VII. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI **UHUK-2018-155**
12-14 Eylül 2018, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun

ÇIRPAN KANAT AERODİNAMİĞİNİN TANDEM KANATLAR İÇİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

S.Banu YÜCEL* ve Mehmet ŞAHİN†
İTÜ, İstanbul

M.Fevzi ÜNAL‡
MEF, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada çırpan kanat aerodinamiği, girdap etkileşimleri açısından kanatların tandem yerleşimi için deneysel ve sayısal olarak incelenmektedir. Sıfır hücum açısındaki NACA0012 profiline sahip iki kanadın düşey yönlü salınım hareketi göz önüne alınmaktadır. Deneysel yöntem olarak PIV (Particle Image Velocimetry) kullanılmış ve deneyler su kanalında gerçekleştirilmiştir. Sayısal yöntem olarak ise sıkıştırılamaz ve daimi olmayan Navier-Stokes denklemlerinin çözümü için ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) formülasyonuna dayanan, düzenli olmayan sonlu hacim çözümü yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçların desteklenmesinde ve itki verimliliğinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Analizler sırasında Reynolds sayısı 2000 *olarak belirlenmiştir. İndirgenmiş frekans* (k) *ve düşey yönlü salınım genliği* (h) *değeri için* $k = 2.5, h = 0.25$ *ve* $k = 4, h = 0.15$ *olacak şekilde iki parametre grubu tek kanat, sabit arka kanatlı Tandem ve iki kanadın da hareketli olduğu durumlar için incelenmiştir. Deneysel çalışmada* 0^o *(Tandem Senkron), ve* 180^o *(Tandem Asenkron), sayısal çalışmada bunlara ek olarak* 90^o *ve* 270^o *faz açısı için girdap etkileşimleri ve itki verimliliğine etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar kanat-iz bölgesi girdap etkileşimlerinin, kh değerinden bağımsız olarak, itki üreten iz bölgesi şekline yapıcı veya yıkıcı yönde etki ediyor olmasına bağlı olarak itki verimliliğini pozitif veya negatif yönde değiştirdiğini göstermiştir.*

GİRİŞ

Çırpan kanat aerodinamiği kuş ve böcek uçuş mekanizmalarını anlamak açısından oldukça önemlidir. Doğa birçok mühendislik ürününün tasarlanmasında ilham kaynağı olmaktadır. Mikro hava araçları (Micro Air Vehicles - MAVs) ve Mikromekanik uçan böcekler (Micromechanical Flying Insects - MFIs) en yaygın çırpan kanat aerodinamiği uygulamalarıdır. Bu uygulamaların kullanım alanları çoğunlukla sivil, askeri yersel ya da iç mekan görüntülemeleri olarak sıralanabilir. Bu alanda yapılan çalışmalar genellikle iki ana grup altında toplanabilir. İlk grup çalışmalar karmaşık üç boyutlu modeller ile gerçek kuş veya böcek kanadının simülasyonlarını içermektedir. Bu çalışmanın

*Araştırma görevlisi, Uzay Müh. Böl., E-posta: yucelsa@itu.edu.tr
†Doç. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: msahin@itu.edu.tr
‡Prof. Dr., E-posta: unalf@mef.edu.tr

da dahil olduğu ikinci grup çalışmalar ise daha basit hareketler ve bilinen kanat profilleri üzerine yapılan parametrik çalışmaları kapsamaktadır.

[Tuncer ve Platzer, 1996] daimi olmayan akış için çok bloklu Navier-Stokes çözücü kullanarak, tek NACA0012 kanat profili ve hareketli/sabit kanat çiftinin tandem durumundaki itki üretimini incelemiştir. Elde ettikleri sayısal sonuçlara göre, hareketli/sabit kanat durumunda itki veriminde önemli ölçüde iyileşme görülmüştür. İtki verimliliğinin önemli ölçüde indirgenmiş frekans ve çırpma genliğine bağlı olduğu öne sürülmüştür. [Jones ve Platzer, 2001] çırpan ön ve sabit arka kanat arasındaki karşılıklı etkileşimden ve Katzmayr etkisinden yararlanılarak verimli bir itki üreteci yapılabileceğini belirtmişlerdir. [Lan ve Sun, 2001] sayısal çalışmalarında, tandem durumundaki iki kanat için aerodinamik kuvvetleri ve akış yapılarını farklı faz açılarında incelemişlerdir. Çalışmada Navier-Stokes hareketli üst üste binen (overset) çözüm ağı kullanarak çözülmüştür. [Lim ve Tay, 2010] faz açısının yanında iki kanat profili arasındaki mesafenin de etkisini nümerik olarak incelemiş (IBCNSS) ve her ikisinin optimum değeri için itki ve taşıma değerlerinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir. [Broering vd., 2010] Reyonolds 10^4 için Navier Stokes denkleminin çözümünde hareketli üst üste çözüm ağı kullanmış, Strouhal sayısı ve faz farkının kuvvet üretimine etkisini incelemişlerdir. Faz farkının kanatlar üzerindeki ayrı ayrı ve birlikteki toplam etkisi irdelenmiştir. Daha sonra [Broering ve Lian, 2012] yaptıkları nümerik çalışmayla tandem durumda performansın faz açısına ve iki kanat arasındaki mesafeye oldukça bağlı olduğunu belirtmiştir. Ek olarak üç boyutluluk etkisini incelemiş ve iki boyutla benzer sonuçlar elde etmiştir. [Tay vd., 2013] düşey salınım yapan kanat ve arka kuyruk etkileşimini $Re = 5,000$ and $10,000$ için deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Arka kuyruk hücum açısı ve kanat-kuyruk mesafesinin önemli ölçüde etkili olduğunu öne sürmüşlerdir.

Bu çalışmayla, literatürde üzerinde oldukça durulan tandem yerleşimli kanatlar arası mesafe sabit tutularak faz farkının aerodinamik kuvvetler ve itki verimliliğine etkisi hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmesi amaçlamıştır.

YÖNTEM

Deneysel Yöntem

Pleksiglas kanat modelleri CNC makinesi kullanılarak üretilmiştir. Kanatların veter uzunlukları $100mm$, kanat açıklığı ise $300mm$'dir. Deneyler İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Trisonik laboratuvarında yer alan büyük ölçekli su kanalında gerçekleştirilmiştir. Kanal ana deney bölgesi boyutları $1010mm \times 790mm$'dir. Kanalın türbülans seviyesi $\%1$'in altındadır ve kanalın $710mm$ su seviyesi için maksimum hızı $0.13m/s$'dir. Kanadın salınım hareketi için ise iki adet Kollmorgen/DanaherMotion AKM33E servo motor ve dişli sistemleri kullanılmıştır. Akışı aydınlatmak için ise çift kavite Nd:Yag lazer (maks. $120mJ/puls$) kullanılmış ve su içerisine $10mikron$ çapında gümüş kaplı cam kürecikler atılarak parlamaları sağlanmıştır. Akım görüntüleri 1600×1200 çözünürlük ve $30Hz$ frekanslı, $10bit$'lik Flow Sense iki kameranın yan yana yerleştirilmesi ile elde edilmiştir. PIV işlemi için Dantec Dynamic firmasına ait veri alma, senkronizasyon ve resim birleştirme yazılımları, motor hareket ve görüntü alma senkronizasyonu için ise Labview yazılımı kullanılmıştır. Görüntü işleme kısmında ise NFILVB ve CleanVec programları, ayrıca hareketli maskeleme için Matlab kodlarından yararlanılmıştır. Dynamic Studio yazılımıyla her bir test durumu için 200 resim alınmış olup hareketin bir periyodu 16 resimle temsil edilmiştir. Her iki kameradan gelen resimler $547mm \times 216mm$'lik bir alanı $(5.47c \times 2.16c)$ kaplayacak şekilde birleştirilmiştir. Resimler çift çerçeve ve $\%50$ örtüşme ile 64×64 çapraz korelasyona tabi tutularak hız vektörleri elde edilmiştir. Ölçüm alanı 93×35 hız vektöründen oluşmuştur ve çözünürlük $5.78mm \times 5.78mm$'dir.

