

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**HAVA ARACI KANATLARINDA TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE
AĞIRLIK AZALTMA**

HAZIRLAYAN

HÜSEYİN CEM KULAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2024

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**HAVA ARACI KANATLARINDA TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE
AĞIRLIK AZALTMA**

HAZIRLAYAN

HÜSEYİN CEM KULAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. HAKKI POLAT GÜLKAN

TEZ İKİNCİ DANIŞMANI

PROF. DR. HASAN UMUR AKAY

ANKARA – 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Hüseyin Cem Kulak tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 12 / 01 / 2024

Tez Adı: Hava Aracı Kanatlarında Topoloji Optimizasyonu İle Ağırlık Azaltma

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Hakkı Polat Gülkan, Başkent Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Hasan Umur Akay, Atılım Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Ömer Faruk Elaldı, Başkent Üniversitesi

.....

Prof. Dr. İsmail Hakkı Tuncer, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk Elaldı

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 16 / 01 / 2024

Öğrencinin Adı, Soyadı : Hüseyin Cem Kulak

Öğrencinin Numarası : 22010247

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı : Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Prof. Dr. Hakkı Polat Gülkan, Prof. Dr. Hasan Umur Akay

Tez Başlığı : Hava Aracı Kanatlarında Topoloji Optimizasyonu İle Ağırlık Azaltma

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 109 sayfalık kısmına ilişkin, 16 / 01 / 2024 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Ithenticate adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 1'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı

Prof. Dr. Hakkı Polat Gülkan

Bu tezi ÷lkemiz için bütün varlığını ortaya koyan milli mücadele kahramanlarımıza, aziz şehitlerimize ve yüce Türk milletine ithaf ediyorum.

Açtığın yolda, gösterdiğin hedefe durmadan yürüyeceğime ant içerim. Varlığım, Türk varlığına armağan olsun.

Hüseyin Cem KULAK

Ankara – 2024

TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmanın gerçekleşmesinde önemli katkılarından dolayı, aşağıda adı geçen kişilere içtenlikle teşekkür eder.

Sayın Prof. Dr. Hasan Umur AKAY'a, çalışmanın başından sonuna kadar her süreçte önemli desteğini sürekli hissettiğim, kendisinden yaptığı fedakarlıkları bir ömür unutmayacağım hocama, tükenmeyen çabaları, gayretleri ve bana kattıkları için...

Sayın Prof. Dr. Hakkı Polat GÜLKAN'a, bana güvenerek çalışmanın temellerini atmamı sağlayıp, süreç boyunca beni en doğru şekilde yönlendirdiği için...

Sayın Tugay KULAK ve Saliha KULAK'a, beni fedakarlıklarla yetiştirdikleri, her daim koşulsuz sevgilerini hissettirdikleri, hayatımın her döneminde ve aldığım bütün kararlarda beni destekledikleri için...

Sayın Ezgi GÜZELKAHRAMAN'a, çalışma süreci boyunca her zaman anlayışlı olduğu, motive ettiği ve desteğini hissettirdiği için...

ÖZET

Hüseyin Cem KULAK

HAVA ARACI KANATLARINDA TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE AĞIRLIK AZALTMA

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2024

Havacılık sektöründe, ağırlık parametresi son derece önemlidir. Ağırlığın, hava aracı performansı ve faydalı yük kapasitesi gibi faktörlere doğrudan etki ettiği bilindiği için, tasarımların daha hafif ve aynı zamanda sağlam olacak şekilde yapılması amaçlanmaktadır. Bununla birlikte, en iyi geometriye ulaşmak zaman alabilmektedir. Belirlenen sınır koşulları ve yükler göz önünde bulundurularak topoloji optimizasyonu yöntemi ile istenen geometri içindeki ideal malzeme dağılımı daha kısa sürede bulunabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, ANSYS yazılımının sonlu elemanlar yöntemini kullanan, Structural Optimization modülü ile NACA 0012 kanat profiline sahip bir kanat kesiti ve 4 m kanat açıklığına sahip bir kanat için yapısal topoloji optimizasyonu yapılmıştır.

Geometrilere üç boyutlu modelleme yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Ardından, kanat kesiti için kararlı halde, deniz seviyesinde, sıkıştırılamaz akış koşullarında, 100 m/s hız ile HAD analizi çözümü sonlu hacimler yöntemini kullanan Fluent yazılımı ile viskoz ve türbülanslı akış koşulları altında yapılmıştır. Çözümler -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° olmak üzere yedi farklı hücum açısında yapılmıştır. Optimizasyonlar için iki farklı durum kurgulanmıştır; ilk olarak kanat kesitlerinin ortasına rijit bir ana kiriş (spar) konumlandırılmıştır. Diğer senaryoda ise veter uzunluğunun 0.25 ve 0.5 noktalarında dikey nervürler (ribler) konumlandırılmıştır. Bütün hücum açılarındaki HAD analizi çözümleri bu iki senaryodaki kesitlere ayrı ayrı aktarılıp sırasıyla hacim oranları %20 ve %10 olarak tanımlanarak topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Ardından, eş zamanlı olacak şekilde yedi farklı hücum açısının çözümleri kullanılarak bu iki senaryo için çok noktalı (multi-point) topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Bu tez çalışmasını diğer çalışmalardan ayıran bir tarafı da bu olmuştur. Yedi farklı hücum açısı çözümünün eş zamanlı olarak çok noktalı optimizasyonda kullanılmasında literatür araştırmasında rastlanmamıştır. Ayrıca, kanat geometrisi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

özümü ile hesaplanmış aerodinamik yük kullanan araştırmaların sayısının da fazla olmadığı görölmüştür.

Kanat kesiti optimizasyonu tamamlandıktan sonra 4 m kanat açıklığına sahip bir kanadın 0.5 Mach akış hızında, kararlı halde ve 0° hücum açısında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğı (HAD) analizi yapılmıştır. Tam dolu kanat için %10 hacim oranı tanımlanarak en iyi geometri için sonuçlar incelenmiştir.

Araştırma süresince optimizasyon sürecinin oldukça hassas olduğı, sonuçların özellikle topoloji optimizasyonu için kullanılan sınır koşullarına ve çözüm ağına bağılı olduğı görölmüştür. Bu nedenle de problemin oldukça dikkatli tanımlanması gerektiğı gözlemlenmiştir ve ilgili önerilerde bulunulmuştur. özümelerin birçok farklı etmeden etkilendiğı ve orijinal sonuçlar elde etmenin olası olduğı görölmüştür. Sonuç olarak yapısal topoloji optimizasyon sürecinin mühendislik tasarımları için oldukça efektif bir araç olduğı sonucuna varılmıştır. Üretim teknolojilerinin gelişmesi ile kompleks optimum sonuçlar çıkarabilen bu aracın kullanımının artması beklenmektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Yapısal Topoloji Optimizasyonu, Hava Aracı Kanatları, ok Noktalı Optimizasyon

ABSTRACT

Hüseyin Cem KULAK

WEIGHT REDUCTION WITH TOPOLOGY OPTIMIZATION FOR AIRCRAFT WINGS

Başkent University Institute of Science

Department of Mechanical Engineering

2024

In aviation, weight significantly impacts aircraft performance and payload capacity. Design processes focus on achieving lighter yet robust structures, albeit time-consuming to attain ideal geometry. Topology optimization, considering set conditions and loads, expedites finding optimal material distribution within desired geometry.

In this thesis study, topology optimization was performed using the Structural Optimization module of ANSYS software for a wing section with a NACA 0012 airfoil and a wing with a 4 m wingspan.

Geometries were modeled using 3D modeling. Then, Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses for the wing section at steady state and sea level with a speed of 100 m/s, were performed with Fluent under incompressible viscous and turbulent flow conditions. Solutions were made at seven different attack angles: -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° . Two different situations were designed for optimizations; First, a rigid spar was positioned in the middle of the wing sections. In the other scenario, two vertical ribs are positioned at 0.25 and 0.5 positions of the chord length. CFD analysis solutions at all angles of attack were transferred separately to the sections in these two scenarios and topology optimizations were performed for the volume ratios were 20% and 10%, respectively. Then, multi-point topology optimization was performed for these two scenarios simultaneously using seven different angles of attack. This was one aspect that differentiated this thesis study from other studies. The simultaneous use of seven different angle of attack solutions in multi-point optimization has not been found in the literature research. Additionally, there are few studies using aerodynamic load calculated with CFD solution for wing geometry.

After the wing section optimization was completed, CFD analysis of a wing with a 4 m wingspan was performed at a flow rate of 0.5 Mach, steady state and 0° angle of attack. The

results for the optimum geometry were examined by applying the 10% volume ratio condition for the fully loaded wing.

The research highlighted the sensitivity of topology optimization to boundary conditions and meshes, emphasizing the need for precise problem definition. Varied factors significantly impact solutions, allowing for the generation of original outcomes. Consequently, topology optimization proves highly effective in engineering designs. Its capability to yield intricate, optimal results foresees increased utilization, especially with advancing production technologies.

KEYWORDS: Structural Topology Optimization, Aircraft Wings, Multi-point Optimization



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Konusu ve Önemi.....	1
1.2. Tezin Düzeni	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kanat İç Yapısalrı İçin Topoloji Optimizasyonu	4
2.2. Şekil Değıştiren (Morphing) Kanat Yapısalrı İçin Topoloji Optimizasyonu ..	10
2.3. Üç Boyutlu Kanatlar İçin Topoloji Optimizasyonu	11
3. HAD ANALİZİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ YAPISAL TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU	14
3.1. Aerodinamik HAD Analizi.....	14
3.1.1. Sıkıştırlabilir akış.....	15
3.1.1.1. Sıkıştırlabilir akışta türbölans modeli	16
3.1.2. Sıkıştırlamaz akış	18
3.1.2.1. Sıkıştırlamaz akışta türbölans modeli	19
3.2. Hava Aracı Kanatları için Yapısal Statik Denge Analizi	19
3.3. Yapısal Topoloji Optimizasyonu Analizi	22
3.3.1 Gradyan tabanlı topoloji optimizasyonu yöntemleri.....	23
3.3.1.1 Asimptotları taşıma yöntemi (MMA).....	24
3.3.1.2. Duyarlılık analizi.....	24
3.3.1.3. Filtreleme	24
3.3.2. Yapısal topoloji optimizasyonu akış şeması.....	25
4. DOĞRULAMA PROBLEMLERİ	26
4.1. Yapısal Topoloji Optimizasyonu Problemleri	26
4.1.1. Problem 1: Basit mesnetlendirilmiş giriş problemi	26
4.1.1.1. Giriş için ağ yapısının oluşturulması.....	27
4.1.1.2. Giriş için sınır koşullarının tanımı	28
4.1.1.3. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları.....	29

4.1.2. Problem 2: Üst yüzeyine basınç uygulanan dikdörtgen problemi.....	31
4.1.2.1. Dikdörtgen geometri için ağ yapısının oluşturulması.....	32
4.1.2.2. Dikdörtgen geometri için sınır koşullarının tanımı	32
4.1.2.3. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları.....	33
4.1.3. Problem 3: Yayılı yük uygulanan küp problemi.....	35
4.1.3.1. Küp için ağ yapısının oluşturulması.....	35
4.1.3.2. Küp için sınır koşullarının tanımı	36
4.1.3.3. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları.....	37
4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Problemi.....	38
4.2.1. Problem tanımı.....	39
4.2.2. HAD analizi için ağ yapısının oluşturulması	40
4.2.3. HAD analizi için sınır koşullarının tanımı.....	43
4.2.4. Ağ yapısından bağımsızlık çalışması	44
4.2.5. Sonuçlar	45
4.2.5.1. Artık (Residual) parametre grafikleri.....	45
4.2.5.2. Kaldırma ve sürüklenme katsayısı grafikleri	48
4.2.5.3. Basınç katsayısı konturları.....	51
4.2.5.4. Hız büyüklükleri konturları.....	56
4.2.5.5. Kaldırma ve sürüklenme katsayılarının deneysel verilerle karşılaştırılması	57
5. AERODİNAMİK YÜK UYGULANAN KANAT KESİTİ İÇİN YAPISAL TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU.....	59
5.1. Problem Tanımı.....	59
5.2 Tasarım Hacmi Tanımı.....	60
5.3. HAD Analizi için Ağ Yapısının Oluşturulması	61
5.4. Ağ Yapısından Bağımsızlık Çalışması.....	62
5.5. Sınır Koşullarının Tanımı	63
5.6 HAD Analizi Sonuçları	64
5.6.1. Artık (Residual) grafikleri.....	64
5.6.2. Kaldırma ve sürüklenme katsayısı grafikleri	67
5.6.3. Basınç katsayısı konturları.....	70
5.7. Yapısal Topoloji Optimizasyonu için Ağ Yapısını Oluşturulması	75
5.8. Topoloji Optimizasyonu için Sınır Koşullarının Tanımlanması	78
5.9. Yapısal Topoloji Optimizasyonu Sonuçları.....	79
5.9.1. Rijit ana giriş problemi için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları	80
5.9.2. Rijit iki nervür problemi için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları..	85

6. ÜÇ BOYUTLU KANAT İÇİN YAPISAL TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU	92
6.1. Problem Tanımı.....	92
6.2. Problemlerin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Çözümleri.....	93
6.2.1. HAD analizleri için sınır koşullarının tanımı ve ağ yapısının oluşturulması	93
6.2.2. HAD analizi sonuçları.....	96
6.2.2.1. Artık (Residual) grafiği	96
6.2.2.2. Kaldırma ve sürüklenme katsayısı grafikleri	97
6.2.2.3. Basınç katsayısı konturları.....	98
6.2.2.4. Mach sayısı konturları.....	99
6.3. Problemin Yapısal Topoloji Optimizasyonu Çözümleri	100
6.3.1. Topoloji optimizasyonu için sınır koşullarının tanımı ve ağ yapısının oluşturulması	101
6.3.2. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları	102
6.3.2.1. Problem 1 için yapısal topoloji optimizasyonu sonucu	102
6.3.2.2. Problem 2 için yapısal topoloji optimizasyonu sonucu.....	104
7. SONUÇ	108
KAYNAKLAR.....	110

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Mikro yapı yaklaşımı. [7].....	3
Şekil 2.2. Alüminyum (sol) ve kompozit (sağ) nervür (rib). [10].....	4
Şekil 2.3. Nervür (rib) optimizasyonuna dahil edilen (sarı renk) ve edilmeyen bölgeler (kırmızı renk) [11].	5
Şekil 2.4. Optimizasyon sonucu elde edilen geometri [11].....	6
Şekil 2.5. Optimum nervür için statik analiz sonucu [11].....	6
Şekil 2.6. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) %20 hacim oranına (V_f) sahip olan nervür geometrisi, (b) %10 kütle oranına (V_f) sahip olan nervür geometrisi [12]....	7
Şekil 2.7. Nervür için sabitlenen ve optimizasyona dahil edilen - edilmeyen bölgeler [13].	7
Şekil 2.8. Topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 0.6 Mach için %20 kütle oranına (M_f) sahip olan nervür geometrisi, (b) 0.85 Mach için %20 kütle oranına (M_f) sahip olan nervür geometrisi [13].	8
Şekil 2.9. Problem için uygulanan sınır koşulları [15].....	9
Şekil 2.10. %50 yoğunluk dağılımına sahip optimum geometri [15].	9
Şekil 2.11. Kanat kesiti için optimizasyon öncesi ve sonrası görseller [15].....	9
Şekil 2.12. Mevcut ve önerilen metot için malzeme dağılımı [29].....	12
Şekil 2.13. Tasarım hacimlerinin farklı alanlara bölünmesi ile alınan sonuçlar [29]	12
Şekil 3.1. Topoloji Optimizasyonu Akış Şeması	25
Şekil 4.1. 60x20x1 mm ölçülerine sahip giriş.....	27
Şekil 4.2. Düzenli ağ yapısının ön yüzey görünümü.....	28
Şekil 4.3. Sınır koşullarının tanımlanması.	28
Şekil 4.4. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği.	29
Şekil 4.5. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları.....	29
Şekil 4.6. Yapısal topoloji optimizasyonu sonucu ($V_f = 0.3$ için $0.001 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir).....	30

Şekil 4.7. Yapısal topoloji optimizasyonu sonucu ($V_f = 0.3$ için $0.7 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir).....	30
Şekil 4.8. Optimizasyon çıktılarının karşılaştırılması (a) Sigmund [53] sonucu, (b) Walker et al. [13] sonucu, (c) Bu çalışmanın sonucu.....	31
Şekil 4.9. 120x20x1 mm dikdörtgen geometri.....	31
Şekil 4.10. Düzenli ağ yapısının XY düzleminde görünümü.....	32
Şekil 4.11. Sınır koşulları.....	33
Şekil 4.12. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) $V_f = 0.6$, (b) $V_f = 0.4$ için.....	33
Şekil 4.13. Topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) referans problem için $V_f = 0.6$ sonucunu, (b) bu çalışmanın $V_f = 0.6$ sonucunu, (c) referans problem için $V_f = 0.4$ sonucunu, (d) bu çalışmanın $V_f = 0.4$ sonucunu göstermektedir.....	34
Şekil 4.14. 20x20x20 mm küp geometrisi.....	35
Şekil 4.15. 8,000 elemandan oluşan küp.....	36
Şekil 4.16. Üst yüzeyine sabit yayılı yük uygulanan, basit mesnetlerle desteklenmiş küp.	36
Şekil 4.17. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) $V_f = 0.4$, (b) $V_f = 0.2$ için.....	37
Şekil 4.18. Şekil 4.16'daki sınır koşulları ve yükler referansında oluşan optimum sonuçlar: (a) ve (b) $V_f = 0.4$ için (iki renk), (c) ve (d) $V_f = 0.2$ için (iki renk).	38
Şekil 4.19. 1 m veter uzunluğuna sahip NACA 0012 simetrik profil.....	39
Şekil 4.20. Tasarım alanı.....	41
Şekil 4.21. Ağ yapısı.....	43
Şekil 4.22. Ağ yapısının yakılaştırılmış görseli.....	43
Şekil 4.23. Sıkıştırılmaz dış akış problemi için sınır koşulları.....	44
Şekil 4.24. Ağ yapısının eleman sayısından bağımsızlığı grafiği.....	45
Şekil 4.25. 0° ve 5° hücum açıları için artık (residual) parametre grafikleri.....	46
Şekil 4.26. 10° ve 15° hücum açıları için artık (residual) parametre grafikleri.....	47
Şekil 4.27. 0° ve 5° hücum açıları için kaldırma katsayısı (c_l) grafikleri.....	48
Şekil 4.28. 10° ve 15° hücum açıları için kaldırma katsayısı (c_l) grafikleri.....	49

Şekil 4.29. 0° ve 5° hücum açıları için sürüklenme katsayısı (c_d) grafikleri.....	50
Şekil 4.30. 10° ve 15° hücum açıları için sürüklenme katsayısı (c_d) grafikleri.....	51
Şekil 4.31. 0° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.	52
Şekil 4.32. 5° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.	53
Şekil 4.33. 10° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.....	54
Şekil 4.34. 15° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.....	55
Şekil 4.35. 0° ve 5° hücum açıları için hız büyüklükleri konturları.	56
Şekil 4.36. 10° ve 15° hücum açıları için hız büyüklükleri konturları.....	57
Şekil 4.37. Deneysel sonuçlar ve bu çalışmanın sonuçları için kaldırma katsayısı (c_l) / hücum açısı grafiği.	58
Şekil 4.38. Deneysel sonuçlar ve bu çalışmanın sonuçları için sürüklenme katsayısı (c_d) / hücum açısı grafiği.	58
Şekil 5.1. Veter boyunca uzanan ana giriş (spar) konfigürasyonu (a), 0.25 ve 0.5 noktalarında konumlandırılan nervür (rib) konfigürasyonu (b).....	60
Şekil 5.2. Tasarım hacminin izometrik görünümü.....	61
Şekil 5.3. Polihedral elemanlardan oluşturulan ağ yapısı.	62
Şekil 5.4. Ağ yapısının eleman sayısından bağımsızlığı grafiği.	63
Şekil 5.5. HAD analizi için sınır koşulları.	64
Şekil 5.6. 0° (üst) ve 5° (alt) hücum açıları için artık (residual) parametre grafikleri.	65
Şekil 5.7. 10° (üst) ve 15° (alt) hücum açıları için artık (residual) parametre grafikleri.	66
Şekil 5.8. 0° ve 5° hücum açıları için kaldırma katsayısı (c_l) grafikleri.....	67
Şekil 5.9. 10° ve 15° hücum açıları için kaldırma katsayısı (c_l) grafikleri.....	68
Şekil 5.10. 0° ve 5° hücum açıları için sürüklenme katsayısı (c_d) grafikleri.....	69
Şekil 5.11. 10° ve 15° hücum açıları için sürüklenme katsayısı (c_d) grafikleri.....	70
Şekil 5.12. 0° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.	71
Şekil 5.13. 5° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.	72

Şekil 5.14. 10° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.....	72
Şekil 5.15. 15° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p)konturları.....	73
Şekil 5.16. -5° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.....	73
Şekil 5.17. -10° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.....	74
Şekil 5.18. -15° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.....	74
Şekil 5.19. Farklı eleman boyutlarına sahip ağ yapıları: (a) 9 mm boyutlu elemanlarla oluşturulan ağ yapısı, (b) 3 mm boyutlu elemanlarla oluşturulan ağ yapısı, (c) 1 mm boyutlu elemanlarla oluşturulan ağ yapısı.....	75
Şekil 5.20. Üç farklı ağ yapısı için topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 9 mm boyutlu elemanlardan oluşan ağ yapısı için, (b) 3 mm boyutlu elemanlardan oluşan ağ yapısı için, (c) 1 mm boyutlu elemanlardan oluşan ağ yapısı için.	76
Şekil 5.21. İki konfigürasyon için oluşturulan ağ yapıları: (a) rijit ana giriş konfigürasyonu için, (b) iki dikey nervür konfigürasyonu için.....	78
Şekil 5.22. Veter boyunca uzanan ana giriş (spar) konfigürasyonu için sınır koşulları (a), 0.25 ve 0.5 noktalarında konumlandırılan nervür (rib) konfigürasyonu için sınır koşulları (b).	79
Şekil 5.23. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) 15° , (b) 10° , (c) 5° hücum açısı için.....	80
Şekil 5.24. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) 0° , (b) -5° , (c) -10° , (d) -15° hücum açısı için.	81
Şekil 5.25. Ana giriş konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 0° hücum açısı için, (b) 5° hücum açısı için, (c) 10° hücum açısı için, (d) 15° hücum açısı için. ($\mathcal{V}_f = 0.2$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.).....	82
Şekil 5.26. Ana giriş konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 0° hücum açısı için, (b) -5° hücum açısı için, (c) -10° hücum açısı için, (d) -15° hücum açısı için. ($\mathcal{V}_f = 0.2$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)	82
Şekil 5.27. Ana giriş konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları (alternatif gösterim): (a) 0° hücum açısı için, (b) 5° hücum açısı için, (c) 10° hücum açısı için, (d) 15° hücum açısı için. ($\mathcal{V}_f = 0.2$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.) ..	83
Şekil 5.28. Ana giriş konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları (alternatif gösterim): (a) 0° hücum açısı için, (b) -5° hücum açısı için, (c) -10° hücum açısı için, (d) -15° hücum açısı için. ($\mathcal{V}_f = 0.2$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)	83
Şekil 5.29. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: Çok noktalı yapısal topoloji optimizasyonu için.	84

Şekil 5.30. Yedi farklı hücum açısı için çok noktalı (multi-point) yapısal topoloji optimizasyonu sonucu: (a) çok renkli gösterim, (b) alternatif gösterim. ($\mathcal{V}_f = 0.2$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir).....	84
Şekil 5.31. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) 15° , (b) 10° , (c) 5° , (d) 0° hücum açısı için.	86
Şekil 5.32. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) -5° , (b) -10° , (c) -15° hücum açısı için. ..	87
Şekil 5.33. İki nervür konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 0° hücum açısı için, (b) 5° hücum açısı için, (c) 10° hücum açısı için, (d) 15° hücum açısı için. ($\mathcal{V}_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.).....	88
Şekil 5.34. İki nervür konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 0° hücum açısı için, (b) -5° hücum açısı için, (c) -10° hücum açısı için, (d) -15° hücum açısı için. ($\mathcal{V}_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)	88
Şekil 5.35. İki nervür konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları (alternatif gösterim): (a) 0° hücum açısı için, (b) 5° hücum açısı için, (c) 10° hücum açısı için, (d) 15° hücum açısı için. ($\mathcal{V}_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.) ..	89
Şekil 5.36. İki nervür konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları (alternatif gösterim): (a) 0° hücum açısı için, (b) -5° hücum açısı için, (c) -10° hücum açısı için, (d) -15° hücum açısı için. ($\mathcal{V}_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)	89
Şekil 5.37. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: Çok noktalı yapısal topoloji optimizasyonu için.	90
Şekil 5.38. Yedi farklı hücum açısı için çok noktalı (multi-point) yapısal topoloji optimizasyonu sonucu: (a) çok renkli gösterim, (b) alternatif gösterim. ($\mathcal{V}_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir).....	90
Şekil 6.1. Üç boyutlu kanat geometrisi.	92
Şekil 6.2. Kanadın HAD analizi için kullanılan tasarım hacmi.	94
Şekil 6.3. Tasarım hacmi için oluşturulan ağ yapısı.	95
Şekil 6.4. Etki geometrisinin ağ yapısına olan etkisi.	95
Şekil 6.5. Kanat için çözülen HAD analizinin artık (residual) grafiği.	96
Şekil 6.6. 0° hücum açısı için kaldırma katsayısı (c_l) grafiği.....	97
Şekil 6.7. 0° hücum açısı için sürüklenme katsayısı (c_d) grafiği.	97
Şekil 6.8. 0° hücum açısı için kök kesitindeki basınç katsayısı (c_p) konturları.	98

Şekil 6.9. Kanat üzerinde 0° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturu gösterimi.....	99
Şekil 6.10. 0° hücum açısı için kök kesitindeki Mach sayısı konturları.....	100
Şekil 6.11. Kanat için oluşturulan ağ yapısı: (a) izometrik görünüm, (b) hücum kenarına yakınlaştırılmış görünüm, (c) kanat köküne yakınlaştırılmış görünüm.	101
Şekil 6.12. Problem 1 için amaç fonksiyonu yakınsama grafiği.....	102
Şekil 6.13. Referans problemin sonuçları ile bu çalışmadaki sonuçların karşılaştırılması: (a) Oktay et al. sonuçları [28], (b) bu çalışmanın sonuçları. ($\mathcal{V}_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir).	103
Şekil 6.14. Problem 2 için amaç fonksiyonu yakınsama grafiği.....	105
Şekil 6.15. İkinci problem için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçlarının izometrik görünümü: (a) 0.25, (b) 0.5, (c) 0.75 açıklıklardaki kesitleri göstermektedir.	105
Şekil 6.16. İkinci problem için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a.1), (b.1) ve (c.1) kesitlerin eleman yoğunluklarının gösterimi, (a.2), (b.2) ve (c.2) kesitlerin tek renk ile gösterimi. ($\mathcal{V}_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.).....	106

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

c	yapısal uyumluluk
c_{b1}	deneysel sabit
c_{b2}	deneysel sabit
c_d	sürüklenme katsayısı
c_f	yüzey sürtünme katsayısı
CFD	Computational Fluid Dynamics
c_l	kaldırma katsayısı
c_p	basınç katsayısı
c_p	sabit basınçta özgül ısı kapasitesi
c_{w1}	deneysel sabit
E	elastik modülü
F_i	uygulanan kuvvetlerin vektörü
f_w	kullanıcı tanımlı bir fonksiyon
G	kayma modülü
g	yer çekimi ivmesi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
K_{ij}	global rijitlik matrisi
k_{ij}^e	elemanın nominal rijitliği
k	termal iletkenlik
L	veter uzunluğu
M	Mach sayısı
M_f	kütle Oranı
M_{ij}	moment bileşenleri
MMA	Method of Moving Asymptotes
N	sonlu eleman sayısı
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
n	penaltı faktörü
p	statik basınç
p_∞	serbest akış basıncı
ρ_∞	serbest akışkanın yoğunluğu
P	basınç
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
Re	Reynolds sayısı
ρ	akışkanın yoğunluğu
ρ_e	elemanın hacim yoğunluk değeri
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
$\acute{S}$	kayma oranı tensörü
t	zaman
τ_w	duvar kayma gerilmesi
U_j	düğüm noktasal yer değiştirmeler
u_i	yer değiştirme bileşeni
u_j	yer değiştirme bileşeni
V	akışkanın hızı
V_∞	serbest akış hızı
V_s	Ses hızı

$\mathcal{V}_f$	hacim oranı
ν	Poisson oranı
ν_τ	sürtünme hızı
$\tilde{\nu}$	türbülanslı girdap viskozitesi
y_p	duvar bölgesinden sonraki ilk hücrenin merkez noktası
q	ısı kaynağı
$\delta_{ij}\varepsilon_{kk}$	rijitlik tensörleri
ε_{ij}	gerinim bileşenleri
σ	türbülanslı Prandtl sayısı
σ_{ij}	gerilim bileşenleri
μ	akışkanın dinamik viskozitesi



1. GİRİŞ

Havacılık endüstrisindeki tasarım süreçlerinde, mühendisler sürekli olarak tasarımlarının daha hafif ve aynı zamanda daha mukavim olması için çaba sarf etmişlerdir. Bu çabaların neticesinde ortaya çıkan ürünlerin, kullanılacakları platformlarda verimi artırmasını amaçlamışlardır. Mühendislik problemlerinde optimum geometriye ulaşabilmek adına çeşitli optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında şekil optimizasyonu, topoloji optimizasyonu ve boyut optimizasyonu yer almaktadır. Topoloji optimizasyonu, yapıları ve ürünleri tasarlama şeklimizde devrim yaratan son teknoloji ürünü bir mühendislik aracıdır. Ağırlığı, maliyeti ve diğer kısıtlamaları en aza indirirken en iyi performansı elde etmek için belirli bir tasarım alanı içindeki malzeme dağılımını optimize eden hesaplamalı bir yöntemdir. Bu yaklaşım, havacılıktan otomotive kadar çeşitli sektörlerde ezber bozmuştur ve mühendislerin daha hafif, daha güçlü ve daha verimli tasarımlar oluşturmalarına olanak sağlamıştır. Temelinde topoloji optimizasyonu, belirli performans hedeflerine ulaşmak için bir tasarım alanı içindeki ideal malzeme dağılımını belirlemeyi amaçlayan sayısal bir tekniktir. Sayısız tasarım olasılığını keşfetmek için hesaplamalı algoritmaların ve sonlu elemanlar analizinin gücünden yararlanır. Temel amaç, fazla malzemeyi kritik olmayan alanlardan uzaklaştırıp yapısal bütünlük ve işlevsellik açısından gerekli olan yerlere yeniden dağıtmaktır. Bu sadece daha hafif ve daha tasarımlara yol açmakla kalmamaktadır, aynı zamanda sürdürülebilirlik açısından hayati önem taşıyan malzeme israfını da azaltmaktadır.

1.1. Tezin Konusu ve Önemi

Bu tez çalışmasında hava aracı kanatlarında ağırlık azaltma amacı ile yoğunluk bazlı yapısal topoloji optimizasyonu yönteminden faydalanılmıştır. Optimize edilecek bütün geometrilerde NACA 0012 simetrik profil kullanılmıştır. İlk olarak profil üzerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçlarının doğrulaması yapılmıştır. Sonra kanat kesiti ve bütün bir kanat için sırasıyla sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir akış koşullarında sonlu hacimler yöntemini kullanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi yapılmıştır. Çözülen aerodinamik problemler sonucunda ortaya çıkan basınç değerleri, kanat kesiti ve bütün bir kanat üzerine uygulanmıştır ve ardından sınır koşulları tanımlanıp yapısal topoloji optimizasyonu çalışmaları yapılmıştır. Değişken hücum açılarındaki aerodinamik yüklerin

kesitlere uygulanmasının ardından, kanat kesitinin bu yükler kullanılarak eş zamanlı bir biçimde çok noktalı topoloji optimizasyonu yapılmış olması, bu tez çalışmasının diğer çalışmalardan farklı olan tarafı olarak vurgulanmıştır. Sonrasında, üç boyutlu dikdörtgensel bir kanat tasarlanarak, üç farklı yapısal topoloji optimizasyonu çalışmaları yapılmıştır. Değişken sınır koşullarının yapısal topoloji optimizasyonu üzerine olan etkilerine değinilmiştir.

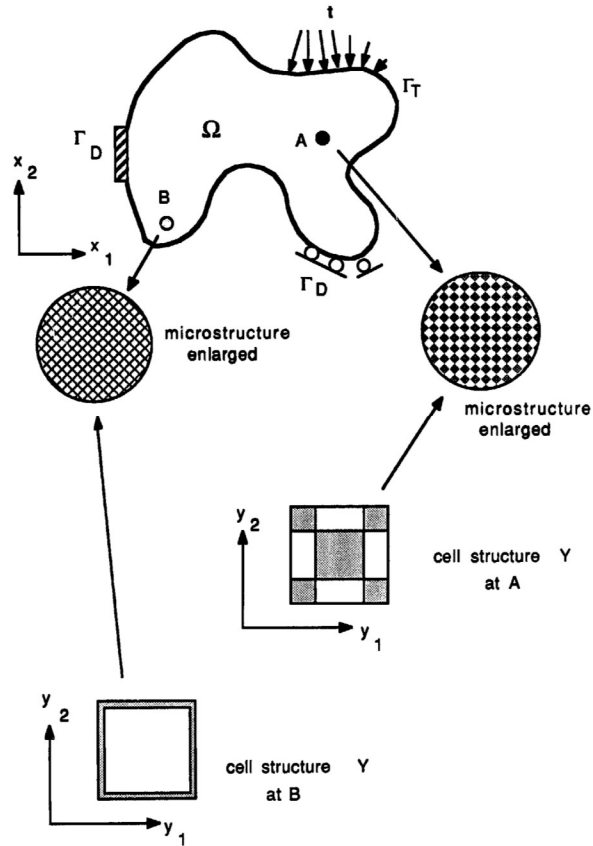
Havacılık alanında çok önemli olan ağırlık parametresini ciddi oranlarda düşürmek için bu yöntemin etkili bir araç olduğunun gösterilmesi ve yöntemin kullanımı sırasında tanımlamaların oldukça dikkatli yapılması gerektiğinin gösterilmesinden dolayı bu çalışma öneme haizdir.

1.2. Tezin Düzeni

Bu tez çalışması yedi ana bölümden oluşmaktadır. İkinci bölüm; kanatlar, iç yapıları ve şekil değiştiren (morphing) kanatlar için yapılan yapısal topoloji optimizasyonu çalışmaları için literatür araştırmasını içermektedir. Üçüncü bölüm, bu tez çalışmasında kullanılacak yöntemler hakkında bilgiler ve kullanılan denklemleri içermektedir. Dördüncü bölüm, doğrulama problemlerini içermektedir. Beşinci bölüm bir kanat kesiti için, altıncı bölüm üç boyutlu bütün bir kanat için farklı sınır şartları tanımlanarak çözülen yapısal topoloji optimizasyon problemleri ve değerlendirmelerini içermektedir. Yedinci bölüm ise, yapılan çalışmaların sonuçlarının değerlendirilmesini içermektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Topoloji optimizasyonu alanındaki çalışmaların temellerinin Maxwell [2] tarafından atıldığı düşünülmektedir. (Logo and Ismail, [3]). Ardından Maxwell tarafından ileri sürülen teoriyi temel alan Michell [4] bu alandaki çalışmaları devam ettirmiştir. Öncü araştırmalar sonrasında ise analitik çalışmalar 1950’li yılların ilk dönemlerine kadar sürmüştür [5], [6]. 1960’lı yıllarda ise matematiksel programlama ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. Amaç, optimize edilen modelin materyal dağılımını yapısal rijitliği ve dayanımı artıracak şekle getirmek olmuştur. 1980 yılından başlayarak, bu yılı takip eden birkaç sene içerisinde ise homojenizasyon yöntemi optimizasyon amacı ile kullanılmıştır. Bu yöntemde ise amaç, mikro yapıların özelliklerini göz önünde bulundurarak makroskobik düzeyde malzemelerin en iyi dağılımını bulmak olmuştur.[7] Bu yöntemi tasvir eden örnek bir görsel Şekil 2.1’de yer almaktadır.

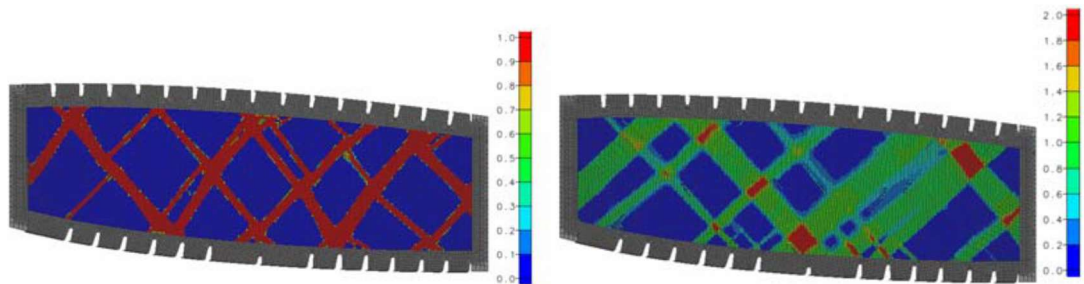


Şekil 2.1. Mikro yapı yaklaşımı. [7]

Bir diğ er yöntem olan yoğ nluk bazlı yaklaşım metodu, Bendsoe [8] tarafından uygulanmıştır. Bu yöntemde materyal dağılımı, yoğ nluklar baz alınarak 0-1 arasında sınırlandırılmıştır. Tam dolu ve boş elemanlar sırası ile 1 ve 0 olarak tanımlanırken, arasında kalanlarda orta yoğ nluklu elemanlar olarak tanımlanmıştır. Metot, optimizasyon problemlerinde yıllardır yoğ n bir şekilde kullanılmaktadır ve oldukça popülerdir. Metodun literatürde bilinen adı SIMP (solid isotropic material with penalization method) olarak yer almaktadır. Bu adlandırma ilk olarak Rozvany and Zhu [9] çalışmasında literatüre kazandırılmıştır.

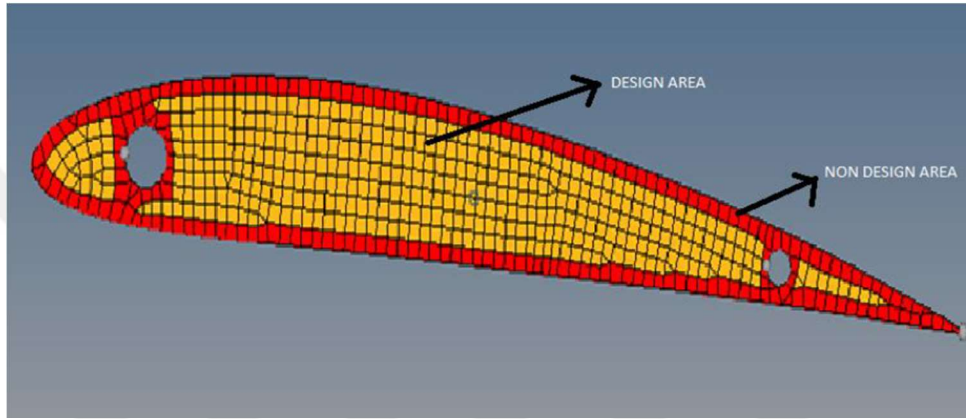
2.1. Kanat İç Yapısalları İçin Topoloji Optimizasyonu

Havacılık alanında yapısal topoloji optimizasyonu yöntemi ile yıllar boyunca farklı çalışmalar yapılmıştır. Araştırmacılar odaklarını çeşitli konular üzerine yoğ nlaştırmışlardır. Bu konulardan bir tanesi ise hava araçlarının i  yapısalları olmuştur. İ  yapısallar özelinde ise nervürler (ribler)  zerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalara örnek olarak Lang et al. [10] tarafından metal ve kompozit malzemeden oluşan bir kanat nerv r  (ribi) için topoloji ve topometri optimizasyonu yapılmıştır. Klasik yoğ nluk bazlı metot kullanılarak izotropik alüminyum nervür için yapısal topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Ardından, şekil optimizasyonunun geliştirilmiş hali olan (araştırmacıların iddialarına göre) topometri optimizasyonu kullanılarak, farklı açılarda dört farklı kata sahip tek yönlü fiber kompozit malzemeden yapılmış olan nervür optimize edilmiştir. Her iki durum için de amaç fonksiyonu minimum gerinim enerjisi olarak belirlenmiştir ve kütle oranı mevcut kütlenin %30'u olacak şekilde kısıtlanmıştır. şekil 2.2'de gösterilen optimizasyon sonuçları karşılaştırıldığında, iki metodun çıktılarının benzerlik g sterdiğı yazarlar tarafından ifade edilmiştir.



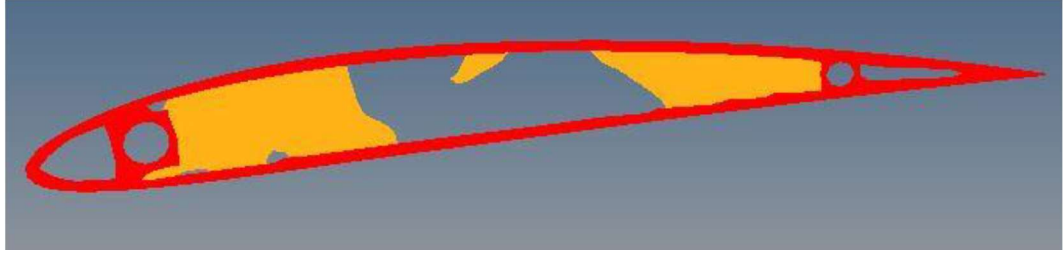
şekil 2.2. Alüminyum (sol) ve kompozit (sağ) nervür (rib). [10].

Soundarya et al. [11] NACA 4412 [1] profiline sahip bir nervür için topoloji optimizasyonu çalışmaları yapmışlardır. Nervür üzerine basınç kuvveti uygulandığı ifade edilmiş, fakat detaylara yer verilmemiştir. Yalnızca kararlı halde analizin yapıldığı belirtilmiştir. Topoloji optimizasyonu kapsamında Şekil 2.3'te gösterilen sarı yüzeyler optimize edilirken kırmızı yüzeyler optimizasyona dahil edilmemiştir. Aynı zamanda nervür, bu bölgelerde deliklerin olduğu noktalardan tüm serbestlik derecelerinde hareketi kısıtlanmıştır.

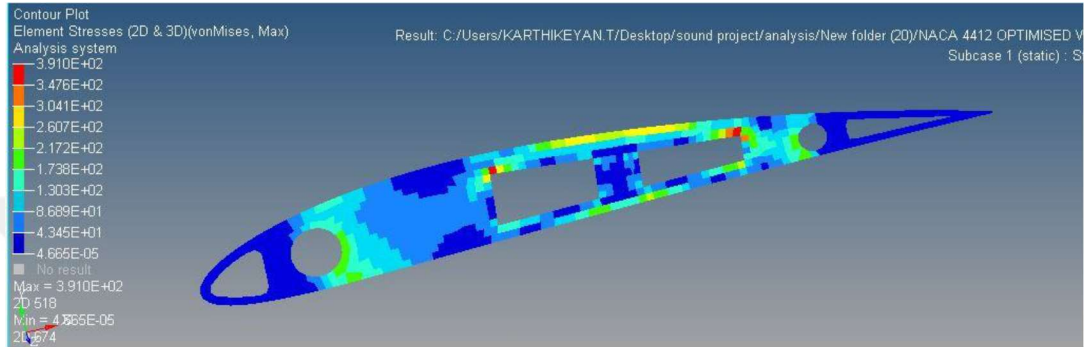


Şekil 2.3. Nervür (rib) optimizasyonuna dahil edilen (sarı renk) ve edilmeyen bölgeler (kırmızı renk) [11].

Nervür malzemesi olan 7000 serisi alüminyumun, izotropik ve homojen dağıldığı kabul edilmiştir. Çözüm, Optistruct yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Optimizasyon sonucunda ortaya çıkan sonuç Şekil 2.4'te görülebilmektedir. Bu geometri araştırmacılar tarafından düzenlenerek Şekil 2.5'teki hale getirilmiştir. Mevcut geometri ve Şekil 2.5'teki nervür için statik analiz yapılmıştır. Ağırlık, 21.8 kg'dan 15 kg'a düşerken, aynı yük altında gerilim ve yer değiştirme değerleri mevcut ve optimum nervür için sırasıyla 299 MPa, 3.34 mm ve 390 Mpa 6.0 mm olarak artış göstermiştir.

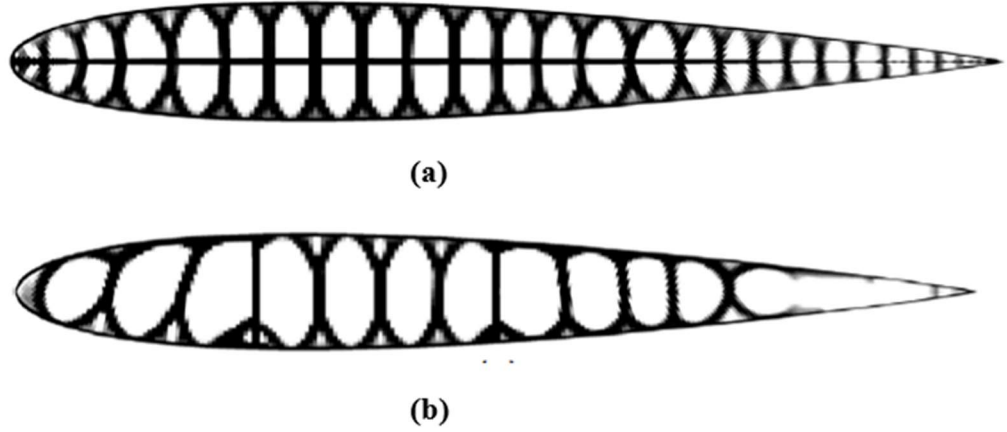


Şekil 2.4. Optimizasyon sonucu elde edilen geometri [11].



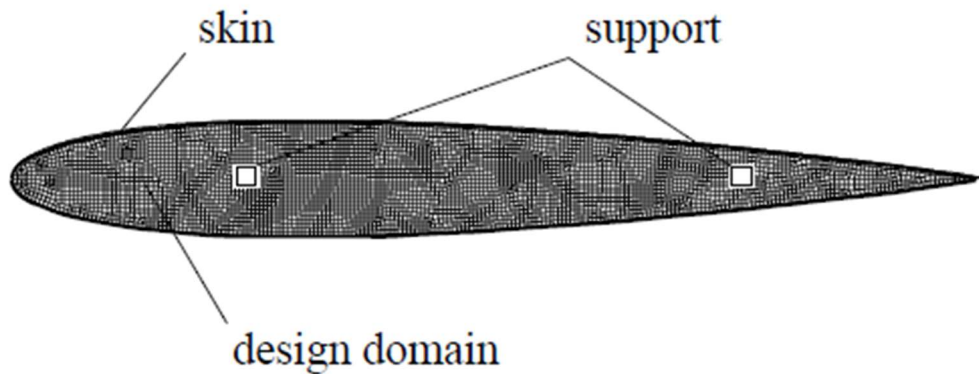
Şekil 2.5. Optimum nervür için statik analiz sonucu [11].

Oktay et al. [12] NACA 0012 kanat profiline sahip iki farklı nervür için yapısal topoloji optimizasyonu çalışması yapmışlardır. Birinci nervür için veter çizgisi boyunca rijit bir ana kiriş (spar), ikinci nervür için ise 0.25 ve 0.5 veter noktalarına rijit, dikey yapısal elemanlar yerleştirilmiştir. Aerodinamik yüklerin bu nervürlere uygulanması için HAD analizi kararlı halde, sıkıştırılamaz akış şartlarında, deniz seviyesi koşullarında 100 m/s akışkan hızına sahip olacak şekilde icra edilmiştir. Yapısal topoloji optimizasyonu sürecinde birinci nervür için hacim oranı (V_f) %20, ikinci nervür için ise %10 olacak şekilde tanımlanmıştır. Şekil 2.6'da, (a) %20 hacim oranı (V_f) tanımlanan optimum topolojiyi, (b) ise %10 hacim oranı (V_f) tanımlanan optimum topolojiyi göstermektedir. Bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde yapılan topoloji optimizasyonları sonuçları Şekil 2.6 (a) ve (b) sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



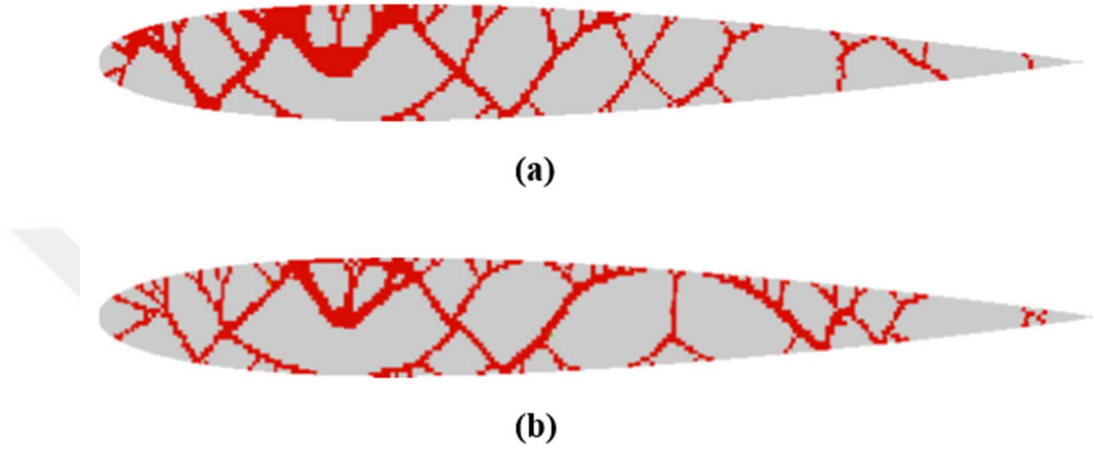
Şekil 2.6. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) %20 hacim oranına (V_f) sahip olan nervür geometrisi, (b) %10 kütle oranına (V_f) sahip olan nervür geometrisi [12].

