

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARA ULAŞIM ARAÇLARININ AERODİNAMİK
İNCELEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Erdem BEKTAŞ**

Anabilim Dalı : UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ

Programı : UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ

EKİM 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARA ULAŞIM ARAÇLARININ AERODİNAMİK
İNCELEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Erdem BEKTAŞ
511051008**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Eylül 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ekim 2008**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. M. Adil YÜKSELEN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Seyhan U. ONBAŞIOĞLU

Prof.Dr. Mehmet Ş. KAVSAOĞLU

EKİM 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışmada yardımlarından ve sabırlarından dolayı sayın hocam M. Adil YÜKSELEN'e ve eşime teşekkür ederim.

Eylül 2008

Erdem BEKTAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ.....	vi
SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. PANEL YÖNTEMİ.....	8
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (CFD) YÖNTEMİ	13
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	19
5. ÖNERİ VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR,.....	33
KAYNAKLAR	34
ÖZGEÇMİŞ	36

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Formula araçları 200 km/saat hızda tavanda baş aşağı gidebilecek aerodinamiğe sahiptir	2
Şekil 1.2: Rus Ekronoplan	3
Şekil 1.3: Beriev Be-2500a	4
Şekil 1.4: Karadan havalanmak üzere tasarlanmış Pelican.....	4
Şekil 1.5: Örnek Yer Etkisi Problemi	6
Şekil 2.1: Panellere ayrılmış profil.....	8
Şekil 2.2: Noktasal girdabın indüklediği P noktasına nazaran gösterimi	9
Şekil 2.3: Firar kenarında uygulanan Kutta şartı	9
Şekil 2.4: Daire etrafında potansiyel akış	10
Şekil 2.5: Daire etrafındaki basınç katsayılarının karşılaştırması.....	10
Şekil 2.6: NACA0012 profilinin Panel Metodu ve Joukowski hesabına göre taşıma katsayıları	11
Şekil 2.7: Yer etkisi hesabı için imajlı oluşturulan profil	11
Şekil 2.8: NACA4412'ye ait analiz profili ile deney profili	12
Şekil 3.1: ANSYS çözüm alanı ve sınır şartları.....	13
Şekil 3.2: Çözüm alanındaki üçgensel hacimler	14
Şekil 3.3: Örnek C_p dağılımı (NACA4412, 2° hücum açısı, $h=0.4c$ yerden açıklık)	14
Şekil 3.4: Serbest halde kanat için çözüm alanı ve sınır şartları.....	15
Şekil 3.5: NACA4412 profiline ait Ansys 10.0 ve deney sonuçları	16
Şekil 3.6: NACA4412 profiline ait 0° hücum açısındaki basınç dağılımları	16
Şekil 3.7: NACA4412 profiline ait 2° hücum açısındaki basınç dağılımları	17
Şekil 3.8: NACA4412 profiline ait 4° hücum açısındaki basınç dağılımları	17
Şekil 3.9: NACA4412 profiline ait 8° hücum açısındaki basınç dağılımları	17
Şekil 4.1: NACA 4412 profili	19
Şekil 4.2: NACA 4412 profili, Panel Yönteminden elde edilen çeşitli hücum açıları için taşıma katsayıları.....	20
Şekil 4.3: NACA4412 Profili 0° , yerden açıklık $h=0.05c$ ve $0.30c$ ve serbest durumda basınç dağılımları.....	20
Şekil 4.4: NACA4412 profili 4° , yerden açıklık $h=0.05c$ ve $0.30c$ ve serbest durumda basınç dağılımları	21
Şekil 4.5: 0° hücum açısı ve serbest durumunda NACA4412 profil etrafındaki basınç dağılımı	22
Şekil 4.6: 0° hücum açısı ve $h=0.05c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profil etrafındaki basınç dağılımı	22
Şekil 4.7: 0° hücum açısı ve $h=0.30c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı	23
Şekil 4.8: 4° hücum açısı ve serbest durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı.....	23

Şekil 4.9: 4° hücum açısı ve $h=0.05c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı	24
Şekil 4.10: 4° hücum açısı ve $h=0.30c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı	24
Şekil 4.11: NACA 4412 profili için CFD Yönteminden elde edilen taşıma katsayıları .	25
Şekil 4.12: NACA4412 Profili Basınç Dağılımı. 0° yerden açıklık $h=0.05c$ ve $0.30c$ ve serbest durum	26
Şekil 4.13: NACA4412 Profili Basınç Dağılımı. 4° yerden açıklık $h=0.05c$ ve $0.30c$ ve serbest durum	26
Şekil 4.14: 0° hücum açısı ve $h=0.05c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı	27
Şekil 4.15: 0° hücum açısı ve $h=0.30c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı	28
Şekil 4.16: 4° hücum açısı ve $h=0.05c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı	28
Şekil 4.17: 4° hücum açısı ve $h=0.30c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı	29
Şekil 4.18: NACA 4412 profili için panel yöntemi sonuçlarının ve deneysel sonuçların karşılaştırması.....	30
Şekil 4.19: NACA 4412 profili için CFD yöntemi sonuçlarının ve deneysel sonuçların karşılaştırması.....	31

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1:NACA 4412 profili için Panel Yönteminden elde edilen taşıma katsayıları..19

Tablo 4.2:NACA 4412 profili için Panel Yönteminden elde edilen taşıma katsayıları..25

SEMBOL LİSTESİ

Φ	: Potansiyel hız fonksiyonu
Γ, γ	: Girdap şiddeti
σ	: Kaynak şiddeti
$\bar{u}$	: x eksen yönündeki hız bileşeni
$\bar{v}$	: y eksen yönündeki hız bileşeni
$\vec{V}$	: Hız vektörü
∇	: Laplace Operatörü
x_0, y_0	: Sabit nokta koordinatları
C	: Panel merkezi (center)
Cl	: Taşıma katsayısı
ε	: Panel merkez orijinli panel koordinatının yatay eksen koordinatı
η	: Panel merkez orijinli panel koordinatının dikey eksen koordinatı
s	: Panel uzunluğu
r	: İki nokta arasındaki uzaklık
$\vec{i}, \vec{j}$	: Yatay eksen, dikey eksen birim vektörleri
R	: Sağ taraf denklem toplamı
A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}	: Katsayı matrisleri
α	: Açık / Hesap katsayısı
Q, E, F, H	: Hareket denklemleri matrisleri
ρ	: Yoğunluk
p	: Basınç
e_t	: Toplam enerji
q	: Hız
a	: Ses hızı
γ	: Gaz sabiti
λ	: Özdeğer
c	: Profil veter uzunluğu (tez içinde kullanılan hesaplarda 1.0'dır)
h	: Profil firar kenarının yere olan uzaklığı (veter boyu cinsinden)
h	: İnce profil kamburluğunun profil boyuna oranı
t	: Profil kalınlığının profil boyuna oranı.
x	: Yatay eksenindeki uzunluk

KARA ULAŞIM ARAÇLARININ AERODİNAMİK İNCELEMESİ

ÖZET

Kara araçları aerodinamiği içerisinde incelenmesi gereken önemli bir etken yer etkisidir. Yer etkisi dinamik hareket anında hava akımında ve bu akıma bağlı kuvvetlerde yerin mevcudiyetinden dolayı oluşan değişiklikleri incelemektir. Bu çalışmada yere yakın durumda hava akımına maruz kalan aracı simüle etmek için NACA4412 profili incelenmiştir. Hesaplamalarda panel metodu ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri kullanılarak 0, 2, 4, 6, 8, 10° hücum açılarında ve firar kenarı 0.05, 0.15, 0.30, 0.40, 0.60, 0.80 ve 1.00 profil boyu yerden açıklıklarda NACA4412 profiline etki eden kaldırma kuvvetinin değişimi incelenmiştir. Panel yöntemi hesaplamalarında lineer dağılımlı girdap, CFD yönteminde ise Ansys 10.0 içerisindeki simplef algoritması kullanılmıştır. Taşıma katsayılarının hesabı için profil etrafındaki basınç dağılımları hesaplanmış, daha sonra profil etrafında integre edilerek taşıma katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirleri ile ve deney sonuçları ile karşılaştırıldığında karakteristik olarak profil etrafındaki akımların iki yöntemde de benzerlik gösterdiği, profil alt yüzeyi ile yer çizgisi arasında kalan alan daralıp genişleyen bir hacim oluşturduğunda profilin yere yaklaşması ile altında negatif basınç alanının arttığı, profilin alt yüzeyi ile yer çizgisi arasında kalan alan sadece daralan bir yapı oluşturduğunda ise profil yere yaklaştıkça altında pozitif basınç alanının arttığı görülmüştür. Panel yöntemi ile CFD yönteminin deney sonuçlarına olan uyumu incelendiğinde ise profile bağlı yerin bağlı hızının panel yönteminde simetrik iki profil ile tam olarak simüle edilemediği, yani bu koşulun panel yöntemi çözümüne tam olarak uygulanamadığı, fakat CFD yönteminde ise yerin profile bağlı bağlı hızının, oluşturulan çözüm hacmindeki yere ait sınır şartlarının uygulanması ile hesaba daha iyi integre edilebilmesinden dolayı CFD yönteminin deney sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

AERODYNAMICAL INVESTIGATION OF GROUND TRANSPORTATION VEHICLES

SUMMARY

Ground effect is one of the important subjects in ground transportation vehicle aerodynamics which should be investigated. Investigating ground effect is investigating the changes on air flow and dynamic forces effects on object because of existence of ground while object is in dynamic movement. To simulate vehicle NACA4412 profile in ground effect is used in this study. Using the panel method and computational fluid dynamics (CFD) method, NACA-4412 profile at varying attack of angles $0-10^\circ$ and varying chord profile ratio ground clearances (0.05, 0.15, 0.30, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00) are tested and changes in lifting forces are investigated. For panel method linear vortex distribution is used, for CFD method Ansys 10.0's simplef algorithm is used. To calculate lift coefficients pressure coefficients are calculated, then calculated coefficients are integrated along chord profile to get lift coefficients. Results are compared with each other and with experimental results. Both results are found similar as characteristic, if the area between undersurface of the chord and ground line has a shrinking expanding structure then a negative pressure field which expands by smaller ground clearances occurs, if the area between undersurface of the chord and ground line has just only a shrinking structure then a positive pressure field which expands by smaller ground clearances occurs. When panel method and CFD method results are compared to experimental results it is seen that relative ground speed which belong to chord can not be integrated to panel method solution because of just using two symmetrical profiles, but because of easy integration of relative ground speed (relative to chord) to boundary conditions, CFD method is giving closer results to experimental results when compared to panel method.

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca kullanılan kara ulaşımı 19. yüzyılda fosil yakıtların ve motorlu araçların kullanımının yaygınlaşması ile önceki dönemlerine oranla kat ve kat hızlanmıştır. Fakat bu hızlanma beraberinde başka sorunlar da getirmiştir; artan yakıt tüketimine bağlı çevre kirliliği ve ulaşımда yaşanan kazalardan ötürü ölümler kara ulaşımı denildiğinde hemen akla gelen en kötü iki unsurdur.

Günümüz kara ulaşım aracı üreticilerinin de ürettikleri araçlarda rekabet üstünlüğü sağlamak için öne çıkardığı unsurlar da bunlardır, aracın yakıt ekonomisi ve seyir güvenliği. Yakıt ekonomisi için aracın motor verimine ve mekanik verimine, aracın seyir güvenliği için çarpma testlerine, hava yastıklarına ve fren mesafesine bakılır. Bunların yanı sıra yakıt ekonomisi ve araç güvenliği için bakılan ortak bir nokta vardır; araç aerodinamiği. Aracın aerodinamik sürtünmesi yakıt tasarrufu hakkında fikir veren önemli bir unsurdur, aracın dış şeklinde yatan aerodinamik görünüm ise insanlara ilk bakışta güvenli maksimum hızı hakkında fikir verir.

Aracın aerodinamik özellikleri, örneğin aerodinamik sürtünme katsayısı yakıt ekonomisi üzerinde yüksek hızlarda en önemli etkindir. Yine aynı şekilde aracın hızlı seyir halinde stabil kalabilmesi aerodinamik özelliğinin bir sonucudur. Bu bakımdan kara ulaşım aracı üreticileri açısından araç aerodinamiği dikkatle incelenen bir değerdir.

Araç aerodinamiğinde araç etrafındaki akış ve bu akışın aracın dinamiğine kattığı özellikler incelenir. Yüksek hızlardaki araç aerodinamiği araca düz yolda takla da attırabilir, tavanda baş aşağı gitmesini de sağlayabilir (Şekil 1.1). Bu bakımdan araçlar aerodinamik özelliklerinin belirlenmesi için bilgisayar ortamında veya rüzgâr tüneline incelenirler. Burada araca çeşitli hızlarda etkiyen yalpa momentleri, yunuslama momentleri, sürtünme kuvvetleri, taşıma veya bastırma kuvvetleri incelenir.



Şekil 1.1: Formula araçları 200 km/saat hızda tavanda baş aşağı gidebilecek aerodinamiğe sahiptir

Kara ulaşım aracı aerodinamiği hiçbir zaman sadece araçtan ibaret değildir. Araç her zaman karaya bağlı bir hareket yaptığı için aerodinamik özellikler araca olduğu kadar üzerinde ilerlediği yerin de fizikine bağlıdır. Bu durum aerodinamik incelemelerde yer etkisi olarak adlandırılır.

Yer etkisinin incelenmesi sadece kara araçlarını kapsamaz. Deniz araçları da aerodinamik açıdan deniz ile etkileşim içinde olduklarından, hatta hava araçları da iniş, kalkış analarında yer ile aerodinamik etkileşim içerisinde olduklarından birer inceleme konusudurlar. Bu incelemelere yaklaşımlar 2 veya 3 boyutlu olabilmektedir. Günümüzde artan yakıt fiyatları ile hızlı ve ekonomik taşıma sağlayacağı düşünülen deniz üstünde gidecek deniz hava karışımı araçlara yönelik çalışmalar rağbet görmektedir. Calcins (1977) yaptığı çalışmada deniz üzerinden New York-Londra arasında çalışacağını varsaydığı hibrit bir sistem olan WIG (Wing in Ground Effect) aracının konvansiyonel taşıma metodu olan gemi ve uçaktan farklı olarak yıllık ortalama %43 fazla kâr sağlayacağını öngörmüştür. Kirill V. Rozhdestvensky (2006) makalesinde kısaca WIG olarak adlandırılan kanat yer etkisinde (WIG-Wing in Ground Effect) araçların Wright kardeşlerden yani uçağın kullanılmaya başladığı ilk zamandan başlayarak farkedilen yer etkisinin Sovyet Rusya zamanında yapılan çalışmalar ile etkin olarak kullanılmaya başlanmasını (Ekronoplan şekil 1.2) Almanya, Çin, Amerika'da bu araçlarla ilgili

yapılan çalışmaları anlatmakta, teknolojinin ilerlemesi sonucunda imalat ve kontrol açısından bu araçlarda olan sorunların aşılması ile ekonomik açıdan bu araçların hızlı gemiler ile jet uçakları arasında kalan pazarı dolduracağından bahsetmektedir. Günümüz devletlerinin WIG konusunda yaptıkları çalışmalara tasarım aşamasında olan Rusya'nın 2500 ton kalkış ağırlığına sahip Beriev Be-2500a (şekil 1.3)'sı ve karadan havalanmak üzere tasarlanmış Amerikan Pelican'ı (şekil 1.4) rnek gösterilebilir. WIG'ler sadece devletlerin değil kişilerin de ilgisini çekmektedir ve onlara yönelik kişisel akademik çalışmalar mevcuttur, rneğin Im ve Chang'ın (2000) yaptığı alışma; NACA 6409 profili dalgalı duvar ile modellenmiş yer etkisinde Euler kodu ile nümerik olarak incelemiş ve NACA-4412 ve NACA-0012 profilleri ile karşılaştırmışlardır, böylece deniz üstü uçuşu modellemişlerdir.



