

TEMEL EĞİTİM UÇAĞI İÇİN GRADYAN TABANLI ÇOK NOKTALI KANAT PROFİLİ ENİYİLEMESİ

Mert Cangul¹ ve Prof. Dr. Atilla Bıyıkoglu²
Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi

ÖZET

Yapılan bu çalışmada, deniz seviyesinde yüksek manevra kabiliyetine sahip ve yüksek hıza mukabil bir temel eğitim uçağının kanat profili için SU2 açık kaynak kodlu HAD çözücüsü ile elde edilen taşıma katsayısı, sürüklenme katsayısı, yunuslama momenti katsayısı ve kalınlık/veter oranı değerlerinden yola çıkılarak, eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir. Manevra ve yüksek hız uçuş koşulları için belirlenen HAD analizi koşulları, bu sınıftaki uçakların uçuş kılavuzlarındaki bilgiler doğrultusunda örnek değerler alınarak belirlenmiştir. Eniyileme çalışmasının gerçekleştirilebilmesi için, SU2 programı ve Scipy kütüphanesi bir arada kullanılmıştır. SU2 programı ile hesaplanan aerodinamik katsayılar, gradyanlar ve değerler, Scipy kütüphanesinde bulunan ardışık en küçük karesel programlama metodunun girdisidir. Amaç fonksiyonu ve kısıt fonksiyonları için gradyan değerleri, SU2 programının kendi içinde bulunan adjoint çözümü ile hesaplanmıştır. Yalnızca kanat profilinin kalınlık/veter oranının gradyanının hesaplanmasında sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Kanat profilinin parametrik olarak tanımlayabilmek için Hick-Henne tümsek fonksiyonları kullanılmıştır. Manevra ve yüksek hız koşulları için, belirtilen hızlarda ve manevrayı sağlayan hücum açılarında sürüklenme kuvvetinin en düşük hale getirilmesi amaç fonksiyonu iken bu koşullardaki taşıma katsayısının sabit kalması eşitlik kısıt fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Eşitsizlik kısıt fonksiyonu olarak maksimum yunuslama momenti katsayısı, minimum kanat profili kalınlık/veter oranı ve profilin minimum kesit alanı tanımlanarak eniyileme gerçekleştirilmiştir.

GİRİŞ

Temel eğitim uçakları, ülkelerin pilot yetiştirme faaliyetleri içerisinde önemli bir role sahiptir. Ülkeler pilot yetiştirme çalışmalarını daha efektif hale getirebilmek için kabiliyetleri daha gelişmiş temel eğitim uçaklarını tercih etmektedirler. Hava araçlarının bütün uçuş zarflarındaki performansını belirleyen anahtar tasarım süreçlerinden biri de kanat profili seçimi veya tasarımıdır. Bu çalışmada, bir temel eğitim uçağının aerodinamik performansını artırmak amacıyla örnek bir manevra ve yüksek hız testi koşullarında, kanat profilinin sürüklenme katsayısını en düşük değere ulaştırmak amaçlanmıştır. Başlangıç profili olarak Havacılık Ulusal Danışma Kurulu'na (National Advisory Committee for Aeronautics) ait NACA64(2)-415 kanat profili seçilmiştir. Bu kanat profili internet sitelerinden ve kitaplardan temin edilebilmektedir ["AirfoilTools"; Abbott ve Doenhoff, 1949]. Bu profilin seçilme nedeni geçmişte bazı temel eğitim uçaklarında bu seriden kanat profillerinin tercih edilmiş olmasıdır. Kanat profili Hicks-Henne tümsek fonksiyonları ile parametrik hale getirilmiştir. Tasarım değişkeni olarak toplamda 38 tümsek fonksiyonu kullanılmıştır. Manevra ve yüksek hız koşulları için, belirtilen hızlarda ve manevrayı sağlayan hücum açılarında sürüklenme kuvvetinin en düşük hale getirilmesi hedef fonksiyon iken bu koşullardaki taşıma katsayısının sabit kalması eşitlik kısıt fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu iki koşulun amaç ve kısıt fonksiyonu üzerindeki ağırlıkları eşittir. Eşitsizlik kısıt fonksiyonu olarak ise yunuslama momenti katsayısı -0.1 değerinden daha

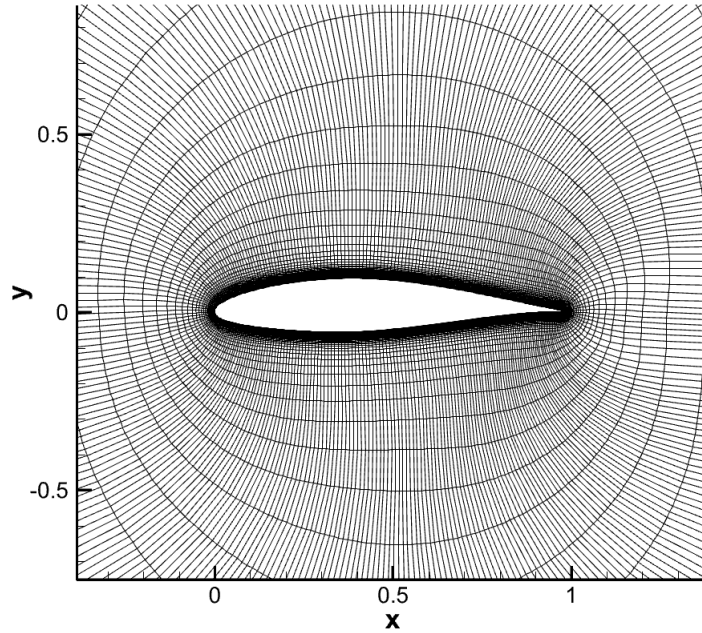
¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Makina Müh. Böl., E-posta: mert.cangul@gazi.edu.tr

² Prof. Dr., Makina Müh. Böl., E-posta: abiyik@gazi.edu.tr

pozitif bir değer olacak şekilde tanımlanmıştır. Kanat içerisine yakıt tankı ve iniş takımı yerleştirilme problemleri düşünülerek kanat profili kalınlık veter oranının 0.12 değerinden yüksek ve profil kesit alanının 0.093 değerinden yüksek olacak şekilde eniyileme gerçekleştirilmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışmada, HAD analizleri SU2 programı ile yapılmıştır. SU2 programı yoğunluk tabanlıdır. HAD analizlerinde Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılmıştır. Sınır tabaka için y^+ değeri 1 olacak şekilde çözüm ağı oluşturulmuştur. Başlangıç profilinin HAD analizi için seçilen çözüm ağı ve farklı çözüm ağları ile elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir. HAD analizleri gerçekleştirilirken 32 çekirdekli bilgisayar kullanılmıştır.