Maute et al. [13] NACA 0012 kanat profiline sahip bir nervür için yapısal topoloji optimizasyonu, üç boyutlu bir kanat için aeroelastik topoloji optimizasyonu icra etmişlerdir. Aerodinamik yüklemeyi Euler [14] akış prensipleri çerçevesinde uygulamışlardır. Kanat kesiti için HAD analizi kararlı halde, deniz seviyesi koşullarında, 2.5° hücum açısında olacak şekilde icra edilmiştir. Sırasıyla 0.6 ve 0.85 Mach hızına sahip, yüksek hızlı ses altı ve transonik akış koşullarındaki yüklere maruz kalan nervür için topoloji optimizasyonu yapmışlardır. Şekil 2.7’de “skin” olarak ifade edilen kabuk bölgesi, kesit şeklinin bozulmaması için optimizasyona dahil edilmemiştir.



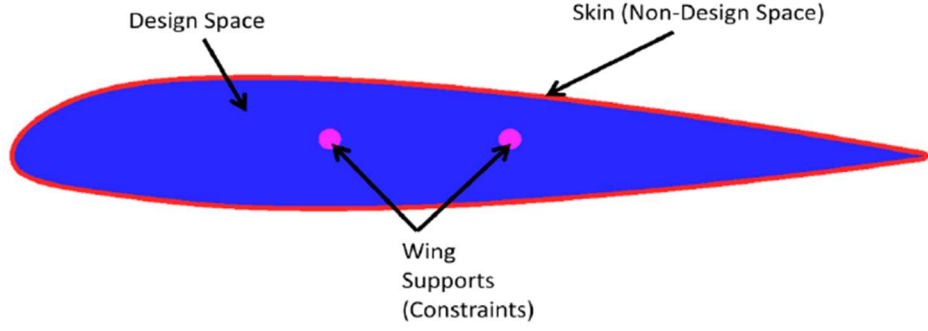
Şekil 2.7. Nervür için sabitlenen ve optimizasyona dahil edilen - edilmeyen bölgeler [13].

Tasarım hacmi için %20 kütle oranı (M_f) tanımlanmıştır. Optimum sonuçlar Şekil 2.8’de paylaşılmıştır. 0.6 ve 0.85 Mach için çıktıları sırasıyla (a) ve (b) olarak belirtilmiştir. Araştırmacılar metodun etkili olduğunu ancak gerçek mühendislik problemleri için hala oldukça pahalı olduğu sonucuna varmıştır.



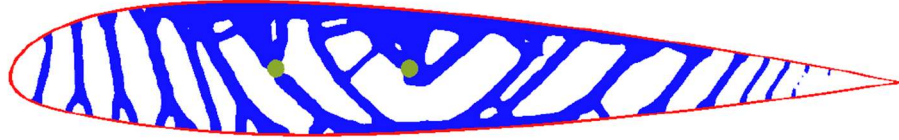
Şekil 2.8. Topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 0.6 Mach için %20 kütle oranına (M_f) sahip olan nervür geometrisi, (b) 0.85 Mach için %20 kütle oranına (M_f) sahip olan nervür geometrisi [13].

Walker et. al [15] NACA 23015 [1] kanat profiline sahip iki boyutlu bir nervür ve üç boyutlu bir kanat kesiti için yapısal performansı geliştirip, kütlece de hafiflemeyi amaçladıkları bir topoloji optimizasyonu çalışması yapmışlardır. Aerodinamik yük, 94.8 m/s akış hızında, 10,000 ft irtifada ve 0° hücum açısına sahip olacak şekilde uygulanmıştır. Şekil 2.9’da araştırmacıların tanımlamış oldukları sınır koşullarına yer verilmiştir. Bu çalışmada da profili çevreleyen kabuk ve sabitlendiği noktalar optimizasyona dahil edilmemiştir.



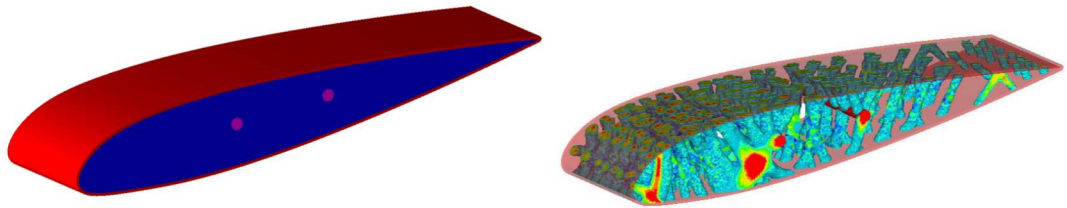
Şekil 2.9. Problem için uygulanan sınır koşulları [15].

Optimum geometri için hacim oranı (V_f) %30 olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon sonucu olarak ortaya çıkan geometri Şekil 2.10'daki gibidir. Sonuç, araştırmacılar tarafından %50 yoğunluk dağılımını gösterecek şekilde görselleştirilmiştir.



Şekil 2.10. %50 yoğunluk dağılımına sahip optimum geometri [15].

Üç boyutlu kanat kesiti ise aynı yük ve sınır koşulları altında optimize edilmiştir. Şekil 2.11'de araştırmacılar tarafından optimizasyon sonucunda elde edilen sonucun %38 yoğunluk dağılımına sahip olduğu bir görseline yer verilmiştir. Ardından, çalışma sonuçlarını doğrulamak amacıyla modelin metal üç boyutlu yazıcıdan üretilmiş versiyonunu kullanarak testler icra etmişlerdir.



Şekil 2.11. Kanat kesiti için optimizasyon öncesi ve sonrası görseller [15].

Shen et al. [16] insansız hava araçları yapıları için karbon fiber takviyeli kompozit bal peteği sandviç paneli kullanarak ağırlık azaltmayı amaçlamışlardır. Bu paneller bir araya getirilerek oluşturulan temsili bir gövdenin içerisinde alınan nervür kesitleri için aerodinamik yükler altında topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Problem için hacim oranı (V_f) %40, penaltı faktörü de 10 olarak tanımlanmıştır. Çalışma sonucunda ortaya çıkan sonuçların gerilme yığılmalarından uzak ve kütlece hafif oldukları, dolayısıyla insansız hava aracı tasarımlarında kullanımının faydalı olabileceği değerlendirilmiştir.

Havacılık uygulamaları kullanılan iç yapılar için inceleme yapılan başka çalışmalar da mevcuttur. Örneğin [17, 18, 19]. Bu çalışmalar ilgili araştırmacılar tarafından incelenebilir.

2.2. Şekil Değiştiren (Morphing) Kanat Yapıları İçin Topoloji Optimizasyonu

Araştırmacıların yoğun olarak araştırdığı bir diğer konu ise şekil değiştiren kanat yapıları olmuştur. Bu alandaki çalışmalar hücum kenarı [20], firar kenarı [21], hücum ve firar kenarı [22], bütün model kanat [23], kanatçık (winglet) [24] olmak üzere çeşitli konularda çalışıldığı anlaşılmıştır. Örnek bir çalışmada Santer and Pellegrino [25] tarafından adaptif hücum kenarına sahip bir hava aracı kanat nervürü, yük yolu temelli yöntem kullanılarak optimize edilmiştir. Metodun yoğunluk bazlı yöntem ile karşılaştırması yapılmıştır. Penaltı faktörü 3 olarak belirlenmiştir ve %5 minimum yoğunluk tanımı yapılmıştır. Sonuç olarak yoğunluk bazlı yöntemin malzeme dağılımının belirlenmesi için ilk etapta kullanılabileceği, ardından yük yolu temelli yöntemin bu tür optimizasyon çalışmalarında kullanılması gerektiği araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir. De Jong [26] iki boyutlu ve üç boyutlu bir kanatçık (winglet) için yapısal topoloji optimizasyonu çalışması yapmıştır. Bu çalışmada sırasıyla mekanizma ve kanatçık optimize edilmiştir. Mekanizma, arzulanan hareketi yapabileceği şekilde optimize edildikten sonra, mekanizma içerisindeki malzeme dağılımı çalışma koşullarını karşılayacak kadar sağlam ve en hafif kütlede olacak şekilde optimize edilmiştir. Optimizasyonlar, önceden geliştirilmiş olan iki boyutlu problemler ile sınırlandırılmış bir programın araştırmacı tarafından geliştirilip üç boyutlu problemleri çözebilecek kabiliyete getirilmiş versiyonu ile yapılmıştır.

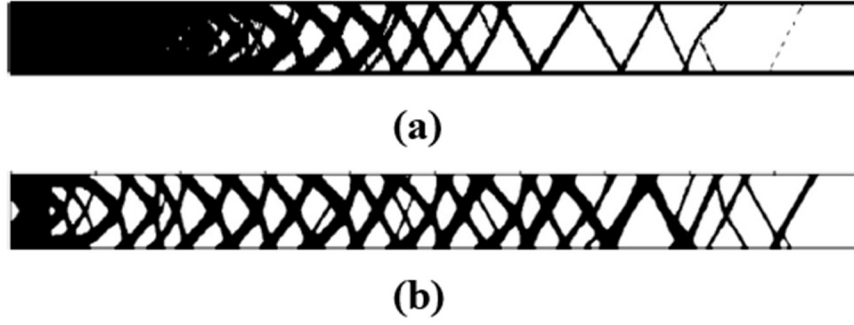
Maute and Reich [27] eyleyiciler yardımı ile şekil değiştirebilen bir NACA 0012 [1] kanat profili için şekil ve topoloji optimizasyonu yapmışlardır. Bunun yanında eyleyici sayısının belirlenebilmesi için de çalışma yapmışlardır. Çalışmada geleneksel iki aşamalı

metot ve eş zamanlı metot uygulaması yaparak sonuçlar arasındaki farkları karşılaştırmışlardır. İki aşamalı metot, araştırmacılar tarafından aerodinamik kuvvetlere bağlı olan şekil optimizasyonu yapıp, ardından ortaya çıkan yeni geometri için topoloji optimizasyonunun yapılması olarak ifade edilmiştir. Eş zamanlı optimizasyon olarakta bu sürecin ayrı süreçler halinde yürütülmemesi gerektiğinden bahsedilmiştir. Karşılaştırmalar, kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin oranına ve eyleyicilerin karşılaşması gereken moment büyüklüğüne göre yapılmıştır. Araştırmacılar, çalışmalarının sonucunda eş zamanlı optimizasyonun, geleneksel yaklaşıma göre kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri oranındaki %15 iyileşme göz önünde bulundurularak daha etkili çözümler verdiğine sonucuna varmışlardır.

2.3. Üç Boyutlu Kanatlar İçin Topoloji Optimizasyonu

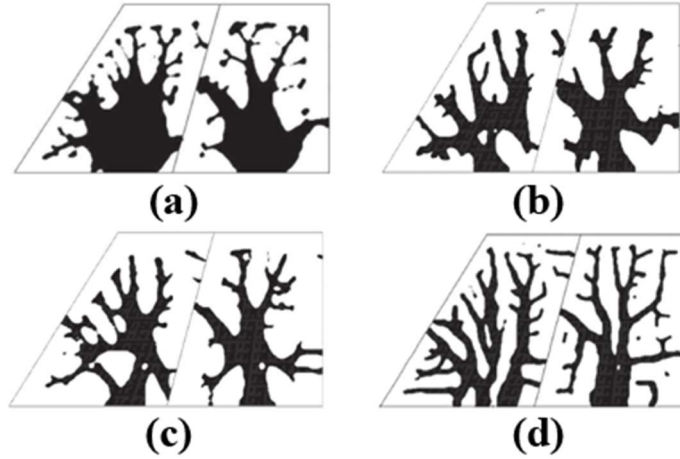
Çeşitli çalışmaların yapıldığı başka bir alan da bütün bir kanadın optimize edilmesi ile ilgili olmuştur. Oktay et al. [28] NACA 0012 [1] kanat profiline sahip üç boyutlu bir kanat için topoloji optimizasyonu çalışması yapmışlardır. Kanat üzerine uygulanacak yükler için önce HAD analizi yapılmıştır. Bu analiz kararlı halde, sıkıştırılabilir viskoz akış şartlarında, 0.5 Mach hızında, 0° hücum açısına sahip olacak şekilde icra edilmiştir. Bu yükler referansında kanat için yapısal topoloji optimizasyonu için penlatı faktörü 3, hacim oranı (V_f) %10 olacak şekilde tanımlanmıştır. Yapısal uyumluluk (compliance) enerjisi incelendiğinde optimum geometrinin mevcut geometriye göre 2.19 kat daha rijit olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuçlar, bu tez çalışmasının beşinci bölümünde çözülen bir problemle karşılaştırılmıştır.

Zhao et al. [29] üç boyutlu bir uçak kanadını alt hacimlere bölerek SIMP metodu ile topoloji optimizasyonu yapmayı amaçlamışlardır. Kanadı optimize etmeden önce, en boy oranı yirmi olan bir giriş üzerinde, tek bir tasarım alanını baz alan geleneksel metot ve bu alanı on alt hacime bölerek optimize eden metodu karşılaştırmışlardır. Optimizasyon alanının birden fazla alt hacime bölünmesi ile birlikte yapısal elemanların geometri boyunca daha düzgün dağıldığı sonuçlar ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.12’de mevcut metot (a) ve bu çalışmada uygulanan metot (b) sonucunda açığa çıkan geometriler için global gerinim enerjisi sırasıyla 320 ve 340 joule değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.12. Mevcut ve önerilen metot için malzeme dağılımı [29].

Bu metot, araştırmacılar tarafından üç boyutlu bir kanat topolojisine uygulanmıştır ve sonuç olarak mühendislik uygulamalarında kullanılabileceği ifade edilmiştir. Araştırmacılar, bu yöntemin optimum dağılımı bulmak için daha çok özgürlüğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.13'te bu sonuçlara yer verilmiştir. (a) geleneksel topoloji optimizasyonu uygulandığında çıkan sonucu, (b) tasarım hacmi radyal bölgelere bölündüğünde çıkan sonucu, (c) tasarım hacmi fan şeklinde bölgelere bölündüğünde çıkan sonucu, (d) blok şeklinde bölündüğünde çıkan sonucu göstermektedir.



Şekil 2.13. Tasarım hacimlerinin farklı alanlara bölünmesi ile alınan sonuçlar [29]

Felix et al. [30] üç boyutlu bir uçak kanadı için, kütle yüklerinin dahil edildiği bir optimizasyon çalışması yapmışlardır. Ayrıca, bu çalışmada birden fazla yükleme koşulunu göz önünde bulundurarak kanadın optimize edilmesi söz konusu olmuştur. Bu koşullar yatay

uçuş ve 3g manevra yükleridir. Yükleme koşullarının aynı anda değerlendirilmesinin ortaya çıkan tasarımlara faydalı olacağı ifade edilmiştir. Başka bir sonuç olarak, özellikle yüksek ivme koşullarının söz konusu olduğu durumlarda ağırlık yüklerinin büyük bir öneme sahip olmadığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.



3. HAD ANALİZİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ YAPISAL TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

3.1. Aerodinamik HAD Analizi

Bir kanattaki aerodinamik yükleme, hava içerisinde hareket ederken bir hava aracının kanadına etki eden kuvvetlerin dağılımını ifade etmektedir. Bu kuvvetler kanat ve hava arasındaki etkileşimin bir sonucudur ve uçağın performansında ve stabilitesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bir kanattaki aerodinamik yükün iki ana bileşeni kaldırma ve sürüklemedir. Kaldırma, yerçekimine karşı gelen ve uçağın havada kalmasını sağlayan kuvvettir. Sürüklenme ise uçağın havada hareket ederken karşılaştığı dirençtir. Ayrıca momentler ve bükülme, burulma ve kesme kuvvetlerini içeren yapısal yükler gibi dikkate alınması gereken başka faktörler de vardır. Mühendislik uygulamalarında bu kuvvetler göz önünde bulundurularak tasarımlar yapılmalıdır.

Akışkanlar dinamiği [31], akışkanların (sıvı veya gaz) hareket halindeki davranışını inceleyen bir bilim dalıdır. Akışkanlar dinamiğinde yaygın olarak karşılaşılan iki temel akış türü sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir akıştır. Bu iki akış tipini anlamak çeşitli mühendislik ve bilimsel uygulamalarda önemlidir. Bu tez çalışmasında iki tip akış türü için de HAD analizi problemleri çözülmüştür. Bölümün devamında sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir akış arasındaki farklara, bu akış tiplerini tanımlamak için kullanılan denklemlere değinilecektir.

Bir akışın sıkıştırılamaz mı yoksa sıkıştırılabilir mi olduğunu anlamak çeşitli mühendislik uygulamaları için oldukça önemlidir. Sıkıştırılamaz akışın yoğunlukla kullanıldığı alanlar genellikle inşaat mühendisliği [32], hidrolik uygulamaları [33] ve düşük hızlı akışkan sistemleriyken [34], sıkıştırılabilir akışa yüksek hızlı aerodinamik [35], tahrik sistemleri [36] ve gaz dinamiği [37] uygulamalarında daha sıklıkla rastlanmaktadır. Hem sıkıştırılamaz hem de sıkıştırılabilir akış için tartışılan denklemler ve ilkeler, akışkan sistemlerinin tasarımı ve analizi için temel sağlamaktadır. Mühendisler ve bilim insanları, bu denklemleri sayısal olarak çözmek ve karmaşık sistemlerdeki akışkan davranışını simüle etmek için HAD yazılımlarını kullanarak çeşitli mühendislik süreçlerinin ve ürünlerinin tasarımına ve optimizasyonuna yardımcı olmaktadır. Bu çözümler yapılırken uygulamanın türüne göre en uygun akış denklemlerinin tanımlanması gerekmektedir.

Özetle, sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir akış analizi arasındaki seçim, akışkanın ve uygulamanın spesifik özelliklerine bağlıdır. Bu akış türleriyle ilgili temel denklemleri ve ilkeleri anlamak, gerçek dünyadaki mühendislik problemlerini çözmek ve akışkanlar dinamiği anlayışının geliştirilebilmesi için çok önemlidir.

Akışkanlar dinamiği, sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir akış da dahil olmak üzere, her biri farklı viskozite seviyeleri sergileyebilen çok çeşitli akış senaryolarını kapsamaktadır. Viskozite, bir akışkanın katmanları arasındaki kaymaya veya göreceli harekete karşı direncini ölçen, akışkanların temel bir özelliğidir [38]. Viskozitenin, sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir akış kavramlarını nasıl etkilediğinden de bahsedilecektir. Hem sıkıştırılamaz hem de sıkıştırılabilir senaryolardaki viskoz akış genellikle türbülansın dikkate alınmasını içermektedir. Türbülans, düzensiz girdaplar ve dalgalanmalarla karakterize edilen karmaşık, kaotik bir akış davranışdır. Türbülanslı viskoz akışı modellemek için mühendisler ve bilim insanları çeşitli türbülans modelleri [39, 40, 41] kullanırlar ve yaygın olarak kullanılan modellerden biri de Spalart-Allmaras türbülans modelidir [42]. Bu tez çalışmasında, HAD analizi çözülmesini gerektiren problemlerde türbülans modeli olarak Spalart-Allmaras kullanılmıştır. Kullanılma sebebi olarak, kütle korunumu, momentumun korunumu denklemleri çözülürken ek olarak sadece tek bir denklem ile türbülans çözümünün yapılabilmesi gösterilebilir. Havacılık uygulamalarında kendini ispatlamış bir denklem olduğu araştırmacılar tarafından sıklıkla bahsedilmiştir. [43] Diğer bir avantajı ise bir denklemin sağlamış olduğu çözüm süresinin diğer türbülans denklemlerine göre daha kısa sürmesi olmuştur. Bu şekilde hesaplamalı sistemler açısından görece daha ucuz olduğu kabul edilmektedir. Türbülans modelinin sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir akış durumlarına nasıl uyarlandığından da bu bölüm içerisinde bahsedilecektir.

3.1.1. Sıkıştırılabilir akış

Sıkıştırılabilir akış, basınç ve sıcaklıktaki değişikliklerin akışkanın yoğunluğunu önemli ölçüde etkilediği davranış tanımlar. Bu tür bir akışa, akışkanın basınç ve sıcaklık değişimlerinden dolayı yoğunlukta önemli değişiklikler yaşayabildiği gazlarda ve yüksek hızlı aerodinamikte karşılaşırlar. Sıkıştırılabilir akış için süreklilik denklemi aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) + \partial \rho / \partial t = 0 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de ρ akışkanın yoğunluğudur, $\mathbf{V}$ akışkanın hızıdır, t ise zamanı temsil eder. Sıkıştırılabilir akışta yoğunluğun sabit olduğu varsayılmaz ve yoğunluktaki değişiklikler bu denklemde hesaba katılmaktadır.

Akış bilimi içerisindeki önemli denklemlerden birisi de Navier-Stokes denklemidir [44]. Bu denklemlerin çözümü kütle, momentum ve enerjinin korunumu ile sağlanır. Denklem aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\rho(\partial \mathbf{V} / \partial t + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki denklem momentum denklemidir. ρ akışkanın yoğunluğudur $\mathbf{V}$ ise hızıdır. p basıncı, t zamanı temsil eder. μ akışkanın dinamik viskozitesidir. $\mathbf{g}$ yer çekimi ivmesi vektörüdür. Son denklem olan enerjinin korunumu denklemi ise aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\rho c_p (\partial T / \partial t + \mathbf{V} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \quad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemde T sıcaklığı, c_p sabit basınçta özgül ısı kapasitesini, k termal iletkenliği, q herhangi bir ısı kaynağını veya yutucuyu (sink) temsil etmektedir.

3.1.1.1. Sıkıştırılabilir akışta türbülans modeli

Sıkıştırılabilir viskoz akışla uğraşırken, sıkıştırılabilirliğin getirdiği ek karmaşıklıklar nedeniyle türbülans modellemesi daha zor hale gelmektedir. Spalart-Allmaras türbülans modeli, HAD simülasyonlarında yaygın olarak kullanılan tek denklemlilik türbülans modelidir. Philippe R. Spalart ve Stephen R. Allmaras tarafından geliştirilen bu model, girdap viskozitesi adı verilen bir değişken için tek bir taşıma denklemini çözerek türbülanslı akış özelliklerinin tahminini basitleştirir [42]. Bu model, taşınım denklemindeki sıkıştırılabilirlik etkileri dikkate alınarak sıkıştırılabilir akışlara uyarlanabilmektedir. Bu tür

akışlar için değiştirilmiş Spalart-Allmaras modeli, sıkıştırılabilirlik etkilerini hesaba katan terimleri içermektedir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{v}) = & c_{b1} \rho \dot{S} \mathbf{v} + c_{w1} f_w \rho \left(\frac{\mathbf{v}}{d} \right)^2 - \frac{1}{\sigma} \nabla [\rho (v + \mathbf{v}) \nabla \mathbf{v}] \\ & + \frac{1}{\sigma} (v + \mathbf{v}) \nabla \rho \nabla \mathbf{v} - \frac{c_{b2}}{\sigma} \rho (\nabla \mathbf{v})^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'te $\mathbf{v}$ türbülanslı girdap viskozitesidir, $\mathbf{V}$ akışkanın hız vektörüdür, t ise zamanı temsil etmektedir. f_w ortalama gerinim hızının etkilerini açıklayan, kullanıcı tanımlı bir fonksiyondur. $\dot{S}$ kayma oranı tensörüdür, σ türbülanslı Prandtl sayısıdır. c_{b1} , c_{w1} ve c_{b2} model sabitleridir. türbülanslı Prandtl sayısı (σ), özel modelleme varsayımlarına ve yerel akış koşullarına göre tanımlanır. Bu değiştirilmiş Spalart-Allmaras modeli, sıkıştırılabilir akışlarda hem türbülans hem de sıkıştırılabilirlik etkilerini hesaba katarak, yüksek hızlı ve değişken yoğunluklu akış senaryolarında türbülans davranışının doğru tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Özetle, Spalart-Allmaras türbülans modeli, sıkıştırılabilir akışkanlar dinamiğinde türbülanslı viskoz akışı simüle etmek için değerli bir araçtır. Türbülans ve sıkıştırılabilirlik etkilerini birleştirerek, mühendislerin ve bilim insanlarının karmaşık akış düzenlerini, sınır katmanlarını ve uçak tasarımı, yanma süreçleri, hava taşıtı tasarımı gibi çok çeşitli mühendislik sistemleri ve uygulamalarının tasarımı ve analizi için kritik olan diğer olayları tahmin etmelerine olanak tanımaktadır. Model, hesaplama verimliliğiyle bilinir ve uçak aerodinamiği de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda önemli uygulamalar bulmuştur. Bu model, hava aracı aerodinamiğinde aşağıdakiler dahil çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır:

1. Kanat Profili ve Kanat Analizi
2. Sürüklenme Tahmini
3. Yüksek Kaldırma Kuvveti Sistemleri
4. Aerodinamik Şekil Optimizasyonu
5. Gürültü Tahmini
6. İz (Wake) Modellemesi

3.1.2. Sıkıştırılamaz akış

Sıkıştırılamaz akış, bir akışkanın yoğunluğunun basınç ve sıcaklıktaki değişikliklerden bağımsız olarak neredeyse sabit kaldığı bir hareketi ifade etmektedir. Bu değerlerdeki değişiklikler ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan dolayı akışkanın yoğunluğunun sabit olduğu ve basınç ve sıcaklıktaki değişikliklerin akışkan üzerinde minimum etkiye sahip olduğu varsayılmaktadır. Sıkıştırılamaz akış genellikle su ve yağlar gibi sıvıların tipik çalışma koşullarındaki davranışını tanımlamak için kullanılmaktadır.

Süreklilik denklemi akışkanlar dinamiğinde temel bir denklemdir ve sıkıştırılamaz akış için aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemde $\mathbf{V}$ akışkanın hız vektörüdür. $\nabla \cdot \mathbf{V}$ ifadesi ise hız vektörünün sapmasını temsil eder. Bu denklem, sıkıştırılamaz akış için hacimsel akış hızının bir akım çizgisi boyunca sabit kaldığını belirtmektedir. Başka bir deyişle kütle korunur ve yoğunluk bir akım çizgisi boyunca sabit kalır ya da ihmal edilebilecek kadar düşük bir düzeyde değişmektedir. Viskoz sıkıştırılamaz akışı tanımlamak için en yaygın kullanılan denklem, daha önce de bahsedilen Navier-Stokes denklemidir. Sıkıştırılamaz akış için Navier-Stokes denklemlerinde $\mu \nabla^2 \mathbf{V}$ terimi, akışkana etki eden viskoz kuvvetleri temsil eder. Bu akış türü için geçerli olan Navier - Stokes denkleminin kısa bir özeti aşağıdaki gibidir:

$$\rho(\partial \mathbf{V} / \partial t + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g} \quad (3.6)$$

Yukarıdaki denklem momentum denklemidir. ρ akışkanın yoğunluğudur $\mathbf{V}$ ise hızıdır. p basıncı, t zamanı temsil eder. $\mathbf{g}$ yer çekimi ivmesi vektörüdür. μ akışkanın dinamik viskozitesidir ve akışkan içindeki iç sürtünmeyi ölçerek bitişik akış katmanlarının birbirini ne kadar kolay geçebileceğini belirler. $\mu \nabla^2 \mathbf{V}$ terimi viskoz yayılımı temsil eder ve akış içindeki sıvı sürtünmesinin etkilerini açıklar. Viskozite, sıkıştırılamaz viskoz akış senaryolarında sınır katmanlarının, sürüklenme kuvvetlerinin ve akışkanın genel davranışının geliştirilmesinde önemli bir rol oynar.

3.1.2.1. Sıkıştırılamaz akışta türbülans modeli

Sıkıştırılamaz viskoz akışta türbülansın etkilerini tahmin etmek için kullanılabilecek türbülans modellerinden birisi sıkıştırılabilir akış için de kullanılabilen Spalart-Allmaras'tır. Bu tez çalışmasındaki çözümlerde Spalart-Allmaras modelinden faydalanılmıştır. Bu model daha karmaşık Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin çözümüyle ilişkili hesaplama karmaşıklığını basitleştiren tek denklemlilik bir türbülans modelidir. Türbülans viskozitesini tahmin etmek için tek bir taşıma denklemi kullanır ve bu da onu hesaplama açısından verimli kılar. Bu model, türbülans girdap viskozitesi $\tilde{\nu}$ için bir taşıma denklemi ile tanımlanır:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \cdot (V\mathfrak{v}) = c_{b1}\dot{S}\mathfrak{v} + \frac{1}{\sigma}[\nabla \cdot (v + \mathfrak{v})\nabla \mathfrak{v} + c_{b2}(\nabla \mathfrak{v})^2] - c_{w1}f_w\left(\frac{\mathfrak{v}}{d}\right)^2 \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'de $\mathfrak{v}$ türbülanslı girdap viskozitesidir, V akışkanın hız vektörüdür ve t zamanı temsil eder. σ türbülanslı Prandtl sayısıdır. c_{b1} , c_{w1} ve c_{b2} model sabitleridir. f_w , ortalama gerinim hızının etkilerini açıklayan, kullanıcı tanımlı bir fonksiyondur. $\dot{S}$, kayma oranı tensörüdür. Spalart-Allmaras modeli $\tilde{\nu}$ için bir tahmin sağlar ve bu daha sonra türbülanslı viskoziteyi hesaplamak için kullanılır ve bu da akış düzenini ve akışkan içindeki momentum ve enerji aktarımını etkiler.

3.2. Hava Aracı Kanatları için Yapısal Statik Denge Analizi

Hava aracı tasarımı, mühendislerin aerodinamik performans ile yapısal bütünlük arasında hassas bir denge kurmaya çalıştığı karmaşık ve çok disiplinli bir alandır. Sonlu elemanlar yönteminin (SEY), hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi sonucunda çıkan yüklerin kullanılarak uygulanmasının, hava aracı kanatlarının davranışını anlamak ve optimize etmek için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşım, mühendislerin akışkan kuvvetleri (aerodinamik) ile kanatların yapısal tepkisi arasındaki etkileşimi kapsamlı bir şekilde analiz etmesine olanak tanıyarak daha verimli ve daha güvenli hava aracı tasarımları yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık bir yapıyı daha küçük ve yönetilebilir öğelere bölerek mühendislik problemlerini çözmek için kullanılan sayısal bir tekniktir. Hava aracı kanatları bağlamında SEY, kanadı iki boyutlu

analiz için üçgenler (triangles) veya dörtgenler (quadrilateral) veya üç boyutlu analiz için dört yüzlü (tetrahedral) ve altı yüzlü (hexahedral) gibi sonlu elemanlara ayırır. Her eleman, çeşitli yükler altındaki davranışını temsil eden bir dizi denklemle tanımlanır. Bu denklemler daha sonra kanadın yapısal tepkisini tahmin etmek için çözülebilecek bir denklem sistemi oluşturmak üzere birleştirilir.

Bu çalışmadaki analizler için kullanılan temel denklemler akış için 3.1 alt bölümünde bahsedilen Navier-Stokes denklemleri ve kanat için yapısal deformasyon denklemleridir. Navier-Stokes denklemleri, kanatla etkileşime giren akışkanın davranışını tanımlar. Bu denklemlerde de kütlenin, momentumun ve enerjinin korunumu ilkeleri esastır.

Yapısal deformasyon denklemleri ise, kanadın aerodinamik kuvvetler de dahil olmak üzere dış yüklere nasıl tepki verdiğini açıklar. Bu denklemler yapısal mekaniğin prensiplerinden türetilmiştir ve tipik olarak küçük deformasyonları ve doğrusal malzeme davranışını varsayan doğrusal esneklik teorisini kapsar [45]. Aerodinamik yüklerin etkisi altında kanat yapısındaki gerilimleri, sapmaları ve deformasyonları hesaplamak için denklemler içerirler.

Denge denklemleri, kanada etki eden kuvvet ve momentlerin karşılık gelen gerilimler ve deformasyonlarla nasıl dengelenmesi gerektiğini açıklar. Bu denklemler Newton'un ikinci yasasından türetilmiştir ve kuvvet dengesi cinsinden yazılmıştır. Üç boyutlu bir analiz için denge denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + \rho g_x = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + \rho g_y = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho g_z = 0 \quad (3.10)$$

Yukarıdaki denklemlerde σ_{ij} gerilim bileşenlerini, ρg_x , ρg_y ve ρg_z ise gövde kuvvetlerini temsil etmektedir.

Diğer bir denklem olan bünye denklemleri ise kanat malzemesindeki gerilimleri gerinimlerle ilişkilendirir ve genellikle doğrusaldır. Bu denklemler aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (3.11)$$

Denklem 3.11’de σ_{ij} gerilim bileşenlerini, $\delta_{ij} \varepsilon_{kk}$ rijitlik tensörlerini, $2G \varepsilon_{ij}$ gerinim bileşenlerini temsil etmektedir. λ ve G (kayma modülü) Lamé sabitleridir ve aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} , \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklemde E elastik modülü, ν Poisson oranını temsil etmektedir. Gerinimleri elde etmek için denklem aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \sigma_{ij} - \frac{\lambda}{2G(3\lambda + 2G)} \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (3.13)$$

Gerinim-yer değiştirme denklemlerine gelecek olursak, bu denklemler gerinimleri deformasyonlara (yer değiştirmelere) bağlar ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.14)$$

Denklem 3.14’te ε_{ij} gerinim bileşenlerini, u_i ve u_j yer değiştirme bileşenlerini temsil etmektedir. Bu denklem, Hooke yasası (Hooke’s Law) denklemi olarak bilinen 3.11 denkleminde yerine koyulmaktadır. Ardından, 3.8, 3.9 ve 3.10 denklemlerinin indis

gösteriminde denklemler yerine koyulmaktadır ve aşağıdaki denklem 3.15 ortaya çıkmaktadır:

$$(\lambda + G) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + b_i = \rho g_i \quad (3.15)$$

Uyumluluk denklemleri deformasyonların birbiriyle tutarlı olmasını sağlar. Bu denklemler, deformasyonların malzemede süreksizliklere veya aşırı kaymaya (shear) yol açmamasını sağlar. Bunlar gerinim-yer değiştirme denklemlerinden türetilir.

Sınır koşulları yapısal deformasyon analizinde kritik öneme sahiptir. Kanat yapısının belirli noktalarındaki yer değiştirme ve/veya kuvvet kısıtlamalarını tanımlarlar. Örneğin, kanattaki belirli noktaların sabit olduğu, diğerlerinin ise serbestçe deforme olmasına izin verildiği belirtilebilir. Uygun sınır koşullarına ve yüklere bağlı olarak bu denklemlerin çözülmesi, kanadın aerodinamik yükler de dahil olmak üzere dış kuvvetlere nasıl tepki verdiğinin tam bir tanımını sağlar. Sonuç, çeşitli uçuş koşullarında uçağın yapısal bütünlüğünü ve güvenliğini sağlamak için çok önemli olan kanat deformasyonunun, gerilimlerinin ve gerinimlerinin tahminidir.

Bu bölümde bahsedilen denklemler ve ilişkiler kullanılarak bölüm 4'teki problemlerin bir kısmı çözülmüştür. Topoloji optimizasyonu kısımlarının çözülebilmesi için de devam eden alt bölümdeki denklemlerden yararlanılmıştır.

3.3. Yapısal Topoloji Optimizasyonu Analizi

Yoğunluğa dayalı yapısal topoloji optimizasyonunda evrimsel algoritmalar [46], gradyan tabanlı yöntemler, makine öğrenimi teknikleri [47] gibi çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanılabilir. Evrimsel algoritmalar, karmaşık problemlerin küresel optimizasyonu için genetik algoritmalar [48] ve parçacık sürüsü optimizasyonunu [49] kullanmaktadır. Güncel olarak makine öğrenimi teknikleri ise optimizasyon sürecini modellemek ve optimum tasarımları tahmin etmek için sinir ağlarının kullanılmasını içermektedir [50].

Bu tez çalışmasındaki problemlerin çözümünde yoğunluk bazlı topoloji optimizasyonu yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin temel amacı, belirli bir tasarım alanı içinde ağırlığı en aza indirirken yapısal performansı en üst düzeye çıkaran optimum malzeme

dağılımını bulmaktır. Malzeme dağılımının bir yapının sağlamlığını ve yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkileyebileceği ilkesine dayanmaktadır. Optimizasyon problemi, çeşitli kısıtlamalara tabi iken tipik olarak yapısal uyumluluk (sertliğin maksimuma çıkarılması) ile ilgili olan bir amaç fonksiyonunun minimizasyonu olarak matematiksel olarak formüle edilir. Tasarım alanı küçük elemanlara bölünmüştür ve her elemanın yoğunluğu, en uygun konfigürasyonu elde etmek için değiştirilmektedir. Her bir öğedeki malzeme yoğunluğu, 0 (boş) ile 1 (tam dolu) arasında değişebilen bir tasarım değişkeni olarak temsil edilir. Bu tipteki bir optimizasyon problemi, aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\begin{aligned}
 K_{ij}U_j &= \mathbf{F}_i \\
 \min c(\rho) &= F_i U_i = U_i K_{ij} U_j = \sum_{e=1}^N ((\rho_e)^n \cdot u_i^e k_{ij}^e u_j^e), 0 \leq \rho \leq 1 \\
 v &= \sum_{e=1}^N \rho_e v_e \\
 \sum_{e=1}^N \rho_e v_e / \sum_{e=1}^N v_e &= v_f
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Yukarıda yazılmış olan denklemlerde K_{ij} global rijitlik matrisini, $\mathbf{F}_i$ uygulanan kuvvetlerin vektörünü, U_j düğüm noktasal yer değiştirmeleri temsil etmektedir. Optimizasyon probleminde bu üç değer yer aldığı denge durumunun sağlanması gerekmektedir. Amaç fonksiyonu olan yapısal uyumluluğu (compliance) c , elemandaki hacim yoğunluk değerini ρ_e , penaltı faktörünü n , tam dolu bir elemanın nominal rijitliğini k_{ij}^e , sonlu eleman sayısını ise N temsil etmektedir.

Problemin kısıtlamaları, amaç fonksiyonunun tanımlanması göz önünde bulundurularak çözümler yapıldığında yapısal uyumluluğun (compliance) minimize edildiği görülecektir.

3.3.1 Gradyan tabanlı topoloji optimizasyonu yöntemleri

Gradyan tabanlı yöntemler, malzeme dağılımını yinelemeli olarak güncellemek için gradyan bilgisini kullanmaktadır. Bu yöntemler, tasarım değişkenlerini yinelemeli olarak

güncellemek ve optimal bir çözüme doğru yakınsama yapmak için amaç fonksiyonundaki en dik yükseliş veya inişin yönünü temsil eden gradyana dayanmaktadır. Yoğunluğa dayalı topoloji optimizasyonu, yapının ağırlığını en aza indirirken, genellikle sertlik olarak tanımlanan yapısal performansı en üst düzeye çıkarmak amacıyla bir tasarım alanı içinde en uygun malzeme dağılımını bulmak için gradyan tabanlı yöntemler kullanılmaktadır.

Gradyan tabanlı yöntemlerde, amaç fonksiyonunun gradyanı her bir elemandaki malzeme yoğunluğuna göre hesaplanmaktadır. Yukarıda bahsedildiği gibi gradyan, amaç fonksiyonunun en dik yükselişi (maksimize ediliyorsa) veya en dik inişine (minimizasyon yapılıyorsa) işaret etmektedir. Bu yöntem, doğası gereği yinelemelidir. Malzeme yoğunlukları için ilk tahminle başlayıp, gradyanı hesaplamaktadır ve ardından optimum çözüme doğru ilerlemek için yoğunlukları güncellemektedir. Süreç, bir yakınsama kriteri karşılanıncaya kadar, tipik olarak amaç fonksiyonundaki değişiklik yeterince küçük hale gelinceye kadar devam eder. Örnekler arasında asimptotları taşıma yöntemi (MMA) [51] ve düzey belirleme (level set) yöntemi [52] yer almaktadır. Bu tez çalışmasındaki problemlerin çözümlerinde MMA kullanılmıştır.

3.3.1.1 Asimptotları taşıma yöntemi (MMA)

Asimptotları taşıma yöntemi (MMA), malzeme yoğunlukları üzerindeki sınırlı kısıtlamaları verimli bir şekilde ele almaktadır ve özellikle yapısal uyumluluk minimizasyonu problemleri için uygun olduğu bilinmektedir. Yöntemle ilgili detaylı bilgilere Svanberg [51] çalışmasında yer verilmiştir.

3.3.1.2. Duyarlılık analizi

Duyarlılık analizi, topoloji optimizasyonunda gradyan tabanlı yöntemlerin önemli bir bileşenidir. Malzeme yoğunluklarına göre amaç fonksiyonunun kısmi türevlerini hesaplamaktadır. Bu türevler, malzeme yoğunluğundaki değişikliklerin amaç fonksiyonunu nasıl etkilediğini belirlemek için kullanılmaktadır.

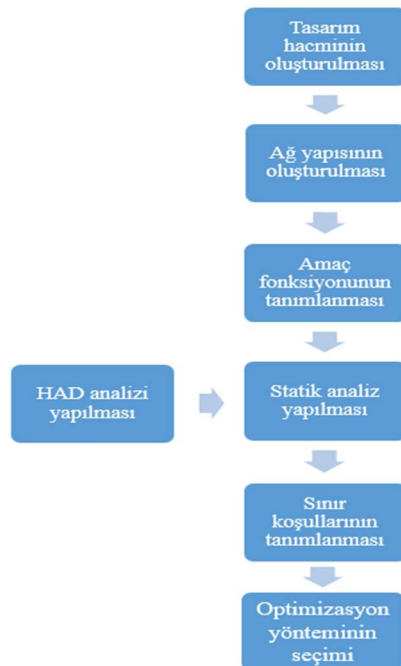
3.3.1.3. Filtreleme

Gradyan tabanlı yöntemler, özellikle büyük ölçekli ve karmaşık problemler için hesaplama açısından yoğun olabilmektedir. Yakınsamanın, optimizasyon parametrelerinin

seçimine oldukça duyarlı olduğu bilinmektedir. Tasarımda dama tahtası desenlerinden kaçınmak için yoğunluk dağılımına sıklıkla filtreleme teknikleri uygulanmaktadır.

3.3.2. Yapısal topoloji optimizasyonu akış şeması

HAD analizi ve sonuçları elde edildikten sonra, yapısal topoloji optimizasyonu yapılırken Şekil 3.1'deki adımlar takip edilmiştir. Bunlardan ilki tasarım hacminin oluşturulması ile başlamıştır. Bu hacim malzemenin dağıtılabileceği hacmi temsil etmektedir. Ardından, tasarım alanı ağ yapısı oluşturularak daha küçük elemanlara bölünmüştür. Tasarım alanının tanımlanmasının ardından amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu fonksiyon, belirlenen uygulamaya bağlı olarak sertliği en üst düzeye çıkarmak, ağırlığı en aza indirmek, termal iletkenliği optimize etmek veya birden fazla amacı içeren, araştırmacının inisiyatifinde olan çeşitli hedefleri temsil edebilir. Amaç fonksiyonu olarak minimum yapısal uygunluk tanımlanmıştır. Tasarımın gerilim seviyeleri, hacimsel oranlar, üretim sınırlamaları veya geometrik faktörler gibi çeşitli gereksinimlerin karşılanabilmesine olanak sağlayan sınır koşulları tanımlanmıştır. Tasarım alanı içindeki ögelere veya bölgelere malzeme özelliklerinin atanmıştır. Bu sayede yapının her bir elemanının yüklere ve çevre koşullarına nasıl tepki vereceğini belirlenmiştir. En son olarak, problemlerin çözümü için yoğunluk bazlı topoloji optimizasyon yönteminin kullanılacağına karar verilmiştir.



Şekil 3.1. Topoloji Optimizasyonu Akış Şeması

4. DOĞRULAMA PROBLEMLERİ

Bu bölüm yapısal topoloji optimizasyonu ve HAD analizleri için çözülen doğrulama problemlerinin tanımlarını ve sonuçlarını içermektedir. Bu problemlerinin çözümleri sonlu elemanar yöntemini kullanan ANSYS ile yapılmıştır. Problem çözümlerinin teknik açıdan doğru bir yaklaşımla yapıldığı, deneysel verilerle ve literatürde yapılan çalışmalar ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Çalışmanın teknik açıdan yararlı olduğunu kanıtlayabilmek için doğrulama çalışmalarının yapılması önem taşımaktadır.

4.1. Yapısal Topoloji Optimizasyonu Problemleri

Bu alt bölümde üç farklı problem çözülmüştür. Bu problemler sırasıyla, basit mesnetlendirilmiş kiriş problemi, üst yüzeyine basınç uygulanan dikdörtgen problemi ve yayılı yük uygulanan küp problemi olarak adlandırılmıştır. Bu üç problemde statik yükler kullanılmıştır.

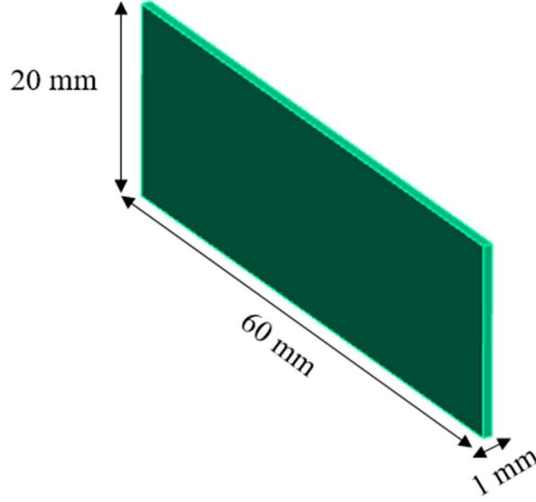
Yapısal topoloji optimizasyonu için problemler kurgulanırken ihmal edilecek durumlar, optimizasyon sonuçlarının beklenenden farklı olmasına sebep olabilmektedir. Bu yüzden, problemlerin amacının ve sınır koşullarının çok dikkatli bir şekilde tanımlanmasını gerektirmektedir.

4.1.1. Problem 1: Basit mesnetlendirilmiş kiriş problemi

Problemde 60x20x1 mm ölçülerine sahip bir kiriş kullanılmıştır. Geometri, basit mesnetlenmiş bir kirişin yarısının modelidir. Ölçülerden de anlaşılacağı üzere geometri birim kalınlığa sahip olacak şekilde modellenmiştir. Referans alınan problemde araştırmacılar [13], çıktılarını ALTAIR Optistruct programını kullanarak, Sigmund [53] tarafından yazılmış olan doksan dokuz koddan oluşan ve basit mesnetlendirilmiş kiriş modelinin optimizasyonu içeren problem ile karşılaştırarak doğrulamışlardır. Bu çalışmada da aynı problem kurgulanmıştır ve optimizasyon sonuçları, diğer iki sonuç ile kıyaslanmıştır.

Referans çalışmalarda iki boyutlu olarak icra edilen optimizasyon, bu çalışmada üç boyutlu olarak yapılmıştır. Amaç aynı sonuçların üç boyutlu geometrilerde de uygun sınır

koşulları tanımlandığında elde edilebildiğinin gösterilmesi olmuştur. Kirişin üç boyutlu modeli Şekil 4.1’de görülmektedir.

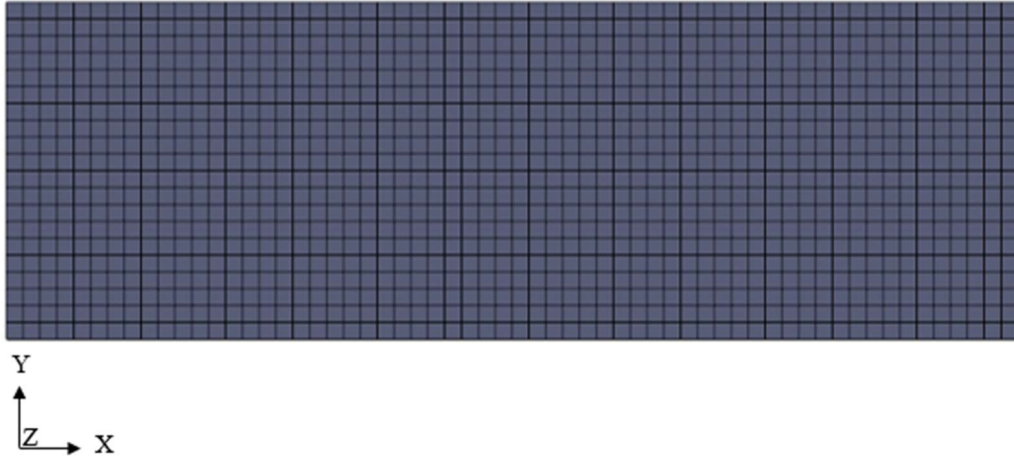


Şekil 4.1. 60x20x1 mm ölçülerine sahip kiriş.

Yapısal topoloji optimizasyonu yapılırken yeni geometrinin hacmi ile mevcut geometrinin hacmi arasındaki oranın %30 olması hedeflenmiştir. Amaç fonksiyonu minimum uygunluk (compliance) olarak belirlenmiştir. Penaltı faktörü 3 olarak alınmıştır. Bu faktör, 0-1 probleminin doğasından kaynaklı yoğunlukların bu iki değer arasında kaldığı durumlarda, yoğunlukları boş ya da tam dolu olmaya zorlamaktadır. Problemin çözümü için yapılması gereken tanımlamalar takip eden alt bölümlerde devam etmiştir.

