

YENİ AIRFOİLLERİN PROFİLLERİNİN AERODİNAMİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Münir SUNER¹

¹Istanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi Gemi Mühendisliği, 34940 Tuzla İstanbul, Türkiye, msuner@itu.edu.tr

DOI: [10.23890/SUHAD.2016.0105](https://doi.org/10.23890/SUHAD.2016.0105)

ÖZET

Uçan sistemlerin airfoillerinin profillerinin yapıları, basınç alanını, direnci ve buna bağlı olarak sistemlerin verimlerini, yakıtı, hatta yakıt nedeni ile çevreye olan etkilerini değiştirmektedir. Bu nedenle airfoillerin profillerinin dizaynı çok önemlidir. Ayrıca aynı sebepten dolayı, analitik çözümün ve yeni airfoillerin profillerinin alanyazına büyük katkısı olacaktır. Bu çalışmada, yeni airfoillerin profilleri tasarlanmış ve aerodinamiği analitik olarak potansiyel akım teorisine göre incelenmiştir. Burada yeni altı adet airfoillerin profilleri üretilerek katı cisim modellemesi ile dizayn edilmiştir. Önce bu farklı profillerin kompleks potansiyel fonksiyonları elde edilmiş ve daha sonra akım fonksiyonları çıkarılmıştır. Bunların akım çizgileri, hız dağılımları, basınç dağılımları bulunmuştur. Bu airfoillerin aerodinamiği karşılaştırılmıştır. Airfoillerin profillerinin katı cisimleri, etraflarındaki akım çizgileri, hız dağılımı ve üzerlerindeki basınç dağılımları Matlab programı ile gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Aerodinamik dizayn, Potansiyel akış, Basınç dağılımı, Airfoil, Analitik modelleme

COMPARISON OF THE AERODYNAMICS OF NEW AIRFOILS PROFILES

ABSTRACT

Airfoils' structures of flying systems affects the pressure field, resistance, and accordingly the performance of the system, also the fuel and even changes the influence of fuel on environment. So the design of airfoils' profiles are of importance. For this reason analytical solution and new profiles design are very big contribution for the literature. In this study the aerodynamic of new different airfoils' profiles have been generated and analysed through the analytical potential flow theory. Here six new airfoils' profiles have been designed by solid modelling after generating different sections. The firstly generated the complex potential functions of these different profiles and then stream functions of them have been derivated. Streamlines of flow, velocity and pressure distribution of the airfoils' profiles have been determined. Aerodynamics of the airfoils' profiles have been compared. Solid modelling of airfoils' profiles, streamlines of flow, velocity field and pressure distribution around them have been illustrated with Matlab.

Keywords: Aerodynamics, Design, Potential flow, Pressure distribution, Airfoil, Analytical solution

1. GİRİŞ

Uçan sistemler için kanat performansı çok önemlidir. Cisim uçarken en önemli unsurlardan biri airfoiller etrafındaki akış ve bu akışın analitik dizaynıdır. Buna bağlı olarak sürünme katsayısı, hız ve basınç dağılımı airfoillerin verimliliğini etkilemektedir. Bu sebeple, söz konusu airfoillerin etrafındaki akımın modellemesi burada açıkça belirtilmiştir; Airfoillerin profillerinin geometrisi de enerji verimini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bir airfoil profilinin katı geometrisi ile etrafındaki akımın analitik modellemesi dikkate alınmalıdır ve bunlara göre basınç, hız alanları

belirlenebilir. Konu ile ilgili alanyazın taraması yapılmış, airfoillerle ilgili çok çalışma olsa da bu şekilde sınırlı sayıda çalışma yakın olduğu düşünülen çalışmalar dikkate alınmıştır. Konuyla ilgili yakın çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

L.M. Schroeder ve arkadaşları, 1989, salınımlı düz plaka bir airfoilin viskoz aerodinamiğinin analitik tahmini üzerinde yerel ölçekte çalışmışlardır. Sürekli ve zamana bağımlı viskoz akım alanları ile ilgili çözümleri, yerel olarak geliştirdikleri analitik çözümlerden elde etmişlerdir. Başka bir çalışmada (J.M. Wolff, S. Fleeter, 1990), Reynolds sayısı değerleri orta seviyede olan sıkıştırılmaz laminar