Sayısal Yöntem

Sıkıştırılamaz akışı yöneten denklemler Kartezyen koordinat sisteminde boyutsuz olarak aşağıdaki gibi yazılabilir,

süreklilik denklemi

$$-\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

momentum denklemi

$$Re\left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\cdot\nabla)\,\mathbf{u}\right] + \nabla p = \nabla^{\mathbf{2}}\mathbf{u} \tag{2}$$

Bu denklemlerde, $\mathbf{u}$ yerel akışkan hız vektörü, p basınç ve Re Reynolds sayısını temsil etmektedir. Hareket eden rastgele bir kontrol hacminin hareketi ve bu diferansiyel denklemlerini düzgün olmayan eleman üzerinde integre edildiğinde Ω_e ,

$$-\oint_{\partial\Omega_e} \mathbf{n}\cdot\mathbf{u}\,dS = 0 \tag{3}$$

$$Re\int_{\Omega_d}\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}dV + Re\oint_{\partial\Omega_d}\left[\mathbf{n}\cdot(\mathbf{u}-\dot{\mathbf{x}})\right]\mathbf{u}dS + \oint_{\partial\Omega_d}\mathbf{n}pdS = \oint_{\partial\Omega_d}\mathbf{n}\cdot\nabla\mathbf{u}dS \tag{4}$$

V kontrol hacmini, S kontrol hacmi yüzey alanını $\mathbf{n}$ dışarı yönlü normal vektörü ve $\dot{\mathbf{x}}$ çözüm ağı hızını temsil etmektedir.

Ayrıklaştırma yöntemi olarak ALE formülasyonuna dayanan, düzensiz, kenar merkezli sonlu hacim yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin detayları [Erzincanli ve Sahin, 2013] çalışmasında verilmiştir. Kenar merkezli sonlu hacim metodu ilk olarak [Hwang, 1995; Rida vd., 1997] tarafından düzensiz üçgen elemanlar üzerinde kullanılmıştır. Bu yöntemle hız vektör bileşenleri her bir hücre kenarının orta noktasında, basınç terimi ise eleman merkezinde tanımlanmaktadır. Şekil 1 momentum denklemleri için iki boyutlu kontrol hacmini göstermektedir.

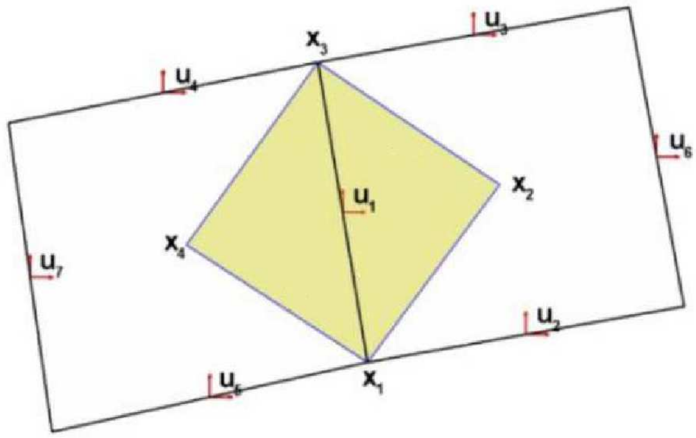
Değişkenlerin bu şekilde tanımlanıyor olması sayısal şemanın kararlı olmasını sağlamakta ve basınç bağlaşımı için ek modifikasyona gerek duyulmamaktadır. Ek olarak oldukça verimli çoklu çözüm ağı çözücülerinin kullanımı mümkündür. Aşağıda sağdaki elemanın ayrık katkısı için x-momentum denklemi açıklanmıştır.

Zaman terimi,

$$Re\left[\frac{9u_1^{n+1}+u_2^{n+1}+u_3^{n+1}+u_6^{n+1}}{12\Delta t}\right]A_{123} - Re\left[\frac{9u_1^{n}+u_2^{n}+u_3^{n}+u_6^{n}}{12\Delta t}\right]A_{123} \tag{5}$$

akışkan hareketi kaynaklı konvektif terim,

$$Re\left[u_{12}^{n+1}\Delta y_{12}^{n+1} - v_{12}^{n+1}\Delta x_{12}^{n+1}\right]u_{12}^{n+1} + Re\left[u_{23}^{n+1}\Delta y_{23}^{n+1} - v_{23}^{n+1}\Delta x_{23}^{n+1}\right]u_{23}^{n+1} \tag{6}$$



Şekil 1: Kontrol hacmi

hız vektör bileşenleri u_{12} ve u_{23} kontrol hacmi kenar orta noktalarında tanımlanmıştır. En küçük kareler yöntemi akış yönüne bağlı interpolasyonuyla (akım önü, upwind) u_{12} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır,

$$u_{12} = \beta\left[u_1 + \nabla u_1 \mathbf{r}_1\right] + (1-\beta)\left[u_2 + \nabla u_2 \mathbf{r}_2\right] \tag{7}$$

β akım önü (upwind) interpolasyondaki ağırlık faktörüdür ve bu çalışmada, $\beta = 1$ alınmıştır. $\mathbf{r}_1$ ve $\mathbf{r}_2$ konum vektörleridir ve kontrol hacmini yüzeyinin orta noktasından hız gradyenlerinin olduğu noktaya doğru tanımlanır. Gradyen terimlerimin elde edilmesinde ∇u_1 ve ∇u_2, hız verisinin doğrusal davrandığı kabul edilerek en küçük kareler prosedürü uygulanır. Örnek olarak ∇u_1 teriminin hesaplanması aşağıdaki gibidir,

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{21} & \Delta y_{21} \\ \Delta x_{31} & \Delta y_{31} \\ \Delta x_{41} & \Delta y_{41} \\ \Delta x_{51} & \Delta y_{51} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_2 - u_1 \\ u_3 - u_1 \\ u_4 - u_1 \\ u_5 - u_1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

çözüm ağı hareketine bağlı konvektif terim,

$$-Re\left[\dot{x}_{12}^{n+1}\Delta y_{12}^{n+1} - \dot{y}_{12}^{n+1}\Delta x_{12}^{n+1}\right]u_{12}^{n+1} - Re\left[\dot{x}_{23}^{n+1}\Delta y_{23}^{n+1} - \dot{y}_{23}^{n+1}\Delta x_{23}^{n+1}\right]u_{23}^{n+1} \tag{9}$$

ayrık geometrik korunumu sağlamak üzere [Thomas ve Lombard, 1979] Denklem 9 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} Re\left[\dot{x}_{12}^{n+1}\Delta y_{12}^{n+1} - \dot{y}_{12}{}^{n+1}\Delta x_{12}^{n+1}\right] = & -\tfrac{3Re}{2\Delta t}\left[\left(\tfrac{x_1+x_2}{2}\right)^{n+1} - \left(\tfrac{x_1+x_2}{2}\right)^{n}\right]\Delta y_{12}^{n+\frac{1}{2}} \\ & +\tfrac{3Re}{2\Delta t}\left[\left(\tfrac{y_1+y_2}{2}\right)^{n+1} - \left(\tfrac{y_1+y_2}{2}\right)^{n}\right]\Delta x_{12}^{n+\frac{1}{2}} \\ & +\tfrac{Re}{2\Delta t}\left[\left(\tfrac{x_1+x_2}{2}\right)^{n} - \left(\tfrac{x_1+x_2}{2}\right)^{n-1}\right]\Delta y_{12}^{n-\frac{1}{2}} \\ & -\tfrac{Re}{2\Delta t}\left[\left(\tfrac{y_1+y_2}{2}\right)^{n} - \left(\tfrac{y_1+y_2}{2}\right)^{n-1}\right]\Delta x_{12}^{n-\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{10}$$

