



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

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Alisadeghi H.\*<sup>1</sup> 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.

<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

### 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

## شبیه‌سازی عددی و مطالعه پارامتری یک توربین بادی دوباله نوسان‌کننده

حامد علیصادقی \* 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

### چکیده

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 دو بُعدی 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 با 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 ۰۰۱۵ 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 برخوردارند. 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 توجه 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

\* نویسنده 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 [1]. 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 نوسان‌کننده می‌توان به ساختار هندسی ساده این توربین‌ها 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 [2]. 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 روبرو بوده و پیوسته در حال توسعه بوده‌اند [3]. این تحقیقات در

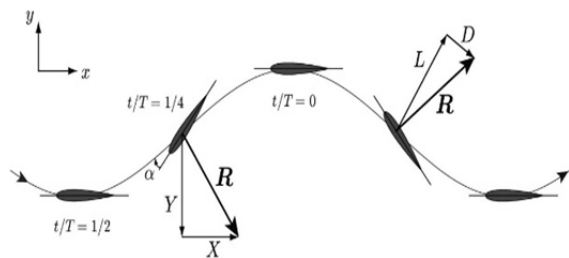
زمینه‌ها و با رویکردهای متفاوتی ادامه یافته است. در این ارتباط می‌توان به دو رویکرد تولید یا دریافت توان از جریان آب یا هوا و ایجاد نیروی پیشران با استفاده از مکانیزم بال‌زن به‌عنوان اصلی‌ترین رویکردهای مورد مطالعه اشاره نمود. در زمینه تولید توان بسته به نوع و مکانیزم حرکتی فویل نوسان‌کننده نیز حالت‌های 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 [4]. 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)، اطلاعات مفید زیادی را فراهم می‌نماید [5]، لذا در اغلب مطالعات انجام‌شده [4] و همچنین تحقیق حاضر، تمرکز روی حالت نخست است.

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 لزج را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این زمینه می‌توان به کارهای گسترده انجام‌شده در دانشگاه لاول توسط کینزی و همکاران اشاره نمود [6-10]. 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 [6, 7, 11] و رینولدزهای بالا [10] و اغلب به‌صورت دو بُعدی و در مواردی نیز به‌صورت سه بُعدی [9] انجام گرفته است. بررسی عددی انجام‌شده توسط کینزی و دوماس [9] در حالت سه بُعدی در نسبت‌های منطقی مختلف حاکی از آن است که رفتار کلی نیروها و ممان‌ها با حالت دو بُعدی مشابهت داشته، اما مقدار آن ۱۵٪ کمتر از حالت دو بُعدی 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 [2, 3, 8].

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

## 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 تولید نیروی پیشران را ایجاد نمود. در شکل ۱، حرکت فویل و نیروهای وارد به آن در حالت تولید توان نشان داده شده است. در این شکل نیروی برآیند آیرودینامیک (R) متشکل از نیروی برآ و پسا در سمت راست تصویر و تجزیه این نیرو به مولفه‌های X و Y در سمت چپ تصویر نشان داده شده است. در حالت تولید توان، مولفه عمودی نیروی برآیند آیرودینامیک در راستا و هم‌جهت با مسیر جابه‌جایی 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، به منظور ساده‌سازی فرآیند طراحی ایرفویل‌های بال‌زن در رژیم تولید توان، ترکیب حرکت انتقالی- پیچشی فویل به صورت 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  $x_p$  از لبه حمله واقع شده است، به شکل زیر توصیف می‌شود:

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\gamma t) \quad (1)$$

$$y(t) = H_0 \sin(\gamma t + \varphi) \quad (2)$$

مشق زمانی معادلات حرکتی فوق به ترتیب سرعت‌های نوسانی پیچشی و انتقالی را نشان می‌دهند.

$$\Omega(t) = \theta_0 \gamma \cos(\gamma t) \quad (3)$$

$$V_y(t) = H_0 \gamma \cos(\gamma t + \varphi) \quad (4)$$

در روابط فوق،  $\theta_0$  و  $H_0$  به ترتیب دامنه‌های پیچشی و انتقالی،  $\gamma$  فرکانس زاویه‌ای و  $\varphi$  اختلاف فاز بین پیچش و انتقال است.

بر اساس تحقیقات انجام شده، بهترین میزان اختلاف فاز برابر با ۹۰ درجه 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 کمی‌سازی اثر ترکیبی حرکت پیچشی و نوسانی است. این زاویه با توجه به شکل ۲<sup>[10]</sup> به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha(t) = \alpha_\gamma(t) - \theta(t) \quad (5)$$

که در رابطه فوق،  $\alpha_\gamma$  زاویه حمله القایی ناشی از حرکت نوسانی انتقالی است و مقدار آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

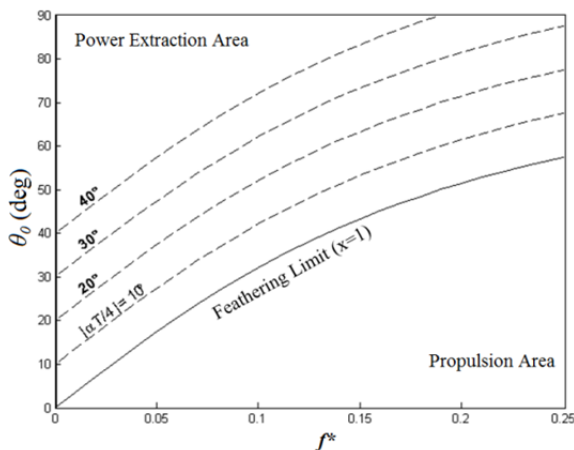
$$\alpha(t) = \arctan(-V_y(t)/U_\infty) - \theta(t) \quad (6)$$