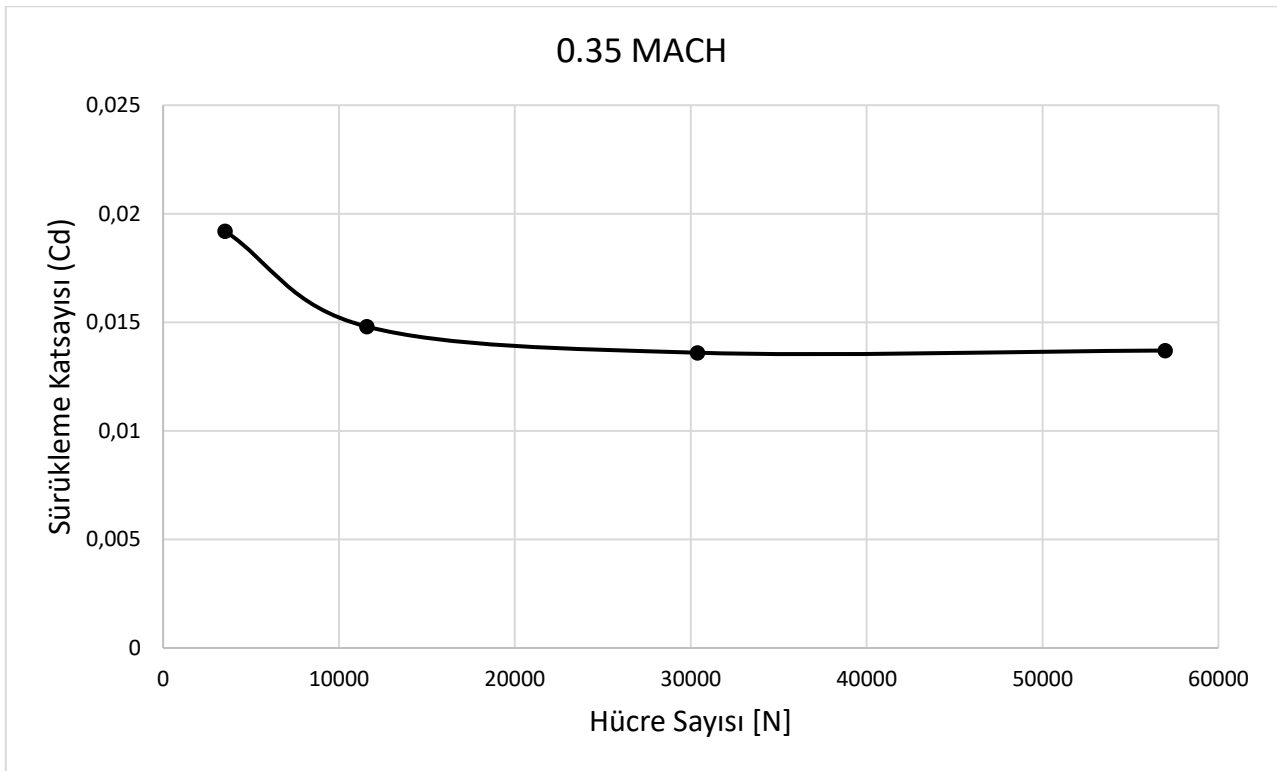


Şekil 1: NACA64(2)-415 Kanat profili için oluşturulmuş çözüm ağı

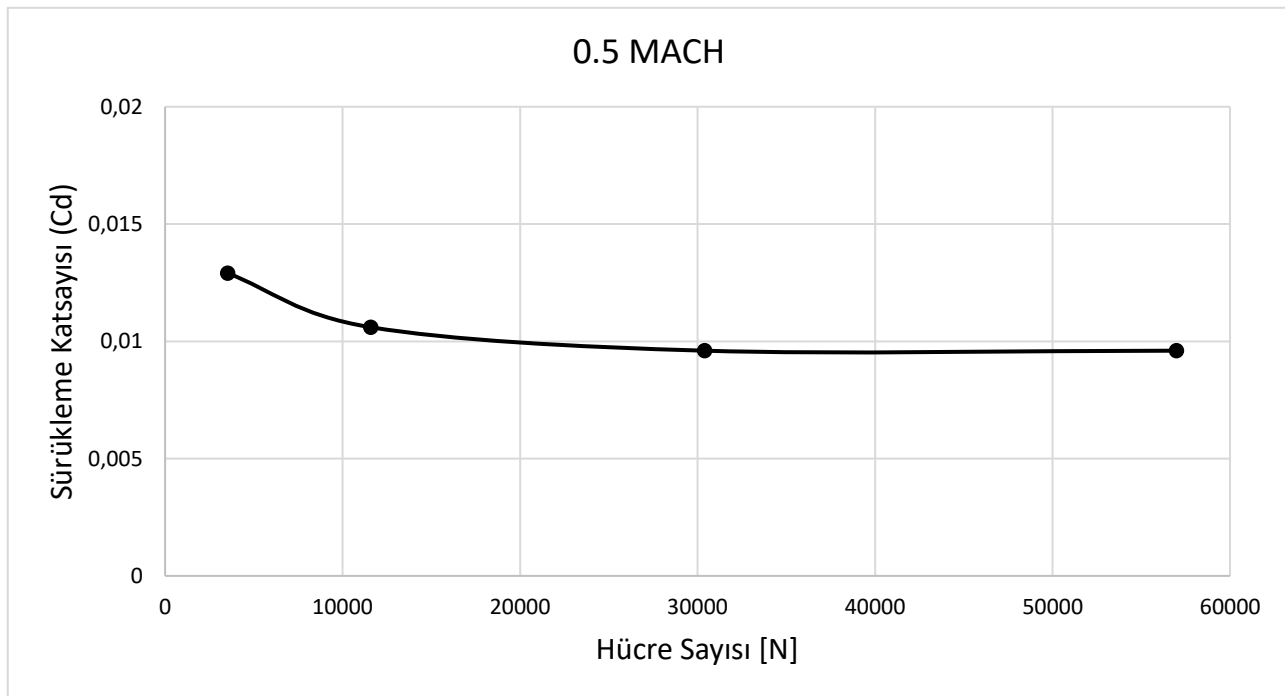
Tablo 1: NACA64(2)-415 Kanat profili için gerçekleştirilen çözüm ağı bağımsızlık çalışması

Büyüme Oranı [GR]	Hücre Sayısı [N]	Mach Sayısı [M]	Taşıma Katsayısı [Cl]	Sürüklenme Katsayısı [Cd]	Hesaplama Süresi [tcomp(dakika)]
1.6	3531	0.35	0.935	0.0192	1
1.3	11592	0.35	0.949	0.0148	2
1.15	30393	0.35	0.959	0.0136	6
1.1	56980	0.35	0.96	0.0137	11
1.6	3531	0.5	0.373	0.0129	1
1.3	11592	0.5	0.383	0.0106	2
1.15	30393	0.5	0.384	0.0096	6
1.1	56980	0.5	0.385	0.0096	11

Sürüklenme katsayısının çözüm ağına göre değişimi ve düşük hesaplama süresi dikkate alındığında 30393 hücre sayısına ve 1.15 büyüme oranına sahip çözüm ağı tercih edilmiştir.



Çizelge 1: 0.35 Mach değerinde sürüklemeye katsayısının hücre sayısına göre değişimi



Çizelge 2: 0.35 Mach değerinde sürüklemeye katsayısının hücre sayısına göre değişimi

Eniyileme metodu olarak gradyan tabanlı ardışık en küçük karesel programlama metodu kullanılmıştır. Praveen tarafından yapılan kısıtlı ve tek amaç fonksiyonlu kanat profili optimizasyonu çalışmasında, farklı optimizasyon metotlarının sonuçları karşılaştırılmıştır [Praveen, 2009; Rao, 2009]. Bu çalışmadaki sonuçlara göre ardışık en küçük karesel programlama en düşük sürüklemeye katsayısına ulaşmıştır. Aerodinamik tasarım optimizasyon çalışmalarında, gradyan tabanlı metotların etkili olduğunu gösteren ilk çalışma Hicks'e aittir [Hicks, Murman ve Vanderplaats, 1974]. Ardışık en küçük karesel programlama metodu, amaç ve kısıt fonksiyonlarının tasarım

değişkenlerine göre kısmi türevlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu türevlerin hesaplanması için SU2 programının adjoint çözücüsü kullanılmıştır. Son yıllarda yapılan birçok tasarım eniyilemesi çalışmasında SU2 programı kullanılmakta ve adjoint çözücüsünün sonuçları ve hassasiyeti incelenmektedir [Albring, Sagebaum ve Gauger, 2016; Yang, Ronch, Drofelnik ve Xie, 2018]. Yalnızca kanat profilinin kalınlık veter oranının kısmi türevlerinin elde edilmesi için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Copeland, adjoint ve sonlu farklar yöntemleri ile gradyan hesaplamasının karşılaştırmasını yapmıştır [Copeland, 2014]. Adjoint yöntem sonlu farklar yöntemine göre zaman açısından daha avantajlı olduğundan, kısmi türevler adjoint (eklenik) yöntemler ile elde edilmiştir.

