

İKİ ÇIRPAN KANADIN ÜRETTİĞİ İTKİNİN HAREKET EDEN VE BOZULAN ÇÖZÜM AĞLARINDA ENİYİLEŞTİRİLMESİ

Mustafa Kaya* ve İsmail H. Tuncer†
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Ankara

ÖZET

Üst üste çırpan iki kanat kesitinden maksimum itki elde etmek için çırpma hareketi eniyileştirilmiştir. Yunuslama ve dalma şeklinde çırpan kanat kesitleri etrafındaki zamana bağlı akış alanları, hareket eden ve bozulan üst üste binmiş ağ sistemi kullanan bir viskoz akış çözücü ile hesaplanmıştır. Harmonik yunuslama ve dalma hareketlerinin genlikleri ve aralarındaki faz farkı eniyileştirilmiştir. Eniyileştirme için paralel hesaplama ortamında çalışan gradyant tabanlı bir algoritma kullanılmıştır. Üst üste binmiş bozulan ağ sistemi, iki kanat kesitinin birbirine yakınlaşmasındaki sınırı kadırmıştır. Düşük frekanslarda üst üste çırpan iki kanat kesitinin tek olarak çırpan kanat kesitinden daha fazla itki ürettiği gösterilmiştir. Yüksek çırpma frekansında, eniyi yunuslama genliği sifıra yaklaşmakta ve hücum kenarı girdaplarının erken oluşmasına neden olarak itki üretimini sınırlandırmaktadır.

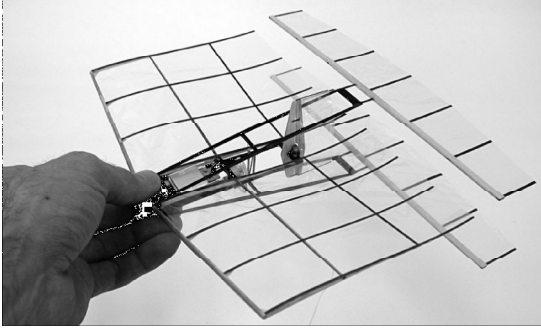
GİRİŞ

Küçük kuşların ve böceklerin uçuş performansına bakıldığında düşük Reynolds sayılı uçuş ve manevra ortamlarında gerekli itki üretimi için çırpan kanatlar kullanılmasının daha uygun olduğu 20. Yüzyılın başlarından itibaren düşünülmektedir[16]. Yaklaşık bir asırlık geçmişe sahip olan çırpan kanatlar ile itki üretilmesi düşüncesi son yıllarda mikro hava araçları (MHA) üzerinde çalışan birçok araştırmacı tarafından yeniden gündeme getirilmiştir. MHA'lar askerî ve sivil amaçlı birçok görevde kullanılması düşünülen 15 cm'den daha az kanat açıklığına sahip ve uçuş hızı 30-60 kph arasında değişen oldukça küçük ölçekli araçlardır.

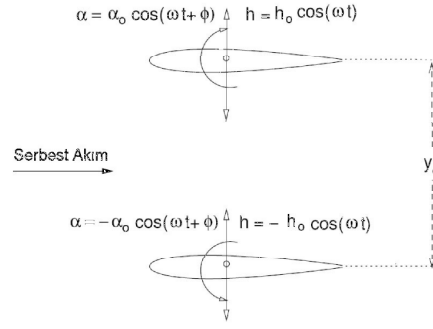
Son 10 yıl içerisinde, MHA uçuşları için gerekli aerodinamik performansı sağlayacak ve enerjiyi verimli kullanacak çırpan kanat teknolojileri güncel bir araştırma ve geliştirme konusu olmuştur. [11]. Yapılan deneysel ve hesaplamalı çalışmalarda, çırpan kanatların kinematik, dinamik ve akış özelliklerini incelenmiş ve kaldırma, sürtünme kuvvetleri ile itki üretimi üzerine önemli değerlendirmeler yapılmıştır[11, 16]. Lai ve Platzer[17] ile Jones ve grubu[18] su

*Araştırma görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: mkaya@ae.metu.edu.tr

†Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: tuncer@ae.metu.edu.tr



Şekil 1: Çırpan kanatlı MHA modeli (Jones ve Platzer)



Şekil 2: Üst üste çırpan iki kanat kesitinin 180° faz farklı çırpma hareketi

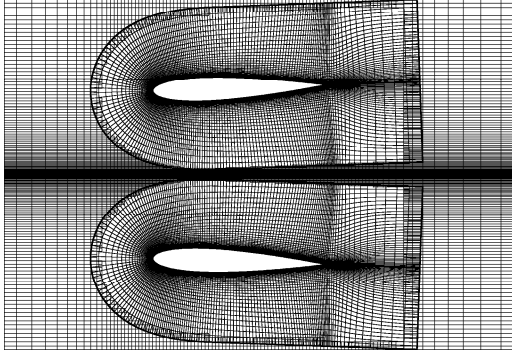
tüneline yaptıkları çırpan kanatlar etrafındaki akış görüntüleme deneyleri ile iz bölgesindeki akış özelliklerine bakarak itkinin nasıl oluştuğunu anlamaya çalışmıştır. Navier-Stokes hesaplamaları yaparak yürüttükleri sayısal çalışmalarda Tuncer ve grubu[22, 20, 13] ile Isogai ve grubu[14, 12], tek bir kanat kesitinin yaptığı yunuslama ve dalma hareketi sonucu oluşan itkinin akıştaki ayrılmadan ne şekilde etkilendiğini araştırmışlardır.

Yakın zamanda, Jones ve Platzer[8] üst üste çırpan iki kanat ile itkisi sağlanan bir radyo kontrollü mikro hava aracı geliştirerek deneme uçuşunu gerçekleştirmişlerdir (Şekil 1). Jones ve grubu[8, 9, 10] ve Platzer ve Jones tarafından çırpan kanatlar üzerine yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, sayısal akış çözümleri ile gerçek uçuş koşulları arasındaki boşluğa dikkat çekmiştir.

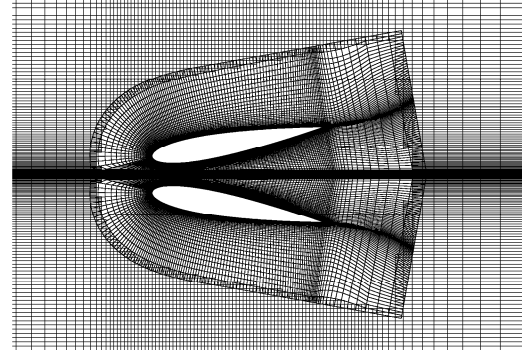
Anderson ve grubu[19] yaptıkları deneyler ile, yunuslama ve dalma hareketleri arasındaki faz farkının, itki verimini arttırmada önemli bir rol oynadığını tespit etmiştir. Yakın zamanda, Heathcote ve Gursul[4], bükülgen kanat kesitlerinin düşük Reynolds sayılarında yaptığı dalma ve yunuslama hareketini su tüneline yürüttükleri deneyler ile incelemişlerdir. Gözlemlerinde, sabit dalma ve yunuslama genlikleri için dalma ve yunuslama arasındaki belirli bir faz farkında, itkinin maksimum olduğunu tespit etmişlerdir. Schouveiler ve grubu [2] çırpma parametrelerinin itki kuvveti ve hidromekanik verim üzerindeki etkilerini araştırmak için bir su (aquatic) itki sistemin performansını deneysel olarak incelemiştir. Yeni çalışmalarında, Muniappan ve grubu[5] çırpan kanatlı bir mikro hava aracının kaldırma kuvveti özellikleri için çırpma açısı ve frekansı üzerine yoğunlaşmıştır. Kurtuluş ve grubu[3], sayısal ve analitik yöntemler kullanarak havada asılı duran bir çırpan kanat kesitinden maksimum kaldırma kuvveti elde etmek için çırpma parametrelerini eniyileştirmiştir.

