

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PERİYODİK HAREKET YAPAN BİR KANAT PROFİLİ ETRAFINDA
MEYDANA GELEN GİRDAP DİNAMİĞİNİN SAYISAL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Selim DURNA

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Uçak-Uzay Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PERİYODİK HAREKET YAPAN BİR KANAT PROFİLİ ETRAFINDA
MEYDANA GELEN GİRDAP DİNAMİĞİNİN SAYISAL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet Selim DURNA
(521091106)**

**İleri Teknolojiler Anabilim Dalı
Uçak-Uzay Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aydın Mısırlıoğlu

Eş Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bayram Çelik

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 521091106 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ahmet Selim Durna**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“PERİYODİK HAREKET YAPAN BİR KANAT PROFİLİ ETRAFINDA MEYDANA GELEN GİRDAP DİNAMİĞİNİN SAYISAL İNCELENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Aydın MISIRLIOĞLU**

Eş Danışman : **Yrd. Doç. Dr. Bayram ÇELİK**

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Fırat Oğuz EDİS**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ömer GÖREN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ayşe Gül GÜNGÖR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **8 Haziran 2012**

Değerli aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen ve tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam Prof. Dr. Aydın Mısırlıoğlu'na teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bu çalışma boyunca bilgisinden faydalandığım benden yardımlarını, desteğini, sabrını hiç esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Bayram Çelik'e de teşekkür ederim.

Tezimin yazılmasında büyük emeği geçen saygı değer, biricik hayat arkadaşım olacak olan Meteoroloji Y. Mühendisi Bihter Yerli'ye, yardımını esirgemeyen Uçak-Uzay Y. Mühendisi Mehmet Halil Yılmaz ve Murat Süer'e ve bu yaşıma kadar bana cefakarca bakmış ve büyüttmüş olana aileme ve tüm dostlarıma çok teşekkür ederim.

Mayıs 2012

Ahmet Selim Durna
Uzay Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. ÇIRPAN KANAT AERODİNAMİĞİNE GİRİŞ	1
1.1. Çırpan Kanatlı Araçların Tarihi	2
1.2. Çırpan Kanat Aerodinamiği ve Hareketin Kinematiki.....	6
1.2.1.Çırpma hareketinin kinematiki	6
1.2.2.Çırpma hareketinin kritik parametreleri	7
1.3. Aerodinamik Katsayılar	14
1.3.1.İtke, taşıma ve momentum katsayısı	14
1.3.2.İtke verimi	15
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	17
2.1. İtke Üretimi Meydana Getiren Girdap Mekanizmaları.....	17
2.2. Dalma Hareketi Yapan Kanat Profili	22
2.3. Yunuslama Hareketi Yapan Kanat Profili.....	26
2.4. Dikey Salınım ve Yunuslama Hareketini Beraber Yapan Kanat Profili	28
2.5. Hücüm ve Firar Kenarı Girdaplarının Etkileri	31
2.6. Statik ve Dinamik Tutunma Kaybı.....	32
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ	35
3.1. Giriş.....	35
3.1.1.Akışı Yöneten Denklemler	35
3.2. Sayısal Çalışma Metodolojisi.....	36
3.2.1.Geometri ve Çözüm Ağı'nın Oluşturulması	36
3.2.2.Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Çözücüsünün Hazırlanması	38
4. SONUÇLAR.....	43
4.1. Analiz Sonuçlarına Giriş	43
4.2. Ön Çalışma	43
4.2.1.Hareketin doğrulanması.....	43
4.2.2.Zaman adımının belirlenmesi	44
4.2.3.Çözüm ağı yoğunluğunun belirlenmesi	45
4.2.4.Çözümlerin periyodikliği.....	51
4.2.5.Deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırma	53
4.3. Sonuçlar.....	55
4.3.1.Yalnızca dalma hareketinde kuvvet katsayıları ve akışın girdap yapısı	55
4.3.2.Yüksek genlikte dalma hareketi	61
4.3.3.Hücüm açısının bütünleşik hareket üzerinde etkisi	71
5. DEĞERLENDİRMELER.....	83

KAYNAKLAR.....	85
EKLER.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	93

KISALTMALAR

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
LEV	: Hücüm Kenarı Girdabı (Leading Edge Vortex)
TEV	: Firar Kenarı Girdabı (Trailing Edge Vortex)
MHA	: Mikro Hava Aracı (Micro Air Vehicle)
UDF	: Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (User Defined Function)
DARPA	: Amerika Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı
FFT	: Fast Fourier Transform
PSD	: Power Spectral Density
LDV	: Laser Doppler Velocimetry

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: 6 farklı çözüm ağının ortalama itki katsayı değerleri..... 50

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Uçan canlılar ve araçlar için Reynolds sayısı aralığı [1].....	1
Şekil 1.2 : Leonardo da Vinci'nin ornithopter tasarımı [6].	3
Şekil 1.3 : Varolan hava araçlarına göre MHA'nın uçuş rejimi [7].	4
Şekil 1.4 : Sabit, döner ve çırpın kanatlı MHA örnekleri. [8][9][10][11].....	5
Şekil 1.5 : Kanat profili hareket şeması.	7
Şekil 1.6 : Yüzen ve uçan hayvanların Strouhal sayısı aralığı [24].	11
Şekil 1.7 : “Taphozous georgianus” yarası türünün kanat çırpma süresi [25].	12
Şekil 1.8 : “Taeniopygia guttata” kuşun 0.125 s'lik dilimindeki kanat çırpma süresi [25].	12
Şekil 1.9 : “Taeniopygia guttata” kuş ile “Taphozous georgianus” yarasanın genlik karşılaştırması [25].	12
Şekil 1.10 : Doğada bulunan 42 farklı türün genlik karşılaştırması [24].	13
Şekil 1.11 : Bütünleşik harekette etkin hücum açısı.	14
Şekil 2.1 : Çırpın kanattan elde edilen itkinin ilk teorik açıklaması Knoller ve Betz [35].	18
Şekil 2.2 : Momentum kaybına neden olan girdap yapısı [40].	19
Şekil 2.3 : Momentum artışına sebep olan girdap yapısı [40].	20
Şekil 2.4 : 0 sürüklenme veya itki üreten iz bölgesi [40].	20
Şekil 2.5 : (Sol şekil - a) Sürüklenme üreten iz bölgesi (Orta - b) İtki üreten iz bölgesi (Sağ - c) Nötr iz bölgesi [43]	21
Şekil 2.6 : İtki/Taşıma üreten girdap caddesi [43]	21
Şekil 2.7 : Sırasıyla düşük frekans değerlerinde itki katsayısındaki dinamik tutunma kayıp grafiği ve dinamik tutunma kaybı sınırındaki k ve h değerleri [47].	23
Şekil 2.8 : İndirgenmiş frekansa göre itki katsayısı ve itki verimi [40,45].	23
Şekil 2.9 : kh değerine göre η değişimi [48,49].	24
Şekil 2.10 : Düşük ve yüksek genlik için verimin yüksek olduğu değerlerde girdap görünümü [48,49].	24
Şekil 2.11 : kh değeri arttıkça ters Karman girdap caddesine geçiş formu (kh değerleri sırasıyla 0, 0.098, 0.196, 0.393) [44].	25
Şekil 2.12 : Sadece yunuslama yapan kanat profili için indirgenmiş frekansa göre itki katsayısının değişimi [54].	27
Şekil 2.13 : İndirgenmiş frekans ve ortalama hücum açısına göre hız profilleri [55]27	
Şekil 2.14 : Farklı hücum açısı, genlik ve faz farkları için itki katsayısı ve itki verimi grafiği [56].	28
Şekil 2.15 : İtki katsayısı, güç katsayısı ve itki veriminin iki hareket arasındaki faz farkına göre değişim grafiği [56].	29
Şekil 2.16 : Frekans ve faz farkının fonksiyonu olarak itki verimi [57].	30
Şekil 2.17 : Strouhal sayısına göre itki katsayısı ve itki veriminin değişimi [48].	30
Şekil 2.18 : NACA 0012 kanat profilinin dinamik tutunma kaybı durumu [63].	32

Şekil 3.1 : Oluşturulan çözüm ağının solda genel görünümü, sağda kanat profili etrafındaki çözüm ağının yakından görünümü.	38
Şekil 3.2 : Fluent yazılımında aynı problemin paralel işlemci sayısına göre çözüm performansı.	39
Şekil 3.3 : Akış alanının sınır koşulları.....	40
Şekil 4.1 : Farklı zaman adımları için bir periyotta itki katsayısı grafiği.	45
Şekil 4.2 : Üç farklı zaman adımı için akım alanı girdap yapısı.....	45
Şekil 4.3 : Farklı ağ yoğunluklarının genel görünümü.	46
Şekil 4.4 : Farklı ağ yoğunluklarının yakından görünümü.	47
Şekil 4.5 : Farklı ağ yoğunluklarının firar kenarı yakınlarındaki görünümü.	48
Şekil 4.6 : Bir periyotta 6 ve 4 farklı yoğunluktaki ağ için sürüklenme katsayısı değişimi (sırasıyla sol ve sağ şekil).	49
Şekil 4.7 : Daha yakından görünüm sağlayan yarı periyotta 6 ve 4 farklı yoğunluktaki ağ için sürüklenme katsayısı değişimi (sırasıyla sol ve sağ şekil).	49
Şekil 4.8 : İki periyotta 6 ve 4 farklı yoğunluktaki ağ için taşıma katsayısı değişimi (sırasıyla sol ve sağ şekil).	49
Şekil 4.9 : Daha yakından görünüm sağlayan yarı periyotta 6 ve 4 farklı yoğunluktaki ağ için taşıma katsayısı değişimi (sırasıyla sol ve sağ şekil).....	49
Şekil 4.10 : Farklı ağ yoğunluklarındaki akış alanındaki girdap yapılarının görünümü.....	51
Şekil 4.11 : $k=2.5$ $h=0.3$ için dört periyot girdap görüntüsü.....	52
Şekil 4.12 : $k=2.5$ $h=0.4$ için dört periyot girdap görüntüsü.....	53
Şekil 4.13 : İtki katsayısının kh değerine göre değişimi.	54
Şekil 4.14 : İtki veriminin kh değerine göre değişimi.	54
Şekil 4.15 : Artan çırpma genliğine karşı anlık sürüklenme katsayısı değişimi.....	56
Şekil 4.16 : Artan çırpma genliğine karşı anlık taşıma katsayısının değişimi.	56
Şekil 4.17 : $h=0.2$ için kanat profilinin aşağı (ilk satır) ve yukarı (alt satır) hareketi sırasında girdap görüntüsü.	57
Şekil 4.18 : $h=0.3$ için kanat profilinin aşağı (ilk satır) ve yukarı (alt satır) hareketi sırasında girdap görüntüsü.	58
Şekil 4.19 : $h=0.4$ için kanat profilinin aşağı (ilk satır) ve yukarı (alt satır) hareketi sırasında girdap görüntüsü.	58
Şekil 4.20 : 4 farklı genlik için kanadın iz bölgesi girdap yapıları.	59
Şekil 4.21 : İtki katsayısı ve itki veriminin değişimi	60
Şekil 4.22 : Yüksek genlikli harekette anlık sürüklenme katsayısı grafiği.....	61
Şekil 4.23 : Yüksek genlikli harekette anlık taşıma katsayısı grafiği.	61
Şekil 4.24 : Sabit çırpma frekansı artan genlikte sürüklenme katsayısının değişimi. .	63
Şekil 4.25 : Sabit frekans artan genliğe göre FFT analizi.....	64
Şekil 4.26 : $h=0.4$ için 12. ve 13. periyotun sürüklenme katsayısı grafiği.	65
Şekil 4.27 : $h=0.4$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili aşağı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.	65
Şekil 4.28 : $h=0.4$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili yukarı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.	66

Şekil 4.29 : $h=0.5$ için 12. ve 13. periyotun sürüklenme katsayısı grafiği.	66
Şekil 4.30 : $h=0.5$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili aşağı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.	67
Şekil 4.31 : $h=0.5$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili yukarı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.	67
Şekil 4.32: $h=0.6$ için 12. ve 13. periyotun sürüklenme katsayısı grafiği.	68
Şekil 4.33 : $h=0.6$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili aşağı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.	68
Şekil 4.34 : $h=0.6$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili yukarı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.	68
Şekil 4.35 : Bütünleşik harekette $k=2.5$ $h=0.5$ için hücum açısı 14 için C_d grafiği...	69
Şekil 4.36 : $h=0.5$ ve bütünleşik hareket için 9. ve 10. periyotta kanat profili aşağı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.	70
Şekil 4.37 : $h=0.5$ ve bütünleşik hareket için 9. ve 10. periyotta kanat profili yukarı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.	70
Şekil 4.38 : İki farklı hareket için dikey yer değiştirme ve etkin hücum açısının değişimi.	71
Şekil 4.39 : $k=2.5$ $h=0.6$ için farklı hücum açılarındaki salınımda sürüklenme ve taşıma katsayılarının değişimi.	72
Şekil 4.40 : $k=2.5$ $h=0.4$ için farklı hücum açılarındaki salınımda sürüklenme ve taşıma katsayılarının değişimi.	73
Şekil 4.41 : Bir periyotta farklı hücum açılarındaki etkin hücum açısının değişimi	73
Şekil 4.42 : 4 farklı hücum açısı için bir periyottaki girdap görünümü.	75
Şekil 4.43 : Profil aşağı hareket ederken en düşük C_d değerlerinde girdap yapısı. ...	76
Şekil 4.44 : Profil yukarı hareket ederken en düşük C_d değerlerinde girdap yapısı. .	76
Şekil 4.45 : $k=2.5$ $h=0.3$ için farklı hücum açılarındaki salınımda sürüklenme katsayısının değişimi.	77
Şekil 4.46: $k=2.5$ $h=0.3$ için farklı hücum açılarındaki salınımda taşıma katsayısının değişimi.	77
Şekil 4.47 : Bir periyotta farklı hücum açılarındaki etkin hücum açısının değişimi. ...	78
Şekil 4.48 : Hücum açısına bağlı olarak ortalama itki ve taşıma katsayılarının değişimi.	78
Şekil 4.49 : 4 farklı hücum açısı için bir periyottaki girdap görünümü.	80

PERİYODİK HAREKET YAPAN BİR KANAT PROFİLİNİN GİRDAP DİNAMİĞİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

ÖZET

Son zamanlarda geleceğin böcek veya kuş boyutlarında görev yapacak hava araçlarının araştırılması yoğunlaşmakta ve dolayısıyla çırpın kanat aerodinamiği konusu büyük bir ilgi toplamaktadır. Bu tezin amacı ileri uçuşta iki boyutlu çırpın bir NACA0012 kanat profili etrafındaki girdap mekanizmasını Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleriyle incelemektir.

Bu çalışmada, Reynolds sayısı 5000’de sıkıştırılmaz ve laminar akış şartlarında bir NACA 0012 kanat profiline düzgün yayılı (üniform) bir akım alanında sadece dalma ve bu hareketle beraber yunuslama hareketi verilmiştir. Çözümlerde indirgenmiş frekans, dalma ve yunuslama genlikleri, hücum açısı, faz farkı birbirinden bağımsız olarak değiştirilerek parametrik bir çalışma yapılmıştır. Sayısal çözücü olarak ticari bir yazılım olan ANSYS/FLUENT yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada, hücum ve firar kenarından başlayan, iz bölgesi boyunca gelişen girdap hareketleri ve bu hareketlerin kuvvet katsayıları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışmanın sonuçlarına geçilmeden önce doğrulama çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada ilk olarak, UDF ile FLUENT yazılımında verilen kanat ve ağ hareketi doğrulanmıştır. İkinci olarak doğru sonuçlara ulaşabilmek için 6 farklı çözüm ağı oluşturulmuş ve bu ağlardan en uygun olanı seçilmiştir. Ardından uygun zaman aralığının seçilmesine geçilmiştir ve akışın periyodik bir davranışa ulaştığı gösterilmiştir. Son olarak, literatürde deneysel ve sayısal sonucu bulunan benzer bir problem seçilen ağ ile çözülmüş ve kuvvet katsayıları ve girdap yapılarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Doğrulama çalışması sonrasında, hareketin genlik değişiminin etkisini tanımlamak ve hücum kenarı girdaplarının çıkış kuvvetlerini nasıl etkilediğini anlayabilmek için öncelikle sadece dalma hareketi için çözüm yapılmıştır. Bu bölümde, sabit bir k değeri için artan kh değerlerinde çözüm yapılmıştır. Reynolds sayısı 5000’de sabitlenmiş olup $k=2.5$ ve $h=0.2-0.7$ arasındaki değerlerde sadece dalma hareketi yapan bir kanat profili göz önüne alınmıştır.

Sonraki bölümde, çırpma genliği 0.5’ten daha büyük olduğu durumlarda kuvvet katsayıları ve girdap yapılarında periyodik olmayan bir davranış tespit edilmiş ve periyodik olmayan davranışın nedenleri araştırılmıştır ve nasıl periyodik hale getirilebileceği araştırılmıştır.

Son bölümde ise dalma ve yunuslama hareketini beraber yapan bir kanat profili etrafındaki girdap yapıları incelenmiş ve hücum açısının değişiminin etkileri

araştırılmıştır. Bu bölümde dalma ile yunuslama hareketi arasında iki farklı faz farkı olacak şekilde bir hareket mekanizması uygulanmıştır.

Bu çalışmalardan sonra sonuçların değerlendirmesine geçilmiş ve zet olarak her bölümde elde edilen sonuçlara tekrar değinilmiştir.

NUMERICAL ANALYSIS OF VORTEX DYNAMICS OF A PERIODICALLY OSCILLATING AIRFOIL

SUMMARY

Recently, investigation of future air vehicles serving in insect or bird sizes have increased so gather a great interest in flapping wing aerodynamics. Because of aroused interest in MAV, there are number of studies on flapping airfoils, and the generated thrust and lift. In nature, the flapping mechanism of a flying animal is a combination of pitching, plunging, and sweeping motions. Researchers carry out two dimensional analyses to understand the underlying physics of the flapping mechanisms before extending their study into the three dimensional analysis and the combined motion. The main objective of thesis is to investigate vortex dynamics around a two-dimensional NACA 0012 wing using Computational Fluid Dynamics (CFD) methods. The commercial code ANSYS / FLUENT is used to carry out the computations based on the Navier-Stokes equations.

This study is carried out under Reynolds number of 5000, incompressible and laminar flow conditions. Two different types of simple harmonic motion are considered for NACA 0012. While the first one consists of pure plunging motion, the second one is a combination of pitching and plunging motion. The pitching takes place about a pivot point at a quarter chord behind the leading edge. The reduced frequency, the plunge and pitch amplitudes, angle of attack, the phase difference are changed independently of each other thereby a parametric study is performed. Vortex formation shedding from the leading and trailing edges and developing throughout the wake region and their effects on force coefficients are investigated.

Validation study is carried out before proceeding to the results of the study. In this study, ANSYS / FLUENT which is a commercial software is used as a numerical solver. As the first step of the validation study, the movement of the mesh and airfoil given in FLUENT with UDF is confirmed. Secondly, grid independence study is carried out to achieve accurate results and reduce computational time. The six different mesh are generated and the best one is selected. Then, time-step refinement study is carried out. The appropriate time-step size selection is explained and is shown that the flow reaches a periodic behavior. Finally, a similar problem in the literature that has numerically and experimentally result is found to be solved by the mesh and is compared with this study.

After the validation study, in order to identify impact of change in the amplitude and in order to understand how leading edge vortices affect the output forces, primarily pure-plunging motion solution is performed. In this section, the solution at a fixed value of k is carried out for the increasing kh . The Reynolds number is fixed in 5000,

an airfoil profile is taken into account which makes pure-plunging at the values of $k = 2.5$ and $h = 0.2-0.7$.

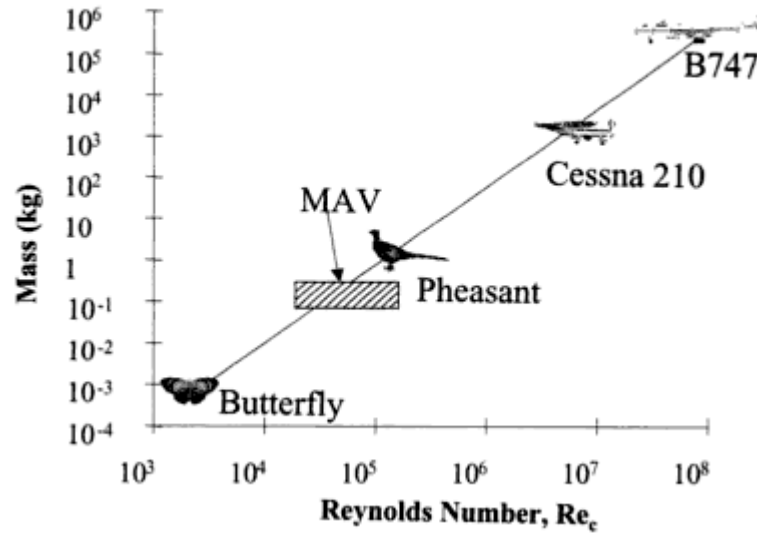
In the next section, aperiodic behavior has been determined in the state of amplitude is larger than about 0.5 and investigated the causes of non-periodic behavior. It is examined that how this movement make periodically.

In the final section, vortical structures around an airfoil making pure-plunging and pitching motions together are examined. Two different airfoil motion which has phase difference of 0° and 90° are considered here and its effects of change in angle of attack is investigated.

After all of the sections, the discussion of the results is performed. Plunging and pitching and plunging combined motion are compared with each other.

1. ÇIRPAN KANAT AERODİNAMİĞİNE GİRİŞ

Uçabilen canlılar yüzyıllardır insanoğlunun dikkatini çekmiş ve bunu gerçekleştirebilme hayali her yüzyılda insanların çeşitli çalışmalar yapmalarına vesile olmuştur. Milattan önceki tarihlerde mağara duvarlarına resmedilerek daha sonraları Leonardo da Vinci gibi çizimler yapılarak ya da Hezarfen Ahmet Çelebi gibi direk uçarak bu hayal gerçekleştirilmiştir. Günümüzde Wright kardeşlerin uçak yapmasıyla birlikte insanlar uçma hayalini gerçekleştirmiş fakat hala kuşlar ve böcekler kadar performanslı uçabilen bir hava aracı yapılamamıştır. Bunun yanında doğadan esinlenerek geliştirilen birçok sistem bulunmaktadır. Örnek olarak gemiler ve denizaltılarda türbinler, uçaklarda jet veya pervaneli motorlar, helikopterlerde rotorlar itki oluşturma sistemleri için sabit kanatlar ve helikopter rotorları taşıma oluşturma sistemleri için kullanılmaktadır. Araştırmacılar hala bu canlılar gibi itki ve taşıma üretebilen, havada asılı kalabilen ve onlar kadar hızlı manevra yapabilen araçlar üretmek için çalışmaktadırlar.



Şekil 1.1 : Uçan canlılar ve araçlar için Reynolds sayısı aralığı [1].

Çırpma hareketi kuşların, böceklerin ve yüzen canlıların hareket kabiliyetinin temel modelini oluşturmaktadır. Uçan ve yüzen canlılar doğaları gereği Reynolds sayısı 100 000'den daha düşük değerlerde uçmaktadırlar [1]. Bu canlılar etraflarını

çevreleyen akışkanlar ile kanatları veya kuyrukları arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak itki ve taşıma üretirler. Düşük Reynolds sayılarında geleneksel sabit kanatlar kısmen daha az taşıma ve oldukça fazla sürüklenme üretirler. Bununla birlikte büyük böcekler ve küçük kuşlar aynı düşük Reynolds sayılarında hem daha esnek hareketler hem de çırpınma itkisiyle daha yüksek taşımalara ulaşmaktadırlar. Uçan canlılar çırpma mekanizmalarıyla rotorlu araçların taşımalarını, sabit kanatlı araçların da itkisini birleştirirler ve böylece boyutlarına göre çok daha fazla ileri uçuş hızı sağlarlar. Bu karakteristikleri mikro hava araçları (MHA) için çırpınan kanatlı hayvanları oldukça çekici hale getirmektedir. Hatta Mars gibi düşük atmosfer yoğunluğuna sahip gezegenlerde ve benzeri uzay araştırmalarında da bu tür MHA'ların kullanılması düşünülmektedir [2].

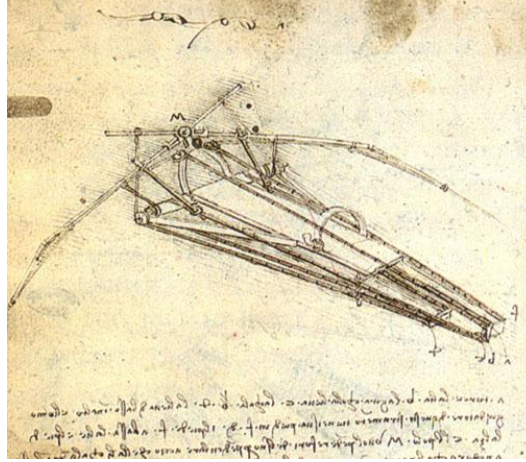
Geleneksel hava aracı tasarımları sabit kanatlar ile tutunma kaybı durumuna düşmeyen yani kanat üzerindeki akışta ayrılmama durumunu temel alır. Yukarıda saydığımız uçan canlıların doğal hareket mekanizmaları ise sabit kanatlı araçlara göre daha fazla taşıma ve itki oluşturan düşük basınç bölgeleri diye söyleyebileceğimiz firar ve hücum kenarlarından girdap ayrılmasına dayanmaktadır.

Bu tezin amacı; etkili itki üretimi için düşük Reynolds sayılı çırpınan kanat aerodinamiğini araştırmaktır. Akış şartlarını ve hareket mekanizmalarını daha iyi anlamak için hücum kenarı ve firar kenarı girdap yapı mekanizmaları, bu girdap yapılarının birbirleriyle ve kanat ile etkileşimi üzerinde durulmuştur ve nasıl itki ve taşıma artırılır, uçuş mekanizması nasıl daha da iyileştirilir soruları cevaplandırılmaya çalışılmıştır. Çalışmada 3 boyutlu hareket yerine rijit bir kanat profilinin 2 boyutlu hareket mekanizması üzerinde çalışılmıştır. Çünkü akışın daimi olmaması nedeniyle ve akım ayrılması, girdap kayması ve iz bölgesinde girdap gelişmesinin izlenmesi 3 boyutlulukta eklenirse çok daha zor olacaktı. Ayrıca doğada birçok böcek ve memeli deniz hayvanlarında yaklaşık olarak 2 boyutta hareket mekanizması görülmektedir. Birçok gerçekleştirilmiş MHA uygulamalarında da, özellikle itki için 2 boyutlu hareket kullanılmaktadır [3-4].

1.1. Çırpınan Kanatlı Araçların Tarihi

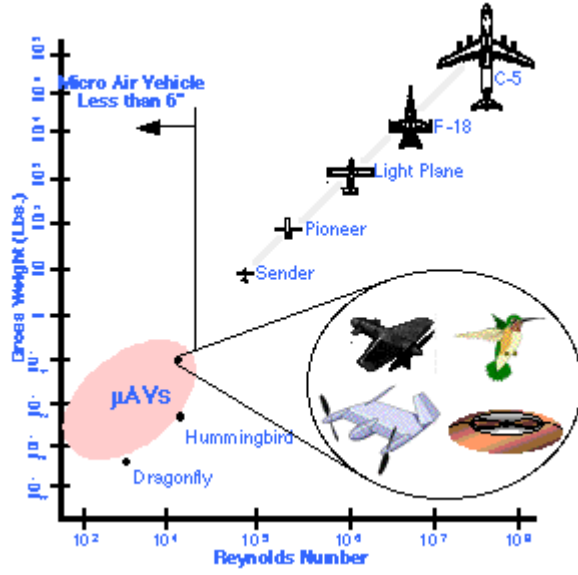
Çırpınan kanatlı hava araçlarının düşünülmesi insanoğlunun uçuş hayalinden dolayı çok daha eski tarihlere, antik çağa kadar dayanmaktadır. Antik çağı araştıran taş oymacıları milattan önce en az 3000 senesinde Tanrıyı tasvir etmek amacıyla

ornithopter veya chariot şeklinde kanatlı yapılara rastlandığını söylemektedirler [5]. Daha yakın tarihlerde ise Leonardo da Vinci'nin 1500'lerde uçan kuşlardan esinlenerek tasarlamış olduğu ornithopter gösterilebilir. Ornithopter kelimesi yunanca olup *ornithos* "kuş" *pteron* "kanat" kelimelerinden meydana gelen günümüzde kanat çırparak uçan hava araçlarına denmektedir [6].



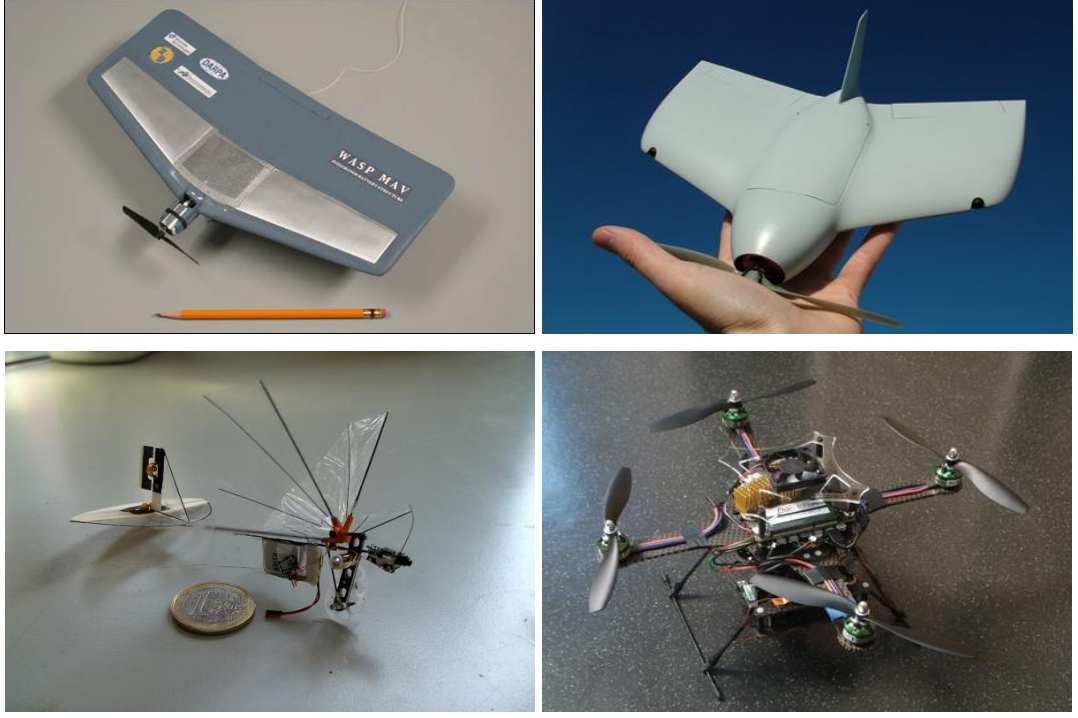
Şekil 1.2 : Leonardo da Vinci'nin ornithopter tasarımı [6].

Geçmişte hayal edilmiş fakat gerçekleştirilemeyen en önemli teknolojik tasarımlardan birisi de Mikro Hava Araçları'dır. Amerika Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) 1997 senesinde küçük hava araçları için bir sınıf tanımlamış ve en uzak iki noktası arasındaki mesafe 15 cm'den büyük olmayacak ağırlığı 100 gr'dan daha az böcekler kadar küçük ölçekteki araçlara MHA demiştir. MHA'lar yavaş uçuşları ve havada asılı kalma özelliklerinden dolayı bina içi uçuşlarda görüntü kaydedip görüntünün gerçek zamanlı aktarımı, canlıların giremeyeceği veya tehlikeli bölgelerde sivil araması, kurtarma operasyonları gibi günümüzde potansiyel birçok askerî ve sivil uygulama alanlarına sahiptir. Mikro hava araçları, varolan hava araçlarına göre çok daha düşük Reynolds sayılarında uçmaktadırlar. Bu Reynolds sayıları doğadaki uçan kuşların ve böceklerin uçtukları aralığa karşılık gelmektedir [7].



Şekil 1.3 : Varolan hava araçlarına göre MHA'nın uçuş rejimi [7].

Mikro hava araçları genel olarak 3 farklı kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar; sabit, döner ve çırpın kanatlı MHA'dır. Şekil 1.4'te günümüzde yapılan MHA çeşitlerinden örnekler gösterilmiştir. Her üç sınıfın birbirine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Sabit kanatlı MHA'lar uzun süreli uçuşları ekonomik bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Ancak manevra kabiliyeti düşük ve askıda yani aynı dikey pozisyonda duramamaktadır. Ayrıca kanatlar üzerindeki akım ayrılmalarından dolayı düşük hücum açılarında tutunma kaybına girme olasılıkları fazladır. Döner kanatlı MHA ise her yönde hareket kabiliyetine sahiptir. Askıda kalma pozisyonunu rahat bir şekilde sağlarken taşıma üretmek için harcadığı güç açısından düşük verime sahiptir. Ayrıca bu tür MHA'lar yüksek titreşime sahiptir. Çırpın kanatlı MHA'lar ise kanat çırpma hareketiyle hem havada asılı kalabilir hem de ileri uçuş modunu rahatlıkla gerçekleştirebilmektedir. Diğer MAV türlerine göre daha verimli ve ekonomik bir uçuş sağlayabilirken hareket mekanizması oldukça karmaşıktır. Bu yüzden de günümüzde çırpın kanatlı MHA'lar son derece popüler bir araştırma konusudur.



Şekil 1.4 : Sabit, döner ve çırpın kanatlı MHA örnekleri [8][9][10][11].

Kanat çırpma hareketini anlamak üzere kuşlar ve böcekler üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmış ve hala da yapılmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak iki sınıf halinde incelenebilir. İleri uçuş modu ve havada asılı kalma modu. Havada asılı kalma modu, gerçekleştirilmesi en zor uçuşlardan biridir. Bu uçuşun başlıca amacı havada ağırlığını dengeleyebilecek dikey yönde bir kuvvet üretmektir. Ayrıca, havada asılı kalma pozisyonu için kanatların eylemsizlik momenti, boyutları, kanat hareketlerinin serbestlik derecesi ve hatta en önemli çalışmalardan biri olan kanat geometrisi ve performansa katkısı gibi konular da önem kazanmaktadır. Bu sınırlandırmalardan dolayı havada asılı konumda kalabilen kuş ve böcek sayısı da azdır. Çoğunlukla bazı böcek türleri ve arı kuşu gibi küçük kuşlar havada asılı kalma modunu gerçekleştirebilmektedir. İleri uçuş modu ise böceklere göre nisbeten daha büyük olan kuşlarda görülen süzülme ve kanat çırparak yol alma hareketidir. Biz konumuz gereği havada asılı kalma modu üzerinde konuşmayıp daha çok ileri uçuş moduyla ilgileneceğiz.

1950'lere kadar yapılan çalışmalar daimi olmayan akışlardaki (unsteady) kuvvet üretimi için hayati olan girdap mekanizmalarını anlamaya yönelik olmamıştır. Uçan hayvanların hareket kabiliyetinin inceleyen bio akışkanlar dinamiğinde öncü çalışma olarak Weis-Fogh ve Jensen [12] ve Lighthill [13] 'in yapmış olduğu çalışmalar

gösterilebilir. Bu tarihlerden önceki yapılan çalışmalar Lighthill [14], Maxworthy [15], Ellington [16] ve Spedding [17] çalışmalarında bulunabilir.

Genel itibariyle yüzen ve uçan canlılar kanatlarını belirli bir frekansta çırpılmaktadırlar. Bu çırpma miktarı canlı türleri arasında hatta kendi türleri içerisinde de farklılık göstermektedir. Bu farklılık rastlantısal bir durum değildir, bu yüzden birçok araştırmacı uçan canlıların hareket mekanizmalarını incelemektedir. Kabaca sınıflandırmak istersek; büyük kuşlar ve balıklar daha düşük frekanslı uçuş rejimine sahip iken daha küçük boyuttakiler daha yüksek frekanslı uçuş rejimine sahiptir. Bu çalışmada kuş boyutlarındaki canlıları temel alınacak ve onların uçuş frekansına göre Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümü gerçekleştirilecektir.

