

ÇIRPAN KANATTA KANAT PROFİLİNİN ETKİSİ

Ferhat KARAKAŞ

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri
Fakültesi, Uçak Mühendisliği
Bölümü.
karakas.ferhat@yahoo.com

Onur PAÇA

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,
Disiplinlerarası Uçak ve Uzay
Mühendisliği Bölümü.
paca@itu.edu.tr

Cihad KÖSE

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,
Disiplinlerarası Uçak ve Uzay
Mühendisliği Bölümü.
kosec@itu.edu.tr

Onur SON

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri
Fakültesi, Uçak Mühendisliği
Bölümü.
sono@itu.edu.tr

Berk ZALOĞLU

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,
Disiplinlerarası Uçak ve Uzay
Mühendisliği Bölümü.
berk_zaloglu@yahoo.com

İdil FENERCİOĞLU*

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri
Fakültesi, Uçak Mühendisliği
Bölümü.
fenercio@itu.edu.tr

Okşan ÇETİNER

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri
Fakültesi, Uçak Mühendisliği
Bölümü.
cetiner@itu.edu.tr

Geliş Tarihi: 30 Mayıs 2014, **Kabul Tarihi:** 30 Haziran 2014

ÖZET

Mikro hava araçlarının (MHA) tasarımı ve pratikteki uygulamaları için yapılan çalışmalar, düşük Reynolds sayılı akışlarıdaki araştırmaların önemini arttırmıştır. Su canlıları, kuşlar ve böceklerin etrafındaki akışlardan biyolojik esinlenme ile yaratılabilen itki kuvveti, bu tür hareket mekanizmalarının havacılıkta kullanılabilecek tahrik sistemlerinin uygulama olanakları açısından gittikçe artan şekilde ilgi çekmektedir. Çırpan kanatlar, halihazırda kullanılmakta olan sabit ve döner kanatlı küçük-boyutlu hava araçlarının performansını arttırmada gelecek vaad etmektedir.

Daha önce, SD7003 profiline sahip, çift taraftan sonlandırılarak iki boyutlu incelemeye tabii tutulmuş, yunuslama ve ötelenme yapan bir çırpan kanatta, değişik hareket parametrelerinde oluşan vorteks yapıları sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada ise vorteks yapılarına dayanarak niteliksel olarak itki veya sürüklenme oluşturduğu belirlenen hareketlerde, dört değişik kanat profiline sahip model (SD7003, NACA0012, $t/c=0.05$ yuvarlak kenarlı ve $t/c=0.05$ keskin kenarlı düz levhalar) için üç boyutlu durumda ($AR=4$) kuvvet ölçümleri yapılmıştır. Çalışma deneysel olarak su kanalında $2,000 < Re < 15,000$ arası değerlerde, DPIV (Digital Particle Image Velocimetry – Dijital Parçacık Görüntüleyerek Hız Belirleme) sistemi ve kuvvet/moment duyargası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Niceliksel akım görüntüleme sonuçları kanat açıklığı boyunca üç değişik düzlemde elde edilmiştir. Sonuçlar çırpan kanadın yakın iz bölgesinde oluşan vorteks yapıları ile kanada etkiyen kuvvet değerleri arasındaki ilişkiyi zamana bağlı olarak ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışmada, sonlu kanat için değişik kanat profilleri kullanımının vorteks oluşumları ile itki/sürüklenme elde edilmesinde oluşturduğu farklılıklar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çırpan kanat, PIV, kanat profili, kuvvet ölçümü.

* Sorumlu Yazar

EFFECT OF CROSS SECTIONAL SHAPE VARIATION FOR AN OSCILLATING WING**ABSTRACT**

Investigations on the design and applications for Micro Air Vehicles (MAV) attract increasing attention to the fields of study on low Reynolds number flows. Generation of thrust and locomotion mechanism of swimming and flying animals may improve the design and development of engineered systems that take advantage of similar unsteady aerodynamic mechanisms. Biological inspiration offers a means to enhance the performance of the next generation of small-scale air vehicles over existing fixed and rotary wing systems.

A 2D oscillating wing with SD7003 airfoil profile undergoing pitching and plunging motions was investigated in a previous study and the vortical structures were categorized for various flapping parameters. In this study, three-dimensional models ($AR=4$) with four different airfoil profiles (SD7003, NACA0012, $t/c=0.05$ rounded edge and $t/c=0.05$ sharp edge flat plates) are used for the cases where thrust or drag production was qualitatively defined based on flow structures. The study is performed in a water channel at the Reynolds number range of $2,000 < Re < 15,000$ using the DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) technique and a Force/Torque sensor. Quantitative flow visualization results are obtained for three different planes along the span of the test models. The results reveal the time dependent relation between the vortical structures and the forces acting on the test models. The effect of using various airfoil profiles on the vortical structures and thrust/drag production is also investigated.

Keywords: Oscillating wing, PIV, airfoil profile, force measurements.

1. GİRİŞ

Mikro Hava Araçları (MHA) günümüzde hem askeri hem de sivil uygulamalar açısından büyük önem arz etmektedir. MHA'ların görev yaptığı düşük Reynolds sayısındaki akışlar da bu konu kapsamındaki araştırmaların ilgi odağı olmaktadır. MHA'ların kontrolüne daha detaylı ışık tutabilmek için yapılan çalışmalar araştırmacıları, MHA'ların kullanacağı uçuş şartlarında uçan küçük kuş ve böcek gibi canlıların manevra kabiliyetlerini ve hareketlerini sürdürebilmek için etraflarındaki akıştan ne şekilde yararlandıklarını incelemeye itmiştir. Sabit kanatların aksine, kanat çırpan canlıların uçabilme yetenekleri kanatlarının hücum ve firar kenarlarından ayrılan girdaplara dayanmaktadır. Hücum ve firar kenarlarından uygun zamanlamalı girdap kopmasına sebebiyet veren akım şartlarının daha iyi anlaşılması, manevra kabiliyeti iyileştirilmiş, daha hafif MHA'larının geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

Çırpan kanat kullanımı yardımıyla itki kuvveti yaratmanın mümkün olduğu uzun zamandır bilinmektedir [1]. Kanat profilleri üzerindeki daimi olmayan akışlar ile ilgili araştırmaların bir kısmı gerçek döner kanatların karşılaştığı açısız değişimleri simgeleyen yunuslama hareketi üzerine yoğunlaşmıştır [2-8]. Diğer yandan, biyobenzetim çalışmalarının bir kısmında da yalnız akım yönüne dik ötelenme hareketi incelenmiştir [1, 9, 10].

Eş zamanlı yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketlerinden oluşan kanat çırpma hareketi geniş bir parametre alanına sahiptir ve yalnızca yunuslama veya yalnızca akıma dik yönde ötelenme hareketlerinin incelendiği çalışmalara nazaran daha az sayıda araştırmaya konu olmuştur [11-15]. Eşzamanlı yunuslama ve ötelenme hareketi yapan çırpan

kanatlara etki eden kuvvetlerin ölçüldüğü araştırmalar da literatürde az sayıdadır [12, 15, 16]; bu durum daimi olmayan akış içerisinde hareket eden cisimlerin kuvvet verilerinin toplanmasındaki zorluklardan da kaynaklanmaktadır. Yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme yapan iki boyutlu bir kanat profili üzerine etkiyen kuvvetleri ölçümü sonucu [15, 16], yüksek Strouhal sayılarında sinusoidal olmayan efektif hücum açısı değişimlerinin çoklu girdap oluşumuna ve bunun sonucu olarak da yüksek itki beklenen bölgelerde performans düşüşüne yol açtığı gösterilmiştir. Ancak yüksek Strouhal sayılarında maksimum efektif hücum açısının da büyük olduğu durumlarda, hücum açısı değişimi yüksek mertebe frekans bileşenlerine sahip olmamakta ve çoklu girdap oluşumlarının gerçekleşmediği durumlar da gözlenebilmektedir [17]. Bahsi geçen çalışmada SD7003 kanat profili kullanılmıştır. Bu kanat profili düşük Reynolds sayılı akışlar için optimize edilmiş olup, dinamik taşıma kaybı karakteristiklerini belirlemeye yönelik nümerik simülasyonlar ile DPIV ve deneysel kuvvet verilerinin validasyonu için de kullanılmıştır [18-21].

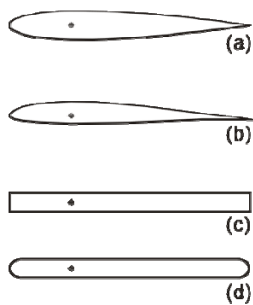
Çırpan kanatlarla ilgili literatür incelendiğinde, yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunun iki boyutlu kanat modelleri ile gerçekleştirildiği dikkat çekmektedir [22-25], ancak çırpan kanatlar ile yapılan çalışmaların uygulama alanlarının üç boyutlu olması sebebiyle üç boyutlu kanat profillerinin incelenmesi ve araştırılması büyük önem arz etmektedir. Literatürde çırpan kanat aerodinamiği konusunda keskin kenarlı düz levhalar ile simetrik kanat profiline sahip test modellerinin karşılaştırılmasına [26], yuvarlatılmış kenarlı hücum kenarlı kanat profilinin etrafında oluşan akım yapılarının ani hücum açısı değişimi [27], döner-kanat uygulamalarında kullanımı [28, 29] ve ötelenme hareketi [30] veya yunuslama ve ötelenme hareketini birlikte yapma [31] durumlarının

incelenmesine yönelik çalışmalara rastlanmaktadır. Oysa ki kamburluklu ve simetrik kanat profilleri ile keskin ve yuvarlatılmış kenarlı düz levha kullanımının karşılaştırıldığı, eşzamanlı yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketleri yapan sonlu kanat etrafı ve iz bölgesinde oluşan akım yapılarının doğrudan kuvvet ölçümleri ile birlikte incelendiği çalışmalar yok denecek kadar azdır.