Daha önceki çalışmalarında, Tuncer ve Kaya[6, 1, 7] tek ya da üst üste (Şekil 2) çırpan kanat kesitlerinden maksimum itki ve itki üretim verimi elde etmek için çırpma hareketinin parametrelerini eniyileştirmişlerdir. Ancak, üst üste çırpan kanat kesitlerini incelemek için kullanılan üst üste binmiş ağ sistemi (Şekil 3), kanat kesiti ağlarının iç içe girmesine olanak sağlamadığı için, dalma ve yunuslama genliklerine kısıtlamalar getirmiştir. Bu çalışmada, ağ bozulmasından (Şekil 4) yararlanılarak hareketli üst üste binmiş ağ çözümlerinde gelişme sağlanmıştır. Elde edilen zamana bağlı akış çözümlerinin doğruluğu hareket eden üst üste binmiş ağ çözümleri ile gösterilmiştir.

Bu çalışmada, üst üste çırpan kanat kesitlerinden maksimum itki elde etmek için çırpma hareketinin parametreleri eniyileştirilmiştir. Kanat kesitleri üzerindeki zamana bağlı viskoz akış alanları, hareket eden ve bozulan üst üste binmiş ağ sistemi kullanılarak paralel hesaplama ortamında çözülmüştür. Gradyant tabanlı eniyileştirme algoritması da paralel olarak uygulanmıştır. Paralel hesaplamalar, PVM kitaplık rutinleri kullanan bir bilgisayar öbeğinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3: Hareket eden üst üste binmiş ağ sistemi



Şekil 4: Hareket eden ve bozulan üst üste binmiş ağ sistemi

YÖNTEM

Üst üste çırpın iki kanat kesiti etrafındaki zamana bağlı viskoz akış alanları, hareket eden ve bozulan ağlar(Şekil 4) üzerinde Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesi ile elde edilir. Hesaplamalar paralel ortamda gerçekleştirilir. Paralel hesaplamalar için, arkaplan ağ simetri ekseninden ikiye bölünür. Dolayısıyla, hesaplama alanı toplam dört alt çözüm ağından oluşur. Paralel çözüm algoritmasında PVM ileti gönderme kitaplık rutinleri kullanılır. Hesaplanan zamana bağlı akış alanları, aerodinamik yüklerin zamana göre değişimi ve anlık parçacık izleri kullanılarak analiz edilir ve yorumlanır.

Navier-Stokes Çözücü

Herbir alt çözüm ağında iki boyutlu, ince-tabaka, Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri yüksek korunumlu biçimde çözülür. Ağlararası sınır şartları, sınır noktalarında akış değişkenlerinin komşu ağdan içdeğerlendirilmesi(interpolation) ile uygulanır. Çözülen akış denklemleri, eğriçizgisel(curvilinear) koordinat sisteminde, (ξ, ζ) , şu şekilde verilmektedir:

$$\partial_t \hat{\mathbf{Q}} + \partial_\xi \hat{\mathbf{F}} + \partial_\zeta \hat{\mathbf{G}} = Re^{-1} \partial_\zeta \hat{\mathbf{S}} \quad (1)$$

Burada, $\hat{\mathbf{Q}}$, $1/J(\rho, \rho u, \rho w, e)$, korunum değişkenleri vektörü, J , metrik Jacobian, $\hat{\mathbf{F}}$ ve $\hat{\mathbf{G}}$, konvektif akı vektörleri ve $\hat{\mathbf{S}}$, kanat kesiti yüzeyine dik çıkan ζ yönündeki viskoz akıların ince tabaka yaklaşımıdır. Konvektif akılar, akış yönü(upwind) tabanlı üçüncü dereceli Osher[24, 25] akı farkı ayrıştırma yöntemi kullanılarak hesaplanır.

Ayrıştırılmış denklemler, yaklaşık çarpanlı kapalı zaman integrasyonu(approximately factored, implicit algorithm) ile çözülür[23]:

$$\begin{aligned} & \left[I + h_\xi \left(\nabla_\xi^b \tilde{A}_{i,k}^+ + \Delta_\xi^f \tilde{A}_{i,k}^- \right) \right]^p \times \left[I + h_\zeta \left(\nabla_\zeta^b \tilde{B}_{i,k}^+ + \Delta_\zeta^f \tilde{B}_{i,k}^- - Re^{-1} \delta_\zeta \tilde{M}_{i,k} \right) \right]^p \\ & \quad \times \left(\hat{Q}_{i,k}^{p+1} - \hat{Q}_{i,k}^p \right) \\ & = - \left(\hat{Q}_{i,k}^p - \hat{Q}_{i,k}^n \right) \\ & \quad - h_\xi \left(\hat{F}_{i+1/2,k}^p - \hat{F}_{i-1/2,k}^p \right) \\ & \quad - h_\zeta \left(\hat{G}_{i,k+1/2}^p - \hat{G}_{i,k-1/2}^p \right) \\ & \quad + Re^{-1} h_\zeta \left(\hat{S}_{i,k+1/2}^p - \hat{S}_{i,k-1/2}^p \right) \\ & \quad + \left(1 - J_{i,k}^n / J_{i,k}^{n+1} \right) \hat{Q}^p \end{aligned} \quad (2)$$

Bu denklemde, $\tilde{A}^{\pm} = \partial\hat{F}/\partial\hat{Q}$, $\tilde{B}^{\pm} = \partial\hat{G}/\partial\hat{Q}$ ve $\tilde{M} = \partial\hat{S}/\partial\hat{Q}$ akı Jacobian matrisleridir. t , hesaplama zamanı olmak üzere, $h_{\xi} = \Delta^f t / \Delta^f \xi$ ve $h_{\zeta} = \Delta^f t / \Delta^f \zeta$ olarak tanımlanır ve Δ^f , ∇^b ve δ , sırasıyla ileri, geri ve merkez farklar operatörleridir. Üst simge n zaman adımını, p ise her zaman adımındaki Newton iterasyon sayısını gösterir. Sol taraftaki ağdasız (inviscid) akı Jacobian matrisleri, \tilde{A} ve \tilde{B} , Steger-Warming[26] akı vektörü ayrıştırma yöntemi kullanılarak hesaplanır. Visköz \hat{S} akıları, ikinci derece kesinlikli merkez farklar ile hesaplanır. Sağ tarafta görülen son terim, ağ bozulmasını göz önünde bulundurur.

Kanat kesiti ağlarının karşılık geldiği yerlerde arkaplan ağda oluşan boşluklar, çözümden *boşaltma* (i-blanking) algoritması ile çıkartılır[21]. Bu işlem, her çözüm zaman adımında gerçekleştirilir. Yine her zaman adımında akış korunum değişkenleri, üst üste binmiş ağlar tarafından oluşturulan ağlararası sınırlarda içdeğerlendirilir.

Hesaplama Alanı

Hesaplama alanı üst üste binmiş ağ sistemi ile ayrıştırılır. Kanat kesitleri etrafındaki C-tipi çözüm ağları bir Kartezyen arkaplan ağ üzerine oturtulur (Şekil 4). Her bir kanat kesitinin çırpma hareketi, kanat kesiti ve etrafındaki çözüm ağı hareket ettirilerek sağlanmaktadır. Kanat kesiti ağları, kanat kesitleri arasındaki simetri çizgisine yaklaştıkça bozulur.

Üstteki kanat kesitinin dalma, h , ve yunuslama, α , bileşimi olarak tanımlanan çırpma hareketi aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned} h &= -h_0 \cos(\omega t) \\ \alpha &= -\alpha_0 \cos(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (3)$$

Altındaki kanat kesiti üsttekine göre 180° faz farkı ile çırpma hareketini yapmaktadır.

