İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK PALA OPTİMUM YAPI TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sedat SÜSLER

Anabilim Dalı : UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ

Programı : UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK PALA OPTİMUM YAPI TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sedat SÜSLER
511051022

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Süleyman TOLUN

Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Erol ŞENOCAK (İ.T.Ü.)

Doç.Dr. Halit Süleyman TÜRKMEN (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanma aşamasında bana yol gösteren ve bilgisini benimle paylaşan, danışmanım sayın Prof. Dr. Süleyman TOLUN'a teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmanın kritik anlarında bildiklerini benimle paylaşarak çalışmanın son halini almasında büyük katkısı olan ROTAM mühendisi Mehmet Suat KAY'a da sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

MAYIS 2008 **Sedat SÜSLER**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
İÇİNDEKİLER iii
TABLO LİSTESİ v
ŞEKİL LİSTESİ vi
SEMBOL LİSTESİ viii
ÖZET ix
SUMMARY x
1. GİRİŞ 1
2. PALA BAŞARIMI VE ELASTİK ANALİZİ 5
2.1 Pala Elemanı Momentum Kuramı (PEMK) 5
2.1.1 Pala Elemanı Kuramı (PEK) 5
2.1.2 Momentum Kuramı 7
2.1.3 Radyal İçeri Akış Denklemi 8
2.1.4 Burulma 9
2.1.5 Sayısal Çözüm 9
2.1.6 Hava Yükleri 10
2.1.7 Uç Kayıp Etkisi 11
2.1.8 Sıkıştırılabilirlik Düzeltmeleri 12
2.1.9 PEMK Girdileri ve Sonuçları 13
2.2 Palanın Dönmesi ve Koniklik 17
2.2.1 Merkezkaç Kuvveti 17
2.2.2 Ön Koniklik Açısı 17
2.3 Otorotasyon 17
2.4 Kompozit Tabakalar ve Yapılar 19
2.4.1 Genel Özellikler 19
2.4.2 Tabaka ve Doğrultu 21
3. BAŞLANGIÇ PALA TASARIMI 23
3.1 Sabit Özellikler ve Kabuller 23
3.2 Pala Kesiti 24
3.3 Kök Kesimi Kesiti 28
4. PALA SONLU ELEMANLAR MODELİ 29
4.1 Pala Kesiti Modellenmesi ve Sayısal Ağ 30
4.2 Kök Kesimi Kesiti Modellenmesi ve Sayısal Ağ 33
4.3 Kiriş Modeli 34
5. ÇOK AMAÇLI YAPISAL OPTİMİZASYON 37
5.1 Çok Amaçlı Optimizasyon 37
5.1.1 Genel Matematiksel Biçim 37
5.1.2 Pareto Optimumu 38
5.2 Genetik Algoritmalar 38
5.2.1 Genel Yapı 38
5.2.2 Çok Amaçlı Genetik Algoritmalar 39
5.3 Pala Yapısal Optimizasyonu 40

5.4 Aşama 1 ve Sayısal Sonuçlar 41
5.5 Aşama 2 ve Sayısal Sonuçlar 53
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 66
7. KAYNAKLAR 68
ÖZGEÇMİŞ 70

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Atmosfer Koşulları 13
Tablo 2.2: Pala Tasarımında Kullanılacak Sabit Özellikler 13
Tablo 2.3: Pala Yükleri 15
Tablo 2.4: İtki ve Güç Değerleri 16
Tablo 3.1: Kesit Elemanları ve Malzeme Özellikleri 25
Tablo 3.2: Optimizasyonu Yapılacak Palanın Değişkenleri 26
Tablo 3.3: Doğrultular ve Sabitler 27
Tablo 3.4: Optimizasyonu Yapılacak Kök Kesiminin Değişkenleri 28
Tablo 5.1: Optimizasyon Kısıtlamaları 41
Tablo 5.2: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesi 44
Tablo 5.3: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Pala Kirişi Özellikleri 45
Tablo 5.4: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Kabuk Özellikleri 46
Tablo 5.5: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Kök Kirişi Özellikleri 47
Tablo 5.6: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesi 50
Tablo 5.7: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Pala Kirişi Özellikleri 51
Tablo 5.8: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Kabuk Özellikleri 52
Tablo 5.9: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Kök Kirişi Özellikleri 53
Tablo 5.10: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesi 56
Tablo 5.11: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Pala Kirişi Özellikleri 57
Tablo 5.12: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Kabuk Özellikleri 58
Tablo 5.13: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Kök Kirişi Özellikleri 59
Tablo 5.14: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesi 62
Tablo 5.15: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Pala Kirişi Özellikleri 63
Tablo 5.16: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Kabuk Özellikleri 64
Tablo 5.17: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Kök Kirişi Özellikleri 65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Helikopter Ana Bileşenleri [2] 1
Şekil 2.1: Bir Pala Elemanına Gelen Hızlar ve Etkiyen Yükler [12] 5
Şekil 2.2: Askı Uçuşu İçin Momentum Analizinde Kullanılan Rotor Halkası 8
Şekil 2.3: λ Dağılımı 14
Şekil 2.4: Taşıma ve Sürükleme Katsayılarının Pala Boyunca Değişimi 16
Şekil 2.5: Merkezkaç Kuvveti ve Bileşenleri 17
Şekil 2.6: Mevcut Helikopterler ve AI değerleri [12] 19
Şekil 2.7: Kompozitlerin Mikromekaniği ve Makromekaniği [14] 19
Şekil 2.8: Kompozit Yapı [15] 20
Şekil 2.9: Kompozit Tabaka Yerleşim Tipleri ve Kod Örnekleri [16] 21
Şekil 2.10: Tabaka Doğrultusu için İşaret Uylaşımı [15] 22
Şekil 3.1: Bir Helikopter Palasının Kesiti ve Kompozit Yapıları [15] 23
Şekil 3.2: Tasarlanan Pala Kesiti 24
Şekil 3.3: Doğrultular ile Değişen Sabitlerin Karşılaştırılması 27
Şekil 3.4: Tasarlanan Kök Kesiti 28
Şekil 4.1: Sonlu Elemanlar Yöntemi 30
Şekil 4.2: Parametrik Pala Kesiti 31
Şekil 4.3: WARP2D3 Üzerinde Düğüm Noktaları ve İntegrasyon Numarası 32
Şekil 4.4: Pala Kesiti Sayısal Ağı 33
Şekil 4.5: Parametrik Kök Kesimi Kesiti 33
Şekil 4.6: Kök Kesimi Sayısal Ağı 34
Şekil 4.7: Timoshenko Kirişi Davranışı 35
Şekil 4.8: Pala Elemanlarının Konumları 35
Şekil 4.9: Maksimum Gerilme Bölgesi 36
Şekil 5.1: Burulma Şekil Değişiminin 4 Tabakalı Yapılar ve Aşama 1 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması 42
Şekil 5.2: Pala Kütlesinin 4 Tabakalı Yapılar ve Aşama 1 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması 42
Şekil 5.3: 4 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 1 ve Oluşum 1 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi 43
Şekil 5.4: 4 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 1 ve Oluşum 2 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi 43
Şekil 5.5: Burulma Şekil Değişiminin 6 Tabakalı Yapılar ve Aşama 1 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması 48
Şekil 5.6: Pala Kütlesinin 6 Tabakalı Yapılar ve Aşama 1 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması 48
Şekil 5.7: 6 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 1 ve Oluşum 1 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi 49
Şekil 5.8: 6 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 1 ve Oluşum 2 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi 49

Şekil 5.9: Burulma Şekil Değişiminin 4 Tabakalı Yapılar ve Aşama 2 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması 54
Şekil 5.10: Pala Kütlesinin 4 Tabakalı Yapılar ve Aşama 2 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması 54
Şekil 5.11: 4 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 2 ve Oluşum 1 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi..... 55
Şekil 5.12: 4 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 2 ve Oluşum 2 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi..... 55
Şekil 5.13: Burulma Şekil Değişiminin 6 Tabakalı Yapılar ve Aşama 2 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması 60
Şekil 5.14: Pala Kütlesinin 6 Tabakalı Yapılar ve Aşama 2 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması 60
Şekil 5.15: 6 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 2 ve Oluşum 1 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi..... 61
Şekil 5.16: 6 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 2 ve Oluşum 2 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi..... 61

SEMBOL LİSTESİ

N_b	: Rotor pala sayısı
c	: Veter uzunluğu
ρ	: Hava yoğunluğu
C_l	: Taşıma katsayısı
C_d	: Sürükleme katsayısı
C_T	: İtki katsayısı
φ	: İndüklenmiş hücum açısı
θ	: Hatve açısı
θ_{tw}	: Pala lineer burulma açısı
$\theta_{0.75}$	: ¾ yarıçapındaki hatve açısı
R	: Pala uzunluğu
Ω	: Rotor dönüş hızı
λ	: İçeri akış oranı
σ	: Rotor katılık oranı
V_C	: Helikopter tırmanma hızı
v_i	: İndüklenmiş hız
U	: Pala elemanındaki bileşke hız
U_P	: Rotor düzlemine dik düzlem dışı hız
U_T	: Rotor düzlemine paralel düzlem içi hız
U_R	: Rotor düzleminde pala boyunca konumlanan radyal hız
A	: Rotor disk alanı
N	: Pala elemanı sayısı
F	: Düzeltme faktörü
M	: Mach sayısı
CF	: Merkezkaç kuvveti
β_p	: Ön koniklik açısı
AI	: Otorotasyon göstergesi
I_R	: Rotor kütle atalet momenti
Θ	: Kompozit tabaka doğrultu açısı
S	: Muhtemel tasarım ortamı
$\sigma_{çekme_day}$	: S sınıfı cam fiber/epoksi boylamasına çekme dayanımı
τ_{kayma_day}	: S sınıfı cam fiber/epoksi kayma dayanımı
ω	: Doğal frekans

ESNEK PALA OPTİMUM YAPI TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmada, esnek bir helikopter rotor palasının optimum yapısal tasarımı yapılmıştır. Tek yönlü, tabakalı kompozit malzemeden yapılmış pala ve kök kesimi kirişi ile palayı saran kabuk yapının tabaka kalınlıkları ve doğrultu açıları tasarım değişkeni kabul edilmiştir. İki amaç fonksiyonu olarak, pala kütlesinin ve burulma şekil değişiminin minimuma indirgenmesi sağlanmıştır. Bu fonksiyonlar, optimizasyon kısıtlamaları ile kontrol edilmişlerdir. Performans açısından otorotasyon kabiliyeti ölçütü, malzeme dayanımı açısından Tsai-Hill başarısızlık kuramı, burulma değişiminin belirli sınırlar arasında olabileceği, modal analiz açısından rezonans aralığı ve pala ile ilgili geometrik sınırlar tanımlanan kısıtlamalardır. Hem dört hem de altı tabakalı kompozit yapılar için optimizasyon uygulaması yapılmış ve tabaka sayısındaki artışın etkileri incelenmiştir. Statik şartlar altında optimum bir pala tasarımı elde edildikten sonra palanın dinamik davranışı incelenmiş ve ortaya çıkabilecek rezonans etkilerinden uzaklaşılmaya çalışılmıştır. Palanın katılığına önemli etkisi olan dolgu malzemesi, bal peteği yapısı ve çelik denge çubuğu diğer pala yapılarıdır. Pala geometrisi gerçeğe yakın tanımlanmaya çalışılmış; fakat tasarım değişken sayısını azaltmak ve hesaplama süresini kısaltmak için bazı geometrik kabuller yapılmıştır. Palaya etkiyen taşıma ve sürükleme kuvvetleri pala elemanı momentum kuramından yararlanarak bulunmuştur. Bunun yanında pala dönmesi ile oluşan merkezkaç kuvveti de analiz şartlarına eklenmiştir. Pala ve esnek kök kesimi kesitleri, Python programlama dili ve ABAQUS yazılımından yararlanarak parametrik modellenmiş ve sonlu elemanlara ayrılmıştır. Bu kesitler, statik ve modal analizler için ABAQUS yazılımında oluşturulan Timoshenko kiriş modeline aktarılmıştır. Modefrontier çok amaçlı genetik algoritma, eniyileyici olarak kullanılmıştır.

OPTIMUM STRUCTURAL DESIGN OF A FLEXIBLE ROTOR BLADE

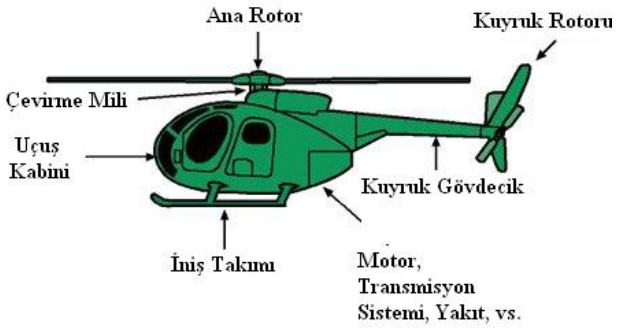
SUMMARY

In this study, the optimum structural design of a flexible helicopter rotor blade has been done. It is aimed to reduce the multi objective function to minimum by assuming the lamina thickness of the spar, root cut out beam and the shell structure and the lamina orientations as design variables. The two objective functions to be minimized include mass and twist deformation functions. These objectives are carried out within the scope of design constraints. These constraints are defined as; autorotation capabilities, Tsai-Hill failure criteria, twist deformation in a certain interval, resonance as a result of modal analysis and some geometric restrictions. The optimization of both four laminated and six laminated composite structures and the effect of the increase in number of layer have been analyzed. After achieving an optimum rotor blade design in a static analysis, the dynamic behavior of the blade has been examined and it was tried to isolate the blade from resonance effects. Lift and drag forces are calculated by using Blade element momentum theory. Centrifugal force is also added while analyzing the blade. Blade and root cut out section are modeled, meshed and analyzed statically and dynamically by ABAQUS program and Python programming language. The optimizer is Modefrontier multiobjective genetic algorithm.

1. GİRİŞ

Sabit kanatlı uçaklar, motorları tarafından sağlanan itkiyle, kanatlarının üstünden ve altından geçen yüksek hızlı hava akımına maruz kalırlar. Bu hava akımının yarattığı basınç farkıyla kanatlar uçağı havaya kaldırır ve havada tutabilir. Hava akımı, döner kanatlı uçaklar olarak tanımlanabilecek helikopterlerde ise bir mil sistemi üzerine yerleştirilen belirli sayıdaki kanadın mile bağlı motor yardımıyla yüksek hızda döndürülmesi sonucu elde edilir. Bu döner kanada pala denir. Hava akımı, palalar üzerinde kaldırma kuvveti oluşturur ve böylece helikopter gövdesi yükselir ve havada tutunabilir.

Sabit kanatlı uçaklarda uçağa kumanda eden hareketli yüzeylerin bir kısmı kanatlarda bir kısmı da yatay ve kuyruk dümenlerinde bulunur. Helikopterlerde ise kumanda edilen yatış, burun aşağı ve yukarı ile dönüş gibi hareketleri oldukça karmaşık bir mekaniğe sahip ana rotor sistemi gerçekleştirir [1]. Şekil 1.1'de helikopter ana bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Helikopter Ana Bileşenleri [2]

Ana rotor sistemi, iki veya daha fazla sayıdaki pala, rotor göbeği, rotor sisteminin tipine göre değişen ve palaları göbeğe bağlayan elemanlar ve mil bağlantı elemanlarından oluşur. Helikopterlerde kullanılan ana rotor tipleri 4 grupta toplanır:

- Tam mafsallı rotor
- Yarı rijit rotor

- Rijit rotor
- Yataksız rotor

Rotor tipleri, pala hareketlerinin gerçekleştirilmesi sorunundan hareketle ortaya çıkmıştır. Kumanda edilen helikoptere, istenilen yönde (ileri, geri, aşağı, yukarı, sağa, sola) manevra yaptırılması için, pala hareketlerinin kontrol edilmesi gerekir. Palaların boylamasına eksen etrafında yunuslama hareketi, dönme düzlemi içerisinde ileri-geri hareketi ve dönme düzlemine dik aşağı-yukarı çırpınma hareketi, palalar üzerindeki taşımayı değiştirir ve helikopter istenilen hareketi yapar.

Tam mafsallı rotor sisteminde, palaların bu üç tip hareketi yapmasına imkan veren menteşe ve yataklar mevcuttur. Bu şekilde rotor sistemi güvenilir ve sağlam olabilir. Ağırlık, bakım zorluğu ve karmaşık mekanik sistem bu tip rotor sistemlerinin olumsuzluklarıdır.

Yarı rijit rotor sistemi daha basit mekanizmaya sahip olmasına rağmen, sadece iki palaya sahip helikopterlerde kullanılmaları gibi bir kısıtlamaya sahiptir. Palaların çırpınma ve ileri-geri hareketi esnek bağlantı parçalarıyla gerçekleştirir. Rijit rotor sistemleri ise palanın yalnızca yunuslama hareketi yapmasına izin verir.

Kompozit malzemelerin, uçakların ardından helikopterlerde de kullanılmaya başlanması, yataksız rotor sistemlerini yaygınlaştırmıştır. Yataksız rotorlarda yunuslama yatağına ihtiyaç duyulmadığı gibi çırpınma ve ileri-geri hareketlerini yapacak menteşeler de bulunmaz. Bu rotorlarda palalar esnek bağlantı parçalarıyla ve yapısal esneme yoluyla bu hareketleri gerçekleştirebilmektedir. Pala yapısı sönümleyici görevini de yapmaktadır. Yataksız rotor sisteminde, gelişmiş aerodinamik şekilleri ve az parçalı rotor göbeğinden dolayı sürükleme kuvveti daha düşüktür ve yüksek performans verirler. Ayrıca metal palalarda 1500 ile 4000 saat arası değişen çalışma ömrü kompozit palalarda onbinlerce saat kabul edilir ve bunlarda metallerin en büyük sorunu olan malzeme yorgunluğu yoktur [1].

Yukarıda anlatılan rotor sistemlerinin özelliklerini göz önüne alarak helikopter pala tasarımında, kullanılacak olan rotor sistemi tipi önem arz etmektedir. Örneğin, pala menteşe ve yataklar yoluyla hareketlerini gerçekleştirebildiği gibi yataksız rotorların bir türü olan elastik mafsallı rotorlarda olduğu gibi esnek bir kirişe tam mafsallı

rotordaki tüm menteşelerin görevleri yaptırılabilir [3]. Bu fark, pala ve pala kökünün modellenmesinde ve analizinde farklı yöntemler izlenmesini gerektirebilmektedir.

Rotor palaları ile ilgili çalışmalar, 80'lerin başında kompozit malzemelerin palalarda kullanılmaya başlanması ve yeni tasarım ve optimizasyon tekniklerinin geliştirilmesiyle hızlanmıştır. Bu konuda en yoğun çalışmayı NASA bünyesindeki araştırma merkezlerinde çalışan bilim adamları yayınladıkları teknik raporlar, makaleler ve bildirilerle yapmışlardır. Celi, 1997 yılına kadar rotorlu araçlarda tasarım optimizasyonları hakkında yapılan tüm çalışmalar hakkında bilgiler vermiştir. Bu çalışmalar içinde pala tasarımları önemli bir yer tutar [4]. Lee, Lin ve Ji, genetik algoritmadan yararlanarak gerçeğe yakın bir kompozit rotor palasının burulma şekil değişiminin azaltılmasını incelemişlerdir. Yapısal optimizasyonda, kompozit tabaka açıları tasarım değişkeni; doğal frekans, maksimum gerilme ile minimum atalet momenti optimizasyon kısıtlayıcıları olarak kullanılmıştır [5]. Lemanski, Weaver, Hill, belirli pala kesiti özelliklerini karşılayabilecek kompozit bir rotor pala tasarımı çalışması yapmışlardır. Tasarımda, deterministik optimizasyon yöntemlerinden yararlanmışlardır [6].

