

BİR ÇIRPAN KANAT ETRAFINDA MEYDANA GELEN GİRDAP MEKANİZMASININ İNCELENMESİ

Ahmet Selim Durna¹, Bayram Çelik², Aydın Mısırlıoğlu³
İTÜ, İSTANBUL

ÖZET

Bu çalışmada, sinüsoidal salınım yapan bir NACA 0012 kanat profilinin etrafındaki akış, iki boyutlu, daimi olmayan, sıkıştırılmaz bir Navier-Stokes çözücüsü kullanılarak simüle edilmiştir. Reynolds sayısı 5000'de kanat profili hem yalnızca dalma hem de yunuslama ile birlikte dalma salınım yapması düşünülmüştür. Özel olarak burada girdap kayma ve onun hareket ile etkileşim mekanizması üzerinde durulmuştur. Burada sunulan bütün simülasyonlarda indirgenmiş frekans değeri (k) 2.5'a sabitlenmiştir. Dalma genliği (h) ise 0.2-0.5 arasında değiştirilerek uygulanmıştır. Simülasyonlar bize hücum kenarı ile firar kenarı girdapları arasındaki etkileşim mekanizmasının hareket sonucunda oluşan itki ve itki verimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

GİRİŞ

Uçabilen canlılar yüzyıllardır insanoğlunun dikkatini çekmiş ve bunu gerçekleştirebilme hayali her yüzyılda insanların çeşitli çalışmalar yapmalarına vesile olmuştur. Çırpma hareketi kuşların, böceklerin ve yüzen canlıların hareket kabiliyetinin temel modelini oluşturmaktadır. Uçan canlılar çırpma mekanizmalarıyla rotorlu araçların taşınmasını, sabit kanatlı araçların da itkisini birleştirirler ve böylece boyutlarına göre çok daha fazla ileri uçuş hızı sağlarlar. Bu karakteristikleri mikro hava araçları (MHA) için çırpma kanatlı hayvanları oldukça çekici hale getirmektedir. 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. [1] MHA'lar bu kadar ilgi topladığından dolayı çırpma kanatlar ve üretilen itki ve taşıma kuvvetleri üzerinde birçok çalışma bulunmaktadır. Uçan ve yüzen canlılar doğaları gereği Reynolds sayısı 100 000'den daha düşük değerlerde uçmaktadırlar ve çırpma mekanizmaları dalma, yunuslama ve süpürme hareketlerinin birleşimidir [5]. Hareketin karmaşıklığından ve düşük Reynolds sayılarında yeterli çalışma olmadığından, araştırmacılar üç boyutlu ayrıntılı çalışmalara geçmeden önce çırpma mekanizmasının fiziğini anlamak için iki boyutlu analizler gerçekleştirmektedirler.

1935 yılında von Karman ve Burgers [12] profil iz bölgesindeki girdapların düzenini ve yerlerini gözlemleyerek itki veya sürüklenme üretiminin ilk kez açıklamasını sundular. Onlar iz bölgesindeki girdap yapılarına bakarak hareketin sürüklenme, itki, taşıma üretmesini sınıflandırdılar. Jones ve arkadaşları [9] deneysel olarak yaptıkları çalışmada, Karman Girdap Caddelerini göstermişler ve

¹ Araştırma görevlisi, Uzay Müh. Böl., E-posta: durnaa@itu.edu.tr

² Yard. Doç. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: celikbay@itu.edu.tr

³ Prof. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: misirli@itu.edu.tr

ek olarak hem itki hem de taşıma üreten iz bölgesi yapısını da sınıflandırmaya eklemiştir. Ayrıca girdap yapısının kh çarpımına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Koochesfahani [10], Oshima & Natsume ve Anderson [11,8] yaptıkları çalışma ile salınım sırasında hücum ve firar kenarından kayan girdap yapılarının, iz bölgesinde büyük yapıları girdapların şekillenmesinde etkili olduğunu göstermişlerdir.

Taylor uçan ve yüzen hayvanların uçuş verimliliği üzerinde 42 farklı canlı türünü incelemiş ve bu hayvanların uçtukları Strouhal sayısının 0.2 ile 0.4 arasında kaldığını ortaya koymuştur.[4]

$$St = \frac{fA}{U_\infty} \quad (1)$$

Burada f çarpınma frekansını, A çarpınma hareketinin genliğini ve U 'da serbest akım hızıdır. Yukarıdaki denklemde görüldüğü üzere Strouhal sayısı çarpınma hızıyla (fA) ileri uçuş hızının oranıdır. Bu çalışma en verimli uçucu ve yüzücülerin canlılar olduğu gerçeğine dayanarak, tasarlanan araçlarında bu aralıkta uçuş yapmalarının en verimli uçuş olacağını göstermektedir.

Daha sonra yapılan çalışmalarla çırpan kanat aerodinamiğinde itki üretiminin hareketin kinematiği, dalma, yunuslama ve bütünleşik hareket gibi hareket modları, bu modlar arasındaki faz farkı, seçilen kanat profili, esnek kanat kullanımı vb. parametreye bağlı olduğu görülmüştür. 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. Birçok araştırmacı/bilim adamı yalnız dalma hareketinin itki üretimi, iz bölgesi girdap yapılarının ve hücum kenarı girdabının davranışının anlaşılmasının dalma hareketiyle 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." [3] Lai ve Platzer Reynolds sayısı 2×10^4 dalma hareketi yapan bir NACA 0012 kanat profili için iz bölgesi yapısını incelediler [6]. Onlar 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. Young ve Lai [2] bütünleşik hareket gerçekleştiren bir NACA0012 kanat profili üzerinde itki verimi ve itki üretiminde Strouhal sayısının etkisini araştırdılar. Bu çalışmada, itki katsayısının Strouhal sayısına göre arttığını fakat itki veriminin 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.

