

# Numerical Simulation and Parametric Study of an Oscillating Twin-Wing Wind Generator

#### ARTICLE INFO

Article Type Original Research

*Authors* Alisadeghi H.\*1 *PhD,* Safipour H.<sup>1</sup> *MSc,* Rezaiefard H.<sup>1</sup> *MSc* 

## How to cite this article

Alisadeghi H, Safipour H, Rezaiefard H. Numerical Simulation and Parametric Study of an Oscillating Twin-Wing Wind Generator. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(5):1115-1125.

## ABSTRACT

An airfoil that is heaving and pitching simultaneously may extract energy from an oncoming flow, acting as a turbine. The extracting energy from a flow is possible if the effective parameter in performance of turbine is selected properly. In this study, the theoretical performance of an oscillating twin-wing wind generator is investigated through unsteady two-dimensional laminar-flow simulations, using the commercial computational fluid dynamics code FLUENT. Computations By examining various geometric, motor, and slippery parameters and investigating the effect of each of these parameters, we present a mapping of power-extraction efficiency in the frequency and pitching amplitude domain for a NACA 0015 airfoil at a Reynolds number of 41000. Results of a parametric study show that motion-related parameters such as heaving amplitude and frequency have a strong effect on airfoil performances, whereas geometry parameters turn out to play a secondary role. A power extraction efficiency of 49% is reached by twin-wing parallel configuration. This configuration improve the efficiency by around 7% as compared to the single foil configuration.

**Keywords** Oscillating Airfoil; Pitching Motion; Heaving Motion; Power Extraction Regime; Twin-Wing Wind Generator

## CITATION LINKS

[1] Wingmill: An oscillating-wing windmill [2] Testing and analysis of an oscillating hydrofoils turbine concept [3] Prototype testing of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils [4] A review on flow energy harvesters based on flapping foils [5] Energy harvesting through flow-induced oscillations of a foil [6] Parametric study of an oscillating airfoil in a power-extraction regime [7] Eulerian simulations of oscillating airfoils in power extraction regime [8] Computational fluid dynamics analysis of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils [9] Three-dimensional effects on an oscillating-foil hydrokinetic turbine [10] Optimal operating parameters for an oscillating foil turbine at Reynolds number 500,000 [11] Optimizing the efficiency of a multi-wing turbine using a Lagrangian vortex particle method [12] Optimal tandem configuration for oscillating-foils hydrokinetic turbine [13] Experimental and numerical study of a dual configuration for a flapping tidal current generator [14] An investigation of the fluid-structure interaction in an oscillating-wing micro-hydropower generator [15] Mode coupling and flow energy harvesting by a flapping foil [16] Optimal frequency for flow energy harvesting of a flapping foil [17] Experimental studies of flapping foils for energy extraction [18] Hydrodynamic hypothesis of school in fishes [19] Three-dimensional flow structures and vorticity control in fish-like swimming [20] Hydrodynamic studies on two traveling wavy foils in tandem arrangement [21] Vortex interaction and roll-up in unsteady flow past tandem airfoils [22] Investigating the interaction of two oscillating foils in tandem arrangement, using 3D unsteady boundary element method [23] Numerical analysis of an oscillating-wing wind and hydropower generator. AIAA Journal [24] A bio-inspired study on tidal energy extraction with flexible flapping wings [25] Fluid dynamics of flapping insect wing in ground effect

<sup>1</sup>Aerodynamics Department, Aerospace Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Daneshgah Boulevard, Ehsan Street Exit, East Zeynoddin Highway, Tehran, Iran. Phone: +98 (21) 73064237 Fax: +98 (21) 77791045 alisadeghi@kntu.ac.ir

#### Article History

Received: August 26, 2018 Accepted: December 03, 2018 ePublished: May 01, 2019

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

# شبیهسازی عددی و مطالعه پارامتری یک توربین بادی دوباله نوسانکننده

## حامد عليصادقي\* PhD

گروه آیرودینامیک، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

#### حسین صفیپور MSc

گروه آیرودینامیک، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

## حجت رضاییفرد MSc

گروه آیرودینامیک، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

### چکیدہ

حرکت پیچشی و انتقالی همزمان یک ایرفویل در معرض جریان هوا میتواند همچون یک توربین بادی از جریان ورودی انرژی دریافت نماید. این امر در صورتی امکانپذیر است که پارامترهای موثر بر عملکرد این توربین بهصورت مناسبی انتخاب شده باشند. در این تحقیق جریان غیردایم دوبُعدی حول یک توربین بادی دوباله با حرکت متقارن با استفاده از نرمافزار تجاری FLUENT مورد بررسی قرار گرفته است. بهمنظور شبیهسازی حرکت پیچشی- انتقالی ایرفویل نوسانکننده از شبکهای دینامیک یا متحرک استفاده شده است. با بررسی پارامترهای مختلف هندسی، حرکتی و لزج، ضمن بررسی تاثیر هر یک از این پارامترها، نقشه راندمان دریافت انرژی در بازه گستردهای از فرکانسها و دامنههای پیچشی برای ایرفویل ناکا ۱۰۱۵ در رینولدز ۴۱۰۰، ترسیم شده است. نتایج مطالعه پارامتری نشان میدهد که پارامترهای مربوط به حرکت همچون دامنه حرکت انتقالی و فرکانس، تاثیر بسزایی روی عملکرد ایرفویل دارد، در حالی که پارامترهای هندسی از درجه اهمیت کمتری برخورداند. همچنین نتایج تحقیق در رابطه با ایرفویل دوباله در مقایسه با حالت تکباله نشان میدهد که استفاده از این ترکیب میتواند راندمان سیستم را تا ۷% افزایش دهد و به مقدار قابل توحه ۴۹% برساند.

**کلیدواژهها:** ایرفویل نوسانکننده، حرکت پیچشی، حرکت انتقالی، رژیم دریافت انرژی، توربین بادی دوباله موازی

> تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲ <sup>\*</sup>ئویسنده مسئول: alisadeghi@kntu.ac.ir

### ۱– مقدمه

اغلب طراحیهای متداول برای توربینهای بادی و آبی شامل روتورهایی با محور عمودی یا افقی هستند. یکی از انواع جدیدتر این توربینها، توربینهای بال نوسانکننده هستند. دریافت انرژی از سیال توسط بالهای نوسانکننده برای اولین بار توسط مکنی و همکاران در سال ۱۹۸۱ مطرح شد<sup>[1]</sup>. با گسترش اهمیت انرژیهای تجدیدپذیر، توجه به این مفهوم نوین در چند سال اخیر افزایش یافته است. از جمله دلایل توجه محققان به موضوع توربینهای نوسانكننده مىتوان به ساختار هندسى ساده اين توربينها اشاره نمود. اغلب این توربینها از بالهایی با هندسه ساده، بدون پیچش هندسی و آیرودینامیک بهره میبرند. این ساختار ساده در کنار شکل حرکت رفت و برگشتی این توربینها باعث شده است تا سرعت بیشینه ملخ یا بال بسیار پایین باشد و تنشهای ناشی از نیروی گریز از مرکز ملخها که در توربینهای محور افقی از چالشهای طراحی سازهای به حساب میآید، حذف شود<sup>[2]</sup>. این عوامل در کنار قابلیت این توربینها در تسخیر مقدار قابل توجهی انرژی از سیال در مقایسه با توربینهای بزرگ رایج، منجر به توجه محققان به این موضوع در سالهای اخیر شده است.