Daha önce yapılmış olan çalışmada [17] SD7003 profiline sahip, çift taraftan sonlandırılarak iki boyutlu incelemeye tabi tutulmuş, yunuslama ve ötelenme yapan bir çırpın kanatta değişik hareket parametrelerinde oluşan akım yapısı şekilleri beş farklı kategoriye ayrılmış ve bu kategorilerin oluşum bölgeleri değişik iki boyutlu parametre düzlemlerinde belirlenmiştir. Bu çalışmada ise vorteks yapılarına dayanarak niteliksel olarak itki veya sürüklenme oluşturduğu belirlenen hareketlerde, dört değişik kanat profiline sahip model (SD7003, NACA0012, $t/c=0.05$ yuvarlak kenarlı ve $t/c=0.05$ keskin kenarlı düz levhalar) için üç boyutlu durumda, kanat açıklığı boyunca üç değişik düzlemde niceliksel akım görüntüleme ve eşzamanlı kuvvet ölçümleri yapılmıştır. Çalışmada, sonlu kanat için değişik kanat profilleri kullanımının vorteks oluşumları ile itki/sürüklenme elde edilmesinde oluşturduğu farklılıklar incelenmiş, sonuçlar çırpın kanadın yakın iz bölgesinde oluşan vorteks yapıları ile kanada etkiyen kuvvet değerleri arasındaki ilişkiyi zamana bağlı olarak ortaya koymuştur. Dolayısı ile yapılmış olan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar hem olayın fiziğine ışık tutmakta hem MHA tasarımı için seçilebilecek parametreler açısından geniş bir kontrol sağlamaktadır.

2. DENEYSEL DÜZENEK VE YÖNTEM

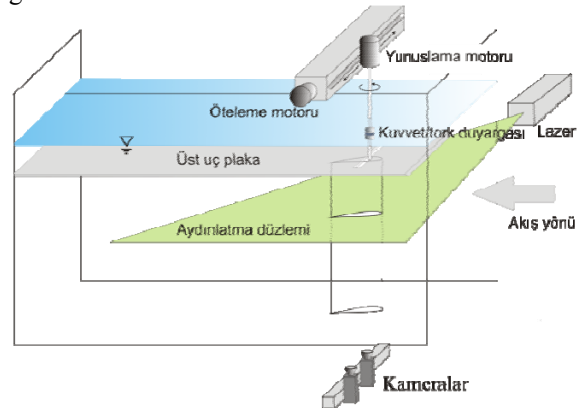
Bu deneysel çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Trisyonik Laboratuvarı'nda bulunan büyük ölçekli su kanalında gerçekleştirilmiştir. Dört değişik kanat kesit profiline sahip sonlu kanat modellerinin etrafında ve iz bölgesinde oluşan akım yapıları elde edilmiş, eşzamanlı olarak doğrudan kuvvet ölçümleri alınmıştır. Kullanılan kanat profil kesitleri Şekil 1'de görülebilir.



Şekil 1. Kanat profilleri, a) NACA0012, b) SD7003, c) $t/c=0.05$ keskin kenarlı düz levha, d) $t/c=0.05$ yuvarlak kenarlı düz levha.

Kullanılan kanat modellerinin hepsinin veter uzunluğu $c = 10\text{cm}$ ve kanat açıklığı (span) $s = 20\text{cm}$ 'dir. Keskin kenarlı ve yuvarlatılmış kenarlı düz levha modellerinin kalınlığı $t = 5\text{mm}$ 'dir. Modeller $1/4$ veter noktasından bir bağlantı çubuğu yardımı ile kuvvet/moment duyargasına, bunu da takiben yine bağlantı çubuğu ile yunuslama hareketini veren motora bağlanmaktadır. Yunuslama ve akışa dik yönde ötelenme hareketi için iki adet Kollmorgen AKM33E servo motor ve Danaher Motion S300 servo sürücü kullanılmıştır. Yunuslama hareketini veren motor akışa dik yönde hareketi veren motorun kontrol ettiği sonsuz vida sistemine bağlıdır. Yapılan üç boyutlu çalışmada, incelemeyi su kanalının üst yüzeyinde oluşan serbest yüzey etkilerinden arındırmak amacı ile kanat modelleri üstten $100 \times 200\text{cm}$ ölçülerinde, 1cm kalınlığında, pleksiglasdan üretilmiş bir uç plaka ile sınırlandırılmaktadır. Bu üst plaka yansımaları engellemek amaçlı siyaha boyanmıştır ve plakaya kanadın akıma dik yöndeki hareketi sırasında bağlantı çubuğunun ilerleyişine olanak vermek üzere 2cm genişliğinde bir yarık açılmıştır. Üst uç plaka simetri düzlemini temsil ettiği için ele alınan modellerin açıklık oranı $c/s = 1/4$ olarak belirlenmektedir. Kuvvet ölçümleri ile senkronize olarak elde edilen iki boyutlu niceliksel akım görüntüleri, her bir kanat için açıklık boyunca üç kesitte ($1/2$ span, $1/4$ span ve kanat ucunda) elde edilmiştir.

Niceliksel akım görüntüleme için DPIV (Digital Particle Image Velocimetry – Parçacık Görüntüleyerek Hız Belirleme) sistemi kullanılmaktadır. Su ortalama çapı yaklaşık $10\mu\text{m}$ olan üzeri gümüş kaplı cam küreciklerle tohumlanmaktadır. Akış alanı maksimum enerji seviyesi 120 mJ/vuruş olan bir çift kavite Nd-YAG lazer ile ışıklandırılmaktadır. Geniş bir görüntüleme alanı oluşturmak için iki adet 10-bit ve 1600×1200 piksel çözünürlüğe sahip CCD kamera kanalın altına yerleştirilmiştir. Kullanılan deney düzeneği Şekil 2'de görülebilir.



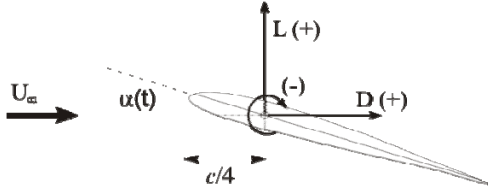
Şekil 2. Deney düzeneği.

İki kameradan alınan görüntüler çok az çakıştırılarak ve iki ortak nokta kullanılarak vektör elde edilmeden önce laboratuvarında geliştirilmiş yazılımlar ile

birleştirilmektedir. Hız alanları çapraz korelasyon kullanılarak elde edilmiştir. Çapraz korelasyonda sorgulama pencereleri 64×64 alınmış ve %50 üst üste bindirme kullanılmıştır. Görüntü alınan düzlemler açıklık boyunca değiştiği için kameraların gördüğü alan ve görüntülerin üstü üste bindirilişi az da olsa farklılık göstermektedir. Ancak sonuçta akış alanının toplamda yaklaşık 3300 vektör ile görsellendiği ve akış düzlemindeki vektör çözünürlüğünün en düşük değerinin $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ olduğu söylenebilir. Veri alma hızı her bir periyotta 8 akış alanı temsil edilecek şekilde ayarlanmış ve 25 periyot süresince veri alınmıştır. Sistem hareket başladıktan sonra 3. periyottan itibaren veri alacak şekilde tetiklenmektedir.

Kuvvet ve momentler, motorlara ankastre bağlı kanadın hemen uç plaka sonrasındaki kısmına, su altında yerleştirilmiş olan ATI-IA Nano17 IP68 kuvvet/moment duyargası ile ölçülmektedir. Sensör, kanat ile kanadın dönmesini sağlayan hareket aktarım çubuğunun arasına monte edilmiştir. Kuvvet/moment ölçümlerinde, DPIV görüntüleri ile senkronize olarak, 1000Hz’de model hareketinin 25 periyodu süresince veri alınmıştır.

Kuvvet/moment duyargası model ile beraber dönmekte olduğu için, elde edilen F_x ve F_y kuvvetleri kullanılarak, modelin o anki hücum açısı ile modele etki eden taşıma ve sürüklenme kuvvetleri elde edilmektedir. Ölçülen ve sonuçların sunumunda yer verilen yunuslama momenti ise x-y-z koordinat sistemi kullanıldığı için Şekil 3’de görüldüğü gibi konvansiyonel yönde (hücum açısını arttırıcı yönde) negatiftir.



Şekil 3 Kuvvet ve moment yönleri.

Kanat modellerinin eşzamanlı yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketlerine ait hareket denklemleri şu şekilde verilebilir:

$$h(t) = h_{amp} \cos(2\pi ft + \psi) \quad (1)$$

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_{amp} \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

Burada $h(t)$ serbest akım hızına dik yönde lineer ötelenme hareketini, $\alpha(t)$ açısal yunuslama hareketini göstermektedir. h_{amp} öteleme hareketinin genliğini, α_{amp} yunuslama hareketinin genliğini, α_0 ise başlangıç hücum açısını göstermektedir. Yapılan çalışmada yunuslama hareketi için sabit hücum açısı ve genlik değerleri, $\alpha_0 = 8^\circ$ ve $\alpha_{amp} = 8.6^\circ$ olacak şekilde tüm incelenen durumlar için aynı kullanılmıştır. Yunuslama ve ötelenme hareketlerinin salınım frekansları f ile gösterilmektedir ve bu çalışmada

birbirlerine eşit olacak şekilde seçilmiştir. Yunuslama ve ötelenme hareketleri arasındaki faz açısı ψ ile tanımlanmaktadır ve ötelenme hareketi yunuslama hareketini $\psi = 90^\circ$ ile geriden takip etmektedir.

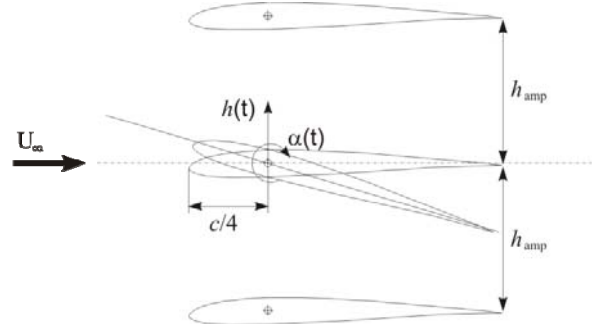
Akışın fiziğine etki eden başlıca boyutsuz parametrelerden Strouhal sayısı (St) ve indirgenmiş frekans (k) ise şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$St = \frac{2h_{amp}f}{U_\infty} \quad (3)$$

$$k = \frac{\pi fc}{U_\infty} \quad (4)$$

Burada c veter uzunluğunu, U_∞ serbet akım hızını tanımlamaktadır.