Her ne kadar dalma genliği, frekans, kuvvet katsayıları ve itki verimi üzerinde fazla sayıda çalışma olsa da, girdap etkileşim mekanizmalarına odaklanan çalışma sayısı sınırlıdır. Çırpan kanatlı bir MHA'nın girdap dinamiği, onun uçuş karakteristiğini anlamak için ve en uygun uçuş konfigürasyonlarının bulunması için önemli bir yere sahiptir. Bu yüzden, bu çalışmanın temel amacı yalnız dalma ve yunuslama ile beraber dalma hareketi yapan bir kanat profilinin hücum ve firar kenarlarından kayan girdapların etkileşimi ve yapısını anlamaktır.

YÖNTEM

Hareketin Kinematiği

Bu çalışmada NACA 0012 kanat profili için iki farklı harmonik hareket düşünülmüştür. İlk olarak sadece dalma hareketi düşünülürken daha sonra yunuslama hareketiyle beraber dalma hareketi düşünülmüştür. Yunuslama hareketinde dönme merkezi çeyrek veter noktası olarak alınmıştır. Sadece dalma hareketinin yapıldığı çırpma hareketinde kanat profilinin dikey yönde yer değiştirmesi, denklem 1'deki formülle elde edilmiştir.

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

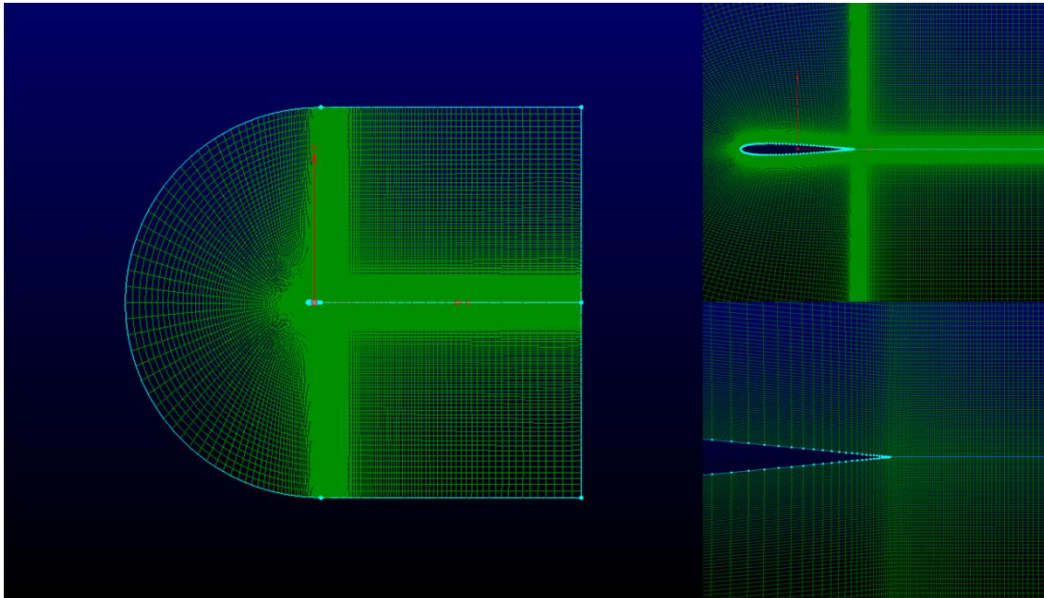
Buradaki y_a boyutsuz dalma genliğini, f dalma frekansını, y ise kanat profilinin anlık pozisyonunu ifade etmektedir. Yunuslama hareketiyle birlikte yapılan hareket için yunuslama açısı

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_a \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (3)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Buradaki α_0 ilk dönme açısını, α_a yunuslama genliğini, φ ise dalma ile yunuslama hareketi arasındaki faz farkını göstermektedir. Denklem 1 ve 2'de 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 programa Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (UDF) olarak girilmiştir. Böylece hem öteleme hareketi hem de dönme hareketini içeren hareket tanımlanmış olmaktadır.

Çözüm Ağının Oluşturulması

Herhangi bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) probleminin en önemli bölümü uygun ağ yapısının seçilmesi oluşturmaktadır. Burada C-tipi, profil yakınlarında ve iz bölgesi içerisinde girdapların hareket ettiği bölgelerde daha sık olacak şekilde dörtgen elemanlardan meydana gelen yapısal ağ oluşturulmuştur. Şekil 1'de 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 kullanılmıştır.



Şekil 1: Oluşturulan çözüm ağının solda genel görünümü, sağda kanat profili etrafındaki çözüm ağının yakından görünümü.