فویلهای نوسانکننده در سالهای اخیر با تغییرات قابل توجهی روبهرو بوده و پیوسته در حال توسعه بودهاند<sup>[3]</sup>. این تحقیقات در

زمینهها و با رویکردهای متفاوتی ادامه یافته است. در این ارتباط میتوان به دو رویکرد تولید یا دریافت توان از جریان آب یا هوا و ایجاد نیروی پیشران با استفاده از مکانیزم بال زن بهعنوان اصلیترین رویکردهای مورد مطالعه اشاره نمود. در زمینه تولید توان بسته به نوع و مکانیزم حرکتی فویل نوسانکننده نیز حالتهای متفاوتی قابل بررسی است. این حالتها شامل حرکت انتقالی و پیچشی اجباری، حرکت پیچشی اجباری و انتقالی خودالقاشده و در نهایت، حرکت پیچشی و انتقالی خودالقاشده است<sup>[4]</sup>. در حالت واقعی، توربینهای تولید توان از نوع دوم یا نهایتاً سوم هستند. اما در مراحل ابتدایی طراحی این توربینها، استفاده از نوع نخست (حرکت پیچشی و انتقالی اجباری)، استفاده از نوع نخست (حرکت پیچشی و انتقالی اجباری)، اطلاعات مفید زیادی را فراهم مینماید<sup>[3]</sup>، لذا در اغلب مطالعات انجامشده<sup>[4]</sup> و همچنین تحقیق حاضر، تمرکز روی حالت نخست

بین تحقیقات انجامشده روی فویلهای نوسانکننده با مکانیزم حرکت اجباری (نوع اول)، دسته وسیعی از تحقیقات با تمرکز روی پارامترهای موثر بر راندمان کاری این توربینها، تاثیر پارامترهای مختلف هندسی، حرکتی و لزجت را مورد بررسی قرار دادهاند. در این زمینه میتوان به کارهای گسترده انجامشده در دانشگاه لاوال توسط *کینزی* و همکاران اشاره نمود<sup>[2, 3, 6-10]</sup>. *کینزی* و همکاران با معرفی فضای فرکانس- زاویه پیچش، امکان بررسی دقیقتر راندمان سیستم را تحت تاثیر پارامترهای مختلف فراهم نمودند. این مطالعات بهصورت عددی در رینولدزهای پایین<sup>[11] [6, 7, 11]</sup> و رینولدزهای بالا<sup>[10]</sup> و اغلب بهصورت دوبُعدی و در مواردی نیز بهصورت سهبُعدى<sup>[9]</sup> انجام گرفته است. بررسى عددى انجامشده توسط *کینزی* و *دوماس*<sup>[9]</sup> در حالت سهبُعدی در نسبتهای منظری مختلف حاکی از آن است که رفتار کلی نیروها و ممانها با حالت دوبُعدى مشابهت داشته، اما مقدار آن ١۵% كمتر از حالت دوبُعدى است. دستهای دیگر از تحقیقات نیز، ترکیبهای مختلف این توربینها را در کنار هم با دو پیکربندی موازی با حرکت مشابه و هماهنگ و پیکربندی پشت سر هم همراه با تاخیر فاز مورد توجه قرار دادهاند[11-13]. در مواردی نیز این تحقیقات عددی با مطالعات تجربی مورد تایید قرار گرفته است<sup>[2, 3, 8]</sup>.

علاوه بر تحقیقات فوق، مطالعات پراکندهای نیز توسط دیگر محققان صورت گرفته است<sup>[4]</sup>. بهعنوان مثال، یدیده واماندگی دینامیک و ریزش گردابهها و اثرات آن از لبه حمله فویل توسط *جونز* و همکاران<sup>[14]</sup> با استفاده از شبیهسازی معادلات ناویر-استوکس غیردایم متوسطگیریشده مورد بررسی قرار گفته است. *ژو* و *پنگ* نیز با تمرکز بر حرکت پیچشی سینوسی نشان دادهاند که مکان محور پیچشی در بازه ۰/۲ تا ۰/۵ برابر طول وتر از لبه حمله فویل، بهینهترین حالت ممکن را برای ایجاد راندمان مطلوب فراهم مینماید<sup>[15]</sup>. شبیهسازی دیگری توسط *ژو* برای نوسانات اجباری پیچشی– انتقالی انجام شد<sup>[16]</sup>. در این مطالعه مشاهده شد که در یک بازه از پارامترهای معین (دامنه جابهجایی برابر با طول وتر، بیشترین زاویه حمله ۴۰درجه و عدد رینولدز ۱۰۰۰)، بیشینه راندمان دریافت انرژی، زمانی رخ میدهد که فرکانس نوسانی با فرکانس اغلب مودهای گردابههای ناپایدار منطبق شود. سیمیسون روی هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در یک مخزن آب با عدد رینولدز ۱۳۸۰۰ آزمایشاتی را ترتیب داد<sup>[17]</sup>. وی با اعمال حرکت پیچشی سینوسی و حرکت انتقالی متناسب با آن توانست زاویه حمله موثر فویل را بهصورت سینوسی تغییر دهد. سیمیسون برای دامنههای جابهجایی انتقالی متفاوت در فضای پارامتری فرکانس و زاویه

حمله موثر بیشینه، الگوهای دنباله جریان را طبقهبندی نمود. وی صراحتاً تاکید کرد که فرکانس کاسته، پارامتر مرتبطتری نسبت به عدد اشتروهال برای توربینهای فویل نوسانکننده است.

مرور مقالات مرتبط با فویلهای نوسانکننده نشان میدهد که علاوه بر تحقیقات انجامشده روی پارامترهای موثر بر راندمان، تلاشهایی نیز در راستای افزایش راندمان این سیستمها با استفاده از ترکیبهای چندتایی فویلهای نوسانکننده توسط افراد مختلف انجام گرفته است[4]. این ایده در ابتدا براساس الگوی حرکت دستهجمعی پرندگان و ماهیها، در رابطه با فویلهای نوسانکننده در رژیم تولید پیشران، مطرح و با موفقیت به کار گرفته شده است<sup>[18-20]</sup>. متعاقباً این ایده در فویلهای نوسانکننده در رژیم تولید توان نیز مورد استفاده قرار گرفت. در این سیستمها علاوه بر پارامترهای موثر پیشین، فاصله و اختلاف فاز دو فویل مجاور نیز به یارامترهای طراحی اضافه شد[4]. مطالعات عددی و تجربی نشان میدهد که استفاده از دو فویل پشت سر هم (سری) میتواند ظرفیت دریافت انرژی را افزایش دهد<sup>[12, 21, 21]</sup>. تحقیقات عددی مفصلی نیز توسط *اشرف* و همکاران روی دو فویل ناکا ۰۰۱۴ بهصورت سری در فواصل مختلف و اختلاف فازهای متفاوت انجام گرفت<sup>[23]</sup>. این تحقیقات نشان داد که اگر چه راندمان هر یک از فویلها ۲۰% کمتر از حالت منفرد است، اما راندمان کل با توجه به ناحیه جاروب واحد، افزایش مییابد و به ۵۹% نزدیک میشود. *لفرانکو*<sup>[11]</sup> دو ترکیب سری و موازی با حرکت هماهنگ دو صفحه تخت نوسانی را در رینولدز ۱۱۰۰ با روش LVM مورد بررسی قرار داد. در بررسی وی راندمان سیستم سری به ۴۱% و ترکیب موازی به ۳۱% رسید. بین تحقیقات انجامشده روی فویلهای نوسانکننده موازی، تنها در مطالعه *لیو* و همکاران<sup>[24]</sup> از ترکیب موازی با حرکت متقارن استفاده شده است، در حالی که در سایر مطالعات، حرکت هر دو فویل بهصورت هماهنگ انجام میگیرد. در مطالعه *لیو* و همكاران[24] نيز افزايش راندمان تركيب موازى قرينه ديده مىشود، اما هیچ گونه مطالعه پارامتری روی پارامترهای موثر توسط وی انجام نشده است. از این رو انجام مطالعه پارامتری برای حالت موازی متقارن و بررسی پارامترهای بهینه طراحی برای آن و مقایسه آن با حالت تکباله ضروری به نظر میرسد.

