

Jenerik Katı Bir Füze Kanat Geometrisinin Doğal Frekans Değerlerinin Çok Amaçlı Geometrik Optimizasyonu

Ceyhun TOLA^{1*}, Ukte AKSEN^{1,2}

¹Aselsan A.Ş, Mikroelektronik Güdüm ve Elektro-Optik Sektör Başkanlığı, Ankara.

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Doktora Programı, İstanbul

Sorumlu yazar e-posta: ctola@aselsan.com.tr* ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9056-0543>

uaksen@aselsan.com.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6202-9816>

Geliş Tarihi: 25.11.2022

Kabul Tarihi: 18.09.2023

Öz

Havadan karaya füze sistemlerini uzak mesafeden hedefe göndermek, taarruz eden hava platformunun düşman unsurlarına mümkün olduğunca daha uzak kalmasını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, hâlihazırda kullanımda olan kanatsız mühimmatlar için kanat kitlerinin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Geliştirilen kanat kitleri, aerodinamik performans bakımından tatmin edici sonuçlar sunmalı, uçuş sırasında karşılaşılabilecek en kritik yüklerle dayanmalı ve kanadın en düşük doğal frekans değeri kuyruk kontrolcüsünün manevra ve denge sağlama amacıyla uyguladığı müdahale frekansından daha yüksek olmalıdır. Çalışma kapsamında, içi dolu metalik bir jenerik füze kanadının çok amaçlı geometrik optimizasyonu parçacık sürü optimizasyonu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri, Abaqus yazılımında parametrik model oluşturmak ve çözüm gerçekleştirmek amacıyla hazırlanan Python kodu yardımıyla gerçekleştirilmiş; optimizasyon akışı ve çözümleri ise ModeFrontier yazılımında yürütülmüştür. Kanat açıklığı boyunca kanadın kök, ara ve uç kesitinde kullanılan kanat profilleri, kanat profil değişiminin gerçekleştiği ara kesitin köke olan mesafesi, uç ve ara kesitteki veter uzunlukları, kökten ara kesite ve ara kesitten kanat ucuna olan ok açıları optimizasyon değişkenleri olarak belirlenmiştir. Optimizasyon kapsamında, kanat alanının ve doğal titreşim analizleri sonucunda elde edilen birinci moda ait doğal frekans değerinin maksimize edilmesi, kanat kütesinin ise minimize edilmesi hedeflenmiştir. Kanadın yeterli taşıma kuvvetini oluşturabilmesi için gerekli minimum kanat alanı kısıt olarak tanımlanmıştır. Ayrıca kökten uca doğru kanat profillerinin sabit kalması ya da doğrusal olarak incilmesi ve sivrilmesini sağlayacak kısıtlar tanımlanmıştır. Optimizasyon sonucunda 1897 adet uygulanabilir, 1107 adet kısıtları ihlal eden ve dolayısıyla uygulanamayan çözüm elde edilmiştir. Son olarak, girdi parametrelerinin kanadın birinci titreşim modunun doğal frekans değeri üzerindeki etkileri hassasiyet analizi sonucunda belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler

Çok Amaçlı Kanat Optimizasyonu;
Parçacık Sürü Optimizasyonu;
Modal Analiz;
Sonlu Elemanlar Yöntemi

Multi-Objective Geometric Optimization of a Generic Solid Missile Wing Based on Modal Analysis

Abstract

Launching air to surface missiles from an air platform to a target as far distance as possible is critical to keeping the air platform as far away from the enemies as possible. In this context, the development of wing kits for wingless munitions which are currently in use has gained importance. The developed wing kits should provide satisfactory results in terms of aerodynamic performance, should withstand the most critical flight loads, and the lowest natural frequency value of the wing should be higher than the excitation frequency applied by the controller for maneuvering and providing the stability. Within the content of this work, multi-objective geometric optimization of a generic metallic solid missile wing is performed using Particle Swarm Optimization Method. Finite element analyzes are carried out in Abaqus software with the assistance of a Python script prepared to parametrize and to solve the models. Optimization workflow is prepared and solved in ModeFrontier software. The airfoil profiles used in the root, the intermediate and the tip sections of the wing along the wing span, the distance in the spanwise direction between the root and the intermediate section, chord lengths of the root, the intermediate and the tip sections, the sweep angles from the root to the intermediate section and from