bir akım içerisindeki düz plaka bir airfoilin zamana bağımlı olmayan, viskoz, çapraz rüzgâr aerodinamiklerini analiz etmek amacıyla matematiksel bir model geliştirilmiştir. Sürekli akımda ise önce, doğrusal olmayan konvektif devrelerin Navier-Stokes eşitliğinde yerel ölçekte doğrusallaştırılması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, Reynolds sayısı ve düşürülen frekansın, airfoilde zamana bağımlı aerodinamikler oluşturan çapraz rüzgâr üzerindeki önemli etkileri gösterilmiştir. Yapılan bir çalışmada (M.V. Cook, 2007) bir uçağın uçuş ve taşıma nitelikleri incelenmiş, uçak sınıflandırılmış ve uçuş safhası tanımlanmıştır. Bu çalışma aynı zamanda bir uçağın dizaynının önemini vurgulamış; bu sebeple, tasarımcı en yüksek uçuş kalitelerini elde edebilmek için tasarımlar ve değerlendirici başarıyla tamamlandığını teyit eder. Ning H.J. ve arkadaşlarının, 2015 çalışmasının sonuçları değişken kesitli kirisin titreşim karakteristiklerinin hesaplanmasında kullanılan yarı analitik yöntemin yüksek hızda uçan profil çubuğun aeroelastik deformasyonunun analizinde uygulandığını göstermiştir. Bu sonuçlara yarı analitik yöntem ile ulaşılmıştır. R.C. Lock and J. Bridgewater, 1967,'ın çalışması, transonik ve süpersonik hızlarda etkili bir şekilde yolculuğu amaçlayan ok kanat gövde birleşimlerinin dizaynı için kapsamlı bir yöntem öne sürmüştür. Bu yöntem günümüzde sesaltı hızlarda kullanılan geliştirilmesini hedeflemektedir ve kanatlarda iki-boyutlu bir kanat kısmının üstündeki, kritik engelleme artış Mach sayısının hemen altındaki (ses altı akışta) bir akıma (bir anlamda) eşdeğer bir akım yaratmayı amaçlamaktadır. Bu, kanatlar üzerinde hedeflenen belli bir basınç dağılımını sağlayacak şekilde, kanatlar ve gövdenin birlikte dizayn edilmesiyle gerçekleştirildi. Bir araştırma incelemesinde (Reckzeh D., 2003) ilk airbus uçakların yüksek kaldırma dizaynlarındaki deneyimler, dizayn çalışması için gerekli başlıca araçlar (hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve rüzgâr tüneli testi) ve alınan onay sunulmuştur. Ayrıca, gelecek nesil uçaklar için yeni yüksek kaldırma içeriklerinin geliştirilmesi için kullanılacak araştırma programlarına dikkat çeken bir yan görüşe yer verilmiştir. Megaliner yüksek kaldırma kanadının geliştirilmesi için tanımlanan çalışma optimize edilmiş genel bir dizayna duyulan ihtiyaçtan yola çıkılarak yürütülmüştür. Yolculuk sırasındaki çeşitli etkileşimler, kanat, destek ve devreye alma sistemi dizaynları vurgulanmıştır, bu da olabilecek en iyi dengeli çözümlere ön ayak olmuştur. Mukesh R. ve arkadaşları, 2012, çalışmalarında aerodinamik şekillerinin optimizasyonunun çözümlenmesinde optimizasyon algoritmasını kullanmışlardır. Çalışmanın sonucuna göre, parçacık sürü optimizasyonu şeması çeşitli olası çözümler arasında en iyisini bulmada daha etkilidir. Ayrıca PSO'nun daha etkili bir gezgin olarak kabul edilen

GA ile kıyaslandığında daha fazla sömürme karakteristikleri gösterdiği görülmüştür. Zakharov V. E. ve arkadaşları, 2002, açılı korur toplam ve Fourier bileşimine dayalı potansiyel akışlara ve iki boyutlu bir yüzeye sayısal çözümler sağlayan yeni bir yöntem geliştirip öne sürmüşlerdir. Suner M., 2015, serbest ve sınırlı akışkan ortamlarda katı bir cisim etrafındaki akım modellenmesi üzerinde çalışmıştır. Suner M. ve diğerleri, 2015, potansiyel akım teorisini kullanarak delikli Rankine ovali hidrodinamiğinin analitik analizini yapmışlardır. Suner M. sınırsız akış ortamında uçan iki-boyutlu cisimlerin aerodinamiğinin analitik analizini araştırmıştır.

Alanyazında yer alan yukarıdaki çalışmalar genel olarak özetlendiğinde, airfoiller ve uçan cisimlerle ilgili potansiyel akışların, viskoz akışın, uçan cisimler etrafındaki etkileşimlerin, maddelerin veya nesnelerin hareketlerinin, yüzey hareketlerinin ve uçan gövdeye benzer nesnelerin simülasyonlarının incelendiği anlaşılmaktadır. Ancak airfoillerin profilleri üzerinde bu şekilde analitik aerodinamik çalışma ilk defa literatürde ele alınmıştır.