با توجه به این که استفاده از پیکربندی موازی با حرکت متقارن، رفتاری مشابه با حرکت فویل در مجاورت زمین را تداعی مینماید و اثر زمین میتواند تاثیر مثبتی روی آیرودینامیک فویل داشته باشد[25]، توقع مىرود كه راندمان اين سيستم نسبت به ساير سیستمهای موازی بیشتر باشد. در این تحقیق سعی بر آن است تا راندمان سیستم در حالت تنها با حالت موازی، مقایسه و یارامترهای بهینه طراحی برای حالت موازی با حرکت متقارن استخراج شود. مطالعهای تاکنون انجام نشده و پارامترهای موثر بر راندمان آن نیز مشخص نشده است. برای این منظور از رویکرد *کینزی* و همکاران<sup>[2, 3, 6-10]</sup> برای مطالعه پارامترهای مختلف و تاثیر آن بر راندمان سیستم در حالت موازی استفاده شده است. در ادامه، ضمن معرفی این روش و پارامترهای موثر بر راندمان و معرفی فضای فرکانس- زاویه سعی شده است تا پارامترهای بهینه برای افزایش راندمان سیستم در هر دو حالت منفرد و موازی مشخص شود. لازم به ذکر است که با توجه به نتایج ارایهشده در مرجع<sup>[9]</sup> و تشابه نیروها و ممانها در حالت دوبُعدی و سهبُعدی و افت راندمان کمتر از ۱۰% برای بالهایی با نسبتهای منظری بالاتر از ۱۰، با توجه به تعدد اجراهای کامپیوتری و حجم محاسبات بالا در حالت شبکه متحرک، در این تحقیق بهجای محاسبات سه بُعدی از

Volume 19, Issue 5, May 2019

## ۲ – مبانی نظری فویل بالزن

طراحی و انتخاب پارامترهای سینماتیک فویلهای بالزن تاثیر بسزایی در دریافت توان از جریان سیال (حالت تولید توان) یا تولید نیروی پیشران (حالت پیشرانش) با صرف انرژی و انتقال آن به سیال دارد. بسته به اندازه و تاخیر فاز نسبی بین حرکتهای انتقالی و پیچشی میتوان یکی از این دو مکانیزم تولید توان یا نیروهای وارد به آن در حالت تولید توان نشان داده شده است. در نیروهای وارد به آن در حالت تولید توان نشان داده شده است. در پسا در سمت راست تصویر و تجزیه این نیرو به مولفههای X و Y این شکل نیروی برآیند آیرودینامیک (R) متشکل از نیروی برآ و مولفه عمودی نیروی برآیند آیرودینامیک در راستا و هم جهت با مولفه عمودی نیروی برآیند آیرودینامیک در راستا و هم جهت با مسیر جابه جایی عمودی ایرفویل قرار میگیرد. در این حالت، ایرفویل هیچ گونه حرکت افقی ندارد و تنها نوسان عمودی و پیچشی خواهد داشت. در نتیجه ایرفویل از سیال، کار یا انرژی دریافت مینماید.



**شکل ۱)** حرکت ایرفویل در رژیم دریافت انرژی<sup>[6]</sup>

همان گونه که در بخش مقدمه توضیح داده شد، بهمنظور سادهسازی فرآیند طراحی ایرفویلهای بالزن در رژیم تولید توان، ترکیب حرکت انتقالی- پیچشی فویل بهصورت اجباری در نظر گرفته و معادلات حرکتی آن استخراج میشود<sup>[5]</sup>. معادلات حرکت نوسان پیچشی و انتقالی سینوسی حول محوری که روی خط وتر ایرفویل در نقطه <sub>x</sub> از لبه حمله واقع شده است، بهشکل زیر توصیف میشود:

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\gamma t) \tag{1}$$

$$y(t) = H_0 \sin(\gamma t + \varphi) \tag{Y}$$

مشتق زمانی معادلات حرکتی فوق بهترتیب سرعتهای نوسانی پیچشی و انتقالی را نشان میدهند.

$$\Omega(t) = \theta_0 \gamma \cos(\gamma t) \tag{P}$$

$$V_{\nu}(t) = H_0 \gamma \cos(\gamma t + \varphi) \tag{P}$$

$$\gamma_y(c)=H_0\gamma \cos(\gamma c+\varphi)$$
 ر روابط فوق،  $heta_0$  و  $H_0$  بهترتیب دامنههای پیچشی و انتقالی،  $\gamma$ 

فرکانس زاویه ای و  $\varphi$  اختلاف فاز بین پیچش و انتقال است. براساس تحقیقات انجامشده، بهترین میزان اختلاف فاز برابر با ۹۰درجه است<sup>[6, 10]</sup> که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است. در ارتباط با نوسان ایرفویل، زاویه حمله موثر از پارامترهای کلیدی برای کمی سازی اثر ترکیبی حرکت پیچشی و نوسانی است. این زاویه با توجه به شکل ۲ <sup>[10]</sup> به صورت زیر تعریف می شود:

$$\alpha(t) = \alpha_y(t) - \theta(t)$$
(۵)  
(۵)  
که در رابطه فوق،  $\alpha_y$  زاویه حمله القایی ناشی از حرکت نوسانی  
انتقالی است و مقدار آن بهصورت زیر محاسبه میشود:

 $\alpha(t) = \arctan(-V_{y}(t)/U_{\infty}) - \theta(t)$ (8)

**Modares Mechanical Engineering** 

۱۱۱۸ حامد علیصادقی و همکاران

مطابق با شکل ۲، سرعت معادل نیز بهشکل رابطه ۲ تعریف میشود.

$$V_{eff}(t) = \sqrt{U_{\infty}^2 + V_y^2(t)} \tag{Y}$$

همان گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، زاویه حمله موثر معادل با زاویه بین خط وتر ایرفویل و سرعت معادل جریان بالادست است.



**شکل ۲)** ترکیب حرکت پیچشی و نوسانی یک فویل و پنجره جاروبشده توسط آن<sup>[10]</sup>

انتظار میرود که مقادیر بیشینه زاویه حمله موثر و سرعت معادل در حرکت نوسانی، روی نیروی بیشینه و احتمال وقوع واماندگی دینامیک تاثیر قابل توجهی داشته باشد. با توجه به حرکت پیچشی و نوسان انتقالی ایرفویل، بیشینه زاویه حمله موثر در یک سیکل، در یکچهارم دوره تناوب آن به وقوع میپیوند و بهشکل زیر تخمین زده میشود:

$$\alpha_{max} \approx |\alpha_{T/4}|$$
 (A)

$$|\alpha_{T/4}| = |\arctan(\gamma H_0/U_{\infty}) - \theta_0|$$
 (۹)  
فرکانس کاسته  $f^*$  نیز بهشکل زیر تعریف می شود:

$$f^* = \frac{fc}{U_{\rm co}} \tag{1}$$

در رابطه ۹، بهعلت وجود ترم غیرسینوسی، زاویه حمله دقیقاً صفر نمی شود، اما در بیشینه سرعت انتقالی با تخمین قابل قبولی می توان زاویه حمله را صفر در نظر گرفت. در این حالت خاص که در شکل ۳ <sup>[6]</sup> نشان داده شده است، نیروی برآیند R مماس و مخالف با حرکت ایرفویل است و به این حالت، حالت بالزن گفته می شود. مفهوم مورد اشاره، منتج به تعریف حد بالزن می شود<sup>[9]</sup>.