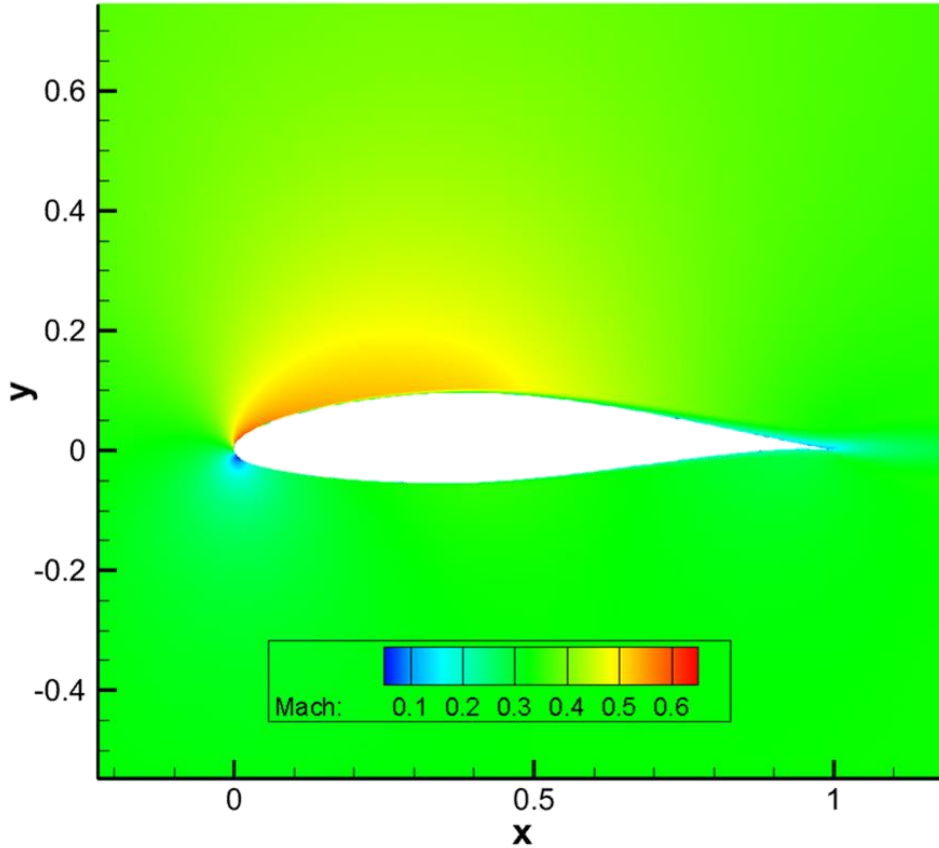
HAD analizleri manevra ve yüksek hız uçuş koşullarını yansıtmak üzere iki koşuldan oluşmaktadır. Analiz koşulları örnek olarak oluşturulmuştur. Tasarıma ve uçuş koşuluna göre koşullar değişkenlik gösterecektir. Manevra koşulu için analiz koşulları deniz seviyesinde 0.35 Mach ve 5° hücum açısı iken, yüksek hız uçuş koşulları için deniz seviyesinde 0.5 Mach ve 0° hücum açısı analiz koşulu olarak seçilmiştir.

UYGULAMALAR

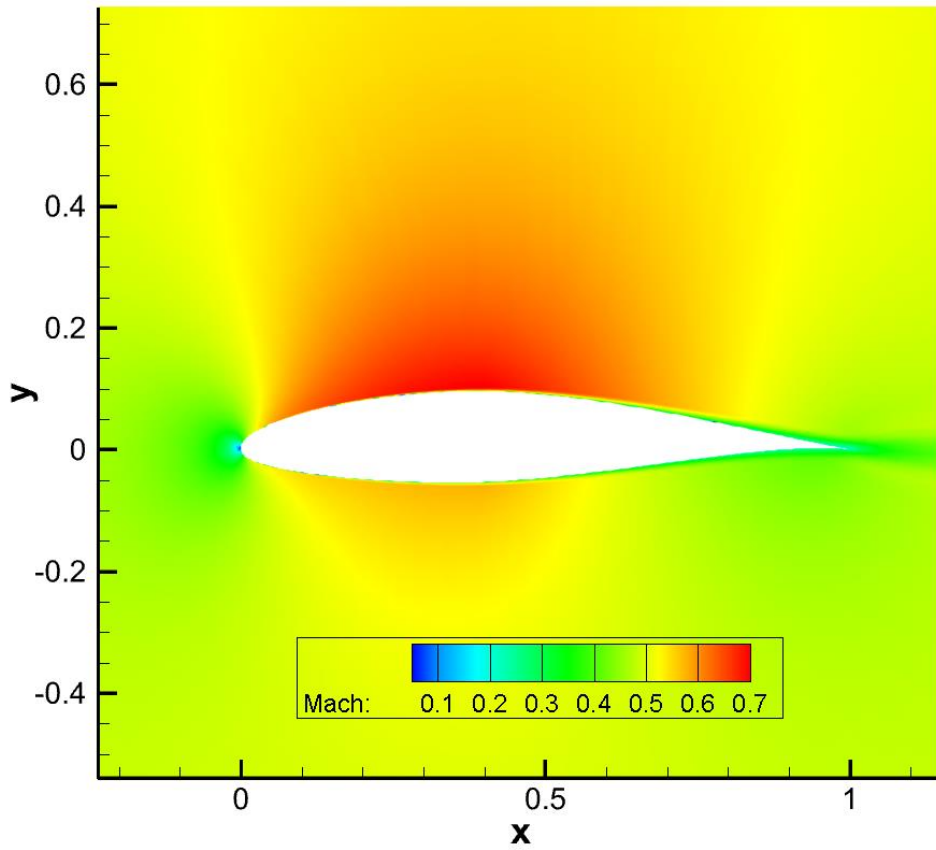
NACA64(2)-415 kanat profili için belirtilen koşullardaki HAD analizi sonuçları aşağıdaki gibidir.

Tablo 2: NACA64(2)-415 Kanat profili için hesaplanan değerler

KOŞUL	MACH SAYISI (M)	HÜCUM AÇISI (Derece)	TAŞIMA KATSAYISI (Cl)	SÜRÜKLEME KATSAYISI (Cd)	MOMENT KATSAYISI (Cm)
MANEVRA	0.35	5	0.96	0.0136	-0.057
YÜKSEK HIZ	0.5	0	0.38	0.0093	-0.086



Şekil 2: NACA64(2)-415 Kanat profilinin seçilmiş manevra koşulundaki Mach konturu



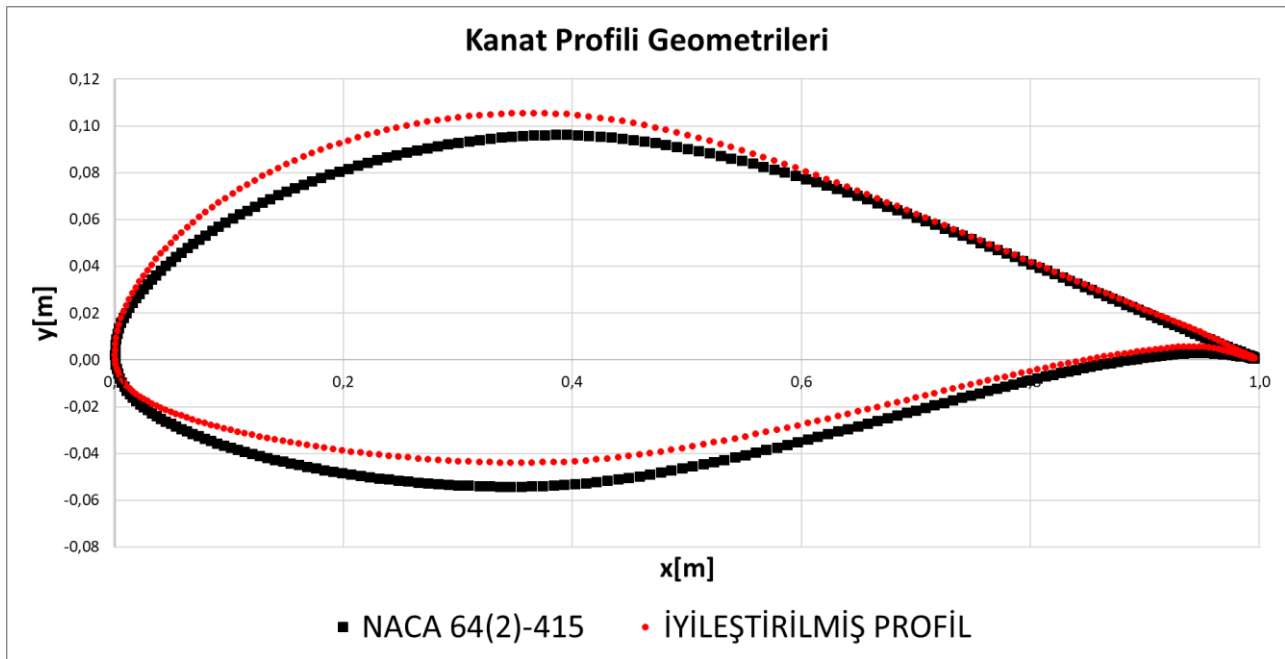
Şekil 3: NACA64(2)-415 Kanat profilinin seçilmiş yüksek hız koşulundaki Mach konturu

