

**Havada Asılı Konumda Sekiz Figürü (Lemniskat) çizen  
Çırpan Kanat Hareketinin Teorik ve Deneysel Olarak  
İncelenmesi**

**PROJE NO: 109M311**

**Prof. Dr. Nafiz ALEMDAROĞLU**

**EKİM 2011  
ANKARA**

## 1. GİRİŞ

Bu raporda, ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümünde bir süredir yürütülmekte olan Çırpın Kanat Aerodinamiği çalışmalarının [1, 2, 3, 4, 5] devamını oluşturan fakat deney düzeneği yetersiz olduğu için sadece teorik ve sayısal yöntemlerle incelenen “sekiz hareketi çizen çırpın kanat” aerodinamiğinin deneysel incelenmesine olanak sağlayacak ve bu hızlı destek projesi ile imal edilen yeni bir kanat çırpma hareket mekanizmasının (düzeneğinin) tanıtımı ve bu düzenek kullanılarak yapılan ilk PIV ölçüm sonuçları sunulacaktır.

Hızlı destek programı kapsamında 109M311 nolu hızlı destek projesi ile desteklenen projemiz için sağlanan desteğin tamamı söz konusu hareket mekanizmasının üretimine/imalatına harcanmıştır. Daha önceki raporlarda ve proje teklifinde konsept tasarım olarak sunulan deney düzeneği tamamlanmış ve daha önceki deneylerde kullanılan mevcut su tankının üzerine monte edilmiştir. Yeni sistem tamamen bilgisayar kontrollü bir sistem olup kanat hareketi çok hassas bir şekilde servo motorlar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Kanat çırpma hareketinin sekiz çizebilmesi için hem dikey (aşağı yukarı) hem de yatay (sağa ve sola) yönlere olmak üzere her iki eksen üzerinde de hareket ettirilebilmektedir. İmal edilen hareket mekanizması programlanabilmekte ve istenilen genlik ve frekans da söz konusu sekiz hareketini çok hassas bir şekilde çizebilmektedir. Sistem aynen iki boyutlu nümerik kontrollü (CNC) bir tezgah mantığı ile çalışmaktadır.

Bu raporda üretilen hareket sistemi tezgahı detaylı olarak tanıtılacak ve bu sistem kullanılarak yapılan ilk PIV ölçümleri sunulacaktır. Bu sistem halen doktora çalışmalarını sürdürmekte olan doktora öğrencisi Nazım Oğuz Erkmen tarafından doktora tez çalışmaları sırasında yoğun bir şekilde kullanılacaktır.

Projenin hazırlanması ve başlatılması sırasında projede araştırmacı olarak görev yapan Yüksek Lisans öğrencisi Özge Başkan, Yüksek lisans tez çalışmaları kapsamında “sekiz şekli çizen kanat çırpma hareketini” nümerik olarak incelemiş ve tez çalışmalarını tamamlayarak [6] Brükseldeki Von Karman Enstitüsüne

Diploma Kursu programına kabul edilmiştir. ÖzgeBaşkan, söz konusu projeyi başlatmış fakat maalesef projenin desteklenmesinin gecikmesi nedeni ile düzeneğin imalatı tez çalışmalarına yetişememiş, bu nedenle de yüksek lisans tezinde deneysel sonuçları kullanamamıştır.

Başlatmış olduğumuz bu çalışma daha sonra doktora öğrencisi Nazım Oğuz Erkmen tarafından devam ettirilmiş, ve söz konusu deney düzeneği geçtiğimiz Mayıs 2010 ayı içerisinde tamamlanmıştır. Nazım Oğuz Erkmen deney düzeneğinin tamamlanmasını ve imalatın istenilen şartlara uygun olarak yapılmasını takip etmiştir. Söz konusu hareket mekanizmasının imalatı tamamlanmış olup deney düzeneği üzerine de yerleştirilmiştir. Sistemin çalıştığı ve istenilen hareketleri yapıp yapmadığı da kontrol edilmiş ve bu proje raporuna konulmak üzere örnek bir PIV ölçümü yapılmıştır. Söz konusu sistem önümüzdeki dönemlerde Nazım Oğuz Erkmen tarafından doktora tezi çalışmaları kapsamında çok yoğun bir şekilde kullanılacaktır. Böylece Yüksek Lisans öğrencisi Özge Başkan'ın sayısal yöntemlerle incelemiş olduğu sekiz şekli çizen kanat çırpma hareketinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılacaktır. Nazım Oğuz Erkmen hem kendi yapmış olduğu ölçümlerin hem de Özge Başkanın tezindeki hesaplamaların ve simülasyonların doğrulamasını yapmış olacaktır.

Bu rapor iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda sekiz şekli çizerek kanat çırpma hareketinin teorik ve sayısal incelemeleri sunulacaktır. İkinci kısımda ise deneysel çalışmalar anlatılacaktır. Deneysel çalışmaların ilk kısmında öncelikle PIV ölçüm tekniği kısa bir şekilde tanıtılacak ve tekniğin genel bazı önemli özelliklerine değinilecektir. Söz konusu ölçüm tekniği, ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde 2006 yılından bu yana yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Öncelikle çırpan kanat hareketinin aerodinamik analizlerini yapmak üzere kurulmuş olan ilk deney düzeneği ve kullanılan PIV sistemi tanıtılacaktır. Daha sonra eski hareket mekanizması kullanılarak yapılan lineer kanat çırpma hareketinin deneysel sonuçları sunulacak ve bu sonuçların nümerik hesaplamalarla karşılaştırılması yapılacaktır. Deneysel çalışmaların ikinci kısmında ise yeni yapılan deney

düzenegi tanıtılacak ve yeni imal edilen bu hareket sistemi kullanılarak yapılan ilk deneylerin sonuçları verilecektir.

## **2. TEORİK VE NÜMERİK ANALİZLER**

Bu proje kapsamında havada askı durumunda yatay sekiz hareketi çizerek kanat çırpma durumu nümerik olarak yüksek lisans tez öğrencisi Özge Başkan tarafından çalışılmıştır [6]. Bu proje teklifi Özge Başkan tarafından yüksek lisans tez çalışmaları sırasında tezin deneysel kısımlarını yapmak üzere hazırlanmıştır. Fakat projenin alınması gecikince, projenin deneysel kısmı tamamlanamamıştır. Özge Başkan yüksek lisans tez çalışmaları kapsamında olayı sadece nümerik olarak inceleyerek, deneysel olarak da sadece lineer kanat çırpma hareketini inceleyerek yüksek lisans tez çalışmasını tamamlamıştır.

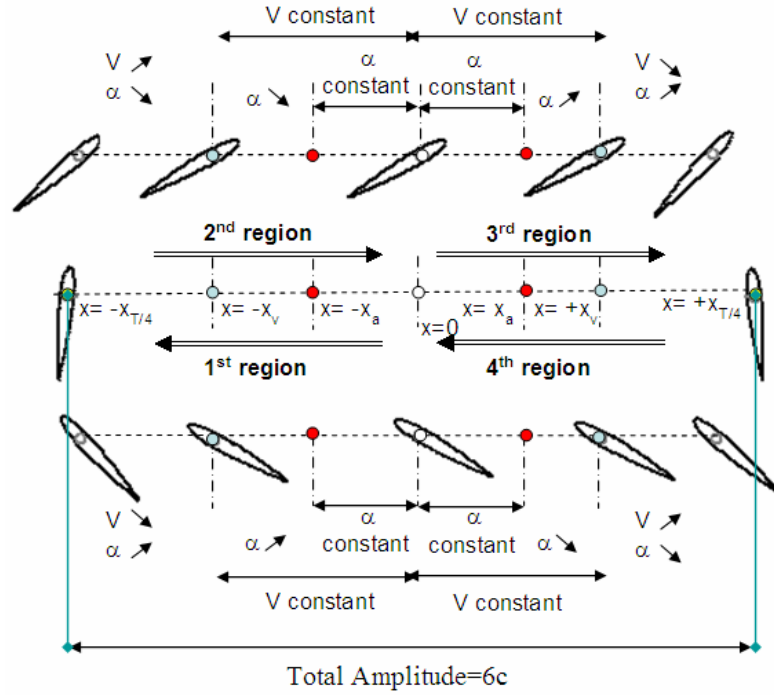
Bu bölümde sekiz şekli çizerek kanat çırpma hareketinin nümerik yöntemlerle gerçekleştirilen çözümleri sunulacaktır. Sekiz şekli çizerek yapılan kanat çırpma hareketi ile doğrusal olarak yapılan kanat çırpma hareketinin karşılaştırılması yapılmış ve her iki hareketin aralarındaki farklılıklar ortaya konulmuştur. Çözümler ticari bir yazılım paketi olan Fluent yazılım paketi kullanılarak yapılmıştır

### **2.1 Doğrusal kanat çırpma hareketinin tanımı:**

Genel olarak bir böceğin veya bir kuşun havada asılı konumdayken kanat çırpma hareketinde 4 ayrı faz bulunmaktadır. Bunlardan iki tanesi doğrusal hareket (aşağıya ve yukarıya doğru çırpma) iki tanesi de dönme fazlarıdır ki bunlara “pronation” ve “supination” denilmektedir. Bu fazlar esnasında kanat bir nokta etrafında dönerek hareketin yönünü değiştirmektedir.

Daha önce yaptığımız çalışmalarda, Kurtuluş [1, Sarıgöl [2], Akay[3] kanat çırpma hareketi 4 ayrı bölgeye ayrılmıştır. İlk bölge aşağı doğru kanat çırpma fazının yarısıdır. İkinci bölge ise yukarı doğru kanat çırpma hareketinin yarısıdır. Üçüncü ve dördüncü bölgeler ise bu ilk bölgelerin ayna görüntüleridir. Yani sırasıyla, yukarı doğru çırpma hareketinin ikinci yarısı ile aşağı doğru çırpma

hareketinin ikinci yarısıdır. Şekil 2.1 bir periyod boyunca kanat çırpma hareketinin bölgelerini detaylı olarak göstermektedir.



Şekil 2.1. Düzgün doğrusal kanat çırpma hareketinde değişik bölgelerin tanımı.

Kurtuluş [1]

Yukarıda bahsedilen her bölge bir doğrusal hareket ile onu takip eden bir dögüsel hareketten oluşmaktadır. Doğrusal hareket bölgesinde kanatçık sabit hızla  $t_v$  anına kadar hareket etmekte bu noktada hız azalmaya başlamaktadır. Kanadın veteri üzerinde hücum kenarından belli uzaklıktaki bir nokta etrafında (üç farklı durum için  $1/4c$ ,  $1/2c$ ,  $3/4c$ ) dönme daha önceden belirlenen bir  $t_a$  zamanında ve  $x_a$  konumunda başlamakta ve tamamlanmaktadır. Linear çırpma her çırpma durağan durumdan başlamakta ve durarak sonlanmaktadır.

“T” kanat çırpma hareketinin periyodudur. Merkezden ( $x=0$ )  $x_v$  pozisyonu ve  $t_v$  anına kadar kanat sabit hızla hareket etmektedir.  $[t_v, T/4]$  zaman aralığında kanat

sıfır hıza ulaşınca kadar yavaşlamaktadır. Bu arada  $t_a$  anında ve  $x_a$  pozisyonunda kanat dönme noktası etrafında dönmeye başlar ve  $90^\circ$  hücum açısına  $t=T/4$  de ulaşır.

Lineer hız  $V$  ve açısal hız  $\omega$  nın tarifleri aşağıdaki denklemlerle verilmiştir. Bu tip hız hareketinin seçilmesindeki neden de ardışık iki faz arasındaki hız ve ivmelerdeki sürekliliği sağlamaktır [1, 2].

$$V = V_0 \cos \left( \frac{\pi}{2} \frac{(T/4 - t_v)}{(T/4 - t_v)} \right) \quad (2.1)$$

$$\omega = -\frac{\omega_{\max}}{2} \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} \frac{(T/4 - t_a)}{(T/4 - t_a)} \right) \right) \quad (2.2)$$

$$\omega_{\max} = \frac{2\alpha_0}{T/4 - t_a} \quad (2.3)$$

$$T = \frac{4\pi}{2|V_0|} \left( \frac{T}{4} - x_v \right) + t_v \quad (2.4)$$

Bu çalışmada kullanılan lineer kanat çarpma hareketi daha önceki çalışmalarımızda kullandığımız tariflerin aynısıdır [1,2,3]. Tüm incelenen durumlarda;

$$x_v = x_c = 2c$$

$$t_v = t_c$$

ve dönme merkezi hücum kenarından çeyrek veter uzaklığındadır.

## 2.2 Yatay sekiz şekli çizen kanat çarpma hareketinin tarifi

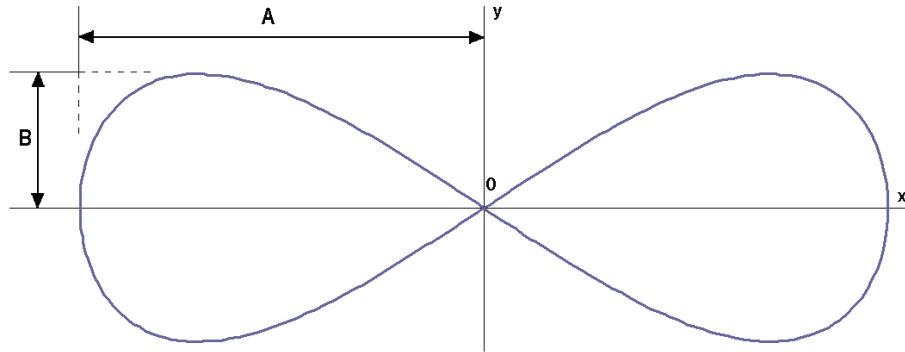
Bu araştırmanın konusunu oluşturan ikinci bir hareket tipi de bu hareket kinematiği üzerine “y” yönünde de bir hareketin eklenmesi ile “yatay sekiz şeklindeki hareketin” elde edilmesidir. Bu tip hareket sırasında kanat sürekli ve kesintisiz olarak bir yörünge üzerinde hareket etmektedir. Kanadın takip ettiği yörünge Lissajous eğrileri ile tarif edilmektedir. Bu eğriler kompleks harmonik bir hareketi tarif eden parametrik eğrilerdir. Bu denklem sistemi ise şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$x = A \sin(\omega t + \delta) \quad (2.5)$$

$$y = B \sin(\omega t) \quad (2.6)$$

$$t \in [0, 2\pi]$$

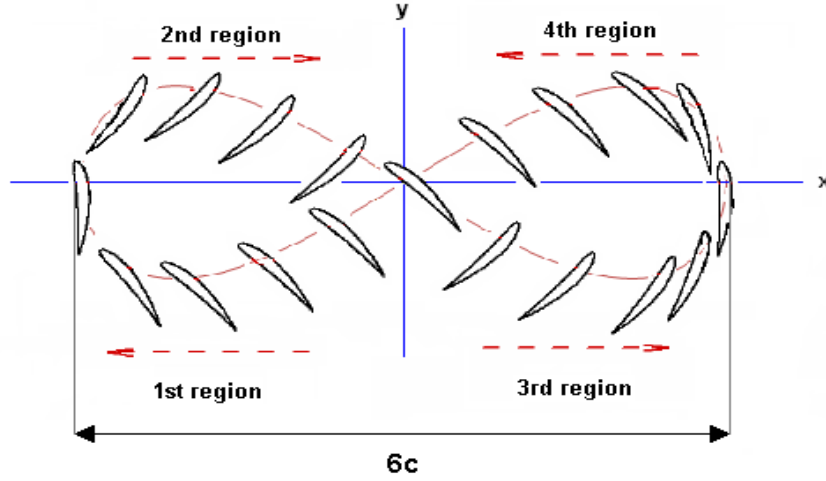
$\delta = \frac{\pi}{2}$ ,  $a=1$  ve  $b=2$  olması durumunda elde edilen şekil aşağıda gösterildiği gibi (Şekil 2.2) yatay durumdaki sekiz şeklidir.



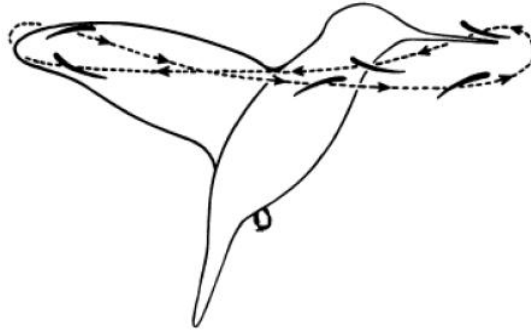
**Şekil 2.2.** Yatay konumdaki sekiz şekli hareketi için kullanılan Lassajous eğrisi

Yukarıda verilen denklemler (2.5) ve (2.6) bu çalışma kapsamında yatay sekiz şekli hareketi için kullanılmıştır. Bu şekil hem “x” hem de “y” yönlerinde incelendiğinde “x” yönündeki hareketin linear hareketin aynısı olduğu, buna

karşın “y” yönündeki hareketin kinematiğinin yatay sekiz şekli ile belirlendiği, diğer bir deyişle kanatçığın “x” yönündeki pozisyonu linear hareketle belirlendiği halde “y” eksenindeki pozisyonunun Lissajous eğrileri denklem sistemi ile belirlendiği görülmektedir. Şekil 2.3 kanadın Lissajous eğrisinin üzerindeki konumlanmasını göstermektedir.



Şekil 2.3 Lissajous eğrisi üzerindeki kanadın pozisyonları.



### Gerçek hayatta kuşların sekiz şekli çizerek kanat çırpma hareketi

Sekiz şekli hareketinin nümerik analizleri için 4 değişik “B” değeri (y yönündeki genlik) kullanılarak “y” yönündeki hareketin etkisi incelenmiştir. Kanadın “x”



yönünde toplam katettiği uzaklık 6 veter uzunluğundadır. “A” değeri bu deplasmanın yarısına eşittir ve tüm incelenen durumlar için 3c mesafesine karşılık gelmektedir.

Teorik ve nümerik çalışmalarda iki değişik tipte kanat profili incelenmiştir. Bunlardan biri simetrik kanat parofili (NACA 0012) diğeri ise kamburlu bir profil olan (NACA 6412)dir. Böylece kamburluğun hareketin aerodinamiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca hücum açısının ve Reynolds sayısının etkileri de sayısal olarak incelenmiştir.

### 3. NÜMERİK ÇALIŞMALAR

Çırpan kanat etrafındaki zamana bağlı, laminar, sıkıştırılmaz, 2 boyutlu akım alanı, ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılım paketi olan FLUENT 6.26 yazılım paketi ile çözülmüştür.

#### 3.1 Çözülen denklemler

İki boyutlu, zamana bağlı Navier Stokes denklemleri sonlu hacim yöntemi kullanılarak sıkıştırılmaz bir akım için çözülmüştür. Geçerli olan kütle ve momentum denklemleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = s_m \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.2)$$

(2.2) denklemindeki ,  $\tau$  gerilim tensörünü göstermektedir ve

$$\tau = \mu \left[ \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \vec{I} \right] \quad (3.3)$$

ifadesi ile verilmiştir.

Bu denklemde,  $\mu$  moleküler vizkoziteyi,  $I$  birim tensörü ve denklemin sağ tarafındaki ikinci terim ise hakim genleşmenin etkisini göstermektedir.

Nümerik simülasyonlarda kanadın hareketi “FLUENT” paketinin “Dinamik Ağ” özelliği kullanılarak yapılmıştır. Kanat çırpma hareketi yazılıma kullanıcı tarafından tariflenmektedir. Kanada çırpma hareketi yaptırılarak ve tüm ağın önceden tariflenen bu hareket denklemleri kullanılarak sağlanmıştır. Bunun için yazılımın önemli bir kolaylığı olan “Kullanıcı Tarafından Tariflenen Fonksiyon Özelliği” (User Defined Function, UDF) kullanılmıştır.

Hesaplamalar yapılırken, UDF her zaman basamağında hız bilgilerini programa aktarmaktadır. Fluent yazılım paketinde UDF ile yazılıma aktarılan hareket teker teker bölge bazında kullanılmaktadır örneğin duvar, ağ giriş bölgeleri gibi.. Kanadın hareketli çözüm ağının ise sabit olması durumunda gerekli dinamik ağ metodlarının (düzeltme, tabakalandırma, veya tekrar ağ örme gibi) kullanılması gerekmektedir. Zira duvarın hareketi ile ağın deformasyonu veya hareket ile birlikte tekrar örülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, sınır tabaka içindeki ve hesaplama ağı içindeki negatif hücre hacimleri problemlerinden kurtulmak için UDF tarafından yüklenen hareket duvara, ağ noktalarına ve sınır şartlarına uygulanmıştır.

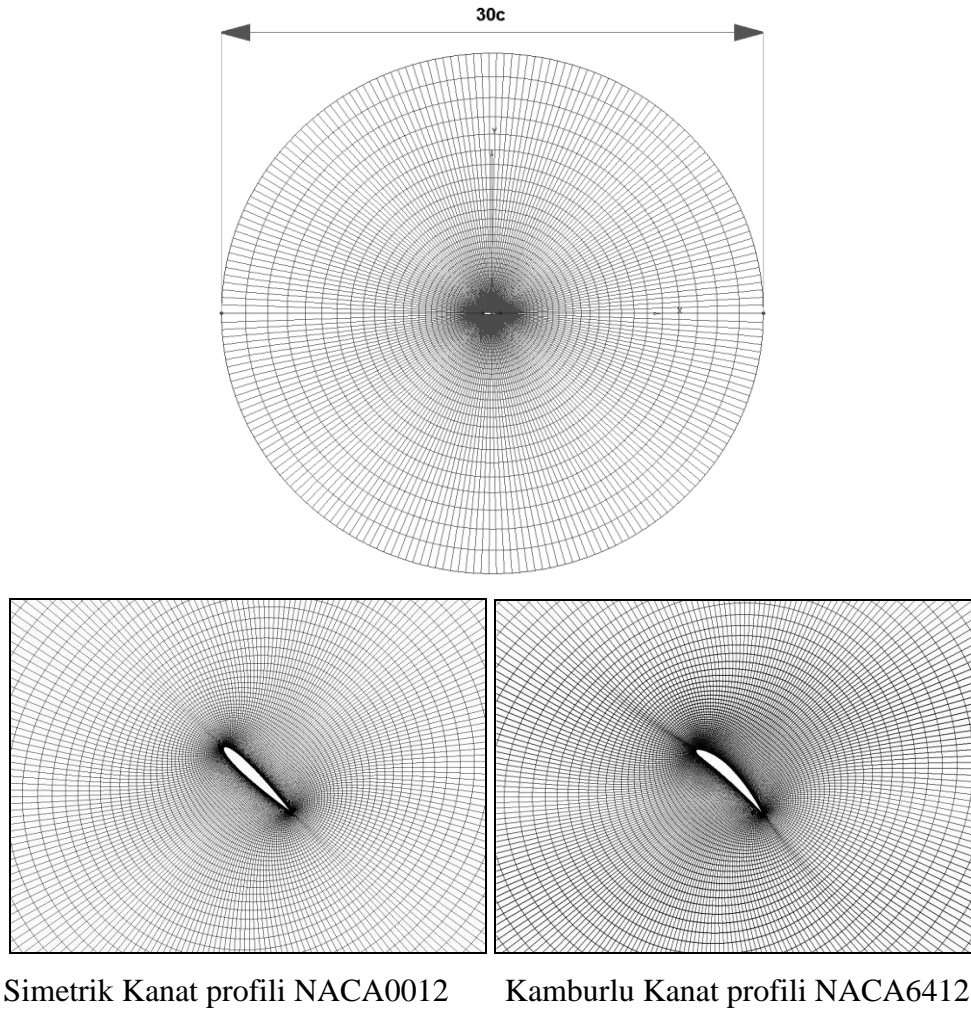
FLUENT tarafından çözülen denklem takımı ağ hızının eklenmesi ile değişmektedir. Rastgele bir kontrol hacmi  $V$  içindeki herhangi bir scalar birim  $\Phi$  için salınım denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (\vec{v}_g \cdot \vec{n}) d\vec{A} = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (3.4)$$

(2.4) denkleminde,  $\vec{v}_g$  hareket eden ağ içindeki ağın hızını,  $\Gamma$  difüzyon katsayısını ve  $S_\phi$  de  $\phi$  için kaynak terimini ifade etmektedir.