Kim ve Sarigul-Klijin, çok aşamalı ve çok amaçlı optimizasyon yoluyla menteşeli rotor sistemli isotropik malzemeden yapılan esnek rotor palası tasarlamışlardır. Rotor palası, çok hücreli ince cidarlı kiriş olarak modellenmiştir. İlk aşamada, minimum ağırlık, minimum titreşim ve maksimum malzeme dayanımı amaçlarını gerçekleştirmişler. İkinci aşamada, tasarlanan palanın dinamik davranışı incelenerek modal şekil verme tekniği ile rotor kafasına iletilen titreşimin azaltılması amaçlanmıştır [7]. Benzer çalışma, daha önceki yıllarda daha az tasarım değişkeni ve optimizasyon kısıtlaması kullanılarak Nixon tarafından da yapılmıştı. Nixon, tek titanyum, tek kompozit ve üç kompozit pala kirişine sahip 3 farklı pala tasarımından yola çıkarak dairesel kesitli pala kirşinin kalınlığını tasarım değişkeni olarak kullanmıştır. Tek amaç fonksiyonu olarak pala ağırlığını azaltmak istemiş ve aerodinamik, performans, malzeme dayanımı ve otorotasyon göstergesini kısıtlamalar olarak kullanmıştır. Statik analiz sonucu elde edilen pala tasarımını dinamik açıdan inceleyip doğal frekansını azaltmak için ayar kütleleri eklemiştir [8].

Daha eski yıllarda yapılan çalışmalarda daha basit kesitli kiriş modelleri ile pala tasarımları yapılmıştır. Friedman, palayı ince cidarlı dikdörtgen kesitli kiriş olarak

modelleyip ayar ağırlıkları ve toplu kütleler ekleyerek titreşim minimuma indirmeye çalışan yapısal optimizasyon çalışmaları yapmıştır [9]. Chattopadhyay ve Walsh, sivrilen basit kutu kiriş modelinden hareket ederek ve doğal frekans ile otorotasyon ataletini kısıtlayıcı yaparak pala ağırlığının minimum yapılması üzerine araştırmalar yapmışlardır [10]. Ganguli ve Chopra, bir ve iki hücreli kompozit kutu kirişler kullanarak rotor kafasına iletilen yükün azaltılması konusunda çalışmışlardır. Bu amaç fonksiyonunu gerçekleştirirken aeroelastik kararlılık ve frekans yerleşimini koşul kabul etmişlerdir [11]. Bu çalışmanın konusu olmamakla birlikte, pala aerolastik optimizasyonu ve aeroelastik uygunluk konusunda da birçok çalışma yayınlanmıştır.

Bu çalışmada, esnek bir helikopter rotor palasının optimum yapısal tasarımı yapılmıştır. Tek yönlü, tabakalı kompozit malzemeden yapılmış pala ve kök kesimi kirişi ile palayı saran kabuk yapının tabaka kalınlıkları ve doğrultu açıları tasarım değişkeni kabul edilmiştir. İki amaç fonksiyonu olarak, pala kütlesinin ve burulma şekil değişiminin minimuma indirgenmesi sağlanmıştır. Bu fonksiyonlar, optimizasyon kısıtlamaları ile kontrol edilmişlerdir.

2. PALA BAŞARIMI VE ELASTİK ANALİZİ

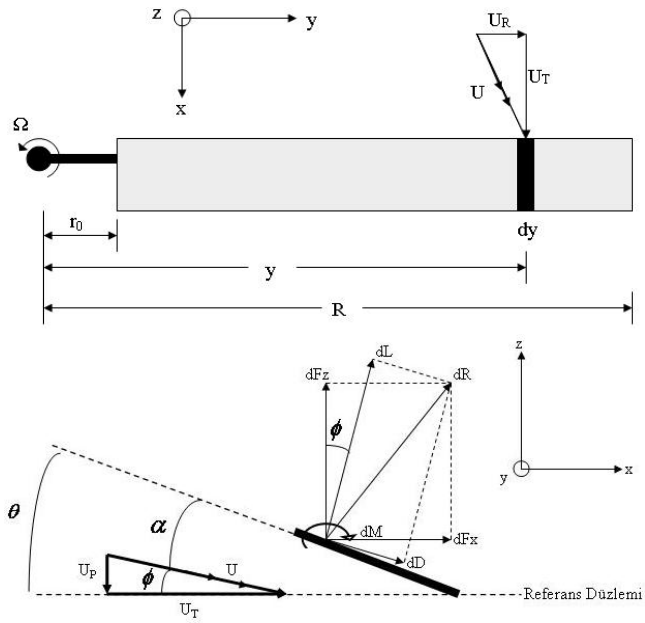
2.1 Pala Elemanı Momentum Kuramı (PEMK)

PEMK, pala elemanı ile momentum kuramının temel ilkelerini birleştirerek askı ve tırmanma uçuşu yapan rotorlar için üçüncü bir analiz yolu olmuştur. Bu ilkeler, taşımanın sirkülasyon ve momentum kuramlarındaki eşitliğine dayanır. PEMK, belirlenen kabuller yoluyla pala boyunca içeri akış dağılımının tahmini için kullanılır[12].

2.1.1 Pala Elemanı Kuramı (PEK)

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi pala elemanı kuramından (PEK) yararlanarak pala üzerindeki bir elemana etkiyen yatay ve düşey kuvvetler aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} dF_Z &= dL\cos\phi - dD\sin\phi \\ dF_X &= dL\sin\phi + dD\cos\phi \end{aligned} \tag{2.1}$$



Şekil 2.1: Bir Pala Elemanına Gelen Hızlar ve Etkiyen Yükler [12]

Taşıma ve sürükleme için genel aerodinamik denklemlerin ve itki için bilinen formülün bir pala elemanına uygulanmış şekilleri (2.2) bağıntısıyla gösterilir.

$$dL = \frac{1}{2}\rho U^2 c C_l dy \tag{2.2a}$$

$$dD = \frac{1}{2}\rho U^2 c C_d dy \tag{2.2b}$$

$$dT = N_b dF_Z \tag{2.2c}$$

(2.2c) bağıntısında, N_b rotordaki pala sayısıdır. PEK kullanılarak ve üç kabulden yararlanarak bir pala elemanı için itki katsayısını (dC_T) bulabiliriz.

$$dC_T = \frac{dT}{\rho A(\Omega R)^2} \tag{2.3}$$

Bu kabuller aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Düzlem dışı hız (U_P), düzlem içi hıza (U_T) göre çok küçük olduğundan, $U \approx U_T$
- İndüklenmiş açı(ϕ) çok küçük olduğundan $\phi = U_P / U_T$, $\sin\phi = \phi$ ve $\cos\phi = 1$
- $dD\sin\phi$ **(**$dD\phi$**)** ihmal edilir.

Yapılan kabuller neticesinde dT için (2.4) bulunur.

$$dT = N_b dL \tag{2.4}$$

İçeri akış oranı (λ), r=y/R ve U/ΩR=Ωy/ΩR=r boyutsuzlaştırma işlemlerinden yararlanarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\lambda = \frac{V_c + \upsilon_i}{\Omega R} = \frac{V_c + \upsilon_i}{\Omega y}\left(\frac{\Omega y}{\Omega R}\right) = \frac{U_P}{U_T}\left(\frac{y}{R}\right) = \phi r \tag{2.5}$$

(2.3) bağıntısından, boyutsuzlaştırma işlemlerinden ve dL ile A (πr^2) değerlerinin açılımından yararlanarak dC_T bulunur. σ değeri rotor katılığını ifade eder ve pala alanının ($N_b cR$) rotor disk alanına (A) oranıdır.

$$dC_T = \frac{1}{2}\sigma C_l r^2 dr \tag{2.6}$$

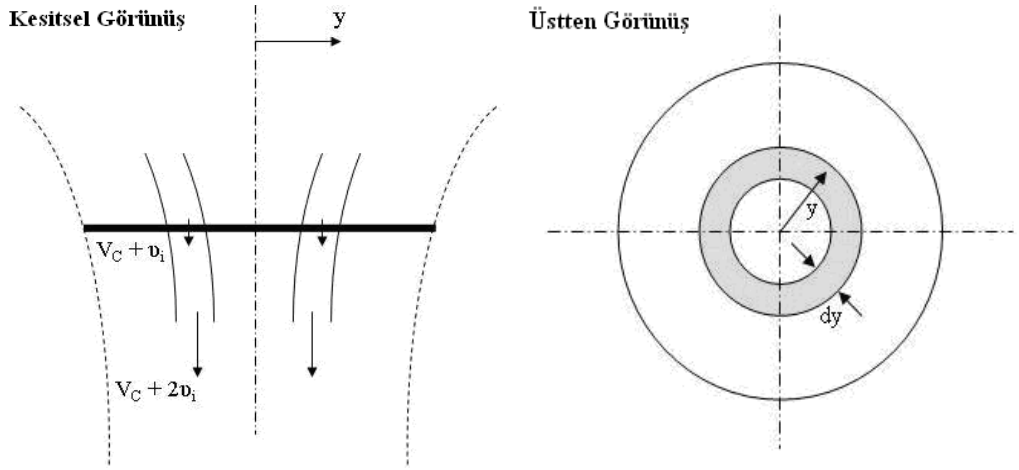
$$C_l = C_{l_\alpha}\left(\alpha - \alpha_0\right) = C_{l_\alpha}\left(\theta - \phi - \alpha_0\right) \tag{2.7}$$

(2.7) ve (2.5) eşitliklerinden yararlanıp sıfır taşıma açısını (α_0), θ açısına dahil edersek, PEK ile elde ettiğimiz itki katsayısının son hali (2.8) olur.

$$dC_T = \frac{\sigma C_{l_\alpha}}{2}\left(\theta r^2 - \lambda r\right) dr \tag{2.8}$$

2.1.2 Momentum Kuramı

İtki ve itki katsayısını tek boyutlu momentum kuramından yararlanarak da bulabiliriz. İtki artışı, rotor çemberindeki kütle akış oranının ($d\dot{m} = \rho dA[V_C + \upsilon_i]$), indüklenmiş hızın iki katı ile çarpımına eşittir. V_C, tırmanma hızını temsil eder ve askı uçuşu durumunda 0 alınır. Gerekli değerler formülde yerine konularak ve Şekil 2.2'den yararlanarak (2.9) elde edilir.



Şekil 2.2: Askı Uçuşu İçin Momentum Analizinde Kullanılan Rotor Halkası

$$dT = 2\rho\left(V_C + \upsilon_i\right)\upsilon_i dA = 4\pi\rho\left(V_C + \upsilon_i\right)\upsilon_i y dy \tag{2.9}$$

(2.9) eşitliği, Froude-Finsterwalder denklemi olarak da bilinir[12]. (2.3), (2.5) ve (2.9) ifadelerinden yararlanıp, daha önce PEK ile yapılan işlemlerde de kullanılan boyutsuzlaştırmaları kullanarak, dC_T için (2.10) formülü bulunur.

$$dC_T = \frac{2\rho\left(V_C + \upsilon_i\right)\upsilon_i\left(2\pi y dy\right)}{\rho\left(\pi R^2\right)\left(\Omega R^2\right)} = 4\frac{\left(V_C + \upsilon_i\right)}{\Omega R}\left(\frac{\upsilon_i}{\Omega R}\right)\left(\frac{y}{R}\right)d\left(\frac{y}{R}\right) = 4\lambda\lambda_i r dr \tag{2.10}$$

İçeri akış oranı için (2.11) ifadesi yazılabiliyorsa, momentum kuramından bulunan dC_T (2.12) halini alır.

$$\lambda = \frac{V_C}{\Omega R} + \frac{\upsilon_i}{\Omega R} = \lambda_C + \lambda_i \tag{2.11}$$

$$dC_T = 4\lambda\left(\lambda - \lambda_C\right) r dr \tag{2.12}$$

2.1.3 Radyal İçeri Akış Denklemi

PEK ve momentum kuramından yararlanarak bulunan dC_T ifadelerini birbirine eşitleyerek içeri akış oranı için kabuller yapmadan doğrudan bir çözüm bulabiliriz. Bu yaklaşım PEK ve momentum kuramından yararlanılan karma bir yoldur. (2.13)

ile ifade edildiği gibi (2.8) ve (2.12) ifadelerini birbirine eşitlediğimizde, λ değerinin bulunabileceği ikinci dereceden bir denklem elde edilir (2.14).

$$\frac{\sigma C_{l_\alpha}}{2}\left(\theta r^2 - \lambda r\right) = 4\lambda\left(\lambda - \lambda_C\right) r \tag{2.13}$$

$$\lambda^2 + \left(\frac{\sigma C_{l_\alpha}}{8} - \lambda_C\right)\lambda - \frac{\sigma C_{l_\alpha}}{8}\theta r = 0 \tag{2.14}$$

Denklem çözüldüğünde elde edilen (2.15) bağıntısı, r değeri ile değişen içeri akış oranını verir. Pala hatvesi, burulma dağılımı, veter dağılımı ve kanat profili diğer girdiler ile ilgili ifadelerdir. Bu çalışmada askı uçuşundaki bir rotor palasının davranışı incelendiğinden λ_C=0 alınır.

$$\lambda(r) \equiv \lambda_{i(r)} = \frac{\sigma C_{l_\alpha}}{16}\left(\sqrt{1 + \frac{32}{\sigma C_{l_\alpha}}\theta r} - 1\right) \tag{2.15}$$

2.1.4 Burulma

Burulma dağılımının bulunmasında, palaya lineer ya da ideal burulmadan hangisinin uygulandığı önemlidir. İdeal burulmada pala ucu hatve açısı kullanılırken, lineer burulmada referans hatve açısı için palanın ¾ yarıçapındaki hatve açısı ($\theta_{0.75}$) kullanılır (2.16). Bu çalışmada tasarlanan pala lineer ve -10° burulmaya (θ_{tw}) sahiptir. Bulunan açı, palaya pilot tarafından kumanda ile yaptırılan müşterek hatve açısı ile toplanarak her istasyon için yerel hatve açısı bulunur.

$$\theta(r) = \theta_{0.75} + (r - 0.75)\theta_{tw} \tag{2.16}$$

2.1.5 Sayısal Çözüm

PEMK denklemlerinin sayısal çözümü, pala açıklığı Δr uzunluğundaki elemanlara bölünerek yapılır ve askı uçuşunda N eleman için λ denklemi, (2.17) halini alır.

$$\lambda(r_n) = \frac{\sigma C_{l_\alpha}}{16}\left(\sqrt{1 + \frac{32}{\sigma C_{l_\alpha}}\theta(r_n) r_n} - 1\right) \qquad n = 1, N \tag{2.17}$$

İçeri akış oranı, (2.17) ifadesi pala boyunca bulunduktan sonra her eleman için itki katsayısı değişimi (2.18) ile bulunabilir.

$$\Delta C_{T_n} = \frac{\sigma C_{l_\alpha}}{2}\left(\theta(r_n) r_n^2 - \lambda(r_n) r_n\right)\Delta r \tag{2.18}$$

Tüm pala için C_T ve güç katsayısı (C_P), en basit yaklaşımla dikdörtgen kuralından yararlanarak bulunur (2.19).

$$C_T = \sum_{n=1}^{N} \Delta C_{T_n} \tag{2.19a}$$

$$C_P = \sum_{n=1}^{N} \lambda_n r \Delta C_{T_n} \tag{2.19b}$$

2.1.6 Hava Yükleri

Pala boyunca yerel taşıma katsayısı dağılımı (2.20) ile ifade edilir.

$$C_l(r_n) = C_{l_\alpha}\left(\theta(r_n) - \frac{\lambda(r_n)}{r_n}\right) \tag{2.20}$$

Yerel sürükleme katsayısı (2.21) bağıntısıyla bulunur. C_d ifadesinde kullanılan katsayılar, kanat profiline, Mach sayısına, Reynolds sayısına ve yüzey ölçümüne bağlı bir fonksiyondur. Zor olabilecek bu hesaplama yerine Reynolds ve Mach sayıları için palanın %75 yarıçapındaki profilinin iki boyutlu deneysel ölçümlerini kullanmak yararlıdır [12].

$$C_d(r_n) = C_{d_0} + d_1\alpha(r_n) + d_2\left[\alpha(r_n)\right]^2 \tag{2.21}$$

Bu çalışmada kullanılan NACA 0012, simetrik bir profil olduğundan d_1=0 kabulü yapılır ve profil ölçümlerinden d_2=0.4 alınır. %75 yarıçapa karşılık gelen 0.4 M değeri için C_{d0}=0.01 alınır.

L ve D, (2.2) bağıntısından yararlanarak N elemanın her biri için bulunduktan sonra, toplam değerleri bir palanın tamamına uygulanan yük olur. İtki ve güç (indüklenen ve profil) değerleri ise hesaplanan taşıma ve sürükleme kuvvetlerinden yararlanarak bu çalışmada tasarlanan 4 palaya sahip rotor için bulunur (2.22).

$$T(r_n) = N_b\left[L(r_n)\cos\phi(r_n) - D(r_n)\sin\phi(r_n)\right] \tag{2.22a}$$

$$P_{ind}(r_n) = N_b\left[y_n\Omega L(r_n)\sin\phi(r_n)\right] \tag{2.22b}$$

$$P_{pro}(r_n) = N_b\left[y_n\Omega D(r_n)\cos\phi(r_n)\right] \tag{2.22c}$$

2.1.7 Uç Kayıp Etkisi

Prandtl tarafından geliştirilen metotla uç kayıp etkisi hesaplanabilir. Prandtl bu durum için indüklenme nedeniyle pala ucunda meydana gelen itki ve taşıma kaybını hesaplayan palanın N elemanı için düzeltme faktörleri (F) bulmuştur (2.23).

$$F = \left(\frac{2}{\pi}\right)\cos^{-1}\left(\exp(-f)\right) \tag{2.23}$$

(2.23) denklemindeki değişken $f_{uç}$ değeri, (2.24) ile gösterildiği gibi pala sayısı, r ve indüklenen içeri akış açısından oluşan bir bağıntıdır.

$$f_{uç} = \frac{N_b}{2}\left(\frac{1-r}{r\phi}\right) \tag{2.24}$$

F fonksiyonu etkisiyle pala uç bölgesindeki indüklenen hız arttırılırken taşıma azaltılır. F fonksiyonu, PEMK ile bütünleştirilerek askı uçuşu için yeni içeri akış oranı bulunur (2.25).

$$\lambda(r) = \frac{\sigma C_{l_\alpha}}{16F}\left(\sqrt{1 + \frac{32F}{\sigma C_{l_\alpha}}\theta r} - 1\right) \tag{2.25}$$

F, λ değerine bağlı bir fonksiyon olduğundan (2.25) sayısal olarak çözülebilir. İlk iterasyonda λ değerini çözerken F=1 alınır ve daha sonra (2.23) kullanılarak F bulunur. Tekrarlanan iterasyonlarla yakınsama sağlanır.

Pala uç kaybı fikri pala kökünde oluşan taşıma kaybı modeline genişletilebilir [12]. Bu durumda $f_{kök}$, (2.26) denklemiyle bulunur.

$$f_{kök} = \frac{N_b}{2}\left(\frac{r}{(1-r)\phi}\right) \tag{2.26}$$

Prandtl'ın uç kaybı ve kök kayıp etkilerinin PEMK içinde yer alması ön tasarım açısından değerlendirirsek gerçeğe yakın bir yaklaşım sağlar.

2.1.8 Sıkıştırılabilirlik Düzeltmeleri

Rotor palaları çok yüksek devirde döndüklerinden, uç hızları ve Mach sayısı yüksektir. Sıkıştırılabilirlik etkisini PEMK formüllerine katmak gerekir. Profilin taşıma eğrisi eğimi ($C_{l\alpha}$) ve sürükleme katsayılarını Mach sayısından bağımsız kabul etmek sorgulanmalıdır. Her bir pala elamanına ait $C_{l\alpha}$ değerinde düzeltme yapılarak C_T üzerindeki sıkıştırılabilirlik etkileri dikkate alınır (2.27).

$$C_{l_\alpha}(M) = \frac{C_{l_\alpha}\big|_{M=0.1}}{\sqrt{1-M^2}} = \frac{C_{l_\alpha}\big|_{M=0.1}}{\sqrt{1-\left(\frac{\Omega y}{a}\right)^2}} = \frac{C_{l_\alpha}\big|_{M=0.1}}{\sqrt{1-M_{uç}^2 r^2}} \tag{2.27}$$

Genel olarak, sıkıştırılabilirlik etkisinin hesaba katılması C_T değerinde %10 civarında bir artışa yol açar. Sıkıştırılabilirlik etkisi, ileri uçuşlarda ve transonik şartlara yaklaşıldığında daha önemli olmasına rağmen, askı ve tırmanma uçuşu hesaplamalarında da kullanılır [12].

2.1.9 PEMK Girdileri ve Sonuçları

Tablo 2.1'deki atmosfer koşulları ve Tablo 2.2'deki sabit özellikler girdi olarak kullanılmıştır. Rotorun askı uçuşu yaptığı kabul edilmiş ve V_C=0 alınmıştır. Burulma açısının dağılımı lineer kabul edilmiştir.