Eniyileme probleminin çözümü gerçekleştirildikten sonra ortaya çıkan sonuçlar ve profil geometrileri aşağıdaki gibidir.

Tablo 3: İyileştirilmiş kanat profili için hesaplanan değerler

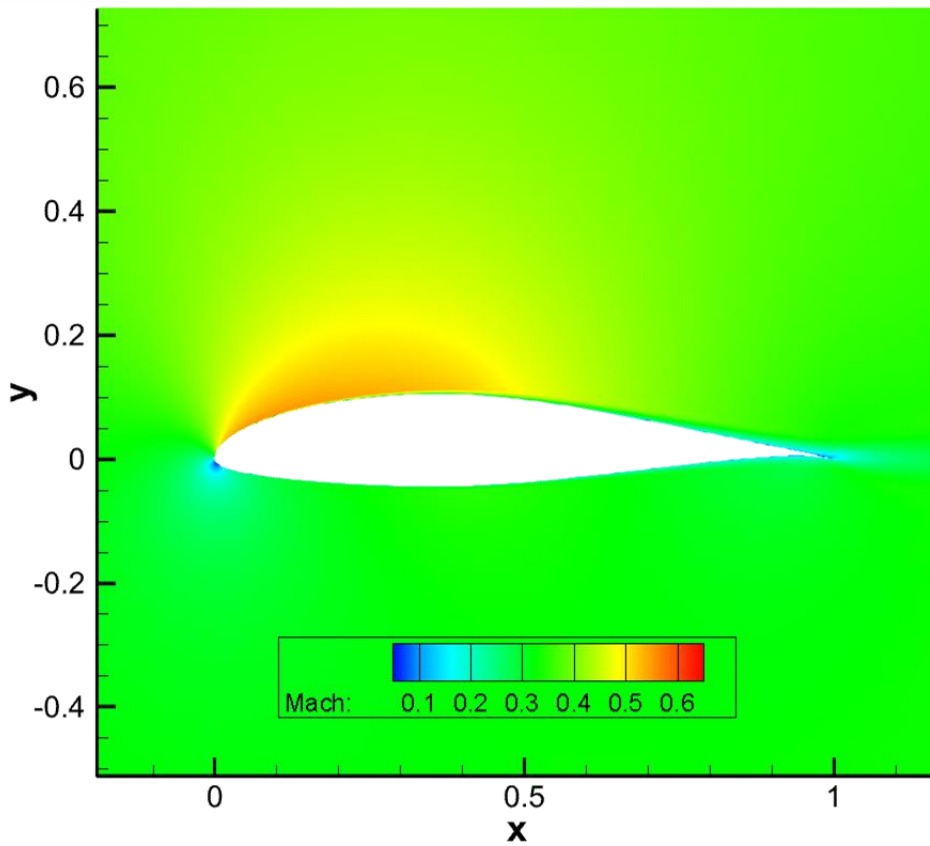
KOŞUL	PROFİL	MACH SAYISI (M)	HÜCUM AÇISI (Derece)	TAŞIMA KATSAYISI (Cl)	SÜRÜKLEME KATSAYISI (Cd)	MOMENT KATSAYISI (Cm)
MANEVRA	NACA64(2)-415	0.35	5	0.96	0.0136	-0.0885
MANEVRA	İYİLEŞTİRİLMİŞ	0.35	4.1	0.96	0.0133	-0.0987
YÜKSEK HIZ	NACA64(2)-415	0.5	0	0.38	0.0093	-0.0884
YÜKSEK HIZ	İYİLEŞTİRİLMİŞ	0.5	-0.8	0.38	0.0093	-0.0983

İyileştirilmiş profil yüksek hız koşulunda avantaj sağlayamazken, manevra koşulunda 3 sürüklenme indeksi kadar avantajlı görünmektedir. Öte yandan, iyileştirilmiş profil yüksek hız ve manevra koşullarında aynı taşıma katsayısını daha düşük hücum açılarında elde edebilmektedir. Bu durum, bütün uçak geometrisi analiz edildiğinde, gövde gibi uçağın diğer parçalarının da hücum açısını düşüreceğinden sürüklenme katsayısında avantaj oluşturabilir.

