



بهبود ضریب توان توربین بادی محور عمودی داریوس به کمک ایرفویل‌های تغییر شکل پذیر

محسن کاظمی، امیرحسین فردی، محمدجواد مغربی*

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۰۲
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷

کلمات کلیدی:

ضریب توان
دینامیک سیالات محاسباتی
توربین بادی داریوس
شبکه عصبی مصنوعی
الگوریتم ژنتیک

خلاصه: تحقیقات در مورد استفاده از مواد هوشمند در بال هواپیماها برای افزایش عملکرد آن‌ها و به دنبال آن استفاده از مواد هوشمند در ایرفویل توربین‌های باد سال‌ها است که آغاز شده است. در این پژوهش، از دینامیک سیالات محاسباتی و معادلات ناپایای ناویر استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز برای توربین بادی داریوس مجهز به ایرفویل تغییر شکل پذیر به منظور تعیین مقطع بهینه پره استفاده شده است، ۲۵۰ ایرفویل توسط نقاط کنترل تصادفی تولید، در نرم افزار گمبیت، به طور غیرسازمان یافته و به صورت شبکه لغزان شبکه بندی شدند، سپس در انسیس به صورت دوبعدی با استفاده از الگوریتم فشار ضمنی با تقسیم اپراتورها شبیه سازی شدند، نقاط کنترل و ضریب توان برای آموزش شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفتند و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی ضریب توان بهره گرفته شد. در این پژوهش از ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ به عنوان ایرفویل مبنا استفاده شده است، بهینه سازی برای دو حالت مختلف انجام شد. برای حالت اول (تعیین مقطع بهینه توربین در یک دور) میزان ضریب توان توربین بادی داریوس با مقطع بهینه واحد به میزان ۴۲٪ افزایش یافت که مقطع پره (ایرفویل) نیز ترسیم شد. برای حالت دوم (تعیین مقطع بهینه در هر یک از چهار ناحیه چرخش روتور) نیز بهینه ترین مقاطع (ایرفویل) بدست آمدند، افزایش ۶۰٪ ضریب توان توربین نتیجه بهینه سازی برای حالت دوم بود.

۱- مقدمه

بعد از انقلاب صنعتی با رشد جمعیت به صورت تصاعدی و سرعت فزاینده تولیدات صنعتی، حلقه‌های زنجیری آسیب‌زا برای محیط زیست بشری در هم تنیده شدند. نیاز به تولید انرژی بیشتر، انسان را ناچار به استفاده بی رویه از سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی می‌کند. از این رو زنگ‌های خطر برای تمامی دولت‌ها به صدا درآمده است و دولت‌ها تحت نظر کنسرسیوم‌های مشترک بین المللی سعی در کاهش این فشار فزاینده بر محیط زیست دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به توافق پاریس اشاره کرد. در این توافق برای تغییر جدی فرآیندهای تولید انرژی و استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر مانند آب، باد و خورشید برنامه‌ریزی وسیعی صورت گرفته است.

۱-۱- توربین‌های بادی

توربین بادی به وسیله‌ای گفته می‌شود که انرژی جنبشی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، توربین‌های بادی براساس قرارگیری

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mjmaghrebi@um.ac.ir

محوردوران روتور نسبت به جریان به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- * توربین‌های بادی محور افقی
- * توربین‌های بادی محور عمودی

توربین‌های بادی محور عمودی نیز خود به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- * توربین‌های بادی محور عمودی مبتنی بر نیروی پسا (ساوینوس)^(۱)
 - * توربین‌های بادی محور عمودی مبتنی بر نیروی برآ (داریوس)^(۲)
- توربین داریوس توربینی است که گشتاور دورانی روتور از برآیند دو نیروی برآ و پسا وارده بر پره حاصل می‌شود، پره‌های داریوس عموماً ایرفویل هستند. توربین‌های داریوس عموماً از ۲ یا ۳ پره مستقیم یا دارای انحنا تشکیل شده‌اند که برای تولید برق بسیار مناسب هستند، زیرا سرعت بالا و گشتاور پایینی دارند.

- 1 Savonius
- 2 Darrieus



۲-۱- پیشینه پژوهش

حوزه بال‌های تغییرشکل‌پذیر در قرن گذشته توجه صدها گروه تحقیقاتی را به خود جلب کرده است و تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است اما با این همه تلاش هنوز در محدوده سرعت‌های پایین هیچ محصول تجاری تغییرشکل‌پذیری وجود ندارد. اگرچه طرح‌هایی برای بال‌ها و هواپیماهای کوچک و با سرعت کم وجود دارد و یا حتی در تونل باد تست شده‌اند، اما بسیار اندکند نمونه‌هایی که ساخته و تست هوایی شده‌اند. رشد علم و ویژگی‌های منحصر به فرد مواد هوشمند به پیشرفت ایرفویل‌ها و هواپیماهای تغییرشکل‌پذیر در سرعت‌های کم کمک فراوانی کرده و چالش‌های آن را برطرف کرده است. امکان تغییر هندسه‌های بزرگ، استفاده از مواد هوشمند به عنوان عملگر و استفاده از مواد کامپوزیت سبک از ویژگی‌های طراحی موفق بال‌ها در سرعت کم هستند [۱].

گاسپاری و ریکی^۱ [۲] شکل ایرفویل تغییرشکل‌پذیر مربوط به یک هواپیما تجاری را بهینه‌سازی کردند. این بهینه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک و به صورت چندهدفه انجام شد، نتایج کاهش ۶٪ نیروی پسا را نشان می‌دهد. مکفی و بینی^۲ [۳] ایرفویل تغییرشکل‌پذیر را به صورت آزمایشگاهی برای توربین باد مورد تحقیق قرار دادند، نتایج افزایش ۴۲٪ ضریب توان توربین را نشان داد. لو^۳ و همکاران [۴] بالچه تغییرشکل‌پذیر در لبه‌ی فرار ایرفویل را به منظور افزایش کارایی هواپیماها در هنگام تیک آف و لندینگ بهینه‌سازی کردند. نتایج افزایش ۸٪ ضریب برآ و افزایش ۷٪ برآ به پسا را نشان می‌دهد، در حالت کروز هواپیما افزایش ۳۰٪ نسبت نیروی برآ به پسا نیز مشاهده شد. جونز^۴ و همکاران [۵] ایرفویل تغییرشکل‌پذیر ۴۴۱۵ را که به مواد هوشمند پیزوالکتریک مجهز بوده است مورد بررسی قرار دادند. هدف به تعویق انداختن نقطه‌ی جدایش روی ایرفویل بود. نتایج کاهش نیروی پسا و افزایش قابل ملاحظه نیروی برآ را نشان می‌دهد. در برخی از زوایا ضریب پسا تا ۱۰۰٪ نیز کاهش یافته بود. تی و لیم^۵ [۶] ایرفویل تغییرشکل‌پذیر در راستای وتر را به منظور افزایش نیروی برآ و پیشرانش به صورت عددی بررسی کردند، نتایج افزایش چشم‌گیر ضریب برآ و ضریب پیشرانش را نشان می‌دهد.

- 1 De Gaspari A & Ricci S
- 2 MacPhee DW & Beyene A
- 3 LU W
- 4 Jones G,
- 5 Tay & Lim

فینکم و فریسول^۶ [۷] با فرض تغییرشکل‌پذیر بودن خمیدگی ایرفویل توانستند کارایی ایرفویل را افزایش دهند، نتایج کاهش نیروی پسا از ۳۰ تا ۶۰٪ را نشان می‌دهد. گاردنر و سلینگ^۷ [۸] با استفاده از خم‌های بی‌زیر ایرفویل‌های تغییرشکل‌پذیر را رسم کردند و با استفاده از الگوریتم ژنتیک از میان ۴۰۰ نمونه بررسی‌شده بهترین ایرفویل را انتخاب کردند، نتایج کاهش ۱۴٪ نیروی پسا در رینولدز ۳۰۰ هزار را نشان می‌دهد. چن^۸ و همکاران [۹] با ارزیابی دقیق خانواده ایرفویل‌ها به دنبال افزایش کارایی توربین بادی محور عمودی داریوس بودند، نتایج طراحی ایرفویل نشان داد نسبت ضخامت به وتر بیشترین تأثیر را در ضریب توان توربین باد دارد و در نتیجه پژوهش ایرفویلی پیدا شد که ۱۵/۵٪ نسبت به ایرفویل ناکا ۰۰۱۵۵ ضریب توان بهتری دارد. محمد^۹ و همکاران [۱۰] توربین بادی داریوس را برای ۲۵ ایرفویل مختلف با معادلات ناپایای ناویر استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز^{۱۰} به صورت عددی بررسی کردند، نتایج افزایش ۱۶٪ ضریب توان توربین با ایرفویل LS (۱)-۰۴۱۳ نسبت به ایرفویل مبنا ناکا ۰۰۲۱۸ را نشان داد.