Bu çalışmanın amacı makro ve mikro mühendislik sistemleri içinde küçük ölçekli projeleri yürütmede özellikle airfoillerin verimlerinin artırılması ve analitik çözümlerin üretilmesi için analitik ve sayısal yöntemleri uygulayarak her türlü araştırma ve incelemeyi kısıtlanmadan gerçekleştirebilmek açısından aerodinamik probleminin çözümüne katkıda bulunmaktır.

Problem: iki-boyutlu potansiyel akış teorisinden yararlanılarak bir matematiksel modelleme yapılmış; ardından, nümerik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sınırsız akışkan ortamında farklı airfoillerin profillerinin aerodinamiği potansiyel akış teorisini kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra girdap ve çift akımlardan faydalanarak airfoillerin oluşumunun akım fonksiyonu elde edilmiştir; böylece, hız, basınç ve kuvvet alanlarına analitik olarak ulaşılmıştır. Bu çalışmada, farklı yeni airfoillerin profillerinin aerodinamik dizaynı yapılmakta ve bu yeni farklı airfoiller karşılaştırılmaktadır. Bu çalışmanın literatürde böyle bir dizayn ile ilgili yapılan ilk araştırma örneği olacağı kabul edilmektedir. Airfoillerin analitik dizaynı tamamen yenilikçi bir konsepttir.

2. METODOLOJİ AEROFİLLERİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

2.1. Problemin Tanımı

Bu araştırma kapsamında incelenecek bir nesne olduğu varsayılan airfoillerin profillerinin geometrik şekli uçan cismin yapısı gibidir. Hava ortamının serbest akım yönü uçuş yönüyle aynı olabilir. Dolayısıyla uçan cismin hava sahasının akımı yönünde ilerleyebilir. Akış ortamı ideal, sürekli, sıkıştırılmaz ve sınırsız kabul edilmektedir. İki-boyutlu airfoillerin profillerinin

hareketi analitik olarak potansiyel akış teorisi ile belirlenmiştir.

Sınırsız bir akım ortamındaki airfoillerin profilleri etrafında oluşan iki boyutlu akımların hareketini incelemek amacıyla genel akım, noktasal girdaplar kullanılacaktır. Konu, sınırsız akış ortamında ele alınacaktır. Sınırsız akışkan ortamdaki airfoillerin profillerinin yapıları farklı uzunlukla kalınlıkta ve açılardadır.

2.2. Hipotez

Hava sahası sürekli, akışkan ideal ve sıkıştırılmazdır, ($\frac{\partial}{\partial t} \equiv 0$, $\mu = 0$, $\rho = \text{sabit}$),

girdap potansiyeli ($\bar{\omega} = 0$), hız alanı ($\vec{V} = \nabla\phi = \text{grad}\phi$), tek faz akım, akım ses altı hızdadır. ($Ma \leq 0.3$)

Burada; μ dinamik viskoziteyi gösterir (kg/ms), ρ yoğunluk (kg/m³), V hız (m/s), ω açısal hız (rad/s), t zaman (s), $F(z)$ ise potansiyel fonksiyondur, (m).

Bu doğrultuda, hareketin potansiyel fonksiyonu süreklilik eşitliğinden ve Laplace diferansiyel denkleminin $\nabla^2\phi = 0$ çözümünden elde edilir.

2.3. İki Boyutlu Potansiyel Akış Teorisi

Potansiyel akış teorisinden bilindiği gibi;

$z = x + iy = r.e^{i\theta}$ 'nin aşağıda belirtildiği şekilde kompleks potansiyeli $F(z)$, potansiyel fonksiyonu ϕ , akım fonksiyonunu ψ , hız alanını \vec{V} , basınç alanını P , kuvvet alanını \vec{F} temsil ettiği düşünülmektedir. Denklem (1), ... , Denklem (6). Akım fonksiyonuna ait akım fonksiyonu ve potansiyel fonksiyon aracılığıyla elde edilen hız ve basınç alanlarına Matlab programı yardımıyla gösterilmiştir.

Kompleks potansiyel fonksiyon Denklem (1) de olduğu gibi akım fonksiyonu ve hız potansiyelinin toplamına eşittir.

$$F(z) = \phi + i\psi \quad (1)$$

Hız alanı akışın potansiyel bir fonksiyondan veya akım fonksiyonundan elde edilmiştir ve Denklem (2)'de gösterilmektedir

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} = \nabla\phi = \frac{\partial\phi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\phi}{\partial y}\vec{j} = \frac{\partial\psi}{\partial y}\vec{i} - \frac{\partial\psi}{\partial x}\vec{j} \quad (2)$$

Hız sonucu ve Bernoulli teoreminde yararlanılarak Denklem (3) 'teki gibi yazılır.

$$|\vec{V}|^2 = u^2 + v^2$$

$$p_1 + \frac{\rho}{2}|\vec{V}_1|^2 = p_2 + \frac{\rho}{2}|\vec{V}_2|^2 \Rightarrow p_2 = p_0 + \frac{\rho}{2}\left(|\vec{V}_2|^2 - |\vec{V}_1|^2\right) \quad (3)$$