Basınç terimi katkısı,

$$\left[\frac{p_{x_1}^{n+1}+p_{x_2}^{n+1}}{2}\right]\Delta y_{12}^{n+1}+\left[\frac{p_{x_2}^{n+1}+p_{x_3}^{n+1}}{2}\right]\Delta y_{23}^{n+1} \tag{11}$$

p_{x_1},p_{x_2} ve p_{x_3} sırasıyla x_1, x_2 ve x_3 noktalarındaki basınçlardır. p_{x_1} ve p_{x_3} bilinmediğinden, ikinci dereceden Taylor serisi açılımıyla hesaplanmaktadır. Örnek olarak, komşu hücre merkezindeki basınç değeri şu şekilde yazılabilir,

$$p_{c,i}=p_{x_1}+\frac{\partial p}{\partial x}\mid_{x=x_1}(x_{c,i}-x_1)+\frac{\partial p}{\partial y}\mid_{x=x_1}(y_{c,i}-y_1) \tag{12}$$

$i=1,2,...,m$ için $x_{c,i}$ komşu eleman merkezlerinin konumlarını ve m, $x=x_1$'in komşu olan dörtgen eleman sayısını temsil etmektedir. Bu durumda elde edilen doğrusal denklem sistemi,

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{c,1}-x_1 & y_{c,1}-y_1 \\ 1 & x_{c,2}-x_1 & y_{c,2}-y_1 \\ ... & ... & ... \\ 1 & x_{c,m}-x_1 & y_{c,m}-y_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} p_{x_1} \\ \frac{\partial p_{x_1}}{\partial x} \\ \frac{\partial p_{x_1}}{\partial y} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} p_{c,1} \\ p_{c,1} \\ ... \\ p_{c,m} \end{bmatrix} \tag{13}$$

Bu denklemler p_{x_1} değerini elde etmek amacıyla en küçük kareler yaklaşımıyla çözülmektedir. Viskoz terim ise aşağıdaki gibi ayrıklaştırılmaktadır,

$$-\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{12}^{n+1}\Delta y_{12}^{n+1}+\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{23}^{n+1}\Delta y_{23}^{n+1}\right]+\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{12}^{n+1}\Delta x_{12}^{n+1}+\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{23}^{n+1}\Delta x_{23}^{n+1}\right] \tag{14}$$

burada eleman köşelerindeki bilinmeyen hızların elde edilmesinde basınç hesaplamalarımda olduğu gibi Taylor serisi açılımı kullanılmaktadır. Hesaplanan hız değerleriyle, Green teoremi kullanılarak çift kontrol hacmi kenar orta noktalarındaki hız gradyenleri hesaplanmaktadır, Şekil 2.

$$\frac{\partial u}{\partial x}=\frac{1}{A}\oint_{\partial\Omega_c}udy \tag{15}$$

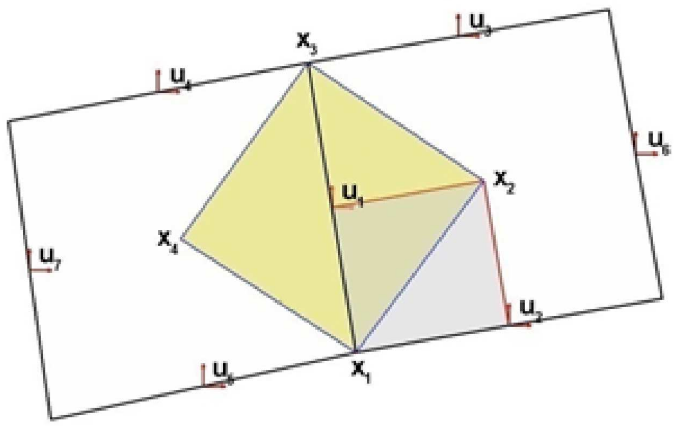
$$\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{A}\oint_{\partial\Omega_c}udx \tag{16}$$

Green teoremi için alınan kontrol hacmi $\partial\Omega_c$ köşegeni kontrol hacminin bir kenarı olacak şekilde hizalanarak oluşturulmaktadır ve dörtgen elemanın bir çeyreğini temsil eder. Her bir kontrol hacmi kenarı için Denklemler 15 ve 16 için orta nokta kuralına göre hesaplanmaktadır.

Sol taraftaki elemanın katkıları ve de y yönündeki momentum ayrıklaştırmalar benzer şekildedir.

Süreklilik denklemi her bir dörtgen elemanda integre edilmekte ve her bir eleman yüzeyinde orta nokta kuralına göre hesaplanmaktadır.

$$-\sum_{i=1}^{4}\left[u_i^{n+1}\Delta y_i-v_i^{n+1}\Delta x_i\right]=0 \tag{17}$$



Şekil 2: Green teoremi için kontrol hacmi

ALE formülasyonu sönümlenen Taylor-Green girdap akışı, bir kanal içerisinde salınım yapan dairesel silindir etrafındaki akış ve kübik kavite içerisinde salınım yapan kürenin neden olduğu akış için doğrulanmıştır, [Erzincanli ve Sahin, 2013]. Ayrıca sayısal yöntem,literatürde ilk olarak, sınırlandırılmış dairesel silindir arkasındaki salt viskoelastik iz çalkantılarını başarılı bir şekilde simüle etmiştir, [Sahin, 2013].

Gerilme vektörü $\mathbf{T}$,

$$\mathbf{T} = \mathbf{n} \cdot \sigma \tag{18}$$

$\mathbf{n}$ yüzey birim vektörü, σ yüzey normal stres tensörü olarak tanımlanmaktadır.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \tag{19}$$

Kanat profili yüzeyi üzerinde gerilme vektörü integre edildiğinde cisme etki eden kuvvet $\mathbf{F}$ aşağıdaki gibi bulunur.

$$\mathbf{F} = \oint \mathbf{T} dS \tag{20}$$

Benzer şekilde, $\mathbf{r_0}$ noktasına etki eden moment, gerilme vektörü $\mathbf{T}$ ve konum vektörünün $\mathbf{r} - \mathbf{r_0}$ vektörel çarpımıyla hesaplanır.

$$\mathbf{M} = \oint (\mathbf{r} - \mathbf{r_0}) \times \mathbf{T} dS \tag{21}$$

Güç gereksinimi,

$$\mathbf{P} = \oint \mathbf{n} \cdot (\sigma \cdot \mathbf{u}) dS \tag{22}$$

burada σ basınç terimini içeren gerilme tensörüdür.

Hesaplanan kuvvet ve moment katsayıları,

$$C_L = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S} \tag{23}$$

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S} \tag{24}$$

$$C_M = \frac{M_z}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 Sc} \tag{25}$$

burada F_x ve F_y kuvvet bileşenleri, M_z cisme etki eden moment, ρ yoğunluk, U_∞ serbest akım hızı, S izdüşüm alan ve c veter uzunluğunu temsil etmektedir.

Benzer şekilde güç katsayısı,

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 S} \tag{26}$$

kanat profili itki verimliliği,

$$\eta_E = \frac{\langle F_x \rangle U_\infty}{\langle P \rangle} \tag{27}$$

şeklinde hesaplanır.