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

مرور مقالات مرتبط با فویل‌های نوسان‌کننده نشان می‌دهد که علاوه بر تحقیقات انجام شده 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<sup>[4]</sup>. این ایده در ابتدا بر اساس 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 پارامترهای طراحی اضافه شد<sup>[4]</sup>. مطالعات عددی و تجربی نشان می‌دهد که استفاده از دو فویل پشت سر هم (سری) می‌تواند ظرفیت دریافت انرژی را افزایش دهد<sup>[14, 21, 22]</sup>. تحقیقات عددی مفصلی نیز توسط /شرف و همکاران روی دو فویل ناکا ۰۰۱۴ به صورت 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. /فرانکو<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 انجام شده 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 به صورت هماهنگ انجام می‌گیرد. در مطالعه /لیو و همکاران<sup>[24]</sup> نیز افزایش راندمان ترکیب موازی قرینه دیده می‌شود، 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<sup>[25]</sup>، توقع می‌رود که راندمان این سیستم نسبت به سایر سیستم‌های موازی بیشتر باشد. در این تحقیق سعی بر آن است تا راندمان سیستم در حالت تنها با حالت موازی، مقایسه و پارامترهای 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 کینری 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 ارائه شده در مرجع<sup>[9]</sup> و تشابه نیروها و ممان‌ها در حالت دو بُعدی و سه بُعدی و افت راندمان کمتر از ۱۰٪ برای بال‌هایی با نسبت‌های منطقی بالاتر از ۱۰، با توجه به تعدد اجزای کامپیوتری و حجم محاسبات بالا در حالت شبکه متحرک، در این تحقیق به جای محاسبات سه بُعدی از

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 بالایی محدوده و رژیم پیش‌رانش در قسمت پایین مشخص شده است. در نمودار ۱ به خوبی می‌توان مشاهده نمود که در یک فرکانس کاهش یافته مشخص، رژیم جریان یا به عبارتی، حالت تولید توان یا پیش‌رانش ایرفویل نوسانی را می‌توان به سادگی با تغییر دامنه پیچش عوض نمود. در نمودار ۱، همچنین خطوط زاویه حمله ثابت که به طور موازی با حد بال‌زن رسم شده‌اند، نشان داده شده است. اگر چه زوایای حمله موثر به بزرگی ۴۰ درجه در آیرودینامیک دایم بی‌معنی به نظر می‌رسد، اما در آیرودینامیک غیردایم به علت 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 [10]:

$$P(t) = Y(t)V_y(t) + M(t)\Omega(t) \quad (12)$$

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

ضریب توان لحظه‌ای کل در حالت دو بُعدی به شکل زیر تعریف می‌شود [10]:

$$C_p = P / \left( \frac{1}{2} \rho U_\infty^3 c \right) \quad (14)$$

$$C_p(t) = \frac{2}{\rho U_\infty^3 c} [Y(t)V_y(t) + M(t)\Omega(t)] \quad (15)$$

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

$$C_p(t) = C_{p_y}(t) + C_{p_\theta}(t) \quad (16)$$

$$C_p(t) = \frac{1}{U_\infty} [C_y(t)V_y(t) + C_M(t)\Omega(t)] \quad (17)$$

که  $C_y(t)$  ضریب برای لحظه‌ای و  $C_M(t)$  ضریب گشتاور پیچشی لحظه‌ای است که به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$C_y(t) = Y(t) / \left( \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c \right) \quad (18)$$

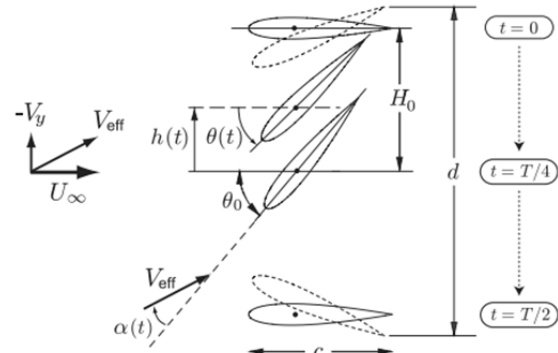
$$C_M(t) = M(t) / \left( \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c \right) \quad (19)$$

ضریب توان متوسط زمانی ( $\bar{C}_p$ ) در طول یک چرخه با انتگرال‌گیری از  $C_p(t)$  لحظه‌ای در یک چرخه به صورت زیر به دست می‌آید:

مطابق با شکل ۲، سرعت معادل نیز به شکل رابطه ۷ تعریف می‌شود.

$$V_{eff}(t) = \sqrt{U_\infty^2 + V_y^2(t)} \quad (7)$$

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 جاروب شده توسط آن [10]

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 یک چهارم دوره تناوب آن به وقوع می‌پیوندد و به شکل زیر تخمین زده می‌شود:

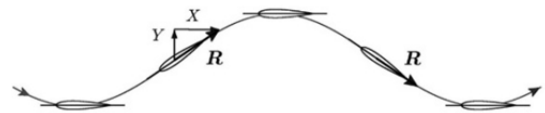
$$\alpha_{max} \approx |\alpha_{T/4}| \quad (8)$$

$$|\alpha_{T/4}| = |\arctan(\gamma H_0 / U_\infty) - \theta_0| \quad (9)$$

فرکانس کاسته  $f^*$  نیز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$f^* = \frac{fc}{U_\infty} \quad (10)$$

در رابطه ۹، به علت وجود ترم غیرسینوسی، زاویه حمله دقیقاً صفر نمی‌شود، اما در بیشینه سرعت انتقالی با تخمین قابل قبولی می‌توان زاویه حمله را صفر در نظر گرفت. در این حالت خاص که در شکل ۳ [6] نشان داده شده است، نیروی برآیند  $R$  مماس و مخالف با حرکت ایرفویل است و به این حالت، حالت بال‌زن گفته می‌شود. مفهوم مورد اشاره، منتج به تعریف حد بال‌زن می‌شود [9].