محمد^{۱۱} و همکاران [۱۱] توربین بادی داریوس با ایرفویل شکاف‌دار را به صورت عددی و با روش معادلات ناپایای ناویر استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز بررسی کردند. از مدل آشفتگی رهیافت $k-\epsilon$ ^{۱۲} در شبیه‌سازی دو بعدی نیز استفاده شده است. نتایج در نسبت سرعت نوک‌های مختلف بررسی شد، ضریب توان توربین در نسبت سرعت نوک ۳ برای ایرفویل دارای شکاف ۵۴٪ بیشتر از ایرفویل مبنا ناکا ۰۰۱۸۸ است.

بغدادی^{۱۳} و همکاران [۱۲] توربین بادی داریوس دارای ایرفویل تغییرشکل‌پذیر با الگوریتم تغییر شکل آزاد^{۱۴} بهینه‌سازی کردند، ایرفویل مبنا ناکا ۰۰۲۱۸ بود و از دو مدل آشفتگی رهیافت $k-\epsilon$ و انتقال تنش برشی $k-\omega$ ^{۱۵} در شبیه‌سازی در حالت دوبعدی و سه‌بعدی استفاده کردند. ضریب توان توربین با ایرفویل بهینه در حالت دوبعدی

6 Fincham & Friswell

7 Gardner & Selig

8 Chen

9 M.H. mohamed

10 Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes

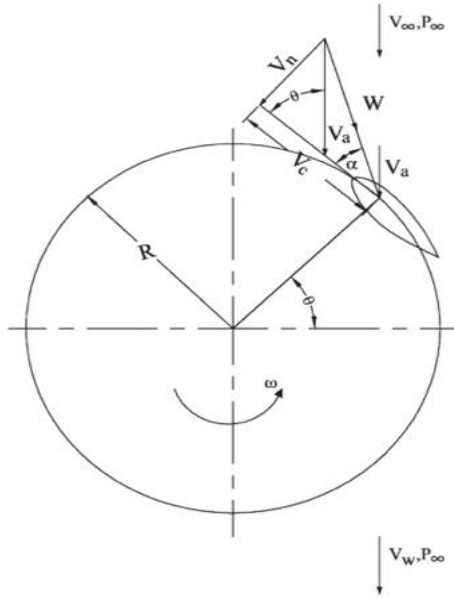
11 Omar Sherif Mohamed

12 k-ε Realize

13 M. Baghdadi

14 Free Form Deformation

15 k-ω SST



شکل ۱. سرعت‌های وارد بر ایرفویل در حال چرخش
Fig.1. Velocity components on rotating airfoil

می‌دهد.

سرعت وارده بر ایرفویل توربین‌های بادی داریوس دارای دو مؤلفه،

V_c مؤلفه سرعت وتری و V_n مؤلفه سرعت عمود بر وتر است [۱۳].

$$V_c = R\omega + V_\infty \cos \theta \quad (2)$$

$$V_n = V_\infty \sin \theta \quad (3)$$

θ زاویه فضایی در نظر گرفته شده است که در نتیجه زاویه حمله

α به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{V_n}{V_c} \right] \quad (4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{V_\infty \sin \theta}{R\omega + V_\infty \cos \theta} \right] \quad (5)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{V_\infty \sin \theta}{V_\infty \left(\frac{R\omega}{V_\infty} + \cos \theta \right)} \right] \quad (6)$$

که با تعریف نسبت سرعت نوک، زاویه حمله به شکل جدیدی

درمی‌آید:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right] \quad (7)$$

برای مقدار نسبت سرعت نوک $1/5$ و 2 به ترتیب $1/14\%$ و $1/9\%$ افزایش یافت در صورتی که برای حالت سه‌بعدی این میزان افزایش به ترتیب $2/20\%$ و $1/16\%$ بود.

هدف از این پژوهش ارائه یک روش بهینه‌سازی مفهومی برای افزایش کارایی و توان تولیدی توربین در شرایط بهینه کاری و صلبیت ثابت به کمک تغییر شکل ایرفویل پره‌ها است. نوآوری این پژوهش نسبت به پژوهش‌های پیشین استفاده همزمان از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی است که موجب کاهش محسوس زمان شبیه‌سازی و افزایش چشم‌گیر ضریب توان توربین داریوس شد. در این پژوهش با استفاده از شبکه عصبی، از صرف زمان برای شبیه‌سازی بیشتر برای بهینه‌سازی جلوگیری شد، با کمک شبکه عصبی و یادگیری آن با استفاده از ضریب توان 250 ایرفویل توربین مختلف تولید شده، شبکه عصبی قادر به پیش‌بینی ضریب توان توربین برای طیف وسیعی از ایرفویل‌ها شد.

۲-آیرویدینامیک ایرفویل توربین بادی داریوس

پره‌های توربین بادی داریوس به گونه‌ای طراحی شده‌اند که بتوانند عملکرد آیرویدینامیکی مناسبی در هر دوری که زوایای حمله مختلفی را تجربه می‌کنند، داشته باشند. گشتاور تولیدی در داریوس در اثر برآیند هر دو نیروی برآ و پساً تولید می‌شود، زاویه محلی توربین α که به دلیل تغییر سرعت نسبی W در هر دور در حال تغییر است، سرعت جریان بالادست V_∞ و سرعت چرخش $R\omega$ تعیین‌کننده جهت و مقدار سرعت نسبی پره در هر لحظه هستند. این تغییر جهت سرعت نسبی باعث تغییر جهت و اندازه هر لحظه نیروی برآ و پساً بر پره می‌شود. در نتیجه F_R تغییر می‌کند، این نیرو به دو مؤلفه نیروی عمودی F_n و مؤلفه نیروی مماسی F_t تجزیه می‌شود. این نیرو مماسی که از چرخش توربین بدست می‌آید، گشتاور لازم جهت تولید برق را تولید می‌کند [۱۳].

نسبت سرعت نوک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$TSR = \lambda = \frac{R\omega}{V_\infty} \quad (1)$$

R شعاع روتور توربین، ω سرعت چرخش زاویه‌ای روتور و V_∞ سرعت جریان آزاد باد است، نسبت سرعت نوک کمیتی بی‌بعد است که نسبت سرعت چرخش پره به سرعت جریان آزاد باد را نشان

توابع و الگوریتم‌های مختلفی برای تولید این سطوح وجود دارند، اما از آن جهت که تغییرات در جهت ضخامت ایرفویل ۳۰٪ کل ضخامت است، خم بی‌زیر [۱۵] روش مناسبی برای تولید هندسه ایرفویل‌ها است. میزان دقت خم بی‌زیر به تعداد نقاط انتخابی وابسته است. یک خم درجه‌ی n بی‌زیر شامل $n+1$ نقطه کنترل است.

$$B(t) = \sum_{i=0}^n b_{i,n}(t) P(i), \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (14)$$

$$b_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}, \quad i = 0, \dots, n \quad (15)$$

P نقاط کنترل، n تعداد نقاط کنترل، t متغیر است. به منظور تولید یک سطح هموار و کاهش تعداد متغیرهای مسئله، برای هر یک از سطح‌های ایرفویل ۵ نقطه به عنوان نقاط کنترلی برای تولید سطح ایرفویل انتخاب شد. ۲ نقطه از نقاط کنترلی در ابتدا و انتهای ایرفویل یعنی به روی لبه‌ی حمله و لبه‌ی فرار ایرفویل قرار گرفته‌اند و ۳ نقطه تغییرات اصلی شکل ایرفویل را ایجاد می‌کنند [۱۶].

برای استخراج نقاط کنترل ایرفویل مبنا ناکا ۰۰۱۵ ابتدا نقاط سطوح ایرفویل نوشته می‌شود، سپس معادلات بی‌زیر برای ۵ نقطه کنترل نوشته می‌شود بعد از آن به کمک روش کمترین مربعات، خم بی‌زیر به روی نقاط سطوح ایرفویل منطبق می‌شود. با تغییر نقاط کنترل، تغییرات ضخامت ایرفویل تا ۳۰٪ ضخامت اولیه ایرفویل ایجاد می‌شود.