1.2. Çırpan Kanat Aerodinamiği ve Hareketin Kinematiği

1.2.1. Çırpma hareketinin kinematiği

Çırpma hareketi ya sadece dalma hareketi ya da dalma hareketiyle birlikte bir nokta (pivot) etrafında dönme hareketini içeren yunuslama hareketinin beraber yapılması olarak tarif edilir. Dalma hareketini (aşağı-yukarı salınım) tanımlamak istersek; kanat profilinin hücum açısında herhangi bir değişiklik olmadan gelen akışa dik yönde hareket etmesidir diyebiliriz. Aynı şekilde yunuslama hareketi ise belirlenen bir noktaya (pivot) göre kanat profilinin dönme hareketi yapmasıdır. Bu çalışmada yunuslama hareketi için pivot noktası, dönme merkezi, olarak çeyrek veter uzunluğu seçilmiştir. Ancak gerçek harekete uygun olmamakla birlikte hücum kenarı girdabının incelenmesi için dönme merkezi olarak 0 ve 1 veter uzunlukları da kullanılmıştır.

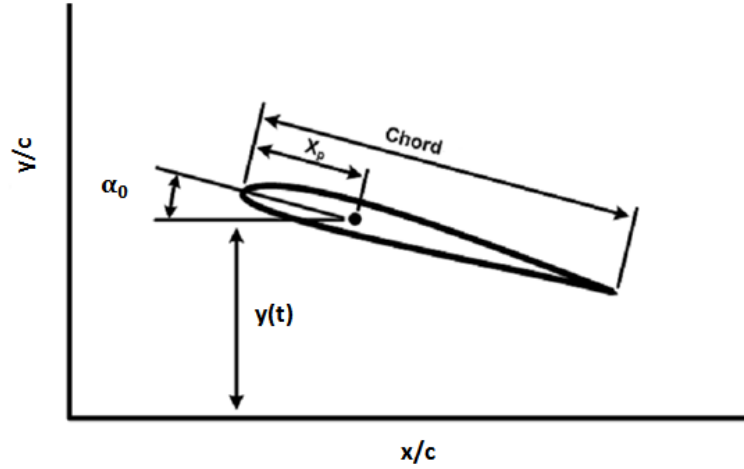
Sadece dalma hareketinin yapıldığı çırpma hareketinde kanat profilinin dikey yönde yer değiştirmesi, denklem 1'deki formülle elde edilmiştir.

$$y(t) = y_a \sin(2\pi f t) \quad (1.1)$$

Buradaki y_a boyutsuz dalma genliğini, f dalma frekansını, y ise kanat profilinin anlık pozisyonunu ifade etmektedir. Yunuslama hareketiyle birlikte yapılan hareket için yunuslama açısı

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_a \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (1.2)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Buradaki α_0 ilk dönme açısını, α_a yunuslama genliğini, φ ise dalma ile yunuslama hareketi arasındaki faz farkını göstermektedir.



Şekil 1.5 : Kanat profili hareket şeması.

Yukarıdaki tanımlanan yer değiştirme mesafesi (y) ve yunuslama açısının (α) türevleri yani hızları elde edilmiş ve bu hız değerleri kanat profilinin hareketi için sayısal çözümü yapacak olan FLUENT programına Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (UDF) olarak girilmiştir. Böylece hem öteleme hareketi hem de dönme hareketini içeren hareket tanımlanmış olmaktadır.

1.2.2. Çırpma hareketinin kritik parametreleri

Düşük Reynolds sayılarındaki çırpma kanatlı uçuşların aerodinamiği henüz tam olarak anlaşılmamış ve nasıl itki üretildiği de tam olarak açık değildir [18]. Çırpma kanatlı uçuşlarda akış alanını yöneten parametreleri belirlemek zor olduğundan açısal genlik, frekans, faz kayması gibi bazı parametreler tanımlanır. Bu nedenle bu çalışmada temel hareket mekanizmaları üzerinde durulmuştur.

Ellington'un araştırmalarında [16] sanki daimi analizler böceklerin ağırlığını karşılayabilmek için gerekli aerodinamik kuvvetin tahmin edilmesinde önemli ölçüde eksik kaldığı görülmüştür. Daha sonraki çırpma kanat araştırmalarında kanat hareketinden kaynaklanan daimi olmayan aerodinamik mekanizmanın anlaşılmasına odaklanılmıştır [19]. Daimi olmayan akış tipinde çırpma kanat aerodinamiğini daha iyi anlayabilmek için bazı boyutsuz parametreler kullanılır. Bu boyutsuz parametrelerin başlıcaları Reynolds sayısı, Strouhal sayısı ve İndirgenmiş Frekans olarak gösterilebilir.

Boyutsuzlaştırılmış akış parametreleri aynı dinamik şartlar altındaki analitik, deneysel, sayısal çalışmalarda, farklı ölçeklerdeki modellerde veya farklı birimlerle yapılan sonuçların karşılaştırılmasına olanak sağlar [20]. Böylelikle ölçek ve birim etkisi ihmal edilmiş olur. Boyutsuz parametreler basınç, sürüklenme ve itki katsayıları gibi çoğunlukla akışkanlar dinamiğinde kullanılmaktadır. Navier-Stokes denklemlerinin boyutsuzlaştırılmasında Mach sayısı ve Reynolds sayısı ön plana çıkar.

1.2.2.1. Mach sayısı

Serbest akım Mach sayısı, serbest akım hızıyla ses hızının oranıyla ifade edilmektedir.

$$M_{\infty} = \frac{V_{\infty}}{a_{\infty}}, \quad a_{\infty} = \sqrt{\gamma R T_{\infty}} \quad (1.3)$$

Burada γ akışkanın özgül ısılarının oranını, R gaz sabiti, T akışkanın sıcaklığını ifade etmektedir. Mach sayısı akış rejiminin karakteristiği ve sıkıştırılabilirliğin etkisinin belirlenmesinde kullanılır. Bu çalışmada uygulanan MHA şartları büyük çaplı hava araçlarına nispeten daha düşük bir seyir hızına sahiptir. Yoğunluk değişiminin ihmal edilebilmesi için Mach sayısı 0.3'den küçük olmalıdır. Yapacağımız çalışmada serbest akım hızı çok düşük olduğundan Mach sayısı oldukça düşüktür. Dolayısıyla yoğunluk değişimi söz konusu değildir.

1.2.2.2. Reynolds sayısı

Diğer bir boyutsuz sayı olan Reynolds sayısı viskoz kuvvetlerle atalet kuvvetlerinin oranıdır. Genel olarak Reynolds sayısı aşağıdaki şekilde tarif edilir:

$$Re = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{U_{ref} L_{ref}}{\nu} \quad (1.4)$$

Burada U_{ref} , L_{ref} , ν sırasıyla referans hız, referans uzunluk ve kinematik viskoziteyi göstermektedir. Çırpan kanatlı uçuşlarda 2 farklı uçuş modu söz konusu olduğundan Reynolds sayısı farklı şekillerde tanımlanmaktadır. İlk olarak bu çalışmada da incelenecek olan ileri uçuş modu gösterilmiştir. İleri uçuş modunda Reynolds sayısı şu hali almaktadır:

$$Re = \frac{\rho_{\infty} U_{\infty} c}{\mu} \quad (1.5)$$

Her iki uçuş modunda da referans uzunluk olarak ortalama veter uzunluğunu alınmaktadır. Referans hız asılma ve ileri uçuş modunda farklı şekillerde tanımlanır. İleri uçuş modunda 2 ve 3 boyutlu uygulamaların her ikisi içinde referans hız olarak ise ileri uçuş hızı kullanılmaktadır. ρ_{∞} ve μ sırasıyla serbest akım yoğunluğu ve akışkanın dinamik viskozitesini göstermektedir.

Asılı kalma durumunda ise referans hızı olarak ortalama kanat ucu hızı kullanılabilir. 2 boyutlu çırpınan bir kanat için ortalama kanat ucu hızı $U_{ref} = \omega h_a$ yazılabilir. Burada ω kanadın ortalama açısal hızı h_a ise dalma genliğidir. ω yerine de $2\pi f$ yazarsak Reynolds sayısı şu hali alır:

$$Re_{f2} = \frac{2\pi f h_a c}{\nu} \quad (1.6)$$

Burada asılı kalma durumunda 3 boyutlu kanat için alınması gereken Re sayısı incelenmemiştir. Bunun için Dickinson [21] ve Ellington [22] makaleleri incelenebilir. Bu çalışmada 2 boyutlu ve ileri uçuş durumu göz önüne alınacaktır.

MHA'lar düşük uçuş hızlara sahip olduğundan viskoz kuvvetler daha baskındır. Bu akışlara düşük Reynolds sayılı akışlar denmektedir. Modellerin karşılaştırılması için sadece boyutsal benzerliğin yanında akışkanın özelliklerinin de benzer olması gereklidir. Bu benzerlik viskoz bir akışkan için basınç kuvvetleriyle viskoz kuvvetlerin dengeli olması şeklinde ifade edilmektedir. Akışkanın dinamik benzerliği; söylenen dengeden dolayı Reynolds sayılarının eşit olması sonucunu oluşturmaktadır. Benzer çalışmalarla karşılaştırmaların yapılabilmesi için modeller arasındaki geometrik ve Re benzerlik sağlanması yeterlidir.

1.2.2.3. Strouhal sayısı ve indirgenmiş frekans

Çırpan kanatların daimi olmayan aerodinamik karakteristiğini ortaya koyan diğer bir önemli boyutsuz parametre de indirgenmiş frekanstır. Bu boyutsuz sayıyı ilk olarak Birnbaum [23] şu şekilde tanımlamıştır:

$$k = \frac{2\pi f c}{U_{\infty}} \quad (1.7)$$

$$k = \frac{2\pi f L_{ref}}{2U_{ref}} \quad (1.8)$$

Reynolds sayısında olduğu gibi indirgenmiş frekans da 2 uçuş modu için farklılık gösterir. İleri uçuş durumu için L_{ref} olarak ortalama veter uzunluğu U_{ref} içinse ileri uçuş hızı alınır. Bu şekilde denklem düzenlenirse;

$$k = \frac{\pi f c_m}{U} \quad (1.9)$$

olur. 3 boyutlu kanat için havada asılı kalma durumunda ileri uçuş hızı olmadığından referans hız olarak ortalama kanat ucu hızı alınmaktadır. Buna göre denklem tekrar düzenlenirse;

$$k = \frac{\pi f c_m}{U_{ref}} = \frac{\pi c_m}{2\Phi R} = \frac{\pi}{\Phi AR} \quad c_m = \frac{2R}{AR} \quad (1.10)$$

indirgenmiş frekans son olarak yukarıdaki şekilde tanımlanır. Özel bir durum olarak 2 boyutlu bir kanadın asılma durumunda referans hızı olarak Reynolds sayısında olduğu gibi maksimum çırpınma hızı alınır. Böylece 2 boyutlu durumda indirgenmiş frekans aşağıdaki şekilde tanımlanır.

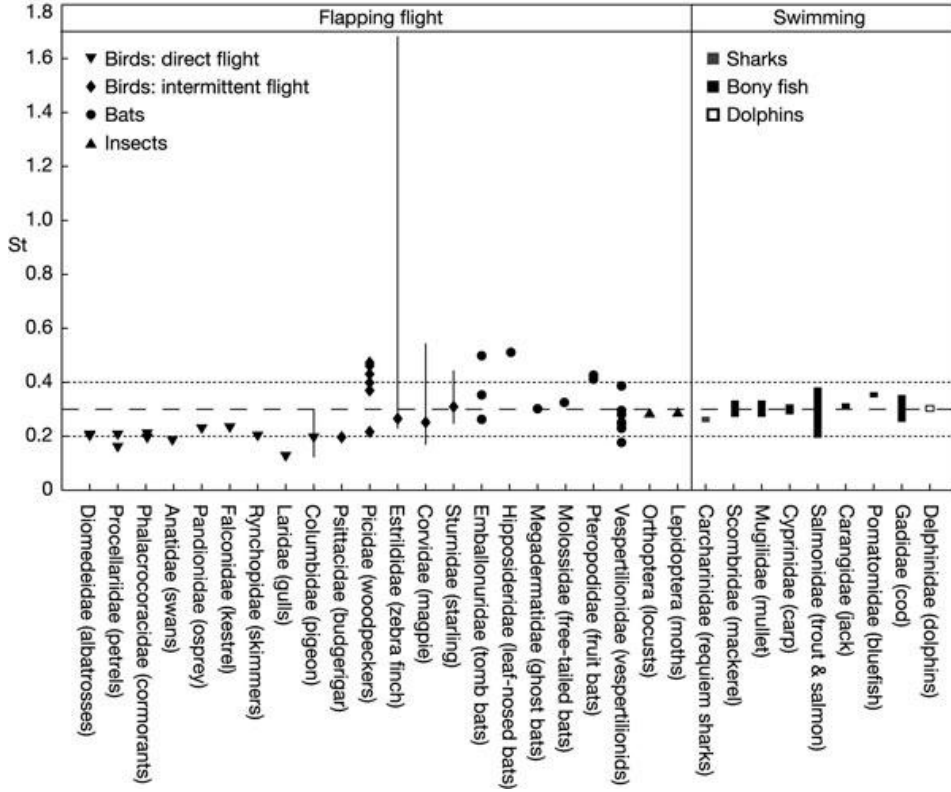
$$k = \frac{\pi f c_m}{U_{ref}} = \frac{c_m}{2h_a} \quad (1.11)$$

Strouhal sayısı ise çırpın kanatlı çalışmalarda girdap dinamiği ve girdap kayma davranış karakteristiğinin anlaşılmasında iyi bilinen bir boyutsuz sayıdır. Çırpın kanatlı uçuşlarda Strouhal sayısı daimi olmayan sistemler arasındaki dinamik benzerliği ifade eder ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$St = \frac{f L_{ref}}{U_{ref}} = \frac{f A}{U_{\infty}} \quad (1.12)$$

Burada f çırpınma frekansını, A çırpınma hareketinin genliğini ve U 'da serbest akım hızıdır. Yukarıdaki denklemde görüldüğü üzere Strouhal sayısı çırpınma hızıyla (fA) ileri uçuş hızının oranıdır. Referans uzunluğu olarak veter uzunluğu yerine iz bölgesinin genişliği kullanılırken referans hız olarak ise ileri uçuş hızı alınmaktadır. Strouhal sayısı uçan ve yüzen hayvanların uçuş verimi hakkında önemli bilgiler

verdiği anlaşılmış ve uçan ve yüzen hayvanlar üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Taylor'un yaptığı çalışmada 42 farklı canlı türünü incelemiş ve uçan ve yüzen hayvanların Strouhal sayısının 0.2 ile 0.4 arasında kaldığını ortaya koymuştur. Şekil 1.6'da Taylor'un ortaya çıkardığı Strouhal sayısı aralığı gösterilmektedir [24]

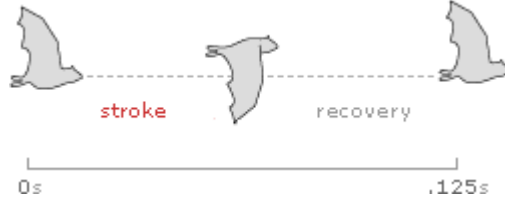


Şekil 1.6 : Yüzen ve uçan hayvanların Strouhal sayısı aralığı [24].

Bu aralık en verimli uçucu ve yüzücülerin canlılar olduğu gerçeğine dayanarak tasarlanan araçlarında bu aralıkta uçuş yapmalarının en verimli uçuş olacağını göstermektedir.

Strouhal sayısını daha iyi anlayabilmek için çırpma frekansı ve genliğinden bahsedersek;

Çırpan kanatlı canlılar için frekans bir saniye içerisindeki kanat çırpma miktarıdır. Kanat çırpması ise kanadın 1 kez aşağı ve yukarı çırpma yapıp başlangıç pozisyonuna gelmesi yani bir tam periyot kadardır. Örneğin “*Taphozous georgianus*” yarasa türü normal bir seyir hızında uçarken her bir saniyede ortalama 8 kez kanat çırpar, Şekil 1.7. Yani ortalama her 0.125 saniyede 1 kez yukarı aşağı kanat çırpmasını tamamlar [25].



Şekil 1.7 : “*Taphozous georgianus*” yarasası türünün kanat çırpma süresi [25].

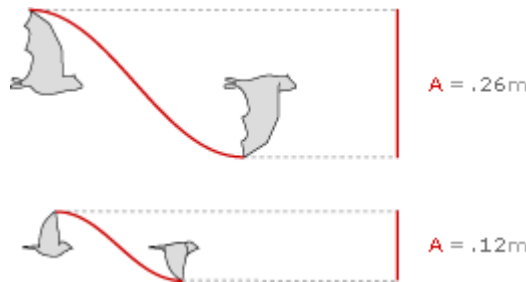
Çırpınma frekansı daha yüksek olan “*Taeniopygia guttata*” kuş ise her bir saniyede 26.9 kez kanat çırpır. Bu da aynı zaman diliminde “*Taphozous georgianus*” yarasaya göre yaklaşık 3.5 kat daha fazla demektir. Şekil 1.8’de “*Taeniopygia guttata*” kuşun 0.125 s’lik dilimindeki kanat çırpınması şematize edilmiştir.



Şekil 1.8 : “*Taeniopygia guttata*” kuşun 0.125 s’lik dilimindeki kanat çırpma süresi [25].

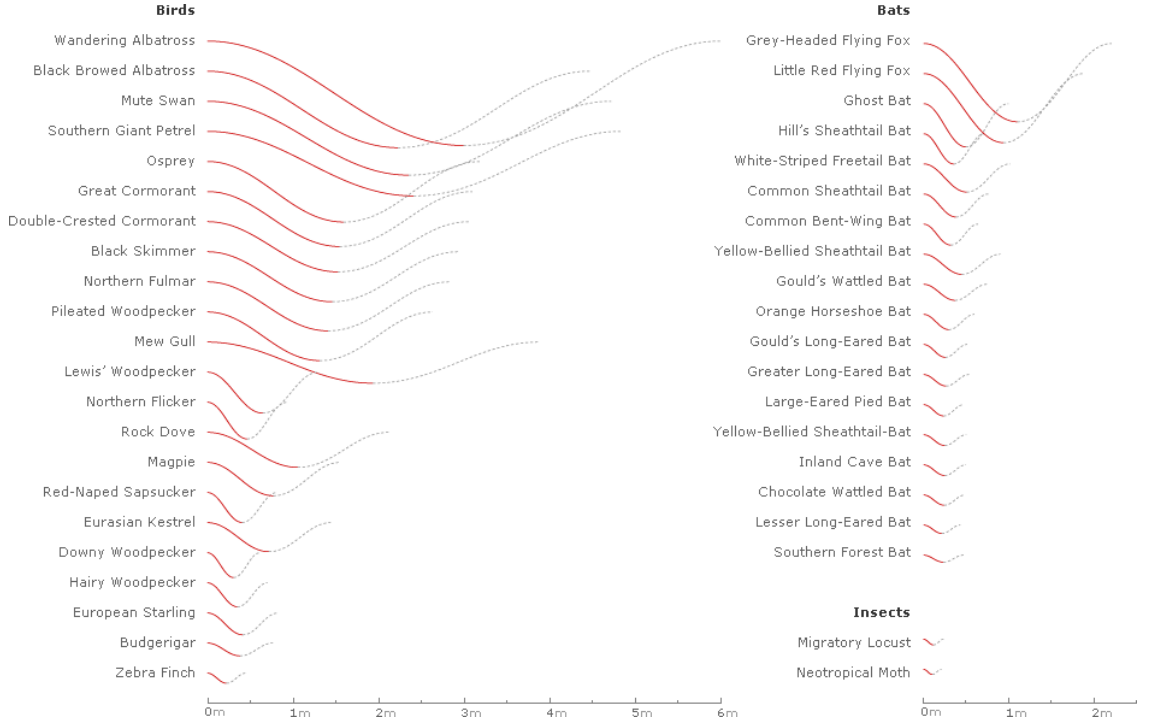
1.2.2.4. Genlik

Genlik uçan canlının kanadını çırparken kanat ucunun aşağı ve yukarı yön arasında (dikey yönde) kalan maksimum mesafedir. Genliğin daha iyi anlaşılması için Şekil 1.9’da “*Taeniopygia guttata*” kuş ile “*Taphozous georgianus*” yarasanın genlik karşılaştırmaları gösterilmiştir.



Şekil 1.9 : “*Taeniopygia guttata*” kuş ile “*Taphozous georgianus*” yarasanın genlik karşılaştırmaları [25].

Farklı türlerin farklı genliklere sahip olduğu ve bunun seyir hızı ve çırpma frekansı üzerinde büyük bir etkisini ortaya koyan Taylor’un doğada bulunan 42 farklı tür için yapmış olduğu genlik çalışması Şekil 1.10’da gösterilmiştir.



Şekil 1.10 : Doğada bulunan 42 farklı türün genlik karşılaştırması [24].

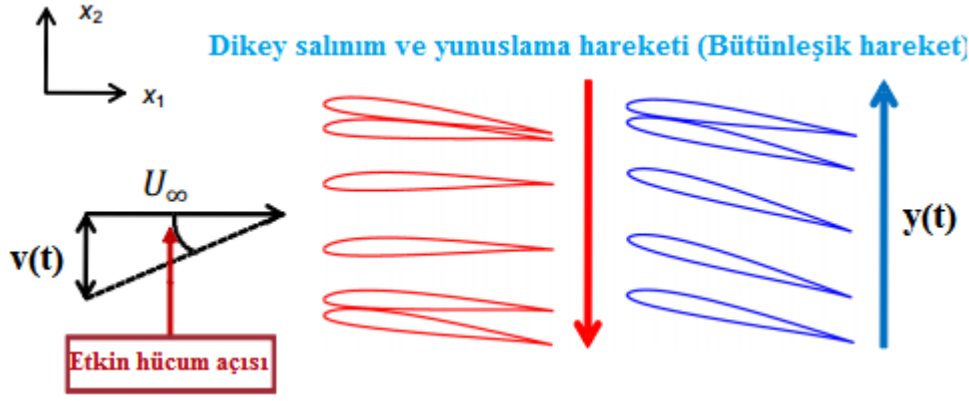
Dalma hareketi düşünüldüğünde boyutsuz dalma genliği aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$h = \frac{a}{c} \quad (1.13)$$

Bu çalışmada yoğun olarak indirgenmiş frekans ile genlik değerinin çarpımı yani kh değeri ile değerlendirmeler yapılacaktır. kh çarpımı maksimum boyutsuz çırpma hızını ifade etmektedir.

1.2.2.5. Etkin hücum açısı

Hücum açısı kanat profilinin gelen akımla arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada kanat profiline dikey ve yunuslama salınım hareketleri verildiğinden hücum açısı hesaplanırken kanat hareketinin etkisi de hesaba katılmalıdır. Bu yüzden Şekil 1.11’de görülen serbest akım ile kanat hareketinin bileşkesi alınır ve bu bileşke hız ile kanat profili arasındaki açı hesaplanır. Bu açıya etkin hücum açısı denmektedir ve Denklem 1.14’de nasıl hesaplanacağı gösterilmiştir.



Şekil 1.11 : Bütünleşik harekette etkin hücum açısı.

$$\begin{aligned}\alpha_e &= \theta(t) + \tan^{-1} \left(-\frac{\dot{y}}{U_\infty} \right) \\ &= \theta_0 \cos(\omega t + \phi_\theta) + \tan^{-1} \left(-\frac{h\omega c \sin(\omega t + \phi_y)}{U_\infty} \right)\end{aligned}\quad (1.14)$$

Burada $\dot{y}$ profilinin dikey yöndeki hızını, U_∞ serbest akım hızını, c profilin veter uzunluğunu, α_e etkin hücum açısını, ϕ faz farkını, h dalma genliğini ifade etmektedir.

1.3. Aerodinamik Katsayılar

1.3.1. İtke, taşıma ve momentum katsayısı

Bir kanat yüzeyi üzerine etkiyen yerel basınç ve kayma gerilmelerinin toplamı kanadın üzerine etkiyen kuvveti ve bir noktaya göre de momenti oluşturmaktadır. Kanat üzerinde meydana gelen kuvvet basınç ve sürtünme kuvveti denilen iki bileşenden meydana gelmektedir. Bu kuvvetler boyutsuz olarak sürüklenme(C_d), taşıma(C_l) ve moment(C_m) katsayısı şeklinde ifade edilir ve denklem 1.15-17'de formül şeklinde gösterilmiştir.

$$C_d = \frac{D}{0.5A\rho_\infty V_\infty^2} \quad (1.15)$$

$$C_l = \frac{L}{0.5A\rho_\infty V_\infty^2} \quad (1.16)$$

$$C_m = \frac{M}{0.5A\rho_\infty V_\infty^2} \quad (1.17)$$

Aerodinamik katsayılar Navier Stokes denklemlerini çözen çözücüler tarafından zamana bağlı olarak hesaplanır ve kaydedilir. Bu yüzden aerodinamik katsayıların hesaplanması ayrıntılı bir şekilde anlatılmamıştır.

Bu çalışmada birçok çalışmada da kullanılan zamana göre ortalama itki katsayısı, $C_{t,ort}$ ortalama güç katsayısı $C_{p,ort}$ dikkate alınacaktır [26-28].

$$C_{t,ort} = -\frac{1}{T} \int_t^{t+T} C_d(t) dt \quad (1.18)$$

$$C_{p,ort} = -\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left[\frac{C_l(t)\dot{y}(t)}{c} + C_m(t)\dot{\theta}(t) \right] dt \quad (1.19)$$

Yukarıdaki denklemlerde T, bir çırpma periyodunun süresidir. C_d ve C_l , sırasıyla sürüklenme ve taşıma katsayılarıdır. C_m , yunuslama merkezine göre hesaplanan yunuslama momenti katsayısıdır. $\dot{y}$, kanat kesitinin dalma hızı iken, $\dot{\theta}$, kanat kesitinin yunuslama hareketinden dolayı oluşan açısal hızdır.

Bu çalışmada kanat profilinin sadece dalma hareketi yaptığı durumlarda, Denklem 1.19'da görünen *açısal hız* 0'dır. Dolayısıyla ortalama güç katsayısı denklemi şu hali almaktadır.

$$C_{p,ort} = -\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left[\frac{C_l(t)\dot{y}(t)}{c} \right] dt \quad (1.20)$$

Çırpan kanatlı araç çalışmalarının en önemli amaçlarından birisi ileriye doğru hareketi sağlayacak itki kuvvetinin elde edilmesidir. Bu yüzden sürüklemeyi minimuma indirilmek kanat profilinin verimliliği için çok önemlidir.

1.3.2. İtki verimi

Bir çırpan kanatlı MHA'nın verimi sadece ürettiği itkiye bağlı değildir. Aynı zamanda o itkiyi üretebilmek için harcadığı güç de önemlidir. Bu yüzden optimum bir tasarımın yapılmasında itki verimi önemli performans parametrelerinden birisidir. İtki verimi, η giriş gücün çıkış güce oranı diye tanımlanır [28]. Burada giriş gücü

kanat profilinin zamana bağı olarak gerçekleştiği işe, çıkış gücü ise itkiyi üretmek için harcanan güce karşılık gelmektedir. Buna göre boyutsuz ifadeler kullanılarak itki verimi ortalama itki katsayısının ortalama güç katsayısına oranı denilebilir.

$$\eta = \frac{C_{t,ort}}{C_{p,ort}} \quad (1.21)$$

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde ilk önce itki üretiminin nasıl gerçekleştiğinden bahsedilecek. Ardından literatürde bulunan sadece dalma, sadece yunuslama ve her iki hareketin beraber yapıldığı analitik, deneysel veya hesaplamalı olarak yapılmış çalışmalar incelenecektir. Bu bölümlerde çırpın kanatlarda itki ve taşıma katsayıları, itki verimi ve bu değerler üzerinde etkili olan akış ve hareket parametreleri incelenecek ve itki ile iz bölgesi arasındaki ilişki, hücum ve firar kenarı girdap yapıları hakkında literatürdeki çalışmalar gözden geçirilecektir.

2.1. İtki Üretimi Meydana Getiren Girdap Mekanizmaları

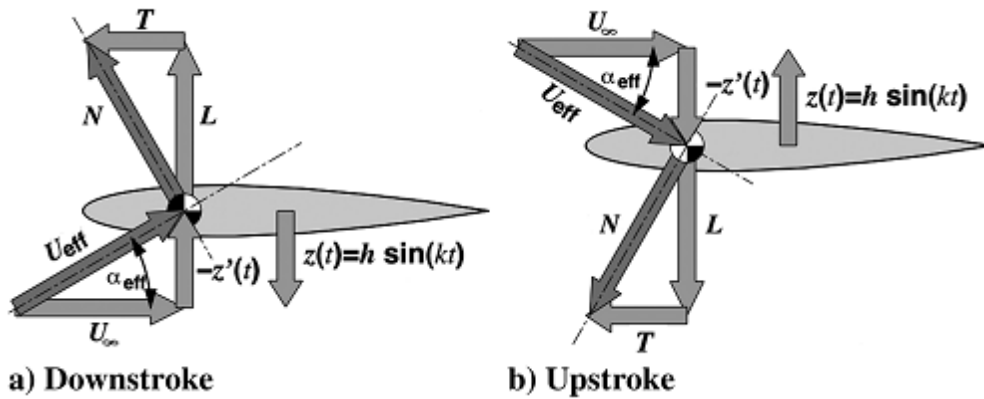
Hareketli kanat aerodinamiği büyük oranda girdap dinamiğinden ve onun kanat profiliyle olan etkileşiminden etkilenmektedir. Girdabın büyüklüğü ve kayması, iz bölgesi şeklinin nasıl olduğu sabit bir kanat profiliyle kıyaslandığında daha fazla taşıma üretimi sağlamaktadır. Hareketli profillerdeki bu taşıma ve itki üretimi girdap dinamiğini anlama ve etkisini görme açısından birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir.

Kuşların ve böceklerin uçuş mekanizmaları üzerinde yapılan ilk çalışmalar sabit kanatlı hava araçları için kullanılan sanki daimi aerodinamik kabullere dayanıyordu. Bu şekilde kanat üzerindeki kuvvet kanat hareketine göre değişiyor fakat kuvvet sadece sabit bir kanat için anlık hücum açısından belirleniyor, kanadın daha önceki hareketinin etkisi hesaba katılmıyordu ve bu canlıların ürettikleri itki ve taşıma hesaplanamıyordu. Bu nedenle bilim dünyasında şu şekilde bir özlü söz konuşuluyordu: “Bir yaban arısı aerodinamik yasalarına göre uçamaz” (A bumblebee can't fly according to the laws of aerodynamics) [29]. Bu sözün söylenmesinin temel nedeni sanki daimi aerodinamiğin çırpın kanatlı uçuşları açıklamada yetersiz oluşuydu. Wang 2000 yılında bunu şu şekilde açıklamıştır: “Sanki-daimi aerodinamik yüksek Reynolds sayılarında (10^5 veya üzeri) yeterli olabilirken, düşük Reynolds sayılarında (10^4 ve altı) sanki-daimi aerodinamik yeterli değildir.” [30]. Kuşlar ve böceklerin uçtuğu düşük Reynolds sayılarında girdap dinamiği ve daimi

olmayan aerodinamik etkilerin çok önemli olduğu ve aerodinamik kuvvetlerin hesabında dikkate alınması gerektiği daha sonraları anlaşılmıştır [31].

Sıkıştırılmaz ve viskoz olmayan potansiyel bir akışta dalma ve yunuslama hareketi yapan 2 boyutlu bir kanat profili düşünelim. Kanat profilinin hücum açısı salınım boyunca değişecek ve kanat tarafından taşıma üretilip, kanat sınırları boyunca oluşan girdaplar da değişecektir. Kelvin Teoremine göre, akış alanındaki toplam girdap miktarı zamanla sabit kalmalıdır, yani girdaplar değişiyorsa zıt işaretli eş büyüklükte girdaplar oluşmalı ve iz bölgesi içerisinde kanat profilinden kaymalıdır. Böylece oluşan girdaplar sürekli bir tabaka şeklini alacaktır. Eğer kanat profilinin hareketi periyodik ise beklenildiği üzere iz bölgesindeki girdap değişimi de periyodik olacaktır. Genelde girdap tabakasının büyüklüğünün değişimi, pozitif ve negatif yönlerde dönen girdapların birleşim bölgeleri ve kendi indüklenmiş hızlarıyla bağlantılı olarak gelişecektir [32]. Böylece salınım yapan bir kanat profilinin iz bölgesinde pozitif ve negatif işaretli girdap dizisi görmeyi beklemekteyiz. Kanat profilinin iz bölgesinde meydana gelen bu girdap yapılarının itki meydana gelmesinde önemli bir etkisi olduğu birçok araştırmacı tarafından söylenmiştir.

Bu konuda ilk olarak, Knoller [33] ve Betz [34] sırasıyla 1909 ve 1912 yıllarında etkili bir hücum açısında çırpan bir kanadın hem itki hem de taşıma bileşeni olan aerodinamik bir kuvvet ürettiğini gözlemlediler. Knoller ve Betz'in bahsettiği taşıma ve itki bileşenlerinden meydana gelen aerodinamik kuvvet, N Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Buna göre kanadın çırpınma hareketinin sonucu hem aşağı hem de yukarı hareket boyunca pozitif bir itki bileşeni meydana gelmektedir [35].

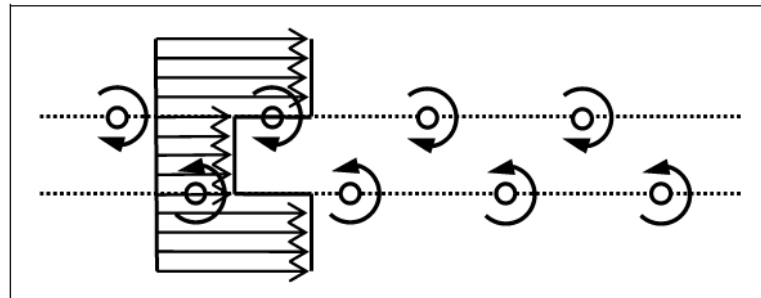


Şekil 2.1 : Çırpan kanattan elde edilen itkinin ilk teorik açıklaması Knoller ve Betz [35].

1921 yılında Katzmayr salınım yapan bir akış alanı içerisine sabit bir kanat yerleştirerek bir dizi deney yaptı ve ilk kez deneysel olarak hareket eden bir kanat etrafında itki üretiminin mümkün olabileceğini gösterildi. Katzmayr'ın çalışmasıyla Knoller-Betz'in hipotezleri doğrulanmış oldu [36]. Knoller-Betz teorisinde profilin iz bölgesinde ilerleyen girdap yapılarını dikkate almadılar.

Çırpma kanatlarda itki üretiminin basit bir mekanizması da 1929 yılında Glauert [37] tarafından gösterilmiştir. Glauert viskoz olmayan bir akış için salınım yapan bir kanat profili klasik lineer teori ile kanat iz bölgesindeki girdapların kayması dolayısıyla itki üretildiğini söylemiştir. Sabit bir ilerleme oranı (maksimum çırpma hızıyla uniform akış hızının bir oranı) için Glauert'in sonuçları itki katsayısı ve verim etkinliği frekans düştükçe monoton olarak arttığını göstermektedir. Wang [38] bu sonuçta bir paradoks olduğunu söylemiş ve Glauert'in söylediği durum doğruysa en iyi etkinliği elde edebilmek için kuşlar ve böceklerin 0 frekansa yakın bir değerde kanat çırpmaları gerektiğini söylemiştir. Wang'a göre çırpma frekansı için belirli bir optimal değer olması gereklidir ve çalışmasında bu optimal değeri göstermiştir.

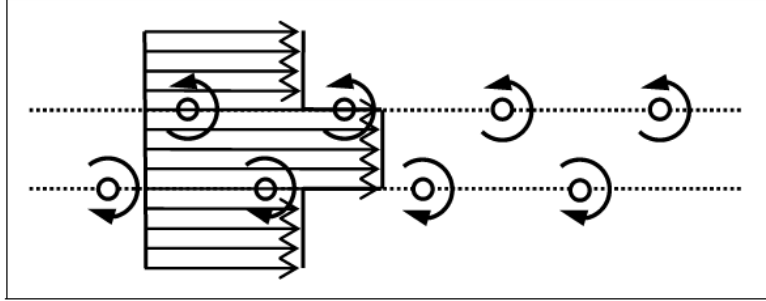
1935 yılında von Karman ve Burgers [39] profil iz bölgesindeki girdapların düzenini ve yerlerini gözlemleyerek itki veya sürüklenme üretiminin ilk kez açıklamasını sundular. Çalışmalarında düşük Reynolds sayılarında Karman girdap caddesi olarak bilinen iki çizgi boyunca zıt yönlerde hareket eden girdap yapılarının meydana geldiği kaba bir cismin (bluff body) iz bölgesini modellediler. Onlar temel olarak iz bölgesini 3 ana başlık altında topladılar; sürüklenme, itki ve 0 itki veya sürüklenme üreten iz bölgesi. Şekil 2.2'de momentum kaybına neden olan Karman girdap caddesi gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Momentum kaybına neden olan girdap yapısı [40].