Çalışmada kullanılan çözüm ağı deformasyon algoritması cebrik yönteme dayanmaktadır. Bu yöntemde iç düğüm noktalarının yer değişimi kanat profili yer değiştirme vektörünün kanat yüzeyinden olan mesafe fonksiyonunun negatif eksponansiyeliyle çarpımından hesaplanmaktadır. Çıkış dışındaki diğer sınır koşulları serbest akım değerindedir. Çıkış içinse gerilmesiz doğal sınır koşulu kullanılmıştır. Kanat profili yüzeyinde kaymasız sınır şartı kullanılmakta ve hız vektörü bileşenleri yüzey orta noktalarında analitik olarak hesaplanmaktadır. Mevcut hesaplamalar impulsif olarak başlatılmaktadır.

Ek olarak, hareketli çözüm ağında ikinci derecen doğruluğu garantilemek için nümerik simülasyonlar her bir zaman adımında iki alt iterasyon yapılarak gerçekleştirilmektedir,[Erzincanli ve Sahin, 2013].

Sayısal simülasyonlar esnasında kullanılan düşey salınımın denklemi,

$$x(t) = x_0 \tag{28}$$

$$y(t) = y_0 + h\sin(\omega t + \phi) \tag{29}$$

iki iterasyon arasında geçen süre, kanat profilinin hareket periyodunun 1/400'ü olacak şekilde belirlenmiştir.

$$\Delta T = 2\pi/(400f) \tag{30}$$

Çözüm ağı deformasyonu için kullanılan eksponansiyel denklem,

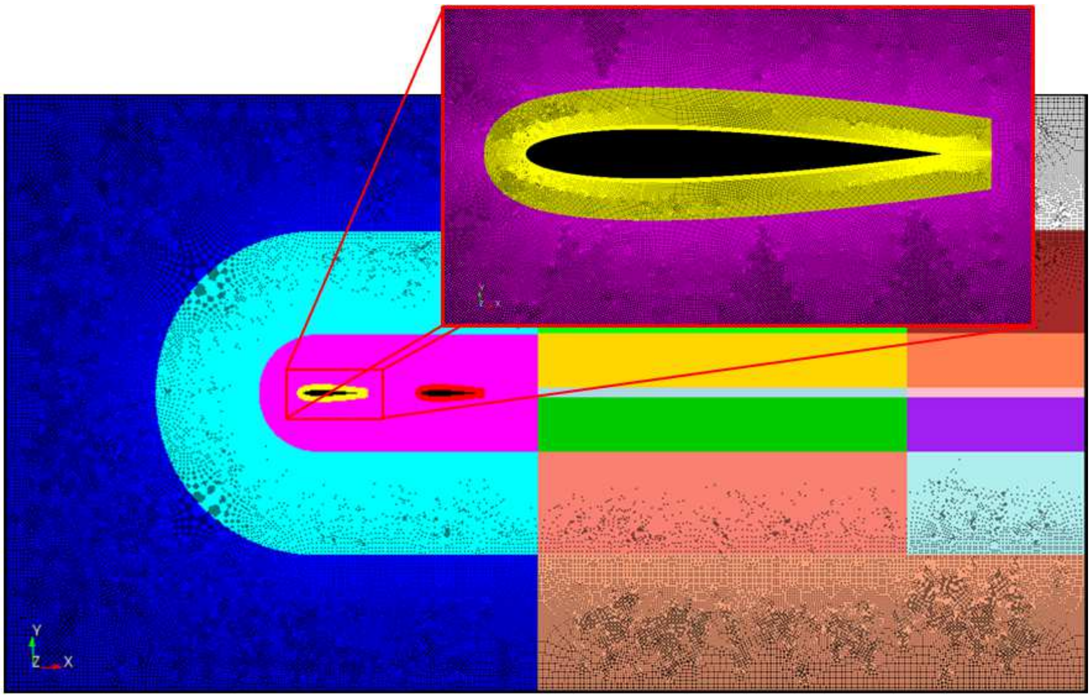
$$y(t) = h \sin(\omega t) \exp(-4(r-1)^2) \tag{31}$$

burada r merkezi kanat profili etrafında çizilen merkez noktası veter orta noktası olan çemberin yarıçapıdır.

$$r = \sqrt{(x-0.5)^2 + y^2} \tag{32}$$

Çözüm alanı boyutları $[-10c, 20c] \times [-10c, 10c]$ olup, kanat profili hücum kenarı orijindedir. Farklı çözüm ağı şemaları ve boyutları kullanabilmek adına çözüm alanı yakın bölge, iz bölgesi gibi alt alanlara bölünmüştür. Tek kanat için kullanılan ağ $748,508$ düğüm noktası $747,597$ dörtgen eleman ($3,739,807$ serbestlik derecesi) içermektedir. Tandem durumda ise $594,430$ eleman kullanılmıştır. Sınır tabaka ağının oluşturulmasında $Gambit$ programı, geri kalan ağın oluşturulmasında ise CUBIT programı kullanılmıştır. Sayısal çalışmada TUBITAK Ulakbim Yüksek başarımlı ve Grid Hesaplama merkezi (TR-Grid) olanaklarından faydalanılmıştır.

Tandem durumda, iki kanat profili arasındaki mesafe yatay yönde bir veter kadardır. Çözüm ağı ve kanat profillerinin yerleşimi Şekil 3'de gösterilmektedir.