4.1.1.1. Kiriş için ağ yapısının oluşturulması

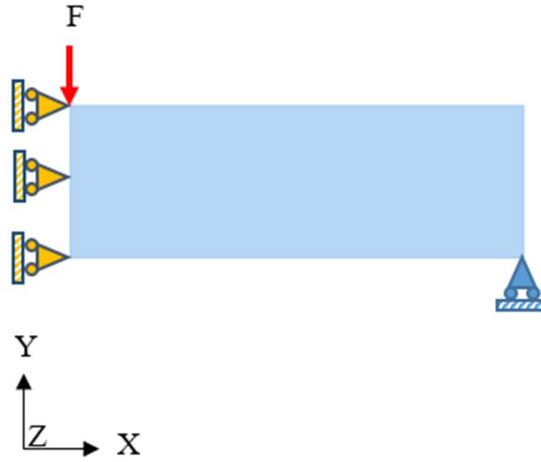
Kiriş için eleman boyutları 1 mm olan, 8,803 düğüm noktasına sahip olan 1,200 altıyüzlü (hexahedral) elemandan oluşan düzenli bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısının ön yüzeyden görünümü Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2. Düzenli ağ yapısının ön yüzey görünümü.

4.1.1.2. Kiriş için sınır koşullarının tanımı

Üç boyutlu model ve ağ yapısı oluşturulduktan sonra, problem için sınır koşulları tanımlanmıştır. Şekil 4.3'te bu koşullar görselleştirilmiştir.



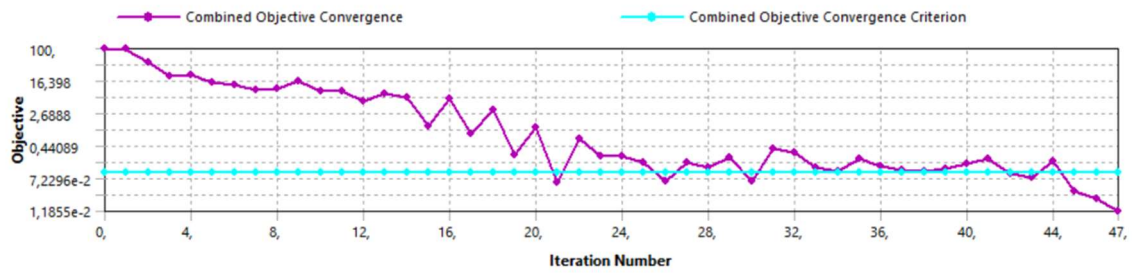
Şekil 4.3. Sınır koşullarının tanımlanması.

Yukarıdaki şekilde F kirişin tek bir elemanı üzerine $-Y$ yönünde doğrudan uygulanan 1 N büyüklüğündeki kuvveti, mavi renkli mesnet kirişin Z ve Y eksenlerindeki hareketinin kısıtlandığını, sarı renkli mesnetler ise tüm yüzey boyunca X yönündeki simetri koşulunu (kirişin yarısının modellendiği unutulmamalıdır.) temsil etmektedir. Kirişin ön ve arka

yüzeyleri için de Z yönünde simetri koşulu tanımlanmıştır. Tanımlamalar yapıldıktan sonra statik analiz çözümü yapılmıştır.

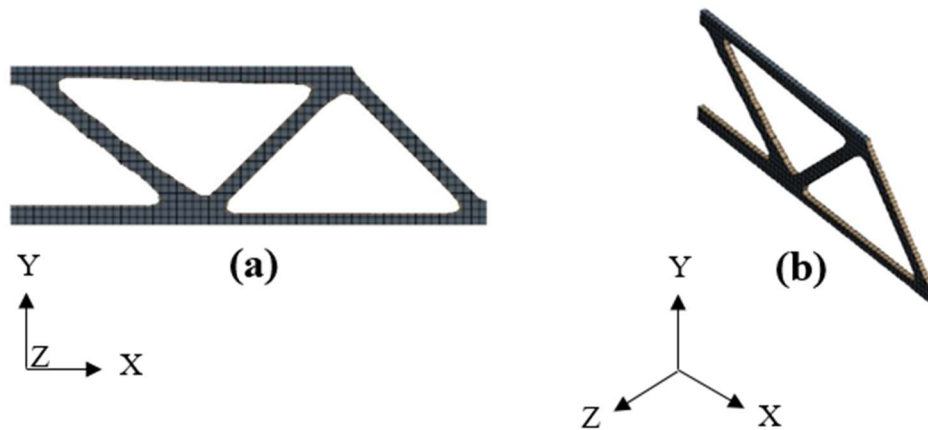
4.1.1.3. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları

Bütün gerekli tanımlamalar yapıldıktan sonra çözüm aşamasına geçilmiştir. Problem, 47 iterasyondan sonra yakınsamıştır. Çözüm 1 dakika sürmüştür. Şekil 4.4 amaç fonksiyonunun yakınsadığını göstermektedir.



Şekil 4.4. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği.

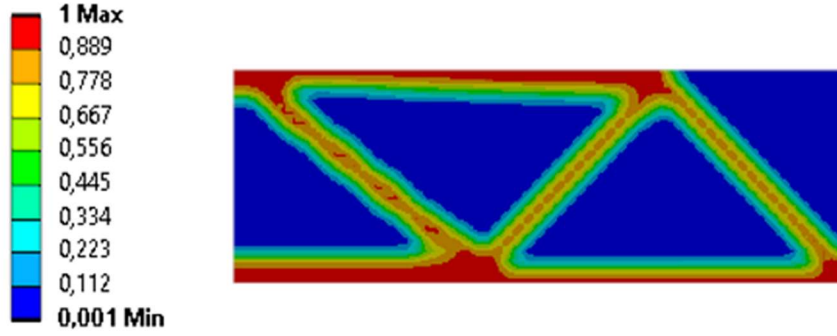
Ortaya çıkan optimum topoloji sonucu Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Bu şekilde (a), kirişin ön yüzeyine tam karşıdan bakıldığında görülebilecek sonucu, (b) ise kirişin izometrik görünümdeki sonucunu temsil etmektedir.



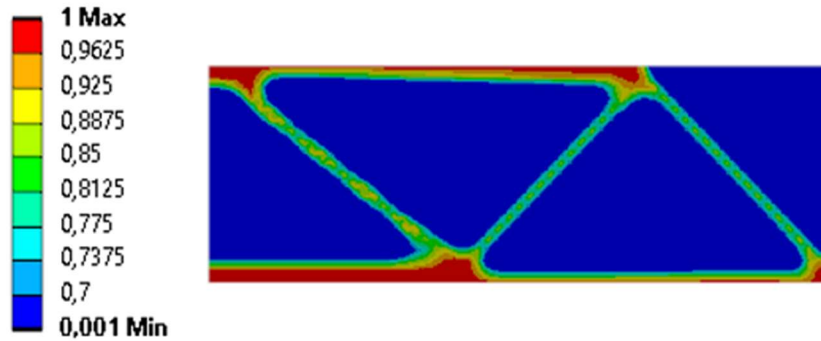
Şekil 4.5. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 de bütün tasarım hacmini kapsayacak şekilde optimizasyon sonuçları görülmektedir. Şekillerde solda belirtilen sayısal değerler, elemanların yoğunluk

değerleridir. Tasarım hacminin elemanlarının 0-1 arasındaki yoğunluk değerleri Şekil 4.6’da görselleştirilmiştir. Şekil 4.7’de ise bu $\mathcal{V}_f = 0.3$ için yoğunluk değerleri $0.7 \leq \rho \leq 1$ olan elemanları gösteren filtre uygulanmıştır. Bu iki gösterim arasındaki temel fark budur.

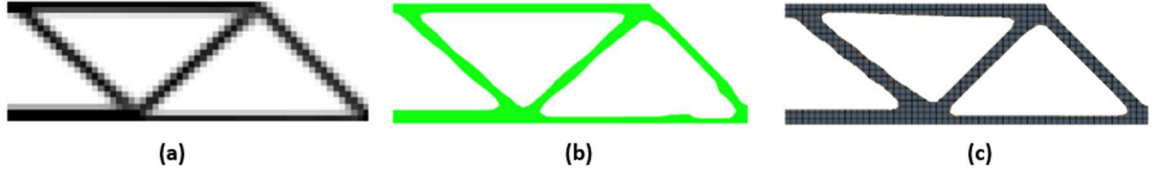


Şekil 4.6. Yapısal topoloji optimizasyonu sonucu ($\mathcal{V}_f = 0.3$ için $0.001 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir).



Şekil 4.7. Yapısal topoloji optimizasyonu sonucu ($\mathcal{V}_f = 0.3$ için $0.7 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir).

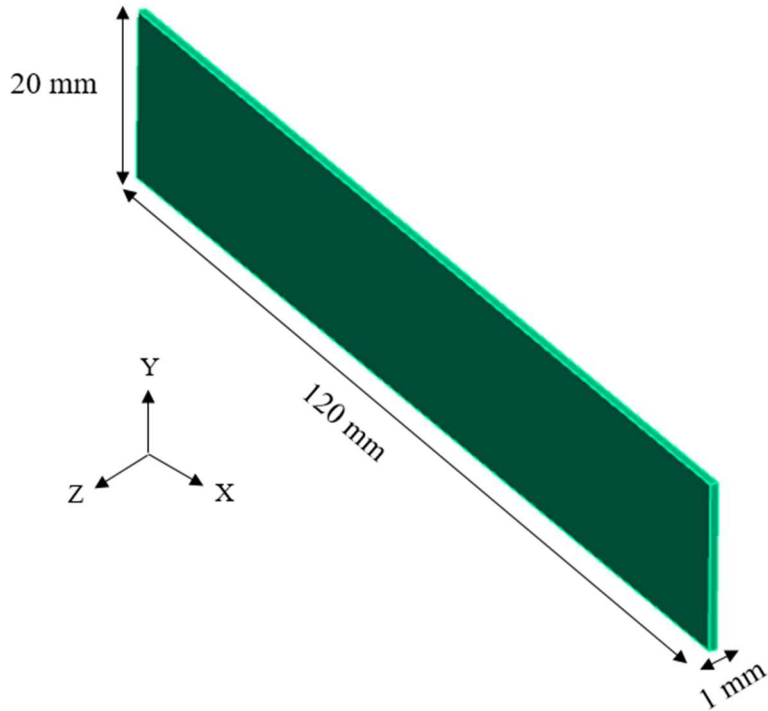
Şekil 4.8’de üç sonucun karşılaştırıldığı görsele yer verilmiştir. Bu şekilde (a) Sigmund [53] araştırmasının sonucunu , (b) Walker et al. [13] araştırmasının sonucunu , (c) ise bu çalışmanın sonucunu temsil etmektedir. Sonucun diğer çalışmalar ile karşılaştırılmasının ardından uygulanan yaklaşımın doğru olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 4.8. Optimizasyon çıktılarının karşılaştırılması (a) Sigmund [53] sonucu, (b) Walker et al. [13] sonucu, (c) Bu çalışmanın sonucu.

4.1.2. Problem 2: Üst yüzeyine basınç uygulanan dikdörtgen problemi

Bu problemde ise 120x20x1 mm ölçülerine sahip olan bir dikdörtgen geometri için topoloji optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Geometri Şekil 4.9’da görülmektedir. Dikdörtgenin üst yüzeyine basınç uygulanmıştır. Alt yüzey için de iki eksenle sabitlenip üçüncü eksenle de simetri koşulu uygulanmıştır. Bu koşulların detaylarından 4.1.2.2 bölümünde bahsedilmiştir.



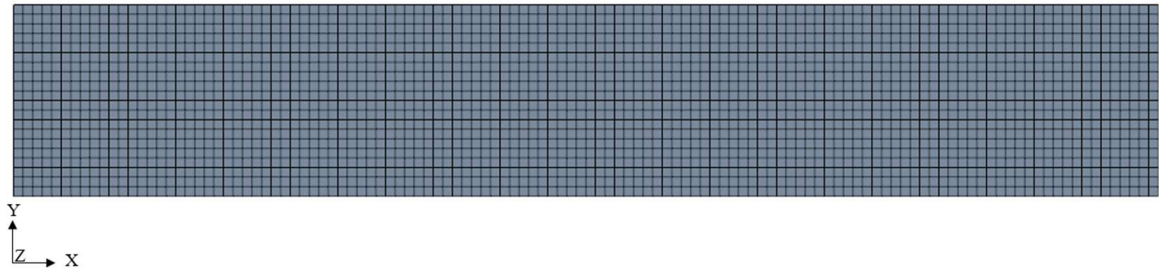
Şekil 4.9. 120x20x1 mm dikdörtgen geometri.

Bu problem için yeni geometrinin hacmi ile mevcut geometrinin hacmi arasındaki oranın (V_f) sırasıyla %60 ve %40 olmasının hedeflendiği iki farklı topoloji optimizasyonu

özümü yapılmıştır. Bu problemde de önceki doğrulama çalışmasında olduğu gibi minimum uygunluk (compliance) amacı ile optimizasyon çözümü yapılmıştır ve penaltı faktörü 3 olarak alınmıştır. Sonuçlar, Oktay vd. [12] çalışmasındaki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

4.1.2.1. Dikdörtgen geometri için ağ yapısının oluşturulması

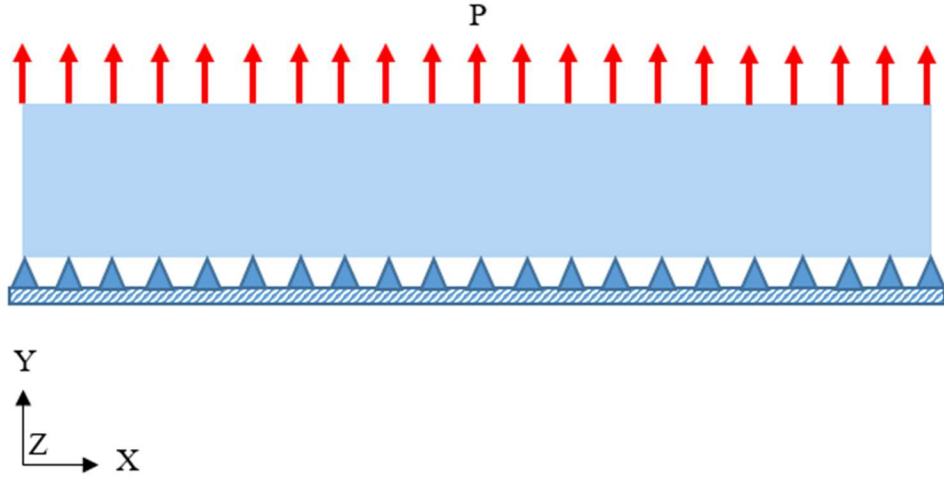
Geometri için, 17,503 düğüm noktasına sahip 2,400 altıyüzlü (hexahedral) eleman içeren düzenli bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Geometri ve oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Ağ yapısının eleman boyutları bu çalışma için de 1 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Düzenli ağ yapısının XY düzleminde görünümü.

4.1.2.2. Dikdörtgen geometri için sınır koşullarının tanımı

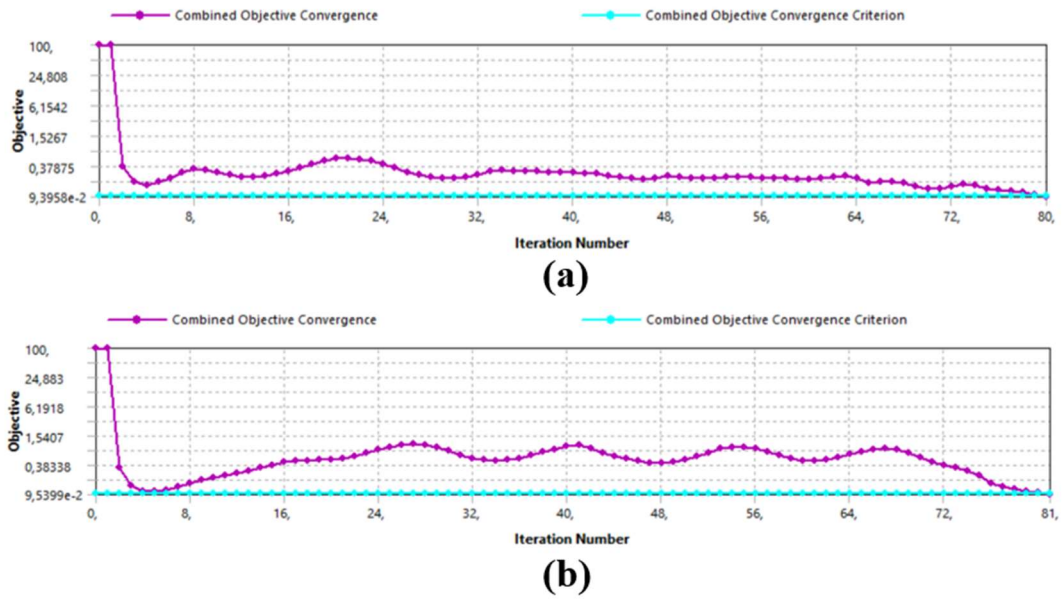
Problem için tanımlanan sınır koşulları Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Bu şekilde P kirişin üst yüzeyindeki elemanlar için Y yönünde doğrudan uygulanan 50 MPa basıncı, mavi renkli mesnet kirişin bütün eksenlerdeki hareketinin kısıtlandığını temsil etmektedir. Kirişin ön ve arka yüzeyleri için de Z yönünde simetri koşulu tanımlanmıştır.



Şekil 4.11. Sınır koşulları.

4.1.2.3. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları

Bu alt bölümde ikinci problem için yapısal topoloji optimizasyonu çözümlerine yer verilmiştir. İki ayrı hacim oranı için çözülen problemler, sırasıyla 80 ve 81 iterasyondan sonra yakınsamıştır. Şekil 4.12’de yakınsama grafikleri gösterilmiştir. Bu grafiklerde (a) $\mathcal{V}_f = 0.6$, (b) $\mathcal{V}_f = 0.4$ için yakınsama grafiklerini göstermektedir. Benzer yakınsama davranışı gösteren grafiklerde (b) için yakınsama grafiklerinde 32. İterasyondan sonra dalgalanmaların (a)’ya göre biraz daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) $\mathcal{V}_f = 0.6$, (b) $\mathcal{V}_f = 0.4$ için.

Çözümler 2 dakika sürmüştür. Ortaya çıkan optimum topoloji sonuçlarının Oktay et al. [12] tarafından çözölen referans problem ile karşılaştırılması Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



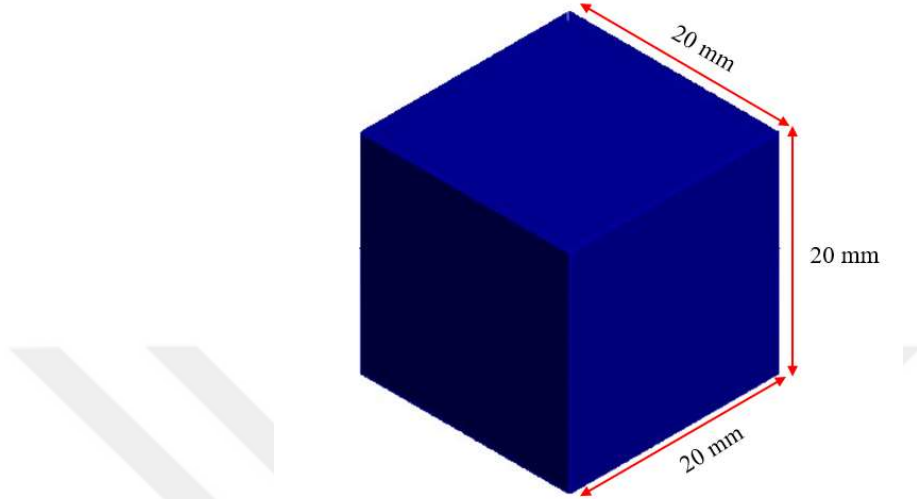
Şekil 4.13. Topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) referans problem için $V_f = 0.6$ sonucunu, (b) bu çalışmanın $V_f = 0.6$ sonucunu, (c) referans problem için $V_f = 0.4$ sonucunu, (d) bu çalışmanın $V_f = 0.4$ sonucunu göstermektedir.

Şekil 4.13'te (a) referans problemde $V_f = 0.6$ koşulu için çıkan sonucu, (b) bu çalışmada $V_f = 0.6$ koşulu için çıkan sonucu, (c) referans problemde $V_f = 0.4$ koşulu için çıkan sonucu, (d) ise bu çalışmada $V_f = 0.4$ koşulu için çıkan sonucu temsil etmektedir. Sonuçlar görselleştirilirken, referans problem ile karşılaştırmanın daha kolay yapılabilmesi amacıyla modül içerisinde yer alan Gray Scale filtresi uygulanmıştır. Bu filtrede boş elemanlar beyaz renkte, ara elemanlar gri renkte, katı elemanlar siyah renkte gösterilmiştir.

Yapısal topoloji optimizasyonu çözümleri yapıldıktan sonra çıkan sonuçlar incelendiğinde, geometrinin referans problemdeki sonuçlara benzer malzeme dağılımı sahip olduğu görölmektedir. Ancak kolona benzer yapıların sayılarında farklılıklar mevcuttur. Ayrıca hacim oranlarını değişimi ile birlikte referans problemde yalnızca mevcut kolon yapılarının incelendiği gözlemlenirken, bu çalışmada uygulanan çözümde kolon sayısında değişimin olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin araştırmacılar ile ANSYS'in kullandığı görselleştirme algoritmalarındaki farklılık olabileceği düşünülmüştür. Bu da topoloji optimizasyon yönteminin farklı yaklaşımlar sergileyebildiğinin göstergesi olarak kabul edilmiştir. Fakat, genel geometrik dağılım şeklinin referans geometri ile çok benzeyen bir eğilimde olduğu gözlemlendiği için bu orijinallik durumunun herhangi bir problem teşkil etmeyeceği düşünülmüştür.

4.1.3. Problem 3: Yayıllı yük uygulanan küp problemi

Bu problemde, 20x20x20 mm ölçülerine sahip, üst yüzeyine sabit yayıllı yük uygulanan üç boyutlu bir küp geometrisi için yapısal topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Küp, dört köşeden basit mesnetler ile desteklenmiştir. Küp, Şekil 4.14'te görülmektedir.

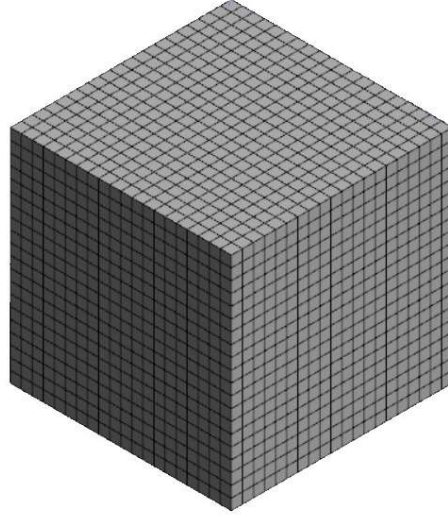


Şekil 4.14. 20x20x20 mm küp geometrisi.

Optimizasyon için $\mathcal{V}_f = 0.4$ ve $\mathcal{V}_f = 0.2$ olmak üzere iki durum için çözüm yapılmıştır. Bu problemde ilk iki problemde olduğu gibi minimum uygunluk (compliance) amacı ile optimizasyon çözümü yapılmıştır ve penaltı faktörü 3 olarak kullanılmıştır. Problem Akay ve Oktay [54] tarafından yapılan referans çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

4.1.3.1. Küp için ağ yapısının oluşturulması

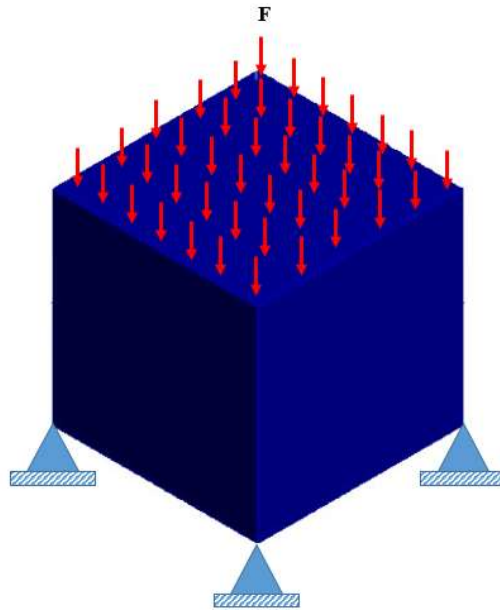
20x20x20 mm küp için, 9,200 düğüm noktasına sahip 8,000 altıyüzlü (hexahedral) eleman içeren düzenli bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Küp için oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Ağ yapısının eleman boyutları bu çalışma için de 1 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.15. 8,000 elemandan oluşan küp.

4.1.3.2. Küp için sınır koşullarının tanımı

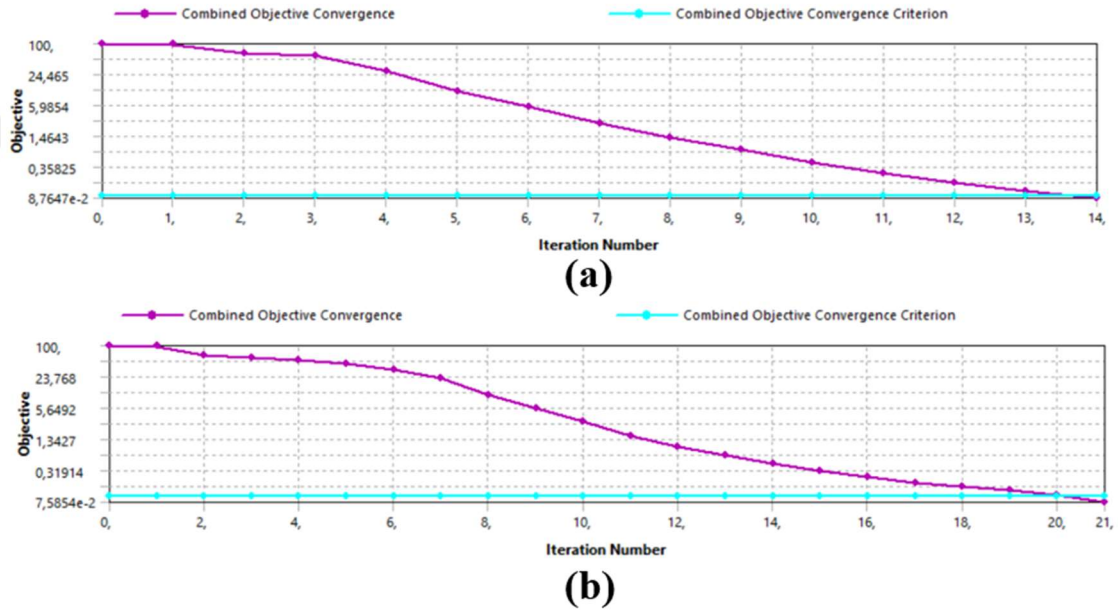
Küp, dört köşesinden de basit mesnetlerle desteklenmiştir. Üst yüzeyine sabit ve yayılı olacak şekilde bir F kuvveti uygulanmıştır. Şekil 4.16’da bu koşullar görselleştirilmiştir.



Şekil 4.16. Üst yüzeyine sabit yayılı yük uygulanan, basit mesnetlerle desteklenmiş küp.

4.1.3.3. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları

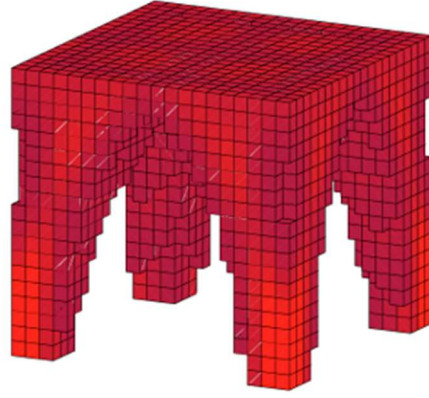
Bu alt bölümde üçüncü problem için yapısal topoloji optimizasyonu çözümlerine yer verilmiştir. İki ayrı hacim oranı için çözülen problemler, sırasıyla 14 ve 21 iterasyondan sonra yakınsamıştır. Şekil 4.17’de yakınsama grafikleri gösterilmiştir. Çözümler sırasıyla 46 saniye ve 1 dakika sürmüştür. Bu grafiklerde (a) $\mathcal{V}_f = 0.4$, (b) $\mathcal{V}_f = 0.2$ için yakınsama grafiklerini göstermektedir. Benzer yakınsama davranışı gösteren grafiklerde (a) için yakınsama daha hızlı gerçekleşmiştir.



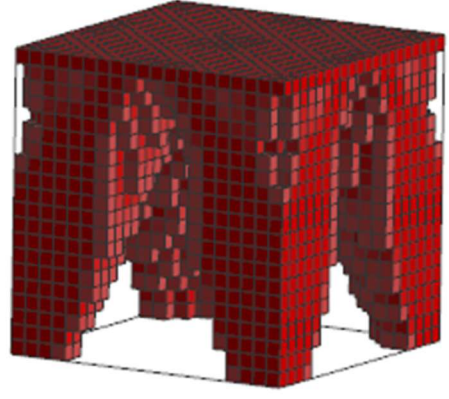
Şekil 4.17. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) $\mathcal{V}_f = 0.4$, (b) $\mathcal{V}_f = 0.2$ için.

Küp geometrisi için hacim oranı ($\mathcal{V}_f$) sırasıyla %40 ve % 20 olacak şekilde iki farklı topoloji optimizasyonu yapıldıktan sonra elde edilen optimum sonuçlar, Şekil 4.18’de Akay ve Oktay [54] tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların benzerlik oranının oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

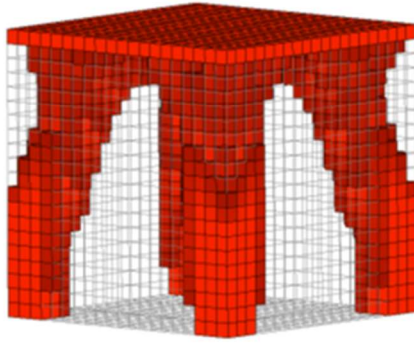
Şekil 4.18’de (a) ve (c), araştırmacıların sırasıyla $\mathcal{V}_f = 0.4$ ve $\mathcal{V}_f = 0.2$ için ulaştıkları sonuçlardır, (b) ve (d) ise bu çalışmada sırasıyla $\mathcal{V}_f = 0.4$ ve $\mathcal{V}_f = 0.2$ için ortaya çıkan sonuçlardır. Bütün sonuçlarda $0.3 \leq \rho \leq 1$ arasındaki yoğunluğa sahip elemanlar gösterilmiştir. Eleman yoğunluklarının gösterilmesinde iki renk kullanılmıştır.



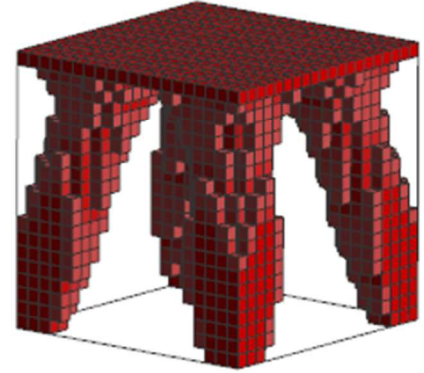
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.18. Şekil 4.16'daki sınır koşulları ve yükler referansında oluşan optimum sonuçlar: (a) ve (b) $V_f = 0.4$ için (iki renk), (c) ve (d) $V_f = 0.2$ için (iki renk).

Bu bölümde üç farklı problem için yapısal topoloji optimizasyonu çözümleri yapılmıştır. Sonuçlar, literatürde yapılan çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalardan sonra, referans problemlerin sonuçları ile benzerlik oranı oldukça yüksek olan sonuçlar elde edilmiştir. Problemlerin çözümleri için tanımlamaların doğru bir şekilde yapıldığı sonucuna varılmıştır.

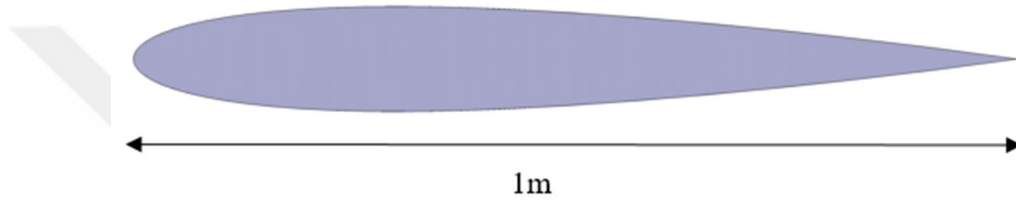
4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Problemi

Bu tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde büyük bir öneme sahip olduğu anlaşılabacak HAD analizleri için de doğrulama çalışmalarının yapılması gerektiği bilinmektedir. Bu nedenle, öncelikle sonlu hacimler yöntemini kullanın Fluent yazılımı ile yapılan HAD analizinden elde edilen sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılıp doğrulanması

gerekmektedir. Doğrulama çalışması için iki boyutlu bir analiz yapılmıştır. Sınır koşullarının doğru tanımlanıp tanımlanmadığını değerlendirebilmek ve daha hızlı çözüm alabilmek için bu yöntem tercih edilmiştir.

4.2.1. Problem tanımı

Bu problemde NACA 0012 simetrik profil kullanılmıştır. Profilin veter uzunluğu 1 metre olarak belirlenmiştir. Şekil 4.19’da profilin görseli görülebilir.



Şekil 4.19. 1 m veter uzunluğuna sahip NACA 0012 simetrik profil.

Sıkıştırılamaz akış rejiminde 0° , 5° , 10° ve 15° hücum açıları için türbülanslı ve kararlı halde HAD analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen kaldırma ve sürüklenme katsayılarının değerleri deneysel Ladson verileri ile karşılaştırılmıştır [55]. Akışkan, 52.08 m/s akış hızı ile profil üzerine gönderilmiştir. Bu hız ses altı ($M < 1$) akış tipi içerisinde kalmaktadır. Bu kategori içerisinde de akışkanın sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz olarak davranabildiği hızlar bulunmaktadır. Analiz, sıkıştırılamaz ($M < 0.3$) viskoz akış prensipleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.

$$M = \frac{V}{V_s} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de M Mach sayısını, V akışkanın hızını, V_s ise belirlenmiş olan ortam, yoğunluk ve sıcaklıktaki ses hızıdır. Ses hızı sabit bir değer olmadığından dolayı akışkanın bulunduğu ortama ait değerlerin (sıcaklık, yoğunluk, elastiklik) belirtilmiş olması gerekmektedir.

Akışkanlar dinamiğinde diğer bir önemli parametre de Reynolds sayısıdır ve bu sayının herhangi bir birimi yoktur. Akışkanın karakteristik davranışı hakkında bilgi vermekte olan bu sayı sayesinde incelenen akışın laminar ya da türbülanslı olduğunun tespiti yapılabilmektedir. Denklem atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetleri oranı şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (4.2)$$

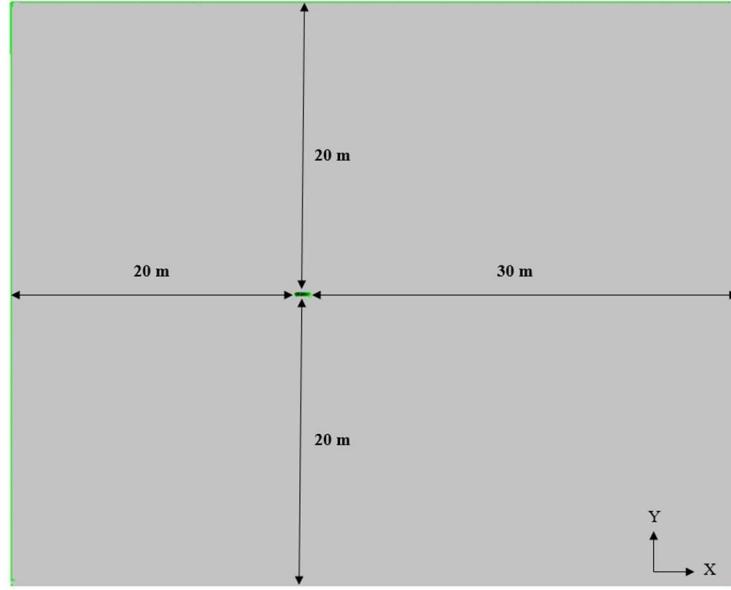
Denklem 4.2’de, ρ akışkanın yoğunluğunu, V akışkanın hızını, L ise bu çalışma için veter uzunluğunu temsil etmektedir. μ ise akışkanın dinamik viskozitesini temsil etmektedir.

Reynolds sayısının belirli değerlerin üzerinde olduğu durumlarda akışın artık laminar olmadığı söylenebilmektedir. Bu değer ise kritik Reynolds sayısı olarak adlandırılmıştır. Bu değerler, uygulama alanlarına göre değişiklik gösterebilmektedir. Örnek olarak, boru içi akışı gibi iç akış problemlerinde Reynolds yaklaşık iki binin üzerinde ise akışın laminar olmadığı söylenebilirken, bu tez çalışmasında olduğu gibi havacılık alanında çözülen dış akış problemlerinde bu limit beş yüz binin üzeri olarak belirlenmiştir.

Bu doğrulama probleminde Reynolds sayısının 6,000,000 olmasından dolayı akışın türbülanslı akış olduğu söylenebilmektedir. Türbülans denklemi olarak da Spalart-Allmaras denklemi Navier Stokes denklemlerine ek olarak bu doğrulama problemi kapsamında çözülmüştür.

4.2.2. HAD analizi için ağ yapısının oluşturulması

Şekil 4.20’de NACA 0012 kanat profili çevresinde oluşturulan dikdörtgensel bir dizayn alanı belirtilmiştir. Bu alanın kanat profiline yeteri kadar uzaklıkta olduğundan sonuçları etkilememesi için emin olunmalıdır. Şekilde bu alanın profile olan uzaklığı belirtilmiştir. Alan, profilin firar kenarına X yönünde 30 m diğer tüm yönlerde 20 m uzaklıkta olacak şekilde oluşturulmuştur. Tasarım alanı, profilin firar kenarında oluşabilecek girdapların çözüm kalitesini etkilememesi için diğer yönlerle göre ölçüsel olarak daha uzun tutulmuştur.



Şekil 4.20. Tasarım alanı.

Ağ yapısı oluşturulurken öncelikle neyin amaçlandığı, ne tip bir akış rejiminde çözüm yapıldığı ve ne tür bir uygulamada kullanılacağı değerlendirilmelidir. Bu bölüm içerisinde bu detaylara değinilmiştir. Sıkıştırılamaz viskoz akış prensipleri içerisinde değerlendirildiğinde ve Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanıldığının bilinmesinden dolayı ağ yapısı oluşturulurken $y^+ \leq 1$ olması hedeflenmiştir. Duvar bölgesine yakın bölge olarak nitelendirilen bu bölge kayma gerilmelerinin doğru hesaplanabilmesi için önemlidir. Bu değer uygulamalarda göz önünde bulundurulacak kriterlere göre daha büyük değerler olarak belirlenebilmektedir. Viskoz alt katman olarak tanımlanan alan içerisinde hesaplamaları yapabilmek için hedeflenen y^+ değeride göz önünde bulundurularak Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılmıştır.

Hedeflenen y^+ değerine ulaşabilmek için de ağ yapısı oluşturulurken, duvar (bu durumda kanat profili) çevresindeki elemanların duvar bölgesinden ne kadar uzakta oluşturulmaya başlayacağının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için de aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır:

1. İlk olarak 4.1 denkleminde belirtilen Reynolds sayısı hesaplanmıştır ($R_e = 6,000,000$).
2. Yüzey sürtünme katsayısı (c_f) deneysel katsayılar içeren aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır:

$$c_f = [2\log_{10}(R_e) - 6.5]^{-2.3} \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'te c_f yüzey sürtünme katsayısını, R_e Reynolds sayısını temsil etmektedir.

3. Hesaplanan yüzey sürtünme katsayısı (c_f) kullanılarak duvar kayma gerilmesi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\tau_w = \left(\frac{1}{2}\rho V^2\right) c_f \quad (4.4)$$

Denklem 4.4'te τ_w duvar kayma gerilmesini, c_f yüzey sürtünme katsayısını, ρ akışkanın yoğunluğunu, V akışkanın hız vektörünü, R_e Reynolds sayısını temsil etmektedir.

4. Denklem 4.5'ten yararlanılarak sürtünme hızı (v_τ) hesaplanmıştır.

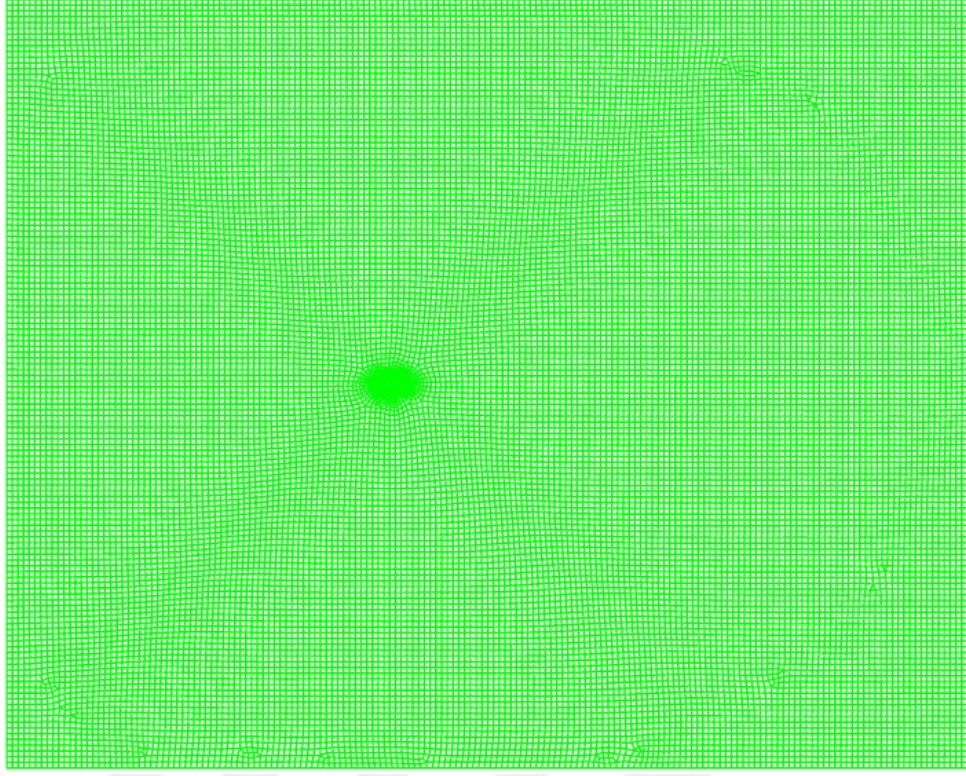
$$v_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4.5)$$

Denklem 4.5'te v_τ sürtünme hızını, τ_w duvar kayma gerilmesini, ρ akışkanın yoğunluğunu temsil etmektedir.

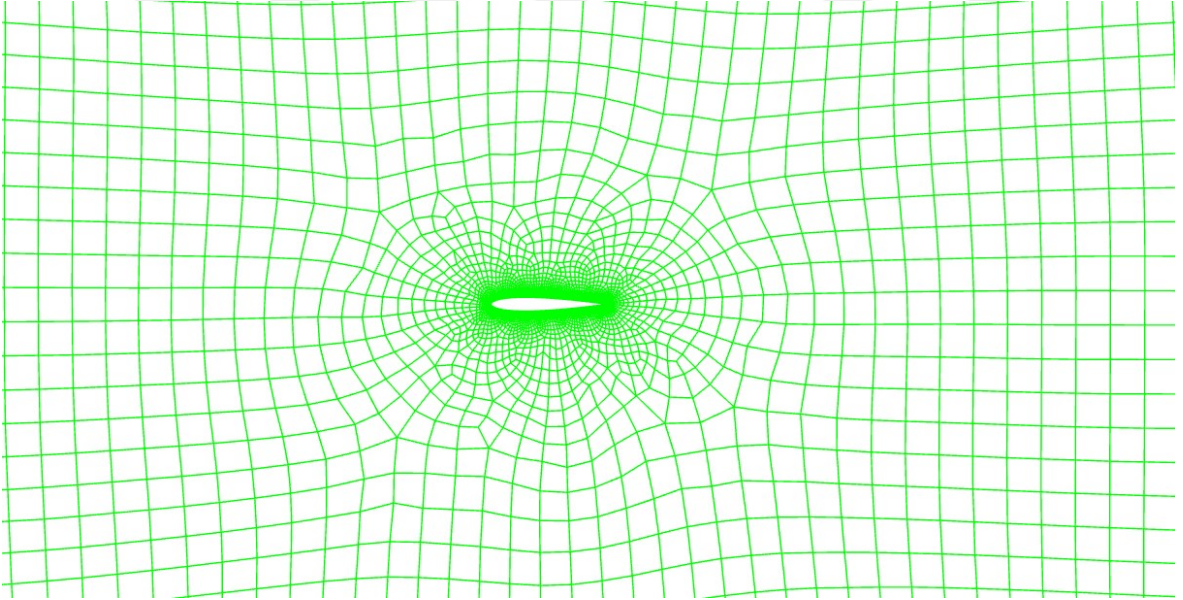
5. Sürtünme hızının (v_τ) da elde edilmesi ile birlikte y^+ değeri hesaplanmıştır. Bu değerden denklem yeniden yazılarak y_p değerine ulaşılabilmektedir.

$$y^+ = \frac{\rho v_\tau y_p}{\mu} \quad (4.6)$$

Denklem 4.6'da y_p değeri, duvar bölgesinden sonraki ilk hücrenin merkez noktasını temsil etmektedir. Bu değerın hesaplanması, problem için ağ yapısı oluşturulurken dikkat edilen bir husus olmuştur. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de görüldüğü gibi ağ yapıları oluşturulmuştur. Şekil 4.21 tüm tasarım alanını, Şekil 4.22 ise bu alanın kanat profili bölgesine yakınlştırılmış görselini içermektedir.



Şekil 4.21. Ağ yapısı.

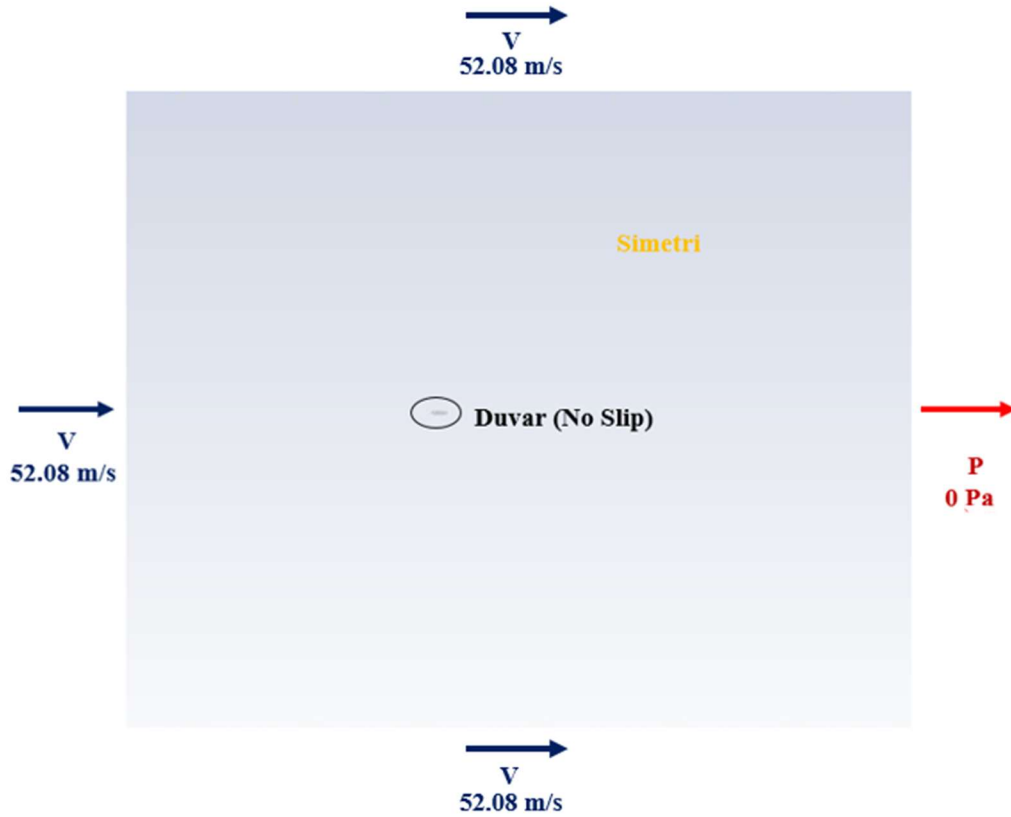


Şekil 4.22. Ağ yapısının yakılaştırılmış görseli.

4.2.3. HAD analizi için sınır koşullarının tanımı

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra sınır koşullarının tanımlanması süreci başlamıştır. Sınır koşullarının doğru tanımlanması yanlış çıktılar ile karşılaşmamak için oldukça

önemlidir. Bu problem için hız girişi ve basınç çıkışı sınır koşulu kullanılmıştır. Bu sınır koşulunun kullanılma sebebi ise düşük hızlardaki ses altı akışlarda ($M < 0.3$) iyi sonuçlar çıkarması olmuştur. Şekil 4.23'te mavi ok ile gösterilen kenarlar hız girişi (52.08 m/s) olarak, kırmızı kenar ise basınç çıkışı (0 Pa) olarak tanımlanmıştır. Reynolds sayısı 6,000,000'dur. Kanat profili, kayma olmayan duvar olarak (no slip wall), gri bölge ise simetri olarak tanımlanmıştır.