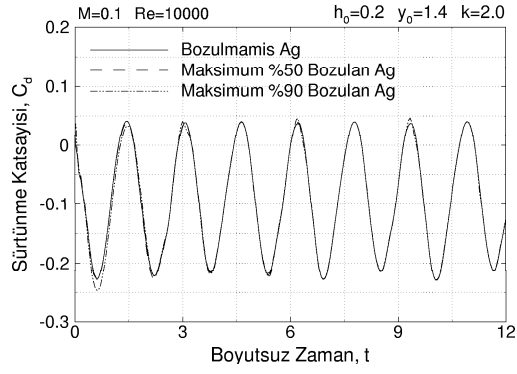
Eniyileştirme

Eniyileştirme işlemi, bir hedef fonksiyonun en hızlı çıkışı (steepest ascent) yönünde ilerlenerek yürütülür. En hızlı çıkış yönünü, hedef fonksiyonun gradyant vektörü belirler: $\vec{\nabla}O(\vec{v}_n) = \frac{\partial O}{\partial V_1} \vec{v}_1 + \frac{\partial O}{\partial V_2} \vec{v}_2 + \dots$. Burada, V_n , eniyileştirme değişkeni, v_n , artan V_n yönünde birim vektör ve $O(\vec{v}_n)$ ise hedef fonksiyon yani üretilen itkidir.

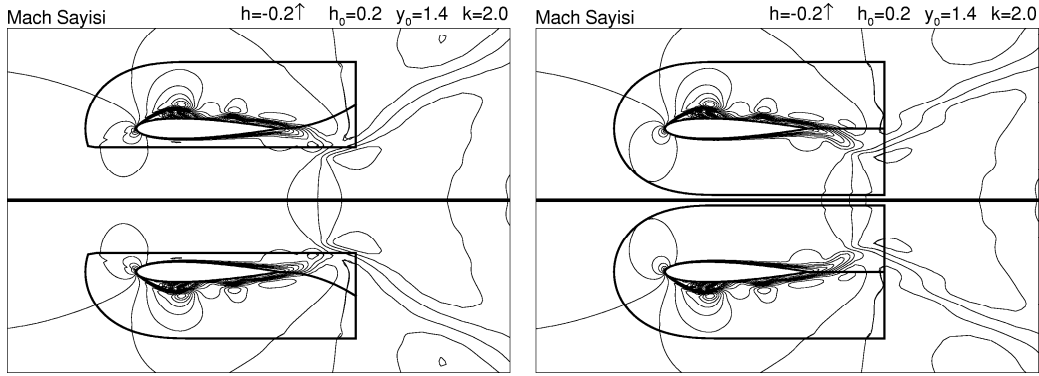
Gradyant vektörünün bileşenleri sayısal olarak birinci dereceden sonlu farklar yaklaşımı ile hesaplanır. Burada göz önünde bulundurulması gereken nokta bu vektör bileşenlerinin çırpma hareketinden elde edilen itki periyodik bir davranış gösterene kadar zamana bağlı bir çözümün sonrasında hesaplandığıdır. En hızlı çıkış yönünü belirten birim vektör, $\vec{D} = \frac{\vec{\nabla}O}{|\vec{\nabla}O|}$, hesaplandıktan sonra ilerleme adımı, $\Delta\vec{V} = \epsilon\vec{D}$, belirlenir. Referans [1], adım boyunu gösteren ϵ değerinin yaklaşımı için, o anki ve bir önceki eniyileştirme adımında hesaplanan gradyant vektörlerinden yararlanılmasını önermektedir.

Paralel Hesaplama

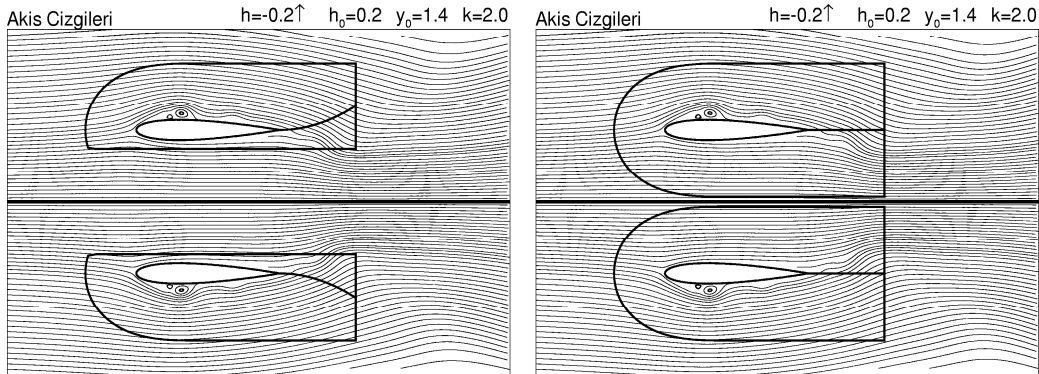
Akış çözümleri yönetici-işçi mantığına dayalı basit bir paralel işlem algoritması ile birden fazla işlemci kullanılarak elde edilir. Çözüm ağı sistemi alt ağlara bölündükten sonra her bir alt ağdaki çözüm farklı bir işlemcide hesaplanır. İşlemciler arası iletişim PVM (Paralel Virtual Machine Sürüm 3.4.5) mesaj gönderme kitaplık rutinleri ile sağlanır. Eniyileştirme işlemi sırasında, gradyant vektörünü belirlemek için gerekli olan eniyileştirme değişkenlerine göre bir miktar bozulmuş zamana bağlı çözümler de paralel olarak hesaplanır. Paralel hesaplamalar Linux işletim sistemi altında çift Pentium ve Xeon işlemcili bilgisayarlardan oluşan bir bilgisayar öbeğinde gerçekleştirilir.



Şekil 5: Sürtünme katsayısının zamana göre değişimi



Şekil 6: Anlık Mach sayısı dağılımı



Şekil 7: Anlık akış çizgileri

SONUÇLAR

Bu çalışmada, çırpan kanat kesitleri üzerindeki zamana bağlı laminar akışlar, $Re = 1 \cdot 10^4$ ve $M = 0.1$, Reynolds ve Mach sayılarında hesaplanmıştır. İlk olarak üst üste binmiş ağ çözümleri doğrulanmıştır. Bunun için yüksek frekansta dalma hareketi yapan üst üste iki kanat kesiti üzerindeki akış alanları hesaplanmıştır. Bu çalışmadan sonra, yunuslama ve dalma bileşiminde çırpan kanat kesitlerinin çırpma hareketleri eniyileştirilmiştir. Üst üste çırpan iki kanat kesitinden elde edilen eniyi itki, tek olarak çırpan kanat kesitinin ürettiği eniyi itki ile karşılaştırılmıştır. Eniyileştirme değişkenleri olarak yunuslama ve dalma hareketlerinin genlikleri ve bu iki hareket arasındaki faz farkı seçilmiştir. Eniyileştirme çalışmalarında, kanat kesitleri arasındaki ortalama uzaklık, $y_0 = 1.4$ ve 1.0 , ve indirgenmiş çırpma frekansı, $k \equiv \frac{\omega c}{U_\infty} = 1.0$, 1.5 ve $k = 2.0$ değerleri kullanılmıştır. Hesaplanan zamana bağlı çözümler, aerodinamik yüklerin zamana göre değişimi ve anlık akış alanları göz önünde bulundurularak yorumlanmıştır.

Doğrulama Çalışması

Doğrulama çalışması için, indirgenmiş çarpma frekansı, $k = 2.0$, olan bir dalma hareketi kullanılmıştır. Kanat kesitleri birbirinden ortalama, $y_0 = 1.4$ uzaklığa yerleştirilmiş ve dalma genliği olarak, $h_0 = 0.2$ seçilmiştir.

Doğrulama çalışmasında, iki bozulan ağ çözümü ile bozulmamış ağ çözümü karşılaştırılmıştır. Bozulan ağ çözümlerinde kanat kesitleri dalma hareketi yaparken, sanal yatay çizgilere yaklaşıldıkça ağların en fazla %50 ve %90 oranlarında sıkışması sağlanmıştır.

Zamana bağlı sürtünme(-itki) katsayılarının değişimini Şekil 5 göstermektedir. Görüldüğü üzere, bozulan ağlarla elde edilen çözümler, bozulmamış ağlar kullanılarak hesaplanan çözümler ile yüksek uyum içerisindedir.