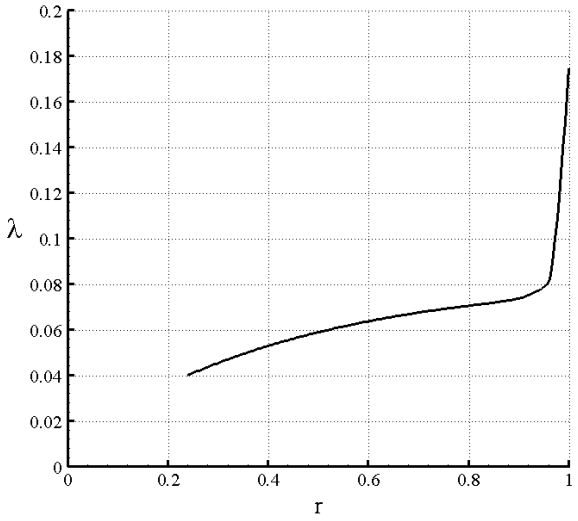
Tablo 2.1: Atmosfer Koşulları

Gün Tipi	Sıcak Gün
Sıcaklık	35 °C
Yükseklik	Deniz Seviyesi
Yoğunluk	0.9894 kg/m^3
Ses Hızı	351.9 m/s

Tablo 2.2: Pala Tasarımında Kullanılacak Sabit Özellikler

Pala Uzunluğu	5479.4 mm
Kök Kesimi Uzunluğu	1095.88 mm
Veter Uzunluğu	280 mm
Profil	NACA 0012
Burulma Açısı	-10°
Sivrilme Oranı	1
Müşterek Hatve Açısı	10°
Rotor Dönüş Hızı	33.33 rad/s
Pala Sayısı	4
Helikopter Ağırlığı	20000 N

Hesaplamalar Excel programı kullanılarak yapılmıştır. Pala 20 elemana bölünerek 20 istasyon için hesaplamalar yapılmıştır. İçeri akış oranının uç kayıplarını dikkate alarak sayısal çözülmesiyle elde edilen dağılımı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



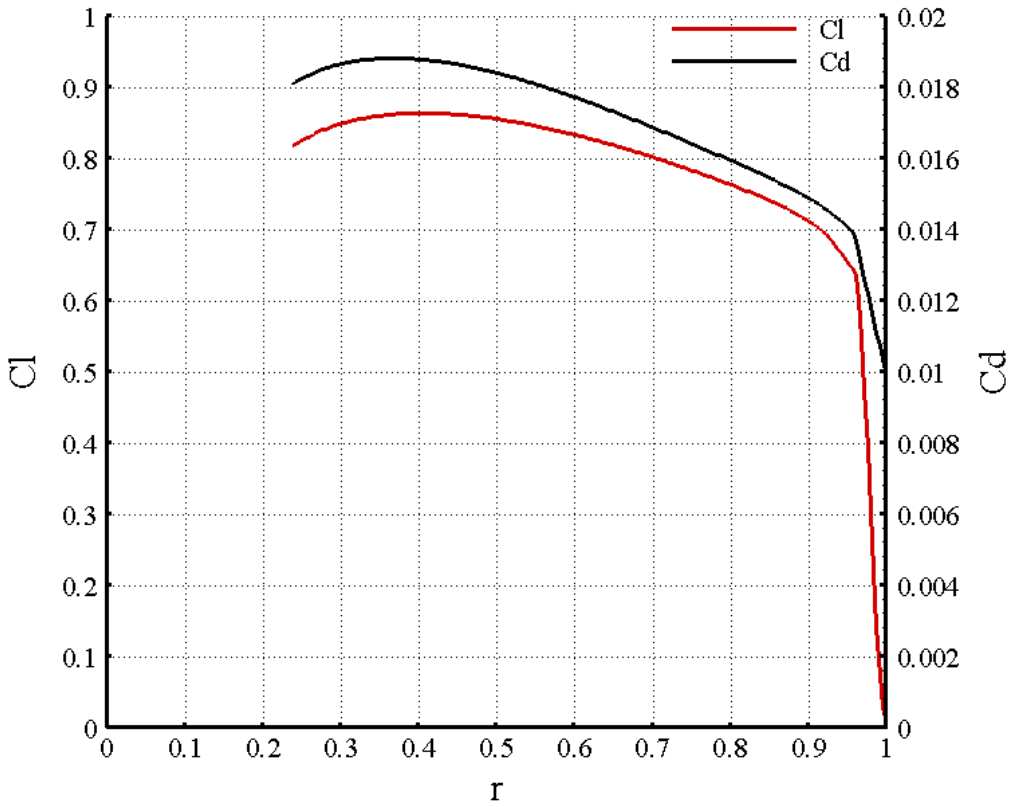
Şekil 2.3: λ Dağılımı

Tablo 2.3'te gösterilen her istasyon için verilerin toplamı bir pala için toplam taşıma ve sürükleme kuvvetini vermektedir. Aerodinamik taşımaya katkısı çok düşük olan kök kesimi hesaplamalara dahil edilmediğinden bu bölgede L ve D bulunmamıştır. Kök kesimi, tüm palanın uzunluğunun %20'sini oluşturmaktadır.

Tablo 2.3: Pala Yükleri

İstasyon No	y (mm)	r	$L(r_n)$ (N) Taşıma Kuvveti	$D(r_n)$ (N) Sürükleme Kuvveti
1	1315.0535	0.24	48.9313	1.0835
2	1534.2291	0.28	68.2314	1.5031
3	1753.4047	0.32	90.3025	1.9809
4	1972.5803	0.36	114.9866	2.5121
5	2191.7558	0.4	142.1035	3.0916
6	2410.9314	0.44	171.4503	3.7139
7	2630.1070	0.48	202.8087	4.3736
8	2849.2826	0.52	235.9522	5.0650
9	3068.4582	0.56	270.6492	5.7829
10	3287.6338	0.6	306.6637	6.5226
11	3506.8093	0.64	343.7549	7.2792
12	3725.9849	0.68	381.6773	8.0487
13	3945.1605	0.72	420.1745	8.8271
14	4164.3361	0.76	458.9637	9.6107
15	4383.5117	0.8	497.6798	10.3950
16	4602.6873	0.84	535.6882	11.1726
17	4821.8628	0.88	571.4384	11.9249
18	5041.0384	0.92	599.9986	12.5933
19	5260.2140	0.96	600.7679	12.9526
20	5479.3896	1	12.1474	10.4350
Toplam (N) (1 pala için):			6074.3702	138.8682

Şekil 2.4'te taşıma ve sürükleme katsayılarının pala boyunca değişimi gösterilmiştir. Bunun yanında Prandtl'ın uç kaybı ve pala kök kayıp etkilerinin hesaba katılmasının etkisi yine Şekil 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2.4: Taşıma ve Sürükleme Katsayılarının Pala Boyunca Değişimi

Gereken toplam güç hesabında ileri uçuş yapılmadığından sadece indüklenen ve profil güç değerleri bulunmuştur. Gövde sürüklemesinden kaynaklanan parazit güç dikkate alınmamıştır. Elde edilen itki ve güç değerleri Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4: İtki ve Güç Değerleri

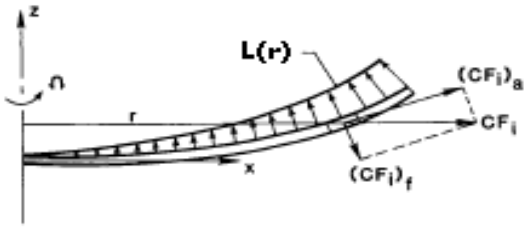
4 pala için		
C_T	0.008	
T	24120.69 N	
P_{ind}	300.34 kW	(402.76 hp)
P_{pro}	75.13 kW	(100.75 hp)

2.2 Palanın Dönmesi ve Koniklik

2.2.1 Merkezkaç Kuvveti

Rotor palalarının dönmesi sonucu merkezkaç kuvveti oluşur ve palanın şekil değişimine uğramasına yol açacak başka kuvvetler yoksa eksenel doğrultuda palayı etkiler. Aksi durumlarda etki doğrultuları değişir. Şekil 2.5 ile gösterildiği gibi, eksen boyunca $(CF_i)_e$ ile pala çırpınması doğrultusunda $(CF_i)_c$ bileşenleri oluşur [8]. Merkezkaç kuvvetler rotor dönüş hızına (Ω) bağlıdırlar. Pala elemanlarına etkiyen bileşke merkezkaç kuvvet (2.28) denklemi ile ifade edilir.

$$CF_n = m_n y \Omega^2 \tag{2.28}$$



Şekil 2.5: Merkezkaç Kuvveti ve Bileşenleri

2.2.2 Ön Koniklik Açısı

Rotorun dönmesiyle oluşan merkezkaç kuvveti etkisiyle aşağı yönde eğilme bileşeni meydana gelir. Rotor palalarına ön koniklik açısı (β_p) verilerek aşağı yöndeki bu eğilme bileşeninin, aerodinamik yükler etkisiyle rotor göbeğinde oluşan yukarı yöndeki eğilme momentini azaltması sağlanır [12]. Bu çalışmada da tercih edilen yataksız rotor tipleri için β_p genellikle 2°-3° arası alınır.

2.3 Otorotasyon

Diğer hava taşıtlarından farklı olarak helikopterlere özgü çok önemli bir özellik olan otorotasyon kabiliyeti, motorların arızalanması ya da diğer acil durumlarda, yaralanmalara ve yapısal hasarlara yol açmayacak şekilde helikopterin acil iniş yapabilmesini sağlar [13]. Otorotasyon sırasında yukarı yönlü hava akışı motora

ihtiyaç duymadan rotor palalarının normal hızda dönmesini sağlar. Otorotasyon, askı, düşey ve ileri uçuşların hepsinde uygulanabilir.

Otorotasyon kabiliyetini, otorotasyon göstergelerinden (AI) yararlanarak ifade edebiliriz. Bell ve Sikorsky otorotasyon göstergeleri ile eşdeğer askı uçuş zamanından yararlanılabilir.

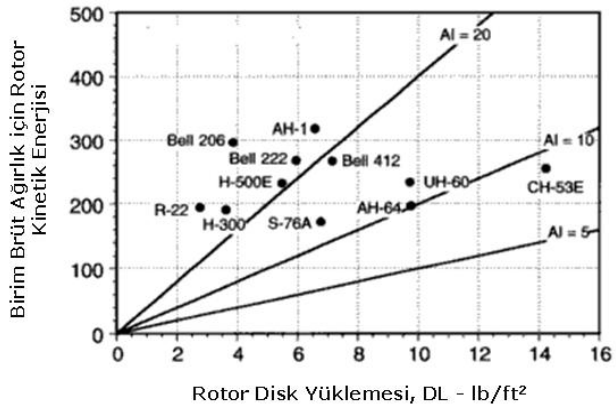
Otorotasyon göstergeleri, otorotasyon performansını etkileyen faktörlere dayanarak oluşturulur. Rotor disk yüklemesi (W), alçalma oranını etkilemektedir. Rotor sistemindeki depolanmış kinetik enerji, otorotasyon manevrasına başlama ve bitirme başarı şansını etkiler [12]. Bunun dışında, otorotasyon göstergeleri içinde yer almamakla birlikte pilot kabiliyeti de performans için önemlidir. Bu çalışmada kullanılan Sikorsky otorotasyon göstergesi, (2.29) ifadesi ile belirlenir.

$$AI = \frac{I_R \Omega^2}{2WDL} \tag{2.29}$$

I_R, rotor kütle atalet momentidir. I, bir rotor palasının elemanlarının kütlelerinin rotor dönme eksenine uzaklıklarının karesi ile çarpılmalarının toplamı (2.30) ile ifade edilir. Bu çalışmadaki 4 palaya sahip rotor için I_R=4I ile ifade edilir.

$$I = \sum_{n=1}^{N} m_n r_n^2 \tag{2.30}$$

Şekil 2.6 incelendiğinde, tek motorlu helikopterler için AI'nın 20 ft^3/lb (1.25 m^3/kg) değerinden daha büyük olması gerekmektedir [12].

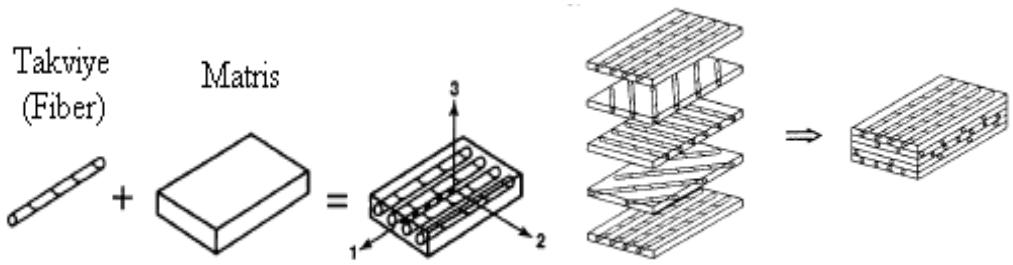


Şekil 2.6: Mevcut Helikopterler ve AI değerleri [12]

2.4 Kompozit Tabakalar ve Yapılar

2.4.1 Genel Özellikler

Kompozit malzeme, temel olarak iki veya daha fazla malzemenin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan ve meydana geldiği malzemelerden farklı özelliklere sahip yeni tür malzemeye denir. Kompozitler, matris ve takviye bileşenlerinden oluşur (Şekil 2.7). Kullanılan matrisin cinsi kompozit malzemeler arasında bir sınıflandırma yaratır. Metal ve seramik türevi malzemeler de matris olarak kullanılmasına rağmen polimer esaslı matrisler %90 oranında kullanıma sahiptir. Bu yüzden kompozit malzemeler takviye edilmiş plastikler olarak da adlandırılabilir.



Şekil 2.7: Kompozitlerin Mikromekaniği ve Makromekaniği [14]

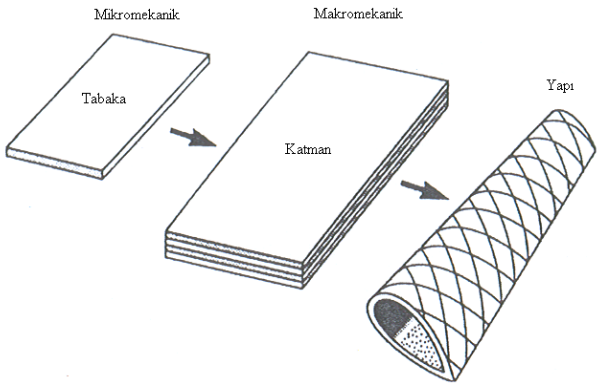
Polimer esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler olarak ikiye ayrılır. Havacılık sanayinde en yaygın kullanılan reçine ve polyester, termoset matrisler grubunda yer alır. Bunun dışında takviye elemanlar fiber olarak adlandırılır. Fiber, sertlik ve sağlamlık gibi yapısal özellikleri; reçine, elyafın yapısal bütünlüğü

oluşturması için birbirine bağlanması, yükün fiber arasında dağılmasını ve fiberin kimyasal etkilerden ve atmosfer şartlarından korunmasını sağlar. Havacılık sanayinde kullanılan başlıca fiber türleri ise cam, aramid ve karbondur.

Fiber ve polimer esaslı matristen oluşan kompozit malzemeler tabakalardan oluşan katmanlı bir yapıya sahiptirler. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de gösterildiği gibi fiber takviyeli kompozitlerin mikromekanik ve makromekanik analizi sonucunda kompozit yapı oluşturulur. Mikromekanik, bileşenlerin (fiber ve matris) mekanik davranışı, etkileşimi ve bu etkileşim ile oluşan davranışları (katmandaki bir tabaka oluşumu) ile ilgilenir. Makromekanik, kompozit malzemelerin ve yapıların daha belirli mekanik davranışlarını bileşenleri ve bileşen etkileşimlerini dikkate almadan inceler [15].

Takviye malzemelerin bir boyutu diğer boyutlarına göre daha fazla olduğunda elyaflardan söz edebiliriz. Kompozit malzemelerde kullanılan fiberlerin fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri üzerinde çok önemli bir faktördür. Takviyeler farklı biçimde konumlanabilir:

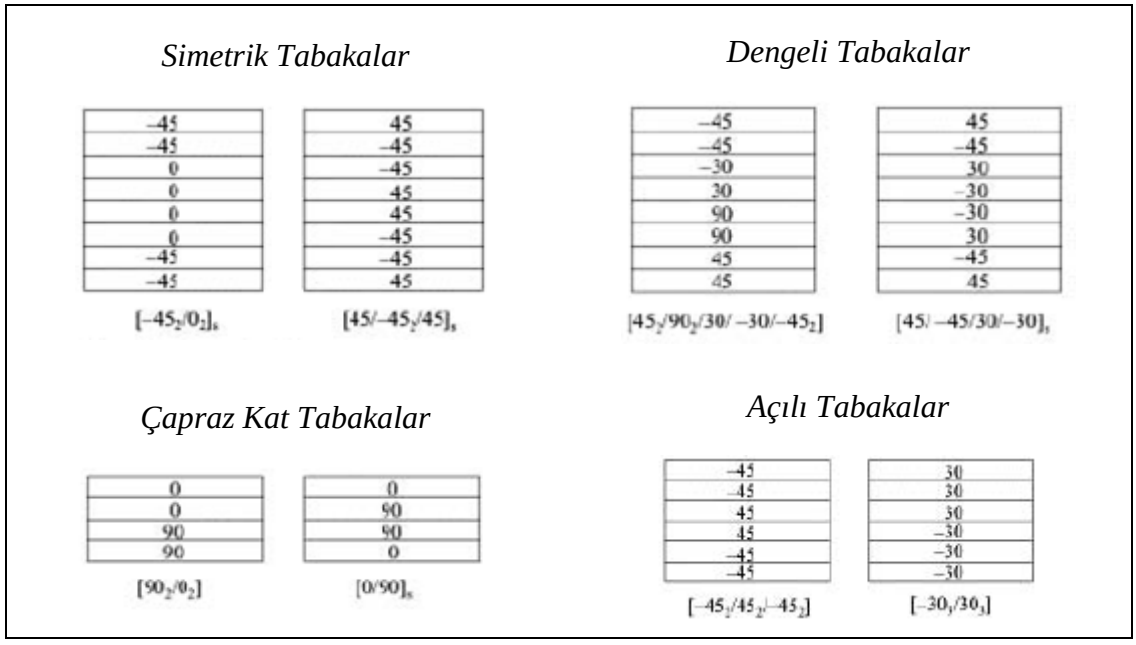
- Parçacıklı kompozit
- Süreksiz fiberler
- Sürekli fiberler
- Tek yönlü sürekli fiberler
- Dokuma kumaş (iki eksenli, üç eksenli)



Şekil 2.8: Kompozit Yapı [15]

2.4.2 Tabaka ve Doğrultu

Elyaf takviyeli bir kompozitin üretimi esnasında, istenilen kompozit kalınlığını sağlamak için çok katlı ve değişik doğrultulu elyafların matris ile tabakalar halinde düzenlenmesi gerekir. Tabakalar, Şekil 2.9'daki örneklerde gösterildiği gibi simetrik, dengelenmiş, çapraz kat, açılı, simetrik olmayan, $\pi / 4$ katman gibi tabaka dizilim tipleriyle yerleştirilebilirler ve katman kodları ile ifade edilirler [16].



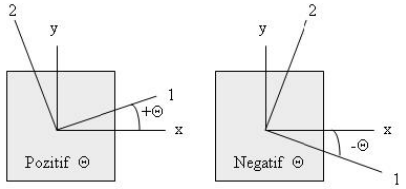
Şekil 2.9: Kompozit Tabaka Yerleşim Tipleri ve Kod Örnekleri [16]

Elyafları tek yönlü olarak düzenlediğimizde ortotropik özelliği sağlarız. Ortotropik durumda kayma modülü ve gerilmeler, burulmaların oluştuğu doğrultulara göre tanımlanır.

Ortotropik malzemelerin katılık matrisi isotropik olmayan malzemelerle aynı formda, fakat kullanılan koordinat sistemine göre değişkenlik gösterir. Genel bir ortotropik tabakanın iki boyutlu hali için mikromekanik analizi yapıldığında asal olmayan eksen koordinatı kullanılır ve bu durumda gerilme-gerinme ilişkisi dört bağımsız sabit ve tabaka doğrultusu ile ilişkilendirilir. Elastik sabit (C_{ij} 'katılık matrisi' veya S_{ij} 'esneklik matrisi') sayısındaki bu azalma, simetrik koşulları gerilme-gerinme ilişkisinde kullanarak gerçekleştirilir [15].