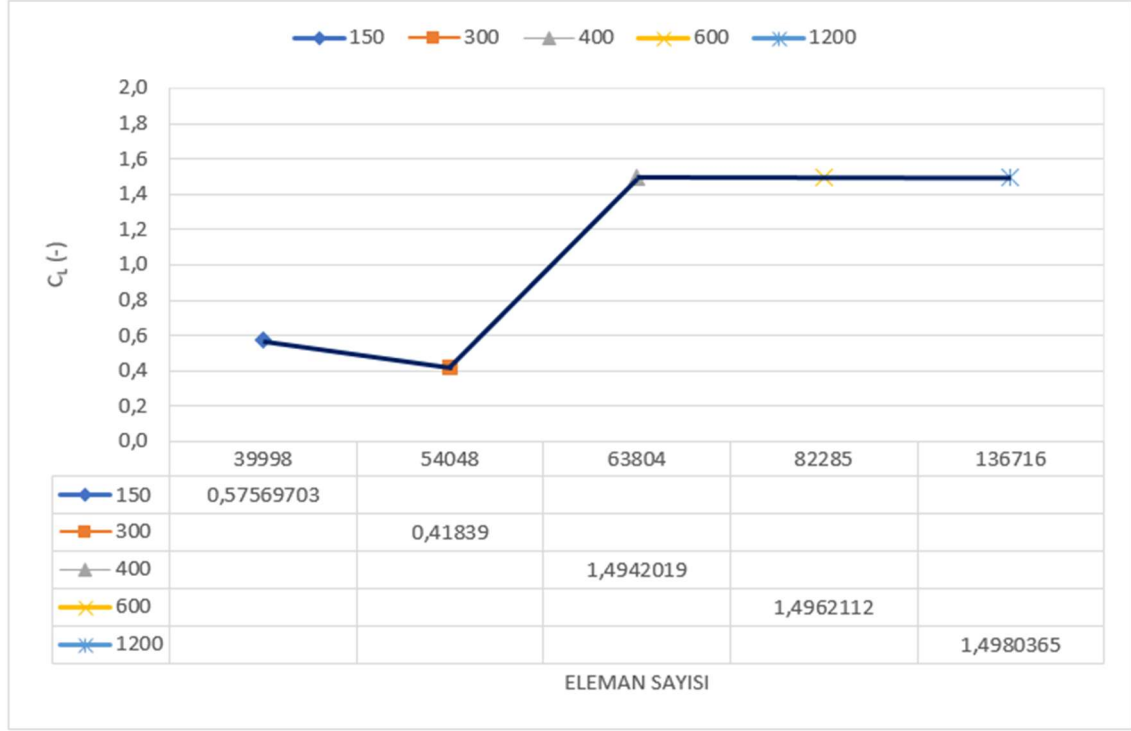


Şekil 4.23. Sıkıştırılabilir dış akış problemi için sınır koşulları.

4.2.4. Ağ yapısından bağımsızlık çalışması

Bu alt bölümün amacı, problemin çözümü sırasında gereğinden fazla zaman ve kaynak harcanmaması için çalışmada kullanılan ağ yapısının doğru sonuç verebilecek optimum sayıdaki eleman sayısını bulmak olmuştur. Bunun için farklı sayıda eleman sayısına sahip farklı kalitelerde ağ yapıları oluşturulmuştur. Global eleman boyutu tanımı 300 mm olarak bütün ağ yapıları için sabit tutulmuştur. Çözüm sonuçlarına doğrudan etkisi olduğu bilinen sınır tabakası ağ yapısının veter boyunca 150, 300, 400, 600 ve 1200 noktaya bölünerek kaldırma katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Bu değerlerinin eleman sayılarına göre

değişimlerini gösteren bir grafik Şekil 4.24'te görülebilir. Bu grafikteki en büyük değişiklik sonrasında ilgili parametrenin eleman sayısından bağımsız bir hale geldiği görülmüştür. Bu durumun 63,804 eleman ve sonrası için geçerli olduğu görülmüştür. Diğer bir deyişle, bu aerodinamik problemin çözümü için 63,804 elemandan fazla eleman içeren bir ağ yapısı kullanmanın verimi düşüreceği, maliyetleri artıracığı anlaşılmıştır.



Şekil 4.24. Ağ yapısının eleman sayısından bağımsızlığı grafiği.

4.2.5. Sonuçlar

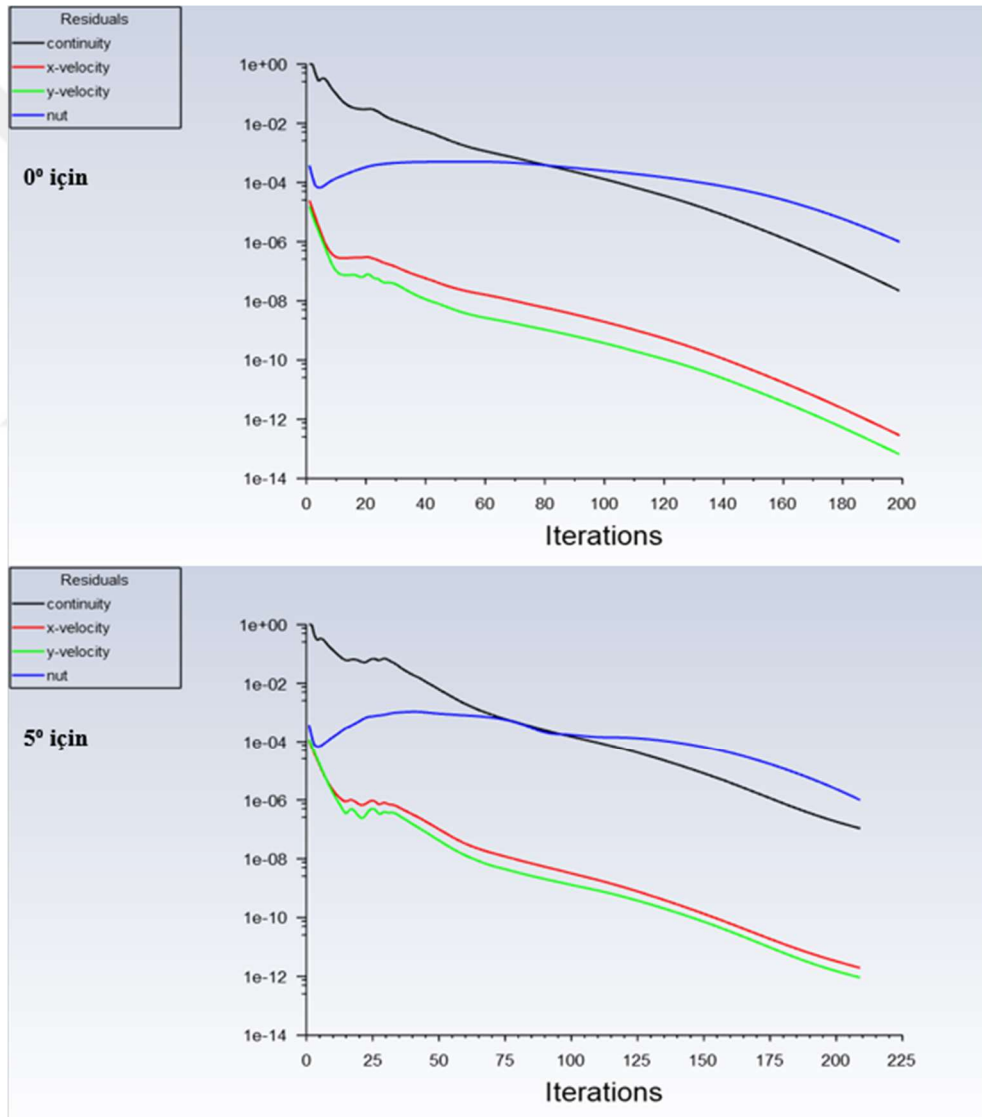
Bütün tanımlamalar yapıldıktan sonra 0°, 5°, 10°, 15° hücum açıları için HAD problemleri çözülmüştür. Bu alt bölümde hepsi için ayrıntılı sonuçlara yer verilmiştir.

4.2.5.1. Artık (Residual) parametre grafikleri

HAD analizleri sırasında süreklilik, X ve Y hızları, türbülans parametrelerinin çözüm esnasında çok küçük değerlere kadar yakınsaması gerekmektedir. Bütün hücum açılarındaki analizler için bu parametrelerin hangi değerlerde yakınsadığı incelenmiştir. Yakınsamaların

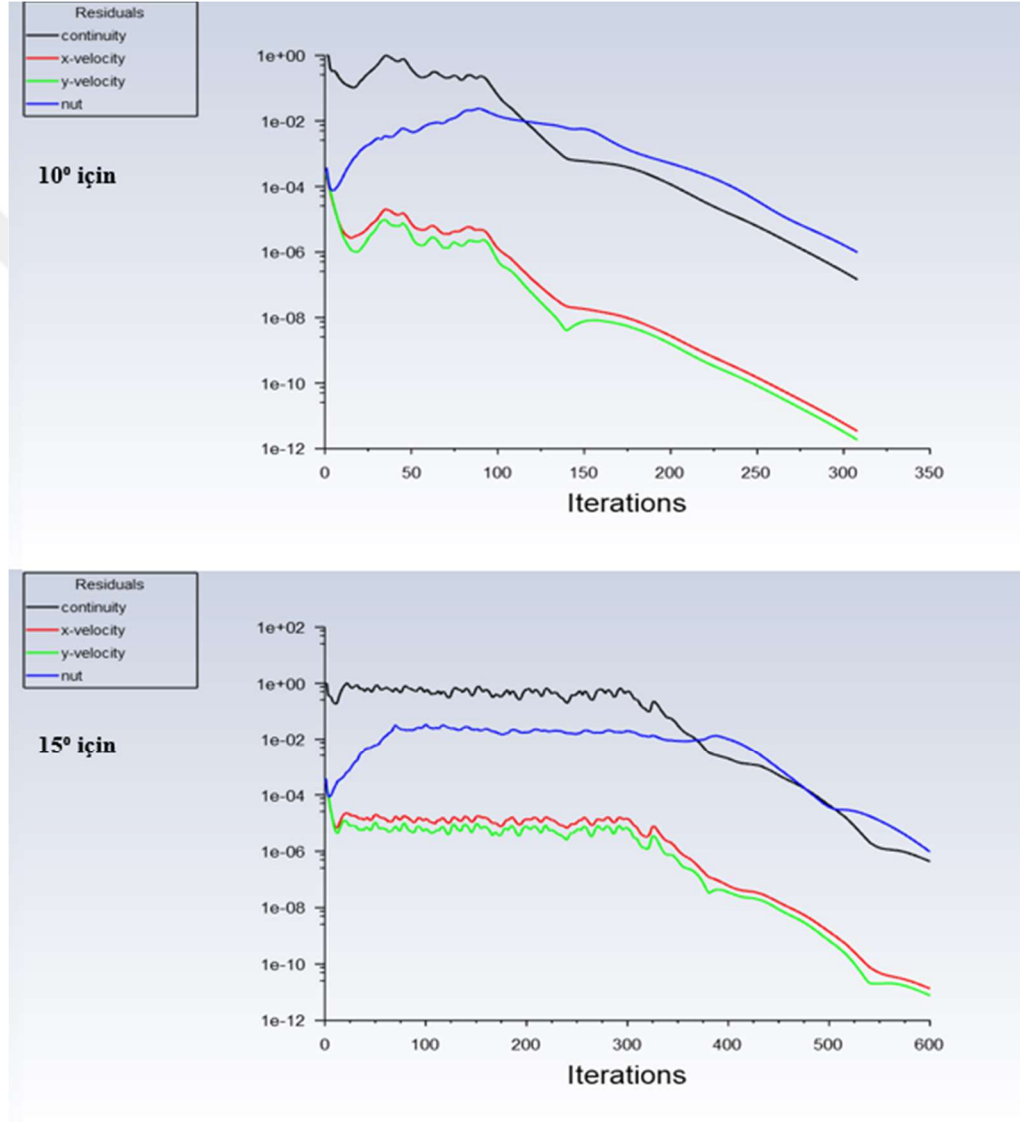
yeterince küçük değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Detaylara bu alt bölümün devamında değinilmiştir.

0° , 5° , 10° , 15° hücum açıları için farklı iterasyon sayılarında çözümler alınmıştır. Bu sayılar sırası ile 200, 209, 308, 600 iterasyon olarak gözlemlenmiştir. Sadece bu verinin referansında, hücum açısı artışı ile çözüm süresi arasında doğru orantı olduğu söylenebilir. Özellikle 15° hücum açısı ile yapılan analizin çözümü çok daha uzun bir iteratif süreçte sahiptir. Bunun sebebinin de akım ayrılmalarının hücum açısının artması ile gösterdiği artış olduğu söylenebilir.



Şekil 4.25. 0° ve 5° hücum açıları için artık (residual) parametre grafikleri.

Şekil 4.25'te yer alan grafikler incelendiğinde 0° ve 5° hücum açıları için yapılan çözümlerde bütün parametrelerin yakınsadığı gözlemlenmiştir. Parametrelerin, HAD analizleri için en az $1E-4$ değerinin altına düşmesi doğru sonuç elde edilebildiğinin anlaşılabilmesi açısından önemlidir. Daha düşük değerler problemin doğruluğunun daha güvenilir olduğunu ifade etmektedir. Bu hücum açıları için bütün parametreler limit değerin daha da altında olan $1E-6$ ve $1E-12$ değerleri arasında yakınsamıştır.



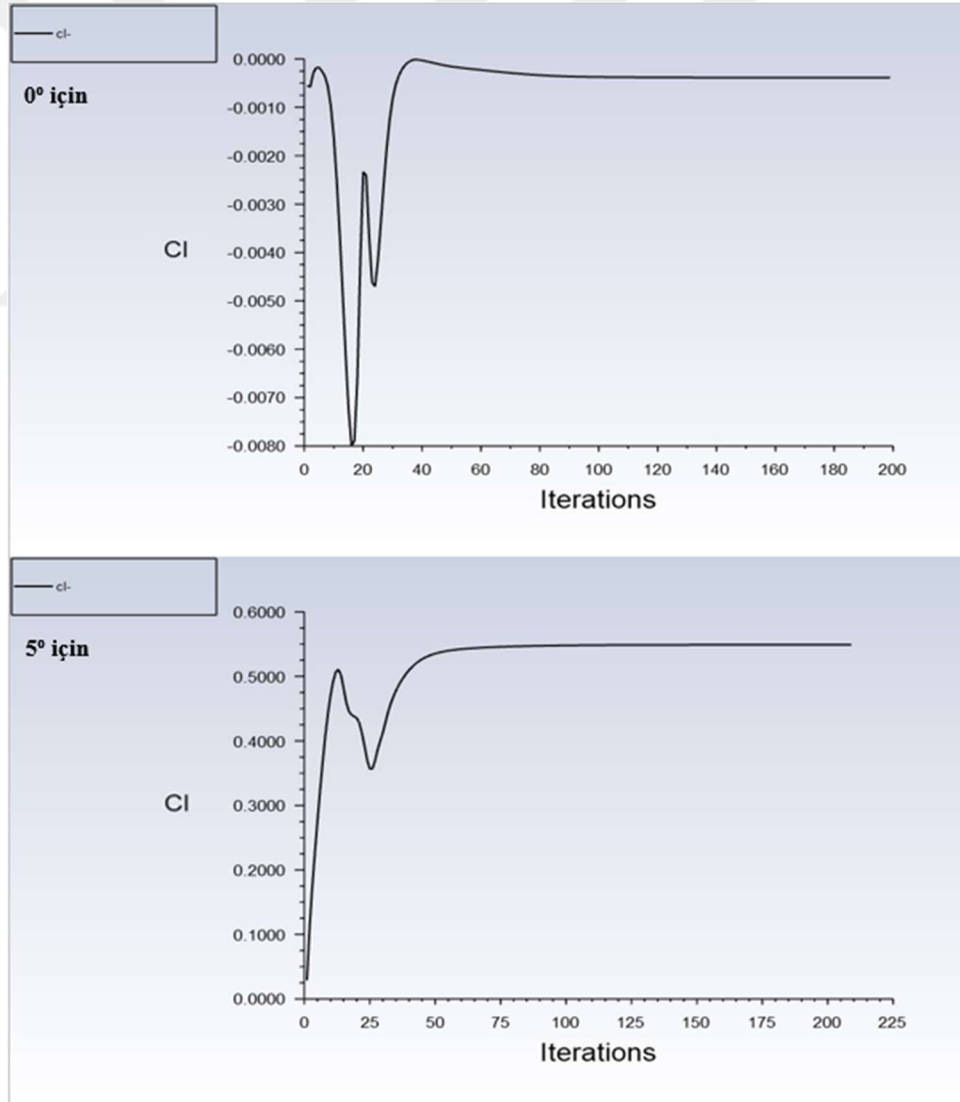
Şekil 4.26. 10° ve 15° hücum açıları için artık (residual) parametre grafikleri.

Şekil 4.26'da yer alan grafikler incelendiğinde 10° ve 15° hücum açıları için yapılan çözümlerde bütün parametrelerin yakınsadığı gözlemlenmiştir. Bu hücum açıları için bütün parametreler limit değerin daha da altında olan $1E-6$ ve $1E-11$ değerleri arasında

yakınsamıştır. Grafiğin düşüşündeki davranışı hücum açısının artması ile Şekil 4.26’da görüldüğü gibi grafik eğimleri daha küçük hücum açılara göre daha düşüktür. Grafiklerden hareketle bu problemde hücum açısı arttıkça yakınsamanın da zorlaştığını söyleyebiliriz.

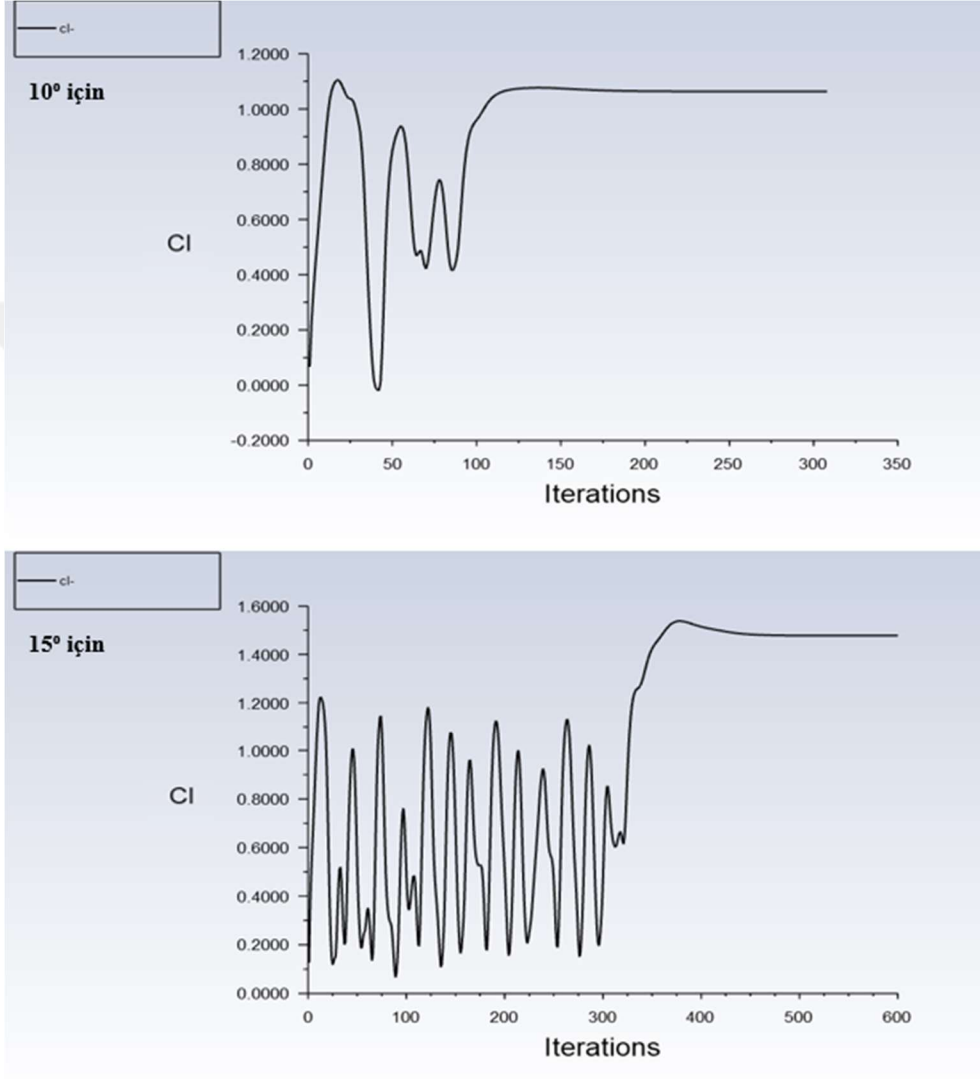
4.2.5.2. Kaldırma ve sürüklenme katsayısı grafikleri

Kaldırma (c_l) ve sürüklenme (c_d) katsayıları, çözümü yapılan bütün hücum açıları için incelenmiştir. Katsayı grafiklerinin hepsinin ayrı ayrı yakınsadığı görülmüştür. Hücum açıları arttıkça grafiklerde dalgalanmaların arttığı gözlemlenmiştir. İlerleyen başlıklarda katsayı değerleri de incelenmiştir, bu yüzden bu başlık altında değerlerden teker teker bahsedilmemiştir.



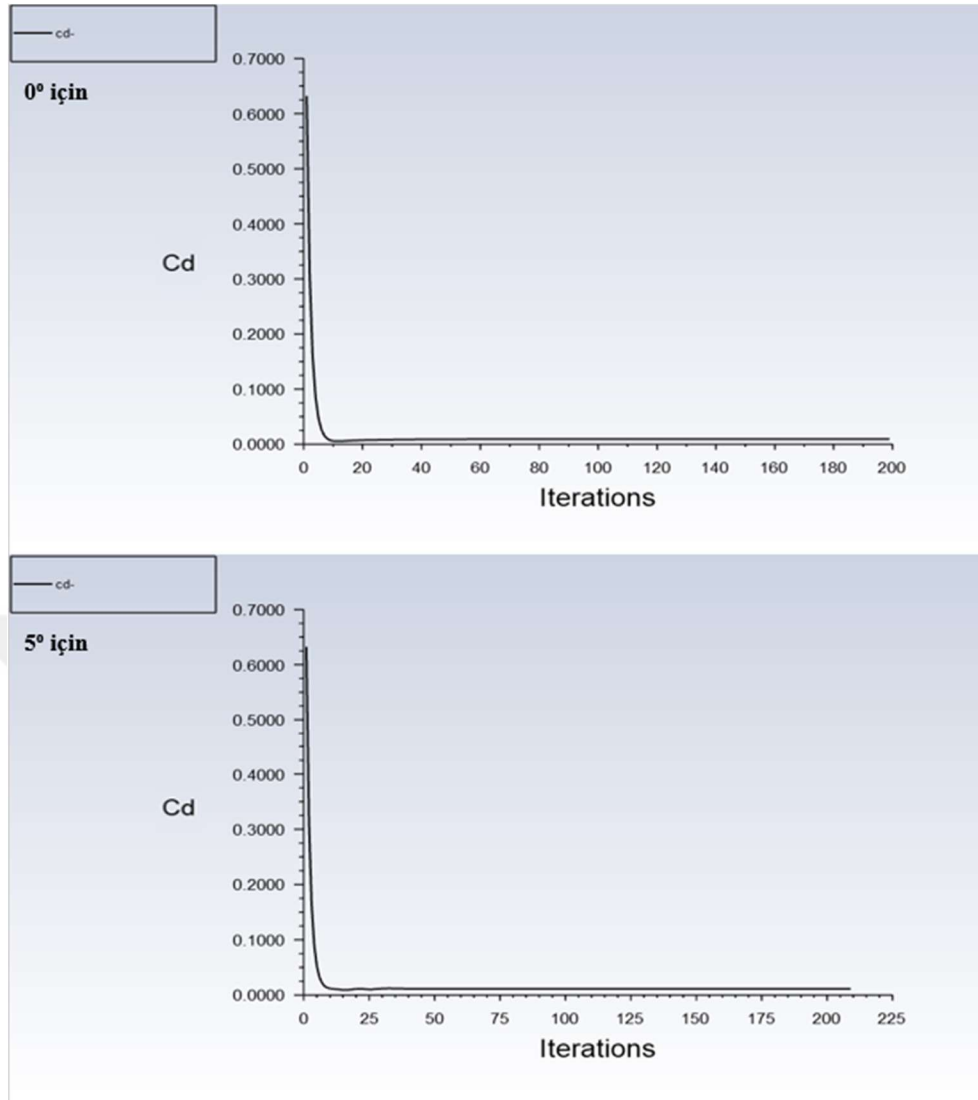
Şekil 4.27. 0° ve 5° hücum açıları için kaldırma katsayısı (c_l) grafikleri.

Şekil 4.27’de yer alan grafikler incelendiğinde 0° ve 5° hücum açıları için yapılan çözümlerde kaldırma katsayısının (c_l) yakınsadığı gözlemlenmiştir. Yakınsama sırasıyla 40. ve 50. iterasyondan sonra gerçekleşmiştir.



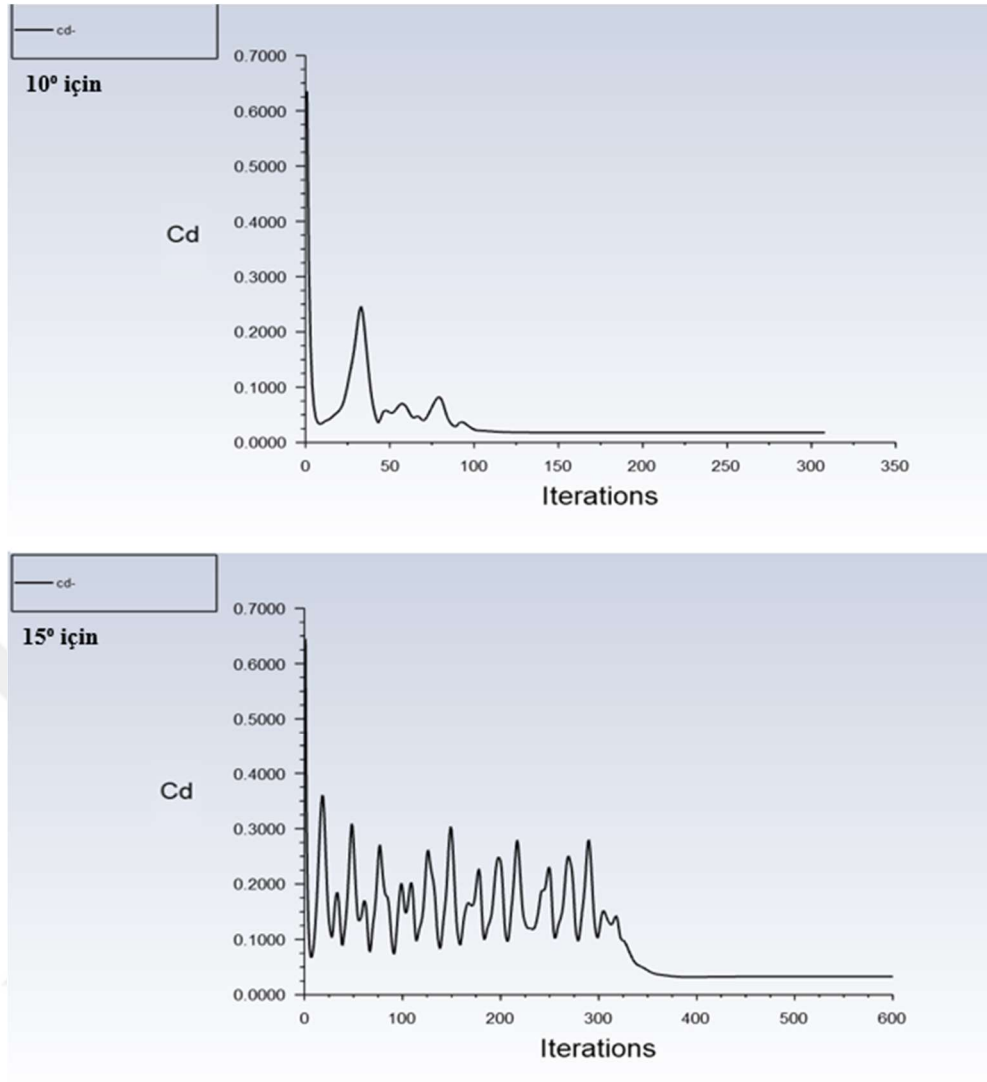
Şekil 4.28. 10° ve 15° hücum açıları için kaldırma katsayısı (c_l) grafikleri.

Şekil 4.28’de yer alan grafikler incelendiğinde 10° ve 15° hücum açısı için yapılan çözümlerde kaldırma katsayısının (c_l) yakınsadığı gözlemlenmiştir. Yakınsama sırasıyla 150. ve 450. iterasyondan sonra gerçekleşmiştir. Yakınsama sürelerinin hücum açısı arttıkça uzadığı görülmüştür. Kaldırma katsayısı (c_l) değerlerinde iniş çıkışların da bu hücum açılarında artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.29. 0° ve 5° hücum açıları için sürüklenme katsayısı (c_d) grafikleri.

Şekil 4.29'da yer alan grafikler incelendiğinde 0° ve 5° hücum açıları için yapılan çözümlerde sürüklenme katsayısının (c_d) yakınsadığı gözlemlenmiştir. Yakınsama sırasıyla 20. ve 30. iterasyondan sonra gerçekleşmiştir.



Şekil 4.30. 10° ve 15° hücum açıları için sürüklenme katsayısı (c_d) grafikleri.

Şekil 4.30’da yer alan grafikler incelendiğinde 10° ve 15° hücum açıları için yapılan çözümlerde sürüklenme katsayısının (c_d) yakınsadığı gözlemlenmiştir. Yakınsama sırasıyla 110. ve 375. iterasyondan sonra gerçekleşmiştir.

Kaldırma (c_l) ve sürüklenme katsayılarının (c_d) grafikleri incelendiğinde, istenilen seviyelerde yakınsamaların elde edilebilmesi için gereken iterasyon sayısı lineer artış göstermiştir. Dolayısıyla hücum açısının artışı ile analiz maliyetinin de arttığı görülmüştür.

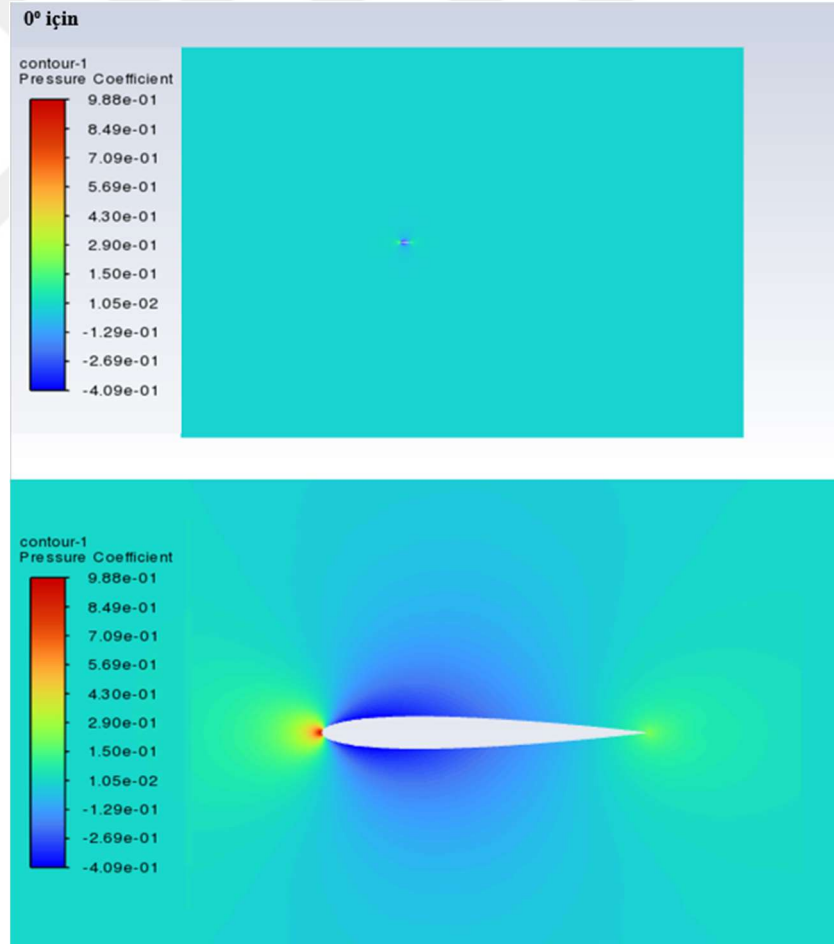
4.2.5.3. Basınç katsayısı konturları

Çözüm sonrası elde edilen basınç katsayısı (c_p) konturları bütün hücum açıları için incelenmiştir. İncelenen basınç katsayısının denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} \quad (4.7)$$

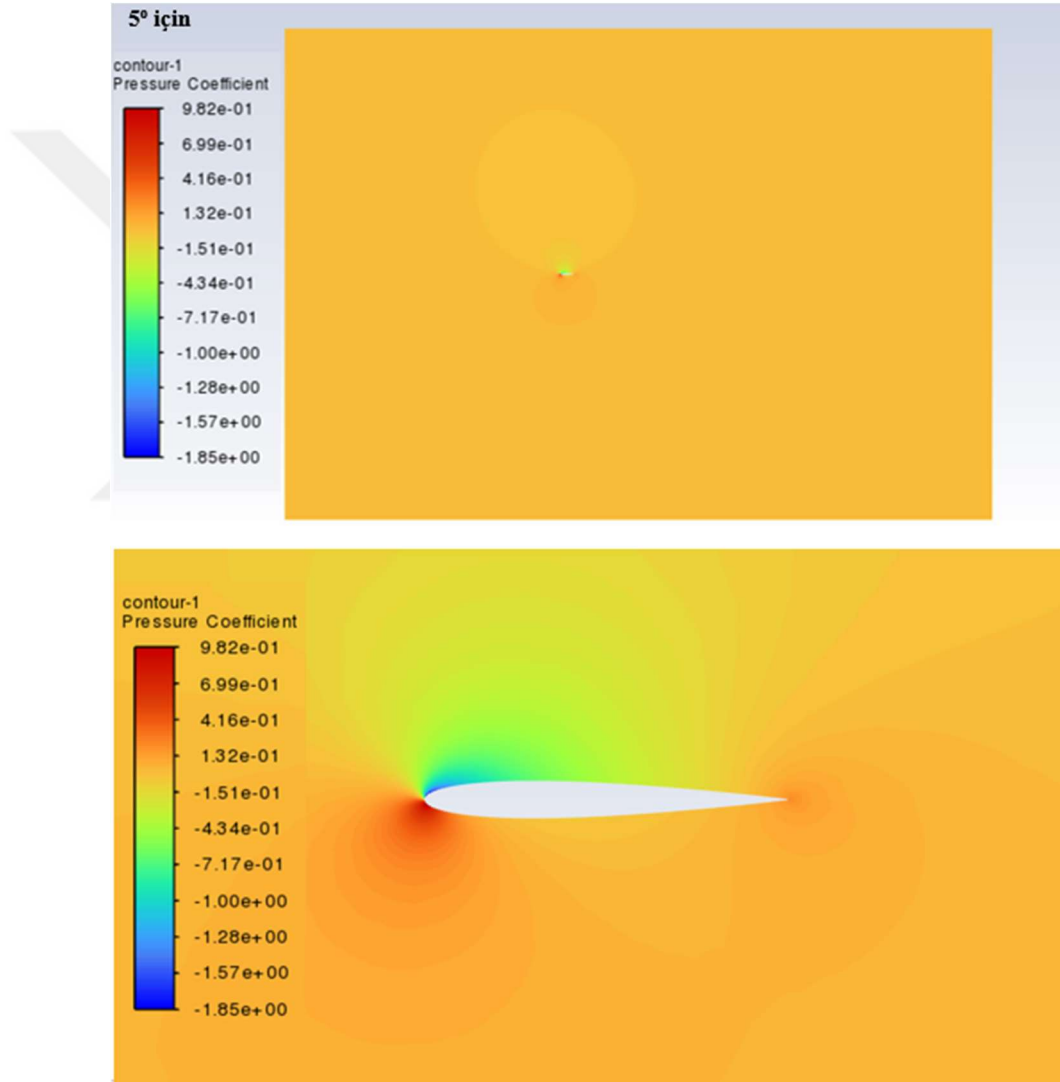
Denklem 4.7’de c_p basınç katsayısını, ρ_∞ akışkanın yoğunluğunu, V_∞ serbest akış hızını, p statik basıncı, p_∞ serbest akış basıncını temsil etmektedir.

0° hücum açısı için basınç katsayısı konturları Şekil 4.31’de görülmektedir. Şekilde tasarım alanının bütünü üstte, asıl ilgi alanımız olan kanat profili çevresinin yakınlaştırılmış görseli ise altta yer almaktadır. Profilin simetrik olmasından dolayı basınç dağılımının da simetrik olduğu gözlemlenmiştir. Bu hücum açısı için basıncın en yüksek olduğu yer hücum kenarı bölgesidir. Profilin veter uzunluğu boyunca ise basınç katsayılarının oldukça düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.31. 0° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.

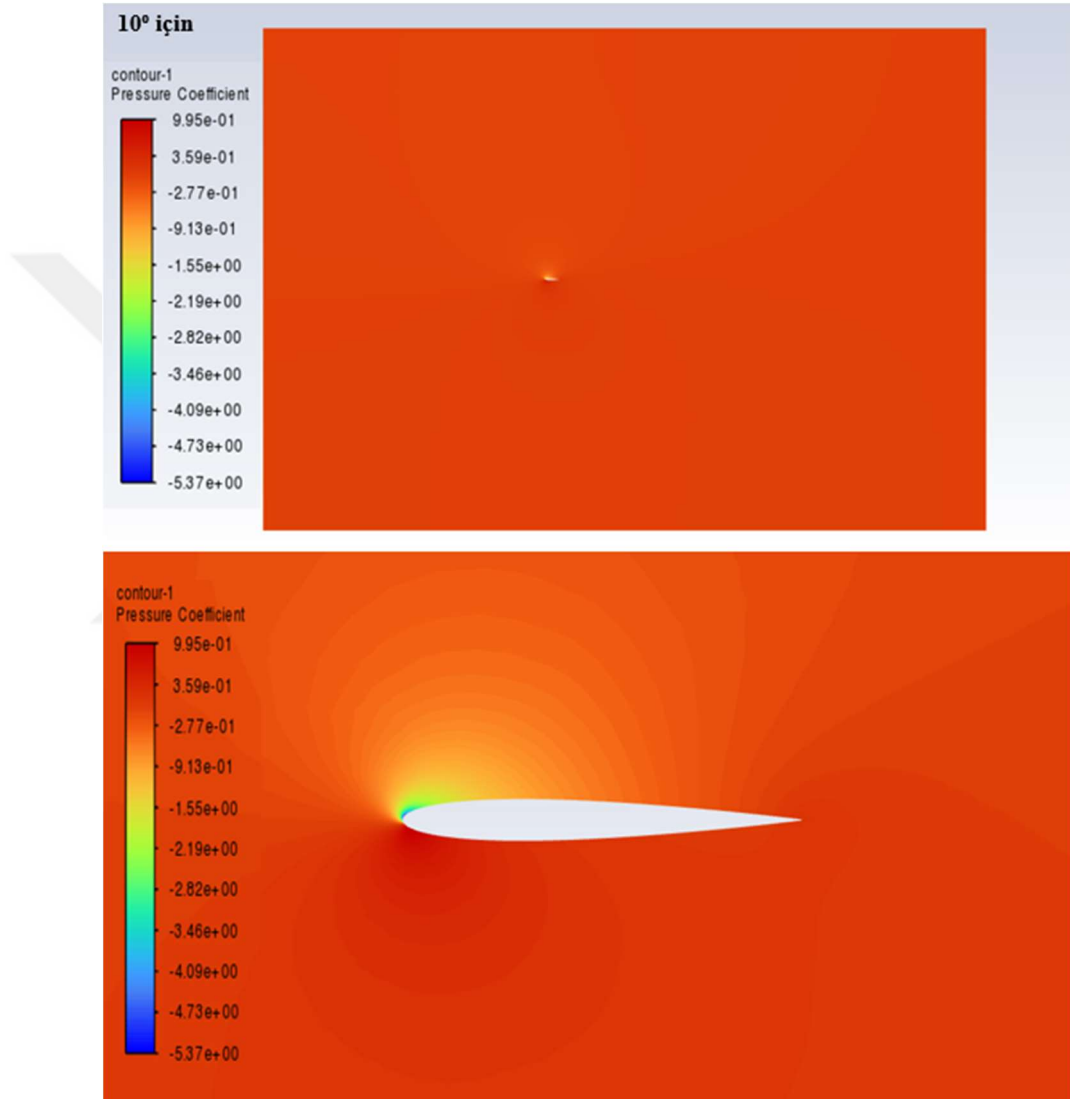
5° hücum açısı için basınç katsayısı konturları Şekil 4.32’de görülmektedir. Şekilde tasarım alanının bütünü üstte, asıl ilgi alanımız olan kanat profili çevresinin yakınlaştırılmış görseli ise alttadır. Bu hücum açısında kanat profili üzerindeki basınç dağılımının alt yüzeyde daha yüksek olduğu beklenildiği gibi görülmüştür. Basıncın en yüksek olduğu bölge bu sefer hücum kenarının alt bölgesine doğru kaymıştır. Profilin üst tarafının basınç dağılımı alt tarafının basınç dağılımından daha düşük olduğu görülmüştür. Kaldırma kuvvetinin oluştuğu söylenebilir.



Şekil 4.32. 5° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.

10° hücum açısı için basınç katsayısı konturları Şekil 4.33’te görülmektedir. Şekilde tasarım alanının bütünü üstte, asıl ilgi alanımız olan kanat profili çevresinin yakınlaştırılmış

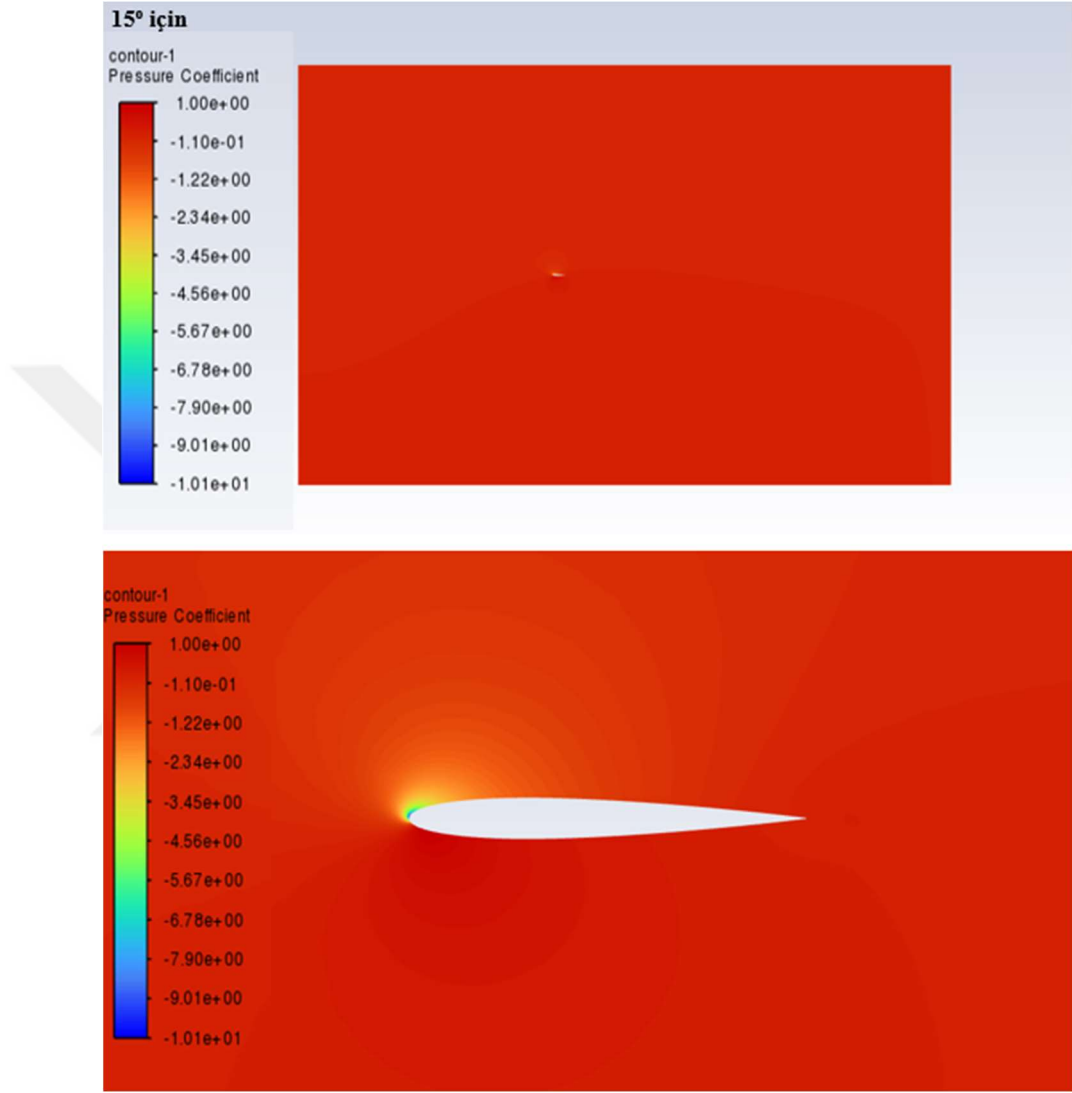
görseli ise altta yer almaktadır. Bu hücum açısındayken profildeki basınç dağılımının alt yüzeyde daha yüksek olduğu beklenildiği gibi görülmüştür. Basıncın en yüksek olduğu bölge 5° hücum açısına göre hücum kenarının biraz daha alt bölgesine doğru kaymıştır. Profilin üst tarafının basınç dağılımı alt tarafının basınç dağılımından daha düşük olduğu bu açıda da görülmüştür.



Şekil 4.33. 10° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.

15° hücum açısı için basınç katsayısı konturları Şekil 4.34'te görülmektedir. Şekilde tasarım alanının bütünü üstte, asıl ilgi alanımız olan kanat profili çevresinin yakınlaştırılmış görseli ise altta yer almıştır. Bu hücum açısındayken profildeki basınç dağılımının alt yüzeyde daha yüksek olduğu beklenildiği gibi görülmüştür. Basıncın en yüksek olduğu

bölge 10° hücum açısına göre hücum kenarının biraz daha alt bölgesine doğru kaymıştır. Profilin üst tarafının basınç dağılımı alt tarafının basınç dağılımından daha düşük olduğu tekrar görülmüştür.

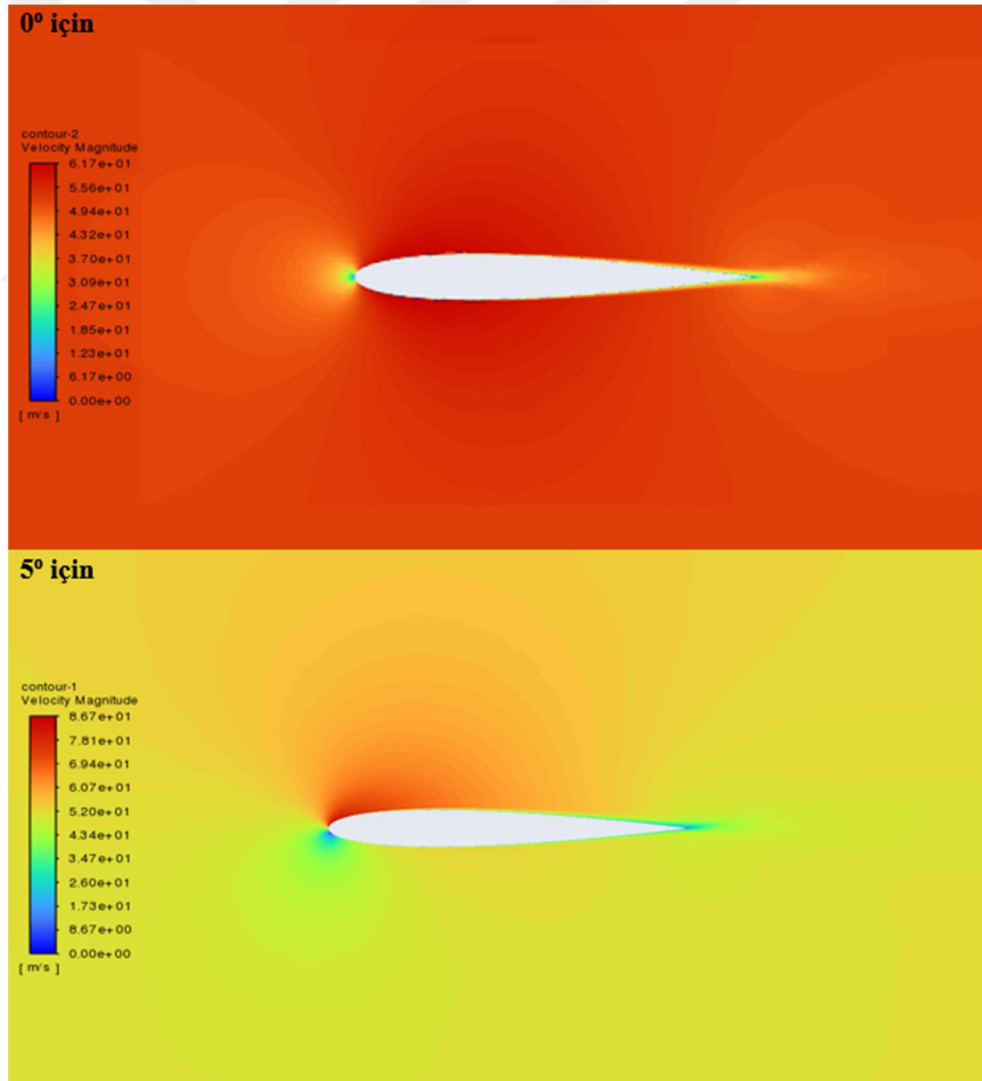


Şekil 4.34. 15° hücum açısı için basınç katsayısı (C_p) konturları.