جدول ۱ نقاط کنترل سطح بالایی و پایینی ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ را نشان می‌دهد، شکل ۲ محدوده تغییرات حد بالا و پایین ایرفویل‌های تصادفی تولیدی را نشان می‌دهد که توسط نقاط کنترل ترسیم شده‌اند.

جدول ۱. نقاط کنترل ایرفویل ناکا ۰۰۱۵

Table 1. Control points of NACA0015 airfoil

$Y(m)$	$X(m)$	$Y(m)$	$X(m)$	
۰	۰	۰	۰	P_1
-۰/۰۹۷۴	۰	۰/۰۹۷۴	۰	P_2
-۰/۱۱۹۵	۰/۵	۰/۱۱۹۵	۰/۵	P_3
۰	۱	۰	۱	P_4
۰	۱	۰	۱	P_5

با توجه به زاویه حمله ایرفویل، نیروی‌های برآ و پسا وارد بر ایرفویل قابلیت تجزیه و تبدیل به دو مؤلفه مماسی و عمودی را دارند، این دو مؤلفه در هر لحظه بر ایرفویل مماس و عمود هستند، نیروی مماسی گشتاور لازم برای تولید توان در توربین را تولید می‌کند که از تفاضل تصویر نیروهای برآ و پسا وارد بر ایرفویل بدست می‌آید:

$$F_t = L \sin \alpha - D \cos \alpha \quad (8)$$

$$F_n = L \cos \alpha + D \sin \alpha \quad (9)$$

L نیروی برآ، D نیروی پسا، F_t نیروی مماسی و F_n نیروی عمودی هستند.

نیروی وارده بر هر ایرفویل F_{ta} در هر دور چرخش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (10)$$

گشتاور وارده بر توربین که با Q نمایش داده می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q = N F_{ta} R \quad (11)$$

شعاع روتور R و N تعداد پره‌های توربین است. P توان خروجی توربین نیز به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$P = Q \times \omega \quad (12)$$

ضریب توان توربین باد که نشانگر میزان کارایی توربین باد است از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_p = \frac{P}{P_{air}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} \quad (13)$$

که ρ چگالی هوا است و سطح جاروب شده است که برابرست با $A = d \times H$ d قطر روتور توربین و H ارتفاع توربین است [۱۴].

۳- اصول مدل‌سازی و شبیه‌سازی

برای بهینه‌سازی ایرفویل توربین باد به عنوان متغیر ورودی به تابعی برای تولید سطحی هموار و پیوسته برای ایرفویل نیاز است.

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \frac{Y}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

معادلات زیر نمادهای بکاررفته در معادله (۱۸) و (۱۹) را شرح می‌دهند [۱۸]:

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (20)$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (21)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (22)$$

$$\mu_t = \frac{\rho k a_1}{\max(a_1, \omega F_2)} \quad (23)$$

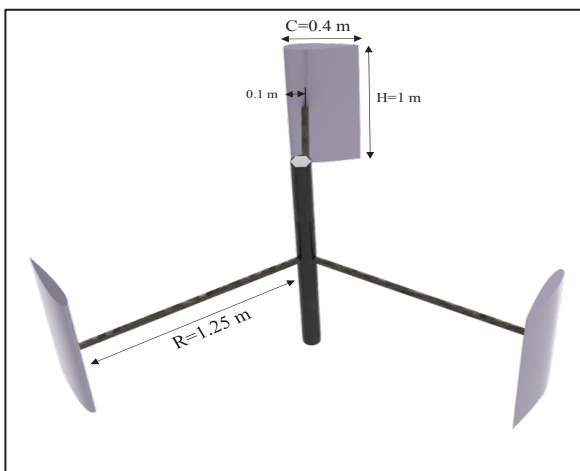
$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (24)$$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (25)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (26)$$

۲-۳- مشخصات توربین

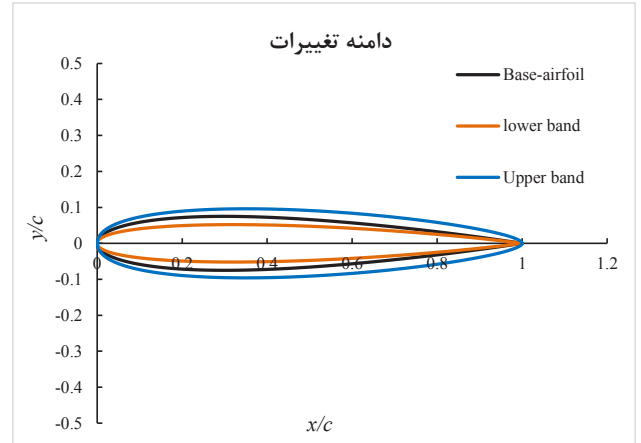
مشخصات و شماتیک توربین بادی داریوس مورد پژوهش در شکل ۳ و جدول ۲ توضیح داده شده است. این توربین توسط لانزافیم^۱ و همکارانش [۱۹] به صورت عددی و توسط براوو^۲ و همکارانش [۲۰] به صورت تجربی مورد تحقیق و آزمایش قرار گرفته است.



شکل ۳. شماتیک توربین بادی داریوس

Fig.3 . Schematic of Darrieus wind turbine

- 1 Lanzafame
- 2 Bravo



شکل ۲. حدبالا و حد پایین تغییرات ایرفویل‌ها

Fig.2. Upper and lower bonds of airfoil variations

به کمک متلب، نقاط کنترلی به صورت تصادفی بین حد بالا و پایین تولید می‌شوند، این نقاط برای تولید ایرفویل‌های مختلف و سپس شبکه‌بندی آن‌ها به گمبیت ارسال می‌گردد.

۳-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای جریان سیال حول توربین باد دو معادله پیوستگی و بقای مومنتوم هستند. معادله بقای جرم برای یک سیال تراکمناپذیر در مختصات کارتزین به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۷]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

معادله بقای مومنتوم به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۷]:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (17)$$

در معادله برداری فوق، ρ چگالی سیال، μ لزجت دینامیکی سیال، \vec{V} بردار سرعت، P فشار است.

برای مدل آشفتگی تنش برشی انتقال $k-\omega$ ، معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی k به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (18)$$

و معادله فرکانس آشفتگی ω به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

جدول ۲. مشخصات توربین بادی پژوهش حاضر

Table 2. Wind turbine specifications of the present study

مشخصات توربین	توضیحات
تعداد پره	۳
طول وتر پره	۰/۴ متر
ایرفویل مقطع پره	ناکا ۰۰۱۵
سرعت باد	۱۰ متر بر ثانیه
سرعت نوک پره	۱/۵
شعاع روتور	۱/۲۵ متر
ارتفاع پره	۱ متر

جدول ۳. روش گسسته‌سازی پارامترهای مسئله

Table 3. Discrete method of problem parameters

پارامتر	روش گسسته‌سازی
زمان	ضمنی مرتبه اول
فشار	مرتبه دوم
ممنتوم	بالادست مرتبه دوم
انرژی جنبشی آشفستگی	بالادست مرتبه اول

۳-۳- شبکه بندی و استقلال از شبکه

در این پژوهش هندسه ایرفویل‌ها با استفاده نقاط ایرفویل‌ها در گمبیت ترسیم می‌شوند، سپس عملیات شبکه‌بندی آن‌ها انجام می‌شود.

با توجه به اینکه مدل آشفستگی جریان در این پژوهش انتقال تنش برشی $k-\omega$ است به منظور دستیابی به دقت حل بالا بایستی مقدار فاصله بی‌بعدشده y^+ کمتر از یک باشد که ارتفاع اولین سلول از سطح پره در کاهش این مقدار بسیار تاثیرگذار است. با انتخاب ارتفاع اولین سلول به طوری که میزان $y^+ > 1$ شبکه در لایه زیرین لزج قرار می‌گیرد [۲۱]. جدول ۴ توضیحات مربوط به تعداد سلول‌های هر ناحیه و عدد بی بعد y^+ را نشان می‌دهد.

$$y^+ = \frac{u^* y}{g} \quad (27)$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (28)$$

ارتفاع اولین سلول از سطح پره، u^* سرعت اصطکاکی و ν لزجت سینماتیکی است، τ تنش برشی روی دیواره و ρ چگالی سیال است. جدول ۴ توضیحات مربوط به تعداد سلول‌های انواع شبکه‌بندی و شکل ۴ کیفیت شبکه‌بندی حوزه حل را نشان می‌دهد.