### 3.2 Çözüm ağı

Hesaplamalarda “O tipi” yapısal hiperbolik ağ kullanılmıştır. Çözüm ağının örülmesinde katı yüzeyden normal mesafe olarak  $y^+ = 0.5$  kullanılmıştır. Çözüm ağının örülmesinde ticari bir yazılım olan “Gridgen” yazılım paketi kullanılmıştır. Örülen ağ içinde yaklaşık olarak 20000 (220×90) hücre kullanılmaktadır. Çözüm alanı 15 veter uzunluğunda bir çap oluşturmaktadır. Kanat profilleri yüzeyinde 220 ağ noktası kullanılmıştır. İlk ağ noktasının kanat yüzeyinden olan uzaklığı ise  $10^{-3}$  veter uzunluğundadır (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1.** Kanat profilleri etrafındaki çözüm ağı

Çözümlerde uzak alan etkisi de göz önüne alınmıştır. Bunun için 10, 15 ve 20 veter uzaklıkları uzak alan sınırı olarak alınmıştır. Göreceli hatanın çok düşük olduğu gözlemlendiğinden en uzak çözüm ağı mesafesi olarak 15 veter uzunluğunun yeterli olacağı bulunmuştur.

### 3.3 Nümerik sonuçlar

Nümerik çalışmalar “y” eksenini yönündeki hareketin aerodinamik kuvvetler üzerindeki etkilerini bulmak ve sekiz şekli hareketinin doğrusal harekete göre avantajlarını bulmak amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla bir çok değişken için değişik durumlar incelenmiştir. İncelenen parametreler arasında kanadın başlangıçtaki hücum açısı, Reynolds sayısı, kanatçık profilinin şekli, (Bakınız Tablo 3.1) listelenebilir. Anlık aerodinamik kuvvetlere ek olarak basınç dağılımları, vortisite eşeğrileri (konturları), ortalama taşıma ve sürüklenme katsayıları, ve bu katsayıların birbirlerine oranları da hesaplanmıştır. .

**Tablo 3.1.** Nümerik çalışmalarda incelenen parametreler

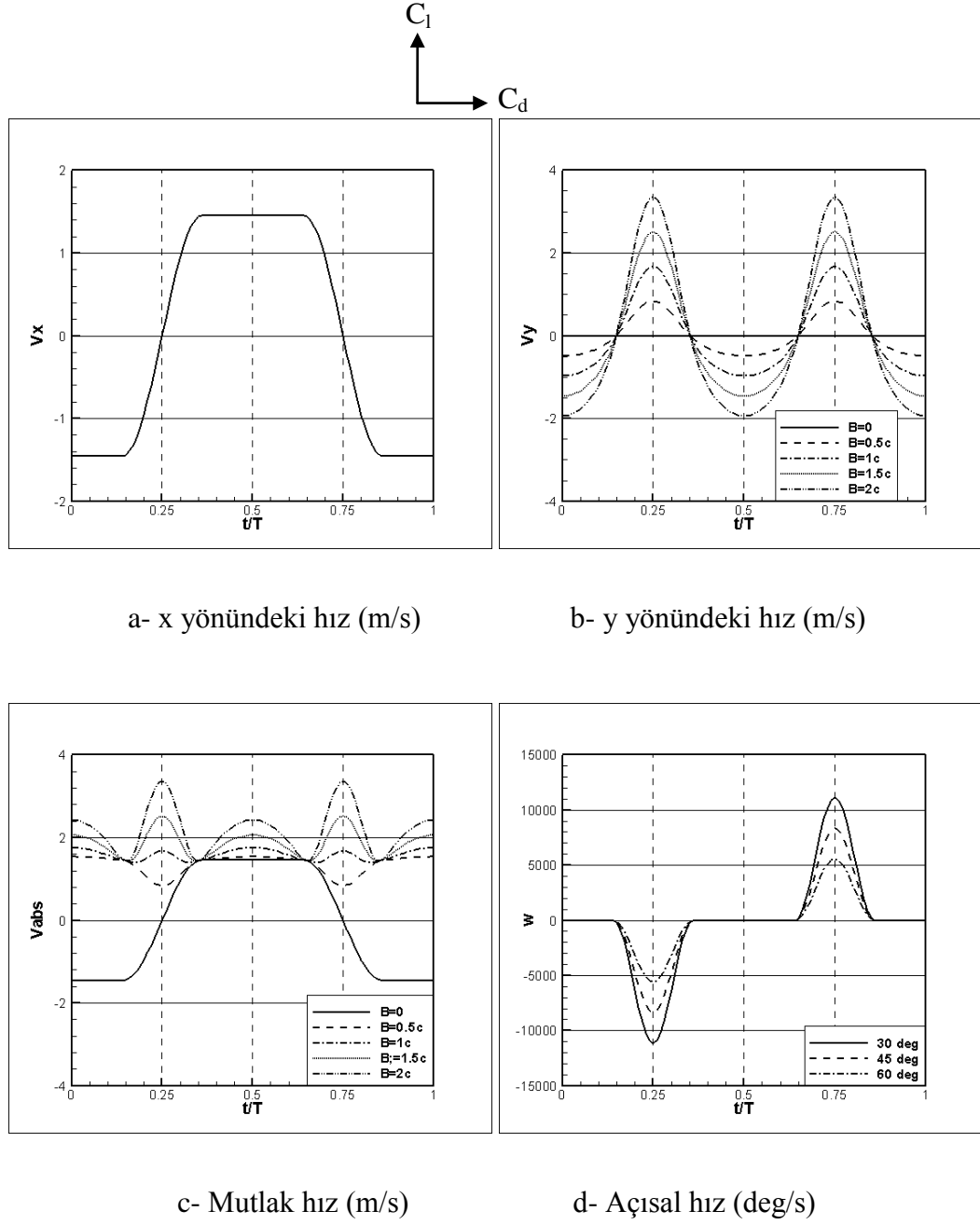
B	0, 0.5c, 1c, 1.5c, 2c
$\alpha$	30°, 45°, 60°
Re	200, 1000, 5000
A/F	NACA 0012, NACA 6412

Havanın vizkozitesi ve yoğunluğu için kullanılan değerler sırasıyla

$1.789 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$  and  $1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$  dir.

Kanatçık etrafındaki akışın periyodik olmasını garanti etmek ve başlangıçtaki kararsızlık etkilerini azaltmak amacıyla tüm alan için yapılan hesaplamalar çarpma hareketinin başlangıcından sonraki 7 nci periyodu için yapılmıştır. Şekil 3.2 de

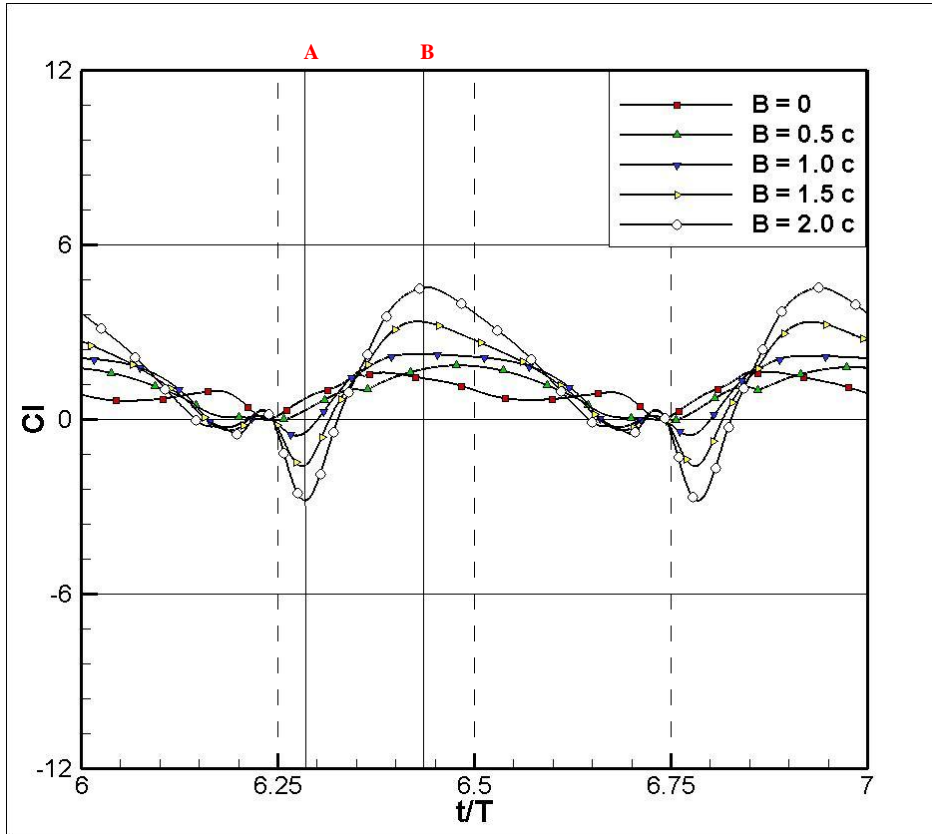
“x” ve “y” yönlerindeki hız değişimlerini, mutlak hız ve açısal hız değerlerinin zamana göre değişimlerini görmek mümkündür [6].



Şekil 3.2. Kanat çırpma hareketinin kinematığı  $Re=1000$

### 3.3.1 “y”- yönündeki genliğin etkisi:

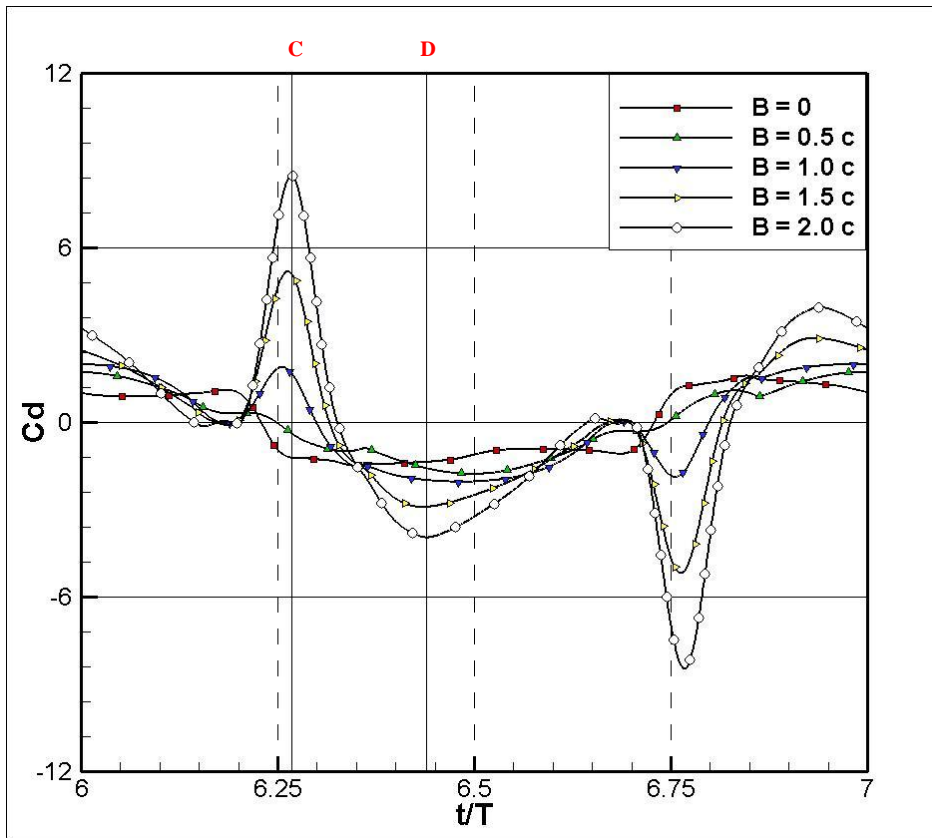
Hareketin “y” yönündeki genliğinin etkilerini bulmak üzere 5 değişik genlik değeri için çözümler 30, 45 ve 60 derecelik hücum açıları için kullanılmıştır. Bu genlikler için ayrı ayrı hesaplanan taşıma ve sürüklenme katsayıları bir boyutsuz periyod süreci boyunca karşılaştırılmıştır. Maksimum ve minimum taşıma ve sürüklenme katsayılarına karşılık gelen durumlardaki akım içindeki vorteks yapısını incelemek amacıyla taşıma katsayısı grafiği üzerindeki A-B, sürüklenme katsayısı eğrileri üzerindeki C-D çizgilerine karşılık gelen durumlar için aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.3). Gösterimi kolaylaştırmak ve konuyu çok fazla karıştırmamak için sadece 45 derecelik hücum açısı için elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.3. NACA 0012 profili için hücum açısı  $\alpha=45^\circ$  ve  $Re=1000$  durumu için yedinci periyod boyunca taşıma katsayısının değişimi

Bir periyod boyunca yapılan simülasyonlarda taşıma katsayısı eğrilerinde ikişer adet negatif ve pozitif tepe noktaları bulunmaktadır. İlk pozitif tepe noktası geçiş fazında, negatif tepe noktası ise hareketin tam dönüş fazında oluşmaktadır. Maksimum ve minimum taşıma katsayıları genliğin maksimum olduğu,  $B=2c$ , durumu için gözlenmektedir. Minimum taşıma değeri  $90^\circ$  sonrasında (A çizgisi üzerinde) olmaktadır.

Sıfır taşıma katsayısı x yönündeki hızın sıfır olduğu noktalarda (Şekil 3.4) elde edilmektedir. Bu durum diğer hücum açıları,  $30^\circ$  ve  $60^\circ$ , için de geçerlidir.

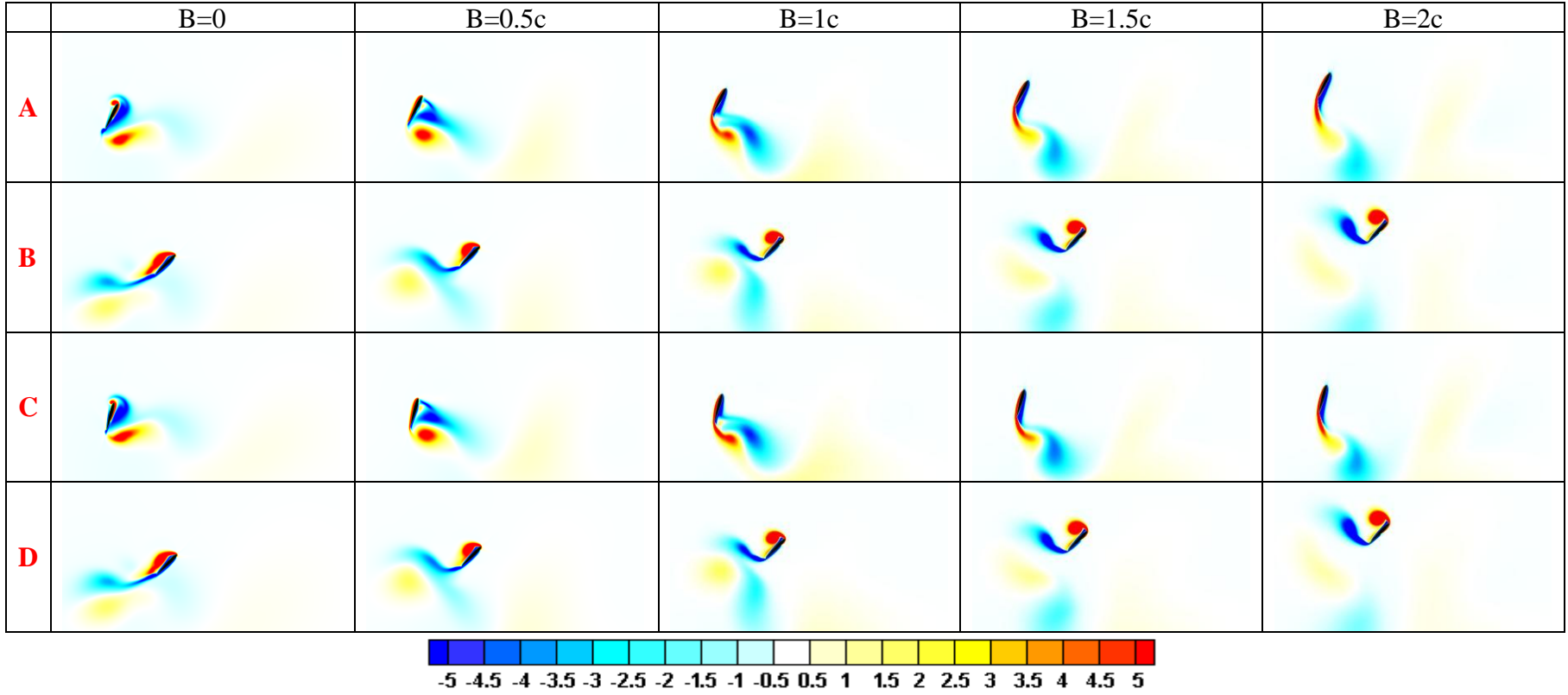


Şekil 3.4. NACA 0012 profili için  $\alpha=45^\circ$  ve  $Re=1000$  durumu için yedinci periyod boyunca kaldırma katsayısının değişimi

Kanat çırpma hareketinde yatay yöndeki kuvvet katsayısı hızın ve kuvvetin yönüne bağlı olarak ya anlık “sürüklenme” veya “itki kuvveti” katsayısı olmaktadır. Eğer “x” yönündeki hızın ve kuvvetin yönleri aynı ise veya her

ikisinin işaretleri aynı ise bu durumda kanatçık üzerine itki kuvveti etki ediyor demektir. Bu nedenle C çizgisi kanatçık üzerine itki kuvvetinin etki ettiğini, D çizgisi ise sürüklenme kuvvetinin etki ettiğini göstermektedir.



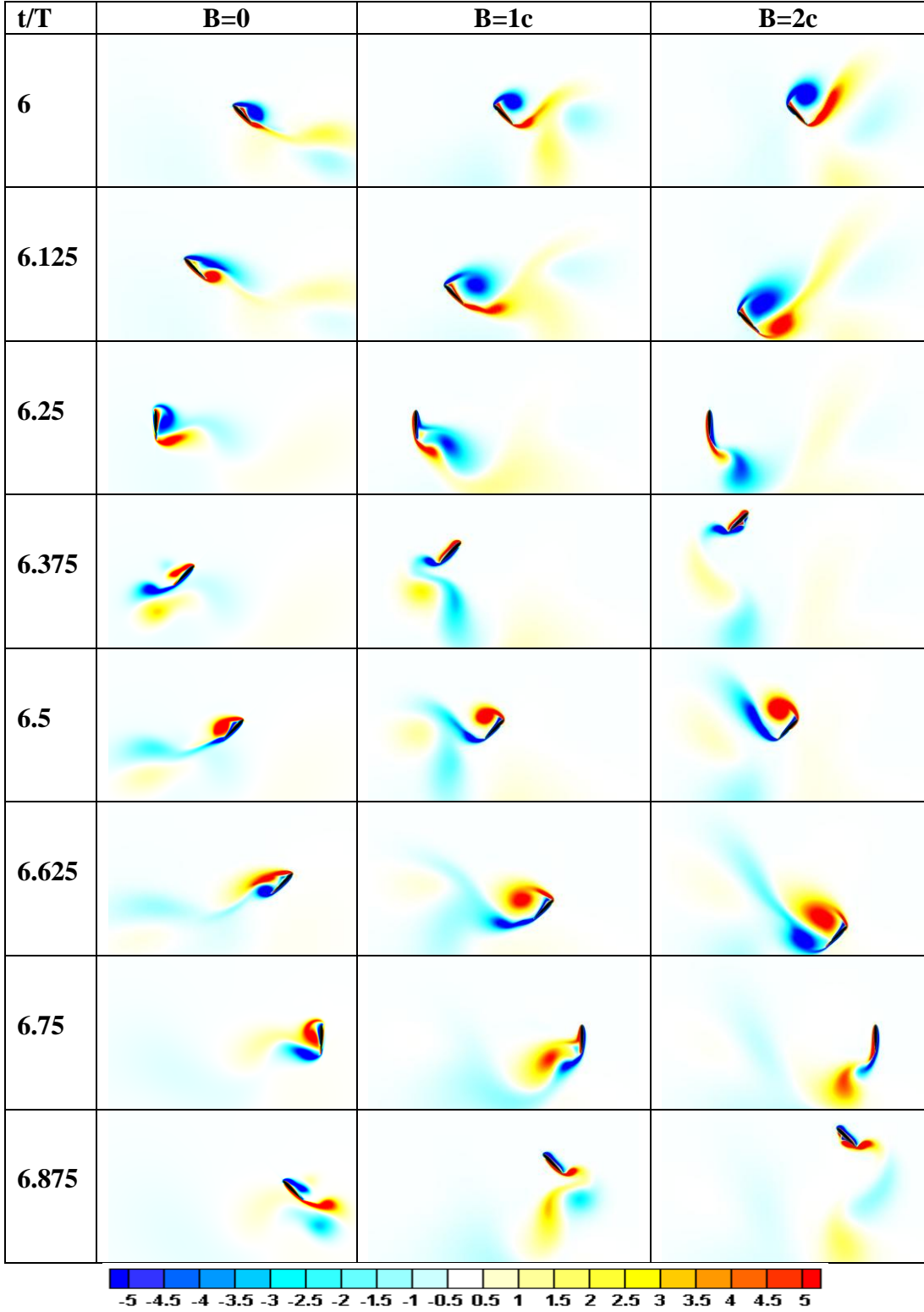


**Şekil 3.5.** A-B ve C-D çizgilerine tekabül eden boyutsuz eş vortisite eğrileri (konturları) çizgilerine karşılık gelen minimum ve maksimum kaldırma kuvveti katsayıları durumları için akım içindeki vorteks yapısı Şekil 3.5’ de gösterilmiştir. Birbirlerine ters yönde dönen hücum kenarı ve firar kenarı girdapları kanatçığın üst yüzeyinde bir emme yaratmakta bu da daha yüksek bir taşıma kuvvetini oluşturmaktadır.