Bu eşitlikte P_0 ortam basıncıdır (N / m²), \vec{V}_1 , ve \vec{V}_2 enerji eşitliği yazılana kadar dikkate alınır. Kuvvet alanı eşitliği Denklem (4)'te gösterildiği gibidir.

$$\vec{F} = \iint p\vec{n}.d\sigma = \iint \left(p_0 + \frac{\rho}{2}\left(|\vec{V}_2|^2 - |\vec{V}_1|^2\right) \right) \vec{n}.d\sigma \quad (4)$$

Burada, $P_1 = P_\infty$ ve $V_1 = U_\infty$ elde edilmiştir. Aynı anda birden fazla akımın olması durumunda süperpozisyon teorisine göre kompleks potansiyel fonksiyonları toplanır (Denklem 5). Akım fonksiyonu, hız alanı ve basınç alanı bu yeni elde edilen fonksiyona göre düzenlenir.

$$F(z) = F_1(z) + F_2(z) + \dots + F_n(z) \quad (5)$$

3. AIRFOİLLERİN KATI MODELLENMESİ

3.1 Airfoillerin Katı Profillerinin Modellemesi

Airfoil katı modeli girdap, genel akım ve uçan nesnenin dış duvarının birleştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu duvarların bulunması konusuna ise ayrıca değinilecektir. Süperpozisyon teorisine göre ayrı olarak elde edilen Airfoillerin profillerinin dış duvarı için fonksiyonları toplanmış ve böylece kompleks potansiyel fonksiyonu için Denklem 6 da olduğu gibi elde edilir.

Genel akım, girdaplar farklı fonksiyonların birleşimi olan, kompleks ve belirli bir gövde yapısına sahip katı airfoillerin profillerinin oluşturulması amacıyla kullanılır ve bu iki-boyutlu potansiyel akım teorisi ile üretilebilirler. Katı airfoil yapısı etrafındaki akım fonksiyonu, hız ve basınç alanları sınırsız bir akışkan ortamında analitik olarak üretilebilir ve hız alanı ile basınç alanı bu teoriden yararlanılarak yazılabilir.

Potansiyel akış teorisi kompleks airfoil etrafına uygulandığında kompleks potansiyel fonksiyonu Denklem 6'da görüldüğü gibi yazılabilir. Noktasal girdap merkezleri alinyasında ilk defa bu makalenin yazarı tarafından araştırılan airfoillerin yeni üretilen profillerine göre uygulanmıştır.

$$F_{\text{airfoil}}(z) = F(z) + U_\infty z =$$

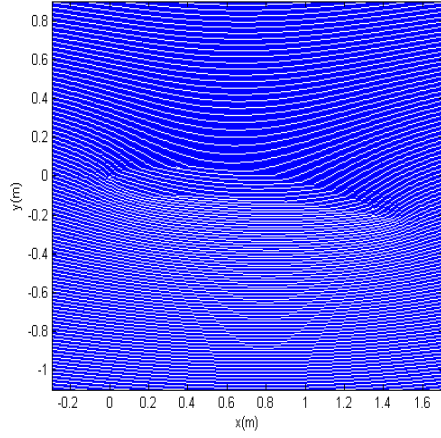
$$= U_\infty z + \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n \frac{q}{i} \log(z - z(j)) \quad (6)$$

3.2 Airfoil Profillerinin Akım ve Potansiyel Fonksiyonu

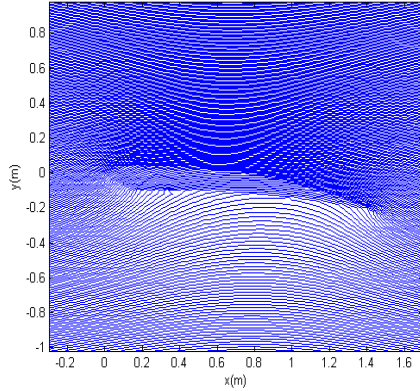
Kompleks potansiyel fonksiyonundan (Denklem 6) yola çıkarak airfoillerin profillerinin potansiyel akımının akım çizgileri ve potansiyel fonksiyonuna Denklem 7'de gösterildiği gibi ulaşılabilir. Airfoillerin katı cismi ve katı isim etrafındaki akış, varsayılan airfoillerin profilleri, noktasal girdaplar ve genel akım ile elde edilir. Airfoillerin profillerinin katı duvarı, y' nin, x' e bağlı fonksiyonu tanımlandıktan sonra, bu dış duvar üzerinde noktasal girdaplar yerleştirilerek ve genel

akımla süperpozisyon teorisine göre toplanarak elde edilmiş ve böylece kompleks potansiyel fonksiyonu için Denklem 6'ya ulaşılmıştır.