شکل ۵ نمودار استقلال از شبکه را برای ضریب توان هر پره در یک دور چرخش روتور را نشان می‌دهد شبکه درشت نتایج مورد قبولی را ارائه نمی‌دهد و شبکه‌های متوسط و ریز نتایج خوبی را نشان می‌دهند که با توجه به اهمیت کاهش زمان محاسبات از شبکه متوسط برای پژوهش حاضر استفاده شده است.

شکل ۴: کیفیت شبکه‌بندی حوزه حل (الف-ناحیه اصلی ب-

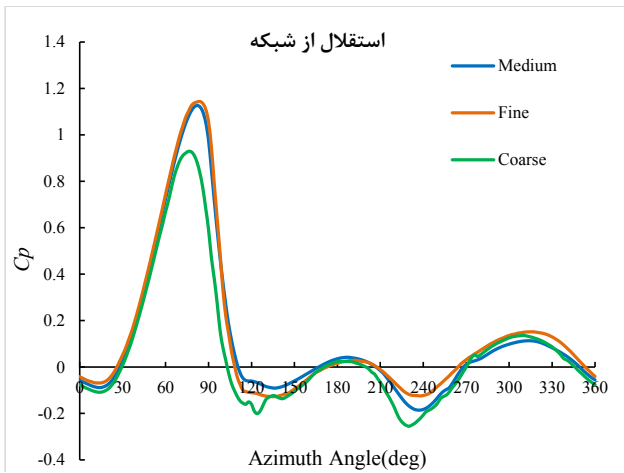
برای مدل‌سازی توربین باد، میدان حل به دو ناحیه ساکن و متحرک تقسیم شده است که توسط شبکه لغزان این دو ناحیه از یکدیگر مجزا شده‌اند، ناحیه متحرک که شامل پره‌های توربین می‌باشد که توسط سطح اشتراکی از ناحیه ساکن جدا شده است.

به منظور حل معادلات حاکم بر میدان حل از نرم افزار انسیس فلونت نسخه ۱۹ استفاده شده است. در ورودی جریان شرط مرزی سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه، در خروجی جریان شرط مرزی فشار خروجی ۱ اتمسفر، شرط مرزی تقارن برای مرزهای اطراف، شرط مرزی دیوار برای پره‌ها و شرط سطح اشتراکی برای سطح مشترک بین دو ناحیه ثابت و متحرک. با توجه به جدایش جریان به روی پره‌های توربین از مدل آشفستگی انتقال تنش برشی $k-\omega$ نیز استفاده شد. حل میدان جریان به صورت ناپایا و همچنین از الگوریتم فشار ضمنی با تقسیم اپراتورها^۱ برای حل همزمان سرعت و فشار استفاده شده است.

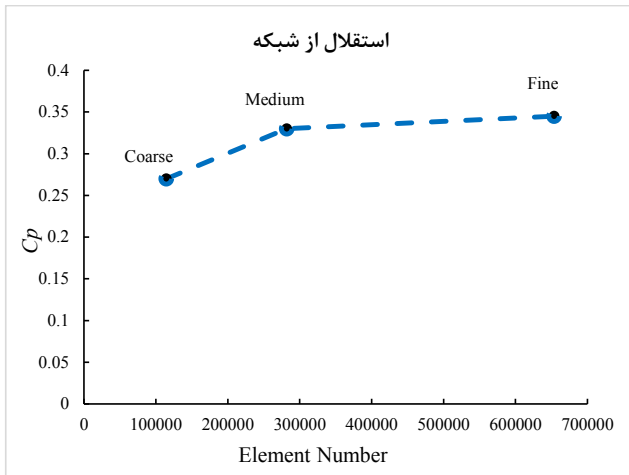
ناحیه متحرک به قطر ۴ متر، طول و عرض ناحیه ثابت نیز به ترتیب ۱۵ و ۱۰ متر برای ابعاد دامنه محاسباتی پژوهش انتخاب شد.

جدول ۲ مشخصات توربین شبیه‌سازی شده در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۳ روش گسسته‌سازی پارامترهای اصلی مسئله را نشان می‌دهد



شکل ۵. نمودار استقلال از شبکه
Fig.5 . Diagram of mesh independency



شکل ۶. نمودار استقلال از شبکه و ضریب توان توربین
Fig.6. Diagram of mesh independency and turbine power coefficient

ناحیه دوار ج- اطراف ایرفویل د- لبه فرار ایرفویل ط- لبه حمله ایرفویل)
شکل ۶ خطای نسبی شبکه بندی های مختلف را نشان می دهد که شبکه بندی متوسط ۲۲٪ و شبکه بندی ریز ۴/۵٪ دارای خطا هستند.

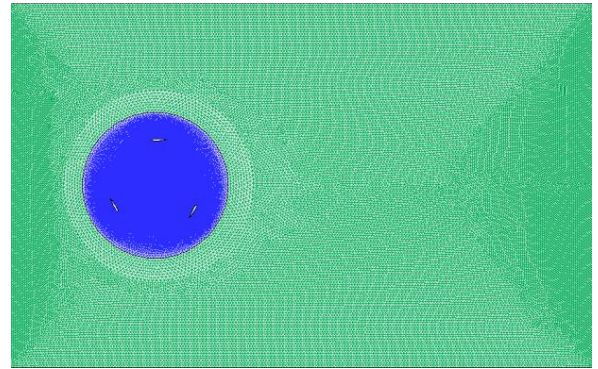
۳-۴- استقلال از گام زمانی

جهت صرفه جویی در زمان محاسبات و موجب افزایش دقت حل بایستی گام زمانی مناسب انتخاب شود. گام زمانی بایستی به اندازه کافی کوچک باشد تا بتواند گردابه های جریان و خواص سیال را به درستی پیش بینی کند. به همین دلیل گام های زمانی طوری انتخاب شده اند که زمان هرگام برابر با ۱، ۲ و ۴ درجه چرخش توربین باد

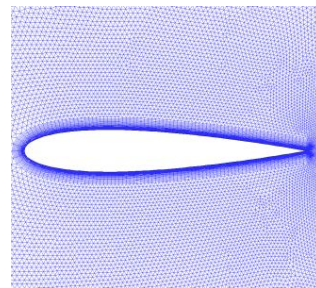
جدول ۴. توضیحات شبکه بندی

Table 4. Mesh description

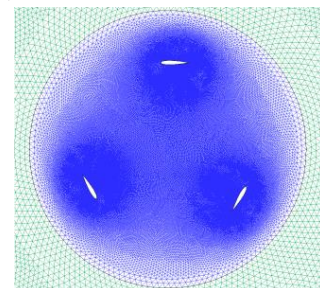
y^+	سلول های ناحیه متحرک	سلول های ناحیه ثابت	کیفیت شبکه بندی
$y^+ < 5$	۸۳۵۸۶	۳۱۳۰۸	درشت
$y^+ < 1$	۲۱۵۰۲۰	۶۷۱۰۴	متوسط
$y^+ < 1$	۵۲۱۹۳۴	۱۳۲۱۱۰	ریز



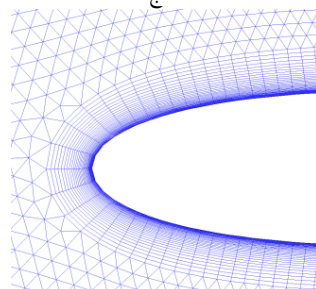
الف



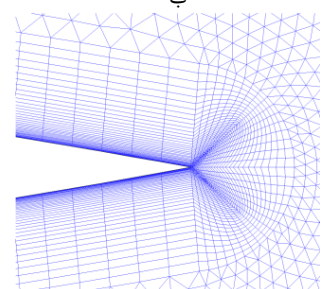
ب



ج



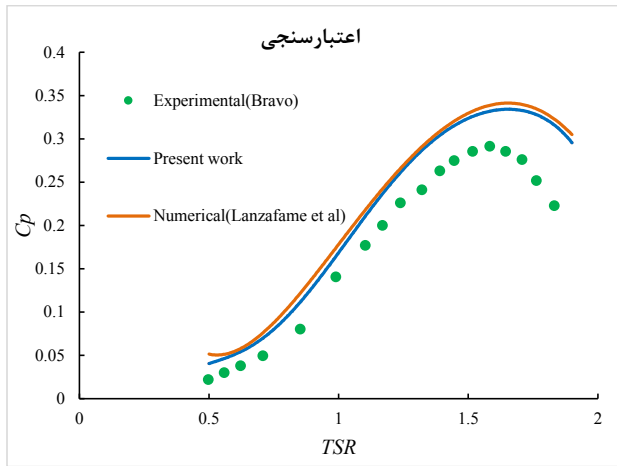
د



ه

شکل ۴. کیفیت شبکه بندی حوزه حل (الف- ناحیه اصلی ب- ناحیه دوار ج- اطراف ایرفویل د- لبه فرار ایرفویل ط- لبه حمله ایرفویل)

Fig.4. Quality of computational domain grid (a) Main domain (b) Rotating domain (c) Around the airfoil (d) Airfoil's trailing edge (e) Airfoil's leading edge)



شکل ۹. اعتبارسنجی پژوهش حاضر

Fig.9. Validation of the present study

چهارم هستند.