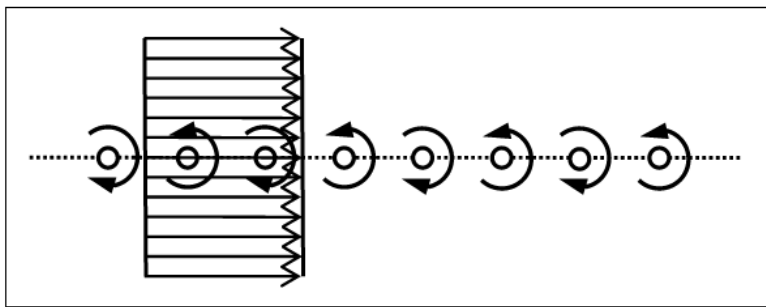
Şekil 2.2'de üst satırdaki girdaplar saat yönünde dönerken alt satırdakiler ise saat yönünün tersi yönde dönmekte olup iz bölgesinde görülen momentum kaybı kanat

profilinin sürüklemeye ürettiğinin bir göstergesidir. Bu girdap konfigürasyonuna ‘sürüklemeye üreten iz bölgesi’ adı verilmektedir. Şekil 2.3’de ise zamana göre ortalama hız profili iz bölgesinde momentum artışına neden olan girdap yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Momentum artışına sebep olan girdap yapısı [40].

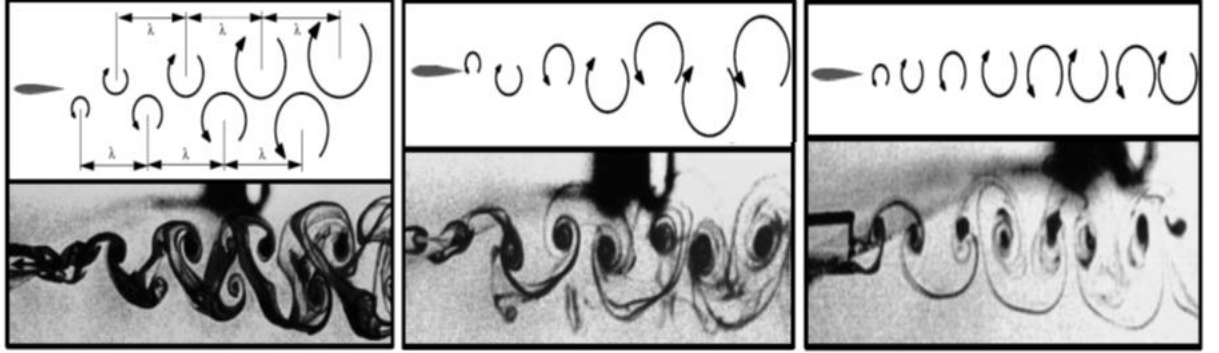
Şekil 2.2’deki sürüklemeye üreten iz bölgesine göre, üst ve alt satırdaki girdapların yönleri zıt yönlü hale gelen bu girdap konfigürasyonu ‘itki üreten iz bölgesi’ olarak geçmektedir. Young çalışmasında daha düşük ortalama hız veya daha yüksek ortalama hızda iz bölgesindeki girdap satırları arasındaki dikey mesafenin artmasının sürüklemeye veya itkinin de artmasına sebep olduğunu söylemiştir. İki satır arasındaki mesafe küçülerek 0’a yaklaştığı zaman ise farklı yönde dönen girdap ailelerinin aynı satırı paylaşacaklarını ve bunun 0 net sürüklemeye veya itki üretimine karşılık geldiğini söylemiştir. Bu konfigürasyona sahip iz bölgesini ‘nötr iz bölgesi’ şeklinde adlandırdılar, Şekil 2.4. [40]



Şekil 2.4 : 0 sürüklemeye veya itki üreten iz bölgesi [40].

Freytmuth [41], Koochesfahani [42], Jones [43] ve Lai [44] yaptıkları bir dizi deneysel çalışmayla belirli bir frekans ve genlikte dalma hareketi yapan bir kanat profilinin iz bölgesi sürüklemeye, nötr veya itki üreten olarak karakterize edilebilir. Burada Jones ve arkadaşlarının [43] yapmış oldukları deneysel çalışma üzerinde duracak olursak; Jones iz bölgesi yapısına ek olarak hem itki hem de taşıma üreten iz

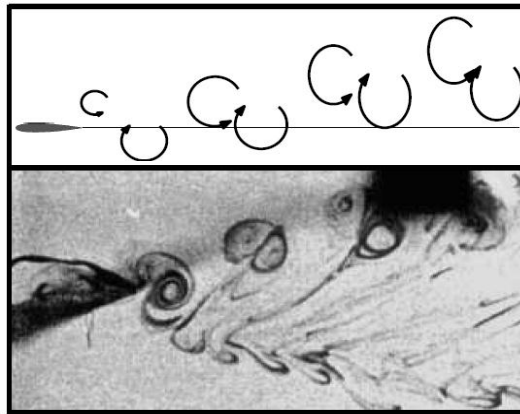
bölgesi yapısını da eklemiştir ve ayrıca girdap yapısının kh çarpımına bağlı olduğunu göstermiştir. Şekil 2.5’de üstteki fotoğraf girdap mekanizmasının şematik olarak alttaki fotoğraf ise su tüneline alinan görüntüleri oluşturmaktadır.



Şekil 2.5 : (Sol şekil - a) Sürüklemeye üreten iz bölgesi (Orta - b) İtme üreten iz bölgesi (Sağ - c) Nötr iz bölgesi [43].

Şekil 2.5’de a ve b karşılaştırılırsa; şekillerde kanat profilinin firar kenarından iz bölgesi boyunca uzanan düz bir çizgi çizildiği hayal edilirse Şekil 2.5-a’da bu çizginin üzerinde kalan girdap yapıları saat yönünde dönüp sürüklemeye üretimi gösterirken Şekil 2.5-b’de saat yönünün tersinde dönüp itme üretimi meydana getirdiği görülmektedir.

Eğer iz bölgesinde oluşan girdap yapıları profil ekseninde ve birbirinin tersi yönde olursa ne itme ne de taşıma üreten bir iz bölgesi oluşur. Şekil 2.5-c’ de görülen nötr iz bölgesinde profilin firar kenarında oluşmaya başlayan girdapların iz bölgesi boyunca birbirine zıt yönde hareket ederek aynı hizaya ilerledikleri görülmektedir.



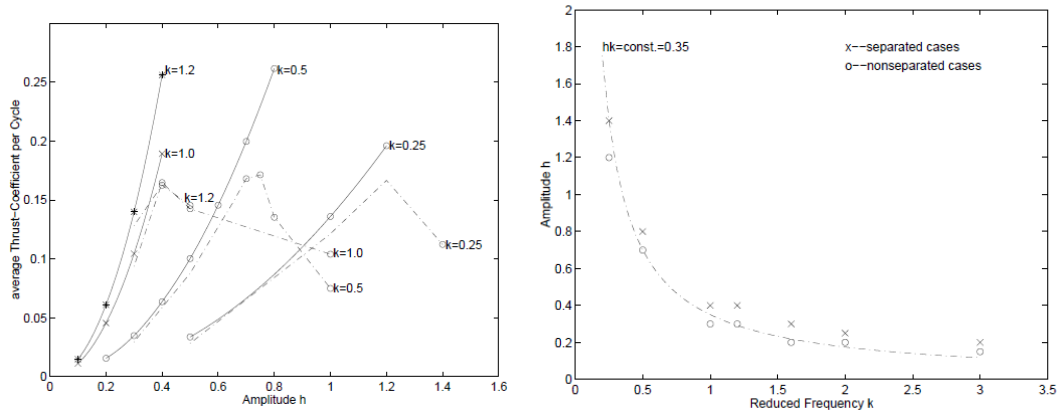
Şekil 2.6 : İtme/Taşıma üreten girdap caddesi [43].

Jones yukarıda sayılan girdap yapılarına, daha yüksek kh değerlerine sahip hareketlerde itki ve taşımanın her ikisinin de meydana geldiği simetrik olmayan girdap yapılarını eklemiştir. Bu yapı Şekil 2.6’da gösterilmiştir.

2.2. Dalma Hareketi Yapan Kanat Profili

Çırpan kanat aerodinamiğinde itki üretiminin birçok parametreye bağlı olduğu bilinmektedir. Bunlardan bazıları: hareketin kinematiği, dalma, yunuslama ve bütünleşik hareket gibi hareket modları, bu modlar arasındaki faz farkı, seçilen kanat profili, esnek kanat kullanımı vb.’dir. Bu kadar fazla bilinmeyen ve değişkenin olduğu hareket mekanizmasını ve canlıların ürettiği itkiyi anlayabilmek için basit ve doğru bilgi verecek bir hareket mekanizmasıyla başlamak gereklidir. Bunun için sadece dalmanın yapıldığı hareket bilim dünyasında en çok ilgi çeken konulardan birisidir. Birçok araştırmacı/bilim adamı dalma hareketinin itki üretimi, iz bölgesi girdap yapılarının ve hücum kenarı girdabının davranışının anlaşılmasının bu hareket moduyla kolay olduğunu söylemektedir. Örneğin; Lewin ve Haj-Hariri’ye göre “İtki üretimi, ters Karman girdap caddesi ve LEV ayrımı gibi alanlarda, birçok olay bu basit hareket ile elde edilebilir.” [45] ve aynı şekilde Newman ve Wu’da “Dalma hareketi açıkça çok etkili ve basit bir mod’dur. Çünkü bu modda meydana gelen itki, tamamıyla hücum kenarındaki emme kuvvetiyle üretilir ve her zaman pozitifdir. Oysa, yunuslama hareketinde kanat profilinin 0 olmayan hücum açılarında vetere normal yönde etkiyen eksenel kuvvetlerin etkisinden dolayı itki artışı meydana gelmekte ve itkinin bileşenleri zorunlu olarak pozitif olmamaktadır.” [46] diye söylemektedir. Bu yüzden öncelikli olarak sadece dalma hareketinin yapıldığı birçok çalışma incelenecektir.

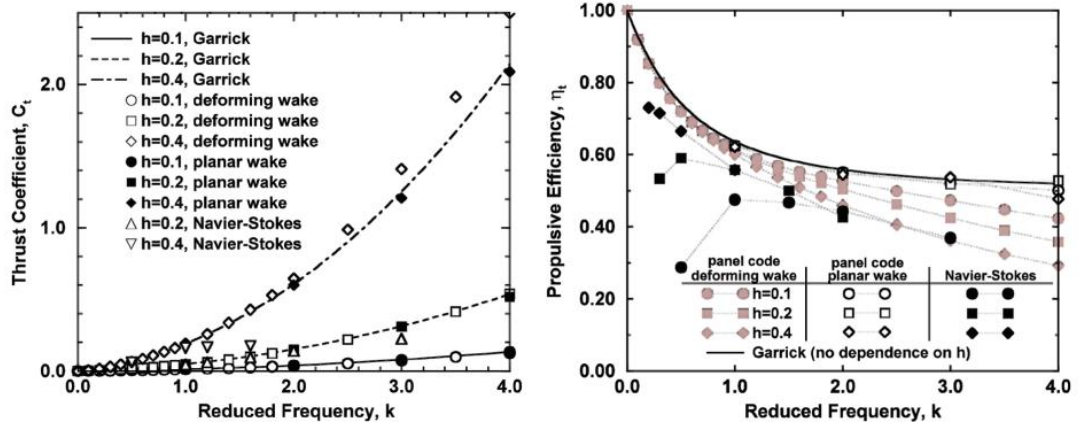
1998’de Tuncer, Walz ve Platzler çırpan kanatta dinamik tutunma kaybı denilen etkiyi hesaplamalı olarak araştırdılar [47]. Tuncer bu çalışmasını Reynolds sayısı 1×10^6 ’da 2 boyutlu bir NACA 0012 kanat profil ile dalma hareketi yaparak gerçekleştirdi. Onlar sabit k artan h değerlerinde belirli bir noktadan sonra $C_{t,ort}$ ’nin düşüşe geçtiğini gösterdiler. (Şekil 2.7) Ayrıca maksimum boyutsuz çırpma hızı kh ’ın itki üretimi ve itki veriminde aşırı bir şekilde düşüşe neden olan dinamik tutunma kaybindan kaçmak için 0.35’in altında olması gerektiğini gösterdiler. Bu değer, Şekil 2.8’de gösterilen k ve h değerleri göz önünde bulundurularak elde edildi.



Şekil 2.7 : Sırasıyla düşük frekans değerlerinde itki katsayısındaki dinamik tutunma kaybı grafiği ve dinamik tutunma kaybı sınırındaki k ve h değerleri [47].

Şekil 2.7’de k - h grafiğinde limitin sol tarafında kalan akış akım ayrılması yaşamamışken dinamik tutunma kaybına uğrayan sağ taraf akım ayrılmasına uğramıştır. Onlar kritik $kh=0.35$ değerinin altında yüksek frekans düşük genlik veya zıttı gibi değerler seçilebileceğini belirttiler [47].

Bu çalışmanın bir devamı olarak Lewin ve Haj-Hariri [45] ve Young [40] bir çalışma gerçekleştirdi. Onlar Garrick’in lineer teorisi, deforme olan iz bölgesi ve gerçekleştirdikleri Navier Stokes analizleriyle elde ettikleri C_t ve η ’yi karşılaştırdılar. Şekil 2.8’de bu grafikler gösterilmektedir.

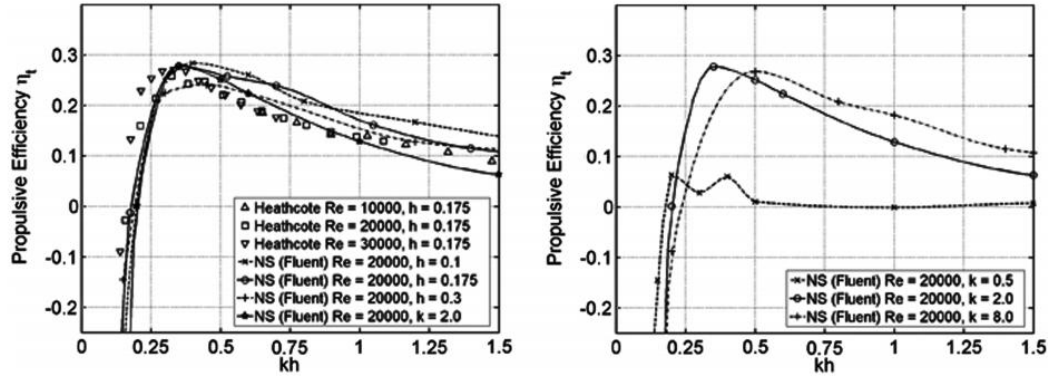


Şekil 2.8 : İndirgenmiş frekansa göre itki katsayısı ve itki verimi [40,45].

Şekil 2.8’de k arttıkça C_t artarken η azalmaktadır. Bunun nedenini k arttıkça daha fazla başlangıç girdaplarının kanat profili üzerinde kaydığı ve bunun da C_t ’yi artırdığını, girdapların kanat üzerinde daha uzun bir periyot boyunca bulunduğu ve artan bu etkileşimden dolayı η ’nin düştüğünü belirttiler. Yani yüksek k değerlerinde

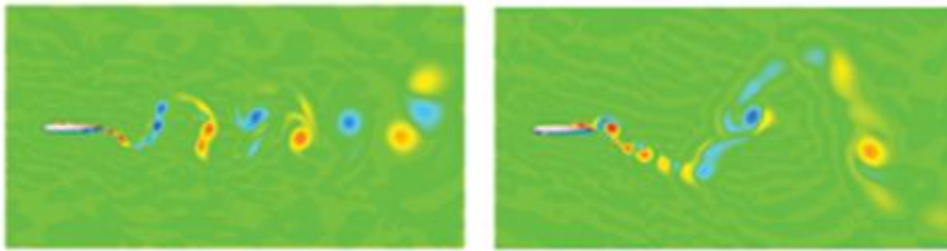
yüksek itki elde edildiği fakat bu itkiyi elde etmek için gereken gücün itkiden daha hızlı arttığı anlamına gelmektedir.

Young ve Lai [48,49] Reynolds sayısı 1×10^4 ile 3×10^4 arasında sıkıştırılmaz bir akışta aynı kanat profili için yaptıkları sayısal analizde yüksek Reynolds sayılı davranışlarla kıyaslandığında önemli farklılıklar ortaya çıkardılar. Şekil 2.9, 3 farklı k ve 3 farklı h için tahmin edilen itki verimlerini göstermektedir.



Şekil 2.9 : kh değerine göre η değişimi [48,49].

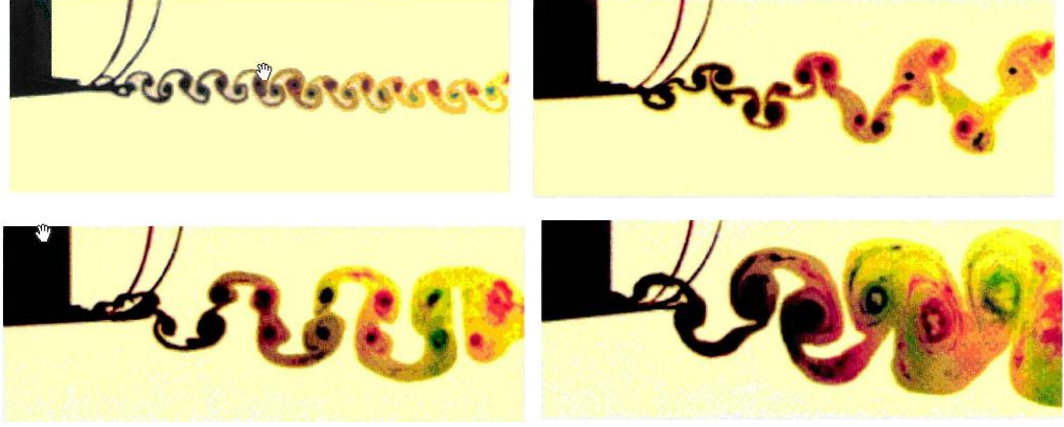
Şekil 2.9'dan çok düşük k hariç kh değeri yaklaşık olarak 0.4'te itki verimi en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu verimde keskin bir düşüşün olduğu yüksek Reynolds sayılı akışlardaki dinamik tutunma kaybı sınırına benzer bir sınır olduğunun göstergesidir. Şekil 2.10'da hem düşük genlik hem de yüksek genlik değerleri için en iyi verimin olduğu kh değerinde hücum kenarından kayan girdap yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Düşük ve yüksek genlik için verimin yüksek olduğu değerlerde girdap görünümü [48,49].

Yüksek Reynolds sayılı akışlarda itkinin üretiminde hücum kenarı girdabının yıkıcı bir etkisi olmasına rağmen düşük Reynolds sayılı akışlarda LEV, TEV'in gücünü artırıcı bir etkiye sahip olduğu ve böylece net itkinin arttığı görülmektedir.

Lai ve Platzer Reynolds sayısı 2×10^4 dalma hareketi yapan bir NACA 0012 kanat profili için iz bölgesi yapısını incelediler [44]. Çalışmalarını deneysel olarak akım görüntüleme ve Laser Doppler Velocimetry (LDV) ile gerçekleştirdiler. Onlar Şekil 2.11’de gösterildiği gibi kh ’ın belirli değerinden sonra (h artarken) sürüklenme üreten Karman girdap caddesinden nötr ve itki üreten Karman girdap caddesine geçişin düzgün bir şekilde gerçekleşmediğini buldular. Lai ve Platzer, Şekil 2.11’de gösterilen her yarı salınımda meydana gelen tek girdap yerine kanat hareketinin her yarı salınımda firar kenarından kayan çoklu girdap yapılarından oluşan birçok geçiş formlarının oluştuğunu gösterdiler. Onlar çalışmalarında firar kenarı bölgesindeki gelişen akımın ayrılmasının çok önemli olduğunu ve viskoz akış analizi gerektiğini söylemişlerdir.



Şekil 2.11: kh değeri arttıkça ters Karman girdap caddesine geçiş formu (kh değerleri sırasıyla 0, 0.098, 0.196, 0.393) [44].

Bu sonuçlar sadece dalma hareketinin yapıldığı moddan elde edilecek itki üretim mekanizmasının önemli ölçüde bir parametreye bağlı olduğunu göstermektedir. Yüksek Reynolds sayılı akışlarda, etkili bir itki üretimi yeteri kadar büyük Strouhal sayısına ulaşıldığında ters Karman girdap caddesi formunda TEV’in kaymasıyla elde edilir. Maksimum itki ve en optimum verim ise sabit bir Strouhal sayısı değeri için dinamik tutunma kaybı sınırına yakın zamanda meydana gelir. Böylece Strouhal sayısı bu rejimdeki akışın davranışını yöneten en önemli parametre olmaktadır. Ancak Mikro hava araçlarının uçmakta olduğu düşük Reynolds sayılı akışlardaki davranış biraz daha karmaşıktır. Çünkü etkili bir itki üretimi hem hücum kenarı hem de firar kenarından kayan girdaplar tarafından elde edilir. En etkili uçuş şartları belirli bir Strouhal sayısı için meydana geldiği görülmesine rağmen itki ve itki verimi TEV’in şekli, ayrılması ve kanat yüzeyi üzerinden yayılması ve zamanlaması gibi

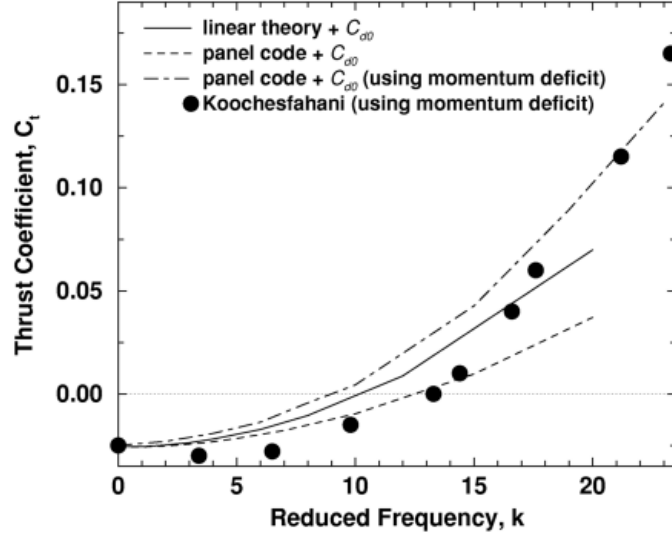
nedenlerden dolayı Strouhal sayısından bağımsız olarak k ile çok daha hassastır. Young ve Lai [49]'nin sonuçları verilen bir kh değeri için LEV'in olumsuz etkisini azaltmak için düşük k yüksek h değeri yerine yüksek k ve düşük h değerinde hareketin yapılmasının daha yararlı olduğunu gösterdiler. Bu bulguların hepsi büyük ölçüde sadece NACA 0012 kanat profili için deneysel ve sayısal temellidir [35].

Müller ve arkadaşları [50] Reynolds sayısı 1000 için dalma hareketini gerçekleştiren bir kanat profilinin itki üretme mekanizmasını sayısal olarak araştırdılar. Dalma hareketinde k ve h bağıllığını incelediler. Dalma hareketindeki itki üretiminin belirleyici faktörünün hücum kenarı tarafından üretilen girdap mekanizmalarının olduğunu söylediler. Onlar dalma hareketi için hücum kenarında meydana gelen girdabın profil boyunca hareket ederken itkiye büyük miktarda yararın olduğunu göstermiştir. Onların bu çalışması yukarıda bahsettiğimiz çalışmalarla tutarlıdır.

Lentink ve Grritsma [51] 2 boyutlu sayısal analizlerinde $Re=150$ ve $h=1.5$ ile dalma hareketi yaptıkları eliptik kanat profilinde kaotik/periyodik olmayan bir yapı olduğunu raporladılar. Çalışmalarını genişlettikleri diğer bir makalelerinde, Lentink ve diğerleri [52] $Re=1000$ 'de $h=1.5$ için farklı frekanslardaki davranışlarda, dalma hareketi yapan bir düz plakanın kaotik davranış gösterdiğini deneysel çalışmalarıyla gösterdiler.

2.3. Yunuslama Hareketi Yapan Kanat Profili

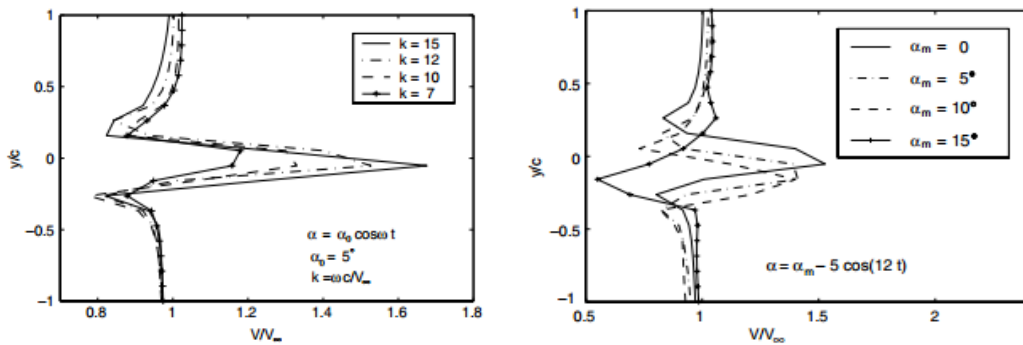
En etkili uçuş modu hakkında daha ayrıntılı bir çalışmaya başlamadan önce sadece dalma değil yunuslama ve hem yunuslama hem de dalma hareketinin olduğu diğer salınım hareketlerini de incelemek gereklidir. Garrick [53] potansiyel akışta bütünleşik salınım yapan düz bir plakayı analiz etti. O sadece yunuslama salınımı yapan harekette nisbeten daha yüksek k değerleri aşıldıktan sonra sadece itki üretebildiğini buldu. Koochesfahani [42] detaylı bir şekilde akım görüntüleme ve ölçümleri yaptı. Şekil 2.12'de Koochesfahani'nin ölçümleri ile lineer ve panel kodu tahminlerinin bir karşılaştırılması gösterilmiştir. Bu çalışmayla sadece yunuslama salınımı yapılmasıyla itki üretimi etkili bir şekilde gerçekleştirilememektedir.



Şekil 2.12 : Sadece yunuslama yapan kanat profili için indirgenmiş frekansa göre itki katsayısının değişimi [54].

Elde edilen düşük seviyedeki itki üretiminden dolayı sadece yunuslama yapan bir kanat profilinin davranışı çok fazla araştırılmamıştır. Bu nedenle hareketi yöneten önemli parametrelerin etkisi üzerine de fazla çalışma bulunmamaktadır. Ortalama yunuslama açısı, Reynolds sayısı ve yunuslama eksenin yeri önemli parametrelerdendir [54].

Sarkar ve Venkatraman [55] itki üretimi ve iz bölgesinin davranışı üzerinde kanat profilinin hareket parametreleri ve çeşitli akışın etkisini araştırdılar. Onlar $C_{t,ort}$ üzerinde yunuslama ekseninin yeri, ortalama hücum açısı, yunuslama genliği ve indirgenmiş frekansın etkisini araştırdılar. Akışı $Re=1 \times 10^4$ 'de iki farklı yunuslama genliğinde (2.5, 5), ortalama hücum açısı 0,5,10,15 değerlerinde çözdüler. Salınımın frekansını ise daha küçük değerler hiç itki üretmediğinden dolayı 5 ile 10 arasında seçtiler. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



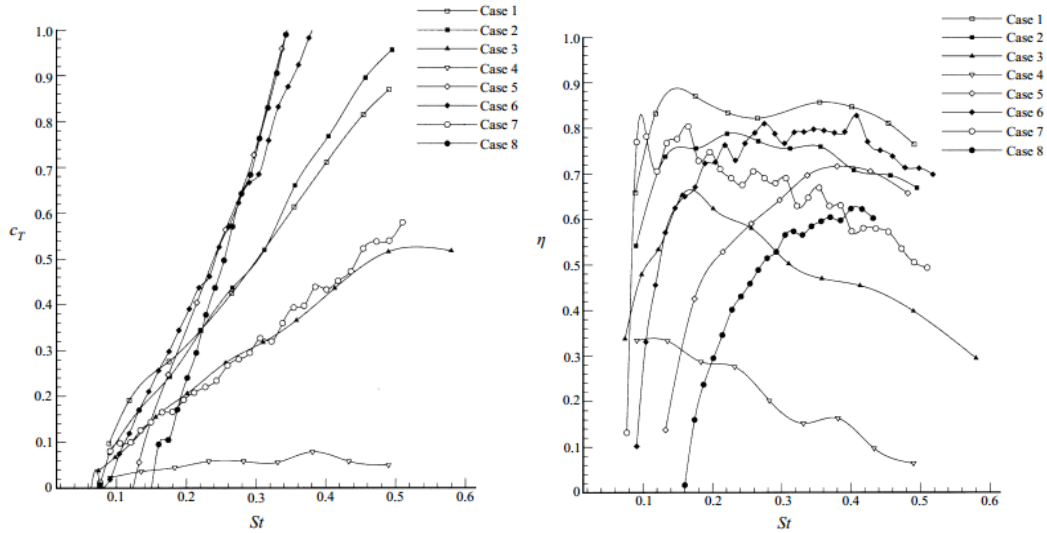
Şekil 2.13 : İndirgenmiş frekans ve ortalama hücum açısına göre hız profilleri [55].

Şekil 2.13’de kanat üzerinde momentum kaybına veya kazancını yani net sürüklenme ya da itki gösteren ortalama hız profillerini göstermektedir. Bu grafiklerden k ’nın daha yüksek değerlerinde itkinin arttığı görülmekte ve ortalama hücum açısı arttığında ise itki azaldığından sürüklenme meydana gelmektedir. Bütün bu yapılan çalışmaların bir sonucu olarak sadece yunuslama hareketiyle itki üretimi elde etmek çok zordur.

2.4. Dikey Salınım ve Yunuslama Hareketini Beraber Yapan Kanat Profili

Kuşlar, uçan hayvanlar ve böcekler uçmak için sadece dalma veya yunuslama hareketini kullanmazlar. Uçuş boyunca kanat çırpıklarından dolayı bu canlıların (özellikle böceklerin) kanat çırpma hareketleri çok karmaşıktır. Doğada neredeyse bütün canlılar hem dalma hem de yunuslama hareketini beraber yaparlar. Bu bölümde bu bütünleşik hareketin en önemli parametreleri üzerinde durulacaktır.

Anderson ve arkadaşları [56] deneysel olarak bütünleşik hareket yapan bir NACA 0012 kanat profilinin ortalama itki katsayısı, giriş güç katsayısı ve itki verimini hesaplamıştır. Onlar lineer ve nonlinear inviscid teorilerindeki sonuçlarla deneysel sonuçları karşılaştırdı ve teori ile deneyler arasında belirli bir parametrik aralıkta iyi derecede uyum olduğunu buldular.

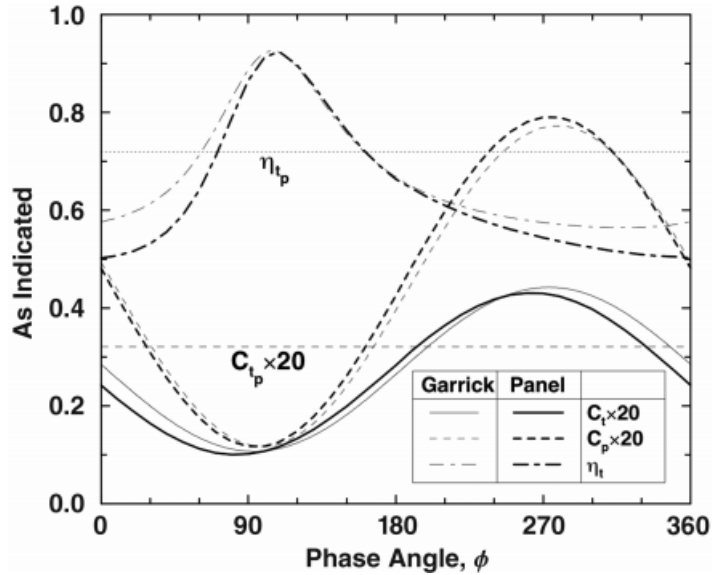


Şekil 2.14 : Farklı hücum açısı, genlik ve faz farkları için itki katsayısı ve itki verimi grafiği [56].

Çalışmalarında en yüksek η her yarı salınımda kısmen daha güçlü LEV’in iz bölgesine doğru ilerleyip TEV ile etkileşime girmesiyle oluştuğunu söylediler. En

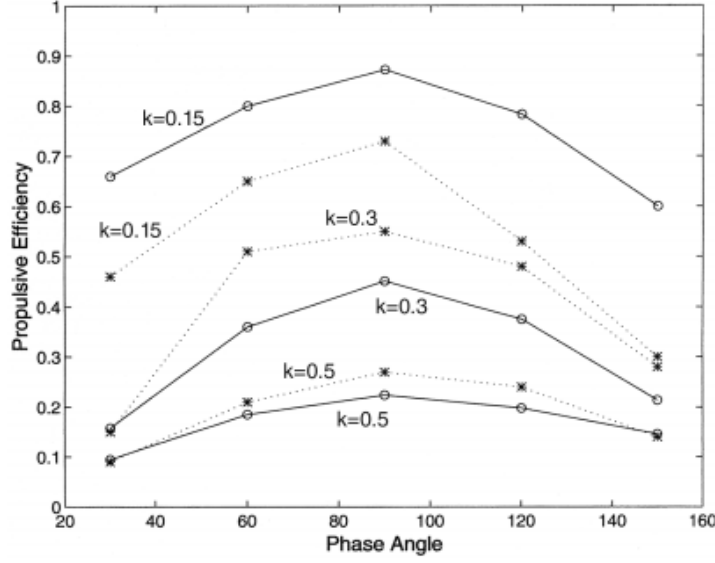
yüksek η LEV'in TEV ile etkileşimi sonucu ters Karman girdap caddesi şeklinde oluştuğunu gösterdiler. Dalma ile yunuslama hareketi arasındaki faz açısının LEV ile TEV etkileşimini etkileyen en önemli parametre olduğunu söylediler. Buna göre η Strouhal sayısı $0.25 < St < 0.4$ aralığında en yüksek değerine ulaşmaktadır.

Bütünleşik çalışmalardan diğer birisi de lineer ve panel kodlarıyla gerçekleştirilen NACA 0012 kanat profilinin çeyrek veter noktası etrafında $h=4$ olacak şekilde yunuslama hareketi verilen çalışmadır [56]. Şekil 2.15'te açık ve koyu düz çizgi ile C_t (sırasıyla Garrick'in lineer teorisi ve panel kodu ile hesaplanan sonuçlar), iki kısa çizgi ile güç katsayısı ve noktalı çizgi ile de η gösterilmiştir. Ayrıca bu şekilde iki yatay çizgi sadece dalma hareketi için elde edilen itki katsayılarıdır.



Şekil 2.15 : İtki katsayısı, güç katsayısı ve itki veriminin iki hareket arasındaki faz farkına göre değişim grafiği [56].