Şekil 4, yukarıda verilen çırpın kanat hareket denklemlerinin görsellenmesi için aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 4 Serbest akım altında yunuslama ve ötelenme yapan kanadın hareket şekli.

Daha önce, yukarıda belirtilen hareket parametrelerinde yunuslama ve eşzamanlı akıma dik yönde ötelenme hareketleri yapan bir SD7003 kanat profili etrafı ve iz bölgesindeki iki boyutlu akım alanlarının DPIV yöntemi ile incelenmesi sonucu akış yapılarının 5 kategori ile sınıflandırıldığı kapsamlı bir deneysel çalışma yapılmıştır [17]. Bu kategoriler özetle şu şekilde tanımlanabilir:

Kategori A1: Kanat hareketinin bir döngüsü süresince iki adet birbirinin tersi yönde hareket eden girdaplar oluşmaktadır. Girdapların ayrılış zamanlaması ters yönlü bir Karman caddesi oluşumu göstermekte, ortalama hız alanları jet şeklinde bir akışa işaret etmektedir.

Kategori B’de, hücum ve firar kenarlarında oluşan girdaplar kategori A’dakilerden daha zayıf oluşmaktadır ve sadece bir çift birbirlerinin ters yönünde dönen girdap iz bölgesine katılmaktadır.

Kategori A ve B’de 2 ile adlandırılan bir alt set tanımlanmıştır. Bu durumlar ötelenme hareketi genliğinin daha düşük ve hareket frekansının da daha yüksek olduğu durumlarda görülmekte ve oluşan girdap çiftlerinin daha şiddetli ve kanattan ayrılışları

sırasındaki dönüş çapları daha küçük olması ile farklılık göstermektedir.

C kategorisinin karakteristik özelliği, kanadın bir hareket döngüsü süresinde bir adet pozitif, iki adet negatif girdap oluşuyor olmasıdır.

D kategorisinde, kanadın aşağı yönde hareketi sırasında hücum kenarı girdabı ve yukarı hareketi sırasında fırar kenarında pozitif işaretli girdap oluşmakta ancak yukarı yönde hareket sırasında ters işaretli girdap oluşmamaktadır. Bu kategori de, önceki kategoriler gibi jet şeklinde bir hız profili oluşturmaktadır.

E kategorisinde ise tekil ve güçlü girdap yapıları görülmemekte ve bunlar Karman girdap caddesi şeklinde yüzeyden ayrılmaktadır.

Bu kategorilere ait seçilen örnek durumlardaki parametre değerleri aşağıdaki tabloda (Tablo 1) görülmektedir.

Tablo 1. Kategorilerine göre deney parametreleri.

Kategori	Re	U_∞ [m/s]	f	h_{amp}/c	α_{amp}	St
A1	2500	0.025	0.2	0.5	8.6	0.8
A2	3000	0.030	0.6	0.25		1.0
B2	7400	0.074				0.4
C	10000	0.100				0.3
D	13700	0.138				0.2
E	10000	0.100	0.1	0.5		0.1

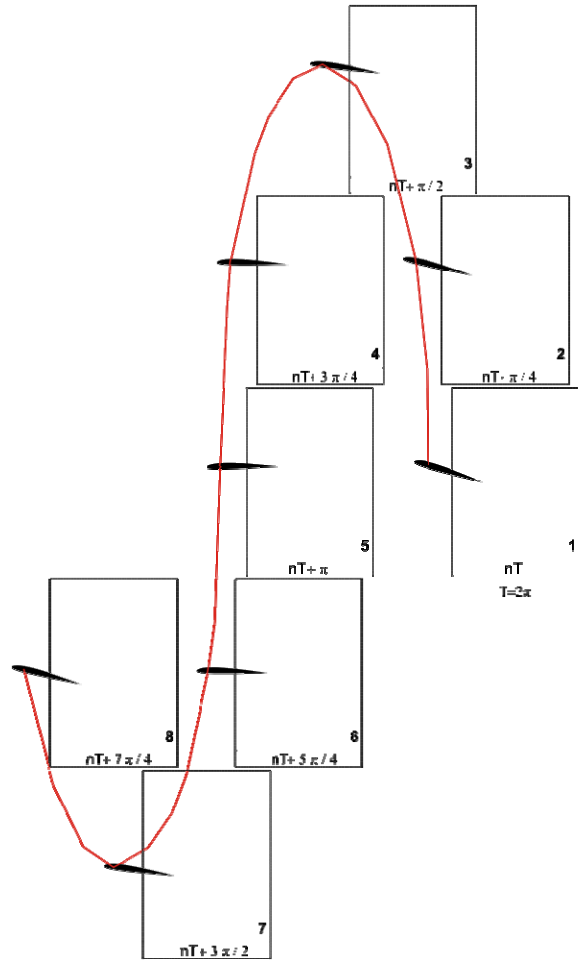
Bu çalışmada ise yukarıda verilen akış yapı sınıflarına ait referans değerlerde alt uç plaka olmaksızın gerçekleştirilen deneylerde dört farklı kanat kesit profiline sahip model incelenmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR

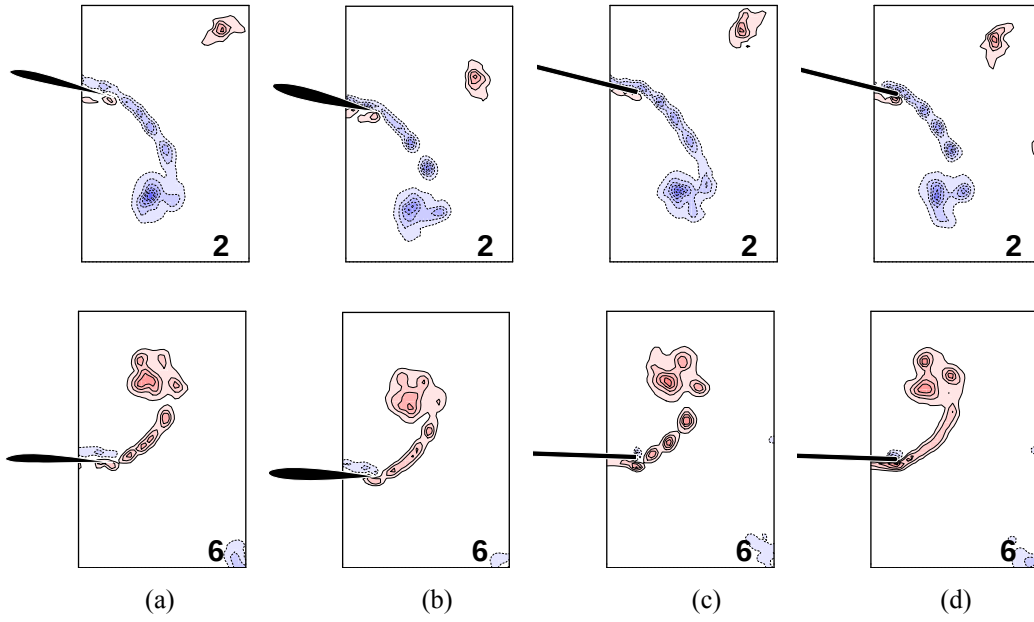
Yapılan deneysel çalışmada elde edilen girdaplılık yapıları kanat hareketinin bir periyodu 8 aşamada görsellenecek şekilde sıralanmıştır. Şekil 5 DPIV sonuçları ile ilgili olarak kanadın bir periyodu esnasındaki pozisyonuna dair şablonu göstermektedir. Burada akış soldan sağa doğrudur.

Şekil 6, kullanılan dört farklı kanat kesit profiline sahip test modeli için A1 Kategorisine ait hareket parametrelerinde, $\frac{1}{2}$ span düzleminde DPIV yöntemi ile elde edilen girdap yapılarına ait bazı sonuçları göstermektedir. Burada 2-numara ile gösterilen kanat arkasındaki girdap yapıları, kanadın hareketine başladığı akıma dik yöndeki ötelenme genişliğinin