şekil 1.2: Rus Ekronoplan



Şekil 1.3: Beriev Be-2500a



Şekil 1.4: Karadan havalanmak üzere tasarlanmış Pelican

Yer etkisi inceleme açısından sadece ulaşım araçlarının verimliliğini arttırmayı kapsamamaktadır. Örneğin Gao, Liu ve Lu (2008) bir böceğin havalanmasının analizini de 2 boyutlu sıkıştırılmaz Navier Stokes denklemlerini kullanmıştır. Zhang, Mahon, Den-Berg ve Williams (2005) yer etkisindeki yarım silindirin kuvvet, basınç ölçümleri, yağ ile akım görüntülenmesi, sıcak tel ve parçacık hız ölçümü (PIV) tekniklerini kullanarak rüzgar tüneline aerodinamik incelemesini yapmıştır. Onlar da cismin yerden

uzaklaştıkça cisme etkiyen taşıma kuvvetinin azaldığını, sürtünme kuvvetinin ise arttığını tespit etmiştir.

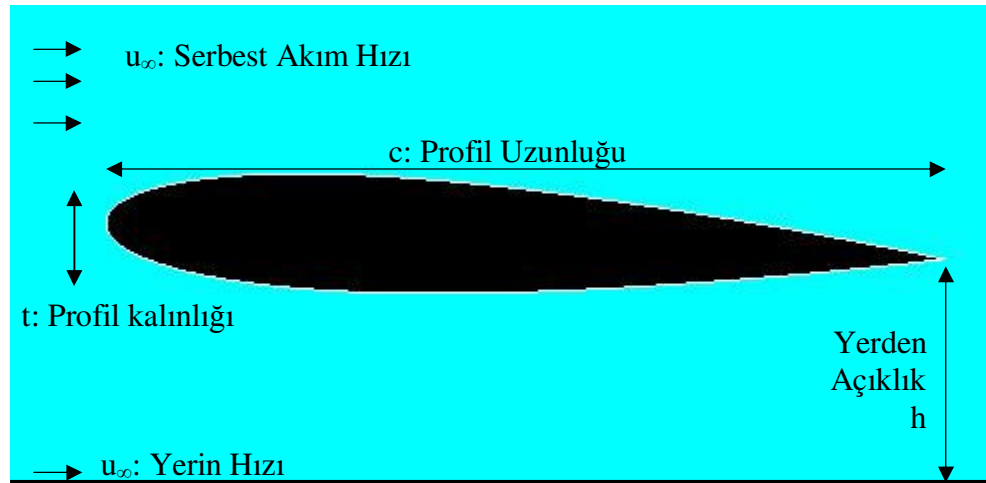
Yer etkisi çalışmalarından bazıları da yer etkisi incelemesini kolaylaştırıcı yöntemler bulmak veya olayı basitleştirerek 3 boyutlu indüklemeye etkilerinden kurtararak 2 boyutlu incelemeler yapmak üzerinedir. Örneğin Plotkin ve Kennell (1981), Plotkin ve Tan (1985) yaptıkları çalışmalar ile taşıyıcı çizgi modellemeleri ile ince kanatların yer etkisindeki taşıma kuvvetlerini hesaplamaya çalışmışlar ve bunlara kanat kalınlık etkisini de eklemişlerdir. Nishino ve Roberts (2007) 2 boyutlu cismin (daire) yere yakınlığının değişimi ile cisim iz değişimlerini incelemiştir, (h silindir ile yer arasındaki boşluk, d silindirin yarıçapı) $h/b \leq 0.9$ durumunda U_c/U_∞ oranı azaldıkça ve relatif uzaklık h/b arttıkça iz bölgesinin daha oynak (unstable) olduğunu, buna ilaveten yer yakınındaki hız (U_g) uzak mesafedeki hızdan az miktarda az olduğunda yine iz bölgesinin daha oynak hale geldiğini bulmuşlardır.

Yer etkisinin incelenmesi durumunda düşünülmesi gereken birinci nokta, gerek deneysel gerekse bilgisayar simülasyonu şeklinde araştırma yapılırken yerin cisme göre hareketli olup olmayacağıdır. Hareket araç açısından düşünüldüğünde böyle bir analiz yapılacak ve incelenecek cisim sabit ise yer ona göre hareketli olmalıdır. Örneğin Kim ile Geropp (1998) çeşitli cisimler üzerinde 2 boyutlu deneysel incelemeler yapmıştır, bu deneyleri yer hareketli ve hareketsiz olmak üzere tekrar etmişlerdir, buldukları sonuca göre yer, cisim üzerinde basınç dağılımı, iz bölgesi, taşıma ve sürüklenme açısından gözardı edilemez etki yapmaktadır (sürüklenme azalmakta, taşıma kuvveti ise artmaktadır).

İnceleme sırasında kullanılacak yöntem deneysel, potansiyel denklem takımlarının çözümü, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile çözüm, veya deneye dayalı formüller ile yaklaşımlar sonucu olabilir. Örneğin; Ahmed ve Sharma (2005) simetrik airfoil NACA-0015 üzerinde yer etkisine yönelik düşük hızlı rüzgâr tüneline deneysel çalışmalar yapmıştır, ölçümlemlerini $0-10^\circ$ hücum açısında ve mümkün olan yere en yakın durumdan bir veter boyuna kadar değişik açıklıklarda ölçüm yapmışlar, profil'in yere yakın durumlarında alt kısımda daha yüksek basınç dağılımı tespit etmişlerdir. Fonseca, Bodstein ve Hirata (2004) sıkıştırılmaz 2 boyutlu akışta yer etkisini incelemek için noktasal girdap dağılımlı panel metodunu kullanmıştır. Yer etkisini imajlar metodu ile

simüle etmişlerdir, yazılım kodunun etkinleştirilmesi sonucunda airfoil yüklemesinin kalınlık, hücum açısı, airfoilin yerden açıklığı, girdap gücü ile değiştiğini tespit etmişlerdir. Jacob (1986) yaptığı çalışmada yer etkisinde kalmış NACA-4415 profilinde akım ayrılmasını incelemiştir. Zerihan ve Zhang (2000) hareketli taban yüzeyi ile simüle edilmiş deney ortamında yaptıkları çalışma sonucunda yer ile kanat alt yüzeyi arasında %20 veter uzunluğunda az boşluk olduğunda aşağı bastırma kuvvetinin maksimum olduğunu, yere kanadın %10 veter uzunluğundan daha az yakında olduğu durumlarda ise firar kenarındaki ayrılmalardan dolayı kanadın stola girdiğini ve aşağı bastırma kuvvetinin azaldığını bulmuşlardır.

Yer etkisi kara araçları için incelendiğinde incelenecek cisim ile yerden açıklığın çok fazla arttırılmasına gerek yoktur, çünkü modellenmek istenen cisim yer aracına ait olduğundan, aracın önündeki yere yakın kanatçık veya arka tamponun üstündeki spoiler de olsa yerden çok fazla açılma şansı olmayacaktır. Bu bakımdan aşağıda şekil 1.5’de gösterilen örnek yer etkisi probleminde incelenecek cisim ile yer arasındaki mesafeyi bir cisim boyundan fazla aşmanın anlamı yoktur. Örneğin Ahmed ve Kohama (2007) yaptıkları deneysel çalışma ile yer kısmı hareketli rüzgâr tüneline NACA4412 profilini 3.0×10^5 Reynolds değerlerinde yerden %5 ile %100 veter uzunluğu açıklıklarında incelemiştir. Hsiun ve Chen (1996) ise yer etkisindeki NACA4412 profilini yaptıkları Navier-Stokes denklem çözücüsünde incelemiştir. Bu çalışmada da yerden açıklık %15’den %100 profil boyuna kadar incelenmiştir.



Şekil 1.5: Örnek Yer Etkisi Problemi

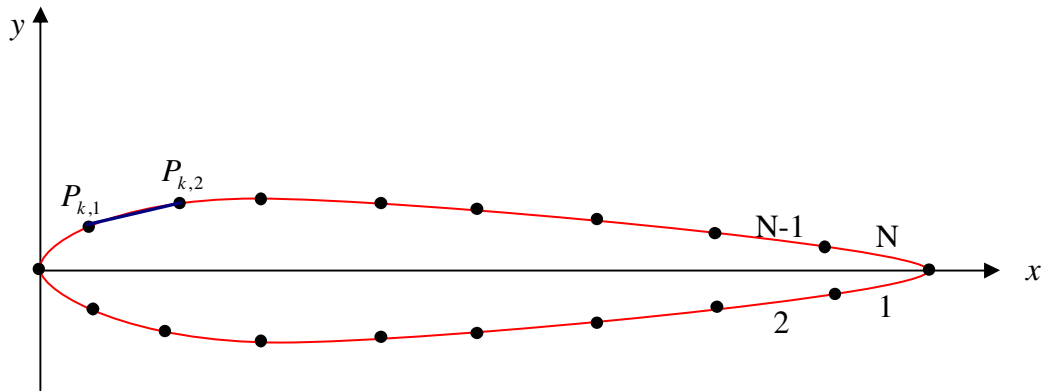
Yer etkisinin incelenmesinde farklı farklı yöntemler kullanılmıştır ve çeşitli çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalarda bir veya birkaç farklı yöntem aynı anda kullanılmaktadır. Fakat şurası açıktır ki, bir çalışmada bir kaç farklı yöntem kullanmak hem zaman hem de maliyet açısından pahalı olur, onun için iyi bir yöntemin belirlenip oradan devam edilmesi kârlı olacaktır.

Bu çalışmada yapılmak istenen, potansiyel akışın bir uygulama metodu olan panel yöntemi ile hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin hesap yöntemini kullanarak çeşitli yer etkisi durumlarını çözümleyerek yer etkisini incelemek, iki farklı yöntem için bulunan sonuçları, gerçeğe yakın durum olarak “deney verileri” ile karşılaştırmak ve yöntemler arasındaki ortak ve farklı noktaları belirlemektir.

Çalışmanın 2. bölümünde kullanılan panel metodundan, 3. bölümünde kullanılan hesaplamalı akışkanlar mekaniği (CFD) metodundan, 4. bölümde ise iki metottan yararlanılarak elde edilen verilerden ve bu verilerin deney verileri ile karşılaştırılmasından bahsedilmektedir.

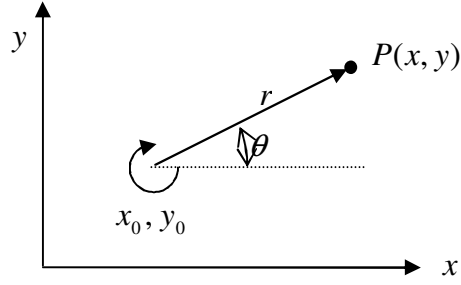
2. PANEL YÖNTEMİ

Bu çalışmada kullanılan, 2 hesap sisteminin birincisinde potansiyel akış denklemlerinden elde edilen panel yöntemi kullanılmıştır. Panel yöntemi, panellerin üzerinde tanımlanan duble, kaynak ve girdap tekilliklerinin çeşitliliğine göre varyasyon gösterir. Bu çalışmada kullanılan panel metodu lineer dağılımlı girdap metodu kullanılmıştır (hesap programı kodu olarak Hepperle'nin yaptığı JavaFoil programı kullanılmıştır). Bu metod kısaca özetlenecek olursa; ilk adım etrafındaki potansiyel akış incelenecek cisim, şekil 2.1'deki gibi dış yüzeyini ayrıntılı belirleyecek yeterli sayıda küçük doğru parçasına ayrılır.



Şekil 2.1: Panellere ayrılmış profil

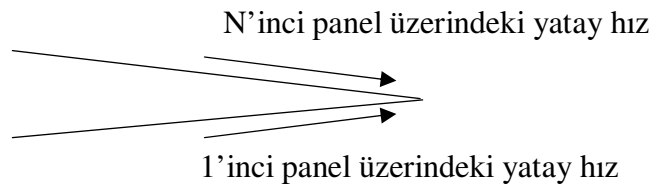
Her bir panelin üzerinde büyüklüğü panel üzerindeki konumuna göre lineer olarak değişen şekil 2.2’de indüklemesi gözükten noktasal girdap dağılımları oluşturulur.



Şekil 2.2: Noktasal girdabın indüklediği P noktasına nazaran gösterimi

Bu teknikte süreklilik açısından bir panelin sonundaki girdabın şiddeti bir sonraki panelin başlangıcındaki girdabın şiddetine eşittir. Bu sayede profil üzerinde büyüklük açısından değişken ve aynı zamanda sürekli girdap dağılımları elde edilir.