۳-۶- اعتبارسنجی

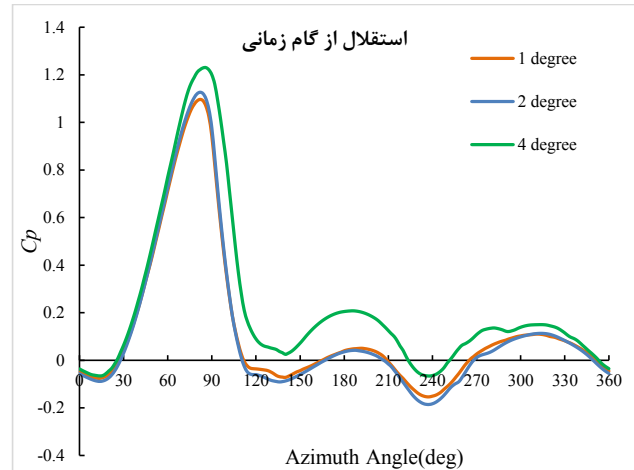
شکل ۹ نمودار اعتبارسنجی پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش عددی لانزافیم و همکاران [۱۹] و تحقیقات آزمایشگاهی براوو و همکاران [۲۰] را نشان می‌دهد. ضریب توان توربین مطالعه حاضر با ضریب توان پژوهش‌های عددی و تجربی در نسبت سرعت نوک‌های مختلف نشان داده شده است. از دلایل اختلاف ضریب توان پژوهش عددی با مطالعه آزمایشگاهی توربین مورد تحقیق، عدم تأثیر اصطکاک و شبیه‌سازی دو بعدی مسئله است.

۴- اصول بهینه‌سازی

شبکه‌های عصبی توانایی بالایی در یادگیری الگوها و حل مسائل غیرخطی دارند و توانایی شبکه عصبی در تحلیل، تخمین و پیش‌بینی در بسیاری از زمینه‌ها مورد توجه افراد بسیاری قرار گرفته است. شبکه‌های عصبی مصنوعی از چندلایه پنهان همراه با نورون‌هایی تشکیل شده‌اند، به هر یک از این نورون‌ها نسبت به ورودی‌ها، وزن‌هایی نسبت داده می‌شود که مقدار آن با توجه به ورودی مسئله متفاوت است، در حقیقت شبکه عصبی چیزی جز آموزش این نورون‌ها و بدست آوردن میزان وزن‌های مناسب نیست [۲۲].

به منظور بررسی عملکرد شبکه عصبی از خطای حداقل مربعات استفاده شده است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

در معادله فوق n تعداد داده‌ها، T مقدار مطلوب (هدف)



شکل ۷. نمودار استقلال از گام زمانی

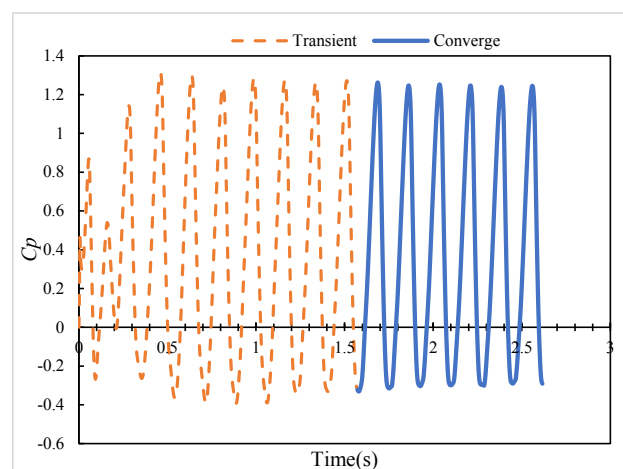
Fig.7. Diagram of time independency

باشد، این سه گام زمانی در نسبت سرعت نوک ۱/۵ بررسی شده‌اند و نتایج ضریب توان هر پره بر حسب زاویه چرخش روتور در شکل ۷ به نمایش درآمده است.

با استفاده از گام زمانی متوسط یعنی درجه علاوه بر کاهش زمان محاسبات، دقت محاسبات نیز کاهش نمی‌یابد. با توجه به اینکه هدف پژوهش بدست آوردن جزئیات مسئله نبوده است و فقط ضریب توان توربین خروجی مدنظر است، از باقیمانده مطلق به عنوان معیار همگرایی استفاده شده است.

۳-۵- استقلال حل از تعداد دوران روتور

با توجه به شکل ۸ ضریب توان روتور از دور سوم به بعد روند ثابتی را طی می‌کند و مسئله همگرا شده است، نتایج این تحقیق، نتایج دور



شکل ۸. نمودار استقلال از دوران

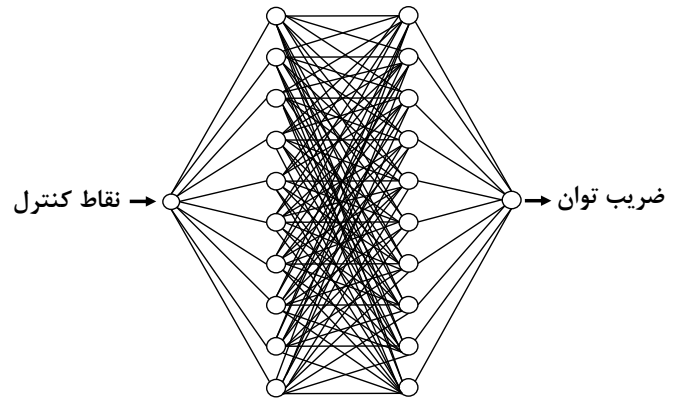
Fig.8. Diagram of rotor rotation independency

برای تست مورد استفاده قرار گرفت.

هرچه میزان R به عدد یک نزدیک‌تر باشد به معنای آن است که نقاط بر تابع منطبق‌تر هستند، توضیحات ارائه‌شده در شکل ۱۱ قابل مشاهده هستند.

همانگونه که در شکل ۱۲ پیداست ابتدا نقاط کنترل که تولیدکننده شکل ایرفویل‌ها هستند توسط خطوط بی‌زیر در متلب تولید و سپس برای ترسیم ایرفویل و شبکه‌بندی آن به گمبیت ارسال می‌شود، در مرحله بعد برای عملیات شبیه‌سازی این ایرفویل‌ها به نرم‌افزار انسیس ارسال می‌شوند و خروجی انسیس که همان ضریب توان است به همراه نقاط کنترل به شبکه عصبی در متلب ارسال می‌شود تا شبکه عصبی مصنوعی آموزش ببیند. بعد از آموزش شبکه عصبی، شبکه عصبی به عنوان تابع به الگوریتم ژنتیک داده می‌شود تا بتوان بهترین ضریب توان و نقاط کنترل مربوط به آن به عنوان خروجی الگوریتم ژنتیک میزان افزایش ضریب توان توربین را گزارش دهد.