Bir malzemeyi karakterize etmeye çalıştığımızda ise elastik sabitler yerine mühendislik sabitlerini kullanırız; çünkü mühendislik sabitleri tasarım ve analizlerde daha geniş kullanıma ve gerilme ve gerinme ile ifade edilen formüllere sahiptir [15].

Genel bir ortotropik tabakanın doğrultusunun işaret uylaşımı Şekil 2.10'da gösterilmiştir. İlgili kompozit malzemeye ait tabaka mühendislik sabitlerinden (E_1, E_2, G_{12}, ν_{12}) ve doğrultudan (Θ) yararlanarak farklı doğrultulardaki tabakalar için E_x, E_y, G_{xy} ve ν_{xy} sabitlerini (2.30) ile ifade edebiliriz.



Şekil 2.10: Tabaka Doğrultusu için İşaret Uylaşımı [15]

$$E_x = \left[\frac{1}{E_1} c^4 + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) s^2 c^2 + \frac{1}{E_2} s^4 \right]^{-1} \tag{2.31a}$$

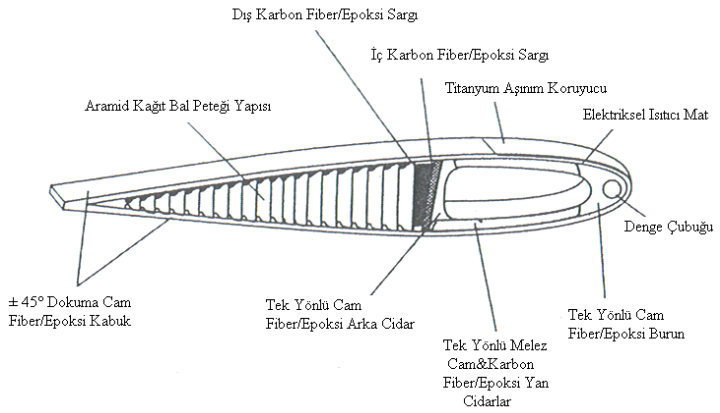
$$E_y = \left[\frac{1}{E_1} s^4 + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) s^2 c^2 + \frac{1}{E_2} c^4 \right]^{-1} \tag{2.31b}$$

$$G_{xy} = \left[\frac{1}{G_{12}} (s^4 + c^4) + 4 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{2G_{12}} \right) s^2 c^2 \right]^{-1} \tag{2.31c}$$

Denklemlerdeki c, cos Θ ifadesi ve s, sin Θ ifadesi ile tanımlanır.

3. BAŞLANGIÇ PALA TASARIMI

Günümüzde havacılık sanayinde uçak kanat ve gövde imalatı yanında helikopter bileşenlerinde ve özellikle helikopter palalarında kompozit malzeme kullanımı en üst noktalara çıkmıştır (Şekil 3.1). Kompozit malzemelerin palalarda kullanılmasının temel üç getirisi hafiflik, esneklik ve dayanımdır. İmalat şartlarının kısmen zor olması bile bu getirilerin sağladığı diğer faydaların önüne geçememiştir.



Şekil 3.1: Bir Helikopter Palasının Kesiti ve Kompozit Yapıları [15]

3.1 Sabit Özellikler ve Kabuller

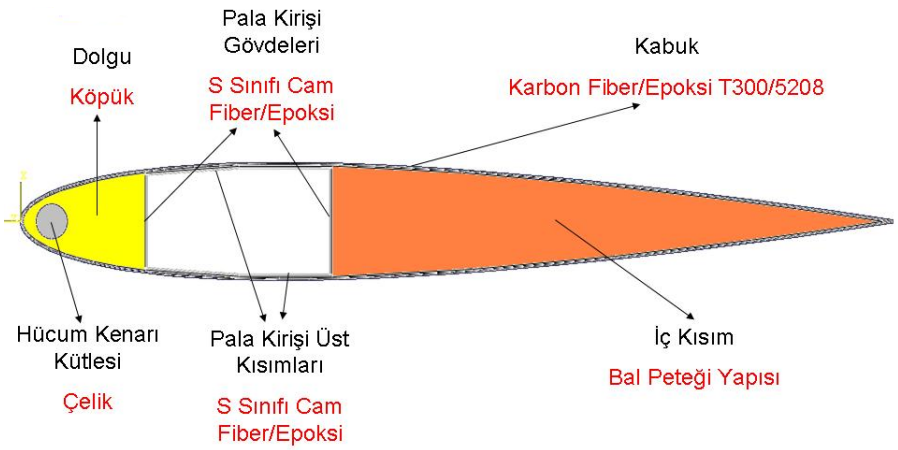
Bu çalışmadaki pala, yataksız rotor sistemine ait bir eleman olarak tasarlanmıştır ve yunuslama, ileri-geri ve çırpınma hareketlerini yatak ya da menteşelere ihtiyaç duymadan yapabilecek esnekliğe sahiptir. Pala, yüksek açıklık oranlı ve rijit bir rotor kafasına bağlı esnek bir kiriş olarak tanımlanmıştır. Kirişin, rotor kafasından başlayarak %20 oranındaki uzunluğu kök kesimi, %80 oranındaki bölümü ise aerodinamik taşımayı sağlayan pala kesitli bölümüdür. Kök kesiminde dönüş hızı düşük olduğundan aerodinamik taşımaya katkısı çok azdır. Tablo 2.2'de palaya ait sabit geometrik özellikler gösterilmiştir. Bunun dışında, Bölüm 2.2.2'de açıklanan β_p açısı 3° sabit değer olarak alınmıştır. Gerçek bir rotor palasına çok yakın bir tasarım

amaçlanmıştır; fakat sonlu elemanlar analizi ve optimizasyon aşamalarında bazı hesaplama kolaylıkları elde edebilmek için bazı kabuller yapılmıştır:

- Kök kesimi dışında pala boyunca aynı pala kesiti kullanılmıştır.
- Pala boyunca veter uzunluğu sabit alınmıştır (sivrilme oranı=1).
- Kök kesimi, pala kirişinin devamı şeklinde kabul edilmiştir.
- Pala ucu, kesik şeklindedir.

3.2 Pala Kesiti

Pala boyunca kesit sabit olduğundan, tüm kesitlerde aynı yapılar mevcuttur. Şekil 3.2 incelendiğinde palayı dıştan, tabakalı kompozit kabuk sarmaktadır. Pala kirişi, üst kısımları pala şekline uyumlu, gövdeleri birbirine paralel tabakalı kompozit malzemeden yapılmış dışbükey kapalı bir eğri olarak tasarlanmıştır. Pala ön kısmında ve iç kısmında dolgu amaçlı malzemeler kullanılmıştır. Denge çubuğu ağırlık merkezini dengeleyici rol oynamaktadır.



Şekil 3.2: Tasarlanan Pala Kesiti

Tablo 3.1'de pala kesit elemanlarında kullanılan malzemeler ve malzeme sabitleri verilmiştir. Analiz ve optimizasyon işlemlerinde, iç kısım, dolgu ve denge çubuğu sabit alan ve hacimler olarak kabul edilmiştir. Denge çubuğu, silindirik yapıda ve daire kesiti 5.5 mm çapındadır. Merkezi, veter üzerinde ve pala ön ucundan 10 mm uzaklıktadır. Köpük, Şekil 3.2'de gösterilen alanı pala ucundan 40 mm uzaklığa

kadar doldurmaktadır. Bal peteği kısmı pala ön ucundan 100 mm uzaklıkta başlamakta ve kesit arka ucuna kadar ulaşan alanı kaplamaktadır.

Tablo 3.1: Kesit Elemanları ve Malzeme Özellikleri

Yapı	Malzeme	Malzeme Özellikleri
Pala Kirişi	S Sınıfı Cam Fiber/Epoksi (Fiber Oranı %50)	ρ=2000 kg/m^3 E_1=43 GPa G_{12}=4.5 GPa E_m=1.0 GPa
Kabuk	Karbon Fiber/Epoksi T300/5208 (Fiber Oranı %70)	ρ=1600 kg/m^3 E_1=181 GPa G_{12}=7.17 GPa E_m=1.4 GPa
İç Kısım	Bal Peteği Yapısı	ρ=32 kg/m^3 E_1=7,6 MPa G_1=0,1 MPa G_2=29.66 MPa
Denge Çubuğu	Çelik	ρ=7860 kg/m^3 E=210 GPa ν=0.3
Dolgu	Köpük	ρ=660 kg/m^3 E=2.4 GPa ν=0.3

Pala kirişi ve kabuk, tabakalı kompozit malzemelerden yapılmıştır. Pala tasarımı için Tablo 3.2'de pala kirişi ve kabuk değişkenlerinin izin verilen aralıkları gösterilmiştir. 6 tabakaya sahip tasarımlar için de aynı optimizasyon aralıkları geçerlidir.

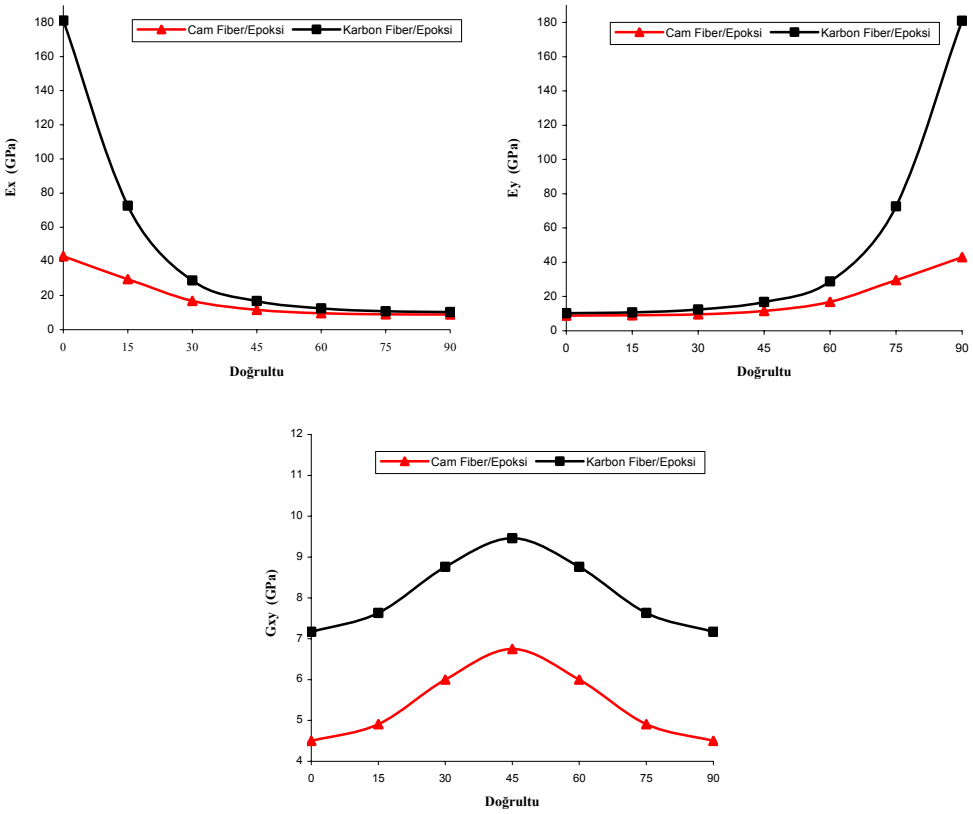
Tablo 3.2: Optimizasyonu Yapılacak Palanın Değişkenleri

Yapı	**Malzeme**	**Tabaka No (Dıştan İçeriye)**	**Kalınlık (mm)**	**Doğrultular**
Pala Kirişi	S Sınıfı Cam Fiber/Epoksi (Fiber Oranı %50)	1	0.1 - 0.45	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°
		2	0.1 - 0.45	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°
		3	0.1 - 0.45	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°
		4	0.1 - 0.45	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°
Kabuk	Karbon Fiber/Epoksi T300/5208 (Fiber Oranı %70)	1	0.1 - 0.3	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°
		2	0.1 - 0.3	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°
		3	0.1 - 0.3	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°
		4	0.1 - 0.3	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°

Analiz ve optimizasyon aşamalarında tabakaların kalınlıkları ve doğrultuları değişken kabul edilmiştir. 4 ve 6 tabaka sayısı ile iki farklı uygulama yapılarak tabaka sayısının artışının etkisi incelenmiştir. 7 farklı doğrultu açısı olasılığı belirlenmiştir. (2.31) ve Tablo 3.1'den yararlanarak 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° doğrultu değerlerine sahip olası tabakalar için sabitler hesaplanmış ve Tablo 3.3'te gösterilmiştir. Şekil 3.3'teki grafikler ile doğrultuların sabitlere ve dolayısıyla malzemenin elastik yapısına etkisi karşılaştırmalı gösterilmiştir.

Tablo 3.3: Doğrultular ve Sabitler

S Sınıfı Cam Fiber/Epoksi				Karbon Fiber/Epoksi T300/5208			
Θ (°)	**E_X (GPa)**	**E_Y (GPa)**	**G_{XY} (GPa)**	**Θ (°)**	**E_X (GPa)**	**E_Y (GPa)**	**G_{XY} (GPa)**
0	43	8.9	4.5	0	181	10.3	7.17
15	29.539	9.007	4.909	15	72.629	10.745	7.632
30	16.830	9.618	5.999	30	28.780	12.418	8.761
45	11.585	11.585	6.749	45	16.737	16.737	9.460
60	9.618	16.830	5.999	60	12.418	28.780	8.761
75	9.007	29.539	4.909	75	10.745	72.629	7.632
90	8.9	43	4.5	90	10.3	181	7.17



Şekil 3.3: Doğrultular ile Değişen Sabitlerin Karşılaştırılması

Tabaka kalınlıkları, amaç fonksiyonlarının optimum hale getirilme çalışmalarında Tablo 3.2' de belirtilen aralıklarda pala kirişi için 0.01 mm ve kabuk için 0.02 mm adımlarla değişebilmektedir.

3.3 Kök Kesimi Kesiti

Kök kesimi pala kirişinin devamı olarak kabul edilmiştir. Sahip olduğu kesit, pala kirişinin kesiti ile aynı geometrik şekle ve malzeme özelliklerine sahiptir; fakat tabakalarının kalınlıkları ve doğrultuları ayrı birer değişken olarak optimumlaştırılmaya çalışılmıştır. Tablo 3.4'te kök kesimi tasarımı için izin verilen değerler gösterilmiştir. Tabaka sayısı, pala kirişi ve kabukta olduğu gibi, 4 ve 6 alınarak farklı iki değerin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 3.4'te kök kesimi kesiti gösterilmiştir.

Tablo 3.4: Optimizasyonu Yapılacak Kök Kesiminin Değişkenleri

Yapı	Malzeme	Tabaka No (Dıştan İçeriye)	Kalınlık (mm)	Doğrultular
Kök Kesimi	S Sınıfı Cam Fiber/Epoksi (Fiber Oranı %50)	1	0.1 - 0.45	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°
		2	0.1 - 0.45	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°
		3	0.1 - 0.45	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°
		4	0.1 - 0.45	0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°

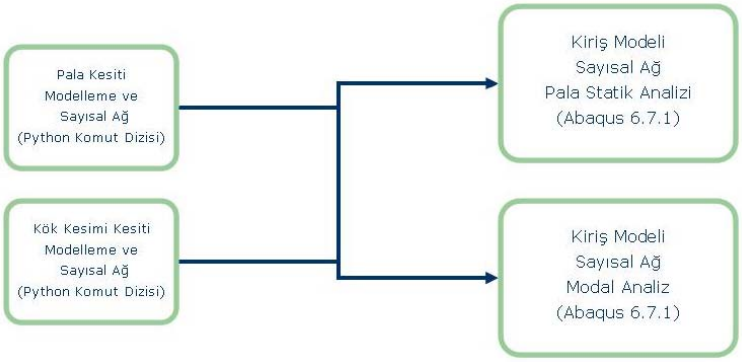


Şekil 3.4: Tasarlanan Kök Kesiti

4. PALA SONLU ELEMANLAR MODELİ

Bu çalışmada pala kirişi, kök kesimi kirişi ve kabuk tabakalarının kalınlıkları ve doğrultularının optimizasyon içinde değişmesi palanın sonlu elemanlar analizi ile beraber optimizasyon tasarımı çevrimi içinde ilerler. Tasarım değişkenlerinin, pala üzerindeki gerilme dağılımına, burulma şekil değişimine, kütle atalet momentine, pala kütlesine ve doğal frekanslara etkisi vardır. Bu etkiler, pala ve kesitlerinin ABAQUS 6.7.1 yazılımı ve Python programlama dili yardımıyla sonlu elemanlar ile modellenip, analizinin yapılması ile değerlendirilebilmiştir. Optimizasyon aşamasında çok sayıda analiz yapılacağı düşünülerek sonlu eleman sayısını azaltmak ve çözüm süresini kısaltmak için üç boyutlu modelleme tercih edilmemiştir. Şekil 4.1 ve aşağıda özetlenen aşamalardan oluşan yöntem izlenmiştir:

- Pala kesitinin modellenmesi ve sayısal ağ oluşturulması
- Pala kök kesiminin modellenmesi ve sayısal ağ oluşturulması
- Kiriş modelinin oluşturulması ve sonlu elemanların atanması
- Pala ve kök kesimi kesitlerinin kiriş modeline atanması
- Kiriş modelinde yükler ve sınır koşullarının atanması
- Kiriş modelinin çözdürülmesi ve sonuçların alınması

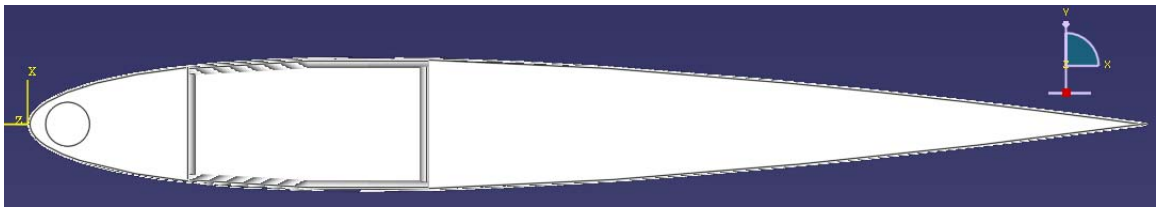


Şekil 4.1: Sonlu Elemanlar Yöntemi

4.1 Pala Kesiti Modellenmesi ve Sayısal Ağ

Bölüm 3.2'de kesit modellemesi için kullanılan girdiler ayrıntılı anlatılmıştı. Optimizasyon aşamasında kullanılacak değişkenlerin çözüm sırasında pala geometrisi ile bir bütün olarak hareket edebilmesi için pala kesiti parametrik modellenmiştir. Bunun için ABAQUS 6.7.1 yazılımı tabanında çalışacak Python dilinde bir komut dizisi hazırlanmıştır. Bu program, aşağıdaki adımları takip eden içeriğindeki komutlar ile kesiti parametrik modelleyip ardından sonlu elemanlarla sayısal ağ oluşturmuştur:

- NACA 0012 koordinat noktası verileri kullanılarak profil oluşturulması
- Kabuk, pala kirişi, denge çubuğu, köpük ve bal peteği yapılarının oluşturulması
- Pala kirişi ve kabuk kısımlarının tabakalı yapılar haline getirilmesi (tabaka kalınlıkları ve her tabakanın doğrultu açısına bağlı malzeme özellikleri)
- Yapılarda kullanılacak malzeme özellikleri girilmesi ve yapılara atanması
- Kullanılacak sonlu eleman tipi ile sayısal ağ oluşturulması
- Mekanik özelliklerin elde edileceği kesit noktalarının belirlenmesi

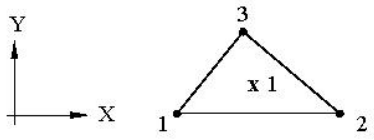


Şekil 4.2: Parametrik Pala Kesiti

Şekil 4.2'de gösterilen modellenmiş pala kesiti, kök kesimi hariç pala boyunca kullanılmıştır. Parametrik modelleme ile kabuk ve pala kirişinin tabaka sayıları, her bir tabakanın kalınlığı ve doğrultu açılarının girişi kullanıcıya bırakılmıştır. Bu değerlerin değişiminde tüm pala geometrisi uygun olarak değişebilmektedir. Doğrultu açılarının parametrik değişimi açı değeri girilerek yapılmamıştır. Tablo 3.3'teki veriler komutlara eklenerek her değişik doğrultulu tabaka ayrı bir malzeme olarak tanımlanmıştır.