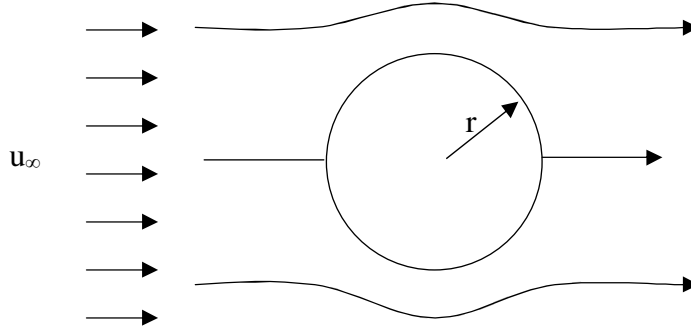
Panel orta noktalarına göre oluşturulmuş indüklenme hızlarını içeren denklem takımları paneller arasında birbirine bağlı fakat belirsiz girdap şiddetlerini içerirler. Bu denklem takımlarının toplu çözümü panel orta noktalarında panele dik hızların '0' olarak belirlenmesi ile (yani panel dış çizgisinden içeri ve dışarı doğru akış yoktur) ve Kutta şartının tanımlanması ile çözülür. Kutta şartı hava akımının profil firar kenarını düzgün olarak terk etmesi hususunu sağlar ve panel sayısından (n) bir fazla olan bilinmeyen sayısının çözümü için mevcut n bilinen sayısını n+1'e çıkarır ve çözümü mümkün kılar. Kısaca birinci ve sonuncu panellerdeki yatay hızların birbirinin tersi olması olarak tanımlanır (Birbirlerine eşittir fakat panel eğimleri ters olduğu için eksi işareti alır şekil2.3)



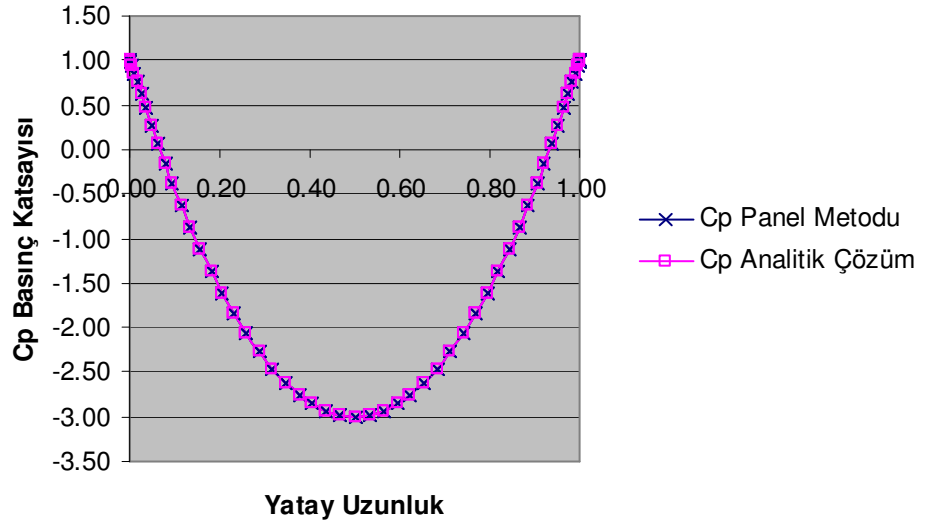
Şekil 2.3: Firar kenarında uygulanan Kutta şartı

Bu çalışmada kullanılan panel yöntemi çözüm programının validasyonu için şekil 2.4'de gösterilen daire etrafı potansiyel akış incelenmiş, sayısal formül 2-1'de verilen basınç katsayıları ile panel metodu kullanılarak 100 panele ayrılmış bir daire etrafındaki basınç katsayıları şekil 2.5'de karşılaştırılmış ve uyum içinde oldukları görülmüştür.

$$C_p = (1 - 4 \sin^2 \theta) \quad (2.1)$$



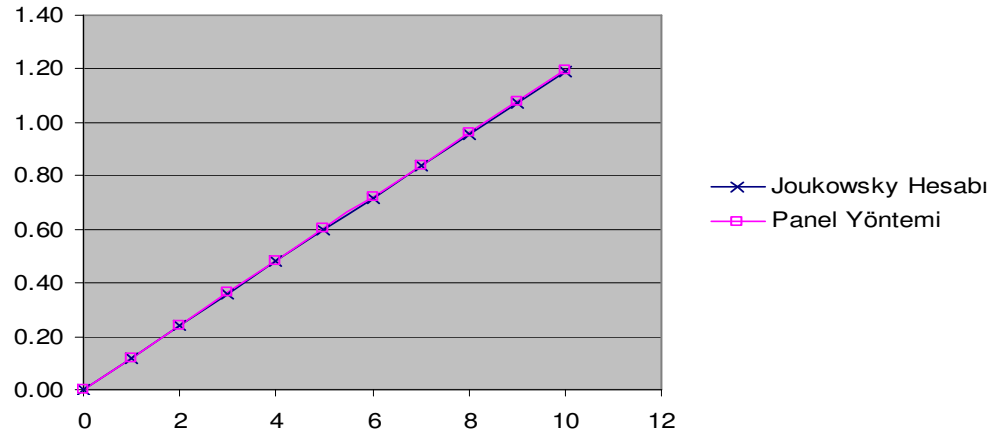
Şekil 2.4: Daire etrafında potansiyel akış



Şekil 2.5: Daire etrafındaki basınç katsayılarının karşılaştırması

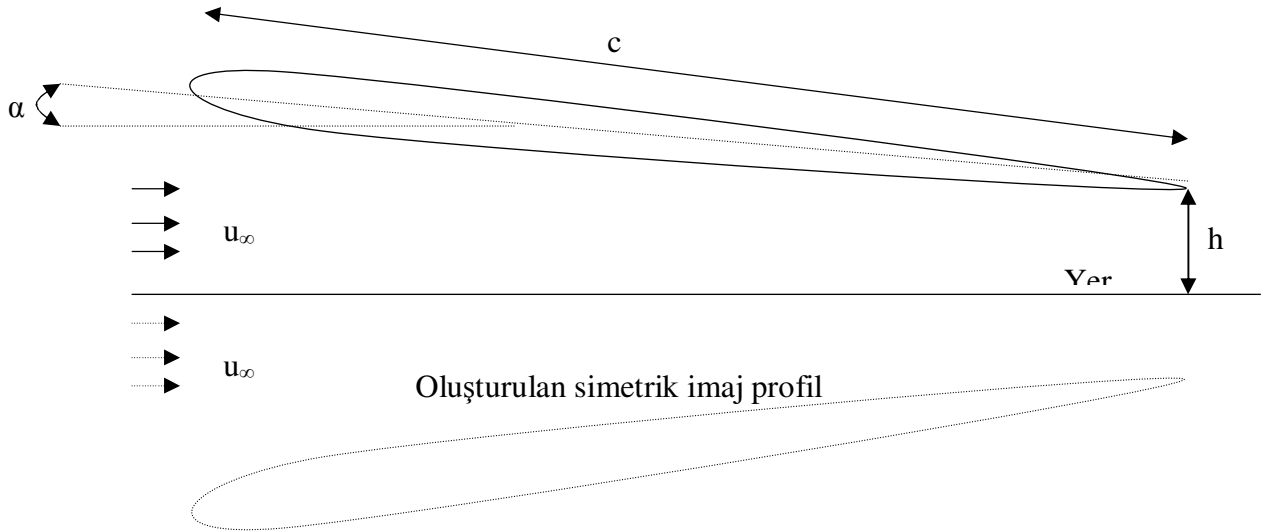
Programın doğruluğu için yapılan bir diğer test ise formülü 2-2’de verilen ince profil için Joukowski taşıma katsayısı hesabının, NACA0012 profilinin çeşitli açılardaki taşıma katsayıları ile programdan elde edilen taşıma katsayıların karşılaştırılmasıdır (şekil 2.6) Bu karşılaştırmada da iki yöntem arasında uyum gözlenmiştir.

$$C_L = 2\pi \left(1 + 0.77 \frac{t}{c} \right) \sin \left(\alpha + \frac{2h}{c} \right) \quad (2.2)$$



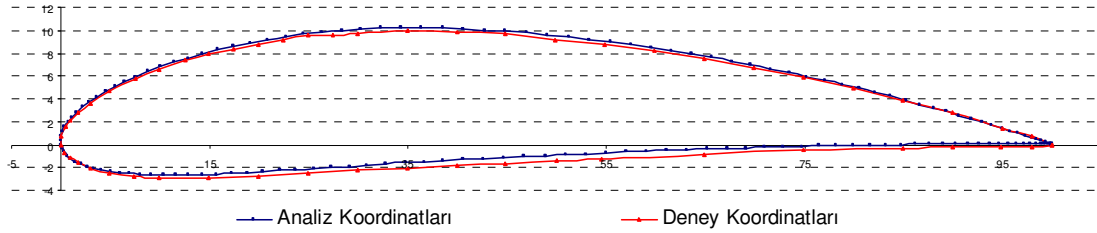
Şekil 2.6: NACA0012 profilinin Panel Metodu ve Joukowsky hesabına göre taşıma katsayıları

Bu çalışmada panel yöntemi kullanılarak yer etkisinin incelenmesinde imajlar yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile şekil 2.7’de gözüktüğü gibi yerden h yükseklikteki profiling yere nazaran simetriği oluşturulmakta n olan panel sayısı $2n$ ’e çıkmakta ve denklemler $2n+2$ bilinmeyen için çözülmemektedir.



Şekil 2.7: Yer etkisi hesabı için imajı oluşturulan profil

Her ne kadar NACA profilleri numaraları bakımından standartlık arz etse de -sözgelimi bu çalışmada kullanılan NACA4412 profili profil boyuna göre %4.4 kamburluğa ve %12 kalınlığa sahip profildir- literatürden sağlanan kaynaklarda kullanılan aynı isimdeki profiller farklı konum ve şekillerde olabilmektedir. Bu bakımdan bu çalışmada kullanılan analiz koordinatları ile karşılaştırılan çalışmanın deney koordinatlarını karşılaştırmak çalışmaların aynı profil üzerinde yapıldığından emin olunmasını sağlayacaktır. Bu çalışmanın panel metodu ve CFD aşamalarında kullanılan NACA4412'ye ait 150 adet koordinat noktaları yukarıda bahsedilen Hepperle'nin Javafoil programı kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan NACA4412 koordinatları ile Pinkerton (1936)'a ait referans deney çalışmasında kullanılan koordinatların karşılaştırılması aşağıdaki şekil 2.8'de gösterilmiştir. Analiz koordinatları 150 noktadan oluşmasına karşın, deney koordinatları 55 noktadan oluşmaktadır. Kullanılan profiller arasında az da olsa şekil farkı vardır, fakat bunun karşılaştırmalara engel olacak ya da geçerliliğini etkileyecek bir fark yaratmayacağı düşünülmüştür.

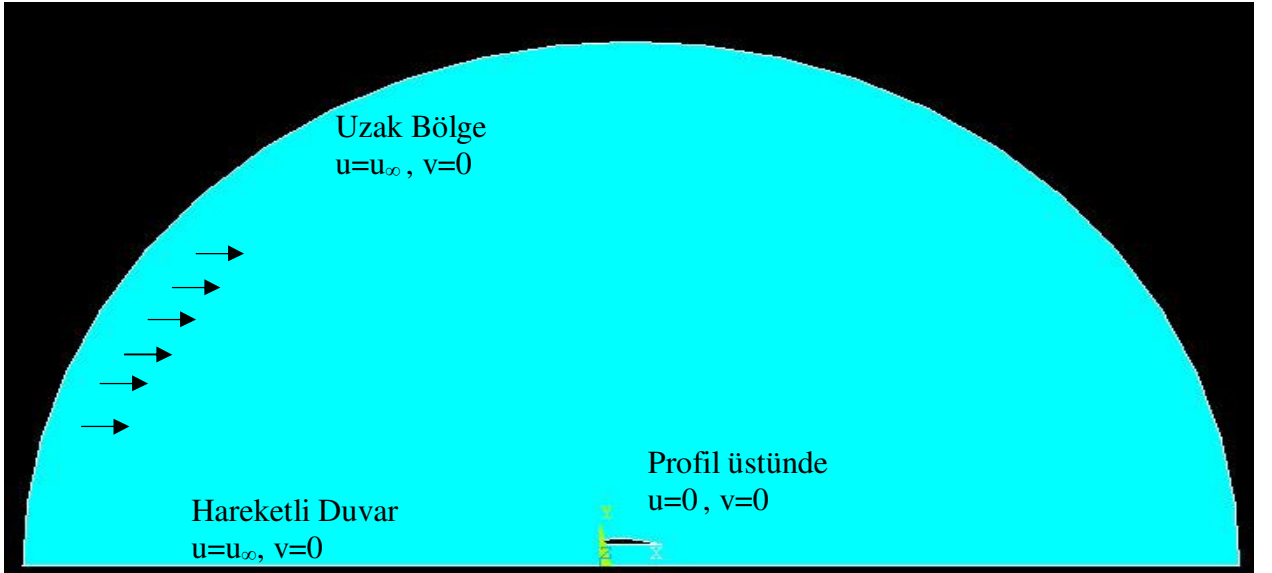


Şekil 2.8: NACA4412'ye ait analiz profili ile deney profili

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (CFD) YÖNTEMİ

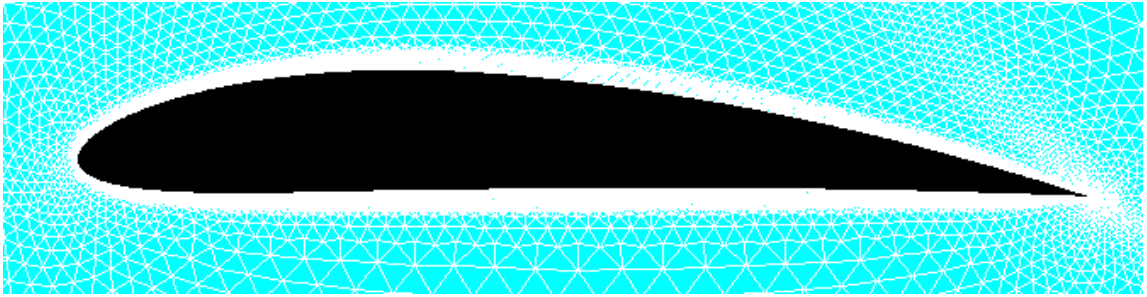
Bu çalışmada CFD hesaplamalarında ANSYS 10.0 programı kullanılmıştır. Program çözümü daimi, adyabatik, türbülanslı, sıkıştırılmaz,viskoz akış seçenekleri kullanılarak çalıştırılmıştır. Çözümün türbülanslı olarak çalıştırılmasının sebebi profilin üst yüzeyinin firar kenarına yakın kısımlarında oluşan sınır tabaka etkilerinin iterasyon sırasında yakınsamayı engellemesi ve çözümü kısır döngüye sokmasıdır. Çözüm için kullanılan algoritma orijinal Simplef algoritmasıdır. İterasyonun durma noktası yatay hız, dikey hız ve basınç değişimleri için minimum $1e-8$ olarak belirlenmiştir. Çözücü olarak TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm/Üç bantlı Matris Algoritması) kullanılmıştır. Profil etrafındaki akışkan normal şartlar altındaki hava olarak belirlenmiştir.

CFD yönteminde panel yöntemindeki gibi simetrik iki profil yerine, çözüm alanında tek bir profil kullanılmış, altındaki düz sınır bölge ise yer etkisi yaratacak biçimde hareketli duvar olarak tanıtılmıştır (Deneysel incelemelerde bu etki hareketli bant kullanılarak sağlanmaktadır). Diğer sınır şartları da şekil 3.1’de gözüktüğü gibi profilden uzak bölgede $u=u_\infty$, $v=0$ ve profil üstünde ise $u=0$, $v=0$ ’dır.