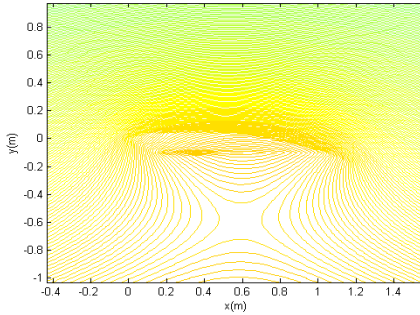
$$\psi_{airfoil}(x, y) = U_{\infty} y - \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n q \left[\log(x - x(j)) + (y \mp y(j))^2 \right] \quad (7)$$



(a)



(b)



(c)

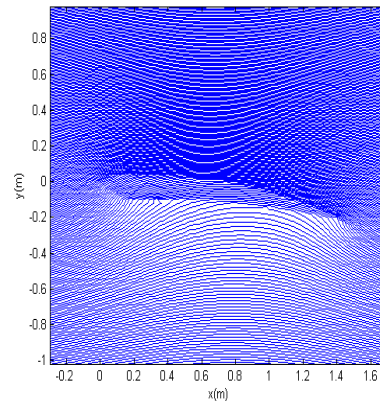
Şekil 1: Farklı airfoillerin profillerinin katı cisim modelleri ve akım çizgileri; a) airfoil 5, b) airfoil 2, c) airfoil 3

Denklem 7 uygulamalarıyla elde edilen airfoillerin profillerinin katı modeli ve etraflarındaki akım çizgileri Şekil 1'de görülmektedir. Şekil 1a' da airfoil profili 5, Şekil 1b'de airfoil profili 2 ve Şekil 1c de airfoil profili 3 katı modeli ve etrafındaki akım çizgileri görülmektedir. Bu çözüm sayesinde airfoiller etrafındaki akım çizgileri gibi,

geometrinin lift kuvveti üzerindeki etkisi açıkça görülebilmektedir.

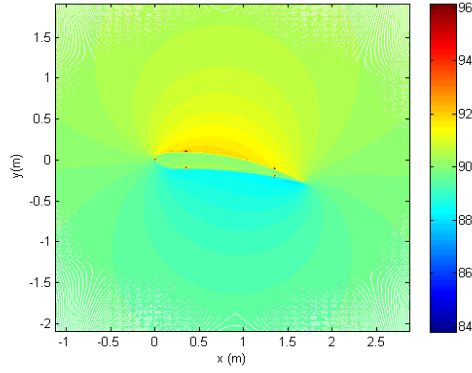
3.3 Airfoil Profilleri Üzerindeki Hız ve Basınç Alanı

Denklem 2 kullanıldığı takdirde hız alanı eşitlikleri ile hız dağılımı sonucuna ulaşılabilir ve bunu takiben Bernoulli Teoremi kullanılarak airfoil profilleri etrafındaki basınç dağılımı belirlenebilir. Şekil 2'de airfoil katı modeli ve etrafındaki akım, airfoil profili üzerindeki hız ve basınç dağılımları ve farklı seviyelerde, ön ve arka tarafında farklı seviyelerde hız ve basınç değişimleri yer almaktadır. Şekil 2a'da katı cisim modeli akış çizgileri net biçimde görülebilir, Şekil 2b'de airfoil profili üzerindeki hızın dağılımı görülmektedir. Buna göre airfoil profili üzerindeki hız, profilin altındaki hıza göre daha yüksektir. Profilin üst tarafında öne doğru daha yüksektir ve profilin altında çıkışa doğru en alt düzeydedir. Hız dağılımının profil geometrisine bağlı olarak değiştiği açıkça görülmektedir. Şekil 2c'de airfoil profili üzerindeki basınç dağılımında basıncın profilin altındaki basıncın üstteki basınca göre daha yüksek olduğu ve bunun lift kuvvetine sebep olduğu görülecektir. Profilin üst tarafında öne doğru daha en düşük ve profilin altında çıkışa doğru en üst düzeydedir. Şekil 2d' de hızın profilin üzerinde daha yüksek olduğu ve altta düştüğü grafikten anlaşılmaktadır. Şekil 2e, 2f' de grafiklerden ise airfoil profili altındaki basıncın airfoil altındakinden daha düşük olduğu, arkasındaki basıncın ön basınçta daha yüksektir. Basınç dağılımı ve lift kuvvetinin airfoil profilin giriş geometrisine, hücum açısına, airfoil profilinin kıvrımına ve airfoil profilinin dış yapısına bağlı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Basınç üstte düşük ve altta yüksektir. Kanadın çıkışında basıncın arttığı da görülebilir.