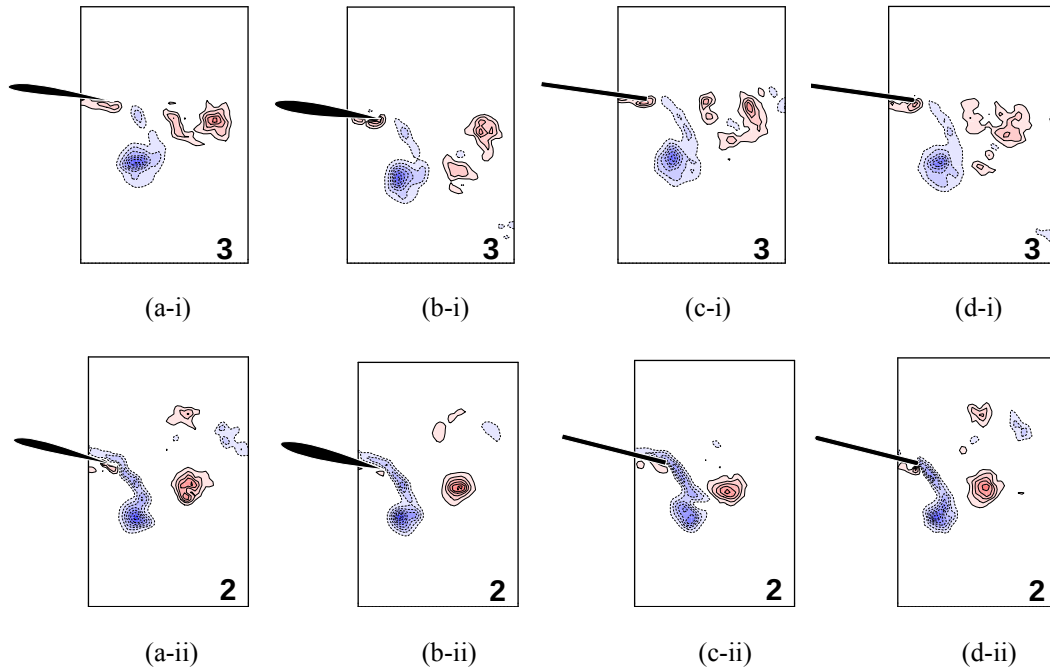
ortasından yukarı yöne doğru çıkışı esnasındaki ($t = T/8$ veya $nT+\pi/4$) görüntü, 6-numara ile gösterilen kanat arkasındaki girdap yapıları ise kanadın ötelenme genişliğinin orta noktasından geçip ötelenmenin pozisyonunun minimum olduğu yöne doğru aşağı yöndeki hareketi esnasında ($t = 5T/8$ veya $nT+5\pi/4$) alınmış görüntüdür. Şekil 6 incelendiğinde görüleceği üzere, farklı kanat kullanımı sonucunda elde edilen kanat arkası girdap yapıları, ele alınan kesitler arasında çok benzerlik göstermektedir. Sadece ötelenme hareketinde çıkış esnasında (#2) NACA0012 profiline sahip kanatta iz bölgesindeki ikincil vorteksin (daha önce kopmuş olan) konumu ve ötelenme hareketinde iniş esnasında (#6) keskin kenarlı kenarlı düz levhadan ayrılmakta olan vorteksin yapısının farklılık gösterdiği söylenebilir. $\frac{1}{4}$ span'de bu önemsiz farklılık dahi gözlenmemektedir. Uç kesitte $\frac{1}{2}$ span'dekine benzer olarak çok az ve önemsiz farklılıklar hissedilebilmektedir.



Şekil 5 Girdap yapılarının gösteriminde kullanılan kanat hareketine göre oluşturulmuş şablon.



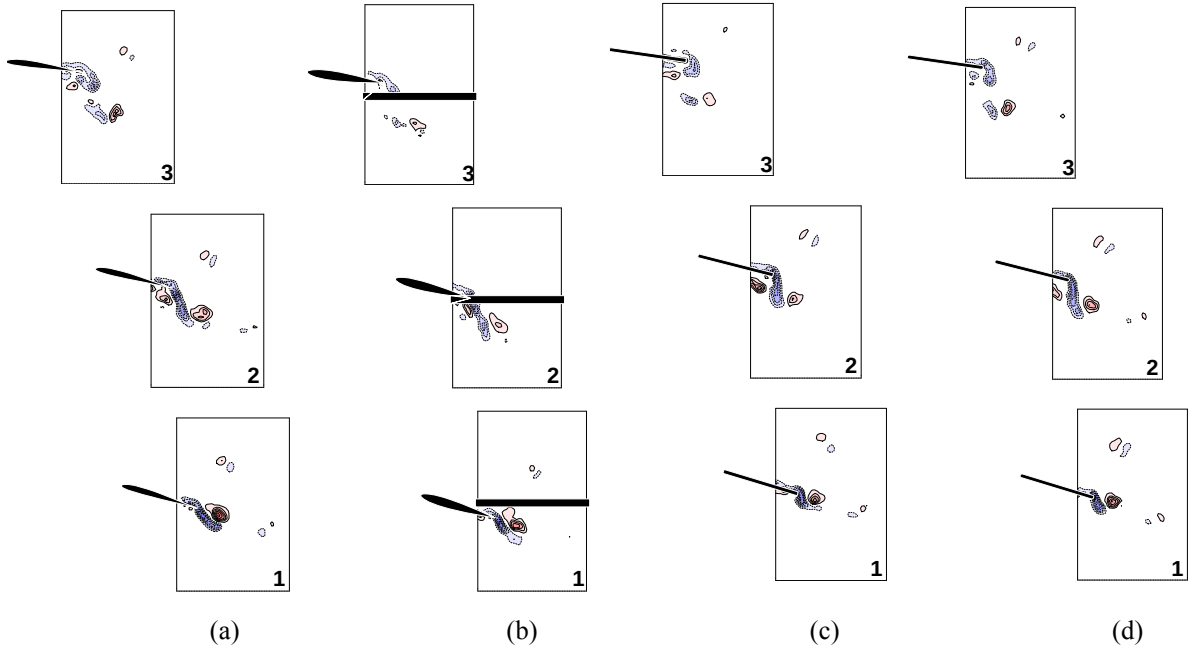
Şekil 6. a) SD7003, b) NACA0012, c) keskin kenarlı düz levha, d) yuvarlatılmış kenarlı düz levha profiline sahip kanat için, $\frac{1}{2}$ span'de A1 kategorisine ait girdap yapıları.



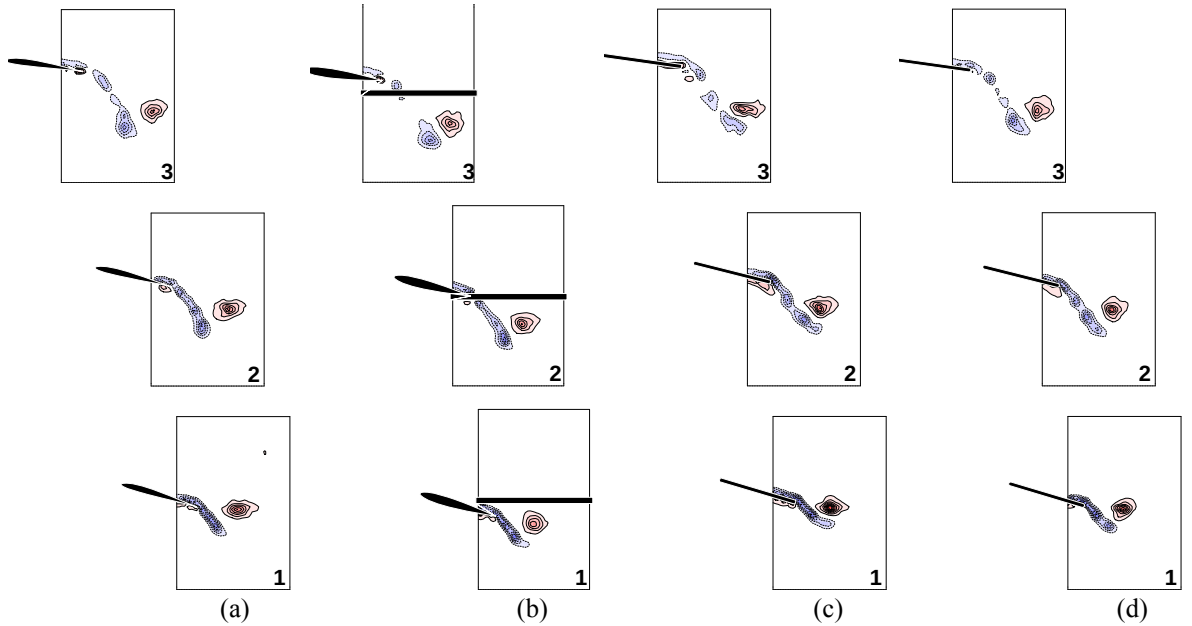
Şekil 7. a) SD7003, b) NACA0012, c) keskin kenarlı düz levha, d) yuvarlatılmış kenarlı düz levha profiline sahip kanat için, i) $\frac{1}{2}$ span'de, ii) $\frac{1}{4}$ span'de A2 kategorisine ait girdap yapıları.

A1 Kategorisi sonuçlarına paralel olarak, A2 Kategorisinde, $\frac{1}{2}$ span'de ele alınan kesitler arasında, ikincil vorteks yapılarındaki farklılıklar dışında genel olarak çok benzerlik görülmektedir. Bu kategori için $\frac{1}{4}$ span'de de benzer farklılıklar gözlemlenebilmektedir. Uç kesitte alınan görüntülere baktığımızda ise (Şekil 8), keskin ve yuvarlatılmış kenarlı levha SD7003'e göre daha kısa ve/veya zayıf girdap oluşumları sergilemektedir. NACA0012 için bu durum SD7003'dekine benzerdir.

B2 Kategorisinde $\frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{4}$ span sonuçları kesitler arası çok benzerdir. Uç kesitte ise SD7003 ile keskin kenarlı levha arasında vorteks oluşumlarının oryantasyonlarında ve bir miktar şiddetlerinde farklılık gözlenmektedir (Şekil 9). Levhaların kendi aralarında benzer olduğu söylenebilir. NACA0012 için elde edilen görüntülerin de daha çok SD7003 sonuçlarına benzediği, ancak kullanılan maskenin görüntü alanını kapatması nedeni ile olabilecek küçük farklılıkların anlaşılamadığı belirtilmelidir.