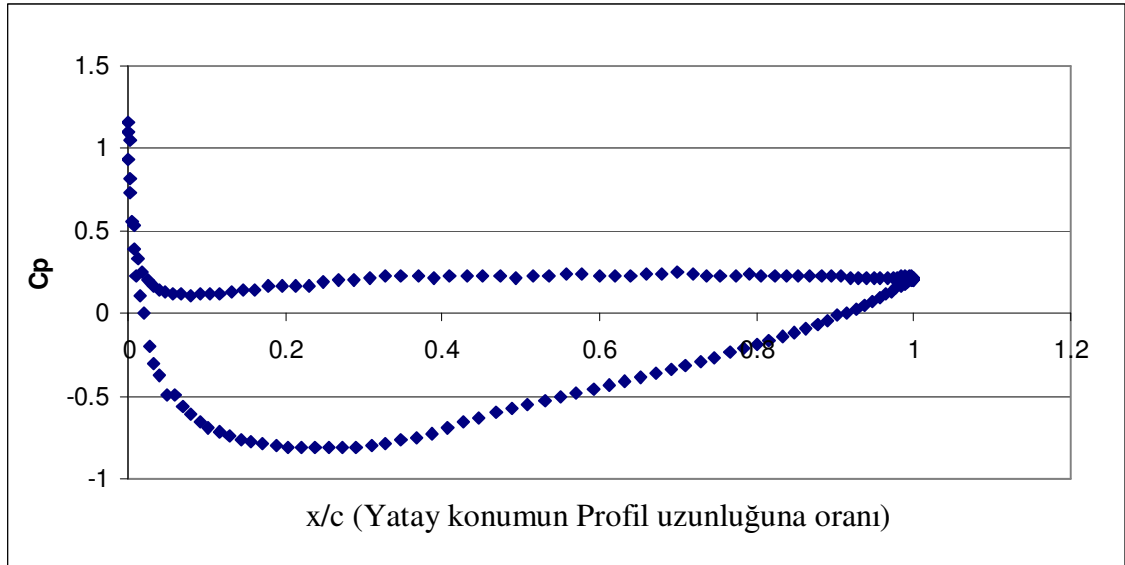


Şekil 3.1: ANSYS çözüm alanı ve sınır şartları

Çözüm alanı üçgensel sonlu hacimlere Şekil 3.2’de gözüktüğü gibi profil yakınında en yoğun olmak üzere ayrılmış ve çözülmüştür. Profile ait taşıma katsayılarının hesabı çözüm sonucunda hesaplanan profil üstü basınç katsayıları (C_p) kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.3’de örnek olarak gösterilmiş olan profile ait yüzey noktalarındaki basınç katsayıları profil etrafında integre edileler taşıma katsayısı C_l elde edilmiştir.

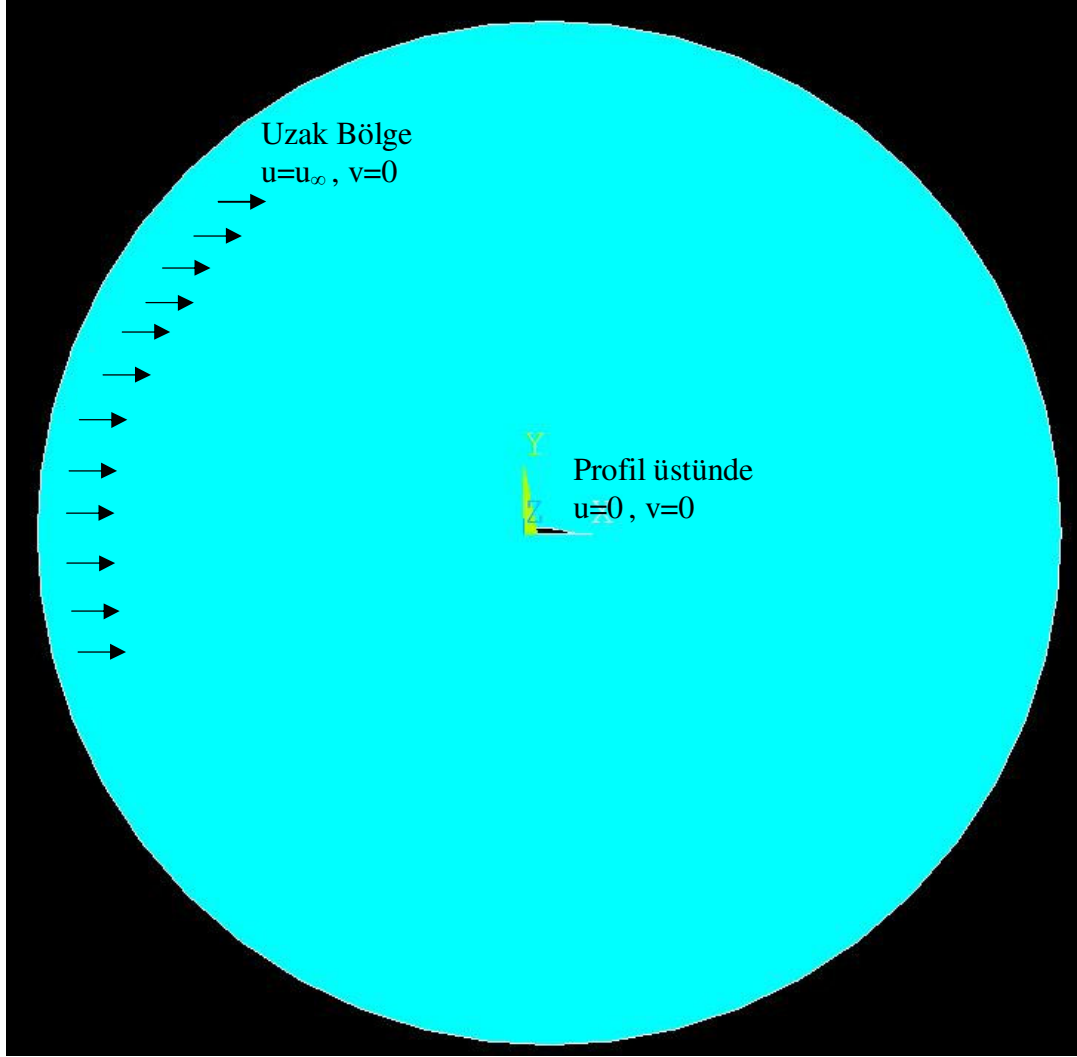


Şekil 3.2: Çözüm alanındaki üçgensel hacimler

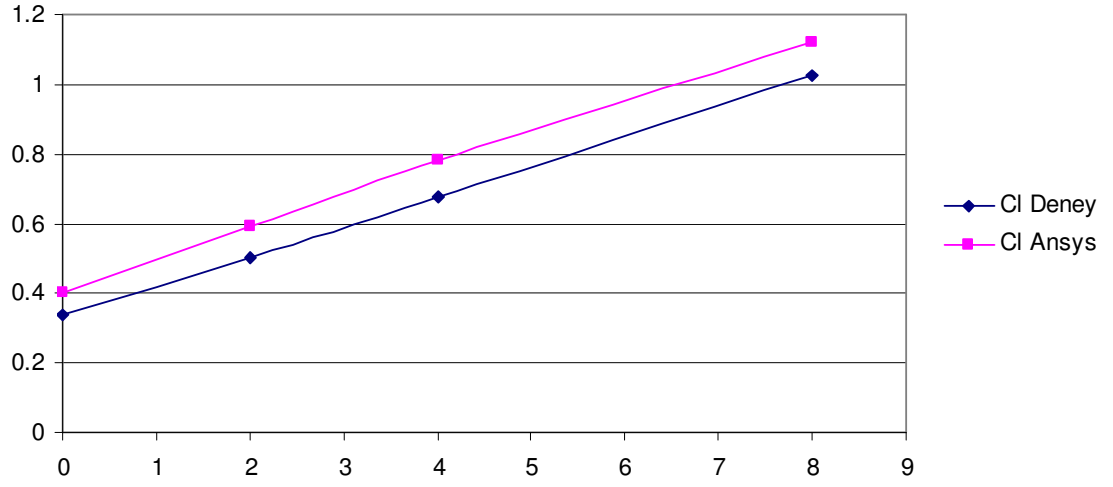


Şekil 3.3: Örnek C_p dağılımı (NACA4412, 2° hücum açısı, $h=0.4c$ yerden açıklık)

Programın Sınanması NACA 4412 profilinin serbest akım durumunda ANSYS 10.0 ile çözümlenmesi ve Pinkerton (1936)'un aynı profil üzerindeki deney sonuçlarının karşılaştırılması ile yapılmıştır. Çözüm alanı Şekil 3.4'de görüldüğü gibi profilden uzak bölgede $u=u_\infty$, $v=0$ ve profil üstünde ise $u=0$, $v=0$ 'dır. NACA4412 profili için elde edilmiş olan çözüm sonuçları ile deney sonuçları Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

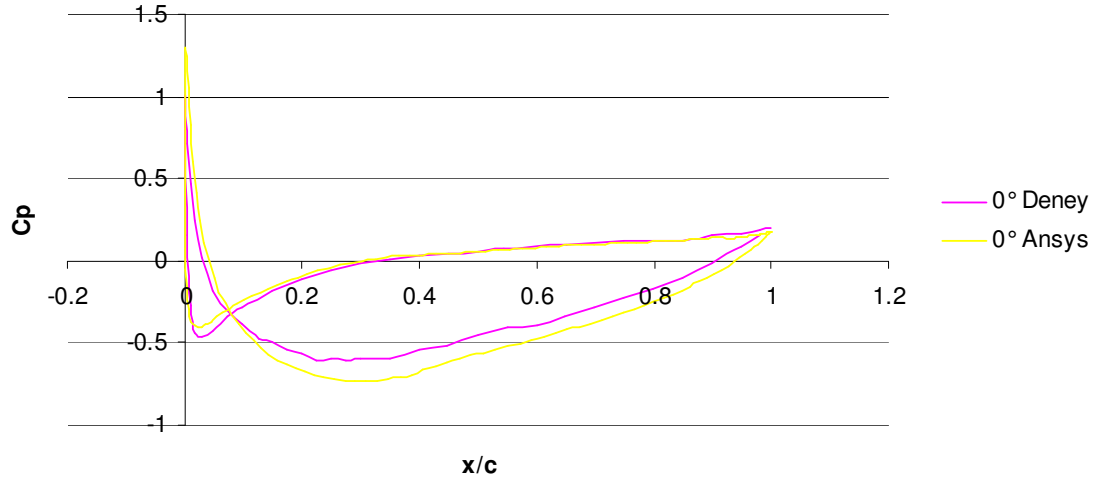


Şekil 3.4: Serbest halde kanat için çözüm alanı ve sınır şartları

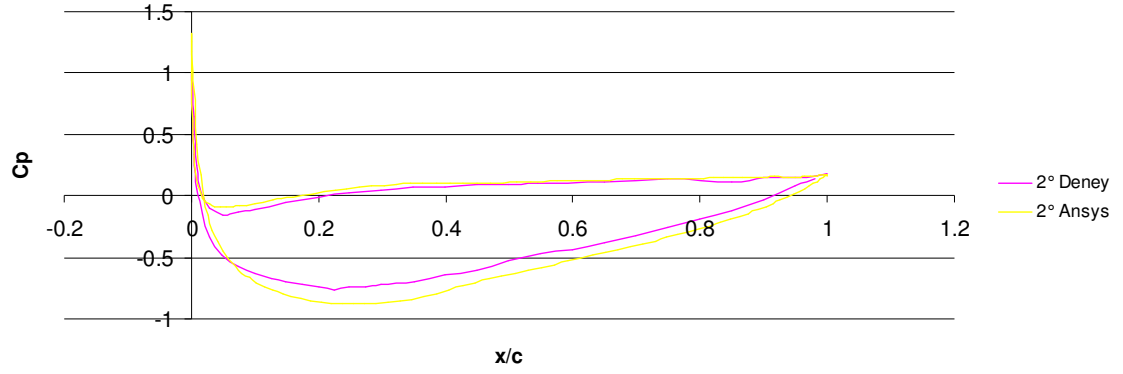


Şekil 3.5: NACA4412 profiline ait Ansys 10.0 ve deney sonuçları

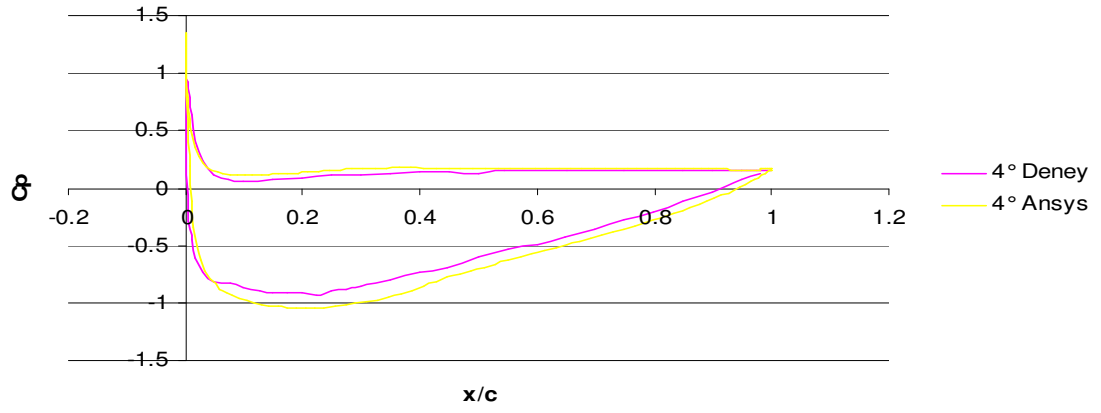
Bu hücum açılarındaki çözümlmelerden elde edilen basınç dağılımları Şekil 3.6-3.9'de gösterilmiştir.



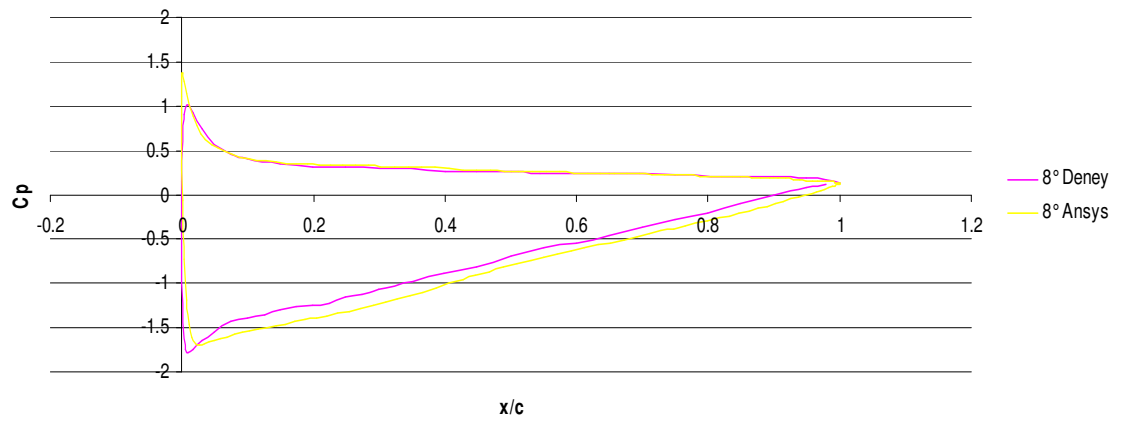
Şekil 3.6: NACA4412 profiline ait 0° hücum açısındaki basınç dağılımları



Şekil 3.7: NACA4412 profiline ait 2° hücum açısındaki basınç dağılımları



Şekil 3.8: NACA4412 profiline ait 4° hücum açısındaki basınç dağılımları



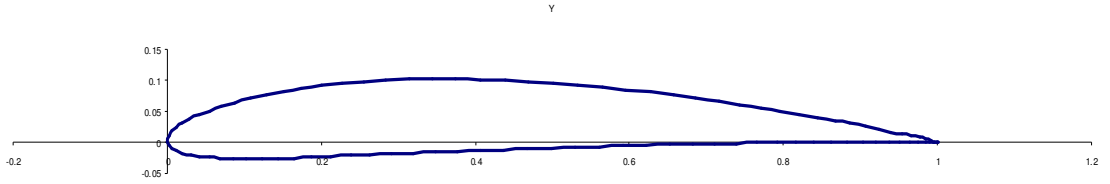
Şekil 3.9: NACA4412 profiline ait 8° hücum açısındaki basınç dağılımları

Yukarıdaki şekillerde gözüktüğü üzere Ansys ve deney sonuçları basınç katsayıları ve taşıma katsayıları açısından birbirine yakın değerdeler. Fakat profiller üzerindeki basınç dağılımları daha ayrıntılı incelendiğinde profilin alt yüzeyine ait değerlerin neredeyse tamamıyla eşit olduğu, deney ve Ansys taşıma katsayısı sonuçları arasındaki ufak farkın profilin üst kısmında oluşan basınç farklılıklarından kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

ANSYS 10.0'dan elde edilecek çözüm setinin Ahmed, Takasaki ve Kohama (2007)'nın yaptığı, test tünelinin alt yüzeyi hareketli bant kullanılan NACA4412'ye ait deney verileri ile rahat karşılaştırılabilmesi için aynı hızlar ve profil büyüklükleri kullanılmıştır. Serbest akım hızı 30.8 m/s, profil boyu 0.15 m'dir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Önceki bölümlerde anlatılan panel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri Şekil 4.1’de gösterilen NACA4412 profilini yer etkisi altında incelemek için kullanıldı. Profilin yerden açıklığı profil boyuna 0.05, 0.15, 0.30, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 oranları için 0, 2, 4, 6, 8 ve 10 derecelik hücum açılarında incelendi. Panel yöntemi için elde edilmiş olan taşıma katsayısı sonuçları Tablo 4.1 ve Şekil 4.2’de sunulmaktadır.