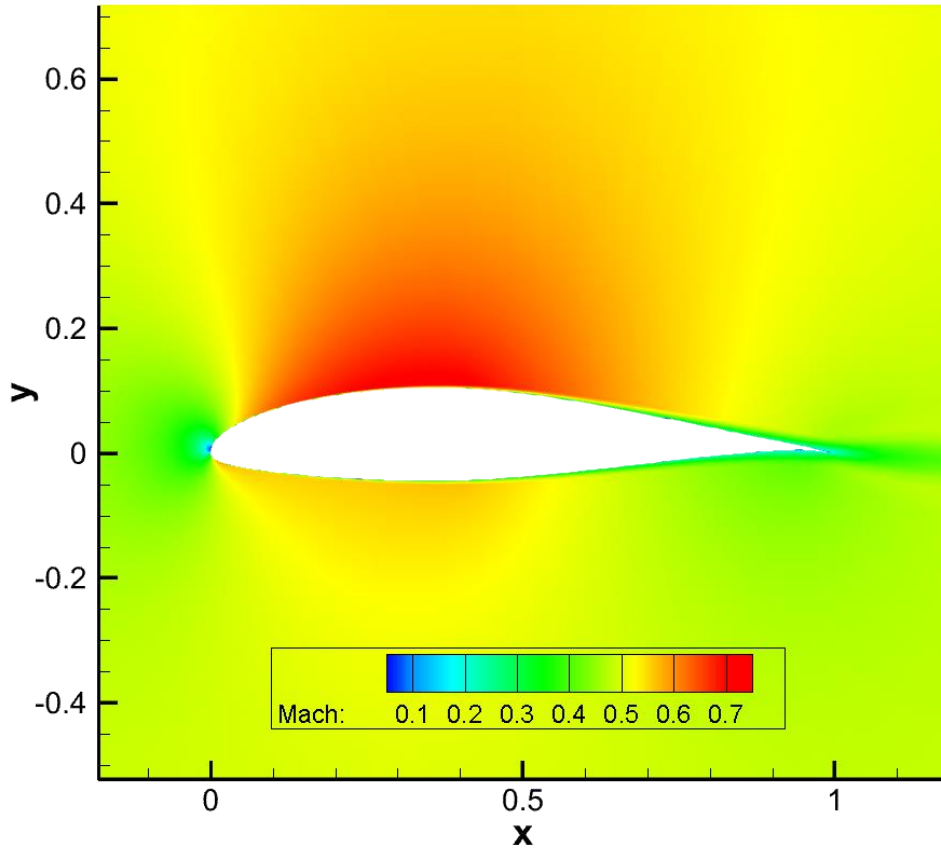


Şekil 4: NACA64(2)-415 ve İyileştirilmiş Kanat Profili

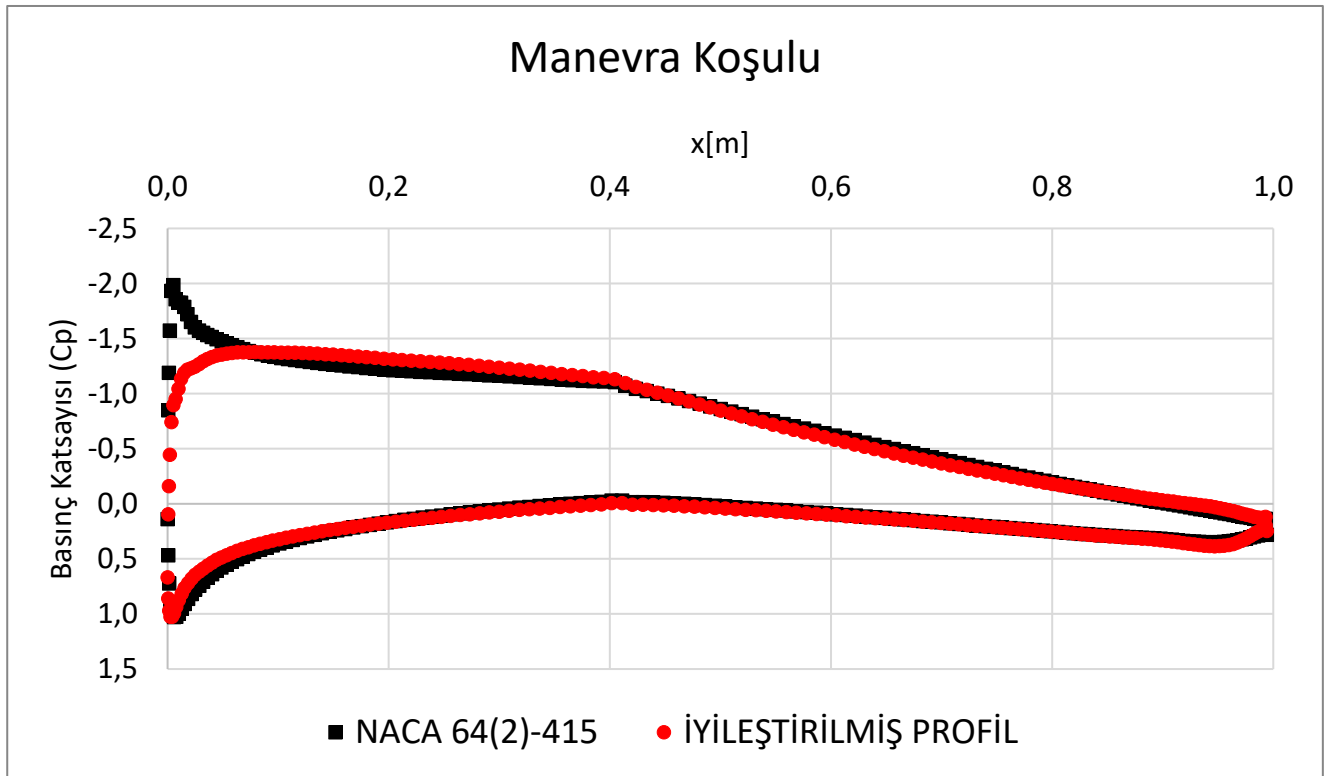
Başlangıç profilinin kalınlık veter oranı 0.15 iken iyileştirilmiş profilin kalınlık veter oranı 0.147 değerine düşmüştür. İki profil arasında aynı taşıma katsayısını sağlayan koşullarda iyileştirilmiş profil daha fazla moment üretmektedir.



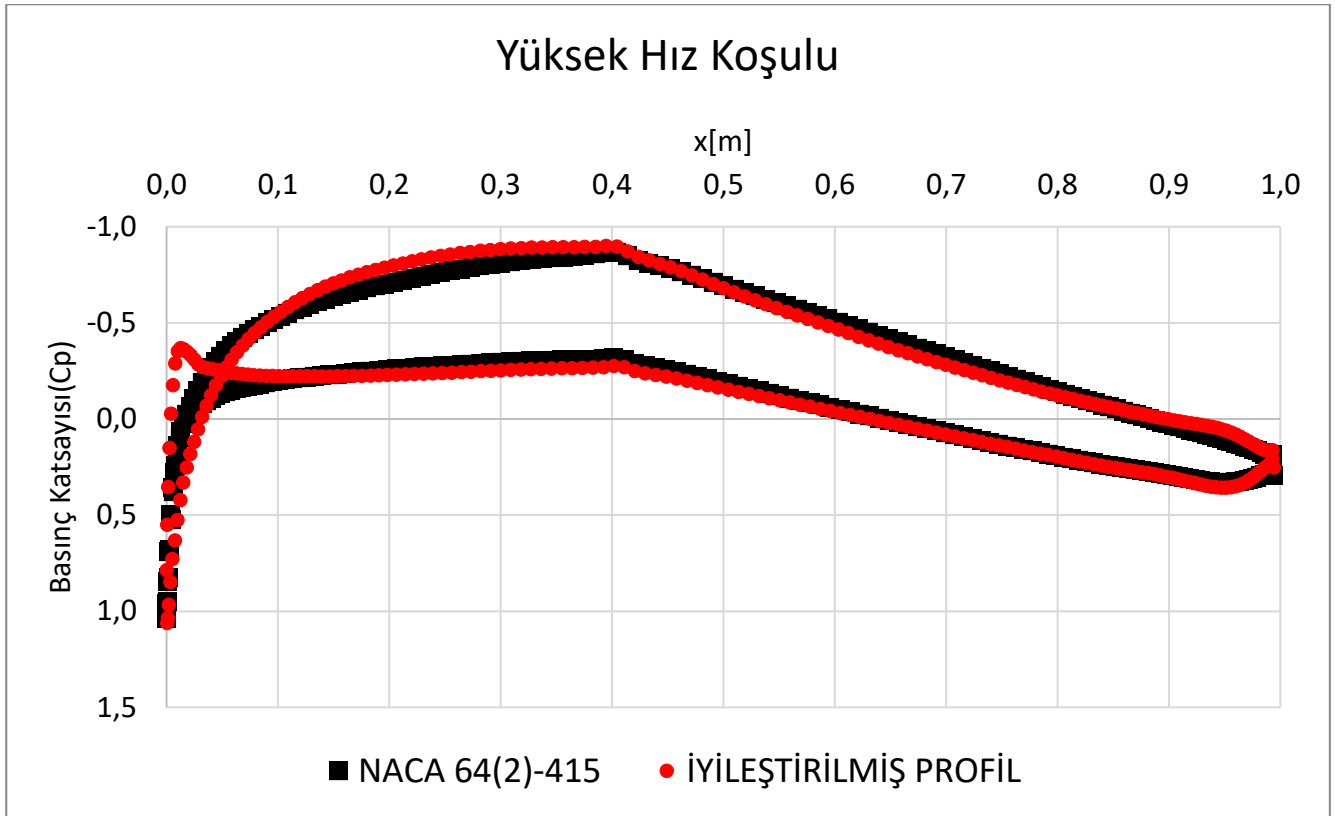
Şekil 5: İyileştirilmiş kanat profilinin seçilmiş manevra koşulundaki Mach konturu



Şekil 6: İyileştirilmiş kanat profilinin seçilmiş yüksek hız koşulundaki Mach konturu