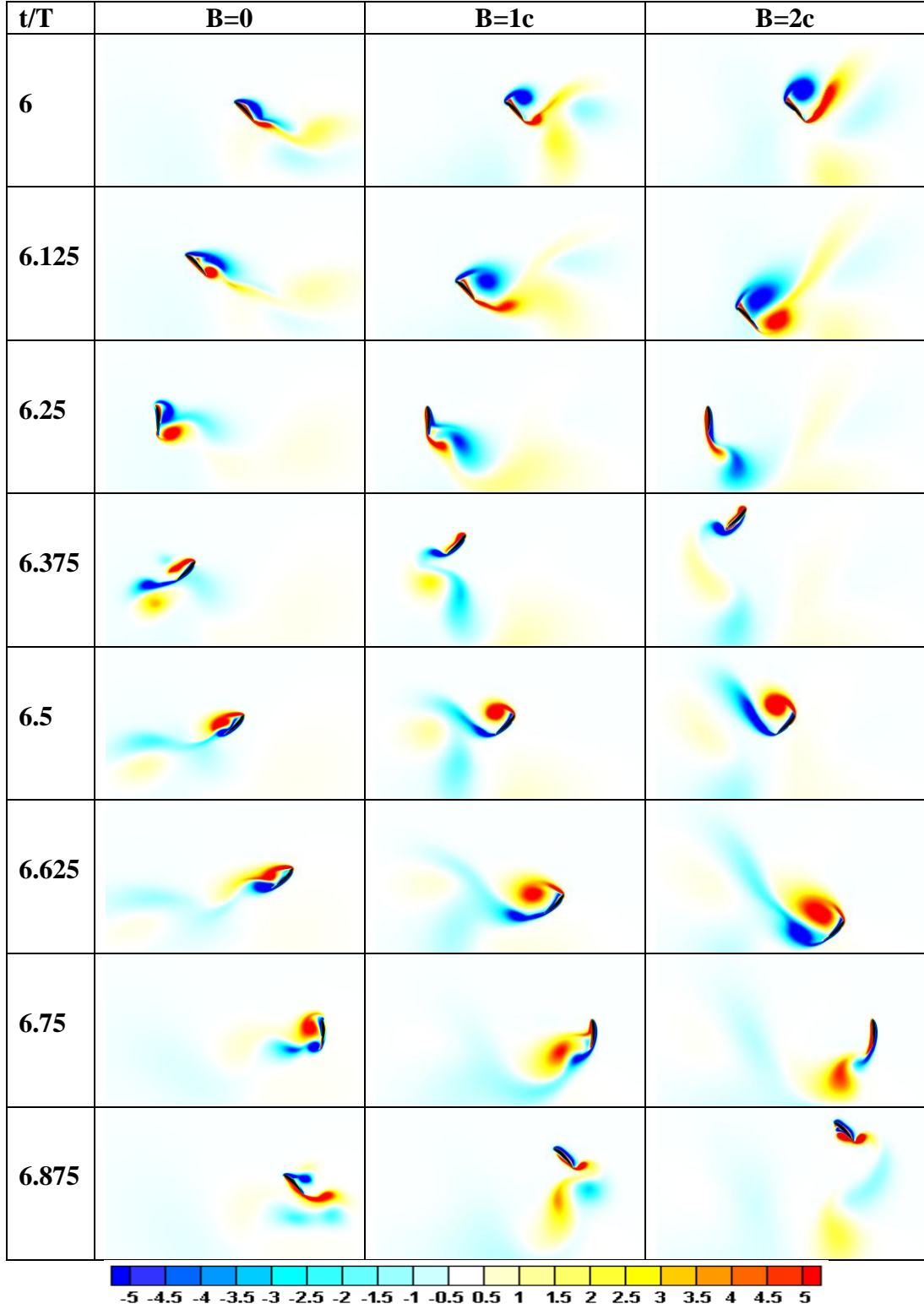
Maksimum ve minimum kaldırma kuvvetlerinin elde edildiği  $B= 2c$  durumu için, Şekil 3.3' deki A dan B ye geçiş, kanatçığın alt yüzeyindeki vorteksin üst yüzeye doğru hareket ederken şiddetinin arttığı gözlenmektedir. Bu geçiş sırasında kaldırma kuvveti sürekli olarak artmakta ve B çizgisine gelindiğinde maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu durumda vorteks kanatçığın tamamen üst yüzeyine göç etmiş durumdadır ve ardından kaldırma kuvvetinde bir azalma söz konusudur.

Sekiz hareketi çizerken kanat üzerinde göreceli olarak çok daha büyük hücum ve firar kenarı vorteksleri oluşmaktadır. “y” yönündeki hareketin genliğinin artması daha büyük vorteks yapılarının oluşmalarına neden olmaktadır. Dahası en son oluşan hücum ve firar kenarı vortekslerinin bir önceki çırpma sırasında oluşan vortekslerle etkileşmemesi nedeniyle vorteksler şiddetlerini lineer harekete oranla daha uzun bir süre koruyabilmektedirler (Şekil 3.6 ve 3.7)

Ayrıca buna ek olarak sekiz hareketi sırasında kanatçık çok daha sürekli ve kesintisiz bir şekilde hareket etmektedir. Kanatçığın aşağıya doğru çırpma hareketinin tam başlaması sırasında firar kenarında oluşan vorteks ile dikey yöndeki hareket sırasında hücum kenarında oluşan aynı yönde dönen vortekslerin etkileşimi sonucunda, kanatçığın dikey yöndeki hareketi firar kenarındaki vorteksin şiddetinin artmasına faydalı olmaktadır.

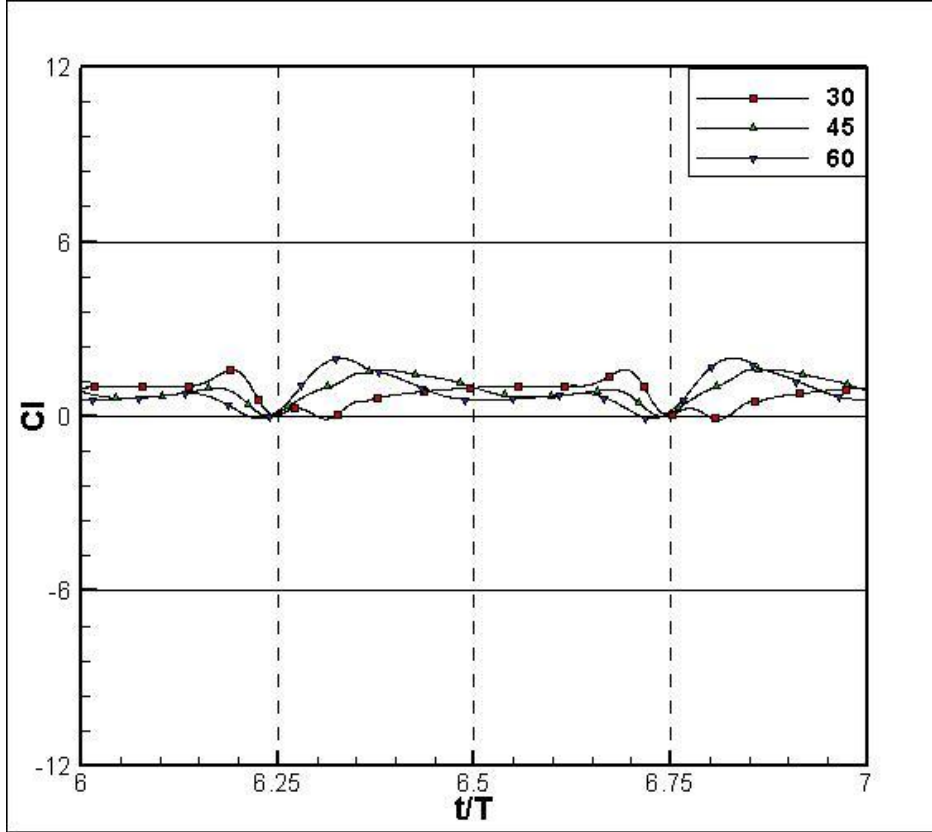


**Şekil 3.6:** NACA 0012 için yedinci periyod boyunca boyutsuz vortisite eş eğrileri,  $\alpha=45^\circ$  ve  $Re=1000$ .



Şekil 3.7 NACA 6412 için yedinci periyod boyunca boyutsuz vortisite eş eğrileri,  $\alpha=45^\circ$  ve  $Re=1000$ .

Şekil 3.8 ve 3.9 düzgün doğrusal (linear) kanat çırpma hareketi için taşıma ve sürüklenme katsayılarının 3 değişik başlangıç hücum açısı değerleri için değişimini göstermektedir. Düzgün doğrusal (linear) kanat çırpma hareketi için ( $B=0$ ) kanatçığın dönme noktası çeyrek veter uzunluğunda alınmıştır.

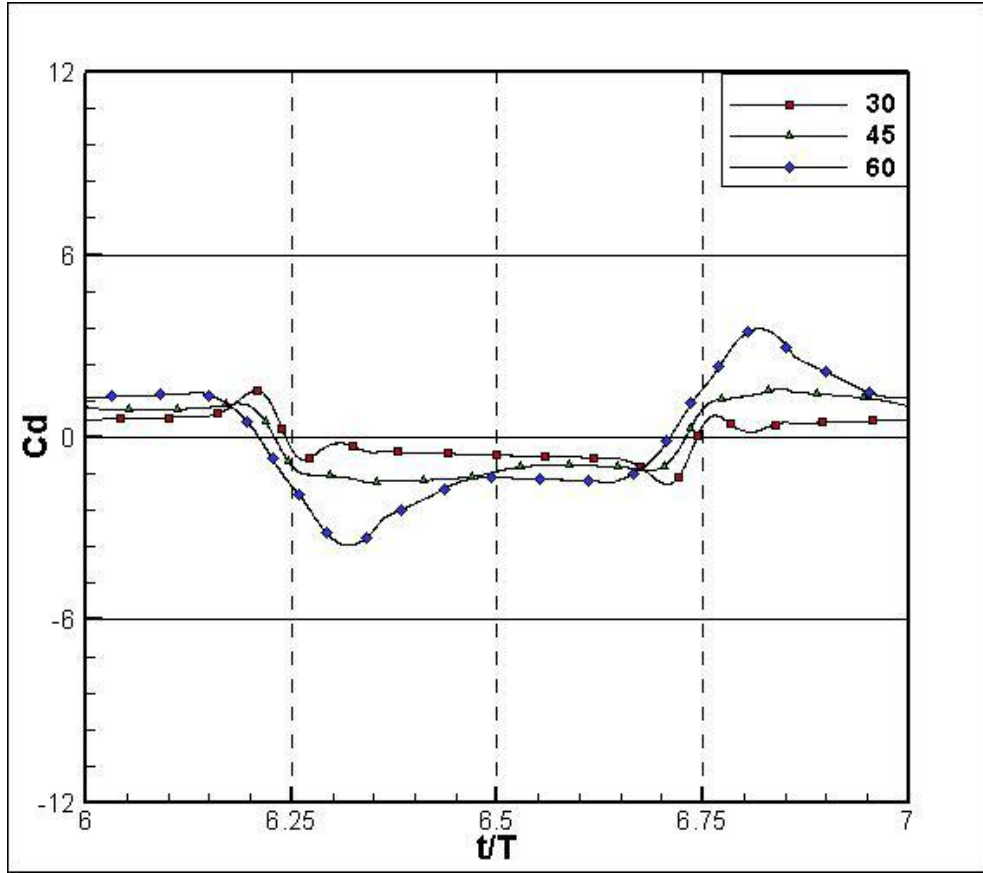


**Şekil 3.8** NACA 0012'nin düzgün doğrusal (linear) hareketi ( $B=0$ ) için taşıma katsayısının yedinci periyod boyunca değişimine  $Re=1000$  hücum açısının etkisi (Kutu içindeki değerler derece cinsinden başlangıç hücum açılarıdır)

Şekil 3.8 aynı  $B$  değeri için taşıma katsayısının değişik hücum açıları durumunda yedinci periyod boyunca olan değişimini göstermektedir. Hücum açısının düşük başlangıç değerlerinde olması durumunda hareketin dönüş fazlarında yüksek dönüş hızları elde edilmektedir. Yüksek dönüş hızları dönüş fazlarının sonunda

ise düşük kaldırma katsayıları, dönüş fazlarının başında ise yüksek taşıma kuvvetleri ile sonuçlanmaktadır.

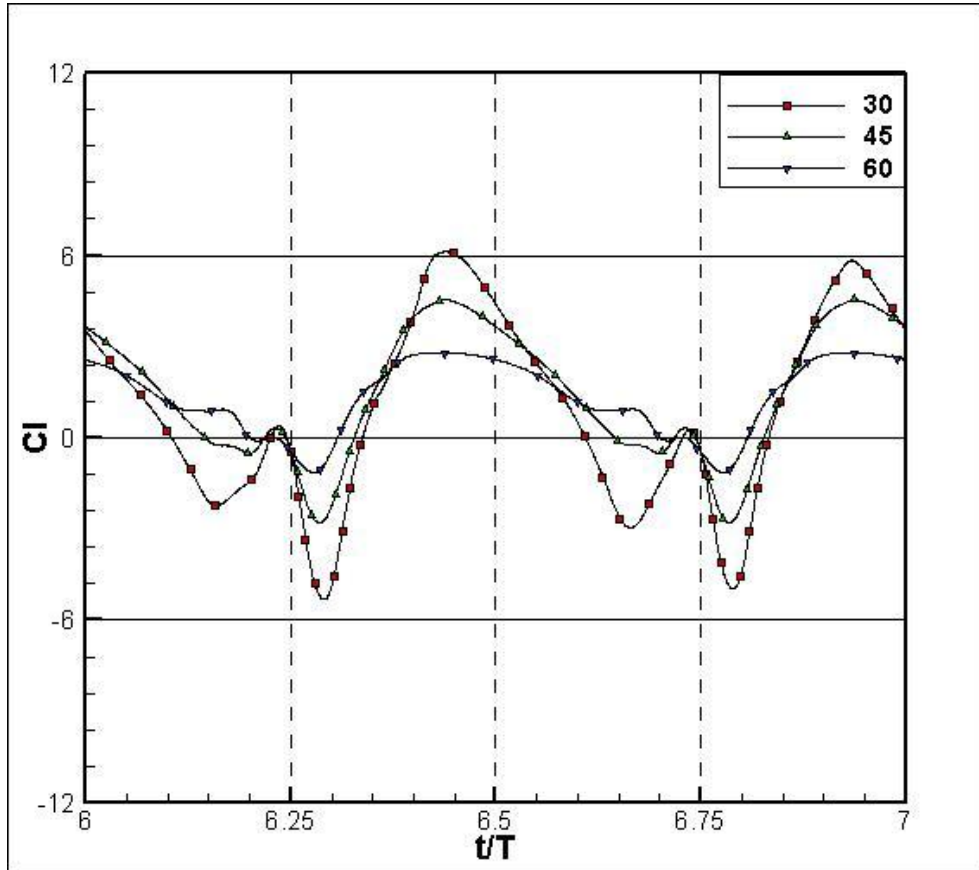
$B=0$  durumu için negatif kaldırma kuvveti durumu olmadığı bu şekilden açıkça görülmektedir. Birinci ve üçüncü bölgelerin sonunda (boyutsuz zaman değerleri 6.25 ve 6.75 için) taşıma katsayısının bu tepe değerleri kanatçığın yatay eksenle 90 derecelik hücum açısı yapması nedeni ile sıfır olmaktadır. 60 derece hücum açısında maksimum taşıma katsayısı diğer hücum açılarına göre daha yüksek bir değerde olmasına rağmen düzgün lineer hareket sırasında taşıma katsayısı çok ani olarak düşüş göstermektedir. Şekil 3.9 sürüklenme katsayısı değişimini Şekil 3.8' deki durumlar için vermektedir.



**Şekil 3.9.** NACA 0012 profili için sürüklenme katsayısının düzgün doğrusal (linear) harekette ( $B=0$ ) yedinci periyod boyunca değişimine ( $Re=1000$ ) hücum açısının etkisi (Kutu içindeki değerler derece cinsinden başlangıç hücum açılarıdır)

Eğer itki kanadın göreceli hareketine göre tarif edilirse, Şekil 3.9 da verilen tüm durumlar için hiç bir itkinin üretilmediği söylenebilir. Bu tarife göre sürüklenme kanat hareketine ters yöndeki kuvvet, itki ise kanat hareketi yönündeki kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle 6.25 ila 6.75 zaman aralığında, ki bu aralık aşağı doğru çırpma hareketine denk gelmektedir, bu bölgedeki eksi değerdeki sürüklenme katsayısı, sürüklenme anlamına gelmektedir. Halbuki yukarı doğru çırpma hareketi sırasında sürüklenme pozitif sürüklenme katsayısı ile gösterilmektedir.

$B=2c$  olması durumunda ise (Şekil 3.10) taşıma kuvveti katsayısı hücum açısının yerel değerinin 90 dereceyi geçmesinden hemen sonra negatif tepe noktaları oluşmaktadır. Başlangıç hücum

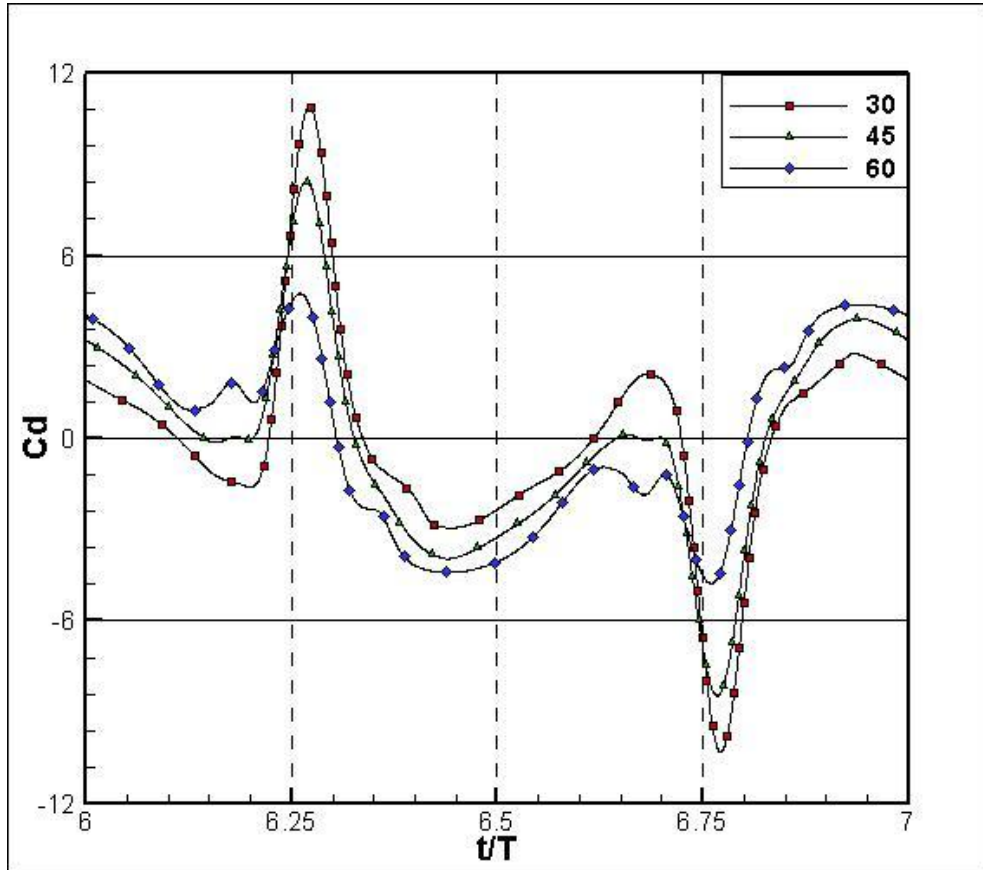


Şekil 3.10. NACA 0012 profili için  $B=2c$  ve  $Re=1000$  durumunda

taşıma kuvveti katsayısının yedinci periyod boyunca değişimine hücum açısının etkisi (Kutu içindeki değerler derece cinsinden başlangıç hücum açılarıdır)

açısının değerlerindeki azalma, ki bu hem ivmenin hem de dögüsel hızın artmasına neden olmaktadır, taşıma katsayında daha yüksek negatif değerlerin elde edilmesine neden olmaktadır. Fakat en küçük hücum açısı için dahi yüksek taşıma katsayıları elde edilmiştir.

B=2c durumu için sürüklenme katsayısı grafiğı (Şekil 3.11) B=0 durumu ile karşılaştırıldığında değışik karakteristikler göstermektedir. Sürüklenme katsayısının ve hareketin yönü dikkate alındığında 6.25 ila 6.75 arasında itki kuvveti katsayısı 90 dereceyi biraz geçtikten sonra her başlangıç hücum açısı değeri için elde edilmiştir. Düşük hücum açıları için daha yüksek sürüklenme katsayıları elde





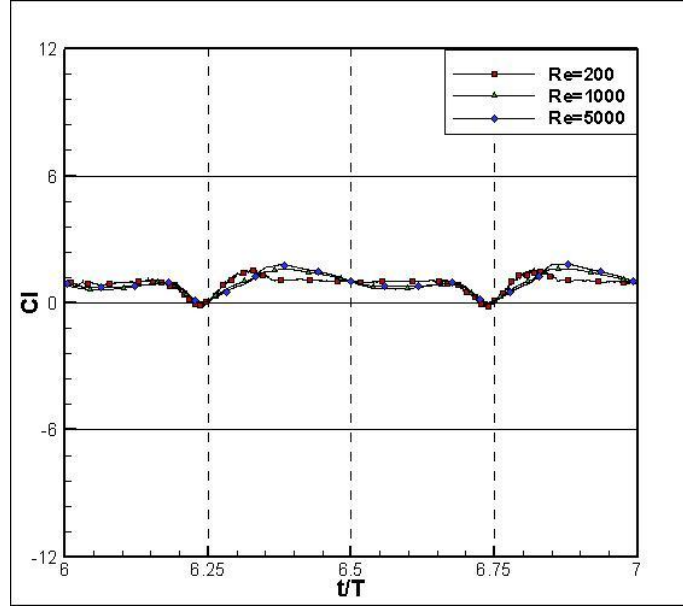
**Şekil 3.11.** NACA 0012 profili için  $B=2c$  ve  $Re=1000$  durumunda sürüklenme katsayısının yedinci periyod boyunca değişimine hücum açısının etkisi (Kutu içindeki değerler derece cinsinden başlangıç hücum açılarıdır)

edilmiştir. Maksimum sürüklenme katsayısı hareketin düzgün doğrusal hareket fazı sırasında firar kenarı girdaplarının kanatçık üst düzeyinde emme yaratması sonucunda oluşmaktadır.

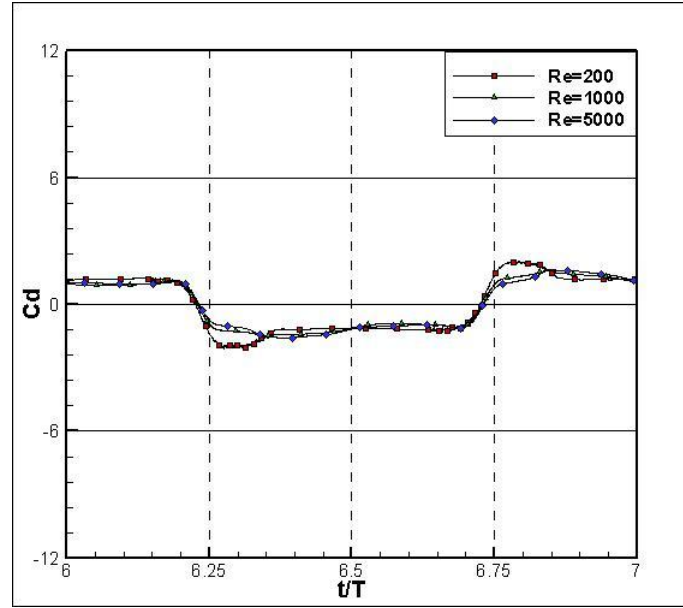
### **3.3.2 Reynolds sayısının etkisi**

Reynolds sayısının etkisi 45 derece hücum açısı için iki değişik genlik değeri için incelenmiştir. Bunlar  $B = 0$  ve  $B = 2c$  değerleridir. NACA 0012 profili için bu genlik değerlerinde taşıma ve sürüklenme katsayıları boyutsuz bir periyod boyunca karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar Reynolds sayısının 500, 1000 ve 2000 değerleri için yapılmıştır. Bu Reynolds sayısı rejimlerinde kuvvet katsayılarının Reynolds sayısının değişiminden çok az etkilendikleri gözlemlenmiştir. Kuvvet katsayıları her Reynolds sayısına karşılık gelen en yüksek hız değerlerine göre boyutsuz hale getirilmiştir.