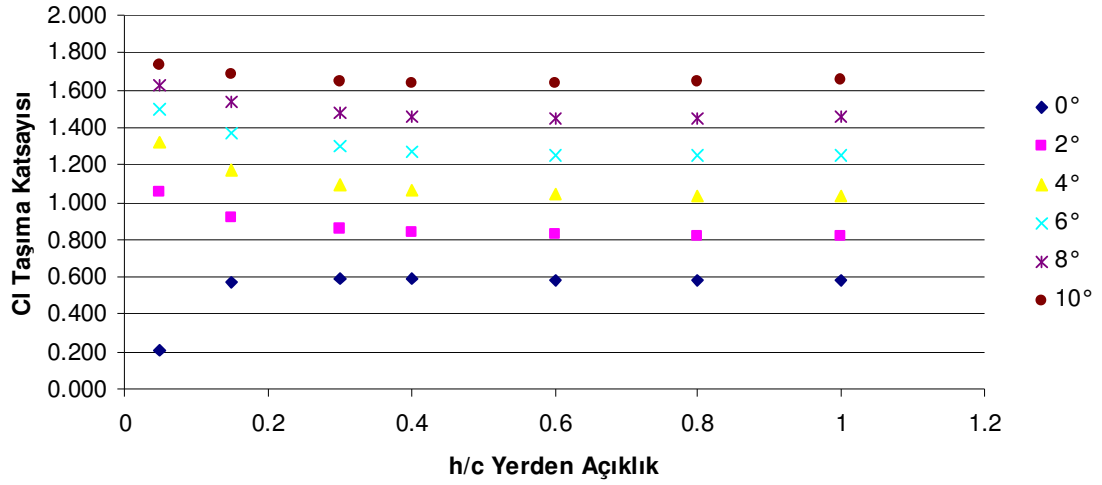


Şekil 4.1: NACA 4412 profili

Tablo 4.1: NACA 4412 profili için Panel Yönteminden elde edilen taşıma katsayıları

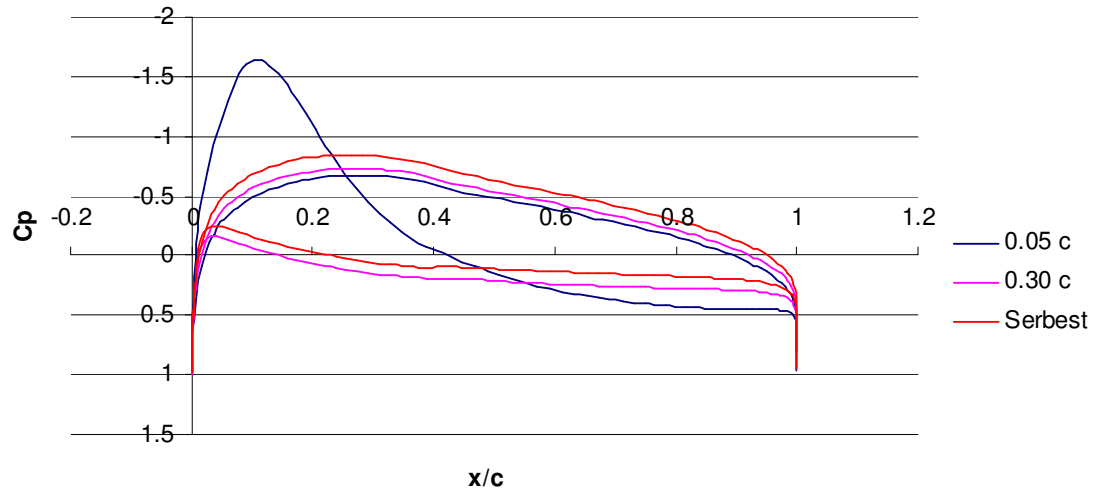
$\alpha \backslash h/c$	0.05	0.15	0.30	0.40	0.60	0.80	1.00	∞
0.00	0.207	0.572	0.590	0.589	0.586	0.584	0.583	0.590
2.00	1.053	0.917	0.859	0.841	0.824	0.817	0.814	0.831
4.00	1.324	1.170	1.091	1.068	1.046	1.039	1.036	1.070
6.00	1.493	1.370	1.296	1.274	1.254	1.249	1.250	1.309
8.00	1.623	1.539	1.480	1.463	1.450	1.450	1.454	1.545
10.00	1.734	1.687	1.648	1.639	1.636	1.642	1.652	1.780

Tabloda ve şekilde gözüktüğü üzere NACA4412 profilinin panel yöntemi ile hesabından elde edilen taşıma katsayılarında 0 derece hücum açısı ile diğerleri arasında fark vardır, 0° hücum açısında yere yakın durumda taşıma katsayısı azalmakta, yerden uzaklaştıkça artmaktadır, diğer hücum açılarında ise taşıma katsayısı yere yakın durumlarda daha fazladır.



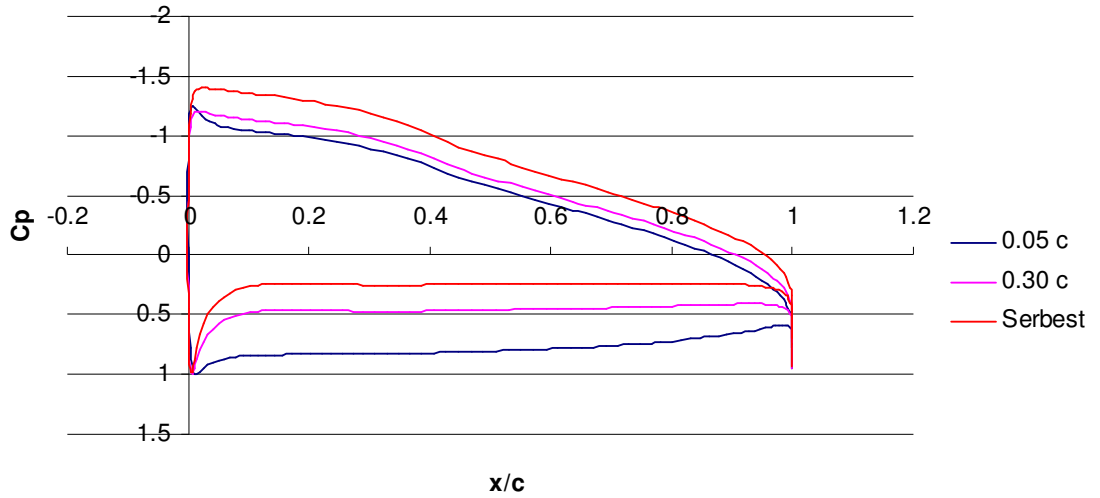
Şekil 4.2: NACA 4412 profili, Panel Yönteminden elde edilen çeşitli hücum açıları için taşıma katsayıları

Aşağıda NACA4412 profili etrafında panel yöntemi ile yapılan çalışmadan elde edilen basınç katsayısı (C_p) dağılımları verilmiştir. Şekil 4.3’de 0° hücum açısındaki profilin, Şekil 4.4’de ise 2° hücum açısındaki profilin yerden 0.15 c ile 0.4 c açıklıklarda ve serbest durumdaki (yer etkisinde olmadan) basınç dağılımları gözükmemektedir.



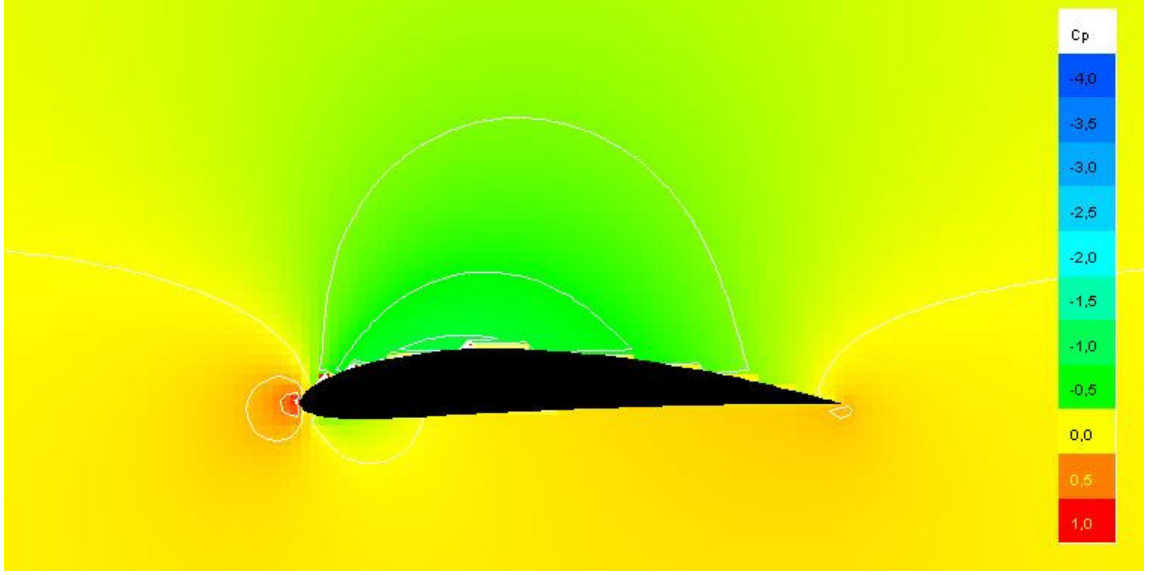
Şekil 4.3: NACA4412 Profili 0° , yerden açıklık $h=0.05c$ ve $0.30c$ ve serbest durumda basınç dağılımları

Şekil 4.3’de görüldüğü üzere 0° hücum açısında yerden $0.05c$ açıklıkta profilin alt yüzeyinde profilin üst yüzeyine nazaran çok daha büyük bir negatif basınç alanı oluşmuştur. Yerden $0.30c$ açıklıktaki basınç dağılımı ile karşılaştırıldığında bu alt yüzey negatif basınç alanı taşıma katsayısında büyük miktarda düşüşe sebep olmaktadır. Üst yüzeylere ait basınç dağılımları karşılaştırıldığında ise yerden $0.30c$ açıklıkta profil üst yüzeyinin taşımaya daha çok katkı sağladığı görülmektedir. Şekil 4.4’de gözüktüğü üzere alt yüzeyler arasındaki basınç farkı üst yüzeyler arasındaki basınç farkından daha büyüktür. 2° ’den büyük hücum açılarında yere en yakın durumlarda en yüksek taşıma katsayısı elde edildiği Şekil 4.2’de gözükmekte idi, bu durumu yere yakın durumlarda profil alt yüzeyinde oluşan yüksek pozitif basınç alanı ile açıklamak mümkündür, böylece 2° ’den büyük hücum açısı durumunda 0° hücum açısından farklı olarak yere yakın durumda daha yüksek taşıma katsayısı oluşmaktadır. 0° ve 4° hücum açılarına bakıldığında $0.05c$ yerden açıklıkta düşük hücum açısında profilin alt ön yüzünde oluşan negatif basınç alanı dikkat çekmektedir. Profilin açısına bağlı bu durum profil altındaki yüzeyin yer ile oluşturduğu hacmin daralıp genişleyen veya sadece daralan hacim olması ile bağdaştırılabilir.

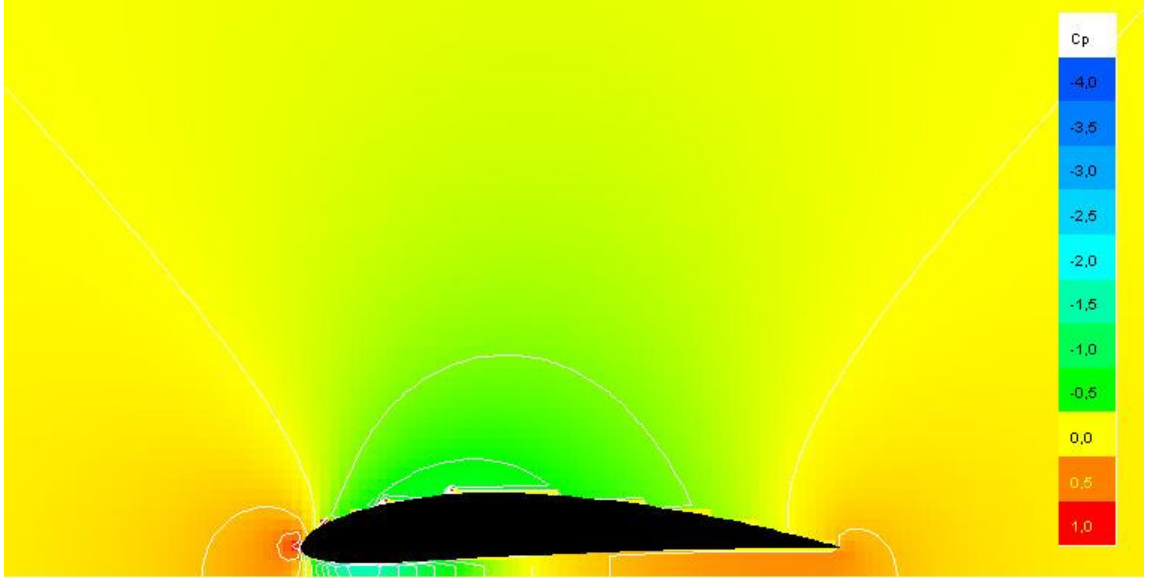


Şekil 4.4: NACA4412 profili 4° , yerden açıklık $h=0.05c$ ve $0.30c$ ve serbest durumda basınç dağılımları

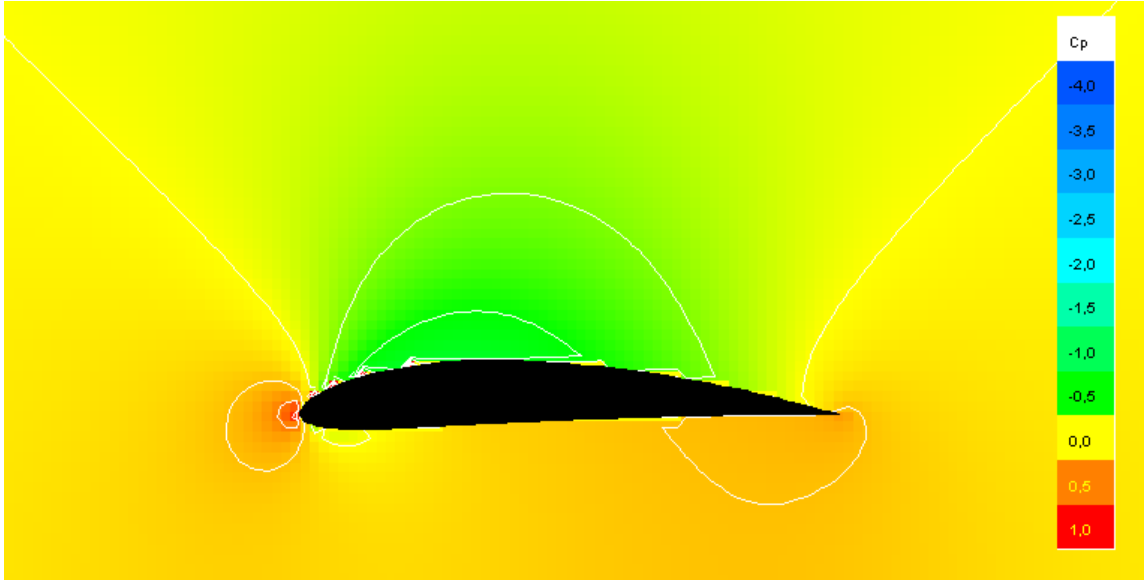
Profilin yere yakınlık durumlarında oluşan bu fark şekil 4.5-4.10'da gösterilen profil etrafında oluşan basınç dağılımlarında da gözükmemektedir.



