. A., Febriyanto, R., and Setyawan, N. D., "Experimental Study on Pitch Angle Effects on the Performance of SG-6043 Horizontal Wind Turbine", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1153, No. 1, IOP Publishing, Bristol, UK, (2019).
- [30] Anderson, M.B., Milborrow, D.J., and Ross, N.J., "Performance and Wake Measurements on a 3 m Diameter Horizontal Axis Wind Turbine: Comparison of Theory, Wind Tunnel and Field Test Data", *Energy Technology Support Unit*, (1982).
- [31] Spera, D., "*Wind Turbine Technology*", ASME Publishing, New York, (1994).

فهرست نمادهای انگلیسی

مساحت روتور، m^2	A
مساحت ایرفویل با فرض طول وتر یک، m^2	Ab
وتر ایرفویل، m	c
ضریب پسا، -	C_d
ضریب برآ، -	C_l
ضریب توان، -	C_p
نیروی المان، N	dF
گشتاور المان، Nm	dQ
ضریب پراتل، -	F_P
اینرسی روتور، kgm^2	J
تعداد پره، -	N
توان، W	P
گشتاور آیرودینامیکی، Nm	Q
گشتاور مقاوم ژنراتور، Nm	Q_r
مقدار شعاع در امتداد پره، m	r
شعاع هاب، m	r_h
شعاع پره، m	R
عدد رینولدز، -	Re
سرعت باد، m/s	U_0
سرعت برآیند، m/s	U_T

نمادهای یونانی

زاویه حمله، rad	α
زاویه تاب، rad	β
نسبت سرعت نوک، -	λ
نسبت سرعت نوک محلی، -	λ_r
چگالی هوا، kg/m^3	ρ
چگالی پره، kg/m^3	ρ_b
زاویه جریان، rad	φ
سرعت زاویه‌ای، rad/s	Ω

Abstract

The study investigates the effect of airfoil used in a horizontal axis wind turbine blade on its power coefficient and also the starting time. Although the effect of airfoil type used in wind turbine blades is known from the aerodynamics viewpoint and researchers have tried to use airfoils with high aerodynamic efficiency, the appropriate choose of an airfoil requires more investigation from the standpoint of starting. In this study, the output power and the starting time of a small horizontal axis wind turbine are calculated via blade element momentum theory. For that purpose, a numerical scheme is developed and validated by the experimental data. Thereafter, the four airfoils namely NACA4412, SD7062, SG6040 and SG6043 are selected and the effect of employing these profiles on the turbine performance is examined. The results reveal that the use of SG6043 airfoil not only leads to more output power but it also results in shorter starting time. The superiority of SG6043 over other airfoils are due to its higher lift to drag ratio and also its lower surface area.