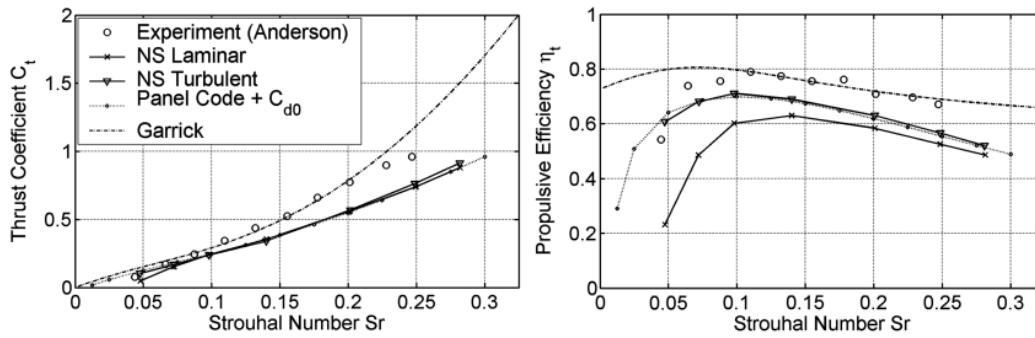
Beklenildiği gibi, Şekil 2.15'te yer alan performans parametreleri dalma ve yunuslama hareketleri arasındaki faz farkına bağlıdır. Yaklaşık olarak 60° ile 165° arasındaki değerler için η 'nin sadece dalma hareketinin η 'den daha yüksek görünmektedir. Bu aralık içerisinde bütünleşik hareketin kanadın performansını artırıcı bir etkisinin olduğu görülüyor. Ayrıca bütünleşik harekette de, 90° civarında en yüksek η elde edildiği görülmektedir. Bu sonucu Tuncer ve arkadaşlarının [57] ve Isogai ve arkadaşlarının [58] $Re=10^5$ 'de NACA0012 kanat profili üzerinde yunuslama genliğinin 10^0 ve $h=1$ olduğu çalışmalarında bu şekilde olduğunu gösterdi.



Şekil 2.16 : Frekans ve faz farkının fonksiyonu olarak itki verimi [57].

Yaptıkları çalışmalarında itki verimindeki zirve yapmasının k 'dan bağımsız olduğunu ve zirve değerinin faz açısının 90° 'e eşit olduğu zaman gerçekleştiğini gösterdiler. Şekil 2.16'da noktali çizgiler Isogai'nin gerçekleştiği çalışmayı düz çizgiler ise Tuncer'in çalışmasını göstermektedir.

Young ve Lai [48] ayrıca bütünleşik hareket gerçekleştiren bir çalışma yaptılar. Anderson'un deneysel çalışmasıyla kıyaslayabilmek için onun akış şartları altında NACA0012 kanat profili üzerinde η ve itki üretiminde Strouhal sayısının etkisini araştırdılar.



Şekil 2.17 : Strouhal sayısına göre itki katsayısı ve itki veriminin değişimi [48].

Şekil 2.17'de Reynolds sayısı 40000'de faz farkı 90° olan $h=0.75$ ve yunuslama genliğinin 15° olduğu çalışmanın sonuçları gösterilmiştir. Hem Navier Stokes çözümleri hem de deneysel sonuçlar C_t 'nin Strouhal sayısına göre arttığını fakat η Strouhal sayısının 0.1 ile 0.2 değerleri yakınlarında bir tepe noktasına ulaştığını gösteriyor. Ayrıca onlar yalnızca Strouhal sayısının çırpan kanat veriminin

karakteristiğini belirlemek için yeterli olmadığını gösterdiler. En optimum Strouhal sayısı en optimum frekans değerini göstermemektedir. Çünkü Strouhal sayısını sabitleme hem k hem de h değiştirilerek gerçekleştirilebilir.

2.5. Hücüm ve Firar Kenarı Girdaplarının Etkileri

LEV, çırpın kanatlı böcek ve kuşların taşımasında kanat üzerinde veya altında düşük basınç bölgeleri oluşturarak önemli bir rol oynamaktadır. LEV'in oluşturulması uçan canlıların taşımalarını artırmada kullandıkları ortak bir mekanizmadır. Bu konuda yunuslama hareketi yapan kanatlarla ilgili çok fazla çalışma bulunmaktadır. Deneysel olarak taşıma katsayısı eğrisinin karakteristiğini bulmak ve dinamik tutunma kaybına sebep olan yunuslama hareketini anlayabilmek için birçok araştırmacı sürüklenme, taşıma ve moment katsayılarını ölçmüştür. Bu konuyla ilgili ayrıntılı çalışmalar için Leishmann [59] ve Carr ve arkadaşlarının [60] makalelerine bakılabilir.

Gursul ve Ho [61] deneysel olarak uniform akış yönünde salınım yapan bir kanat üzerinde taşıma katsayısını incelediler. Onlar C_t 'nin belirli bir değerde en yüksek değere ulaştığını gözlemlediler ve bunun sebebinin LEV'in büyüklüğüyle ilişkili olduğunu söylediler.

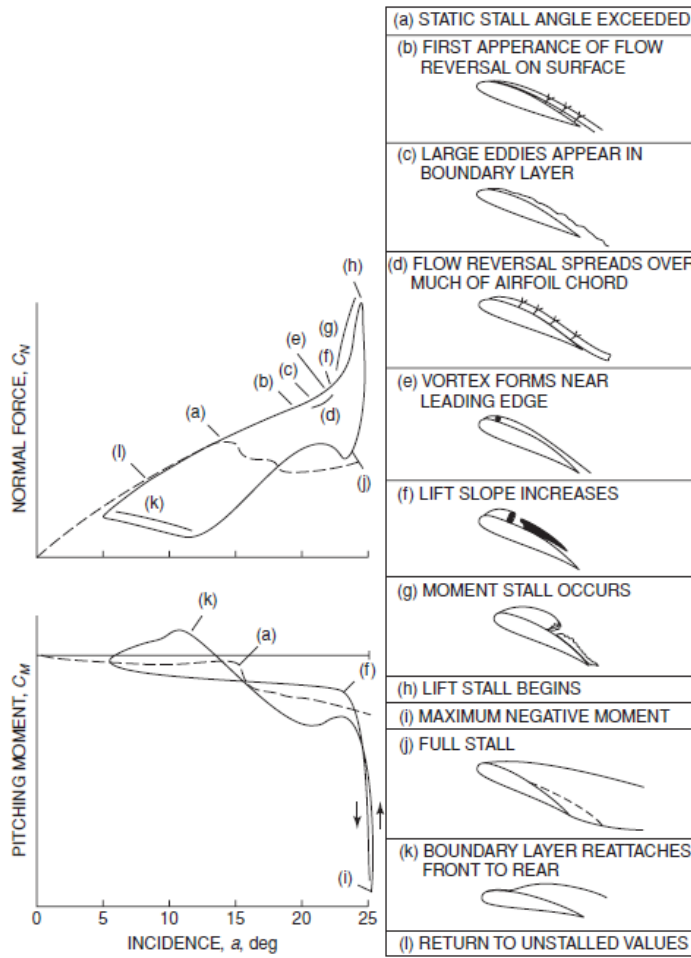
LEV'in sadece taşıma üzerinde değil, itki üzerinde de etkisi olduğu zaman içerisinde araştırmacılar tarafından görülmüştür. Karman girdap caddeleri üzerinde LEV'in büyük bir etkisi bulunmaktadır. Anderson yaptığı çalışmada LEV ile η arasında bir ilişki olduğunu söylemiştir. Deneylerinde genellikle maksimum η değerinde iz bölgesinde ters Karman girdap caddesi oluştuğunu gözlemlemiştir. Freymuth [41] bir NACA 0015 kanat profilinin Strouhal sayısının 0.34'e eşit ve $h/c=0.2$ olduğu değerlerde bütünleşik hareket bir çalışma yaptı ve o çalışmada ters Karman girdap mekanizması gözlemledi. Freymuth kanat profilinden iz bölgesine doğru ilerleyen güçsüz bir LEV'in TEV ile birleştiğini fark etti. Genel olarak araştırmacılar Reynolds sayısı, hücum açısı, genlik değişimiyle etkileşimleri gözlemişlerdir.

Panda ve Zaman akım görüntülemesi ile harmonik olarak salınım yapan bir kanat profilinde dinamik tutunma kaybı için sadece LEV'in değil TEV'in de önemli olduğunu gösterdiler [62].

2.6. Statik ve Dinamik Tutunma Kaybı

Bir kanat profili tutunma kaybı açısının üzerindeki belirli bir hücum açısıyla harekete başlarsa hücum kenarı üzerinde zamana bağlı olarak büyük girdap yapıları meydana gelir ve bu girdap yapısı aniden taşımanın çok fazla artmasına sebep olur. [39] Dinamik tutunma kaybı veya gecikmiş tutunma kaybı ise büyük bir LEV'den dolayı tutunma kaybı olmadan önce kısa bir periyot için yüksek hücum açılarında hareket eden bir kanadın fazlaca taşıma elde etmesinin tarifinde kullanılmaktadır.

McCroskey ve Fisher [63] hızlıca yunuslama hareketi yapan bir NACA 0012 kanat profili için dinamik tutunma kaybında akış yapılarının gelişimini göstermiştir. Şekil 2.18'de bu profilin dinamik tutunma kaybı durumu adım adım gösterilmiştir.



Şekil 2.18 : NACA 0012 kanat profilinin dinamik tutunma kaybı durumu [63].

Şekil 2.18'de a noktasına bakıldığında kanat hızlıca sabit tutunma kaybı açısını aştıktan sonra meydana gelen ters akışlar basınç dağılımını oldukça etkiliyor. (b noktası) Bu oluşan ters akış kanat üzerindeki yüzeyde ilerleme başlar ve girdap

halini alır. Girdap ilk olarak kanat profilinin hücum kenarının yakınlarında görülür (e noktası), yavaş yavaş büyür ve firar kenarına doğru hareket eder. Yunuslama momenti maksimum negatif değerine ulaşır ve hem taşıma hem de yunuslama momenti aniden düşmeye başlar (h ve i noktaları) ve dinamik tutunma kaybı olarak bilinen durum gerçekleşmiş olur. Hücum açısı azalırken girdap iz bölgesine doğru hareket eder ve kanat üzerinde tamamıyla ayrılmış akış gelişir. Gösterilen bu döngü salınım genliği, ortalama hücum açısı ve indirgenmiş frekans değerlerine bağlıdır [64].

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

3.1. Giriş

Bundan önceki bölümlerde çırpın kanat çalışmalarının geçmişinden, yapılan çalışmalardan ve çırpın kanat profiliyle ilgili önemli parametrelerden bahsedildi. Bu bölümde ise hesaplamalı akışkanlar dinamiğinden, akışı yöneten denklemlerden, sayısal ağ yapısı ve sayısal çözücü ayarlamaları anlatılacaktır.

3.1.1. Akışı Yöneten Denklemler

Akışı yöneten denklemler farklı HAD yöntemlerinde çok farklı şekillerde elde edilebilir. Biz bu çalışmada Navier-Stokes denklemlerinin korunumlu halini dikkate alacağız. Bilindiği gibi akışkanlar dinamiği üç temel fizik prensibi temeli üzerine kurulmuştur. Bunlar;

- a. Kütlenin korunumu
- b. Momentumun korunumu (Newton'un ikinci yasası)
- c. Enerjinin korunumu

Burada yapılan çalışmada sadece süreklilik ve momentum denklemleri kullanılacaktır; çünkü incelenen akış türü sıkıştırılamaz özellikte kabul edilmiştir.

3.1.1.1. Kütlenin korunumu

Akışkanlar dinamiğinin ilk yasası olan kütle korunumuna göre, bir akış hacmi içerisindeki kütlenin artış oranı, o akış hacmi içerisindeki net kütle akış oranına eşittir. Burada süreklilik denkleminin çıkarılışı gösterilmeyecek olup korunumlu formda süreklilik denkleminin son hali şu şekildedir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (3.1)$$

3.1.1.2. Momentumun korunumu

Newton'un ikinci yasası olan momentum korunumuna göre, bir akış parçasığının momentumunun değişim oranı parçasığa uygulanan kuvvetlerin toplamına eşittir. Bu

bölümde de momentum denkleminin Newton'un ikinci yasasından başlanarak elde edilmesi yapılmayacaktır. Navier-Stokes denklemlerinin çıkarımı için Durna'nın yapmış olduğu teze bakılabilir. [51] x, y, z olmak üzere 3 yönde de momentum denkleminin son hali denklem 3.2'deki gibidir.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\
\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\
\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z
\end{aligned} \tag{3.2}$$

3.2. Sayısal Çalışma Metodolojisi

Sayısal bir çalışma 4 temel başlık altında toplanabilir. Bunlar; geometrinin oluşturulması, sayısal ağ yapısının oluşturulması, sayısal çözücünün ayarlanması ve sonuçların alınması. Bu bölüm altında sayısal ağ yapısı ve çözücü ayarlarının yapılması anlatılacaktır.

Öncelikle çırpın kanatlı yapılarda zaten karmaşık olan akış şartlarını basitleştirmek için kuş ve böceklerin uçuş yaptığı düşük Reynolds sayısında ve 2 boyutlu bir kanat profili üzerinde çalışılmıştır.

3.2.1. Geometri ve Çözüm Ağının Oluşturulması

Bu çalışmada, kanat profili olarak NACA 0012 profili kullanılmıştır. Bu profil hem simetrik ve basit yapısı nedeniyle hem de literatürde bu profille yapılan çalışmaların fazla olması sebebiyle seçilmiştir. Analizlerde NACA 0012 profilinin veter uzunluğu 0.01 m olarak alınmıştır.

3.2.1.1. Pointwise programının tanıtımı

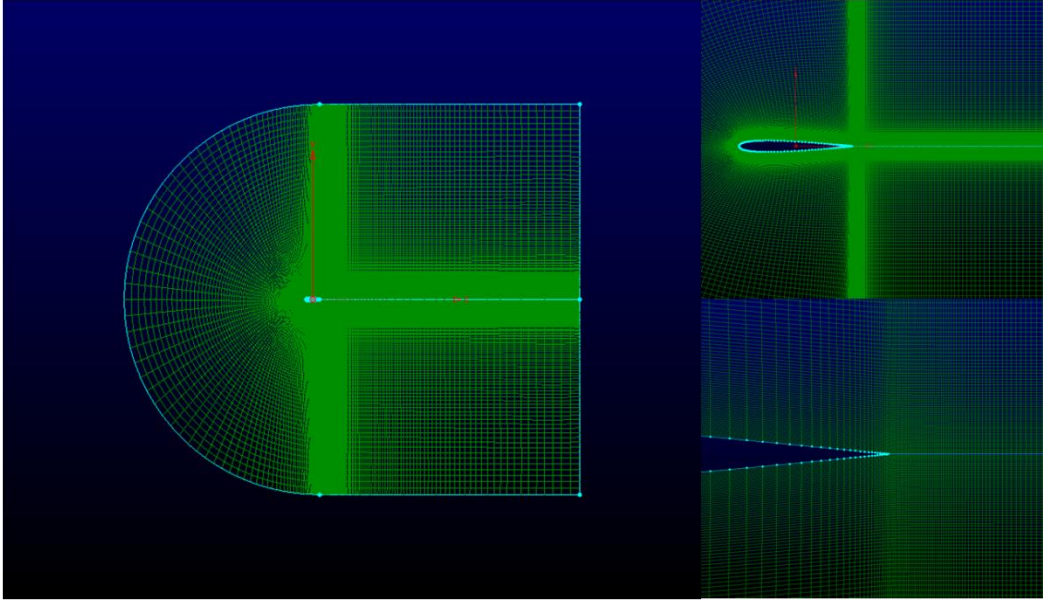
Kanat profilinin etrafındaki ağın oluşturulmasında Pointwise programının kullanılmasına karar verilmiştir. Pointwise programı, havacılık sektöründe 3 boyutlu karmaşık geometriler için ağ yapısının oluşturulmasında 1984 yılından beri yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu yazılım yoğunlukla Amerika menşeli hava araçlarının analizlerinde kullanılmaktadır.

Pointwise programı, yapısal, yapısal olmayan ya da hibrit çözüm ağı oluşturmanın yanında daha az bilgisayar kaynakları kullanarak doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayan yüksek kaliteli teknikler kullanmaktadır. Otomatik ağ birleştirme, yapılan işlemlerde bütün adımlarıyla ileri-geri hareket edebilme yeteğinin yanısıra hızlı ve kolay öğrenilebilecek bir arayüz sağlamaktadır.

Pointwise programının yapabildiği yeteneklerden biraz bahsedecek olursak; bütün işletim sistemlerine uygun olan bu programla bir çok HAD yazılımlarına uygun ağ yapısı oluşturulabilir. T-Rex algoritmasını kullanarak (anisotropic triangle extrusion) hibrit sınır tabaka yüzey ağları oluşturulabilir. Sadece yüzeyden oluşan (kabuk) geometrilerle çalışılıyorsa, düzlemlerle ayrılabilir veya yeni yüzeyler eklenebilir.

3.2.1.2. Oluşturulan Çözüm Ağları

2 boyutlu akış analizleri için C-tipi, profil yakınlarında ve iz bölgesi içerisinde girdapların hareket ettiği bölgelerde daha sık olacak şekilde dörtgen elemanlardan meydana gelen yapısal ağ oluşturulmuştur. Şekil 3.1’de bu şekilde oluşturulan ağ yapısının genel görünümü, sağ tarafta kanat profilinin yakından görünümü ve hücum, firar kenarı yakınlarındaki ağ yoğunluğu gösterilmiştir. Hız girişinin olduğu giriş yüzeyi kanat profilinin hücum kenarından 10 veter uzaklıkta, akış çıkış yüzeyi ise kanat profilinin firar kenarından 15 veter uzaklıkta, son olarak kanat profillerinin üst ve alt yönlerine doğru 10 veter uzaklıkta yüzeyler oluşturulmuştur. Kanat profili üzerinde 161 düğüm noktası ve 561 x 201 düğüm noktası kullanıldı.



Şekil 3.1: Oluşturulan çözüm ağının solda genel görünümü, sağda kanat profili etrafındaki çözüm ağının yakından görünümü.

3.2.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Çözücüsünün Hazırlanması

Yapılan analizlerde akış tamamıyla laminar farzedilmiştir ve daimi olmayan, sıkıştırılamaz Navier-Stokes denklemleri çözülmüştür. Bu bölümde kullanılan HAD çözücüsü hakkında ve çözücü ayarlarıyla ilgili bilgiler verilmiştir.

3.2.2.1. Kullanılan sayısal çözücü yazılımının tanıtımı

Belirli bir akış probleminin çözümü için kullanılabilecek pek çok paket program mevcuttur. FLUENT, STAR CD, CFD++, CFX, STAR-CCM+ bu programlara örnek olarak verilebilir. Epey gelişmiş ve tasarım açısından güvenilir sayılan bu yazılımlarla iki veya üç boyutlu pek çok problem hızlıca çözülüp sonuçları görüntülenebilir. Bu çalışmada, sayısal çözücü olarak Dünya’da en yaygın olarak kullanılan hesaplamalı akışkanlar çözücüsü FLUENT yazılımının 6.3.26 sürümü kullanılmıştır.

FLUENT sonlu hacimler yöntemini kullanan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. 1983'ten bu yana dünya çapında birçok endüstri dalında tercih edilen ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumundadır. Fluent, genel amaçlı bir HAD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbomakine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler v.b.) endüstrisi gibi birbirinden farklı birçok endüstriye ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde

kullanılabilir. Yakınsamayı hızlandıran çoklu ağ metodu ve çoklu çözücü seçenekleri ile FLUENT yazılımı geniş hız rejimleri aralıklarında yüksek hassasiyet sağlayabilmektedir. FLUENT yazılımında bulunan fiziksel modeller ile laminar, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin, kimyasal tepkimelerin, çok fazlı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile hassas çözülmesi sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada, analizler çözüm süresine bağlı olarak bazen tek işlemci ile bazen ise paralel olarak 12 işlemciye kadar çözüm yapılmıştır. Paralel çözüm ile ilgili olarak, UDF ve FLUENT yazılımı paralel çalışmaya uygun hale getirilmiş ve çözümler yapılmıştır.

FLUENT yazılımı paralel olarak aynı makinada farklı işlemci sayılarında bütün çözücü ayarları aynı olacak şekilde yunuslama ve dalma hareketi yapan bir kanat profilinin analizi için çalıştırılmıştır. Buna göre farklı işlemci sayısının çözüm süresine olan etkisini gösteren Şekil 3.2'deki grafik elde edilmiştir.

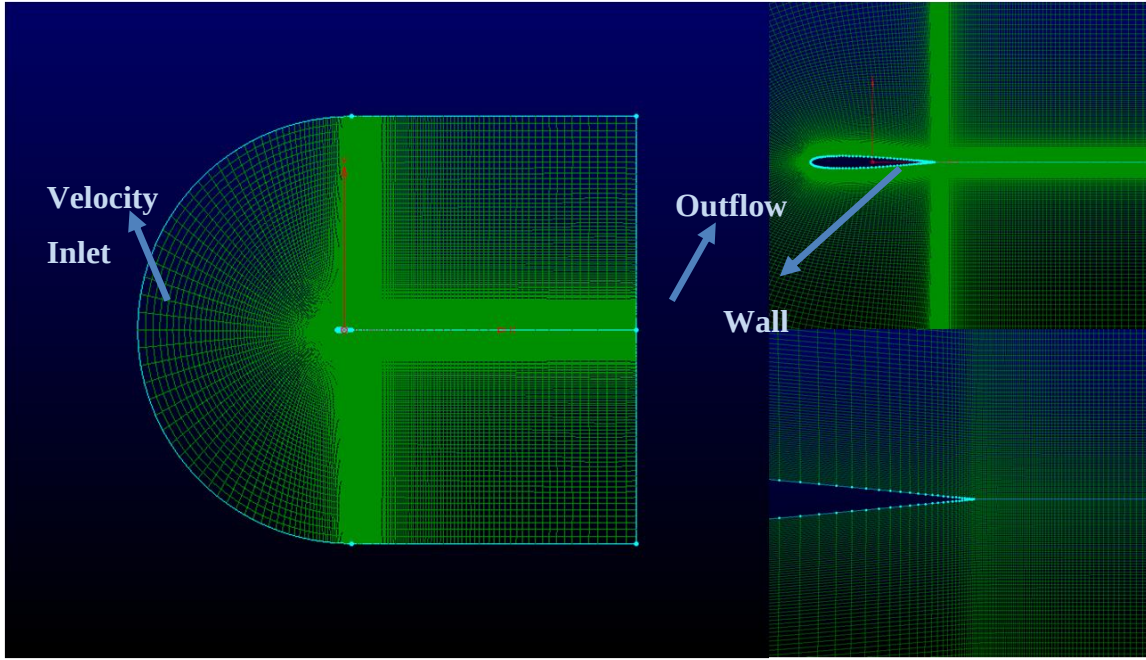


Şekil 3.2 : Fluent yazılımında aynı problemin paralel işlemci sayısına göre çözüm performansı.

Bu grafiğe göre, çözüm yapılan makinede FLUENT yazılımı ile 5-6 işlemciye kadar paralel çözmek çözüm süresi açısından avantajlı iken daha fazla işlemcide çözmenin bir avantajı görülmemektedir.

3.2.2.2. Sınır koşullarının belirlenmesi

Herhangi bir HAD probleminde mutlaka akış alanının sınır koşullarının tanımlanması gerekir. Bunun için ağ oluşturma basamakları tamamlandıktan sonra sınır koşulları uygulanacak dış yüzeyler akış fiziğine göre gruplandırılırlar.



Şekil 3.3 : Akış alanının sınır koşulları.

Akış modellemelerinde ilk olarak akışın gireceği yüzeyler tanımlanır. Bizim çalışmamızda akışın gireceği yüzey Şekil 3.3’de “Velocity Inlet” olarak tanımlanan yüzeyden olacaktır. Bu çalışmada akış yönünün +x eksenini yönünde olduğunu kabul edeceğiz. Başka problemlerde 3 yönün bir bileşeni olarak hız vektörü girilebilir. Akış hız vektörüyle bağlı olarak gelen akımın çıkacağı bölge önemlidir. Oluşturulan akış alanında akımın çıkış yüzeyi “Outflow” olarak tanımlanan yüzeydir. Kanat profili için ise “Wall” tanımı yapılmıştır.

3.2.2.3. Çarpma hareketinin verilmesi

Çarpma hareketinin modeli oluşturulurken yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemlerden bazıları; ağ yapısının sabit kalıp sınır koşullarının simetrik değişim göstermesi, ağ yapısının deforme olmadan profil ile beraber hareket etmesi veya birden fazla bloktan meydana gelen ağ yapısının deforme olarak hareket etmesidir. Bu çalışmada, kanat profiliyle beraber hareket eden deforme olmayan akış alanı yöntemini kullanıldı. Çarpma hareketinin verilmesi, çözücü olarak kullanılan FLUENT yazılımına UDF diye kısaltılan kullanıcı tanımlı fonksiyon (user defined function) ile sağlandı. Modeldeki birçok değişken veya FLUENT modellerinin tamamı bu fonksiyonlar kullanılarak değiştirilebilmekte veya eklenebilmektedir.

UDF, C programlama dili kullanılarak hazırlandı ve bu UDF dinamik olarak çözücüyle beraber okutuldu.

Kısaca yazılan UDF dosyası ile dalma hareketi için sadece akış alanının y eksenindeki hız vektörü, dalma ve yunuslama hareketi için ise akış alanının y eksenindeki hız vektörüyle x eksenindeki dönme hız vektörü tanımlandı. Hazırlanan UDF dosyası EK.A'da gösterilmiştir.

3.2.2.4. Diğer akış parametreleri ve çözücü ayarlarının yapılması

Çözüm ağı oluşturma işleminden sonraki basamak çözücü ayarlarının yapılmasıdır. Çözülecek model 2 boyutlu ve zamana bağlı olduğundan 2D, unsteady ayarları yapılır. Unsteady formülasyonu olarak 1. Dereceden implicit model seçilmiştir. Navier-Stokes denklemleri basınç temelli çözücü kullanılarak çözülmüştür. Ardından sınır koşulları ve malzeme bilgileri girilmiştir. Hız ile basınç arasındaki ilişkiyi düzenleyen algoritma olarak SIMPLE, SIMPLEC, PISO ve COUPLED arasından süreksiz akıslarda ve ağ yapısı düzgün olmayan durumlarda iyi sonuçlar veren PISO algoritması tercih edilmiştir. Basınç ve momentum denklemlerinin ayrıklaştırması için 2. dereceden upwind yöntemi kullanılmıştır.

En son olarak bütün bu ayarlamalardan sonra girdap görüntülerini işleyeceğimiz Ensight programına uygun çıktı vermesini sağlayacak ayarlar yapılmış ve akım periyodikliğe ulaştıktan 10 periyot sonrasına kadar çözüm alınmıştır.

4. SONUÇLAR

4.1. Analiz Sonuçlarına Giriş

Bu çalışmada, bir NACA 0012 kanat profilinin etrafında meydana gelen viskoz, laminar bir akış incelenmiştir. Profile düzgün yayılı (üniform) bir akım alanında sadece dalma ve yunuslama hareketi beraber verilmiştir. Hücüm ve firar kenarından başlayan, iz bölgesi boyunca gelişen girdap hareketleri ve bu hareketlerin meydana getirdiği sonuçlar incelenmiştir.

Çalışmanın sonuçları verilmeden önce doğrulama çalışması yapılmıştır. Bu bölümde ilk olarak UDF ile FLUENT yazılımında verilen kanat ve ağ hareketi doğrulanmıştır. İkinci olarak doğru sonuçlara ulaşabilmek için uygun çözüm ağı seçilmiştir. Ardından uygun zaman aralığının seçilmesi anlatılmış ve akışın periyodik bir davranışa ulaştığı gösterilmiştir. Son olarak, literatürdeki deneysel ve sayısal çözümü bulunan bir çalışma aynı şartlarda tekrarlanmış ve bu çalışmadaki çözümlerle karşılaştırılmıştır.

Doğrulama çalışma sonrasında, sadece dalma hareketi yapan kanat profilinin etrafındaki girdap mekanizmaları incelenmiş ve onun kuvvet katsayıları ve itki verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda farklı genlik ve frekans değerlerinde çözümler yapılarak, bu çözümler karşılaştırılmıştır. Sonraki bölümde yüksek genlikli harekette meydana gelen periyodik olmayan davranışın nedenleri ve nasıl periyodik hale getirilebileceği araştırılmıştır. Son bölümde ise iki farklı hareket tipinde dalma ve yunuslama hareketini beraber yapan bir kanat profili etrafındaki girdap yapıları ve kuvvet katsayıları incelenmiş ve genlik, faz farkı, hücum açısı gibi farklı parametrelerin değişimlerinin etkileri araştırılmıştır.

4.2. Ön Çalışma

4.2.1. Hareketin doğrulanması

Analiz basamağının ilk aşaması analizi oluşturan dalma ve yunuslama hareketlerinin yazılım tarafından doğru olarak verilip verilmediğinin doğrulanmasıdır. 3. bölümde belirtildiği gibi kanat hareketi FLUENT programına C programlama dilinde yazılmış

bir UDF ile verilmektedir. Bu çalışma için kontrol edilecek değerler kanat profilinin akışa dik eksenindeki hareketi ve hücum açısıdır.

Sonuçların görselleştirme (Post-processing) işlemi için EnSight yazılımı kullanılmıştır. Bu yüzden bütün periyotlar için FLUENT yazılımı çalıştırılırken analiz sonucunda değerlendirilecek değişkenler *EnSight case* dosyası formatında yazdırılmaktadır. EnSight yazılımı akış alanı içerisinde istediğiniz bölgelerdeki mesafeleri ölçmede rahatlık sağlamaktadır. Akışa dik eksenindeki hareket için kanat profilinin hücum kenarındaki bir nokta (node) referans olarak alınmıştır.

Hücum açısının tespiti için basit trigonometrik bir bağlantı kullanılmıştır. Elimizde bulunan veriler hücum ve firar kenarının x ve y koordinatlarıdır. Bu yüzden EnSight yazılımı üzerinde kanat profilinin hücum ve firar kenarına kursör yerleştirilmiş ve aşağıdaki denklem hesaplatılmıştır.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Y_f - Y_h}{X_f - X_h} \right) \quad (4.1)$$

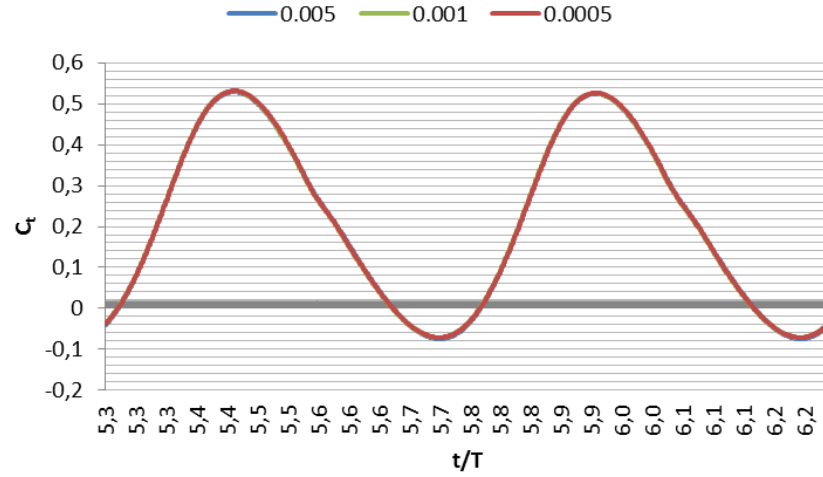
Bu denklemdeki X_f, Y_f sırasıyla firar kenarı x ve y noktasının koordinatlarını X_h, Y_h ise hücum kenarı x ve y noktasının koordinatlarını ifade etmektedir. Burada dikkat edilecek noktalardan birisi yunuslama hareketinin verildiği noktadır. Bu çalışmada farklı noktalarda yunuslama hareketi verilmiştir fakat doğrulama çalışması için 0.25 veter uzunlukta dönmeyi içeren yunuslama hareketi kullanılmıştır.

Sonuç olarak sayısal çözümden gelen hareket pozisyonları ile gerçek olması gereken pozisyonlar karşılaştırılmış ve hareketin doğru olduğu görülmüştür.

4.2.2. Zaman adımının belirlenmesi

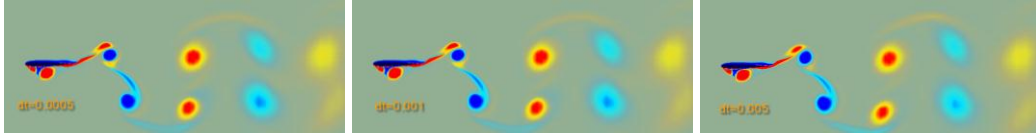
Daimi olmayan akışlarda en önemli parametrelerden birisi de zaman adıdır. Uygun zaman adımını tespit edebilmek için, 5×10^{-4} , 10^{-3} ve 5×10^{-3} olmak üzere 3 farklı zaman aralığı (Δt) denenmiştir. Zaman adımı hariç diğer bütün çözücü ayarları tamamıyla aynı olup $Re=5000$ 'de, $k=2.5$ ve $h=0.3$ durumunda çözüm yapılmıştır.

3 farklı zaman aralıklı sonuçlarda itki katsayılarına bakılmıştır ve Şekil 4.1 bu grafiği göstermektedir.



Şekil 4.1 : Farklı zaman adımları için bir periyotta itki katsayısı grafiği.

Görüldüğü üzere, çözdürülen 3 farklı zaman adımı için eğriler tamamıyla birbiri üzerine oturmaktadır. Yani sonuçlar zaman adımından bağımsız hale gelmiştir.

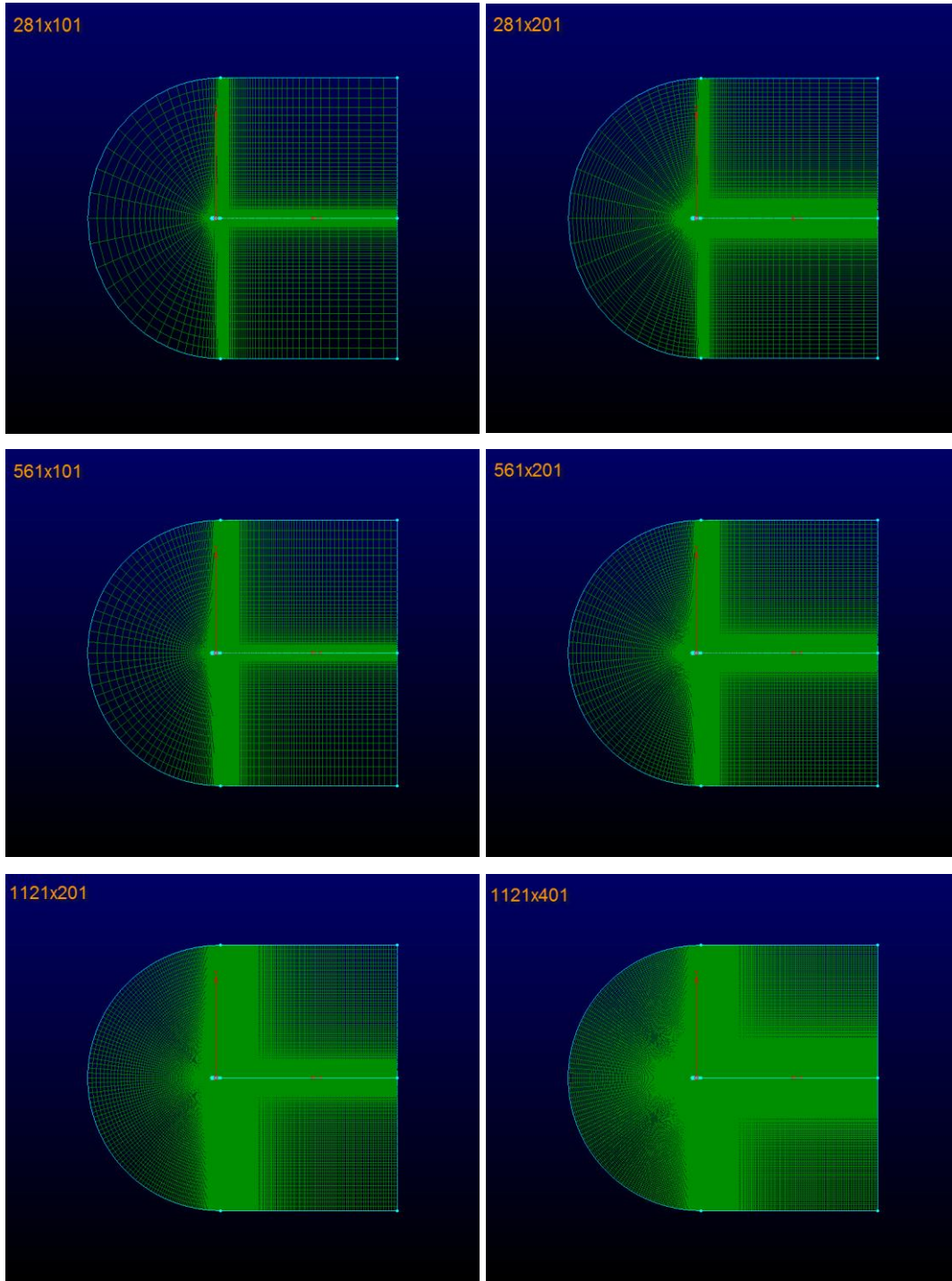


Şekil 4.2 : Üç farklı zaman adımı için akım alanı girdap yapısı.