Şekil 6 ve 7, maksimum %90 bozulma anında akış alanını gösteren anlık Mach sayısı dağılımlarını ve akış çizgilerini vermektedir. Şekillerde bozulmamış ağlardan elde edilen sonuçlar ile de bir karşılaştırılma yapılmaktadır. Her iki çözüm sistemi ile hesaplanan akış alanları arasındaki uyum hareket eden ve bozulan ağ sisteminin doğruluğunu göstermektedir.

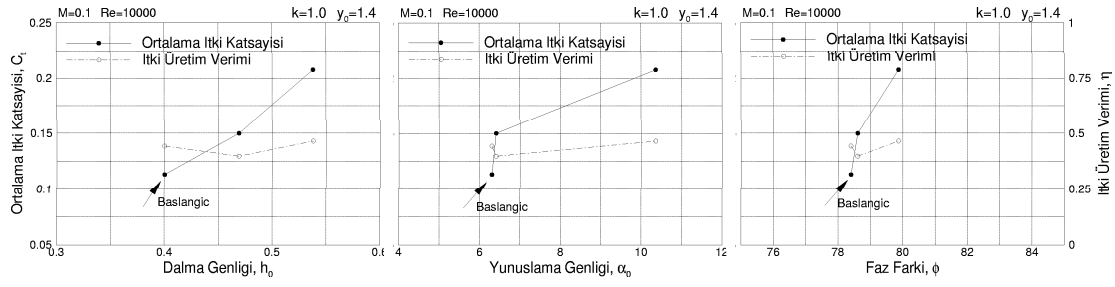
Tablo 1: Eniyileştirme durumları ve değişkenleri

Durum	k	y_0	h_0	$\alpha_0(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$
1	1.0	1.4	V	V	V
2	1.5	1.4	V	V	V
3	2.0	1.4	V	V	V
4	1.0	1.0	V	V	V
5	2.0	1.0	V	V	V

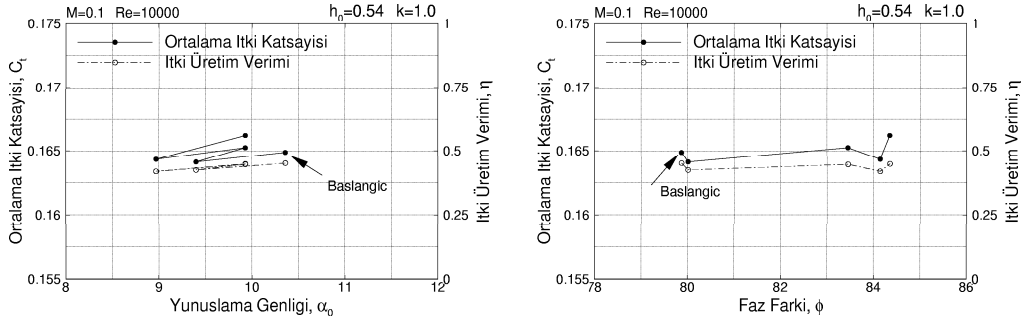
Eniyileştirme Çalışması

Eniyileştirme çalışmaları dalma ve yunuslama hareketini birlikte yapan üst üste iki kanat kesiti için gerçekleştirilmiştir. Tablo 1 incelenen eniyileştirme durumlarını özetlemektedir. Tabloda eniyileştirme değişkenleri V ile gösterilmiştir. Aynı eniyileştirme durumları tek olarak çırpan kanat kesiti için de incelenmiştir. Ancak tek olarak çırpan kanat kesiti için yürütülen eniyileştirme çalışmalarında dalma genliği, h_0 , üst üste çırpan iki kanat kesiti için yakınsayan eniyi değerinde sabit tutulmuştur. Her iki kanat kesiti yapılandırması için elde edilen eniyi itki değerleri, daha sonra, karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda, üst üste çırpan kanat kesitleri için hesaplanan bütün itki değerleri kanat kesiti başına düşen itki olarak verilmiştir. Her bir eniyileştirme durumunda 4 – 9 işlemci kullanılarak paralel hesaplamalar için yaklaşık 10 – 20 saat gerekmiştir.

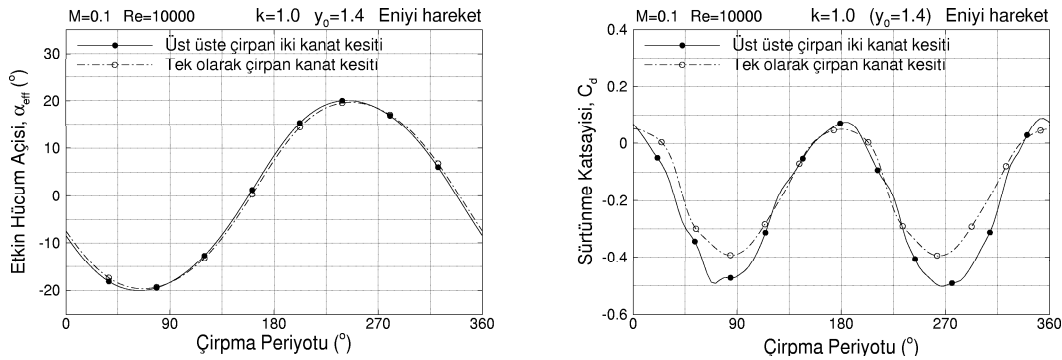
Durum 1 için eniyileştirme işleminin adımları Şekil 8'de verilmektedir. Eniyileştirme için başlangıç tahminleri daha önceki kısıtlayıcı eniyileştirme çalışmamızda[6] elde edilen eniyi değerler olarak seçilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, eniyileştirme değişkenleri hedef fonksiyon olan itkinin gradyanı boyunca kanat kesitlerinin birbirine yakın olabileceği en son fiziksel sınıra kadar 3 adım içerisinde ilerlemiş ve itki değeri düzenli olarak artmıştır. Yakınsanan ortalama itki katsayısı, $C_t = 0.21$, $h_0 = 0.54$, $\alpha_0 = 10.4^{\circ}$ ve $\phi = 79.9^{\circ}$ değerlerinde elde edilmiştir. Bu değere karşılık gelen itki üretim verimi ise $\eta = 46.5\%$ 'dir. Bütün eniyileştirme durumları için yakınsama sonuçları Tablo 2'de sunulmaktadır. Şekil 9 tek olarak çırpan kanat kesiti için eniyileştirme adımlarını göstermektedir. Bu durum için α_0 ve ϕ değişkenleri ile yürütülen eniyileştirme işlemi daha düşük ortalama itki katsayısı, $C_t = 0.17$, verirken yakın itki üretim



Şekil 8: Durum 1 için eniyileştirme adımları (Üst üste çırpan iki kanat kesiti)



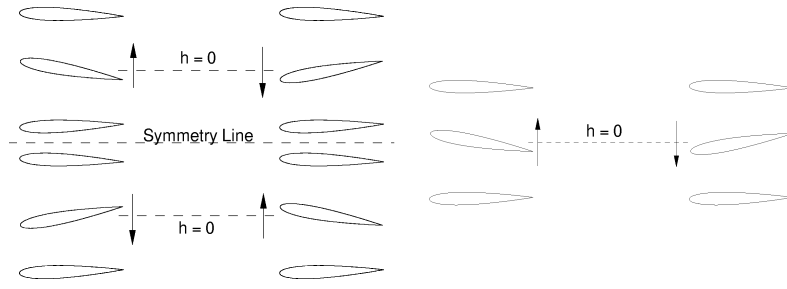
Şekil 9: Durum 1 için eniyileştirme adımları (Tek olarak çırpan kanat kesiti)