**شکل ۳)** نیروی برآیند آیرودینامیک در حالت بالزن<sup>[6]</sup>

در حقیقت، این معیار برای تخمین مقادیر حدی دامنه پیچش  $heta_0$ برای تولید رژیمهای مختلف تولید توان یا پیشرانش، در ترکیب با دامنه تقلایی H<sub>0</sub> و فرکانس کاسته  $f^*$  مورد استفاده قرار میگیرد. م

$$x = \frac{\sigma_0}{\tan^{-1(H_0\gamma/U_\infty)}}$$
(11)

براساس این معیار، برای x>1 رژیم تولید توان و برای x<1 رژیم پیشرانش به دست میآید. بهمنظور تحلیل حرکت ایرفویل در  $(f^*, \theta_0)$  رژیمهای مختلف جریان تمرکز روی فضای پارامتری ( $f^*$ ,  $\theta_0$ 

ماهنامه علمی– پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

سادهتر بوده و همان گونه که در نمودار ۱ نشان داده شده است، این فضا با استفاده از حد بالزن به دو ناحیه تقسیم میشود. در این نمودار، ناحیه تولید یا دریافت توان در قسمت بالای محدوده و رژیم پیشرانش در قسمت پایین مشخص شده است. در نمودار ۱ بهخوبی میتوان مشاهده نمود که در یک فرکانس کاهشیافته مشخص، رژیم جریان یا به عبارتی، حالت تولید توان یا پیشرانش ایرفویل نوسانی را میتوان بهسادگی با تغییر دامنه پیچش عوض موازی با حد بالزن رسم شدهاند، نشان داده شده است. اگر چه روایای حمله موثر به بزرگی ۴۰درجه در آیرودینامیک دایم بیمعنی به نظر میرسد، اما در آیرودینامیک غیردایم بهعلت ریزش گردابه و وجود واماندگی دینامیک همچنان مورد توجه است.



**نمودار ۱)** نواحی دریافت توان و پیشرانش در فضای فرکانس– زاویه (خطوط موازی زوایای حمله موثر ثابت)

توان یا قدرت آیرودینامیک لحظهای از ترکیب توان حاصل از حرکت انتقالی عمودی و گشتاور پیچشی مطابق با رابطه زیر به دست میآید<sup>[10]</sup>:

$$P(t) = Y(t)V_y(t) + M(t)\Omega(t)$$
(14)

توان متوسط در یک سیکل نیز با انتگرالگیری از توان لحظهای در کل سیکل بهصورت زیر به دست میآید:

ضریب توان لحظهای کل در حالت دوبُعدی بهشکل زیر تعریف میشود<sup>[10]</sup>:

$$C_p = P / \left(\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^3 c\right) \tag{1F}$$

$$C_p(t) = \frac{2}{\rho U_{\infty}^3 c} [Y(t)V_y(t) + M(t)\Omega(t)]$$
(1 $\Delta$ )

ضریب توان لحظهای کل، حاصل جمع ضرایب توان ناشی از حرکت انتقالی و پیچشی است و بهشکل زیر به دست میآید:

$$C_p(t) = C_{p_y}(t) + C_{p_\theta}(t) \tag{15}$$

$$C_p(t) = \frac{1}{U_{\infty}} \left[ C_y(t) V_y(t) + C_M(t) \Omega(t) \right] \tag{1Y}$$

که (C<sub>y</sub>(t ضریب برآی لحظهای و C<sub>m</sub>(t ضریب گشتاور پیچشی لحظهای است که بهشکل زیر تعریف میشوند:

$$C_{y}(t) = Y(t) / \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^{2} c \qquad (1\lambda)$$

$$C_M(t) = M(t) / \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 c \tag{19}$$

ضریب توان متوسط زمانی (\(\bar{C}p) در طول یک چرخه با انتگرالگیری از (Cp(t) لحظهای در یک چرخه بهصورت زیر به دست میآید:

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T} \int_0^T C_p(t) \mathrm{d}t = \bar{P} / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c \qquad (\Upsilon$$

یا به عبارتی دیگر به طریق زیر:

$$\bar{C}_p = \bar{C}_{p_y} + \bar{C}_{p_\theta} \tag{(Y1)}$$

$$\bar{C}_p = \frac{1}{U_{\infty}T} \int_0^T \left[ C_y(t) V_y(t) + C_M(t) \Omega(t) \right] \mathrm{d}t \tag{YY}$$

راندمان تولید توان معمولاً بهصورت نسبت توان متوسط خروجی به توان قابل استحصال جریان عبوری از مساحت جاروبشده توسط فویل تعریف میشود.

$$\eta = \frac{\bar{P}}{P_a} \tag{(Y^{\mu})}$$

در رابطه فوق، توان قابل استحصال بهشکل زیر تعریف میشود و در نهایت نیز راندمان کل بهصورت زیر به دست میآید:

$$P_a = \frac{1}{2}\rho U_{\infty}^3 d \tag{(YF)}$$

$$\eta = \frac{\bar{p}}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^{3} d} = \bar{C}_{p} \frac{c}{d}$$
(Y $\Delta$ )

پارامتر d بیشترین مسافت جاروبشده توسط لبه فرار فویل بوده که در شکل ۲ نشان داده شده است.

# ۳– شبیهسازی عددی

# ۳ ـ ۱ ـ روش حل معادلات جریان

معادلات حاکم بر جریان حول فویل نوسانکننده، معادلات غیردایم ناویر – استوکس تراکمناپذیر آرام است. حل این معادلات با استفاده از نرمافزار تجاری FLUENT انجام گرفته است. در این شبیهسازی عددی از رویکرد فشار مبنا با روش کوپلینگ میدان سرعت – فشار PWIM و الگوریتم حل SIMPLE استفاده شده است. ترم جابهجایی با روش بالادست مرتبه دوم گسستهسازی شده و گسستهسازی زمانی نیز با استفاده از روش ضمنی مرتبه دوم مورت گرفته است. حرکت اجباری فویل در میدان حل و استخراج پارامترهای مورد نیاز نیز با توسعه تابعی داخلی یا UDF در محیط FLUENT امکان پذیر شده است.

## ۳-۲- میدان حل و شبکه محاسباتی

با توجه به این که فویل نوسانکننده دارای حرکت ترکیبی پیچشی و انتقالی بوده، بنابراین نیاز است که از شبکه متحرک یا دینامیک برای اعمال حرکت فویل استفاده شود. میدان حل، شرایط مرزی و شبکه محاسباتی برای حالت اعتبارسنجی و حالت پیکربندی دوتایی حرکت موازی بهترتیب در شکلهای ۴ و ۵ نشان داده شده است. میدان حل استفاده شده در بخش اعتبارسنجی از ۵ بلوک تشکیل یافته و حرکت انتقالی ایرفویل با نوسانات عمودی بلوک ۵ مدلسازی شده است. این نوسانات با روش لایهای در نرمافزار FLUENT مدلساول است.

در پیکربندی موازی با توجه به تقارن مساله، بهجای شبیهسازی هر دو فویل تنها یک فویل در نظر گرفته شده و از شرط مرزی تقارن استفاده شده است. در این حالت، استفاده از استراتژی بهکاررفته در شبکه اعتبارسنجی امکان پذیر نیست، چرا که نزدیکی ایرفویل به مرز تقارن، اجازه حرکت لایهای شبکه را نمیدهد. همان گونه که در شکل ۵ نشان داده شده، میدان حل جدید از ۴ بلوک تشکیل یافته است. بلوک ۴ دارای شبکهای بیسازمان بوده و حرکتهای نوسانی ایرفویل در این بلوک لحاظ شده است. بهمنظور بررسی استقلال حل از شبکه، ۳ شبکه متفاوت ارایه شده و تعداد سلولهای این ۳ شبکه در جدول ۱ ارایه شده است.