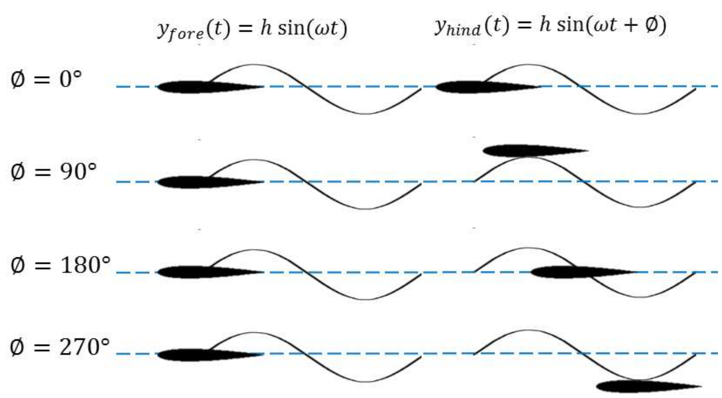


Şekil 3: Tandem yerleşim için sayısal ağ yapısı

UYGULAMALAR

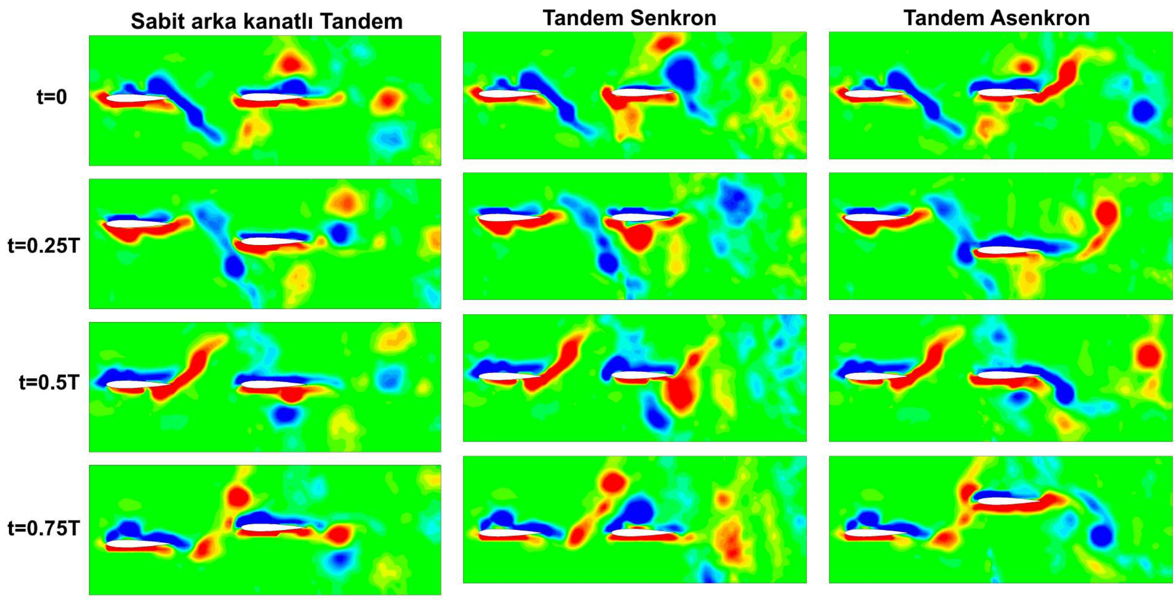
Tandem durumdaki iki kanadın göz önüne alınan faz açılarına göre başlangıç konumları Şekil 4'de gösterilmektedir. Aerodinamik kuvvetler çalışmanın sadece sayısal kısmında hesaplanmış, deney sırasında herhangi bir kuvvet ölçümü yapılmamıştır. Deneysel olarak elde edilen tüm girdaplılık değerleri boyutsuz olup değeri tüm şekiller için -5 ve +5 aralığındadır.

Hareketin bir periyodu için sabit arka kanatlı Tandem, Tandem Senkron, Tandem Asenkron durumları deneysel olarak Şekil 5 ve 6 ile gösterilmiştir. Bütün durumlar için şekillerin en üst sırası,



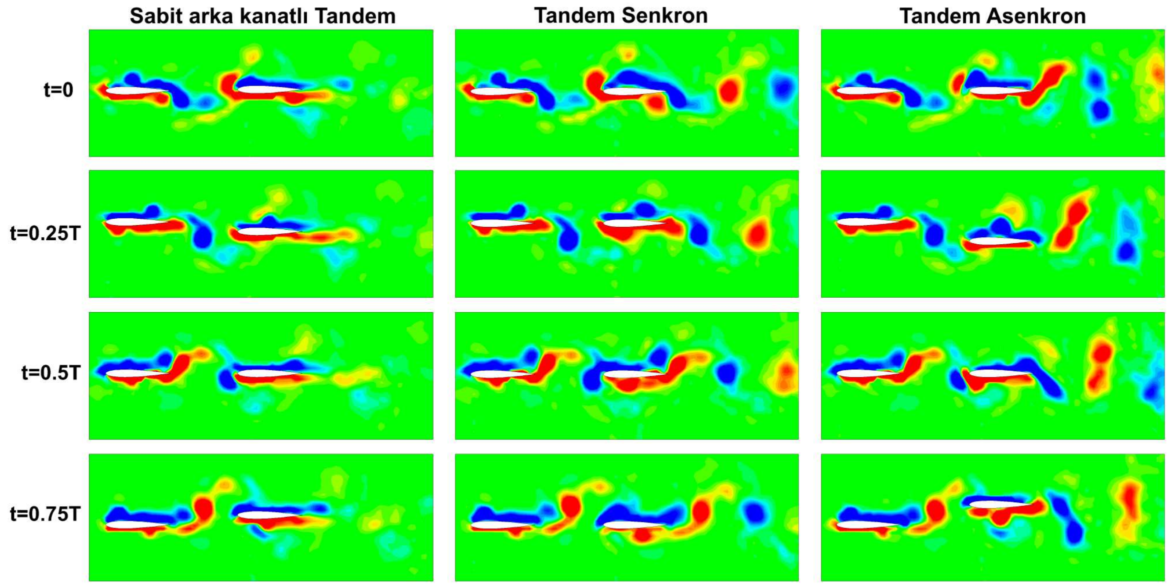
Şekil 4: Kanat konumları

$t = 0$, kanadın orta konumda olduğu durumu temsil etmektedir ve kanadın ilk hareketi yukarı doğrudur.



Şekil 5: Hareketin bir periyodu için iz bölgesinin gelişimi, $k = 2.5$, $h = 0.25$

Şekil 5'te görülüğü üzere $k = 2.5$, $h = 0.25$ için, bütün durumlarda, hareket yukarı yönlü olduğunda hücum kenarı girdabı saatin tersi yönünde ve firar kenarı girdabı saat yönündedir. Hareket aşağı yönlü olduğunda ise bunun tersi söz konusu olmaktadır. Her iki yönlü harekette de aynı yönlü olan hücum ve firar kenarı girdapları ön kanadın firar kenarında birleşip daha sonra arka kanatla etkileşime girmektedirler. Sabit arka kanatlı Tandem durumunda birleşen girdaplar arka kanat tarafından ikiye bölünmektedir. Örnek olarak $t = 0.5T$'de saatin tersi yönündeki birleşik girdap arka kanat tarafından $t = 0.75T$'de ikiye bölünmektedir. Bölünen girdabın üst tarafı arka kanadın üst tarafıyla etkileşmeye başlamakta ve hücum kenarında saat yönlü bir girdap indüklemektedir. Bu zıt dönüş yönlü girdap çifti etkileşip alt akıma doğru ilerlerken, $t = 0$ anında ön kanadın firar kenarında oluşan saat yönlü birleşik girdap $t = 0.25T$'de arka kanat tarafından ikiye bölünmektedir. Bu sefer bölünen girdabın alt kısmı arkadaki kanadın hücum kenarına saatin tersi yönünde bir girdap indükler ve birlikte alt akıma doğru ilerlerler. Tandem Senkron durumunda ön ve arka kanat senkronize hareket etmektedirler. Bu nedenle ön kanadın firar kenarında oluşan birleşik girdap, hareketin yönü yukarı doğru olduğunda arka kanadın hücum kenarında oluşan girdaptan etkilenmektedir. Böylelikle birleşik girdabın tamamı iz bölgesinin ters tarafına doğru, arka kanadın hücum kenarında var olan zıt dönüş yönlü girdap çifti tarafından adeta yönlendirilmektedir. Bu etkileşim ters Kármán girdap caddesi oluşturarak itkiyi arttırıcı yönde etki yapmaktadır. Tandem Asenkron durumunda ise ön kanadın hemen arkasında ters Kármán caddesi oluşumu, arka kanadın makaslama etkisi yüzünden birleşik girdabın sadece bir bölümünün iz bölgesinin ters tarafına geçmesine izin vermesi nedeniyle desteklenmemektedir.