Sonlu eleman yazılımlarıyla basit kesitlere sahip kiriş modellerinin analizi yapılırken kesitler üzerinde sayısal ağ oluşturulmaz. Kesit kütüphanesinden kesit çeşitlerinden biri seçilerek gerekli özellikler atanır. Sayısal ağlı bir kesit daha farklıdır. Sayısal ağlı bir kesit karmaşık bir kiriş kesiti tanımlanabilmesine olanak sağlar. Ana fikir, kiriş kesitinin iki boyutlu sonlu elemanlar modelini yaratabilmektir. Kiriş modelini oluştururken ve Timoshenko kiriş analizini yaparken istenen kesit değerleri ve hesaplanan özellikler bu sayısal ağlı kesitin analizi sonucu oluşan dosya yardımıyla atanır [17]. Dosyada yer alan kesit özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Kesit katılıkları (eksenel, eğilme, burulma, enine kayma katılıkları)
- Kütle
- Kütle merkezi
- Dönme ataleti
- Sönümleme özelliği
- Ağırlık ve kayma merkezi
- Kesit Noktaları



Şekil 4.3: WARP2D3 Üzerinde Düğüm Noktaları ve İntegrasyon Numarası

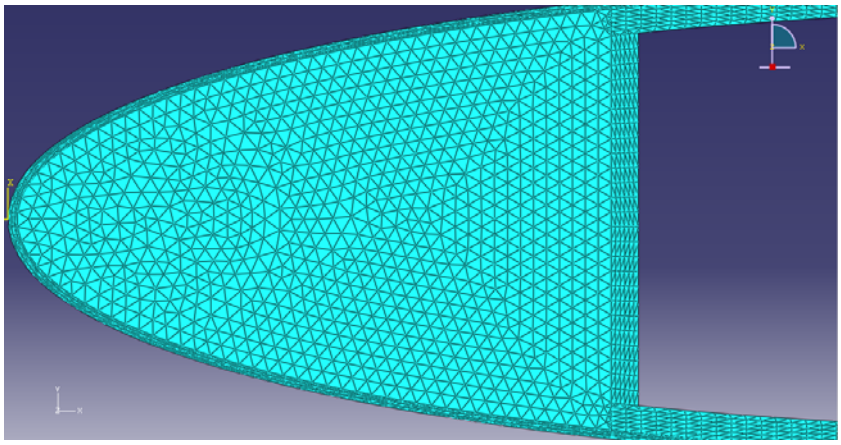
Bu çalışmadaki pala kesiti de sayısal ağlı bir kesittir. Sayısal ağ oluşturmak için ABAQUS 6.7.1 yazılımı eleman kütüphanesinde bulunan sayısal ağlı kesitler için özel kullanılan iki boyutlu ve WARP2D3 kodlu üç düğüm noktalı üçgen çarpılma elemanları kullanılmıştır (Şekil 4.3). Bu elemanların her düğüm noktasında düzlem dışı çarpılma fonksiyon değerini temsil eden tek serbestlik derecesi vardır. Düzlem dışı çarpılma fonksiyonlarının türevleri, kiriş modelindeki Timoshenko sonlu elemanların integrasyon noktalarındaki kesme gerilme ve gerinmelerinin hesaplanmasında kullanılır [17]. Timoshenko kiriş elemanlarının çarpılma elemanlarıyla oluşturulan iki boyutlu sayısal ağlı kesitleri için lineer elastik malzeme tanımı (3.1) ile ifade edilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} E & & \\ & G_1 & \\ & & G_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{Bmatrix} \tag{3.1}$$

Pala burulmasının yaratılması için kullanılacak olan kullanıcı tanımlı koordinat sistemi ile evrensel koordinat sistemi arasındaki açı tanımını dahil edersek gerilme-gerinme ilişkisi (3.2) halini alır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} E & 0 & 0 \\ & G_1(\cos\alpha)^2 + G_2(\sin\alpha)^2 & (G_1 - G_2)\cos\alpha\sin\alpha \\ simetrik & & G_1(\sin\alpha)^2 + G_2(\cos\alpha)^2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{Bmatrix} \tag{3.2}$$

Şekil 4.4'te kesit üzerindeki sayısal ağı oluşturan çarpılma elemanlarının kabuk, pala kirişi ve pala hücum bölgesindeki yayılımı gösterilmektedir.

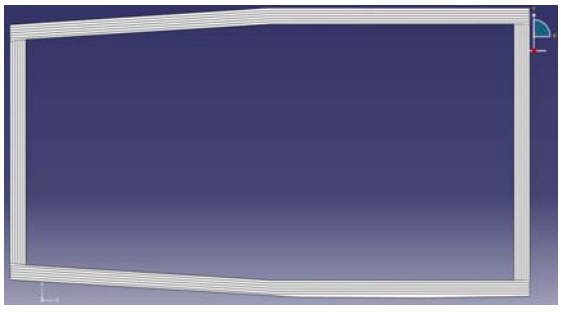


Şekil 4.4: Pala Kesiti Sayısal Ağı

Komut dizisi, kesit üzerinde mekanik özelliklerin belirlenebileceği ve kesit noktaları denilen istenilen sayıda nokta seçilebilmesine imkan vermektedir. Kiriş modeli oluşturulduktan ve analizinden sonra bu üç nokta için optimizasyon için gerekli pala boyunca maksimum gerilmelerin olabileceği yerler elde edilebilmelidir.

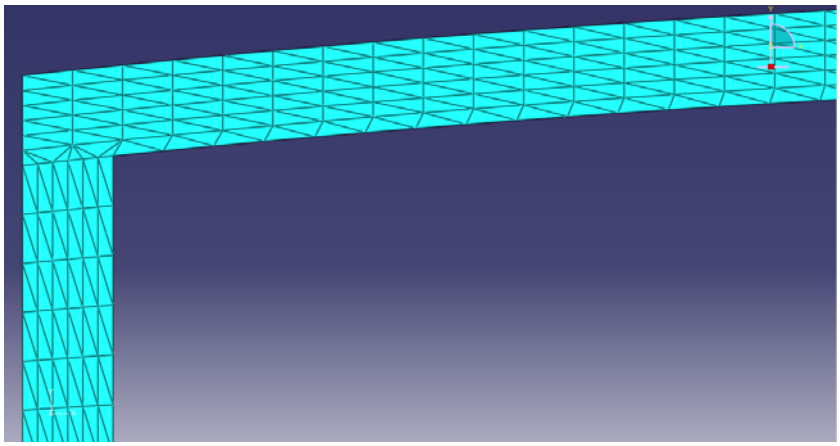
4.2 Kök Kesimi Kesiti Modellenmesi ve Sayısal Ağ

Kök kesimi kesitinin modellenmesi, Bölüm 4.1'deki pala kesiti modellenmesi ile benzerdir. Kök kesimi için Python dilinde ABAQUS 6.7.1 yazılımı tabanında çalışacak ikinci bir komut dizisi hazırlanmıştır. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi kök kesimini parametrik modelleyecek bu kodlar, sadece pala kirişinden oluşan bir pala kesiti gibi düşünülmüştür. Tabaka kalınlıkları ve doğrultuları parametrik değerler şeklinde düzenlenerek hazırlanmıştır.



Şekil 4.5: Parametrik Kök Kesimi Kesiti

Sayısal ağlı bir kesit oluşturulduğundan, Şekil 4.6'teki gibi kök kesimi için de WARP2D3 elemanları kullanılmıştır. Kesit noktaları için pala kesitinde geçerli ölçütler kök kesimi için de geçerlidir.

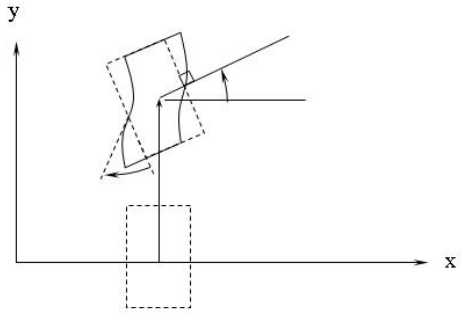


Şekil 4.6: Kök Kesimi Sayısal Ağı

4.3 Kiriş Modeli

Kiriş modeli, ABAQUS 6.7.1 yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Pala ve kök kesimi esnek yapılar olarak tanımlanmıştır. Rotor kafası rijit kabul edilerek, kök kesimi kafaya ankastre bağlanmıştır. Gerekli geometrik özellikler Tablo 2.2'den yararlanarak eklenmiştir. Çubuk şeklinde modellenen palaya kesitlerin eklenmesi Python komut dizilerinin çalıştırılması ve kirişte kullanılacak kesit özelliklerinin atanmasıyla sağlanır.

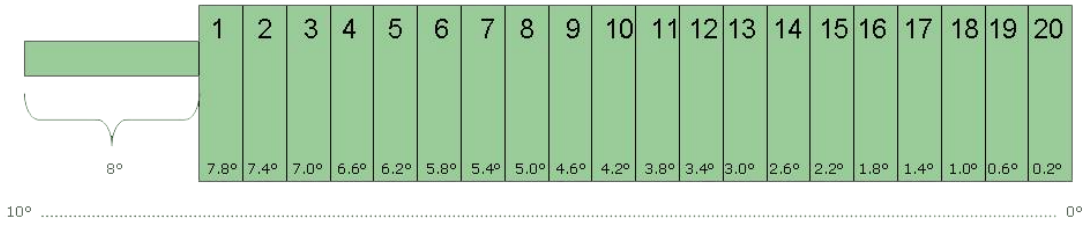
Kök kesimi ve pala, yazılımda yer alan B31 kodlu elemanlarla sayısal ağ oluşturulmuştur. B31, üç boyutlu ve iki düğüm noktalı lineer Timoshenko kiriş elmanıdır. Timoshenko kirişler, Euler-Bernoulli kirişlerinden farklı olarak enine kayma şekil değişimine olanak sağlarlar [17]. Kirişte hem kesitin dönme ataleti hem de kayma şekil değişimi birarada değerlendirilir (Şekil 4.7). Böylece Timoshenko kiriş teorisinde eğilme momentinin etkisi, yanal şekil değişimlerinin etkisi, dönme ataletinin etkisi ve kayma şekil değişimlerinin etkisi aynı anda göz önünde bulundurulur [18]. Timoshenko kiriş teorisindeki bu şekil değiştirme düzeneği fiziksel olarak kirişin katılığını azaltır ve statik yük altında Euler-Bernoulli kirişlerine göre daha fazla şekil değişimlerine yol açar.



Şekil 4.7: Timoshenko Kirişi Davranışı

Kök kesiminde daha yüksek gerilmeler oluşacağından bu bölümde daha fazla sonlu eleman tanımlanmıştır. Palanın %20' sini kapsayan kök kesimine 20 B31 elemanı atanmıştır. Geri kalan pala kesitli bölümü de 20 B31 elemanına bölünmüştür. Bölüm 2.2.2'de anlatılan ön koniklik açısı 3° kabul edilip kiriş modeline uygulanmıştır.

Müşterek hatve açısı 10° olduğundan, -10° lineer burulma açısı palaya uygulandığında pala ucunda 0° açı değeri elde edilir. Statik ve modal analiz için pala burulması idealleştirme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8'de gösterilen 20 elemana sahip pala için, kök kesimi kirişine bağlı pala kesitli sonlu elemandan başlayıp, açı değeri 0.4° azaltılır. Kök kesimi boyunca bu durumun devam etmesi durumunda, pala ucundan köküne -10° burulma açısının bulunduğu kabul edilir. Bu çalışma için 20 elemana sahip kök kesimi boyunca palanın konumu 8° ve sabit kabul edilmiştir. Her pala elemanına ve kök kesimine atanacak yerel koordinat sistemi, koordinat dönüşümü ile elde edilir.



Şekil 4.8: Pala Elemanlarının Konumları

Statik analiz için PEMK kullanılarak 20 istasyon için elde edilen ve Tablo 2.3'te gösterilen taşıma ve sürükleme kuvvetleri, 20 adet B31 elemanının 2 düğüm noktasına eşit paylaştırılarak uygulanır. Merkezkaç kuvveti, ABAQUS yazılımında yer alan CENTRIF komutu yardımıyla atanır. 40 B31 elemanının integrasyon noktalarında ve Python komut dizisinde tanımlanan 3 kesit noktasında 120'şer tane

σ_1, σ_{12}, σ_{13} gerilmeleri çıktı dosyasına yazdırılır. Bölüm 4.1 ve Bölüm 4.2'de anlatılan pala ve kök kesimi kirişlerinin kesitleri üzerinde maksimum gerilmeye maruz kalabilecek noktaları belirleyebilmek için kritik noktalarda palaya statik analiz uygulanır. Şekil 4.9'da gösterildiği gibi kök kesimi kirişinin sol gövde ve alt kısım bölümlerinin birleşim yerinde maksimum gerilmeler elde edilmiştir. Optimizasyon aşamasında kullanılacak maksimum gerilme ile ilgili kısıtlamalar için bu birleşim yerinden kesit noktaları alınır. Her eleman için elde edilen burulma şekil değişimi değerleri ile pala kütlesi ve kütle atalet momenti değerleri de statik analiz sonucu elde edilen çıktı dosyasına yazdırılır.



Şekil 4.9: Maksimum Gerilme Bölgesi

Palanın sadece statik açıdan incelenmesi palanın yüksek hızlarda dönmesi sırasında ortaya çıkabilecek rezonans problemlerini görmeye yetmez. Dinamik açıdan değerlendirilmesi, modal analiz sonucu elde edilen doğal frekanslarının incelenmesi gerekir. Timoshenko kiriş teorisinin kullanılması statik analizlerde daha büyük şekil değişimine yol açması yanında, yapılan modal analizlerde, özellikle yüksek frekans değerlerinin söz konusu olduğu rotor palalarında, daha gerçekçi doğal frekans değerleri elde edilmesini sağlar. Statik analiz için kullanılan kiriş modelinden yararlanarak yapılan modal analiz ile 10 mod için şekiller, özdeğerler ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir.

5. ÇOK AMAÇLI YAPISAL OPTİMİZASYON

5.1 Çok Amaçlı Optimizasyon

5.1.1 Genel Matematiksel Biçim

Bütün olasılıkları içeren klasik tek amaçlı bir tasarım optimizasyonunun matematiksel biçimini koşullara bağlı olarak (5.1) ile ifade edebiliriz. Bu genel biçimde f(x) amaç fonksiyonu minimuma indirilmeye çalışılır. Tasarım problemlerinin türüne göre değişken sayıları farklı olabilir. Bunun dışında eşitlik ve eşitsizlik koşullarının miktarlarında ve hangisinin ya da ikisinin de olabileceği konusunda değişik durumlar da olabilir.

$$\begin{aligned} &f(x) = f(x_1, x_2, ..., x_n) \\ &h_i(x) = h_i(x_1, x_2, ..., x_n) = 0; \qquad i = 1, 2, \ldots, p \; ; \; j = 1, 2, \ldots, m \\ &g_j(x) = g_j(x_1, x_2, ..., x_n) \le 0; \end{aligned} \tag{5.1}$$

Optimizasyon problemleri çok amaçlı fonksiyonlara da sahip olabilir. (5.1) ifadesinden yararlanarak minimuma indirilmeye çalışılan çok amaçlı fonksiyonlara sahip optimizasyon probleminin genel matematiksel halini koşullara baplı olarak (5.2) ile ifade edebiliriz.

$$\begin{aligned} &f(x) = (f_1(x), f_2(x), ..., f_k(x)) \\ &x = (x_1, x_2, ...x_n) \\ &h_i(x) = 0; \qquad i = 1, 2, \ldots, p \; ; \; j = 1, 2, \ldots, m \\ &g_j(x) \le 0; \end{aligned} \tag{5.2}$$

Bütün muhtemel tasarım noktalarını bir arada tanımlayan muhtemel tasarım ortamı (S), (5.3) ile tanımlanır.

$$S = \left\{ x \middle| h_i(x) \le 0; i = 1, 2, \ldots, p;\ ve\ g_j(x) \le 0; j = 1, 2, \ldots, m \right\} \quad (5.3)$$

5.1.2 Pareto Optimumu

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümlerinin tanımlanmasında ağır basan çözüm fikri Pareto optimumudur. Eğer S'de x^* gibi bir çözüm noktası dışında en az bir amaç fonsiyonunu diğer bir fonksiyonu arttırmadan azaltan yine S'de bir başka x noktası yoksa x^*, Pareto optimumu olarak adlandırılır. Tüm Pareto optimumları birarada Pareto optimum kümesi şeklinde tanımlanır [19].

5.2 Genetik Algoritmalar

5.2.1 Genel Yapı

Tasarım araştırması, amaç ve koşul ortamlarının anlaşılabilir bir şekilde aranmasının yapılması aşamasıdır. Bulunan tasarımların değerlendirilmesinin sonucu olarak daha iyi tasarımlar bulabilmek için yeni araştırmalar yapılır. Araştırma yöntemleri iki farklı yaklaşımdan dolayı iki grupta toplanır:

- Deterministik yöntemler
- Olasılıksal yöntemler

Kullanılan algoritmalar da yöntemlere göre farklılık gösterir. Deterministik yöntemlerde, araştırılan amaç fonksiyonunun sürekli ve kararınca düzgün olduğu göz önünde tutulur. Bu yöntemlerde algoritma bir başlangıç tasarımından optimumu aramaya başlar ve bir hareket sırası yaratarak bir tasarım ortamı noktasından diğerine ilerlemeye çalışır. Maksimuma ulaşıldığını gösteren bir belirti varsa işlemi sonlandırır [20]. Bu yöntemlerden bazıları eğrileri ve eğrilikleri tahmin etmeye ve hesaplamaya çalışırken, bazıları optimum noktanın yakınına ikinci dereceden yaklaşım fikrini benimserler.

Olasılıksal yöntemlerde, algoritma bir ilk tasarımlar kümesi kullanır. Doğal seçilim düzeneğine benzeyen bir yöntemle üreme işlemi benzerliğiyle yeni alt jenerasyonlar yaratılır. Algoritma aramayı durdurmaya kadar verdiğinde o aşamadaki rastgele bir

tasarımlar kümesi tanımlanır ve seçilen bu alt küme üzerinden yeni tasarımlar üretilir. İşlem gerekli ölçütü karşılayıncaya ya da belirlenen bir iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar devam eder. Genetik algoritmalar bu yöntemlerin en bilinenlerindendir. Genetik algoritmalar, ayrık, sürekli ve türevlenemeyen gibi tüm problem çeşitlerine uygulanabilir

Maliyet ve koşul fonksiyonlarının gradyanlarını kullanmak gerekmediğinden kullanılması ve programlanması kolay algoritmalardır. Algoritma üç işleyiş türünden oluşur:

1. Yeniden üretim
2. Atlama
3. Dönüşme

Yeniden üretim, populasyon olarak tanımlanabilecek ana kümeden bir tasarımlar kümesi seçme ve onları yeni jenerasyonlara taşıma aşaması olarak tanımlanır. Seçilim işlemi küme içindeki daha uygun durumdaki elemanlara yönelir. Küme içindeki tasarımların önemini ifade eden uygunluk değerleri bu seçilim olasılığını arttırır. Atlama evresi, yeni alt küme belirlendiğinde, değişkenleri yeni jenerasyona tanıtıcı rol üstlenir ve rehberlik görevini yapar. Mutasyon, yeniden üretim ve atlama aşamalarında gerçekleşebilecek değerli genetik materyalin vaktinden önce kayıplarına karşı koruyucu görev üstlenir [19].

5.2.2 Çok Amaçlı Genetik Algoritmalar

Genetik algoritmaların tek amaçlı optimizasyonlar için kullanımı, çok amaçlı optimizasyon problemlerine etkili çözümler sağlamak amacıyla genişletilebilir. Bu aşamada tek amaçlı genetik algoritmalar için tanımlanan kavram ve yöntemler gözden geçirilmeli ve çok amaçlı optimizasyona nasıl uygulanacağı sorgulanmalıdır [19].