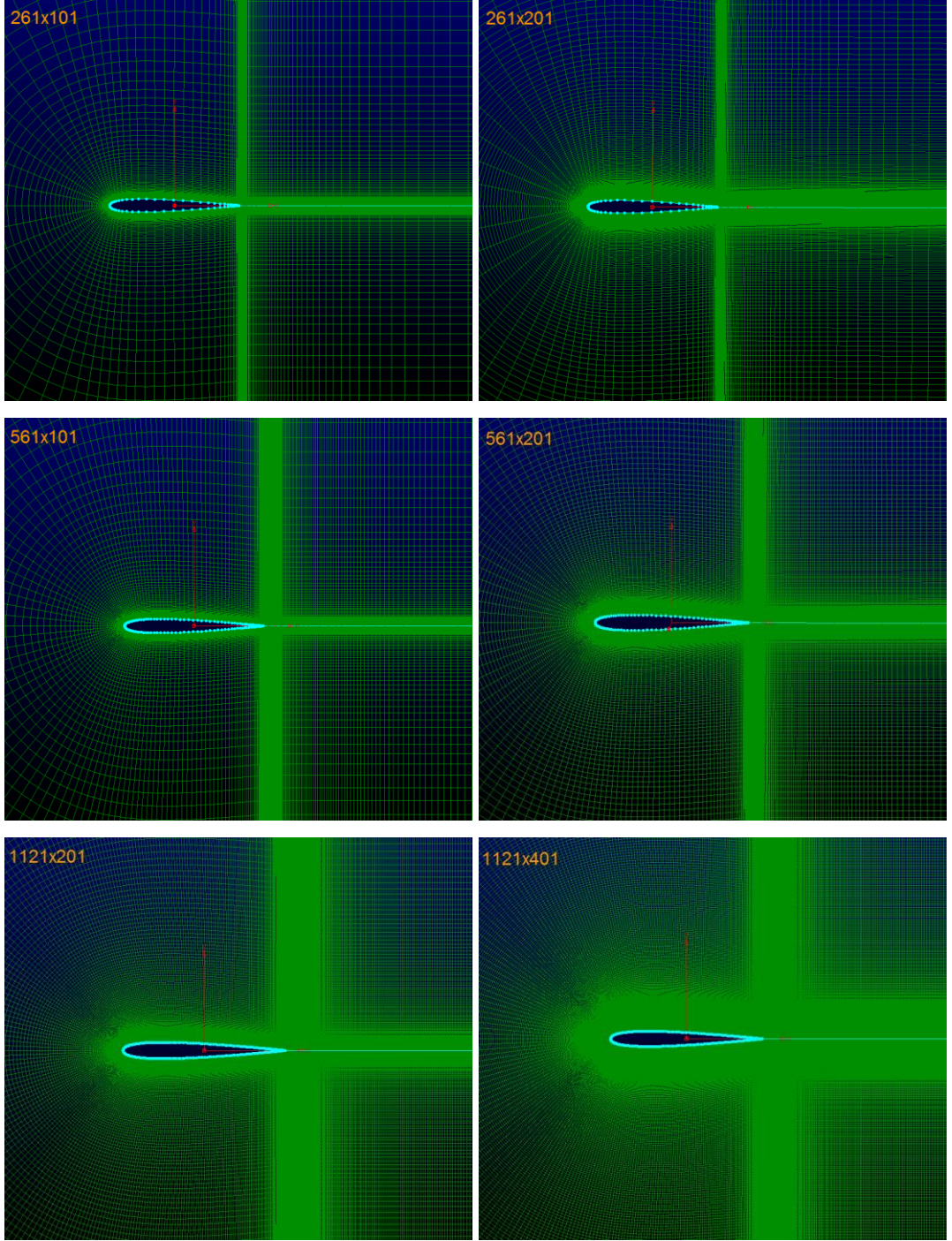
Şekil 4.2 sırasıyla 5×10^{-4} , 10^{-3} ve 5×10^{-3} zaman adımları için elde edilen girdap yapılarını göstermektedir. Görüldüğü üzere çözüm alınan Δt aralıkları girdap yapılarının netliğinde farklılık oluşturmamaktadır. Bu nedenlerden dolayı çözüm adımı için 10^{-3} seçilmiştir.

4.2.3. Çözüm ağı yoğunluğunun belirlenmesi

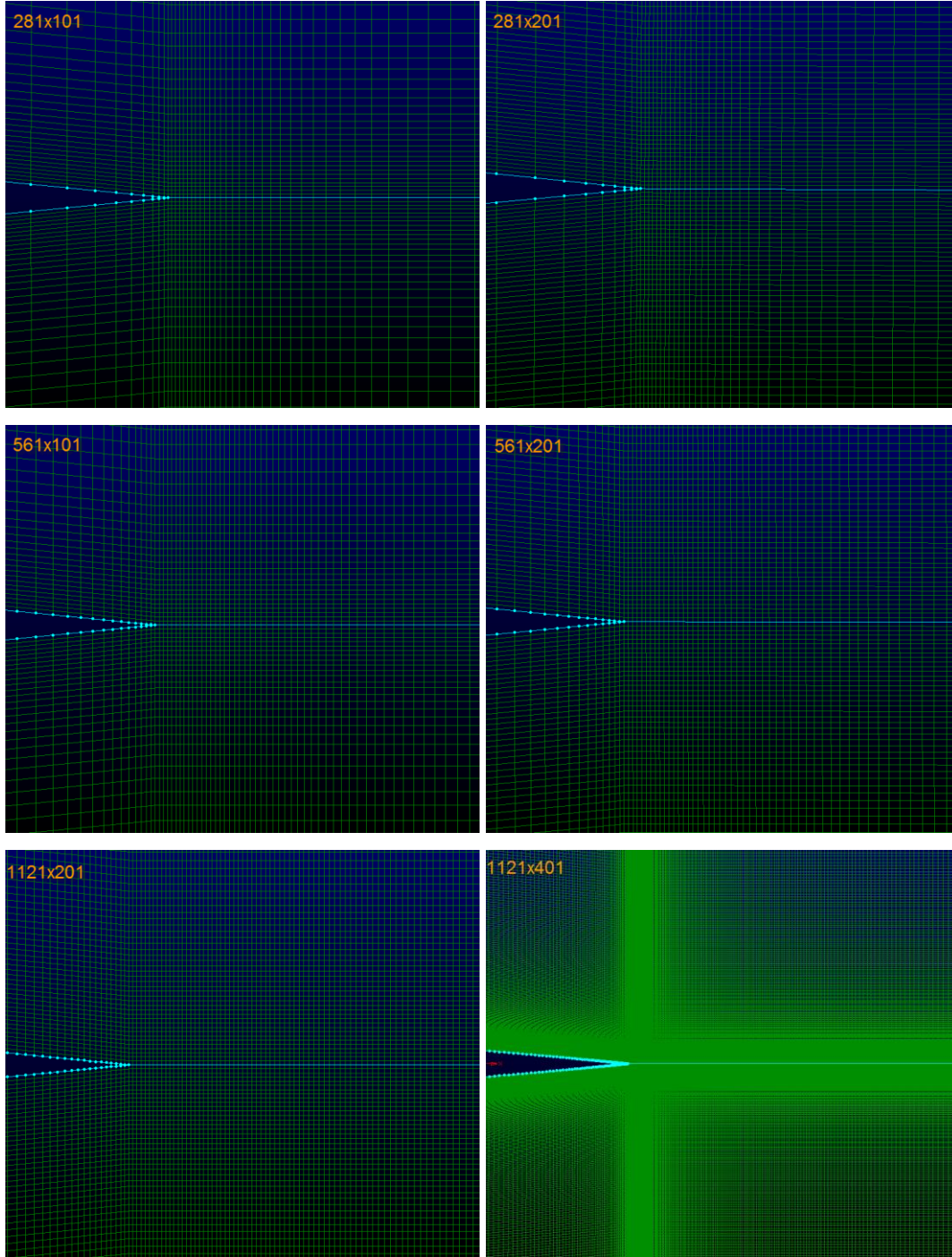
HAD analizlerinde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da çözüm ağı yoğunluğudur. Oluşturulacak çözüm ağı doğru sonuca ulaştıracak yoğunlukta olmakla beraber fazla yoğun olup çok fazla çözüm zamanı gerektirmemelidir. Bu çalışmada 6 farklı yoğunlukta C tipi yapısal çözüm ağı oluşturulmuştur. Bunlar sırasıyla 281 x 101 (kanat profili üzerindeki yüzeyde 81 nokta), 281 x 201 (kanat profili üzerindeki yüzeyde 81 nokta), 561 x 101 (kanat profili üzerindeki yüzeyde 161 nokta), 561 x 201 (kanat profili üzerindeki yüzeyde 161 nokta), 1121 x 201 (kanat profili üzerindeki yüzeyde 321 nokta), 1121 x 401 (kanat profili üzerindeki yüzeyde 321 nokta). Şekil 4.3'de oluşturulan çözüm ağlarından örnekler gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Farklı ağ yoğunluklarının genel görünümü.

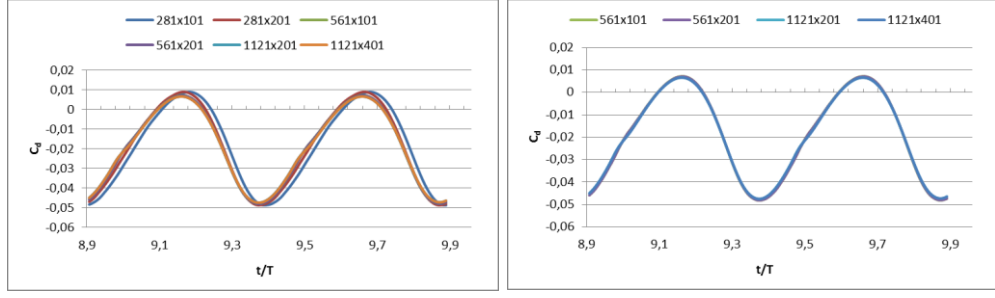


Şekil 4.4 : Farklı ağ yoğunluklarının yakından görünümü.

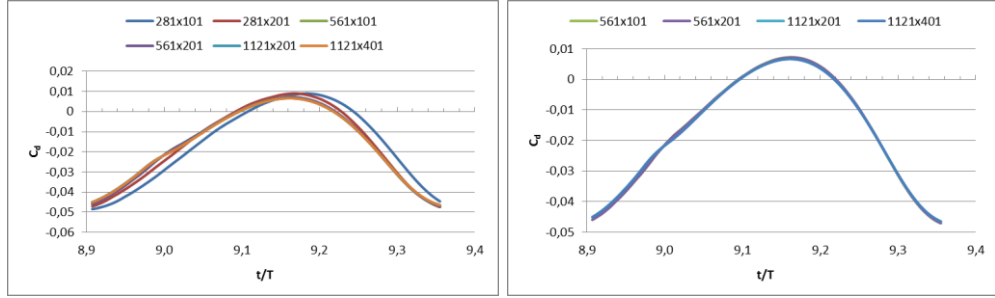


Şekil 4.5 : Farklı ağ yoğunluklarının firar kenarı yakınlarındaki görünümü.

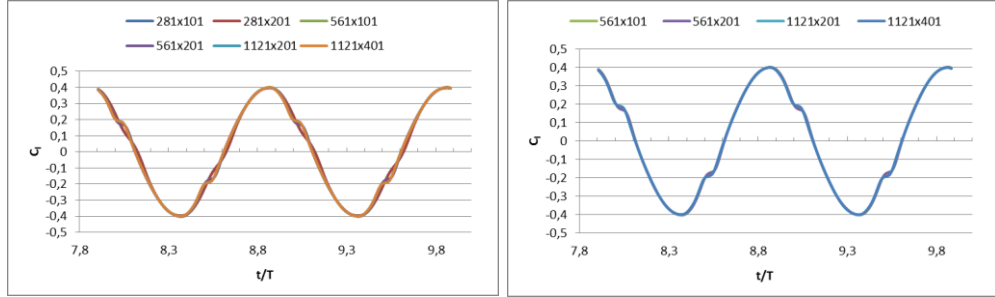
Bu 6 farklı çözüm ağı bir önceki bölümde bahsedilen akış şartlarında çözdürülmüş ve elde edilen itki ve taşıma katsayısı grafikleri Şekil 4.6-9'da gösterilmiştir. Bu grafiklerde dalma hareketinde gerçekleşen bir ve yarı periyot için zamana bağlı kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır.



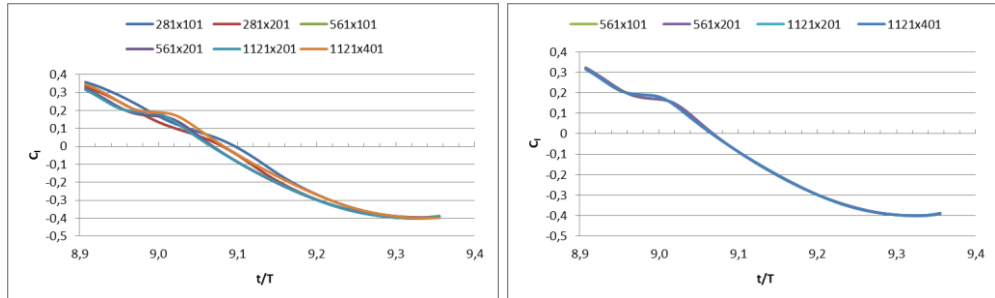
Şekil 4.6 : Bir periyotta 6 ve 4 farklı yoğunluktaki ağ için sürüklenme katsayısı değişimi (sırasıyla sol ve sağ şekil).



Şekil 4.7 : Daha yakından görünüm sağlayan yarı periyotta 6 ve 4 farklı yoğunluktaki ağ için sürüklenme katsayısı değişimi (sırasıyla sol ve sağ şekil).



Şekil 4.8 : İki periyotta 6 ve 4 farklı yoğunluktaki ağ için taşıma katsayısı değişimi (sırasıyla sol ve sağ şekil).



Şekil 4.9 : Daha yakından görünüm sağlayan yarı periyotta 6 ve 4 farklı yoğunluktaki ağ için taşıma katsayısı değişimi (sırasıyla sol ve sağ şekil).

Şekil 4.6-Sol'da 6 farklı çözüm yoğunluklarının sürüklenme katsayısı grafiği görülmektedir. Burada 281 x101 ve 281 x 201 yoğunluklu çözüm ağları hariç

diğerlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. 281 x101 ve 281 x 201 yoğunluklu çözüm ağları çıkarıldığında (sağ şekil) kalan 4 farklı çözüm ağı tamamıyla birbiri üzerine oturmaktadır. Bu değişimi daha yakından görebilmek için Şekil 4.7’de yarı periyot için sürükleme katsayısı değişimleri gösterilmiştir.

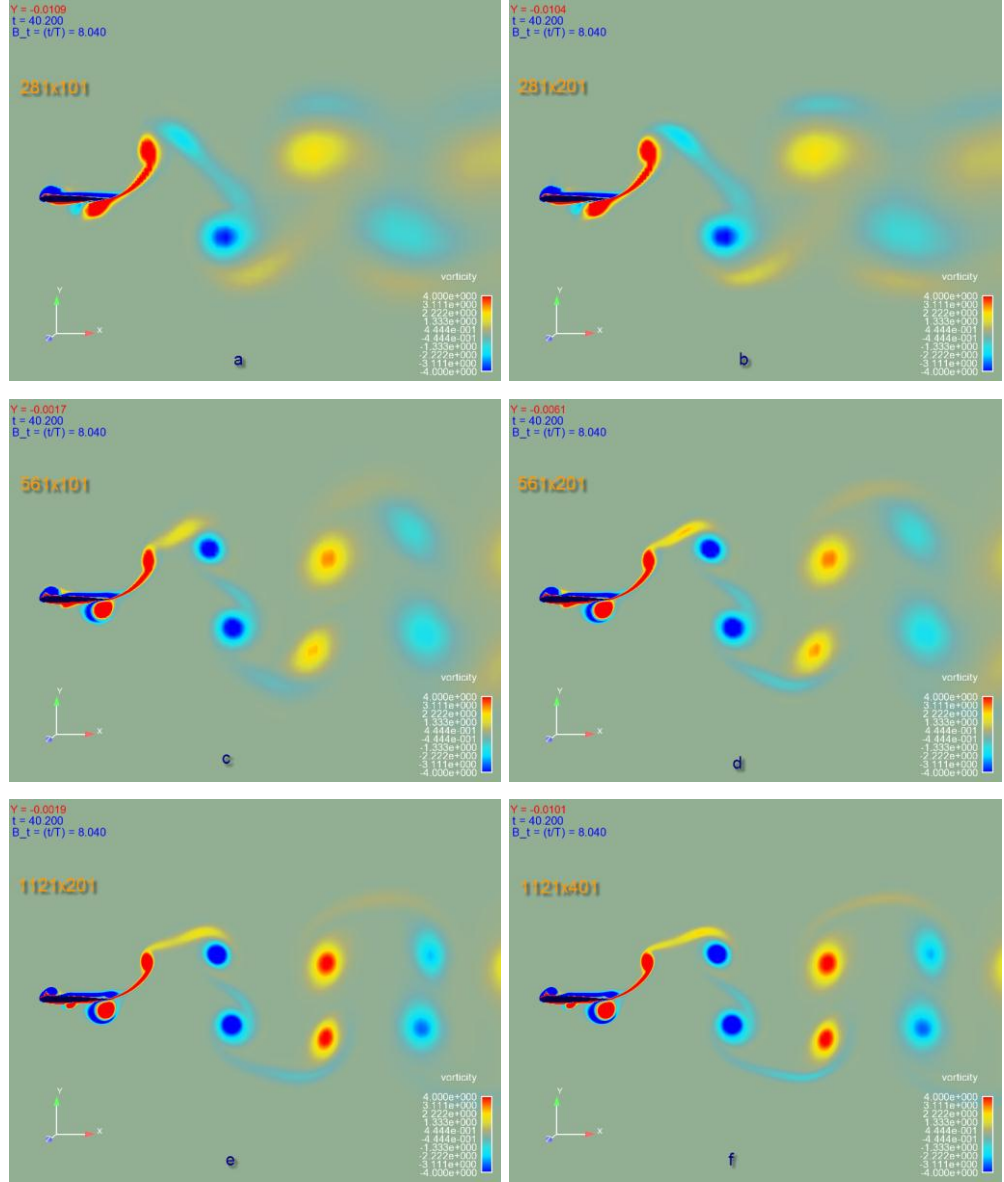
Şekil 4.8’de ise 6 farklı çözüm ağının taşıma katsayısı grafikleri görülmektedir. Sürükleme katsayısında görülen aynı özellikler taşıma grafiğinde de geçerlidir. 561 x101, 561 x 201, 1121 x 201 ve 1121 x 401 çözüm ağları birbiriyle mükemmel bir uyum içerisindedir. Ayrıca kuvvet grafiklerinden bu dört farklı çözüm ağının uygun oldukları görülmektedir.

Çizelge 4.1: 6 farklı çözüm ağının ortalama itki katsayı değerleri.

Akış yönündeki nokta sayısı	Dikey yönde nokta sayısı	$C_{t,ort}$
281	101	$1,9 \times 10^{-2}$
281	201	$1,9 \times 10^{-2}$
561	101	$1,9 \times 10^{-2}$
561	201	$1,9 \times 10^{-2}$
1121	201	$1,9 \times 10^{-2}$
1121	401	$1,9 \times 10^{-2}$

Çizelge 4.1’de çözölen 6 farklı çözüm ağı için zamana bağılı ortalama itki katsayısı sonuçları verilmiştir. Sonuçlara göre farklı çözüm ağı yoğunluğu test edilmesine rağmen ortalama itki katsayısı değerinde bir fark görölmemektedir. Ortalama itki katsayısı, uygun çözüm ağının seçiminde yararlı olmayacaktır.

Şekil 4.10’da ise farklı çözüm ağları için aşağı salınım sırasında aynı zamandaki girdap görüntöleri karşılaştırılmıştır. Şekilde göröldüğü gibi, akım yönünde çözüm ağı yoğunluğunun artması (a,c,e) girdap yapılarının daha da netleşmesini sağlamıştır. Şekil 4.10-a ve b’de kanat profilinin alt yüzeyinde oluşan ikinci (mavi, pozitif) girdap yapısı hiç görünmemektedir. Oysa diğör çözüm ağı yoğunluklarında bu girdap yapıları net olarak görölmektedir. Akışa dik yönde ağı yoğunluğunu artırmak ise iz bölgesinde mantar şeklindeki girdap yapılarının birbirine olan bağlantılarının belirginleşmesine katkısı olmuştur.



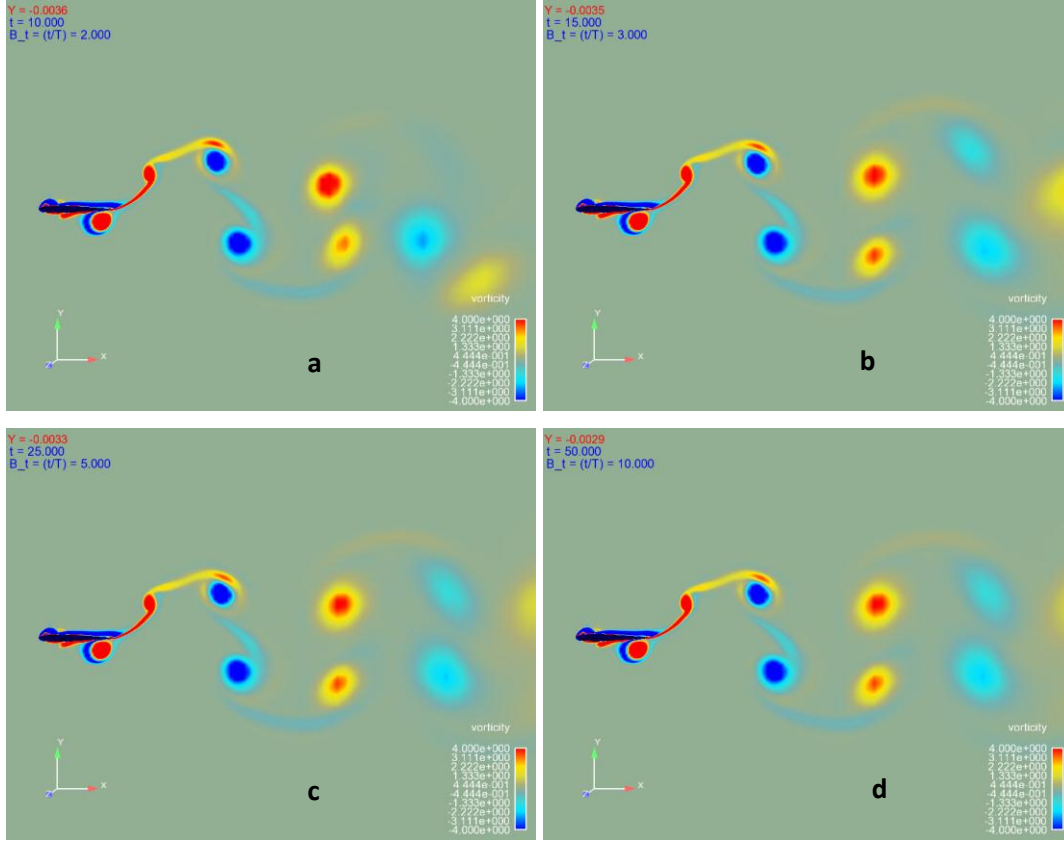
Şekil 4.10 : Farklı ağ yoğunluklarındaki akış alanındaki girdap yapılarının görünümü.

Buradan elde edilen sonuçlarla 561 x 201 ağ yoğunluğu en iyi ağ ile kıyaslandığında akış alanı için yeterli doğruluğu sağlamaktadır. Bu yüzden bundan sonra yapılacak analizlerde 561 x 201 ağ yoğunluğu kullanılacaktır.

4.2.4. Çözümlerin periyodikliği

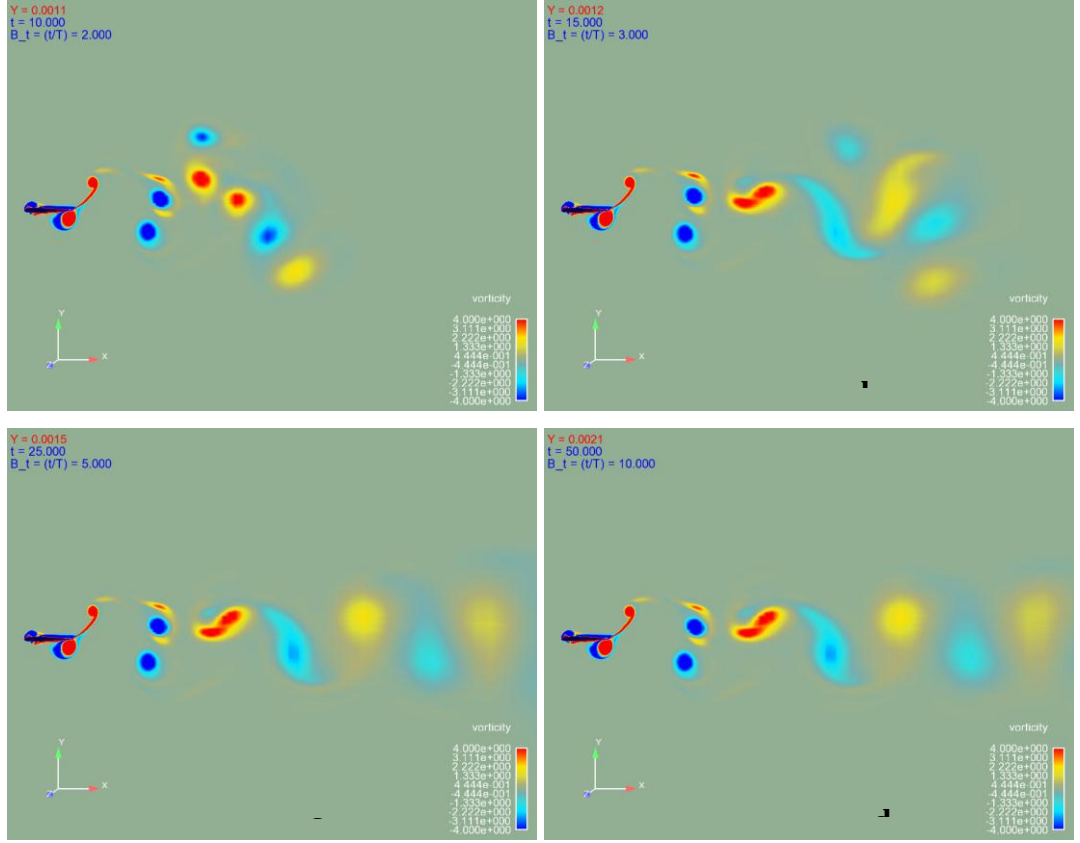
Çözüm periyodikliğe ulaşmadan yapılacak hesaplamalar yanlış sonuçlara götürmektedir. Bu yüzden periyodikliğe ulaşma sınırı tespit edilmelidir. Periyodikliğe ulaşıldığını veya ulaşılmadığını girdap görüntülerinden rahatlıkla anlayabiliriz. Şekil 4.11’de $k=2.5$ $h=0.3$ durumunda 2., 3., 5. ve 10. periyot için aynı dikey pozisyonda kanat etrafındaki girdap yapıları gösterilmiştir. Şekil 4.11’de

sırasıyla a,b,c,d ikinci, üçüncü, beşinci ve onuncu periyodu göstermektedir. Şekil 4.11-b-c-d görüntülerine bakıldığında kanat üzeri veya iz bölgesi girdap yapıları aynı gözükmemektedir. Yani çözülen k ve h değerleri için periyodikliğe ulaşılmıştır. 2. Periyot görüntüsünden kanat üzerindeki girdapların düzenli hale geldiği fakat iz bölgesinin bir düzene ulaşmadığı görülmektedir.



Şekil 4.11 : $k=2.5$ $h=0.3$ için dört periyot girdap görüntüsü.

Şekil 4.12’de ise $k=2.5$ $h=0.4$ durumu için aynı dikey pozisyonda a ikinci periyot, b üçüncü, c beşinci ve d ise onuncu periyot girdap yapısını göstermektedir. Bu sefer iz bölgesi daha geniş alınmıştır. İkinci periyotta kanat üzeri girdap yapıları düzenli bir halde iken, iz bölgesi oldukça karmaşık olarak gözükmemektedir. Üçüncü periyot için de durum aynı şekilde, beşinci periyot için ise artık akış alanının periyodikliğe ulaştığı söylenebilir. Çünkü onuncu periyot ile beşinci periyot karşılaştırılırsa aynı girdap yapıları görülmektedir. Buradan her kh değeri için periyodikliğe ulaşma zamanının aynı olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.12 : $k=2.5$ $h=0.4$ için dört periyot girdap görüntüsü.

Sonuç olarak bu çalışmada periyodiklik sınırı gözetilmiş olup, çözülen akış değerlerine bağlı olarak farklı periyotlar alınmıştır. Değerlendirmelerde periyodiklik sınırından sonra elde edilen itki ve taşıma katsayıları ele alınacaktır.

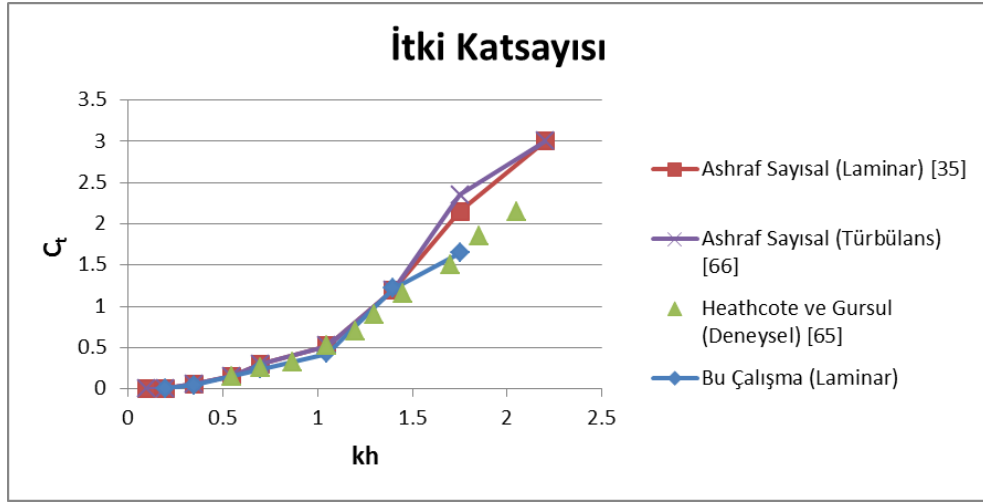
4.2.5. Deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırma

Bu çalışmada yapılan hesaplamalar Heathcote ve Gursul'ün deneysel çalışması [65] ve Ashraf'ın sayısal çalışmasıyla [35,66] karşılaştırılmıştır. Heathcote ve Gursul $Re=2 \times 10^4$ ve $k=0.0-12.0$ değerleri arasında $h=0.175$ değerinde dalma hareketi yapan bir NACA 0012 kanat profili üzerinde kuvvet ölçümleri gerçekleştirdiler. Ashraf $Re=2 \times 10^4$ olduğu bu çalışmalarda türbülans modelinin etkisini görebilmek için hem laminar hem de Spalart-Allmaras türbülans modeliyle çözüm yapmıştır.

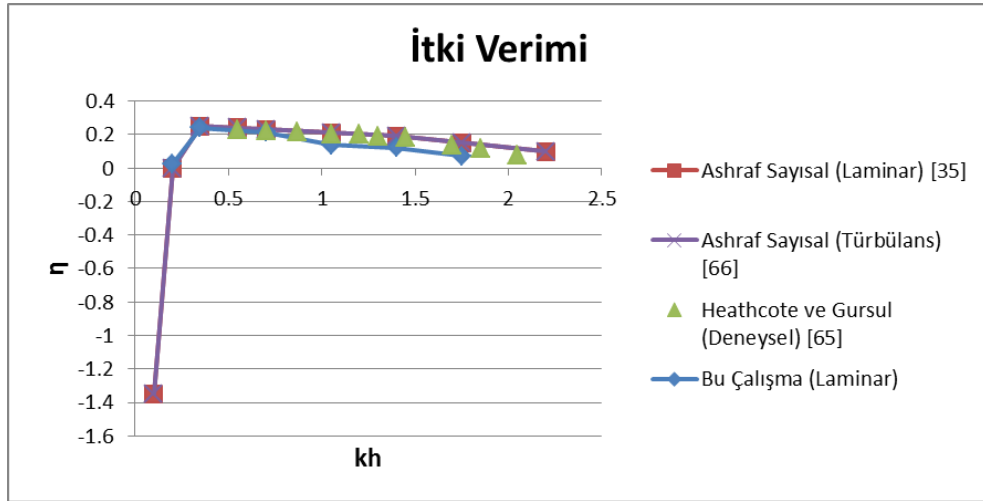
Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te zamana bağlı olarak itki katsayısının ve itki veriminin kh değerine göre değişimleri gösterilmiştir. İtki katsayısı, kh değeri 1.5'dan daha az olan kısımlarda hem deneysel sonuçlarla hem de Ashraf'ın sayısal sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu gözükmemektedir. kh 'ın 1.5'dan daha yüksek değerlerinde, Ashraf'ın çalışmasının deneysel sonuçlardan uzaklaştığı ve ayrıca laminar ile türbülans

modelleri arasında da fark olduğu görülmektedir. Ashraf kh değerinin 1.5’den daha yüksek olduğu durumlarda, geçiş akışlarının varlığından dolayı laminar akış kabullerinin yapılamayacağını söylemiştir.

Bu çalışmada ayrıca kh değerinin 1’den büyük olduğu durumlarda artan frekansın etkisiyle akışta periyodik olmayan girdap mekanizmalarının meydana geldiği gözlemlenmiş fakat kuvvet değerlerinin deneysel ve sayısal çalışmalardan uzaklaşmadığı görülmüştür.



Şekil 4.13 : İtki katsayısının kh değerine göre değişimi.



Şekil 4.14 : İtki veriminin kh değerine göre değişimi.

Sonuç olarak, yapılmış olan Navier-Stokes çözümleriyle Ashraf'ın sayısal ve Heathcote ve Gursul'un deneysel çalışmalarıyla itki katsayısı ve itki veriminin uyumlu olduğu gözlemlenmiş (kh değeri 1.5'e kadar) ve genel artış azalış eğilimlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

4.3. Sonuçlar

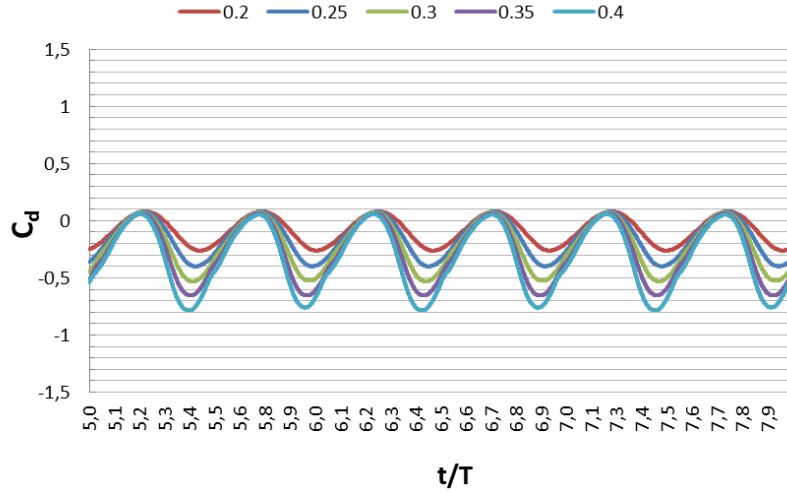
Bu bölümde ilk olarak dalma hareketi yapan kanat profilinin itki katsayısı ve itki verimini etkileyen parametreler gösterilecektir. Ardından yüksek genlikteki salınımlarda meydana gelen itki veriminin düşmesine sebep olan girdap yapıları incelenecek ve son olarak dalma ve yunuslama hareketini beraber yapan kanat profili etrafındaki girdap yapıları incelenmiştir.

4.3.1. Yalnızca dalma hareketinde kuvvet katsayıları ve akışın girdap yapısı

İlk olarak, hareketin genlik değişiminin etkisini tanımlamak ve hücum kenarı girdaplarının çıkış kuvvetlerini nasıl etkilediğini anlayabilmek için öncelikle sadece dalma hareketi için çözüm yapılmıştır.