Sayısal Analiz

Salınım yapan bir kanat profilinin etrafındaki daimi olmayan akış alanı iki boyutlu, sıkıştırılmaz, sonlu hacimler metodu tabanlı Navier-Stokes çözücüsü kullanılarak simüle edilmiştir. Ticari kod olan FLUENT yazılımı versiyon 6.3.26'nın 2.dereceden upwind spatial discretization ve 1.dereceden zaman doğruluğu özellikleri kullanılarak kanat profili etrafındaki akış alanı simüle edilmiştir. Hız ile basınç arasındaki ilişkiyi düzenleyen algoritma olarak süreksiz akışlarda ve ağ yapısı düzgün olmayan durumlarda iyi sonuçlar veren PISO algoritması tercih edilmiştir. Akış, Reynolds sayısı 5000'de iken laminer olduğu kabul edilmiştir. Kanat profilinin hareketi modellemede kanat profiliyle beraber hareket eden deforme olmayan akış alanı yöntemi (dinamik mesh) kullanılmıştır.

Kuvvet Katsayıları ve Güç

Çözümlerde çıktı verisi olarak itki, taşıma katsayısı ve itki verimi kullanılmıştır. Bir kanadın itki verimi elde edilen gücün giriş gücüne oranı olarak ifade edilmektedir [2, 6- 8]. Buna göre denklem 3 ve 4'te ortalama itki katsayısı, $C_{t,ort}$ ortalama güç katsayısı $C_{p,ort}$ gösterilmiştir.

$$C_{t,ort} = -\frac{1}{T} \int_t^{t+T} C_d(t) dt \quad (4)$$

$$C_{p,ort} = -\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left[\frac{C_l(t)\dot{y}(t)}{c} + C_m(t)\dot{\theta}(t) \right] dt \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde T, bir çarpma 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 açılma hızıdır. İtke verimi, η giriş gücün çıkışı güce oranı diye tanımlanır [8].

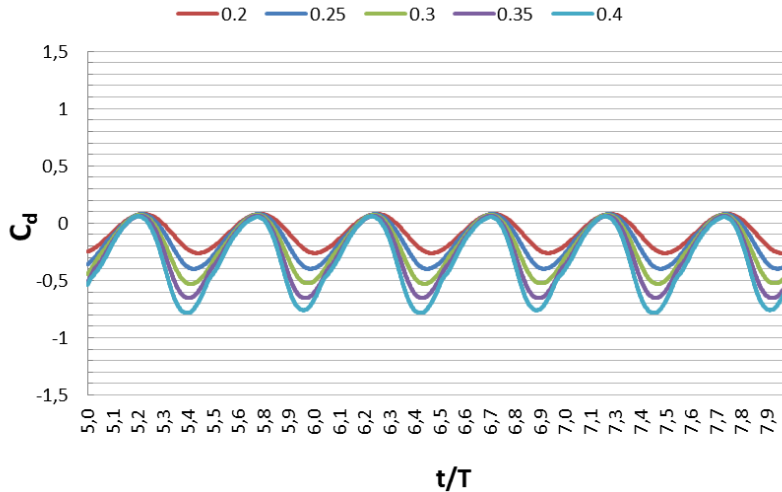
$$\eta = \frac{C_{t,ort}}{C_{p,ort}} \quad (6)$$

SONUÇLAR

Bu çalışmada iki farklı hareket modunda çözüm alınmıştır. Bunlar; yalnız dalma ve dalma ile beraber yunuslama hareketi. Her iki hareket türünde de indirgenmiş frekans değeri (k) 2.5'e sabitlenmiş dalma genliği (h) 0.2 ile 0.5 değerleri arasında değiştirilmiştir.

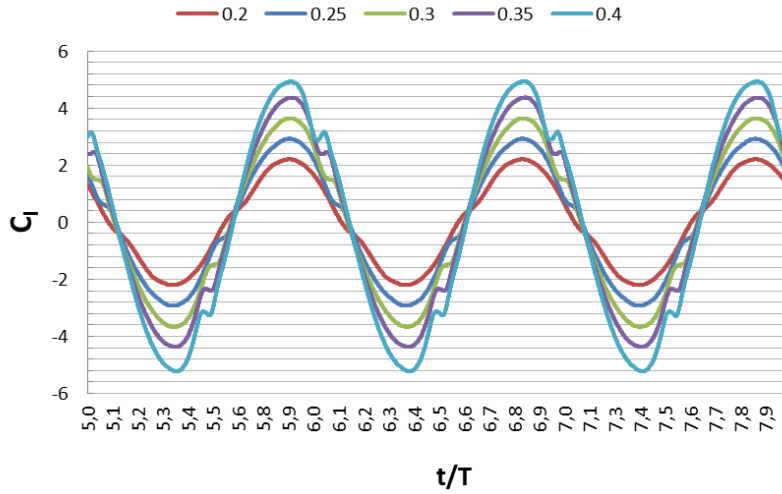
Yalnız Dalma Hareketi

Sabit frekans, farklı genlik değerleri için öncelikli olarak itki ve taşıma katsayılarının değişimini inceledik. Buna göre, itki katsayısı (C_t) serbest akım yönüne göre sürüklenme katsayısının (C_d) negatif değeri olduğundan Şekil 2'deki C_d 'nin negatif değeri yani dikey ekseninde simetriği, C_t olarak düşünülebilir. Bu bilgiler ışığında, C_t Şekil 2'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'de görülen C_t eğrisinin bir periyodunun dalga boyunun iki katıdır. Bunun sebebi dalma hareketinde hem aşağı hem de yukarı yönde itki üretilmesidir.