Keywords

Multi-Objective Wing Optimization;
Particle Swarm Optimization;
Modal Analysis;
Finite Element Method

the intermediate section to the wing tip are determined as optimization variables. Within the scope of the optimization process, it is aimed to maximize the natural frequency value of the first mode obtained as a result of the modal analysis, to maximize the wing area, and to minimize the wing mass. The minimum wing area needed to generate a sufficient amount of lift is defined as an optimization constraint. Furthermore, additional optimization constraints which provide either the airfoil profiles taper and get thinner or remain constant through the spanwise direction are defined. As a result of the optimization process, 1897 feasible and 1107 unfeasible designs which violate optimization constraints are obtained. Finally, the effects of the input parameters on the natural frequency value of the first vibration mode of the wing are obtained as a result of sensitivity analysis.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Günümüzde, gelişmiş hava savunma sistemleri, hava operasyonu gerçekleştiren insanlı ya da insansız hava araçlarının uçuş yapabileceği hava sahasını oldukça sınırlandırmaktadır. Hava operasyonu sırasında taarruz eden hava araçlarının havadan karaya göndermiş oldukları güdümsüz bombaları düşman unsurlarına mümkün olduğunca uzak mesafeden ve güdümlü olarak sevk etmelerini sağlamak amacıyla kanatsız mühimmatlar için düşük maliyetli kanat ve güdüm kitlerinin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Şekil 1'de sunulan JDAM (Müşterek Doğrudan Taarruz Mühimmatı, İng. Joint Direct Attack Munition), bahsedilen türde kanatlı güdüm kitine sahip mühimmatlara örnektir (<https://newaltas.com>). Üretim ve montaj maliyetlerini düşürerek kanadın yapısal dayanımını arttırmak amacıyla genellikle bu tür kanat kitlerinde kullanılan metalik kanat geometrilerinin içi doludur.



Şekil 1. JDAM mühimmatı (<https://newaltas.com>)

Tasarlanan kanatların aerodinamik açıdan hedeflenen performansı sağlaması ve yapısal açıdan uçuş yüklerine dayanması gerekmektedir. Buna ek olarak, kanadın doğal titreşim frekansının kuyruk kontrolcüsünün manevra ve denge sağlama

amacıyla uyguladığı müdahale frekansından daha yüksek olması gerekmektedir. Birden fazla tasarım isterinin bulunduğu bu tür problemlerde optimizasyon sürecinin yürütülmesi kritik öneme sahiptir.

Literatürde kanat tasarımı üzerine farklı disiplinlerde çeşitli optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Ding vd. (2018), suda kullanılan kompozit bir kanatçığın akış kaynaklı titreşimlerden kaynaklı rezonansa uğramasını önlemek amacıyla modal analiz tabanlı bir optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir. Hu vd. (2020), kanat yapısındaki elemanların yapısal dayanım ve kütle açısından en uygun özelliklere sahip olmasını sağlamak amacıyla parametrik bir optimizasyon çalışması yapmışlardır. Hanif vd. (2020), cevap yüzeyi yönteminden faydalanarak ticari bir yolcu uçağı kanadının yapısal optimizasyonunu kısa süre içerisinde gerçekleştirmişlerdir. Sarojini ve Mavris, (2021) Varyasyonel Asimptotik Yöntem (İng. Variational Asymptotic Method) kullanarak hibrit-elektrik itki sistemine sahip bir uçağın 3 boyutlu kanat kutusunu 1 boyutlu giriş modeli oluşturarak yapısal açıdan optimize etmişlerdir. Poole vd. (2022), bir kanadın aeroelastik tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Ancak bu çalışmaların hiçbirinde içi dolu metalik bir güdümlü füze kanadının doğal titreşim frekanslarını maksimize etme ihtiyacı ön planda bulundurulmamıştır. Kanat ön tasarım aşamasındaki çalışmalar göstermiştir ki kanatlı güdüm kitlerinde kullanıma uygun içi dolu metalik kanat geometrilerinde genellikle yapısal dayanım açısından bir sorun yaşanmamakta öte yandan kanat doğal titreşim frekanslarının kuyruk kontrolcüsünün manevra ve denge sağlama