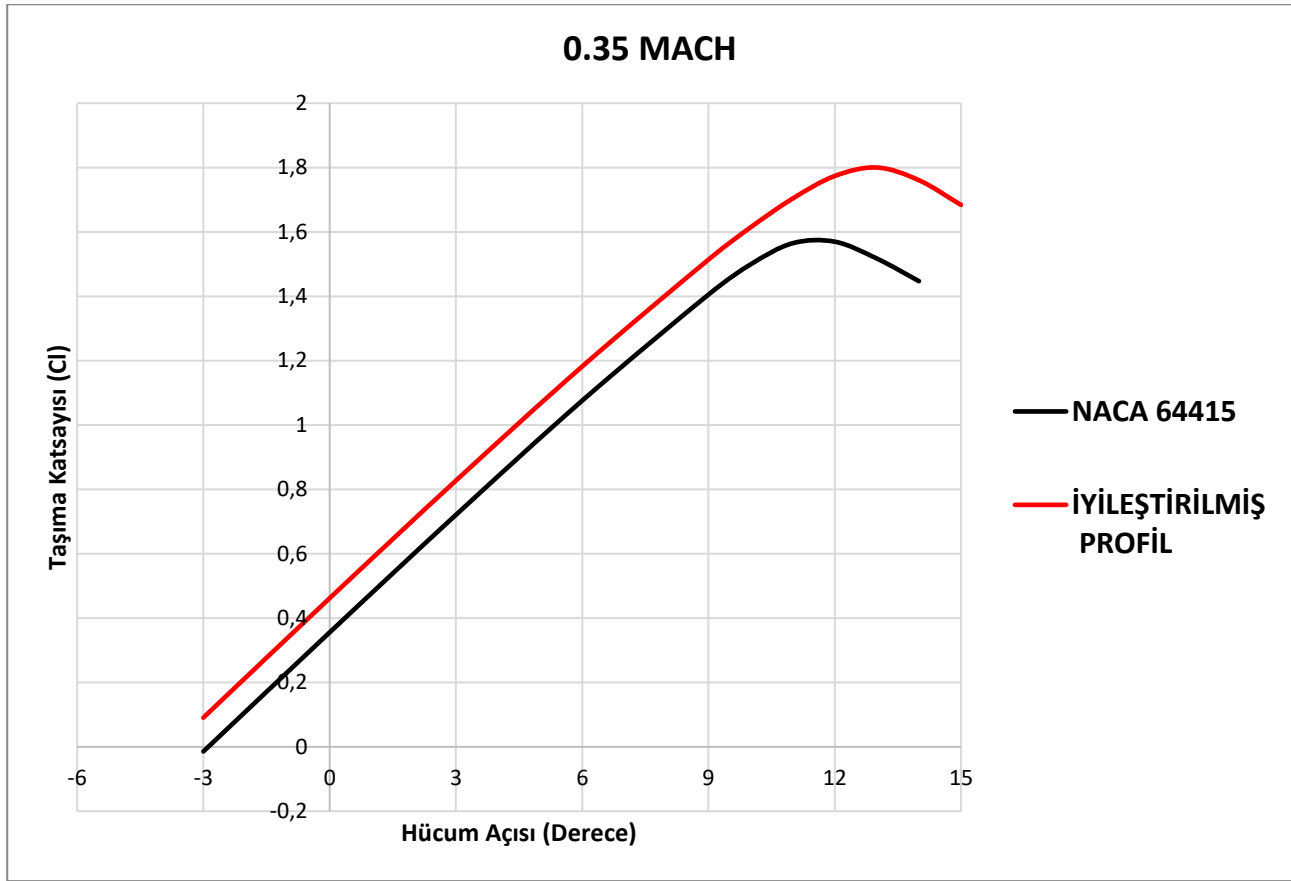
Çizelge 3: Manevra koşulu için kanat profillerinin basınç katsayısı dağılımı



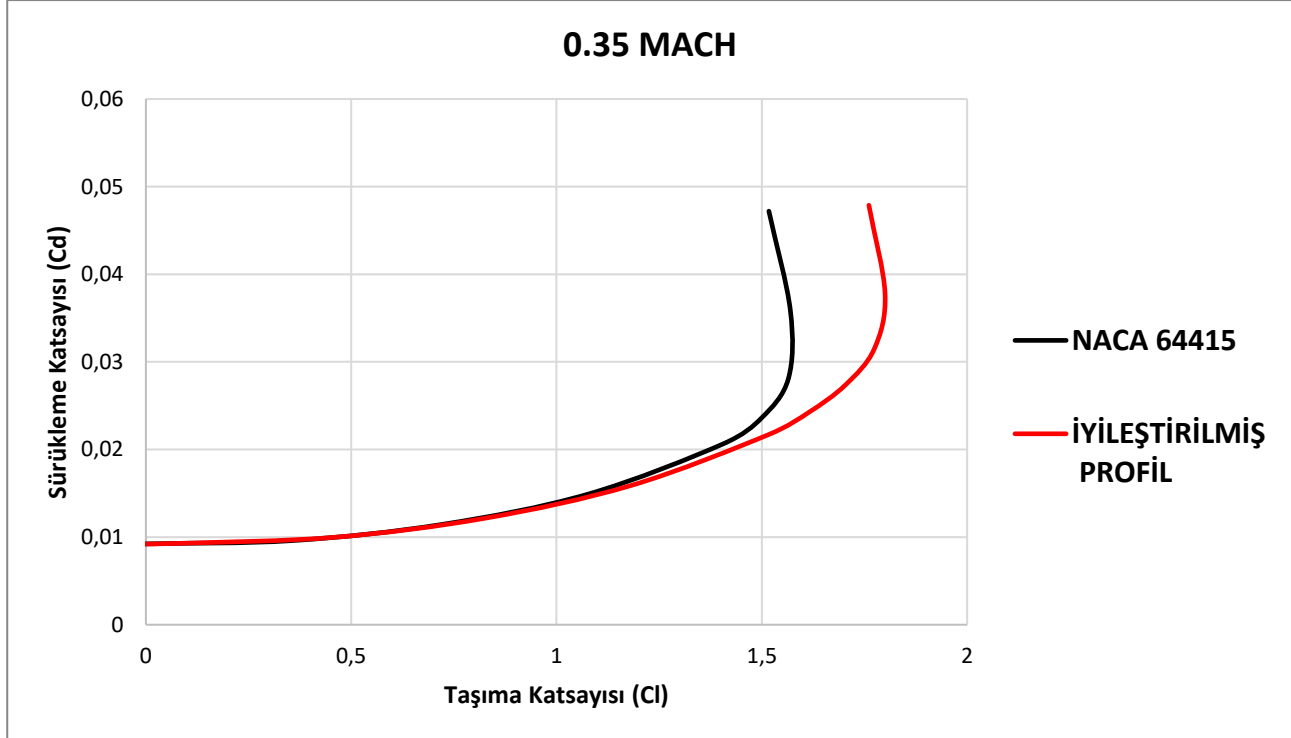
Çizelge 4: Yüksek hız koşulu için kanat profillerinin basınç katsayısı dağılımı

İki profilin basınç katsayılarına bakıldığı zaman hem yüksek hız hem de manevra koşulunda hücum kenarı bölgesinde farklılıklar görülmüştür. İyileştirilmiş kanat profilinin manevra koşulunda hücum kenarı etrafındaki minimum basınç katsayısı sıfıra daha yakındır. Öte yandan, yüksek hız koşulunda iyileştirilmiş kanat profilinin hücum kenarının alt yüzeyinde tepe noktası gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar dışında bariz bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Yüksek hız koşulunda her iki kanat profilinin de minimum basınç noktaları aynıdır.