Şekil 6: Hareketin bir periyodu için iz bölgesinin gelişimi, $k = 4$, $h = 0.15$

Benzer şekilde, $k = 4$, $h = 0.15$ için de bütün durumlarda, hareket yukarı yönlü iken hücum kenarında saatin tersi yönünde, firar kenarında ise saat yönünde girdaplar oluştuğu, hareket aşağı yönlü olduğunda ise girdapların tam tersi yönde döndükleri Şekil 6'da görülmektedir. Yine her iki yönlü harekette eş yönlü hücum ve firar kenarı girdapları ön kanadın firar kenarında birleşerek daha sonra arka kanatla etkileşirler. Genel akış yapısı ise $k = 2.5$, $h = 0.25$'tekinden farklı olarak daha dar ve daha az dağınıktır. Sabit arka kanatlı Tandem durumunda bu sefer $t = 0.25T$'de saat yönündeki birleşik girdap arka kanat tarafından $t = 0.5T$'de ikiye bölünmektedir. Bölünen girdabın alt tarafı arka kanadın alt tarafıyla etkileşmeye başlamakta ve $t = 0.75T$'de hücum kenarında saatin tersi yönlü bir girdap indüklemektedir. Bu zıt dönüş yönlü girdap çifti etkileşip alt akıma doğru ilerlerken, $t = 0.75T$ anında ön kanadın firar kenarında oluşan saat tersi yönlü birleşik girdap $t = 0$'da arka kanat tarafından ikiye bölünmektedir. Bu sefer bölünen girdabın üst kısmı arkadaki kanadın hücum kenarına saat yönünde bir girdap indükler ve birlikte alt akıma doğru ilerlerler. Tandem Senkron durumunda ise $t = 0$'da ön kanadın firar kenarından kopan saat yönü dönüşlü birleşik girdap, $t = 0.25T$'de alt akıma doğru ilerler ve $t = 0.5T$'de arka kanadın üst tarafında kendi ile aynı yönlü girdapla birleşerek büyük bir girdap oluştururlar. Benzer bir etkileşim saat tersi yönlü birleşik girdap için ise $t = 0$'da gerçekleşmektedir. Tandem Asenkron durumunda $t = 0$'da saat yönü dönüşlü birleşik girdap arka kanatla $t = 0.5T$'de etkileşerek arka kanadın firar kenarında saatin tersi yönünde bir girdap indükler ve arka kanadın alt tarafında bir girdap çifti oluştururlar. Bu girdap çifti arka kanat yukarı yönde harekete devam ederken alt akıma doğru ilerler, iz bölgesinde jet akımı oluşumuna ve böylelikle itkinin artmasına katkıda bulunur.

Bütün faz açıları için sayısal olarak elde edilen girdaplılık kontürleri Şekil 7 ve Şekil 8 ile gösterilmiştir. Ayrıca bütün durumlar için, sayısal olarak hesaplanan kuvvet katsayıları Tablo 1 ve Tablo 2 ile verilmiştir. Her iki parametre grubu itki ve itki verimliliği tandem sistem için bu tablolar kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 9 ile verilmiştir.

Şekil 9(a) da görüldüğü üzere, $k = 2.5$,$h = 0.25$ için tandem durum tüm faz açılarında itki verimliliğine katkıda bulunmamıştır. Yalnızca $\phi = 0^o$'de (Tandem Senkron) olduğu durumda tek kanada kıyaslandığında itkinin arttığı görülmüştür. Sabit arka kanatlı Tandem ve $\phi = 0^o$ durumlarında itki verimliliği sabit kalırken diğer tüm faz açıları için $\phi = 90^o$,$\phi = 180^o$, $\phi = 270^o$ verimlilik azalmıştır. Bu sonuçlar hem deneysel hem de sayısal olarak elde edilen, Şekil 5 ve Şekil 7, girdap etkileşimlerine göre beklenen itki değişimleriyle örtüşmektedir. Ayrıca incelenen faz açıları için, uzak iz bölgesinin oldukça dağınık olduğu Şekil 7'de görülmektedir.

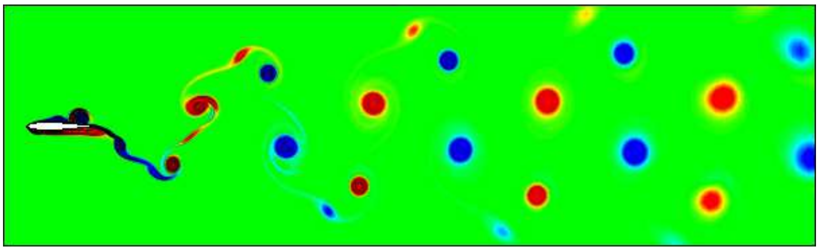
Tandem yerleşimin $k = 2.5$,$h = 0.25$ parametre setindekinin aksine, $k = 4$,$h = 0.15$ parametre setinde bütün faz açılarında itki verimliliğini arttırdığı Şekil 9(b)'de görülmektedir. En yüksek verim artışı ise %39 ile faz açısının $\phi = 90^o$ olduğu durumda elde edilmektedir. Sabit arka kanatlı Tandem ve $\phi = 0^o$ durumları içinse itki azalırken itki verimliliği artmış yani güç gereksinimindeki düşme daha fazla olmuştur. Şekil 8 ile görüldüğü üzere $\phi = 90^o$,$\phi = 180^o$, $\phi = 270^o$ için iz bölgesindeki girdap yapıları daha organizedir ve deney sonuçlarından çıkarılan yorumlara uyumlu olarak $\phi = 180^o$ (Tandem Asenkron)faz açısı itki artışının en fazla olduğu durumdur. Ayrıca Tablo 2'de $\phi = 270^o$ faz açısında arka kanat üzerindeki taşıma katsayısının sabit kanatla kıyaslandığında yüz kat arttığı görülmektedir. Bu durum Şekil 8(f)'de görülen eğik iz bölgesinin varlığından dolayı beklenen bir sonuçtur.

Tablo 1: Ortalama kuvvet değerleri (8 periyot), $k = 2.5$, $h = 0.25$

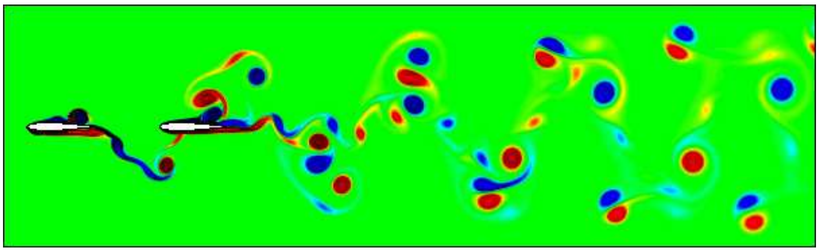
		C_l	C_t	C_m	C_p	η
Tek kanat		-0.000722	0.109316	-0.000071	0.71005	0.153954
Sabit arka kanatlı Tandem	F	-0.000019	0.108781	0.000012	0.694994	0.156521
	H	0.000041	-0.022648	0.000090	0.000000	$-\infty$
$\phi = 0^o$	F	-0.00178	0.120707	-0.00015	0.77084	0.156592
	H	-0.00085	0.156075	-0.00208	0.994052	0.157009
$\phi = 90^o$	F	0.006082	0.115535	0.000564	0.718264	0.160852
	H	0.005553	-0.02254	0.012093	0.349396	-0.0645
$\phi = 180^o$	F	-0.000008	0.098288	0.000015	0.628302	0.156435
	H	-0.00014	0.030492	-0.00033	0.495925	0.061485
$\phi = 270^o$	F	0.000411	0.098518	0.000054	0.657384	0.149864
	H	0.000639	0.093114	0.001431	1.074679	0.086644