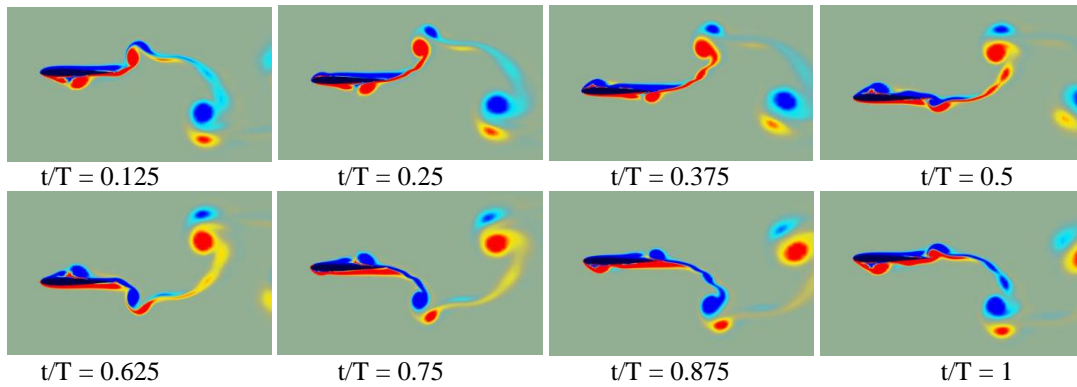
Şekil 2: Artan çarpma genliğine karşı anlık sürüklenme katsayısı değişimi.

Şekil 3'de ortalama $C_t=0$ eksenine simetrik hareket ettiği görülmektedir. Simetrik hareket 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 değişim meydana gelmektedir. Bu davranışın arkasındaki mekanizmayı anlamak için girdap dinamiği üzerine yoğunlaştık.



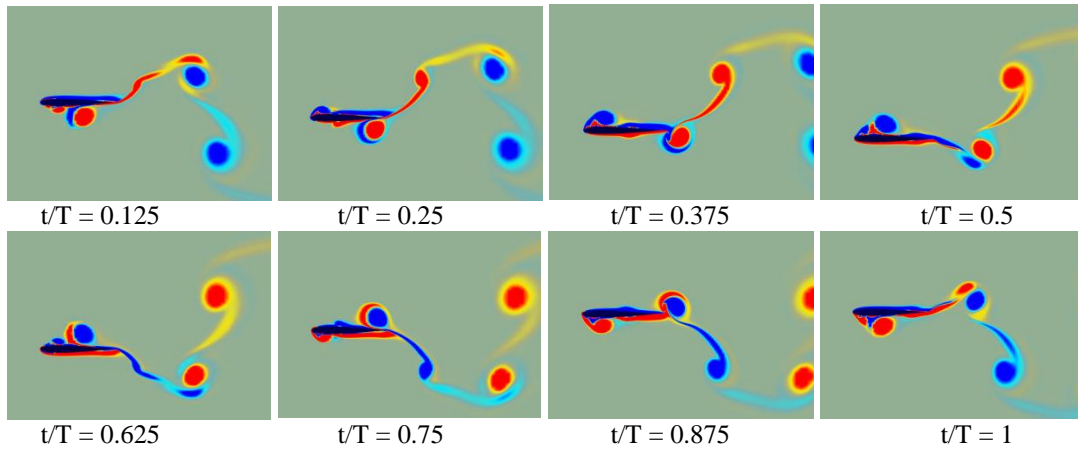
Şekil 3: Artan çırpma genliğine karşı anlık taşıma katsayısının değişimi.

Kuvvet değerlerinin sonra itki artmasına sebep olan girdap yapıları da incelenmiştir. Şekil 4'de $h=0.2$ değeri için kanat profilinin bir periyottaki aşağı (1.satır) ve yukarı (2.satır) hareketi sırasında $t/T=0.125$ aralıklarla 8 farklı görüntüler halinde 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 profilinin altında ve üstünde nisbeten daha küçük boyuttaki girdap ise hücum kenarı girdabıdır. Profil aşağı yönde hareketine devam ederken ($t/T = 0.125 - 0.375$), 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 görülmüyor. t/T değeri 0.625'den 1'e gidildikçe negatif TEV'in üzerinde hareket eden LEV'in, şiddetinin azalttığı ve zıt yönde dönen LEV ile TEV'in iz bölgesinde girdap çifti olarak ilerlediği görülmektedir. 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.