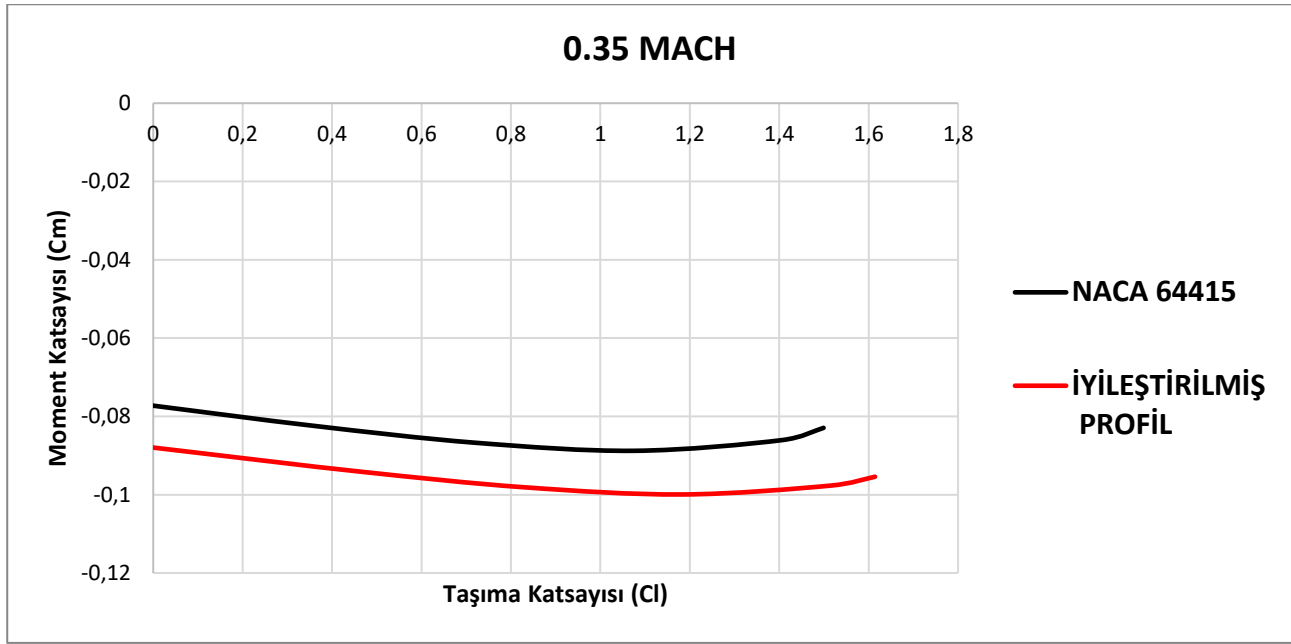
Her iki kanat profili için 0.35 ve 0.5 Mach hızlarında farklı hücum açılarındaki HAD analizi sonuçları aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



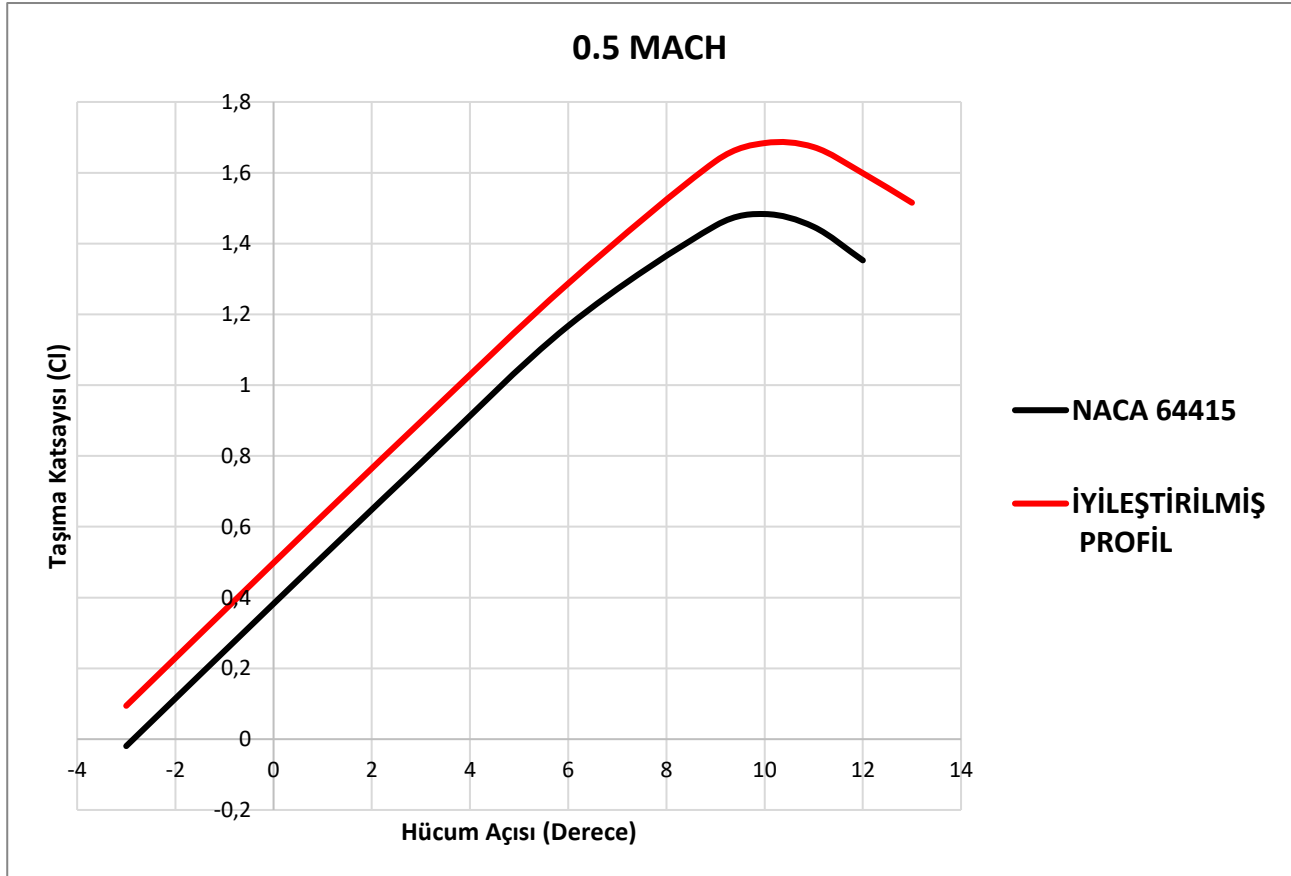
Çizelge 5: 0.35 Mach değerinde taşıma katsayısının hücum açısına göre değişimi



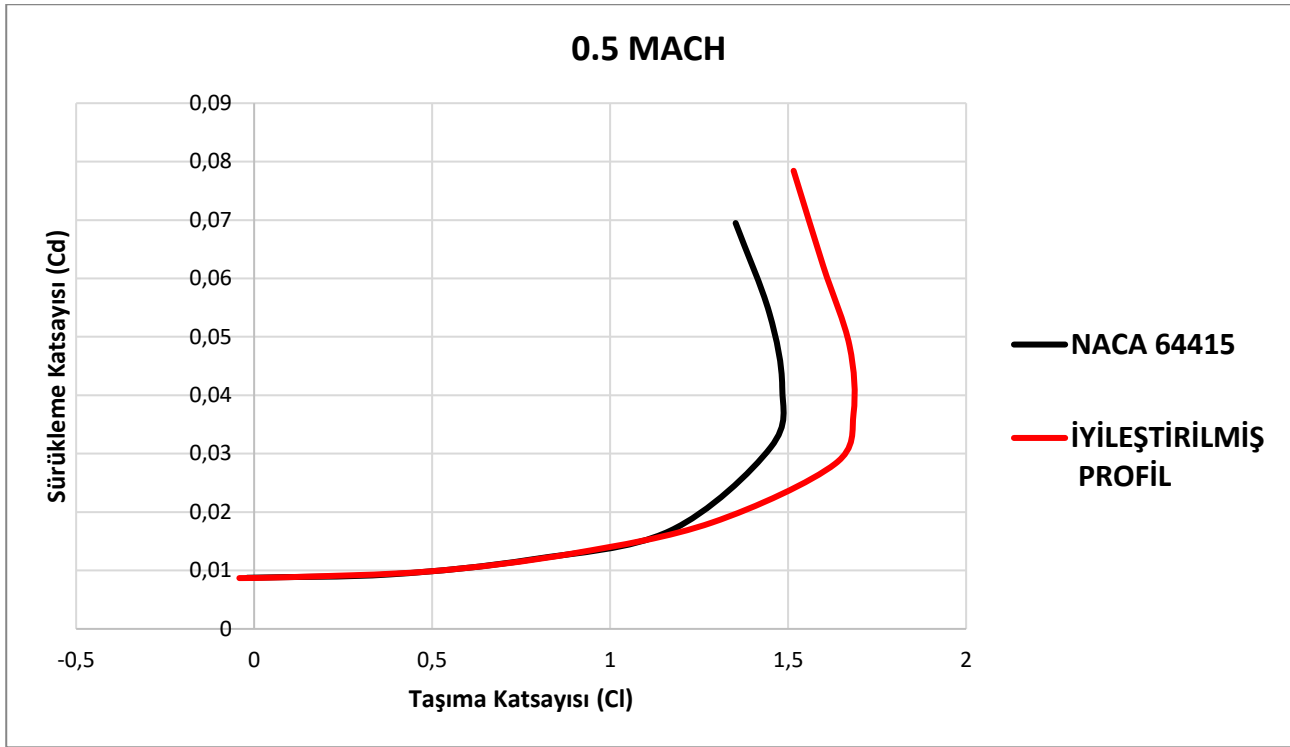
Çizelge 6: 0.35 Mach değerinde sürüklenme katsayısının taşıma katsayısına göre değişimi