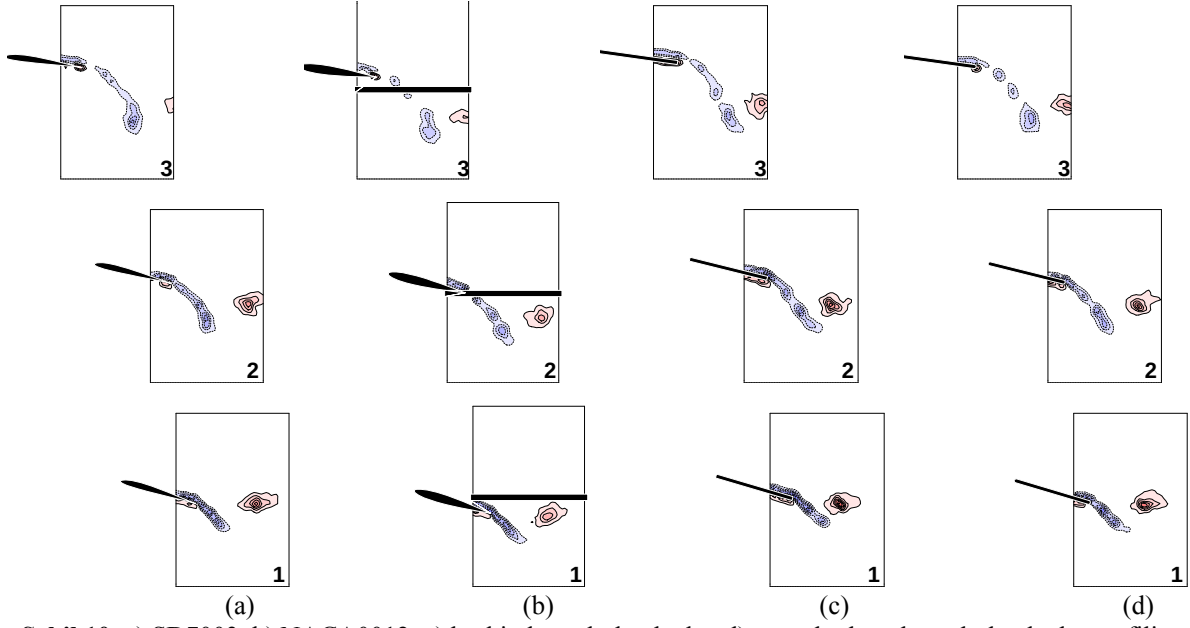
Şekil 8. a) SD7003, b) NACA0012, c) keskin kenarlı düz levha, d) yuvarlatılmış kenarlı düz levha profiline sahip kanat için uç kesitte A2 kategorisine ait girdap yapıları.



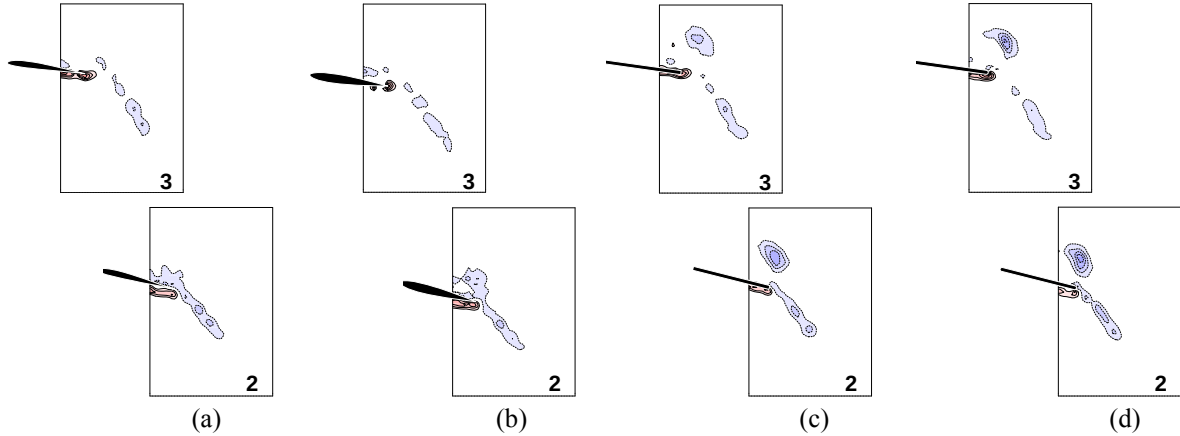
Şekil 9. a) SD7003, b) NACA0012, c) keskin kenarlı düz levha, d) yuvarlatılmış kenarlı düz levha profiline sahip kanat için uç kesitte B2 kategorisine ait girdap yapıları.

C Kategorisinde $\frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{4}$ span sonuçları kesitler arası çok benzerdir. Uç kesitte (Şekil 10), keskin kenarlı düz levha için, kanadın ötelenme hareketinin orta noktasından başlayarak çıkış yönünde (#1, #2 ve #3), negatif işaretli kopmakta olan uzamış girdap yapısı ile yakın iz bölgesindeki pozitif işaretli kopmuş girdap arası mesafe diğerlerine göre daha yakındır. Genel olarak yuvarlatılmış düz levha NACA0012 ile ve bu ikisi ikinci derecede SD7003 ile benzerlik göstermektedir.

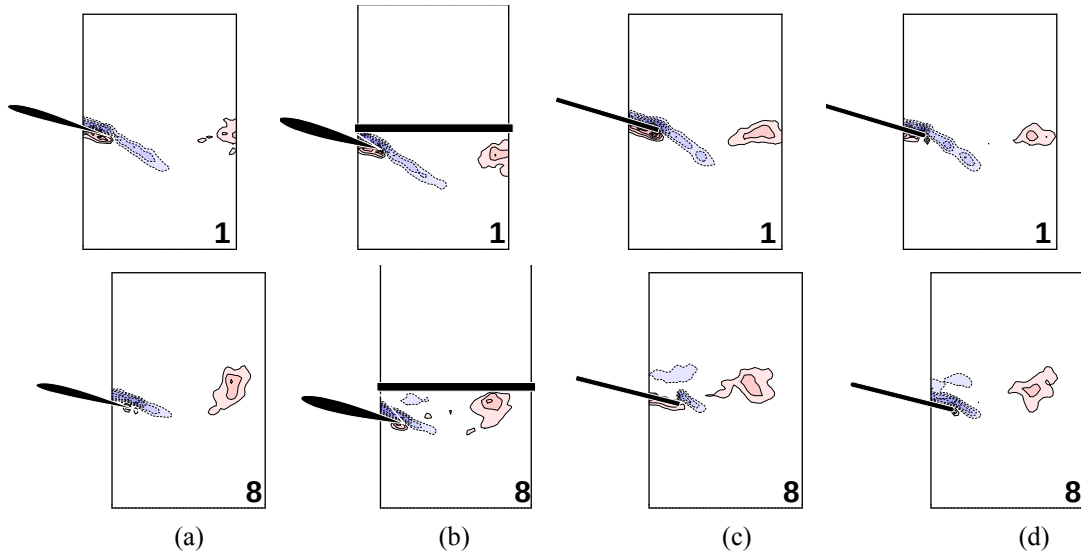
D Kategorisi $\frac{1}{2}$ span sonuçlarında (Şekil 11), ötelenme hareketinin çıkışı esnasında (#2 ve #3) firar kenarından negatif vorteks ayrılırken buna ek olarak hücum kenarından gelen, kanadın üzerinde bir başka negatif vorteks görülmektedir. Bu durum özellikle düz levhalarda belirgin olmaktadır. Uç kesitte ise (Şekil 12) ötelenme hareketinin çıkışı esnasında levhalarda SD7003'e göre daha önce kopmuş olan vorteksin kopmakta olana daha yakın olduğu gözlenmektedir. Maskeleye bandı olsa da bu açıdan NACA0012'nin daha çok SD7003'e benzerlik gösterdiği söylenebilir.



Şekil 10. a) SD7003, b) NACA0012, c) keskin kenarlı düz levha, d) yuvarlatılmış kenarlı düz levha profiline sahip kanat için uç kesitte C kategorisine ait girdap yapıları.



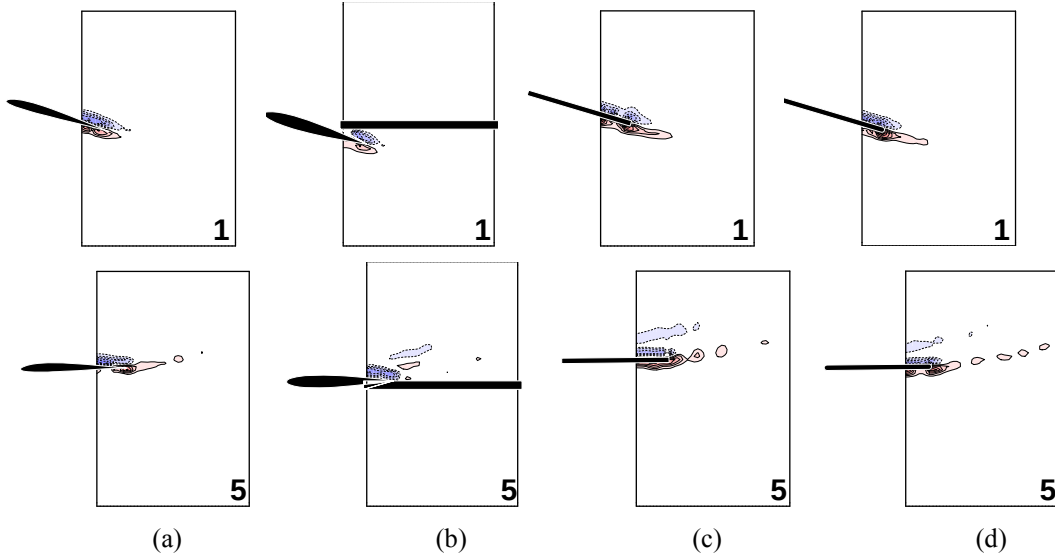
Şekil 11. a) SD7003, b) NACA0012, c) keskin kenarlı düz levha, d) yuvarlatılmış kenarlı düz levha profiline sahip kanat için $\frac{1}{2}$ span'de D kategorisine ait girdap yapıları.



Şekil 12. a) SD7003, b) NACA0012, c) keskin kenarlı düz levha, d) yuvarlatılmış kenarlı düz levha profiline sahip kanat için uç kesitte D kategorisine ait girdap yapıları.

E Kategorisi $\frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{4}$ span kesit görüntüleri kanat kesit şekline bağlı bariz bir farklılık göstermemektedir. Ancak uç kesit görüntüleri incelendiğinde (Şekil 13) levhaların kendi aralarında çok benzer olduğu ve SD7003 ile NACA0012'ye göre girdap yapılarının

daha uzun olduğu, bir başka farklılık olarak ötelenme hareketinin inişinde girdap yapılarının yukarı doğru yönlendiği görülmektedir. Bununla birlikte bir miktar yönlenme belirtisi NACA0012 için de vardır.



Şekil 13. a) SD7003, b) NACA0012, c) keskin kenarlı düz levha, d) yuvarlatılmış kenarlı düz levha profiline sahip kanat için uç kesitte E kategorisine ait girdap yapıları.