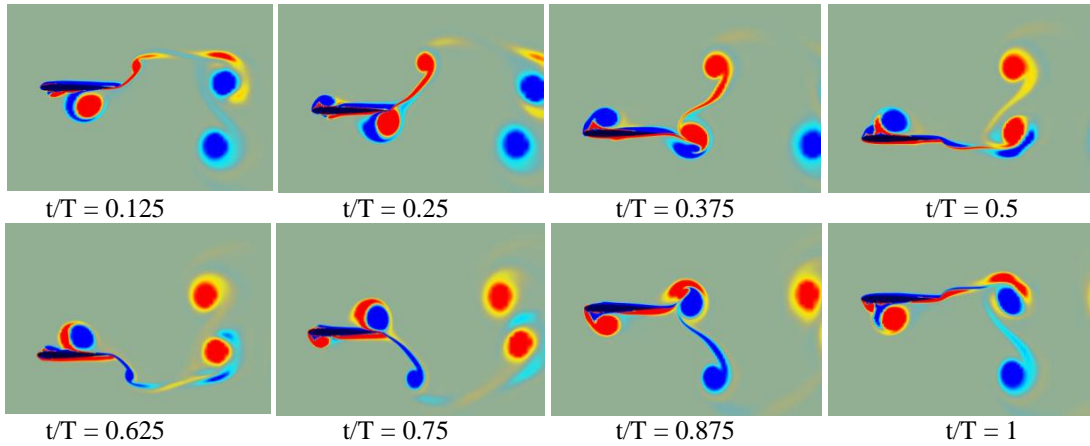
Şekil 4: $h=0.2$ için kanat profilinin aşağı (ilk satır) ve yukarı (alt satır) hareketi sırasında girdap görüntüsü.

Şekil 5'de $h=0.3$ için girdap görüntüleri bir önceki fotoğrafta verilen sıra ile 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 görülmüyor 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 bağlanmadan iz bölgesine bu şekilde kaydıkları görülmüyor ve iz bölgesinde aynı yönde dönen büyük çaplı girdap oluşturuyorlar.



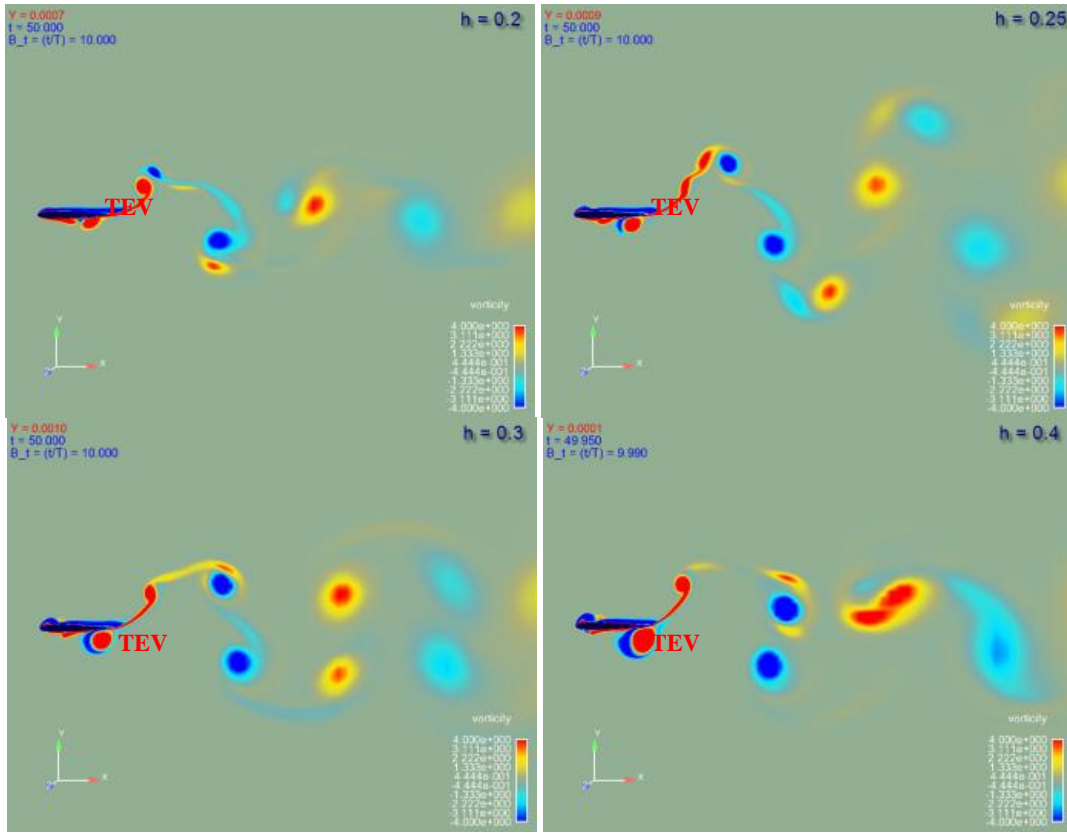
Şekil 5: $h=0.3$ için kanat profilinin aşağı (ilk satır) ve yukarı (alt satır) hareketi sırasında girdap görüntüsü.

Şekil 6'da $h=0.4$ için önceki şekillere benzer olarak girdap görüntüleri verilmiştir. Şekil 4-6'da verilen görüntüler karşılaştırılırsa, $t/T=0.125$ 'te genliğin daha düşük değerlerindeki girdaplara göre LEV'in daha da büyüdüğü ve 0.35 veter boyuna ulaştığı görülmektedir. LEV'in önünde oluşan ikinci zıt işaretli girdabın Şekil 5'e göre daha da güçlendiği görülmektedir. LEV firar kenarına ulaştığında, aynı yönde dönen TEV'e bağlanmakta ve ikinci oluşan girdap ise firar kenarı sonunda hücum kenarı girdabının gücünü zayıflatmaktadır.



Şekil 6: $h=0.4$ için kanat profilinin aşağı (ilk satır) ve yukarı (alt satır) hareketi sırasında girdap görüntüsü.