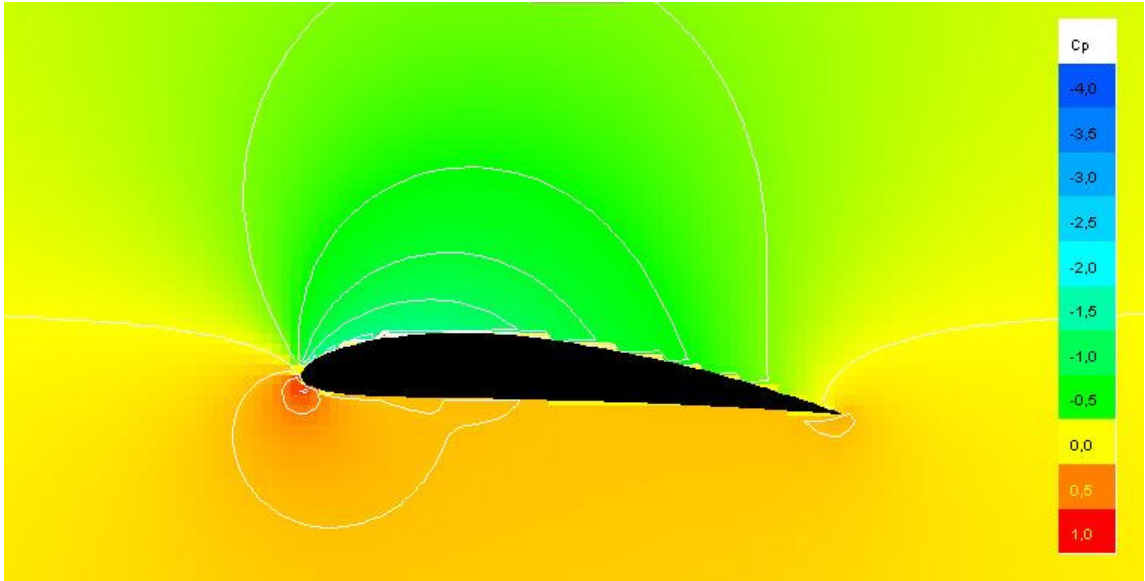
Şekil 4.5: 0° hücum açısı ve serbest durumda NACA4412 profil etrafındaki basınç dağılımı



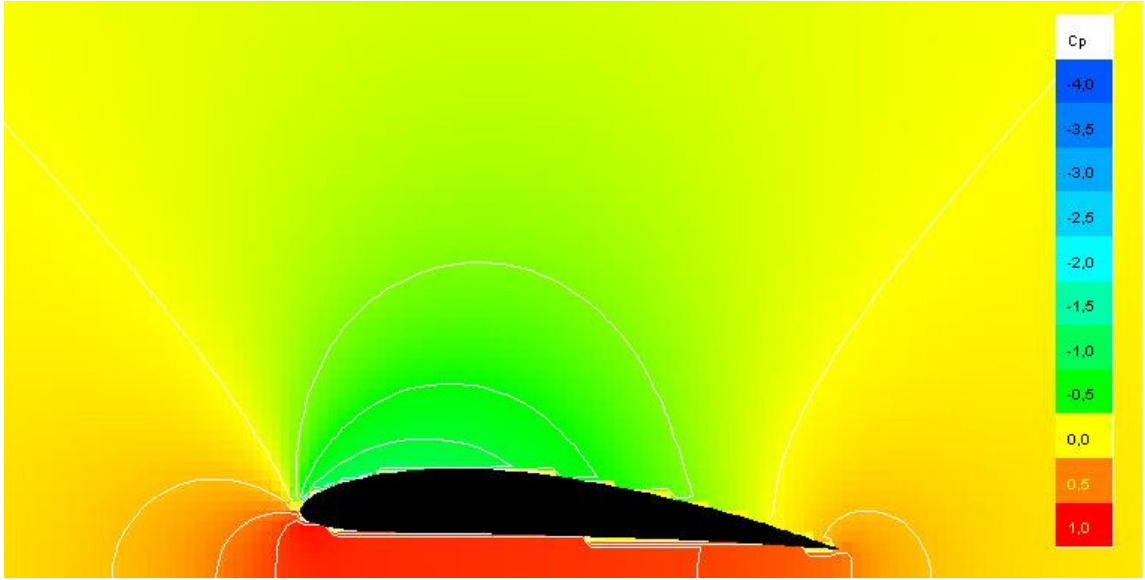
Şekil 4.6: 0° hücum açısı ve $h=0.05c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profil etrafındaki basınç dağılımı



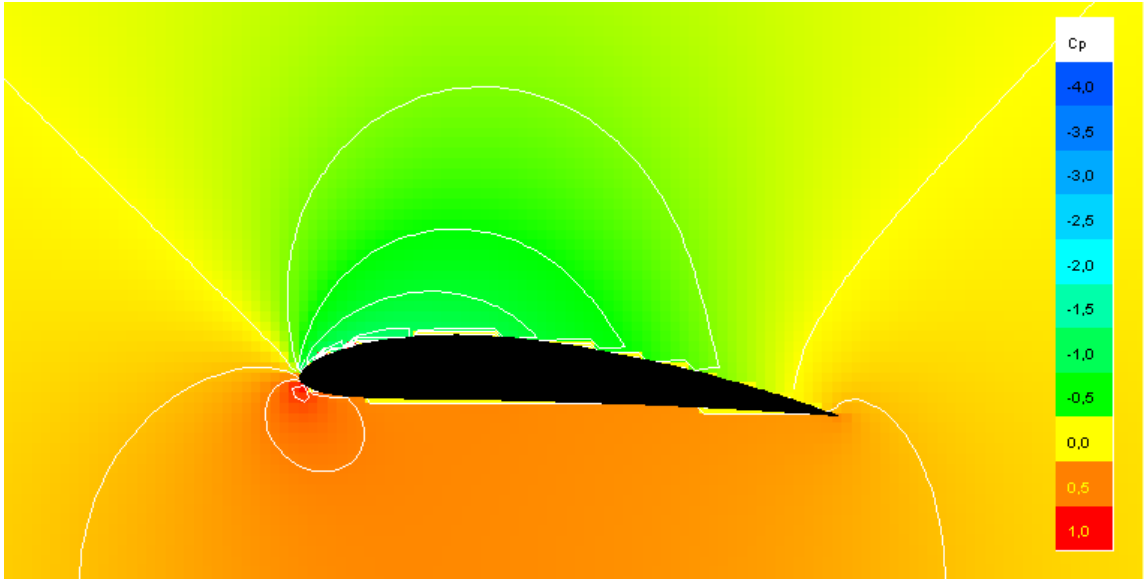
Şekil 4.7: 0° hücum açısı ve $h=0.30c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı



Şekil 4.8: 4° hücum açısı ve serbest durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı



Şekil 4.9: 4° hücum açısı ve $h=0.05c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı



Şekil 4.10: 4° hücum açısı ve $h=0.30c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı

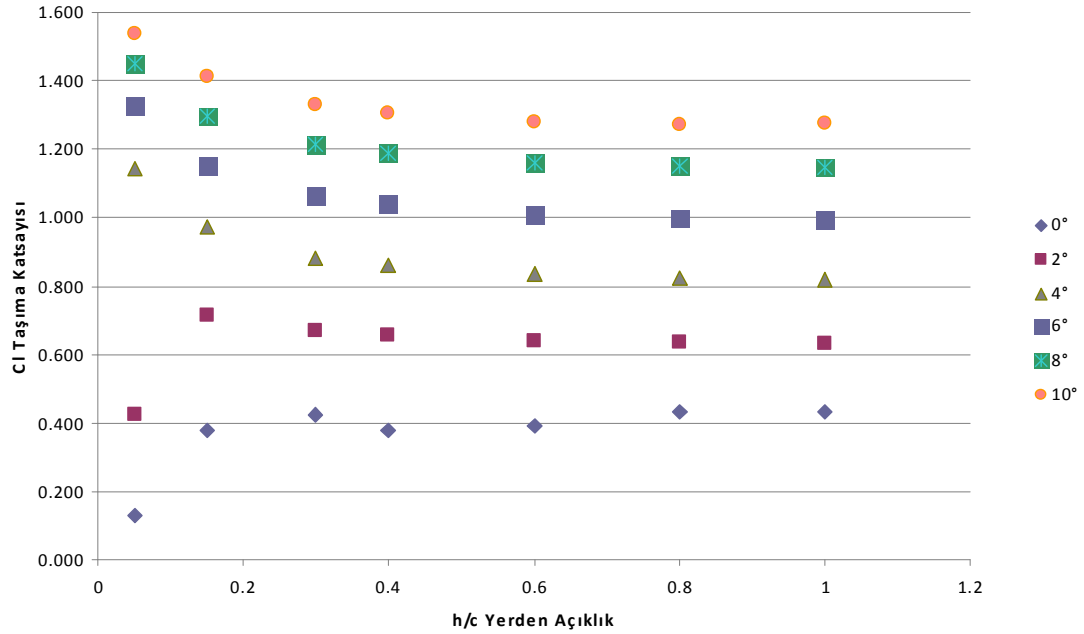
Şekil 4.5-4.10’da görüldüğü gibi 0° hücum açısında profilin alt ön kısmında oluşan negatif basınç alanı yer etkisinin artması – yere yaklaşma- ile artma eğilimi göstermekte (profilin alt yüzeyi ile yer arasındaki hacim daralıp genişleyen hacim özelliği taşımaktadır), fakat 4° hücum açısı durumunda profilin alt yüzeyinde oluşan pozitif

basınç alanı yere yaklaştıkça artmaktadır (profilin alt yüzeyi ile yer sadece daralan hacim oluşturmaktadır).

Hesaplamalı akışkanlar mekaniğinden elde edilen taşıma katsayısı sonuçları 0, 2, 4, 6, 8 ve 10 derecelik hücum açılarında profilin yerden açıklığının profil boyuna 0.05, 0.15, 0.30, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 oranları için Tablo 4.2 ve Şekil 4.11’de gösterilmektedir.

Tablo 4.2: NACA 4412 profili için Panel Yönteminden elde edilen taşıma katsayıları

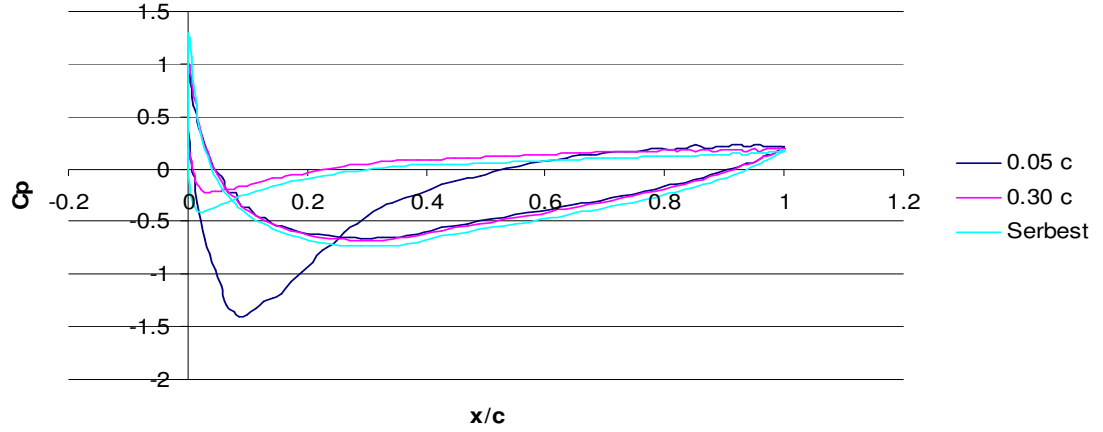
α \ h/c	0.05	0.15	0.3	0.40	0.60	0.80	1.00	∞
0.00	0.129	0.378	0.423	0.377	0.390	0.433	0.432	0.403
2.00	0.423	0.716	0.668	0.658	0.642	0.634	0.631	0.591
4.00	1.142	0.972	0.882	0.860	0.834	0.824	0.820	0.781
6.00	1.326	1.153	1.064	1.038	1.009	0.998	0.994	0.958
8.00	1.449	1.296	1.215	1.189	1.158	1.149	1.147	1.122
10.00	1.538	1.414	1.332	1.306	1.280	1.274	1.274	1.191



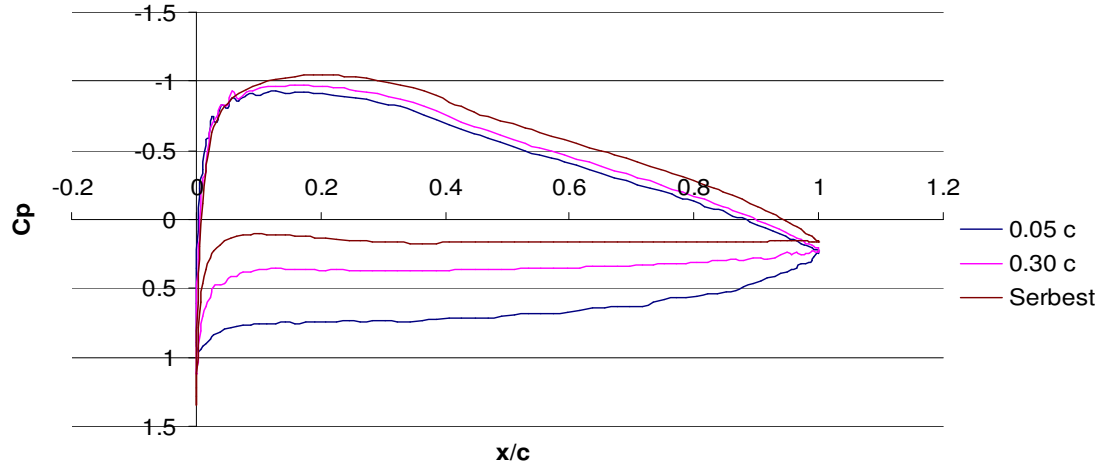
Şekil 4.11: NACA 4412 profili için CFD Yönteminden elde edilen taşıma katsayıları

Tablo 4.2 ve Şekil 4.11’de gözüktüğü üzere panel yöntemine paralel olarak CFD yönteminden elde edilen sonuçlarda da 0° hücum açısında yere yakın durumlarda taşıma katsayısı azalmakta, yerden uzaklaştıkça taşıma katsayısı da artmaktadır. 4° ve daha büyük hücum açılarında ise tersi bir durum söz konusudur, yere yakın durumlarda

taşıma katsayısı artmakta, uzaklaştıkça azalmaktadır. CFD yönteminde ise panel yönteminden farklı olarak 2° hücum açısında da 0° hücum açısına benzer bir sonuç elde edilmiştir, buna göre yere en yakın durumda en düşük taşıma katsayısı elde edilmiştir. CFD metodunda hesaplanan NACA4412 profiline ait basınç katsayıları dağılımları şekil 4.12 ve 4.13’de gösterilmiştir.