Tablo 2: Ortalama kuvvet değerleri (8 periyot), $k = 4, h = 0.15$

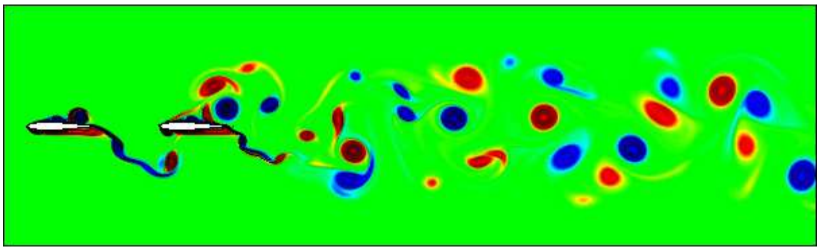
		C_l	C_t	C_m	C_p	η
Tek kanat		-0.002388	0.109273	-0.000108	0.690535	0.158244
Sabit arka kanatlı Tandem	F	-0.000076	0.108543	-0.000005	0.651043	0.166721
	H	-0.000302	0.039445	-0.000620	0.000000	∞
$\phi = 0^o$	F	-0.000860	0.119965	-0.000021	0.731980	0.163891
	H	-0.001306	0.044891	-0.003140	0.229995	0.195184
$\phi = 90^o$	F	-0.000302	0.117628	-0.000043	0.656297	0.179230
	H	-0.000253	0.112973	-0.000464	0.435828	0.259215
$\phi = 180^o$	F	-0.000985	0.097593	-0.000058	0.570497	0.171066
	H	-0.000917	0.238177	-0.001907	1.141126	0.208721
$\phi = 270^o$	F	-0.074678	0.100813	-0.006967	0.659171	0.152939
	H	-0.203654	0.206897	-0.440962	1.099723	0.188136



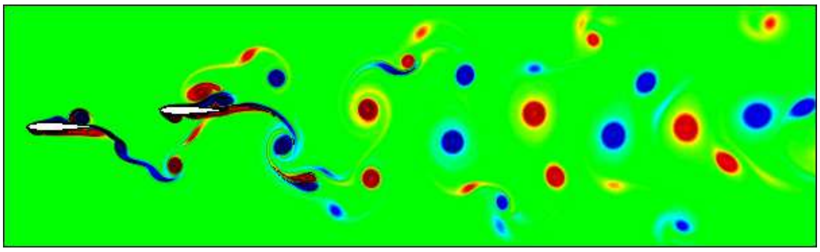
(a)



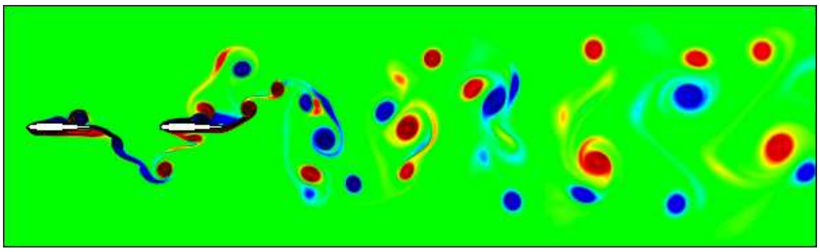
(b)



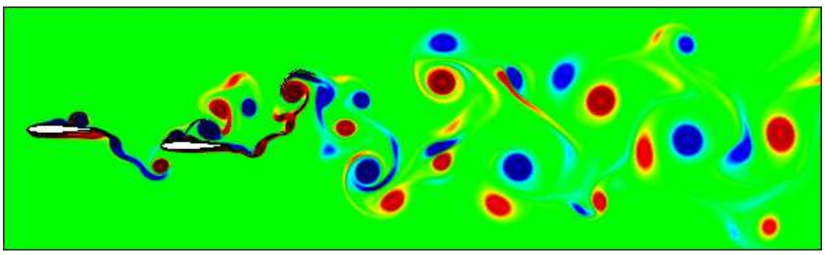
(c)



(d)

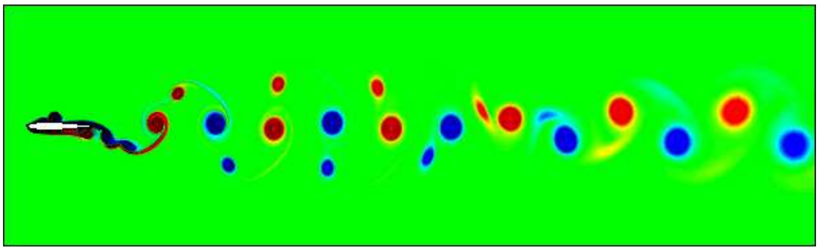


(e)

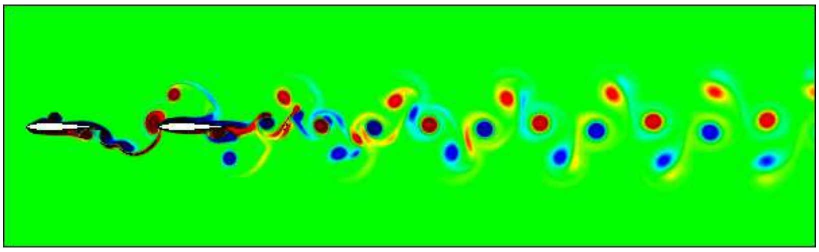


(f)

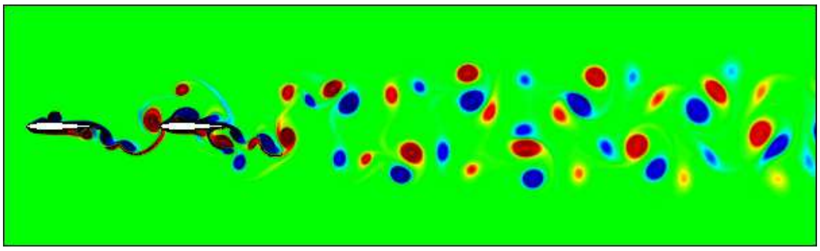
Şekil 7: Faz farkının etkisi, $k = 2.5$, $h = 0.25$, (a) Tek,(b) Sabit arka kanatlı Tandem, (c) $\phi = 0^o$, (d) $\phi = 90^o$, (e) $\phi = 180^o$, (f) $\phi = 270^o$



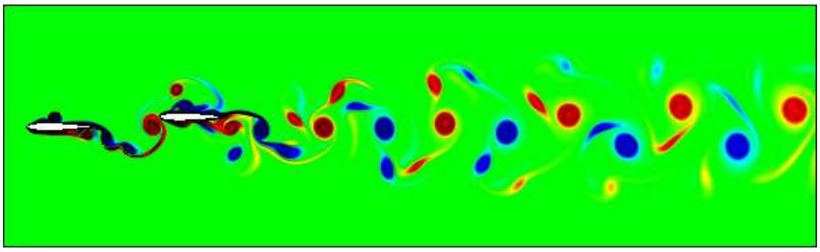
(a)



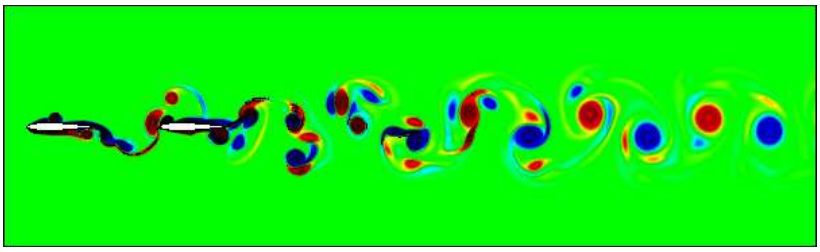
(b)



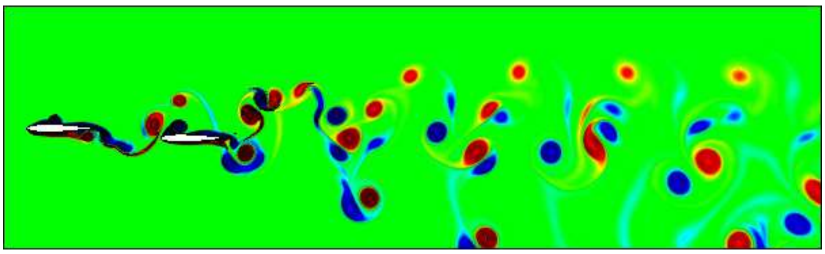
(c)



(d)