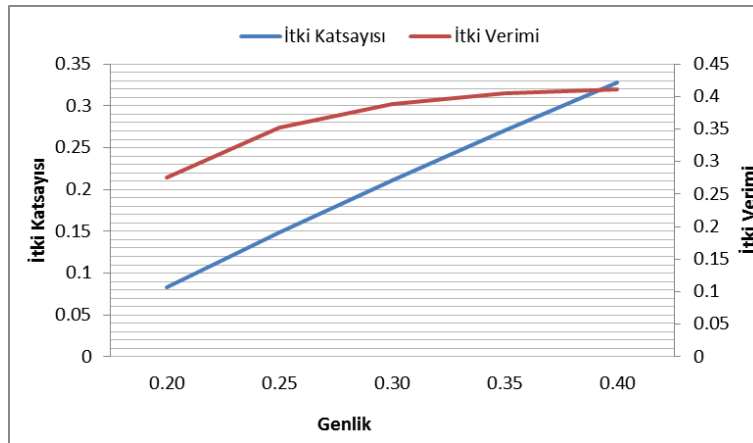
Şekil 7'de $h=0.2-0.4$ arasındaki değerler için aynı andaki ($t/T=0.0$) iz bölgesindeki girdap görüntüleri alınarak gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, h arttıkça kanat üzerinden kayan girdaplar daha güçlü hale gelmektedir. h artmasına rağmen TEV ile kıyaslandığında, LEV daha fazla güçlenmekte ve LEV'in önünde oluşan zıt işaretli ikinci girdap yapısının ise daha fazla etkili olmaktadır. 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.



Şekil 7 : 4 farklı genlik için kanadın iz bölgesi girdap yapıları.

Ayrıca biz dalma genliğini 0.4 değerinden daha fazla arttırdığımızda girdap yapısının periyodikliğinde bozukluklar gözlemledik ve itki ve taşıma katsayıları grafiklerinin çok daha karmaşık hale geldiğini gördük. MHA'lar ile düzgün bir operasyon gerçekleştirebilmek ve onları kolayca kontrol edebilmek için periyodik girdap yapısı ve kuvvet oluşumu gereklidir.

Şekil 8'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 değer üstüne çıktığında itki veriminin düşmesi gerekmektedir.

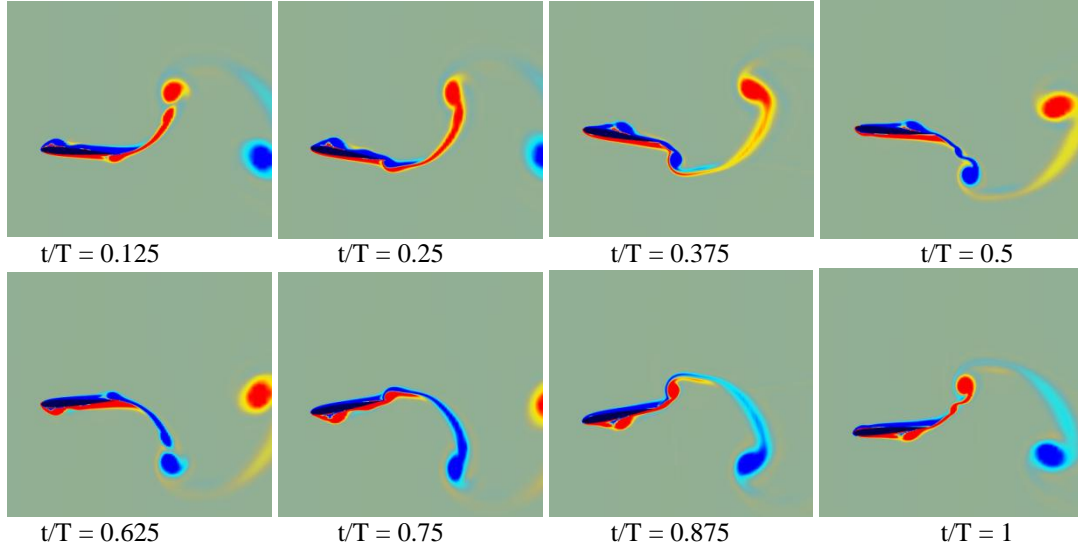


Şekil 8: İtki katsayısı ve itki veriminin değişimi

Dalma ile Beraber Yunuslama Hareketi:

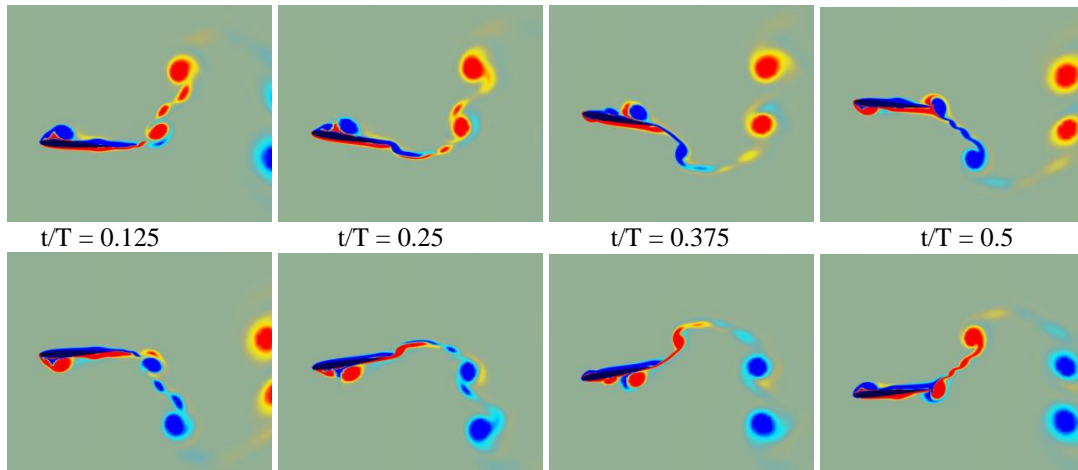
Bu bölümde sabit yunuslama genliği $\alpha_{\max} = 10^\circ$ ve 0.2'den 0.4'e değişen dalma genliğinde dalma ile beraber yunuslama hareketi yapan bir kanat profilinin akış kinematiği araştırılmıştır. Bütün çözümlerde dalma ile yunuslama arasındaki faz farkı $\varphi=90^\circ$ 'de sabitlenmiştir.