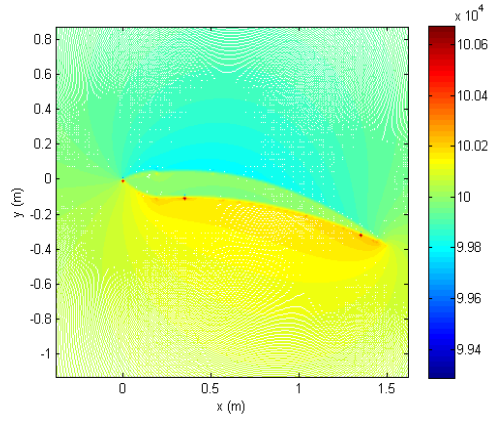


(a)

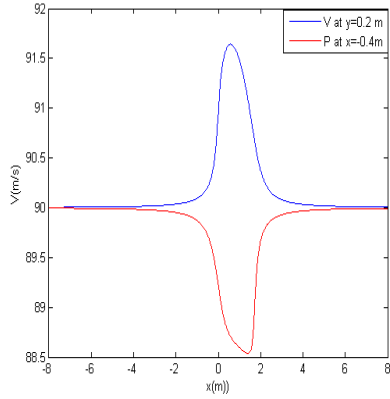
Şekil 2: Airfoil2 katı modeli etrafındaki; a) akım çizgileri, b) hız dağılımı, c) basınç dağılımı d) Farklı seviyelerde alt ve üst hız değişimi, e) ön ve arka basıncı, f) üst ve alt tarafında farklı seviyelerde basınç değişimi



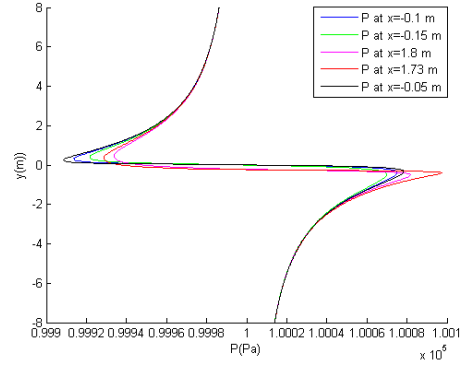
(b)



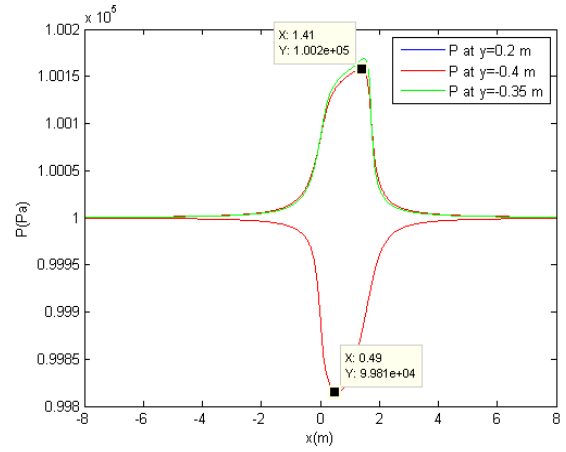
(c)



(d)



(e)