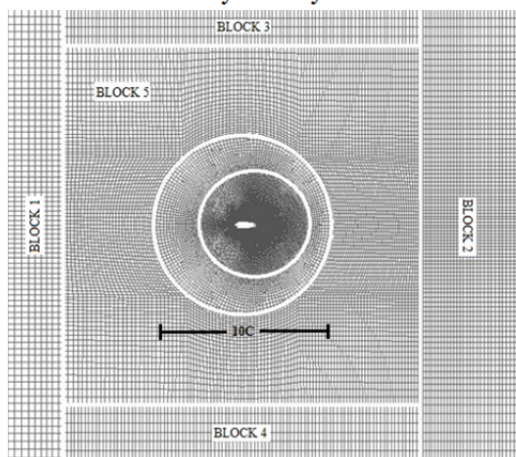
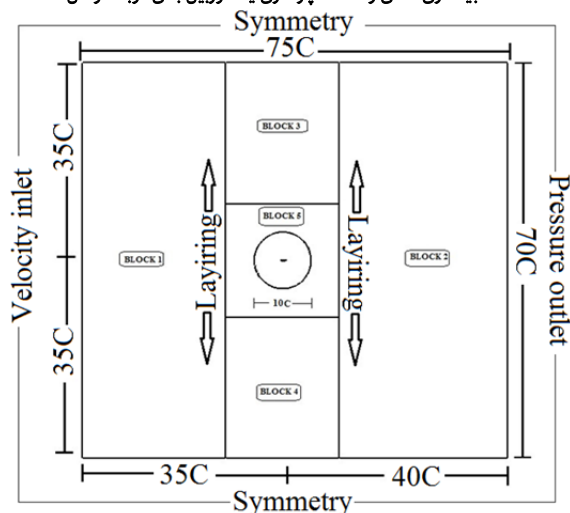


شکل ۳) نیروی برآیند آیرودینامیک در حالت بال‌زن [6]

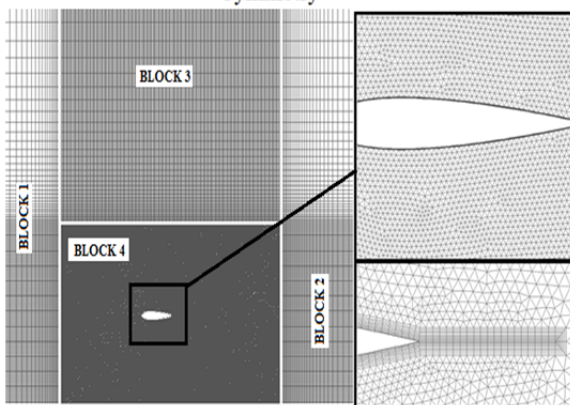
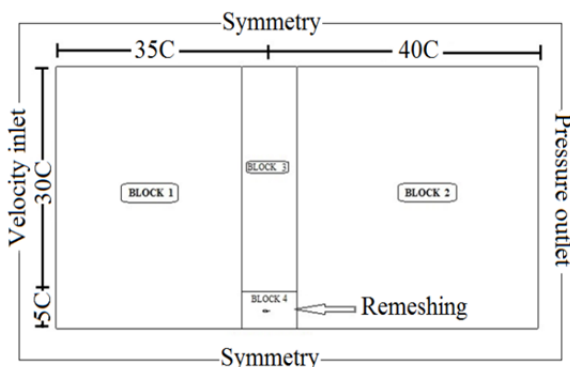
در حقیقت، این معیار برای تخمین مقادیر حدی دامنه پیچش  $\theta_0$  برای تولید رژیم‌های مختلف تولید توان یا پیش‌رانش، در ترکیب با دامنه تقلائی  $H_0$  و فرکانس کاسته  $f^*$  مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$x = \frac{\theta_0}{\tan^{-1}(H_0 \gamma / U_\infty)} \quad (11)$$

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



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

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T} \int_0^T C_p(t) dt = \bar{P} / \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 c \quad (20)$$

یا به عبارتی دیگر به طریق زیر:

$$\bar{C}_p = \bar{C}_{p_y} + \bar{C}_{p_{\theta}} \quad (21)$$

$$\bar{C}_p = \frac{1}{U_{\infty} T} \int_0^T [C_y(t) V_y(t) + C_M(t) \Omega(t)] dt \quad (22)$$

راندمان تولید توان معمولاً به صورت نسبت توان متوسط خروجی به توان قابل استحصال جریان عبوری از مساحت جاروب شده توسط فویل تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{\bar{P}}{P_a} \quad (23)$$

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

$$P_a = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 d \quad (24)$$

$$\eta = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 d} = \bar{C}_p \frac{c}{d} \quad (25)$$

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

### ۳- شبیه‌سازی عددی

#### ۳-۱- 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 صورت گرفته است. حرکت اجباری فویل در میدان حل و استخراج پارامترهای مورد نیاز نیز با توسعه تابعی داخلی یا UDF در محیط FLUENT امکان‌پذیر 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 به ترتیب 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 مدل‌سازی شده و تعداد سلول‌های این شبکه برابر با ۷۸۳۶۳ سلول است.