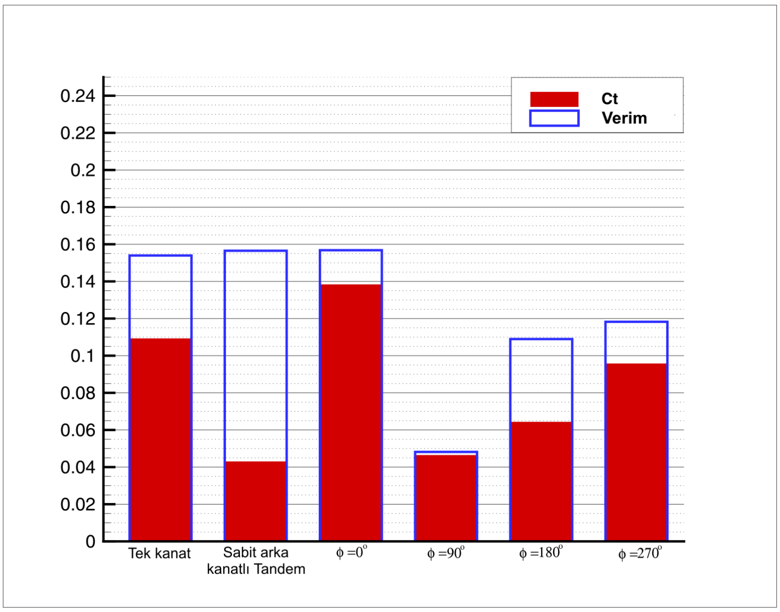


(e)

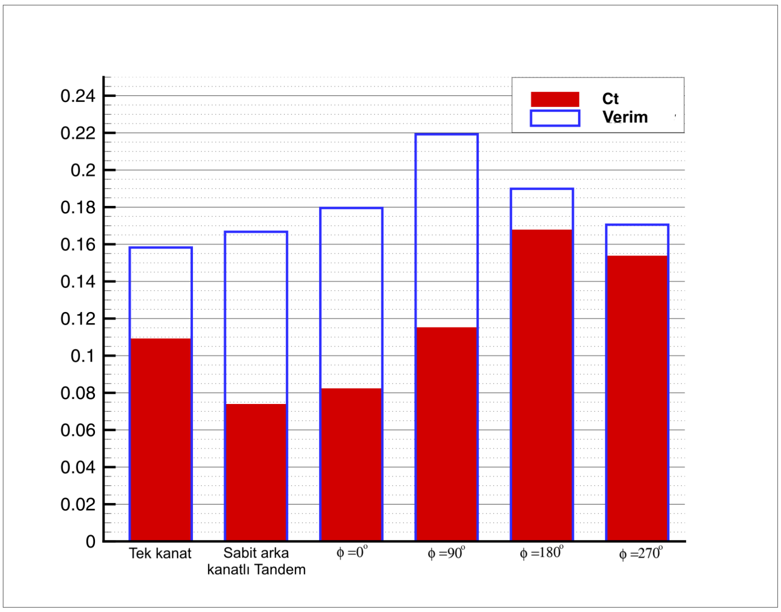


(f)

Şekil 8: Faz farkının etkisi, $k = 4$, $h = 0.15$, (a) Tek,(b) Sabit arka kanatlı Tandem, (c) $\phi = 0^o$, (d) $\phi = 90^o$, (e) $\phi = 180^o$, (f) $\phi = 270^o$



(a)



(b)

Şekil 9: $C_t - \eta$ grafiği(a) $k = 2.5$, $h = 0.25$, (b) $k = 4$, $h = 0.15$

SONUÇ

İki farklı indirgenmiş frekans (k) ve boyutsuz düşey salınım hızı (h) değişken setiyle yapılan deneyler ve sayısal hesaplamalar sonucunda k ve h'nin değerine göre sonuçlar değişkenlik göstermiştir. Tek kanatla kıyaslandığında, tandem yerleşimde ikinci bir kanadın varlığı $k = 2.5$,$h = 0.25$ için $\phi = 90^o$,$\phi = 180^o$ ve $\phi = 270^o$ faz açısında itki kuvvetinin azalmasına, $\phi = 0^o$ ise önemsenmeyecek bir derecede artmasına neden olmuştur. Bunun aksine $k = 4$,$h = 0.15$ için bütün faz açılarında tandem yerleşim avantajlıdır ve en yüksek itki verimliliği değeri faz açısının $\phi = 90^o$ olduğu durumda elde edilmiştir. Tek kanatla kıyaslandığında $\%39$ kadarlık bir artışa denk gelmektedir. Diğer bir kayda değer nokta ise yine $k = 4$,$h = 0.15$ için $\phi = 270^o$ negatif taşıma yönünde, tek kanadın yüz katı mertebesinde ciddi bir kuvvet oluşmaktadır. Her iki değişken seti için kh değeri yaklaşık olarak 0.6 ve tek kanat için bezer kuvvet değerlerine sahip oldukları halde tandem yerleşiminde elde edilen sonuçların birbirinden çok farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılığın temel nedeninin kanatlar arası etkileşimin, itki üreten akış yapısına olumlu ya da olumsuz yönde etki ediyor olması olduğu düşünülmektedir. İleriye yönelik olarak, iki kanat arası mesafe veya arka kanat üzerinde modifikasyonlarla tandem yerleşim için verimliliğin artırılması üzerine çalışılabilir.

Kaynaklar

Broering, T. M., Lian, Y., ve Henshaw, W. 2010. *Numerical Study of Two Flapping Airfoils in Tandem Configuration.* Proceedings of 48th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition, AIAA 2010-0865

Broering, T. ve Lian, Y. S., 2012. *The effect of phase angle and wing spacing on tandem flapping wings. Acta Mechanica Sinica*, Cilt.28(6), s.1557-1571

Erzincanli, B. ve Sahin, M., 2013. *An arbitrary lagrangian-eulerian formulation for solving moving boundary problems with large displacement and rotations.* Journal of Computational Physics, Cilt.255, s.660-679

Hwang, Y. H., 1995. *Calculations of incompressible flow on a staggered triangular grid, part II: applications.* Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, Cilt.27, s.337-353

Jones, K. D. ve Platzer, M. F., 2001. *On the Use of Vortex Flows for the Propulsion of Micro-Air and Sea Vehicles.* Symposium on Advanced Flow Management: Part A Vortex Flows and High Angle of Attack for Military Vehicles.

Lan, S. ve Sun, M., 2001. *Aerodynamic force and flow structures of two airfoils in flapping motions.* Acta Mechanica Sinica, Cilt.17, s.310-331

Lim, K. ve Tay, W., 2010. *Numerical analysis of the s1020 airfoils in tandem under different flapping configurations.* Acta Mechanica Sinica, Cilt.26(2), s.191-207

Rida, S., McKenty, F., Meng, F. L. ve Reggio M., 1997. *A staggered control volume scheme for unstructured triangular grids.* International Journal for Numerical Methods in Fluids, Cilt.25(6), s.697-717

Sahin, M., 2013. *Parallel large-scale numerical simulations of purely-elastic instabilities behind a confined circular cylinder in a rectangular channel.* Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Cilt.195, s.46-56

Tay, W. B., Percin, M., van Oudheusden, B. W., Bijl, H., Cetiner, O., ve Unal, M. F., 2013. *Numerical and experimental analysis of tandem flapping flight.* 21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, San Diego, California, USA

Thomas, P. D. ve Lombard, C. K., 1979. *Geometric conservation law and its application to flow computations on moving grids.* AIAA Journal, Cilt.17, s.1030-1037

Tuncer, I.H. ve Platzer, M.F., 1996. *Thrust generation due to airfoil flapping.* AIAA Journal, Cilt.34, s.324-331