Kuvvet/moment sonuçlarında elde edilen grafikler, kullanılan dört farklı kanat kesidine sahip test modelinin üçerli gruplanarak incelenmesine dayanmaktadır. Katsayılar hem serbest akım hızına göre, hem akıma dik ötelenme olduğu için efektif hıza göre elde edilmiş ve bir periyot içerisindeki değişimleri çizdirilmiştir. Ayrıca akım ile cisim arasındaki enerji alışverişini göstermek amacı ile histerizis döngüleri elde edilmiştir. Tüm kategorilere ait hareket parametrelerinde yapılan deneylerde kuvvet/moment duyargası sonuçları Şekil 14 ve Şekil 15'de SD7003, NACA0012 ve keskin kenarlı düz levhanın; Şekil 16 ve Şekil 17'de ise SD7003, keskin kenarlı düz levha ve yuvarlatılmış kenarlı düz levhanın kıyaslanması ile elde edilmiştir. Özet olarak kanat kesit değişimi açısından şu bulgular görülmektedir:

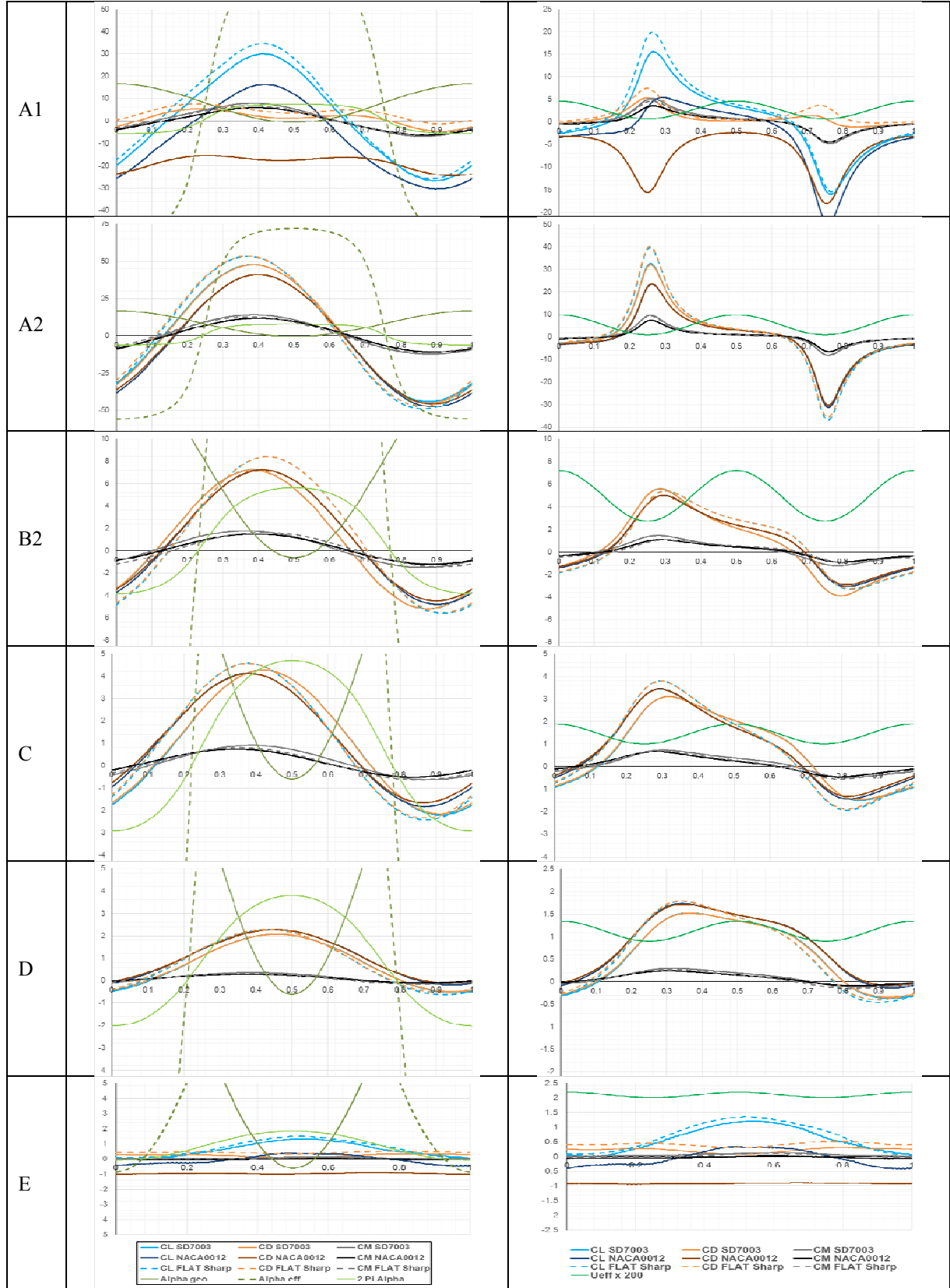
Kategori A1 için sürüklenme değeri değişiminin taşıma değerinin değişimine göre çok düşük olduğu görülmektedir. A2 için ise sürüklenme değeri taşıma değerine değer olarak eşdeğerdir. Taşıma katsayısının maksimum değerleri karşılaştırıldığında kesite göre diziliş sırasıyla NACA0012, yuvarlatılmış

kenarlı levha, keskin kenarlı levha ve SD7003 şeklindedir. Ancak bu kategori için histerizis döngülerinde bariz olarak NACA0012 profilinin farklı davranış gösterdiği görülmektedir. Bu sadece kuvvet ölçümlerinde ve en düşük serbest akım hızlı bir kategoride olduğu için seri deneyler esnasında bias oluştuğu düşünülmektedir.

Kategori B2'de değişim değerleri eşdeğer olup keskin kenarlı levhanın faz farkı ile geriden gelip daha yüksek taşıma katsayısı değerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum C kategorisinde de görülmektedir. NACA0012 bu faz ilişkisinde keskin kenarlı levha ile aynı davranırsa da taşıma katsayısı SD7003 mertebesine ulaşabilmektedir.

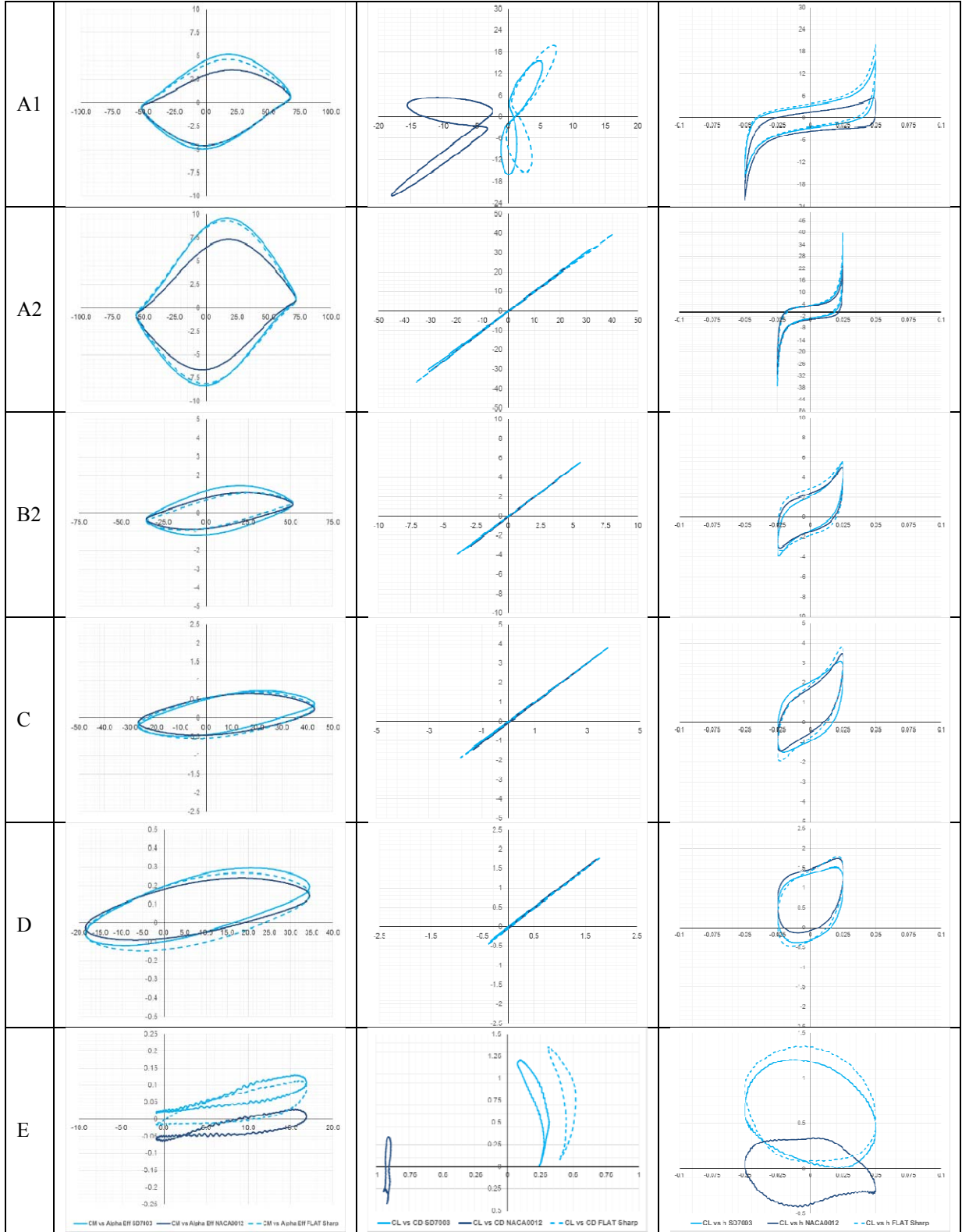
D kategorisinde taşıma ve sürüklenme değişimlerinin değeri yaklaşık olarak aynıdır ve kesitler arasında daha önce görülen faz bu kategoride görülmemektedir.