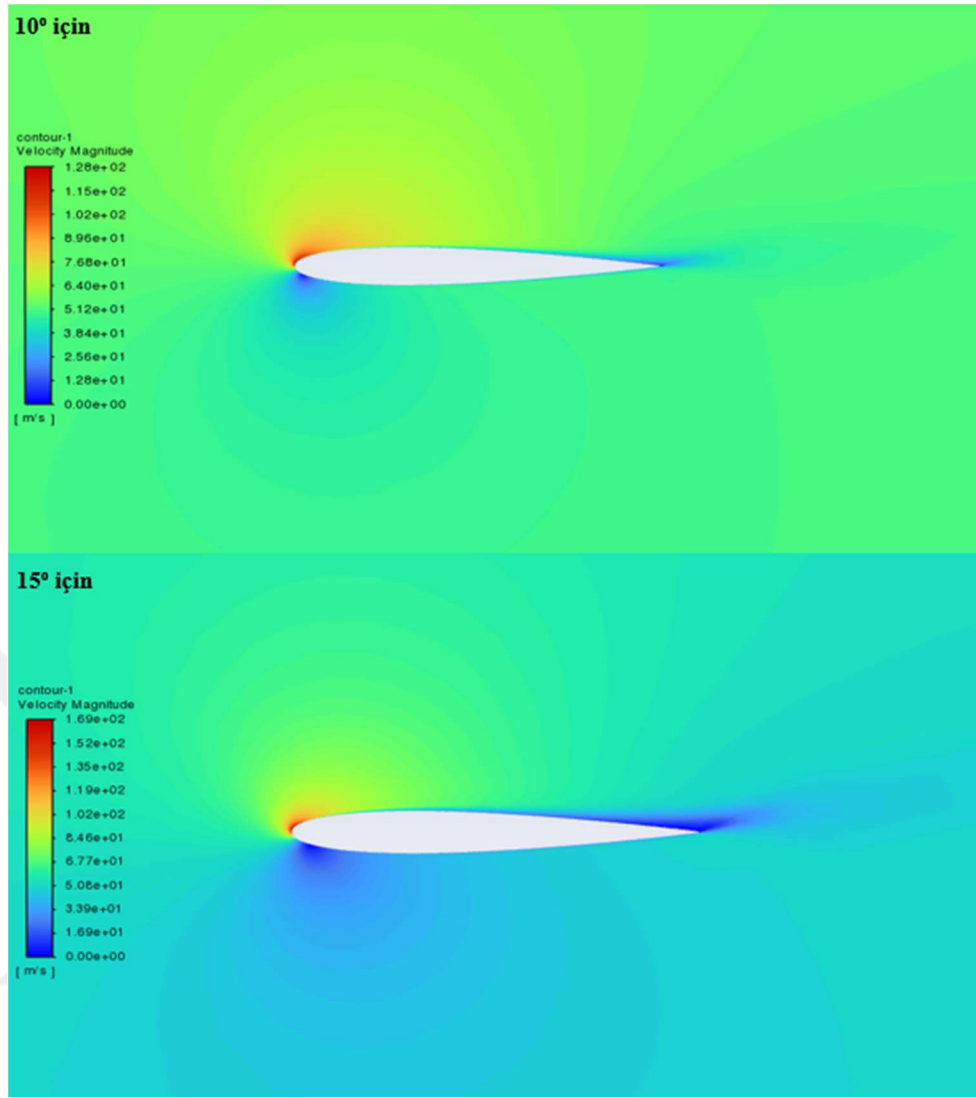
Hücum açıları ayrı ayrı incelenmiştir ve basınç katsayısı konturlarının, profilin simetrik olduğu da düşünülerek mantıklı olduğu sonucuna varılmıştır. Konturların hepsi incelendikten sonra, özellikle 10° ve 15° hücum açılarında kanat profili çevresindeki basınç katsayılarının (C_p) büyük ölçüde yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek basınç bölgelerinin yayıldığı alanın büyüdüğü görülmüştür.

4.2.5.4. Hız büyüklükleri konturları

Hız büyüklüklerinin yer aldığı konturlar 0° ve 5° hücum açıları için Şekil 4.35'te, 10° ve 15° hücum açıları için de Şekil 4.36'da incelenebilir. Bütün konturlarda basınçların en yüksek olduğu noktalarda hızların en düşük büyüklüklerde olduğu görülmüştür. Bu durumun gözlemlenmesi zaten beklenmektedir. Hücum açısı artıkça, profilin üst yüzeyinde, firar kenarı bölgesinde akış ayrılmaları meydana gelmiştir. Olması beklenen bu etki de gözlemlenmiştir. 15° hücum açısının daha da artırılması sonucunda perdövites (stall) durumu başlayacaktır. Hücum açısı arttıkça konturların hız büyüklüklerinin de arttığı görülmüştür. 0° hücum açısı hariç tutularak, diğer hücum açıları için hızın daha yüksek olduğu bölgeler doğal olarak profilin üst yüzeyi olmuştur. İncelenen konturlardan, sonuçların beklenildiği şekilde olduğu görülmüştür.



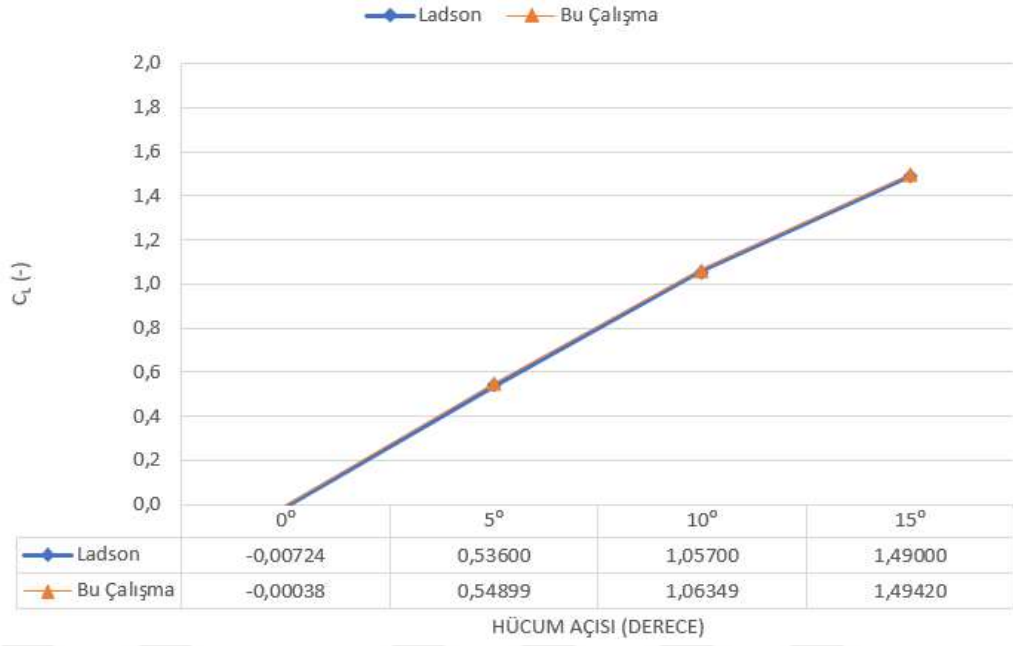
Şekil 4.35. 0° ve 5° hücum açıları için hız büyüklükleri konturları.



Şekil 4.36. 10° ve 15° hücum açıları için hız büyüklükleri konturları.

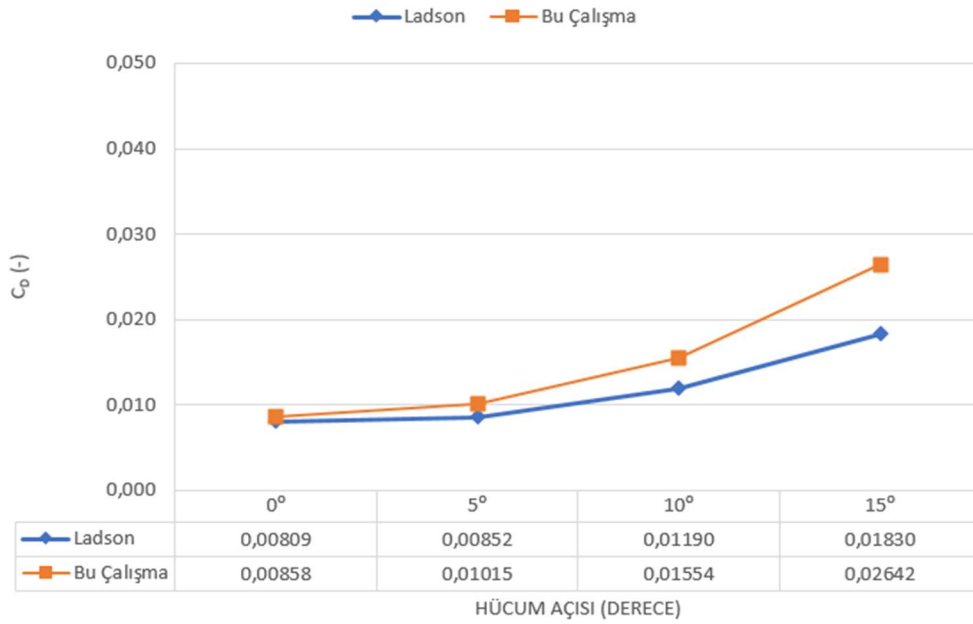
4.2.5.5. Kaldırma ve sürüklenme katsayılarının deneysel verilerle karşılaştırılması

Doğrulama çalışmaları kapsamında yapılan HAD analizi sonuçlarının deneysel veriler ile karşılaştırıldığı grafikler Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de görülebilir. Kaldırma (c_l) ve sürüklenme (c_d) katsayıları için aynı problemin dört farklı hücum açısındaki değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Kaldırma katsayısı (c_l) için sonuçların deneysel verilerle çakışık halde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.37. Deneysel sonuçlar ve bu çalışmanın sonuçları için kaldırma katsayısı (c_l) / hücum açısı grafiği.

Sürüklenme katsayısı sonuçlarına bakıldığında ise hücum açısı büyüdükçe, bu durum için 10°'den itibaren, değerlerde küçük sapmalar gözlemlenmiştir. Fakat bu sapmaların bu tür bir çalışma için kabul edilebilir seviyelerde olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4.38. Deneysel sonuçlar ve bu çalışmanın sonuçları için sürüklenme katsayısı (c_d) / hücum açısı grafiği.

5. AERODİNAMİK YÜK UYGULANAN KANAT KESİTİ İÇİN YAPISAL TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Doğrulama çalışmalarının tamamlanmasının ardından bu başlık altında aerodinamik yük uygulanan kanat kesiti için yapısal topoloji optimizasyonu yapılmıştır.

5.1. Problem Tanımı

Çalışmada 1 m veter uzunluğuna sahip olan NACA 0012 kanat profiline sahip bir kanat kesiti kullanılmıştır. Kesit üzerine 100 m/s akış hızına sahip hava -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° hücum açıları ile gönderilmiştir. Analiz deniz seviyesinde, standart atmosfer koşullarında icra edilmiştir. Akış hızı dikkate alınarak, problemin sıkıştırılamaz akış rejiminde çözümü yapılmıştır. Hız girişi- basınç çıkışı sınır koşulu kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak Spalart-Allmaras kullanılmıştır. Optimizasyon problemi için öncelikle aerodinamik akış problemi çözülmüş, ardından bu akış yükleri tek yönlü (one-way) olarak kanat kesiti üzerine uygulanmıştır.

Yükler iki farklı kanat kesiti konfigürasyonu için uygulanmıştır. Bu konfigürasyonlar için birbirinden bağımsız yapısal topoloji optimizasyonları yapılmıştır. Birinci konfigürasyonda veter çizgisi boyunca bir ana kiriş (spar) yerleştirilmiştir ve bu sparın rijit bir yapıya sahip olduğu kabul edilmiştir. İkinci konfigürasyonda ise veterin 0.25 ve 0.5 noktalarında konumlandırılacak şekilde iki adet nervür (rib) yerleştirilmiştir ve bu nervürler de rijit kabul edilmiştir. Bu konfigürasyonlar Şekil 5.1’de sırasıyla (a) ve (b) olarak görülmektedir.



(a)



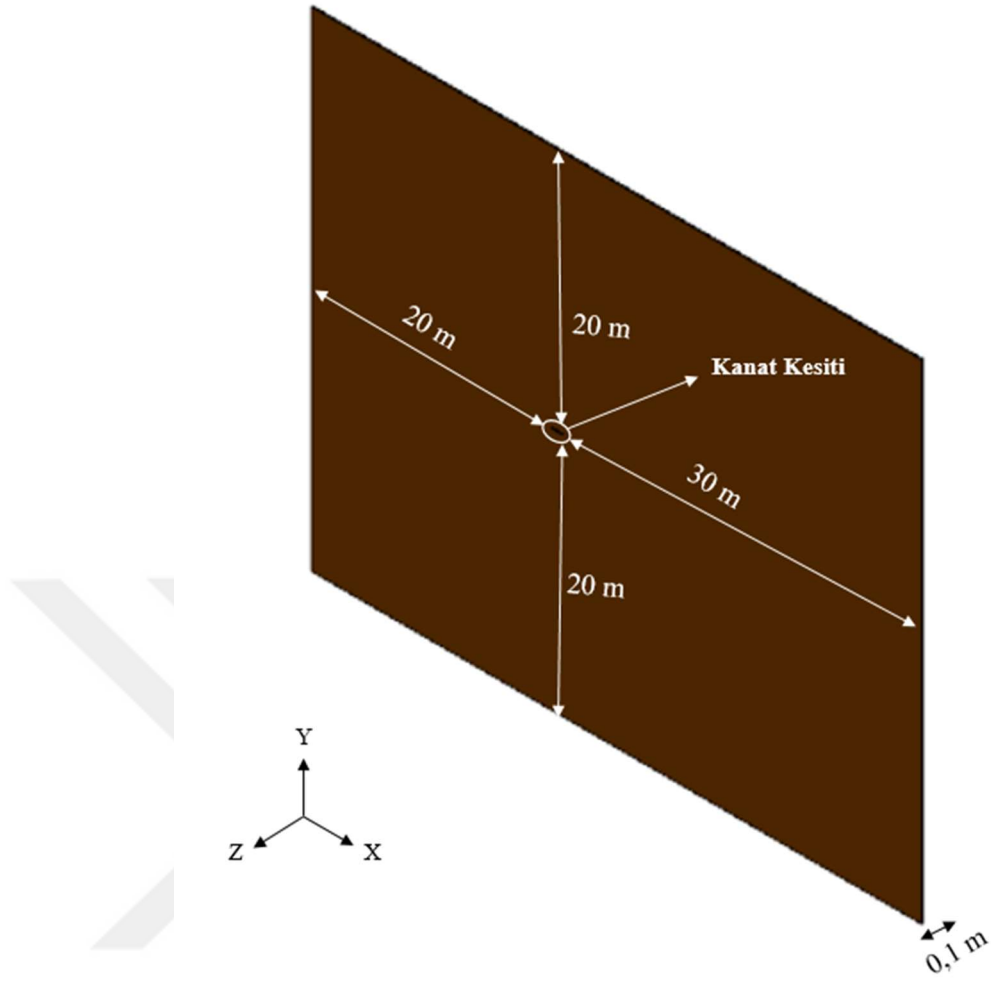
(b)

Şekil 5.1. Veter boyunca uzanan ana kiriş (spar) konfigürasyonu (a), 0.25 ve 0.5 noktalarında konumlandırılan nervür (rib) konfigürasyonu (b).

Geometriler, minimum uygunluk (compliance) prensibi kapsamında optimize edilmiştir. Penaltı faktörü 3 olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.1 (a) için $\mathcal{V}_f = 0.2$ olarak, Şekil 5.1 (b) $\mathcal{V}_f = 0.1$ olarak tanımlanmıştır.

5.2 Tasarım Hacmi Tanımı

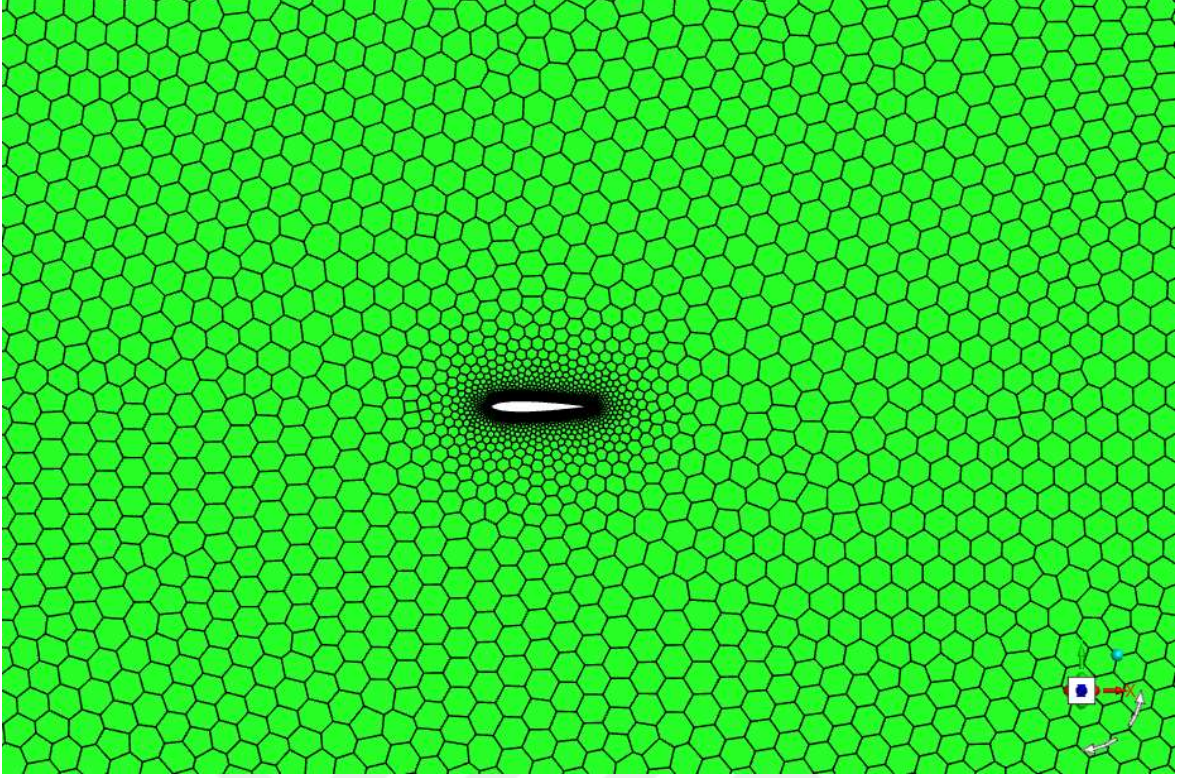
Kanat kesitine uygulanacak aerodinamik yüklerin hesaplanması için oluşturulmuş olan tasarım hacmi Şekil 5.2’de görülmektedir. Tasarım hacmi X yönünde 30 veter uzaklığında, -X yönünde 20 veter uzaklığında, $\pm Y$ yönlerinde ise 20 veter uzaklığında olacak şekilde oluşturulmuştur. Z yönünde ise 0.1 m kalınlığa sahip olduğu belirlenmiştir. Kanat kesiti, kendisini çevreleyen hacmin büyük olmasından dolayı görülemediği için Şekil 5.2’de beyaz renkli bir elipsin içine alınmıştır.



Şekil 5.2. Tasarım hacminin izometrik görünümü.

5.3. HAD Analizi için Ağ Yapısının Oluşturulması

Ağ yapısı oluşturulurken önceki alt bölümlerde doğrulama çalışması yapılmış olan tasarım alanının 0,1 m kalınlığa sahip olacak şekilde revize edilip kullanılabileceği düşünülmüştür. Ancak, ağ yapısı oluşturulduktan sonra istenilen kalite düzeyinde olmadığı görülmüştür. Bu yüzden metot değiştirilerek aynı hacim içerisinde polihedral elemanlar kullanılmıştır. Polihedral elemanların kaliteli bir ağ yapısı oluşturmak için oldukça faydalı olduğu ve toplam eleman sayısını düşürdüğü bilinmektedir. Ağ yapısı 580,525 polihedral eleman ve 1,328,124 düğüm noktasından oluşmaktadır. Ağ yapısı Şekil 5.3'te görülmektedir.

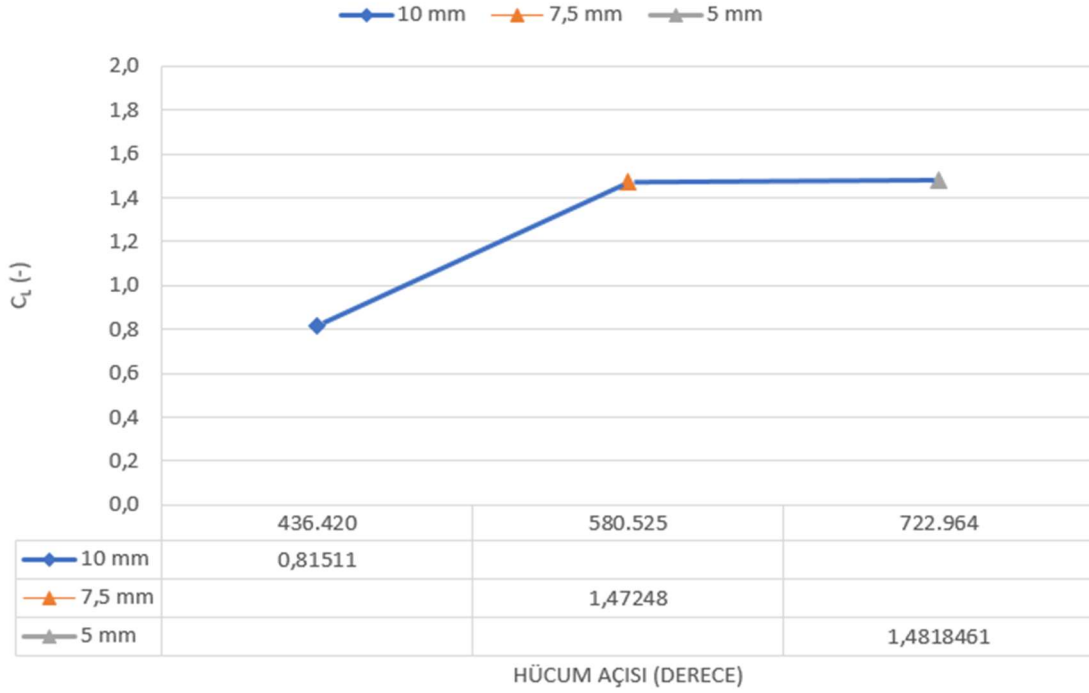


Şekil 5.3. Polihedral elemanlardan oluşturulan ağ yapısı.

5.4. Ağ Yapısından Bağımsızlık Çalışması

Bu çalışmanın yapılma amacından bölüm 4.2.4'te bahsedilmiştir. Bu yüzden bu alt bölümde çalışmanın neden yapıldığına tekrar değinilmemiştir.

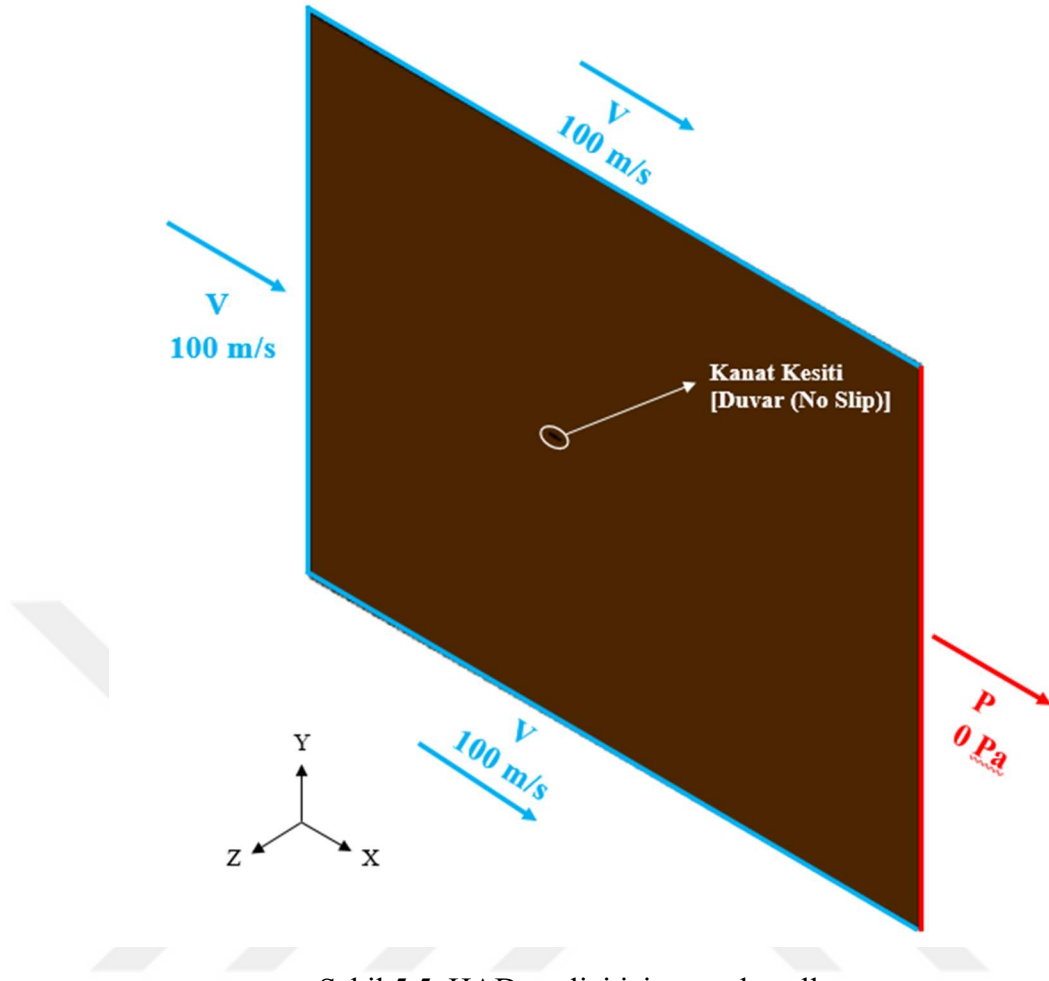
Ağ yapıları için global eleman boyutu en büyük 150 mm olarak tanımlanmıştır. Global minimum eleman boyutu 1 mm olarak belirlenmiştir. Kanat kesitinin alt ve üst yüzleri için yüzey boyutları 10 mm, 7.5 mm ve 5 mm olarak tanımlanmıştır ve kaldırma katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Bu değerlerinin eleman sayılarına göre değişimlerini gösteren bir grafik Şekil 5.4'te görülmektedir. Bu grafikteki en büyük değişiklik sonrasında ilgili parametrenin eleman sayısından bağımsız bir hale geldiği görülmüştür. Bu durumun 580,525 eleman ve sonrası için geçerli olduğu görülmüştür.



Şekil 5.4. Ağ yapısının eleman sayısından bağımsızlığı grafiği.

5.5. Sınır Koşullarının Tanımı

Tasarım hacmi için ağ yapısı oluşturulduktan sonra sınır koşulları tanımlanmıştır. Bu problemde hız girişi ve basınç çıkışı sınır koşulu kullanılmıştır. Bu sınır koşulunun kullanılma sebeplerinden önceki alt bölümlerde bahsedilmiştir. Şekil 5.5'te açık mavi ile gösterilen yüzeylerden, açık mavi ok yönünde hız girişi (100 m/s) olarak, kırmızı yüzey ise basınç çıkışı (0 Pa) olarak tanımlanmıştır. Kanat kesiti yüzeyleri kayma olmayan duvar olarak (no slip wall), kahverengi renge sahip ön yüzey ve bu açıdan görülemeyen arka yüzey Şekil 5.5'teki eksene göre Z yönünde simetri olarak tanımlanmıştır.



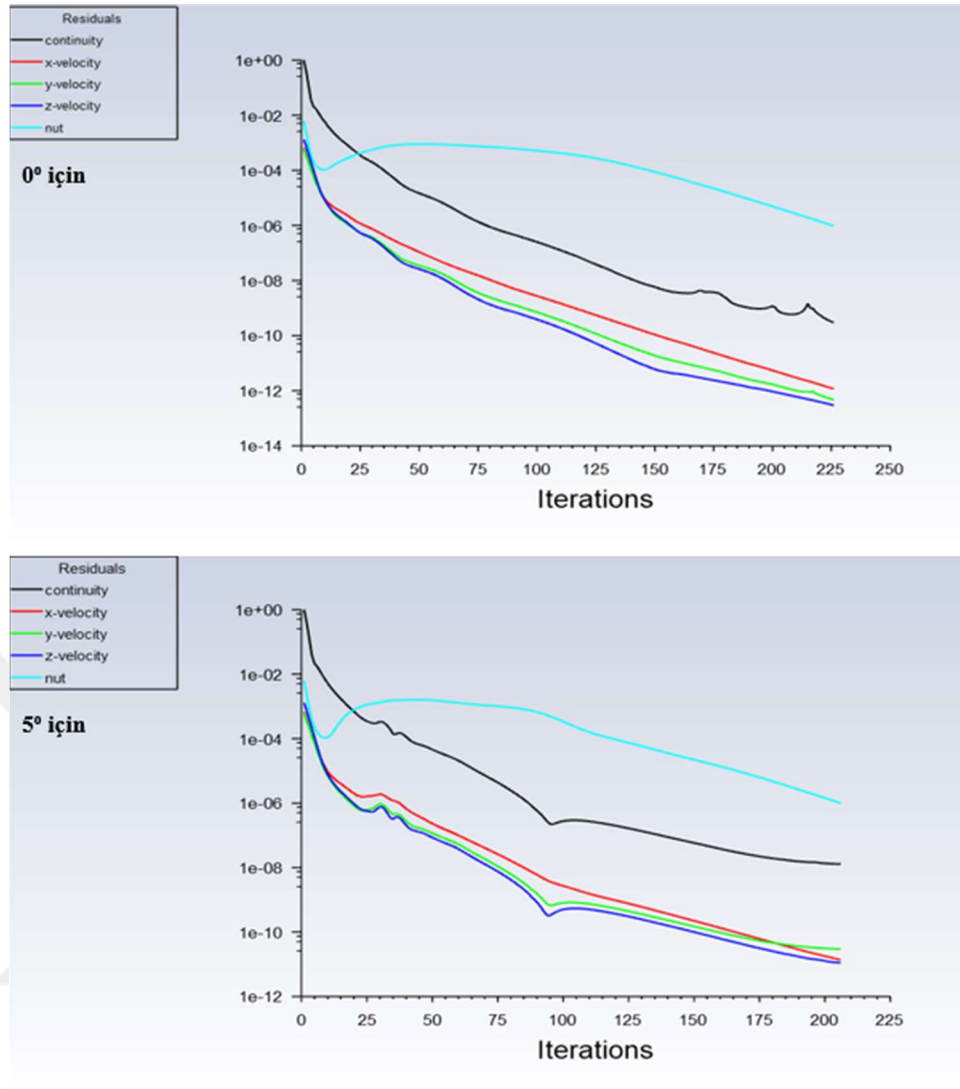
Şekil 5.5. HAD analizi için sınır koşulları.

5.6 HAD Analizi Sonuçları

Bütün tanımlamalar yapıldıktan sonra -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° hücum açıları için HAD problemleri çözülmüştür. Bu alt bölümde hepsi için ayrıntılı sonuçlara yer verilmiştir.

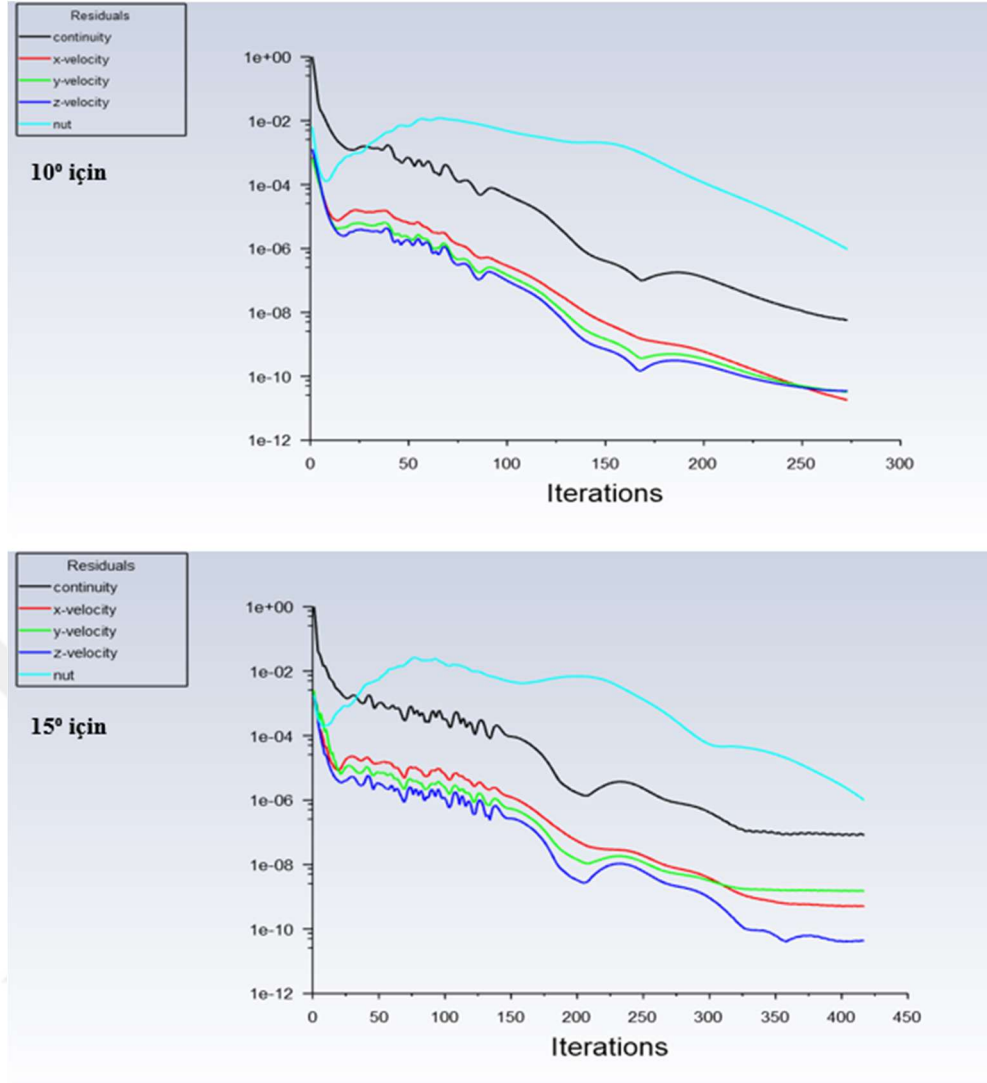
5.6.1. Artık (Residual) grafikleri

Kanat kesiti için sadece hücum açılarının değiştirildiği, diğer koşulların aynı kaldığı HAD çözümleri yapılmıştır. 0° ve 5° hücum açılarında çözümler elde edildikten sonra süreklilik denklemi, X, Y, Z hızları ve türbülans denkleminin bir parametresi olan nut gibi parametrelerin hepsinin en yüksek $1E-5$ seviyesinden başlayarak düşük $1E-12$ seviyelerinde yakınsadığı görülmüştür. Bu seviyelerde yakınsama ise problem için yeterli görülmüştür. Problemler sırasıyla 225 ve 207 iterasyonda sonucunda yakınsamıştır. Grafikler Şekil 5.6’da görülmektedir.



Şekil 5.6. 0° (üst) ve 5° (alt) hücum açıları için artık (residual) parametre grafikleri.

10° ve 15° hücum açılarında çözümler elde edildikten sonra süreklilik denklemi, X, Y, Z hızları ve türbülans denkleminin bir parametresi olan nut gibi parametrelerin hepsinin en yüksek 1E-5 seviyesinden başlayarak düşük 1E-11 seviyelerinde yakınsadığı görülmüştür. Bu seviyelerde yakınsama ise problem için yeterli görülmüştür. Problemler sırasıyla 274 ve 421 iterasyonda sonucunda yakınsamıştır. Grafikler Şekil 5.7’de görülmektedir.

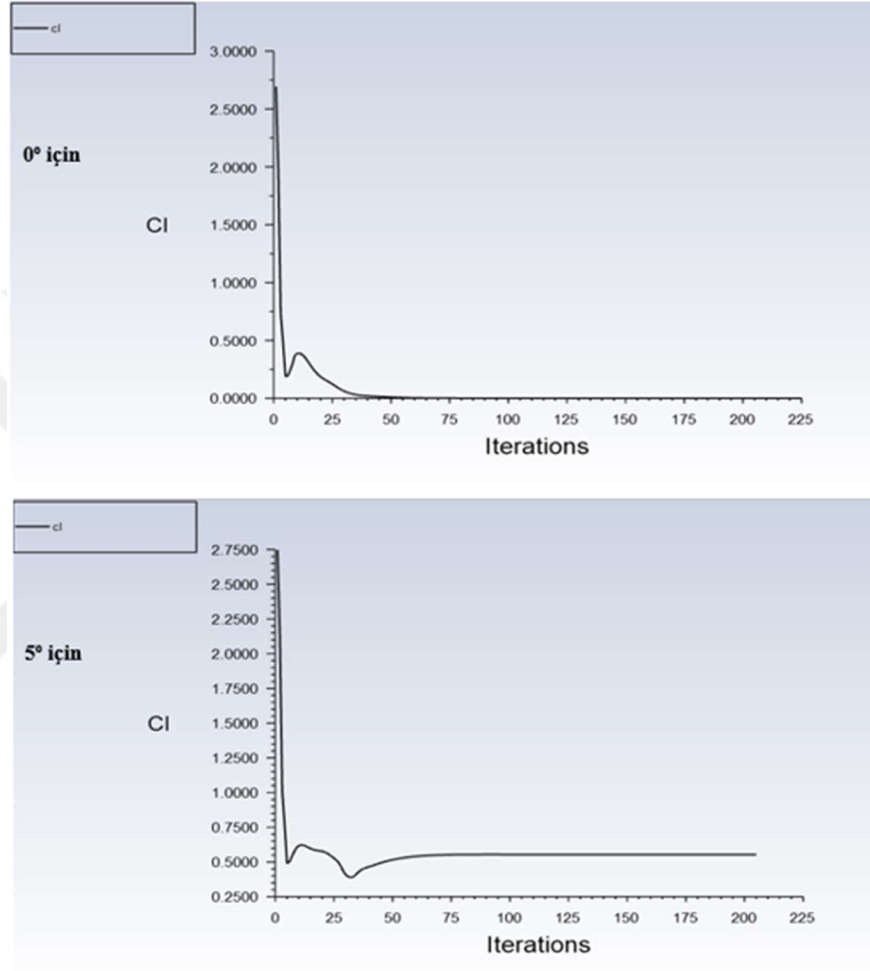


Şekil 5.7. 10° (üst) ve 15° (alt) hücum açıları için artık (residual) parametre grafikleri.

-15°, -10° ve -5° hücum açıları için yapılan çözümlerin, pozitif işaretli çözümler ile aynı iterasyon sayılarında yakınsadığı görülmüştür. Bu sebeple tekrara düşmemek adına grafikler bu bölüme eklenmemiştir. Kesitin alt ve üst yüzeylerinin simetrik olduğu düşünüldüğünde bu durum ile karşılaşılması beklenmiştir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'deki bu grafikler incelendiğinde hücum açıları yükseldikçe grafikteki dalgalanmaların arttığı yorumu yapılabilir.

5.6.2. Kaldırma ve sürüklenme katsayısı grafikleri

Önceki bölümlerde incelenen grafiklere ek olarak, kaldırma katsayısı (c_l) ve sürüklenme katsayısı (c_d) kontrol edilmiştir. Bu grafikler de 0° , 5° , 10° ve 15° derece hücum açıları için incelenmiştir.

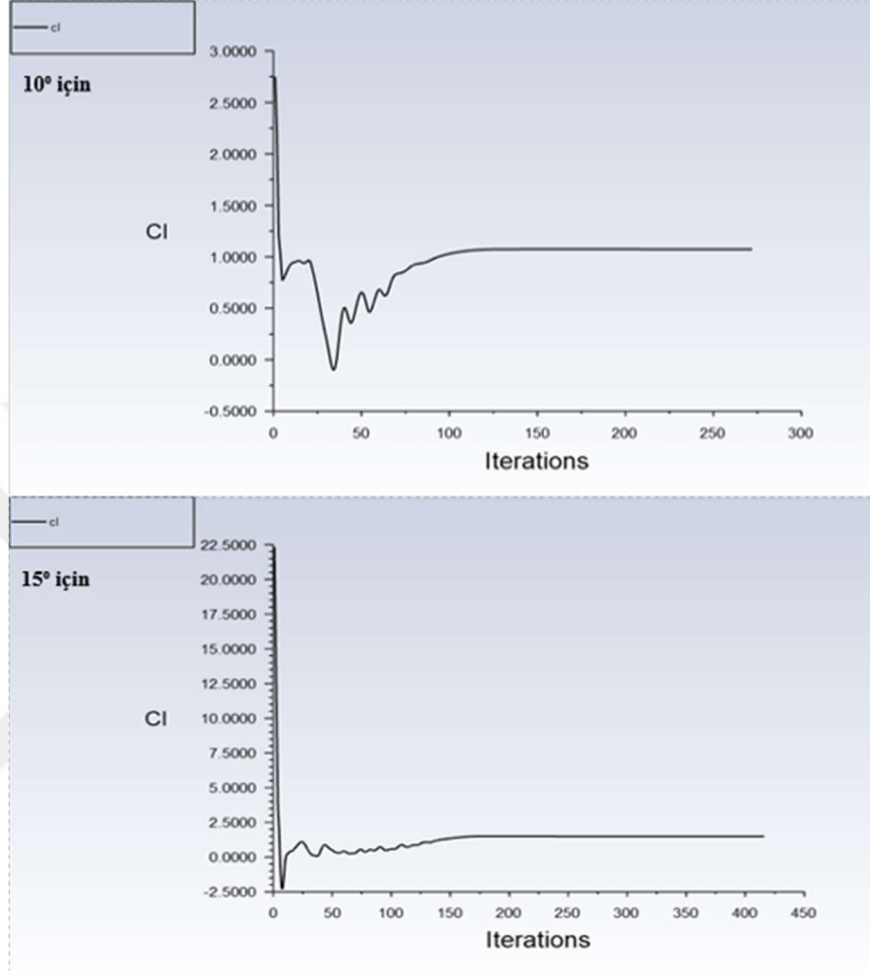


Şekil 5.8. 0° ve 5° hücum açıları için kaldırma katsayısı (c_l) grafikleri.

Şekil 5.8’de yer alan grafikler incelendiğinde 0° ve 5° hücum açısı için yapılan çözümlerde kaldırma katsayısının (c_l) yakınsadığı gözlemlenmiştir. Yakınsama sırasıyla 50. ve 75. iterasyondan sonra gerçekleşmiştir.

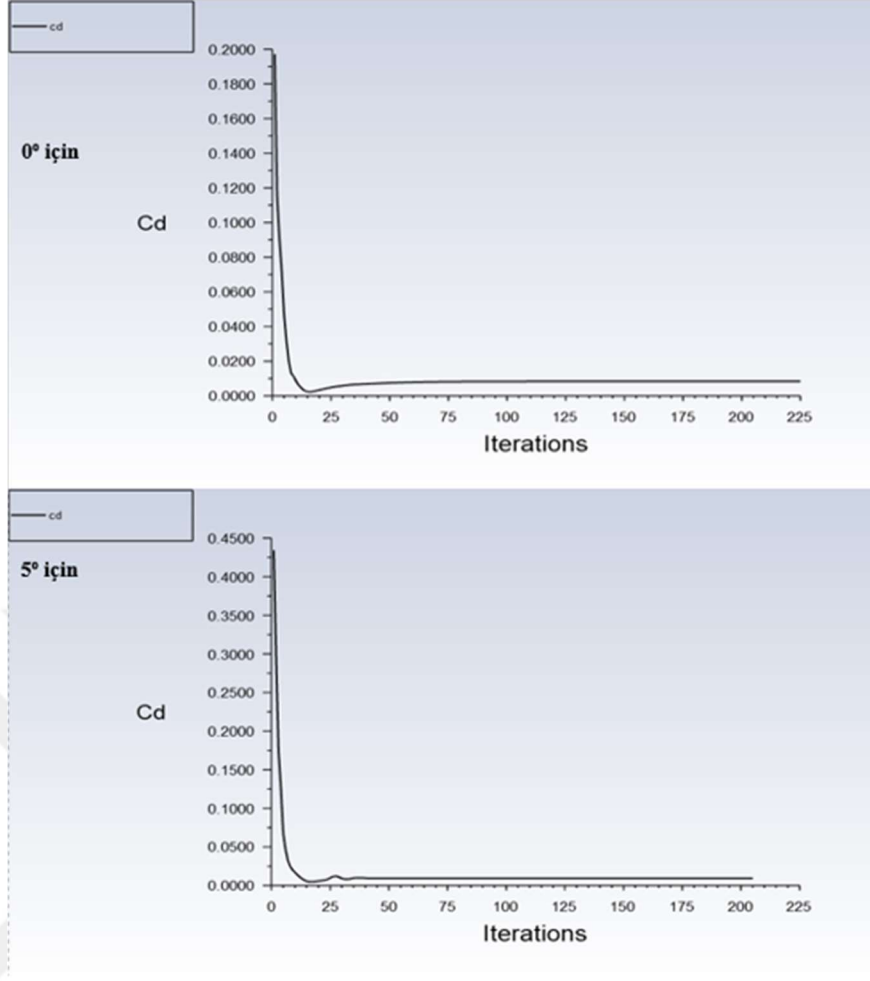
Şekil 5.9’da yer alan grafikler incelendiğinde 10° ve 15° hücum açısı için yapılan çözümlerde kaldırma katsayısının (c_l) yakınsadığı gözlemlenmiştir. Yakınsama sırasıyla 100. ve 150. iterasyondan sonra gerçekleşmiştir. Bu bölümde kaldırma katsayısının (c_l)

yakınsaması için gereken iterasyon sayısının hücum açısı arttıkça lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir.



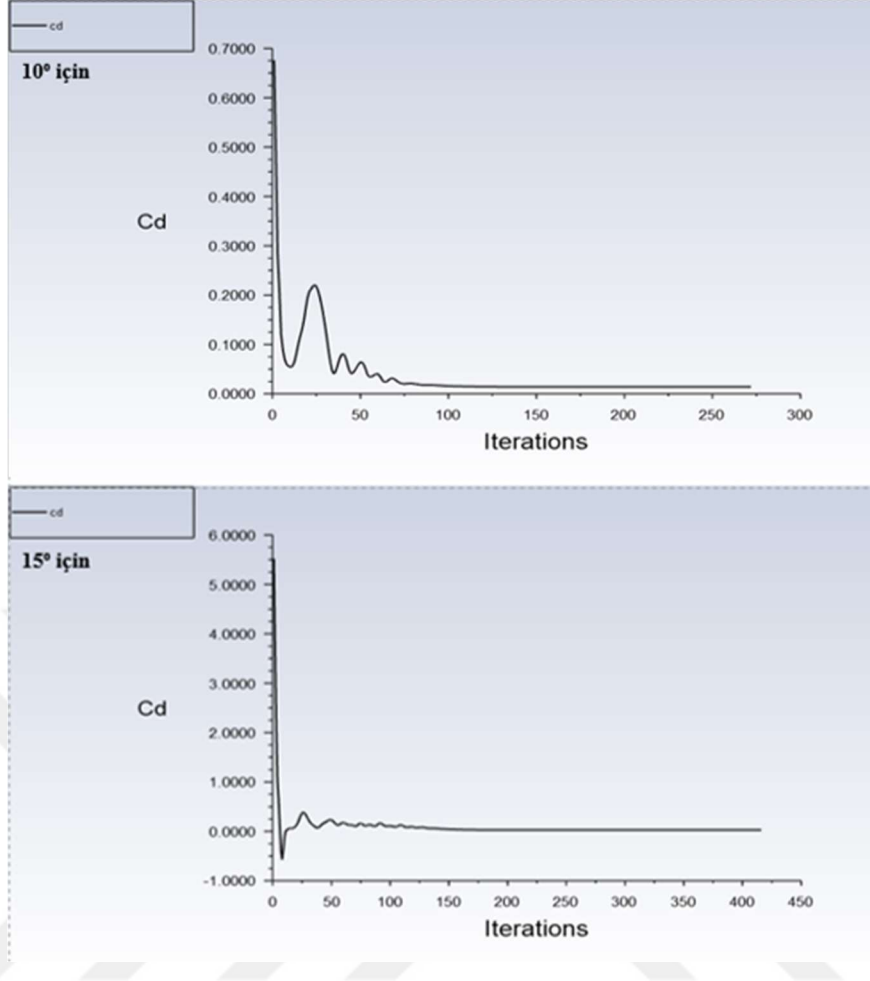
Şekil 5.9. 10° ve 15° hücum açıları için kaldırma katsayısı (c_l) grafikleri.