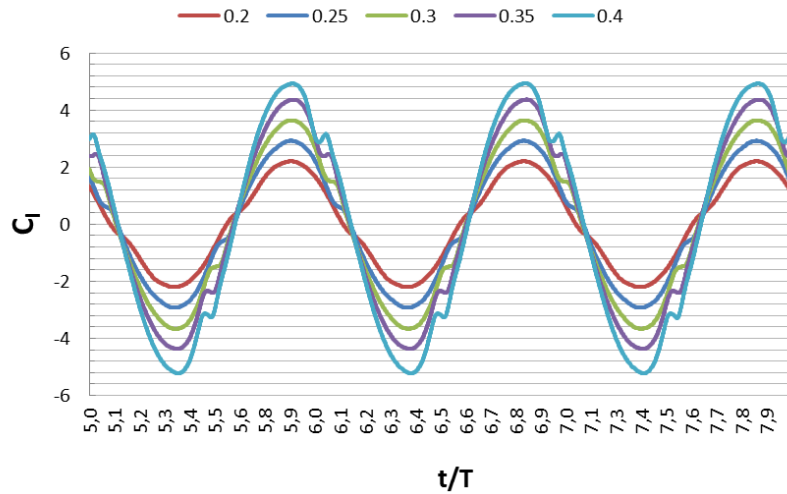
Bu bölümde, sabit bir k değeri için artan kh değerlerinde çözüm yapılmıştır. Reynolds sayısı 5000’de sabitlenmiş olup $k=2.5$ ve $h=0.2-0.7$ arasındaki değerlerde sadece dalma hareketi yapan bir kanat profili göz önüne alınmıştır. Şekil 4.15 ve 4.16’da problemin periyodik kaldığı aralıkta artan h ’a göre elde edilen anlık sürükleme ve taşıma katsayı grafikleri gösterilmiştir.

İtki katsayısı (C_t) serbest akım yönüne göre sürükleme katsayısının (C_d) negatif değeridir. Şekil 4.15’deki C_d ’nin negatif değeri yani dikey eksenle simetriği, C_t olarak düşünülebilir. Bu bilgiler ışığında, C_t Şekil 4.15’de bütün genlik değerlerinde 0 eksenine göre simetrik olmadığı ve genlik arttıkça ortalama C_t ’nin arttığı görülmektedir. Yani h değeri arttıkça itki üretimi de artmaktadır. Ayrıca, C_t eğrisinin bir periyodunun dalga boyu Şekil 4.16’da görülen C_l eğrisinin bir periyodunun dalga boyunun iki katıdır. Bunun sebebi dalma hareketinde hem aşağı hem de yukarı yönde itki üretilmesidir.



Şekil 4.15 : Artan çırpma genliğine karşı anlık sürüklenme katsayısı değişimi.

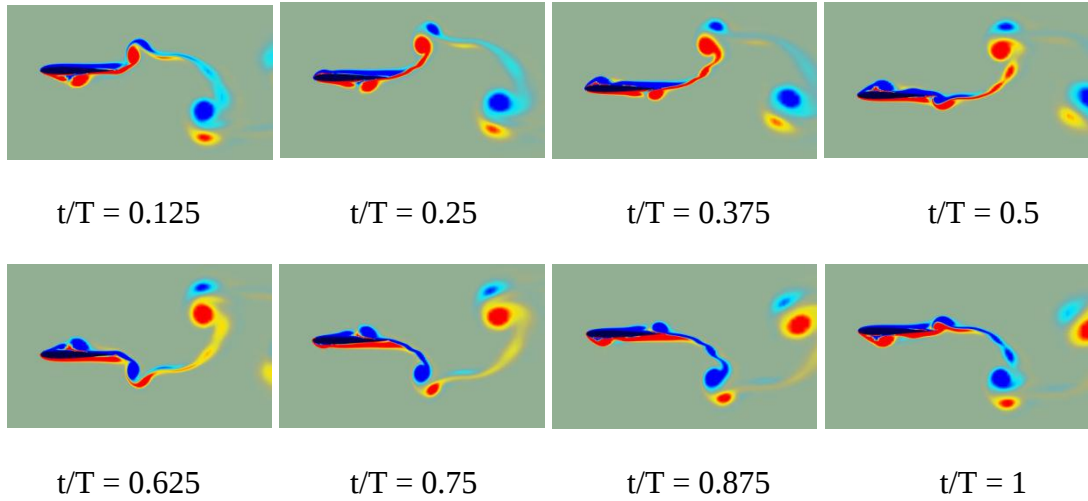
Şekil 4.16’da ortalama $C_l=0$ eksenine simetrik hareket ettiği görülmektedir. Zaten simetrik ve hücum açısı olmadan bir hareket gerçekleştiğinden ve simetrik bir kanat seçimi yapıldığından dolayı bu şekilde bir sonucun elde edilmesi beklenmekteydi. Burada $h=0.2$ eğrisine bakıldığında düzgün, hiçbir bozuntu olmaksızın simetrik bir salınım yaptığı görülürken $h=0.2$ değerinin üstündeki değerlerde ise ani bir değişimin (çıkıntı) meydana gelmektedir. Artan h değerinde kanat üzerinde büyüyen LEV’in taşıma üzerinde bu şekilde bir ani değişime sebep olmaktadır.



Şekil 4.16 : Artan çırpma genliğine karşı anlık taşıma katsayısının değişimi.

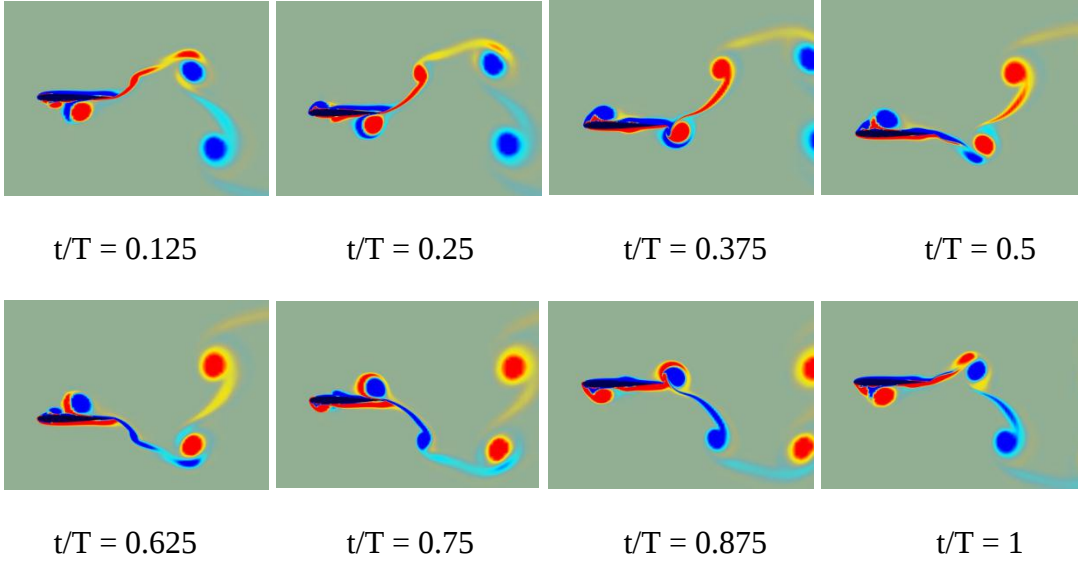
Kuvvet değerlerinin yanında itki artmasına sebep olan girdap yapıları da incelenmiştir. Şekil 4.17’de $h=0.2$ değerinde kanat profilinin bir periyottaki aşağı (1.satır) ve yukarı (2.satır) hareketi sırasında $t/T=0.125$ aralıklarla girdap yapıları gösterilmiştir. İz bölgesinde $t/T=0.125$ anında mavi renkli büyük boyutlu girdap firar

kenarı girdabı olup saat yönünde (pozitif) dönmektedirler. $t/T=0.125$ anında kanat profiline altında ve üstünde nisbeten daha küçük boyuttaki girdap ise hücum kenarı girdabıdır. Hem aşağı hem de yukarı harekette kanat üzerindeki LEV firar kenarına doğru kanat profili üzerinde kaymaktadır. Hareket boyunca LEV'in kanat profili üzerinden fazla uzaklaşmadığı görülmektedir. $t/T=0.5$ anında LEV firar kenarına ulaşmış ve daha önce meydana gelen aynı yönlü TEV'e bağlanarak iz bölgesine aktığı görülüyor. LEV çok yavaş hareket ettiğinden iz bölgesinde negatif TEV'den kopuyor ve zıt yönde dönen TEV ile beraber hareket ediyor. t/T değeri 0.625'den 1'e gidildikçe negatif TEV'in üzerinde hareket eden LEV'in, şiddetinin azalttığı görülüyor. Bunun sebebi yakınındaki zıt yönlü dönen TEV veya ağ yapısının o bölgede azalması olabilir. Girdap yapıları aşağı ve yukarı harekette tamamıyla birbirinin simetrisi olarak gözükmemektedir. Bu hareket, bu yapıyla çözümler arasında en az itki üreten çözümdür.



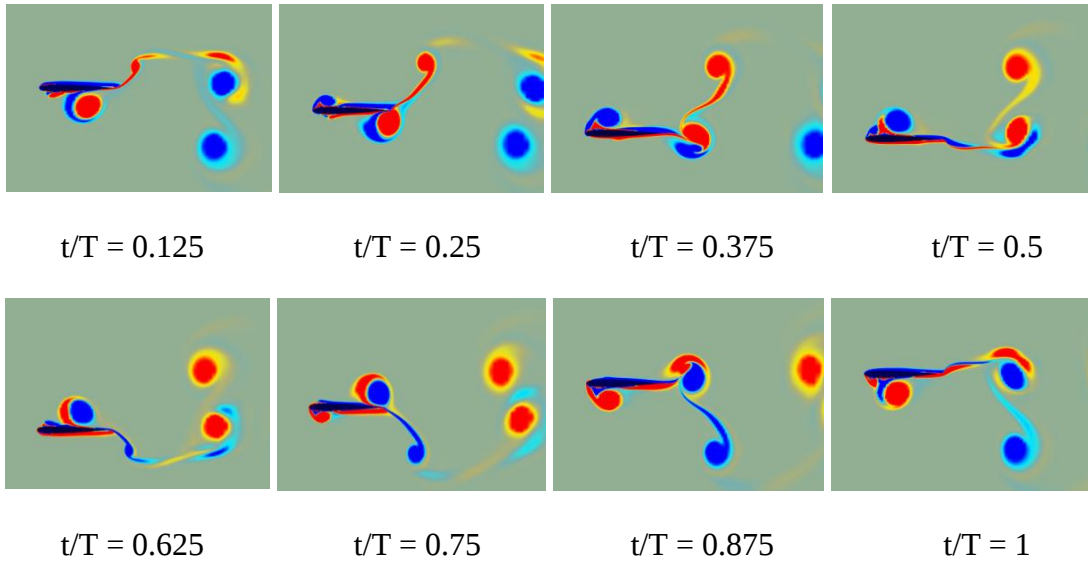
Şekil 4.17 : $h=0.2$ için kanat profiline aşağı (ilk satır) ve yukarı (alt satır) hareketi sırasında girdap görüntüsü.

Şekil 4.18'de $h=0.3$ için girdap görüntüleri gösterilmiştir. $h=0.2$ çözümüyle kıyaslandığında $h=0.3$ durumunda kanat altında ve üzerinde oluşan hücum kenarı girdabının $h=0.2$ 'de yaklaşık olarak 0.2 veter boyunda iken $h=0.3$ 'de 0.3 veter boyuna ulaştığı görülüyor ve LEV'in önünde zıt işaretli yeni bir girdabın oluştuğu ve onu sarmaladığı görülmektedir. $t/T=0.375$ anında LEV'in kanat üzerinden kayarak firar kenarına geldiğinde aynı yönde dönen TEV'e bağlanamadan iz bölgesine bu şekilde kaydıkları görülüyor ve iz bölgesinde aynı yönde dönen büyük çaplı girdap oluşturuyorlar.

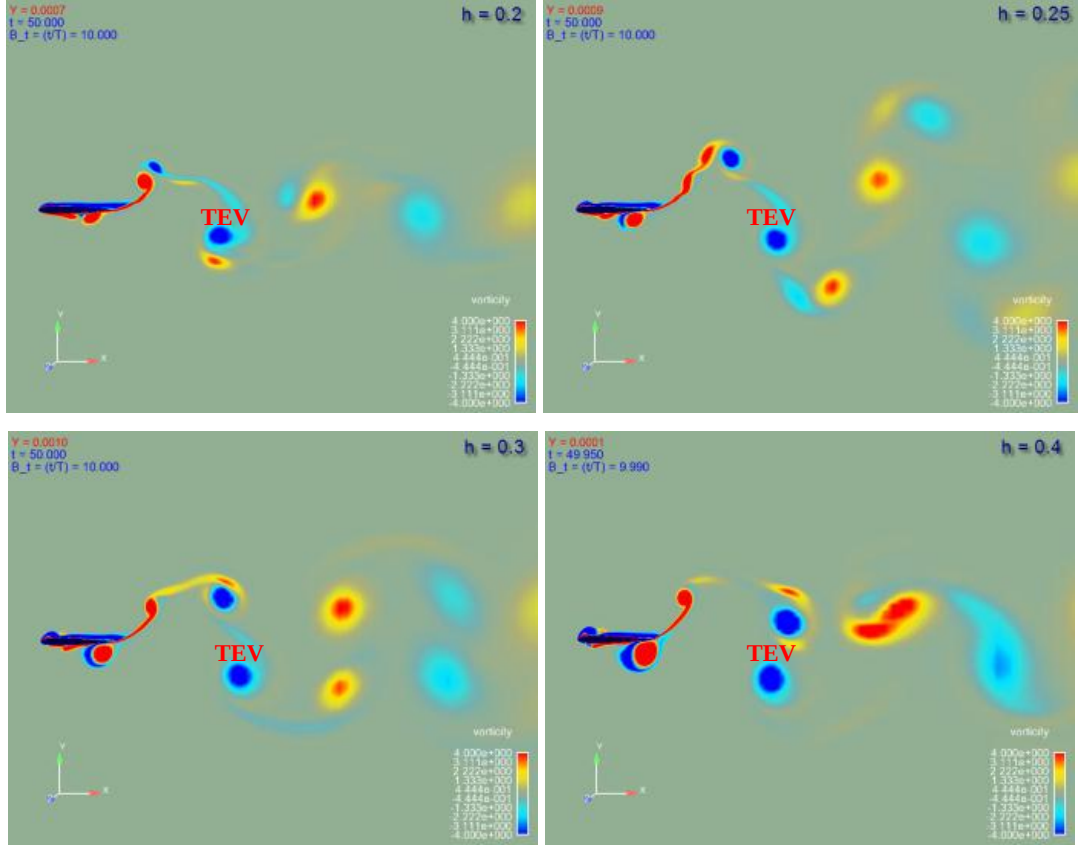


Şekil 4.18 : $h=0.3$ için kanat profilinin aşağı (ilk satır) ve yukarı (alt satır) hareketi sırasında girdap görüntüsü.

Şekil 4.19’da bir periyot için $h=0.4$ ’te girdap görüntüleri gösterilmiştir. $t/T=0.125$ ’te genliğin daha düşük değerlerindeki girdaplara göre LEV’in daha da büyüdüğü ve 0.35 veter boyuna ulaştığı görülürken LEV’in önünde oluşan zıt işaretli yeni girdabın da geliştiği ve sanki vorteks çifti gibi hareket ettikleri görülmektedir. LEV’in kanat üzerinde hareketiyle firar kenarına geldiğinde oluşan aynı yönde dönen TEV’e bağlandığı ve ikinci oluşan girdabın firar kenarı sonunda hücum kenarı girdabının gücünü zayıflatmaktadır.

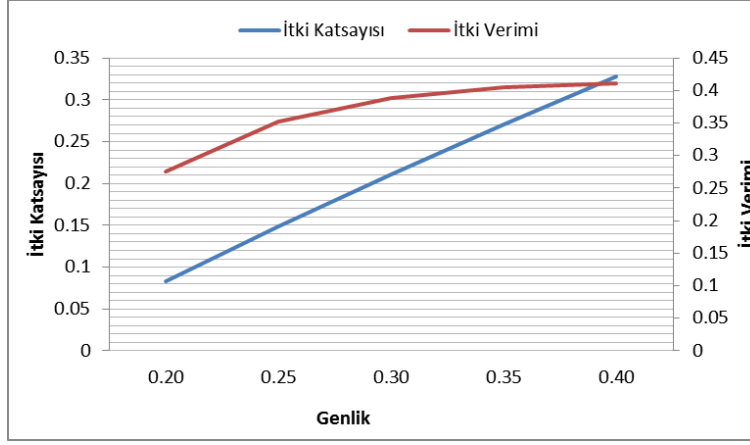


Şekil 4.19 : $h=0.4$ için kanat profilinin aşağı (ilk satır) ve yukarı (alt satır) hareketi sırasında girdap görüntüsü.



Şekil 4.20 : 4 farklı genlik için kanadın iz bölgesi girdap yapıları.

Şekil 4.20’de 4 farklı genlik değeri için kanadın iz bölgesi girdap yapıları gösterilmiştir. Kanat altındaki LEV h arttıkça büyümekte ve LEV’in önünde de zıt işaretli ikinci bir girdap yapısının oluşmaya başladığı görülmektedir. Bu oluşan ikinci girdap $h=0.3$ ve $h=0.4$ değerlerinde LEV’i sarmaladığı ve LEV’in kanat profiliyle bağını azalttığı görülmektedir. Kanat üzerinde kaymakta olan LEV h arttıkça iz bölgesinde akım yönünde aynı yönde dönen TEV’e yaklaşmakta hatta $h=0.4$ değerinde TEV’i geçmektedir. Daha dikkatli bakılacak olursa TEV konumları h arttıkça değişmiyorken LEV’in yeri ve büyüklüğü iz bölgesindeki girdap görüntüsündeki değişikliğin temelini oluşturmuştur. Genel olarak her bir çözüm için zıt yönlü dönen büyük çaplı girdapların iz bölgesi boyunca yayıldığı görülmektedir. $h=0.3$ değerinde düzenli bir zıt girdap yapısı görünümü elde edilmiştir. Bu görüntü ters Karman girdap caddesi olarak adlandırılmaktadır ve sadece iz bölgesine bakılarak hareketin itki ürettiğini göstermektedir.



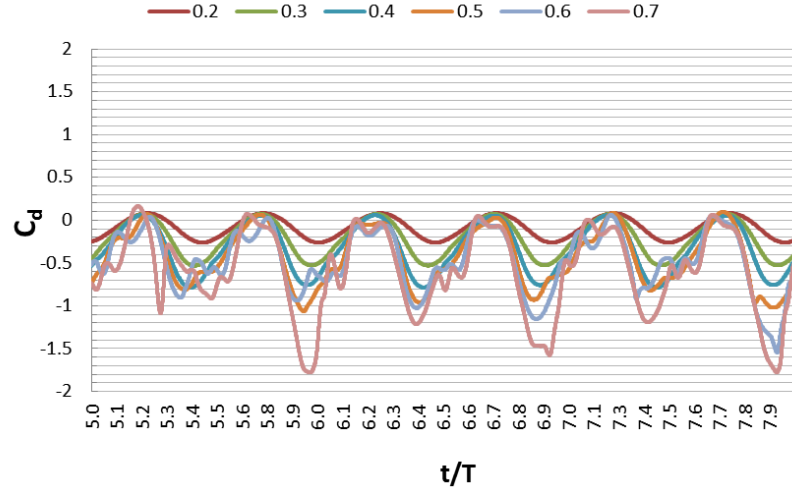
Şekil 4.21 : İtki katsayısı ve itki veriminin değişimi

Şekil 4.21’de genliğin artması durumunda itki katsayısı ve itki veriminin değişimi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, genliğin artması itki katsayısında lineer bir artışa sebep olurken itki veriminde $h=0.35$ değerine kadar yavaş bir artış ve daha sonrasında artışın sabitlendiği görülmektedir. Bu durum Young ve Lai’nin [40] çalışmasıyla birebir uyumludur. Onlar çalışmalarında farklı frekans değerlerinde Strouhal sayısı 0.05-0.1 değerleri arasında iken itki veriminin bir tepe noktaya ulaşacağı ve bu değerden sonra düşeceğini gösterdiler. Bu çalışmada $h=0.4$ durumu Strouhal sayısı 0.063’e denk gelmektedir. Yani Young ve Lai’ye göre genlik bu değerin üstüne çıktığında itki veriminin düşmesi gerekmektedir.

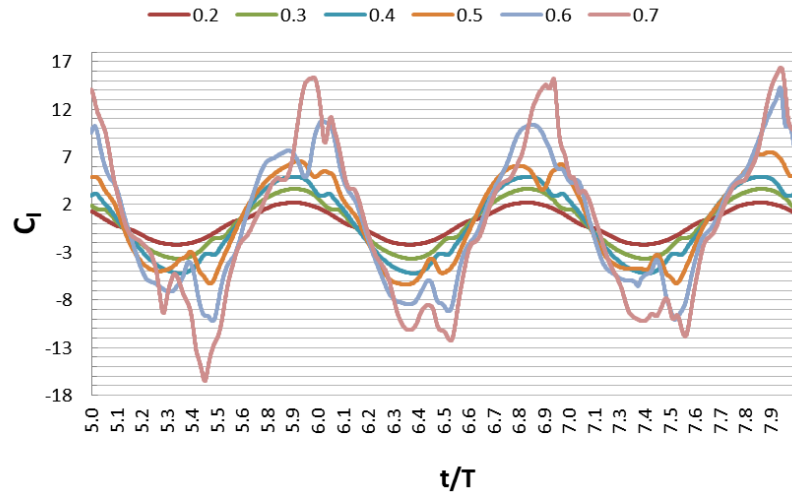
Sonuç olarak; sadece dalma hareketiyle yapılan çalışmada dalma genliğinin artmasıyla üretilen itkinin lineer olarak arttığı fakat itki veriminin belirli bir maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Artan dalma genliğiyle beraber LEV’in şiddetini (büyüklüğünü) artırdığı ve iz bölgesinin şekillenmesinde büyük önemi olduğu görülmüştür. Ayrıca genliğin yüksek değerlere ulaşmasıyla LEV’in önünde ikinci bir zıt yönde dönen girdabın oluştuğu gözlemlenmiş ve bu girdabın LEV’in şiddetini azaltan bir etkisinin olduğu görülmüştür.

Dalma genliği arttırıldıkça, taşıma katsayısı eğrisinde bazı ani değişimler görülmüş ve bunun sebebinin büyüyen LEV’in firar kenarındaki etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Dalma genliği 0.5 ve daha üzerine çıktığında kuvvet katsayı değerleri periyodik davranış göstermemeye başladığı görülmüştür. Şekil 4.22 ve 4.23’de sürüklenme ve taşıma katsayısı periyodik davranış gösteren ve göstermeyen 0.5 değeri üzerindeki durumlar aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.22 : Yüksek genlikli harekette anlık sürüklenme katsayısı grafiği.



Şekil 4.23 : Yüksek genlikli harekette anlık taşıma katsayısı grafiği.

Yeni oluşan ikinci girdabın etkisinin önemli olduğu ve daha yüksek genlikli harekette görülen bu periyodik olmayan davranışın nedeni olduğu öngörülmüştür. Bölüm 4.3.2’de çırpma genliği 0.5’ten daha büyük olduğu durumlarda periyodik olmayan davranışa sebep olan nedenler araştırılmaya çalışılmıştır.

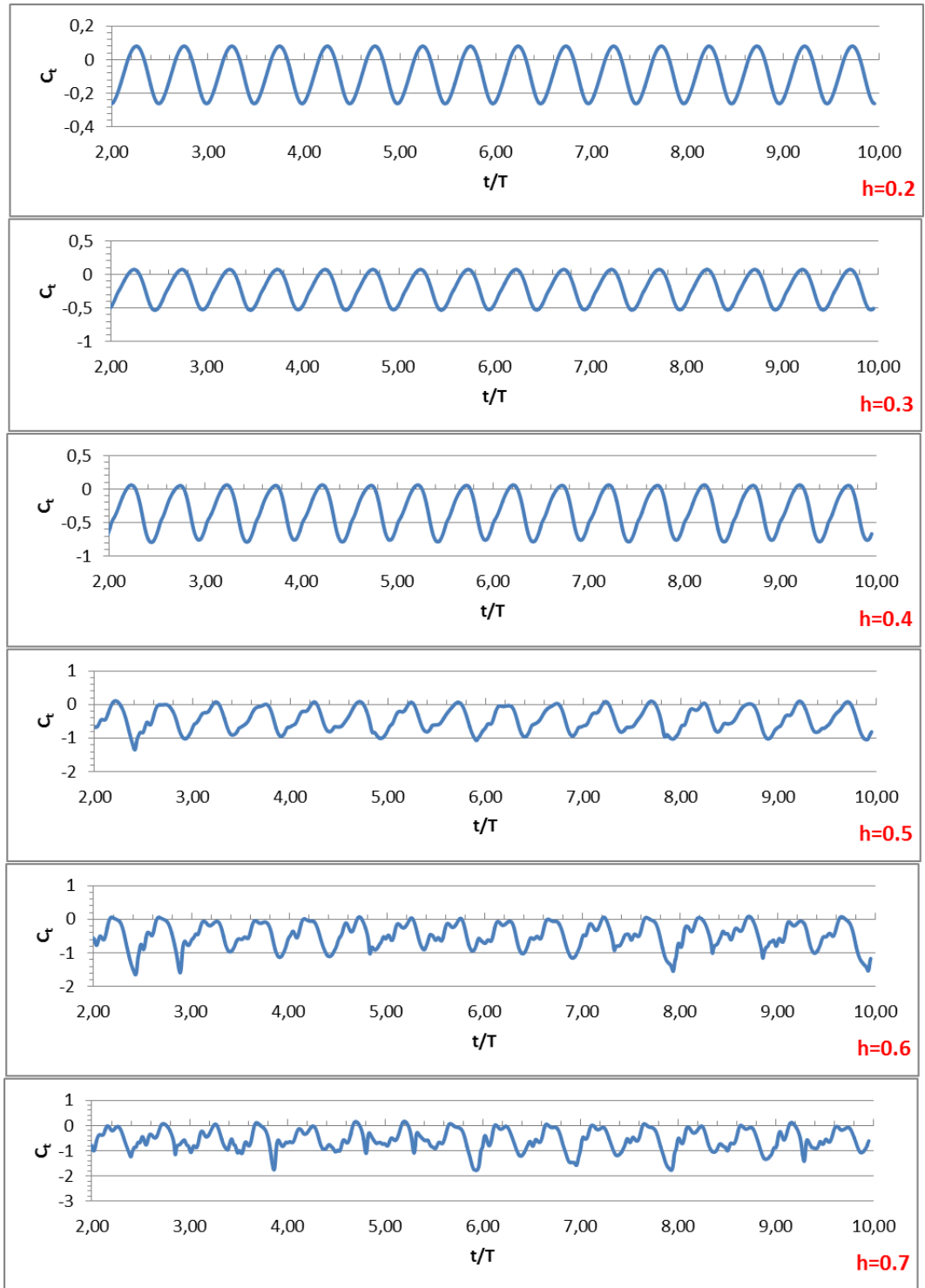
4.3.2. Yüksek genlikte dalma hareketi

Çırpma genliğinin artışı $Re=5000$ $k=2.5$ ’de $h=0.4$ ’den sonra hareketin periyodikliğini bozmaktadır. Periyodik olmayan kuvvet üretimi, çırpkan kanatlı MHA’ların kontrolünü ve görevlerini yerine getirmelerinde sorunlara neden olabilir. Bu yüzden ilk bölümde bahsettiğimiz çırpkan kanatlı canlıların veya tasarlanan araçların uçtukları

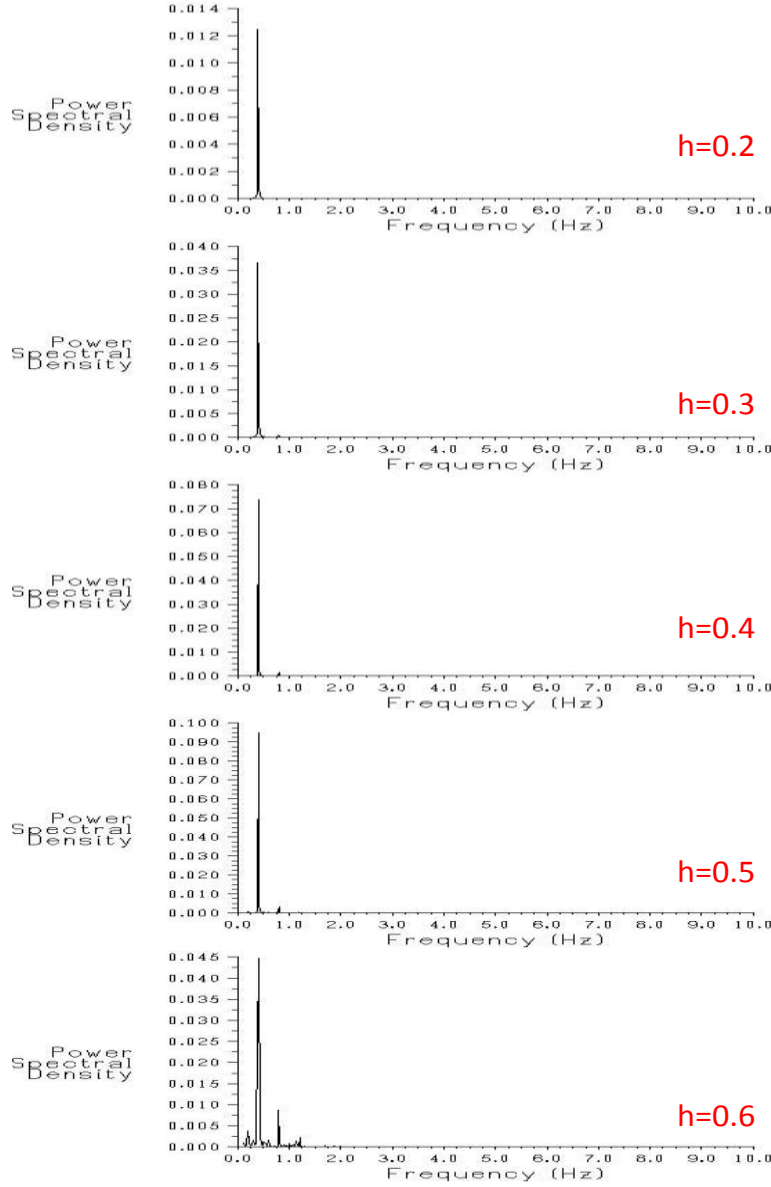
10^3 - 10^5 Re sayısı aralığında yüksek genlikli dalma yapan kanatta meydana gelen periyodik olmayan akışın çok iyi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir.

Bu bölümde yüksek genlikli hareketlerde hareketin periyodikliğini bozan yapının ne olduğunu araştırılmış ve nasıl periyodik hale getirilebileceği incelenmiştir.

Şekil 4.24’de zamana bağlı itki katsayısı üzerinde dalma genliğinin değişiminin etkisi gösterilmiştir. Şekilde her bir çözüm için 8 periyotluk yani 8 salınım için itki katsayısı grafiklerine yer verilmiştir. Önceki çalışmalarla uyumlu olarak C_d grafiklerinden h arttıkça ortalama itkinin arttığı görülmektedir. $h=0.5$ ’den sonra C_d grafiğinin simetrikliği bozulmaktadır. Bu bozulma, hareketin periyodiklikten periyodik olmayan davranışa doğru geçtiğini göstermektedir. Bu durumu doğrulamak için C_d üzerine Fast Fourier Transform (FFT) modeliyle güç spektrum analizi (power spectrum analysis) uygulanmıştır. Şekil 4.25’de FFT analizinin sonuçları artan çarpma genliğine bağlı olarak gösterilmiştir. Buna göre düşük genlikli $h=0.2$ durumu için Power Spectral Density (PSD) grafiğinde tek bir tepe noktası görünürken genlik arttığında $h=0.5$ ’ten sonraki değerlerde birden fazla tepe noktası belirgin hale gelmektedir. Ayrıca $h=0.6$ değeri için PSD grafiğinde birden fazla çalkantı olduğu görülüyor ki bu da periyodik olmayan düzensiz bir davranışın göstergesidir.



Şekil 4.24 : Sabit çırpma frekansı artan genlikte sürüklenme katsayısının değışimi.



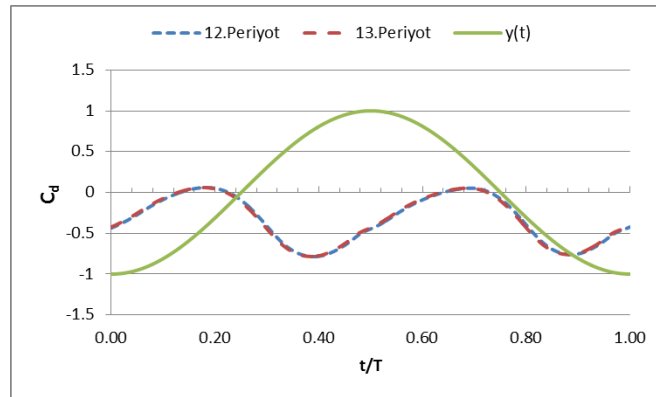
Şekil 4.25 : Sabit frekans artan genliğe göre FFT analizi.

Şekil 4.24’de görülen sürükleme katsayısı grafiklerinden $h=0.4$ ve altı değerlerin tamamıyla periyodik davranış sergilediği bu değer üzerinde periyodikliğin bozulduğu Bölüm 4.3.1’de belirtilmişti. $h=0.5$ ’de her iki periyotta bir sanki periyodik bir davranış sergiliyor gibi görünmektedir. Daha yüksek genlik değerlerinde ise tamamıyla asimetrik bir davranış görünmektedir. Bu yüzden bu çalışmada 0.4 ve altı değerler periyodik davranış, 0.5 değeri periyodik davranışa geçiş bölgesi ve 0.5 değeri üzeri ise periyodik olmayan davranış şeklinde sınıflandırılacaktır.

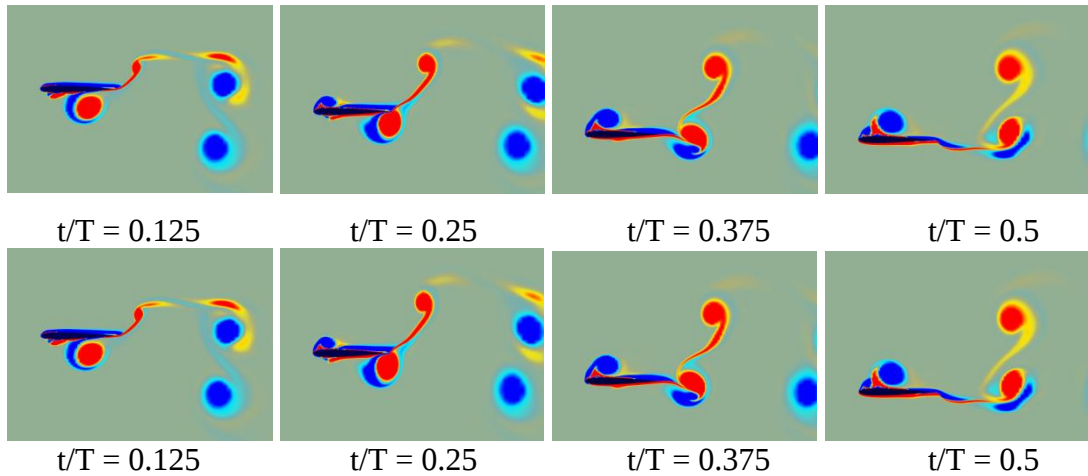
Kuvvet grafikleri ve FFT analizlerinin yanında periyodik olmayan davranışı daha iyi anlayabilmek için artan dalma genliğindeki girdap mekanizmaları incelenmiş ve

Şekil 4.26-34 arasında gösterilmiştir. Her bir çözüm için 12. ve 13. salınım hareketindeki girdap etkileşimlerinin neden olduğu farklar gösterilmeye çalışılmıştır.