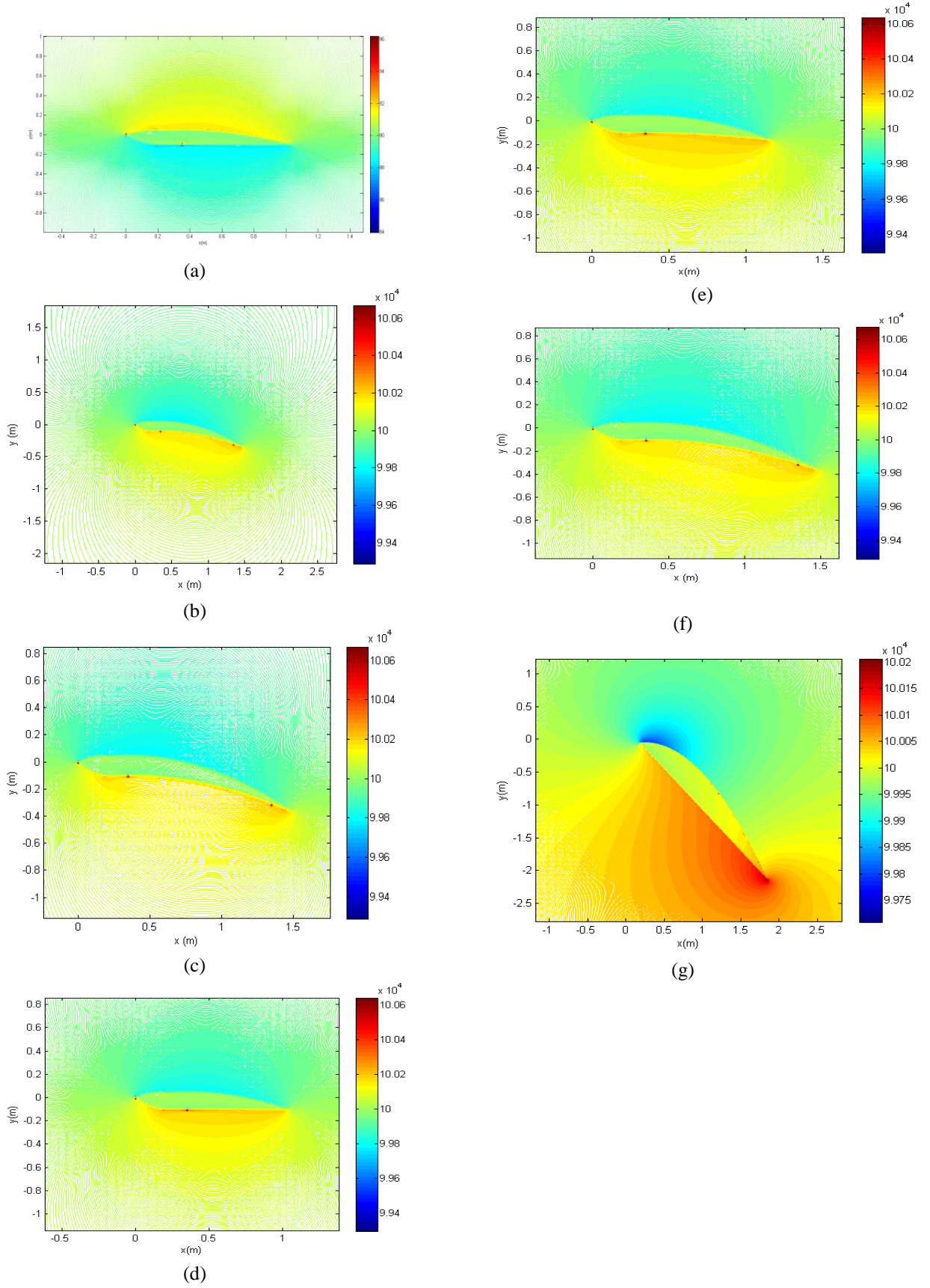


(f)

Şekil 2: Airfoil2 katı modeli etrafındaki; a) akım çizgileri, b) hız dağılımı, c) basınç dağılımı d) Farklı seviyelerde alt ve üst hız değişimi, e) ön ve arka basıncı, f) üst ve alt tarafında farklı seviyelerde basınç değişimi (Devam)

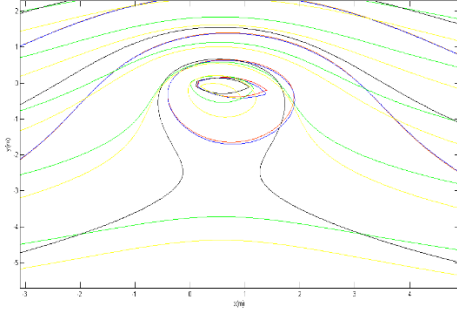
Şekil 2: Airfoil2 katı modeli etrafındaki; a) akım çizgileri, b) hız dağılımı, c) basınç dağılımı d) Farklı seviyelerde alt ve üst hız değişimi, e) ön ve arka basıncı, f) üst ve alt tarafında farklı seviyelerde basınç değişimi (Devam)

Şekil 3'te airfoillerin profilleri üzerindeki hız ve basınç dağılımları görülmektedir. Şekil 3a' da airfoil3 üzerindeki hız dağılımı, Şekil 3b'de airfoil1 basınç dağılımı, Şekil 3c'de airfoil2 basınç dağılımı, Şekil 3d'de airfoil3 basınç dağılımı, Şekil 3e'de airfoil4 basınç dağılımı, Şekil 3f'de airfoil5 üzerindeki basınç dağılımı, Şekil 3g'de airfoil6 basınç dağılımı görülmektedir. Hücum açısı arttıkça basınç farkı değişmektedir. Hücum açısına bağlı olarak değişimler net olarak okunabilir. Airfoil profilinin uzunluğu, kalınlığı oluşan itme ve lift kuvvetinde önemli rol oynamaktadır.



Şekil 3: Airfoillerin profilleri üzerindeki, a) airfoil3 hız dağılımı, b) airfoil1 basınç dağılımı, c) airfoil2 basınç dağılımı, d) airfoil3 basınç dağılımı, e) airfoil4 basınç dağılımı, f) airfoil5 basınç dağılımı, g) airfoil6 basınç dağılımı

Şekil 4'te ilk beş airfoilin profilinin akım çizgileri ve bu profillerin lift kuvveti etkisi görülmektedir. Bu teoride noktasal girdap kullanıldığından bunlar üzerinde oluşan lift kuvveti büyüklüğü akım çizgisinden belirlenebilir.