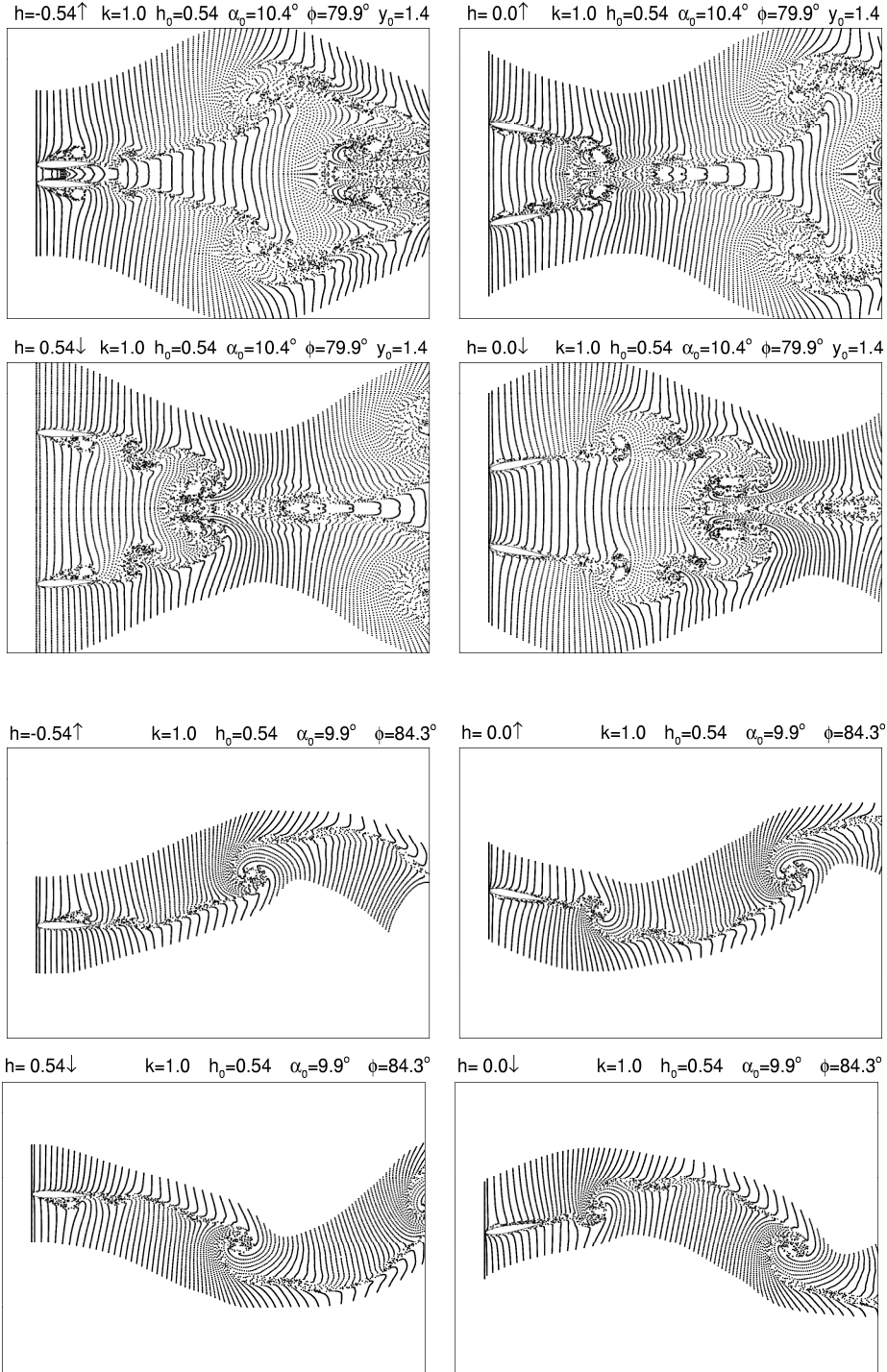
Şekil 10: Durum 1 için etkin hücum açısı ve zamana bağlı sürtünme katsayısı

verimi, $\eta = 44.8\%$ sağlamıştır. Yakınsanan çırpma parametreleri, $\alpha_0 = 9.9^\circ$ ve $\phi = 84.3^\circ$, üst üste çırpan iki kanat kesiti durumunda elde edilen eniyi hareket parametrelerine çok yakın olmasına rağmen itki değeri yaklaşık %25 daha düşüktür. Üst üste ve tek olarak çırpan kanat kesiti durumları için eniyi çırpma hareketi boyunca etkin hücum açısının ve sürtünmenin(-itki) zamana göre değişimi Şekil 10'da gösterilmektedir. Şekilde, kanat kesitleri ortalama dalma konumundayken üst üste çırpan iki kanat kesitinin tek olarak çırpan kanat kesitine kıyasla daha yüksek anlık itki verdiği görülmektedir.

Durum 1 için üst üste ve tek olarak çırpan kanat kesitlerinin eniyi çırpma hareketi ve bu hareketin bir periyodu boyunca akış alanında oluşan anlık parçacık izleri Şekil 11 ve 12'de verilmektedir. Üst üste çırpan kanat kesitleri üzerindeki akışın tek olarak çırpan kanat kesiti üzerindeki akışa göre güçlü hücum kenarı girdapları nedeniyle daha girdaplı olduğu görülmektedir. Kanat kesitleri çırpma boyunca aşağı ve yukarı hareket ederken hücum kenarı girdaplarının oluştuğu ve iz bölgesine doğru ilerlediği gözlenmektedir. Güçlü girdaplar nedeniyle veter boyunca oluşan yüksek emmenin maksimum itkiyi sağladığı söylenebilir.



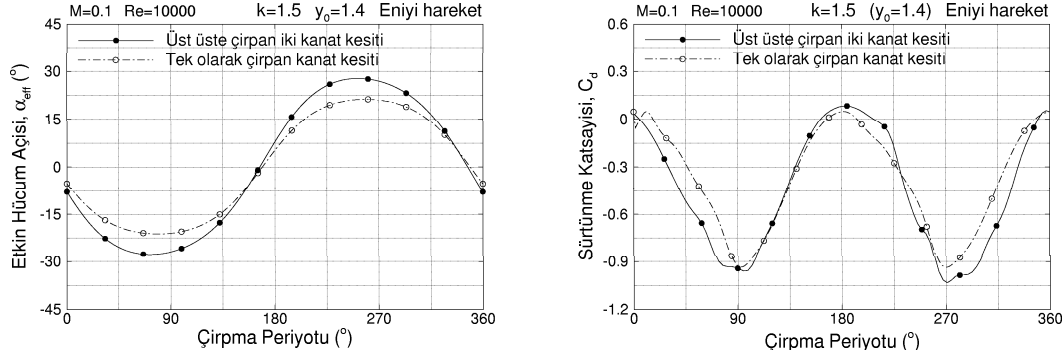
Şekil 11: Durum 1 için eniyi hareket (Üst üste ve tek olarak çırpan kanat kesitleri)



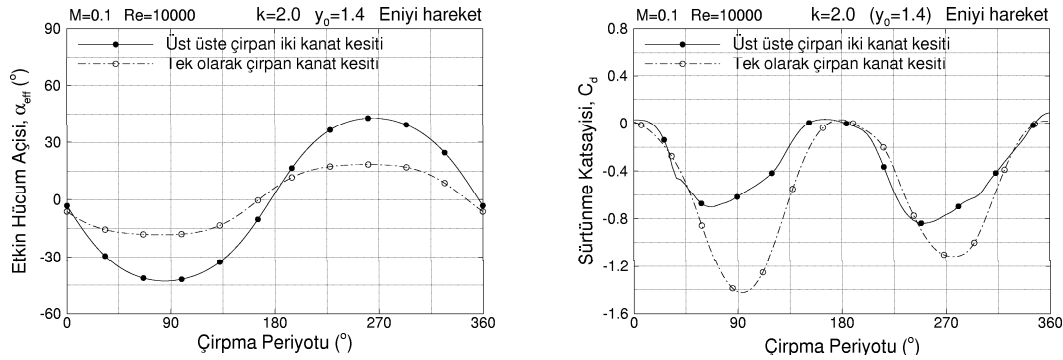
Şekil 12: Durum 1 için parçacık izleri (Üst üste ve tek olarak çırpan kanat kesitleri)