Şekil 5.10'da yer alan grafikler incelendiğinde 0° ve 5° hücum açısı için yapılan çözümlerde sürüklenme katsayısının (c_d) yakınsadığı gözlemlenmiştir. Yakınsama sırasıyla 50. ve 44. iterasyondan sonra gerçekleşmiştir.



Şekil 5.10. 0° ve 5° hücum açıları için sürüklenme katsayısı (c_d) grafikleri.

Şekil 5.11’de yer alan grafikler incelendiğinde 10° ve 15° hücum açısı için yapılan çözümlerde sürüklenme katsayısının (c_d) yakınsadığı gözlemlenmiştir. Yakınsama sırasıyla 100. ve 148. iterasyondan sonra gerçekleşmiştir.



Şekil 5.11. 10° ve 15° hücum açıları için sürüklenme katsayısı (c_d) grafikleri.

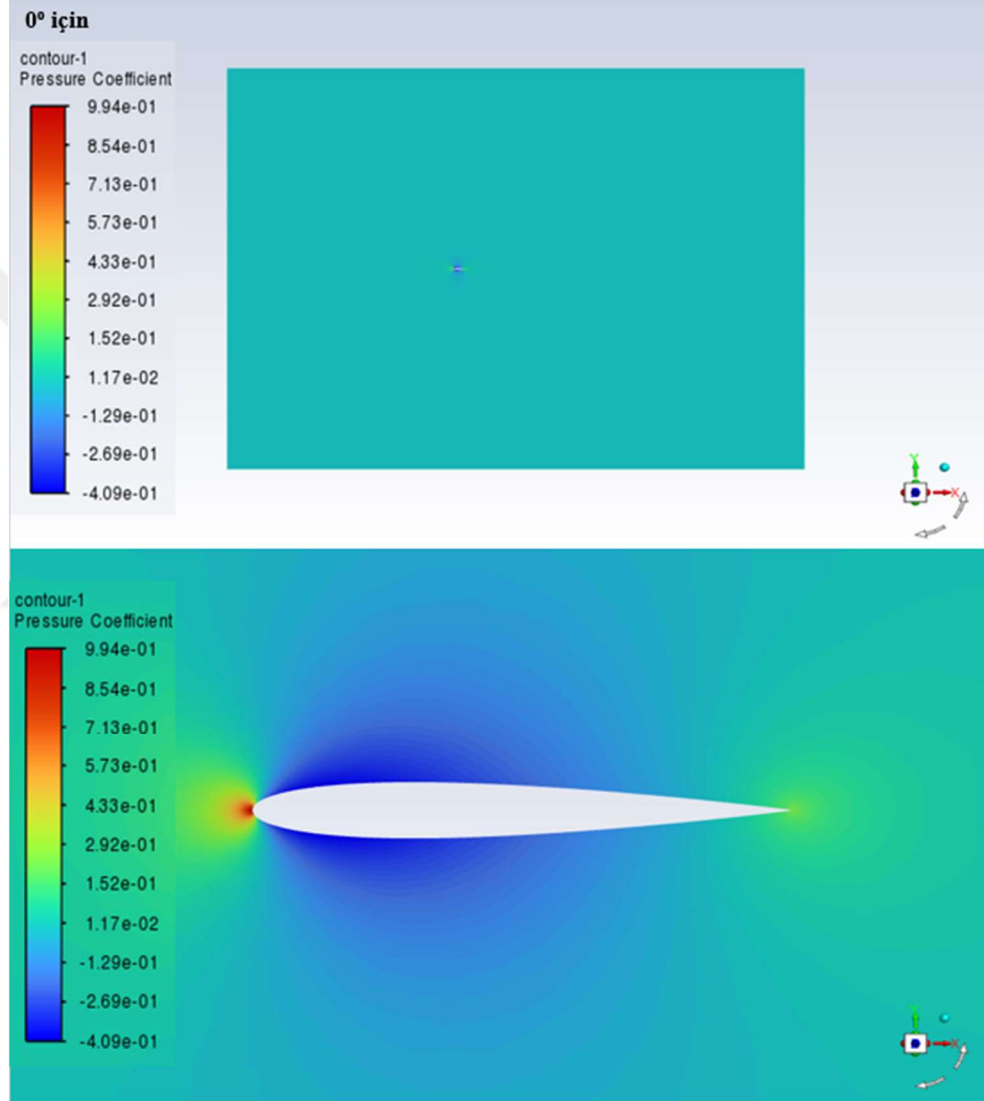
Negatif hücum açıları için HAD analizi tamamen aynı koşullar altında yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kanat profilinin simetrik olması nedeniyle -5° , -10° ve -15° hücum açıları için bu grafikler, yukarıdaki grafiklerin bir tekrarı niteliğinde olacaktır. Sonuçlar tamamen aynı olmasa bile farkların ihmal edilebilecek düzeyde olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenden dolayı negatif açılar için yakınsama grafikleri tez metnine eklenmemiştir.

5.6.3. Basınç katsayısı konturları

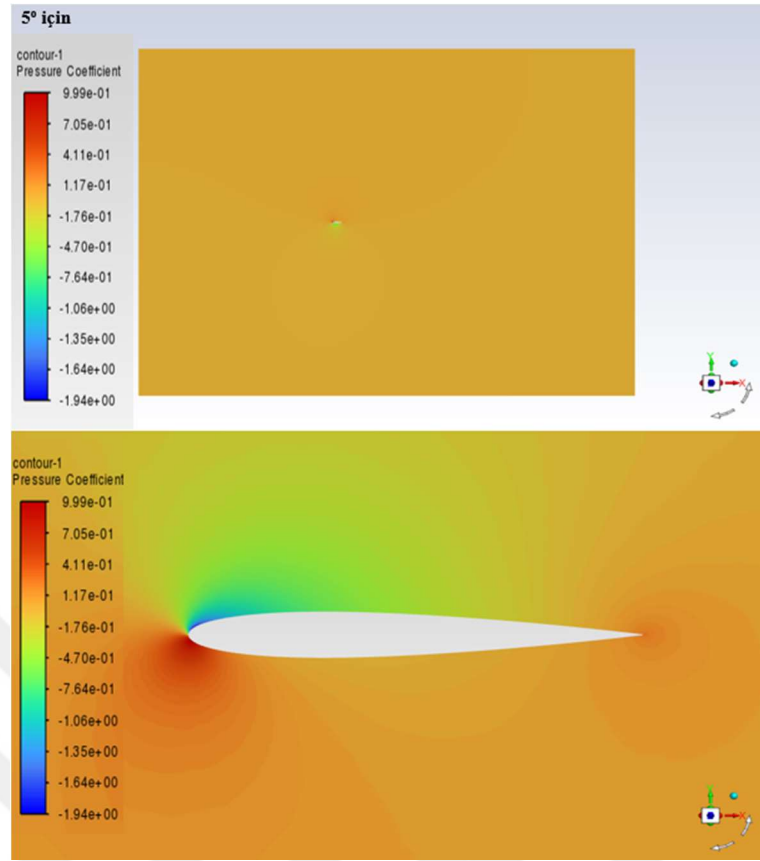
Bu alt bölümde basınç katsayısı konturları (c_p) incelenmiştir. Bu konturların incelenmesinin amacı, basınç katsayılarının farklılık gösteren hücum açılarında kanat kesiti çevresinde nasıl değiştiğinin anlaşılması olmuştur.

0° , 5° , 10° , 15° hücum açıları için basınç katsayısı konturları (c_p) sırasıyla Şekil 5.12, 5.13, 5.14 ve 5.15'te görülmektedir. -5° , -10° , -15° hücum açıları için de Şekil 5.16, 5.17 ve

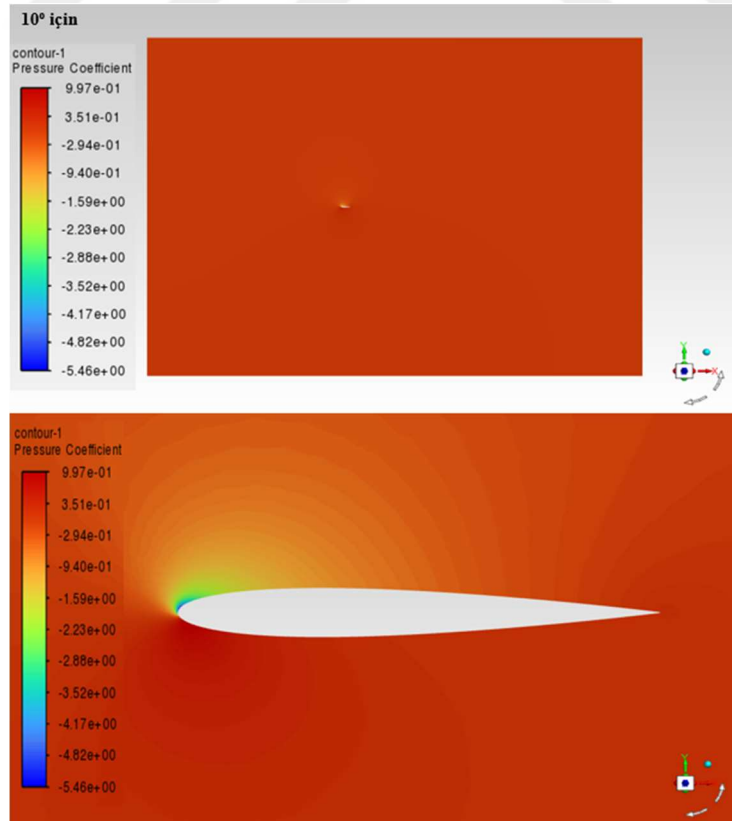
5.18’de görölmektedir. Şekillerde, tasarım hacimlerinin tamamı üstte, kanat profili profili çevresinin yakınlştırılmış görselleri ise altta yer almaktadır. Önceki alt bölümlerde konturlar hakkındaki yorumlar pozitif hücum açıları için yapılmıştır. Bu çözümler de aynı profil ve hücum açılarında yapıldığı için dağılımı görsel olarak yorumlamaya gerek duyulmamıştır.



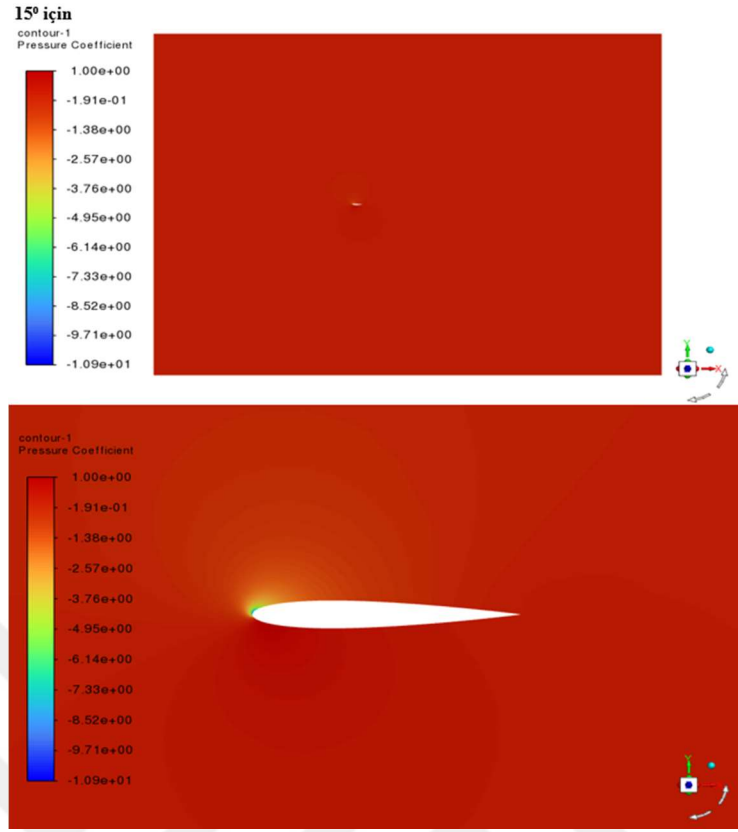
Şekil 5.12. 0° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.



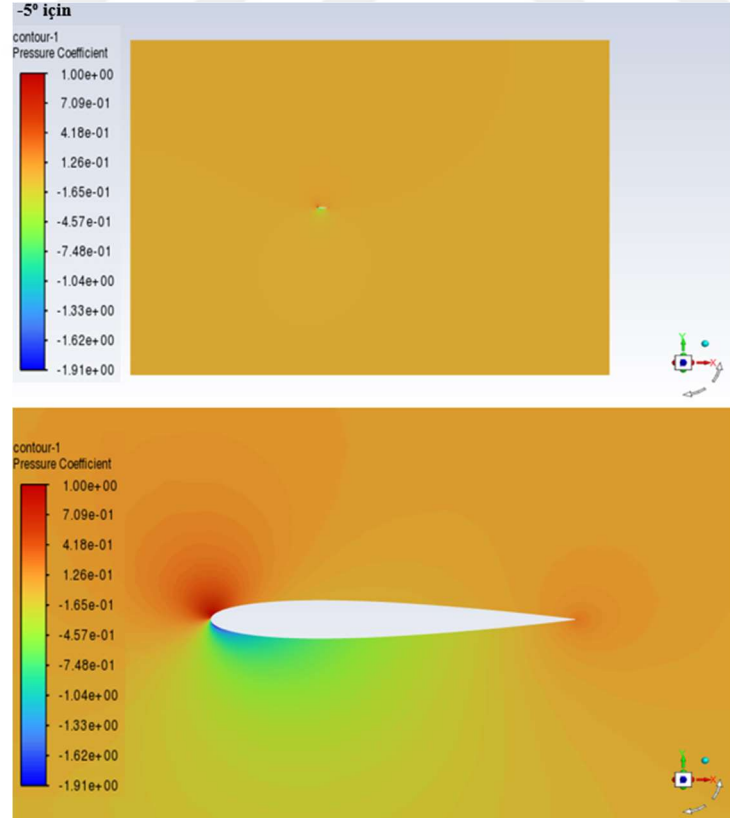
Şekil 5.13. 5° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.



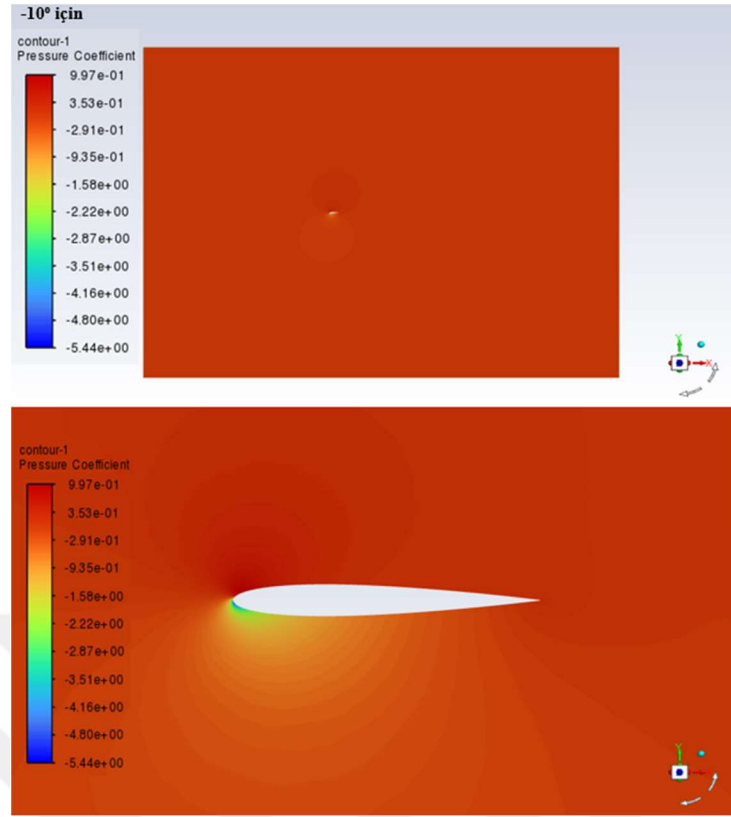
Şekil 5.14. 10° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.



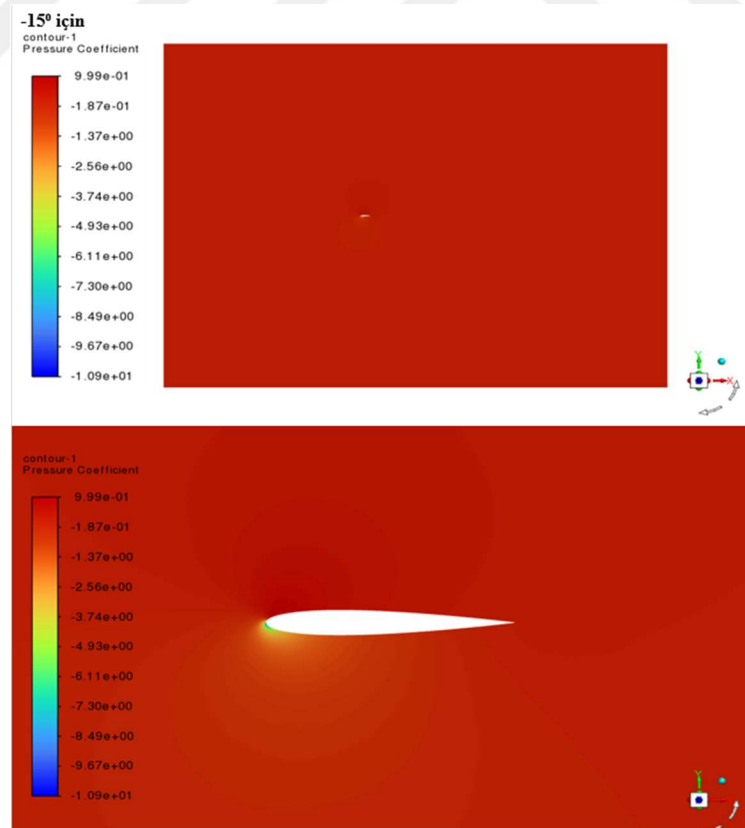
Şekil 5.15. 15° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p)konturları.



Şekil 5.16. -5° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.



Şekil 5.17. -10° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.



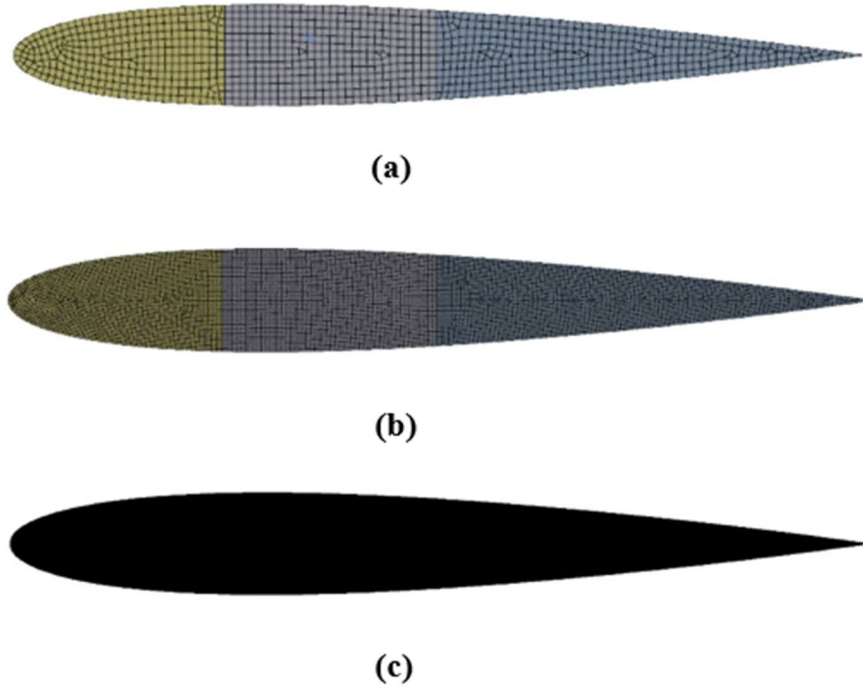
Şekil 5.18. -15° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturları.

Bu alt bölümde basınç katsayısı konturlarının incelenmesiyle, pozitif ve negatif hücum açılarında farklar saptanmıştır. Değerlerde en fazla %1 olacak şekilde farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların düzensiz ağ yapısı kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. HAD analizi sonuçlarının bu bölümün devamında incelenmiş olan çok noktalı (multi-point) topoloji optimizasyonu sonuçlarını biraz da olsa etkilediği düşünülmüştür. Çünkü kesit üzerine kuvvetler HAD analizi ile elde edilen kuvvetlerdir.

5.7. Yapısal Topoloji Optimizasyonu için Ağ Yapısını Oluşturulması

Bu alt bölümde yapısal topoloji optimizasyonu yapılacak olan kanat kesitleri için uygun eleman boyutu seçimi yapılmıştır. Çözüm süresinin uzunluğu ve üretilebilirlik parametreleri seçim için değerlendirme kriterlerini oluşturmuştur. Değerlendirme, 5.1 bölümünde detayları verilen Şekil 5.1 (b) geometrisi kullanılarak yapılmıştır.

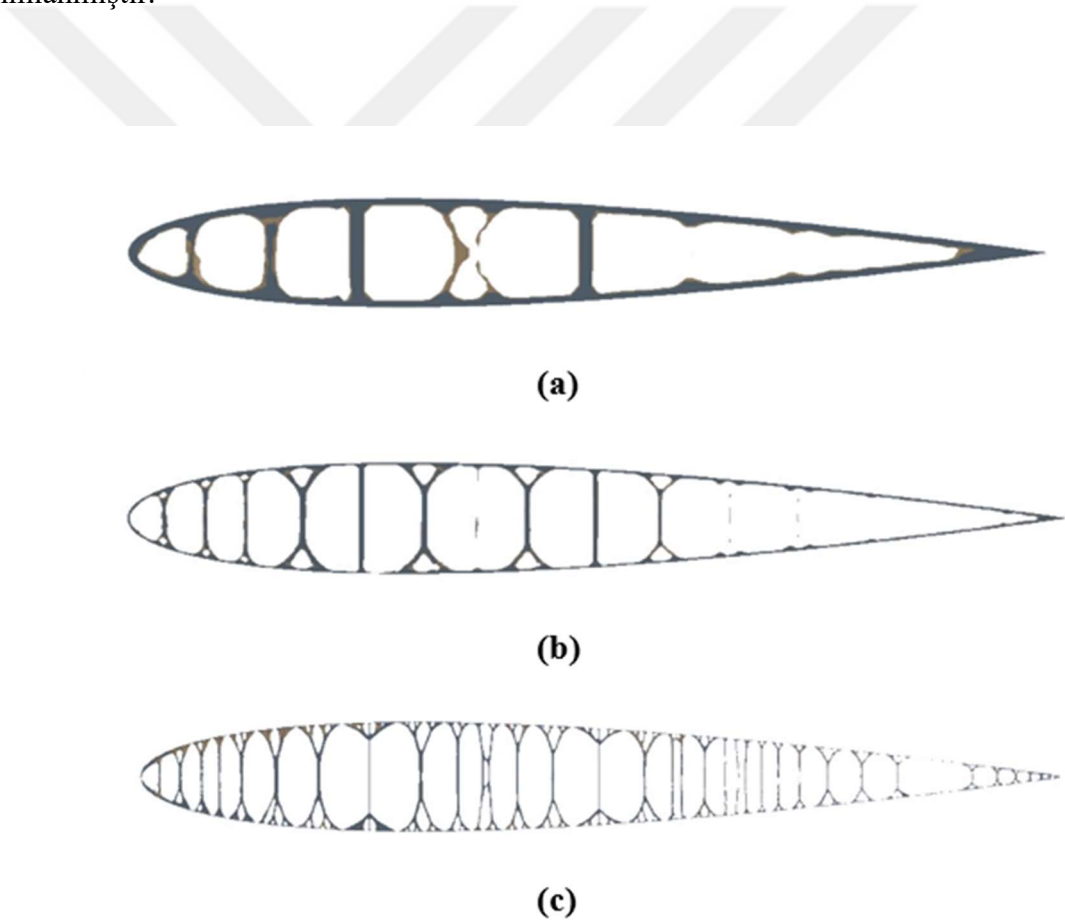
Bu geometri için sırasıyla 9 mm, 3 mm, 1 mm eleman boyutlarına sahip düzensiz ağ yapıları oluşturulmuştur. Şekil 5.19'da (a) 9 mm, (b) 3 mm, (c) 1 mm eleman boyutuna sahip altıyüzlü (hexahedral) elemanlardan oluşturulmuş ağ yapısını temsil etmektedir.



Şekil 5.19. Farklı eleman boyutlarına sahip ağ yapıları: (a) 9 mm boyutlu elemanlarla oluşturulan ağ yapısı, (b) 3 mm boyutlu elemanlarla oluşturulan ağ yapısı, (c) 1 mm boyutlu elemanlarla oluşturulan ağ yapısı.

Şekil incelendiğinde (a) en büyük eleman boyutuna sahip ağ yapısı olduğu görülmektedir. Bölge ayrımları ve elemanlar bu versiyon için göz ile görülebilmektedir. (b) 3 mm boyuta sahip elemanlardan oluşturulmuştur. Ağ yapısının elemanları ve bölge ayrımları göz ile görülebilecek seviyededir. (c) en küçük boyutlu elemanlara sahip ağ yapısıdır. Bu elemanlar sayıca fazla ve çok küçük olduğu için siyah bir ağ yapısı görüntüsüne sahip olarak görülmektedir.

Farklı eleman boyutları ile oluşturulmuş ağ yapılarına sahip geometriler için yapısal topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Topoloji optimizasyonu, 0° hücum açısı kullanılarak yapılan HAD analizi çözümlerinden elde edilen aerodinamik kuvvetler ve alt bölüm 5.8’de belirtilen sınır koşulları kullanılarak icra edilmiştir. Yeni geometriler için $\mathcal{V}_f = 0.1$ olarak tanımlanmıştır.



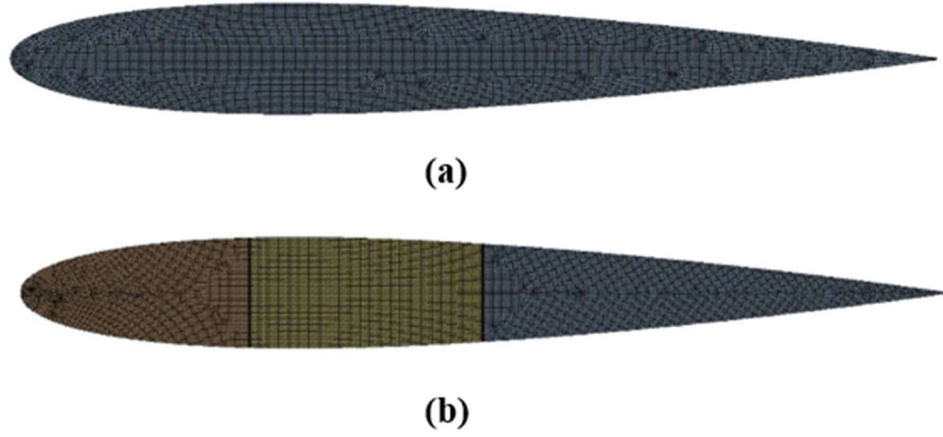
Şekil 5.20. Üç farklı ağ yapısı için topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 9 mm boyutlu elemanlardan oluşan ağ yapısı için, (b) 3 mm boyutlu elemanlardan oluşan ağ yapısı için, (c) 1 mm boyutlu elemanlardan oluşan ağ yapısı için.

Üç farklı eleman boyutu kullanılarak oluşturulmuş ağ yapılarına sahip olan geometriler için $V_f = 0.1$ olarak tanımlanan yapısal topoloji optimizasyon sonuçları Şekil 5.20’de gösterilmiştir. (a) 9 mm boyutlu elemanlar ile oluşturulmuş geometri için, (b) 3 mm boyutlu elemanlar ile oluşturulmuş geometri için, (c) 1 mm boyutlu elemanlar ile oluşturulmuş geometri için sonuçları göstermektedir.

(a) sonucu incelendiğinde sonucun malzeme dağılımının hücum kenarı bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir. Kesitin alt ve üst yüzeyine dik bir şekilde dağılan yapısal elemanların firar kenarı bölgesinde yoğun olmadığı görülmüştür. Bu bölgede sadece kesitin firar kenarına çok yakın olan küçük bir bölgesinde malzeme varlığı görülmüştür. Bu ağ yapısının oluşturulma ve çözüm süresi bakımından oldukça avantajlı olduğu görülmüştür. (b) sonucu incelendiğinde (a) sonucundaki yapısal elemanlara göre çok daha ince görünen aynı eğilime sahip elemanlardan oluşmuştur. Dikey yapısal elemanların sayılarının arttığı görülmüştür. Çözüm süresi ve ağ yapısının oluşturulması uzun sürmemiştir. (a) sonucu gibi geleneksel bir geometriden daha farklı bir sonuç çıkmıştır. Bu nedenle ilginç ve yenilikçi sonuçlar alınabileceği değerlendirilmiştir. (c) incelendiğinde sonucun malzeme dağılımının çok sayıda ince ve birbirlerine çok yakın mikro elemanlardan oluştuğu görülmüştür. Kesitin hücum kenarından firar kenarını kadar neredeyse her yerde ince ve kesit çevresine dik yapısal destekler görülmektedir. Ağ yapısının oluşturulması ve topoloji optimizasyonu süreci oldukça uzun sürmüştür. Bu nedenlerle 1 mm eleman boyutuna sahip ağ yapılarının kullanımı, bu problem için verimli bulunmamıştır.

Değerlendirmenin sonucunda detayları kaçırmamayı sağlayacak, ideal çözüm süresine sahip, malzeme dağılımı sonuçlarının orijinal bulunduğu 3 mm boyuta sahip elemanlar ile oluşturulan ağ yapısına sahip geometrilerin problem çözümlerinde kullanılmasına karar verilmiştir.

Şekil 5.21’de gösterilen iki konfigürasyon için de ağ yapıları düzensiz yapıda ve 3 mm eleman boyutuna sahip altıyüzlü (hexahedral) elemanlardan oluşturulmuştur. (a) için ağ yapısı, 8,772 elemana ve 63,907 düğüm noktasına sahiptir. (b) için ağ yapısı, 18,728 elemana ve 105,649 düğüm noktasına sahiptir. Şekil 5.21’de iki geometri için de oluşturulan ağ yapıları görülmektedir.

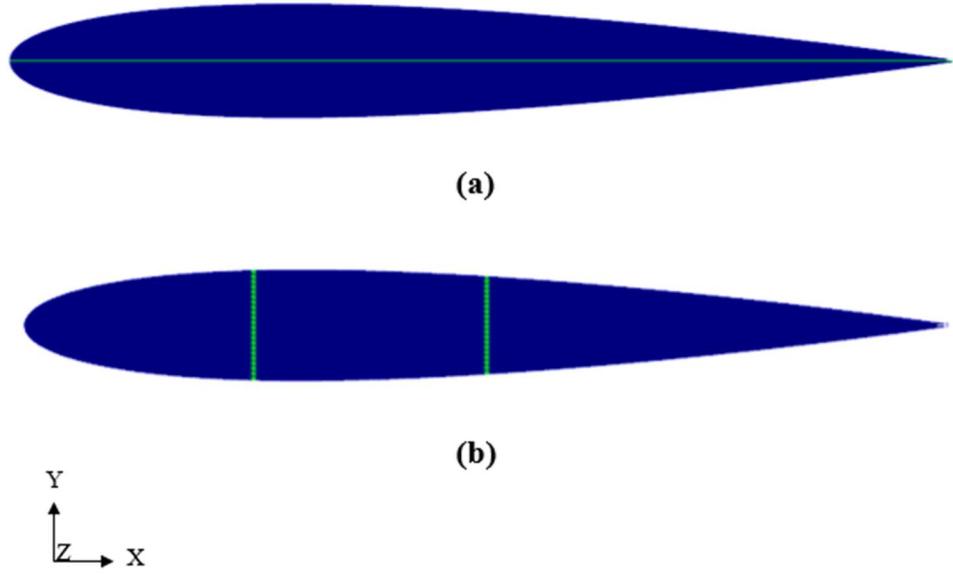


Şekil 5.21. İki konfigürasyon için oluşturulan ağ yapıları: (a) rijit ana kiriş konfigürasyonu için, (b) iki dikey nervür konfigürasyonu için.

5.8. Topoloji Optimizasyonu için Sınır Koşullarının Tanımlanması

Ağ yapısı tanımlandıktan sonra, sınır koşulları her iki versiyon için de tanımlanmıştır. Şekil 5.22'deki eksen referans alınarak, iki versiyon için de kesitlerin ön ve arka yüzeylerine Z yönünde simetri koşulu tanımlanmıştır. Bu şekilde, (a) konfigürasyonu için yatay olan ana kiriş (spar) yeşil renk ile gösterilmiştir ve rijit olduğu kabul edilen bu yapı boyunca kanat kesitinin X ve Y eksenlerindeki hareketi kısıtlanmıştır. Profilin üst ve alt yüzeyine HAD analizi ile elde edilen basınç yükleri uygulanmıştır. Bu yüzeyler optimizasyona dahil edilmemiştir.

(b) konfigürasyonu için de X ve Y eksenlerindeki hareketin sınırlandığı elemanlar, 0.25 ve 0.5 veter noktasındaki nervürler (ribler) olmuştur. Şekil 5.22 (b)'de bu nervürler (ribler) yeşil renk ile gösterilmiştir. Kesitin üst ve alt yüzeylerine, diğer versiyonda olduğu gibi, basınç yükleri uygulanmıştır. Simetri koşulları ile ilgili bilgi bir üst paragrafta belirtilmiştir.



Şekil 5.22. Veter boyunca uzanan ana kiriş (spar) konfigürasyonu için sınır koşulları (a), 0.25 ve 0.5 noktalarında konumlandırılan nervür (rib) konfigürasyonu için sınır koşulları (b).

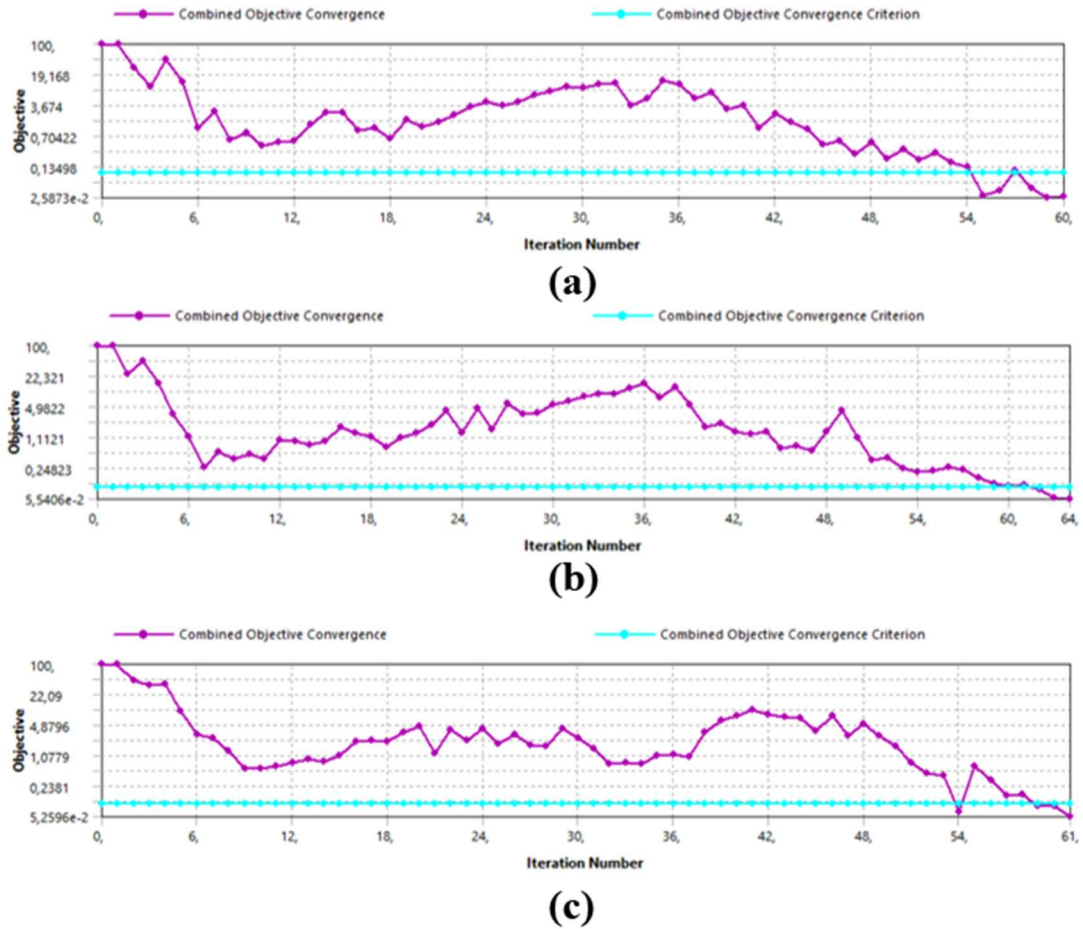
5.9. Yapısal Topoloji Optimizasyonu Sonuçları

HAD analizi ile elde edilen kuvvetlerin kanat kesitine uygulanmasının ardından yapısal topoloji optimizasyonu süreci başlatılmıştır. Amaç fonksiyonu ve diğer koşullardan 5.1 ve 5.8 bölümlerinde bahsedilmiştir. Kesitin üst ve alt yüzeyleri kabuğu oluşturduğu gerekçesi ile optimizasyon dışında bırakılmıştır. Farklı hücum açıları kullanılarak yapılan HAD çözümlerinden elde edilen yükler kullanılarak, kanat kesiti için ayrı ayrı optimizasyon çözümleri yapılmıştır. Ardından da yedi farklı hücum açısı (-15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15°) sonuçları tek bir optimizasyon problemine aktarılmıştır. Bu problem için ilk etapta sadece en kritik hücum açılarının koşulları kullanılarak topoloji optimizasyonu yapılması düşünülmüştür. Fakat yüksek hücum açılarında özellikle firar bölgelerine doğru akım ayrılmasının olması, daha düşük açılarda da topoloji optimizasyonu problemi için değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaştırmıştır. Bu şekilde geometri, tek bir hücum açısı ile oluşan kuvvetin referansına sahip bir sonuç yerine birden fazla hücum açısının kuvvetlerini taşıyabilecek uygunlukta olacak şekilde optimize edilmiştir. Bu çalışmayı diğer tez çalışmalarından ayıran bir yönü de optimum geometri için birden fazla yük koşuluna en uygun olacak malzeme dağılımını bulmak olmuştur. Bu şekilde tasarım faaliyetlerine, gerçek mühendislik koşullarına daha uygun olabilecek geometriler ortaya çıkmıştır.

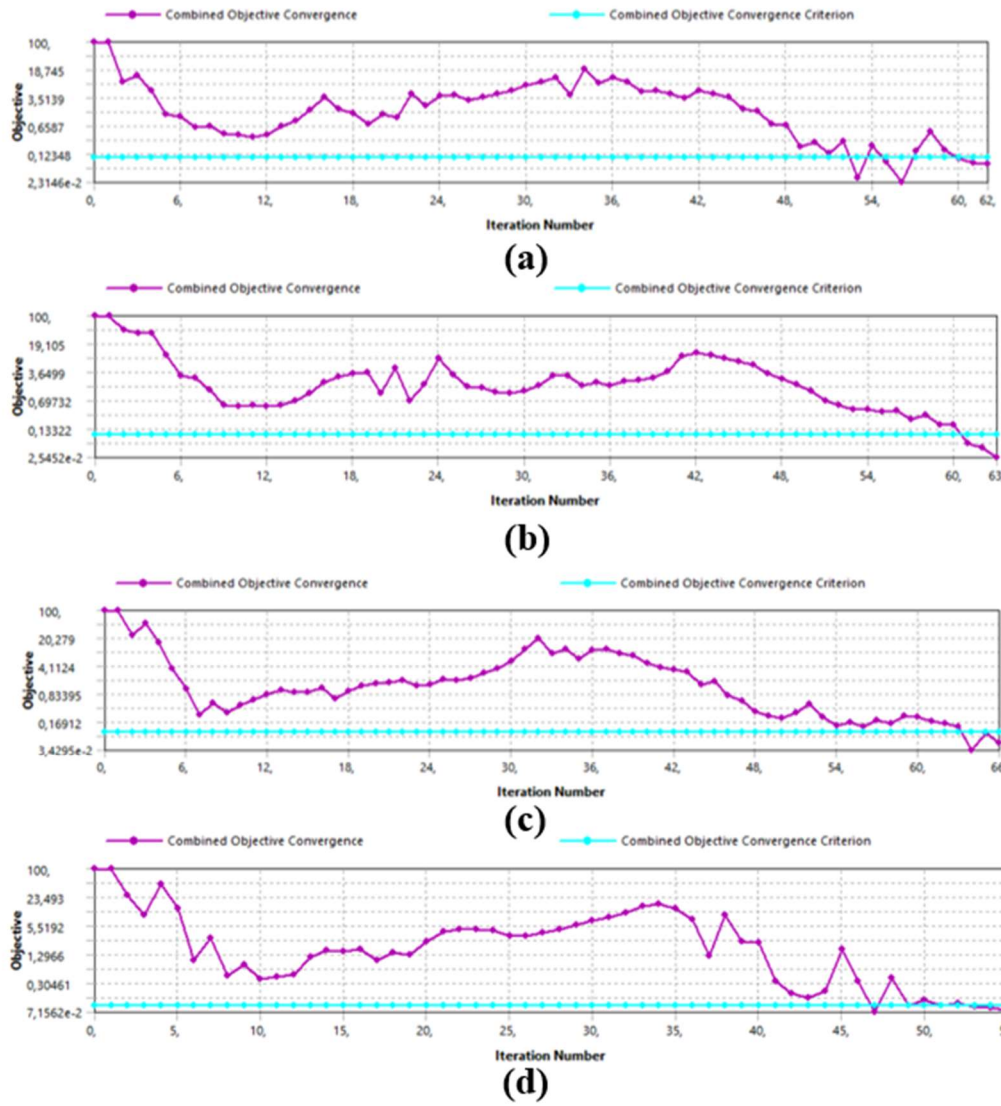
5.9.1. Rijit ana kiriş problemi için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları

Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te amaç fonksiyonunun yakınsama grafikleri görülmektedir. Bütün hücum açıları için amaç fonksiyonları yakınsamıştır. Şekil 5.23 (a) 15° , (b) 10° , (c) 5° hücum açısı problemleri için yakınsama grafiklerini içermektedir. Problemler sırasıyla 60 (9 dakika, 14 saniye), 64 (9 dakika, 41 saniye) ve 61 (9 dakika, 38 saniye) iterasyonda yakınsamıştır. Şekil 5.24 (a) 0° , (b) -5° , (c) -10° ve (d) -15° hücum açısı çözümü için yakınsama grafiklerini içermektedir. Problemler sırasıyla 62 (10 dakika, 43 saniye), 63 (10 dakika, 24 saniye), 66 (8 dakika, 38 saniye), 55 (8 dakika, 24 saniye) iterasyonda yakınsamıştır.

Hücum açısının artması ile yakınsama için gerekli olan iterasyon sayısının artacağı düşünülmüştür, fakat grafikler incelendiğinde böyle bir duruma rastlanmamıştır. Bu yüzden, hücum açısının artışı ve iterasyon sayısı arasında anlamlı bir ilişki kurulamamıştır.

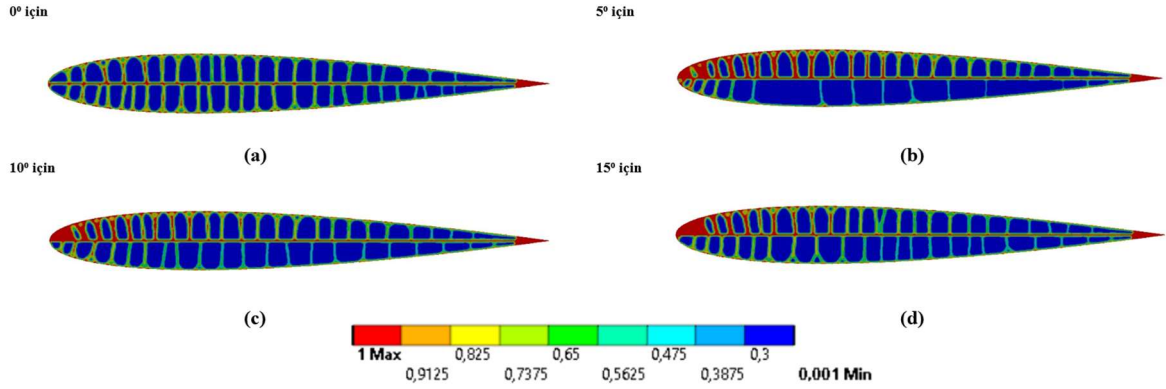


Şekil 5.23. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) 15° , (b) 10° , (c) 5° hücum açısı için.

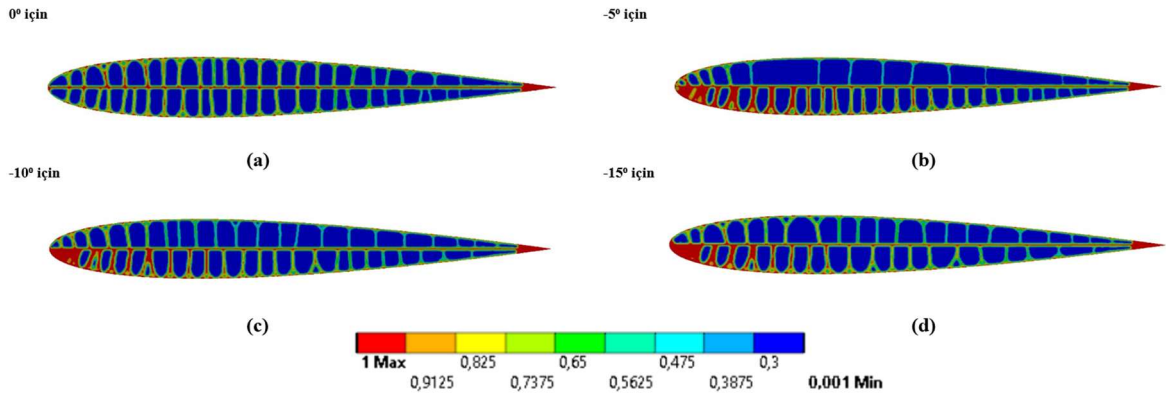


Şekil 5.24. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) 0° , (b) -5° , (c) -10° , (d) -15° hücum açısı için.

Şekil 5.25'te 0° , 5° , 10° , 15° hücum açıları kullanılarak, Şekil 5.26'da -5° , -10° , -15° , 0° hücum açıları kullanılarak birbirinden bağımsız olarak yapılan topoloji optimizasyonlarının sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.25. Ana kiriş konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 0° hücum açısı için, (b) 5° hücum açısı için, (c) 10° hücum açısı için, (d) 15° hücum açısı için. ($V_f = 0.2$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)



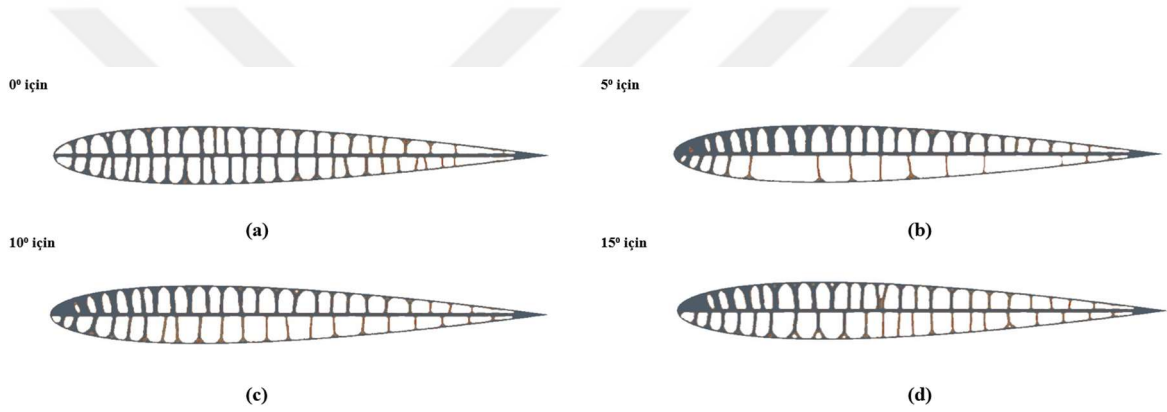
Şekil 5.26. Ana kiriş konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 0° hücum açısı için, (b) -5° hücum açısı için, (c) -10° hücum açısı için, (d) -15° hücum açısı için. ($V_f = 0.2$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)

Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'daki sonuçlar, eleman yoğunluk değerleri $0.3 \leq \rho \leq 1$ aralığında olacak şekilde gösterilmiştir. Kırmızı renkli elemanlar tam dolu, mavi renkli elemanlar ise boş elemanları, diğer renkler ise ara elemanları temsil etmektedir. Bu durumda, yoğunluğu $\rho \leq 0.3$ 'ün altında kalan her eleman yukarıdaki şekillerde mavi renk ile gösterilmiştir.