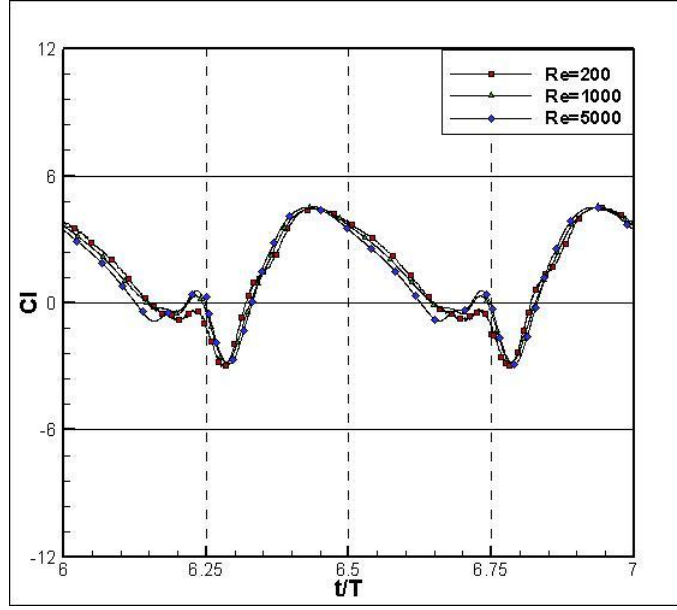
Şekil 3.12 taşıma katsayısının  $B=0$  durumu için değişimini göstermektedir. Bu şekilden de görüleceği gibi Reynolds sayısının 1000 ve 5000 olması durumlarında sonuçlarda pek fazla bir değişiklik olmamaktadır. Doğrusal hareket sırasında taşıma katsayısı değerlerinde küçük farklılıklar göze çarpmaktadır. Bu durum için sürüklenme katsayısı incelendiğinde dönüş fazı esnasında değişik sürüklenme katsayılarının elde edildiği gözlemlenmektedir.



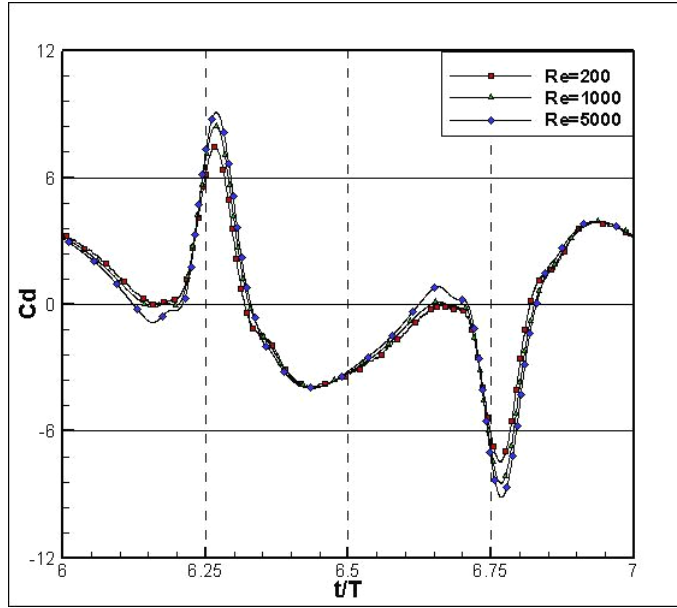
Şekil 3.12. NACA 0012 profili için  $B=0$  ve  $\alpha=45^\circ$  durumunda taşıma katsayısının yedinci periyod boyunca değişimi



Şekil 3.13. NACA 0012 profili için  $B=0$  ve  $\alpha=45^\circ$  durumunda yedinci periyod boyunca sürüklenme katsayısının değişimi



Şekil 3.14. NACA 0012 profili için  $B=2c$ ,  $\alpha=45^\circ$  durumu için yedinci periyod boyunca taşıma katsayısının değışimi



Şekil 3.15. NACA 0012 profili için  $B=2c$  ve  $\alpha=45^\circ$  durumu için yedinci periyod boyunca sürüklenme katsayısının değışimi

Değişik Reynolds sayılarındaki ortalama kuvvet katsayıları Tablo 3.2’ de gösterilmiştir. İncelenen tüm durumlar için sürüklenme ve taşıma katsayılarının hemen hemen aynı büyüklükte oldukları görülmüştür.

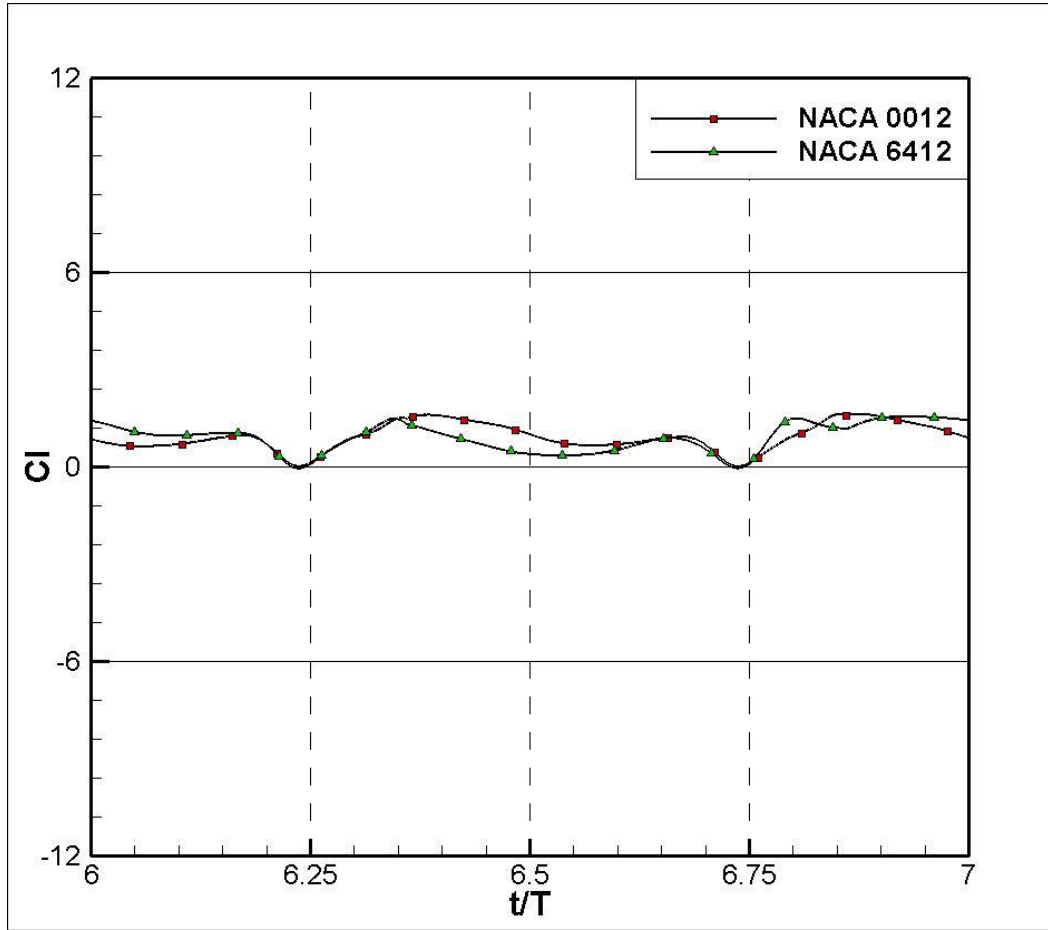
**Tablo 3.2.** Değişik Reynolds sayılarında ve  $\alpha=45^\circ$  için ortalama aerodinamik değerler

	B=0			B=2c		
	Re=200	Re=1000	Re=5000	Re=200	Re=1000	Re=5000
$\bar{C}_l$	0,932	0,919	0,979	1,412	1,505	1,315
$\bar{C}_d$	1,184	1,066	1,102	1,204	1,051	0,752
$\bar{L} \overline{(\nabla)}$	0,012	0,012	0,013	0,018	0,019	0,017
$\bar{D} \overline{(\nabla)}$	0,015	0,014	0,014	0,016	0,014	0,010
$\bar{L}/\bar{D}$	0,787	0,863	0,888	1,173	1,432	1,745

### 3.3.3 Kanatçık profili şeklinin ve kamburluk etkisi

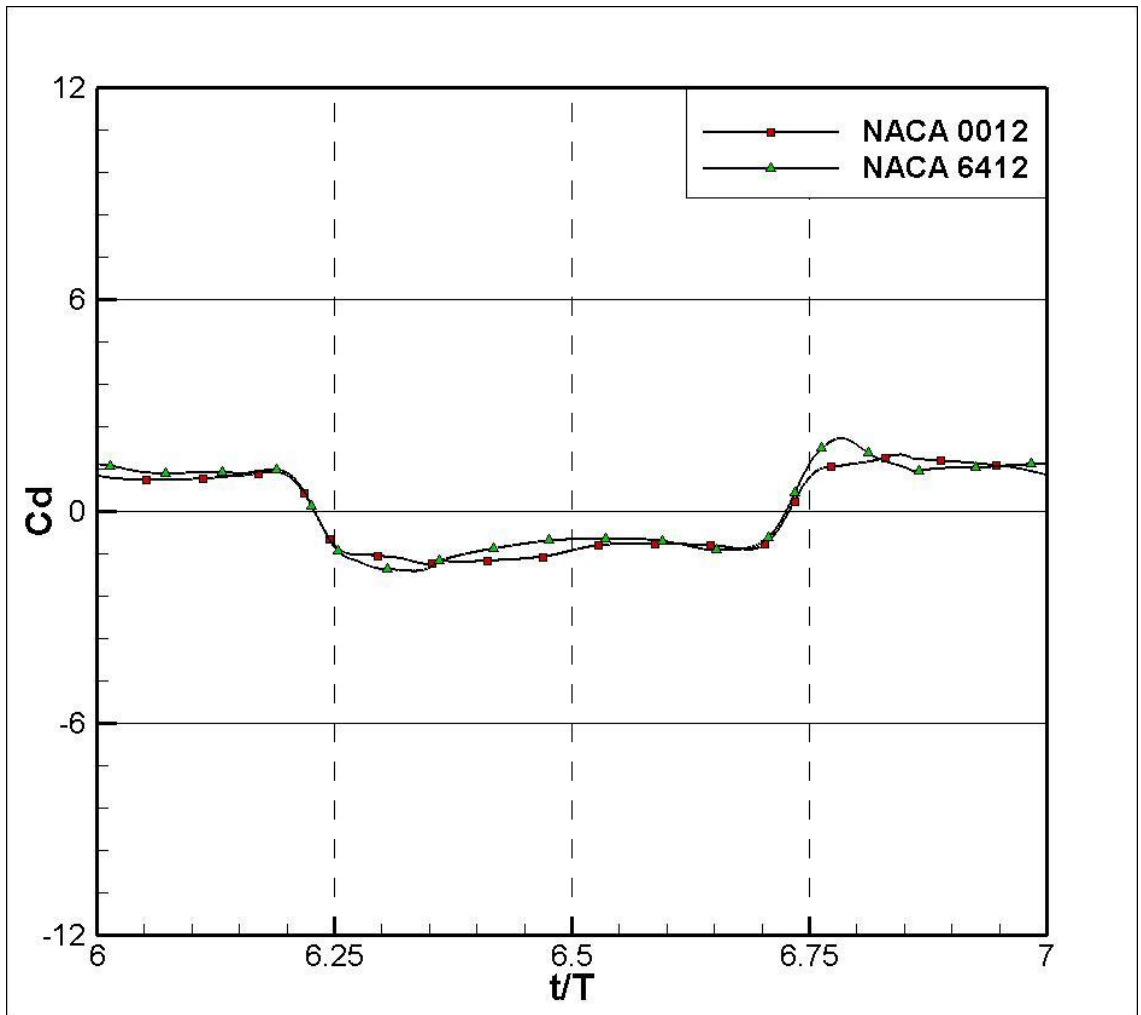
Kamburluğun etkisini incelemek için iki değişik kanat profili, NACA 0012 ve NACA 6412, kullanılmıştır. Bu iki kanat profili için de taşıma ve sürüklenme katsayıları bir boyutsuz periyod boyunca incelenmiştir. Taşıma ve sürüklenme katsayılarının tam ve doğru olarak karşılaştırılabilmeleri için kanatların kalınlıkları da aynı olarak seçilmiştir. Her iki profil için hesaplama alanı da hemen hemen aynı olarak seçilmiştir. Hesaplamalardaki ani başlangıç şartlarının etkisinden kurtulmak için sadece hareketin başlangıcından sonraki yedinci periyoddaki hareket incelenmiştir. Simetrik ve kambur profilli kanatların çırpma hareketlerinin nümerik simülasyonu 3 değişik hücum açısı ve “y” eksenindeki 5 değişik hareket genliği için çalışılmıştır. Gösterim kolaylığı açısından sadece 45 dereceli hücum açısı sonuçları sunulmuştur.

Şekil 3.16'da  $\alpha=45^\circ$  durumu için kamburluğun etkisi, taşıma katsayısı açısından karşılaştırılmıştır. Simetrik profillerin aşağı doğru çarpma sırasındaki (6.25 ila 6.75 zaman aralığında) taşıma katsayısındaki pozitif tepe değerleri kamburlu profillere göre daha yüksektir. Diğer taraftan yukarı doğru çarpma sırasında da kamburlu profillerin sürüklenme katsayısı daha yüksektir. Aşağı doğru çarpma sırasında kamburlu profilin alt yüzeyi üst yüzey olmaktadır. Bu kanadın emme yüzeyinde ilave basınç artışı yaratmaktadır ve bu da daha düşük taşıma katsayısına neden olmaktadır.



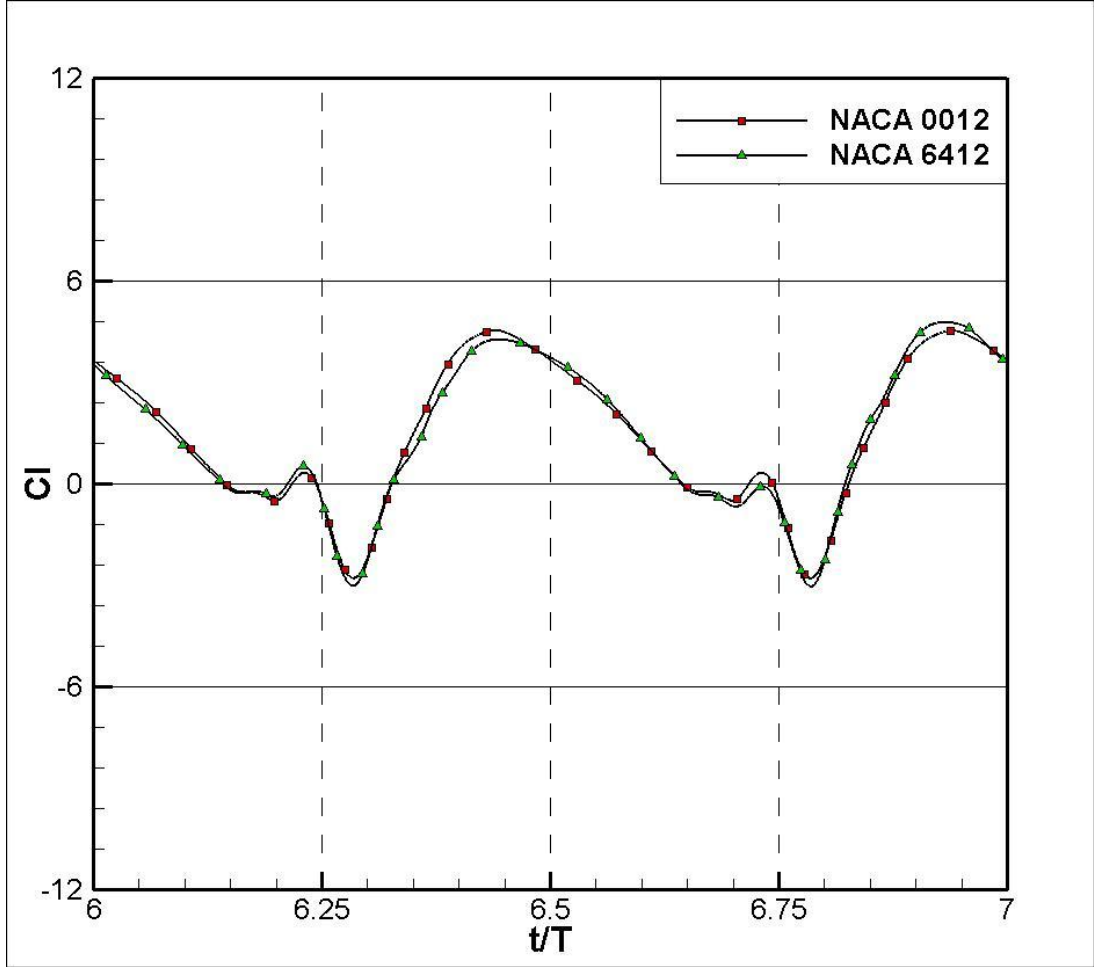
Şekil 3.16. Değişik profillerin  $B=0$ ,  $\alpha=45^\circ$  ve  $Re=1000$  durumu için yedinci periyod boyunca taşıma katsayısının değişimi

Şekil 3.17, NACA 0012 ve NACA6412 profilleri için sürüklenme katsayısı değerlerini göstermektedir. Aşağıya doğru çarpma hareketi sırasında kamburlu profillerin emme yüzeyi daha yüksek basınç alanları yaratmaktadır. Bu da beklenildiği gibi sürüklenme katsayısı değerlerinde bir azalmaya neden olmaktadır. Kamburlu profillerin aerodinamik kuvvet katsayıları, özellikle taşıma ve sürüklenme katsayıları simetrik profillerin katsayılarından çok farklı değildir

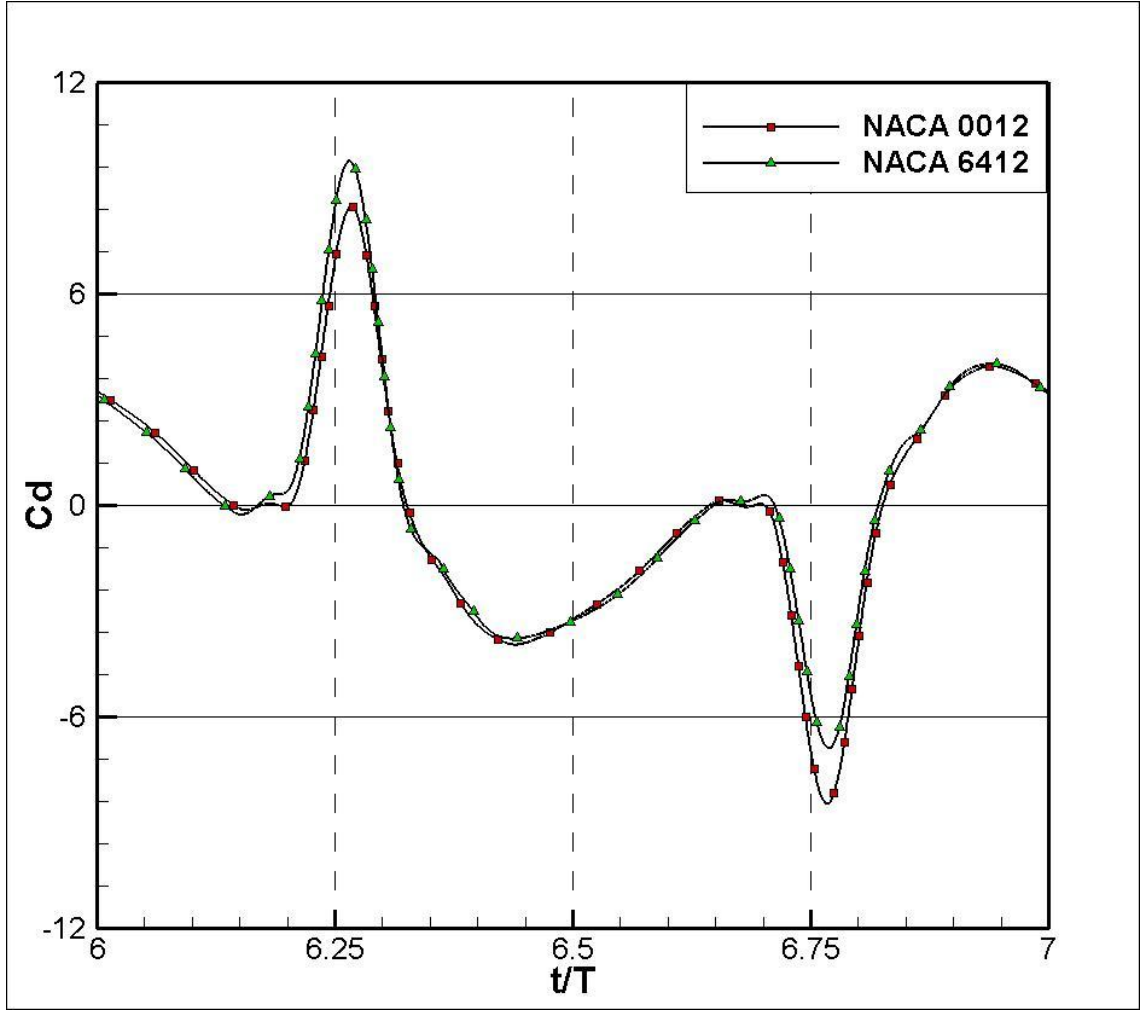


Şekil 3.17. Değişik profiller için  $B=0$ ,  $\alpha=45^\circ$  ve  $Re=1000$  durumu için yedinci periyod boyunca sürüklenme katsayısının değişimi

Aerodinamik katsayıların  $B=0$  durumu için yorumu aynen  $B=2c$  durumu için yapılan yorumlara benzer şekilde yapılabilir. Kamburluğun sürüklenme katsayısına olan etkisi en kolay kanadın dönüş fazında gözlenebilmektedir.