amacıyla uyguladığı müdahale frekansı ile çakışması durumunda istenmeyen titreşimler gözlenmektedir. Bu çalışma kapsamında, Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (İng. Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO) kullanılarak, Al 7075 T6 alaşımından tasarlanan içi dolu çift sivrileme (İng. double taper) ve çift ok açısına (İng. double sweep) sahip jenerik kanat geometrisinin kanat alanının ve doğal titreşim analizleri sonucunda elde edilen birinci moda ait doğal frekans değerinin maksimize edilmesi, kanat kütlelerinin ise minimize edilmesi hedeflenmiştir. Geometrik optimizasyon sürecine dahil edilen 8 optimizasyon değişkeni sırasıyla, kanat açıklığı boyunca kanadın kök, ara ve uç kesitinde kullanılan kanat profilleri, kanat profil değişiminin gerçekleştiği ara kesitin köke olan mesafesi, uç ve ara kesitteki veter uzunlukları, kökten ara kesite ve ara kesitten kanat ucuna olan ok açılarıdır. Ayrıca, kanat kökünden kanat ucuna doğru kanat profillerinin sabit kalmasını ya da doğrusal olarak incelmesi ve sivrilmesini sağlayacak kısıtlar tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında, girdi parametrelerinin kanadın birinci titreşim modunun doğal frekans değeri üzerindeki etkileri hassasiyet analizi sonucunda elde edilmiştir.

Optimizasyon döngüsü ModeFrontier yazılımında, sonlu elemanlar modellerinin hazırlığı ve çözümü ise Abaqus ticari sonlu elemanlar yazılımında yürütülmüştür. Sonlu elemanlar modelini oluşturma ve çözümü adımını parametrik hale getirmek amacıyla bu çalışma kapsamında, Abaqus üzerinde çalıştırılabilen bir Python kodu hazırlanmıştır.

Çalışmanın sonraki bölümlerinde sırasıyla parametrik sonlu elemanlar modeli, optimizasyon döngüsü, optimizasyon sonuçları ve hassasiyet analizinden bahsedilerek genel değerlendirme yapılmıştır.

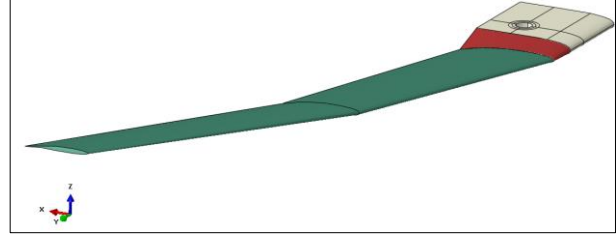
2. Parametrik Sonlu Elemanlar Modeli

Parametrik sonlu elemanlar modeli Abaqus ticari yazılımı üzerinde çalışabilen bir Python kodu yazılarak hazırlanmıştır. Bu kod yardımıyla geometri çizilmekte, malzeme özellikleri ve kesitler tanımlanarak ilgili kesitlerin geometriye atanması, kanat ve kulp geometrilerinin montajı, kanat ve kulp geometrileri arasında etkileşimlerin tanımlanması,

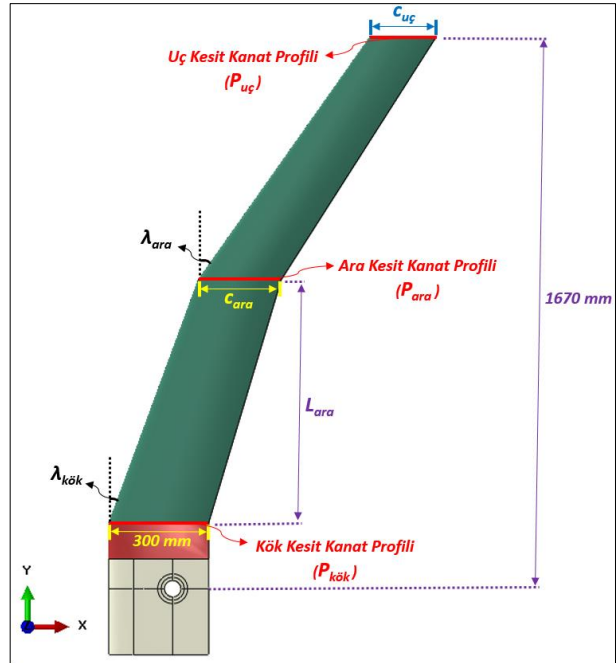
sınır koşullarının atanması, çözüm ağının oluşturulması ve çözüm yapılması adımları otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

2.1 Geometri

Optimizasyonu gerçekleştirilecek içi dolu kanat geometrisinin izometrik görünümü Şekil 2'de, üstten görünümü Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Kanadın izometrik görünümü

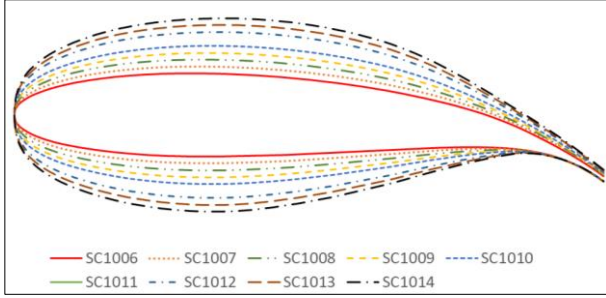


Şekil 3. Kanadın üstten görünümü ve optimizasyon değişkenleri

Kanat geometrisi 3 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlardan ilki taşıma kuvvetinin elde edilmesini sağlayan koyu yeşil renk ile gösterilen kanat bölümü, ikincisi kanadın gövde üzerine sabitlenmesini sağlayan ve bej renk ile gösterilen kulp bölümü, sonuncusu ise kanat ile kulp arasındaki geçişi sağlayan ve kırmızı renk ile gösterilen kulp geçiş parçasıdır.