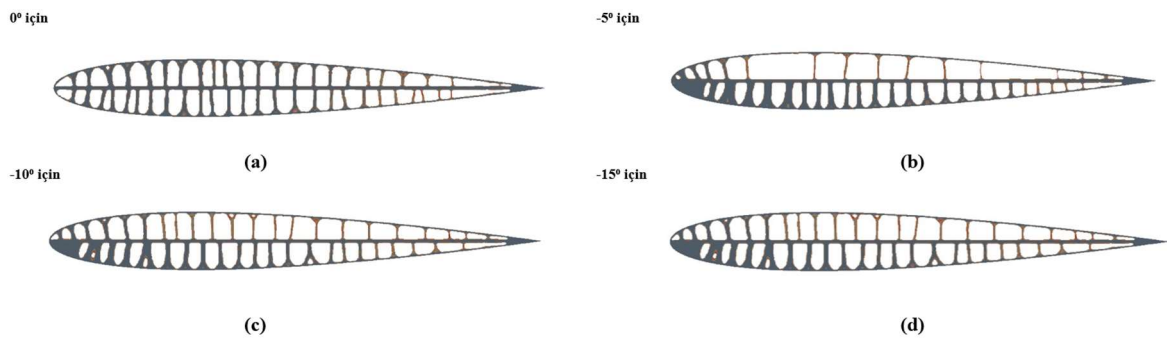
Bu sonuçlar incelendiğinde, malzeme dağılımının pozitif ve negatif işaretli hücum açıları sonuçları için birbirlerine tam tersi olacak bölgelerde yoğunlaştığı görülmüştür. Profilin simetrik olmasından dolayı bu durumun makul olduğu kabul edilmiştir. 0° hücum

açısı sonucu için, kesitteki elemanlar neredeyse simetrik olacak şekilde dağılmıştır. Diğer hücum açıları için elemanların yoğunlaştığı bölge, hücum kenarı bölgesi olmuştur. Hücum açılarındaki artışın ardından bu bölgedeki yoğunlaşmanın sonuçlarda gözlemlenmesi beklenen bir durum olduğu kabul edilmiştir. Bütün hücum açılarında, firar kenarındaki küçük bir bölgede de eleman yoğunluğunun fazla olduğu görülmüştür.

Sonuçlar, farklı bir gösterim ile Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'deki gibi de görüntülenebilmektedir. Bu şekillerde, sonuçları gerçek bir ürün görüntüsü olarak görebilmek mümkündür. Bu sonuçlarda eleman yoğunluk değerleri $0.3 \leq \rho \leq 1$ aralığında olacak şekilde gösterilmiştir. $\rho \leq 0.3$ yoğunluğundaki elemanlar (boş) beyaz renk ile gösterilmiştir. Tam dolu elemanlar gri renk, ara elemanlar ise kahverengi ile gösterilmiştir.

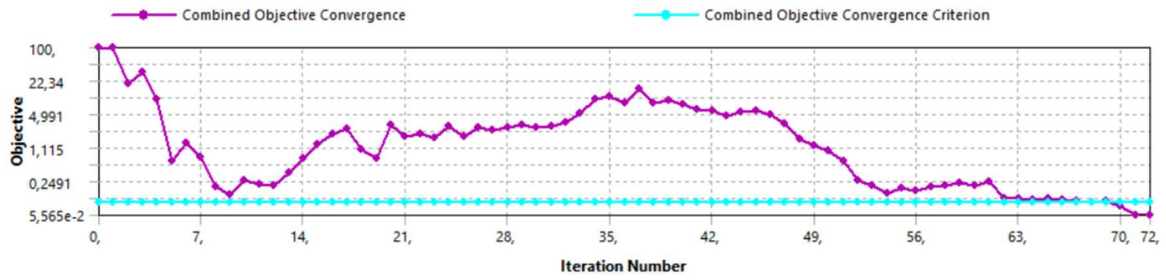


Şekil 5.27. Ana kiriş konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları (alternatif gösterim): (a) 0° hücum açısı için, (b) 5° hücum açısı için, (c) 10° hücum açısı için, (d) 15° hücum açısı için. ($V_f = 0.2$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)



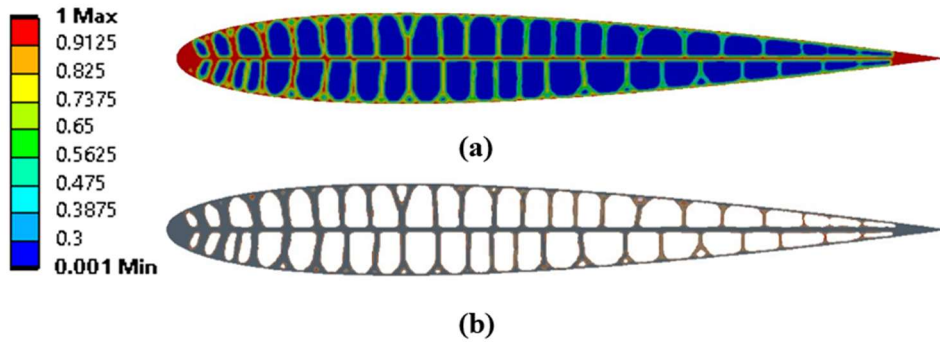
Şekil 5.28. Ana kiriş konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları (alternatif gösterim): (a) 0° hücum açısı için, (b) -5° hücum açısı için, (c) -10° hücum açısı için, (d) -15° hücum açısı için. ($V_f = 0.2$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)

Ana giriş konfigürasyonu için yedi farklı hücum açısı statik analiz sonucunun eş zamanlı olarak etki ettiği kanat kesiti için yapılan çok noktalı (multi-point) yapısal topoloji optimizasyonu için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği Şekil 5.29’da gösterilmiştir. 72 iterasyondan sonra yakınsama gerçekleşmiştir ve çözüm 1 saat 24 dakika sürmüştür. Çok noktalı optimizasyon sürecinin getirdiği avantajların yanında, çözüm süresinin tek noktalı problemlere göre oldukça uzun sürdüğü görülmüştür. Bu da sonuç elde etmek için gereken maliyetlerin artışına neden olmuştur.



Şekil 5.29. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: Çok noktalı yapısal topoloji optimizasyonu için.

Şekil 5.30’da çok noktalı yapısal topoloji optimizasyonu sonucu, eleman yoğunluk değerleri $0.3 \leq \rho \leq 1$ aralığında olacak şekilde iki farklı türde gösterilmiştir. Bu sonuç gösteriminde, (a) için kırmızı renkli elemanlar tam dolu, mavi renkli elemanlar ise boş elemanları ($\rho \leq 0.3$), diğer renkler ise ara elemanları temsil etmektedir. (b) için, tam dolu elemanlar gri renk, ara elemanlar ise kahverengi ile gösterilmiştir. Boş elemanlar ($\rho \leq 0.3$) beyaz renk ile gösterilmiştir.



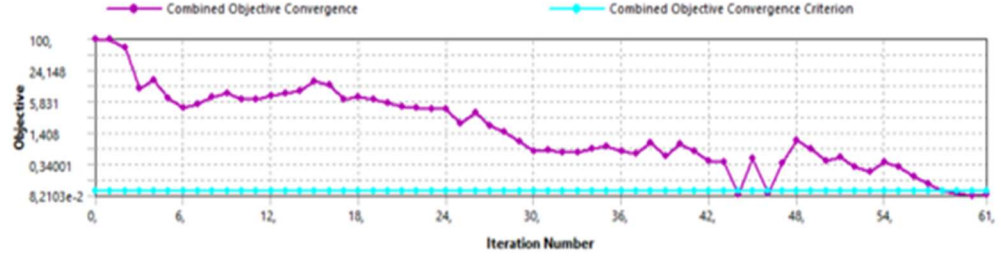
Şekil 5.30. Yedi farklı hücum açısı için çok noktalı (multi-point) yapısal topoloji optimizasyonu sonucu: (a) çok renkli gösterim, (b) alternatif gösterim. ($V_f = 0.2$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir).

Şekil 5.30'daki optimum sonuç incelendiğinde, eş zamanlı olarak uygulanan yedi farklı hücum açısının sonuçlarının etkisi bariz bir şekilde anlaşılmıştır. Yedi hücum açısının etkisi ile hücum kenarının etrafında eleman miktarının yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Firar kenarında da önceki sonuçlar gibi küçük bir bölgede eleman yoğunluğunun olduğu görülmüştür. Hücum açılarının birbirinden bağımsız olarak uygulandığı çözümlerden farklı olarak ana girişin (spar) alt ve üst bölgesinde malzeme dağılımının neredeyse homojen olduğu görülmüştür. Şekil 5.27'deki 0° hücum açısı çözümünden farklı olarak, Şekil 5.30'daki çok noktalı çözümde pozitif ve negatif hücum açılarının etkisi ile hücum kenarında malzeme yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Dağılımdaki asimetriklerin ise çözümlerde düzensiz ağ yapısı kullanılmasından kaynaklandığı kabul edilmiştir. Bir hava aracının sürekli olarak çeşitli hücum açılarındaki farklı yüklere maruz kaldığı düşünüldüğünde, topoloji optimizasyon sürecinin de çok noktalı (multi-point) olmasının gerekliliği açık bir şekilde görülmüştür. Ayrıca, çok noktalı topoloji optimizasyonunun tasarım süreçlerinde avantaj sağlayacağı anlaşılmıştır.

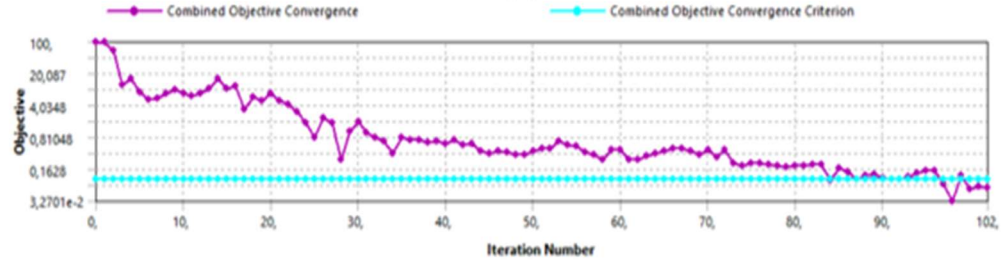
5.9.2. Rijit iki nervür problemi için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları

Ana giriş konfigürasyonundaki altyapı aynı şekilde iki nervür konfigürasyonunda kullanılmıştır. Rijit yapıların konumları ve şekillerinin farklılığın yanı sıra bir de $\mathcal{V}_f = 0.1$ olarak tanımlanmıştır. Geriye kalan bütün koşullar birinci konfigürasyon ile eşdeğerdir. Bu konfigürasyon için de çözüm alınan farklı hücum açıları için ayrı ayrı optimizasyon çözümleri yapılmıştır. Ardından da bu problem için de yedi farklı hücum açısı (-5° , -10° , -15° , 0° , 5° , 10° , 15°) sonuçları çok noktalı (multi-point) yapısal topoloji optimizasyonu problemine aktarılmıştır.

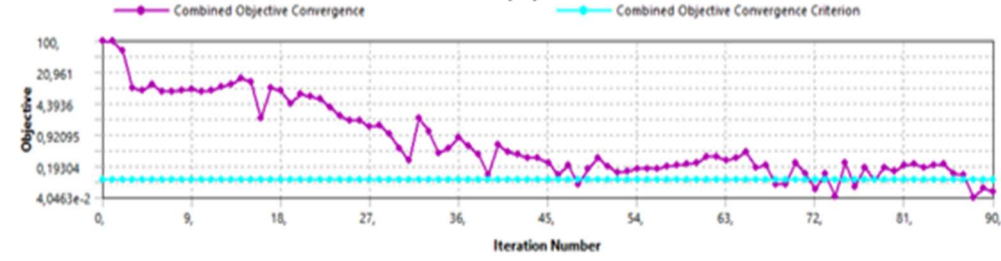
Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de amaç fonksiyonun yakınsama grafikleri görülmektedir. Bütün hücum açıları için amaç fonksiyonları yakınsamıştır. Şekil 5.31 (a) 15° , (b) 10° , (c) 5° , (d) 0° hücum açısı çözümü için yakınsama grafiklerini içermektedir. Problemler sırasıyla 61 (11 dakika), 102 (18 dakika, 30 saniye), 90 (15 dakika, 49 saniye) ve 77 (13 dakika, 50 saniye) iterasyonda yakınsamıştır. Şekil 5.32 (a) -5° , (b) -10° ve (c) -15° hücum açısı çözümü için yakınsama grafiklerini içermektedir. Problemler sırasıyla 93 (16 dakika, 9 saniye), 100 (17 dakika, 43 saniye) ve 69 (12 dakika, 38 saniye) iterasyonda yakınsamıştır.



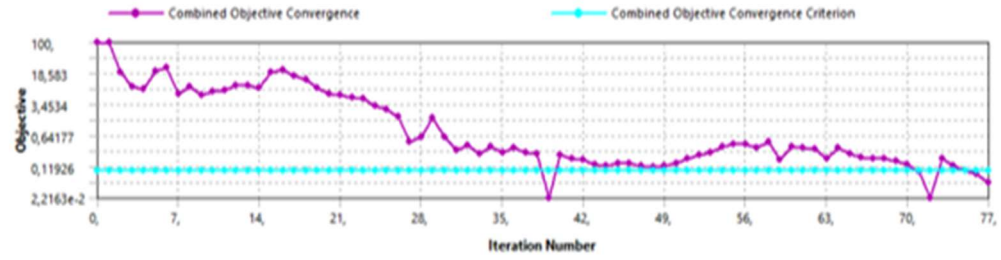
(a)



(b)

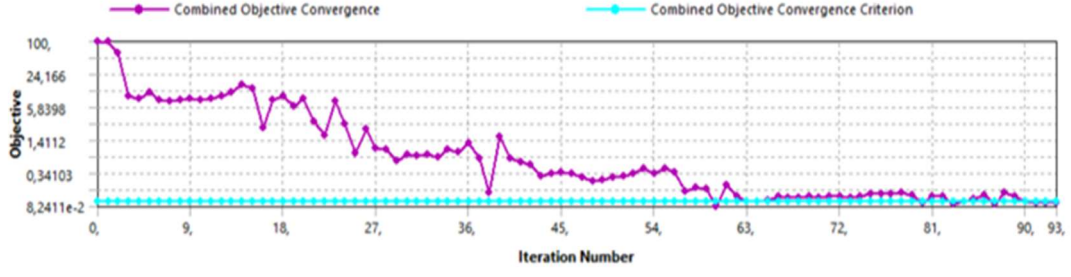


(c)

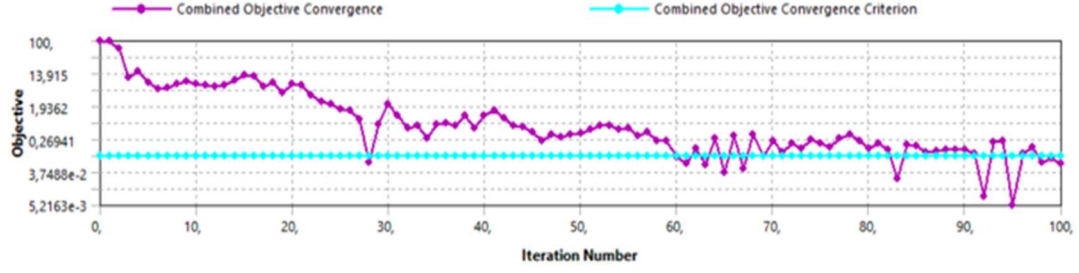


(d)

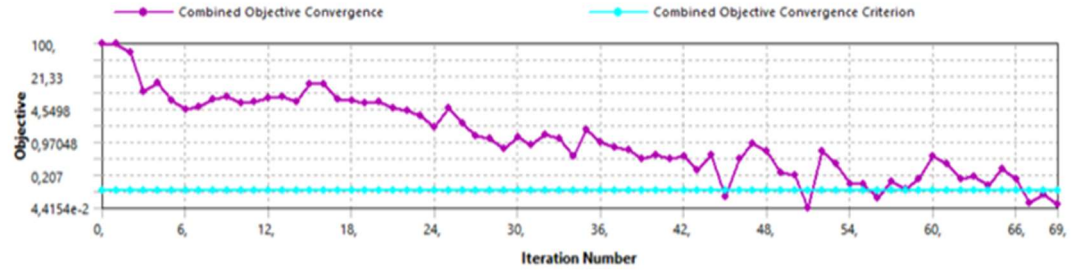
Şekil 5.31. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) 15°, (b) 10°, (c) 5°, (d) 0° hücum açısı için.



(a)



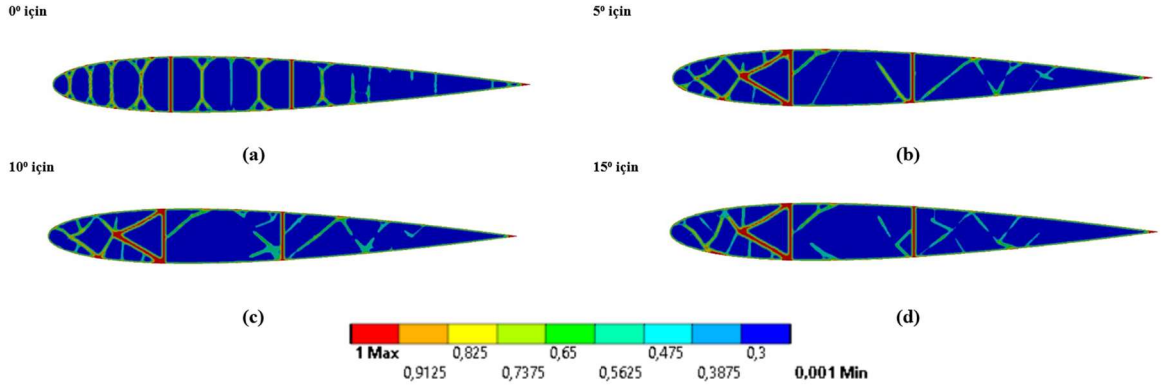
(b)



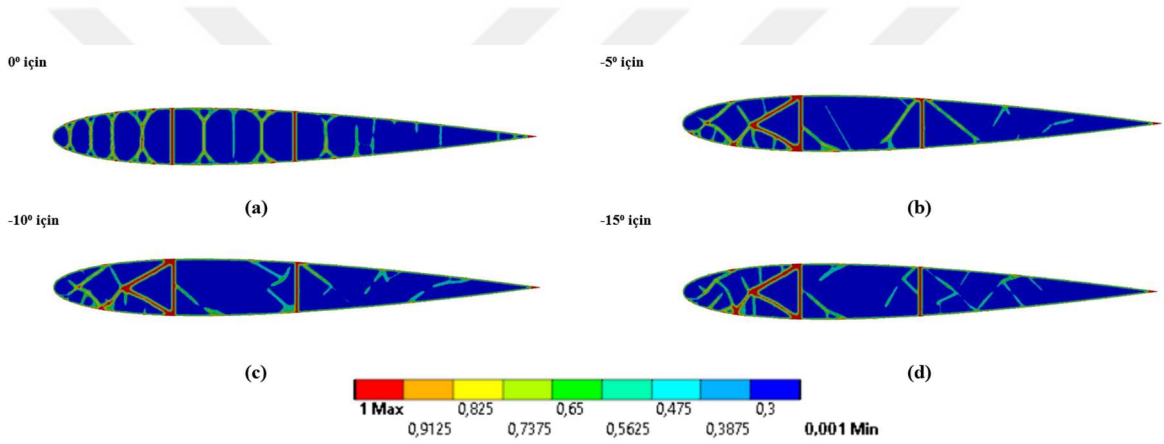
(c)

Şekil 5.32. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: (a) -5° , (b) -10° , (c) -15° hücum açısı için.

Şekil 5.33'te 0° , 5° , 10° , 15° hücum açıları kullanılarak, Şekil 5.34'te -15° , -10° , -5° , 0° hücum açıları kullanılarak birbirinden bağımsız olarak yapılan topoloji optimizasyonlarının sonuçları görülmektedir.



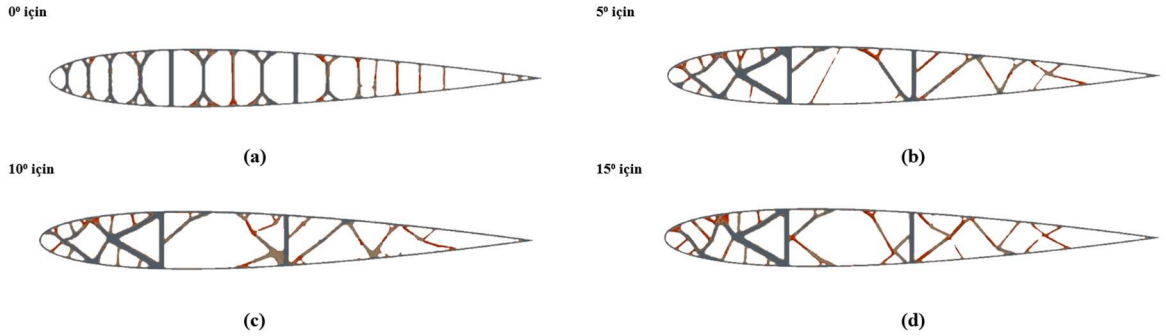
Şekil 5.33. İki nervür konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 0° hücum açısı için, (b) 5° hücum açısı için, (c) 10° hücum açısı için, (d) 15° hücum açısı için. ($V_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)



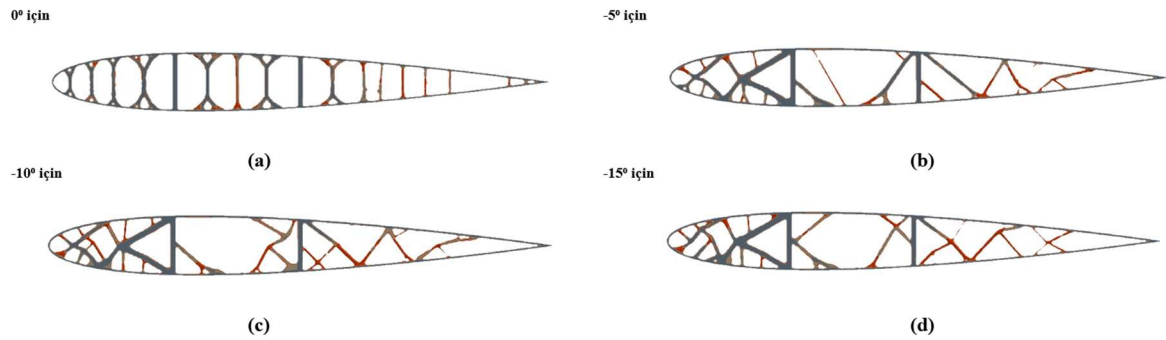
Şekil 5.34. İki nervür konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a) 0° hücum açısı için, (b) -5° hücum açısı için, (c) -10° hücum açısı için, (d) -15° hücum açısı için. ($V_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)

Sonuçlar incelendiğinde, bu konfigürasyon için de malzeme dağılımının pozitif ve negatif işaretli hücum açıları sonuçları için birbirlerine simetrik olacak bölgelerde yoğunlaştığı görülmüştür. 0° hücum açısı sonucu için, kesitteki eleman dağılımı alt ve üst yüzeye dik olan yapısalardan oluşmuştur. Şekil 5.33 ve 5.34 (a)'daki sonucun, bu hücum açısı için beklenen malzeme dağılımına sahip olduğu görülmüştür. Diğer hücum açıları için, 0.25 veter noktasındaki rijit nervüre bağlı olacak şekilde üçgensel bir destek yapısalı oluşmuştur. Bu yapısalın özellikle hücum kenarı bölgesini destekleyen elemanlara bağlandığı görülmüştür. Orta bölgede ve firar kenarı bölgesinde ise 0° hücum açısı sonucu dışındaki bütün sonuçlarda karmaşık dağılan diagonal yapısalın olduğu görülmüştür.

Sonuçlar, bu konfigürasyon için farklı bir gösterim ile Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'daki gibi de görüntülenebilmektedir. Bu sonuçlar da eleman yoğunluk değerleri $0.3 \leq \rho \leq 1$ aralığında olacak şekilde gösterilmiştir. $\rho \leq 0.3$ yoğunluğundaki elemanlar (boş) beyaz renk ile gösterilmiştir. Tam dolu elemanlar gri renk ($\rho \geq 0.7$), ara elemanlar ise kahverengi ($0.4 < \rho < 0.7$) ve kırmızı ($0.3 < \rho \leq 0.4$) ile gösterilmiştir.

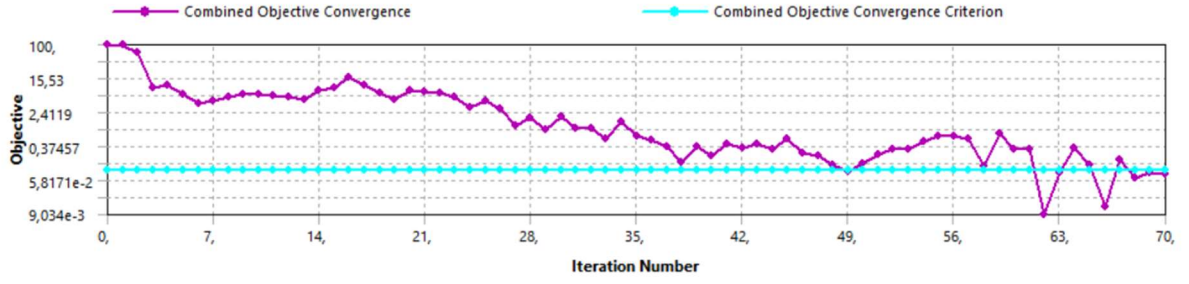


Şekil 5.35. İki nervür konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları (alternatif gösterim): (a) 0° hücum açısı için, (b) 5° hücum açısı için, (c) 10° hücum açısı için, (d) 15° hücum açısı için. ($V_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)



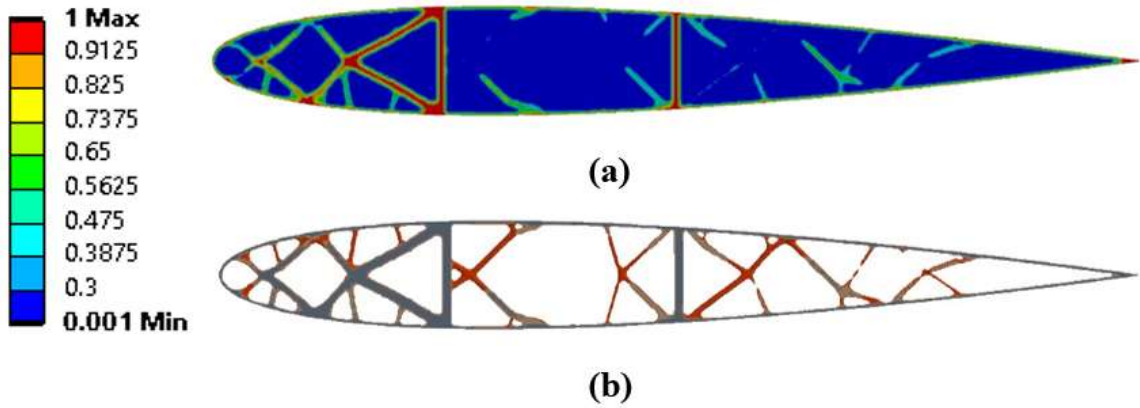
Şekil 5.36. İki nervür konfigürasyonu için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları (alternatif gösterim): (a) 0° hücum açısı için, (b) -5° hücum açısı için, (c) -10° hücum açısı için, (d) -15° hücum açısı için. ($V_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)

İki nervür konfigürasyonu için yedi farklı hücum açısı sonucunun eş zamanlı olarak etki ettiği kanat kesiti için yapılan çok noktalı (multi-point) yapısal topoloji optimizasyonu için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği Şekil 5.37'de gösterilmiştir. 70 iterasyondan sonra yakınsama gerçekleşmiştir ve çözüm 1 saat 29 dakika sürmüştür. Çözüm, ana giriş konfigürasyonuna göre 5 dakika daha uzun sürmüştür.



Şekil 5.37. Amaç fonksiyonu yakınsama grafiği: Çok noktalı yapısal topoloji optimizasyonu için.

Şekil 5.38’de çok noktalı yapısal topoloji optimizasyonu sonucu, eleman yoğunluk değerleri $0.3 \leq \rho \leq 1$ aralığında olacak şekilde iki farklı türde gösterilmiştir. Bu sonuç gösteriminde, (a) için kırmızı renkli elemanlar tam dolu, mavi renkli elemanlar ise boş elemanları ($\rho \leq 0.3$), diğer renkler ise ara elemanları temsil etmektedir. (b) için, tam dolu elemanlar gri renk ($\rho \geq 0.7$), ara elemanlar ise kahverengi ($0.4 < \rho < 0.7$) ve kırmızı renk ($0.3 < \rho \leq 0.4$) ile gösterilmiştir. Boş elemanlar ($\rho \leq 0.3$) beyaz renk ile gösterilmiştir.



Şekil 5.38. Yedi farklı hücum açısı için çok noktalı (multi-point) yapısal topoloji optimizasyonu sonucu: (a) çok renkli gösterim, (b) alternatif gösterim. ($V_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir).

Şekil 5.38 (b) incelendiğinde çok noktalı topoloji optimizasyonunun sonuca olan etkisi anlaşılmıştır. 0.25 veter noktasındaki nervüre bağlı olan desteklerin neredeyse simetrik

dağıldığı, orta bölgedeki diagonal desteklerin de simetrik olduğu, firar kenarı bölgesine doğru karmaşık diagonal desteklerin olduğu görülmüştür. Bu versiyon için de malzeme yoğunluğunun en fazla olduğu bölgenin hücum kenarı bölgesi olduğu görülmüştür.

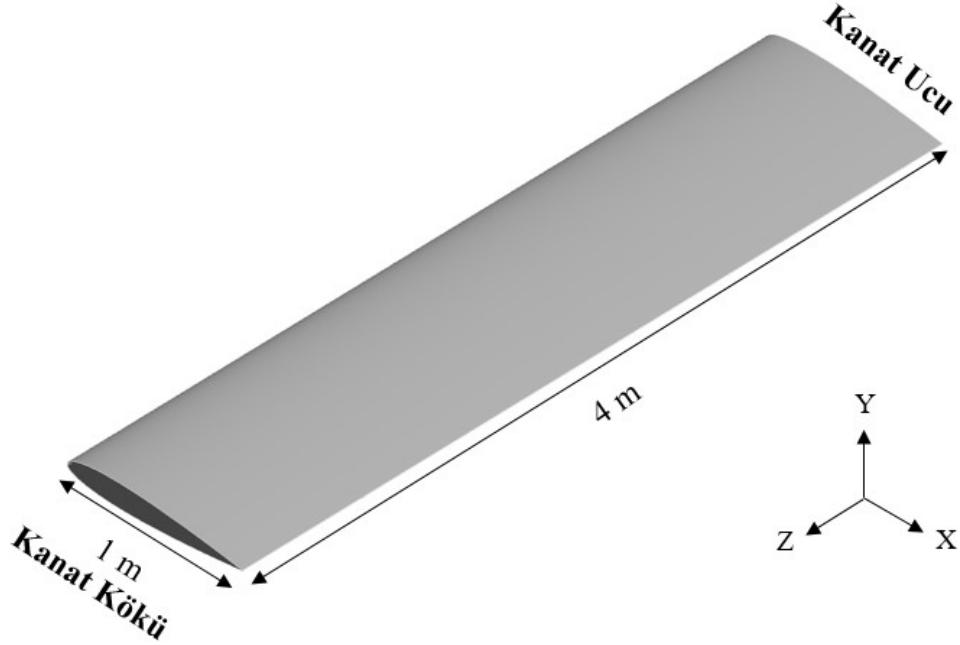
-15°, -10°, -5°, 0°, 5°, 10°, 15° hücum açılarındaki basınç yüklerine maruz kalan iki versiyon için de bir önceki satırda belirtilen açılarda ve tanımlanan sınır koşulları referansında sonuçlar, yapısal topoloji optimizasyonu yöntemi ile incelenmiştir. Ardından bütün hücum açıları için elde edilen statik analiz sonuçları eş zamanlı olarak kullanılarak iki versiyon için de çok noktalı (multi-point) yapısal topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelenmiştir ve tam dolu olan ilk tasarımlara göre kütleden büyük oranlarda tasarruf edildiği açıkça görülmüştür. Hava araçlarında kullanılan yapısal tasarımların çeşitli hücum açılarındaki kuvvetlere sürekli olarak maruz kaldığı düşünüldüğünde, bu türdeki tasarımların optimizasyonu için tek bir hücum açısına bağlı kalmak gerçek mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliği azaltmaktadır. Bu tez çalışmasında hem dayanıklı, hem hafif hem de gerçek mühendislik koşullarına daha uygun olacak optimum tasarımların ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Çok noktalı optimizasyon yönteminin bu çalışmada kullanılması bu amaca ulaşılmasını sağlarken, diğer çalışmalardan bu tez çalışmasını ayıran önemli sonuçlar açığa çıkarmıştır.

6. ÜÇ BOYUTLU KANAT İÇİN YAPISAL TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Bu bölümde üç boyutlu dikdörtgen geometriye sahip bir kanadın ağırlığının azaltılması ve sınır koşullarının sonuçlara etkisinin değerlendirilebilmesi amacıyla yapısal topoloji optimizasyonu çalışmaları yapılmıştır.

6.1. Problem Tanımı

Bu problemde, tez çalışmasının daha önceki bölümlerinde kullanılan NACA 0012 kanat profili kullanılmıştır. Üç boyutlu kanat, 1 m veter uzunluğuna, Z eksenine yönünde 4 m kanat açıklığına sahiptir. Şekil 6.1’de kanat geometrisinin görseli ve ölçüleri belirtilmiştir.



Şekil 6.1. Üç boyutlu kanat geometrisi.

Deniz seviyesi koşullarında, 0.5 Mach akış hızına sahip olan hava 0° hücum açısı ile kanadın üzerine tatbik edilmiştir. Analizin çözümünde, sıkıştırılabilir akış problemlerinde doğru sonuçlar verdiği bilinen pressure far-field sınır koşulu kullanılmıştır. Bu tez çalışmasındaki diğer problemlerde olduğu gibi bu problemde de sınır tabakasındaki türbülans etkilerini çözümleyebilmek için tek denklemlili Spalart-Allmaras türbülans modeli

kullanılmıştır. Bu modelin avantajlarından önceki bölümlerde bahsedilmiştir. HAD analizi problemi çözüldükten sonra, yapısal topoloji optimizasyonu problemi için aerodinamik yükler tek yönlü (one-way) olarak üç boyutlu kanadın üzerine uygulanmıştır.

Kanat için iki farklı yapısal topoloji optimizasyonu problemi çözülmüştür. Hacim oranının (V_f) %10 olarak tanımlandığı bütün problemler için yapısal uyumluluğu (compliance) minimize etmek amaçlanmıştır. Problemlerde, optimize edilecek olan bölgeler değiştirilmiştir. Fluent ile çözülen HAD analizi problemlerinden elde edilen basınç yükleri iki problem için de ortak olarak kullanılmıştır. Bu yüklerin referansında kanat için farklı sınır koşulları kullanılarak yapısal topoloji optimizasyonu çalışmaları yapılmıştır.

Bu problemde birincisi, Oktay et al. [28] çalışmalarında yapmış olduğu topoloji optimizasyonu problemi referans alınarak çözülmüştür. Bu problemde kanat kökü, kendi eksenindeki bütün yönlerden sabitlenmiştir. Yapısal topoloji optimizasyonu için yalnızca sabitlenmenin yapıldığı yüzey olan kanat kökü optimizasyon dışında tutulmuştur. Kanadın kalan bütün bölümleri topoloji optimizasyonuna dahil edilmiştir.

İkinci problemde ise birinci problemdeki bütün koşullar değişiklik yapılmadan uygulanmıştır. Bu problemin farkı ise kanadı çevreleyen kabuk bölgesinin optimizasyon dışında tutulması olmuştur. Bir başka ifade ile sadece kanadın içerisinde kalan bölge yapısal olarak optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçların değerlendirmesi yapılmıştır.

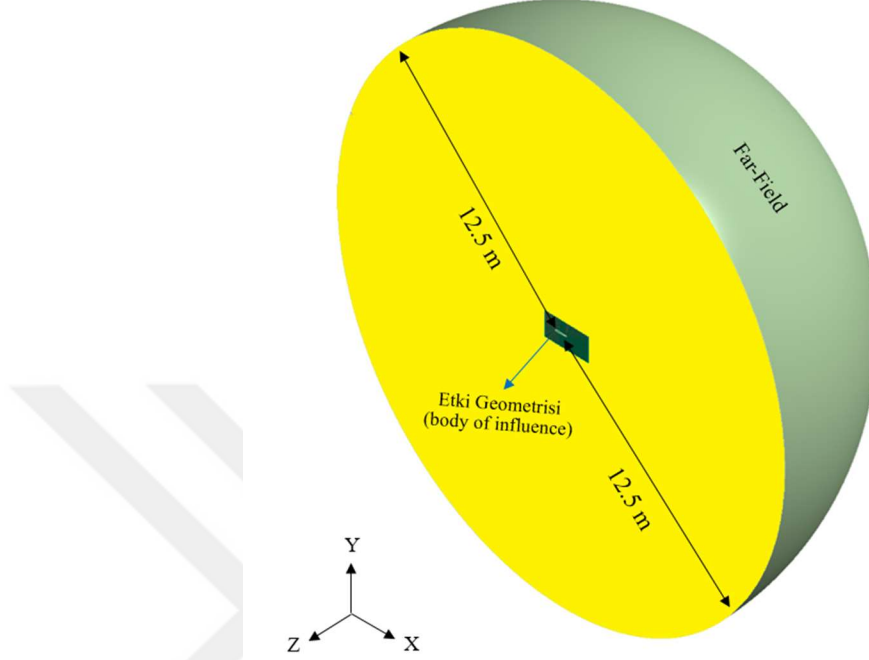
6.2. Problemlerin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Çözümleri

Bu bölümde, 6.1 bölümünde tanımlanmış olan problemin HAD analizi kısmının tanımlanması ve çözümlerine yer verilmiştir. İki problem için de aynı aerodinamik yükler uygulanmıştır.

6.2.1. HAD analizleri için sınır koşullarının tanımı ve ağ yapısının oluşturulması

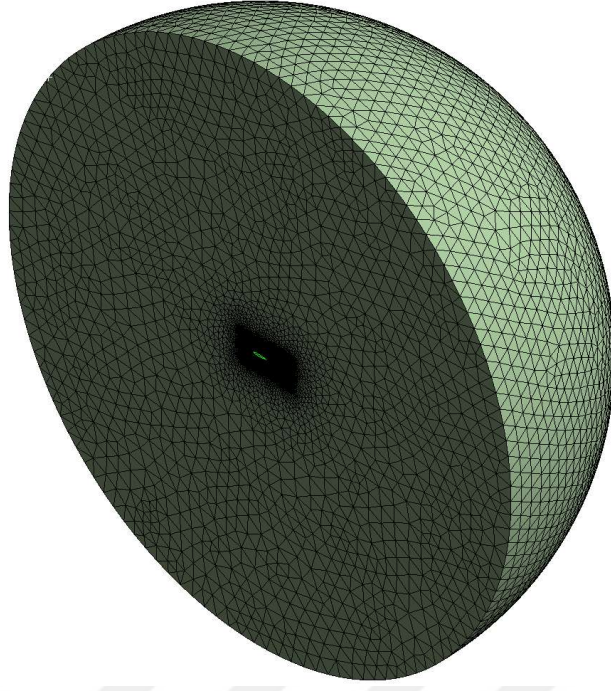
HAD analizlerinin çözümünde küresel tasarım hacmi kullanılmıştır. 25 m çapa sahip olan tasarım hacminde kanat, sarı renkli dairenin tam ortasında olacak şekilde konumlandırılmıştır. Tasarım hacmi Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Kanadın çevresinde, koyu yeşil renge sahip bölgede lokal olarak ağ yapısı eleman boyutu kontrolü yapmayı sağlayan dikdörtgen etki geometrisi (body of influence) yerleştirilmiştir. Etki geometrisi, X, Y ve Z eksenlerinde sırası ile 4 m, 2m, 4.5 m ölçülere sahiptir.

Şekil 6.2’de hacmin açık yeşil ile belirtilen yüzeylerden için pressure far-field (0.5 Mach), sarı renk ile gösterilen yüzey için Z yönünde simetri koşulu tanımlanmıştır.



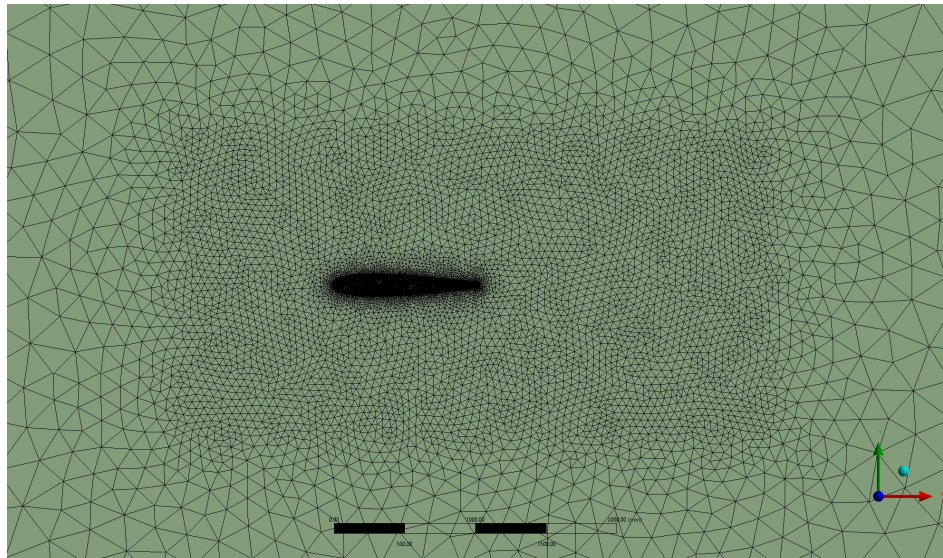
Şekil 6.2. Kanadın HAD analizi için kullanılan tasarım hacmi.

Tasarım hacmi için belirtilen tanımlamalar yapıldıktan sonra ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısı oluşturulurken 8,243,490 düğüm noktasına sahip olan 20,418,967 dörtyüzlü (tetrahedral) elemanlar kullanılmıştır. Tasarım hacmi, eleman boyutu en fazla 1,000 mm olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Şekil 6.3’te ağ yapısına ait bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 6.3. Tasarım hacmi için oluşturulan ağ yapısı.

Etki geometrisi (body of influence) için eleman boyutu 50 mm olarak tanımlanmıştır. Sınır tabakası çözümlerinin doğru yapılabilmesi için kanat çevresine 39 katmandan oluşan sınır tabakası ağ yapısı oluşturulmuştur. Etki geometrisinin ağ yapısına etkisi göz ile direkt görülebilmektedir. Ağ yapısının ilgili bölgesi Şekil 6.4’te gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Etki geometrisinin ağ yapısına olan etkisi.

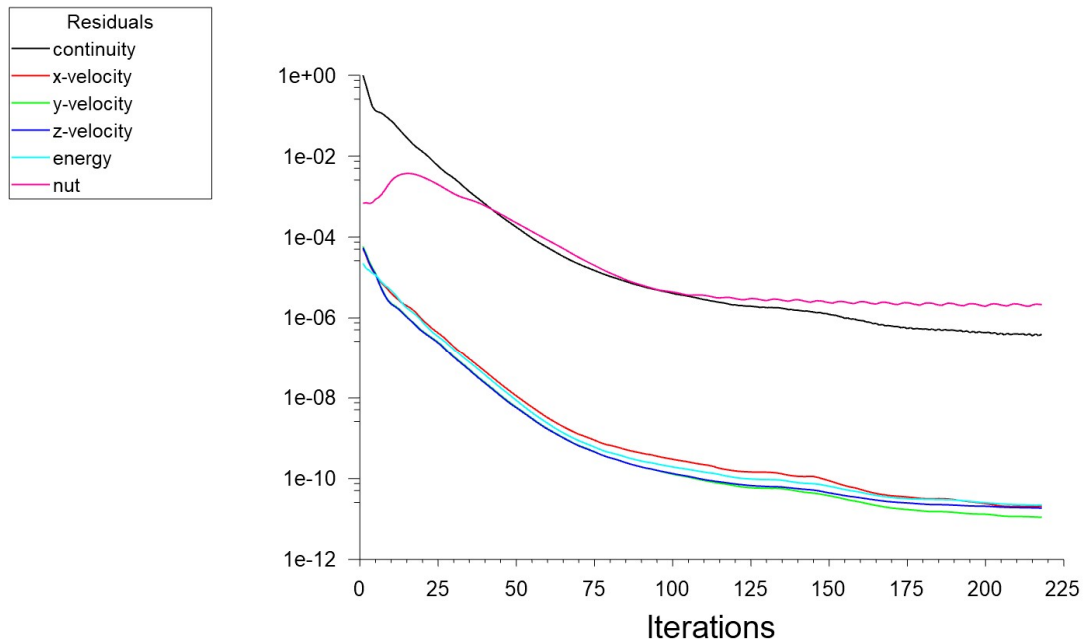
Analiz, basınç-hız bağlantısı için Coupled çözücü algoritması kullanılarak çözülmüştür. Yoğunluk, momentum, viskozite ayrıştırmaları için ikinci dereceden upwind yöntemi, gradyan ayrıştırmaları için de Green Gauss hücre tabanlı yöntem kullanılmıştır.

6.2.2. HAD analizi sonuçları

Bu bölümde problemin HAD analizi sonuçları incelenmiştir. Sonuçlar ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

6.2.2.1. Artık (Residual) grafiği

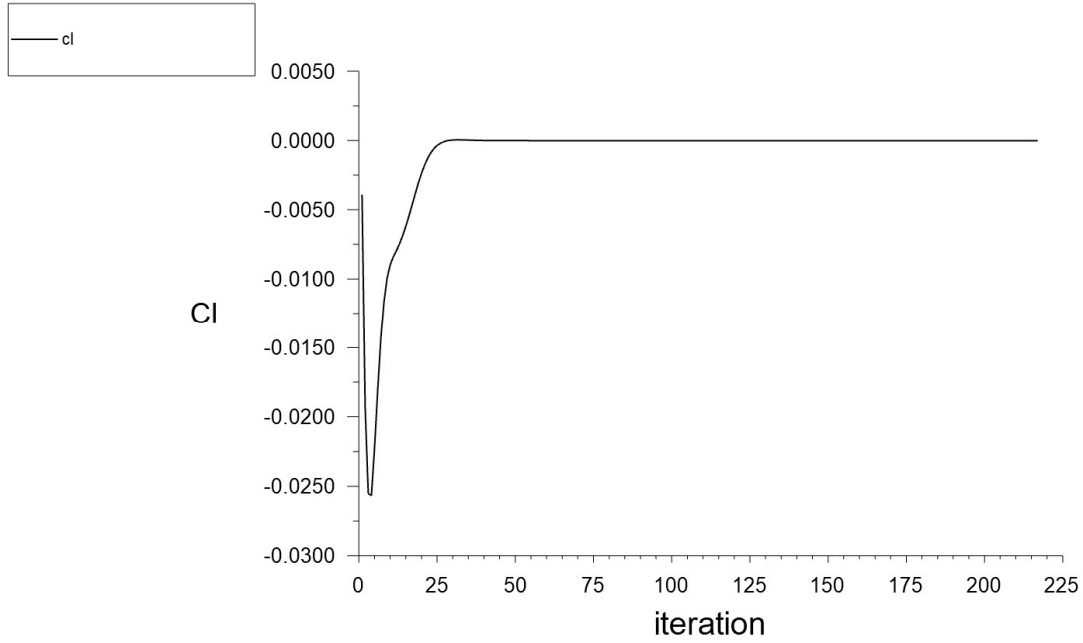
Kanat için 0° hücum açısında HAD analizi çözümü elde edildikten sonra süreklilik denklemi, X, Y, Z hızları ve türbülans denkleminin bir parametresi olan nut gibi parametrelerin hepsinin en yüksek $1E-5$ seviyesinden başlayarak en düşük $1E-11$ seviyelerinde yakınsadığı görülmüştür. Bu seviyelerde yakınsama ise problem için yeterli görülmüştür. Problem 219 iterasyon sonucunda yakınsamıştır. Grafik Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



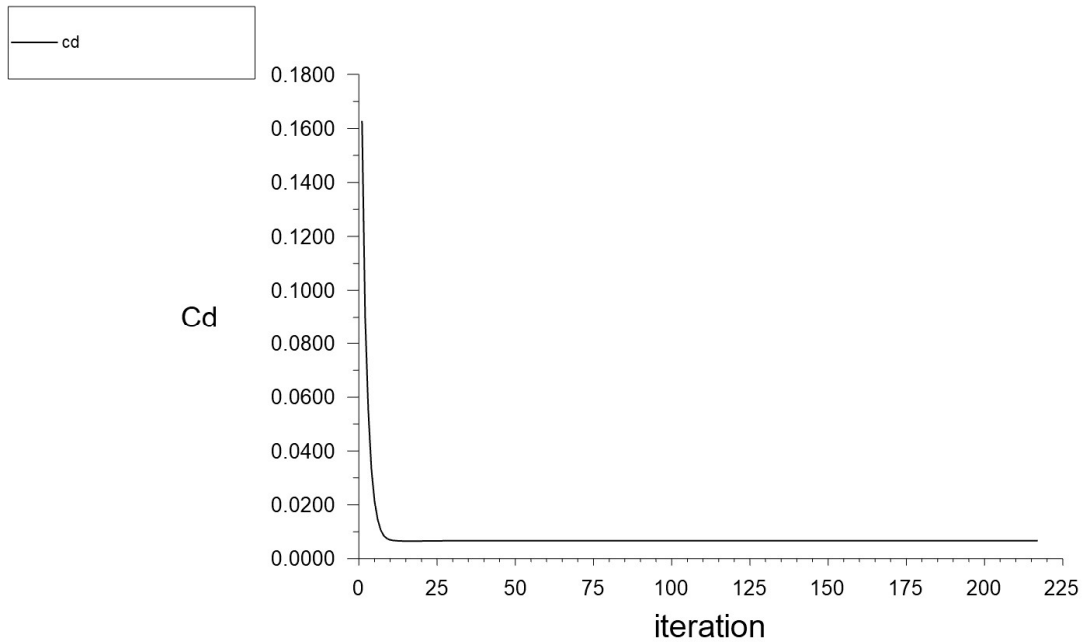
Şekil 6.5. Kanat için çözülen HAD analizinin artık (residual) grafiği.