Tablo 2: Eniyileştirme durumlarının yakınsama sonuçları

Durum	Üst üste çirpan iki kanat kesiti					Tek olarak çirpan kanat kesiti				
	h_0	$\alpha_0(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	C_l	$\eta[\%]$	h_0	$\alpha_0(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	C_t	$\eta[\%]$
1	0.54	10.4	79.9	0.21	47	0.54	9.93	84.3	0.17	45
2	0.53	11.6	93.7	0.45	41	0.53	15.8	112.	0.38	45
3	0.47	2.32	39.0	0.38	16	0.47	20.4	123.	0.56	42
4	0.34	4.21	90.2	0.09	39	0.34	4.21	90.2	0.06	39
5	0.34	0.45	213.	0.27	22	0.34	13.5	139.	0.30	38

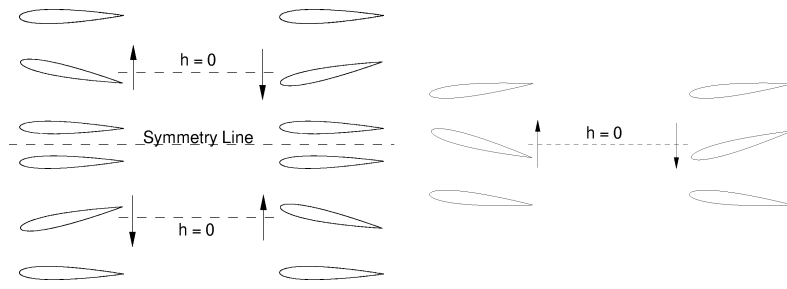


Şekil 13: Durum 2 için etkin hücum açısı ve zamana bağlı sürtünme katsayısı

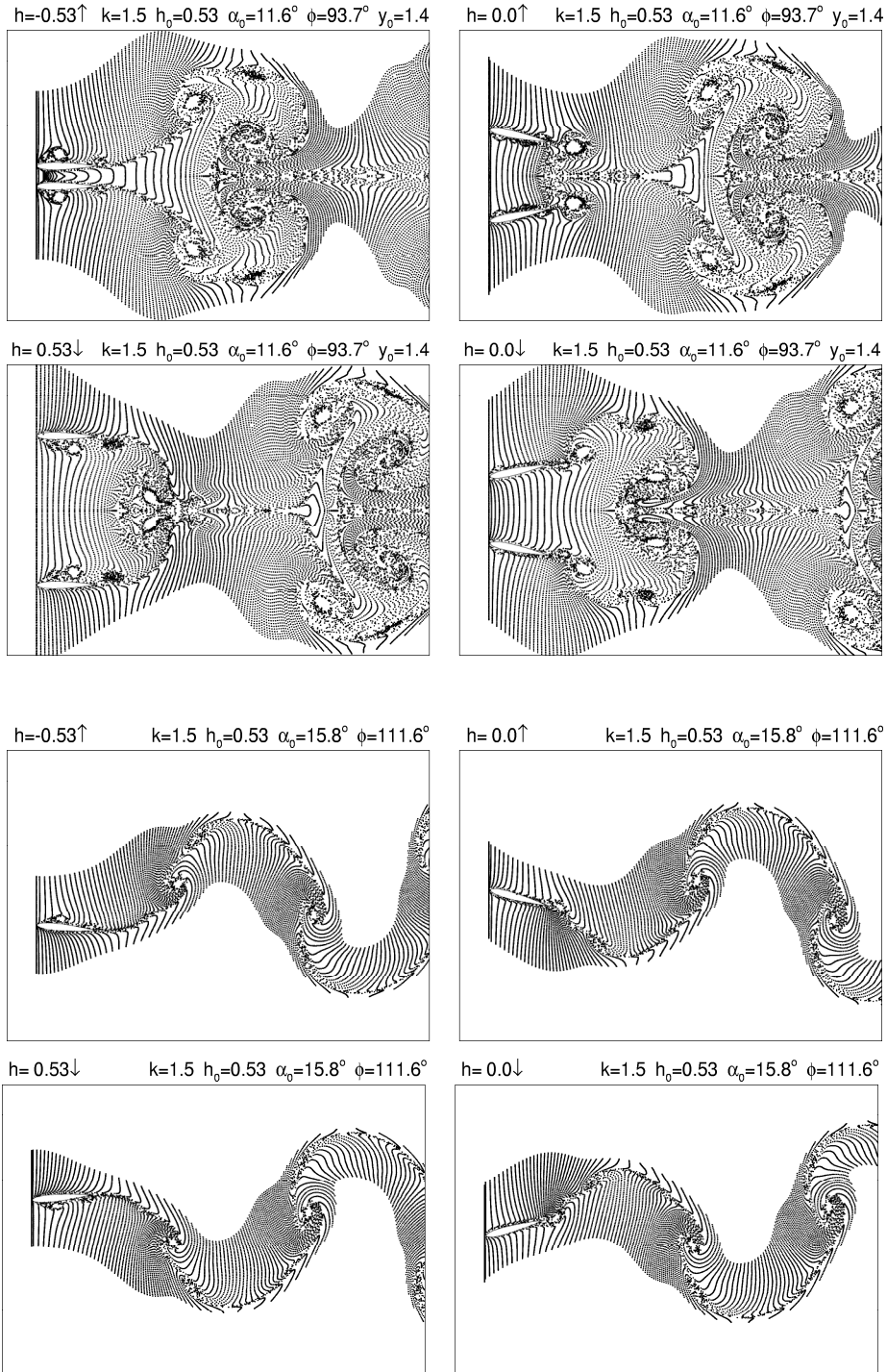


Şekil 14: Durum 3 için etkin hücum açısı ve zamana bağlı sürtünme katsayısı

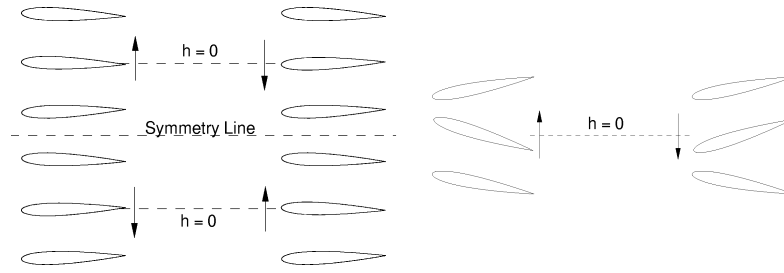
Durum 2 ve 3'te, Durum 1'den farklı olarak indirgenmiş çirpma frekansı sırasıyla $k = 1.5$ ve 2.0 olarak seçilmiştir. Üst üste çirpan kanat kesitleri için yapılan eniyileştirmede, Durum 1 ve Durum 2'nin aksine Durum 3'te eniyi yunuslama genliğinde önemli ölçüde bir düşüş görülmektedir. Bu durumda kanat kesitleri dalma hareketine çok yakın bir hareket yapmaktadır. Benzer gözlem daha önceki[6] çalışmada da elde edilmiştir. Beklenildiği üzere[1, 7] sabit dalma genliğinde tek olarak çirpan kanat kesitinden elde edilen eniyi itki değeri frekans arttıkça artmaktadır. Hatta $k = 2.0$ frekans değeri için eniyi itki üst üste çirpan iki kanat kesiti durumunun verdiği eniyi itkidenden daha yüksektir. Tek olarak çirpan kanat kesiti yapılandırmasının fiziksel nedenlerle daha büyük yunuslama genliğine sahip olabilmesi dolayısıyla daha yüksek itki sağlandığı düşünülmektedir. Dikkat çeken ikinci bir nokta ise, üst üste çirpan kanat kesitinin $k = 2.0$ çirpma frekansında verdiği eniyi itki durumunda itki üretim veriminin çok azaldığı ve $\eta = \%16$ değerine düştüğüdür. Durum 2 ve Durum 3 için etkin hücum açısının ve sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimleri Şekil 13 ve 14'te verilmektedir. Durum 3 için maksimum itki anında tek olarak çirpan kanat kesitinin ürettiği anlık itkinin üst üste çirpan iki kanat kesiti yapılandırmasına göre yaklaşık iki kat yüksek olduğu şekilde görülmektedir.