Şekil 3'ten görüleceği üzere kanadın kök kesitinde ($P_{kök}$), ara kesitinde (P_{ara}) ve uç kesitinde ($P_{uç}$) farklı kanat profilleri kullanılabilir. Kanat kesitinde

kullanılabilecek kanat profilleri inceden kalına doğru sırasıyla SC1006, SC1007, SC1008, SC1009, SC1010, SC1011, SC1012, SC1013 ve SC1014 olup bunlar Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Optimizasyon sürecine dâhil edilen kanat profilleri

Optimizasyon sürecinde optimizasyon algoritması kök, uç ve ara kanat kesitlerinde bu kanat profilleri içerisinde seçim yapmaktadır. Ayrıca ara kesitin kanat üzerindeki konumu kök kesitine olan mesafe ile belirlenmiş olup Şekil 3'te L_{ara} ile sembolize edilen bu parametre de optimizasyon değişkeni olarak hesaba katılmıştır.

Kanat kök veter uzunluğu 300 mm ve tek kanat açıklığı da 1670 mm olarak sabit alınmış olup orta kesitteki veter uzunluğu (c_{ara}) ile uç kesitteki veter uzunluğu ($c_{uç}$) da optimizasyon değişkeni olarak hesaba katılmıştır. Son olarak, kanat kökündeki ok açısı ($\lambda_{kök}$) ve ara kesitteki ok açısı (λ_{ara}) parametreleri de optimizasyon değişkeni olarak tanımlanmıştır.

Optimizasyon sürecinden önce tasarlanan ve Şekil 3'te gösterilen başlangıç kanat geometrisine ait tasarım değişkenleri ve bu geometri ile gerçekleştirilen doğal frekans analizleri sonucunda elde edilen ilk titreşim moduna ait doğal frekans değeri Çizelge 1'de sunulmuştur.

2.2 Malzeme Özellikleri

Çalışma kapsamında tasarlanan kanat, mekanik özellikleri Çizelge 2'de sunulan Al 7075 T6 alaşımından üretilmektedir.

Çizelge 1. Optimizasyon sürecinden önceki tasarım

Parametre	Değer	Birim
c_{ara}	250	mm
$c_{uç}$	200	mm
L_{ara}	735	mm
$\lambda_{kök}$	35	°
λ_{ara}	20	°
Kök Kesit Kanat Profili	SC1012	-
Ara Kesit Kanat Profili	SC1010	-

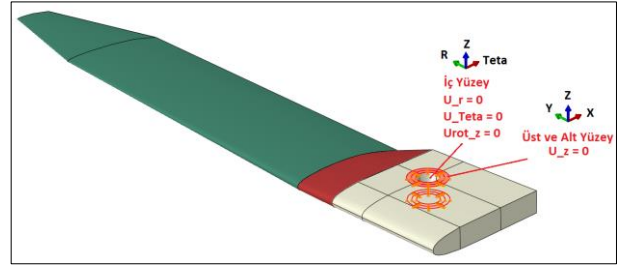
Uç Kesit Kanat Profili	SC1008	-
S_w	428250	mm ²
f_1	10.964	Hz
m_w	32.864	kg

Çizelge 2. Al 7075 T6 malzemesine ait mekanik özellikler (<https://www.matweb.com>)

Özellik	Değer	Birim
Elastisite Modülü	71.8	GPa
Poisson Oranı	0.33	-
Yoğunluk	2810	kg/m ³
Akma Dayanımı (24°C'de)	503	MPa

2.3 Sınır Koşulları

Kanat, etrafında döneceği mil yuvasının içerisinde, tanımlanan silindirik koordinat sistemine göre radyal, teğetsel yönlerde ötelemeye karşı ve milin dönme eksenini etrafında dönmesini önleyecek şekilde sabitlenmiştir. Ayrıca mil yuvasının üzerinde ve altında rulmanlar tarafından desteklenen yüzeylerden düşey yönünde (z yönünde) sabitlenmiştir. Kanat üzerinde uygulanan sınır koşulları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Kanat üzerine uygulanan sınır koşulları

Şekil 5'te, u_z z, u_r radyal, u_θ teğetsel yöndeki ötelemeyi; u_{rot_z} z eksenini etrafındaki dönmeyi temsil etmektedir.