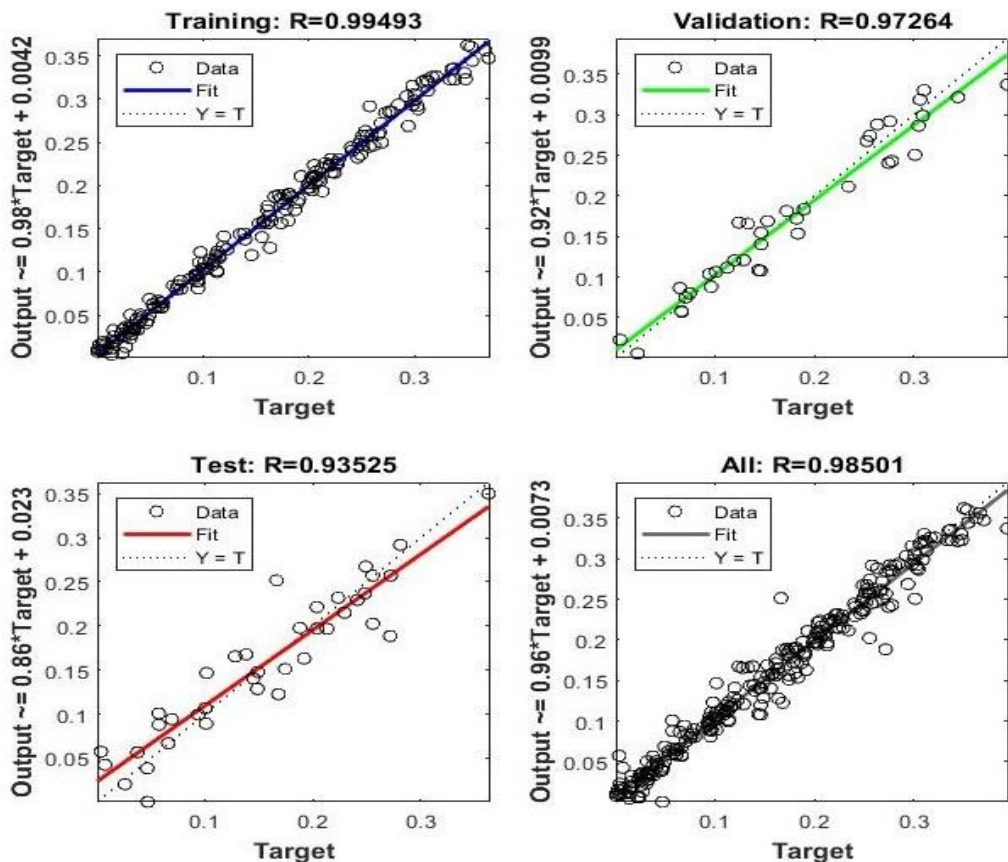
لایه های پنهان شبکه



شکل ۱۰. شماتیک لایه‌های شبکه عصبی پژوهش حاضر

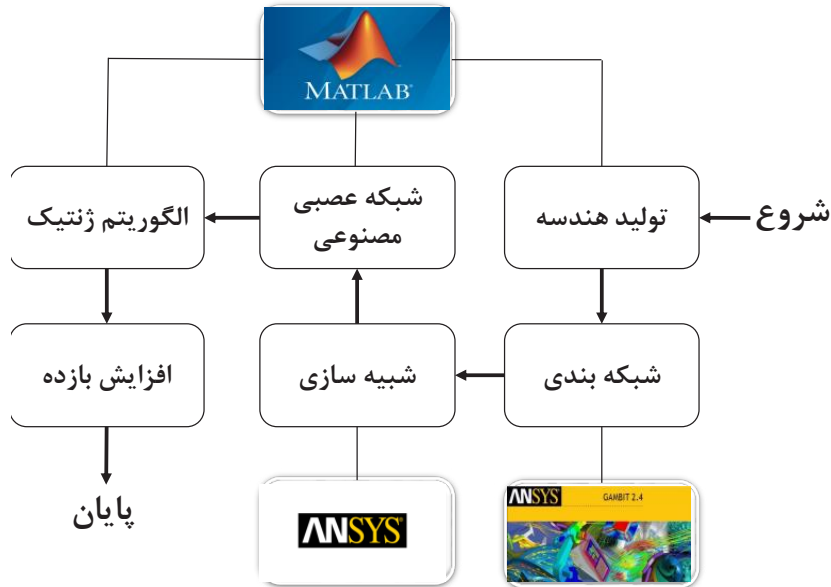
Fig.10. Schematic of neural network layers of the present study

و مقدار پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی است. لایه‌های پنهان استفاده‌شده در این پژوهش که دارای ۲ لایه پنهان و هر لایه حاوی ۱۰ نورون بود، همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده شد. از مجموع تمام داده‌ها، ۷۰٪ برای آموزش، ۱۵٪ برای اعتبار سنجی و ۱۵٪



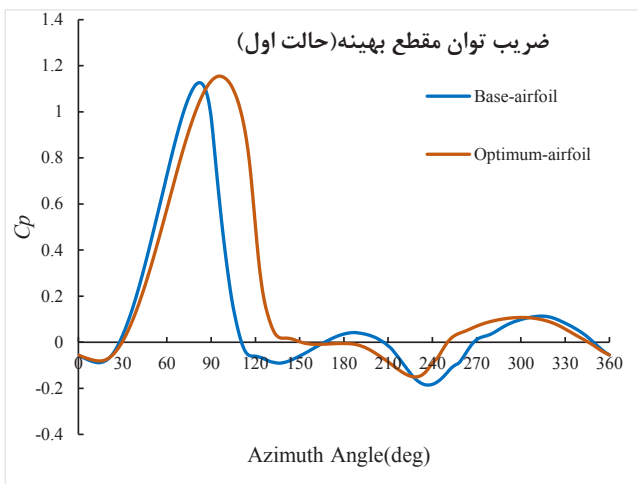
شکل ۱۱. رگرسیون آموزش شبکه عصبی

Fig.11. Neural network training regression



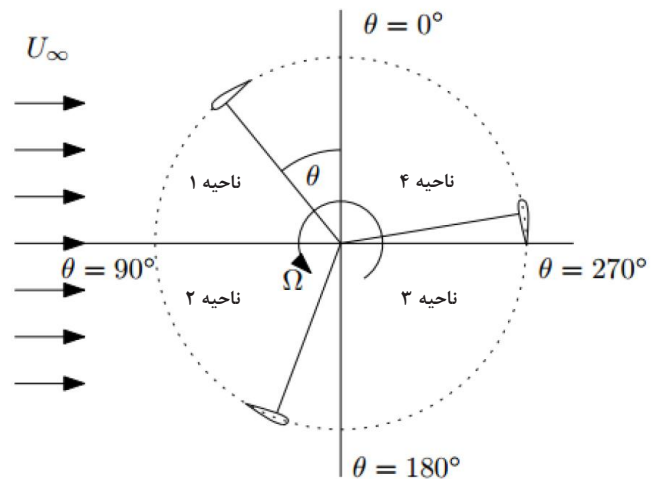
شکل ۱۲. شماتیک مراحل عملیاتی پژوهش حاضر

Fig.12. Schematic of work steps of the present study



شکل ۱۴. نمودار ضریب توان برای یک پره با ایرفویل جدید و مبنا

Fig.14. Diagram of power coefficient for one blade with new and base airfoil



شکل ۱۳. نواحی چهارگانه روتور توربین بادی داریوس

Fig.13. Darrieus wind turbine rotor quadruple zones

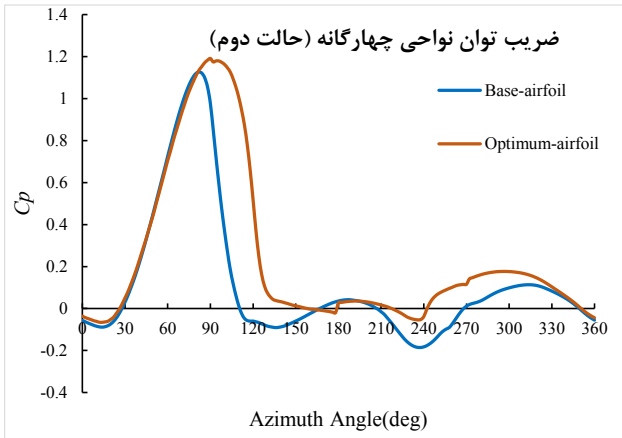
در حالت اول ایرفویل بهینه توربین بادی داریوس در شرایط بهینه آن ($TSR=1/5$) که به صورت مقطعی بهینه منحصر به فرد برای پره‌های ایرفویل در هردور چرخش توربین است، بدست آمده است. نتایج، افزایش ۴۲٪ ضریب توان توربین بادی با ایرفویل جدید را نسبت به حالت مبنا نشان می‌دهد، شکل ۱۴ نمودار ضریب توان بر حسب زاویه پرخش روتور برای یک پره را نشان می‌دهد.

شکل ۱۵ ایرفویل بهینه در هردور چرخش توربین را به همراه ایرفویل مبنا نمایش می‌دهد، تغییرات ظاهری ایرفویل جدید مشاهده

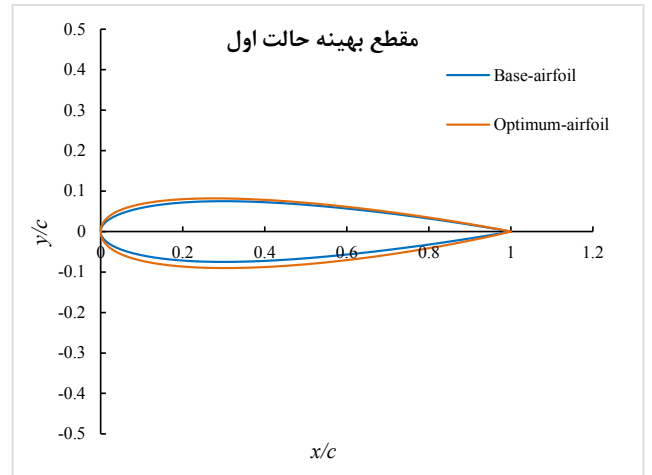
۵-نتایج

در این پژوهش هدف تعیین مقطع بهینه برای توربین در هردور چرخش است که این مقطع هم به صورت یک مقطع واحد در یک دور و هم بهترین مقاطع در هر ربع چرخش روتور توربین بدست آمده است.