**Şekil 3.18.** Değişik profillerin  $B=2c$ ,  $\alpha=45^\circ$  ve  $Re=1000$  durumu için taşıma katsayısının yedinci periyod boyunca değişimi



Şekil 3.19. Çeşitli profillerin  $B=2c$ ,  $\alpha=45^\circ$  ve  $Re=1000$  durumu için sürüklenme katsayısının yedinci periyod boyunca değişimi



**Tablo 3.3:** Ortalama aerodinamik kuvvet ve kuvvet katsayıları

		<b>B = 0</b>			<b>B = 0.5 C</b>			<b>B = 1C</b>			<b>B = 1.5 C</b>			<b>B = 2 C</b>		
		<b>30°</b>	<b>45°</b>	<b>60°</b>	<b>30°</b>	<b>45°</b>	<b>60°</b>	<b>30°</b>	<b>45°</b>	<b>60°</b>	<b>30°</b>	<b>45°</b>	<b>60°</b>	<b>30°</b>	<b>45°</b>	<b>60°</b>
<b>NACA 0012</b>	$\bar{C}_l$	0,784	0,919	0,861	0,875	0,986	0,882	1,010	1,167	0,948	1,129	1,306	1,095	0,997	1,505	1,370
	$\bar{C}_d$	0,622	1,066	1,613	0,595	1,056	1,516	0,502	1,136	1,582	0,296	1,093	1,747	-0,127	1,051	2,160
	$\bar{L} \left( \frac{V}{\rho} \right)$	0,010	0,012	0,011	0,011	0,013	0,011	0,013	0,015	0,012	0,015	0,017	0,014	0,013	0,019	0,018
	$\bar{D} \left( \frac{V}{\rho} \right)$	0,008	0,014	0,021	0,008	0,014	0,020	0,007	0,015	0,020	0,004	0,014	0,023	-0,002	0,014	0,028
	$\bar{L}/\bar{D}$	1,261	0,863	0,534	1,469	0,933	0,582	2,013	1,027	0,599	3,811	1,195	0,627	-7,844	1,432	0,634
<b>NACA 6412</b>	$\bar{C}_l$	0,791	0,882	0,834	0,831	0,970	0,865	0,980	1,125	0,925	1,090	1,265	1,072	0,949	1,458	1,329
	$\bar{C}_d$	0,650	1,080	1,608	0,582	1,050	1,509	0,507	1,114	1,567	0,322	1,089	1,749	-0,059	1,081	2,170
	$\bar{L} \left( \frac{V}{\rho} \right)$	0,010	0,011	0,011	0,011	0,013	0,011	0,013	0,015	0,012	0,014	0,016	0,014	0,012	0,019	0,017
	$\bar{D} \left( \frac{V}{\rho} \right)$	0,008	0,014	0,021	0,008	0,014	0,020	0,007	0,014	0,020	0,004	0,014	0,023	-0,001	0,014	0,028
	$\bar{L}/\bar{D}$	1,218	0,816	0,519	1,428	0,924	0,573	1,932	1,010	0,590	3,383	1,162	0,613	-15,986	1,349	0,612

### 3.4 Ortalama aerodinamik kuvvetler ve kuvvet katsayıları

Ortalama aerodinamik kuvvet katsayıları simülasyonun yedinci periyodu boyunca Reynolds sayısının 1000 olduğu durum için hesaplanmıştır. Toplamda incelenen 30 durum Tablo 3.3' de sunulmuştur. Bu tabloda listelenen parametreler Tablo 3.1' de verilmiştir.

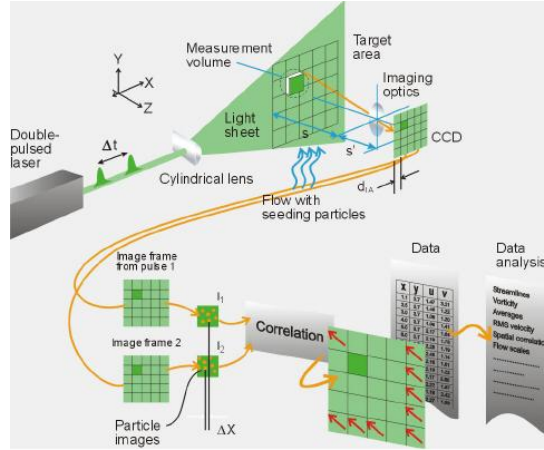
Sonuç olarak maksimum ortalama toplam kuvveti elde etmek için incelenen kanat çırpma hareketi için en önemli parametre yapılan hareketin “y” yönündeki genliğidir. Yani yatay “8” şeklindeki alt ve üst çizgiler arasındaki mesafedir. Bu genlik (mesafe) arttıkça hareketin tüm periyodu için ortalama taşıma katsayısı da artmaktadır. İkinci önemli parametre de hücum açısıdır. Hücum açısının etkisi incelendiğinde en yüksek ortalama taşıma katsayısının 45 derece hücum açısında, en yüksek toplam kuvvet katsayısının da 60 derece hücum açısında elde edildiği gözlenmektedir. Ortalama sürüklenme katsayısı 60 derece hücum açısında oldukça yüksektir. Bu da toplam kuvvet katsayısına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Fakat hareketin “y” yönündeki genliğinin artırılması çok daha düşük sürüklenme katsayısına neden olmaktadır.

## İKİNCİ KISIM

### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1. PIV ölçüm tekniği

PIV'nin (Particle Image Velocimetry) Türkçe karşılığı **Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Tekniği**'dir. PIV tekniği bir akış alanının belirlenen ve lazer ışık kaynağı ile aydınlatılan kesit bölgesi içindeki anlık hız vektörlerinin ölçümünü sağlayan ve böylece lazer tabakası ile aydınlatılan akış alanının tümünün ölçülmesi ve görüntülenmesi tekniğidir (Şekil 4.1). Önceleri sadece iki boyutlu ölçme yapılabilen bu yöntem giderek geliştirilmiş ve hız vektörünün üç bileşenini de ölçebilir duruma getirilmiştir. Modern sayısal ve hızlı CCD kameraların kullanılması ile PIV ölçme sistemi tamamen otomatik hale dönüştürülmüş ve gerçek-zaman hız haritalarının elde edilmesi sağlanmıştır. Temel olarak bir PIV sistemi, tohumlama, aydınlatma, kameralar, senkronizasyon, korrelasyon, doğrulama ve ileri analiz safhalarından oluşmaktadır.



Şekil 4.1. PIV ölçme sisteminin çalışma prensibi

#### 4.2. Eski deney düzeneği ile yapılan PIV deneyleri

Bu bölümde eski deney düzeneği kullanılarak lineer kanat çarpma hareketinin incelenmesi için yapılan deneyler anlatılacak, elde edilen bu deneysel sonuçlar nümerik çözüm sonuçları ile karşılaştırılacaktır. Eski deney düzeneğinde “y” yönünde hareket yapılamadığı için sekiz şekli çizen kanat hareketini bu düzeneikle yapmak mümkün değildir. Bu nedenle yeni deney düzeneğinin kurulması için bu proje teklifi yapılmıştır.

Deneyler ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümünde bulunan  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1.5\text{m}$  boyutlarındaki su tankında yapılmıştır. Tank bir tip akrilik olan altuglass malzemesinden yapılmıştır. Tankın içinden görüntü alabilmek için duvarları söz konusu akrilik malzemedan yapılmıştır. Deneyler için tankın içi saf su ile doldurulmuştur.

Deneyler hem simetrik bir kanat profili, NACA0012, hem de kamburlu bir kanat profili, NACA 6412, kullanılarak yapılmıştır. Kanatların kord (veter) uzunlukları ve kanat açıklıkları sırasıyla 6 cm ve 50 cm dir. Kanat modelleri de akrilik malzemedan yapıldığından lazer ışınları için tamamen geçirgendir. Böylece kanadın hem önündeki hem de arkasındaki akış alanını lazer tabakası ile aydınlatmak mümkündür. (Şekil 4.2) . Deneyler sırasında kanat sağa ve sola doğrusal bir hareketle sürülmekte ve hareketin kinematiğine göre de belli noktalarda dönme eksenini etrafında döndürülerek çarpma hareketinin yönü değiştirilmektedir.



**Şekil 4.2.** Deneysel model

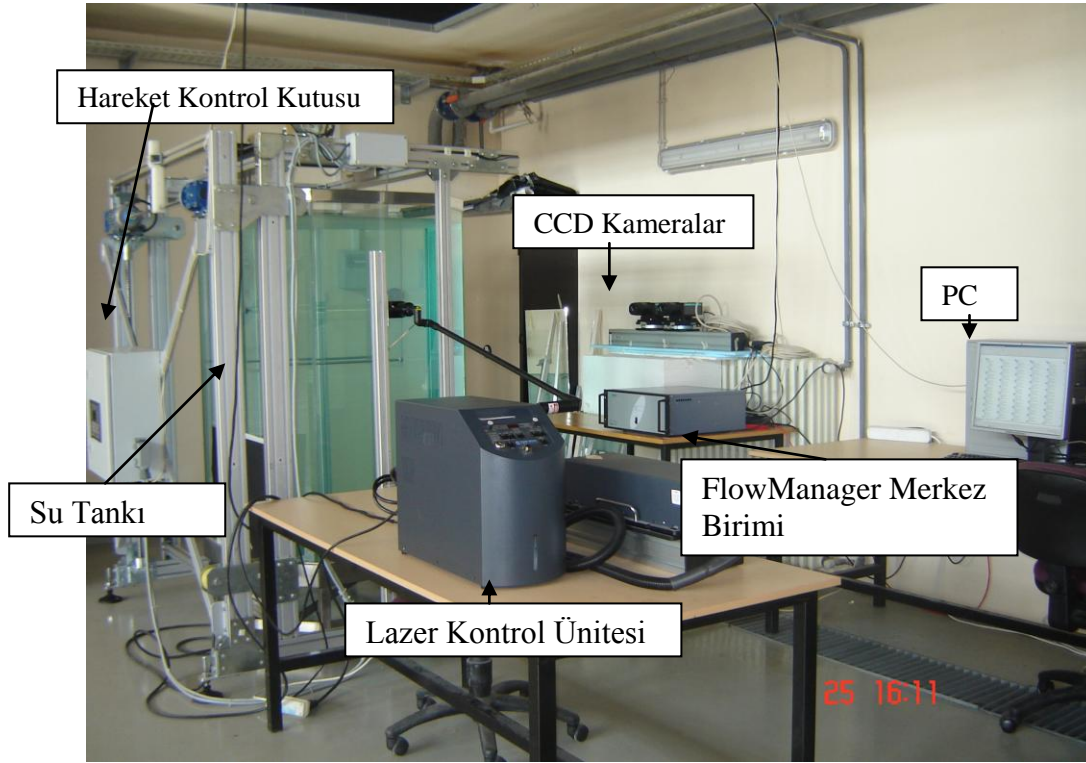
Akışın ve ölçmelerin iki boyutluluğunu sağlamak amacı ile kanat iki ucundan sonlandırma plakaları arasına monte edilmiştir. Kanat uçlarına konulan sonlandırma levhaları da pleksiglas malzemeden üretilmiş olup deney sırasında kameraların akış alanını görmeleri sağlanmıştır. Sonlandırma plakalarının uzunluk ve enleri sırasıyla 90 cm x 50 cm dir. Kanat ve kanat uçlarındaki sonlandırma plakaları hep birlikte tek bir asambleye oturtulmuş olup tüm sistem birlikte hareket etmektedir.

Kanat çarpma hareketi su tankının dışına yerleştirilmiş bir adım motor mekanizması ile sağlanmaktadır. Sistemde iki adet adım motor bulunmaktadır Bunlardan birinci motor bir sonsuz vida mekanizması ile tüm asambleye sağa ve sola lineer hareketi sağlamaktadır. İkinci motor ise kanadın dönme hareketini sağlamaktadır. Böylece sistem lineer kanat çarpma hareketini sağlayabilmekte fakat sekiz şekli çizememektedir. Açılar  $\pm 0.5$  derece hata ile sabitlenebilmektedir. Program vasıtası ile ayarlanan deplasmanlar noktadan sonra iki haneye kadar doğruluk sağlamaktadır. Sağlanan en yüksek hız 4 cm/s dir. Sonsuz vidanın her dönüşünde sistem 4 mmlik bir lineer hareket yapmaktadır. Açık devre kontrol sistemi ile kontrol edilen adım motorlar bir dönüşü 200 adımda tamamlamaktadırlar. Kanat çarpma hareketi aynen nümerik çalışmalarda olduğu gibi uygulanmıştır. Her 100 ms de bir hız ve hücum açıları hesaplanmakta ve üst mekanizmaya gönderilmektedir.

Çırpan kanadın etrafındaki zamana bağlı hız alanının görüntüleri PIV sistemi tarafından toplanmaktadır. DANTEC PIV sistemi bir lazer kaynağı, iki CCD kamera bir Flow Manager merkez birimi ve yazılımı ile verilerin toplanması için kullanılan ticari bir veri toplama

sistemi ve yazılımı ile bu yazılımların üzerinde koşulduğu bir bilgisayar sisteminden oluşmaktadır.

Bu sistem bundan önceki deneysel tez çalışmalarında da kullanılmıştır. Tüm deney düzeneği Şekil 4.3' de gösterilmiştir.



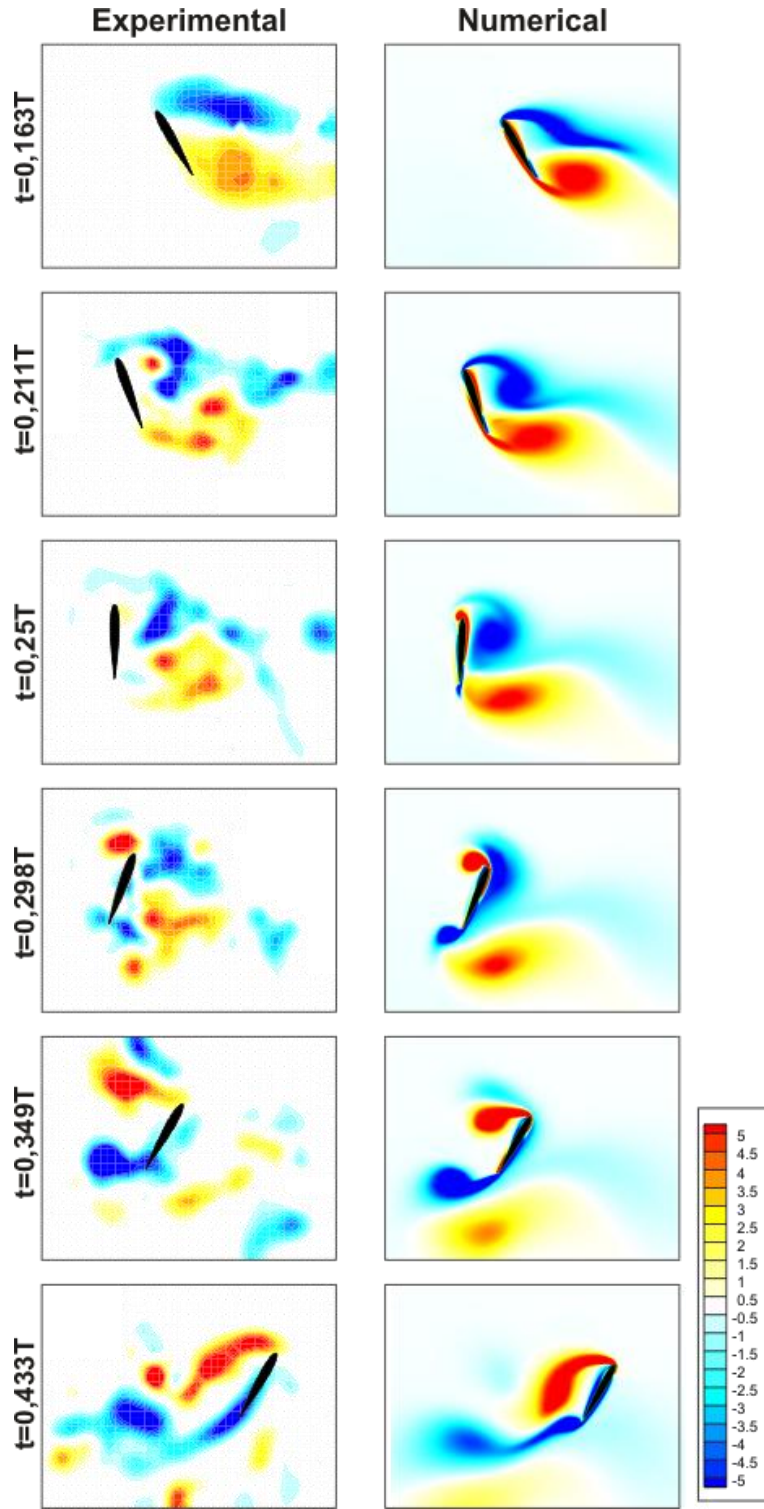
Şekil 4.3. Deney düzeneği

Sonlandırma plakalarının etkisini azaltmak amacıyla deneyler kanat modelinin tam orta açıklığında yapılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi havada asılı kalma durumu kanat çırpma hareketinin özel bir durumu olup serbest akış hızı sıfırdır. Bu yüzden deneylerin bir su tankı içinde suyun durgun halinde yapılması mümkün olmaktadır. Deneylere başlamadan önce kanat çırpma hareketi başlatılmakta ve 8 periyod bu çırpma hareketi tekrarlanmaktadır. Böylece deneylere başlamadan önce akımın periyodik duruma ulaşması sağlanmaktadır. Deneyler sırasında kanat veter uzunluğuna ve “x” yönündeki lineer hıza göre hesaplanan Reynolds sayısı 1000 dir.

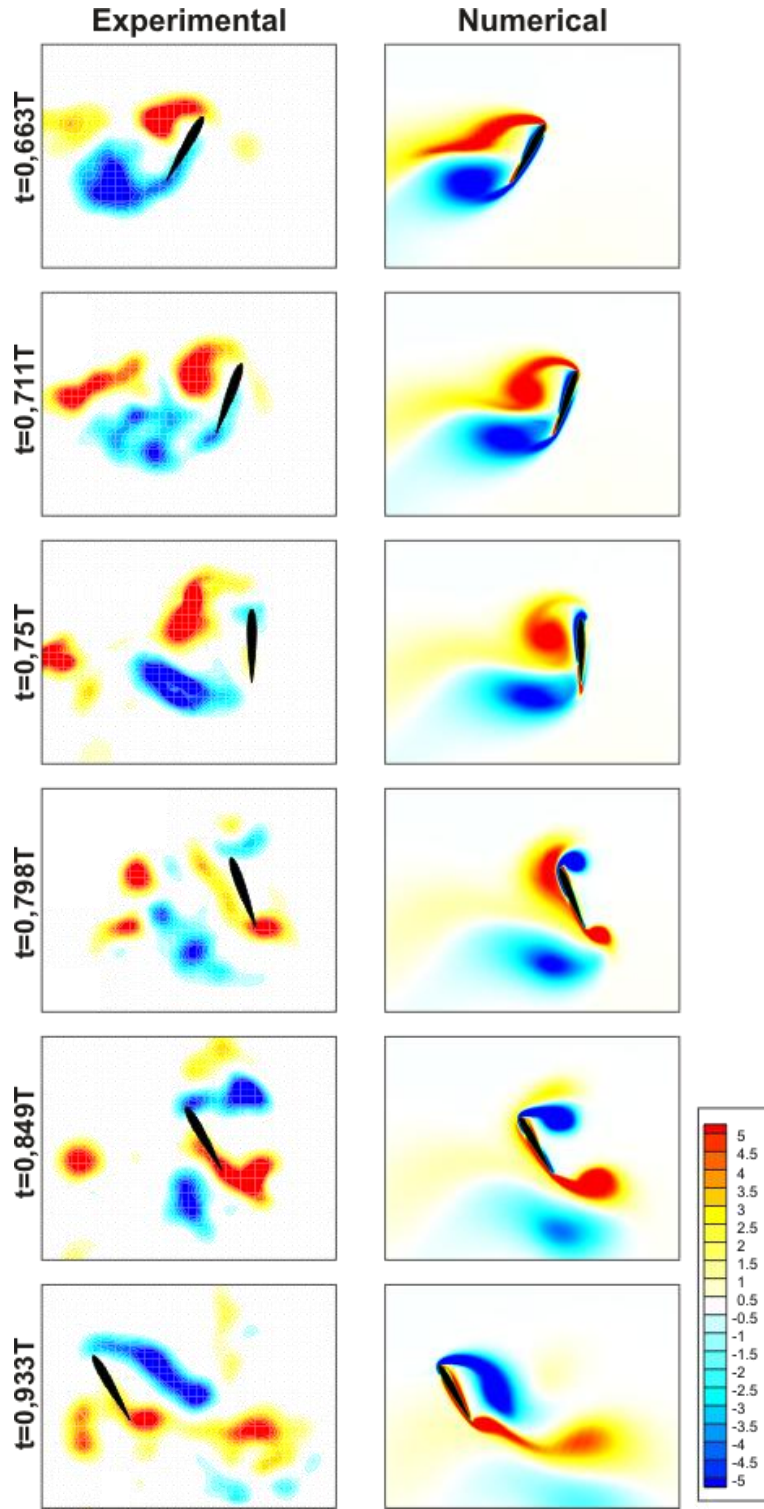
### 4.3. Deneysel sonuçlar, lineer kanat çırpma hareketi

Elde edilen deneysel sonuçlar nümerik sonuçların doğrulanması amacıyla ve lineer kanat çırpma hareketi sırasında oluşan temel vorteks oluşum mekanizmasının incelenmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu çalışma sırasında sekiz şekli çizilemediği için dik yöndeki, “y” yönündeki hareketin vorteks oluşumları üzerindeki etkilerini görmek mümkün olmamıştır. Bu etkileri görmek ancak yeni yapılan hareket mekanizması kullanılarak yapılan deneylerle mümkündür. PIV ölçmeleri iki değişik kanat profili için; NACA 0012 ve NACA 6412 profilleri için ve üç değişik başlangıç hücum açısında  $30^0$ ,  $45^0$ ,  $60^0$  yapılmıştır. Her deneysel durum için, kanat çırpma hareketinin bir tam periyodu yanyana konulan iki kamera tarafından çekilen 12 görüntü ile temsil edilmiştir.

Şekil 4.4 ve 4.5’ de vorteks yapıları açısından deneysel sonuçlar nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.4’ de bir tam periyodun yarısı birinci kamera ile çekilen 6 görüntü ile Şekil 4.5’ de ise tam periyodun diğer yarısı ikinci kamera ile çekilen 6 görüntü ile sunulmuştur. Doğrusal kanat çırpma hareketi bir tam periyot sürecinde simetriktir yani ikinci kamera tarafından çekilen görüntüler birinci kamera tarafından çekilen görüntülerin ayna yansımasıdır. Aşağıdaki şekillerde kanadın hareketi şu şekilde anlatılabilir: Kanat ayarlanan başlangıç hücum açısında yatayda yana doğru hareket etmektedir ve  $t=0.163T$  anında (periyodun öbür yarısında  $t=0.663T$ ) çeyrek veterdeki dönme noktası etrafında dönmeye başlamaktadır. Boyutsuz zamanın  $t= 0.211T$  ( $0.711T$ ) olduğu anda dönmenin hemen hemen tam ortasındadır ve beklenildiği gibi  $t=0.25T$  ( $t=0.75T$ ) anında maksimum hücum açısına ulaştığı noktadadır. Bu noktadan sonra kanat  $t=0.298T$  ( $t=0.298T$ ) anındaki görüntülerden anlaşılacağı gibi tam ters yönde hareketine devam etmektedir.



Şekil 4.4. NACA 0012 profili için deneysel ve nümerik çalışmalardan türetilen boyutsuz vortisite eş değer çizgileri (konturları),  $\alpha_0=60^\circ$  (Birinci kamera)



**Şekil 4.5.** NACA 0012 profili için deneysel ve nümerik çalışmalardan türetilen boyutsuz vortisite eş değer çizgileri (konturları),  $\alpha_0=60^\circ$  (İkinci kamera)



Kanat dönmesine başlangıç hücum açısına  $t=0.349T$  ( $0.849T$ ) anında erişinceye kadar devam etmektedir. Bu andan sonra bu sabit hücum açısında yatay yönde lineer hareketine  $t=0.433T$  ( $0.933T$ ) anında devam eder. Vorteks oluşum yapıları bakımından deneysel sonuçlarla nümerik hesaplamaların büyük bir uyum içinde oldukları görülmektedir. Nümerik olarak hesaplanan hücum kenarı ve firar kenarı vorteksleri ve bunların birbirleri ile etkileşimi PIV ölçümleri ile de doğrulanmıştır.