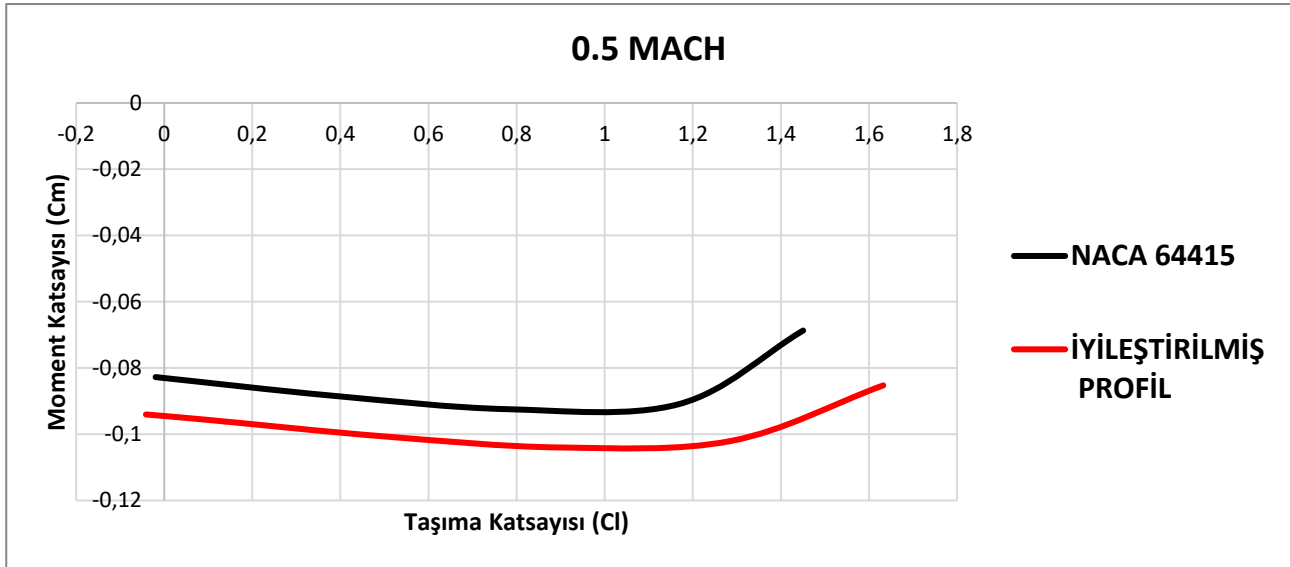
Çizelge 7: 0.35 Mach değerinde moment katsayısının taşıma katsayısına göre değişimi



Çizelge 8: 0.5 Mach değerinde taşıma katsayısının hücum açısına göre değişimi



Çizelge 9: 0.5 Mach değerinde sürüklenme katsayısının taşıma katsayısına göre değişimi



Çizelge 7: 0.5 Mach değerinde moment katsayısının taşıma katsayısına göre değişimi

0.35 ve 0.5 Mach hızlarındaki HAD analizi sonuçları aerodinamik katsayılar üzerinde aynı karakteristiği göstermiştir. İyileştirilmiş profilin perdövites açısı başlangıç profiline göre 0.35 Mach hızında 1 derece artmıştır. Perdövites hızını doğrudan etkileyen maksimum taşıma katsayısı iyileştirilmiş profil ile 0.35 Mach hızında %10 kadar artmıştır. Aynı taşıma katsayısına karşılık gelen sürüklenme katsayısına bakıldığında iyileştirilmiş profil 0.35 Mach hızında 1.0 taşıma katsayısı ve üzeri değerlerde, 0.5 Mach hızında ise 1.2 taşıma katsayısı ve üzeri değerlerde avantaj sağlamaktadır. Her iki profilin 0.35 ve 0.5 Mach sonuçlarına göre moment katsayısı/taşıma katsayısı eğimleri eşittir fakat iyileştirilmiş profil aynı taşıma katsayısına karşılık yaklaşık %10 daha fazla moment üretmektedir. Profillerin akış üzerindeki aşağı sapma etkileri farklı olduğundan profillerin moment değerleri trim sürüklemesi hakkında çıkarım yapabilmek için yetersizdir. Trim sürüklemesinin hesaplanması kanat-kuyruk tasarım çalışması ile mümkün olacaktır.

SONUÇ

Yapılan bu çalışmada, bir temel eğitim uçağı için belirlenen yüksek hız ve manevra koşullarına göre kanat profili eniyileme çalışması gerçekleştirildi. Belirlenen koşullardaki başlangıç profilinin sağladığı taşıma katsayısını sağlamak şartı ile sürüklenme katsayısını düşürmek amaç fonksiyonu olarak tanımlandı. Moment katsayısı, kalınlık veter oranı ve profil kesit alanı eşitsizlik kısıtları idi. Yüksek hız koşulunda sürüklenme katsayısında bir düşüş gözlenmezken manevra koşulunda 3 sürüklenme indeksi kadar bir azalma elde edildi. Başlangıç ve iyileştirilmiş profillerin farklı Mach ve hücum açısı değerlerinde aerodinamik katsayıları incelendiğinde iyileştirilmiş profilin maksimum taşıma katsayısı, yüksek taşıma katsayılarına karşılık gelen sürüklenme katsayısı ve perdövites açısı gibi değerlerde daha avantajlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, iyileştirilmiş profil başlangıç profilinin sağladığı taşıma katsayısı değerlerini daha düşük hücum açılarında sağlayabildiğinden iyileştirilmiş profilin tercih edilmesi ile uçak üzerindeki diğer parçaların hücum açısının daha az olacağı çıkarımı ile toplam sürüklenme kuvvetinde bir avantaj sağlanabileceği öngörülebilir. İlerleyen çalışmalarda, aynı koşullar ile üç boyutlu kanat geometrisinin eniyileme çalışması gerçekleştirilecektir.

Kaynaklar

- Abbott, I. H. A., & Doenhoff, A. E. Theory of wing sections: Including a summary of airfoil data. New York: McGraw-Hill, 1949
- Albring, T., Sagebaum, M., Gauger, N., “Efficient Aerodynamic Design using the Discrete Adjoint Method in SU2”, AIAA 2016-3518, June 2016
- Copeland, R., “Adjoint-Based Aerothermodynamic Shape Design of Hypersonic Vehicles in Non-Equilibrium Flows”, 2014
- Hicks, R.M., E.M. Murman, G.N. Vanderplaats, “An assessment of airfoil design by numerical Optimization”, NASA TM X-3092, Ames Research Center, California, July 1974.
- Praveen, C., “Airfoil Shape Optimization Using Adjoint Method and Automatic Differentiation”, Annual AeSI CFD Symposium, August 2009
- Rao, S. S., Engineering Optimization: Theory and Practice: Fourth Edition. John Wiley and Sons., 2009
- Yang, G., Ronch, A., Drofelnik, J., Xie, Z., “Sensitivity Assessment of Optimal Solution in Aerodynamic Design Optimization using SU2”, Aerospace Science and Technology, October 2018
- “AirfoilTools.”, <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca642415-il>
- “SU2Code”, <http://su2code.github.io>