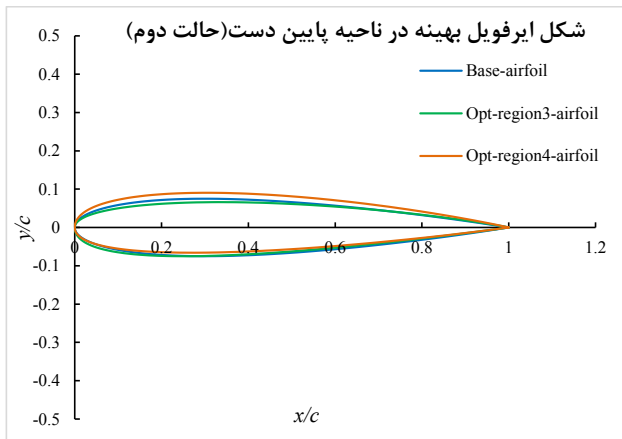
با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده پره‌ها بر یکدیگر اثری ندارند و نتایج پره‌ها ۱۲۰ درجه با یکدیگر اختلاف فاز دارند، در این بخش فقط نتایج مربوط به پره اول ارائه می‌شود.



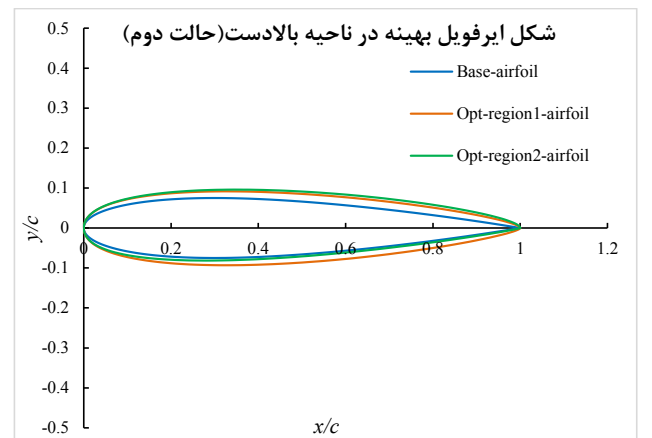
شکل ۱۶. نمودار ضریب توان برای یک پره با ایرفویل جدید و مبنا
Fig.16. Diagram of power coefficient for one blade with new and base airfoil



شکل ۱۵. ایرفویل جدید (بهینه) و ایرفویل مبنا
Fig.15. New (optimum) airfoil and base airfoil



شکل ۱۸. ایرفویل جدید (بهینه) و ایرفویل مبنا برای ناحیه پایین دست
Fig.18. New (optimum) airfoil and base airfoil for down-stream



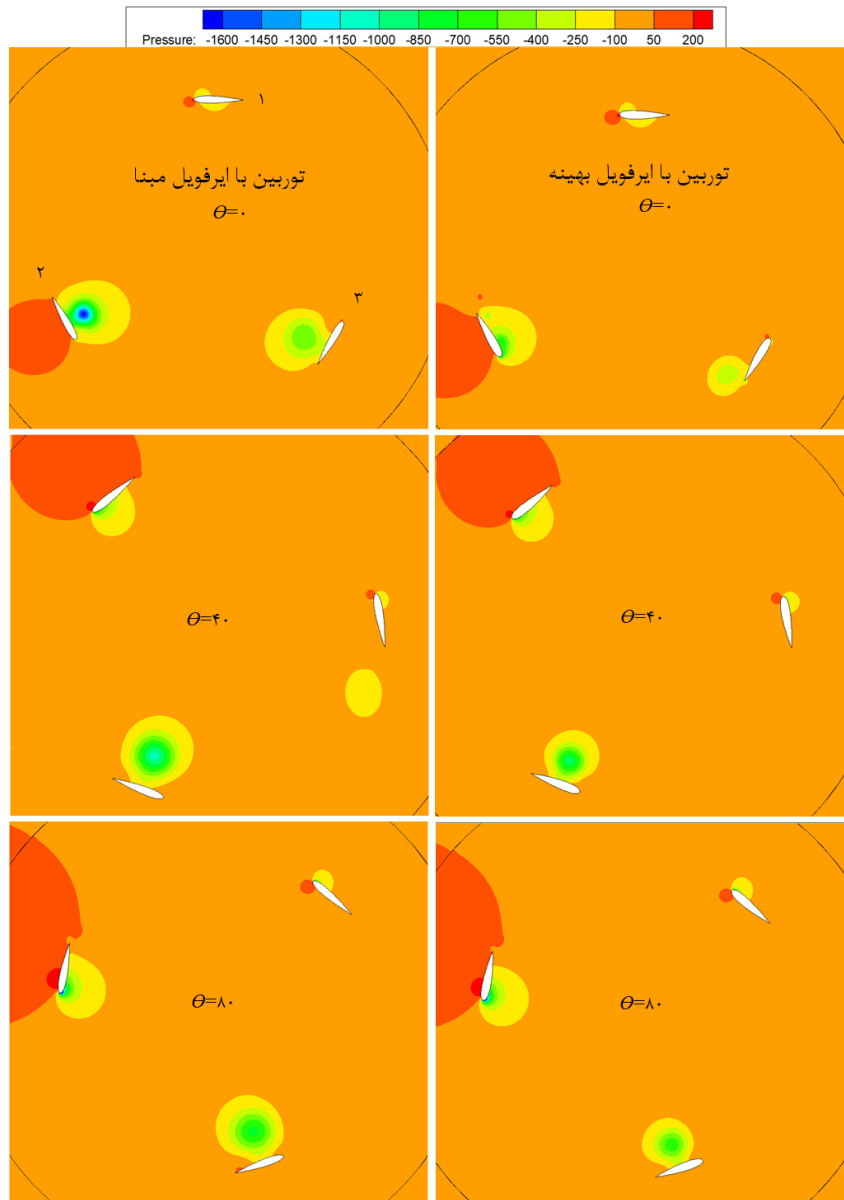
شکل ۱۷. ایرفویل جدید (بهینه) و ایرفویل مبنا برای ناحیه بالادست
Fig.17. New (optimum) airfoil and base airfoil for up-stream

شکل های ۱۷ و ۱۸ ایرفویل های بهینه در نواحی مختلف چرخش توربین را به همراه ایرفویل مبنا نمایش می دهند، تغییرات ظاهری ایرفویل جدید مشاهده می شود.

شکل ۱۹ مقایسه کانتور فشار بین توربین داریوس با ایرفویل بهینه و ایرفویل مبنا را در زوایای فضایی ۰، ۴۰ و ۸۰ درجه را برای حالت اول بهینه سازی نشان می دهد، همانطور که در $\theta=0$ پیداست ایرفویل شماره ۱ مبنا و بهینه در شروع ناحیه اول قرار دارند، ایرفویل ۲ نیز در ناحیه ۲ قرار دارد، همانطور که در ایرفویل بهینه پیداست فشار کمینه قسمت داخلی ایرفویل بهینه کاهش یافته است، اندازه گردابه ها کوچک تر شده است، همچنین فشار بیشینه در قسمت بیرونی ایرفویل بهینه نسبت به مبنا افزایش یافته است در نتیجه

می شود، ایرفویل جدید یا همان مقطع بهینه دارای ضخامت بیشتری است.

برای حالت دوم هریک از نواحی چهارگانه به صورت جداگانه بهینه سازی شده اند که به صورت کلی بهبود ۶۰٪ ضریب توان مقاطع جدید در شکل ۱۶ مشاهده می شود، که سهم هریک از نواحی از افزایش ضریب توان متفاوت است، همانگونه که در شکل ۱۶ مشاهده می شود، در زوایای ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ گسست ها و ناپیوستگی هایی وجود دارد که به دلیل تفاوت ایرفویل ها در نواحی مختلف و شبیه سازی جداگانه آن ها است. مقاطع بهینه ایرفویل پره ها در هر ناحیه نیز در شکل های ۱۷ و ۱۸ ترسیم شده است. ناحیه بالادست شامل نواحی ۱ و ۲ و ناحیه پایین دست شامل نواحی ۳ و ۴ هستند.