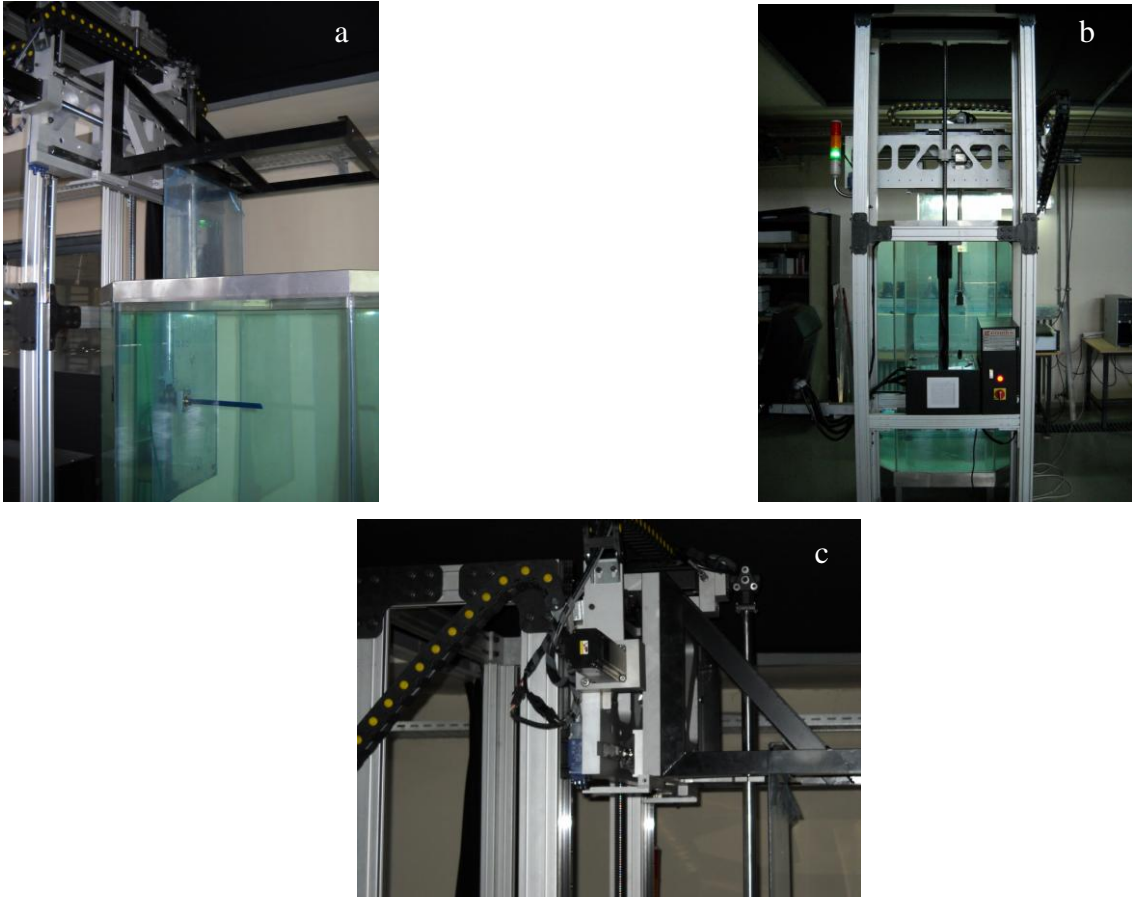
Hareketin ikinci yarısı için lineer kanat çırpma hareketi şu şekilde anlatılabilir: Çok büyük hücum ve firar kenarı vorteksleri kanat ile birlikte lineer hareketlerine devam ederler ( $t=0.663T$ ). Bundan sonra kanadın dönmesi fazında hücum ve firar kenarı vorteksleri kanadın emme yüzeyi tarafına doğru kıvrılarak dönerler ( $t=0.711T$ ). Kanat maksimum hücum açısına eriştiğinde (ki  $90^0$  ye karşılık gelmektedir.) hücum ve firar kenarı vorteksleri kanadın dönüp gideceği yöne doğru yerleşmişlerdir. Kanat bu ters yönde hareketine başlarken yeni oluşan hücum ve firar kenarı vorteksleri bir önceki faz sırasında oluşan vortekslerle etkileşime girerler ( $t=0.798T$  ve  $t=0.849T$ ). Ters yönde dönen vorteksler birbirleri ile etkileşime girdiklerinde vortisiteyi imha ederler ki bu da kaldırma-taşıma (lift) sağlanması açısından istenmeyen bir durumdur.

Diğer deneysel durumlar için incelenen boyutsuz vortisite eş değer eğrileri Ek A' da sunulmuştur.

## **5.0 YENİ PIV DENEY DÜZENEĞİ**

Bu dönem içinde çırpan kanat aerodinamiğinin “Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV- Particle Image Velocimetry)” tekniği kullanılarak incelenmesi için gerekli olan deney düzeneği tamamlanmış ve deneylere başlanılmıştır. Bu raporda deney düzeneğinin kurulum aşamaları tek tek anlatılacak bu yeni deney düzeneği kullanılarak yapılan ölçümler nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.1. a-c’de çırpan kanat hareketi için kullanılacak olan mekanizmanın fotoğrafları gösterilmektedir.



**Şekil 5.1. (a)-(c).** Su tankı ve yeni imal edilen çırpan kanat hareket mekanizması

Resimlerde deney düzeneğini oluşturan elemanlar tek tek gösterilmektedir.

Mekanizmanın yapımı tamamlandıktan sonra ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği'nde daha önceki TÜBİTAK projeleri kapsamında yaptırılan su tankının içine yerleştirilmiştir. Böylelikle çırpan kanat hareketini incelemek için kurulan PIV deney düzeneğinin büyük bir bölümü tamamlanmış bulunmaktadır.

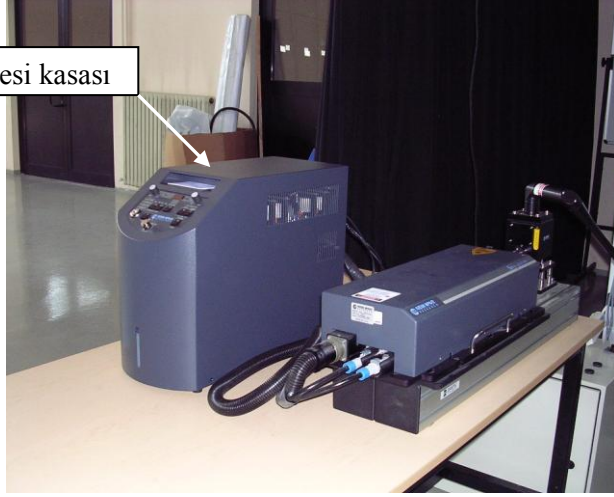
Şekil 5.2.' de 1.5 m x 1 m x1 m boyutlarındaki su tankı gösterilmektedir. PIV tekniği kullanılarak akışın görüntülemesi suyun içinde daha kolay olduğundan deneyler ve akım görüntülemeler genel olarak su tankı içinde gerçekleştirilmektedir.



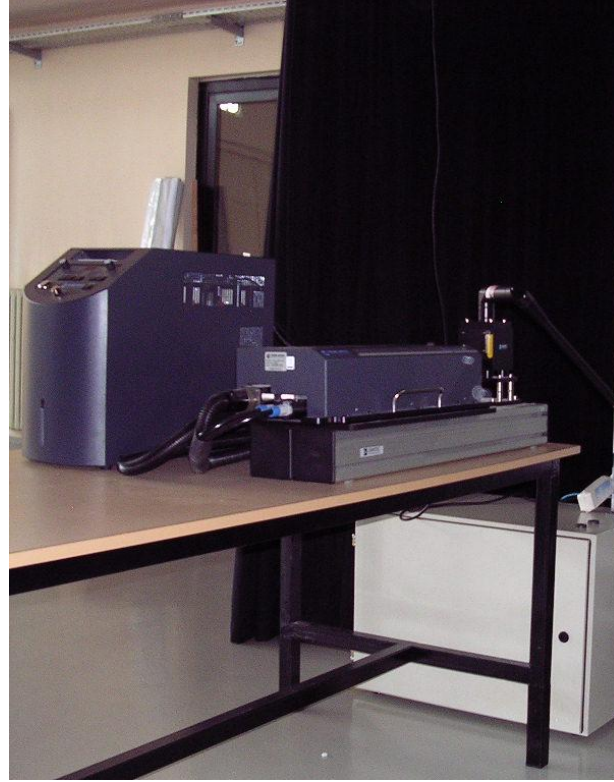
**Şekil 5.2.** Su tankı

Deney düzeneğinin diğer önemli bir elemanı da lazer ışık kaynağıdır. PIV akış görüntülemesinde kullanılan lazer kaynağı darbeli (pulsed) bir Nd:YAG lazerdir. Lazerin maksimum gücü 532 nm dalga boyunda her vuruş (darbe) için 120 mJ'dür. Lazerin ayrıntılı fotoğrafları 5.3'te verilmiştir.

Lazer kontrol ve güc ünitesi kasası



Lazer lensi

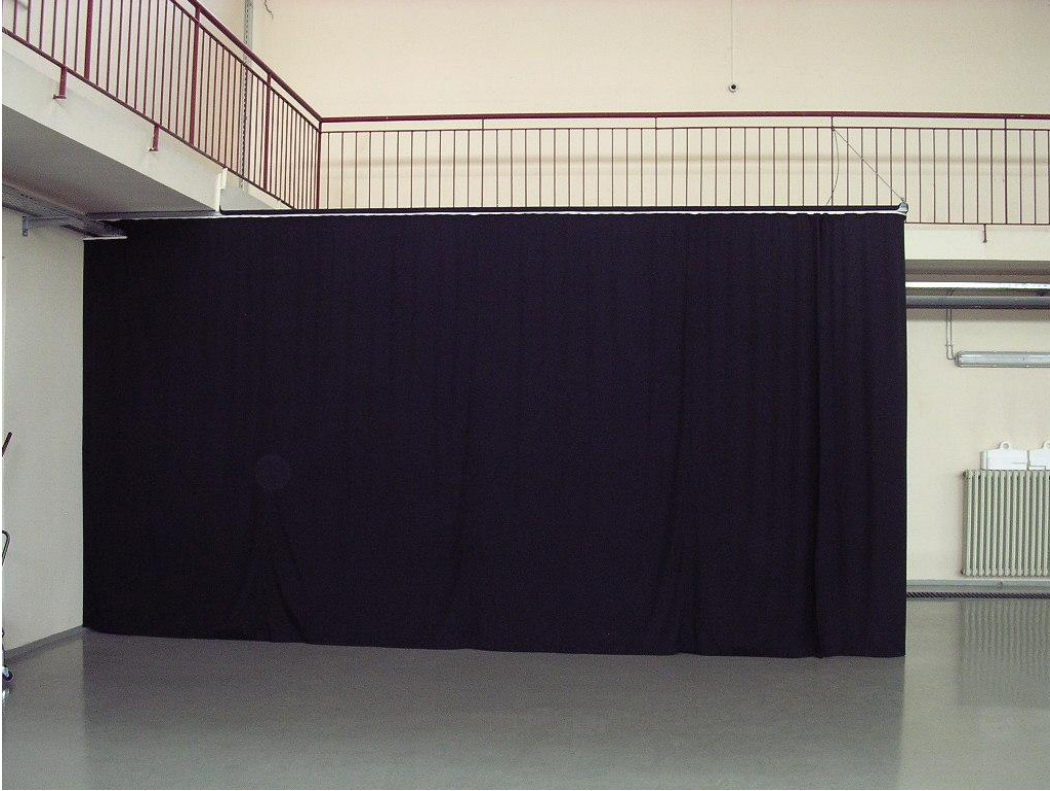


Şekil 5.3. Nd :YAG lazer elemanları

PIV sisteminde 2 adet CCD sayısal hızlı kamera ve aksesuarları bulunmaktadır. Bu kameraların çözünürlüğü 1600 x 1200 piksel'dir. Kameraların fotoğrafları Şekil 5.4'te verilmektedir. Kameraların iyi çekim yapmalarını sağlamak ve çevresel yansılardan korumak amacıyla deney düzeneğinin etrafı siyah perdelerle kapatılarak karartılmıştır. (Şekil 5.5).



Şekil 5.4. CCD kameralar



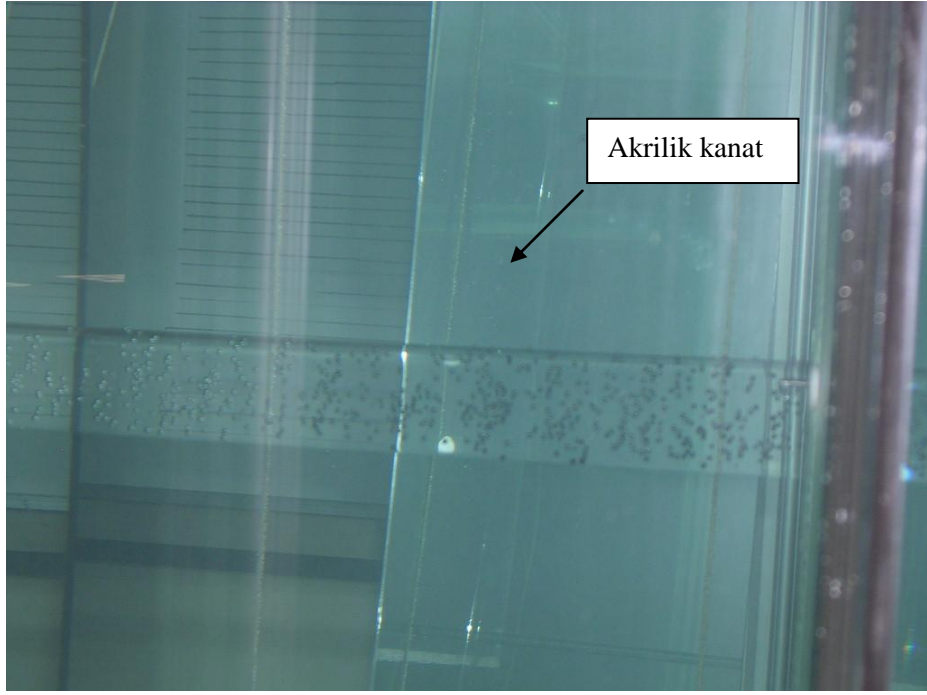
Şekil 5.5. Siyah perdelerle kapatılmış deney alanı

PIV sisteminin paket programı bir kameradan 4 kameraya kadar kontrol yeteneğine sahiptir. İşletim sistemi olarak Window XP 32 bit platform kullanmaktadır. TecPlot ve Matlab linklerini kullanarak esnek programlamaya olanak sağlamaktadır. Kullanıcı tarafından kolaylıkla kullanılabilen cihaz yöneticisi donanımının fotoğrafları ise Şekil 5.6.'da gösterilmektedir.

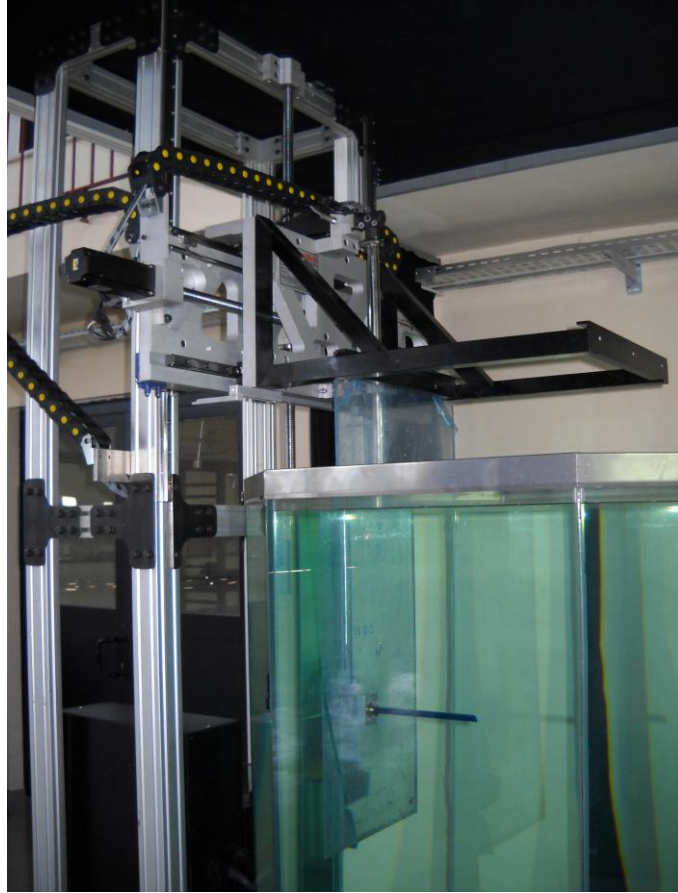


**Şekil 5.6.** Cihaz yöneticisi donanımı

Çırpın kanat hareketinin incelenmesi için kurulan mekanizmada kullanılan şeffaf model bir NACA 0012 kanat profili olup, akrilikten üretilmiştir (Şekil 5.7). Hareketi sağlayan üst mekanizmaya bağlı iki pleksiglas levha arasına sabitlenen kanat modeli kendi etrafında dönebilmekte, ileri geri ve yukarı aşağı hareket edebilmektedir. Ayrıca yukarı aşağı hareket edebilme kabiliyeti sayesinde su tankından çıkarılabilmekte ve böylece deneyde kullanılacak modelin kolayca değiştirilmesi sağlanmaktadır (Şekil 5.8).



**Şekil 5.7.** Akrilik kanat modelinin su tankı içindeki görüntüsü.



**Şekil 5.8** Su tankı ve hareketli üst mekanizma

Sistem, yazılmış bir ara program ile ırpan kanat hareketini gerçekleştirmektedir. Programa girilen veriler kontrol kutusundan geçerek sinyaller aracılığı ile mekanik hareketlere dnüşürölmektedir. Böylece hareket kullanıcı tarafından kontrol edilebilmektedir.

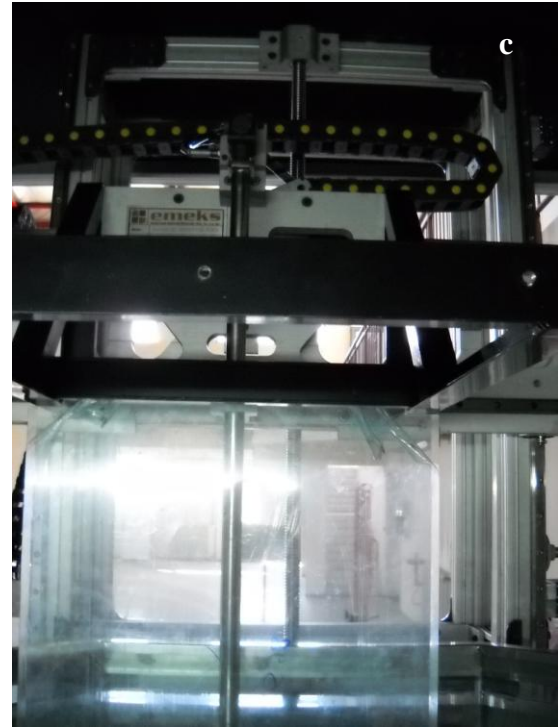
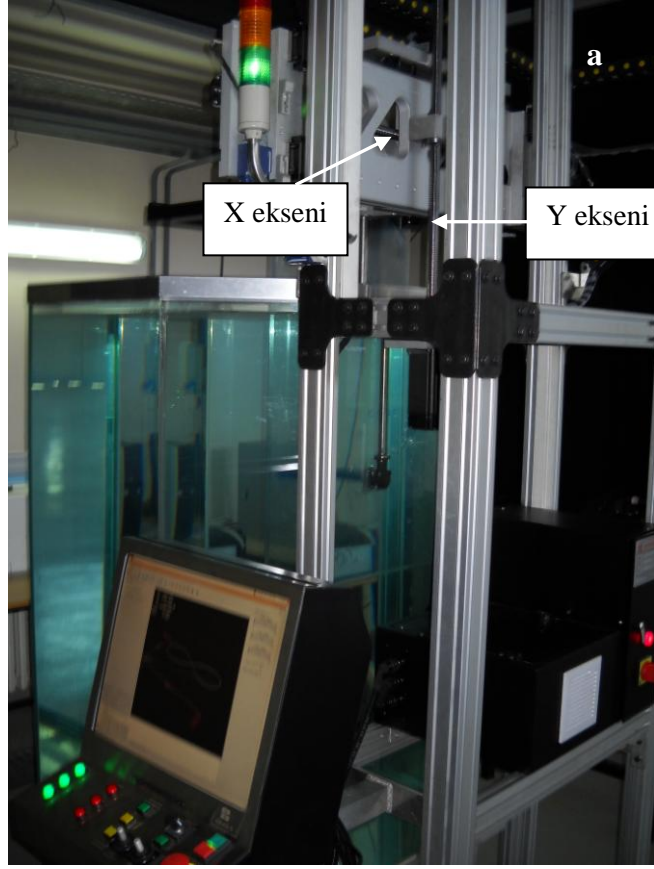
Yazılan bu ara program sayesinde, Matlab Importer ile Matlab’da yazılan program sisteme aktarılabilmekte ve deney için gerekli olan diğer veriler ekrandan girilebilmektedir. Deney için ekrandan girilebilen veriler, ilk olarak sabit hız (max: 30000 mm/min (0.5 m/sec)) (bu sayede Reynolds sayısının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilebilmektedir). İkinci veri “X” ve “Y” eksenlerindeki değişiklikleri yaparak sistemin başlangıç noktasının ayarlanmasına imkan veren “homing” dir. Üçüncü veri ise, deney için ideal akış şartlarını elde etmek için hareketin kaç defa tekrarlanacağının ve kamera ile kaydın (fotoğraf çekimlerinin) ne zaman başlayacağının girilmesidir. Bunlara ek olarak sistem manual olarak da kullanılabilir. Bu verilerin girildiği arayüz ekranı şekil 5.9’ da gösterilmektedir.

şekil 5.10 (a)-(c)’de deney düzeneği ayrıntılı olarak gösterilmektedir. şekil5.11’de tamamlanmış olan deney düzeneğinin son hali yer almaktadır.