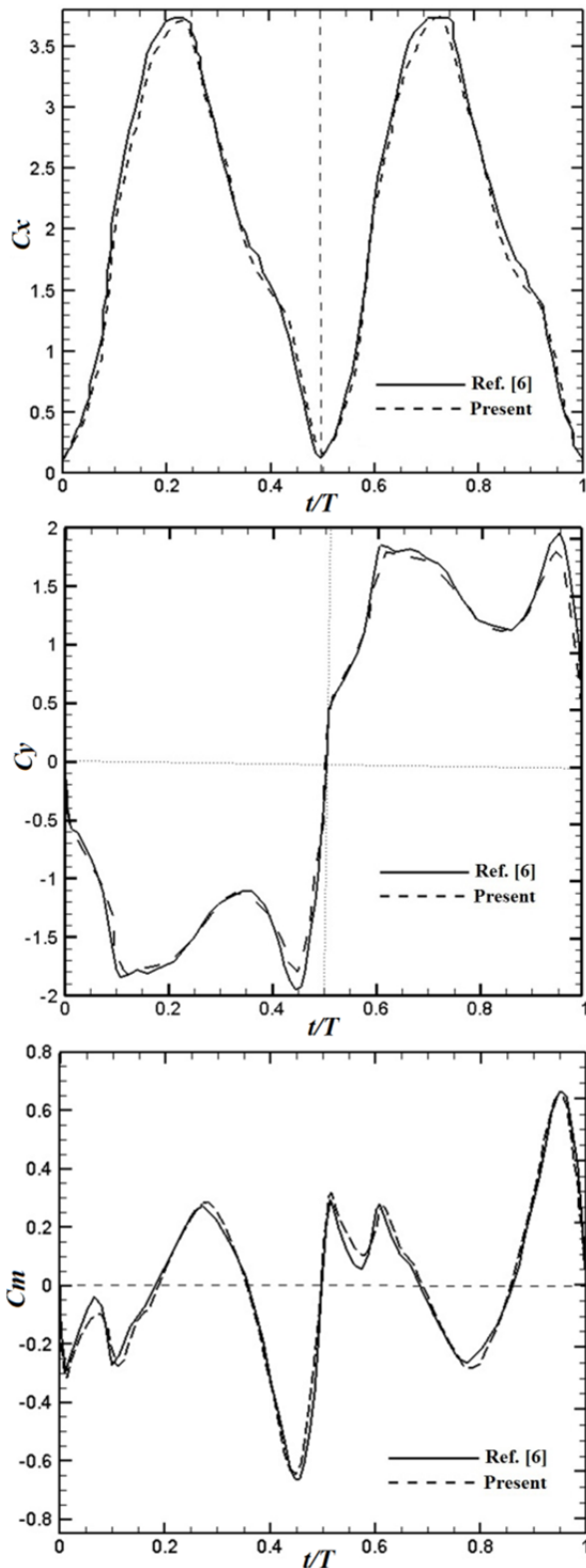
در پیکربندی موازی با توجه به تقارن مساله، به جای شبیه‌سازی هر دو فویل تنها یک فویل در نظر گرفته شده و از شرط مرزی تقارن استفاده شده است. در این حالت، استفاده از استراتژی به‌کاررفته در شبکه اعتبارسنجی امکان‌پذیر نیست، چرا که نزدیکی ایرفویل به مرز تقارن، اجازه حرکت لایه‌ای شبکه را نمی‌دهد. همان گونه که 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. به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، ۳ شبکه متفاوت ارائه شده و تعداد سلول‌های این ۳ شبکه در جدول ۱ ارائه شده است.



تعداد سلول‌ها	شبکه محاسباتی
۸۶۴۷۹	درشت
۲۷۰۱۶۰	متوسط
۱۱۲۱۰۴۵	ریز

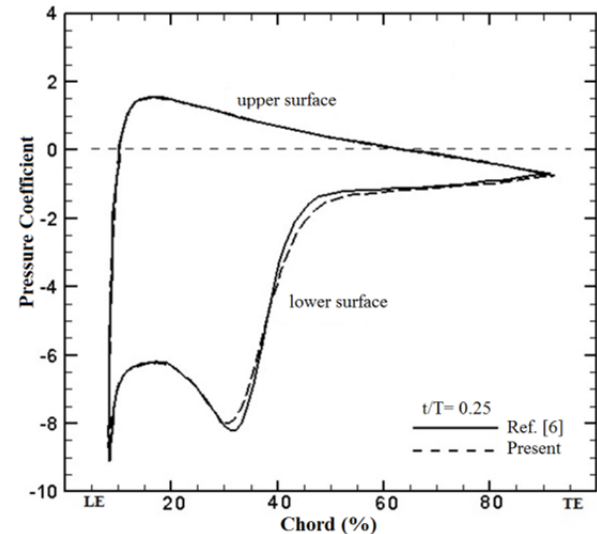
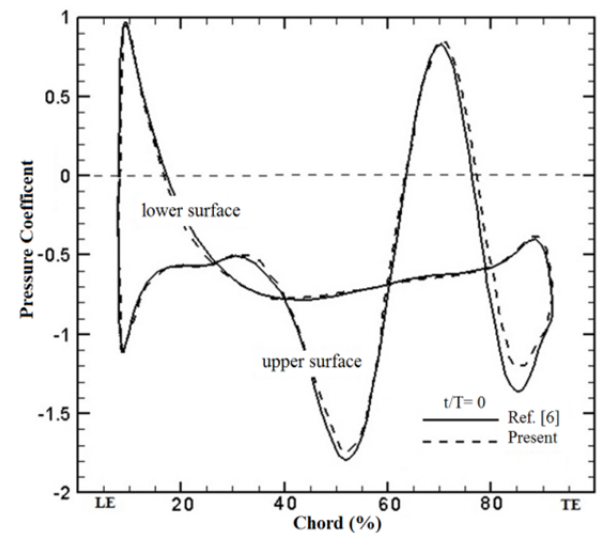
### ۳-۳- اعتبارسنجی

با توجه به این که اغلب مطالعات تجربی در رابطه با فویل‌های نوسان‌کننده در شرایط واقعی و غیرآزمایشگاهی صورت گرفته است [2, 3]، امکان استفاده از این داده‌ها برای اعتبارسنجی محاسبات وجود ندارد. لذا در این بخش، از نتایج عددی ارایه شده در مرجع [6] استفاده شده است. برای این منظور، ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ با فرکانس کاسته ۰/۱۴ و دامنه پیش ۷۶/۳۳ درجه با نسبت دامنه جابه‌جایی یک‌برابر وتر و فاصله محوری یک‌سوم وتر از نوک حمله در سیال آب با رینولدز ۱۱۰۰ مورد تحلیل قرار گرفته است. در نمودارهای ۲ و ۳ به ترتیب توزیع ضریب فشار روی ایرفویل در دو موقعیت زمانی متفاوت و ضرایب نیرو و گشتاور با نتایج عددی مرجع [6] مقایسه شده است. همان گونه که در این نمودارها مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده تطابق نسبتاً خوب و قابل قبولی با نتایج عددی مرجع [6] دارد.



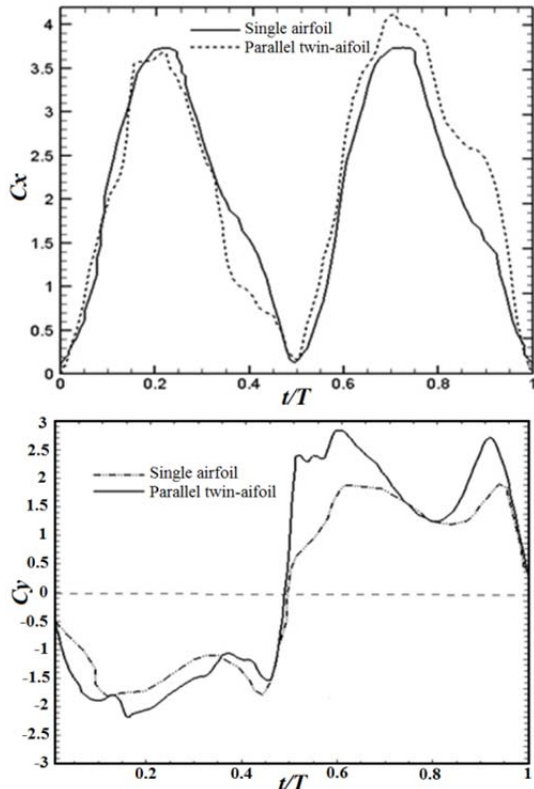
نمودار ۳) مقایسه ضریب نیرو و گشتاور برحسب زمان با نتایج عددی [6]

همان گونه که در نمودار ۴ مشاهده می‌شود، به علت بزرگ بودن سلول‌ها در شبکه درشت، ضریب نیروی X در برخی نقاط منفی شده که این نشان‌دهنده تغییر رژیم عملکردی فویل به شکل 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



نمودار ۲) مقایسه توزیع ضریب فشار حول ایرفویل با نتایج عددی مرجع [6] در  $t/T=0/۰۲۵$  (بالا) و  $t/T=۰/۲۵$  (پایین)

جمع‌بندی نهایی را فراهم می‌نماید، مقدار راندمان دریافت انرژی است. مقدار راندمان بیشینه در این حالت ۳۸/۲۸٪ بوده که در مقایسه با بیشینه راندمان گزارش شده در مرجع [۶] (راندمان ۳۴٪)، ۴٪ افزایش راندمان را در پی داشته است. بنابراین می‌توان به راحتی نتیجه‌گیری نمود که استفاده از پیکربندی موازی می‌تواند افزایش راندمان کلی سیستم را به همراه داشته باشد.

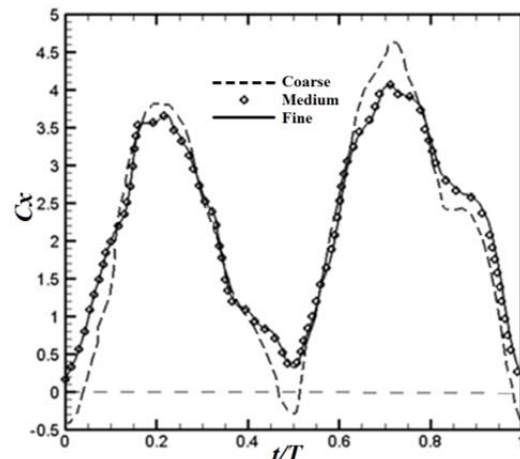


نمودار ۵) مقایسه ضرایب نیروی X و Y برای ایرفویل تنها با ایرفویل نوسان‌کننده دوباله

پس از اطمینان از تاثیرگذاری پیکربندی موازی لازم است تا پارامترهای بهینه برای این ترکیب‌بندی نیز تعیین شود. برای این منظور، تمامی پارامترها به جز فرکانس و دامنه پیچش، ثابت فرض می‌شوند. این پارامترهای ثابت، پیکره‌بندی پایه‌ای را تشکیل می‌دهند که شامل ایرفویل ناکا ۰۰۱۵، عدد رینولدز ۴۱۰۰۰ (با توجه به سرعت ۶ متر بر ثانیه باد)، نسبت دامنه جابه‌جایی  $H_0/C=1$  و محور پیچش  $x_p=1/3$  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، ۴۹/۱۳٪ است. این راندمان در دامنه‌های پیچشی بالا حدود ۷۰ تا ۸۰ درجه و در فرکانس‌های کاسته ۰/۱۴ تا ۰/۱۸ به دست آمده است.

در نمودار ۵، خطوط زاویه حمله ثابت نیز به صورت خط‌چین رسم شده است. در این نمودار می‌توان مشاهده نمود که بیشترین راندمان‌ها در زوایای حمله موثر ۳۵ تا ۴۰ درجه 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 کارایی سیستم می‌شود. کینزی و دوماس [۶] نشان دادند که پدیده ریزش گردابه‌های نوک حمله (LEV) در اغلب شبیه‌سازی‌های دارای راندمان بالا وجود

محاسبات و کاهش هزینه‌ها در تمامی شبیه‌سازی‌های آبی 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 به عنوان پارامتری حساس و قابل تمایز در رژیم‌های پیش‌رانس 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 به صورت مرز متقارن در نظر گرفته شده است.

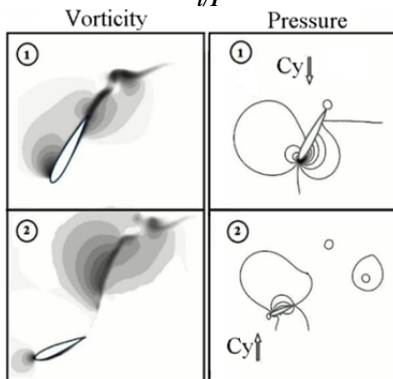
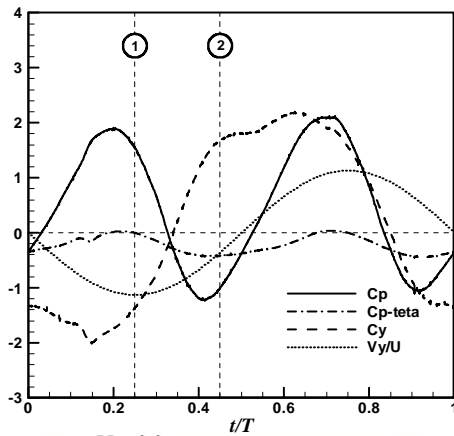


نمودار ۴) مقایسه ضریب نیروی X برای شبکه درشت، متوسط و ریز به منظور بررسی استقلال حل از شبکه

#### 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 انجام شده، 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 محتمل‌ترین سرعت باد)، پارامترهای هندسی و حرکتی بهینه توربین بادی دوباله استخراج شود.

نخست، حالت پیکربندی موازی مساله ارایه شده 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 یافته است. در نیمه دوره اول، افزایش اندکی در مقدار اکسترمم نمودار دیده می‌شود که چندان قابل توجه نیست. اما در نیمه دوم، افزایش ۱۰۰ درصدی مقادیر اکسترمم نیروی عمودی نسبت به حالت تک‌بال مشهود است. افزایش مقادیر اکسترمم نمودارها با پیکربندی موازی، نشان از ارتقای عملکردی ایرفویل نوسان‌کننده نسبت به حالت تک‌بال ساده است. اما پارامتر مهم‌تری که امکان



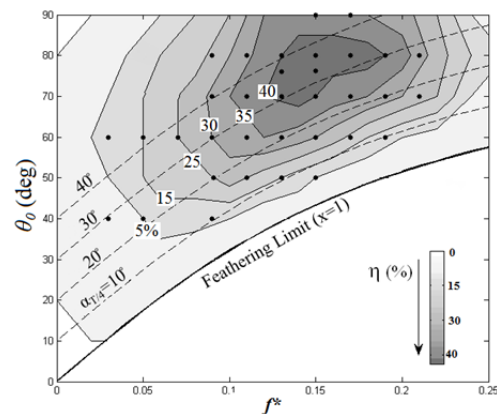
شکل ۷ تغییرات ضریب توان کل و توان پیچشی، سرعت جابه‌جایی و ضریب برآ با زمان (بالا) خطوط همتراز فشار و ورتیسیتیته در زمان‌های  $t/T=0.25$  و  $t/T=0.45$  (پایین) برای حالت  $(f^*=0.18; \theta_0=60)$

با دقت در نمودارهای سرعت جابه‌جایی ( $V_y$ ) و ضریب نیروی عمودی ( $C_y$ ) 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٪ مدت زمان دوره تناوبی، این دو پارامتر علامت‌های متفاوتی دارند. لازم به ذکر است که تفاوت علامت این دو پارامتر منجر به منفی شدن نمودار ضریب توان لحظه‌ای (رابطه ۱۷ را ببینید) و در نتیجه کاهش مقدار ضریب توان متوسط می‌شود.

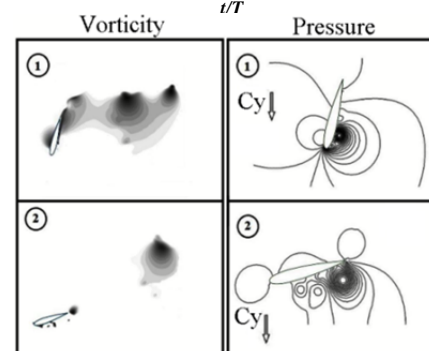
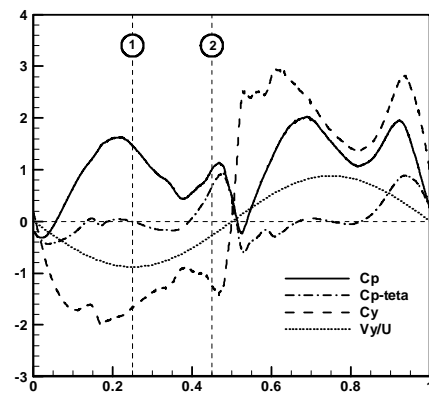
نکته دیگری که در رابطه با شبیه‌سازی‌های انجام شده حایز اهمیت بوده، این است که در فرکانس‌های زیر  $0.16$ ، سهم ضریب توان ناشی از حرکت جابه‌جایی از توان کل دریافتی نسبت به توان پیچشی بسیار بیشتر است، به گونه‌ای که می‌توان از حاصلضرب نیروی عمودی در سرعت جابه‌جایی خطی، تخمین قابل قبولی از توان کل دریافتی 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  $H_0$  و  $f^*$ ، افزایش فرکانس یا دامنه جابه‌جایی منجر به افزایش سرعت جابه‌جایی می‌شود. 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.

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  $(\theta_0=76/33; f^*=0.14)$  نشان داده شده است. در این شکل، خطوط همتراز ورتیسیتی و فشار، وقوع پدیده ریزش گردابه‌ها را به‌خوبی نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که راندمان حاصل از این سیستم حدود ۴۲٪ به دست آمده، در حالی که در شکل ۷، علی‌رغم فرکانس بالاتر و دامنه پیچش کمتر  $(f^*=0.18; \theta_0=60)$  و شکل‌گیری جریانی آرام، راندمانی متوسط حدود ۱۸٪ به دست آمده است. در حقیقت این تفاوت راندمان، ناشی از جدایش جریان از لبه حمله و ریزش گردابه‌هایی قوی‌تر در شکل ۶ نسبت به شکل ۷ است.



نمودار ۶ نقشه راندمان ۳۴ شبیه‌سازی صورت‌گرفته در فضای پارامتری  $(f^*, \theta_0)$



شکل ۶ تغییرات ضریب توان کل و توان پیچشی، سرعت جابه‌جایی و ضریب نیروی عمودی با زمان (بالا) خطوط همتراز فشار و ورتیسیتیته در زمان‌های  $t/T=0.145$  و  $t/T=0.25$  (پایین) برای حالت  $(f^*=0.14; \theta_0=76/33)$



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 دامنه‌های جابه‌جایی 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  $H_0/c$  بر راندمان با فرکانس و بیشینه زاویه حمله یکسان

$\bar{C}_p$	$\eta\%$	$H_0/c$	$\theta_0$	$\alpha_{T/4}$	$f^*$
۰/۳۶	۲۵/۸۲	۰/۵	۴۴	۲۳	۰/۱۲
۰/۷۱	۲۹/۴۸	۱	۶۰	۲۳	۰/۱۲
۱/۱۱	۳۲/۸	۱/۵	۷۱/۵	۲۳	۰/۱۲
۱/۵	۳۴/۲۴	۲	۷۹/۴۵	۲۳	۰/۱۲

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 به دلیل افزایش سرعت جابه‌جایی خطی است. هر چند به دلیل افزایش توان قابل استحصال (Pa) از جریان که ناشی از افزایش  $H_0$  (به علت بزرگ‌تر شدن پنجره جاروب‌شده) بوده، توان دریافتی نیز با افزایش  $H_0$  افزایش یافته، اما این افزایش به گونه‌ای است که در نهایت راندمان سیستم، تغییرات اندکی دارد. بنابراین می‌توان گفت در فرکانسی ثابت با زاویه حمله موثر ثابت می‌توان تا حدی بدون افت راندمان، میزان ضریب توان دریافتی را با افزایش دامنه جابه‌جایی ( $H_0$ ) 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 ۰۰۰۲، ۰۰۱۵، و ۰۰۲۰ ارائه شده است.

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

$(f^*=0/14; \theta_0=76/33)$		$(f^*=0/18; \theta_0=60)$		ایرفویل
$\bar{C}_p$	$\eta\%$	$\bar{C}_p$	$\eta\%$	NACA
۱/۰۴	۴۰/۷۸	۰/۴۵	۱۸/۶۴	۰۰۰۲
۱/۰۷	۴۱/۹۷	۰/۴۶	۱۹/۴۲	۰۰۱۵
۱/۰۶	۴۱/۵۶	۰/۴۶	۱۹/۴۲	۰۰۲۰

اما تغییر موقعیت مرکز پیچش در راستای وتر ایرفویل مستقیماً بر شتاب لحظه‌ای سطح جسم تاثیر می‌گذارد و منجر به تغییر شار ورتیسیتته در دیواره می‌شود. در این تحقیق، مرکز پیچش ایرفویل در سه موقعیت ۰/۲۵، ۰/۳۳، و ۰/۵ وتر مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸، خطوط هم‌تراز ورتیسیتته در لحظه  $t/T=1$  برای هر سه حالت ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در هر سه حالت ریزش گردابه‌های نوک حمله قابل مشاهده است، اما در مواردی که محور چرخش به نوک حمله ایرفویل نزدیک‌تر است، ریزش گردابه‌ها زودتر اتفاق می‌افتد. به‌وضوح دیده می‌شود 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 ۰/۵ و ۰/۲۵، ناهماهنگی زیادی بین نیروی عمودی و سرعت جابه‌جایی ایجاد نموده است. این

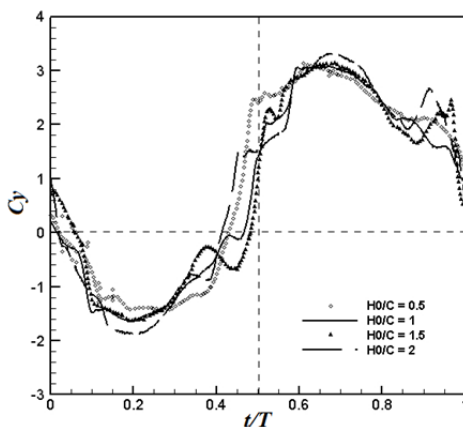
ترکیب مناسب این پارامترها منجر به زاویه حمله و سرعت موثر بهینه در هر دوره تناوبی می‌شود. تغییر دامنه جابه‌جایی در فرکانس و زاویه پیچش ثابت، منجر به تغییر ابعاد پنجره جاروب‌شده توسط فویل و در نتیجه باعث تغییر توان قابل دریافت از سیال می‌شود. در جدول ۲، برای دو فرکانس و دامنه پیچش مشخص، تغییر راندمان و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

جدول ۲) تاثیر پارامتر  $H_0/c$  بر راندمان

$(f^*=0/18; \theta_0=60)$		$(f^*=0/14; \theta_0=76/33)$		دامنه جابه‌جایی
$\eta\%$	$\bar{C}_p$	$\eta\%$	$\bar{C}_p$	$H_0/c$
۱۹/۴۲	۰/۴۶	۴۱/۹۷	۱/۰۷	۱
-۹/۶۹	-۰/۳۲	۳۵/۴۷	۱/۲۲	۱/۵

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 ۱/۵ برابر طول وتر، فرکانس ۰/۱۸ و دامنه پیچش ۶۰ درجه راندمان و ضریب توان، منفی شده است. علت منفی شدن 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 ( $H_0$ ) 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 به گونه‌ای تغییر داده شد که زاویه حمله موثر ثابت باقی بماند. در نمودار ۷، تغییرات نیروی عمودی با دامنه‌های جابه‌جایی مختلف در فرکانس ۰/۱۲ و زاویه حمله موثر  $\alpha_{T/4}=23$  نشان داده شده است.