$h=0.2$ değeri için girdap yapıları ve onların etkileşimleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekilde verilen görüntüler Şekil 4-6'da verilen sıra ile gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, profil yukarı ($t/T < 0.5$) ve aşağı ($t/T > 0.5$) hareketleri boyunca sırasıyla saat yönünün tersinde ve saat yönünde dönen TEV'ler oluşmaktadır. Dalma hareketi yapan çözümlerden farklı olarak, yunuslama hareketi oluşan LEV'lerin gücünü azaltmıştır. TEV ile etkileştikten sonra nisbeten daha güçsüz olan LEV daha kolay yayılmaktadır. Yunuslama hareketinin bir sonucu olarak, iz bölgesinde oluşan girdap yapılarında TEV daha baskın hale gelmiştir.



Şekil 9: $h=0.2$ ve $\alpha_{\max} = 10^\circ$ durumunda yunuslama ve dalma hareketini beraber yapan kanat profilinin girdap görüntüleri

Şekil 10'da $h=0.3$ için bütünleşik hareketteki girdap görüntüleri gösterilmiştir. $h=0.2$ 'deki çözüme zıt olarak artan dalma genliği kanadın aşağı ve yukarı hareketi sırasında sırasıyla saat yönünde ve saatin tersi yönünde dönen LEV'ler oluşturmaktadır. LEV'lere ek olarak, $t/T=0.125$ ve $t/T=0.625$ görüntülerinde gördüğü üzere saatin tersi yönünde dönen ikinci girdaplar oluşmaktadır. Şekil 7'de gösterilen dalma hareketinden farklı olarak, $t/T = 0.25$ ve 0.75 zamanlarında TEV ile kanadın diğer tarafında meydana gelen girdap tabakaları arasındaki güçlü etkileşimler görülmektedir. Bu etkileşim her bir salınımında iki girdap yapısından daha fazla girdabın kaymasına neden olur. Daha güçsüz girdaplar daha geç gücünü kaybetmesine rağmen aynı işaretli LEV-TEV çifti iz bölgesinde yayılmaktadır. Burada TEV LEV'den daha güçlüdür.



$t/T = 0.625$

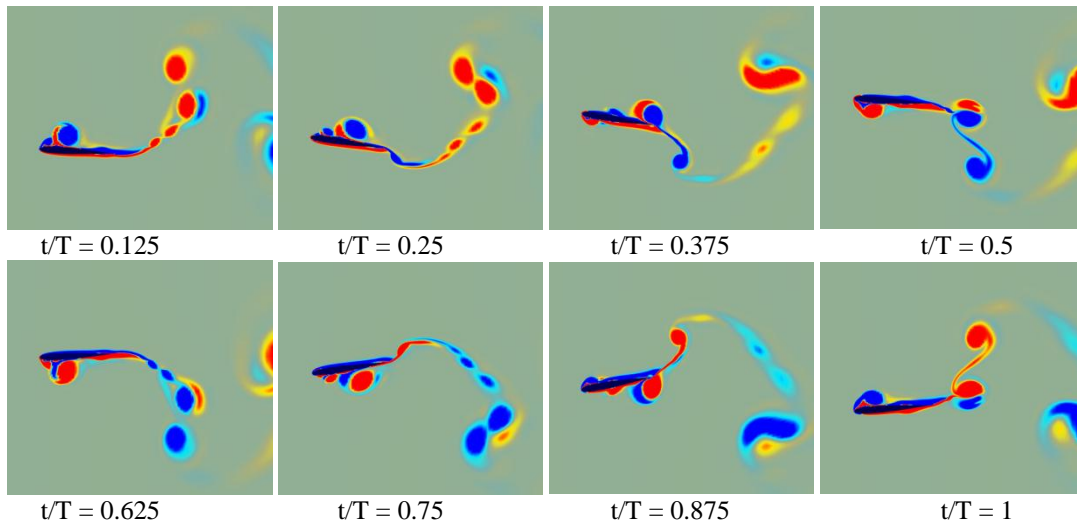
$t/T = 0.75$

$t/T = 0.875$

$t/T = 1$

Şekil 10: $h=0.3$ ve $\alpha_{\max} = 10^\circ$ durumunda yunuslama ve dalma hareketini beraber yapan kanat profilinin girdap görüntüleri