2.4 Çözüm Ağı

Katı geometriye ait çözüm ağı ortalama 7 mm kenar boyutuna sahip doğrusal kübik elemanlardan oluşturulmuştur (C3D8I). Örnek çözüm ağı geometrisi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Örnek çözüm ağı geometrisi

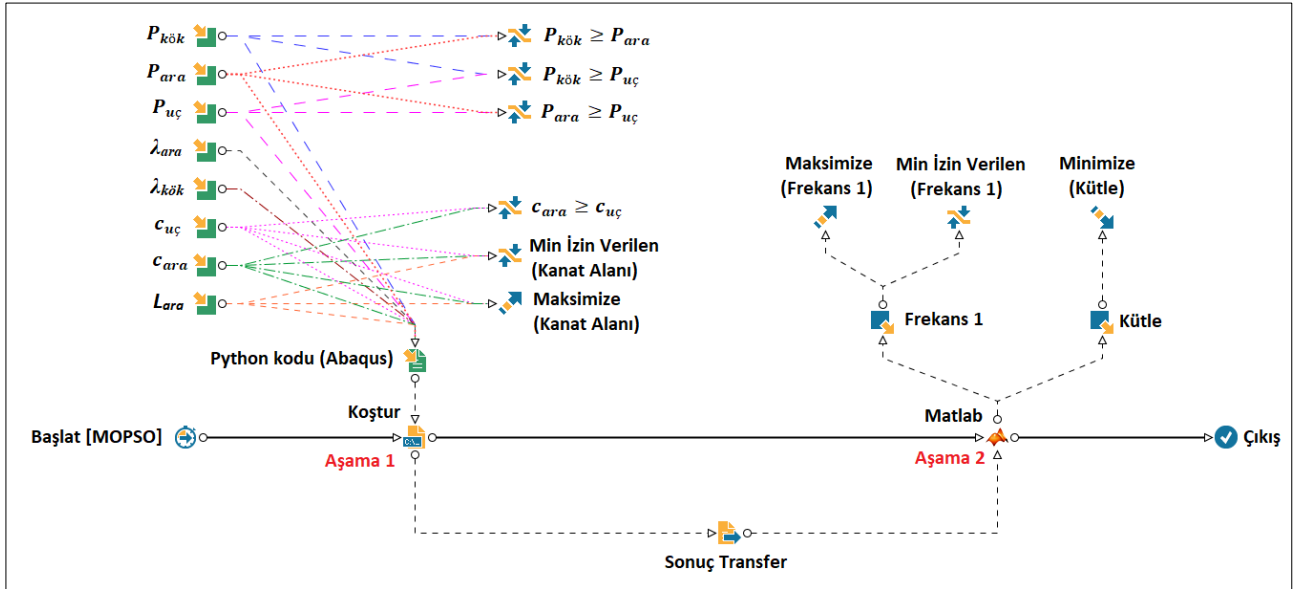
3. Optimizasyon Döngüsü

Optimizasyon döngüsü ModeFrontier ticari yazılımında Şekil 7'de gösterildiği gibi kurgulanmıştır.

Döngü, 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, 8 adet optimizasyon girdisine ait değerler parametrik Python kodu içerisinde yazılarak hazırlanan girdi dosyası komut istemi üzerinden Abaqus ticari yazılımında koşturulmakta; ikinci aşamada ise ilk aşamada elde edilen analiz sonuç dosyaları, çalışma kapsamında hazırlanan Matlab kodu yardımıyla okunarak kanada ait kütle ve ilk moda ait doğal frekans değerleri elde edilmektedir. Çok amaçlı optimizasyon çözümünde lokal minimum noktasına takılmadan yüksek doğrulukta optimum sonuç bulmadaki başarısı sebebiyle Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması tercih edilmiştir. Bu yöntem, Genetik Algoritma Yöntemi'ne benzerlik göstermekle birlikte genetik değişim (İng. crossover) ve mutasyon parametrelerine sahip olmadığı için hesaplama maliyeti ve karmaşıklığı daha düşük ve buna karşın geniş bir kulvarda yüksek doğrulukta çözümler sağladığı için verimli bir yöntemdir (Montrone vd., 2016).

Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması Dr. Eberhart and Dr. Kennedy tarafından 1995 yılında kuş sürülerinin veya balık sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir (Kennedy vd., 1995). Bu algoritma kapsamında her bir birey parçacık olarak adlandırılır. Parçacıklardan oluşan popülasyona da sürü adı verilir. Her parçacık optimize edilmiş problemin birer aday çözümünü temsil etmektedir. Hedef, tek amaçlı optimizasyon probleminde sürüdeki en iyi parçacığın; çok amaçlı optimizasyon probleminde sürüdeki en iyi parçacık kümesinin konumlarını belirlemektir.

Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması, parçacık konumlarını bireysel ve global en iyi konumlar temelinde güncelleyerek arama alanında keşif yapar. Parçacıklar bir sonraki konumu geçmiş tecrübelerine ve sürüdeki en iyi bireye dayanarak iyileştirmeye çalışırlar. Ardışık iterasyonlarla, algoritma çelişen hedefler arasında en iyi denge çözümlerini temsil eden bir dizi çözüm olan Pareto-optimal önüne yakınsar ve karar vericilerin tercihlerine göre seçilebilecek bir çözüm kümesi sunar. ModeFrontier kapsamında kullanılan bu algoritma aşağıdaki adımları takip etmektedir (Montrone vd., 2016):



Şekil 7. ModeFrontier ortamında hazırlanan optimizasyon akış şeması

1. Sürü Başlangıç Değerlerini Belirleme: Optimizasyon girdilerinin tanımlanan üst ve alt limitleri dahilinde parçacıklar rastgele bir şekilde

ya da belirli bir deney tasarım algoritmasına göre (örn: Sobol algoritması) oluşturulur. Her bir parçacığın bir konumu ve hızı vardır.
2. Uygunluk Değerlendirmesi: Her bir parçacığın çok amaçlı hedef fonksiyonlarına dayalı olarak

uygunluğu değerlendirilir. Bu aşama, her bir hedef fonksiyonunun ayrı ayrı değerlendirilmesini içerir.

3. Bireysel En İyinin Güncellenmesi: Parçacıkların, şu ana kadar buldukları en iyi konum ve uygunlukları güncellenir.
4. Global En İyinin Güncellenmesi: Tüm parçacıkların bireysel en iyi konumları dikkate alınarak, global en iyi konum ve uygunluk değeri güncellenir.
5. Hız ve Konum Bilgilerinin Güncellenmesi: Her bir parçacığın hızı ve konumu, bireysel en iyi ve global en iyi konumları kullanılarak güncellenir. Hız, atalet ağırlığı (İng. inertia weight), bilişsel bileşen (İng. cognitive component) ve sosyal bileşen (İng. social component) tarafından hesaplanır.

Çalışma kapsamında kurgulanan optimizasyonun 3 amacı bulunmaktadır. Bunlar, kanat alanının (S_w) ve doğal titreşim analizleri sonucunda elde edilen birinci moda ait doğal frekans değerinin (f_1) maksimize, kanat kütlelerinin (m_w) ise minimize edilmesidir. Optimizasyon amaçları matematiksel olarak (1) numaralı eşitlikte ifade edilmiştir.

$$\max_{s \in S} (S_w) \ \& \ \max_{s \in S} (f_1) \ \& \ \min_{s \in S} (m_w) \quad (1)$$

Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasında her bir amaç için ayrı amaç fonksiyonları tanımlanır ve bu fonksiyonlar eş zamanlı olarak optimize edilir. Bu nedenle çözümler, baskınlık tanımına (İng. dominance definition) ve dışlama mesafesi stratejilerine (İng. crowding distance strategies) dayanan Pareto baskınlık kriterlerine göre seçilir. Bu konunun detayları (Deb vd., 2002) ve (Marler ve Aurora, 2004) referanslarda sunulmuştur.

Kanadın ilk moduna ait doğal frekans değerinin 17.5 Hz'in üzerinde olması bir gereksinimdir. Bu değerden daha düşük doğal frekans değerine sahip olan kanat tasarımları daha hafif ya da daha büyük kanat alanına sahip olsalar dahi kullanılamazlar. Benzer şekilde, mühimmatın uçabilmesi için gerekli aerodinamik taşıma kuvvetini sağlaması amacıyla bir minimum kanat alanı (367500 mm^2) belirlenmiş olup bu alanın altındaki tasarımların kullanılması mümkün değildir. Literatürde bu durumun örnekleri mevcuttur: Nikbay ve Acar (2011) tarafından