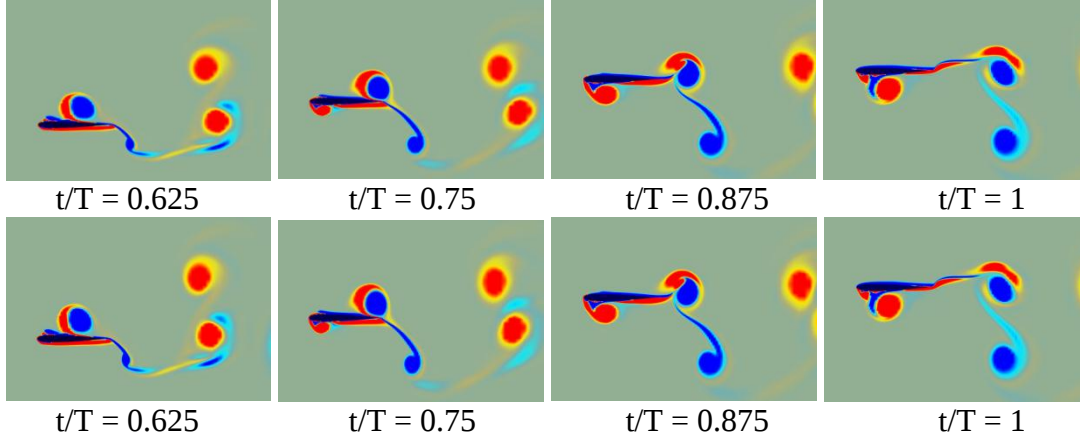
Şekil 4.26'da $h=0.4$ 'de ard arda gelen iki periyot için anlık C_d karşılaştırması gösterilmiştir. Bu grafikte $y(t)$ eğrisi dikey yer değiştirmeyi göstermektedir. Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de ise kanat profili aşağı inerken ve yukarı çıkarken boyutsuz zaman cinsinden $t/T=0.125$ aralıklarla girdap mekanizmaları gösterilmiştir. Şekil 4.26'daki düşük genlikli bu durum için karşılaştırılan her iki periyotta itki değeri ve girdap mekanizması beklenildiği gibi tamamıyla aynıdır. Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi $h=0.4$ 'ün girdap yapısı şu şekildedir: Her yarı periyotta kanat profilinin üzerinde ve altında büyük çaplı bir LEV oluşur, bu LEV profil üzerinde hareket ederek firar kenarına doğru kayar ve firar kenarında meydana gelen TEV ile etkileşir. Bu etkileşimin sonunda kanadın iz bölgesinde TEV ile birleşen zıt işaretli girdapların oluştuğu ve momentum kazanımına sebep olan yani itki üreten ters Karman girdap caddesi formu oluşmaktadır.



Şekil 4.26 : $h=0.4$ için 12. ve 13. periyotun sürüklenme katsayısı grafiği.

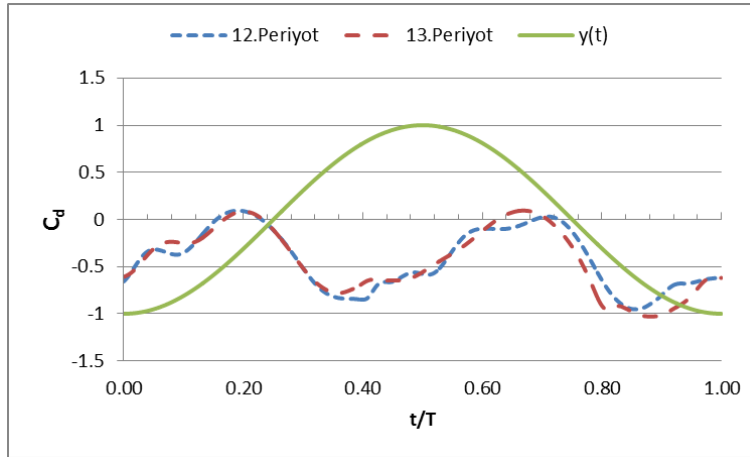


Şekil 4.27 : $h=0.4$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili aşağı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.

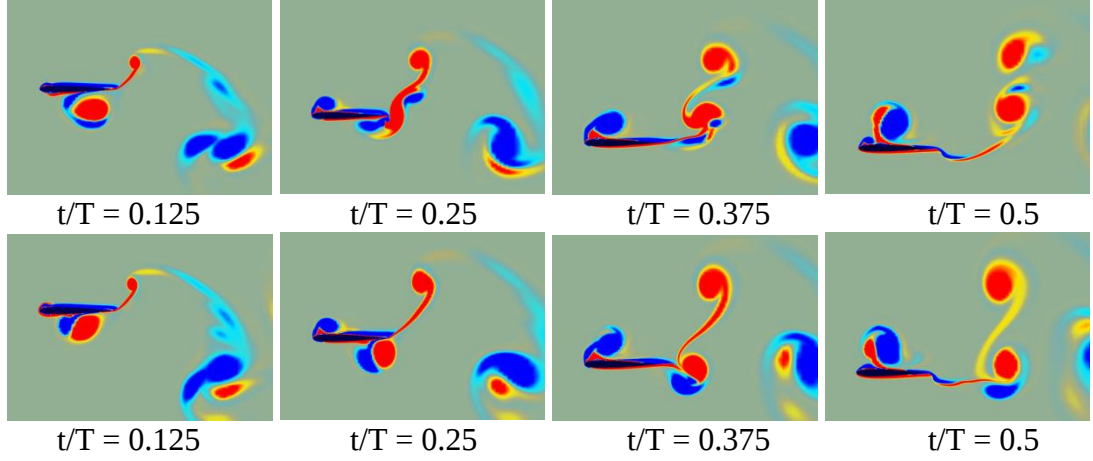


Şekil 4.28 : $h=0.4$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili yukarı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.

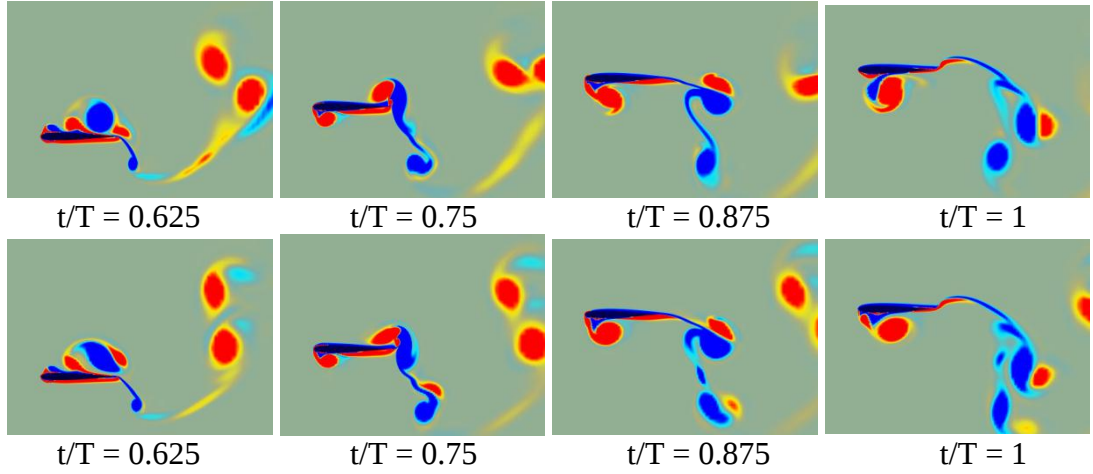
Benzer bir şekilde $h=0.5$ değeri için de itki katsayısı ve girdap mekanizmaları Şekil 4.29-31 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.29’da 2 periyot arasında anlık C_d değerlerine bakıldığında eğrilerin birbirinden farklılaştığı görülmektedir. Bu artık hareketin periyodik davranıştan periyodik olmayan davranışa geçiş yaptığını göstermektedir. Şekil 4.30 ve 4.31’de aşağı ve yukarı salınım sırasındaki girdap mekanizmalarının da iki periyot arasında farklılaştığı görülüyor. Bu farklılık büyük ölçüde LEV ve onun TEV ile etkileşiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.29 : $h=0.5$ için 12. ve 13. periyotun sürüklenme katsayısı grafiği.

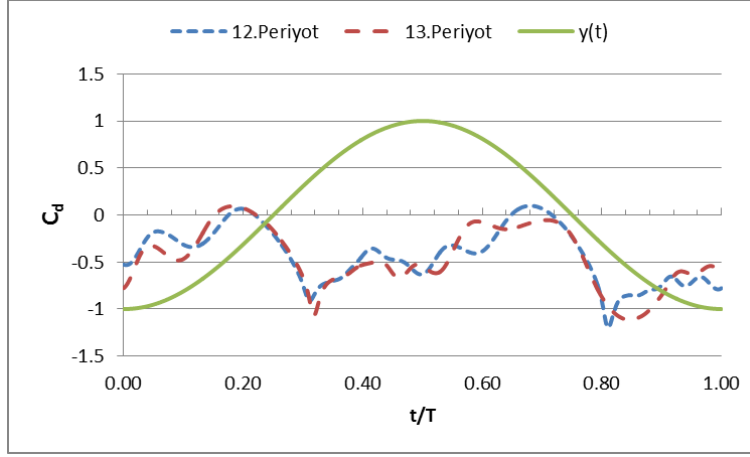


Şekil 4.30 : $h=0.5$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili aşağı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.

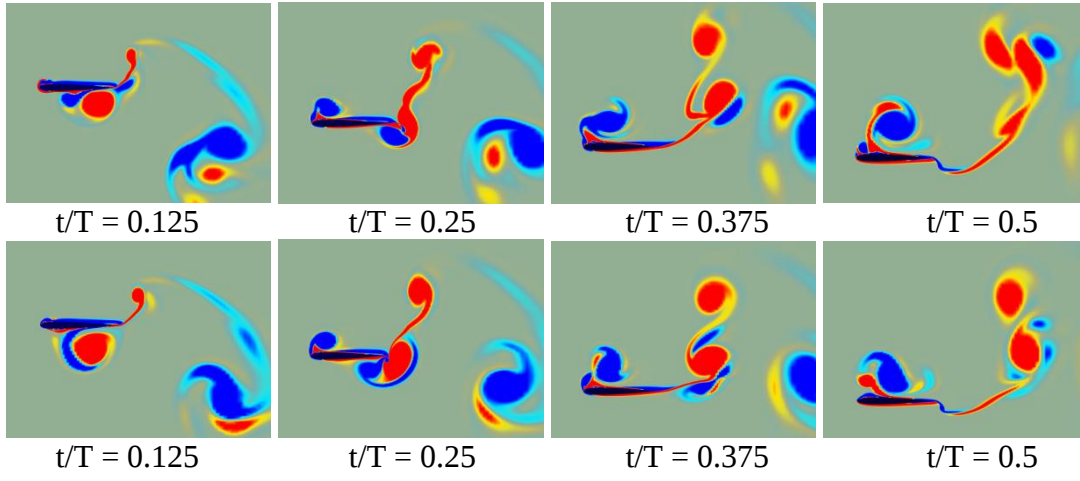


Şekil 4.31 : $h=0.5$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili yukarı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.

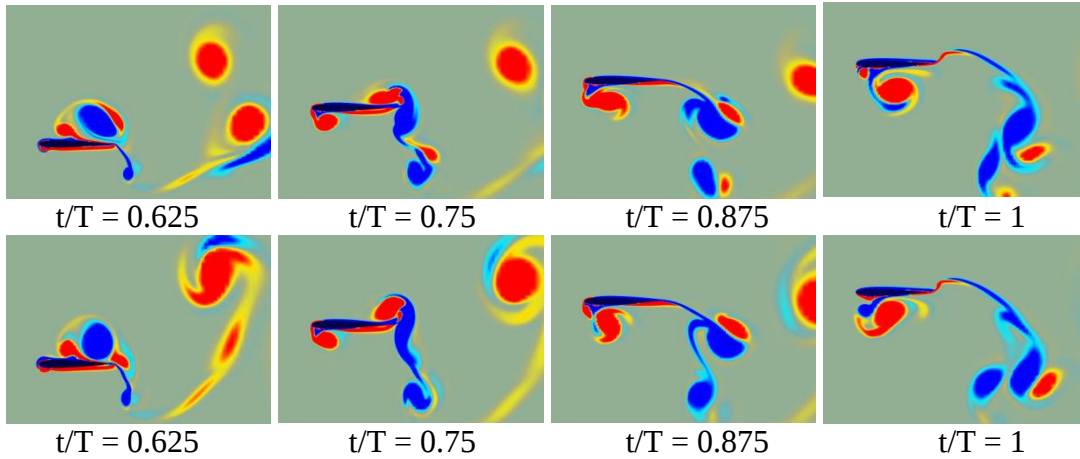
Benzer bir şekilde $h=0.6$ değeri için de C_d ve girdap mekanizmaları Şekil 4.32-34 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.32’de eğrilerin bir önceki genlik değerine göre çok daha fazla karmaşıktığı ve birbiriyle uyuşmadığı görülmektedir. Bu artık hareketin tamamıyla periyodik olmayan bir yapıya geçtiğini göstermektedir. Benzer olarak Şekil 4.33 ve 4.34’de aşağı ve yukarı salınım sırasındaki girdap mekanizmalarının da farklılaştığı görülmektedir.



Şekil 4.32: $h=0.6$ için 12. ve 13. periyotun sürüklenme katsayısı grafiği.



Şekil 4.33 : $h=0.6$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili aşağı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.



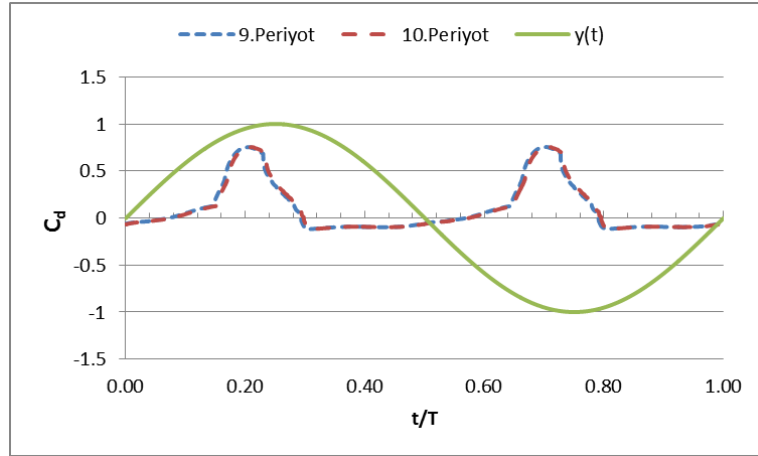
Şekil 4.34 : $h=0.6$ için 12. ve 13. periyotta kanat profili yukarı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.

Şekil 4.33'te $h=0.6$ için 12.periyot $t/T=0.25$ anında kanat altında meydana gelen LEV'in önünde zıt işaretli bir girdap daha meydana gelirken 13.periyot aynı anda zıt

işaretli oluşan girdabın LEV'i çevrelediği görülmektedir. Aynı şekilde $h=0.5$ için Şekil 4.30'da aynı zamandaki görüntüdeki girdap yapısı benzer bir durum sergilemektedir.

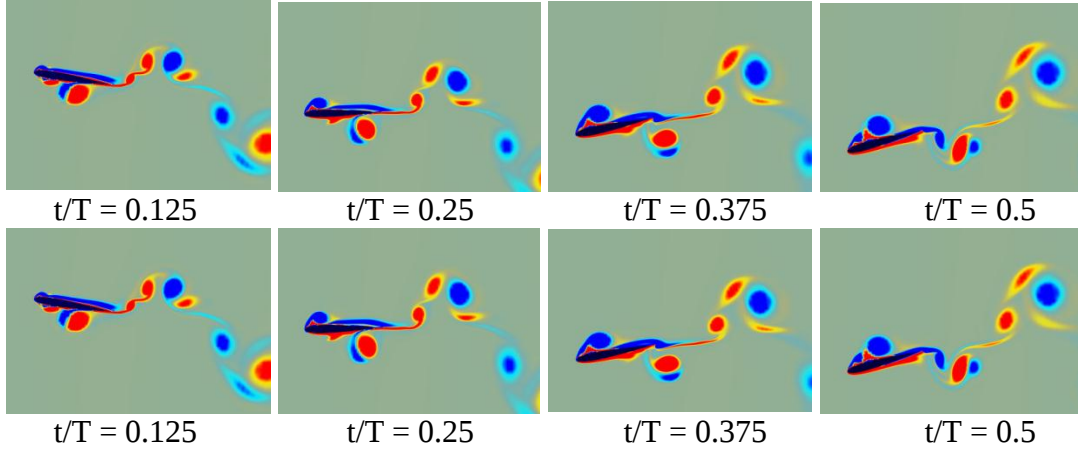
3 farklı genlik durumu için girdap yapıları incelendiğinde h arttıkça kanat üzeri ve altındaki LEV'in daha da büyüdüğü görülüyor ve h arttıkça LEV'in kanat profilinden ayrılması daha da kolaylaşmaktadır. . Şekil 4.27, 4.30 ve 4.33'de $t/T=0.5$ anında oluşan bu büyük yapılı LEV kanat üzerinde kaydıktan sonra TEV ile etkileşime girmekte ve onun etkileşimine göre iz bölgesi girdap yapısı değişmektedir. Buradan LEV'in hem periyodiklik hem de iz bölgesi girdap yapısının şekillenmesinde önemli olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Yüksek genlikli hareketler için periyodik olmayan davranışı çözüm bulabilmek için harekete yunuslama salınımı eklenerek çözümler yapılmıştır ve periyodiklik sınırının daha da genişlediği bulunmuştur. Şekil 4.35'de $k=2.5$ $h=0.5$ değerinde hücum açısı 14° olacak şekilde yunuslama ve dalma hareketi beraber yapılan çözüm için anlık C_d grafiği gösterilmiştir.

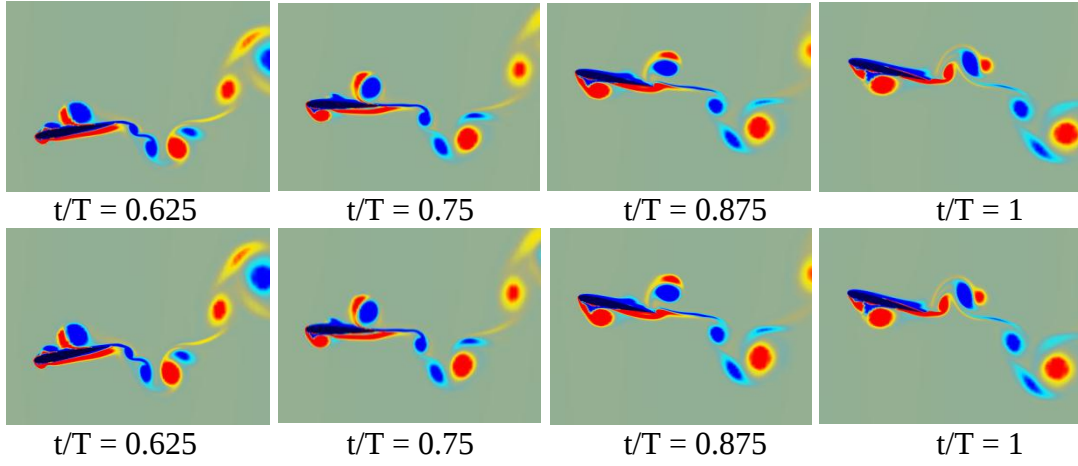


Şekil 4.35 : Bütünleşik harekette $k=2.5$ $h=0.5$ için hücum açısı 14° için C_d grafiği.

Görüldüğü üzere iki periyot arasında C_d eğrisinde farklılık yoktur. Yani akım periyodik olarak hareket etmektedir. Kanat üzeri ve iz bölgesindeki girdap yapılarını da inceleyecek olursak; (Şekil 4.36 ve 4.37) iki periyot arasında girdap yapılarında fark meydana gelmemektedir.



Şekil 4.36 : $h=0.5$ ve bütünleşik hareket için 9. ve 10. periyotta kanat profili aşağı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.



Şekil 4.37 : $h=0.5$ ve bütünleşik hareket için 9. ve 10. periyotta kanat profili yukarı hareket ederken girdap mekanizmasının karşılaştırılması.

Daha düşük hücum açılarında çözümün periyodikliğe ulaşmadığı görülmüştür. Şekil 4.35’de C_d grafiğinden bu çözümün itki üretmediği görülmektedir.

Sonuç olarak; $Re=5000$ ve $k=2.5$ ’da yalnızca dalma hareketi yapan bir NACA 0012 kanat profilinin analizinden;

$h < 0.4$ iken periyodik

$0.4 < h < 0.6$ arasında periyodiktan periyodik olmayana geçiş

$h > 0.6$ iken periyodik olmayan

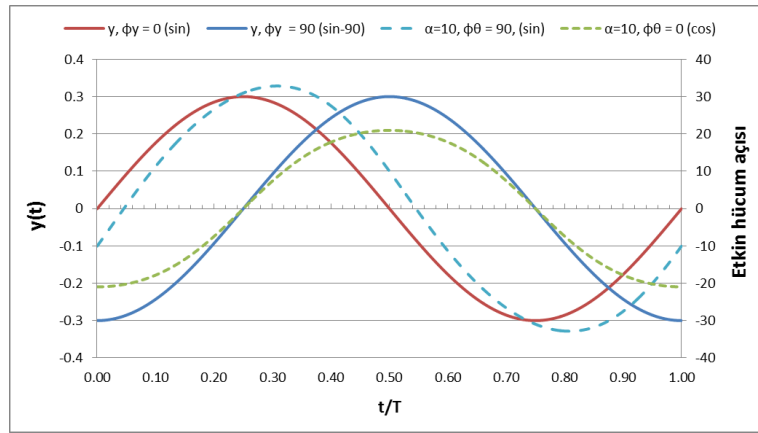
bir akış olarak gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca yüksek genlikli hareketlerde periyodik olmayan davranışa sebep, kanat profilinin altında ve üzerinde oluşan ikinci girdap yapısının LEV ile rastgele etkileşimi ve LEV’in büyüklüğü olarak görülmüştür.

Dalma hareketine doğru hücum açısı verilerek hareket, periyodik olmayan davranıştan periyodik hale çevrilebilir ve periyodik hale geçiş; verilen hücum açısının kanat etrafında oluşan ikinci girdabı kanattan uzaklaştırmasıyla gerçekleşmiştir. Bütünleşik harekette hücum açısının itki üzerindeki etkisi Bölüm 4.3.3’de gösterilmiştir.

4.3.3. Hücum açısının bütünleşik hareket üzerinde etkisi

Yüksek genlikli periyodik olmayan bir dalma hareketine yunuslama salınımı eklenerek periyodik hale getirilebileceği Bölüm 4.3.2’de anlatıldı. Bu bölümde yunuslama salınımindaki hücum açısının ve faz farkının itki ve taşıma üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Dalma ve yunuslama faz farkı 0° ve 90° olan iki farklı hareket için çözüm yapılmıştır. Şekil 4.38’de bu iki farklı hareketteki dikey yer değiştirme ve etkin hücum açısının değişimi gösterilmiştir. Şekilde düz çizgi ile dikey yer değiştirmeler, kesikli çizgi ile etkin hücum açısının değişimi gösterilmiştir.

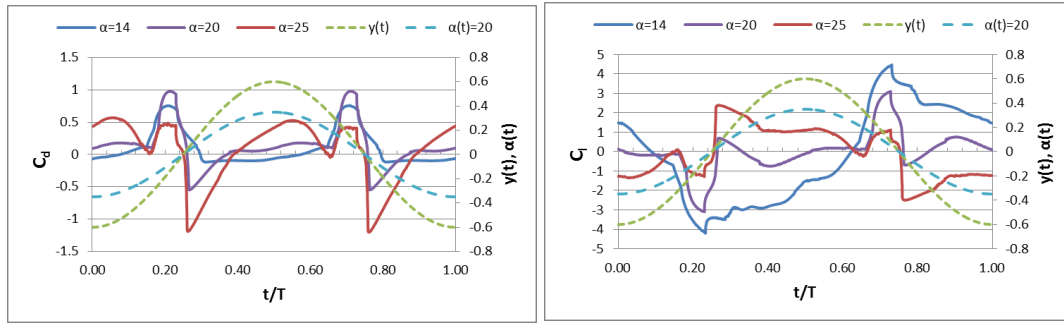


Şekil 4.38 : İki farklı hareket için dikey yer değiştirme ve etkin hücum açısının değişimi.

Bu bölümde birinci çözüm alınan durum $y, \varphi_y = 90^\circ(\sin - 90)$ (mavi eğri) dikey yer değiştirme ve $\alpha, \varphi_\theta = 0^\circ(\cos)$ (kesik çizgili yeşil eğri) açısal hareketin olduğu durumdur. Bu harekette dalma ile yunuslama hareketi arasında faz farkı bulunmamaktadır. Açısal hareketin verildiği $\alpha, \varphi_\theta = 0^\circ(\cos)$ durumda hücum açısı 10° yerine 0° verilseydi dikey yer değiştirme eğrisiyle aynı değişime sahip olacaktı. 10° ’lik hücum açısı profilin gördüğü etkin hücum açısını azalttığı görülmektedir.

İkinci çözüm alınan durum ise $y, \varphi_y = 0^0(\sin)$ (kırmızı eğri) dikey yer değiştirme ve $\alpha, \varphi_\theta = 90^0(\sin)$ (kesik çizgili mavi eğri) açısal hareketin olduğu durumdur. Bu harekette dalma ile yunuslama salınımı arasında 90^0 'lik faz farkı bulunmaktadır. 10^0 'lik hücum açısı, etkin hücum açısını artırırken dikey yer değiştirme ile arasında belirli bir faz farkına neden olmaktadır.

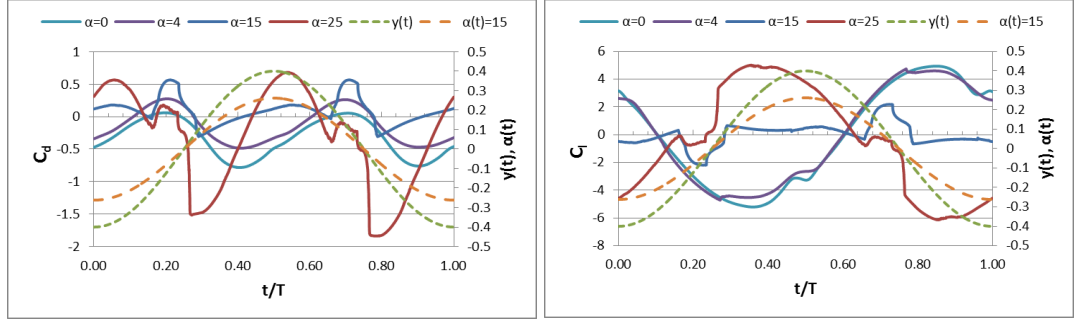
Re=5000 k=2.5 h=0.6'da yani Bölüm 4.3.2'de periyodik hale getirilen çözüm için 14^0 - 25^0 arasındaki hücum açılarında faz farkı olmadan çözümler alınmıştır. Buna göre Şekil 4.39'da gösterilen sürüklenme ve taşıma katsayıları değişim grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 4.39 : k=2.5 h=0.6 için farklı hücum açılarındaki salınımda sürüklenme ve taşıma katsayılarının değişimi.

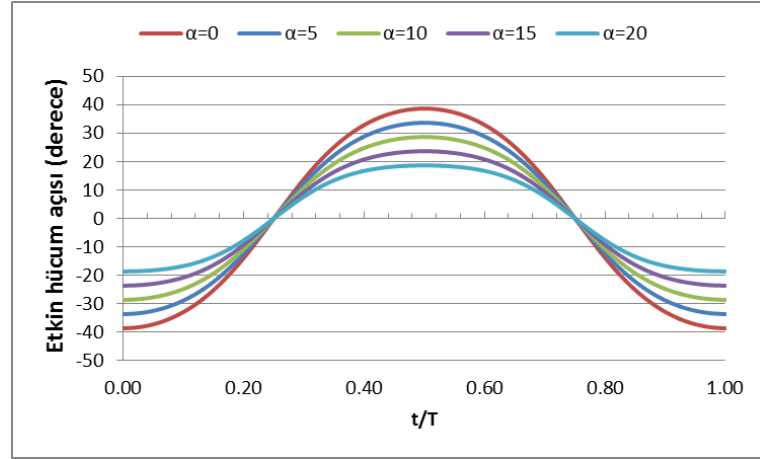
Hücum açısı 14^0 'den 20^0 'ye artarken ortalama sürüklenme katsayısının arttığı görülüyor yani çözüm sürüklenme elde etme rejimindedir. Hücum açısı 25^0 'de ortalama sürüklenme katsayısının düştüğü görülmektedir. Fakat hücum açısı 25^0 'den daha yüksek değerlere çıktığında profil tutunma kaybına uğramakta ve kararsız bir kuvvet değişimi göstermektedir.

Bölüm 4.3.2'de tamamen periyodik bir çözüm olan k=2.5 h=0.4'de durumu için 0^0 - 25^0 arasındaki hücum açılarında çözümler yapılmıştır. Buna göre Şekil 4.40'de gösterilen sürüklenme ve taşıma katsayıları değişim grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 4.40 : $k=2.5$ $h=0.4$ için farklı hücum açılarındaki salınımda sürüklenme ve taşıma katsayılarının değişimi.

$\alpha=0$ durumunda itki üretirken, $\alpha=4$ 'de ortalama itki katsayısı düşmüştür. Hücum açısı daha da artırıldığında ise tamamıyla sürüklenme üreten duruma geçiş yapılmıştır. Sürüklemeye geçişin sebebini anlamak üzere yunuslama hareketi eklendiğinde profilin gördüğü etkin hücum açıları hesaplanmış ve Şekil 4.41'deki grafikte gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında, hücum açısının 0 olduğu yani sadece dalma hareketinin yapıldığı durumda, profil en yüksek hücum açısını görmektedir. Yunuslama hareketi eklendiğinde, artan yunuslama genliğine karşın profilin gördüğü etkin hücum açısı düşmektedir. Bu sebeple faz farkının olmadığı durumda yunuslama hareketi eklemek itki katsayısında bir kazanç sağlamamaktadır.



Şekil 4.41 : Bir periyotta farklı hücum açılarında etkin hücum açısının değişimi

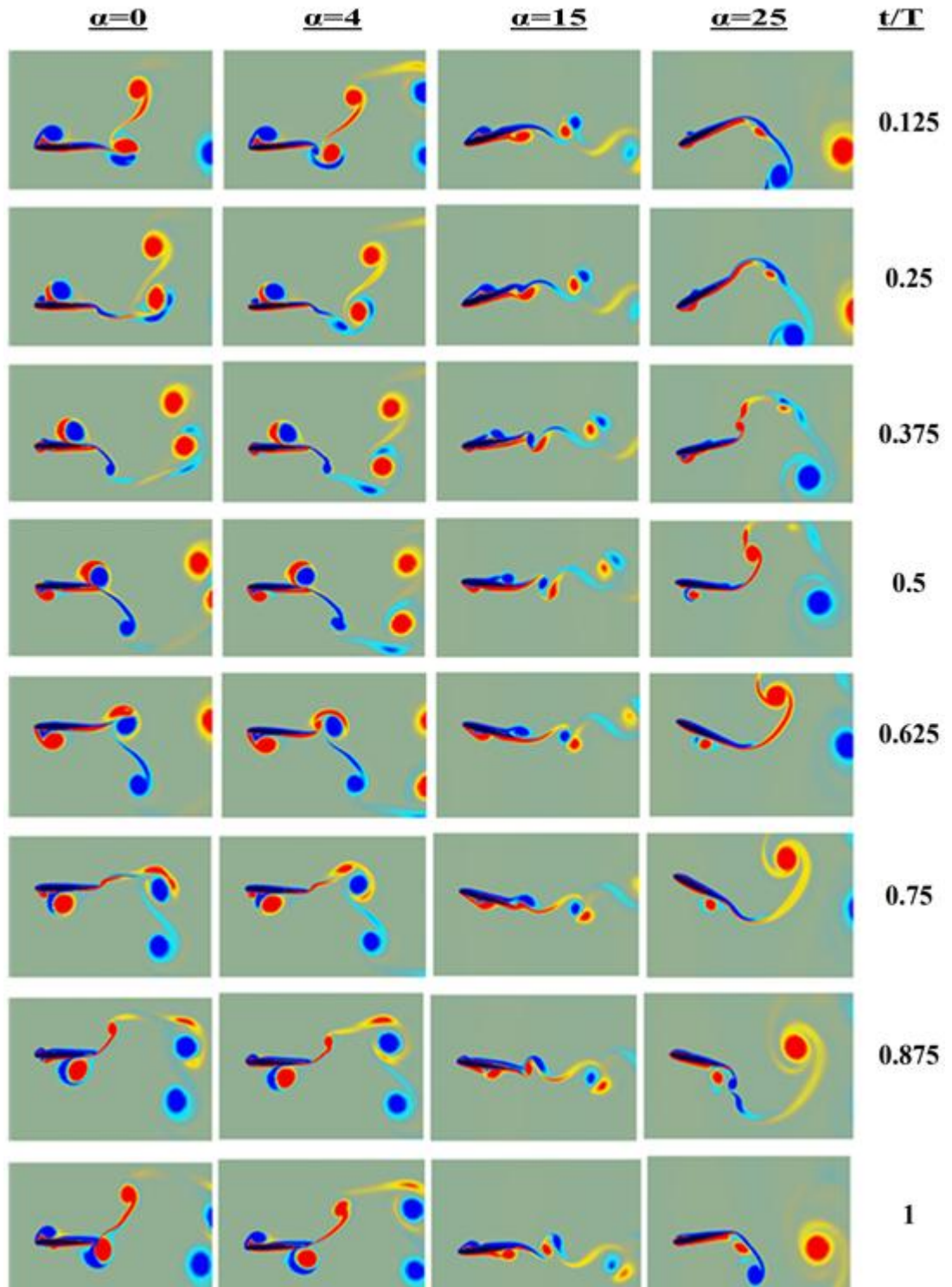
Her ne kadar yunuslama hareketini eklemek bir kazanç sağlamasa da sürüklemenin artmasına ve kuvvet grafiğindeki değişimlere sebep olan girdap yapılarını anlamak önemlidir. Bu yüzden Şekil 4.42'de çözümü alınan 4 farklı hücum açısı için boyutsuz zamana göre girdap yapıları gösterilmiştir.

$\alpha=0$ ve $\alpha=4$ durumları incelenirse, $t/T=0.125$ 'de LEV ve $t/T=0.75$ 'de ise ikinci zıt yönlü LEV'in de büyüklüğünde azalma görülmektedir. İtli rejiminin elde

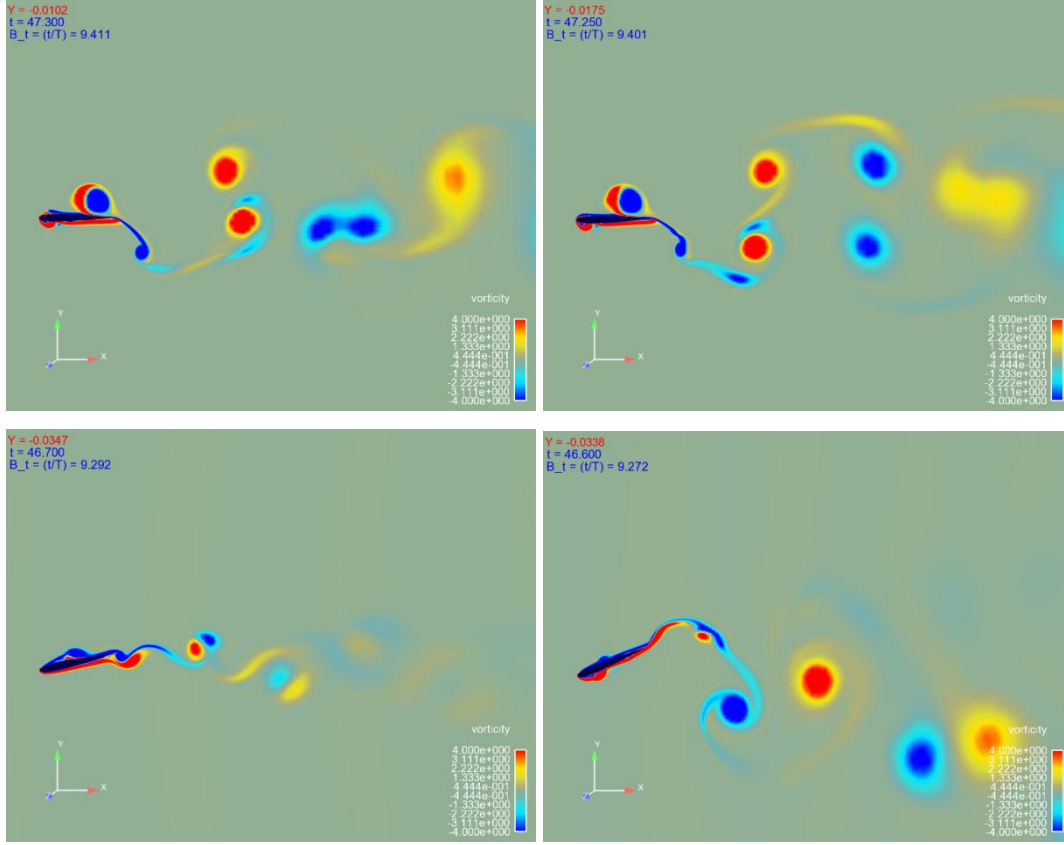
edilmesinde çok önemli olan LEV'in bu oranda küçülmesi Şekil 4.40'daki C_d değişiminin nedenidir.