Bazı çok amaçlı genetik algoritmalarda, tek amaçlı optimizasyonda kullanılan uygunluk fonksiyonları tanımlanmaz ve kullanılmaz. Bunun yerine bir sonraki iterasyona tasarımları seçmek için bazı seçme stratejileri doğrudan kullanılır. Bunlar

vektör hesaplamalı genetik algoritma, sıralama, Pareto uygunluk fonksiyonu, Pareto küme filtresi, seçkinlik stratejisi, yarışma seçimi ve hücre tekniği gibi yöntemlerdir.

5.3 Pala Yapısal Optimizasyonu

Pala yapısal optimizasyonu, Modefrontier 4.0 yazılımında yer alan çok amaçlı genetik algoritma eniyileyici olarak kullanılarak yapılmıştır. Modefrontier yazılımında veri ve mantık akışlarından yararlanarak iki akış şeması oluşturulur. Bu akış şemaları ortak işlemde kesişir ve mantık şeması ile gelen çözücü algoritma ile eniyilemenin gerçekleştirilmesi sağlanır. Bu çalışmada kesişim, analizin gerçekleştirildiği ABAQUS yazılımı ve Python programlama dili ortaklığıdır.

Optimizasyonda minimum değerine indirilmeye çalışılan iki amaç fonksiyonu bulunmaktadır:

- Pala kütlesi (M_{pala})
- Pala burulma şekil değişimi (θ_b)

Tasarım değişkenleri, pala kirişi, kök kesimi kirişi ve kabuk tabakalarının kalınlıkları ve doğrultu açılarıdır. Tablo 3.2 ve Tablo 3.4'te tabaka kalınlıklarının geometrik kısıtlamaya bağlı mümkün değerleri ile olası doğrultu açıları gösterilmişti. Optimizasyonu sınırlayan kısıtlamalar ve kullanıldığı optimizasyon aşamaları Tablo 5.1'de açıklanmıştır. İlk aşamada, rezonans aralığı dışındaki diğer kısıtlamalar kullanılarak statik şartlar altında en iyi tasarım elde edilmiştir. İkinci aşamada ise pala modal analizi de yapılarak, ilk aşamadaki kısıtlamalar ve rezonans aralığı kısıtlaması birlikte kullanılıp nihai tasarım elde edilmiştir. Her iki aşama da 4 ve 6 tabakalı kirişler ve kabuk yapı için uygulanmıştır. Rezonans etkisinin göz önüne alınmaması ve alınması arasındaki farkı görmek yanında tabaka sayısının artışının etkisi de incelenmiştir.

Tsai-Hill başarısızlık kriteri, kesit noktalarında saptanan maksimum gerilmeler ve malzeme dayanımlarıyla elde edilen eşitliktir. Modal analiz sonucu bulunan doğal frekanslar rezonans aralığı içinde yer almamalıdır.

4 ve 6 tabakalı yapılar ve yalnız statik kısıtlamalar ile statik ve rezonans kısıtlamalarının birlikte yer aldığı uygulamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, 4 ve 6 tabakalı yapılar için birinci aşama ve ikinci aşama şeklinde Bölüm 5.4 ve Bölüm 5.5'te açıklanmıştır.

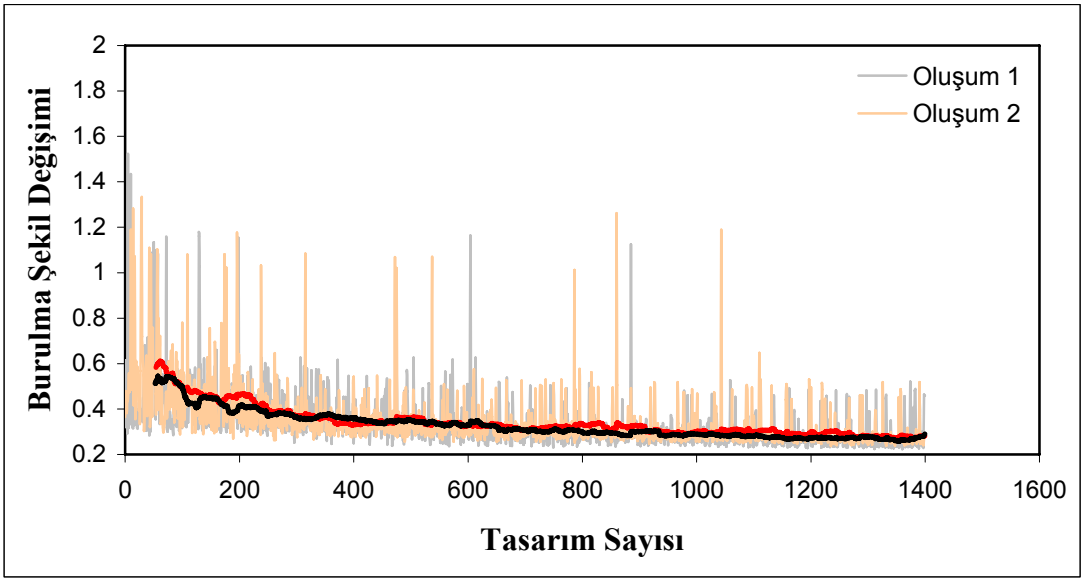
Tablo 5.1: Optimizasyon Kısıtlamaları

Aşama1 / Aşama 2	Otorotasyon Göstergesi (AI)	Eşitsizlik Kısıtlaması	AI ≥ 20 ft^3/lb (1.25 m^3/kg)
	Burulma Şekil Değişimi (θ_h)	Eşitsizlik Kısıtlaması	$0° \le \theta_h \le 3°$
	Tsai-Hill Kriteri $R = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2}}$	Eşitsizlik Kısıtlaması	1-R ≥ 0
	X	S Sınıfı Cam Fiber/Epoksi	$X=0.3\sigma_{çekme_day}$
	Y	$\sigma_{çekme_day}$= 1280 MPa τ_{kayma_day}= 69 MPa	$Y=0.3\tau_{kayma_day}$
	Doğal Frekanslar (ω) $\omega_1=\Omega=33.33$ rad/s (±%10 risk bölgesi) Rezonans $29.997 \le \omega \le 36.663$	Eşitsizlik Kısıtlaması	$0 \le \left\| \frac{\omega_i - \omega}{\omega} \right\| \le 0.1$

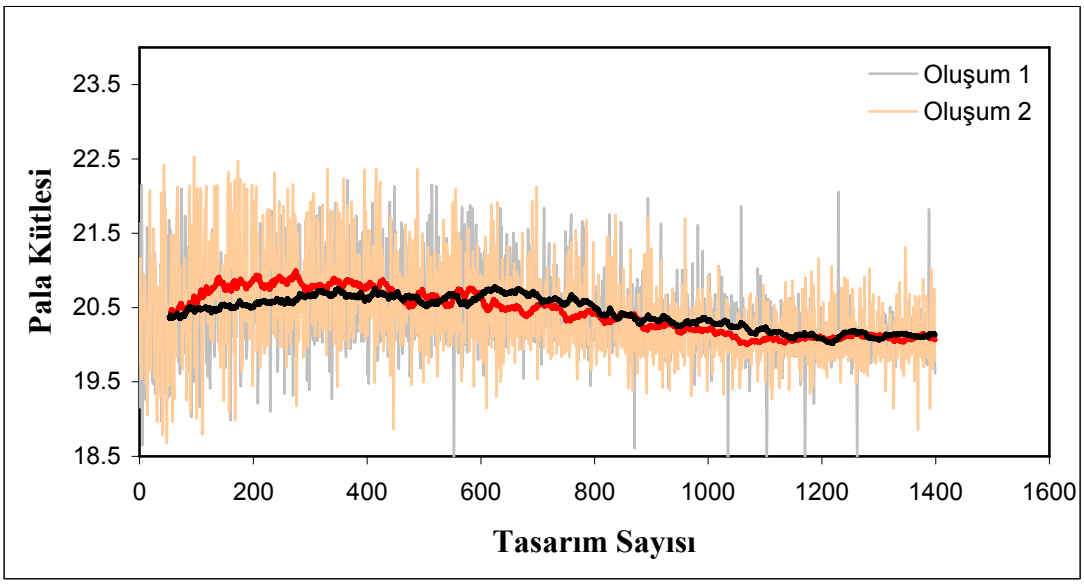
İlk tasarımlar kümesi için, olasılıksal yöntem kullanıldığı dikkate alınarak 2 farklı küme için hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Modefrontier yazılımına ait tasarım örnekleri algoritmalarından sobol tipi (oluşum 1) ve rastgele (oluşum 2) sıralamalar ilk tasarımlar kümesi olarak kullanılmıştır. İlk tasarım kümesi eleman sayısı 70 alınıp, 20 jenerasyon kullanılarak bir çalışma için 1400 tasarım yapılmıştır. Birinci ve ikinci aşamadaki 4 ile 6 tabakalı yapıların her biri için 2 oluşum uygulanarak 8 çalışma gerçekleştirilmiştir.

5.4 Aşama 1 ve Sayısal Sonuçlar

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de birinci aşama kısıtlamaları altında, 4 tabakalı kirişler ve kabuk yapı kullanılması durumunda amaç fonksiyonlarının optimizasyon sürecindeki gelişimi gösterilmiştir. Daha iyi gözlem için tasarımların hareketli ortalamalarını da kullanarak iki farklı ilk tasarım kümesi için de birbiriyle uyumlu yakınsamalar olduğunu söyleyebiliriz.

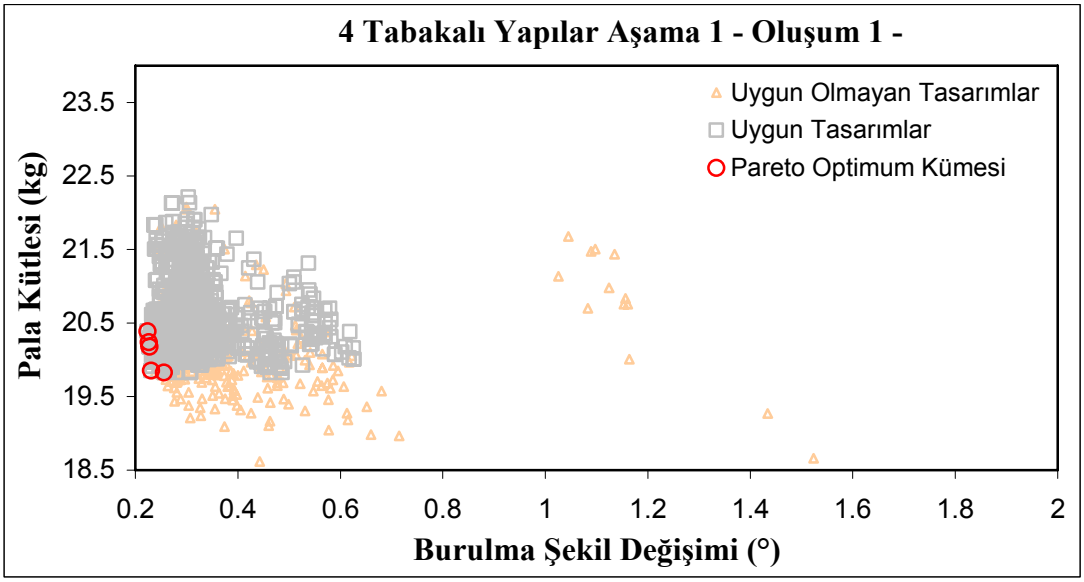


Şekil 5.1: Burulma Şekil Değişiminin 4 Tabakalı Yapılar ve Aşama 1 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması

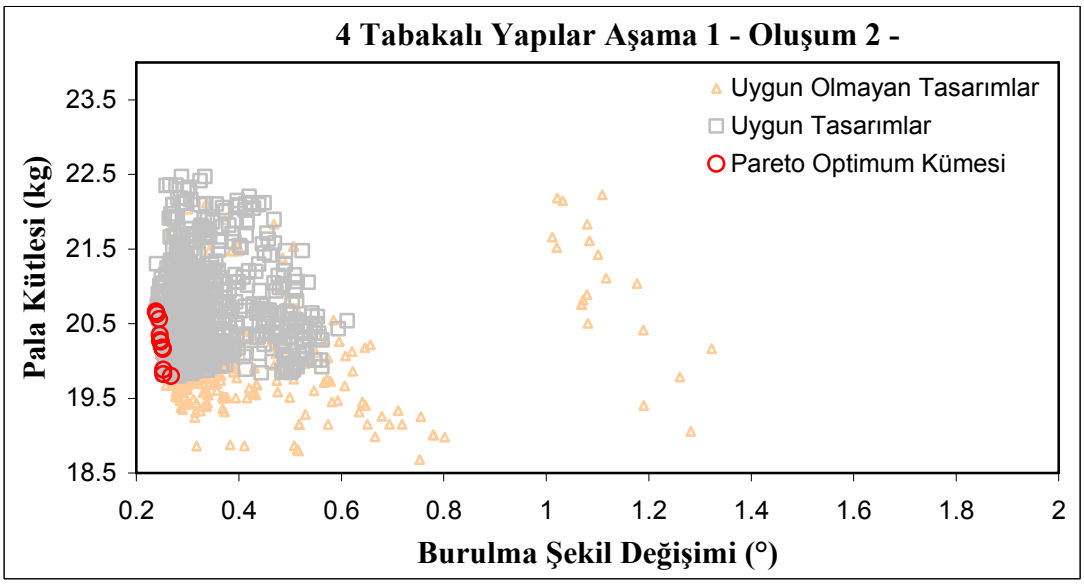


Şekil 5.2: Pala Kütlesinin 4 Tabakalı Yapılar ve Aşama 1 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 incelendiğinde, farklı iki oluşum için 4 tabakalı yapılar kullanılması durumunda birinci aşama kısıtlamaları altında elde edilen tasarım ortamları gösterilmektedir. Rezonans etkisinin dahil olmadığı bu aşamada, otorotasyon etkisi ve Tsai-Hill başarısızlık kriteriyle uygun tasarımların bulunduğu alan sınırlandırılmıştır. İkinci oluşum kullanılarak elde edilen Pareto optimum kümesi daha düşük değerlere sahip amaç fonksiyonlarına sahiptir.



Şekil 5.3: 4 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 1 ve Oluşum 1 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi



Şekil 5.4: 4 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 1 ve Oluşum 2 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi

Tablo 5.2'deki ikinci oluşuma ait Pareto optimum kümesindeki 1367. tasarım, minimum pala kütlesi değerine sahiptir.

Tablo 5.2: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesi

Tasarım Sayısı	Pala Kütlesi (kg)	Burulma Şekil Değişimi (°)
1241	20.351858	0.245930674
1301	20.277122	0.246297367
1307	20.56104	0.24422326
1332	20.66353	0.238436386
1339	19.884052	0.252261858
1349	19.824787	0.252279047
1362	20.160431	0.251981109
1364	20.631004	0.240338606
1367	19.797522	0.267496806
1374	20.178712	0.250909678
1385	20.260593	0.24747766

Tablo 5.3: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Pala Kirişi Özellikleri

Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
1241	0.36	1.44	[30/0/45/30]
1301	0.35	1.4	[45/0/60/15]
1307	0.36	1.44	[30/0/45/30]
1332	0.38	1.52	[15/30/45/15]
1339	0.39	1.56	[45/0/30/45]
1349	0.38	1.52	[30/0/60/15]
1362	0.32	1.28	[02/45/15]
1364	0.41	1.64	[45/15/60/15]
1367	0.34	1.36	[30/0/60/30]
1374	0.44	1.76	[45/0/30/45]
1385	0.38	1.52	[30/0/60/15]

Tablo 5.3, Tablo 5.4 ve Tablo 5.5, 4 tabakalı yapılar ile ikinci oluşuma ait Pareto optimum kümesinin tasarımlarının kiriş ve kabuk yapısı kalınlıklarını ve katman kodlarını göstermektedir.

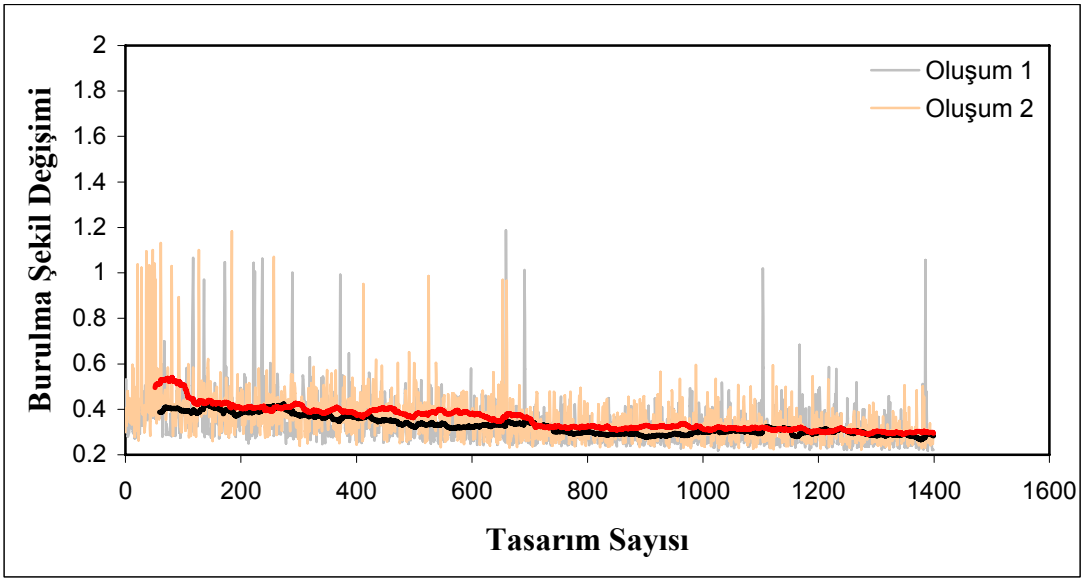
Tablo 5.4: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Kabuk Özellikleri

Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
1241	0.18	0.72	[604]
1301	0.18	0.72	[90/603]
1307	0.2	0.8	[75/603]
1332	0.2	0.8	[604]
1339	0.12	0.48	[60/90/75/60]
1349	0.12	0.48	[60/90/60/75]
1362	0.18	0.72	[604]
1364	0.18	0.72	[75/60]S
1367	0.14	0.56	[60/75]S
1374	0.12	0.48	[45/90/75/60]
1385	0.16	0.64	[604]

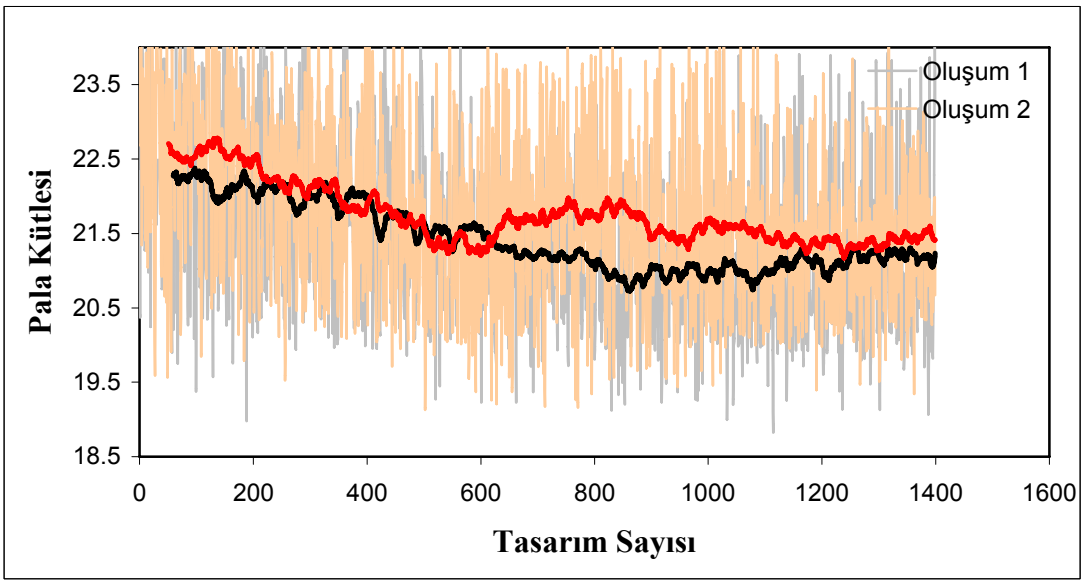
Tablo 5.5: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Kök Kirişi Özellikleri

Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
1241	0.16	0.64	[0$_2$/90$_2$]
1301	0.15	0.6	[0$_2$/90$_2$]
1307	0.16	0.64	[0$_2$/90$_2$]
1332	0.15	0.6	[0$_2$/90$_2$]
1339	0.15	0.6	[0$_2$/90$_2$]
1349	0.15	0.6	[0/90/75/90]
1362	0.19	0.76	[0/90$_3$]
1364	0.15	0.6	[0$_2$/90$_2$]
1367	0.15	0.6	[0/30/90$_2$]
1374	0.15	0.6	[0/60/75/90]
1385	0.16	0.64	[0/15/90$_2$]

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da, birinci aşama şartlarının benzer şekilde 6 tabakalı yapılara uygulanması durumunda elde edilen amaç fonksiyonlarının optimizasyon sürecindeki gelişimi gösterilmiştir. Hareketli ortalamaların da incelenmesiyle, her iki amaç fonksiyonunun iki oluşum için de yakınsadığı görülmüştür. Burulma şekil değişimi için farklı iki oluşum, optimizasyon boyunca birbirine çok benzer ilerleme ve yakınsama sağlamıştır.