E kategorisinde sürüklenme değişiminin değeri çok düşüktür. Histerizis döngüleri incelendiğinde NACA0012 sonuçları yine farklılık göstermektedir.

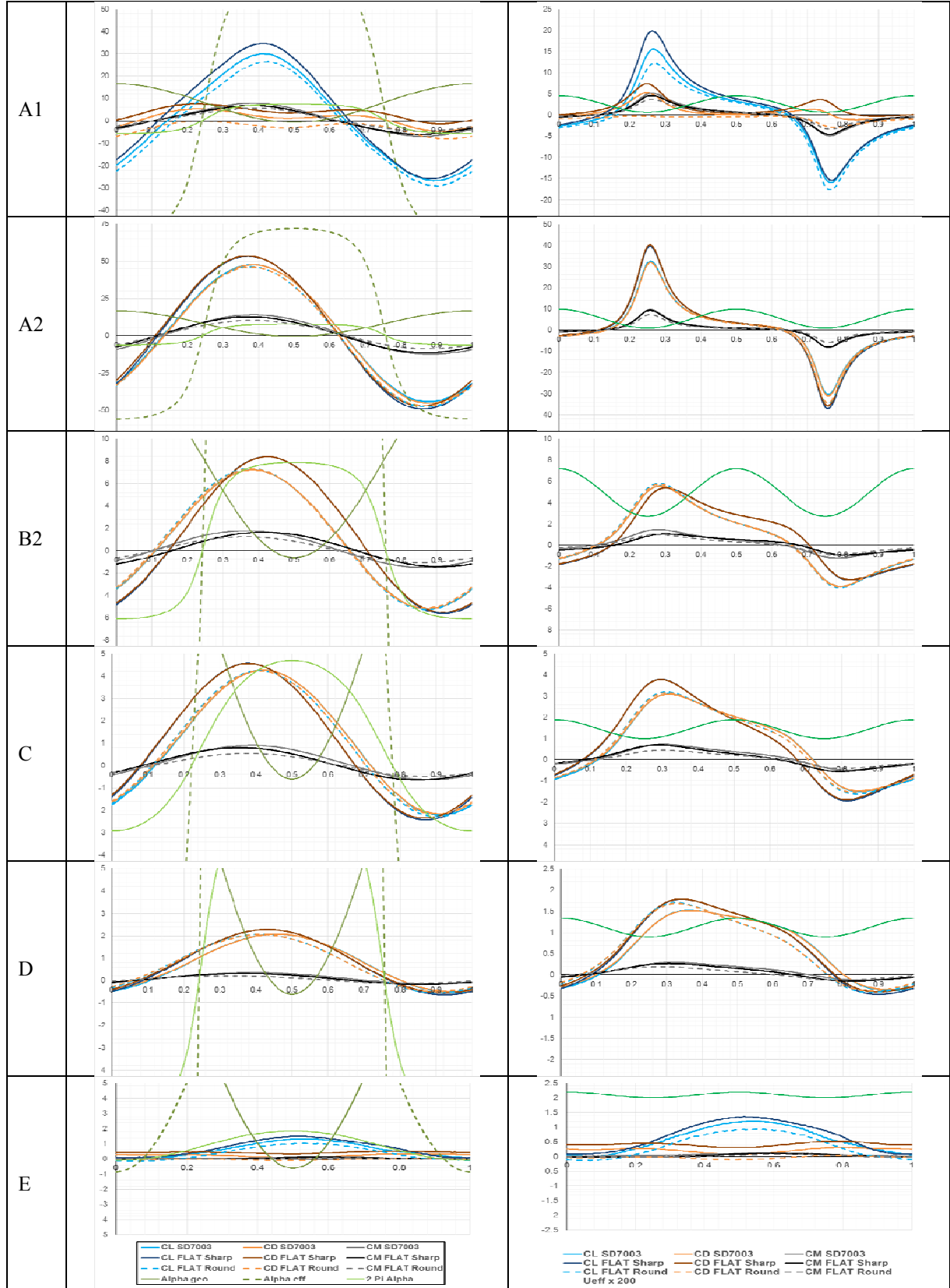


Şekil 14. Tüm kategorilerde SD7003, NACA0012 ve keskin kenarlı düz levha profiline sahip kanatlar için a) U_∞ 'a göre, b) U_{eff} 'e göre boyutsuzlaştırılmış kuvvet/moment grafikleri.

Çırpın Kanatta Kanat Profiline Etkisi

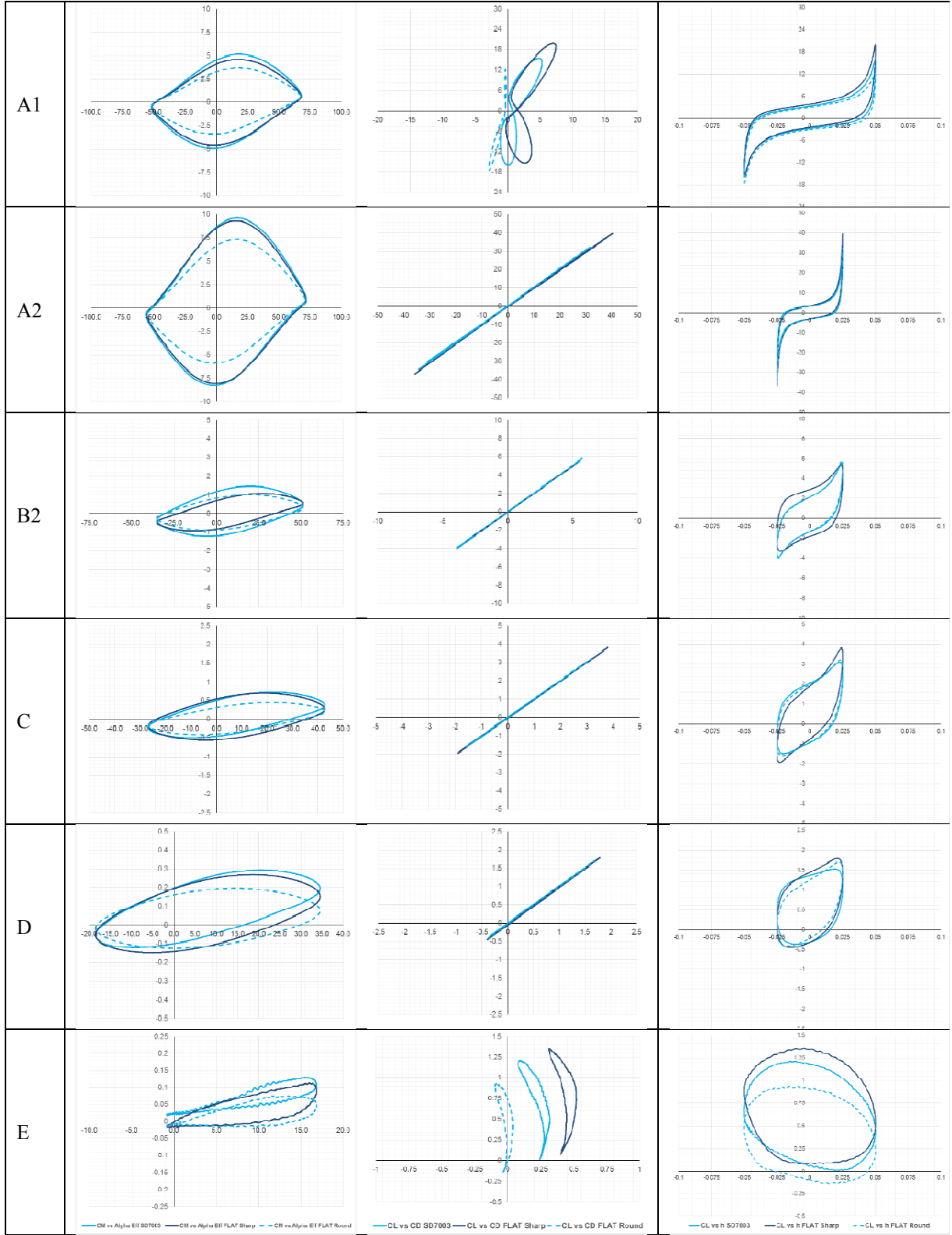


Şekil 15. Tüm kategorilerde SD7003, NACA0012 ve keskin kenarlı düz levha profiline sahip kanatlar için U_{eff} 'e göre boyutsuzlaştırılmış histerizis grafikleri.



Şekil 16. Tüm kategorilerde SD7003, keskin kenarlı düz levha ve yuvarlatılmış kenarlı düz levha profiline sahip kanatlar için a) U_∞ 'a göre, b) U_{eff} 'e göre boyutsuzlaştırılmış kuvvet/moment grafikleri.

Çırpın Kanatta Kanat Profiline Etkisi



Şekil 17. Tüm kategorilerde SD7003, keskin kenarlı düz levha ve yuvarlatılmış kenarlı düz levha profiline sahip kanatlar için U_{eff} 'e göre boyutsuzlaştırılmış histerizis grafikleri.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada eşzamanlı yunuslama ve akıma dik yönde ötelenme hareketleri yapan dört değişik kanat profiline sahip model için üç boyutlu durumda kanat etrafındaki akım yapıları niceliksel akım görüntüleme yöntemi ile incelenmiş ve senkron kuvvet ölçümleri yapılmıştır.

Niceliksel akım görüntüleme sonuçlarında genel olarak ve özellikle $\frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{4}$ span karşılaştırmalarına dayanarak, kanat kesit şeklinin incelemelerde etkisinin görülmeyeceği belirtilmelidir.

Kuvvet/moment değişimleri incelendiğinde, hem değerler açısından hem enerji yönü açısından kesitler arası sistematik bir sıralanma elde edilememiştir.

Niceliksel akım görüntüleme sonuçları ile kuvvet/moment ölçüm sonuçları birarada değerlendirildiğinde kullanılan profile bağlı farklılıkların detayda kaldığı ve genel akım yapısı ve itki sağlama açısından çırpma parametrelerinin baskın olduğu söylenebilir.