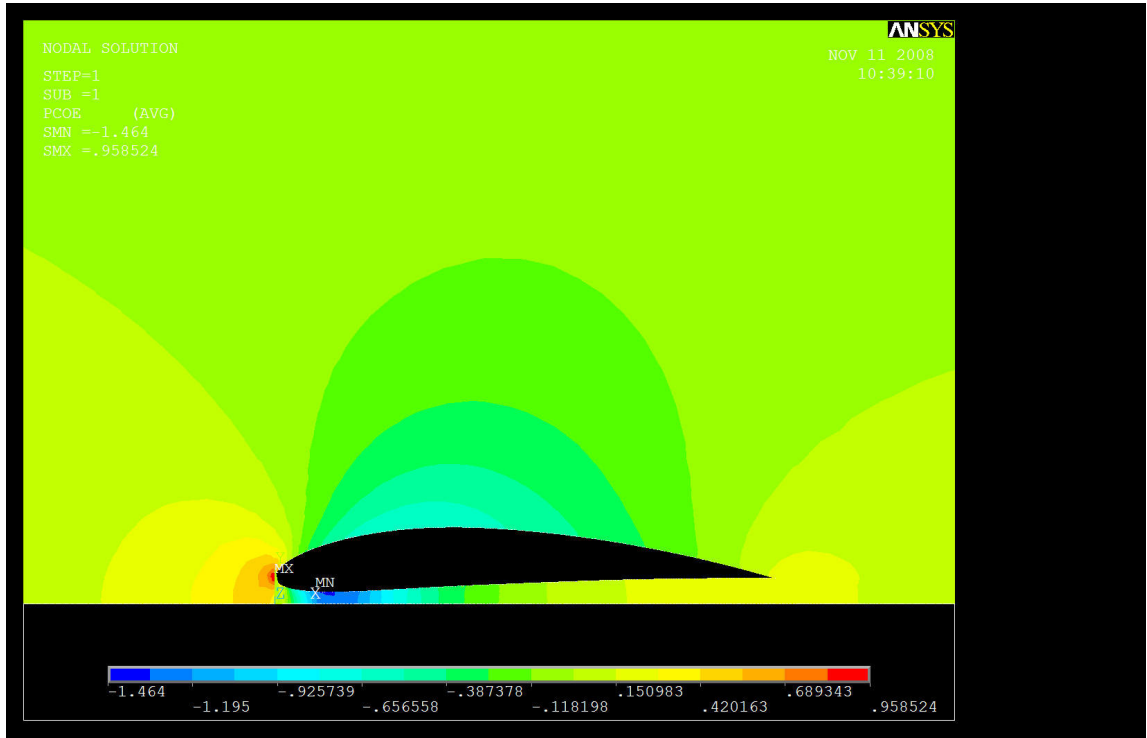


Şekil 4.12: NACA4412 Profili Basınç Dağılımı. 0° yerden açıklık $h=0.05c$ ve $0.30c$ ve serbest durum

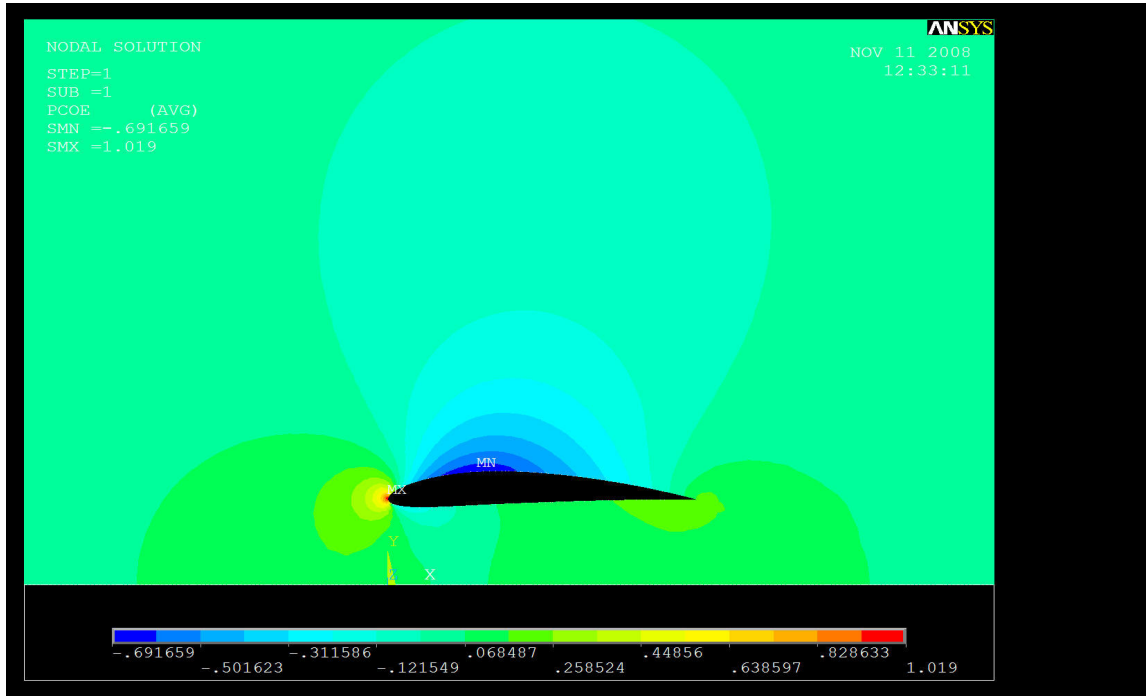


Şekil 4.13: NACA4412 Profili Basınç Dağılımı. 4° yerden açıklık $h=0.05c$ ve $0.30c$ ve serbest durum

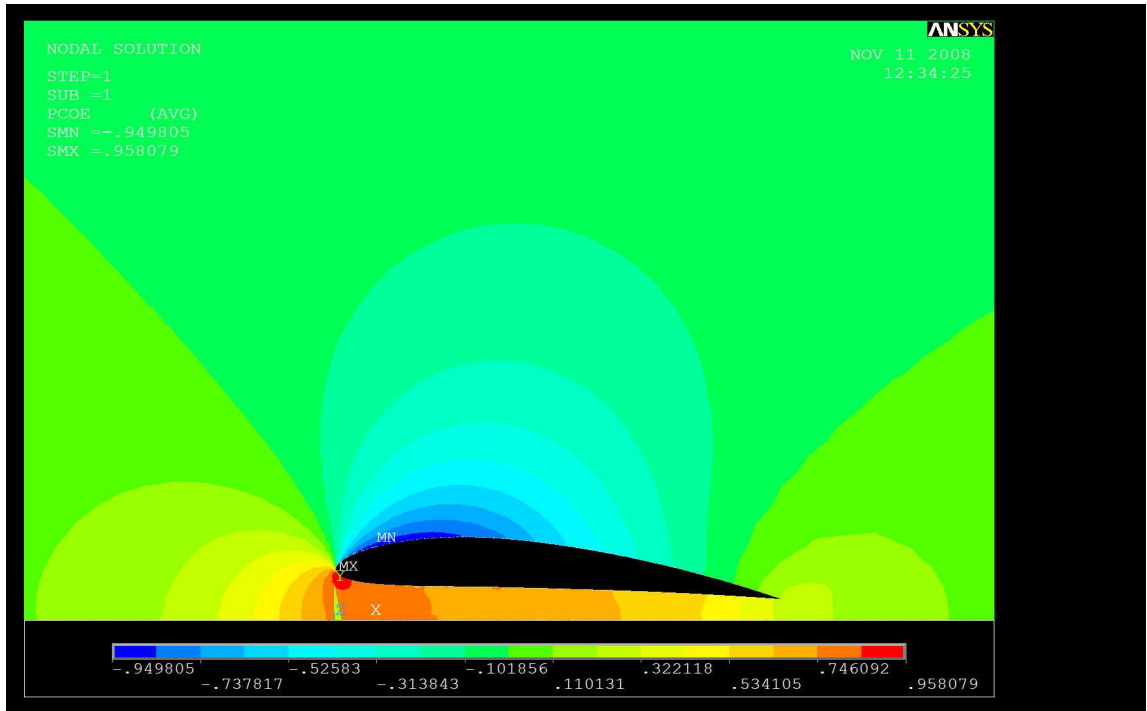
Şekil 4.12 ve 4.13’de görüldüğü gibi CFD yönteminde de panel yöntemine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre yine 0° hücum açısında panelin alt ön kısmında negatif basınç alanı oluşmakta ve yere yakınlıkla güçlenmektedir. 4° hücum açısında da yine panel yöntemine paralel sonuç alınmıştır, tek farkı profilin üstündeki basınç dağılımı yerden açıklıkla çok daha az değişmektedir, alt yüzeyindeki dağılımı ise yere yaklaştıkça büyüklük yönünden kuvvetlenmiştir. Profillerin etrafındaki çözüm bölgesinde oluşan basınç değişimleri Şekil 4.14-4.17’de gösterilmiştir.



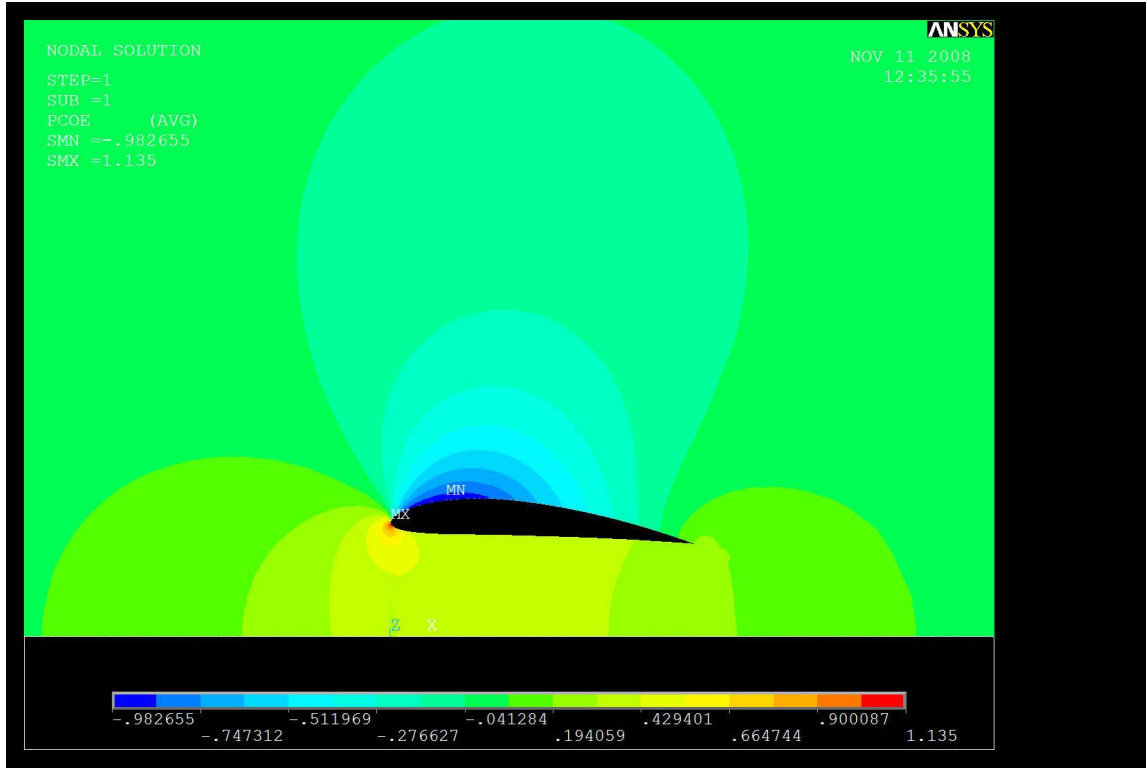
Şekil 4.14: 0° hücum açısı ve $h=0.05c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı



Şekil 4.15: 0° hücum açısı ve $h=0.30c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı



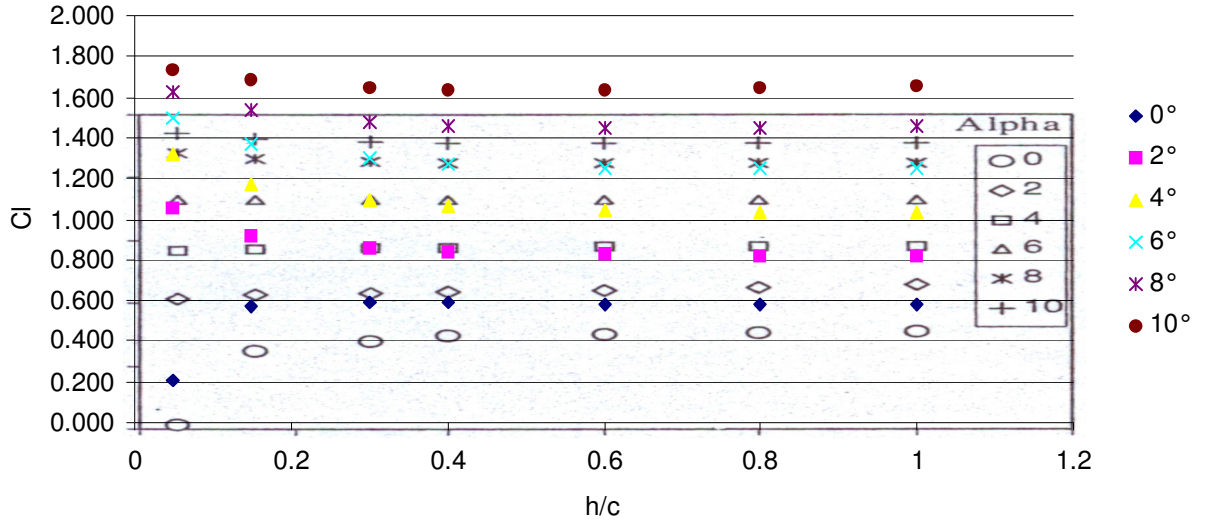
Şekil 4.16: 4° hücum açısı ve $h=0.05c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı



Şekil 4.17: 4° hücum açısı ve $h=0.30c$ yerden açıklık durumunda NACA4412 profili etrafındaki basınç dağılımı

Şekil 4.14-4.17’de profil etrafındaki basınç dağılımlarında panel yöntemine paralellik vardır, 0° hücum açısı durumunda yine profilin alt kısmında alt yüzey ile yer arasında kalan boşluğun azalıp artmasından dolayı, alt ön kısımdaki negatif basınç alanı yere yaklaştıkça artmaktadır. Daha yüksek açılarda ise alt kısmın yere uzaklığı profilin gerisine doğru azaldığı için yere yaklaştıkça alt kısmın pozitif basıncında artma olmaktadır. Bu da taşıma katsayısında artırıcı etki yapmaktadır.