Şekil 4: Airfoillerin profillerinin lift kuvvetine etkisi

4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada farklı profillerden oluşan iki-boyutlu airfoiller araştırılmış ve katı gövdeleri potansiyel akış teorisi yöntemi ile analitik olarak üretilmiştir. Farklı profillerin kompleks potansiyel fonksiyonları bulunmuştur. Airfoil profillerinin katı cisim geometrisi, akım fonksiyonları çıkarılmış, basınç alanları fonksiyonların analitik olarak bulunmuş ve Matlab programı ile gösterilmiştir. Airfoiller etrafındaki basınç dağılımı ve hız alanı belirlenmiş ve Matlab programı ile gösterilmiştir. Sonuçlara göre, söz konusu airfoillerin hucum açısı, profilleri, uzunlukları ve kalınlıkları verimi ve basınç alanı önemli derecede etkilemektedir. Bu çözümler ile geometrinin basınç ve kuvvet alanı ile enerji verimliliği üzerindeki etkisi anlaşılabilir. Ayrıca bu çözümler teorik ve pratik anlamda eşleştirilmiştir. Verimleri açıkça görülmektedir ve literatür ile uyum içindedir.

SEMBOLLER DİZİNİ

| | |
|--------|--|
| $F(z)$ | Kompleks potansiyel fonksiyonu, (m) |
| F | Kuvvet (N) |
| P | Basınç (kg / ms^2) |
| u | x- eksenindeki hız bileşeni, (m / s) |
| V | Hız, (m / s) |
| v | y- eksenindeki hız bileşeni, (m / s) |
| $y(j)$ | Noktasal girdabın y eksenindeki konumu, (m) |
| $x(j)$ | Noktasal girdabın x-eksenindeki konumu, (m) |
| q | Noktasal girdabın şiddeti, (m^2/s) |
| μ | Dinamik viskozite, (kg/ms) |
| ρ | Kütleli yoğunluk (kg / m^3) |
| ϕ | Potansiyel fonksiyonu, (m^2 / s) |
| ψ | Akım fonksiyonu, (m^2 / s) |

KAYNAKLAR

- Cook M.V., 2007. Flying and Handling Qualities . Flight Dynamic Principles (Second Edition), Pages 240-273
- Janson, Carl E., Potential flow panel method for calculation of free surface flow with lift, Doctor Savhandlingar vid chalmers Tekniska Högskola, 1997, 1277.
- Lock R.C., Bridgewater J., 1967, Theory of aerodynamic design for swept-winged aircraft at transonic and supersonic speeds Progress in Aerospace Sciences, Volume 8, Pages 139-228
- LI J., Gao Z., Huang J., K Zhao K. August 2013 Aerodynamic design optimization of nacelle/pylon position on an aircraft. Chinese Journal of Aeronautics, Volume 26, Issue 4, Pages 850-857
- Mukesh R., Pandiyarajan R., Selvakumar U., Lingadurai K. 2012 Influence of Search Algorithms on Aerodynamic Design Optimisation of Aircraft Wings Procedia Engineering, Volume 38, 2012, Pages 2155-2163
- Schroeder L.M., Wolff J.M., Fleeter S. 1989. Locally analytical prediction of the viscous aerodynamics of an oscillating flat plate airfoil Mathematical and Computer Modelling, Volume 12, Issue 6, Pages 707-719
- Ning H., Nan-Peng Feng, Tan-Hui Wu, Cheng Zhang, Hao Wang, march 2015, Semi-analytical method for calculating aeroelastic effect of profiled rod flying at high velocity. Defence Technology, Volume 11, Issue 1, Pages 85-92
- Suner M., Sınırlı olmayan akışkan ortamda uçan iki boyutlu yüzey airodinamiğinin analitik analizi, Uluslararası Sürdürülebilir Havacılık Konferansı, Temmuz 2015, İstanbul
- Suner M. 2015 Modeling of flow around a solid body in free and restricted fluidal mediums, chapter by Springer
- Suner M., Salci S.A., Yigit K.S., Kandemir Ilyas. 2015. Analytical analysis of hydrodynamics of the perforated Rankine oval, ocean engineering, 108, 227-240
- Reckzeh D., March 2003 Aerodynamic design of the high-lift-wing for a Megaliner aircraft. Aerospace Science and Technology, Volume 7, Issue 2, , Pages 107-119
- Wolff J.M., Fleeter S., 1990. Viscous unsteady gust aerodynamics of a flat plate airfoil by a locally Analytical method. Computers & Mathematics with Applications, Volume 19, Issue 6, 1990, Pages 27-36