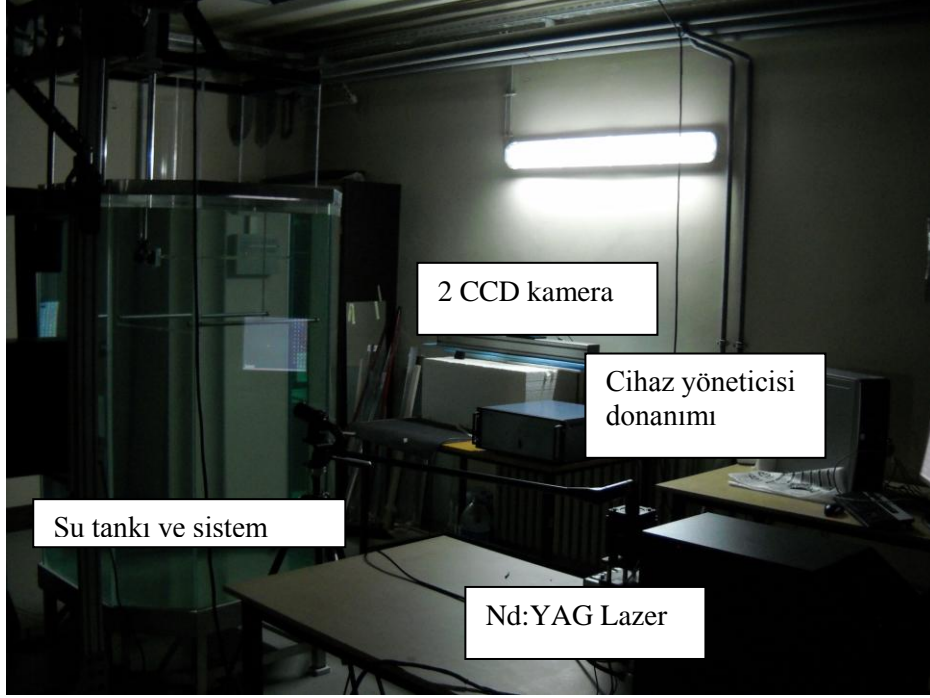




Şekil 5.9. Çırpın kanat hareketini sağlayan programa verilerin girildiği arayüz



**Şekil 5.10 (a)-(c).** Çırpın kanat hareketinin PIV yöntemiyle görüntülenmesi için imal edilen yeni deney düzeneği.

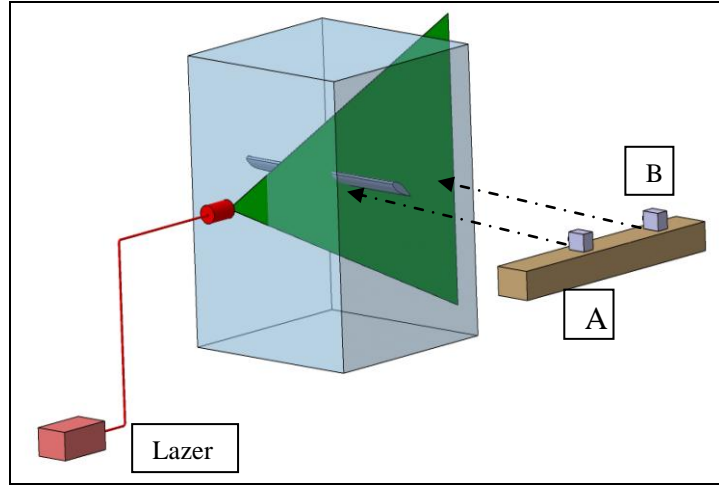


**Şekil 5.11** Çırpın kanat hareketinin PIV yöntemiyle görüntülenmesi için hazırlanan deney düzeneğinin son hali

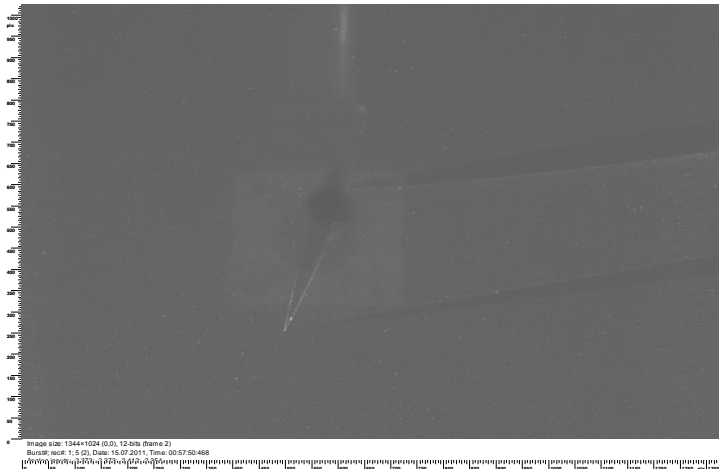
## 6. YENİ DENEY DÜZENEĞİ İLE YAPILAN DENEY SONUÇLARI

Çırpın kanat hareketinin iki boyutlu aerodinamik analizi için seçilen kanat profili 48.5 cm kanat açıklığında, 6 cm veter uzunluğunda akrilik malzemeden üretilmiş NACA 0012 profilidir. İki boyutlu akım şartlarını sağlayabilmek amacıyla profil hareketin devamlılığını sağlayabilecek bir şekilde iki pleksiglas levha arasında sabitlenmiştir. Hız ölçümlerinin yapılabilmesi için lazer akış düzlemine dik olarak su tankından yaklaşık 20 cm mesafe uzaklığa yerleştirilmiştir. Düzenekte iki kamera kullanılmakta ve bu kameralar su tankından yaklaşık 120 cm uzaklıkta bulunmaktadır. Kullanılan lazer ışığı profil veterini gösterecek şekilde bir düzlem yaratmakta ve bu düzlem üzerindeki parçacıkların lazer ışığını yansıtmasıyla kameralar aracılığıyla akımın görüntüsü alınmaktadır. Kameraların odak düzleminin lazerin aydınlattığı düzleme dik olması iki boyutlu ölçümler için şarttır. Kameralar A ve B olarak isimlendirilmektedir (Şekil 6.1). A ve B kameralarına ait ölçme düzleminin boyutları, her kamera için 1020x1340 pixel olup yaklaşık 20x25 cm dir, ve görüntü alınan her bölge için kanadı tam 90 derece açı ile dik bir şekilde görüntülenmektedir (Şekil 6.2). Çırpın

kanat hareketinin fiziğinin daha iyi anlaşılabilmesi için bütün bir hareket boyunca görüntü alınmaktadır. A ve B kameraları lazer düzlemine dik olarak yanyana pozisyonlandırılarak aynı anda resim almaları sağlanmış fakat her kamera sadece 4 fazdan oluşan çırpan kanat hareketinin ikişer fazını resimlemektedir. Kameralar üzerinde yeşil lazer ışığına duyarlı filtreler bulunmaktadır. Bu filtreler ile parçacıkların hareketi daha rahat gözlemlenebilmektedir. Bu çalışmada, PIV ile yapılan deneylerde çok çeşitli parçacık türü mevcut olmasına karşın su deneylerinde gümüş kaplı içi boş cam kürecikler (Silver Coated Hollow Glass Spheres , SHG-10) kullanılmaktadır. 10  $\mu\text{m}$  çapında 1.4  $\text{g}/\text{cm}^3$  yoğunluğundaki bu kürecikler akışı izlemekte ve akış olmadığında ise suda asılı kalmaktadırlar.



Şekil 6.1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi



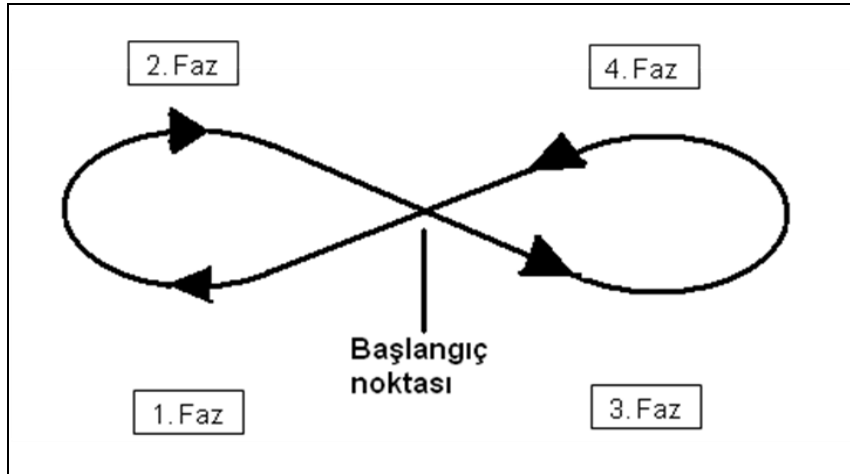
Şekil 6.2 A ve B kameralarına ait ölçme düzleminin boyutları

Aşağıda yeni düzenekle yapılan deneyler için akış şartları tablo 6.1de sunulmaktadır..

**Tablo 6.1.** Akış şartları

B	2c
$\alpha$	60°
Re	1052
A/F	NACA 0012
Başlangıç Hızı	17.54 mm/s
Başlangıç Hücüm Açısı	90 derece

Akış düzlemi sağdan sola doğru dalış (downstroke) hareketi ile başlayıp, tırmanış (upstroke) hareketi ile devam edip (1. faz), aynı yönde tırmanış, dalış (2. faz), takiben soldan sağa dalış, tırmanış (3. faz) ve dalış (4. faz) hareketi ile tamamlanacak şekilde tanımlanmıştır (Şekil 6.3). Kanat belirlenen başlangıç hücüm açısında sağdan sola doğru harekete başlamaktadır. Daha önce anlatıldığı gibi sabit hız ve sabit açı mesafeleri sentetik harekete parametre olarak tanımlanmakta ve hareketi sağlayan programa ara yüz aracılığıyla hız ve açı ile birlikte girdi olarak verilebilmektedir.

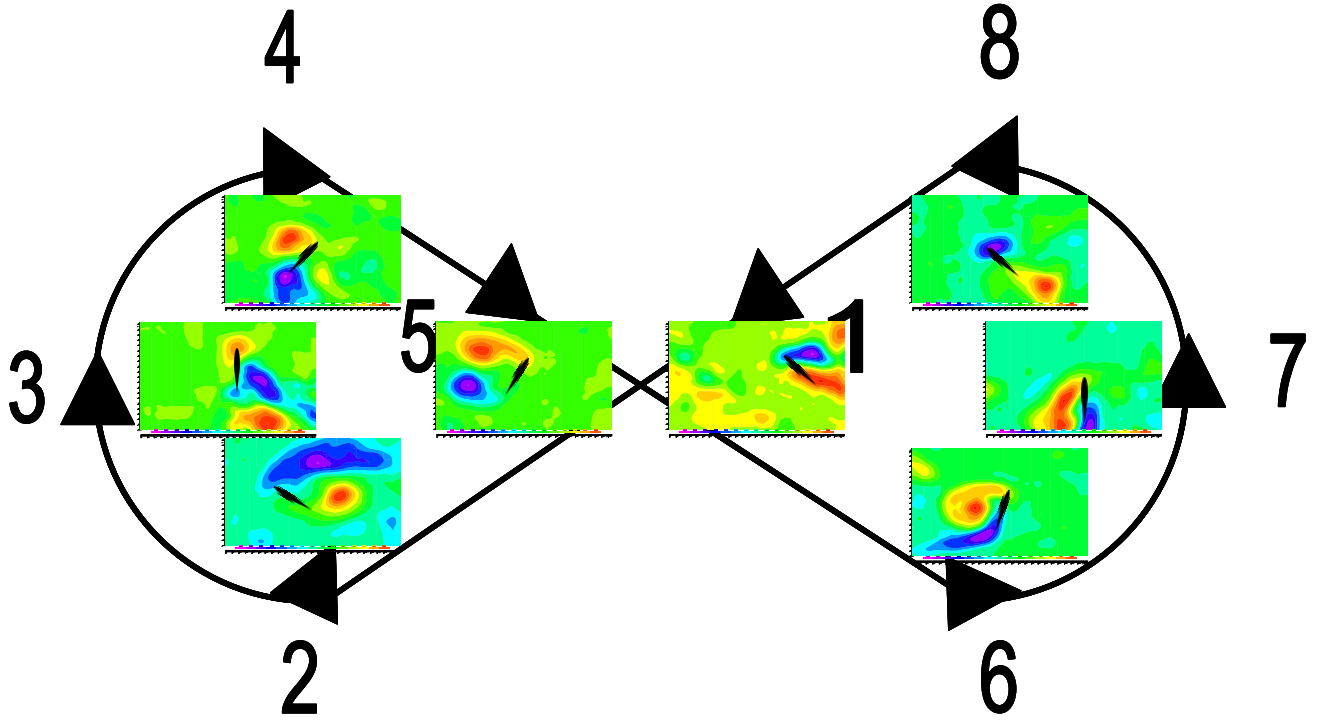


**Şekil 6.3** Akış düzlemi. Akış yönü oklarla gösterilmiştir.

Alınan resimlerin zamanları hareket periyoduna bölünerek boyutsuz hale getirilerek  $t^*$  olarak sunulmaktadır. Tablo 6.1'deki akış şartlarındaki hareketin bir periyodu yaklaşık olarak 64 saniyedir.

$$t^* = \frac{t}{T_{\text{periyot}}}$$

Hazırlanan deney düzeneği kullanılmaya başlanmış ve yapılan testlerde bir tam periyod boyunca (başlangıç noktası bir) sekiz farklı noktada alınan görüntüler Şekil 6.4 de gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Bir tam periyot boyunca sekiz farklı noktada yapılan akım alanı ölçümleri

Kanatçık etrafındaki akışın periyodik olmasını garanti etmek ve başlangıçtaki kararsızlık etkilerini azaltmak amacıyla tüm alan için yapılan hesaplamalar çırpma hareketinin başlangıcından sonraki 7 nci periyodu için yapılmıştır.

Bir periyot boyunca yapılan deneylerde taşıma katsayılarında ikişer adet negatif ve pozitif tepe noktaları bulunmaktadır. İlk pozitif tepe noktası geçiş fazında, negatif tepe noktası ise

hareketin tam dönüş fazında oluşmaktadır. Minimum taşıma değeri  $90^\circ$  sonrasında oluşmaktadır.

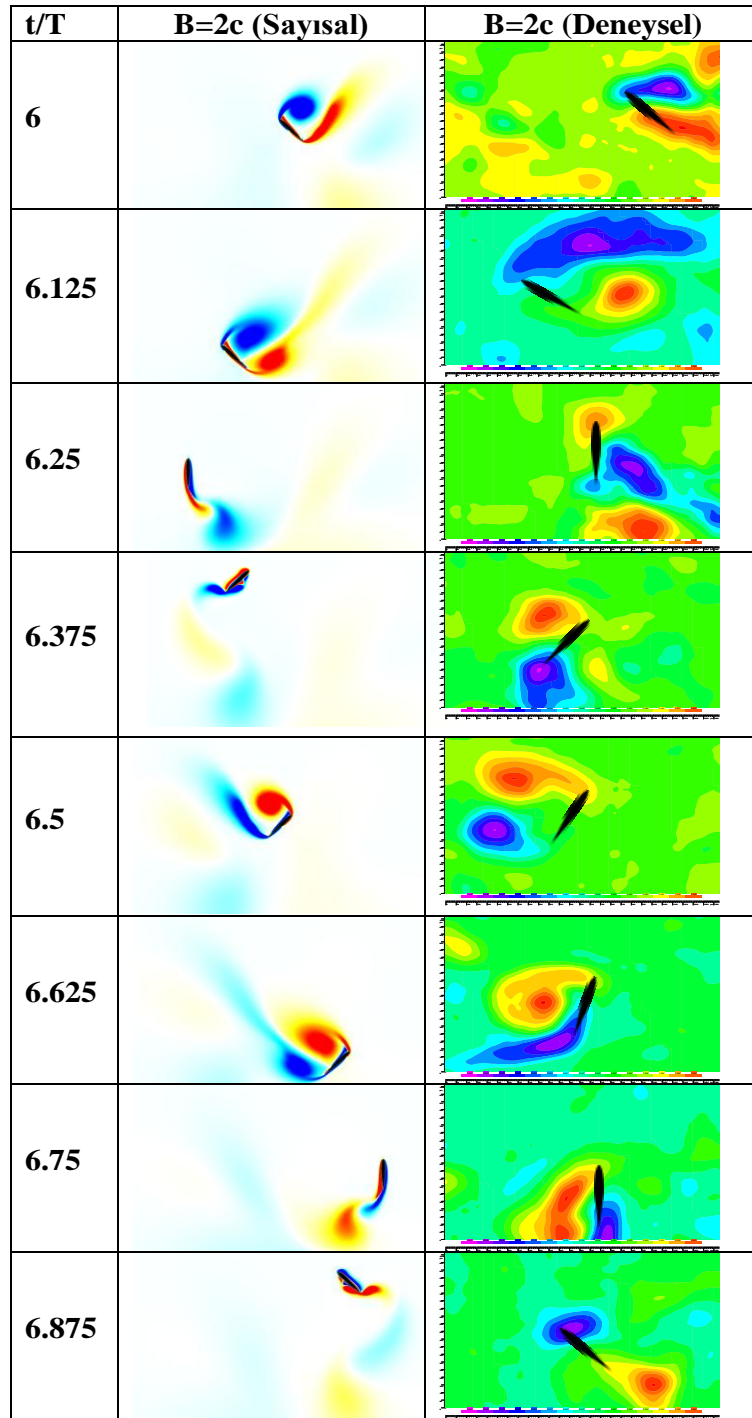
Sıfır taşıma katsayısı x yönündeki hızın sıfır olduğu noktalarda (3 ve 7) elde edilmektedir. Kanat çırpma hareketinde yatay yöndeki kuvvet katsayısı hızın ve kuvvetin yönüne bağlı olarak ya anlık “sürüklenme” veya “itki kuvveti” katsayısı olmaktadır. Eğer “x” yönündeki hızın ve kuvvetin yönleri aynı ise veya her ikisinin işaretleri aynı ise bu durumda kanatçık üzerine itki kuvveti etki ettiğini göstermektedir.

Maksimum ve minimum kaldırma kuvvetlerinin gözlemlendiği durumda, kanatçığın alt yüzeyindeki vorteksin üst yüzeye doğru hareket ederken şiddetinin arttığı gözlenmektedir. Bu geçiş sırasında kaldırma kuvveti sürekli olarak artmakta ve maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu durumda vorteks kanatçığın tamamen üst yüzeyine göç etmiş durumdadır ve ardından kaldırma kuvvetinde bir azalma söz konusudur.

Sekiz hareketi çizerken kanat üzerinde göreceli olarak çok daha büyük hücum ve firar kenarı vorteksleri oluşmaktadır. Son oluşan hücum ve firar kenarı vortekslerinin bir önceki çırpma sırasında oluşan vortekslerle etkileşmemesi nedeniyle vorteksler şiddetlerini lineer harekete oranla daha uzun bir süre koruyabilmektedirler.

Ayrıca buna ek olarak sekiz hareketi sırasında kanatçık çok daha sürekli ve kesintisiz bir şekilde hareket etmektedir. Kanatçığın aşağıya doğru çırpma hareketinin tam başlaması sırasında firar kenarında oluşan vorteks ile dikey yöndeki hareket sırasında hücum kenarında oluşan aynı yönde dönen vortekslerin etkileşimi sonucunda, kanatçığın dikey yöndeki hareketi firar kenarındaki vorteksin şiddetinin artmasına faydalı olmaktadır.

NACA 0012 profilinin kanat çırpma hareketinin bir tam periyot boyunca detayları nümerik sonuçlar bölümünde çok kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Sayısal çözümlerden elde edilen akım alanı detayları ile bu deneylerden elde edilen akım alanının detayları karşılaştırılmalı olarak Şekil 6.5’de verilmektedir



Şekil 6.5 NACA 0012 profili için nümerik ve deneysel çalışmalardan türetilen boyutsuz vortisite eş değer çizgileri (konturları),  $\alpha_0=60^\circ$

Deneysel sonuçların nümerik sonuçlarla karşılaştırılması şekil 6.5 de görsel olarak verilmiştir. Şüphesiz bu iki yöntemin karşılaştırmasının birbir örtüşmesini beklemek mümkün değildir. Fakat sonuçlar birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır. Girdap alanlarında gözlenen farklılıkların hareketin aynı anında alınan ölçmeler olmamasından kaynaklandığını belirtmek gerekir. Nümerik hesaplamalarda zamanı tam ve kesin olarak belirlemek mümkündür. Fakat bu zamanların karşılık geldiği pozisyonları deneysel çalışmalarda aynı doğrulukta ve kesinlikte belirlemek tam olarak mümkün olamamaktadır. Bu nedenle de deneysel ölçümlerdeki zamanlar nümerik ölçümlere göre biraz kaymalı olarak verilmiştir. Görüntülerin alındığı pozisyonlar zamanlama olarak deneysel zamanlara göre ya biraz önce ya da biraz sonraki zamana karşı gelmektedir. Bu nedenle deneysel sonuçlarla nümerik sonuçlar arasında bazı zamanlama farklılıkların gözlenmesinin nedeni bu senkronizasyonun tam ve doğru olarak yapılamamasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.5 de  $t/T=6$  değeri şekil 2.3 de ve 6.4 de tarif edildiği gibi kanat çırpma hareketin aşağı doğru dalış hareketinin tam orta noktasıdır. Diğer bir deyişle bu çalışmada tarif edilen hareketin de başlangıç noktasıdır. 1. faz bu noktadan başlayıp kanadın yukarıya doğru dönerek tırmanması arasındaki aralıktır. Şekil 6.5 de bu başlangıç noktası olan  $t/T=6$  değeri için deneysel ve nümerik sonuçların birbirlerine olan benzerliği gözlenmektedir. Burada hücum kenarı girdabı mavi (saat yönünde dönen girdap) firar kenarı girdabı ise kırmızı renkli olarak (saat yönünün tersine dönen girdap) gösterilmiştir. Nümerik çözümlerdeki netlik maalesef deneysel sonuçlarda yakalanamamıştır. Deneysel sonuçlardaki firar kenarı girdabı oldukça yayılmış durumdadır ve nümerik çözümlerdeki gibi yukarıya doğru kıvrılmamıştır. Hücum kenarının girdabı ise net bir şekilde yakalanmıştır. Ne var ki bu girdap nümerik çözümlere göre kanat yüzeyinden oldukça uzaktadır. Burada deneysel sonuçların biraz daha geç bir zamandaki pozisyonu gösterdiğini yorumlamak mümkündür.

$t/T=6.125$  durumu için de hemen hemen aynı şeyleri söylemek mümkündür. Deneysel sonuçlarda hücum kenarı girdabı oldukça yayılmış (diffuse etmiş) durumdadır ve kanadın üst yüzeyinden ayrılmıştır (kopmuştur). Fakat nümerik çözümlerde bu girdap hala üst yüzeye bağlı durumdadır. Firar kenarı girdapları için de aynı gözlem geçerlidir. Deneysel sonuçlarda firar kenarı girdabı yüzeyden kopmuş durumdadır fakat nümerik çözümlerde ise bu girdap henüz kopmamış fakat tam kopma durumundadır.



$t/T=6.25$  durumu için kanat tam yukarı doğru harekete geçmek üzerindedir. Kanat çırpma hareketi nedeni ile oluşan akışa neredeyse tamamen dik konuma gelmiştir ve çırpma hareketin yönü kanat yukarı doğru çıkarken değişmektedir. Deneysel sonuçlarda kanadın alt yüzeyine doğru yayılmış durumda görünen hücum kenarı girdabının döngü yönü değişmektedir, aşağı doğru inerken saat yönünde dönen bu girdap bu pozisyonda saat yönünün tersi istikametinde dönmeye başlamaktadır. Fakat net bir girdap yerine daha yayılmış bir girdap kanadın alt yüzeyini kaplamıştır. Diğer taraftan firar kenarı girdabı için de aynı yorumlar geçerlidir. Bu girdabın yönü de değişmektedir. Önce saat yönünün tersine olan dönü hareketi bu sırada saat yönündedir, ve girdap şekilde görüldüğü gibi kanadın üst yüzeyine yayılmış durumdadır ve net bir girdap görüntüsü yoktur. Aynı gözlemler deneysel sonuçlar için de geçerlidir. Deneysel sonuçlarda da girdapların yön değişimi ve kanat yüzeylerine yayılmaları ve net girdap görüntülerinin kaybolduğu gözlenmektedir. **Bu değişimlerinin etkisini nümerik çalışmalarda görmek mümkündür. Şekil 3.11 den de görüleceği gibi sürekleme katsayısı  $t/T=6.25$  anında maximum değere ulaşmaktadır. Yani bu an sürüklemenin en fazla olduğu andır. Bu noktadan sonra sürekleme katsayısı sürekli olarak düşecektir. Zira bundan sonra kanat sırt yüzeyi akımı karşılayacak şekilde aşağıya doğru dalarak çırpma hareketine başlamaktadır.** Aynı durum kaldırma katsayısı için de geçerlidir. Şekil 3. 10 da verilen nümerik çözümlerden bu anı biraz geçtikten sonra yani kanat aşağı doğru dalma hareketine tam başlama anında kaldırma katsayısının en düşük değerde olduğunu görmek mümkündür. Bu nedenle  $t/T= 6.25$  anı, kaldırma katsayısının en düşük, sürüklem katsayısında en yüksek olduğu ana karşılık gelmektedir. Tabii ki havada askı durumunda kalmak için de en elverişsiz durum olarak değerlendirilmelidir.