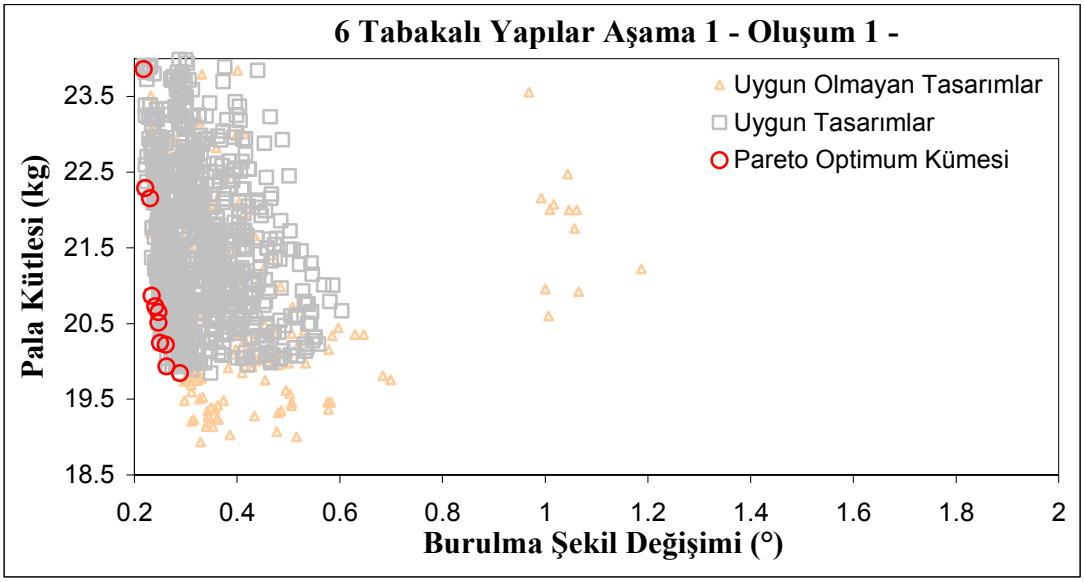


Şekil 5.5: Burulma Şekil Değişiminin 6 Tabakalı Yapılar ve Aşama 1 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması

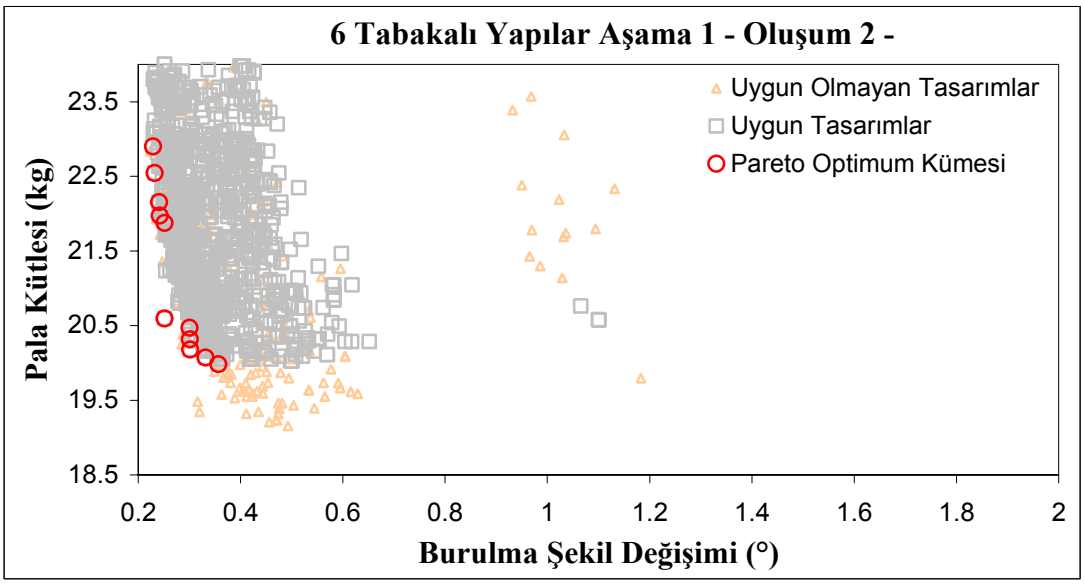


Şekil 5.6: Pala Kütlesinin 6 Tabakalı Yapılar ve Aşama 1 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de, 6 tabakalı yapılar için farklı oluşumlardaki tasarım ortamları gösterilmiştir. birinci oluşum için elde edilen Pareto optimum kümesi daha ayrıntılı olarak Tablo 5.6'da açıklanmıştır.



Şekil 5.7: 6 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 1 ve Oluşum 1 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi



Şekil 5.8: 6 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 1 ve Oluşum 2 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi

Tablo 5.6'daki Pareto optimum kümesinde, tabaka sayısının artmasından dolayı Tablo 5.2'den farklı olarak daha yüksek minimum pala kütlesi ile daha düşük minimum burulma şekil değişimi değerleri elde edilmiştir.

Tablo 5.6: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesi

Tasarım Sayısı	Pala Kütlesi (kg)	Burulma Şekil Değişimi (°)
1121	20.246436	0.249826787
1328	20.512428	0.246790111
1337	20.725204	0.240458927
1349	20.863679	0.233675107
1369	22.151911	0.230604053
1388	20.648974	0.246767193
1389	23.861206	0.218251083
1393	19.93148	0.262179757
1394	20.22135	0.260953628
1395	19.842056	0.288570194
1397	22.287143	0.221488295

Tablo 5.7, Tablo 5.8 ve Tablo 5.9, 6 tabakalı yapılar ile birinci oluşuma ait Pareto optimum kümesinin tasarımlarının kiriş ve kabuk yapısı kalınlıklarını ve katman kodlarını göstermektedir.

Tablo 5.7: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Pala Kirişi Özellikleri

Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
1121	0.23	1.38	[30/60/30/15/0$_2$]
1328	0.26	1.56	[75/90/30/0$_3$]
1337	0.32	1.92	[60/0/15/30/0/15]
1349	0.3	1.8	[0/0/45/30/60/45]
1369	0.3	1.8	[75/0/45/0$_3$]
1388	0.24	1.44	[45/75/60/15/0$_2$]
1389	0.36	2.16	[0$_2$/45$_3$/0]
1393	0.23	1.38	[0/30/15/30/0/15]
1394	0.26	1.56	[60/0/30$_2$/75/30]
1395	0.22	1.32	[75/90/15/30/0/30]
1397	0.28	1.68	[45/0/45/15/0$_2$]

Tablo 5.8: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Kabuk Özellikleri

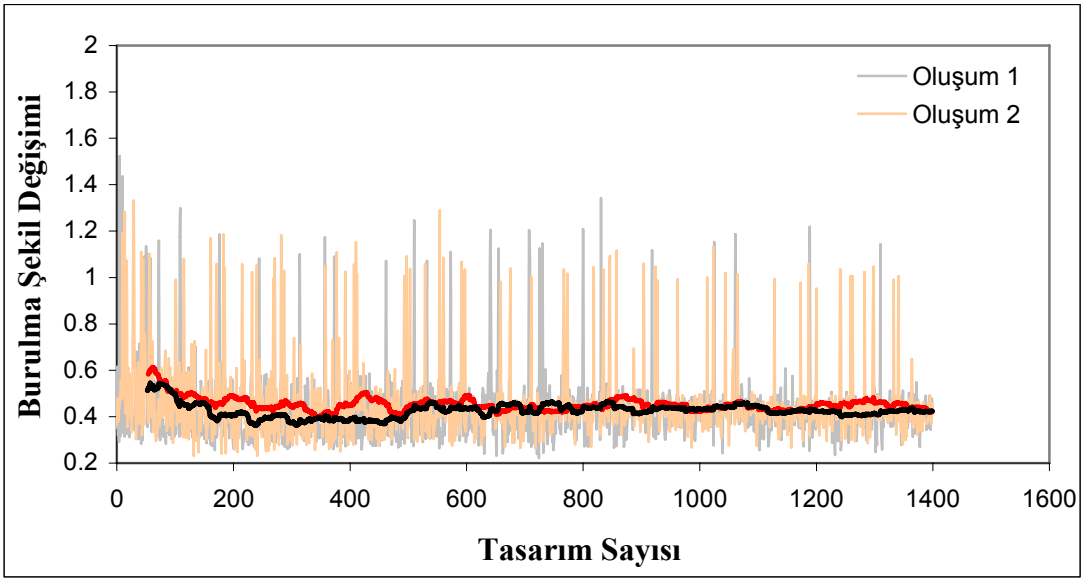
Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
1121	0.12	0.72	[60/45/60$_3$/90]
1328	0.12	0.72	[60/45$_2$/75$_3$]
1337	0.1	0.6	[45$_3$/75$_3$]
1349	0.12	0.72	[60$_5$/75]
1369	0.2	1.2	[75/60/90/60/75/45]
1388	0.14	0.84	[60/45/60$_2$/75$_2$]
1389	0.28	1.68	[60$_2$/75/60$_2$/75]
1393	0.1	0.6	[60/45$_2$/75$_2$/60]
1394	0.1	0.6	[75/60$_3$/75$_2$]
1395	0.1	0.6	[60/45$_2$/75$_2$/60]
1397	0.22	1.32	[60$_2$/75/60/75/60]

Tablo 5.9: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Kök Kirişi Özellikleri

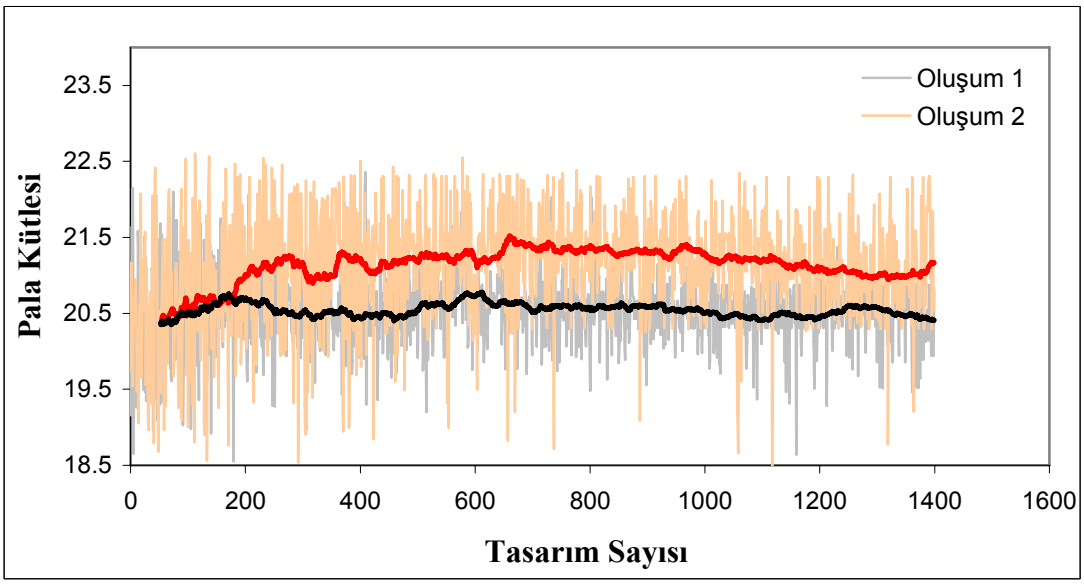
Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
1121	0.1	0.6	[02/15/90/752]
1328	0.1	0.6	[02/15/90/752]
1337	0.1	0.6	[02/60/752/60]
1349	0.1	0.6	[02/45/30/60/90]
1369	0.12	0.72	[02/15/45/902]
1388	0.1	0.6	[02/30/90/752]
1389	0.11	0.66	[02/60/902/60]
1393	0.1	0.6	[02/60/752/60]
1394	0.11	0.66	[02/30/75/60/90]
1395	0.1	0.6	[02/45/60/75/60]
1397	0.12	0.72	[03/903]

5.5 Aşama 2 ve Sayısal Sonuçlar

Rezonans aralığının kısıtlayıcılar arasına eklenmesi sonucu birinci aşama çalışmalarına göre çok daha az sayıda uygun tasarım elde edilmiştir. İkinci aşamayı içeren optimizasyon süreçlerinin ilk safhalarında uygun olmayan tasarımlar oluşmaktadır. Algoritma bu şekilde bir uygun olmayan tasarım ortamı oluşturduktan sonra amaç fonksiyonlarının minimize edilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10, amaç fonksiyonlarının optimizasyon sürecindeki gelişimini 4 tabakalı yapılar için iki farklı oluşumu karşılaştırarak göstermiştir.

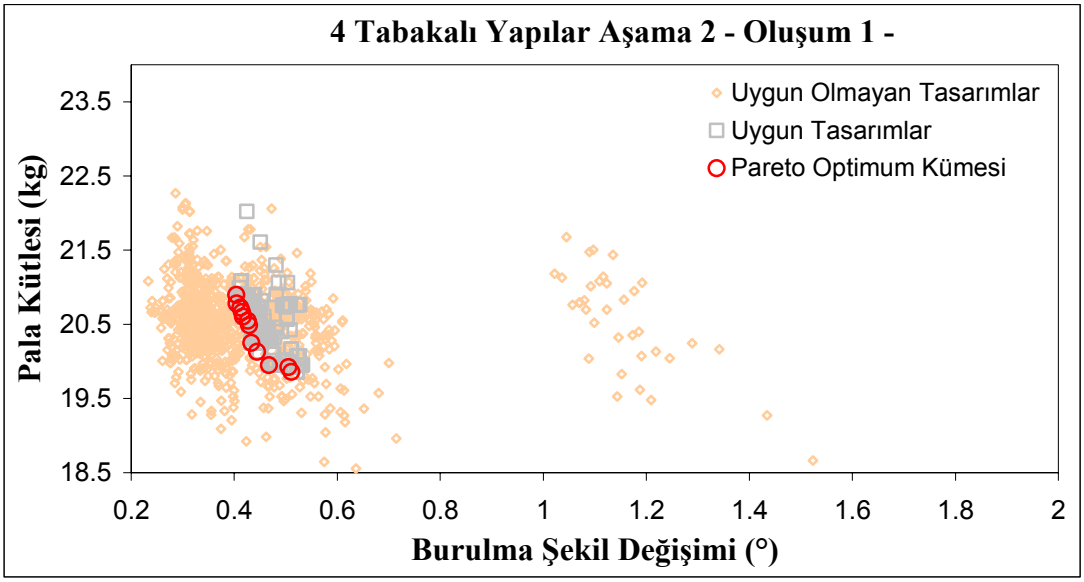


Şekil 5.9: Burulma Şekil Değişiminin 4 Tabakalı Yapılar ve Aşama 2 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması

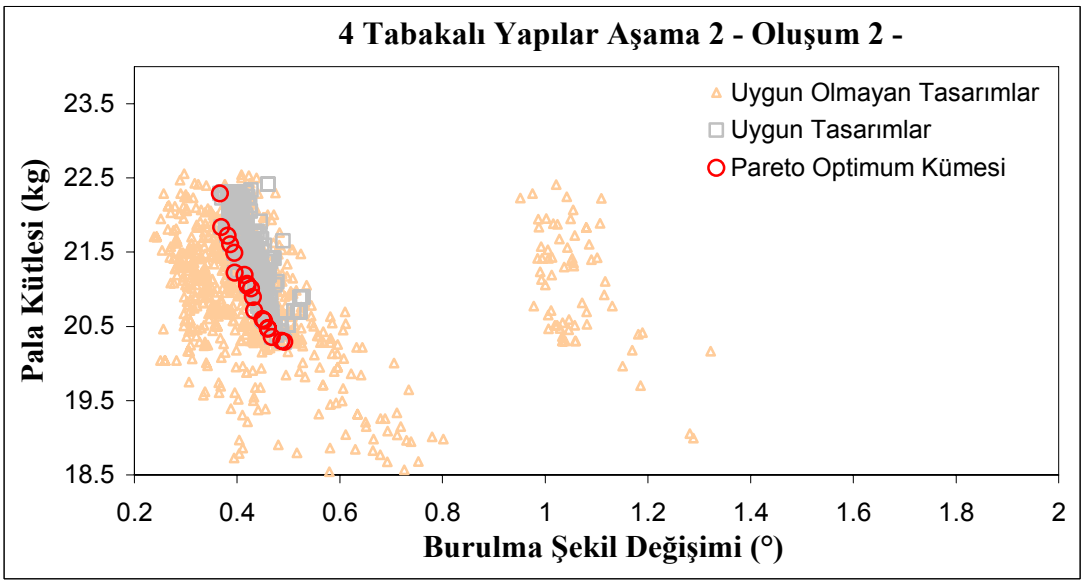


Şekil 5.10: Pala Kütlesinin 4 Tabakalı Yapılar ve Aşama 2 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de farklı oluşumlar kullanılarak yapılan optimizasyonlar sonucu oluşan 4 tabakalı yapılar için tasarım ortamları gösterilmiştir. Birinci aşama uygulamalarına göre uygun tasarımlar daha sınırlı ve belirli bölge aralığında toplanmıştır.



Şekil 5.11: 4 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 2 ve Oluşum 1 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi



Şekil 5.12: 4 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 2 ve Oluşum 2 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi

Tablo 5.10, ikinci aşama uygulamalarından biri olan 4 tabakalı yapılar ve birinci oluşum için ayrıntılı Pareto optimum kümesini gösterir. Birinci aşama uygulaması ile karşılaştırdığımızda pala kütlesinde fazla bir değişimin gözlenmediği, burulma şekil değişiminde ise artış olduğu görülmüştür. Birinci aşamada çok verimli olamayan tabaka doğrultularının rezonans kısıtlamasını içeren ikinci aşama için belirleyici olduğunu söyleyebiliriz.

Tablo 5.10: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesi

Tasarım Sayısı	Pala Kütlesi (kg)	Burulma Şekil Değişimi (°)
1124	20.545569	0.426784802
1197	20.66353	0.41514803
1238	20.722357	0.412071246
1252	19.921147	0.505726927
1275	20.486436	0.428841721
1296	20.898136	0.404233184
1306	20.604615	0.416884092
1325	20.248805	0.433190471
1327	19.859646	0.511003869
1381	20.12931	0.444437632
1395	20.781052	0.404468096
1397	19.949279	0.467470535

Tablo 5.11, Tablo 5.12 ve Tablo 5.13, ikinci aşama için 4 tabakalı yapılar ile birinci oluşuma ait Pareto optimum kümesinin tasarımlarının kiriş ve kabuk yapısı kalınlıklarını ve katman kodlarını göstermektedir.