Şekil 11'de $h=0.4$ için bütünleşik hareketteki girdap görüntüleri gösterilmiştir. Girdap kayma mekanizması $h=0.3$ 'deki çözüme benzer olmasına rağmen, iz bölgesindeki girdap yapıları oldukça farklıdır. Bu farklılık kanat profilinin iki tarafı üzerinde nisbeten daha güçlü olan shear tabakalarının görünümünden kaynaklanmaktadır. Bu shear tabakalarından birisi kanat profili boyunca genişler ve TEV'i beslerken, zıt işaretli diğeri birincisinden daha fazla genişleyen bu tabakayı kesmektedir. Bu mekanizma TEV ve LEV'e ilave 2 girdaptan daha fazla yapının oluşmasına ve hızlıca gücünü kaybetmemesine neden olmaktadır. Hareket halindeki LEV daha sonra TEV'i yakalamakta ve onların birleşerek nisbeten daha büyük tek girdap çekirdeği haline gelmesini sağlar. Yalnız dalma hareketinin $h=0.4$ 'deki durum ile kıyaslanırsa, bütünleşik hareket LEV ve ikinci girdabın gücünü azaltmakta ama LEV ile TEV'in birleşme zamanını azaltmaktadır.



Şekil 11: $h=0.4$ ve $\alpha_{\max} = 10^\circ$ durumunda yunuslama ve dalma hareketini beraber yapan kanat profilinin girdap görüntüleri

DEĞERLENDİRMELER

Burada sadece dalma ve dalma ile beraber yunuslama hareketi yapan bir NACA 0012 kanat profilinin kuvvet katsayıları ve iz bölgesi girdap yapıları incelenmiştir. Yalnız dalma hareketiyle yapılan çalışmada, düşük dalma genliklerinde ($h \leq 0.2$) sadece TEV bulunurken yüksek dalma genliklerinde ($h \geq 0.3$) hem LEV hem de TEV bulunmaktadır. 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. Girdap yapısına ilave olarak, biz kuvvet katsayıları üzerinde genliğin etkisini inceledik. Dalma genliğinin artmasıyla üretilen itkinin lineer olarak arttığı fakat itki veriminin belirli bir maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Genliğin artırılması kanadı sürüklenme üretilen itki üreten rejime geçirebilir. Yine dalma genliği artırıldıkça, taşıma katsayısı eğrisinde bazı ani değişimler görülmüş ve bunun sebebinin büyüyen LEV'in firar kenarındaki etkisi olduğu tespit edilmiştir. Yunuslama ile beraber yapılan dalma hareketinde ise nisbeten daha karmaşık girdap mekanizmaları ve etkileşimleri ile karşılaşmıştır. Burada analizi yapılan girdap dinamiği çözümlerine rağmen, bu çalışmanın dalma genliği ve faz farkının belirli değerleri kapsayacak şekilde genişletilmesine ihtiyaç vardır.

Kaynaklar

- [1] Michelson, R.C., “Slow flight in the lower Mars Atmosphere in support of NASA science missions”, International Unmanned Vehicles Workshop, Istanbul, Turkey, 10-12 June 2010.
- [2] Young, J., and Lai, J. C. S., “Mechanisms Influencing the Efficiency of Oscillating Airfoil Propulsion,” AIAA Journal, Vol. 45, No. 7, pp. 1695 – 1702, July 2007.
- [3] Lewin, G. C. and Haj-Hariri, H., “Modelling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow”, J. Fluid Mech. 492, pp. 339-362, 2003.
- [4] Taylor, G.K., Nudds, R.L. and Thomas, L.R., "Flying and Swimming Animals Cruise at a Strouhal Number Tuned for High Power Efficiency," Nature, 425, pp. 707-711, 2003.
- [5] Mueller, T.J., “Fixed and Flapping Wing Aerodynamics For Micro Air Vehicle Applications”, AIAA, vol. 195, 2001.
- [6] Lai, J.C.S., Platzer, M.F., “The characteristics of a plunging airfoil at zero freestream velocity”, AIAA Journal, Vol. 39, pp. 531-534, 2001.
- [7] Lai, J. C. S., and Platzer, M. F., Jet Characteristics of a Plunging Airfoil, AIAA Journal, Vol. 37, No. 12, pp. 1529-1537, 1999.
- [8] Anderson, J. M., Streitlien, K., Barrett, D. S., and Triantafyllou, M. S., "Oscillating foils of high propulsive efficiency", Journal of Fluids Mechanics, vol. 360, pp. 41-72, 1998.
- [9] Jones, K. D., Dohring, C. M., and Platzer, M. F., “Experimental and Computational Investigation of the Knoller-Betz Effect”, AIAA Journal, Vol. 36, No. 7, 1998.
- [10] Koochesfahani, M. M., “ Vortical Patterns in the Wake of an Oscillating Airfoil” AIAA Journal, Vol. 27, No. 9, pp. 1200 – 1205, 1989.
- [11] Oshima, Y., Natsume, A., “Flow field around an oscillating airfoil. Proceedings of the Second International Symposium on Flow Visualization”, Bochum, West Germany, 1980.
- [12] von Kármán, T., and Burgers, J. M., “General Aerodynamic Theory— Perfect Fluids,” Aerodynamic Theory, edited by W. F. Durand, Vol. 2, Julius Springer, Berlin, p. 308, 1934.