Panel metodundan elde edilen veriler ve CFD metodundan elde edilen veriler ile deneysel verilerin karşılaştırılması Şekil 4.18 ve Şekil4.19’da gösterilmiştir; şekillerin arka planında gözüken tablo ve işaretler deneysel verilere aittir ve Alpha olarak belirtilen değerler deneysel sonuçlara ait hücum açısını temsil etmektedir, renkli olarak belirtilen değerler ise bu çalışma sonucunda elde edilen verilerdir, seriler profil hücum açılara göre oluşturulmuştur, yatay eksen “ h/c ” yerden uzaklığın profil boyuna oranına, dikey eksen ise taşıma katsayısı “ C_l ” büyüklüğüne karşılık gelmektedir.



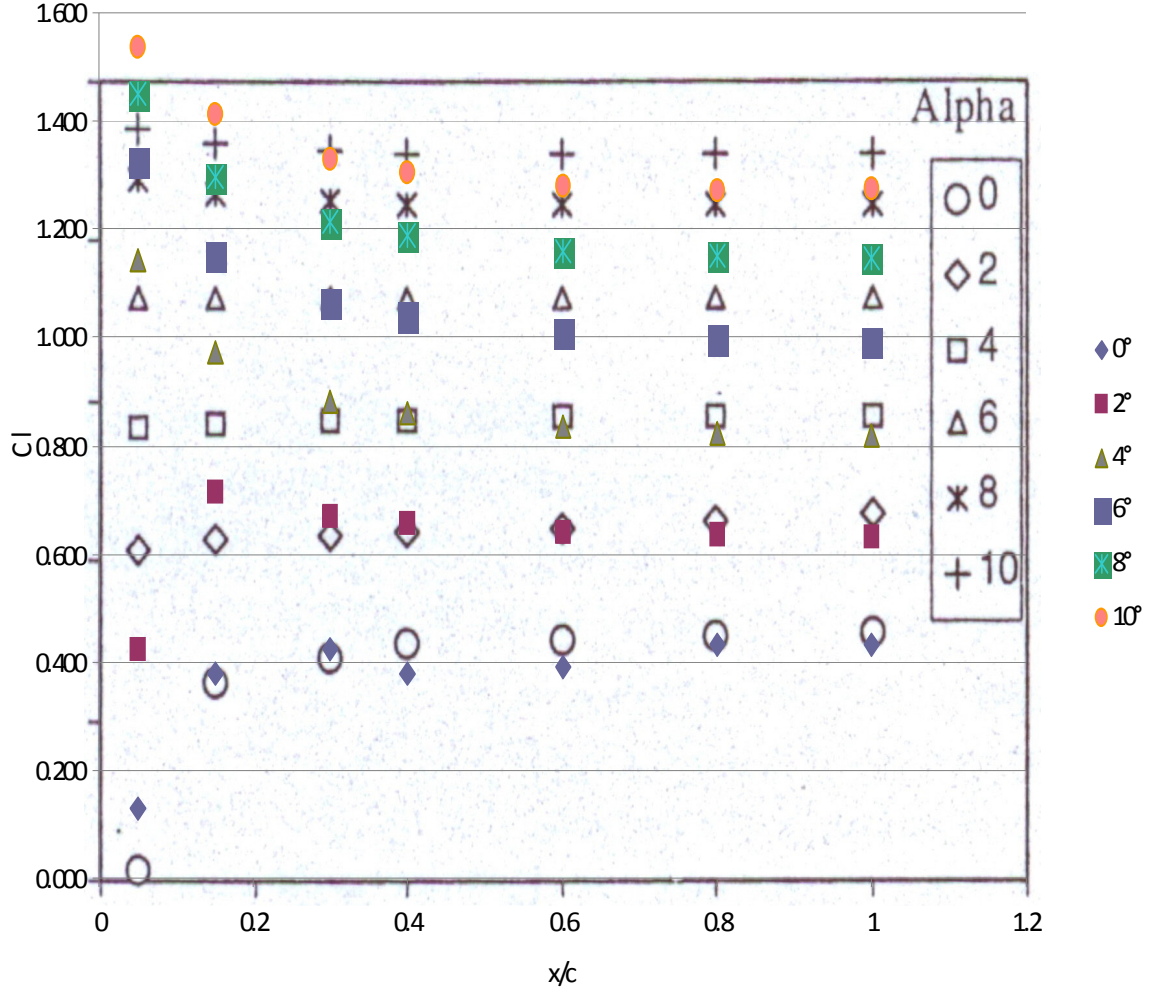
Şekil 4.18: NACA 4412 profili için panel yöntemi sonuçlarının ve deneysel sonuçların karşılaştırması

Şekil 4.18’de görüldüğü üzere deneysel veriler ile panel metodundan elde edilen NACA4412 taşıma katsayıları arasında yere yakınlık açısından paralellik mevcuttur, iki durumda da 0° hücum açısında yerden uzaklaştıkça taşıma katsayısı artmakta, diğer hücum açılarında yerden uzaklaştıkça azalmaktadır, fakat bu artma ve azalma oranları yere en yakın olan $0.05c$ uzaklık ile $0.30c$ arasında farklı oranlarda artış göstermiştir. Deneysel sonuçlara göre 2° hücum açısında az da olsa yere yaklaştıkça taşıma katsayısında azalma görülmektedir, fakat panel yöntemindeki sonuç 2° için tam tersi durumdadır.

Veriler arasında göze çarpan bir diğer durum ise her ne kadar veriler arasında değişime göre paralel artış azalış olsa da iki grup arasında her hücum açısında bariz fark vardır. Örneğin 0 derece hücum açısında deneysel veriler 0.40 civarında iken panel metodunda 0.57 civarındadır, diğer hücum açıları için de deney ile panel yöntemi değerleri arasında yaklaşık 0.2 fark bulunmaktadır.

Şekil 4.19’da CFD metodundan elde edilen sonuçlar ile deney verileri karşılaştırıldığında 0° hücum açısı için birbirine oldukça uyumlu değerler elde edildiği, 2° hücum açısı durumunda yere en yakın durumda taşıma katsayısının bu hücum açısında da azaldığı deney verilerinden daha abartılı olarak görülmektedir, diğer hücum

açıları da deney verilerine yakın sonuçlar elde edilmiştir fakat yere yakın durumlardaki artış büyüklükleri daha fazla olarak gözükmemektedir.



Şekil 4.19: NACA 4412 profili için CFD yöntemi sonuçlarının ve deneysel sonuçların karşılaştırması

Sonuç olarak panel yönteminde de CFD yönteminde de profil etrafında benzer akım özellikleri, aynı hücum açısı değerlerinde ve aynı yere yakınlık oranlarında gözle çarpılmaktadır. Fakat taşıma katsayısı büyüklükleri açısından CFD yöntemi deney sonuçları ile daha iyi yakınlık göstermiştir. Buna göre hücum açısı profilin alt yüzeyinin yere yakınlığını ön kısımdan itibaren önce yakın, profilin gerisine göre uzaklaşacak şekilde tutuyorsa (convergence-divergence) yere yaklaştıkça negatif basınç alanı

oluşturmakta, eğer hücum açısı profilin alt kenarının yere olan konumunu hücum kenarından firar kenarına doğru yakınlaştırıyorsa profilin yere olan uzaklığı azaldıkça alt yüzeyde pozitif basınçta artma görülmektedir. CFD metodu ile panel metodu arasında görülen bir fark verdikleri sonuçlardadır, basınç dağılımları benzer olmasına rağmen büyüklükleri değişiktir ve CFD çözümü panel yöntemine göre NACA4412 profilinin Ahmed, Takasaki ve Kohama (2007)'nın yaptığı deney verileri ile kıyaslandığında daha iyi sonuç vermektedir. Zaten panel yönteminde yer etkisini simüle etmek için simetrik iki profilin analiz edilmesi yer etkisini sağlayan değişkenleri tam olarak yansıtamamaktadır. CFD yönteminde ise yerin profile nazaran hareketi sınır şartı olarak rahatlıkla tanımlanabilmektedir.

5. ÖNERİ VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada yer etkisi problemi NACA 4412 profili üzerinde panel yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması ile incelenmiştir. Her 3 yöntemin birbiri ile ortak noktaları vardır ve gerçek durumun özellikleri her birinde simüle edilmeye çalışılmıştır.

CFD yöntemi yer etkisi koşullarını panel yönteminden daha iyi ihtiva edebildiği için (yerin hareketini veren sınır şartları ile) beklenildiği gibi deney verilerine panel yöntemi sonuçlarından daha yakın sonuçlar vermiştir. CFD yönteminde dikkati çeken bir nokta ise hacim ağı (mesh) alanının sınır şartlarına yakın alanlarda ayrıntılı olmasıdır, bu koşul karşılanamadığı takdirde olması gerekenden farklı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu çalışma her ne kadar 2 boyutluluğu kapsasa da yer etkisinde ihmal edilemeyecek bir durum da 3 boyutluluk etkisidir. 3 boyutluluk düşük açıklıkta daha da etkili olduğu için kara araçları için daha iyi yaklaşımlar sunacaktır.

Literatürde yapılmış çalışmalarda deniz üstü hareket eden araçlar için her ne kadar deniz yüzeyindeki dalgaları simüle edici yaklaşımlar yapılsa da aracın altında oluşan pozitif basınçtan dolayı oluşan yüzey bombesi genelde çalışmalarda göz ardı edilmektedir. Bu bakımdan yapılacak deneylerde ve sayısal çalışmalarda yerin şeklini bombeli almak gerçek duruma daha yakın sonuçlar verecektir.

Yer etkisi problemi ne kadar sayısal ve deneysel yöntemlerle incelenirse incelensin gerçek durum tam olarak elde edilemeyecektir, çünkü sayısal yöntemler ve deneyler doğal durumlarından dolayı gerçek durumdan uzaklaşan hatalar ihtiva ederler, söz gelimi sayısal yaklaşımın verimliliği ya da deney ölçüm aletlerinin akışa etkisi ve rüzgâr tünelinin akış durumu gibi. Günümüzde gelişen sensör teknolojisi ve daha küçük hacimlerde dijital veri depolayabilme yetisi ile istenen fiziksel durum yaşanırken veri toplayabilmeyi mümkün kılmaktadır, bu bakımdan gerçek bir model üzerinde yapılacak ölçümler yer etkisi problemi konusundaki en iyi yaklaşımları ve bilgileri sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Ahmed M.R., Sharma S.D.**, 2005. An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **29**, 633-647
- Ahmed M. R., Takasaki T., Kohama Y.**, 2007. Aerodynamics of a NACA4412 Airfoil in Ground Effect, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, **45**, 37-47
- Calkins D. E.**, 1977. Feasibility Study of a Hybrid Airship Operating in Ground Effect, *Journal of Aircraft*, **14**, 809-815
- Currie, I. G.**, 2002. Fundamental Mechanics of Fluids, New York, pp.70
- Fonseca G. F., Bodstein G. C. R., Hirata M. H.**, 2004. Numerical Simulation of Inviscid Incompressible Two-Dimensional Airfoil–Vortex Interaction in Ground Effect, *Journal Of Aircraft*, **40**, 4
- Gao T., LIU N., Lu X.**, 2008. Numerical Analysis of the Ground Effect on Insect Hovering, *Journal of Hydrodynamics*, **20**, 17-22
- Hepperle M.**, 2006. JavaFoil-Panel Method Program Code, http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/jf_applet.htm
- Hsiun C.M., Chen C.K.**, 1996. Aerodynamic characteristics of a two-dimensional airfoil with ground effect, *Journal of Aircraft*, **33**, 386-392
- Im Y.H., Chang K.S.**, 2000. Unsteady Aerodynamics of a Wing-in-Ground-Effect Airfoil Flying over a Wavy Wall, *Journal of Aircraft*, **37**, 690-696
- Jacob K.**, 1987. Advanced method for computing flow around wings with rear separation and ground effect, *Journal of Aircraft*, **24**, 126-128
- Nishino T., Roberts G.**, 2007. Absolute and convective instabilities of two-dimensional bluff body wakes in ground effect, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*

- Kim M. S., Geropp D., 1998.** Experimental investigation of the ground effect on the flow around some two-dimensional bluff bodies with moving-belt technique, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **74-76**, 511-519
- Pinkerton R.M., 1936.** Calculated and measured pressure distributions over the midspan section of the NACA 4412 airfoil, *National Advisory Committee for Aeronautics Report*, **563**
- Plotkin A., Kennell C.G., 1981.** Thickness-Induced Lift on a Thin Airfoil in Ground Effect, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, **19**, 1484-1486
- Plotkin A., TAN C. H., 1986.** *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, **24**, 1193-1194
- Rozhdestvensky K. V., 2006.** Wing-in-ground effect vehicles, *Progress in Aerospace Sciences*, **42**, 211-283
- Yükselen M.A., 2007.** Hesaplamalı aerodinamik 2007-2008 ders notları, İstanbul.
- Zerihan J.; Zhang X., 2000.** Aerodynamics of a Single Element Wing in Ground Effect, *Journal of Aircraft*, **37**, 1058-1064
- Zhang X., Mahon S., Van Den-Berg M., Williams C., 2005.** Aerodynamics of a Half-Cylinder in Ground Effect Engineering Turbulence, *Modelling and Experiments*, **6**, Pages 461-470

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Kütahya’da doğdu. Ankara’dan Milli Piyango Anadolu Lisesinden mezun olduktan sonra lisans derecelerini 2003 yılında İTÜ Uçak Mühendisliği bölümünden ve 2004 yılında İşletme Mühendisliği bölümünden aldı. Askerlik hizmetini yedek subay olarak Ankara’da tamamlamasının ardından Uçak ve Uzay Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans eğitime ve özel bir şirkette çalışmaya başladı.