### Volume 19, Issue 5, May 2019



**شکل ۴)** میدان حل و شرایط مرزی (بالا) و شبکه محاسباتی (پایین) مورد استفاده در اعتبارسنجی



**شکل ۵)** میدان حل و شرایط مرزی (بالا) و شبکه محاسباتی (پایین) مورد استفاده در شبیهسازی حرکت موازی

**Modares Mechanical Engineering** 

محتلف	جدول ۱) تعداد سلولهای شبکههای
تعداد سلولها	شبكه محاسباتى
٨۶۴٧٩	درشت
27.18.	متوسط
1171.40	ريز

# ۳-۳- اعتبارسنجی

با توجه به این که اغلب مطالعات تجربی در رابطه با فویلهای نوسانکننده در شرایط واقعی و غیرآزمایشگاهی صورت گرفته است<sup>[3, 2]</sup>، امکان استفاده از این دادهها برای اعتبارسنجی محاسبات وجود ندارد. لذا در این بخش، از نتایج عددی ارایهشده در فرکانس کاسته ۱۰/۴ و دامنه پیچش ۲۶/۳۳ درجه با نسبت دامنه فرکانس کاسته ۱۰/۴ و دامنه پیچش ۲۶/۳۳ درجه با نسبت دامنه جابهجایی یکبرابر وتر و فاصله محوری یکسوم وتر از نوک حمله در سیال آب با رینولدز ۱۰/۰ مورد تحلیل قرار گرفته است. در نمودارهای ۲ و ۳ بهترتیب توزیع ضریب فشار روی ایرفویل در دو مرجع<sup>[6]</sup> مقایسه شده است. همان گونه که در این نمودارها مشاهده میشود، نتایج بهدستآمده تطابق نسبتاً خوب و قابل قبولی با نتایج عددی مرجع<sup>[6]</sup> دارد.



**نمودار ۲)** مقایسه توزیع ضریب فشار حول ایرفویل با نتایج عددی مرجع<sup>[6]</sup> در +/+t/T (بالا) و t/T=+/4 (پایین)





همان گونه که در نمودار ۴ مشاهده میشود، بهعلت بزرگبودن سلولها در شبکه درشت، ضریب نیروی x در برخی نقاط منفی شده که این نشاندهنده تغییر رژیم عملکردی فویل بهشکل غیرفیریکی است. در مورد دو شبکه دیگر، علاوه بر آن که رفتار ضریب نیروی x منطقی به نظر میرسد و رژیم عملکردی فویل در حالت دریافت توان باقی مانده است، نتایج دو شبکه متوسط و ریز بر هم منطبق بوده و اختلاف ناچیزی داشتهاند. از این رو برای تسریع فرآیند

محاسبات و کاهش هزینهها در تمامی شبیهسازیهای آتی از شبکه متوسط استفاده شده است.

با حصول اطمینان از صحت شبیهسازی عددی در ابتدای این بخش، برای بررسی صحت محاسبات و استقلال حل از شبکه در پیکربندی موازی، ضریب نیروی x بهعنوان پارامتری حساس و قابل تمایز در رژیمهای پیشرانش و دریافت انرژی انتخاب شده و برای هر ۳ شبکه (جدول ۱) در نمودار ۳ مورد مقایسه قرار گرفته است. مشخصات جریان و حرکت ایرفویل در این شبیهسازی، مشابه حالت قبل بوده و تنها مرز پایینی ایرفویل بهصورت مرز متقارن در نظر گرفته شده است.



**نمودار ۴)** مقایسه ضریب نیروی x برای شبکه درشت، متوسط و ریز بهمنظور بررسی استقلال حل از شبکه

## ۴ – نتایج

هدف از این تحقیق در گام نخست، بررسی اثر پیکربندی موازی متقارن روی عملکرد توربین بال نوسانکننده بوده و در مرحله بعدی، تعیین پارامترهای اصلی هندسی و حرکتی برای دستیابی به راندمان بهینه برای توربینهای بادی دوباله است. همان گونه که در بخش مقدمه توضیح داده شد، اغلب مطالعات مربوط به پیکربندی منفرد و مطالعات مرتبط با حالت دوتایی، متمرکز روی حالت سری یا موازی غیرمتقارن بوده است. ضمن آن که مطالعات انجامشده، بیشتر در ارتباط با سیال آب با رینولدزهای محدود صورت گرفته، لذا در این تحقیق سعی بر آن است تا با تمرکز روی جریان هوا با رینولدزهای متوسط (سرعتهای نزدیک به محتمل ترین سرعت باد)، پارامترهای هندسی و حرکتی بهینه توربین بادی دوباله استخراج شود.

نخست، حالت پیکربندی موازی مساله ارایهشده در بخش اعتبارسنجی با حالت ایرفویل تنها مورد مقایسه قرار گرفته است. در نمودار ۵، ضریب نیروهای x و y برای هر دو حالت ارایه شده است. همان گونه که مشاهده میشود، استفاده از پیکربندی موازی نسبت به حالت تکبال، مقدار ضریب نیروی x را در نیمه دوم دوره تناوب افزایش داده است که تاثیر چندانی بر راندمان سیستم ندارد. اما ضریب نیروی عمودی نیز همان طور که انتظار میرود، افزایش نمودار دیده میشود که چندان قابل توجه نیست. اما در نیمه دوم، افزایش ۱۰۰درصدی مقادیر اکسترمم نیروی عمودی نسبت به حالت تکبال مشهود است. افزایش مقادیر اکسترمم مودارها با پیکربندی موازی، نشان از ارتقای عملکردی ایرفویل نوسانکننده نسبت به حالت تکبال ساده است. اما پرامتر مهمتری که امکان

<u>م</u>هبیه ازی عدی و مطالعه پارامتری یک توربین بادی دوباله نوسان کننده ۱۱۲۱ جمع بندی نهایی را فراهم می نماید، مقدار راندمان دریافت انرژی است. مقدار راندمان بیشینه در این حالت ۳۸/۲۸% بوده که در مقایسه با بیشینه راندمان گزارش شده در مرجع<sup>[6]</sup> (راندمان ۳۴%)، ۴% افزایش راندمان را در پی داشته است. بنابراین می توان به راحتی نتیجه گیری نمود که استفاده از پیکربندی موازی می تواند افزایش راندمان کلی سیستم را به همراه داشته باشد.



**نمودار ۵)** مقایسه ضرایب نیروی x و y برای ایرفویل تنها با ایرفویل نوسانکننده دوباله

پس از اطمینان از تاثیرگذاری پیکربندی موازی لازم است تا پارامترهای بهینه برای این ترکیببندی نیز تعیین شود. برای این منظور، تمامی پارامترها بهجز فرکانس و دامنه پیچش، ثابت فرض می شوند. این پارامترهای ثابت، پیکرهبندی پایهای را تشکیل می دهند که شامل ایرفویل ناکا ۲۰۱۵، عدد رینولدز ۴۱۰۰۰ (با توجه به سرعت ۶متر بر ثانیه باد)، نسبت دامنه جابهجایی 1-7 (با توجه به پیچش 1/3 = 1/3 است. بر این اساس، ۳۴ اجرای متفاوت با فرکانس و دامنه پیچش مختلف از فضای پارامتری ( $f^*, \theta_0$ ) انتخاب و راندمان آنها در نمودار ۶ رسم شده است. بیشترین راندمان به دست آمده، ۳۱/۰۴% است. این راندمان در دامنههای پیچشی بالا حدود ۲۰ تا ۸۰درجه و در فرکانسهای کاسته ۲۰۱۴ تا