Bu çalışma 112M682 No'lu TÜBİTAK 1001 Projesi kapsamında gerçekleştirilmiş ve desteklenmiştir.

4. KAYNAKLAR

- [1] Jones, K.D., Dohring, C.M., Platzer, M.F., (1998) "Experimental and computational investigation of the Knoller-Betz effect", *AIAA Journal*, 36 (7), 1240-1246.
- [2] Kramer, M., (1932) "Increase in the maximum lift of an airfoil due to a sudden increase in its effective angle of attack resulting from a gust", *NASA TM 678*.
- [3] McCroskey, W.J., (1982) "Unsteady airfoils", *Annual Review Fluid Mechanics*, 14, 285-311.
- [4] Carr, L.W., (1988) "Progress in analysis and prediction of dynamic stall", *Journal of Aircraft*, 25(1), 6-17.
- [5] Koochesfahani, M.M., (1989) "Vortical pattern in the wake of an oscillating airfoil", *AIAA Journal*, 27, 1200-1205.
- [6] Ohmi, K., Coutanceau, M., Loc, T.P. ve Delieu, A., (1990) "Vortex formation around an oscillating and translating airfoil at large incidences", *Journal of Fluid Mechanics*, 211, 37-60.
- [7] Ohmi, K., Coutanceau, Daube, O., M., Loc, T.P., (1991) "Further experiments on vortex formation around an oscillating and translating aerofoil at large incidences", *Journal of Fluid Mechanics*, 225, 607-630.
- [8] Panda, J., Zaman, K.B.M.Q., (1994) "Experimental investigation of the flow field of an oscillating airfoil and estimation of lift from wake survey", *Journal of Fluid Mechanics*, 265, 65-95.
- [9] Lai, J.C.S., Platzer, M.F., (1999) "Jet characteristics of a plunging airfoil", *AIAA Journal*, 37(12), 1529-1537.
- [10] Heathcote, S., Gursul, I., (2007) "Jet switching phenomenon for a periodically plunging airfoil", *Physics of Fluids*, 19, 027104.
- [11] Triantafyllou, M.S., Techet, A.H., Hover, F.S., (2004) "Review of experimental work in biomimetic foils", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(3), 585-594.
- [12] Anderson, J.M., Streitlien, K., Barrett, D.S., Triantafyllou, M.S., (1998) "Oscillating foils of high propulsive efficiency", *Journal of Fluid Mechanics*, 360, 41-72.
- [13] Triantafyllou, M.S., Triantafyllou, G.S., Gopalkrishnan, R., Wake mechanics for thrust generation in oscillating foils, *Physics of Fluids, Letters*, A 3(12), 2835-2837, (1991).
- [14] Young, J., Lai, C.S. Mechanisms influencing the efficiency of oscillating airfoil propulsion, *AIAA Journal*, 45(7), 1695-1702, (2007).
- [15] Read, D.A., Hover, F. S., Triantafyllou M. S., (2003) "Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering", *Journal of Fluids and Structures*, 17, 163-183.
- [16] Hover, F.S., Haugsdal, O., Triantafyllou, M.S., (2004) "Effect of angle of attack profiles in flapping foil propulsion", *Journal of Fluids and Structures*, 19, 37-47.
- [17] Fenercioglu, I., Cetiner, O., (2012) "Categorization of Flow Structures around a Pitching and Plunging Airfoil", *Journal of Fluids and Structures*, 31, 92-102.
- [18] Windte, J., Scholz, U., Radespiel, R., (2006) "Validation of the RANS-simulation of laminar separation bubbles on airfoils", *Aerospace Science and Technology*, 10, 484-494.
- [19] Ol, M.V., Bernal, L., Kang, C-K, Shyy, W., (2009) "Shallow and deep dynamic stall for flapping low Reynolds number airfoils", *Experiments in Fluids*, 46(5), 883-901.
- [20] Bernal, L., Ol, M.V., Szczublewski, D.P., Cox, C.A., (2009) "Unsteady Force Measurements in Pitching-Plunging Airfoils", *39th AIAA Fluid Dynamics Conference*, AIAA 2009-4031.
- [21] Rival D., Tropea, C., (2009) "Characteristics of Pitching and Plunging Airfoils under Dynamic-Stall Conditions", *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, AIAA 2009-537.

- [22] von Ellenrieder, K. D., Parker, K., Soria, J., (2003) "Flow Structures Behind a Heaving and Pitching Finite-span Wing", *Journal of Fluid Mechanics*, 490, 129-138.
- [23] Dong, H., Mittal, R., Najjar, F. M., (2006) "Wake topology and hydrodynamic performance of low-aspect-ratio flapping foils", *Journal of Fluid Mechanics*, 566, 309-343.
- [24] Ol, M. V., (2007) "Vortical Structures in High Frequency Pitch and Plunge at Low Reynolds Number", *37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, AIAA 2007-4233.
- [25] Lian, Y., (2009) "Numerical Investigation of Boundary Effects on Flapping Wing Study", *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, AIAA 2009-539.
- [26] Usuh, C.O., Young, J., Lai, J.C.S., Ashraf, M.A., (2012) "Numerical Analysis of a Non-Profiled Plate for Flapping Wing Turbines", *18th Australasian Fluid Mechanics Conference*.
- [27] Stevens, P. R. R. J., Babinsky, H., (2014) "Low Reynolds Number Experimental Studies on Flat Plates", *52nd Aerospace Sciences Meeting*, AIAA 2014-0743.
- [28] Babinsky, H., Jones, A. R., (2009) "Unsteady Lift Generation on Sliding and Rotating Flat Plate Wings", *39th AIAA Fluid Dynamics Conference*, AIAA 2009-3689.
- [29] Ramasamy, M., Lee, T. E., Leishman, J. G., (2007) "Flowfield of a Rotating-Wing Micro Air Vehicle", *Journal of Aircraft*, 44 (4), 1236-1244.
- [30] Lewin, G. C., Haj-Hariri, H. (2003), "Modelling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow", *Journal of Fluid Mechanics*, 492, 339-362.
- [31] Baik, Y. S., Bernal, L. P., Granlund, K., Ol, M. V., (2012) "Unsteady force generation and vortex dynamics of pitching and plunging aerofoils", *Journal of Fluid Mechanics*, 709, 37-68.

ÖZGEÇMİŞLER

Ferhat KARAKAŞ

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği Bölümü lisans son sınıf öğrencisi. von Karman Akışkanlar Mekaniği Enstitüsü'nde ses üstü hızlardaki akım yapılarının hesaplamalı olarak modellenmesi üzerine staj çalışması yapmıştır.

Onur PAÇA

2014 yılında İTÜ Uzay Mühendisliği Bölümü'nden lisans diploması alarak mezun oldu. Çalışmalarına aerodinamik alanında sayısal olarak devam etmektedir. 2014 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Uçak ve

Uzay Mühendisliği Disiplinlerarası Lisansüstü Programı öğrencisi oldu. Halen aynı bölümde yüksek lisans öğrencisidir.

Cihad KÖSE

2013 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümü'nden lisans diplomasını aldı. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak ve Uzay Mühendisliği Lisansüstü Programı'nda yüksek lisans öğrencisi olarak eğitime başladı ve halen bu programdaki eğitimine devam etmektedir. Aynı zamanda İTÜ Trisyonik Laboratuvarı'nda yapılan araştırma projelerinde görev almaktadır.

Arş.Grv. Y.Müh. Onur SON

2008 yılında İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Mühendisliği Bölümü'nden lisans, 2010 yılında da Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı'ndan yüksek lisans diplomasını aldı. 2010 yılında aynı bölümde doktora programına kabul edilip, Uzay Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi'ne bağlı Trisyonik Laboratuvarı'nda çeşitli projelerde görev alıp, Ölçme Tekniği ve Deneysel Mühendislik derslerinin yardımcılığını yürütmüştür. Halen Uzay Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmakta olup, doktorasına devam etmektedir.

Y.Müh. Berk ZALOĞLU

2004 yılında İTÜ Uçak Mühendisliği Bölümü'nden lisans, 2008 yılında Uçak ve Uzay ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nden yüksek lisans diplomasını almıştır. Yine aynı bölümde doktora eğitimine devam etmektedir. İTÜ Trisyonik Laboratuvarı'nda deneysel akışkanlar mekaniği odaklı birçok araştırmada yer almıştır. 2013 yılından beri Avrupa Birliği 7. Çerçeve kapsamındaki NIOPLEX projesinde araştırmacı olarak çalışmaktadır.

Dr. İdil FENERCİOĞLU

1999 yılında İTÜ Uzay Mühendisliği Bölümü'nden lisans, 2002 yılında Uçak ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nden yüksek lisans diploması alarak aynı bölümden 2010 yılında doktor ünvanını aldı. Kısa süreli görevlendirmeler ile RWTH-Aachen Şok Dalgası Laboratuvarı ve University of Bath Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı'nda deneysel çalışma gruplarında görev yaptı. İTÜ Trisyonik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen bir çok projede araştırmalara katıldı ve çalışmalarını aynı laboratuvarı'da deneysel akışkanlar mekaniği konularında sürdürmeye devam etmektedir. 1999 yılında Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen aynı fakültede Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Prof. Dr. Okşan ÇETİNER

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği Bölümü'nden 1992 yılında lisans derecesini aldı. 1994 yılında Uçak Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı ve 1995 yılında yüksek lisans derecesini aldı. Amelia Earhart ödülünü kazanması üzerine doktora Lehigh

Üniversitesi'nde devam etti. 1999 yılında Uzay Mühendisliği Bölümünde Yardımcı Doçent kadrosuna atandı. 2008 yılında Doçent ünvanını aldı ve 2013 Kasım ayında ise Profesör kadrosuna atandı. İlgi ve çalışma alanları arasında Akışın Uyardığı Titreşimler, Akış-Yapı Etkileşimleri, PIV (Particle Image Velocimetry) ve Ölçme Sistemleri sayılabilir.