$t/T=6.375$  anı için yorumlar bir önceki gözlemlerle hemen hemen aynıdır. Zira bu pozisyonda kanat sırtına dönük olarak yukarı doğru çıkma hareketinin sonundadır. Yani dönme hareketi hemen hemen tamamlanmak üzeredir. Nümerik çözümlerde hücum kenarı girdabı tamamen alt yüzeye yayılmış ve yapışmış durumdadır. Kanadın üst yüzeyi ise saat yönündeki girdap ile kaplıdır ve bu girdap kanat yüzeyinden de kopmak üzeredir. Deneysel sonuçlarda söz konusu girdaplar daha belirgindir. Firar kenarı ve hücum kenarı girdaplarının daha net bir oluşumu gözlemlenmektedir. Nümerik çözümlerden de gözleneceği gibi (şekil 3.11)  $t/T=6.375$  anı kanadın sürüklem kuvvetinin yavaş yavaş azaldığı sürecin başlangıcıdır. 6.25 anında

maximum sürüklemenin elde edilmesinden sonra sürükleme katsayısı kanadın akım sırtına gelecek şekilde aşağıya doğru dalma hareketine başladığında sürükleme katsayısı maksimum değerden giderek azalmaya başlamaktadır. Bu azalma giderek sifıra yaklaşmakta hatta dalış hareketinin ortalarında sıfır değerine ulaşmaktadır. Şekil 3. 10 verilen kaldırma katsayısının değişimi incelendiğinde kaldırma katsayısının bu an için giderek yükselmekte olduğu ve  $t/T=6.40$  da en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir. Yani kanadın üst yüzeyi (sırtı) akımı karşılayan yüzey olarak aşağı doğru dalış hareketi sırasında izlenen yolun daha ortaların gelmeden diğer bir değişle periyodun 2 fazı içinde kaldırma katsayısının değeri maksimum değerine ulaşmaktadır.

**$t/T=6.5$**  anı için hem deneysel hem de nümerik sonuçlar birbirleri ile çok güzel bir uyum içerisindedir. Nümerik sonuçlarda gözlenen net girdap oluşumları deneysel sonuçlarda da aynı netlikle gözlenmektedir. Hücüm kenarı girdabının nümerik çözümlerinde gözlenen kanat yüzeyinden uzaklaşması aynı şekilde deneysel sonuçlarda da elde edilmiştir. Firar kenarı girdabının nümerik çözümlerdeki yukarı doğru yayılarak uzaması aynı şekilde deneysel sonuçlarda da gözlenmiştir ve hatta deneysel sonuçlarda girdabın kanat yüzeyinden ayrıldığı görülmektedir. Bu an şekil 2. 4 de gösterildiği gibi 2 ci fazın sonu ve 3 fazın başlamasıdır. Aşağıya doğru sırtüstü dalış hareketinin tam orta noktasına denk gelmektedir. Bu noktada daha önce de belirtildiği gibi sürükleme katsayısının sifıra inip negatif değerlere geçtiği andır. Şekil 3.11 den sürükleme katsayısının bu anda negatif değerlerde olduğunu görmek mümkündür. Bu noktadan sonra dalış hareketine devam edilmesi sürüklemenin artmasına (daha az negatif değerlere ulaşılmasına) yani sürükleme yerine elde edilen itmenin azalmasına neden olmaktadır. Sürükleme değeri bu süreç içerisinde tekrardan artış göstererek sifıra ulaşmakta ve giderek pozitif değerlere geçmektedir. Şekil 3.10 da verilen kaldırma katsayısının değişimi incelendiğinde ise bu durumda kaldırma katsayısının giderek azaldığı ve üçüncü fazın ortalarında ise, yaklaşık  $t/T= 6.65$  değerlerinde, sıfırlandığı gözlemlenmektedir.

**$t/T=6.625$**  anı için de nümerik çözümlerle deneysel sonuçlar arasındaki uyumlu gözlemler geçerlidir. Bu durum kanadın sırt üstü şeklinde aşağı doğru hareketinin sonuna yaklaşıırken oluşan durumdur. Deneysel ve nümerik sonuçların birbirlerine olan uyumu dikkate şayandır. Hücüm kenarı girdabı tamamen büyümüştür, firar kenarı girdabı ise yavaşlamanın da etkisi ile biraz daha yayılma trendine girmiştir.

Bu an aşağıya doğru dalış hareketinin hemen hemen sonuna denk gelmektedir. Hareket giderek yavaşlamakta ve kanat yukarıya doğru tırmanış için kendi eksenini etrafında dönüş hareketine başlamak üzeredir. Bu nedenle yukarıda da bahsedildiği gibi girdapların yeri kaymaktadır. Özellikle deneysel sonuçlardan (Şekil 6.5) firar kenarı girdabının yayıldığını görmek mümkündür. Şekil 3. 11 den de bu an için sürüklenme katsayısının yerel bir maksimuma ulaştığını gözlemlemek mümkündür. Yukarıda da belirtildiği gibi Şekil 3.10 da verilen kaldırma katsayısı da giderek azalarak bu an sıfır değerlerine ulaşmaktadır.

$t/T=6.75$  anı için kanat yukarıya doğru dönüşe geçmiştir. Kanadın hücum kenarındaki girdabı şimdi alt yüzeye doğru yayılım göstermekte, firar kenarındaki girdap ise kanadın üst yüzeyine yayılmaktadır. Bu gözlemler hem nümerik çözümlerde hem de deneysel sonuçlarda hemen hemen aynıdır. Her iki sonuçta şaşılacak derecede birbirine benzemektedir.

Aynen  $t/T=6.25$  anında olduğu gibi şekil 3. 11 den bu anın da çırpma hareketinin en kritik anlarından birini olduğunu gözlemlemek mümkündür. Kanat üzerine etkiyen sürüklenme kuvveti daha önce bir yerel maksimumdan geçerek giderek azalmış ve bu an itibarıyla en düşük negatif değere ulaşmıştır, yani sürüklenme katsayısı negatif minimum değerdedir. Yani sürüklenme yerine itme oluşmaktadır. Diğer taraftan Şekil 3.10 da verilen kaldırma katsayısı ise aynen sürüklenme katsayısında olduğu gibi bu noktayı biraz geçtikten sonra yani kanat alt yüzeyi akımı karşılayacak şekilde aşağıya doğru dalış hareketine tam başlamak üzere iken en düşük değerine ulaşmaktadır.

$t/T=6.875$  anında kanat çırpma hareketinin periodunu tamamlamak üzeredir ve yeniden ilk başladığı konuma dönmektedir. Bu durumda kanadın firar kenarında yine saat yönünün ters yönünde, hücum kenarında ise saat yönünde bir girdap oluşumu hem sayısal çözümlerde hem de deneysel sonuçlarda gözlenmektedir. Ne varki her iki vortex de yayılmaktadır. Hücum kenarındaki vortex kanat yüzeyine doğru, firar kenarındaki vortex ise akım alanı içine doğru atılmaktadır. Bu gözlemler hem nümerik hem de deneysel sonuçlar için de aynıdır. Şekil 3. 11 den hareketin bu anı için elde edilen sürüklenme katsayısına bakıldığında sürüklemenin pozitif değerlerde olduğunu ve giderek bir yerel maximumdan geçip daha sonra peridu tamamlamak üzere bir yönelim de olduğunu görmek mümkündür. Şekil 3.10 da verilen kaldırma katsayısının değişimi ise bu an itibarı ile yani periodun son fazı olan 4 cü fazın

tamamlanmasından hemen önce, kaldırma katsayısının tekrar arttığını ve bu durumda en yüksek değerine ulaştığını göstermektedir.

Görüldüğü gibi sekiz hareketi çizerek kanat çırpma sırasında bir period boyunca kaldırma ve sürüklenme katsayıları hemen hemen aynı noktalarda değişim göstermekte, en yüksek ve en düşük değerlerine aynı anlarda gelmektedirler. Şüphesiz bu değişimlerin nedeni kanat üzerinde oluşan girdap çiftlerinin durumu ve bunların yer değişimleridir. Burada yapılan ise girdapların durumlarının incelenmesi ve nümerik çalışmalarda ortaya konan sürüklenme ve kaldırma katsayılarının değişim eğrilerinin söz konusu girdap çiftlerinin geometrilerindeki değişimlerle özdeşleştirilerek yorumlanmasıdır.

Tüm bu gözlemler içinde dikkati çeken en önemli husus sekiz şeklinde çırpma hareketi yaparken kanat hiç bir şekilde bir önceki hareket fazında oluşan girdaplarla kesinlikle etkileşim içine girmemektedir. Yani bir önceki hareket fazı sırasında salınan girdaplardan hiç biri kanat hareketinin yolunu kesmemekte ve kanat ile etkileşime girmemektedir. Bu durum oldukça önemli bir gözlemdir. Zira sekiz hareketi çizerek kanat çırpma hareketinin en önemli özelliği ve doğrusal çırpma hareketine göre üstünlüğü de burada yatmaktadır. Bu hareket sırasında oluşan vortexlerin birbirleri ile etkileşimi söz konusu değildir. Hareket oldukça temiz ve etkileşimsizdir. Bunun sonucu olarak da hareketin kazanımı kaldırma katsayısında kendisini göstermektedir.

## **7. YENİ DENEY DÜZENEĞİNDEKİ AKSAKLIKLAR**

Çırpan kanat hareketinin iki boyutlu aerodinamik analizi için yeni imal edilen ve bu sonuç raporunda NACA 0012 kanat profili için deney sonuçları sunulan sistemin, deney için ideal akış şartlarını elde etmek amacıyla hareketin kaç defa tekrarlanacağını ve kamera ile kaydın (fotoğraf çekimlerinin) ne zaman başlayacağını girilmesini sağlayan veri giriş sisteminde bazı sorunlar yaşanmıştır. Sistemin manual olarak da kullanılabilmesi bu sorunu kısmen ortadan kaldırmıştır. Fakat sistemin daha esnek ve daha etkileşimli çalışmasını sağlamak için yazılım üzerindeki geliştirme ve iyileştirme çalışmaları halen devam etmektedir.

## 8. SONUÇ

109M311 Nolu hızlı destek projesi ile desteklenen projemizin sonuç raporunda ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde sekiz şekli çizen çırpan kanat hareketinin aerodinamiğinin analizi için imal edilen ve deneylerin yapıldığı mevcut su tankı üzerine monte edilen hareket düzeneği tanıtılmış ve yeni kurulan bu deney düzeneği kullanılarak NACA 0012 simetrik kanat profilinin sekiz figürü çizerek çırpma hareketi yaparken oluşturduğu akım alanı PIV yöntemi kullanılarak deneysel olarak incelenmiş ve deneysel olarak bulunan akım alanı nümerik sonuçlarla karşılaştırılarak sunulmuştur.

Yapılan ilk gözlemlerde deneysel sonuçlarla nümerik çözümlerin birbirleri ile büyük bir uyum içinde oldukları gözlenmiştir. Özellikle sekiz hareketi çizerken kanadın hücum ve firar kenarlarında oluşan ve birbirlerine göre ters yönde dönen girdap çiftlerinin kanat çırpma hareketinin bir periodu boyunca oluşumları ve kanat üzerindeki konumları hem deneysel hem de nümerik olarak incelenmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda da kanat çırpma hareketinin aerodinamiği daha net bir şekilde anlaşılmıştır.

Öncelikle deneysel sonuçlar nümerik çözümlerin doğruluğunu kanıtlamıştır. Akım alanı içinde oluşan girdap çiftlerinin (hücum kenarı girdabı ile firar kenarı girdap çifti) hem oluşum şekilleri hem de kanat üzerindeki göreceli pozisyonları nümerik sonuçları doğrulamıştır. Her iki yöntemle elde edilen eş değer girdap (vortisite) eğrileri şekil 6.5 de verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi her iki yöntemle elde edilen akım alanı girdapları birbirlerine çok benzemektedir. Bazı durumlarda uyuşum tam, bazı durumlarda ise girdapların konumu ve şekli biraz farklılık göstermektedir. Bu durum deneysel sonuçların alındığı an ile nümerik sonuçların elde edildiği çırpma hareketinin yörüngesi üzerindeki konum farklılığından yani bu yörünge üzerinde çekilen ölçüm fotoğraflarının çekildiği anların nümerik sonuçlarla tam olarak örtüşmemesinden kaynaklanmaktadır. Girdap alanlarının birbirleri ile tam benzerlik gösterdikleri durumlarda her iki yöntemle elde edilen sonuçların elde edildiği anlar birbirleri ile aynı olduğundan yörünge üzerinde de aynı konumda olduklarından girdap oluşumları da birbirleri ile tıpatıp aynı olmaktadır.

Sekiz hareketi çizerek kanat çırpma olayında hareket kanadın alt yüzeyi akışı karşılayan taraf olacak şekilde aşağıya doğru dalma (plunge) olarak başlamaktadır. Bu hareket sırasında kanadın hücum kenarından saat yönünde, firar kenarından ise saat yönünün ters istikametinde iki ayrı vortex oluşumu gözlenmektedir. Hareketin bu ilk fazı şekil 6.4 de gösterildiği gibi 1 ve 2 nolu noktalar arasında olmaktadır.

2 noktasından sonra 2- 3 noktaları arasında (şekil 6.4) kanat giderek yavaşlamakta ve bu sefer kanat kendi eksenini etrafında dönerek yukarıya doğru çıkmaktadır. Bu hareket sırasında kanat üzerinde oluşan girdapların konumları yer değiştirmekte kanadın üst yüzeyinden (hareket yönüne göre kanadın sırtından) alt yüzeyine (hareket yönüne göre kanadın akımı karşılayan tarafı, kanadın alt yüzeyi) doğru kaymakta ve özellikle de girdapların dönme yönleri tamamen değişmektedir. Hücüm ve firar kenarlarındaki girdaplar birbirlerine yine ters yönlerde dönerken, hücüm kenarındaki girdap kanat alt yüzeyine kayarak saat yönünün ters yönünde, firar kenarındaki girdap ise kanadın üst yüzeyinde kalarak saat yönünde dönmektedir.

Şekil 6.4 de 3 ile 4 noktaları arasında kalan bölgede kanat bu sefer akışı kanadın sırtında (üst yüzeyine) karşılayacak şekilde dalış hareketine geçmektedir. Bu sefer her iki girdap da kanadın alt yüzeyine kaymakta ve dönüş yönleri 3 noktasında tespit edilen şekliyle devam etmektedir. 1 ve 2 noktaları arasında kanadın alt yüzeyine karşı gelen akım bu sefer aynı şekilde simetrik olarak kanadın üst yüzeyine karşı gelmektedir. Kanat simetrik olduğu için de 1-2 arasındaki girdap oluşumunun aynısı bu sefer kanadın alt yüzeyinde ama tamamen ters yönlerde döngüye sahip olacak şekilde meydana gelmektedir.

4-5-6 noktaları arasında kanat akımı sırtında (üst yüzeyinde) karşılayacak şekilde dalış hareketini yapmaktadır. Bu dalış ile 1-2 noktaları arasındaki dalış arasında kanat simetrik olduğu için hiç bir fark yoktur. Zaten akım alanlarının incelenmesinden de bu sonuç ortaya çıkmaktadır. Aradaki fark girdapların yer değiştirmesidir. 1-2 noktaları arasında kanadın üst yüzeyinde olan girdaplar 4-5-6 noktaları arasındaki dalış hareketi arasında kanadın alt yüzeyine kaymıştır ve dönüş yönleri de tamamen ters yöne doğru olmaktadır. Hücüm kenarındaki girdap saat yönünün ters yönünde firar kenarındaki girdap ise saat yönünde olmaktadır.

6 noktasına gelindiğinde kanat hareketi yavaşlamakta ve aynen 2 noktasında olduğu gibi kanat kendi eksenini etrafında dönerek yön değiştirmekte ve yukarıya doğru tırmanışa geçmektedir. 6-7 noktaları arasında gözlemlenen olaylar aynen 2-3 noktaları arasında olduğu gibidir. Fakat bu sefer girdapların buldukları yüzey kanadın hücüm kenarı girdabı için kanadın alt yüzeyi firar kenarı girdabı için üst yüzeyi (sırtı) dir. Girdaplar hemen hemen tüm alt ve üst yüzeylere yayılmış durumdadır.

8 noktası yukarı doğru tırmanışın sonu, aşağı doğru çarpma (dalma) hareketinin başlangıç noktasıdır ve 4 noktasının simetriğidir. 4 noktasındaki gözlemler bu nokta için de geçerlidir. Fakat girdapların dönüş yönleri 4 noktasına göre tamamen tersdir ve girdaplar kanadın üst

yüzeyindedir (sırt tarafındadır). 8 noktasından başlayarak 1 noktasına kadar kanat yine sabit açı ile dalış yapmaktadır ve bu dalış esnasında hem hücum kenarı hem de firar kenarı girdapları giderek büyümekte ve kanat yüzeyinden kopmak istemektedir.

## **9. ÖNÜMÜZDEKİ DÖNEMDE YAPILACAK ÇALIŞMALAR**

İmal edilen yeni sistem bundan sonra da sürekli olarak kullanılacaktır. Özellikle doktora tez çalışmasını bu konuda yapmakta olan doktora öğrencisi Oğuz Erkmen'nin tez çalışmaları sırasında çok daha yoğun olarak kullanılacaktır. Doktora tez çalışmalarında değişik kanat profilleri (özellikle kamburlu profiller) kullanılarak PIV deneyleri gerçekleştirilecektir. Bu raporda sunulan deneylerin daha değişik hücum açıları için detaylı ölçümleri de doktora tez çalışmaları kapsamında ileriki dönemlerde devam edecektir.

Bu proje ile hedeflenen sonuç deney düzeneğinin kurulması ve deneylerin yapılabilir hale getirilmesi idi. Bunda da başarılı olunmuştur. Proje ile başarılan başlıca hedefler şunlar olmuştur:

- Deney düzeneğini oluşturan ve bu projenin bütçesinin tümünün harcandığı sekiz hareketini çizdiren hareket mekanizmasının tam ve güvenli bir şekilde çalıştığı kanıtlanmıştır.
- Hareket mekanizması çalıştırılmış, su tankı içindeki kanada sekiz hareketi çizdirilmiştir. Kanada su tankı içinde yeni mekanizma ile sekiz hareketi çizdirilirken, hareketle senkron bir şekilde akım alanının PIV görüntüleri kameralar ile alınmış ve alınan bu görüntüler işlenerek akım alanının anlık hız vektörleri bulunarak çizdirilmiştir.
- Ayrıca hız vektörlerinden hareketle kanat etrafında oluşan girdaplar (girdap konturları) başarıyla ortaya çıkarılmıştır.
- Deney düzeneğinin yanı sıra kamera ile yapılacak çekimlerin hareketle senkron olması gerekmektedir. Zira kameraların çektiği görüntülerin, hareketin hangi anında (sekiz hareketinin hangi noktasında) çekildiğinin kesin olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle görüntüler alınırken hareketin tüm koordinat bilgileri de kayıt edilmektedir.
- Ayrıca önceden programlama yaparak hareketin belirlenen noktasında otomatik olarak görüntü almak da mümkündür.

## REFERANSLAR

1. Dilek Funda Kurtuluş, “Numerical and Experimental Analysis of Flapping Motion in Hover, Application to Micro Air Vehicles”, PhD Thesis, June 2005, Ortak Doktora Tezi, ODTÜ- ENSMA Poitiers France,
2. Ebru Sarıgöl, “Numerical and Experimental Analysis of Flapping Wing Motion”, PhD Thesis, July 2007, ODTÜ.
3. Buşra Akay, “Unsteady Aerodynamic Calculation of Flapping Wing Motion”, Master of Science Thesis, September 2007, ODTÜ, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü.
4. “Çırpan Kanatlı Mikro Hava Araçlarının Tasarımı için Kanat Aerodinamiğinin Deneysel Olarak (PIV Particle Image Velocimetry) Tekniği ile İncelenmesi”, TÜBİTAK projesi MİSAG 104M417, Ocak 2008. Proje Kesin Raporu. Proje Yöneticisi: Prof. Dr. Nafiz Alemdaroğlu,
5. “Unsteady Aerodynamics of Flapping Motion for Micro Air Vehicle Design”, TÜBİTAK MİSAG-CNRS-3 Uluslararası Projesi, proje no. 104M329, Proje kesin Raporu Aralık 2007, Proje Yöneticisi: Prof. Dr. Nafiz Alemdaroğlu,
6. Özge Başkan, Msc Thesis, Eylül 2009, “Experimental and Numerical Investigation of Flow Field Around Flapping Airfoils Making Figure of Eight in Hover”, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Ankara.
7. Nafiz Alemdaroğlu, Özge Başkan, Ebru Sarıgöl, “Investigation of Flow Around a Flapping Airfoilin Hover: Comaprison of L,inear And Figure of Eight Motion”, AIAC, 2009 5th Anakra International Aerospace Conference, 17-19 August 2009 METU- Ankara Turkey.
8. Bomphrey ,R. J., Lawson, N. J., Harding, N.J. ,Taylor, G.K., and Thomas, A.L.R., *The aerodynamics of Manduca sexta: digital particle image velocimetry analysis of the leading-edge vortex*, The Journal of Experimental Biology 208,pp.1079-1094, 2005.
9. Warrick, D. R., Tobalske, B. W., and Powers, D. R., *Aerodynamics of the hovering hummingbird*, Nature (London) 435, 1094–7, 2005.



**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No: 109M311</b>
<b>Proje Başlığı: Havada Asılı Konumda Sekiz Figürü (Lemniskat) çizen Çırpan Kanat Hareketinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi</b>
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> <b>Prof. Dr. Nafiz ALEMDAROĞLU (yürütücü)</b> <b>Özge Başkan( araştırmacı)</b> <b>Nazmi Oğuz Erkmen (araştırmacı)</b>
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> <b>Orta Doğu Teknik Üniversitesi</b> <b>Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü</b> <b>Ankara</b>
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b>
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01/10/2009 - 01/04/2010</b>
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b> <p>Havada Asılı Konumda Sekiz Figürü (Lemniskat) çizen Çırpan Kanat Hareketinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi projesi TÜBİTAK tarafından 109M311 nolu proje olarak desteklenmiştir. Proje kapsamında hem sayısal hem de deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu çalışmaların sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Desteklenen bu proje kapsamında bir yüksek lisans tez çalışması tamamlanmış bir Doktora tezi de halen devam etmektedir. Hızlı destek programı kapsamında desteklenen bu proje kapsamında sekiz figürü çizen kanat hareketini yaptıracak bir hareket mekanizması üretilmiş ve mevcut deney düzeneğine entegre edilerek kullanılmaya başlanmıştır.</p>
<b>Anahtar Kelimeler: PIV, Sekiz Hareketi, Lamniscate, Flapping Motion,</b>
<b>Fikri Ürün Bildirim Formu</b> Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> <small>Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.</small>
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b> 1. Nafiz Alemdaroğlu, Özge Başkan, Ebru Sarıgöl, "Investigation of Flow Around a Flapping Airfoilin Hover: Comaprison of L,inear And Figure of Eight Motion",

AIAC, 2009 5th Ankara International Aerospace Conference, 17-19 August 2009  
METU-Ankara Turkey.

2. Özge Başkan, Msc Thesis, Eylül 2009, "Experimental and Numerical Investigation of Flow Field Around Flapping Airfoils Making Figure of Eight in Hover", Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Ankara.