در نمودار ۵، خطوط زاویه حمله ثابت نیز بهصورت خطچین رسم شده است. در این نمودار میتوان مشاهده نمود که بیشترین راندمانها در زوایای حمله موثر ۳۵ تا ۴۰درجه رخ داده است. در چنین زوایای حمله بالایی، ریزش گردابههای ناشی از واماندگی دینامیک دور از انتظار نیست. اگر چه جدایش لایه مرزی در آیرودینامیک دایم، آثار نامطلوبی بر جای میگذارد، اما در مسایل آیرودینامیک غیردایم منجر به افزایش کارآیی سیستم میشود. *کینزی* و دوماس<sup>[6]</sup> نشان دادند که پدیده ریزش گردابههای نوک حمله (LEV) در اغلب شبیهسازیهای دارای راندمان بالا وجود Modares Mechanical Engineering

## ۱۱۲۲ حامد علیصادقی و همکاران ــ

داشته و زمانبندی درست ریزش این گردابهها در نیمه اول دوره تناوب، مکانیزمی موثر و کارا در ارتقای راندمان دریافت انرژی است. شبیهسازی انجامشده در تحقیق حاضر نیز این موضوع را برای حالت فویل موازی تایید مینماید. بهعنوان مثال در شکل ۶، ضرایب نیروی عمودی، سرعت جابهجایی، توان لحظهای و توان پیچشی لحظهای برای فرکانس و دامنه پیچش (۲۶/۳۳– $\theta$ 9: ۱۹/۰=f) نشان داده شده است. در این شکل، خطوط همتراز میدهند. لازم به ذکر است که راندمان حاصل از این سیستم حدود میدهند. لازم به ذکر است که راندمان حاصل از این سیستم حدود و دامنه پیچش کمتر (۶۰– $\theta$ 9: ۱/۰–f) و شکلگیری جریانی آرام، و دامنه پیچش کمتر (۶۰– $\theta$ 9: ۱/۰–f) و شکلگیری جریانی آرام، راندمانی متوسط حدود (۱۸۱% به دست آمده است. در حقیقت این تفاوت راندمان، ناشی از جدایش جریان از لبه حمله و ریزش



( $f^*$ , نقشه راندمان ۳۴ شبیه<br/>سازی صورت گرفته در فضای پارامتری ( $f^*$ , <br/>  $\theta_0$ )



**شکل ۶)** تغییرات ضریب توان کل و توان پیچشی، سرعت جابهجایی و ضریب نیروی عمودی با زمان (بالا) خطوط همتراز فشار و ورتیسیته در زمانهای t/T=۰/۲۵ و t/T=-۱/۴۵ (پایین) برای حالت (۲۶/۳۹–60؛ ۲/۱۴=۶/)



**شکل ۷)** تغییرات ضریب توان کل و توان پیچشی، سرعت جابهجایی و ضریب برآ با زمان (بالا) خطوط همتراز فشار و ورتیسیته در زمانهای ۲۵/۰۰= t/T و t/T=۰/۴۵ (پایین) برای حالت (۶۰–6<sub>0</sub>۶۰ ۸۱/۰۰)

با دقت در نمودارهای سرعت جابهجایی (Vy) و ضریب نیروی عمودی (Cy) میتوان مشاهده کرد که این دو پارامتر در شکل ۶ در اغلب موارد همعلامت هستند، در حالی که در شکل ۷ در بیش از ۲۵% مدتزمان دوره تناوبی، این دو پارامتر علامتهای متفاوتی دارند. لازم به ذکر است که تفاوت علامت این دو پارامتر منجر به منفیشدن نمودار ضریب توان لحظهای (رابطه ۱۷ را ببینید) و در نتیجه کاهش مقدار ضریب توان متوسط می شود.

نکته دیگری که در رابطه با شبیهسازیهای انجام شده حایز اهمیت بوده، این است که در فرکانسهای زیر ۱۶/۱۶، سهم ضریب توان ناشی از حرکت جابهجایی از توان کل دریافتی نسبت به توان پیچشی بسیار بیشتر است، بهگونهای که میتوان از حاصلضرب نیروی عمودی در سرعت جابهجایی خطی، تخمین قابل قبولی از توان کل دریافتی به دست آورد. بنابراین، برای افزایش میزان توان دریافتی باید علاوه بر افزایش ضریب نیروی عمودی و سرعت جابهجایی عمودی، علامت این دو پارامتر نیز هماهنگ باشند تا از تولید توان منفی جلوگیری شود. این هماهنگی از زمانبندی مناسب ریزش گردابههای نوک حمله ایرفویل به دست میآید. با توجه به ارتباط مستقیم سرعت جابهجایی خطی با  $\mathrm{H}_{0}$  و  $f^{*}$ ، افزایش فرکانس یا دامنه جابهجایی منجر به افزایش سرعت جابهجایی می شود. اما ضریب نیروی عمودی، ارتباط پیچیدهای با مقادیر بیشینه زاویه حمله موثر و بیشینه سرعت موثر دارد. از این رو با توجه به تعدد پارامترهای موثر بر راندمان سیستم، این پارامترها در سه دسته کلی پارامترهای حرکتی، هندسی و لزج تقسیمبندی شده و آثار هر یک بر راندمان مورد بررسی قرار گرفته است.

در ابتدا، دامنه جابهجایی یا انتقالی، دامنه پیچشی و فرکانس کاسته بهعنوان پارامترهای حرکتی مورد توجه قرار گرفته است.

ترکیب مناسب این پارامترها منجر به زاویه حمله و سرعت موثر بهینه در هر دوره تناوبی میشود. تغییر دامنه جابهجایی در فرکانس و زاویه پیچش ثابت، منجر به تغییر ابعاد پنجره جاروبشده توسط فویل و در نتیجه باعث تغییر توان قابل دریافت از سیال میشود. در جدول ۲، برای دو فرکانس و دامنه پیچش مشخص، تغییر راندمان و ضریب توان متوسط با تغییر دامنه جابهجایی ارایه شده است.

بر راندمان	$H_0/c$	پارامتر	تاثير	(۲	جدول
------------	---------	---------	-------	----	------

امنه جابهجایی	$(f^*=\cdot/14: \theta_0=18/14\%)$		$(f^*=\cdot/\lambda : \theta_0= r \cdot)$	
H <sub>0</sub> /c	- Ūp	$\eta\%$	Ēр	$\eta\%$
١	١/•٧	41/91	•/۴۶	19/44
۱/۵	1/22	30/FV	-•/٣Y	-9/89

همان گونه که مشاهده میشود، با افزایش دامنه جابهجایی، راندمان کاهش پیدا کرده، اما ضریب توان دریافتی افزایش یافته است. در این جدول، در دامنه جابهجایی با ۱/۵برابر طول وتر، فرکانس ۱/۱۸ و دامنه پیچش ۶۰درجه راندمان و ضریب توان، منفی شده است. علت منفیشدن این دو پارامتر، عبور از مرز حد بالزن و ورود به ناحیه تولید نیروی پیشران است.

کینزی و دوماس<sup>[6]</sup> برای ایرفویل تکبال نشان دادند که بیشینه زاویه حمله موثر، نسبت به دو پارامتر مستقل دامنه پیچشی ( $\theta_0$ ) و دامنه جابهجایی (H<sub>0</sub>) پارامتر تعیینکنندهتری است. همچنین نشان دادند که مشخصههای اصلی جریان مانند ریزش گردابههای لبه حمله و زمانبندی آن برای مسایلی که فرکانس و بیشینه زاویه حمله موثر یکسانی دارند، مشابه است. لذا در این تحقیق نیز برای اطمینان از صحت این موضوع در حالت دوباله موازی و انتخاب رویکردی مناسب برای بررسی تاثیر دامنه جابهجایی روی راندمان، در فرکانسی ثابت، برای دامنههای جابهجایی مختلف، دامنه پیچشی بهگونهای تغییر داده شد که زاویه حمله موثر ثابت باقی بماند. در نمودار ۲، تغییرات نیروی عمودی با دامنههای جابهجایی مختلف در فرکانس ۲۰۱۲ و زاویه حمله موثر ۳۲= $_{T/4}$  نشان داده شده است.