Tablo 5.11: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Pala Kirişi Özellikleri

Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
1124	0.36	1.44	[15/0/15$_2$]
1197	0.38	1.52	[15/0$_2$/30]
1238	0.39	1.56	[15/0/30/0]
1252	0.24	0.96	[15/45/60/0]
1275	0.35	1.4	[0$_3$/60]
1296	0.42	1.68	[30/0/45/0]
1306	0.37	1.48	[0$_3$/60]
1325	0.31	1.24	[15/0$_3$]
1327	0.24	0.96	[15/45/0/75]
1381	0.29	1.16	[0$_3$/60]
1395	0.4	1.6	[0$_3$/30]
1397	0.26	1.04	[15$_3$/60]

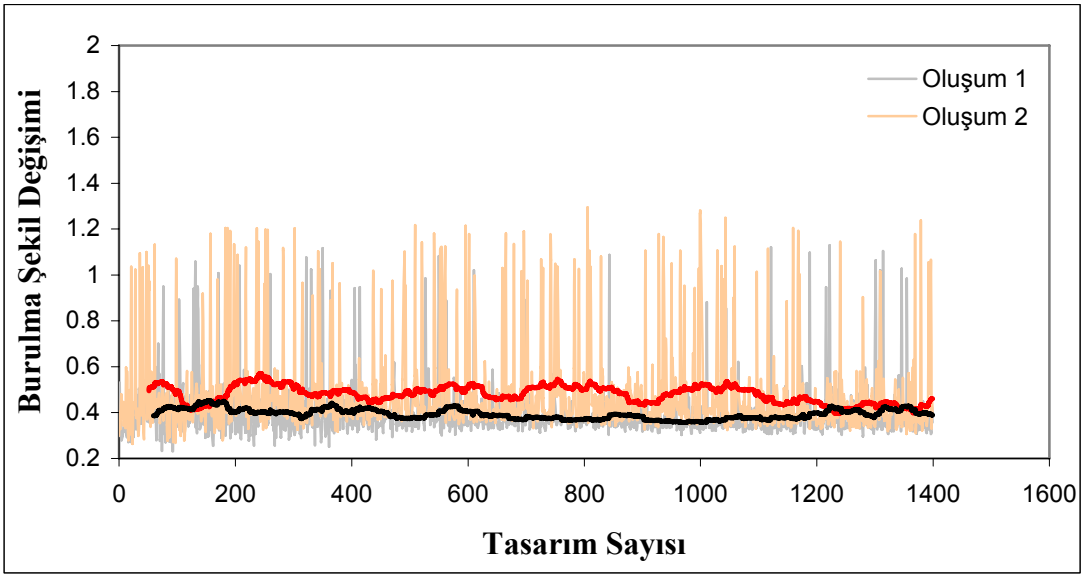
Tablo 5.12: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Kabuk Özellikleri

Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
1124	0.2	0.8	[0/60/45/75]
1197	0.2	0.8	[45/75/0/60]
1238	0.2	0.8	[45/75/0/60]
1252	0.2	0.8	[60/45/15/0]
1275	0.2	0.8	[0/60/45/90]
1296	0.2	0.8	[45/75/0/45]
1306	0.2	0.8	[45/75/0/60]
1325	0.2	0.8	[45/75/0/60]
1327	0.2	0.8	[30/75/30/0]
1381	0.2	0.8	[0/60/45/75]
1395	0.2	0.8	[45/75/0/60]
1397	0.2	0.8	[45/75/0/60]

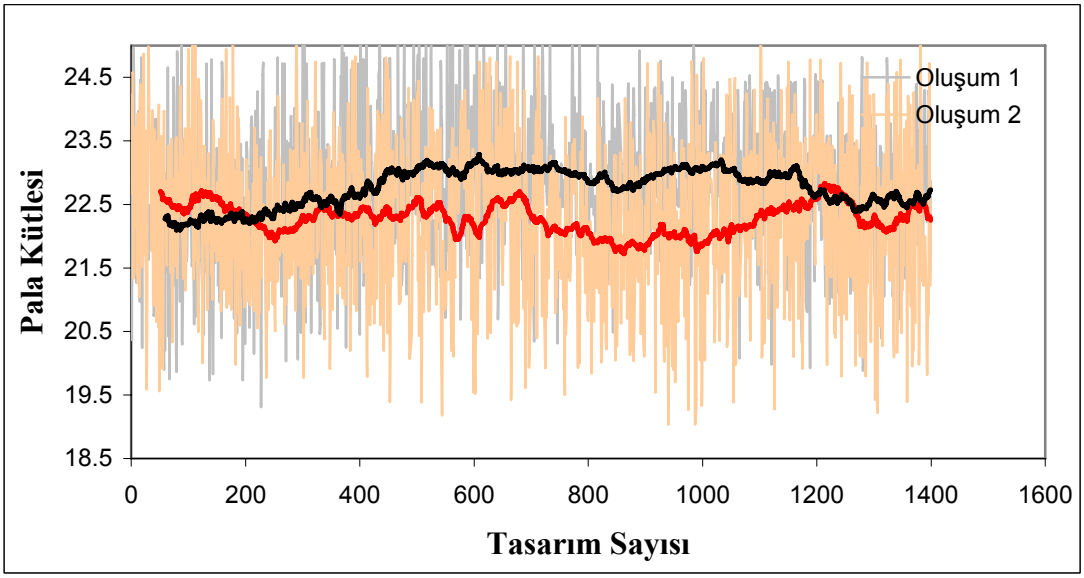
Tablo 5.13: 4 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 1 için Pareto Optimum Kümesinde Kök Kirişi Özellikleri

Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
1124	0.15	0.6	[03/30]
1197	0.15	0.6	[03/30]
1238	0.15	0.6	[03/30]
1252	0.21	0.84	[0/15/90/75]
1275	0.15	0.6	[03/30]
1296	0.15	0.6	[03/30]
1306	0.15	0.6	[03/30]
1325	0.15	0.6	[03/30]
1327	0.17	0.68	[0/90/45/30]
1381	0.15	0.6	[03/30]
1395	0.15	0.6	[03/30]
1397	0.15	0.6	[03/30]

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te amaç fonksiyonlarının optimizasyon sürecindeki gelişimi 6 tabakalı yapılar ve farklı oluşumlar için gösterilmiştir.

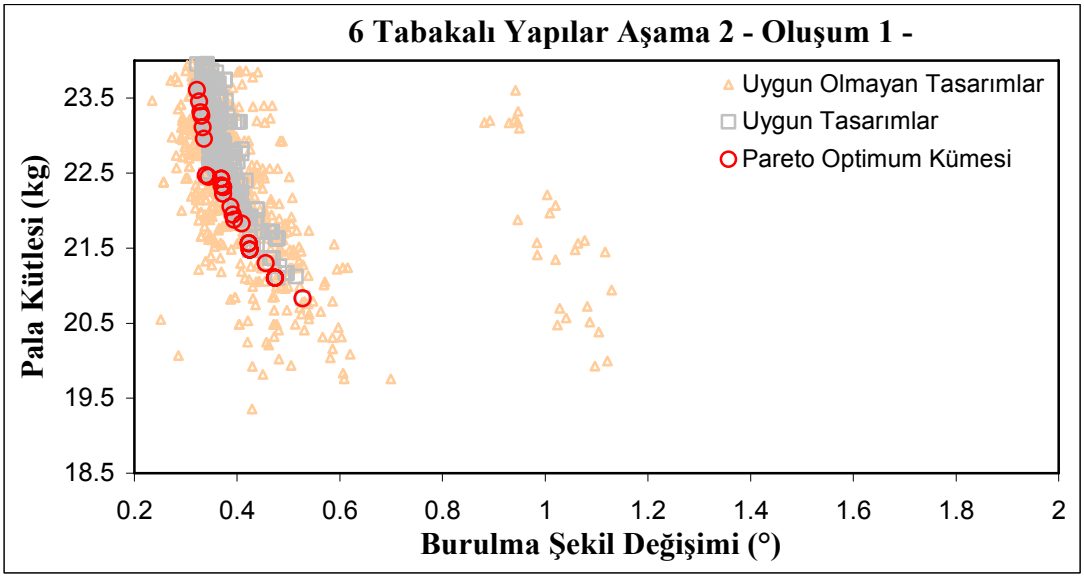


Şekil 5.13: Burulma Şekil Değişiminin 6 Tabakalı Yapılar ve Aşama 2 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması

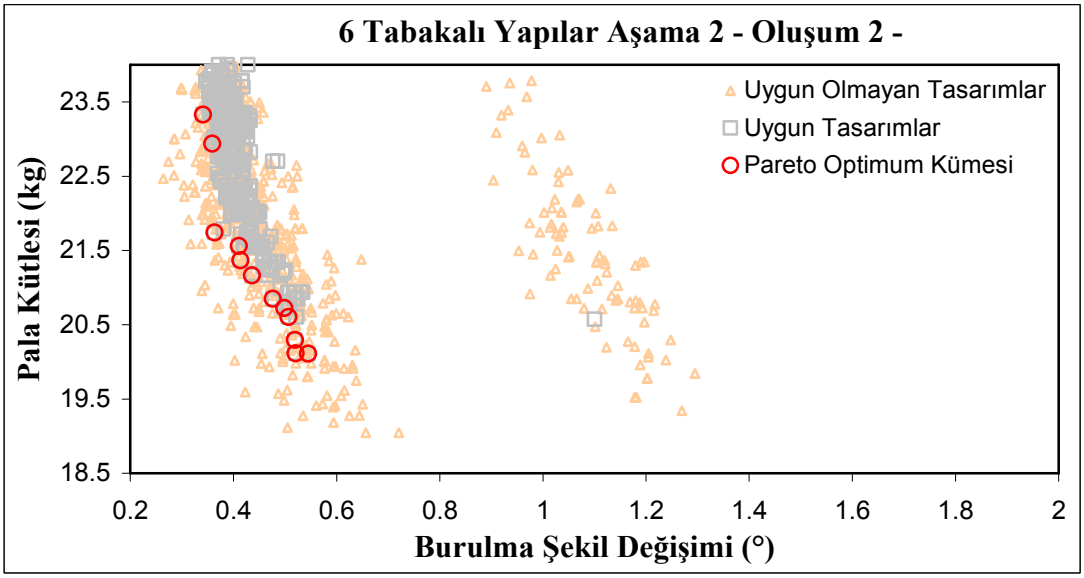


Şekil 5.14: Pala Kütlesinin 6 Tabakalı Yapılar ve Aşama 2 için Farklı Oluşumlar Kullanılarak Karşılaştırılması

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da, 6 tabakalı yapılar için farklı oluşumlardaki tasarım ortamları gösterilmiştir. İkinci oluşum için elde edilen Pareto optimum kümesi daha ayrıntılı olarak Tablo 5.14'te açıklanmıştır.



Şekil 5.15: 6 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 2 ve Oluşum 1 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi



Şekil 5.16: 6 Tabakalı Yapılar Kullanılarak Aşama 2 ve Oluşum 2 Şartlarında Tasarımların Dağılım Çizelgesinde Görüntülenmesi

Tablo 5.14: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesi

Tasarım Sayısı	Pala Kütlesi (kg)	Burulma Şekil Değişimi (°)
487	20.109582	0.544699517
727	20.725204	0.498776949
757	20.849007	0.47677537
845	21.165651	0.436272984
850	20.292554	0.519380512
898	20.113969	0.52089312
1134	23.328336	0.340915618
1262	24.16596	0.338973291
1311	20.604419	0.506987435
1322	24.210116	0.319126033
1352	21.561427	0.410890953
1359	21.740722	0.363490155
1375	22.935999	0.358826278
1383	21.367773	0.413910441

Tablo 5.15, Tablo 5.16 ve Tablo 5.17, 6 tabakalı yapılar ile ikinci oluşuma ait Pareto optimum kümesinin tasarımlarının kiriş ve kabuk yapısı kalınlıklarını ve katman kodlarını göstermektedir.

Tablo 5.15: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Pala Kirişi Özellikleri

Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
487	0.25	1.5	[90/60/45$_2$/75/45]
727	0.32	1.92	[60/0/90/15/0/30]
757	0.1	0.6	[75/30/60$_2$/30/45]
845	0.14	0.84	[90/45/75/30/15/45]
850	0.23	1.38	[75/60/90/60/30/75]
898	0.21	1.26	[75/60/30/60/0/75]
1134	0.23	1.38	[0/60/0/30/60$_2$]
1262	0.32	1.92	[75/0/90/15/0/30]
1311	0.26	1.56	[60/0/90/30/0/30]
1322	0.32	1.92	[75/0/45/15/0/30]
1352	0.1	0.6	[90/0/90/15/0/30]
1359	0.14	0.84	[90/60/75/0$_2$/30]
1375	0.18	1.08	[75/90$_2$/45/0/30]
1383	0.16	0.96	[0$_2$/45/0/75/0]

Tablo 5.16: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Kabuk Özellikleri

Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
487	0.1	0.6	[90/30/0/90/0/75]
727	0.1	0.6	[60/45/0/60/0/15]
757	0.22	1.32	[0/75/30/15/60/15]
845	0.22	1.32	[15/60/75/45/60/0]
850	0.12	0.72	[60/45/0/60/0/60]
898	0.12	0.72	[60/45/0$_2$/60/30]
1134	0.3	1.8	[45/0/15/30/45/30]
1262	0.3	1.8	[60/0$_2$/30/60/0]
1311	0.12	0.72	[60/45/0/45/0/15]
1322	0.3	1.8	[45/0/30$_2$/60/30]
1352	0.26	1.56	[45/0/45/15/45/30]
1359	0.26	1.56	[30/45/60/90/60/0]
1375	0.3	1.8	[60/30/0/15/60/30]
1383	0.22	1.32	[15/60/45$_2$/30/0]

Tablo 5.17: 6 Tabakalı Yapılar ve Oluşum 2 için Pareto Optimum Kümesinde Kök Kirişi Özellikleri

Tasarım Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Kodu
487	0.1	0.6	[60/75/0/60/90/15]
727	0.1	0.6	[0/75/15/60/90/45]
757	0.19	1.14	[30/45/75$_2$/15/0]
845	0.17	1.02	[15$_2$/30/45/15/30]
850	0.12	0.72	[0/60/15/60/75/30]
898	0.12	0.72	[0/60/15/60/75/30]
1134	0.23	1.38	[0/75/15/0$_2$/90]
1262	0.26	1.56	[0/30/0$_3$/90]
1311	0.14	0.84	[0/75/15/75/90/45]
1322	0.28	1.68	[0$_2$/15/0$_2$/75]
1352	0.23	1.38	[0/75/30/15/0/60]
1359	0.15	0.9	[0$_2$/30/60/15$_2$]
1375	0.25	1.5	[0/30/0$_3$/90]
1383	0.18	1.08	[15$_2$/30/45/15$_2$]

Birinci aşama için yapılan uygulamalarda algoritma performansı yeterli düzeyde yakınsama gerçekleştirirken, ikinci aşama uygulamalarında yakınsama daha düşük düzeyde kalmıştır. Generasyon sayısı arttırılarak daha çok tasarımın incelenebileceği optimizasyon çalışmaları, rezonans etkisinin de dahil olduğu ikinci aşama uygulamaları için daha yüksek yakınsama oranları sağlayabilir. İkinci aşamaya ait farklı oluşumlardaki uygulamaların birinci aşamadaki gibi birbirine daha benzer yakınsama gelişimlerine sahip olmasına yol açabilir.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Optimizasyon algoritmasını, bilgisayar destekli mühendislik yazılımıyla kullanarak tasarım optimizasyonu döngüsünü pala tasarımına uyguladık. Bu çalışmada, var olan bir palanın iyileştirilmesi yerine başlangıçtan özgün bir pala tasarımı düşünüldüğünden deterministik yöntemler yerine genetik algoritma eniyileyici olarak kullanılması daha yararlı olmuştur. Amaç fonksiyonlarında, bir önceki palanın değerlerine göre iyileştirme elde etme yerine, olası onbinlerce tasarım içinden en iyi tasarım seçilmiştir. Çalışma, rezonans sınırlarının tasarıma etkisini görebilmek açısından iki aşamalı uygulanmıştır. Rezonans etkisinin kısıtlama olarak dahil edilmediği ilk aşamada Tsai-Hill başarısızlık kuramı ve otorotasyon etkisi ile uygun ve uygun olmayan tasarımlardan oluşan tasarım ortamları oluşturulmuştur. Rezonans etkisinin dahil olması, olasılıksal yöntem için geçerli daha başarılı optimizasyon süreçleri ve tasarım ortamları oluşturmuştur. Bu süreç, ilk generasyonlarda sürekli uygun olmayan tasarım ortamlarının oluşması ile uygun tasarımların bulunabileceği alanların belirlenmesi ve daha sonraki generasyonlarda amaç fonksiyonlarının minimize edilmesi üzerine yoğunlaşması şeklinde özetlenebilir.

İkinci aşama çalışmalarında birinci aşamaya göre yeterli yakınsama sağlanamamıştır. Bunun nedeni, kısıtlamalar yönünden daha karmaşık yapıya sahip ikinci aşama için generasyon sayısının yeterli olmamasıdır. Generasyon sayısının arttırılması, yakınsama oranını arttırırken çözüm süresini de belirgin miktarda arttırmaktadır. İlk tasarımlar kümesi eleman sayısının arttırılması da yakınsamanın arttırılmasına katkıda bulunabilir.

Her aşama için kompozit yapılarda kullanılan tabaka sayısının 4 ve 6 şeklinde iki farklı uygulaması, tabaka sayısının artışının ve doğrultu açılarının etkisini göstermiştir. 6 tabakalı yapıların optimizasyon uygulamalarında değişken sayısının artmasından dolayı ilk tasarımlar kümesi eleman sayısı artışını gerektirmektedir.

Gelecek uygulamalar için değişken sayısını azaltabilecek girişimlerde bulunulması çözüm doğruluk oranına katkıda bulunacaktır. Kompozit yapılarda simetrik tabakalar düşünülmesi ve doğrultu açılarını daha yerel hale getirme yapılabilecek düzenlemelerdendir. Bunun yanında kabuk tabakalarının değişkenlerinin sabit yapılması, pala ve kök kirişi tabakalarının etkisinin ve değişiminin incelenmesini kolaylaştırır. Olasılıksal ve deterministik yöntemlerin pala tasarım optimizasyonu üzerinden karşılaştırılması da yapılabilecek diğer bir çalışmadır.

7. KAYNAKLAR

[1] **Şahin, K.,** 1999. Uçaklar ve Helikopterler, İnkılap, İstanbul.

[2] Internet Belgesi: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/helicopter.html

[3] **Koçyiğit, H.,** 2005. Elastik Mafsallı Bir Helikopter Palasının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapısal Analizleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[4] **Celi, R.,** 1999. Recent Applications of Design Optimization to Rotorcraft-A Survey, *Journal of Aircraft*, **36**, 176-189.

[5] **Lee, Y. J., Lin C. C. ve Jin, J.C.,** 2005. Optimization of a Composite Rotor Blade using a Genetic Algorithm with Local Search, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **24**, 1759-1769.

[6] **Lemanski, S. L., Weaver, P. M., Hill ve G. F. J.,** 2005. Design of Composite Helicopter Rotor Blades to Meet Given Cross Sectional Properties, *The Aeronautical Journal*, **109**, 471-475.

[7] **Kim, J. E. ve Sarigul Klijn, N.,** 2001. Elastic Dynamic Rotor Blade Design with Multiobjective Optimization, *AIAA Journal*, **39**, 1652-1661.

[8] **Nixon, M. W.,** 1987. Preliminary Structural Design of Composite Main Rotor Blades for Minimum Weight, Teknik Rapor, NASA-TP 2730, AVSCOM-TM 87-B-6.

[9] **Friedmann, P.,** 1985. Application of Modern Structural Optimization to Vibration Reduction in Rotorcraft, *Vertica*, **9**, 363-376.

[10] **Chattopadhyay, A. ve Walsh, J. L.,** 1989. Minimum Weight Design of Helicopter Rotor Blades with Frequency Constraints, *Journal of the American Helicopter Society*, **34**, 77-82.

[11] **Ganguli, R. ve Chopra, I.,** 1996. Aeroelastic Optimization of a Helicopter Rotor with Two Cell Composite Blades, *AIAA Journal*, **34**, 835-841.

[12] **Leishman, J. G.,** 2006. Principles of Helicopter Aerodynamics, Cambridge University Press, New York.

[13] 1974. Engineering Design Handbook Helicopter Engineering Part One Preliminary Design, United States Army Material Command, Alexandria.

[14] **Jones, R. M.,** 1999. Mechanics of Composite Materials, Taylor&Francis Inc., Ann Arbor.

[15] **Gibson, R. F.,** 2007. Principles of Composite Material Mechanics, CRC Press, New York.

[16] **Kollar, L. P., Springer, G. S.,** 2003. Mechanics of Composite Structures, Cambridge University Press, New York.

[17] **ABAQUS 6.7** Yardım Dosyaları

[18] **Ihlamur, M. E.,** 2008. Leipholz Problemi İçin Farklı Kiriş Modellerinin Analizi ve Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[19] **Arora, J. S.,** 2004. Introduction to Optimum Design, Elsevier Academic Press, San Diego.

[20] **Modefrontier 4.0** Yardım Dosyaları

ÖZGEÇMİŞ

Sedat Süsler, 1982 yılında İzmir'de doğdu. 2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2005 yılında lisans eğitimini tamamlayarak İstanbul Teknik Üniversitesi Disiplinler Arası Uçak ve Uzay Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başladı. Aynı zamanda İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır