



## Effect of fore-wing motion on increasing the performance of a tandem flapping wing power generator

İdil Fenercioğlu\*<sup>ID</sup>, Ferhat Karakaş<sup>ID</sup>

Department of Astronautical Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, 34469, Turkey

### Highlights:

- Design of flapping wing power generator
- Experimental investigation of flow-structure interaction
- Effect of fore-wing on the performance of the hind-wing

### Keywords:

- Flapping wing
- Tandem wings
- Power generator
- Flow structures
- PIV

### Article Info:

Research Article  
Received: 19.03.2018  
Accepted: 28.12.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.571624

### Acknowledgement:

This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) with project number 214M385.

### Correspondence:

Author: İdil Fenercioğlu  
e-mail: fenercio@itu.edu.tr  
phone: +90 212 285 3146 / 120

### Graphical/Tabular Abstract

An experimental study was performed in a water channel for a better improvement to the design of a renewable and sustainable tandem flapping-wing energy generator. The flow structures around and in the near wake of the flapping foils were investigated and direct force measurements were obtained.

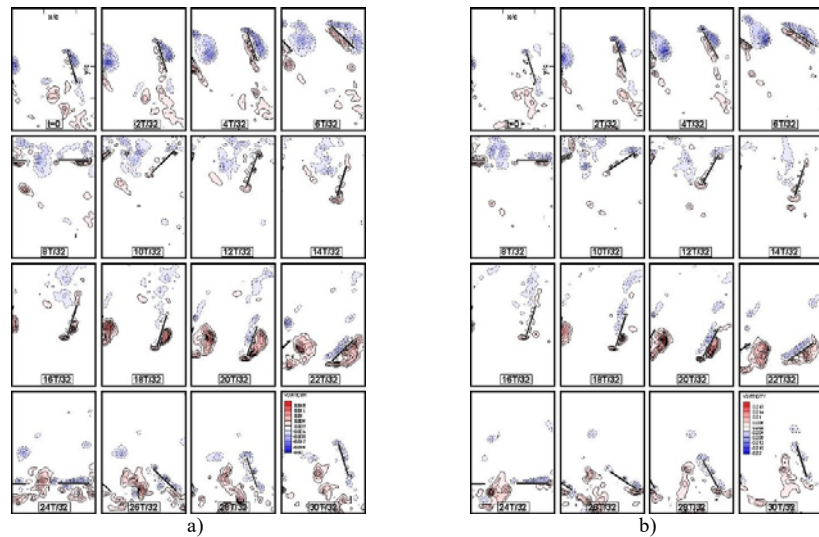


Figure A. Instantaneous vorticity plots for  $\psi = 0^\circ$  and non sinusoidal motions of fore and hind wings a)  $\Delta T_{R\text{-fore}} = 0.3$   $\Delta T_{R\text{-hind}} = 0.3$  b)  $\Delta T_{R\text{-fore}} = 0.4$   $\Delta T_{R\text{-hind}} = 0.4$

**Purpose:** This research aims to put forward the effect of rapid pitch reversal time ( $\Delta T_R$ ) of the pitching and plunging foils and the phase angle ( $\psi$ ) between the two foils' motion on the system's energy efficiency by commenting on productive or destructive power production.

### Theory and Methods:

The experiments were performed in a water channel using PIV technique to investigate the flow structures around and in the near wake of the flapping foils with simultaneous force measurements. Instantaneous and average vorticity plots were given and associated with mean power coefficient variations of the hind wing.

### Results:

When the fore wing and the hind wing motions are equal, the maximum power can be attained with sinusoidal motion ( $\Delta T_R = 0.5$ ) and  $\psi = 135^\circ$  phase angle. When the fore wing performs sinusoidal motion, the pitch reversal time  $\Delta T_{R\text{-hind}} = 0.4$  case can produce power in addition to the power produced by the fore wing when the phase angle is between  $45^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ .

### Conclusion:

Tandem flapping wing power generation system can maximize energy production by productive vortex interactions. More effective energy production in a tandem flapping wing system can be achieved by using a sinusoidal pitching and plunging fore wing.



## Ardışık çırpan kanatlı enerji üreticinin performansını artırmada ön kanat hareketinin etkisi

İdil Fenercioğlu\*<sup>ID</sup>, Ferhat Karakaş<sup>ID</sup>

İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzun Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34469, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çırpan kanatlı enerji üretici tasarımı
- Akım-cisim etkileşiminin deneysel incelenmesi
- Ön çırpan kanat hareketinin arka kanat performansına etkisi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 19.03.2018  
Kabul: 28.12.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.571624

### Anahtar Kelimeler:

Çırpan kanat,  
ardışık kanat,  
enerji üretici,  
akım yapıları,  
PIV

### ÖZET

Düşük Reynolds sayılı akışların incelenmesi, alternatif enerji üretimi konusundaki araştırmalarda giderek artan bir şekilde ilgi uyandırmaktadır. Doğal uçabilme yeteneğine sahip canlıların daimi olmayan aerodinamik akışları kullanım ve kontrol yöntemlerinin anlaşılması, benzer hareket mekanizmalarından yararlanan mühendislik tasarımlarının uygulama olanakları açısından dikkat çekmektedir. Ardışık yerleştirilmiş iki adet çırpan kanat yöntemi ile çalışacak bir yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji üreticinin geliştirilmesi için bu deneysel çalışmada kanatların etrafı ve yakın iz bölgesindeki akım yapıları incelenerek sistemin enerji verimini etkileyen parametrelerden ani dönüş hızı ( $\Delta TR$ ) ve kanatlar arası faz açısı ( $\psi$ ) değişiminin güç üretimine yapıcı veya yıkıcı etkisi ortaya konulmuştur. Ön ve arka kanatların birbirine eş ani dönüş değerinde hareket etmeleri halinde en yüksek gücün sinüzoidal harekette ( $\Delta TR = 0.5$ ) faz açısının  $\psi = 135^\circ$  olduğunda elde edileceği, ön kanadın sinüzoidal hareketi halinde arka kanadın ani dönüş zamanı değerinin  $\Delta TR$ -arka = 0.4 olması halinde ise  $45^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$  arasında öndeki kanadın ürettiği gücün yanı sıra arkadaki kanadın da güç elde edebileceğini gösterilmiştir. Dolayısı ile sinüzoidal hareket eden ön kanat kullanarak arka kanadın gördüğü akışın diğer ani dönüş değerlerine nazaran daha az yavaşlatılması sayesinde ardışık kanatlı sistemde daha verimli enerji elde edilmesi sağlanacaktır.

## Effect of fore-wing motion on increasing the performance of a tandem flapping wing power generator

### H I G H L I G H T S

- Design of flapping wing power generator
- Experimental investigation of flow-structure interaction
- Effect of fore-wing on the performance of the hind-wing

### Article Info

Research Article  
Received: 19.03.2018  
Accepted: 28.12.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.571624

### Keywords:

Flapping wing,  
tandem wings,  
power generator,  
flow structures,  
PIV

### ABSTRACT

Low Reynolds number flow regime attract interest to provide insight to alternative energy production studies. Understanding how natural fliers utilize and control the unsteady aerodynamic phenomena to enhance their capabilities draw continuous attention on improving the design and development of engineered systems that may take advantage of similar unsteady aerodynamic mechanisms. For a better improvement to the design of a renewable and sustainable tandem flapping-wing energy generator, this experimental study investigates the flow structures around and in the near wake of the flapping foils to put forward the effect of rapid pitch reversal time ( $\Delta TR$ ) and the phase angle ( $\psi$ ) on the system's energy efficiency by commenting on productive or destructive power production. When the fore wing and the hind wing motions are equal, the maximum power can be attained with sinusoidal motion ( $\Delta TR = 0.5$ ) and  $\psi = 135^\circ$  phase angle. When the fore wing performs sinusoidal motion, the pitch reversal time  $\Delta TR$ -hind = 0.4 case can produce power in addition to the power produced by the fore wing when the phase angle is between  $45^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ . It can be concluded that using a sinusoidal fore wing to slow down the flow seen by the hind wing less, can result in more effective energy production in a tandem flapping wing system.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemizin ve dünyamızın artmakta olan enerji ihtiyacını alternatif kaynaklardan karşılamak için araştırmalar sürdürülmekte, özellikle rüzgâr ve su enerjisi gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir temiz enerji kaynaklarından daha verimli olarak yararlanmanın yolları aranmaktadır. Hava ve su akımlarından enerji elde etmek için rüzgâr ve hidroelektrik türbinlerinde geleneksel olarak döner kanatlı tasarımlar kullanılıyor olmasına rağmen, yapılan son çalışmalar çırpan kanatlı tasarımların döner kanatlara kıyasla etraflarındaki akımdan çekilen gücü artırabileceğini göstermekte, dolayısı ile çırpan kanatlar mekanik güç üretimine yönelik uygulamaların performansını artırma açısından gelecek vaat etmektedir [1]. Dolayısıyla, çırpan kanatlar çoğunlukla havacılık alanında Mikro Hava Araçları (MHA) ile ilgili uygulama alanı bulmasına rağmen, düşük Reynolds sayılı akışların incelenmesi, alternatif enerji üretimi konusundaki araştırmalarda da ilgi uyandırmaya başlamıştır. Çırpan kanat kullanan bir değirmenin enerji üretiminde kullanabileceği fikri ilk kez McKinney ve DeLaurier [2] tarafından öne sürülmüştür. Farklı bir tasarım olan çırpan kanatlı bir güç üreticinin halihazırda kullanılmakta olan döner kanatlı rüzgâr türbinlerine alternatif olabileceği Platzler ve Bradley [3] tarafından önerilmiş ve patentlenmiştir. Biyolojik esinlenmenin çırpan kanat etrafındaki akımdan güç çekmek için efektif bir çözüm olup olmadığına yönelik çalışmalar dünya genelinde yaygın olarak halen devam etmektedir. Döner kanatlı rüzgâr ve su enerjisi üreteçlerine alternatif olabileceği düşünülen çırpan kanatlı türbinlerin kullanımı ile atmosferin yukarı seviyelerinde bulunan kuvvetli rüzgâr akımlarından, nehir, okyanus ve gel-git dalgalarından güç elde edilmesi planlanmaktadır [4]. Bu tarz çırpan kanat tasarımına sahip enerji üreteçlerinin endüstriyel tasarımı henüz gelişme aşamasında olsa da, uluslararası şirketler tarafından imal edilip kullanılmaya başlanan örnekleri son yıllarda piyasaya çıkmaya başlamıştır (“Stingray” - Engineering Business Ltd./İskoçya [5], “bioSTREAM” - BioPower Systems Ltd./Avustralya [6], “HFG3” - ANIPROP GbR/Almanya [7] vb.). Çırpan kanatlı türbin tasarımlarının üretebildiği enerji miktarının daha iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda ise birden çok çırpan kanat kullanan tasarımlar, muhtemel çırpan-kanatlı türbin tarlaları oluşturma amacı ile de giderek artan bir biçimde incelenmekte [8] ve hatta üretime geçilerek uygulanmaktadır. Uluslararası şirketler tarafından üretime geçilmiş olan örneklerden biri Festo AG&Co. KG tarafından dizayn edilmiş olan “DualWingGenerator” adlı çift çırpan kanatlı güç üreticidir [9]. Pulse Tidal Ltd. şirketi ise “Pulse-Stream100” adlı yatay ekseninde çırpan kanatlı bir güç üreticisi ile, aynı nehirde kullanılan düşey ekseninde döner kanatlı bir güç üreticinin üretebildiği miktarın 4 katı olacak şekilde enerji elde edebilmiştir [10]. Bu tasarım aynı zamanda sığ sularda kullanılabilir ve az yer kaplaması sayesinde aynı alana ardışık olarak daha fazla enerji üreticisi yerleştirilebilir avantajlarına da sahiptir. BioPower Systems Ltd. Şirketinin tasarımı olan “bioSTREAM – tidal farm” da deniz altında yerleştirilen birden fazla çırpan kanatlı güç üreticinin güç

üreticisi tarlası şeklinde gel-git etkisinden yararlanarak güç üretmesi amacı ile tasarlanmıştır [11]. Çırpan kanat yöntemi ile güç elde edilmesi konusunda yapılan en son çalışmalar Young vd. [12] ile Xiao ve Zhu [13] tarafından özetlenmiş ve bu araştırma alanındaki yoğun ilgiden bahsedilerek çırpan kanatlı güç üreteçlerinin döner kanatlı türbinlere olan avantajları tartışılmıştır.

Çırpan kanatların harici bir itki sistemine ihtiyaç duymadan içinde bulunduğu akımdan güç çekerek itki enerjisi elde edebileceği [14] aşında uzun yıllardır bilinmektedir. Kanat çırparak uçan canlılar, uçabilme ve manevra kabiliyetlerini kanatlarının hücum ve firar kenarlarından ayrılan girdapları kontrol ederek sağlamaktadırlar [15]. Bu durum yunuslama ve/veya ötelenme yapan kanatların deneysel ve hesaplamalı yöntemler ile incelenmesine yönelik birçok çalışmanın çıkış noktası olmuştur. Yapmış oldukları ayrı çalışmalarda Knoller [16] ve Betz [17] çırpan kanatların yarattığı efektif hücum açısı sonucu kanat üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetin akışa dik yönde (taşımaya) ve akış yönünde (itki) kuvveti bileşenlerine sahip olduğunu göstermişlerdir. Katzmayer [18] ise sabit bir kanat modelini salınım yapan bir akışa yerleştirerek Knoller-Betz etkisi olarak adlandırılan bu durumun doğruluğunu deneysel olarak göstermiş, yapmış olduğu tekrarlamalı ölçümlerle ortalama itkiyi elde ederek sürükleme kuvvetindeki azalmayı ve küçük bir miktarda da olsa taşımaya kuvvetindeki artışı gözlemleyebilmiştir. Kanat profilleri üzerindeki daimi olmayan akışlar ile ilgili araştırmalar yapan Koochesfahani [19] salınım yapan kanadın frekans, genlik ve salınım dalga şeklini kontrol ederek kanat arkasında oluşan iz bölgesi yapısının kontrol edilebileceğini göstermiş, Panda ve Zaman [20] ise iz bölgesinden taşımaya kuvveti tahminlerinde bulunmuştur.

Kuşlar ve deniz canlılarının hareketlerini taklit etme yönünde biyobenzetim prensibi ile yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketlerinden oluşan kanat çırpmaya hareketi çok geniş bir parametre alanına sahiptir ve deneysel araştırmalar, özellikle iki boyutlu kanat profillerinde yapılan çalışmalar olmak üzere, göreceli olarak daha az sayıda çalışmaya konu olmuştur. Anderson vd. [21]’nin yaptığı deneysel çalışmalar en elverişli itki verimliliğinin Strouhal sayısı 0,2 ile 0,4 arasında olduğu değerlerde elde edildiğini göstermiştir. Bu aralığın balık ve su memelilerinin maksimum yüzme hızlarındaki değerlerine uyduğu Triantafyllou vd. [22] tarafından da belirtilmektedir. Ancak Young ve Lai [23], yaptıkları sayısal çalışmalar sonucunda Strouhal sayısının kanat çırpan profillerdeki verimi tanımlamak için yeterli olmadığını göstermiştir.

Çırpan kanatlarda hücum kenarı girdaplarının oluşmaya başlama ve kanat yüzeyinden ayrılma zamanlarının itki üretimine olan etkileri Isogai vd. [24], Read vd. [25] ile Hover vd. [26] tarafından incelenmiş; Rival ve Tropea [27] tarafından da hücum açısı değerinin kanat üst yüzeyinde oluşan hücum kenarı girdabına olan etkisi gösterilmiştir. Kinsey ve Dumas [28] ise çırpan kanadın etrafındaki akımdan güç çekerek enerji üretebilmesi için, kanadın bir

hareket döngüsü esnasında oluşan hücum kenarı girdaplarının kanat yüzeyinde tutundukları sürenin artırılması gerektiğini ortaya koymuştur. Kanada etkileyen taşıma kuvvetine fayda sağlayan esas mekanizmanın kanadın hücum kenarında oluşmaya başlayan hücum kenarı girdabının kanat yüzeyinde sabit kalabilmesi olduğunu Platzer vd. [29] de belirtmiştir.

Çırpan kanatlı güç üreteçleri ile ilgili çalışmalarda hem hareket kinematiklerinin daha kolay elde edilebiliyor olması sebebiyle hem de Kinsey vd. [30, 31]'nin hidrokinetik türbin prototipi baz alınarak genelde ileri doğru kanat çırparak uçuş hareketini benzetime yönelik periyodik ve sinüzoidal yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketleri yapan kanatlar kullanılmakta olduğu görülmektedir. Ancak Platzer vd. [32] tarafından farklı bir kanat hareketi kinematiği önerilmiştir; bu alternatif harekette, yüksek hız ve yüksek yunuslama açısına sahip bir kanat, yaptığı akıma dik yönde öteleme hareketini mümkün olduğunca uzun süre koruduktan sonra ani olarak yunuslama açısı ve hareket yönünü değiştirmektedir. Yapılan bu sinüzoidal olmayan hareket periyodik bir şekilde devam ettirilmekte, böylece oluşan hücum kenarı girdaplarının kanat yüzeyinde daha uzun süre kalması sağlanmaktadır. Gerçekleştirdikleri nümerik çalışma sonuçlarında akıma dik yönde öteleme ve belirli bir faz açısı ile sinüzoidal olmayan eşzamanlı yunuslama hareketlerini periyodik olarak yapan tekil çırpan kanatlı bir güç üretecinin üretebildiği güç ve verimin, kanadın sinüzoidal hareket yapma haline göre %30 artırılabilceği bildirilmiştir.

Çırpan kanatlı türbin tasarımlarının üretebildiği enerji miktarının iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda ise birden çok çırpan kanat kullanan tasarımlar dikkat çekmektedir. Çırpan-kanatlı türbin tarlaları oluşturma amacı ile de çoğul çırpan kanatların farklı yerleşim şekilleri giderek artan bir biçimde incelenmektedir. Ardışık yerleşime sahip iki kanat kullanımının sonuçlarını inceleyen çalışmalarda deneysel yöntemlerde karşılaşılan kısıtlamalar nedeni ile sıklıkla hesaplamalı yöntemler kullanılmış olmasına rağmen (örn. Tuncer vd. [33], Tuncer ve Kaya [34], Ramamurti vd. [35] ile Windte ve Radespiel [36]), Warkentin ve DeLaurier'in [37] simetrik olarak çırpan hareketi yapan kanatlar ile yapmış oldukları rüzgâr tüneli testlerine ait sonuçlar, ardışık olarak yerleştirilmiş kanatlarla ilgili belirli faz açısı ve kanatlar arası mesafe değerleri için tekil çırpan kanatlara oranla daha fazla itki verimliliği elde edilebileceğini göstermiştir. Dong ve Liang [38] da önde kanat olması durumunun akım altında hareket eden diğer kanadın oluşturduğu itki kuvvetini artırma yönünde etkilediğini göstermiştir. Elde ettikleri bu sonuçlar Rival vd. [39] tarafından da doğrulanmış; öndeki kanat etrafında gelişen akım yapılarının arka arkaya yerleştirilmiş kanat konfigürasyonundan etkilenmediği ve ikili kanat sisteminin performansının arka-kanat ile etkileşime giren girdaplar tarafından belirlendiği sonucuna varılmıştır. Belirli faz açısı değerleri ile eşzamanlı ve periyodik ancak sinüzoidal olmayan yunuslama ve akıma dik yönde öteleme hareketi yapan ardışık yerleşimine sahip kanat profilleri kullanılarak yapılan bir nümerik araştırma ile

de çoğul çırpan kanatların farklı yerleşim şekilleri nümerik olarak incelenmiş ve akımdan güç çekme potansiyelleri belirlenmiştir [40]. Çalışmanın sonuçları, sinüzoidal hareket eden tek bir kanada nazaran güç üretiminde %17, verimde ise %15'e varan artış elde edilebileceğini göstermektedir. Bazı hallerde performansta azalma görülmüş olmasına rağmen, bütün hareket periyodu boyunca pozitif güç üretimi sağlanabilmesi ardışık kanat yerleşimi konfigürasyonlarının en önemli avantajı olarak belirtilmiştir.

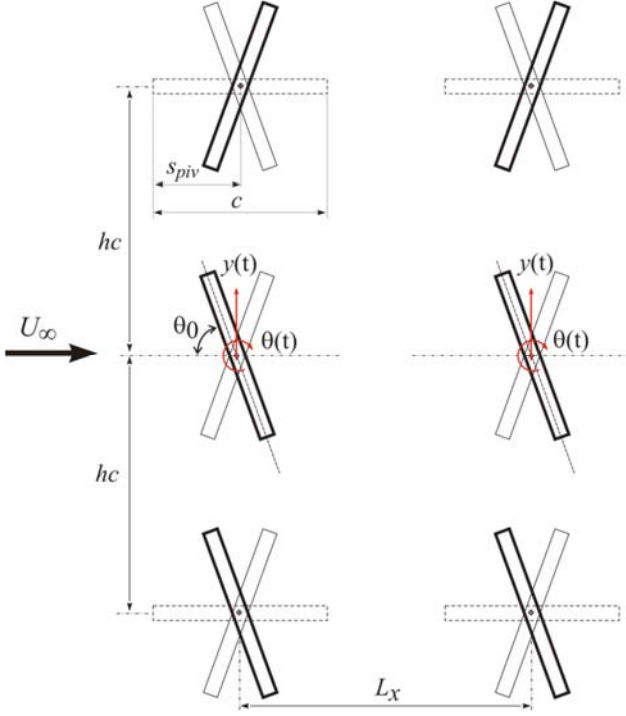
Sunulan bu çalışmada çift çırpan kanatlı bir enerji üreticinin verimliliğini artırmada ön kanat hareketinin etkisini araştırmaya yönelik olarak, iki adet ardışık yerleştirilmiş ve birbirlerine göre belirli faz açısı değerleri ile eşzamanlı ve periyodik yunuslama ve akıma dik yönde öteleme yapan iki adet düz levha profiline sahip kanadın hareketine odaklanılmıştır. Öndeki kanadın sinüzoidal veya sinüzoidal olmayan hareketinin arkadaki kanada olan etkisi deneysel olarak incelenmiş, akım-cisim etkileşiminin kanatlar etrafındaki girdap yapılarına etkisi ortaya koyulmuştur. Kanatların hücum ve fırlar kenarlarından girdap kopmasına sebebiyet veren akım şartlarının daha iyi anlaşılması amacı ile yunuslama hareketlerini ters yöne çevirdiği farklı ani dönüş zamanı değerlerinin kanatların etrafı ve iz bölgesindeki akım yapılarına olan etkileri Parçacık Görüntüleme Hızölçeri (Particle Image Velocimetry - PIV) tekniği kullanılarak elde edilmiş ve sonuçlar kuvvet/moment ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

Ardışık yerleştirilmiş çift çırpan kanatlı yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji üreticinin incelendiği bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar daimi olmayan aerodinamik akışların kullanım ve kontrol yöntemlerinin anlaşılmasına ve benzer yöntemlerden yararlanan mühendislik sistem tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

## 2. ÇIRPAN KANAT KİNEMATİĞİ (FLAPPING WING KINEMATICS)

Kullanılan ardışık yerleştirilmiş kanat modelleri belirli bir faz açısı ile eşzamanlı yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketlerini periyodik ancak incelen duruma göre sinüzoidal veya tam sinusoidal olmayan şekilde gerçekleştirmektedir. Serbest akım altında periyodik ancak sinusoidal olmayan yunuslama ve ötelenme yapan ardışık yerleştirilmiş düz levha profiline sahip kanatların hareket kinematiği Şekil 1'de verilmiştir. Pleksiglasdan üretilmiş dikdörtgen kesitli düz levha profilindeki test modellerinin veter uzunlukları  $c = 10\text{cm}$  ve açıklık oranları  $s = 30\text{cm}$  olarak seçilmiştir. Kanat modellerinin birer bağlantı çubuğu yardımı ile yunuslama hareketini veren motora bağlandığı dönme eksenini noktasının hücum kenarından mesafesi  $s_{piv} = 0,44c$  olarak seçilmiştir. Kanadın akıma dik yönde ötelenme hareketi  $y(t)$  ile, yunuslama hareketi  $\theta(t)$  ile temsil edilmekte, serbest akım hızı ise  $U_\infty$  ile gösterilmektedir. Bu çalışmada akıma dik yönde ötelenme hareketinin genliği  $h = 1,05c$  ve yunuslama hareketinin genliği  $\theta_0 = 73^\circ$  olarak seçilmiştir. Kanatların hareket frekansı  $f$ , yunuslama hareketi ve akıma dik yönde öteleme hareketleri için birbirlerine eşit olarak

seçilmiş ve  $f = 0,125$  Hz olarak belirlenmiştir.  $L_x$  ardışık yerleştirme düzeninde kanatlar arasındaki mesafeyi belirtmektedir ve çalışma boyunca ön ve arka kanatların dönme eksenleri arasındaki mesafe 2 veter boyu ( $L_x = 2c$ ) olarak seçilmiştir.

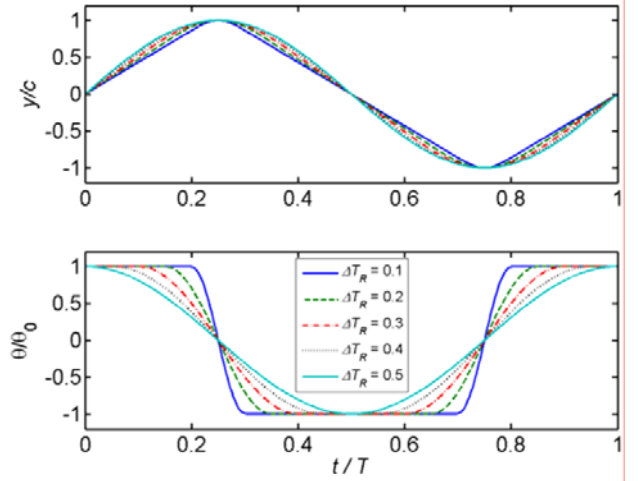


**Şekil 1.** Ardışık yerleştirilmiş kanatların hareket kinematığı (Motion kinematics of tandem wings)

Literatürde bulunan çırpan kanatlar ile ilgili çalışmalarda genellikle ötelenme hareketi yunuslama hareketini  $90^\circ$  faz farkı ile geriden takip edecek şekilde incelenmiştir. Yang vd. [41] yüksek itki verimliliği için hareketi optimize eden sayısal bir çalışma yapmış ve yunuslamanın ötelenme hareketinin önünde olmak üzere en uygun faz açısının  $70^\circ$  ile  $90^\circ$  derece arasında olması gerektiğini bularak ortalama hücum açısının zamana bağlı itki katsayısı üzerinde ve yunuslama hareketinin dönme eksenini noktasının optimizasyonda etkisinin az olduğunu göstermişlerdir. Read vd. [25]'nin yaptıkları deneylerde elde ettikleri sonuçlar ise, maksimum itki oluşumunun, yunuslama ve ötelenme hareketleri arasındaki açının  $90^\circ$  ile  $100^\circ$  arasında olduğu durumlarda elde edildiğini göstermektedir. Kanadın yunuslama ve ötelenme hareketleri arasındaki faz açısının artırılması yunuslama hareketindeki yön değiştirmenin daha erken gerçekleşmesi anlamına gelmekte, kanat hücum kenarında oluşan girdapların gelişimlerini daha erken tamamlayarak kanattan daha erken ayrılmasına sebep olmaktadır [42]. Hücum kenarı girdap ayrılmasının erken gerçekleşmesinin ortalama güç katsayısında azalmaya sebep olduğu Asraf vd. [40] tarafından hesaplanmış ve Kinsey ve Dumas [28]'in parametrik bir çalışmada, faz açısının  $90^\circ$  olmasının güç üretimi ve verimliliği açısından avantajlı bir durum sergilediği gösterilmiştir. Sunulan bu çalışmada ardışık yerleştirilmiş düzende her bir kanadın kendi

yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketleri arasındaki faz farkı, ötelenme hareketi yunuslama hareketini  $\phi = 90^\circ$  ile geriden takip edecek şekilde seçilerek sabitlenmiştir.

Kanadın akıma dik yönde ötelenme hareketi süresi mümkün olduğunca uzun tutulup yunuslama açısının aniden ters yöne çevrilmesi ile oluşturulan periyodik ancak sinüzoidal olmayan hareketin, çırpan kanatlı enerji üreticileri için daha verimli olduğu Platzer vd. [32] tarafından belirtilmiştir. Ani dönüş zamanı olarak da belirtilebilecek ve  $\Delta T_R$  ile gösterilen bir parametre tanımlanmış, akıma dik yönde öteleme hareketi yapan kanadın aniden yunuslama açısını ters yöne değiştirme süresinin sinüzoidal olmayan çırpma hareketi periyoduna oranı olarak açıklanmıştır. Ani dönüş zamanı ( $\Delta T_R$ ) değerlerindeki değişikliğin yunuslama ve akıma dik yönde öteleme hareketlerini aralarındaki faz farkının  $90^\circ$  olduğu durumlar için nasıl değiştirdiği Şekil 2'de gösterilmektedir. Görülebileceği üzere  $\Delta T_R = 0,5$  olduğunda kanat sinüzoidal olarak yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketlerini eş zamanlı olarak yapmakta,  $\Delta T_R$  değerinin  $0,5$ 'ten küçük olduğu durumlarda ise kanat hareketi periyodik kare dalga / üçgen dalga benzeri sinyale dönüşmektedir.



**Şekil 2.** Yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketlerinin ani dönüş zamanı ile değişimi [32] (Variations of pitch and plunge motions with rapid reversal time)

Bu çalışmada bir enerji üreticinin verimini etkileyen parametrelerden ön kanadın sinüzoidal veya sinüzoidal olmayan hareketlerinin arka kanada etkisi ortaya konulmaya çalışılmış,  $\Delta T_R = 0,3$  ile  $\Delta T_R = 0,5$  arasındaki ani dönüş zamanı değerlerinin kanat etrafı ve yakın iz bölgesindeki akım yapılarına etkisi incelenmiştir. Ardışık kanatların birbirlerine göre hareketleri arasındaki faz farkı değişimleri arkadaki kanat önde gidecek şekilde  $\psi = 0^\circ$  ile  $315^\circ$  arasında  $45^\circ$  artırımlar yapılarak ele alınmıştır.

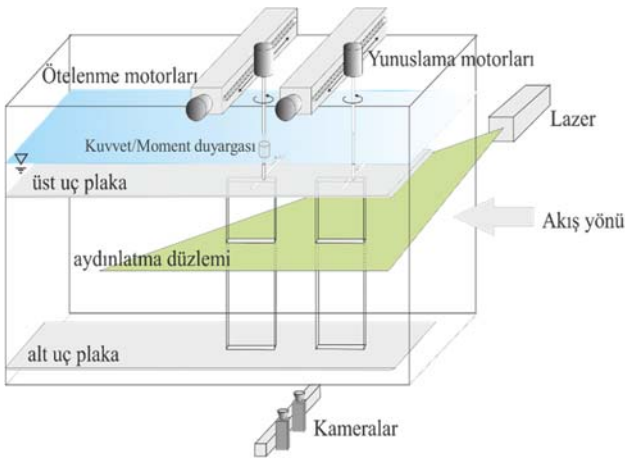
Akışın fiziğine etki eden başlıca boyutsuz parametreler olan Strouhal sayısı ( $St$ ) ve indirgenmiş frekans ( $k$ ) şu şekilde tanımlanmaktadır:  $St = fhc/U_\infty$   $k = 2\pi fc/U_\infty$  Çalışma

boyunca incelenmek istenen indirgenmiş frekans  $k = 0,8$  olarak sabit tutulmaktadır, buna göre Strouhal sayısı da  $St=0,13$ 'e karşılık gelmektedir.

### 3. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

#### 3.1. Su Kanalı (Water Channel)

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Trisonik Laboratuvarı'nda bulunan deney kesiti yüksekliği 750mm ve genişliği 927mm olan 6m uzunluğundaki su kanalında gerçekleştirilmiştir. Su kanalında, çalışma deneylerinde kullanılan deney düzeneği, Parçacık Görüntüleme Hızölçeri (Particle Image Velocimetry - PIV) yönteminde kullanılan kamera ve lazer sistemlerinin yerleşimleri ile birlikte görsellenerek iki boyutlu incelemede çift kanat kullanımı durumu için Şekil 3'de görülmektedir. İncelemeleri su kanalının üst yüzeyinde oluşan serbest yüzey etkilerinden arındırmak amacı ile modeller üstten 50cm×100cm ölçülerinde, 1cm kalınlığında, pleksiglastan üretilmiş bir uç plaka ile sınırlandırılmıştır. Bu üst plaka yansımaları engellemek amacıyla siyaha boyanmıştır ve plakaya kanadın akıma dik yöndeki hareketi sırasında bağlantı çubuğunun ilerleyişine olanak vermek üzere 2cm genişliğinde bir yarık açılmıştır. Alt uç plaka ise akışın görüntülenebilmesi için şeffaf pleksiglas malzemeden üretilmiştir.



**Şekil 3.** Yunuslama ve ötelenme yapan ardışık yerleştirilmiş kanat yerleşiminde deney düzeneği (Experimental setup for pitching and plunging tandem wings)

#### 3.2. Hareket Mekanizması (Motion Mechanism)

Kullanılan iki adet düz levha profiline sahip modelin yunuslama ve akışa dik yönde ötelenme hareketleri için ikişer adet Kollmorgen/Danaher Motion AKM33E ve AKM54K servo motor kullanılmıştır. Yunuslama motorlarının her ikisi de ayrı ayrı iki adet akıma dik yönde ötelenme hareketini veren motorun kontrol ettiği sonsuz vida sistemine bağlıdır. Modeller Şekil 3'te de görüldüğü üzere yunuslama hareketini veren motorlara bağlantı çubukları yardımı ile monte edilmiştir. Servo motorlar yunuslama

hareketi için ServoSTAR S300 ve akıma dik yönde ötelenme hareketi için ServoSTAR S700 model dijital servo amplifikatörler ile bilgisayara bağlanmış, Şekil 7'de verilmiş olan kanat hareketi, incelenmek istenen frekans ve genlikte bir Labview VI (Virtual Instrument) sinyal üretici ile oluşturulmuştur. Aynı Labview VI sinyal üretici, kanat hareketi başladıktan sonra 3. periyottan itibaren veri alacak şekilde PIV sistemini tetiklenmekte, senkronizasyon ise bir National Instruments PCI-6601 zamanlayıcı ile gerçekleştirilmektedir.

#### 3.3. PIV Sistemi (PIV System)

Ardışık yerleştirilmiş kanatların etrafında ve yakın iz bölgelerinde oluşan niceliksel akım yapıları ve bu akım yapılarının birbirleriyle olan etkileşimleri Dynamic Studio (Dantec Dynamics A/S) yazılımı kullanan bir PIV sistemi ile elde edilmiştir. Suyun tohumlanması için ortalama çapı yaklaşık 10µm olan üzeri gümüş kaplı cam kürecikler kullanılmıştır. Şekil 3'te de görüldüğü üzere, çift kavite Nd-YAG lazer (maksimum enerji seviyesi 120 mJ/vuruş) su kanalını yandan aydınlatacak şekilde kanat modellerinin yarı açıklığı boyunca hizalanmıştır. Geniş bir görüntüleme alanı oluşturmak için iki adet 10-bit ve 1600×1200 piksel çözünürlüğe sahip CCD kamera kanalın altına yerleştirilmiştir. İki kameradan alınan görüntüler çok az çakıştırılarak ve iki ortak nokta kullanılarak vektör elde edilmeden önce laboratuvarında geliştirilmiş yazılımlar ile birleştirilmiştir. Hız alanları çapraz korelasyon kullanılarak elde edilmiştir. Çapraz korelasyonda sorgulama pencereleri 64×64 alınmış ve %50 üst üste bindirme kullanılmıştır. Veri alma hızı her bir periyotta 32 akış alanı temsil edilecek şekilde ayarlanmış ve 3 periyot süresince veri alınmıştır. Sonuçta akış alanı toplamda yaklaşık 3400 vektör ile görsellenmiş ve akış düzlemindeki vektör çözünürlüğünün en düşük değeri  $0,058c \times 0,058c$  olarak elde edilmiştir.

#### 3.4. Kuvvet Ölçüm Sistemi (Force Measurement System)

Ardışık yerleştirilmiş çırpan kanatlı güç üretici düzeneğinde ön kanadın yapmış olduğu sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan periyodik hareketinin arkaya yerleştirilmiş olan kanat üzerindeki etkilerini ölçmek için altı eksenli bir kuvvet/moment duyargası kullanılmıştır. Model hareketini sağlayan motorlara ankastre bağlı arka kanadın hemen uç plaka sonrasındaki kısmına, su altında yerleştirilmiş olan ATI-IA Nano17 IP68 kuvvet/moment duyargası, silindirik z-ekseni akıma dik ötelenme ve yunuslama düzlemine dik olacak şekilde bağlanmıştır (Şekil 3). Motorların oluşturduğu atalet kuvvet ve momentlerini elimine etmek için deneyler aynı hareket parametrelerinde havada tekrarlanmış ve suda alınan veriden çıkarılmıştır. Kuvvet/moment ölçümlerinde, 10000Hz örnekleme frekansında model hareketinin 30 periyodu süresince veri alınmıştır. Kuvvet/moment duyargası model ile beraber hareket etmekte olduğu için, ölçülen kuvvet değerleri ile modelin o anki hareket kinematığı kullanılarak modele etki eden taşıma ve sürüklenme kuvvetleri elde edilmektedir.

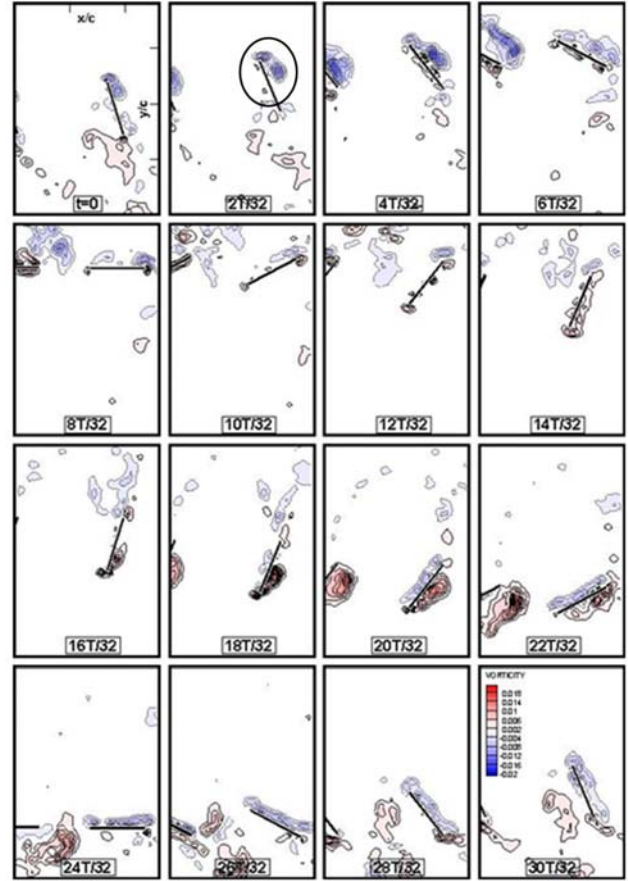
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Gerçekleştirilen bu çalışmada, bir enerji üreticinin ön ve arka kanatlarının aynı hareketi yapması ile ön kanat sinüzoidal hareket yapmakta iken arkadaki kanadın sinüzoidal olmayan hareket yapması durumlarının sistemin toplam verimine etkisi belirlenmiştir. Verimliliği arttırmaya yönelik olarak, çırpan kanat hareketlerinin ani dönüş zamanı değerleri ( $\Delta T_R$ ) ve kanatların birbirlerine göre faz açıları ( $\psi$ ) değiştirilerek kanatların etrafı ve yakın iz bölgesindeki akış yapıları incelenmiş, ayrıca ardışık hareket eden iki kanat ile etkileşime giren olan girdap yapılarının yörüngeleri ve şiddet değişimleri elde edilmiştir.

PIV yöntemi ile elde edilen akım yapıları bu çalışmada kanatların bir hareket periyodu 16 resim ile görsellenecek şekilde verilmektedir. Kullanılan kameralar ön kanadın firar kenarı ve arka kanadın etrafı kamera görüş alanına girecek şekilde hizalanmış, böylece akım-cisim etkileşimini incelemek üzere ön kanattan kopan girdapların arka kanadın etrafında oluşan girdaplarla girdiği etkileşim görüntülenebilmiştir. Ardışık yerleştirilmiş kanatlar periyodik hareketlerine, yunuslama açısının maksimum genliğinde ve akıma dik yönde ötelenme hareketi genliğinin orta noktasında iken yukarı doğru hareket ederek başlamakta, belirtilen ani dönüş zamanı değerinde ( $\Delta T_R$ ) yunuslama açısının değerini ters istikamete çevirmekle hareketini aşağı yönde tamamladıktan sonra tekrar yunuslama açısı değerini diğer yönde çevirerek hareketini yukarı doğru devam ettirmektedir. Verilen şekillerdeki ilk resim kanat modelini akıma dik yönde ötelenme hareketinin ortasında göstermektedir. Tüm görüntülerde akım yönü soldan sağa doğrudur.

Şekil 4'te ardışık yerleştirilmiş ön ve arka kanatlar birbirlerine göre faz farkı olmadan ( $\psi = 0^\circ$ ) sinüzoidal ( $\Delta T_{R-ön} = \Delta T_{R-arka} = 0,5$ ) hareket etmekte iken oluşan akım yapıları gösterilmektedir. Verilen tüm şekillerde minimum boyutsuzlaştırılmış vortisite seviyesi  $[\omega c/U_\infty]_{min} = \pm 0,0025$  ve boyutsuz vortisite aralığı  $\Delta[\omega c/U_\infty] = 0,0025$  olarak seçilmiştir. Kanatların aşağı yöndeki akıma dik ötelenme hareketi sonucu yunuslama açısını pozitif olacak şekilde değiştirecek akıma dik yöndeki hareketine yukarı yönde başlaması sonrasında ( $t = 26T/32$ ) kanadın üst yüzeyinde saat yönünde dönen bir hücum kenarı girdabı oluşmaya başlamaktadır. Bu negatif girdap kanadın yukarı doğru hareketi süresince gelişerek kanadın üst yüzeyini kaplamakta ve kanadın yunuslama açısını negatif yönde ani dönüş süresi içerisinde değiştirmesi esnasında ( $t = 10T/32$ ) kanat yüzeyinden ayrılarak kopmak suretiyle iz bölgesine sürüklenmektedir. Hem kanatların simetrik olması dolayısı ile hem de hareketin tam simetrik davranışı sebebiyle, saat yönünün tersine dönen bir hücum kenarı girdabı da aynı şekilde kanadın aşağı yöndeki hareketi esnasında oluşmaya başlamakta ve kanadın hücum açısını ters yöne değiştirerek akıma dik yön değiştirmesi esnasında koparak iz bölgesine sürüklenmektedir. Daha önce aynı ani dönüş değerinin incelendiği tek kanatlı bir enerji üretici için gerçekleştirilmiş çalışma [42] ile karşılaştırıldığında arkaya kanat

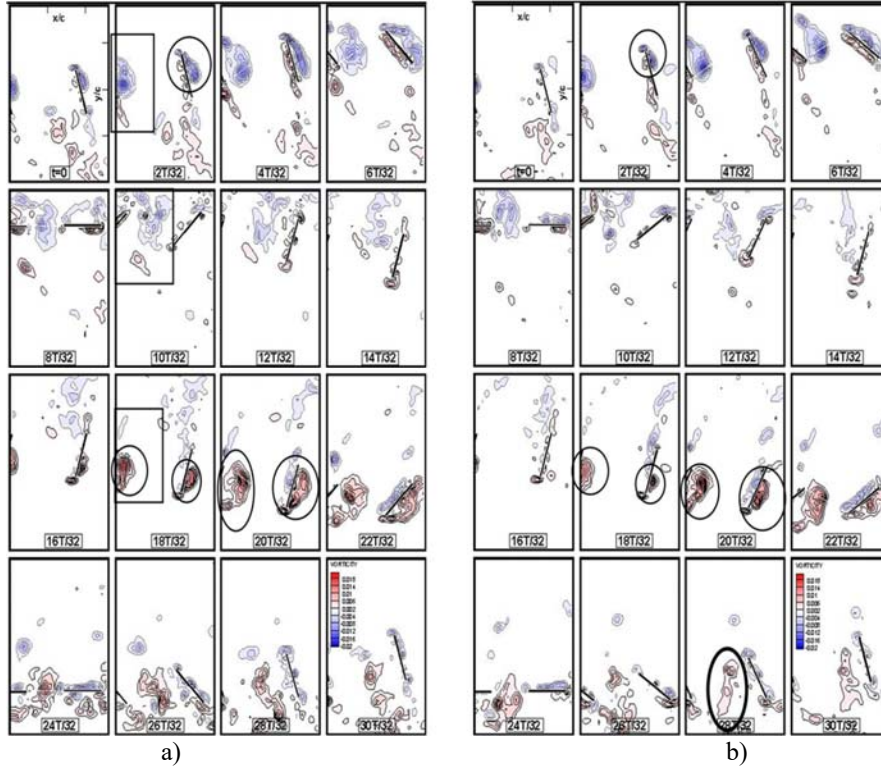
yerleştirilmesi durumunda ön kanadın firar kenarından ayrılan girdapların oluşum ve kanattan koparak iz bölgesine atılması zamanlarında değişiklik olmadığı görülmektedir. Bu durum, ön kanadın etrafında ve yakın iz bölgesinde oluşan akım yapılarının, akım altı bölgesine 2 veter uzunluğu mesafede bir başka kanat yerleştirilmesi halinden etkilenmediğini göstermektedir ve Jones ve Platzer [43] de aynı şekilde ön kanadın arka kanattan etkilenmediğini belirtmiştir.



**Şekil 4.**  $\psi = 0^\circ$  halinde ön ve arka kanatların sinüzoidal hareketi ( $\Delta T_{R-ön} = 0,5$   $\Delta T_{R-arka} = 0,5$ ) için anlık vortisite dağılımları

(Instantaneous vorticity plots for  $\psi = 0^\circ$  and sinusoidal motions of fore and hind wings ( $\Delta T_{R-fore} = 0.5$   $\Delta T_{R-hind} = 0.5$ ))

Ardışık kanat kullanımı halinde ise arkadaki kanat etrafında oluşan girdapların öndeki kanat etrafı ve iz bölgesinde oluşan girdaplardan farklılık gösterdiği görülebilmektedir. Şekil 5a'da  $\Delta T_R = 0,3$  için  $\psi = 0^\circ$  iken  $t = 18T/32$  anına bakılacak olursa, daire içine alınmış olan pozitif işaretli girdaplardan arkadaki kanada ait olanın boyut ve şiddetinin ön kanat alt yüzeyinde oluşan girdaba göre daha az olduğu görülmektedir.  $t = 20T/32$  anında ise aynı girdabın ön kanat alt yüzeyinden ayrılmaya başladığı ancak arka kanat alt yüzeyine hala yapışık kaldığı gözlenmektedir, benzer şekilde davranış  $\Delta T_R = 0,4$  için  $t = 18T/32$  ve  $t = 20T/32$  anlarında da görülmektedir (Şekil 5b). Ani dönüş zamanı değerinin  $\Delta T_R = 0,5$ 'ten  $\Delta T_R = 0,4$ 'e ve  $0,3$ 'e düşürülmesi, kanadın yunuslama yönünü değiştirdiği ani dönme hızının artmasını



**Şekil 5.**  $\psi = 0^\circ$  halinde, ön ve arka kanatların sinüzoidal olmayan hareketi a)  $\Delta T_{R-ön} = 0,3$   $\Delta T_{R-arka} = 0,3$  b)  $\Delta T_{R-ön} = 0,4$   $\Delta T_{R-arka} = 0,4$  için anlık vortisite dağılımları  
(Instantaneous vorticity plots for  $\psi = 0^\circ$  and non sinusoidal motions of fore and hind wings a)  $\Delta T_{R-fore} = 0.3$   $\Delta T_{R-hind} = 0.3$  b)  $\Delta T_{R-fore} = 0.4$   $\Delta T_{R-hind} = 0.4$ )

sağlamaktadır. Ani dönüş zamanı değerinin azalması ile dönüş hızının artması halinde, kanadın yukarı yöndeki hareketinin bitmesi sonrasında hücum kenarından kopan negatif işaretli saat yönünde dönen girdap ile kanadın firar kenarından kopan ve saat yönünün tersine dönen pozitif işaretli girdapların oluşma hızının arttığı ve kanattan daha erken ayrılarak iz bölgesine sürüklendikleri bilinmektedir [44]. Bu durum Şekil 4 ve Şekil 5'te  $t = 2T/32$  anında daire içerisine alınmış negatif işaretli girdapların incelenmesi ile de gözlenebilmektedir. Dolayısıyla ardışık iki kanat kullanımı halinde de  $\Delta T_R$  değerinin değiştirilmesi tekli kanat kullanımı durumunda oluşan şartlarla benzerlik göstermektedir. Ancak, ardışık yerleştirilmiş kanat düzeninde ön ve arka kanatların birbirine eş ani dönüş zamanı değerinde ve faz farkı olmaksızın hareket etmekte iken kanat üzerinde oluşan girdaplarda gerçekleşen farklılığın sebebi Young vd. [45] tarafından da açıklandığı üzere, ön kanadın yapmış olduğu yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketi ile güç üretmesi sonucu arkada bulunan kanadın gördüğü akım hızının azalmasıdır.

Çırpan kanatlı bir enerji üretici ile pozitif güç elde edebilmek için çırpan kanadın iz bölgesindeki ortalama vortisite ve ortalama hız dağılımlarında sürükleme yaratacak şekilde hız-azalması (velocity deficit) gözlenmesi gerektiği bilinmektedir [44]. Ardışık yerleştirilmiş çırpan kanatlar ile yapılan çalışmalarda ise ön kanadın yarattığı girdapların arka kanat tarafından yaratılan girdaplar ile etkileşiminin önem kazandığı görülmektedir. İtici kuvveti elde etmek amacıyla ile

bir silindirin iz bölgesine çırpan kanat yerleştiren Gopalkrishnan vd. [48], yıkıcı etkileşim olarak tanımladığı girdap etkileşiminde arkadaki kanadın da akımdan güç üretebileceğini göstermiştir. Önde bulunan silindirden gelen girdap ile arkadaki kanat tarafından oluşturulan ters işaretli girdabın eşleşerek birleşmesi sonucu yatay eksen doğrultusunda gücü nispeten azalmış ve gelen girdaptan daha küçük olmasına rağmen sürükleme yaratacak şekilde Karman Caddesi şeklinde bir iz bölgesi oluşması halinde akımdan güç elde edilebileceğini belirtilmiştir. İtici için yapıcı etkileşim olarak bahsettiği durumda ise öndeki kanadın firar kenarından iz bölgesine atılan girdap ile aynı işaretli arka kanat hücum kenarı girdabı etkileşiminin gerçekleşmekte olduğunu açıklamıştır. Streitlien vd. [49] de güç elde etmek için arkadaki kanadın hücum kenarı girdaplarının öndeki kanadın oluşturduğu girdaplar ile kesişmesi halinde gerçekleşeceğini, Akhtar vd. [50] ise arkadaki kanadın hücum kenarı girdap ayrılmasının elde edilecek olan itkiyi arttırabileceğini belirtmiştir. Jones vd. [47] ise arkadaki kanadın oluşturduğu girdaplar ile öndeki kanadın firar kenarından kopan ters işaretli girdaplar ile eşleşmesi sonucu arkadaki kanadın öndeki kanadın iz bölgesinden enerji çekilebileceğini açıklamış, bu durum Rival vd. [39] tarafından da gösterilmiştir.

Çırpan kanatlar yardımı ile güç üretimi için yapıcı ve yıkıcı girdap etkileşimleri Kinsey ve Dumas [28] tarafından da tanımlanmıştır ve sadece ön kanattan gelen girdaplar ile arka kanadın yüzeyinde oluşan aynı işaretli veya ters işaretli



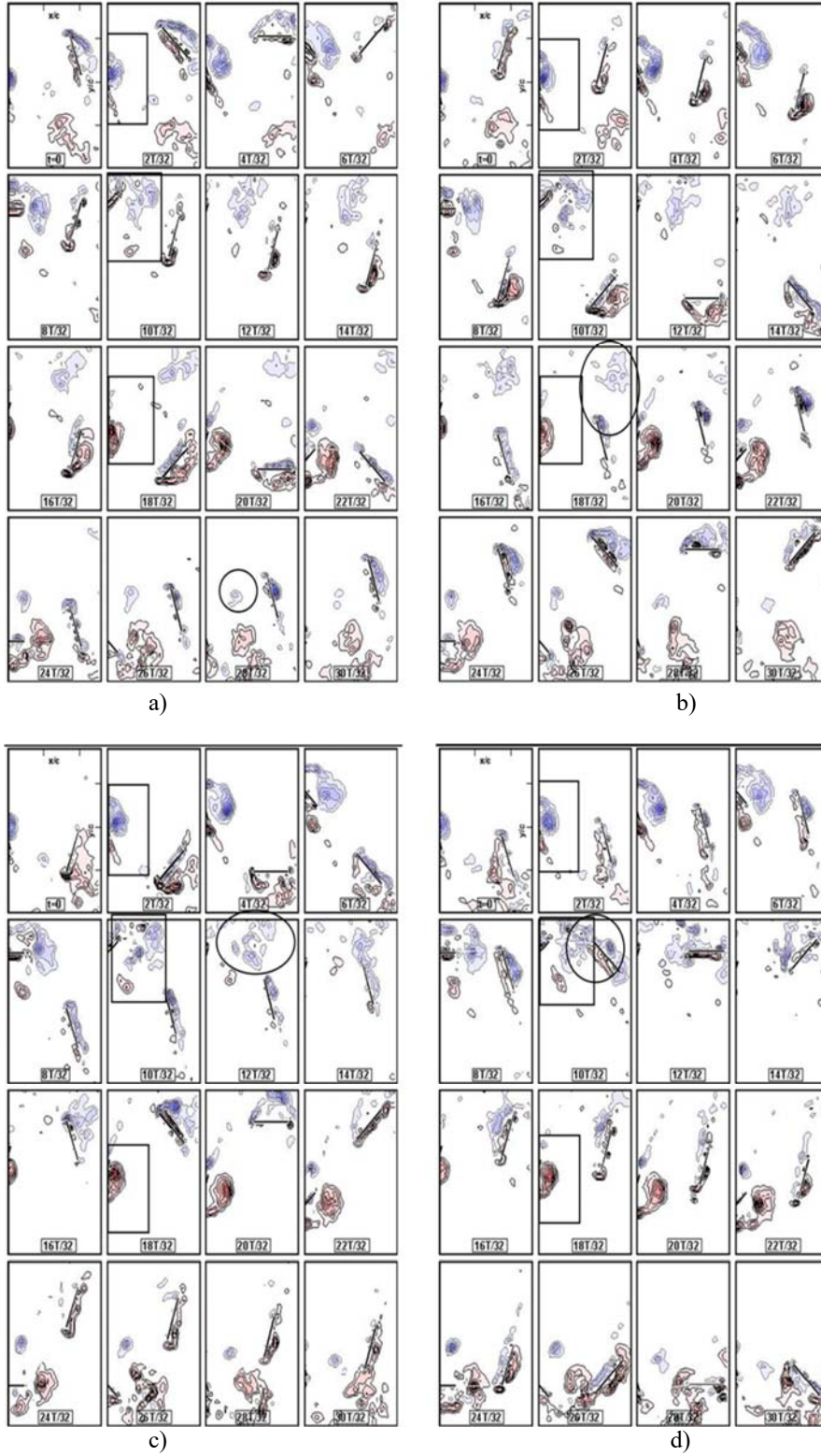
girdapların etkileşiminden bahsetmek yerine arka kanadın hareketinin yönünün de önemli olduğuna değinmişlerdir. Xu vd. [51] bu çalışmada incelenen indirgenmiş frekans mertebesinde de salınım yapan iki kanat için indirgenmiş frekans ve kanatlar arasındaki mesafenin etkisini nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Gopalkrishan vd. [48]'nin sonuçlarını destekler şekilde öndeki kanattan iz bölgesine sürüklenen pozitif işaretli girdabın arka kanadın yukarı hareketi esnasında arka kanat üst yüzeyinde kanadın gördüğü akım hızını artırıcı etki yaratması sonucu anlık taşıma kuvveti ile alt ve üst yüzeyler arası dinamik basınç artışı yaratabildiğini, bu girdabın arka kanadın hücum kenarında oluşan negatif işaretli girdap ile etkileşimi sonucunda da akımdan enerji çekme verimliliğine katkı sağladığını belirtmişlerdir. Öndeki kanattan ayrılan negatif işaretli girdap ile arka kanadın hücum kenarında negatif işaretli girdap etkileşimi sonucunda ise tam tersi etki olduğunu ve enerji verimliliğinin düşeceğini açıklamış, öndeki kanattan ayrılan hücum kenarı girdabının zayıflayıp dağılarak iz bölgesine sürüklenmesi ve arkada bulunan kanat ile etkileşimin az olmasının enerji üretimi için daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir. Xu vd. [51]'nin sonuçlarına göre ön kanat toplam sisteme 2/3 oranında enerji üretimi katkısı yaparken arka kanat ancak 1/3 oranında yapabilmektedir; ancak her halükarda toplam sistemin enerji üretiminde artış gerçekleşmektedir.

Dolayısı ile ardışık yerleştirilmiş yunuslama ve akıma dik yöndeki sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan hareketlerini belirli bir faz farkı ile yapan iki kanadın etrafında ve iz bölgelerinde oluşan akım yapıları incelendiğinde, bir güç üretici için sürüklenme yaratacak şekilde etkileşime giren hücum kenarı ve firar kenarı girdapları şeklinde akım yapılarının oluşmasına ve kanat hareket yönünün değiştiirmeden önce daha uzun süre girdapların kanattan ayrılmadan kalmasına gerek olduğu söylenebilir. Bu bilgiler ışığında Şekil 4 ve Şekil 5 incelenecek olursa, ön kanat ve arka kanat arasında faz farkı bulunmadığı durumda ( $\psi = 0^\circ$ ) arka kanadın aşağı yöndeki hareketini bitirerek yön değiştirmesi sonrasında hücum kenarı etrafında oluşmaya başlayan negatif işaretli ve saat yönünde dönen girdap ile  $t = 26T/32$  anında ön kanattan koparak iz bölgesine sürüklenen pozitif işaretli girdabın birbirlerinin şiddetini bozacak kadar bir etkileşime girmediği görülmektedir. Aynı durum hareket simetrik olduğundan kanat hareketi yukarı yönde bitip kanat yön değiştirdiğinde de gerçekleşmektedir. Kinsey ve Dumas [28]'a göre bu durum güç üretimi için yıkıcı bir etki olmaktadır. Kanadın farklı ani dönüş zamanlarında oluşan girdaplara bakılacak olursa sinüzoidal harekette (Şekil 4) kanadın dönüşü daha yavaş olduğundan ön kanattan gelen ters işaretli girdap kanat yön değiştirdiğinde kanadın alt yüzeyine yaklaşmaktadır ( $t = 30T/32$ ). Ancak daha hızlı dönüş zamanı olan  $\Delta T_R = 0,3$ 'te aynı ana bakacak olursak (Şekil 5a) ön kanattan koparak gelen girdap aynı lokasyonda iken arka kanat akıma dik yönlü ötelenme hareketinde yukarı yönde daha fazla giderek, gelen pozitif işaretli girdabın etkisinden kısmen kurtulmuştur; bu durumda  $\Delta T_R = 0,3$  hareketinin sinüzoidal ( $\Delta T_R = 0,5$ ) hareketten daha çok güç üretimi sağlayacağından bahsedilebilir. Arka kanadın güç

üretimi ve verimliliği ön kanat tarafında oluşarak kanatlar arasındaki iz bölgesine sürüklenen girdaplarla etkileşimden önemli ölçüde etkilenmekte, bu etkileşim ise iki kanat arasındaki faz açısını ayarlayarak kontrol edilebilmektedir [52]. Faz açısı değişimi, akım-cisim etkileşiminin zamanını ve arka kanadın hücum kenarı girdabı ile etkileşime girecek olan girdabın dönüş yönünü belirlemekte kullanılabilir. Böylece tek kanat kullanımını durumuna kıyasla arka kanat yüzeyinde daha büyük ve güçlü bir hücum kenarı girdabı oluşturarak güç üretimi artırılabilir. Şekil 6'da ön ve arka kanatların sinüzoidal olmayan ancak birbirine eş ani dönüş zamanı durumunda hareketi ( $\Delta T_{R-\text{ön}} = \Delta T_{R-\text{arka}} = 0,3$ ) halinde farklı faz açısı değerleri için anlık vortisite dağılımları verilmiştir. Kanatlar arasındaki pozitif değerli faz açısı, arka kanadın ön kanadın ne kadar önünden gittiğini belirtmektedir.  $\Delta T_R = 0,3$  durumu için faz açısı değişimlerinde ön kanat etrafı ve yakın iz bölgesinde oluşan girdaplara bakıldığında (Şekil 5a ve Şekil 6), kare içine alınan girdapların incelenen her bir faz açısı değerinde aynı lokasyon ve aynı şiddette olduğu görülmekte, bu da Rival vd. [46] ile Jones vd. [48]'nin sonuçlarıyla da uyumlu olarak, ardışık yerleştirme düzeninde arkada kanat bulunması halinde, ön kanadın etrafında ve yakın iz bölgesinde oluşan akım yapılarının arka kanatla hareketleri arasındaki farklı faz açısı değerine rağmen etkilenmediğini göstermektedir.

Ardışık yerleştirilmiş kanatlar arası faz açısının artırılması sonucu ön kanadın hareketi arka kanada göre geriden gelecektir. Bu durumda Şekil 6'da da fark edilebileceği üzere artık ön kanattan koparak iz bölgesine sürüklenen girdaplar arka kanat ile etkileşime girmese şekli değişecektir. Bu durum faz açısı artırıldığında daha bariz bir şekilde görülebilmektedir,  $\psi = 45^\circ$  halinde etkileşim minimumda kalmakta ve arka kanat hücum kenarı girdabı çok az bozuntuya uğramaktadır. Ani dönüş zamanı olması dolayısı ile etkileşim sinüzoidal hareket nazaran biraz daha fazla gerçekleşmektedir. Özellikle sinüzoidal harekette ön ve arka kanat girdaplarında etkileşimin az olması hali Rival vd. [46] tarafından akımdan enerji çekme modu olarak tanımlanmaktadır. Şekil 6a'ya bakıldığında  $t = 28T/32$  anında daire içerisinde gösterilen ön kanattan koparak iz bölgesine sürüklenmiş negatif işaretli girdap arka kanat yukarı yöndeki hareketine devam etmekteyken arka kanadın firar kenarı doğrultusunda yaklaşmakta, bu durum da Kinsey ve Dumas [28] tarafından güç üretici için yapıcı etkileşim olarak adlandırılmaktadır.

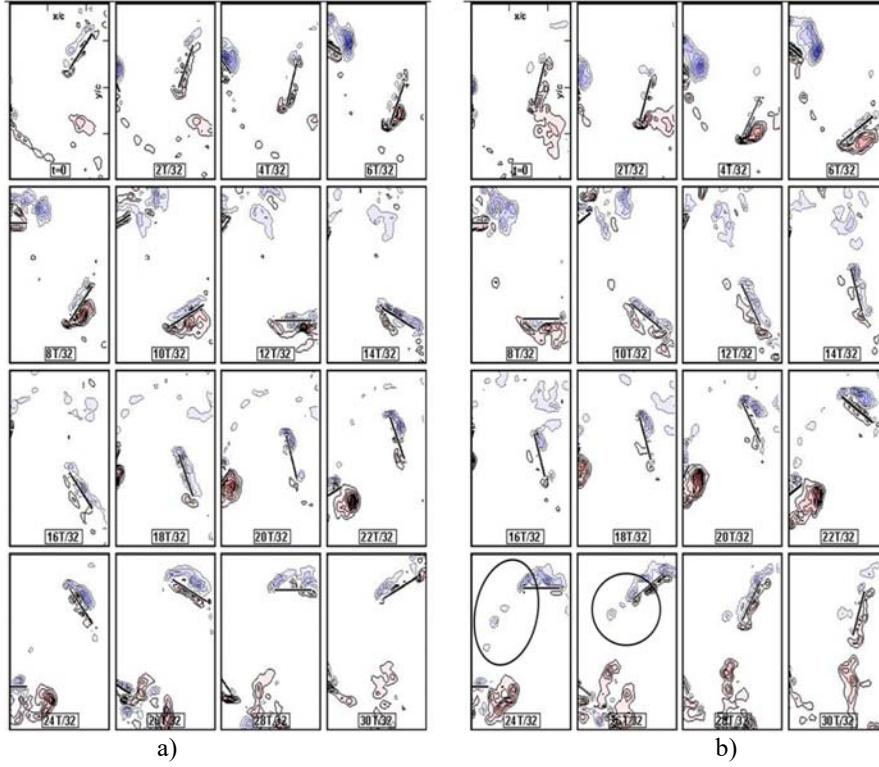
Kanat hareketleri arası faz açısı  $\psi = 135^\circ$  olduğunda ön kanattan ayrılarak gelen girdaplar için, özellikle sinüzoidal hareket halinde, artık neredeyse arka kanadı ıskaladıkları söylenebilir (Şekil 7a). Sinüzoidal hareket için  $\psi = 135^\circ$  faz açısı olması durumu Ashraf vd. [40] tarafından maksimum güç elde edileceği durum olarak hesaplanmış, Akhtar vd. [50] de  $\psi = 138^\circ$ 'yi minimum itki elde edilen yer olarak göstermiştir. Karakas ve Fenercioglu [52] taşıma kuvveti ile akıma dik yönde ötelenme hızının sekronizasyonu sonucu sinüzoidal harekette faz açısının  $\psi = 135^\circ$  olması halinde arka kanadın tüm hareket periyodu boyunca pozitif güç elde edebildiği ve bu durumun tekli kanat kullanımından %4,5



**Şekil 6.** Ön ve arka kanatların  $\Delta T_{R\text{-ön}} = 0,3$   $\Delta T_{R\text{-arka}} = 0,3$  hareketi halinde a)  $\psi = 45^\circ$  b)  $\psi = 135^\circ$  c)  $\psi = 225^\circ$  d)  $\psi = 315^\circ$  için anlık vortisite dağılımları (Instantaneous vorticity plots for  $\Delta T_{R\text{-fore}} = 0.3$   $\Delta T_{R\text{-hind}} = 0.3$  with a)  $\psi = 45^\circ$  b)  $\psi = 135^\circ$  c)  $\psi = 225^\circ$  d)  $\psi = 315^\circ$ )

daha fazla güç üretimi yapabildiği göstermiştir. Şekil 6b’de ise ani dönüş zamanı dolayısı ile,  $\psi = 135^\circ$  için, arka kanat yukarı yönlü hareketini sürdürmekte iken ( $t = 18T/32$ ) kanat

üst yüzeyinde oluşan negatif işaretli girdabın ön kanadın iz bölgesine sürüklenmiş olan aynı işaretli girdap ile az da olsa enerji üretimini azaltacak şekilde yıkıcı etkileşime sebep



**Şekil 7.** Ön ve arka kanatların a)  $\Delta T_{R-ön} = 0,5$   $\Delta T_{R-arka} = 0,5$  hareketi halinde  $\psi = 135^\circ$  b)  $\Delta T_{R-ön} = 0,4$   $\Delta T_{R-arka} = 0,4$  hareketi halinde  $\psi = 180^\circ$  için anlık vortisite dağılımları  
(Instantaneous vorticity plots for a)  $\Delta T_{R-fore} = 0.5$   $\Delta T_{R-hind} = 0.5$  with a  $\psi = 135^\circ$  b)  $\Delta T_{R-fore} = 0.4$   $\Delta T_{R-hind} = 0.4$  with a  $\psi = 180^\circ$ )

olması beklenmektedir. Şekil 7b'de verilen, faz açısı  $\psi = 180^\circ$  için  $\Delta T_R = 0,4$  hareketinde  $t = 24T/32$  ve  $26T/32$  anlarında daire içerisinde gösterildiği şekilde, arka kanat yukarı doğru hareketi esnasında hücum kenarında negatif işaretli girdap oluştuğundan sonra yön değiştirmekte, kanadın üst yüzeyindeki hücum kenarı girdabı ile ön kanattan koparak iz bölgesine sürüklenmiş olan negatif işaretli girdaplar arasında zayıf bir etkileşim olmaktadır.

Ancak bu negatif işaretli girdap parçacıkları büyük bir saat yönünde dönen girdabın küçük parçaları olduğundan arka kanadın hücum kenarı girdabı tarafından kendine doğru çekilmekte ve hücum kenarı girdabı ile birleşmekte ve hücum kenarı girdabını biraz daha kuvvetlendirerek daha uzun süre kanada bağlı kalmasını sağlamaktadır. Bu tarz bir etkileşim Rival vd. [46] tarafından güç üretimi olarak tanımlanıp Jones vd. [47] tarafından da güç üretiminin performansını artırıcı etki olarak tanımlanmıştır. Dolayısı ile faz açısı  $\psi = 180^\circ$  olduğunda  $\Delta T_R = 0,4$  hareketinin performansının test edilen diğer faz açısındaki durumlara göre daha iyi olacağı anlamına gelmektedir.

Faz açısı  $\psi = 225^\circ$ 'e arttırıldığında ise, arka kanat yukarı yöndeki hareketini sürdürürken negatif işaretli girdaplar birleşmekte (Şekil 6c,  $t = 10T/32 - 14T/32$ ) ve kanat yön değiştirdikten sonra iz bölgesine atılmakta, arka kanat aşağı yöndeki hareketini sürdürürken de aynı yönlü girdaplar pozitif işaretli olacak şekilde birleşmektedir ( $t = 26T/32 - 30T/32$ ). Bu durum Kinsey ve Dumas [28] tarafından güç

üretimi için yıkıcı etkileşim olarak tanımlandığı şekilde, arka kanadın yukarı yönlü akıma dik ötelenme hızı ile negatif girdaplar tarafından oluşturulan taşıma kuvveti yönü birbirlerine ters olduğundan güç üretiminde azalmaya sebebiyet vermekte, hatta Gopalkrishnan vd. [48]'e göre itki elde edilmesine neden olmaktadır.

Faz açısı  $\psi = 315^\circ$  olduğunda da benzer şekilde aynı işaretli girdapların birleşimi gözlenmektedir (Şekil 6d).  $t = 10T/32$  anına bakıldığında kanat tam yukarı yöndeki hareketini bitirmek üzere maksimum akıma dik yönde ötelenme genliği hizasına yaklaşmaktayken negatif işaretli girdaplar ile kuvvetli bir etkileşime girmektedir. Aynı faz açısında kanadın ani dönüş zamanı yavaşlatıldığında, sinüzoidal harekette daha az etkileşimin gerçekleşeceği beklenebilir. İncelen her üç dönüş zamanı parametresi için de enerji üretimi minimize edilmiş olsa da, sinüzoidal hareketteki etkileşimin az olmasının diğer aynı faz açısı değerindeki ani dönüş zamanı hareketlerinden biraz daha fazla güç elde edilmesini sağlayabileceği söylenebilir.

Kinsey ve Dumas [28] tarafından da açıklandığı üzere, ortalama vortisite yapıları incelendiğinde kanat arkasında jet-benzeri akım yapıları elde edildiğinde, yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketlerini yapan kanat negatif güç yani itki elde etmektedir. Kanadın ani yön değiştirmesi sonrasında sabit hızda ve yüksek yunuslama hareketi genliği değerinde, akıma dik yönde ötelenme hareketini yaptığı süre içerisinde iz bölgesinde dikkat çeken jet-şeklinde akım

yapıları kanat arkası bölgede orta yatay eksenin üst tarafında saat yönünün tersine dönen pozitif girdap, yatay eksenin alt tarafında ise negatif girdap oluşumu ile, yani ters-Karman Caddesi şeklinde kendini göstermekte, çırpan kanadın güç elde edebilmesi için ise iz bölgesinde hız-azalması (velocity deficit) şeklinde orta yatay eksenin üst tarafında saat yönünde dönen negatif girdap oluşumu, yatay eksenin alt tarafında ise saat yönünün tersine dönen pozitif girdap oluşumu beklenmektedir. Fenercioglu vd. [44]'deki nümerik sonuçlardan elde edilmiş olan güç katsayısı değerleri incelendiğinde kanat arkası iz bölgesindeki ortalama vortisite ve ortalama hız dağılımlarında jet-şeklinde akım yapısı oluştuğunda negatif güç katsayısı elde edildiği gözlenmektedir. Ardışık yerleştirilmiş çırpan kanatların güç üretici için kullanılacak olması dolayısıyla iz bölgesinde hız-azalması (velocity deficit) şeklinde görülen durumlar tercih edilir olacaktır.

Tek çırpan kanatlı bir enerji üretici için  $\Delta T_R = 0,3, 0,4$  ve  $0,5$  ani dönüş değerlerinde yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketleri arasındaki faz açısı  $\phi = 90^\circ$  olduğunda pozitif güç elde edilebilmektedir [53]. Kanat profilinin yeterince büyük genlik ve frekansta salınım yaptığında (yunuslama ve/veya akışa dik yönde ötelenme), akımalı bölgede zamana bağlı ortalama hız alanının jet çıkışı şeklinde olduğu ve bunun da kanada etki eden net itki kuvvetini gösterdiği bilinmektedir [44]. Şekil 8'de verilen ortalama vortisite dağılımları da önde bulunan kanat arkası iz bölgesinde yatay eksenin üstünde saat yönünde dönen negatif girdap ve yatay eksenin alt bölümünde saat yönünün tersine dönen pozitif girdap olarak kendini belli etmekte ve ön kanat tarafından güç elde edilebildiğini göstermektedir.

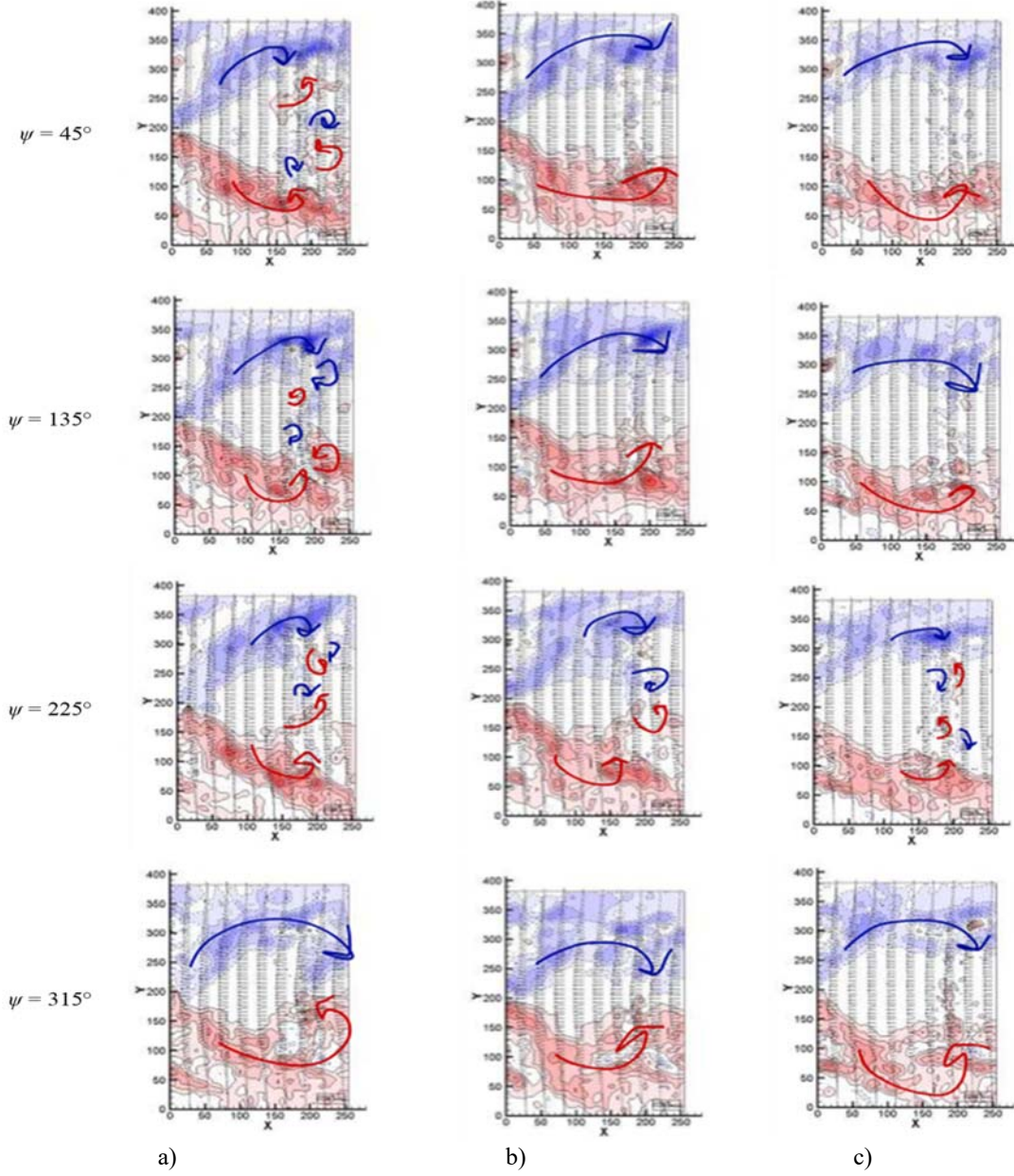
Şekil 8 incelendiğinde, faz açısı  $\psi = 45^\circ$  olduğunda, özellikle  $\Delta T_{R-ön} = \Delta T_{R-arka} = 0,3$  durumunda bariz olarak arka kanadın etrafı ve yakın iz bölgesinde negatif ve pozitif yönlü girdapların yer değiştirdiği görülebilmektedir. Faz açısı  $\psi = 135^\circ$  için de aynı şekilde girdapların arka kanat etrafında ters Karman Caddesi şeklinde bir yapıya dönüştükleri gözlenmektedir. Akhtar vd. [50] ardışık yerleştirilmiş çırpan kanatlar arasındaki faz açısının  $48^\circ$  olması halinde maksimum itkinin elde edilebileceğini nümerik simülasyonlar ile hesaplamıştır.

İtke elde edilebilmesi, çırpan kanatları kullanarak güç elde etmeyi hedefleyen bu çalışmada tercih edilmeyen durumlara karşılık gelmektedir. Ön ve arka kanatların hareketleri arasındaki faz açısının  $45^\circ \leq \psi \leq 135^\circ$  olması halinde  $\Delta T_R = 0,3$  ve  $\Delta T_R = 0,4$  için sinusoidal hareket olan  $\Delta T_R = 0,5$  ile karşılaştırıldığında daha düşük güç katsayısı elde edilebileceği öngörülmektedir. Karakas ve Fenercioglu [52]'nin ölçüm sonuçları da bu öngörüye doğrular şekilde en yüksek gücün sinusoidal harekette faz açısının  $\psi = 135^\circ$  olduğunda elde edildiğini göstermiştir. Bu faz açısı değeri aynı zamanda Ashraf vd.[40] ile Akhtar vd. [50] tarafından da güç üretimi için en iyi durum olarak adlandırılmıştır. Ani dönüş zamanı değerinin  $\Delta T_R = 0,3$  ve  $\Delta T_R = 0,4$  halinde ise arka kanat için ölçülen güç katsayılarının tekli kanat durumundan daha düşük olmasına rağmen [52] ikili sistem

olarak bakıldığında ön ve arka kanadın toplam güç katsayısı değerinin tek kanattan fazla olacağı söylenebilir.

Ön ve arka kanat arasındaki faz açısı artırıldığında ise,  $\psi = 225^\circ$  olduğunda çaprazlanarak yer değiştiren girdap çiftleri olmadığından bu üç ani dönüş zamanı değeri arasında en yüksek gücün, hareketin  $\Delta T_R = 0,4$  değeri ile yapılması halinde gerçekleşeceği öngörülmektedir. Faz açısının  $\psi = 315^\circ$ 'e artırılması halinde ise anlık vortisite dağılımlarında gözlenen yıkıcı etkileşim (Şekil 6), ortalama vortisite dağılımlarında jet-benzeri bir yapı olarak kendini göstermese de, negatif ve pozitif işaretli girdap yapılarının orta yatay ekseninde birbirlerine daha çok yaklaştığı dikkat çekmekte, bu durumun da güç üretimini azaltıcı etkisi olacağı belirtilmektedir.

Ön ve arka kanatların birbirinden farklı ani dönüş zamanı değerlerinde hareket yapmaları halinde ise ön kanadın sinusoidal hareketi seçilerek incelenmiştir. Şekil 9'da ön kanat sinusoidal hareket yaparken arka kanadın faz açısı  $\psi = 0^\circ$  iken  $\Delta T_{R-arka} = 0,3$  ve  $0,4$  için anlık akım yapıları verilmektedir. Ön ve arka kanadın eş hareketi ile karşılaştırıldığında (Şekil 5), ön kanadın daha yavaş ani dönüş değerinin sonucu olarak öndeki kanat yüzeyinde oluşan ve koparak kanat arkası iz bölgesine sürüklenen girdapların oluşum ve kopma anlarının daha yavaş gerçekleştiği görülebilir. Şekil 9'da  $t = 10T/32$  anında belli olduğu şekilde ön kanat akıma dik yönde ötelenme hareketi genliğinin en üst pozisyonuna geldikten sonra hareketini aşağı yönde sürdüreceği şekilde yer değiştirmekte, bu esnada üst yüzeyde oluşan negatif işaretli girdap ön kanadın iz bölgesine ve arka kanadın hücum kenarına doğru sürüklenmektedir. Ön kanadın firar kenarından pozitif işaretli girdabın da ayrılması ile negatif ve pozitif işaretli akım yapıları arka kanadın hücum kenarında oluşan negatif işaretli girdabın arka kanat yüzeyine tutunmasında bozuntuya yol açmaktadır. Ardışık kanatların eş hareketi durumunda ise negatif işaretli girdap yapısını bozan pozitif işaretli girdap görülmemektedir (Şekil 5). Ön ve arka kanatların aşağı yöndeki hareketlerine devam etmeleri esnasında kanatların alt yüzey hücum kenarlarında pozitif işaretli girdaplar oluşarak gelişmeye başlamaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere, ön kanadın yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketleri ile güç üretmesi sonucu arkada bulunan kanadın gördüğü akım hızı azalmakta, arkadaki kanada ait girdapların boyut ve şiddeti ön kanada ait girdaplara göre daha az olmaktadır. Kanat hareketleri arasında faz farkı olmaması ancak ön ve arka kanadın eş olmayan ani dönüş değerinde hareket etmesi neticesiyle görülmektedir ki, ön kanadın alt yüzeyinde oluşan pozitif işaretli girdap  $t = 22T/32$  anında ön kanattan ayrılmaya başlamakta, arka kanadın pozitif işaretli girdabı ise kanada daha yakın durmaya devam etmektedir. Şekil 5'teki ön ve arka kanatların eş hareket haline tekrar bakıldığında ise  $t = 22T/32$  anında pozitif işaretli girdabın ön kanada daha yakın konumlanmış olduğu ve ayrılmanın tam gerçekleşmediği ayrıca ön ve arka kanatlara ait girdapların yataydaki hizalarının aynı olduğu görülmektedir. Bu durum eş olmayan harekette öndeki kanadın sinusoidal hareketi sonucu öndeki

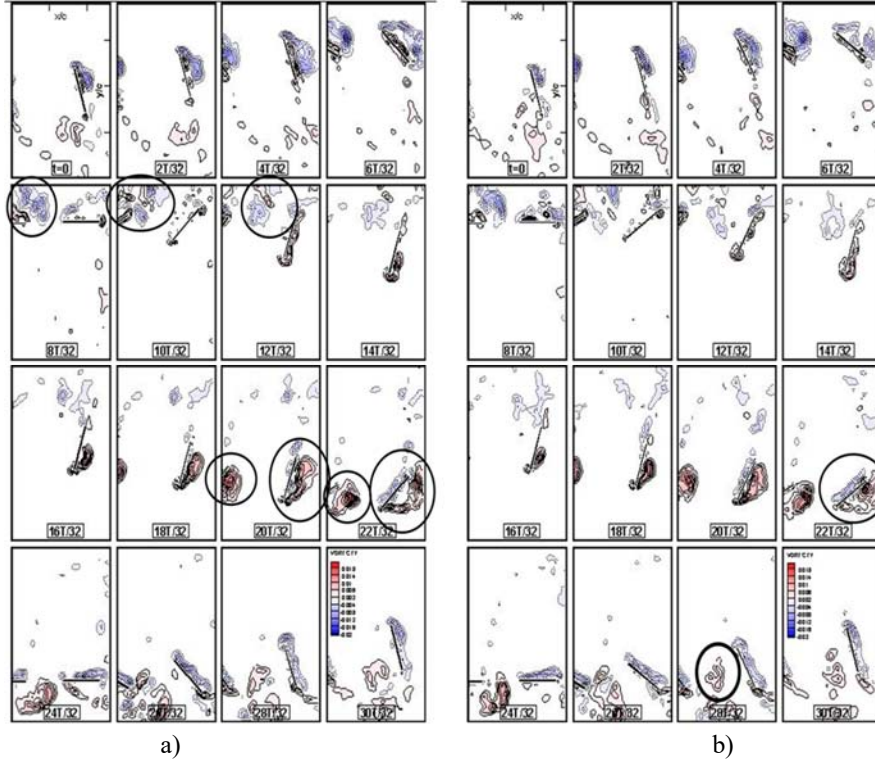


**Şekil 8.** Ön ve arka kanatların a)  $\Delta T_{R-ön} = 0,3$   $\Delta T_{R-arka} = 0,3$  b)  $\Delta T_{R-ön} = 0,4$   $\Delta T_{R-arka} = 0,4$  c)  $\Delta T_{R-ön} = 0,5$ ,  $\Delta T_{R-arka} = 0,5$  hareketi halinde kanat hareketleri arasındaki farklı faz açısı değerleri ( $\psi$ ) için ortalama hız vektörleri ve ortalama vortisite dağılımları  
(Average velocity and average vorticity plots for a)  $\Delta T_{R-fore} = 0.3$   $\Delta T_{R-hind} = 0.3$  b)  $\Delta T_{R-fore} = 0.4$   $\Delta T_{R-hind} = 0.4$  c)  $\Delta T_{R-fore} = 0.5$   $\Delta T_{R-hind} = 0.5$  for different phase angle ( $\psi$ ) values)

kanadın arkadaki kanat tarafından görülen akım hızını yeterince azaltmadığını göstermektedir. Eş olmayan harekette  $t = 26T/32$  anına gelindiğinde ön kanattan ayrılan girdabın içerisinde, kanadın ters yöndeki hareketinde olduğu şekilde yine hem pozitif hem negatif işaretli akım yapılarının bulunduğu görülmektedir.

Şekil 5'teki kanatların eş hareketi esnasında ani dönüş zamanı değeri  $\Delta T_{R-ön} = \Delta T_{R-arka} = 0,4$  olduğunda  $t = 28T/32$  anında, ön kanadın iz bölgesine sürüklenmiş olan pozitif işaretli girdap (daire içinde) bariz bir şekilde arka kanadın

yukarı yönlü hareketi esnasında arka kanadın hücum kenarına doğru çekilerek arka kanadın alt yüzeyine paralel kalarak yukarı doğru sürüklenmekte olduğu dikkat çekmekte ve bu durum diğer  $\Delta T_R$  değerlerinde hareket eden kanatlarda da benzer şekilde gözlenmekte idi. Şekil 9'a bakıldığında ise ön kanadın hareketi sinüzoidal olduğunda ön kanattan kopan pozitif girdabın (daire içerisinde) arka kanadın firar kenarına yakın kaldığı görülmekte ancak arka kanat tarafından emmeye maruz kalmamaktadır. Gopalkrishan vd. [48] ve Xu vd. [51]'nin de belirtmiş oldukları üzere akımdan enerji çekme verimliliğine katkı sağlanması öndeki kanattan iz



**Şekil 9.**  $\psi = 0^\circ$  halinde a)  $\Delta T_{R\text{-ön}} = 0,5$   $\Delta T_{R\text{-arka}} = 0,3$  b)  $\Delta T_{R\text{-ön}} = 0,5$   $\Delta T_{R\text{-arka}} = 0,4$  için anlık vortisite dağılımları  
(Instantaneous vorticity plots for  $\psi = 0^\circ$  with a)  $\Delta T_{R\text{-fore}} = 0.5$   $\Delta T_{R\text{-hind}} = 0.3$  b)  $\Delta T_{R\text{-fore}} = 0.5$   $\Delta T_{R\text{-hind}} = 0.4$ )

bölgesine sürüklenen pozitif işaretli girdabın arka kanadın yukarı hareketi esnasında arka kanadın hücum kenarında oluşan negatif işaretli girdap ile etkileşimi sonucunda elde edilebilmektedir. Bu durumda  $\psi = 0^\circ$  iken ön ve arka kanadın birbiriyle eş ani dönüş zamanı değerinde hareket etmesi halinde gerçekleşen yapıcı etkileşim sonucu enerji verimliliğine katkının ön kanadın sinüzoidal hareket yaparken arka kanadın sinüzoidal olmayan ani dönüş zamanı değeri kullanması halinden daha fazla olacağı söylenebilir.

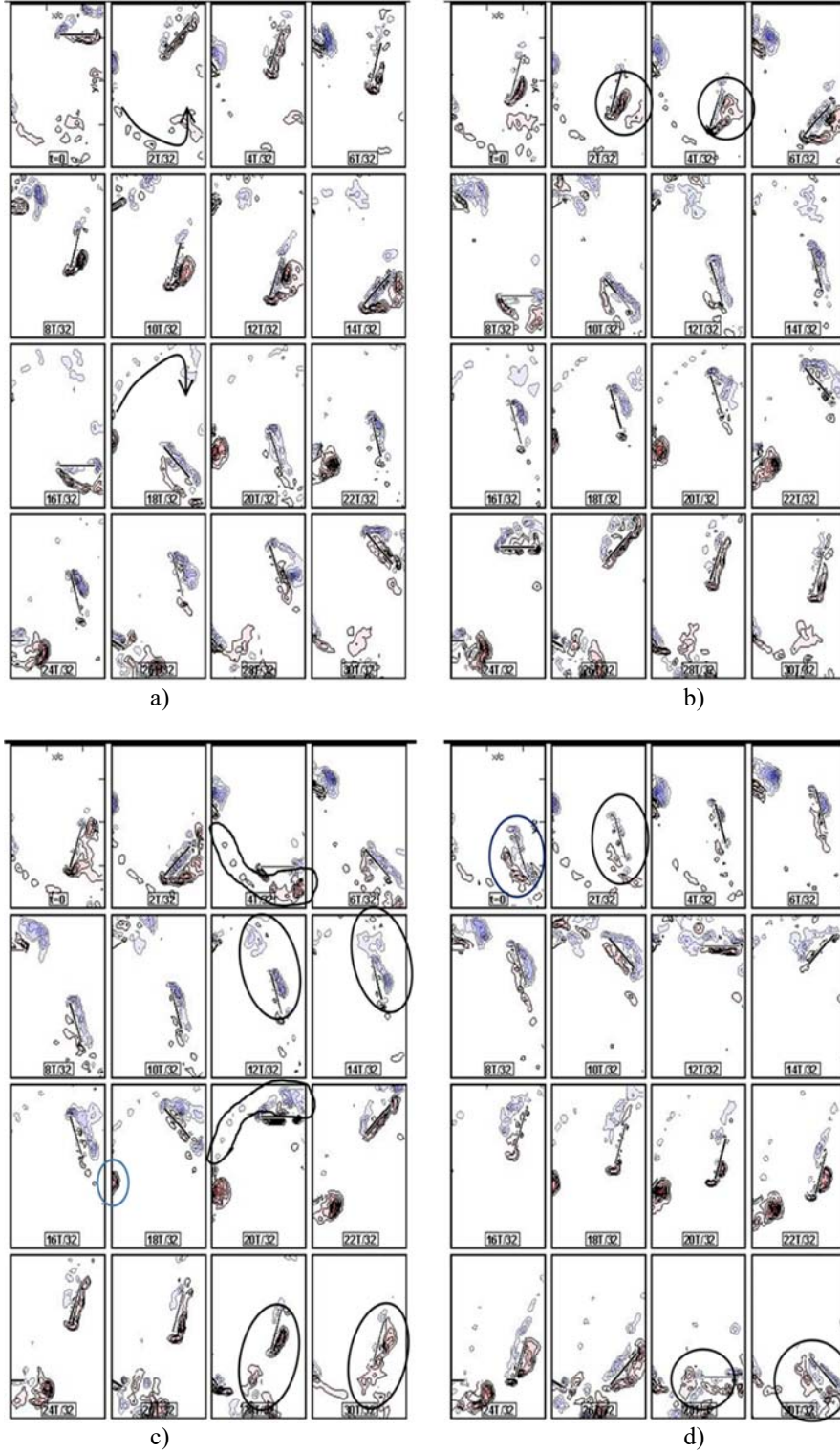
Faz açısı  $\psi = 90^\circ$  olduğunda ön kanat sinüzoidal, arka kanat  $\Delta T_{R\text{-arka}} = 0,3$  ani dönüş değerindeki hareketlerini yapmakta iken (Şekil 10a) arka kanadın aşağı yönlü hareketi esnasında ön kanat yukarı yönlü hareketini sürdürmekte ve ön kanattan koparak iz bölgesine sürüklenen girdaplar arka kanat ile etkileşime girmemekte, bu durumda da herhangi bir girdap etkileşimi olmaması sonucu güç üretiminde bozuntu yaratılmamaktadır. Faz açısının  $\psi = 180^\circ$  olması halinde ise, arka kanadın aşağı yönlü hareketi esnasında ön kanattan koparak gelen pozitif girdap arka kanadın hücum kenarında oluşmakta olan aynı işaretli girdap ile birleşerek (Şekil 10b, daire içerisinde) arka kanadın hücum kenarı girdabının gücünü arttırmakta ve arka kanat yüzeyinde daha uzun süre kalmasını sağlamaktadır. Bu durum da Gopalkrishan vd. [48] tarafından itki elde etmek için yapıcı etkileşim olarak bahsedilen durum ile benzerlik göstermektedir.

Faz açısının artması ile  $\psi = 225^\circ$  durumunda (Şekil 10c), arka kanadın akıma dik yönde öteleme genliğinin minimum noktasında ( $t = 4T/32$ ) kanat tam yunuslama açısı yönünü

değiştirmeden önce, öndeki sinüzoidal hareket eden kanattan kopup iz bölgesine uzayan pozitif girdabın, Gopalkrishan vd. [48] tarafından itki için yapıcı olarak tanımlandığı şekilde, arka kanadın firar kenarı hizasında birleştiği görülmektedir. Arka kanadın yukarı yönlü hareketine devam ederek akıma dik ötelenme hareketi genliğinin orta noktasını geçtikten sonra ( $t = 12T/32$ ) ise, öndeki kanattan koparak iz bölgesine sürüklenmiş olan negatif girdap, Xu vd. [51] tarafından güç üretimi için yıkıcı etkileşim olarak tanımlanacak şekilde, arka kanadın hücum kenarında oluşan aynı işaretli hücum kenarı girdabı ile birleşmekte ve büyüyerek gücünü arttırmaktadır ( $t = 14T/32$ ).

Bu durum ters işaretli olacak şekilde arka kanadın aşağı yönlü hareketi esnasında da gözlenmektedir. Oluşan bu eş işaretli girdap birleşmeleri  $\Delta T_{R\text{-arka}} = 0,3$  için ön ve arka kanadın eş hareketi esnasında gerçekleşen durumlara göre daha geç zamanda gerçekleşmekte (Şekil 6c,  $t = 10T/32$  yerine Şekil 10c,  $t = 12T/32$ ) ve ön kanattan ayrılarak gelen girdap arka kanada daha geç varmaktadır. Dolayısı ile ön kanadın sinüzoidal hareket yapması halinde enerji üretime yıkıcı etki eden eş işaretli girdap birleşmeleri kanadın hareket periyodunda daha geç gerçekleşmektedir. Kinsey ve Dumas [28] tarafından da arka kanadın yukarı hareketi esnasında gelen negatif girdap ile kanatta oluşan taşıma kuvveti yönünün birbirine ters olması sonucu güç üretiminde bozuntu oluşacağı açıklanmıştır.

Faz açısı  $\psi = 315^\circ$ 'e artırıldığında ise ön kanattan ayrılan girdaplar ile arka kanatta oluşan ters işaretli girdap



**Şekil 10.**  $\Delta T_{R-ön} = 0,5$   $\Delta T_{R-arka} = 0,3$  halinde a)  $\psi = 90^\circ$  b)  $\psi = 180^\circ$  c)  $\psi = 225^\circ$  d)  $\psi = 315^\circ$  için anlık vortisite dağılımları  
(Instantaneous vorticity plots for  $\Delta T_{R-fore} = 0.5$   $\Delta T_{R-hind} = 0.3$  with a)  $\psi = 90^\circ$  b)  $\psi = 180^\circ$  c)  $\psi = 225^\circ$  d)  $\psi = 315^\circ$ )

etkileşimleri görülmekte, arka kanat yukarı hareketini gerçekleştirmekteyken hücum kenarında negatif hücum kenarı girdabı oluşmakta, bu esnada ön kanattan koparak sürüklenen pozitif girdap da arka kanadın alt yüzeyine doğru yaklaşmaktadır. Bu durum Xu vd. [51] tarafından güç

üretimi için yapıcı etkileşim olarak tanımlanmıştır, dolayısı ile Şekil 10d'de  $t = 28T/32$  ile  $2T/32$  arasında güç üretimi anlık olarak artacaktır. Öndeki kanadın hareketi sinüzoidal olduğunda kanat yunuslama açısını ters yöne doğru daha yavaş değiştirmektedir;  $\Delta T_R = 0,5$  yunuslama açısı değişim

zamanının toplam hareket periyodunun yarısı olduğunu ifade etmektedir. Ön ve arka kanatların hareketleri arasında belirli bir faz açısı olması halinde de arka kanat ön kanada kıyasla verilen faz açısı kadar önden gitmektedir, dolayısı ile ön ve arka kanatların eş olmayan hareketinde faz açısı arttıkça önde bulunan kanat giderek daha geride kalmaktadır.

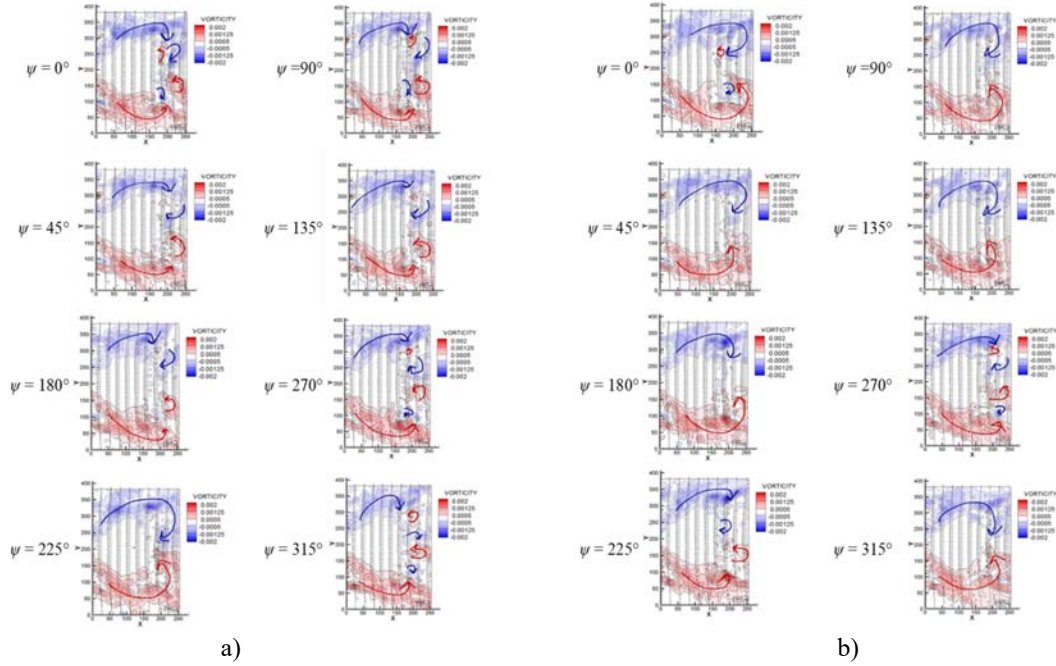
Şekil 11'de verilen ortalama hız vektörleri ve ortalama vortisite dağılımları incelendiğinde görülmektedir ki, ön kanadın sinüzoidal hareketi esnasında arka kanadın sinüzoidal olmayan ani dönüş değerleri için, ön kanadın etrafı ve iz bölgesindeki negatif ve pozitif işaretli akım yapılarının aralarındaki  $y$ -ekseni boyunca olan mesafe, ön ve arka kanadın eş hareketi sonucu oluşan mesafeden daha fazladır. Bu durum da ön kanadın hareketinin ve dolayısı ile kanat etrafında oluşan ve iz bölgesine sürüklenen girdapların oluşma ve koparak iz bölgesine sürüklenme anlarının yavaşladığının göstergesidir.

Şekil 11'de verilen ortalama hız vektörleri ve ortalama vortisite dağılımları kanat hareketleri arasındaki farklı faz açısı değerleri için incelendiğinde, arka kanadın ani dönüş zamanı değerinin  $\Delta T_{R-arka} = 0,3$  olması halinde faz açısının  $\psi = 270^\circ$  ve  $\psi = 315^\circ$  olduğu anlarda jet-benzeri oluşumlar görülmektedir. Bu durum üst paragrafta bahsedilen anlık güç üretimindeki düşüşün görülebileceği hali belirtmektedir. Ani yunuslama açısı değişiminin  $\Delta T_{R-arka} = 0,4$  olması halinde ise faz açısının  $\psi = 45^\circ$  ile  $\psi = 180^\circ$  arasında sürüklenme yaratacak şekilde Karman Caddesi benzeri ortalama vortisite dağılımları görülmekte, bu durumlar da öndeki kanadın ürettiği gücün yanısıra arkadaki kanadın da güç elde

edilebileceği durumlara karşılık gelmektedir. Arka kanat için gerçekleştirilen kuvvet ölçümleri sonucu hesaplanan ortalama güç katsayısı değerleri Karakas ve Fenercioglu [52]'den adapte edilen sonuçlar ile birlikte ön kanadın arka kanatla sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan eş hareketi ve ön kanat yalnızca sinüzoidal hareket gerçekleştirilmekte iken arka kanadın sinüzoidal olmayan hareketi yaptığı durumlarda tüm faz açısı değerleri için Şekil 12'de verilmektedir.

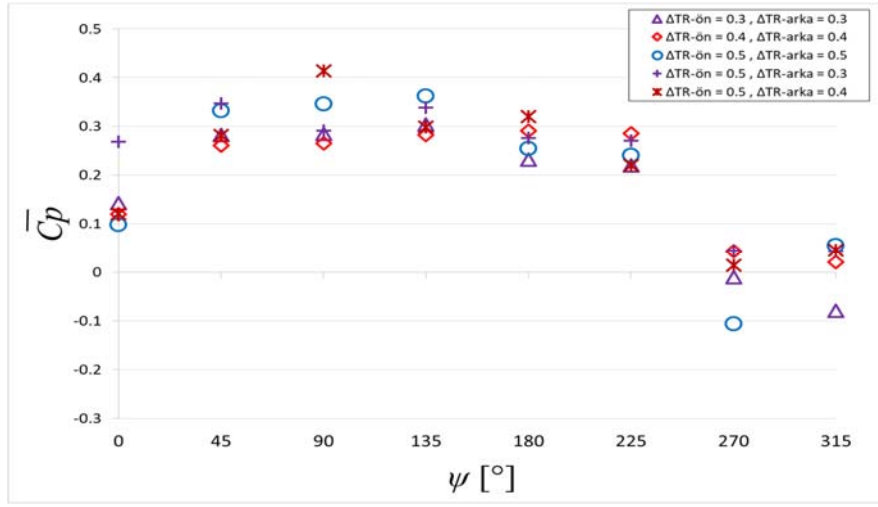
Şekil 5a ve Şekil 5b'de verilen akım yapılarının etkileşiminde de bahsedildiği üzere, ön ve arka kanat hareketlerinin periyodik ancak sinüzoidal olmadığı eş hareket durumunda  $\Delta T_{R-ön} = \Delta T_{R-arka} = 0,3$  ve  $\Delta T_{R-ön} = \Delta T_{R-arka} = 0,4$  için kanatlar arasındaki faz açısının  $\psi = 0^\circ$  halinde elde edilen ortalama güç katsayısı ( $\overline{C_p}$ ) değerlerinin ön ve arka kanatların her ikisinin de sinüzoidal hareket yapmakta iken elde edilen  $\overline{C_p}$  değerinden büyük olduğu Şekil 12'de görülmektedir. Faz açısının artması ile Şekil 6a'da ön kanattan kopan girdapların arka kanat girdapları ile daha az etkileşime girmekte olduğu şeklinde bahsedilen  $\Delta T_{R-ön} = \Delta T_{R-arka} = 0,3$ ,  $\psi = 45^\circ$  durumunda ise  $\overline{C_p}$  değerinin arttığı görülmektedir.

Ön ve arka kanatların eş olmayan hareketlerine bakıldığında ise (Şekil 12) incelenen her durumda pozitif ortama güç üretiminin sağlandığı görülebilir. Faz açısı  $\psi = 90^\circ$  olduğunda ön kanat sinüzoidal, arka kanat  $\Delta T_{R-arka} = 0,3$  ani dönüş değerindeki hareketlerini yapmakta iken Şekil 10a'da verilen anlık vortisite dağılımlarında gösterildiği şekilde ön kanattan koparak iz bölgesine sürüklenen girdapların arka kanat ile



**Şekil 11.** Ön ve arka kanatların a)  $\Delta T_{R-ön} = 0,5$ ,  $\Delta T_{R-arka} = 0,3$  b)  $\Delta T_{R-ön} = 0,5$ ,  $\Delta T_{R-arka} = 0,4$  hareketi halinde kanat hareketleri arasındaki farklı faz açısı değerleri ( $\psi$ ) için ortalama hız vektörleri ve ortalama vortisite dağılımları (Average velocity and average vorticity plots for a)  $\Delta T_{R-fore} = 0.5$ ,  $\Delta T_{R-hind} = 0.3$  b)  $\Delta T_{R-fore} = 0.5$ ,  $\Delta T_{R-hind} = 0.4$  for different phase angle ( $\psi$ ) values)





Şekil 12. Arka kanat için ortalama güç katsayısının faz açısıyla değişimi  
(Mean power coefficient variations with phase angle for the hind wing)

etkileşime girmemesi sonucu güç üretiminde bozuntu yaratılmadığı Şekil 12'de de görülebilir. Şekil 11'de verilen ortalama hız vektörleri ve ortalama vortisite dağılımları ile Şekil 12'de verilen ortalama güç katsayısı değerleri birlikte değerlendirildiğinde, çırpan kanatlar tarafından yaratılan girdapların birbirleri ile etkileşimlerinin güç üretimini üzerinde aktif rol oynamakta olduğu gözlemlenebilir. Genel olarak ön kanadın sinüzoidal hareket yapması halinde (Şekil 10), ön ve arka kanadın eş hareketi ile karşılaştırıldığında (Şekil 5 ve Şekil 6), ön kanat girdaplarının oluşum ve kopma anlarının daha yavaş gerçekleştiği görülmekte, bu durum da arka kanadın ortalama güç katsayısına olumlu etki ederek ön ve arka kanatların eş olmayan hareketi halinde çırpan kanatlı güç üretici sisteminin daha verimli çalışabilmesini sağlamaktadır.

Ön kanadın sinüzoidal hareketi ( $\Delta T_{R-ön} = 0,5$ ) ile arka kanadın ani dönüş zamanı değerindeki hareketinin  $\Delta T_{R-arka} = 0,3$  olması halinde incelenen tüm faz açısı değerlerinde elde edilen ortalama güç katsayısı değerleri ön kanadın arka kanada eş hareketi durumundan ( $\Delta T_{R-ön} = \Delta T_{R-arka} = 0,3$ ) daha büyüktür (Şekil 12). Bunun sebebi, ön kanadın sinüzoidal hareketinde  $\Delta T_{R-ön} = 0,3$  hareketine kıyasla ön kanadın yunuslama yönünü değiştirdiği dönme hızının daha az olması ve dolayısı ile ön kanadın yapmış olduğu yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketi ile daha az güç üretmesi sonucu arkada bulunan kanadın gördüğü akım hızının daha fazla olmasıdır. Ön kanat sinüzoidal hareket yapmakta iken arka kanadın ani dönüş zamanı değerlerinde akım yapıları incelendiğinde özellikle  $45^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$  arasında sürüklenme yaratacak şekilde ortalama vortisite dağılımları görülmüştür (Şekil 11). Ön kanadın  $\Delta T_{R-ön} = 0,5$  arka kanadın  $\Delta T_{R-arka} = 0,3$  hareketi halinde kanatlar arası faz açısı  $\psi = 270^\circ$  için eş hareketteki  $\Delta T_{R-ön} = \Delta T_{R-arka} = 0,3$  durumuna kıyasla %23,3 daha yüksek ortalama güç katsayısı elde edilebilmektedir.  $\Delta T_{R-ön} = 0,5$ ,  $\Delta T_{R-arka} = 0,4$  olduğu durumda ise  $\psi = 90^\circ$  için eş hareket  $\Delta T_{R-ön} = \Delta T_{R-arka} = 0,4$ 'e kıyasla ortalama güç katsayısı %55,7 artarak ortalama güç katsayısı değerlerinde %3,6 fark olacak şekilde tekil çırpan

kanatlı güç üretici [52] performansına yaklaşmaktadır, bu sayede ikili sistem olarak bakıldığında ardışık kanatlı bir enerji üreticinin toplam ortalama güç katsayısı maksimize edilebilecektir.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çırpan kanatlı bir enerji üreticinin performansı temel olarak hücum ve firar kenarı girdaplarının davranışından etkilenmektedir. Güç üreten bir çırpan kanadın ortalama vortisite dağılımları incelendiğinde sürüklenme yaratacak şekilde Karman Caddesi benzeri akım yapıları göstermekte, negatif ortalama güç elde edildiğinde ise jet-benzeri akım yapıları görülmektedir. Çırpan kanat yöntemini kullanan bir enerji üreticinin değişken akım koşulları altında optimum güç çıkışı koruyabilmek için kanatların etrafında girdap yapılarının oluşma ve iz bölgesine atılma zamanlarını kontrol edebilmek önem kazanmakta, bu kontrol de kanat hareketleri arasındaki faz açısı ve kanatların ani dönüş zamanı ile ilintili olmaktadır. Bu çalışmada, ardışık yerleştirilmiş çırpan kanatlardan arkadaki kanadın performansının, ön kanat hareketi sonucu yaratılan girdaplara, bu girdapların oluşarak iz bölgesine sürüklenme zamanına ve arka kanadın etkileşime girdiği girdap anındaki hareket yönüne bağlı olduğu açıklanmıştır.

Elde edilen güç katsayısı değerleri göstermektedir ki ön kanat iz bölgesi ile etkileşim arka kanadın enerji üretme performansını etkilemektedir. Ön kanadın sinüzoidal veya sinüzoidal olmayan ani dönüş hızı ( $\Delta T_R$ ) değerlerinde oluşan akım yapılarının kanatlar arası farklı faz açısı ( $\psi$ ) değişimi sonucu arka kanada yapıcı veya yıkıcı etkisi ortaya konulmuştur. Niceliksel akım yapıları ve ortalama vortisite dağılımları ve elde edilen ortalama güç katsayısı değerleri incelendiğinde, ön ve arka kanatların birbirleriyle aynı ani dönüş değerinde hareket etmeleri halinde en yüksek gücün sinüzoidal harekette ( $\Delta T_{R-ön} = \Delta T_{R-arka} = 0,5$ ) faz açısının  $\psi = 135^\circ$  olduğu durumda elde edildiği görülmüştür. Faz farkı değerinin  $45^\circ \leq \psi \leq 135^\circ$  arasında olması halinde eş

harekette  $\Delta T_{R-\text{ön}} = \Delta T_{R-\text{arka}} = 0,3$  ve  $\Delta T_{R-\text{ön}} = \Delta T_{R-\text{arka}} = 0,4$  için  $\Delta T_{R-\text{ön}} = \Delta T_{R-\text{arka}} = 0,5$  ile karşılaştırıldığında daha düşük pozitif ortalama güç katsayısı elde edilmiştir. Ön kanat sinüzoidal hareket yapmakta iken  $\Delta T_{R-\text{ön}} = 0,5$  arka kanadın  $\Delta T_{R-\text{arka}} = 0,3$  ani dönüş zamanı değerinde hareket etmesi halinde faz açısının  $\psi = 270^\circ$  ve  $\psi = 315^\circ$  olması durumunda güç üretilmeyecek şekilde jet-benzeri oluşumlar görülmektedir.  $\Delta T_{R-\text{ön}} = 0,5$ ,  $\Delta T_{R-\text{arka}} = 0,4$  olması halinde ise  $45^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$  arasında sürüklenme yaratacak şekilde ortalama vortisite dağılımları görülmekte, bu da öndeki kanadın ürettiği gücün yanı sıra arkadaki kanadın da güç elde edebileceğini göstermekte,  $\psi = 90^\circ$  için sinüzoidal ön kanat hareketine sahip çift çırpan kanatlı güç üreticinin  $\Delta T_{R-\text{arka}} = 0,4$  ile hareket eden arka kanadında ölçülen ortalama güç katsayısı arada %3,6 fark olacak şekilde tekil çırpan kanatlı güç üretici performansına yaklaşmaktadır.

Ardışık kanatlı bir enerji üreticisine bütün ikili sistem olarak bakıldığında yapıcı girdap etkileşimi gerçekleştirilebilmesi halinde daha güçlü girdap oluşturarak enerji üretiminin maksimize edilebileceği söylenebilir. Ön kanadın sinüzoidal yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketi yapması durumunda ön kanattan ayrılarak gelen girdap arka kanada daha geç varmakta, enerji üretime yıkıcı etki eden eş işaretli girdap birleşmeleri kanadın hareket periyodunun daha ileri bir safhasında gerçekleşmektedir. Dolayısı ile sinüzoidal hareket eden ön kanat kullanarak arka kanadın gördüğü akışın diğer ani dönüş değerlerine nazaran daha az yavaşlatılması sayesinde ardışık kanatlı sistemde daha verimli enerji elde edilmesi sağlanabilmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma 214M385 No'lu TÜBİTAK Projesi kapsamında gerçekleştirilmiş ve desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Platzer M.F., Young J., Lai J.C.S., Flapping-wing technology: the potential for air vehicle propulsion and airborne power generation, 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, Anchorage, ABD, 2008.
- McKinney W., DeLaurier J., Wingmill: An Oscillating-Wing Windmill, Journal of Energy, 5(2), 109-115, 1981.
- Platzer M.F., Bradley R.A., Oscillating-Wing Power Generator with Flow-Induced Pitch-Plunge Phasing, Patent No: US 2009/0121490, 2009.
- Platzer, M.F., Sarigul-Klijn, N., A Novel Approach to Extract Power from Free-Flowing Water and High-Altitude Jet Streams, ASME Energy Sustainability Conference, San Francisco, ABD, 2009-90146, 2009.
- Tidal energy. Stingray, Engineering Business Engineering Business Ltd. [http://www.tidalenergy.eu/engineeringbusiness\\_stingray.html](http://www.tidalenergy.eu/engineeringbusiness_stingray.html). Yayın tarihi Temmuz 5, 2009. Erişim tarihi Ocak 31, 2018.
- BioPower Systems (BPS). bioSTREAM. <http://bps.Energy/biostream>. Yayın tarihi Eylül 12, 2015. Erişim tarihi Ocak 31, 2018.
- Aniprop. Bilder vom Hubflügelgenerator HFG3. [http://www.aniprop.de/sites/default/files/aniprop\\_hfg3\\_bilder\\_einbau.html](http://www.aniprop.de/sites/default/files/aniprop_hfg3_bilder_einbau.html). Yayın tarihi Haziran 23, 2004. Erişim tarihi Ocak 31, 2018.
- Subsea World News. DOE Gives USD 40 Mln for Wave Energy Test Facility in Oregon. <https://subseaworldnews.com/2016/12/22/doe-gives-usd-40-mln-for-wave-energy-test-facility-in-oregon/>. Yayın tarihi Aralık 2, 2016. Erişim tarihi Ocak 31, 2018.
- Festo. DualWingGenerator. <https://www.festo.com/group/de/cms/10222.htm>. Yayın tarihi Haziran 18, 2003. Erişim tarihi Ocak 31, 2018.
- Herbosch-Kiere. Pulse Tidal Energy System. <http://www.herbosch-kiere.co.uk/projects/pulse-tidal-energy-system.html>. Yayın tarihi Aralık 21, 2014. Erişim tarihi Ocak 31, 2018.
- Kloos G., Gonzales C.A., Finnigan T.D., The bioSTREAM tidal current energy converter, 8th European Wave and Tidal Energy Conference EWTEC, Uppsala, İsveç, 2009.
- Young, J., Lai, J.C.S., Platzer, M.F., A review of progress and challenges in flapping foil power generation, Progress in Aerospace Sciences, 67, 1-28, 2014.
- Xiao, Q., Zhu, Q., A review on flow energy harvesters based on flapping foils, Journal of Fluids and Structures, 46, 174-191, 2014.
- Yılmaz I., Keiyinci S., Cam O., Karci A., Experimental investigation of aerodynamic parameters on flapping wing, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (4), 1035-1050, 2017.
- Jones K.D., Dohring C.M., Platzer M.F., Experimental and computational investigation of the Knoller-Betz effect, AIAA Journal, 36 (7), 1240-1246, 1998.
- Knoller R., Die Gesetze des Luftwiderstandes, Flug- und Motortechnik, 3 (21), 1-7, 1909.
- Betz A., Ein Beitrag zur Erklärung des Segelfluges, Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, 3, 269-272, 1912.
- Katzmayr R., Effect of Periodic Changes of Angle of Attack on Behavior of Airfoils, NACA TM 147, 1922.
- Koochesfahani, M.M., Vortical pattern in the wake of an oscillating airfoil, AIAA Journal, 27, 1200-1205, 1989.
- Panda J., Zaman K.B.M.Q., Experimental investigation of the flow field of an oscillating airfoil and estimation of lift from wake survey, Journal of Fluid Mechanics, 265, 65-95, 1994.
- Anderson, J.M., Streitlien, K., Barrett, D. S., Triantafyllou, M. S., Oscillating foils of high propulsive efficiency, Journal of Fluid Mechanics, 360, 41-72, 1998.
- Triantafyllou M.S., Triantafyllou G.S., Gopalkrishnan R., Wake mechanics for thrust generation in oscillating foils, Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 3 (12), 2835-7, 1991.
- Young, J., Lai, J.C. S., Mechanisms influencing the efficiency of oscillating airfoil propulsion, AIAA Journal, 45 (7), 1695-1702, 2007.

24. Isogai, K., Shinmoto, Y., Watanabe, Y., Effects of dynamic stall on propulsive efficiency and thrust of flapping airfoil, *AIAA Journal*, 37 (10), 1145-1151, 1999.
25. Read, D.A., Hover, F.S., Triantafyllou, M.S., Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering, *Journal of Fluids and Structures*, 17 (1), 163-183, 2003.
26. Hover, F.S., Haugsdal, Ø., Triantafyllou, M.S., Effect of angle of attack profiles in flapping foil propulsion, *Journal of Fluids and Structures*, 19 (1), 37-47, 2004.
27. Rival, D., Prangemeier, T., Tropea, C., The influence of airfoil kinematics on the formation of leading-edge vortices in bio-inspired flight, *Experiments in fluids*, 46 (5), 823-833, 2009.
28. Kinsey, T., Dumas, G., Parametric study of an oscillating airfoil in a power-extraction regime, *AIAA Journal*, 46 (6), 1318-1330, 2008.
29. Platzer, M.F., Jones, K. D., Young, J., Lai, J.C.S., Flapping wing aerodynamics: progress and challenges, *AIAA Journal*, 46 (9), 2136-2149, 2008.
30. Kinsey, T., Dumas, G., Lalande, G., Ruel, J., Meht, A., Viarouge, P., Jean, Y., Prototype testing of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils, *Renewable Energy*, 36 (6), 1710-1718, 2011.
31. Kinsey, T., Dumas, G., Computational fluid dynamics analysis of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils, *Journal of fluids engineering*, 134 (2), 021104, 2012.
32. Platzer, M.F., Ashraf, M.A., Young, J., Lai, J.C.S., Development of a New Oscillating-Wing Wind and Hydropower Generator, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2009-1211, 2009.
33. Tuncer, I.H., Lai, J.C.S., Ortiz, M.A., Platzer, M.F., Unsteady aerodynamics of stationary/flapping airfoil combination in tandem, 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, ABD, AIAA 97-0659, 1997.
34. Tuncer, I. H., Kaya, M., Optimization of flapping airfoils for maximum thrust and propulsive efficiency, *AIAA Journal*, 43 (11), 2329-2336, 2005.
35. Ramamurti, R., Sandberg, W., Vaiana, P., Kellogg, J., Cylinder, D., Computational fluid dynamics study of unconventional air vehicle configurations, *The Aeronautical Journal*, 109 (1097), 337-347, 2005.
36. Windte, J., Radespiel, R., Propulsive efficiency of a moving airfoil at transitional low Reynolds numbers, *AIAA Journal*, 46 (9), 2165-2177, 2008.
37. Warkentin, J., DeLaurier, J., Experimental aerodynamic study of tandem flapping membrane wings, *Journal of Aircraft*, 44 (5), 1653-1661, 2007.
38. Dong, H., Liang, Z., Effects of ipsilateral wing-wing interactions on aerodynamic performance of flapping wings, 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, ABD, AIAA201-0071, 2010.
39. Rival, D., Schönweitz, D., Tropea, C., Vortex interaction of tandem pitching and plunging plates: a two-dimensional model of hovering dragonfly-like flight, *Bioinspiration & biomimetics*, 6 (1), 016008, 2011.
40. Ashraf, M.A., Young, J., Lai, J.C.S., Reynolds number, thickness and camber effects on flapping airfoil propulsion, *Journal of Fluids and Structures*, 27 (2), 145-160, 2011.
41. Yang, S., Luo, S., Liu, F., Tsai, H.M., Optimization of unstalled pitching and plunging motion of an airfoil, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA2006-1055, 2006.
42. Karakas F., Fenercioglu I., Effects of Three-Dimensionality for an Oscillating-Wing Power Generator, 8th Ankara International Aerospace Conference, ODTU, Ankara, Türkiye, AIAC-2015-032, 2015.
43. Jones, K., Platzer, M., An experimental and numerical investigation of flapping-wing propulsion, In 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, p. 995, Ocak, 1999.
44. Fenercioglu, I., Cetiner, O., Effect of unequal flapping frequencies on flow structures, *Aerospace Science and Technology*, 35, 39-53, 2014.
45. Young, J., Lai, J.C., Platzer, M.F., A review of progress and challenges in flapping foil power generation, *Progress in Aerospace Sciences*, 67, 2-28, 2014.
46. Rival, D., Hass, G., Tropea, C., Recovery of energy from leading-and trailing-edge vortices in tandem-airfoil configurations, *Journal of Aircraft*, 48 (1), 203-211, 2011.
47. Jones, K., Platzer, M.F., Experimental investigation of the aerodynamic characteristics of flapping-wing micro air vehicles, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, ABD, AIAA2003-418, 2003.
48. Gopalkrishnan, R., Triantafyllou, M.S., Triantafyllou, G.S., Barrett, D., Active vorticity control in a shear flow using a flapping foil, *Journal of Fluid Mechanics*, 274, 1-21, 1994.
49. Streitlien, K., Triantafyllou, G.S., Triantafyllou, M.S., Efficient foil propulsion through vortex control, *AIAA Journal*, 34 (11), 2315-2319, 1996.
50. Akhtar, I., Mittal, R., Lauder, G.V., Drucker, E., Hydrodynamics of a biologically inspired tandem flapping foil configuration, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 21 (3), 155-170, 2007.
51. Xu, J., Sun, H., Tan, S., Wake vortex interaction effects on energy extraction performance of tandem oscillating hydrofoils, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30 (9), 4227-4237, 2016.
52. Karakas, F., Fenercioglu, I., Effect Of Phase Angle On Tandem Flapping-wing Power Generation, *International Journal of Energy Production and Management*, 2 (1), 95-105, 2017.
53. Fenercioglu, I., Zaloglu, B., Young, J., Ashraf, M.A., Lai, J.C.S., Platzer, M.F., Flow structures around an oscillating wing power generator, *AIAA Journal*, 53 (11), 3316-3326, 2015.