$\alpha=15$ durumunda LEV büyüklüğü $\alpha=0$ durumuna göre oldukça küçülmekte hatta $\alpha=25$ 'de $t/T=0.125-0.5$ arasında profil üzerinde LEV oluşmamaktadır. $\alpha=25$ 'de profil üzerinde LEV'in oluşmaması C_d , C_l grafiklerindeki değişimin $\alpha=15$ 'deki rejimden tamamıyla farklı çıkmasına sebep olmuştur. Bu hücum açısından daha yüksek değerlerde ise profil tutunma kaybına uğramaktadır.

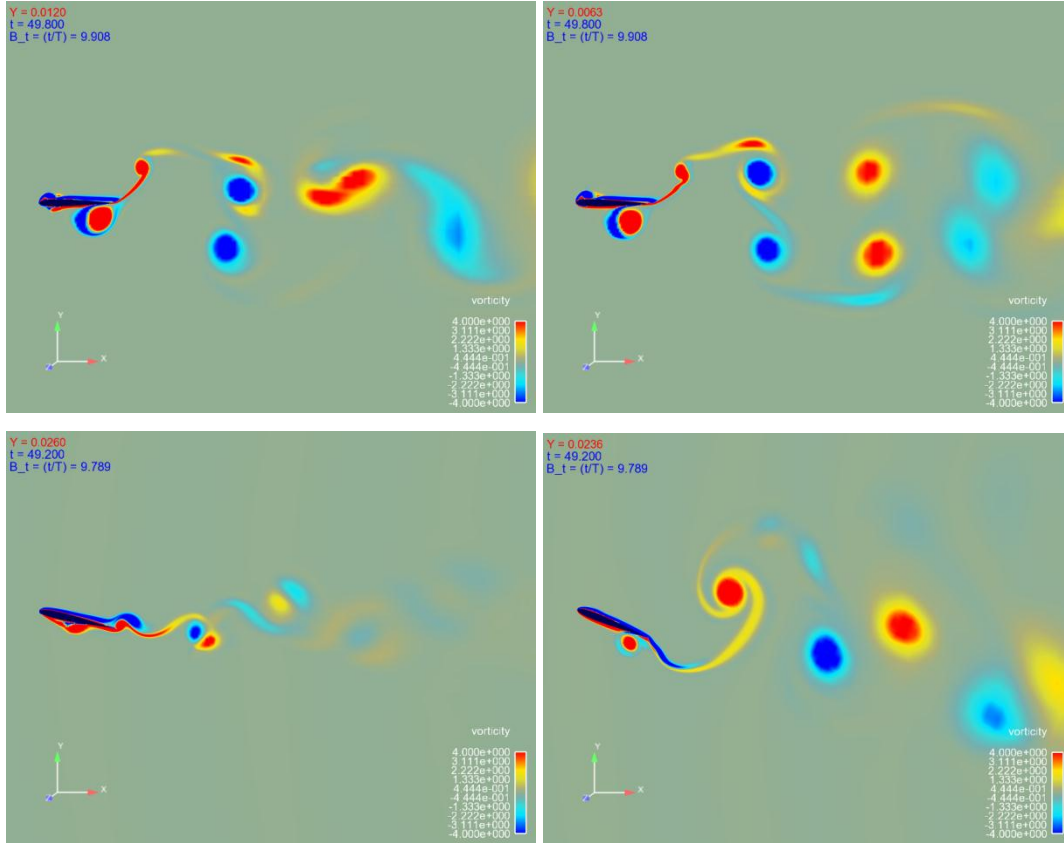
Şekil 4.43 ve 4.44'de aşağı ve yukarı salınım halindeyken Şekil 4.40'daki grafikte en düşük C_d değerlerindeki girdap yapıları gösterilmiştir. Şekil 4.43-a ve b'de en düşük C_d değeri, pozitif LEV'in firar kenarına yakın ve ikinci oluşan negatif LEV'in oldukça büyüdüğü zamanda meydana gelmiştir. Bu andan sonra, profilin altında negatif LEV gelişmeye başlayacak ve profil üzerindeki 2. negatif LEV daha da büyüyerek C_d 'nin yükselmesini sağlayacaktır.



Şekil 4.42 : 4 farklı hücum açısı için bir periyottaki girdap görünümü.

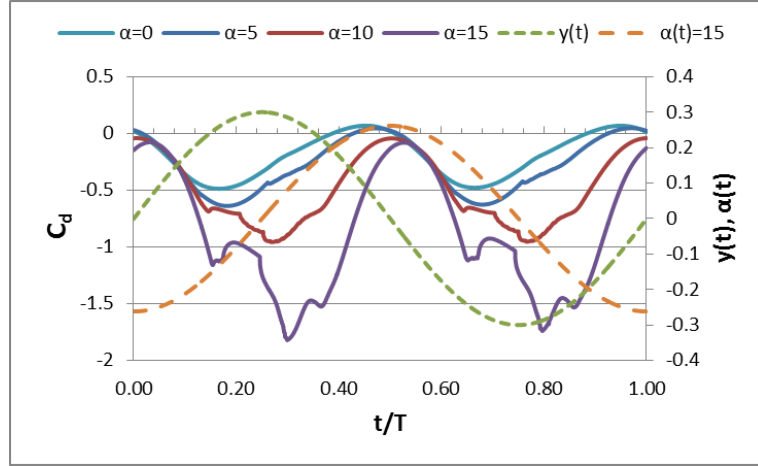


Şekil 4.43 : Profil aşağı hareket ederken en düşük C_d değerlerinde girdap yapısı.



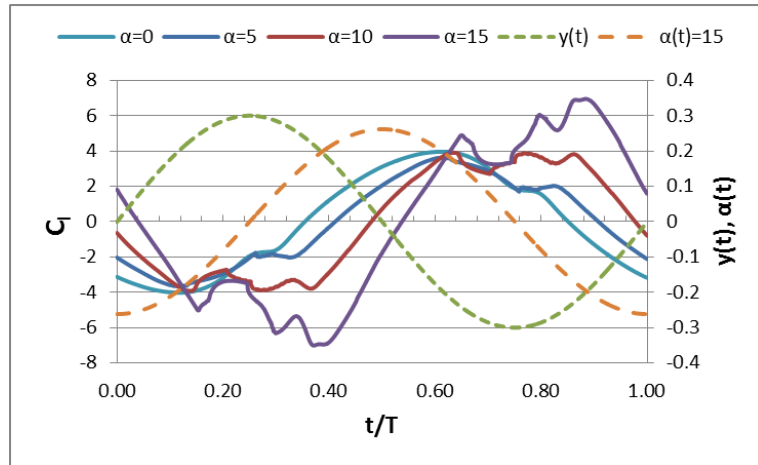
Şekil 4.44 : Profil yukarı hareket ederken en düşük C_d değerlerinde girdap yapısı.

Faz farkı olmadan yunuslama hareketinin itki üzerinde etkisinin olmadığına görülmesi üzerine yunuslama ile dalma hareketi arasındaki faz farkı 90° olan durumda hücum açısı 0° 'dan 15° 'ye kadar çözüm yapılmıştır. Şekil 4.45 ve 4.46'da $h=0.3$ durumunda, söylenen hücum açılarındaki sürüklenme ve taşıma katsayıları gösterilmiştir. Bu şekillerde kesikli çizgi ile dikey hareketin pozisyonu ve açısal dönmenin değişimi gösterilmiştir.



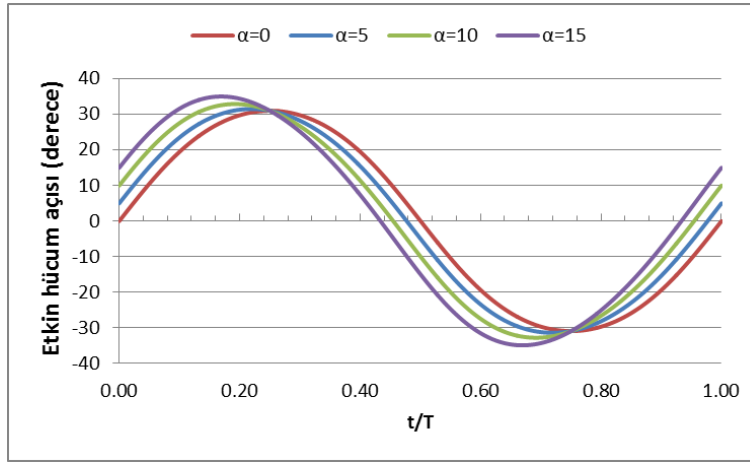
Şekil 4.45 : $k=2.5$ $h=0.3$ için farklı hücum açılarındaki salınımda sürüklenme katsayısının değişimi.

Şekil 4.45'de $\alpha=0$ iken ortalama sürüklenme katsayısının -0.19 civarında yani itki üreten bir durumda olduğu görülmektedir. 90° 'lik faz farkıyla yunuslama hareketinin eklenmesi $\alpha=5$ durumunda itkinin artmasına sebep olmuştur. Hücum açısı daha da artırıldığında ise itkinin daha da arttığı görülmüştür. Şekil 4.48'de hücum açısına göre zamana bağlı ortalama itki katsayısının değişimi görülebilir.



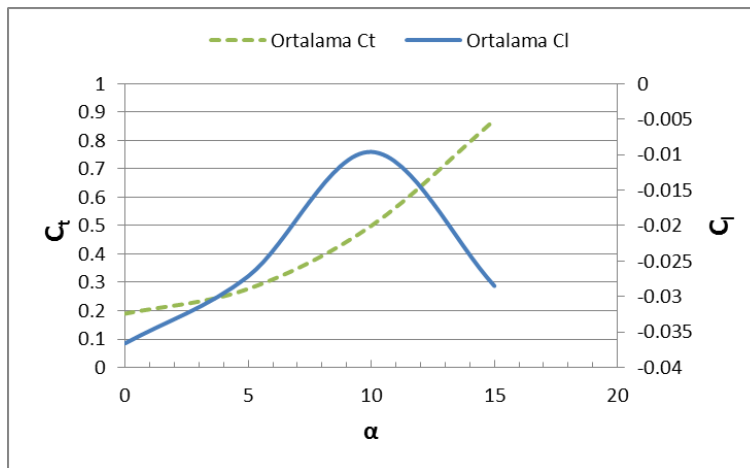
Şekil 4.46: $k=2.5$ $h=0.3$ için farklı hücum açılarındaki salınımda taşıma katsayısının değişimi.

Hücum açısına göre taşıma katsayısının değişimi ise Şekil 4.46'da gösterilmiştir. Şekilde taşıma katsayısının değişimi biraz daha karmaşık görünmektedir. Bu karmaşık yapıyı anlayabilmek için profilin gördüğü etkin hücum açıları Şekil 4.47'de gösterilmiştir. Şekil 4.47'de $\alpha=0$ eğrisine bakıldığında, $t/T=0.2$ civarına kadar diğerlerine göre en düşük hücum açısını görmekte, bu değerden sonra ise $t/T=0.8$ civarına kadar en yüksek hücum açısını gören durum olmaktadır. $t/T=0.8$ 'den sonra ise yine en yüksek etkin hücum açısına sahip olmaktadır. Bu durum taşıma katsayısı grafiğiyle (Şekil 4.46) benzer görünmektedir.



Şekil 4.47 : Bir periyotta farklı hücum açılarındaki etkin hücum açısının değişimi.

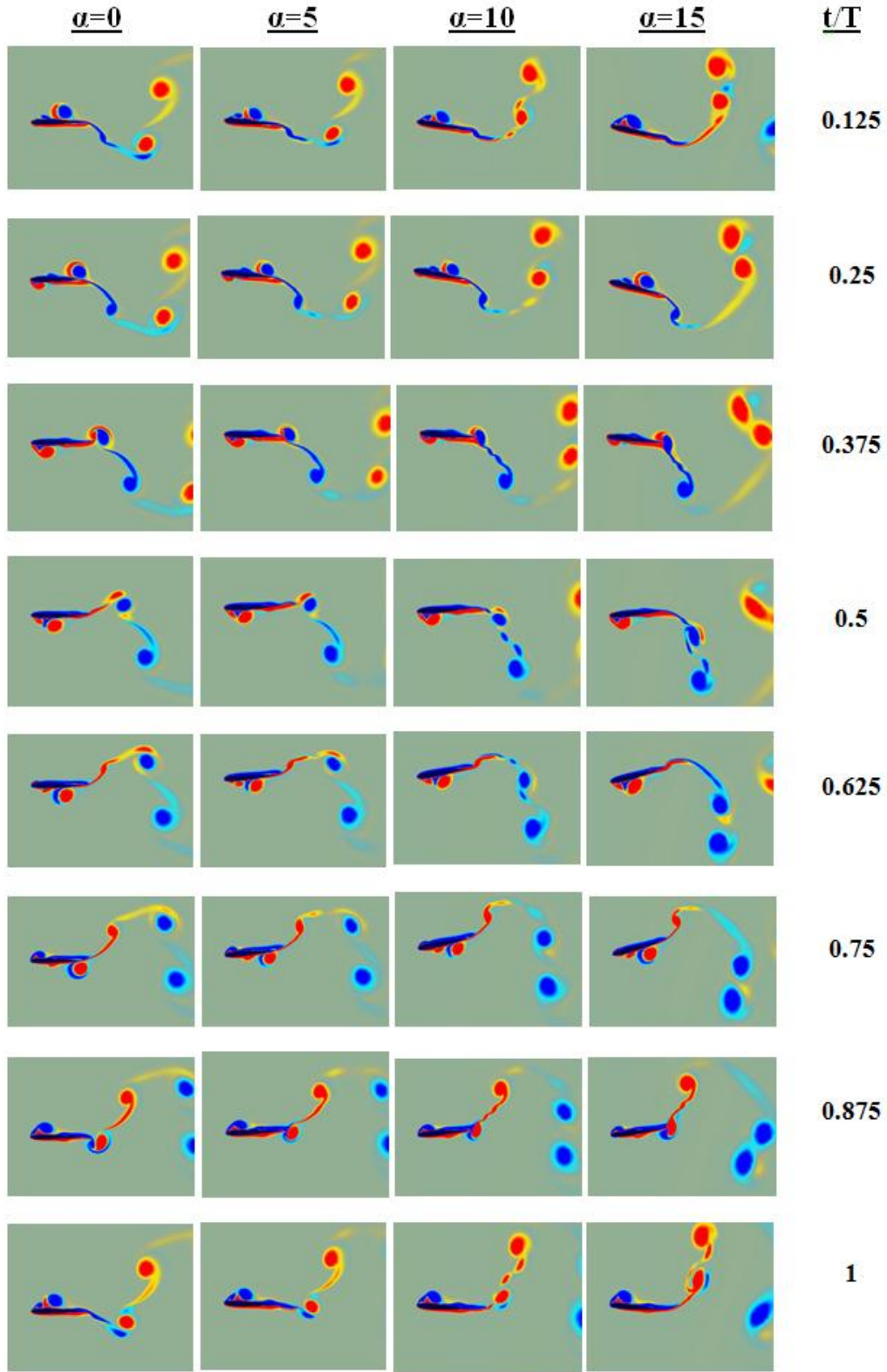
Şekil 4.46'da taşıma katsayısı, $\alpha=0$ eğrisi $t/T=0.2$ civarına kadar diğerlerine göre en düşük değerine ulaşmakta ve 0.2'den 0.8'e kadar da en yüksek artış gösteren olmakta, bu değerden sonra ise tekrar en düşük değeri almaktadır.



Şekil 4.48 : Hücum açısına bağlı olarak ortalama itki ve taşıma katsayılarının değişimi.

Şekil 4.48’de hücum açısı artarken ortalama itki katsayısının arttığı görülmektedir. Ancak taşıma katsayısı $\alpha=10$ değerine kadar artmakta, bu değerden sonra düşüşe geçmektedir. Bu çözüm durumunda hücum açısı 10° ’nın üzerinde profil tutunma kaybına uğradığı söylenebilir. Şekil 4.46’daki taşıma eğrilerindeki eğilimlerin değişiminin sebeplerini anlamak üzere akıştaki girdap yapıları Şekil 4.49’da gösterilmiştir.

Şekil 4.49’da $t/T=0.125$ anında $\alpha=0$ durumunda profilin üzerinde oluşan LEV’in önünde zıt işaretli ikinci bir girdabın oluştuğu görülmektedir. Bu girdap hücum açısı arttıkça, $\alpha=10$ durumuna kadar büyüklüğü azalmaktadır. Aynı durum $t/T=0.25$, 0.625 , 0.75 anlarında da görülmektedir. $t/T=0.125$ ve 0.25 zamanlarında oluşan negatif işaretli LEV, C_d ve C_l değerlerini azaltıcı yönde etki ederken yanında oluşan pozitif ikinci LEV, C_d ve C_l değerlerinde ufak yükselmeye veya düşüş eğimini değiştirmeye sebep olmaktadır. $t/T=0.625$, 0.75 ’de negatif işaretli ikinci girdabın önünde yeni pozitif yönlü üçüncü bir girdap oluşmuştur. Bu girdap ise C_d ve C_l üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. $\alpha=15$ durumu için ise bu saydığımız durumlardan biraz daha farklı bir girdap yapısı görünmektedir. $t/T=0.25$ anında kanat üzerindeki ikinci girdap daha düşük hücum açısı olan 10° ’ye göre düşmesi gerekirken yükselmiştir. Aynı durum $t/T=0.625$ ve 0.75 anları için de geçerlidir. Yani $\alpha=0,5$ ve 10 durumlarından farklılık göstermektedir. Şekil 4.48’deki C_l eğrisinin düşüşe geçmesi bu farklılığı açıklamaktadır. Sonuç olarak, kanat etrafında oluşan farklı işaretli ikinci ve üçüncü LEV C_d ve C_l kuvvet katsayılarının eğrilerindeki değişikliklerin nedenidir.



Şekil 4.49 : 4 farklı hücum açısı için bir periyottaki girdap görünümü.

Bu bölümde, sürüklenme ve itkiye sebep olan iki farklı hareket halinde kanat etrafında meydana gelen girdap yapıları ve bunların kuvvet katsayıları üzerindeki etkileri incelenmiştir ve faz farkının 90° olmasının itkiyi ve taşımayı artırıcı, maksimum hücum açısının belirli bir değere kadar artırılmasının itki ve taşıma katsayıları üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu, kanat etrafında meydana gelen LEV'in önünde oluşan zıt işaretli ikinci LEV'in kuvvet katsayılarının eğilim trendini değiştirdiği tespit edilmiştir.

5. DEĞERLENDİRMELER

Sadece dalma hareketiyle yapılan çalışmada, dalma genliğinin artmasıyla üretilen itkinin lineer olarak arttığı fakat itki veriminin belirli bir maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Artan dalma genliğiyle beraber kanat etrafındaki LEV yapılarının şiddetinin (büyüklüğünün) arttığı ve bu yapıların itkinin artmasında iz bölgesinin şekillenmesinde büyük önemi olduğu görülmüştür. Genliğin yüksek değerlere ulaşmasıyla, LEV'in önünde ikinci zıt yönde dönen bir girdabın oluştuğu gözlemlenmiş ve bu girdabın LEV'in şiddetini azaltan bir etkisinin olduğu görülmüştür. Ayrıca dalma genliği arttırıldıkça, taşıma katsayısı eğrisinde bazı ani değişimler görülmüş ve bunun sebebinin büyüyen LEV'in firar kenarındaki etkisi olduğu tespit edilmiştir.

İkinci olarak gerçekleştirilen yüksek dalma genlikli harekette akışın belirli bir genlik değerinden sonra periyodikliğinin bozulduğu görülmüştür. Buna göre, $h < 0.4$ iken periyodik, $0.4 < h < 0.6$ arasında periyodiktan periyodik olmayana geçiş, $h > 0.6$ iken tamamen periyodik olmayan bir yapı gösterdiği görülmüştür. Yüksek genlikli hareketlerde periyodik olmayan davranışa sebep, kanat profilinin altında ve üzerinde oluşan ikinci girdap yapısının LEV ile rastgele etkileşimi ve LEV'in büyüklüğü olarak görülmüştür. Bu bölümde, dalma hareketine doğru hücum açısı verilerek hareket, periyodik olmayan davranıştan periyodik hale çevrilebileceği gösterilmiştir. Periyodik hale geçiş; verilen hücum açısının kanat etrafında oluşan ikinci girdabı kanattan uzaklaştırmasıyla gerçekleşmiştir.

Son bölümde, sürüklenme ve itkiye sebep olan iki farklı hareket halinde kanat etrafında meydana gelen girdap yapıları ve bunların kuvvet katsayıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dalma ve yunuslamanın beraber yapıldığı bu harekette, faz farkının çok önemli olduğu tespit edilmiş ve faz farkı olmadığı zaman profilin gördüğü etkin hücum açısının dalmada daha yüksek olduğu, faz farkı katıldıktan sonra etkin hücum açısının arttığı görülmüştür. Faz farkının 90° olmasının ve maksimum hücum açısının belirli bir değere kadar artırılmasının itki ve taşıma

katsayıları üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu, kanat etrafında meydana gelen LEV'in önünde oluşan zıt işaretli ikinci LEV'in kuvvet katsayılarının eğilim trendini değiştirdiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Mueller, T.J.** (2001). Fixed and Flapping Wing Aerodynamics For Micro Air Vehicle Applications. AIAA, vol. 195.
- [2] **Michelson, R.C.** (2010). Slow flight in the lower Mars Atmosphere in support of NASA science missions”, International Unmanned Vehicles Workshop, Istanbul, Turkey, 10-12 Haziran.
- [3] **Fish, F.E. ve Rohr, J.J.** (1999). Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance, Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, Technical Report 1801.
- [4] **Jones, K.D. ve Platzer, M.F.** (2003). Experimental Investigation of the Aerodynamic Characteristics of Flapping-Wing Micro Air Vehicles. AIAA, 418.
- [5] **Url-1** <<http://www.ornithopter.org/>>, alındığı tarih: 02.03.2012.
- [6] **Url-2** <<http://en.wikipedia.org/wiki/Ornithopter>>, alındığı tarih: 09.05.2012.
- [7] **McMichael, J. ve Francis, M.** (1997). Micro Air Vehicles - Toward a New Dimension in Flight. Alındığı tarih: 02.03.2012, adres: http://www.fas.org/irp/program/collect/docs/mav_auvsi.htm
- [8] **Url-3** <<http://www.symscape.com/node/502>>, alındığı tarih: 09.05.2012
- [9] **Url-4** <<http://www.aerotonomy.com/nanos.html>>, alındığı tarih: 09.05.2012
- [10] **Url-5** <https://pixhawk.ethz.ch/micro_air_vehicle/start>, alındığı tarih: 09.05.12
- [11] **Url-6** <<http://www.sciencedaily.com/releases/2008/07/080722085558.htm>>, alındığı tarih: 09.05.2012
- [12] **Weis-Fogh, T. ve Jensen, M.** (1956). Biology and physics of locust flight, Proc. R. Soc. B, 239, 415-585.
- [13] **Lighthill, M. J.** (1975). Mathematical Biofluidynamics, SIAM, Philadelphia.
- [14] **Lighthill, M. J.** (1970). Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency, J. Fluid Mech, 44, 265.
- [15] **Maxworthy, T.** (1981). “The fluid dynamics of insect flight”, Ann. Rev. Fluid Mech, 13, 329.
- [16] **Ellington, C. P.** (1984). The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. I. The Quasi-steady Analysis, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Vol. 305, pp. 1-15.
- [17] **Spedding, G. R.** (1992). The aerodynamics of flight. In Mechanics of Animal Locomotion, Springer, p. 51.

- [18] **Platzer, M. F. and Jones, K. D.** (2006). Flapping Wing Aerodynamics, Progress and Challenges. In: 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
- [19] **Viieru, D., Tang, J., Lian, Y., Liu, H., Shyy, W.** (2006). Flapping and Flexible Wing Aerodynamics of Low Reynolds Number Flight Vehicles. AIAA Paper 2006-503, presented at the 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 Ocak, Reno, NV.
- [20] **Url-7** <<http://en.wikipedia.org/wiki/Nondimensionalization>>, alındığı tarih: 03.05.2012.
- [21] **Dickinson, M.H., Lehmann, F.O., Sane, S.P.** (1999). Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight, *Science*, vol 284, 1954-60.
- [22] **Ellington, C.P., Van den Berg, C., Willmott, A.P., Thomas, A.L.R.** (1996). Leading-edge vortices in insect flight. *Nature (London)*, vol 384, 626-30.
- [23] **Birnbaum, W.** (1924). Das ebene Problem des schlagenden Fliigels, *Zeitschrift fur ange-wandte Mathematik und Mechanik (ZAMM)*, Vol. 4, pp. 277-292.
- [24] **G.K. Taylor, R.L. Nudds, and L.R. Thomas** (2003). Flying and Swimming Animals Cruise at a Strouhal Number Tuned for High Power Efficiency. *Nature*, 425, pp. 707-711.
- [25] **Url-8** <<http://style.org/strouhalflight/>>, alındığı tarih: 04.03.2012.
- [26] **Lai, J. C. S., and Platzer, M. F.** (1999). Jet Characteristics of a Plunging Airfoil, *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 12, pp. 1529-1537.
- [27] **Young, J., and Lai, J. C. S.** (2007). Mechanisms Influencing the Efficiency of Oscillating Airfoil Propulsion. *AIAA Journal* , Vol. 45, No. 7, pp. 1695 – 1702.
- [28] **Anderson, J. M., Streitlien, K., Barrett, D. S., and Triantafyllou, M. S.** (1998). Oscillating foils of high propulsive efficiency. *Journal of Fluids Mechanics*, vol. 360, pp. 41-72.
- [29] **Lewin, G. C. and Haj-Hariri, H.** (2003). Modelling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow. *J. Fluid Mech.* 492: 339-362.
- [30] **Wang, Z.J.** (2000). Vortex shedding and frequency selection in flapping flight. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 410, pp. 323-341.
- [31] **Ellington, C.P.** (2006). Insects versus birds: the great divide. In: 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-2006-35, Reno, USA.
- [32] **Krasny, R.** (1987). Computation of vortex sheet roll-up in the Trefftz plane, *Journal of Fluid Mechanics* 184, 123-155.
- [33] **Knoller, R.** (1909). Die Gesetze des Luftwiderstandes. *Flug- und Motortechnik (Wien)*, Vol. 3, No. 21, pp. 1-7.
- [34] **Betz, A.** (1912). Ein Beitrag zur Erklarung des Segelfluges. *Zeitschrift fur Flugtechnik und Motorluftschiffahrt*, Vol. 3, pp. 269-272.

- [35] **Platzer, M. F., Jones, K. D., Young, J., and Lai J. C. S.** (2008). Flapping-Wing Aerodynamics: Progress and Challenges. *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 9.
- [36] **Katzmayr, R.** (1922). Effect of periodic changes of angle of attack on behavior of airfoils, NACA TM-147.
- [37] **Glauert, H.** (1929). The force and moment on an oscillating aerofoil. Tech. Rep. Aero. Res. Comm. 1242, 74.
- [38] **Wang, Z.J.** (2000). Vortex shedding and frequency selection in flapping flight. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 410, pp. 323-341.
- [39] **Von Kármán, T., and Burgers, J. M.** (1934). General Aerodynamic Theory—Perfect Fluids, Aerodynamic Theory, edited by W. F. Durand, Vol. 2, Julius Springer, Berlin, p. 308.
- [40] **Young, J.** (2005). Numerical Simulation of the Unsteady Aerodynamics of Flapping Airfoils, Ph.D. Thesis, The University of New South Wales, at the Australian Defence Force Academy.
- [41] **Freymuth, P.** (1988). Propulsive vortical signature of plunging and pitching airfoils. *AIAA J.* 26, 881-883.
- [42] **Koochesfahani, M. M.** (1989). Vortical Patterns in the Wake of an Oscillating Airfoil. *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 9, pp. 1200 – 1205.
- [43] **Jones, K. D., Dohring, C. M., and Platzer, M. F.** (1998). Experimental and Computational Investigation of the Knoller-Betz Effect. *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 7.
- [44] **Lai, J. C. S., and Platzer, M. F.** (1999). Jet Characteristics of a Plunging Airfoil. *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 12, pp. 1529-1537.
- [45] **Lewin, G. C. and Haj-Hariri, H.** (2003). Modelling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow, *J. Fluid Mech.* 492, pp. 339-362.
- [46] **Newman, J. N. and Wu, T. Y.** (1974). Hydromechanics of fish swimming. *Symposium on Swimming and Flying in Nature* 2, 615-634.
- [47] **Tuncer, I. H., Walz, R., and Platzer, M. F.** (1998). A Computational Study of the Dynamic Stall of Flapping Airfoil. *AIAA Paper* 98-2519.
- [48] **Young, J., and Lai, J. C. S.** (2004). Oscillation Frequency and Amplitude Effects on the Wake of a Plunging Airfoil. *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 10, pp. 2042– 2052.
- [49] **Young, J., and Lai, J. C. S.** (2007). Mechanisms Influencing the Efficiency of Oscillating Airfoil Propulsion. *AIAA Journal* , Vol. 45, No. 7, pp. 1695 – 1702.
- [50] **Müller, R., Oyama, A., Fujii, K., Hoeijmakers, H.** (2009). Propulsion by an Oscillating Thin Airfoil at Low Reynolds Number, *Proceedings of 5th ICCFD Conference*, Seoul, South Korea, July 7-11, 2008, pp. 241-246. Springer.

- [51] **Lentink, D. and Gerritsma, M.** (2003). Influence of airfoil shape on performance in insect flight. In: 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit Orlando, Florida June 23-26.
- [52] **Lentink, D., Muijres, T. F., Donker-Duyvis, J. F. and van Leeuwen, L. J.** (2007). Vortex-wake interactions of a flapping foil that models animal swimming and flight *The Journal of Experimental Biology* 211: 267-273.
- [53] **Garrick, I. E.** (1936). Propulsion of a Flapping and Oscillating Airfoil, NACA, Rept. 567.
- [54] **Jones, K. D., Lund, T.C., and Platzer, M.F.** (2001). Experimental and Computational Investigation of Flapping Wing Propulsion for Micro Air Vehicles, Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicles, Vol. 195, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, New York, pp. 307-339, Chap. 16.
- [55] **Sarkar, S. and Venkatraman, K.** (2006). Numerical Simulation of Incompressible Viscous Flow Past a Heaving Airfoil, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, vol. 51, pp. 1-29.
- [56] **Anderson, J. M., Streitli en, K., Barrett, D. S., and Triantafyllou, M. S.** (1998). Oscillating foils of high propulsive efficiency. *Journal of Fluids Mechanics*, vol. 360, pp. 41-72.
- [57] **Tuncer, I. H., Walz, R., and Platzer, M. F.** (1998). A Computational Study of the Dynamic Stall of a Flapping Airfoil. AIAA Paper 98-2519.
- [58] **Isogai, K., Shinmoto, Y., and Watanabe, Y.** (1999). Effects of Dynamic Stall on Propulsive Efficiency and Thrust of Flapping Airfoil. *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 10, pp. 1145–1151.
- [59] **Leishman, J.G.** (2006). Principles of Helicopter Aerodynamics, second ed. Cambridge University Press, New York, USA.
- [60] **Carr, L.W., McAlister, K., McCroskey, W.** (1977). Analysis of the development of dynamic stall based on oscillating airfoil experiments. NASA Technical Note D-8382.
- [61] **Gursul, I. and Ho, C.-M.** (1992). Oscillating foils of high propulsive efficiency. *AIAA J.* 30, 111.
- [62] **Panda, J., Zaman, K.B.M.Q.** (1994). Experimental investigation of the flow field on an oscillating airfoil and estimation of lift from wake surveys. *Journal of Fluid Mechanics* 265, 65–95.
- [63] **McCroskey, W. J. and Fisher, R. K.** (1972). Detailed aerodynamic measurements on a model rotor in the blade stall regime, *Journal of the American Helicopter Society* 17, 20–30.
- [64] **Shyy, W., Lian, Y., Tang, J., Viieru, D., and Liu, H.** (2008). Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers, Cambridge University Press, New York.
- [65] **Heathcote, S. and Gursul, I.** (2007). Flexible flapping airfoil propulsion at low reynolds number. *AIAA Journal* 45(5): 1066-1078.

- [66] **Ashraf, M.A., Lai, J. C.S. and Young, J.** (2007). Numerical analysis of flapping wing aerodynamics, Proceedings of 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, Gold Coast, Australia, 2-7 December.

EKLER

EK A: Profilin dalma ve yunuslama hareketini sağlaması için yazılan UDF kodu

```
#include "udf.h"
#define mu 0.001003
#define ro 998.2
#define c 0.1

DEFINE_CG_MOTION(plunge,dt,cg_vel,cg_omega,time,dtime)
{

Thread *t;
face_t f;
real k = 2.5;
real h = 0.2;
real re = 5000;
real freq, Uinf;
real omega;
real vel;
real alfa;

alfa = 10 * (3.14/180);
Uinf = (re*mu)/(ro*c);
freq = (k*Uinf)/(2*c*M_PI);

/*reset velocities*/
NV_S(cg_vel, =,0.0);
NV_S(cg_omega, =,0.0);

/*get the thread pointer for which the motion is defined*/
t=DT_THREAD(dt);

vel = 2.0*M_PI*freq*h*c*sin(2.0*M_PI*freq*time);
omega = alfa*2*M_PI*freq*sin(2.0*M_PI*freq*time - M_PI/2);

cg_vel[1]=vel;
cg_omega[2]=omega;

}
```


ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ahmet Selim Durna

Doğum Yeri ve Tarihi: Düziçi – 21/12/1987

E-Posta: durnaa@itu.edu.tr

Lisans: İ.T.Ü. Uzak Mühendisliği

Yayın Listesi:

- Aslan, A. R., Yağcı, H. B., Sofyalı, A., Süer, M., Ümit, E., Tola, C., Ceylan, O., **Durna, A. S.**, Çelik, G., Öztürk, D. C., Development of a 3Unit CubeSat for LEO Communication, 2nd Nano-Satellite Symposium, Japan, March 14-16, 2011, University of Tokyo, Tokyo / Japan.
- Süer, M., **Durna, A.S.**, Çelik, G., Şanlıtürk K.Y., Aslan A.R., Structural Design and Analyses of a 3Unit Cubesat, RAST, June 2011, Turkey.
- Yılmaz, H., **Durna, A.S.**, Mısırlıoğlu, A., Determination the design parameters and optimum variables of a low Reynolds number quad rotor propeller, *AIAC: Ankara International Aerospace Conference*, September 2011, Turkey
- Aslan, A. R., Yağcı, H. B., Sofyalı, A., Süer, M., Ümit, E., Ceylan, O., Toktamış, B., **Durna, A. S.**, Akay, E., Akay, G. İ. ve İ.T.Ü. NanoSat Grubu, Öz, İ., Gülgönül, S. ve TÜRKSAT NanoSat Grubu, TURKSAT-3USAT: A 3U Communication Cubesat, 3rd Nano-Satellite Symposium, Japan, December 12-14, 2011, University of Tokyo, Tokyo / Japan

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Durna, A.S.**, Çelik B., Mısırlıoğlu A., Vortex wake formation and its effects on thrust and propulsive efficiency for an oscillating airfoil, *ICCFD 2012: International Conference on Computational Fluid Dynamics*, August 22-23, Paris, France.
- **Durna, A.S.**, Çelik B., Mısırlıoğlu A., Bir çırpın kanat etrafında meydana gelen girdap mekanizmasının incelenmesi, *IV. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı (UHUK)*, 12-14 Eylül 2012, Hava Harp Okulu, İstanbul, Türkiye.