**نمودار ۲)** مقایسه نمودارهای ضریب نیروی عمودی برای دامنههای جابهجایی مختلف در (۲۳–π<sub>1</sub>/4=۲۳)

همان گونه که در این نمودار مشاهده میشود، علیرغم تفاوت دامنه پیچشی و جابهجایی، ضریب نیروی عمودی هر چهار مورد رفتار مشابهی داشته و زمانبندی ریزش گردابهها در آنها کاملاً مشابه بوده، بهگونهای که تغییر علامت ضریب نیروی عمودی برای تمامی موارد در فاصله ۴۰درصدی تا ۵۰درصدی دوره تناوبی اتفاق

Volume 19, Issue 5, May 2019

<u>مبیه سازی عدی و مطالعه پارامتری یک توربین بادی دوباله نوسان کنند ۱۱۲۳</u> افتاده است. بنابراین میتوان نتیجهگیری نمود که نتایج *کینزی* و دوماس<sup>[6]</sup> در حالت دوباله موازی نیز برقرار است. لازم به ذکر است که شباهت رفتار نیروی عمودی برای دامنه های جابه جایی مختلف، الزاماً بیانگر عملکرد یکسان آنها نیست. مقادیر ضریب متوسط توان دریافتی و راندمان برای این چهار حالت در جدول ۳ گزارش شده است.

**جدول ۳)** تاثیر پارامتر H<sub>0</sub>/c بر راندمان با فرکانس و بیشینه زاویه حمله یکسان

Ēр	$\eta\%$	H <sub>0</sub> /c	$\boldsymbol{\theta}_{0}$	<b>α</b> <sub>T/4</sub>	<b>f</b> *
۰/۳۶	Y0/NY	•/۵	kk	۲۳	٠/١٢
+/Y1	49/FX	١	۶.	۲۳	٠/١٢
1/11	۳۲/۸	۱/۵	Y1/۵	۲۳	٠/١٢
۱/۵	WF/YF	٢	V9/FQ	۲۳	•/1۲

همان گونه که در این جدول مشاهده میشود، مقادیر متوسط توانهای دریافتی متفاوت است. در فرکانس ثابت دامنه، سرعت نوسانی جابهجایی به دامنه جابهجایی وابسته بوده، لذا افزایش توان دریافتی بهدلیل افزایش سرعت جابهجایی خطی است. هر چند بهدلیل افزایش توان قابل استحصال (Pa) از جریان که ناشی از افزایش س (H (بهعلت بزرگترشدن پنجره جاروبشده) بوده، توان دریافتی نیز با افزایش س افزایش یافته، اما این افزایش بهگونهای است که در نهایت راندمان سیستم، تغییرات اندکی دارد. بنابراین میتوان گفت در فرکانسی ثابت با زوایه حمله موثر ثابت میتوان تا حدی بدون افت راندمان، میزان ضریب توان دریافتی را با افزایش دامنه جابهجایی (H) افزایش داد.

پس از بررسی پارامترهای حرکتی، نوبت به پارامتر هندسی میرسد. از پارامترهای هندسی میتوان به شکل یا ضخامت ایرفویل و مکان محور پیچش اشاره نمود. تحقیقات انجامشده توسط نگارندگان این مقاله نشان میدهد که تغییر ضخامت فویل، تاثیر قابل توجهی روی راندمان و حتی ضریب توان متوسط دریافتی ندارد. این نتایج در جدول ۴ برای سه ایرفویل ناکا ۲۰۰۰، ۵۱۰۰ و ۲۰۰۰ ارایه شده است.

جدول ۴) تاثیر ضخامت ایرفویل بر ضریب دریافت انرژی و راندمان

( <i>f</i> *=•/\\	$(f^*=+/1)$ * $:\theta_0=$ Y8/22)		۸ :θ <sub>0</sub> =۶۰)	ايرفويل
- Ĉ <sub>p</sub>	$\eta\%$	Ēр	$\eta\%$	NACA
1/•۴	۴•/۸۷	•/۴۵	18/84	••••٢
١/•٧	F1/9Y	•/۴۶	19/44	++10
1/+8	41/28	•/۴۶	19/44	••٢•

اما تغییر موقعیت مرکز پیچش در راستای وتر ایرفویل مستقیماً بر شتاب لحظهای سطح جسم تاثیر میگذارد و منجر به تغییر شار ورتیسیته در دیواره میشود. در این تحقیق، مرکز پیچش ایرفویل در سه موقعیت ۰۲/۵، ۳/۳۰ و ۵/۵ وتر مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸، خطوط همتراز ورتیسیته در لحظه 1=1/t برای هر سه حالت ارایه شده است. همان گونه که مشاهده میشود، در هر سه مواردی که محور چرخش به نوک حمله قابل مشاهده است، اما در ریزش گردابههای نوک حمله قابل مشاهده است، اما در ریزش گردابهها زودتر اتفاق میافتد. بهوضوح دیده می شود که زمانبندی ریزش گردابهها بهطور عمده بر هماهنگی نیروی عمودی با سرعت جابهجایی عمودی تاثیرگذار است. در نمودار ۸، ضریب نیروی عمودی برای هر سه حالت در کنار سرعت جابهجایی نشان داده شده است. همان گونه که در این نمودار مشاهده میشود، مکان محور پیچش در هر دو حالت ۵/۰ و ۲/۵۰ ناهماهنگی زیادی مکان محور پیچش در هر دو حالت ۵/۰ و ۲/۵۰ ناهماهنگی زیادی

#### ۱۱۲۴ حامد علیصادقی و همکاران ـ

ناهماهنگی در حالت ۰/۵ در ابتدای سیکل و در حالت ۰/۲۵ در وسط سیکل اتفاق افتاده است. اما در مورد محور پیچش در ۱/۳۳ وتر هماهنگی بسیار خوبی بین این دو پارامتر مشاهده میشود. همان گونه که مشاهده میشود، تغییر مکان محور پیچش، تاثیر عمیقی نیز بر دامنه تغییر نیرو دارد، بهگونهای که در حالت نزدیکتر به لبه حمله ایرفویل، اکسترمم ضریب نیرو افزایش و با دورشدن از لبه حمله اکسترمم نیرو کاهش یافته است. در جدول ۵ برای مکانهای محور پیچش مختلف، راندمان و ضریب توان متوسط ارایه شده است. همان گونه که در این جدول مشاهده میشود، در حالت ٠/٢٥ افزايش اكسترمم نيرو، خود باعث افزايش توان دریافتی از سیستم شده، هر چند عدم هماهنگی ضریب نیرو و سرعت عمودی در وسط سیکل تا حدی این افزایش را تحت تاثیر قرار داده است. طول ینجره جاروبشده توسط ایرفویل با تغییر محل پیچش، اندکی تغییر داشته که در محاسبه راندمان لحاظ شده و این امر باعث شده است تا علی رغم افزایش ضریب متوسط، توان راندمان تغییر چندانی نداشته باشد.

پس از بررسی پارامترهای حرکتی و هندسی، آخرین پارامتر موثر بر سیستم یعنی پارامتر لزجت مورد بررسی قرار میگیرد. برای این منظور، راندمان سیستم در سه عدد رینولدز ۵۰۰، ۴۱۰۰ و ۵۰۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته و در جدول ۶ نتایج مربوط به این بررسی ارایه شده است. همان گونه که مشاهده میشود، افزایش عدد رینولدز، افزایش ضریب توان متوسط و متعاقباً راندمان سیستم را در پی داشته است. این امر با توجه به کاهش اثرات لزجت، کوچکشدن لایه مرزی و افزایش اکسترمم نیروی عمودی و در نتیجه توان دریافتی قابل توجیه است.