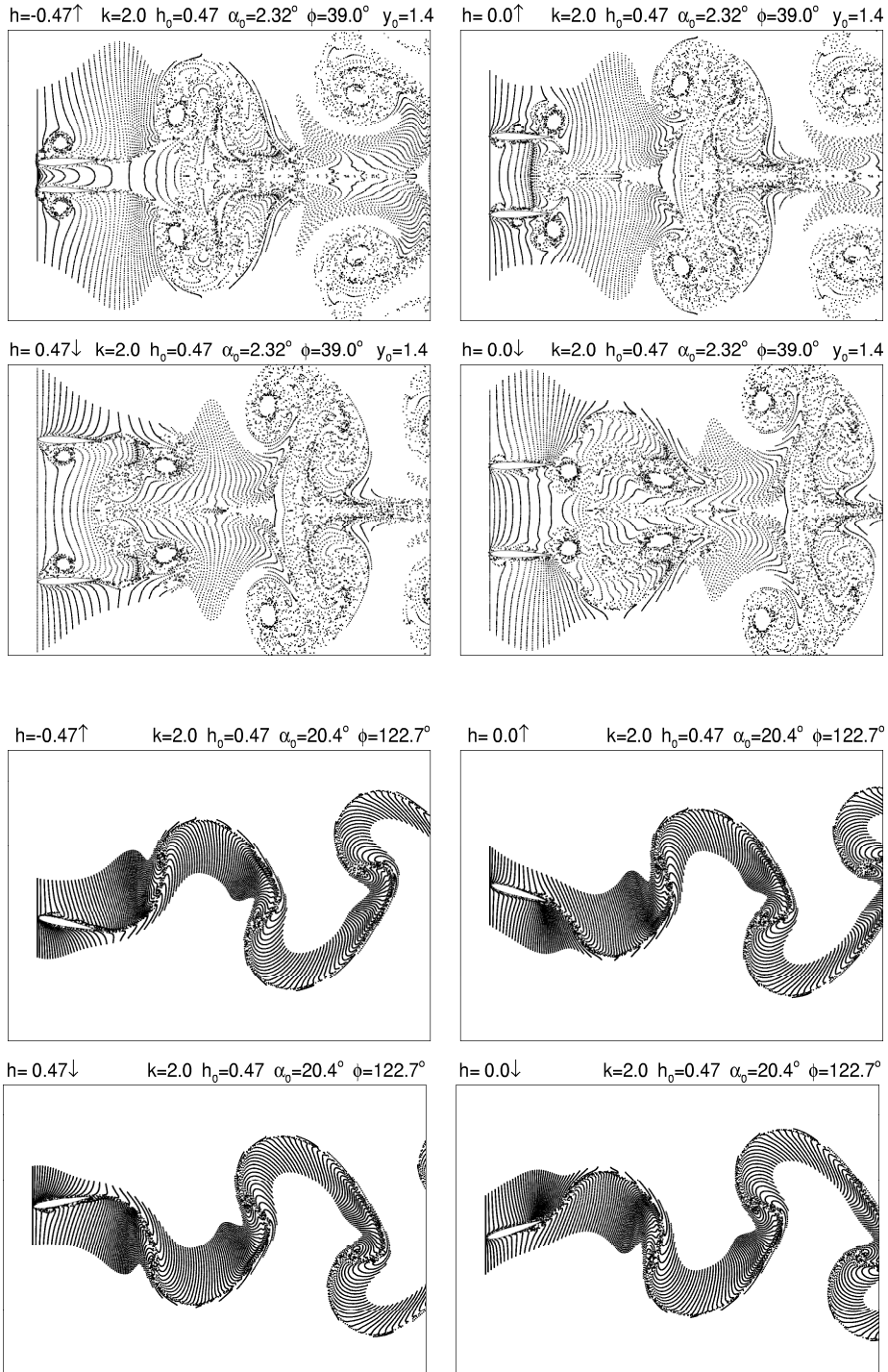
Şekil 15: Durum 2 için eniyi hareket (Üst üste ve tek olarak çırpan kanat kesitleri)



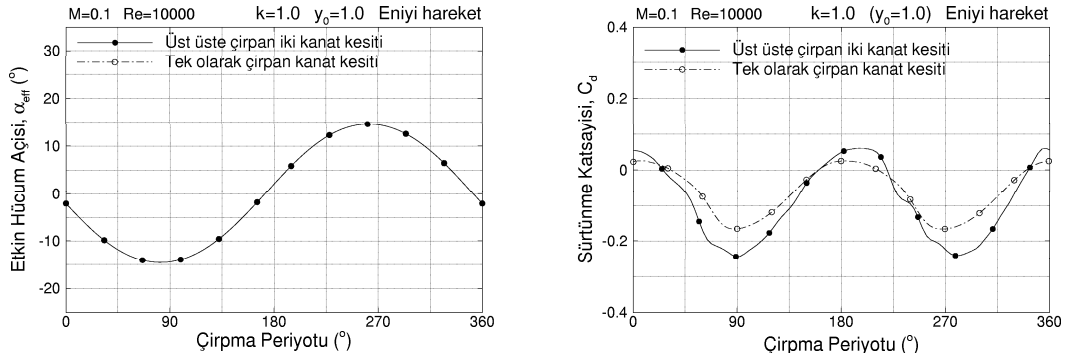
Şekil 16: Durum 2 için parçacık izleri (Üst üste ve tek olarak çırpan kanat kesitleri)



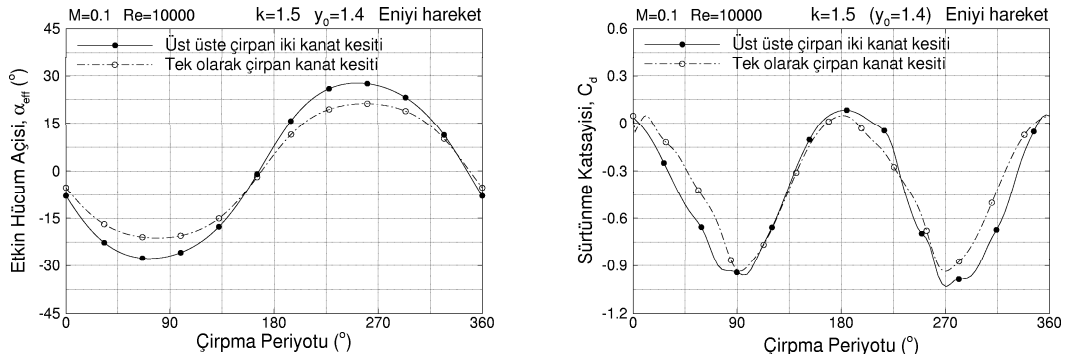
Şekil 17: Durum 3 için eniyi hareket (Üst üste ve tek olarak çırpan kanat kesitleri)



Şekil 18: Durum 3 için parçacık izleri (Üst üste ve tek olarak çırpan kanat kesitleri)



Şekil 19: Durum 4 için etkin hücum açısı ve zamana bağlı sürtünme katsayısı



Şekil 20: Durum 5 için etkin hücum açısı ve zamana bağlı sürtünme katsayısı

Şekil 15 ve 17, Durum 2 ve Durum 3 için yakınsayan eniyi çirpma hareketlerini göstermektedir. Bu hareketlerin sonucunda kanat kesitleri etrafında bir çirpma periyodu boyunca oluşan akış alanları anlık parçacık izleri olarak Şekil 16 ve 18'de verilmektedir. Durum 1'de gözlenen yüksek girdaplı akış alanı Durum 2 ve Durum 3'te de görülmektedir. Çirpma frekansının artmasıyla daha güçlü hücum kenarı girdapları oluşmakta ve bu girdaplar kanat kesiti veteri boyunca ilerleyip iz bölgesine ulaşmaktadır. Ayrıca Durum 3'te yunuslama genliğinin düşük bir değerde olması nedeniyle hücum kenarı girdaplarının daha erken oluştuğu gözlenmektedir.