شکل ۱۹. توزیع فشار در توربین بادی با ایرفویل مبنا و ایرفویل بهینه

Fig.19. Pressure distribution in wind turbine with base airfoil and optimmun airfoil

جریان نیز به تعویق افتاده است.

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

شبکه‌های عصبی توانایی بالایی در یادگیری مسائل غیرخطی دارند و می‌توان با آموزش مناسب شبکه‌های عصبی علاوه بر پیش‌بینی دقیق پارامترها عملیات بهینه‌سازی نیز با سرعت بیشتری انجام شود. در این پژوهش با استفاده از شبکه عصبی توربین بادی با ایرفویل‌های متفاوت آموزش دید و توانست ضریب توان بهینه را به کمک الگوریتم ژنتیک بدست آورد. با استفاده از ایرفویل‌های تغییرشکل‌پذیر می‌توان

نیروی برآ نسبت به ایرفویل مبنا افزایش یافته است، ایرفویل بهینه نیز دارای فشار داخلی کمتر و گردابه‌های کوچکتری نسبت به ایرفویل مبنا است. در $\theta = 40^\circ$ همانطور که در شکل ۱۴ نیز مشاهده می‌شود، ایرفویل ۱ بهینه و مبنا در وضعیت مشابهی در تولید توان قرار دارند و ایرفویل ۲ نیز در انتهای ناحیه دوم قرار دارد و فشار کمینه داخلی ایرفویل بهینه نسبت به ایرفویل مبنا کاهش یافته است. در $\theta = 80^\circ$ همانطور که در شکل ۱۶ نیز مشاهده می‌شود ایرفویل ۱ بهینه و مبنا در وضعیت مشابهی در تولید توان قرار دارند و در ایرفویل ۲ بهینه نیز فشار کمینه داخلی کاهش یافته است و گردابه‌ها کوچک‌تر و جدایش

ω	سرعت زاویه‌ای (Rad/s)
θ	زاویه چرخش (Deg)
α	زاویه حمله (Deg)
δ	ضریب دوم لزجت (Pa.s)
ρ	چگالی (kg/m^3)

به شکل قابل توجهی عملکرد سیستم‌هایی مانند توربین‌های بادی و بال‌های هواپیما را تحت کنترل درآورد.

با توجه نتایج، ضریب توان برای حالت اول و دوم به ترتیب ۴۲٪، ۶۰٪ نسبت به ضریب توان توربین با ایرفویل مبنا افزایش داشته است. همچنین مشاهده شد که بیشترین میزان تغییرات ضریب توان در ناحیه ۲ حاصل شد و در حالت اول با تعیین مقطع بهینه و بهینه‌سازی ضریب توان، ضریب برآ و پسا هردو افزایش یافتند.

و در آخر نتایج نشان می‌دهد استفاده از ایرفویل‌های تغییرشکل‌پذیر موجب افزایش چشم‌گیر ضریب توان توربین‌های بادی می‌شود.

مراجع

- [1] A. Sofla, S. Meguid, K. Tan, W. Yeo, Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges, *Materials & Design*, 31(3) (2010) 1284-1292.
- [2] A. De Gaspari, S. Ricci, Knowledge-based shape optimization of morphing wing for more efficient aircraft, *International Journal of Aerospace Engineering*, 2015 (2015).
- [3] D.W. MacPhee, A. Beyene, Experimental and fluid structure interaction analysis of a morphing wind turbine rotor, *Energy*, 90 (2015) 1055-1065.
- [4] L. Weishuang, T. Yun, L. Peiqing, Aerodynamic optimization and mechanism design of flexible variable camber trailing-edge flap, *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(3) (2017) 988-1003.
- [5] G. Jones, M. Santer, M. Debiasi, G. Papadakis, Control of flow separation around an airfoil at low Reynolds numbers using periodic surface morphing, *Journal of Fluids and Structures*, 76 (2018) 536-557.
- [6] W. Tay, K. Lim, Numerical analysis of active chordwise flexibility on the performance of non-symmetrical flapping airfoils, *Journal of Fluids and Structures*, 26(1) (2010) 74-91.
- [7] J. Fincham, M. Friswell, Aerodynamic optimisation of a camber morphing aerofoil, *Aerospace Science and technology*, 43 (2015) 245-255.
- [8] B. Gardner, M. Selig, Airfoil design using a genetic algorithm and an inverse method, in: 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2003, pp. 43.
- [9] J. Chen, L. Chen, H. Xu, H. Yang, C. Ye, D. Liu, Performance improvement of a vertical axis wind turbine by comprehensive assessment of an airfoil family, *Energy*, 114 (2016) 318-331.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت جاروب‌شده (m^2)
$C_{(d)}$	ضریب پسا
$C_{(l)}$	ضریب برآ
d	قطر روتور (m)
F_n	نیروی عمودی (N)
F_t	نیروی مماسی (N)
H	ارتفاع توربین (m)
P	توان (W)
Q	گشتاور وارد بر توربین (N.m)
R	شعاع توربین (m)
T	گشتاور (N.m)
u^*	سرعت اصطکاکی (m/s)
∞_v	سرعت ورودی (m/s)
w	سرعت نسبی وارد بر پره (m/s)
y	فاصله اولین سلول از سطح پره (m)
y^+	فاصله بی‌بعد شده

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی (Pa.s)
μ_t	لزجت آشفتگی (Pa.s)
λ	سرعت نوک پره

- and Robotics Research, 1(3) (2012) 410-420.
- [17] F.M. White, Fluid Mechanics, 8th edition ed., McGraw-Hill, NY, 2016.
- [18] M. Kaewbumrung, W. Tangsopa, J. Thongsri, Investigation of the trailing edge modification effect on compressor blade aerodynamics using SST k- ω turbulence model, Aerospace, 6(4) (2019) 48.
- [19] R. Lanzafame, S. Mauro, M. Messina, 2D CFD modeling of H-Darrieus wind turbines using a transition turbulence model, Energy Procedia, 45 (2014) 131-140.
- [20] R. Bravo, S. Tullis, S. Ziada, Performance testing of a small vertical-axis wind turbine, in: Proceedings of the 21st Canadian Congress of Applied Mechanics, 2007, pp. 3-7.
- [21] G. Srinivasan, J. Ekaterinaris, W. McCroskey, Evaluation of turbulence models for unsteady flows of an oscillating airfoil, Computers & Fluids, 24(7) (1995) 833-861.
- [22] K. Chakraborty, S. Bhattacharyya, R. Bag, A. Hassanien, Sentiment analysis on a set of movie reviews using deep learning techniques, in: Social Network Analytics—Computational Research Methods and Techniques, Elsevier, 2018.
- [10] M. Mohamed, A. Dessoky, F. Alqurashi, Blade shape effect on the behavior of the H-rotor Darrieus wind turbine: Performance investigation and force analysis, Energy, 179 (2019) 1217-1234.
- [11] O.S. Mohamed, A.A. Ibrahim, A.K. Etman, A.A. Abdelfatah, A.M. Elbaz, Numerical investigation of Darrieus wind turbine with slotted airfoil blades, Energy Conversion and Management: X, 5 (2020) 100026.
- [12] M. Baghdadi, S. Elkoush, B. Akle, M. Elkhoury, Dynamic shape optimization of a vertical-axis wind turbine via blade morphing technique, Renewable Energy, (2020).
- [13] Y. Maruyama, M. Shimura, R. Yoshie, R. WEI, K. SEKI, Development of vertical axis wind turbine with straight blades suitable for buildings, JWE: 89 (2001) 265-268.
- [14] M. Islam, D.S.-K. Ting, A. Fartaj, Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines, Renewable and sustainable energy reviews, 12(4) (2008) 1087-1109.
- [15] M. Hazewinkel, Encyclopaedia of Mathematics:, in, Springer Science & Business Media, 1997.
- [16] R.K.N. Parasaram, T. Charyulu, Airfoil Profile Design by Reverse Engineering Bezier Curve, International Journal of Mechanical Engineering

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Kazemi, A. Fardi, M. J. Maghrebi, Improving the power coefficient of the Darrieus vertical axis wind turbine with the aid of morphing airfoils, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5)(2021) 3227-3240.

DOI: [10.22060/mej.2021.18974.6931](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18974.6931)