نمودار ۷) مقایسه نمودارهای ضریب نیروی عمودی برای دامنه‌های جابه‌جایی مختلف در  $(f^*=0/12; \alpha_{T/4}=23)$

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 ۴۰ درصدی تا ۵۰ درصدی دوره تناوبی اتفاق

جدول ۶) تاثیر عدد رینولدز بر ضریب دریافت انرژی و راندمان

$(f^*=0/14; \theta_0=76/33)$		$(f^*=0/18; \theta_0=60)$		عدد رینولدز
$\bar{C}_p$	$\eta\%$	$\bar{C}_p$	$\eta\%$	Re
۰/۹۳	۳۶/۴۷	۰/۲۷	۱۱/۴	۵۰۰
۱/۰۷	۴۱/۹۷	۰/۴۶	۱۹/۴۲	۴۱۰۰
۱/۱۶	۴۵/۵	۰/۵۱	۲۱/۵۳	۵۰۰۰۰

### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مطالعه‌ای پارامتریک روی ایرفویل نوسانی با حرکت انتقالی و پیچشی همزمان در جریان تراکم‌ناپذیر 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 ۴۱۰۰ و جریان هوا تا ۷٪ راندمان سیستم را نسبت به حالت تک‌باله افزایش می‌دهد. مطالعه پارامتری انجام شده، دستیابی به راندمان‌های بالاتر از ۴۹٪ را نیز نشان می‌دهد. این راندمان در فرکانس کاسته حدود ۱۴٪ و دامنه پیچشی بین ۷۰ تا ۸۰ درجه 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 می‌شود.

**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 (۴۵٪)؛ حسین صفی‌پور (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ حجت رضایی‌فرد (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۵٪)

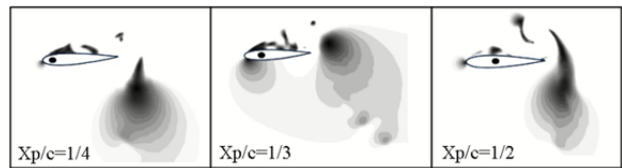
**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

### منابع

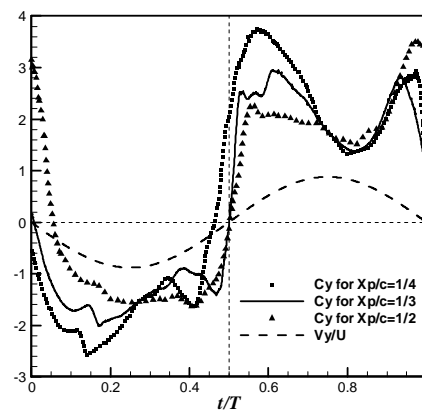
- McKinney W, DeLaurier J. Wingmill: An oscillating-wing windmill. *Journal of Energy*. 1981;5(2):109-115.
- Kinsey T, Dumas G. Testing and analysis of an oscillating hydrofoils turbine concept. ASME 3<sup>rd</sup> Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting collocated with 8<sup>th</sup> International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 1-5 August, 2010, Montreal, Quebec, Canada. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2010.
- Kinsey T, Dumas G, Lalande G, Ruel J, Mehtu A, Viarouge P, et al. Prototype testing of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils. *Renewable Energy*. 2011;36(6):1710-1718.
- Xiao Q, Zhu Q. A review on flow energy harvesters based on flapping foils. *Journal of Fluids and Structures*. 2014;46:174-191.
- Peng Z, Zhu Q. Energy harvesting through flow-induced oscillations of a foil. *Physics of Fluids*. 2009;21(12):123602.
- Kinsey T, Dumas G. Parametric study of an oscillating airfoil in a power-extraction regime. *AIAA Journal*. 2008;46(6):1318-1330.

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 ۰/۳۳ 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، به گونه‌ای که در حالت نزدیک‌تر به لبه حمله ایرفویل، اکسترمم ضریب نیرو افزایش و با دور شدن 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 ۰/۲۵ افزایش اکسترمم نیرو، خود باعث افزایش 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 پنجره جاروب‌شده توسط ایرفویل با تغییر محل پیچش، اندکی تغییر داشته که در محاسبه راندمان لحاظ شده و این امر باعث شده است تا علی‌رغم 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 ۵۰۰۰۰ 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، کوچک شدن لایه مرزی و افزایش اکسترمم نیروی عمودی و در نتیجه توان دریافتی قابل توجه است.



شکل ۸) مقایسه ورتیسیتته در مکان‌های مختلف محور پیچش برای حالت  $(f^*=0/14; \theta_0=76/33)$



نمودار ۹) مقایسه ضرایب نیروی عمودی در مکان‌های مختلف محور پیچش برای حالت  $(f^*=0/14; \theta_0=76/33)$

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

$(f^*=0/14; \theta_0=76/33)$		$(f^*=0/18; \theta_0=60)$		مکان محور پیچش
$\bar{C}_p$	$\eta\%$	$\bar{C}_p$	$\eta\%$	$X_p/c$
۱/۱۳	۴۲/۰۲	۰/۳۸	۱۵/۳۶	۰/۲۵
۱/۰۷	۴۱/۹۷	۰/۴۶	۱۹/۴۲	۰/۳۳
۰/۹۲	۳۹/۲	۰/۴۴	۱۹/۶۱	۰/۵

- 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