6.2.2.2. Kaldırma ve sürüklenme katsayısı grafikleri

Şekil 6.6’da ve Şekil 6.7’de yer alan grafikler incelendiğinde 0° hücum açısı için yapılan çözümlerde kaldırma (c_l) ve sürüklenme katsayısının (c_d) yakınsadığı gözlemlenmiştir. Katsayılar için yakınsamalar sırasıyla 30. ve 17. iterasyondan sonra gerçekleşmiştir.



Şekil 6.6. 0° hücum açısı için kaldırma katsayısı (c_l) grafiği.

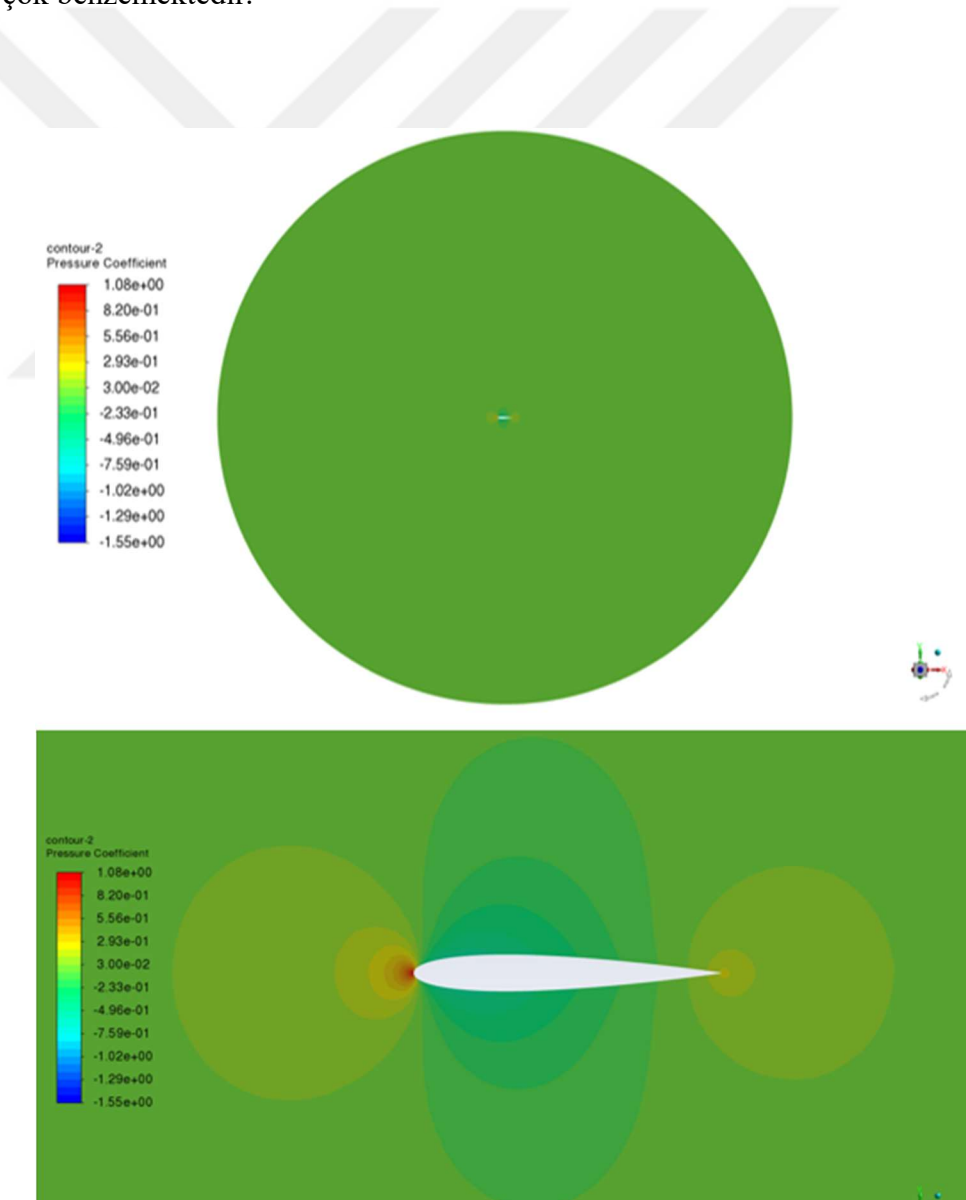


Şekil 6.7. 0° hücum açısı için sürüklenme katsayısı (c_d) grafiği.

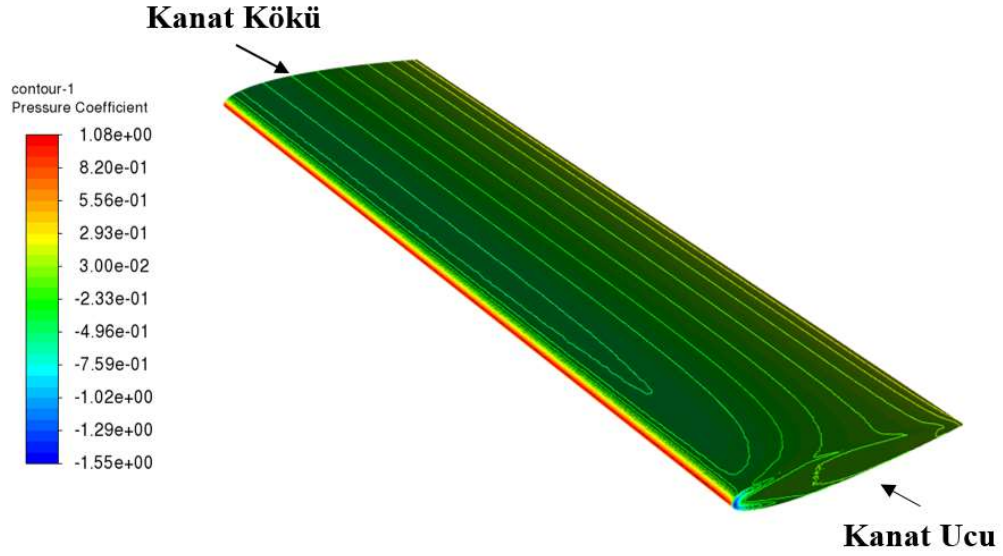
6.2.2.3. Basınç katsayısı konturları

Bu bölümde problemin basınç katsayısı (c_p) konturları incelenmiştir. Bu konturların incelenmesinin amacı, basınç katsayılarının kanat çevresinde nasıl değiştiğinin anlaşılacak istenmesi olmuştur. Basınç katsayısının denkleminde önceki bölümlerde yer verilmiştir.

0° hücum açısı için basınç katsayısı konturları Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da görülmektedir. Kontur kesiti kanadın kök bölgesinden alınmıştır. Değerler global aralıkta olacak şekilde gösterilmiştir. Şekil 6.8’de tasarım hacimlerinin tamamı görselin üst kısmında, kanat çevresinin yakınlştırılmış görüntüsü, görselin alt kısmında yer almaktadır. Şekil 6.9’da ise kanat modeli üzerindeki basınç katsayısı dağılımları model özelinde incelenebilmektedir. Burada görülen kanat üzerindeki basınç katsayısı dağılımları Oktay et al. [28]'de gösterilen dağılıma çok benzemektedir.



Şekil 6.8. 0° hücum açısı için kök kesitindeki basınç katsayısı (c_p) konturları.

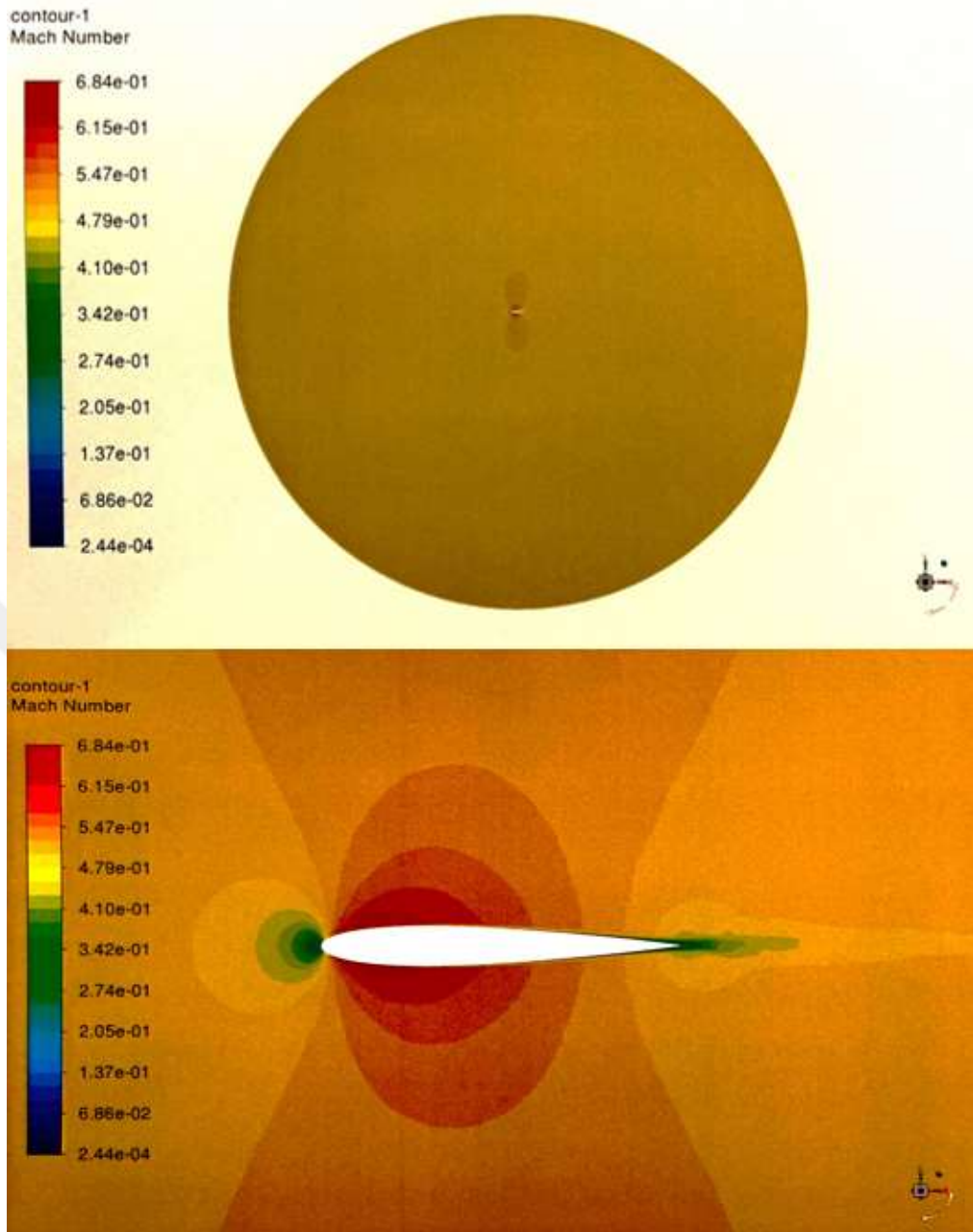


Şekil 6.9. Kanat üzerinde 0° hücum açısı için basınç katsayısı (c_p) konturu gösterimi.

6.2.2.4. Mach sayısı konturları

Bu bölümde Mach sayısı konturları incelenmiştir. Bu konturların incelenmesinin amacı, Mach sayısının kanat çevresinde nasıl değiştiğinin anlaşılmasını istenmesi olmuştur.

0° hücum açısı için Mach sayısı konturları Şekil 6.10'da görülmektedir. Kontur kesiti kanadın kök bölgesinden alınmıştır. Değerler global aralıkta olacak şekilde gösterilmiştir. Şekil 6.10'da tasarım hacimlerinin tamamı görselin üst kısmında, kanat çevresinin yakınlştırılmış görselleri ise görselin alt kısmında yer almaktadır. Bu hücum açısında en düşük mach sayısının hücum kenarında olduğu, en yüksek mach sayısının ise basınç katsayılarının (c_p) en düşük olduğu bölgelerde olduğu görülmüştür. Düşük basınç katsayılarının (c_p) bulunduğu bölgeler 6.2.2.3 bölümündeki şekillerde görülmektedir. Konturlar incelenmiştir ve sonuçların beklenildiği gibi olduğu görülmüştür.



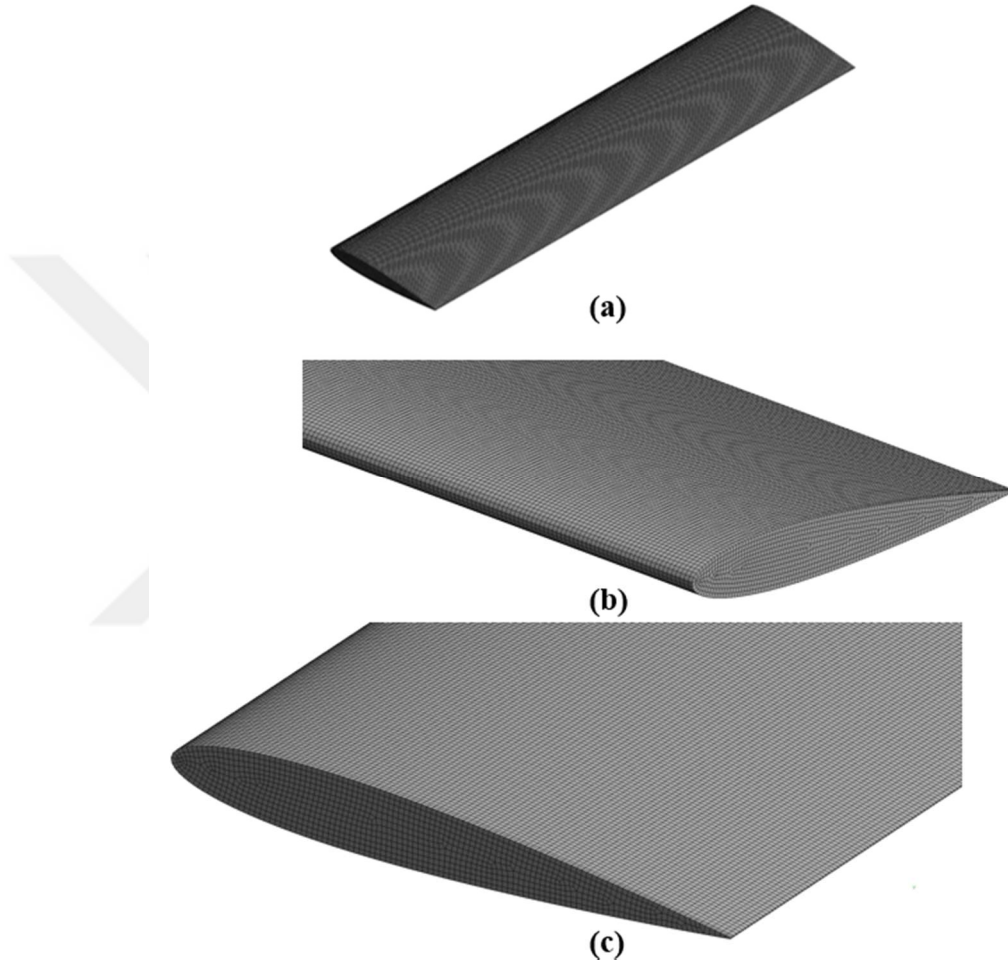
Şekil 6.10. 0° hücum açısı için kök kesitindeki Mach sayısı konturları.

6.3. Problemin Yapısal Topoloji Optimizasyonu Çözümleri

Bu alt bölümde, bölüm 6.1’de tanımlanmış olan koşullara göre iki yapısal topoloji optimizasyonu problemi çözülmüştür. Problemlerin ağ yapısının oluşturulması ve çözümlerden elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Topoloji optimizasyonları, ANSYS yazılımının Structural Optimization modülü kullanılarak yapılmıştır.

6.3.1. Topoloji optimizasyonu için sınır koşullarının tanımı ve ağ yapısının oluşturulması

Kanatın ağ yapısı, 9.5 mm boyutunda, 464,877 düğüm noktasına sahip 417,780 altıyüzlü (hexahedral) elemandan oluşturulmuştur. Şekil 6.11’de kanat için oluşturulan ağ yapısı görülmektedir. Bu şekilde, kanadın farklı açılarda ve yakınlaştırılmış görünümlerine de yer verilmiştir.



Şekil 6.11. Kanat için oluşturulan ağ yapısı: (a) izometrik görünüm, (b) hücum kenarına yakınlaştırılmış görünüm, (c) kanat köküne yakınlaştırılmış görünüm.

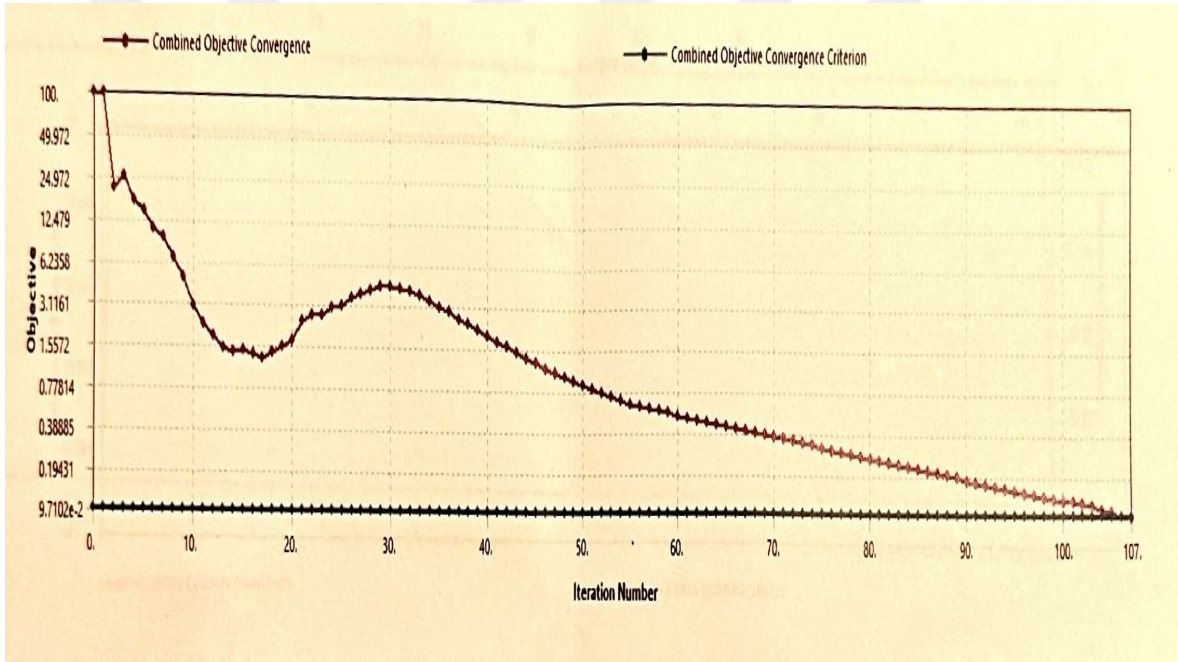
Şekil 6.11 (a) kanadın tamamına ait ağ yapısını içerdiği için çalışmaya eklenmiştir. Fakat, eleman sıklığından dolayı izometrik görünümü karmaşık durmaktadır. Ağ yapısının, (b) ve (c) görselleri ile birlikte incelenmesinin, elemanların kanat üzerinde nasıl görüldüğü hakkında bilgi sahibi olunması açısından yararlı olacağı düşünülmüştür.

6.3.2. Yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları

Bu bölümde üst bölümlerde tanımlanan iki problem için yapılan topoloji optimizasyonu sonuçları ve bu sonuçların değerlendirmelerine yer verilmiştir.

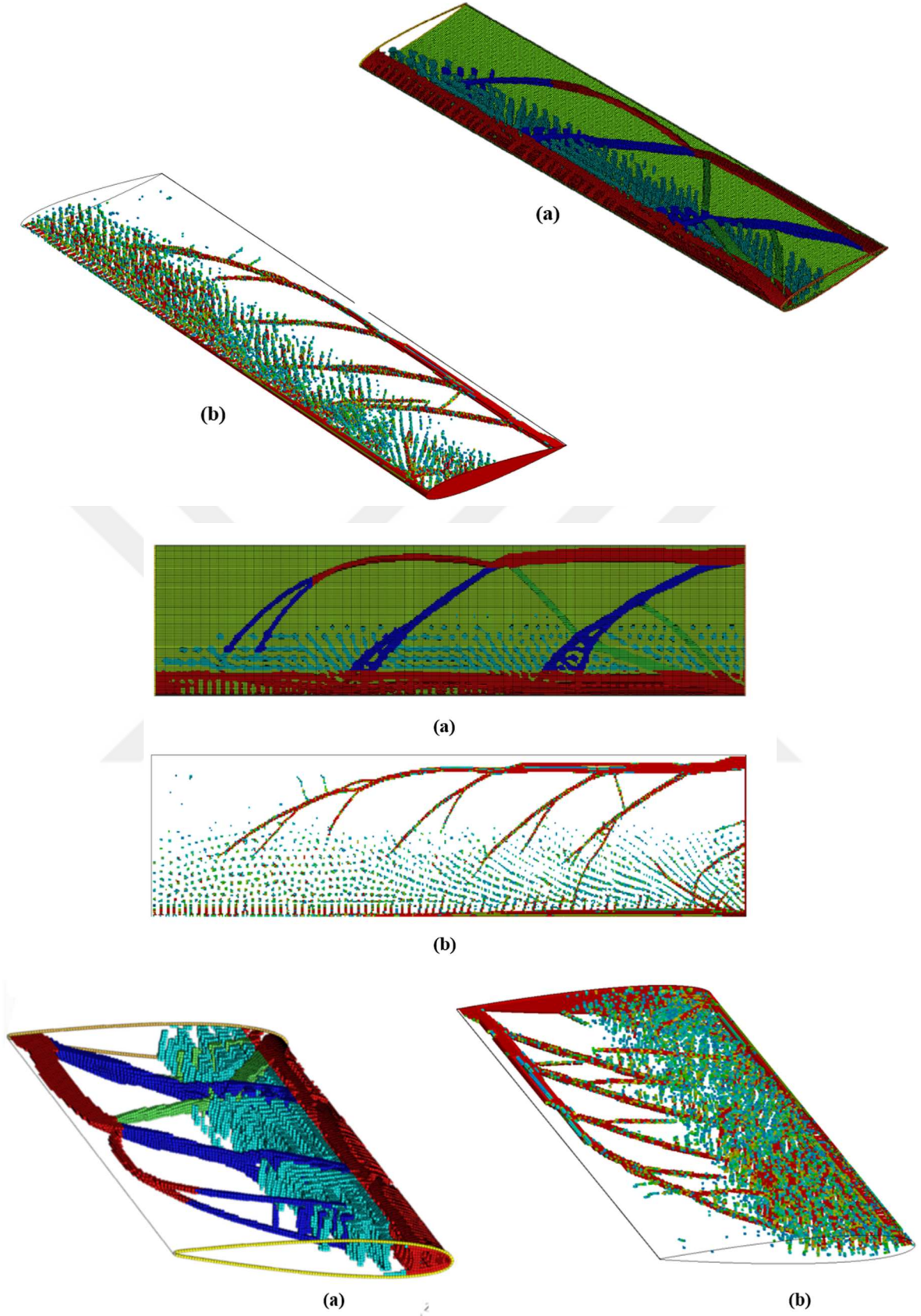
6.3.2.1. Problem 1 için yapısal topoloji optimizasyonu sonucu

Bu alt bölümde Problem 1 için yapılmış olan yapısal topoloji optimizasyonu sonuçlarına yer verilmiştir. Birinci problem için Şekil 6.12’de amaç fonksiyonun yakınsama grafiği görülmektedir. 107 iterasyon sonrasında yakınsama gerçekleşmiştir. 30. iterasyondan sonra grafiğin sürekli olarak yakınsama eğiliminde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.12. Problem 1 için amaç fonksiyonu yakınsama grafiği.

Problem 1 için sonuçlar, Oktay et al. [28]'den referans alınan problemin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.13'te referans problem ile bu tez çalışmasındaki problemin karşılaştırması yapılmıştır.

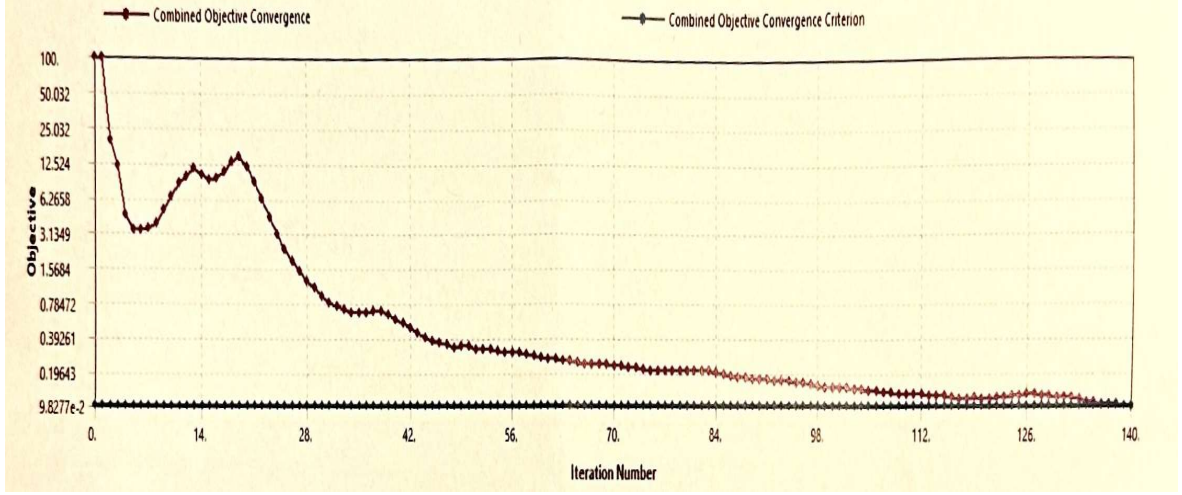


Şekil 6.13. Referans problemin sonuçları ile bu çalışmadaki sonuçların karşılaştırılması: (a) Oktay et al. sonuçları [28], (b) bu çalışmanın sonuçları. ($\mathcal{V}_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir).

Şekil 6.13 (a) referans problemin sonuçlarını, (b) bu tez çalışmasının sonuçlarını temsil etmektedir. Bütün şekillerde, $V_f = 0.1$ için yoğunluk değerleri $0.3 \leq \rho \leq 1$ aralığında olan elemanlar gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde iki yapısal topoloji optimizasyonu problemi için de sonuçların oldukça benzer olduğu görülmüştür. İki sonuç için de elemanların genel olarak hücum kenarı bölgesinde yoğunlaştığı görülmüştür. Kanadın firar kenarına doğru kıvrıma sahip olan ana giriş (spar) benzeri bir yapısal iki sonuçta da mevcuttur. Hatta iki sonuç için bu ana giriş yapısının eşit denebilecek seviyede benzerliğe sahip olduğu görülmüştür. Ana giriş yapısının başlangıç noktasının, beklenildiği gibi kanat kökünde olduğu görülmüştür. Ana giriş yapısalından hücum kenarına doğru uzama eğiliminde olan nervürlerin (riblerin) oluştuğu görülmüştür. Referans problemin sonuçlarında üç adet, bu çalışmanın sonuçlarında ise dört adet nervürün mevcut olduğu görülmüştür. Bu durumun da görselleştirme, filtreleme ve platform farklılıklarından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Genel bir değerlendirme olarak ise, sonuçların arasında yüksek derecede uyum olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuç, çalışmanın doğruluğunu tasdik edebilecek seviyede bir sonuç olmuştur.

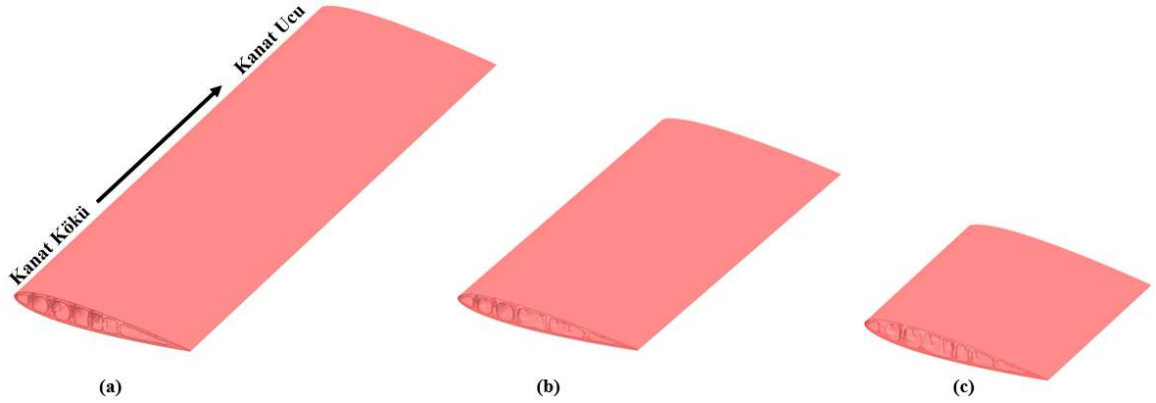
6.3.2.2. Problem 2 için yapısal topoloji optimizasyonu sonucu

Bu alt bölümde Problem 2 için yapılmış olan yapısal topoloji optimizasyonu sonuçlarına yer verilmiştir. Bu problem için Şekil 6.14'te amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği görülmektedir. 140 iterasyon sonrasında yakınsama gerçekleşmiştir. Bu problemin, yakınsaması için gerekli olan iterasyon sayısının birinci problemten daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeninin kabuğun optimizasyon dışında tutulması olduğu düşünülmektedir. Kabuk bölgesinin içindeki ideal malzeme dağılımının bulunmasının daha uzun sürmesi beklenen bir durum olmuştur. Çünkü, diğer problemten farklı olarak optimizasyon bölgesini kısıtlayan bir sınır şartı daha eklenmiştir. 10. ve 21. iterasyonlar arasında ıraksamalar görülse de, takip eden iterasyonlarda davranışın yumuşak ve sürekli bir yakınsama eğiliminde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.14. Problem 2 için amaç fonksiyonu yakınsama grafiği.

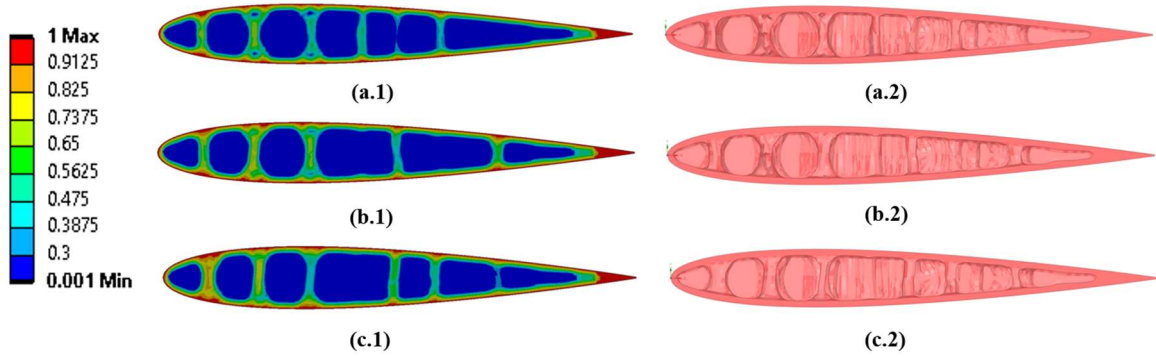
İkinci problemin yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları ise Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da görülebilmektedir. Bu problemde kanadın dış kabuğu optimizasyon dışında tutulduğu için sonuçların incelenebilmesi adına, oluşan optimum geometrinin kanat boyunca 0.25, 0.5, 0.75 açıklıklarından kesitler alınmıştır. Şekil 6.15'te (a) 0.25, (b) 0.5, (c) 0.75 açıklıklardaki kesitleri göstermektedir.



Şekil 6.15. İkinci problem için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçlarının izometrik görünümü: (a) 0.25, (b) 0.5, (c) 0.75 açıklıklardaki kesitleri göstermektedir.

Kesitlerin tam karşıdan incelenebilmesi için Şekil 6.16'daki görsellere yer verilmiştir. Bu görsellerde (a.1), (b.1) ve (c.1) kesitlerin elemanları için yoğunluk değerlerini göstermektedir. (a.2), (b.2) ve (c.2) ise kesitlerin tek renkli hallerinin gösterimlerini

içermektedir. Bütün kesitlerde, $\mathcal{V}_f = 0.1$ için yoğunluk değerleri $0.3 \leq \rho \leq 1$ aralığında olan elemanlar gösterilmiştir. (a.1), (b.1) ve (c.1) kesitlerinde, $0.3 \leq \rho$ değerinde olan bütün elemanlar mavi renk ile gösterilmiştir.



Şekil 6.16. İkinci problem için yapısal topoloji optimizasyonu sonuçları: (a.1), (b.1) ve (c.1) kesitlerin eleman yoğunluklarının gösterimi, (a.2), (b.2) ve (c.2) kesitlerin tek renk ile gösterimi. ($\mathcal{V}_f = 0.1$ için $0.3 \leq \rho \leq 1$ değerleri gösterilmektedir.)

Kesitlerdeki malzeme dağılımları incelendiğinde kabuğun optimizasyon dışında tutulmasının sonuçlara büyük bir etkisi olduğu görülmüştür. Kanat açıklığı boyunca belirli noktalardan (0.25, 0.5, 0.75) alınmış olan bütün kesitlerde 0° hücum açısının ve simetrik kanat profili kullanılmasının etkileri görülmüştür. Bu koşullardan dolayı iç yapıların, üst ve alt yüzeye dik olacak şekilde dağıldığı görülmüştür. Kesitler için genel malzeme dağılımının en çok hücum kenarı bölgesinde yoğunlaştığı görülmüştür. Arada kalan bölgelerde ise dağılımda değişiklikler olduğu görülmüştür. Firar kenarındaki küçük bir bölgede de eleman yoğunluğu olduğu görülmüştür. Sonuçlardan hareketle, bu bölgelerde yapısal dayanımı sağlayacak elemanların kullanılmasının gerekliliği anlaşılmıştır. Bu şekilde dayanıklı kanatlar oluşturulurken kütleden de tasarruf edildiği açıkça görülmüştür. Optimum geometride, başlangıç kanat kütlesine göre %70 hafifleme olduğu görülmüştür.

İki problem için aynı aerodinamik yükler altında farklı sınır koşulları tanımlanarak yapılan yapısal topoloji optimizasyonlarında birbirinden oldukça farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu da sınır koşullarının topoloji optimizasyonu üzerindeki büyük etkisini bir kere daha göstermiştir. İki problem için de mevcut geometriye göre kütlece daha hafif sonuçlar elde edilmiştir. Fakat sonuçlar üretilebilirlik ve gerçek şartlara uygunluk bakımından

değerlendirildiğinde ikinci problemin sonucunun kullanıma daha uygun olduğu değerlendirilmiştir. Bu iki optimum sonuçtan elde edilen topolojilerden hangisinin daha iyi performans göstereceği (Şekil 6.13 ve Şekil 6.16), bu topolojiler kullanılarak oluşturulacak yapısal analiz modelleri sonucu elde edilecek gerilme ve şekil değiştirmelerden sonra saptanabilecektir.



7. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında negatif ve pozitif yedi hücum açısı kullanılarak (-15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15°) yapılan HAD analizlerinin çözülmesi ile elde edilen basınç yükleri kanat kesiti üzerine uygulanmıştır. Uygulanan aerodinamik yüklere karşı rijit ve kütlece daha hafif yedi adet, malzeme dağılımları birbirinden farklı olan (her hücum açısı için bir tane olmak üzere) kanat kesitleri, yapısal topoloji optimizasyonu yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Sonrasında, hava araçlarının uçuş icrasının değişken hücum açılarındaki yapıldığı bilindiğinden, kanat kesiti için -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , 15° hücum açılarındaki etkilerinin eş zamanlı olarak değerlendirildiği çok noktalı yapısal topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Ayrıca hücum açısı büyüdükçe oluşan akım ayrılmaları yüzünden daha düşük hücum açılarındaki geometri üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde yarar görüldüğü için açı yelpazesi geniş tutulmuştur. Tek bir hücum açısının neden olabileceği kuvvetlere dayanıklı olacak şekilde optimize edilen kesitlere göre, çok noktalı topoloji optimizasyonunun daha gerçekçi uçuş şartlarına uyum sağlayabilecek optimum sonuçlar elde edilebilmesi için daha elverişli bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Ancak, bu yöntemin maliyet artışına neden olacağı da unutulmamalıdır.

Bütün bir kanat için yapılan topoloji optimizasyonu çalışmalarında sınır koşullarında yapılan tek bir değişikliğin bile sonuçlarda büyük farklar ortaya çıkardığı görülmüştür. Sınır şartları tanımlanırken gereken önemin gösterilmesi gerektiği bir kere daha anlaşılmıştır. Dayanıklılık ve hafifliğin öneminin büyük olduğu hava aracı kanatları için topoloji optimizasyonunun, kütle bazında büyük oranlarda hafiflemeyi sağlayabilecek etkili bir yöntem olduğu bir kere daha görülmüştür.

Eklemeli imalat teknolojisinin gün geçtikçe daha da gelişmesi topoloji optimizasyonu uygulamasının sonucunda ortaya çıkan karmaşık geometrilerin üretilebilir hale gelmesini sağlamıştır. Bu gelişmeler sonucunda, yöntemin mühendislik uygulamalarında kullanımını ilerleyen zamanlarda iyice artış gösterecektir.

Gelecek çalışmaları için eklemeli imalat teknolojisinin ilerlemesi göz önünde bulundurularak, mikro yapılar üzerine faydalı çalışmalar yapılabilir.

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen optimum geometriler üretilip test edilebilir. Üretim zorlukları, dayanımsal ve kütleli faydalar bu şekilde değerlendirilebilir.

Ağırlık parametresinin büyük önem taşıdığı mühendislik uygulamalarında (özellikle havacılık uygulamalarında), topoloji optimizasyonunun oldukça faydalı bir yöntem olduğu bir kere daha anlaşılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] I. H. Abbott, A. E. V. Doenhoff and L. S. Stivers, Jr., “Summary of airfoil data,” Report No. 824, *National Advisory Committee for Aeronautics*, Dec. 22, 2023. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930090976/downloads/19930090976.pdf>.
- [2] J. C. Maxwell, “I.—on reciprocal figures, frames, and diagrams of forces,” *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, vol. 26, pp. 1-40, Jan. 1870, doi: 10.1017/S0080456800026351.
- [3] J. Logo and H. Ismail, “Milestones in the 150-year history of topology optimization: a review,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 58, pp. 2787–2793, Oct. 2011, doi: 10.1109/TBME.2011.2158315.
- [4] A. G. M. Michell, “The limits of economy of material in frame - structures,” *Philosophical Magazine Series* 6, 8:47, pp. 589-597, 1904, doi: 10.1080/14786440409463229.
- [5] R. Tatham, “Weight-strength analysis of aircraft structures. F. R. Shanley,” *The Aeronautical Journal*, vol. 57, Issue 510, pp. 423, June 1953, doi: 10.1017/S0368393100125337.
- [6] J. Heyman, “Plastic design of beams and plane frames for minimum material consumption,” *Quarterly of Applied Mathematics* 8, pp. 373-381, 1951, doi: 10.1090/QAM/39533.
- [7] M. P. Bendsøe and N. Kikuchi, “Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71(2), pp. 197–224, 1988.
- [8] M.P. Bendsoe and O. Sigmund, “Topology optimization – theory, methods, and applications,” Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2003.

- [9] G. Rozvany, M. Zhou and T. Birker, “Generalized shape optimization without homogenization,” *Struct Optim* 4, pp. 250–254, Sep. 1992.
- [10] R.P. Lang, J. A. Hernandez, F. S. Bussamra and F. K. Arakaki, “Topological optimization of composite aircraft wing rib,” in *21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, Natal, RN, Brazil, Oct. 24-28, 2011.
- [11] S. Soundarya, K. K. Arun and S. Sathiyavani, “Topology optimization of wing ribs in cessna citation,” *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering*, vol. 6, Issue 3, pp. 07-17, Mar. 2018.
- [12] E. Oktay, H. U. Akay and O. Merttopcuoglu, “Parallelized structural topology optimization and CFD coupling for design of aircraft wing structures,” *Computers & Fluids*, vol 49, Issue 1, Pp. 141-145, 2011, doi: 10.1016/j.compfluid.2011.05.005.
- [13] K. Maute, M. Nikbay and C. Farhat, “Conceptual Layout of Aeroelastic Wing Structures by Topology Optimization,” *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Denver, Colorado, April 22-25, 2002.
- [14] S. Friedlander, “Studies in Mathematics and Its Applications,” *Collège de France Seminar*, vol. 31, pp. 1-654, 2002.
- [15] D. Walker, D. Liu and A. Jennings, “Topology optimization of an aircraft wing,” in *56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Kissimmee, Florida, 5-9 January 2015, doi: 10.2514/6.2015-0976.
- [16] B. Shen, H. Liu and S. Lv, “Topology optimization of UAV structure based on homogenization of honeycomb core,” *AIP Advances* 13, 2023, doi: 10.1063/5.0154143.
- [17] L. Krog, A. Tucker and G. Rollema, “Application of topology, sizing and shape optimization methods to optimal design of aircraft components,” *3rd Altair UK HyperWorks Users Conf*, 1–12. 2002.

- [18] B. K. Stanford and P. D. Dunning, "Optimal Topology of Aircraft Rib and Spar Structures under Aeroelastic Loads," *NASA Langley Research Center*, vol. 52, pp. 14, Jul. 2015.
- [19] J. Zhu, W. Zhang and L. Xia, "Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. archives of computational methods in engineering," *Archives of Computational Methods in Engineering*, Jan. 2015, doi: 10.1007/s11831-015-9151-2.
- [20] K. J. Lu and S. Kota, "Design of compliant mechanisms for morphing structural shapes," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, pp. 379–390, June 2003.
- [21] M. I. Friswell, J. E. Herencia, D. Baker, and P. M. Weaver, "The optimisation of hierarchical structures with applications to morphing aircraft," In *Second International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications*, Gijon, Spain, 2-5 Sept., 2008.
- [22] B. Trease and S. Kota, "Adaptive and controllable compliant systems with embedded actuators and sensors," *Proceedings of SPIE*, vol. 6525, 2007, doi: 10.1117/12.715919.
- [23] J. Eves, V. V. Toropov, H. M. Thompson, P. H. Gaskell, J. J. Doherty, and J. Harris, "Topology Optimization of aircraft structures with non-conventional configurations," In *8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Lisbon, Portugal, 2009.
- [24] N. Ursache, T. Melin, A. Isikveren, and M. I. Friswell, "Morphing Winglets for Aircraft Multi-phase Improvement," In *7th AIAA Aviation Technology Integration and Operations Conference (ATIO)*, Belfast, Northern Ireland, 2007.
- [25] M. J. Santer and S. Pellegrino, "Topology Optimization of Adaptive Compliant Aircraft Wing Leading Edge," *AIAA Journal*, University of Cambridge, Cambridge, UK., March 2009, vol. 47, no. 3.

- [26] T. A. de Jong, "Topology optimization of 3D Linkages with application to morphing winglets," Faculty of Aerospace Engineering Delft University of Technology, 2016.
- [27] K. Maute and G. W. Reich, "Integrated multidisciplinary topology optimization approach to adaptive wing design," *Journal of Aircraft*, vol. 43, no. 1, pp. 253-263, 2006.
- [28] E. Oktay, H. U. Akay and O. T. Sehitoglu, "Three-dimensional structural topology optimization of aerial vehicles under aerodynamic loads," *Computers & Fluids*, vol. 92, pp. 225-232, 2014, doi: 10.1016/j.compfluid.2013.11.018.
- [29] Y. B. Zhao, W. J. Guo, S. H. Duan and L. G. Xing, "A novel substructure-based topology optimization method for the design of wing structure," *Int. J. Simul. Multisci. Des. Optim.*, vol. 8, Feb. 2017, doi: 10.1051/smdo/2016013.
- [30] L. Felix, A. A. Gomes and A. Suleman, "Wing topology optimization with self-weight loading," *10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Orlando, Florida, USA, May 19-24, 2013.
- [31] P. S. Bernard, *Fluid Dynamics*, University of Maryland, College Park, 2015.
- [32] G. Dewanto, W. Pranoto, J. Widjajakusuma and H. G. Matuttis, "Simulation of incompressible viscous flow using finite element method," *The Third International Conference of Construction, Infrastructure, and Materials (ICCIM 2023)*, vol. 429, Sep. 2023.
- [33] Z. Ghadampour, M. R. Hashemi, N. Talebbeydokhti, S. P. Neill and A. H. Nikseresht, "Some numerical aspects of modelling flow around hydraulic structures using incompressible SPH," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 69, issue 12, pp. 1470-1483, 2015, doi: 10.1016/j.camwa.2015.04.001.
- [34] S. Derakhshan and A. Tavaziani, "Study of wind turbine aerodynamic performance using numerical methods." *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 83-90, Mar. 2015.

- [35] L. W. Chen, C. Y. Xu and X. Y. Lu, “Numerical investigation of the compressible flow past an aerofoil,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 643, pp. 97 – 126, Jan. 2010, doi: 10.1017/S0022112009991960.
- [36] M. Ledoux and A. El Hami, *Compressible Flow Propulsion and Digital Approaches in Fluid Mechanics*, 2017, doi: 10.1002/9781119368786.
- [37] D. Zeidan and H. D. Ng, “Computational methods for gas dynamics and compressible multiphase flows,” *Shock Waves*, vol. 29, pp. 1–2, 2019, doi: 10.1007/s001930180870-9.
- [38] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "viscosity". Encyclopedia Britannica, 15 Nov. 2023, <https://www.britannica.com/science/viscosity>. Accessed 22 Dec. 2023.
- [39] F. Menter, “Zonal Two Equation k- ω Turbulence Models For Aerodynamic Flows,” In *23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*, Orlando, FL, U.S.A., July 1993, doi: 10.2514/6.1993-2906.
- [40] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang and J. Zhu, “A new k-epsilon eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: Model development and validation,” 1994.
- [41] D. C. Wilcox, “A half century historical review of the k- ω model,” In *29th Aerospace Sciences Meeting*, Reno, NV, U.S.A., Jan. 1991, doi: 10.2514/6.1991-615.
- [42] P. Spalart and S. Allmaras, “A one-equation turbulence model for aerodynamic flows,” *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Jan. 06-09, 1992, Reno, NV, U.S.A., doi: 10.2514/6.1992-439.
- [43] D. Monk and E. A. Chadwick, “ Comparison of turbulence models effectiveness for a delta wing at low reynolds numbers,” In *7th European Conference For Aeronautics And Space Sciences*, 2017, doi: 10.13009/EUCASS2017-653.

- [44] C. Foias, O. Manley, R. Rosa and R. Temam, “Navier – Stokes equations and turbulence,” vol. 83. Cambridge University Press, 2001.
- [45] P. L. Gould and Y. Feng, “Introduction to linear elasticity,” vol. 2. New York: Springer-Verlag, 1994.
- [46] M. Ohsaki, “Genetic algorithm for topology optimization of trusses,” *Computers & Structures*, vol. 57, Issue 2, 1995, pp. 219-225, Oct. 1995, doi: 10.1016/0045-7949(94)00617-C.
- [47] H. Chi, Y. Zhang, T. L. E. Tang, L. Mirabella, L. Dalloro, L. Song and G. H. Paulino, “Universal machine learning for topology optimization,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 375, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.cma.2019.112739.
- [48] I.Y. Kim and O. L. De Weck, "Variable chromosome length genetic algorithm for progressive refinement in topology optimization," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 29, pp. 445-456, Jan. 2005.
- [49] G. C. Luh, C. Y. Lin and Y. S. Lin, “A binary particle swarm optimization for continuum structural topology optimization,” *Applied Soft Computing*, vol. 11, Issue 2, pp. 2833-2844, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.asoc.2010.11.013.
- [50] S. Banga, H. Gehani, S. Bhilare, S. Patel and L. Kara, “3D topology optimization using convolutional neural networks,” arXiv preprint arXiv:1808.07440, 2018.
- [51] K. Svanberg, "The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization." *International journal for numerical methods in engineering*, vol. 24.2, pp. 359-373, Feb. 1987, doi: 10.1002/nme.1620240207.
- [52] M. Y. Wang, X. Wang and D. Guo, “A level set method for structural topology optimization,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 192, Issues 1–2, pp. 227-246, 2003.

- [53] O. Sigmund, "A 99 line topology optimization code written in Matlab," *Structural and multidisciplinary optimization*, vol. 21, pp. 120-127, 2001, doi: 10.1007/s001580050176.
- [54] H. U. Akay ve E. Oktay, "Yapısal tasarım için topoloji optimizasyonu," 8. *Yapı Mekaniği Semineri*, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2012.
- [55] C. L. Ladson, "Effects of independent variation of Mach and Reynolds numbers on the low-speed aerodynamic characteristics of the NACA 0012 airfoil section," vol. 4074, *National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Division*, 1988.