**شکل ۸)** مقایسه ورتیسیته در مکانهای مختلف محور پیچش برای حالت (f<sup>\*</sup>=+/۱۴ =۰/۱۶)



**نمودار ۸)** مقایسه ضرایب نیروی عمودی در مکانهای مختلف محور پیچش برای حالت (۲۶/۳۳⊕9: ۲/۱۴=*6*)

**جدول ۵)** تاثیر مکان محور پیچش بر ضریب دریافت انرژی و راندمان

(f <sup>*</sup> =•/\۴ :θ₀=Y۶/٣٣)		(f*=•/\λ :θ₀=۶•)		مکان محور پیچش
$ar{C}_{p}$	$\eta\%$	Ēр	$\eta\%$	x <sub>p</sub> /c
1/11	44/04	۰/۳۸	10/38	۰/۲۵
١/•٧	F1/9V	•/149	19/44	۰/۳۳
•/9٢	٣٩/٢	•/۴۴	19/81	۰/۵

، مکانیک مدرس	مهندسى	– پژوهشی	علمى	باهنامه
---------------	--------	----------	------	---------

	<b>جدول ۶)</b> تاثیر عدد رینولدز بر ضریب دریافت انرژی و راندمان					
$(f^*=*/14:\theta_0=12/200)$			(f* <b>=</b> •/\	λ :θ <sub>0</sub> =۶•)	عدد رينولدز	
	- Ūp	$\eta\%$	Ēр	$\eta\%$	Re	
	+/٩٣	347/KV	•/۲٧	11/19	۵	
	١/•٧	K1/11	•/48	19/44	41	
	1/18	40/0	+/۵۱	41/22	۵	

## ۵- نتیجهگیری

در این تحقیق، مطالعهای پارامتریک روی ایرفویل نوسانی با حرکت انتقالی و پیچشی همزمان در جریان تراکمنایذیر آرام صورت گرفت. این تحقیق روی ایرفویل دوتایی موازی با حرکت متقارن انجام شد تا تاثیر حرکت موازی دو ایرفویل در راندمان کلی سیستم مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از این پیکربندی در رینولدز ۱۱۰۰ و جریان آب حداقل ۴% و در رینولدز ۴۱۰۰۰ و جریان هوا تا ۷% راندمان سیستم را نسبت به حالت تکباله افزایش میدهد. مطالعه یارامتری انجامشده، دستیابی به راندمانهای بالاتر از ۴۹% را نیز نشان میدهد. این راندمان در فرکانس کاسته حدود ۱/۱۴ و دامنه یپچشی بین ۷۰ تا ۸۰درجه به دست میآید. مطالعه پارامتری حاضر نشان داد که پارامترهای حرکتی همچون فرکانس، بیشینه زاویه حمله موثر و دامنه جابهجایی، نقش موثرتری بر عملکرد ایرفویل دارند. در مقابل، پارامترهای هندسی مانند ضخامت ایرفویل و مکان محور پیچش، تاثیر کمتری بر راندمان نهایی سیستم دارند. بررسی پارامترهای لزجت نیز نشان میدهد که افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش راندمان سیستم و ضریب متوسط دریافت انرژی می شود.

> **تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است. **تاییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است. **تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: حامد علیصادقی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (٤٥%)؛ حسین صفیپور (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (٤٠%)؛ حجت رضاییفرد (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (١٥%) **منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

### منابع

1- McKinney W, DeLaurier J. Wingmill: An oscillatingwing windmill. Journal of Energy. 1981;5(2):109-115.

2- Kinsey T, Dumas G. Testing and analysis of an oscillating hydrofoils turbine concept. ASME 3<sup>rd</sup> Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting collocated with 8<sup>th</sup> International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 1-5 August, 2010, Montreal, Quebec, Canada. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2010.

3- Kinsey T, Dumas G, Lalande G, Ruel J, Mehut A, Viarouge P, et al. Prototype testing of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils. Renewable Energy. 2011;36(6):1710-1718.

4- Xiao Q, Zhu Q. A review on flow energy harvesters based on flapping foils. Journal of Fluids and Structures. 2014;46:174-191.

5- Peng Z, Zhu Q. Energy harvesting through flowinduced oscillations of a foil. Physics of Fluids. 2009;21(12):123602.

6- Kinsey T, Dumas G. Parametric study of an oscillating airfoil in a power-extraction regime. AIAA Journal. 2008;46(6):1318-1330.

ــ شبیهسازی عددی و مطالعه پارامتری یک توربین بادی دوباله نوسانکننده ۱۱۲۵

of a flapping foil. Journal of Fluid Mechanics. 2011;675:495-517.

17- Simpson BJ. Experimental studies of flapping foils for energy extraction [Dissertation]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology; 2009.

18- Belyayev VV, Zuyev GV. Hydrodynamic hypothesis of school in fishes. Problems of Ichthyology. 1969;9:578-584.

19- Zhu Q, Wolfgang MJ, Yue DKP, Triantafyllou MS. Three-dimensional flow structures and vorticity control in fish-like swimming. Journal of Fluid Mechanics. 2002;468:1-28.

20- Deng J, Shao XM, Yu ZS. Hydrodynamic studies on two traveling wavy foils in tandem arrangement. Physics of Fluids. 2007;19(11):113104.

21- Aziz H, Mukherjee R. Vortex interaction and roll-up in unsteady flow past tandem airfoils. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2016;9(6):3087-3100.

22- Pourmostafa M, Ghadimi P. Investigating the interaction of two oscillating foils in tandem arrangement, using 3D unsteady boundary element method. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2018;40:412.

23- Ashraf MA, Young J, Lai JCS, Platzer MF. Numerical analysis of an oscillating-wing wind and hydropower generator. AIAA Journal. 2011;49(7):1374-1386.

24- Liu W, Xiao Q, Cheng F. A bio-inspired study on tidal energy extraction with flexible flapping wings. Bioinspiration and biomimetics. 2013;8(3):036011.

25- Wu J, Shu C, Zhao N, Yan W. Fluid dynamics of flapping insect wing in ground effect. Journal of Bionic Engineering. 2014;11(1):52-60.

7- Dumas G, Kinsey T. Eulerian simulations of oscillating airfoils in power extraction regime. WIT Transactions on Engineering Science. 2006;52:245-254.

8- Kinsey T, Dumas G. Computational fluid dynamics analysis of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils. Journal of Fluids Engineering. 2012;134(2):021104.

9- Kinsey T, Dumas G. Three-dimensional effects on an oscillating-foil hydrokinetic turbine. Journal of Fluids Engineering. 2012;134(7):071105.

10- Kinsey T, Dumas G. Optimal operating parameters for an oscillating foil turbine at Reynolds number 500,000. AIAA Journal. 2014;52(9):1885-1895.

11- Lefrançois J. Optimizing the efficiency of a multi-wing turbine using a Lagrangian vortex particle method [Dissertation]. Quebec: Laval University; 2008. [French]

12- Kinsey T, Dumas G. Optimal tandem configuration for oscillating-foils hydrokinetic turbine. Journal of Fluids Engineering. 2012;134(3):031103.

13- Kim J, Quang Le T, Ko JH, Sitorus PE, Tambunan IH, Kang T. Experimental and numerical study of a dual configuration for a flapping tidal current generator. Bioinspiration Biomimetics. 2015;10(4):046015.

14- Jones KD, Lindsey K, Platzer MF. An investigation of the fluid-structure interaction in an oscillating-wing micro-hydropower generator. In: Chakrabarti SK, Brebbia CA, Almorza D, Gonzalez-Palma R, editors. Fluid structure interaction. Southampton: WIT Press; 2003.

15- Zhu Q, Peng Z. Mode coupling and flow energy harvesting by a flapping foil. Physics of Fluids. 2009;21(3):033601.

16- Zhu Q. Optimal frequency for flow energy harvesting