Kanat kesitleri arasındaki ortalama uzaklığın itki oluşumu üzerindeki etkisini incelemek için Durum 4 ve 5'te bu uzaklık azaltılmış ve Durum 1 ve 3'te yürütülen eniyileştirme işlemleri tekrarlanmıştır. Kanat kesitleri arasındaki ortalama uzaklığın, $y_0 = 1.4$ değerinden $y_0 = 1.0$ değerine inmesi sonucunda, Tablo 2'de görüldüğü üzere üretilen itki değerlerinde önceki durumlara (Durum 1 ve 3) göre bir düşüş gözlenmiştir. $k = 1.0$ çirpma frekanslı Durum 4'te gözlenen itkideki azalma her iki kanat kesiti yapılandırması için %65 civarındadır. Daha yüksek frekansta, $k = 2.0$, çirpma hareketinin incelendiği Durum 5'te itkideki azalma üst üste çirpan iki kanat kesiti için yaklaşık %20 iken tek olarak çirpan kanat kesiti için azalma %50'ye yakındır. Yine de tek olarak çirpan kanat kesiti daha yüksek bir itki üretim verimi ile, üst üste çirpan kanat kesitlerinden %10 daha fazla itki üretebmiştir. Yüksek frekanslarda eniyi çirpma hareketi göz önüne alındığında, tek olarak çirpan kanat kesitinin üst üste çirpan kanat kesitlerinden daha verimli ve yüksek itki ürettiği söylenebilir.

DEĞERLENDİRMELER

Hareket eden ve bozulan üst üste binmiş ağ sistemi kullanılarak üst üste çirpan iki kanat kesitinin çirpma parametrelerindeki kısıtlamalar kaldırılmış ve maksimum itki elde etmek için

çarpma hareketi eniyileştirilmiştir. Düşük çarpma frekanslarında üst üste çırpan iki kanat kesiti yapılandırmasının tek olarak çırpan kanat kesitlerinden daha fazla itki ürettiği görülmüştür. Yüksek frekansta, yunuslama genliği sifıra yaklaşmakta ve erken hücum kenarı girdaplarının oluşmasına neden olmaktadır. Çarpma frekansının artmasıyla eniyi itki değerinin arttığı sonucunun gözlendiği tek olarak çırpan kanat kesiti yapılandırmasının aksine üst üste çırpan kanat kesitleri durumunda itki üretiminin sınırlı olduğu görülmüştür. Devam eden çalışmalar daha yüksek frekanslarda üst üste çırpan kanat kesitlerinin itki üretimini araştırmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Tuncer, I.H. and Kaya, M., *Optimization of Flapping Airfoils For Maximum Thrust and Propulsive Efficiency*, AIAA Journal, Vol 43, Nov 2005, pp. 2329-2341.
- [2] Schouveiler, L., Hover, F.S. and Triantafyllou, M.S., *Performance of Flapping Foil Propulsion*, Journal of Fluids and Structures, Vol. 20, Issue 7 SPEC. ISS., Oct 2005, pp. 949-959.
- [3] Kurtulus, D. F., Farcy, A. and Alemdaroglu, N., *Unsteady Aerodynamics of Flapping Airfoil in Hovering Flight at Low Reynolds Numbers*, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, Jan 2005.
- [4] Heathcote, S. and Gursul, I., *Flexible Flapping Airfoil Propulsion at Low Reynolds Numbers*, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, Jan 2005.
- [5] Muniappan, A., Duriyanandhan, V. and Baskar, V., *Lift Characteristics of the Flapping Wing Micro Air Vehicle*, Collection of Technical Papers - AIAA 3rd "Unmanned-Unlimited" Technical Conference, Workshop, and Exhibit, Vol. 1, 2004, pp. 127-135.
- [6] Kaya, M. and Tuncer, I.H., *Parallel Optimization of Flapping Airfoils in a Biplane Configuration for Maximum Thrust*, Proceedings of Parallel CFD 2004 Conference, Gran Canaria, Canary Island, Spain May 24-27, 2004
- [7] Tuncer, I.H. and Kaya, M., *Optimization of Flapping Airfoils for Maximum Thrust*, AIAA Paper, No 2003-0420, Jan 2003.
- [8] Jones, K.D. and Platzer, M.F., *Experimental Investigation of the Aerodynamic Characteristics of Flapping-Wing Micro Air Vehicles*, AIAA Paper, No 2003-0418, Jan 2003.
- [9] Jones, K.D., Castro, B.M., Mahmoud, O., Pollard, S.J., Platzer, M.F., Neef, M.F., Gonet, K., Hummel, D. *A Collaborative Numerical and Experimental Investigation of Flapping-Wing Propulsion*, AIAA Paper, No 2002-0706, Jan 2002.
- [10] Jones, K.D., Duggan, S.J., Platzer, M.F., *Flapping-Wing Propulsion for a Micro Air Vehicle*, AIAA Paper, No 2001-0126, Jan 2001.
- [11] Mueller, T.J. (editor), *Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicles*, AIAA Progress in Aeronautics and Astronautics, Vol 195, Reston, VA, 2001.
- [12] Isogai, K. and Shinmoto Y., *Study on Aerodynamic Mechanism of Hovering Insects*, AIAA Paper, No 2001-2470, 2001.
- [13] Tuncer, I.H. and Platzer, M.F., *Computational Study of Flapping Airfoil Aerodynamics*, AIAA Journal of Aircraft, Vol 35, 2000, pp. 554-560.

- [14] Isogai, K., Shinmoto Y., Watanabe, Y., *Effects of Dynamic Stall on Propulsive Efficiency and Thrust of a Flapping Airfoil*, AIAA Journal, Vol 37, 2000, pp. 1145-1151.
- [15] Platzer, M.F. and Jones, K.D., *The Unsteady Aerodynamics of Flapping-Foil Propellers*, 9th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France, Sept 2000.
- [16] Shyy, W., Berg, M. and Lyungvist, D., *Flapping and Flexible Wings for Biological and Micro Air Vehicles*, Pergamon Progress in Aerospace Sciences, Vol 35, 1999, pp. 455-505.
- [17] Lai, J.C.S. and Platzer, M.F., *The Jet Characteristics of a Plunging Airfoil*, 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, Jan 1998.
- [18] Jones, K.D., Dohring, C.M. and Platzer, M.F., *An Experimental and Computational Investigation of the Knoller-Beltz Effect*, AIAA Journal, Vol 36, 1998, pp. 1240-1246.
- [19] Anderson, J.M., Streitlen, K., Barrett, D.S. and Triantafyllou, M.S., *Oscillating Foils of High Propulsive Efficiency*, Journal of Fluid Mechanics, Vol 360, 1998, pp. 41-72.
- [20] Tuncer, I.H., Lai, J., Ortiz, M.A, and Platzer, M.F., *Unsteady Aerodynamics of Stationary/Flapping Airfoil Combination in Tandem*, AIAA Paper, No 97-0659, 1997.
- [21] Tuncer, I.H., *A 2-D Unsteady Navier-Stokes Solution Method with Moving Overset Grids*, AIAA Journal, Vol. 35, No. 3, March 1997, pp. 471-476.
- [22] Tuncer, I.H. and Platzer, M.F., *Thrust Generation due to Airfoil Flapping*, AIAA Journal, Vol 34, 1995, pp. 324-331.
- [23] Rai, M.M. and Chakravarty, S.R., *An Implicit Form of the Osher Upwind Scheme*, AIAA Journal, Vol. 24, No. 5, 1986, pp. 735-743.
- [24] Osher, S. and Chakravarty, S.R., *quA New Class of High Accuracy TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Laws*, AIAA Paper, No. 85-0363, 1985.
- [25] Chakravarty, S.R. and Osher, S., *Numerical Experiments with the Osher Upwind Scheme for the Euler Equations*, AIAA Journal, Vol. 21, No. 11, 1983, pp. 1241-1248.
- [26] Steger, J.L. and Warming, R.F., *Flux Vector Splitting of the Inviscid Gas Dynamic Equations with Applications to Finite-Difference Methods*, Journal of Computational Physics, Vol. 40, 1981, pp. 263-293.