modeFrontier yazılımı kullanılarak yürütülmüş olan çok amaçlı optimizasyon çalışmasında, bir uçak kanadına ait aeroelastik kararsızlık durumu optimize edilmiştir. Bu kapsamda, kanatçık tersliği (İng. control reversal), çırpıntı (İng. flutter) ve diverjans (İng. divergence) hızları hem amaç hem de kısıt olarak kullanılmıştır. Benzer şekilde, Nikbay vd. (2009) tarafından NASA'nın deneysel ARW-2 kanadına ait aeroelastik çok amaçlı çok disiplinli optimizasyon çalışması modeFrontier yazılımı üzerinde modellenerek yürütülmüş olup söz konusu çalışmada da ağırlık ve taşıma gibi bazı optimizasyon çıktıları hem kısıt hem de amaç olarak kullanılmıştır. Pratik uygulamalarda kullanımına rastlanan bu yöntem üzerine literatürde teorik çalışmalar da bulunmaktadır. Vieira vd. (2004) çok amaçlı optimizasyon problemlerinde kısıtları amaç olarak ele almak için bir yöntem olan Niched Pareto Genetic Algorithm (NPGA) Yöntemi'ni tanıtmışlardır. Optimizasyon süreci çeşitli kısıtlar altında yürütülmektedir. Bunlardan ilki kanadın sahip olması gereken minimum alan ile ilgili olup (2) numaralı eşitlikte ifade edilmiştir.

$$g_1(s) = 1 - \frac{S_w}{367500 \text{ mm}^2} \leq 0 \quad g_1(s) \in \mathbb{R} \quad (2)$$

Bir diğer kısıt ise doğal titreşim analizleri sonucunda elde edilen birinci moda ait doğal frekans değerinin sahip olması gereken alt limit ile ilgili olup (3) numaralı eşitlikte ifade edilmiştir.

$$g_2(s) = 1 - \frac{f_1}{17.5 \text{ Hz}} \leq 0 \quad g_2(s) \in \mathbb{R} \quad (3)$$

Kanadın en kalın ve geniş bölgesi kök; en ince ve dar bölgesi uç kısmı olmalıdır. Bunu sağlamak için (4), (5), (6) ve (7) numaralı eşitliklerde ifade edilen kısıtlar uygulanmıştır.

$$g_3(s) = \frac{c_{ara}}{c_{kök=300 \text{ mm}}} - 1 \leq 0 \quad g_3(s) \in \mathbb{R} \quad (4)$$

$$g_4(s) = \frac{c_{uç}}{c_{ara}} - 1 \leq 0 \quad g_4(s) \in \mathbb{R} \quad (5)$$

$$g_5(s) = \frac{P_{ara}}{P_{kök}} - 1 \leq 0 \quad g_5(s) \in \mathbb{R} \quad (6)$$

$$g_6(s) = \frac{P_{uç}}{P_{ara}} - 1 \leq 0 \quad g_6(s) \in \mathbb{R} \quad (7)$$

Daha önce geometri alt başlığı altında açıklandığı üzere çalışma kapsamında kullanılan 8 optimizasyon

değişkeni ve bu değişkenlere ait alt ve üst sınırlar Çizelge 3'te listelenmiştir.

Çizelge 3. Optimizasyon değişkenleri ve sınırları

Parametre	s_L	s_U	Birim
c_{ara}	100	300	mm
$c_{uç}$	100	300	mm
L_{ara}	350	1100	mm
$\lambda_{kök}$	0	30	°
λ_{ara}	0	30	°
Kök Kesit Kanat Profili	SC1006	SC1014	-
Ara Kesit Kanat Profili	SC1006	SC1014	-
Uç Kesit Kanat Profili	SC1006	SC1014	-

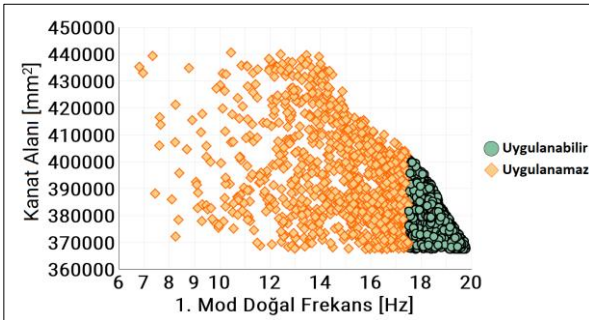
Optimizasyon değişkenleri kanat üretim toleransları göz önüne alınarak ayrık (İng. discrete) olarak seçilmiştir. Bu duruma örnek vermek gerekirse, c_{ara} ve $c_{uç}$ değişkenleri 1 mm; L_{ara} değişkeni 5 mm ve λ_{ara} ve $\lambda_{uç}$ değişkenleri ise 1 derece hassasiyet ile değiştirilebilmektedir. Bu durumun matematiksel ifadesi (8) ve (9) numaralı eşitliklerde gösterilmiştir.

$$S = \{s_1 \in \mathbb{Z} \mid s_L \leq s_1 \leq s_U\} \quad (8)$$

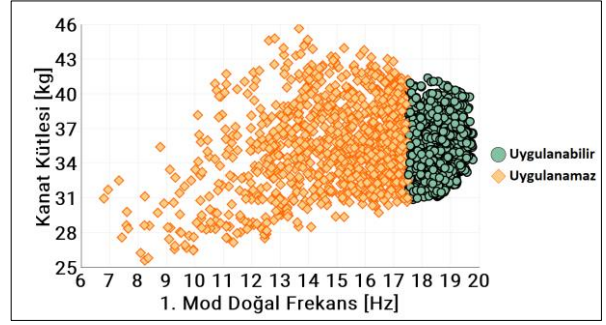
$$s_1 = \{c_{ara}, c_{uç}, L_{ara}, \lambda_{kök}, \lambda_{ara}, P_{kök}, P_{ara}, P_{uç}\} \quad (9)$$

4. Optimizasyon Sonuçları

Optimizasyon çözümü sırasında Intel® Xeon® Silver 4216 2.10 GHz 64 çekirdekli işlemciye ve 128 GB belleğe sahip bir iş istasyonu kullanılmıştır. Aynı anda 20'şer paralel model oluşturulmuş ve çözülmüştür. 96 saat boyunca 3138 adet modelleme ve çözüm gerçekleştirilmiştir. İncelenen tasarımların 1897 kadarı uygulanabilir tasarımlar (İng. feasible results) olup 1107 kadarı kısıtlardan en az birini ihlal ettiği için uygulanamaz çözüm (İng. unfeasible results) olarak sınıflandırılmıştır. Geri kalan çözümler geometrik sivrilme kısıtını ihlal eden hatalı tasarımlardır. Şekil 8 ve 9'da uygulanabilir çözümler yeşil, uygulanamaz çözümler sarı renk ile gösterilmiştir.

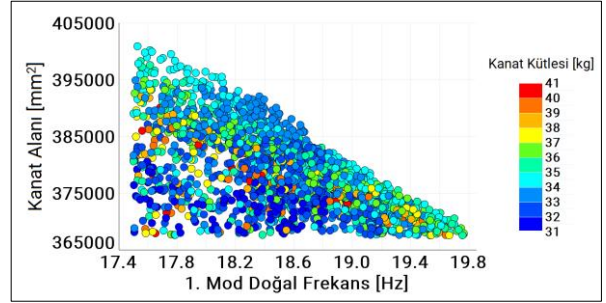


Şekil 8. Bütün optimizasyon çözümlerinin frekans – kanat alanı grafiği üzerinde dağılımı

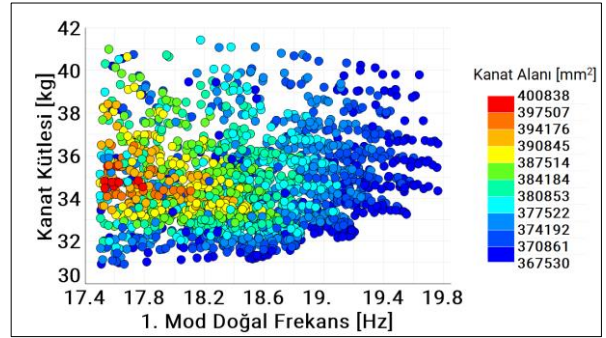


Şekil 9. Bütün optimizasyon çözümlerinin frekans – kanat kütlesi grafiği üzerinde dağılımı

Şekil 10 ve Şekil 11'de sunulan 3 boyutlu grafikler sadece uygulanabilir çözümleri içermektedir. Grafiklerdeki üçüncü boyut renk kodu ile gösterilmiştir.

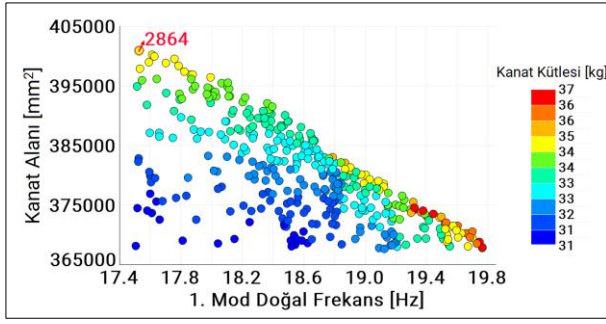


Şekil 10. Uygulanabilir optimizasyon çözümlerinin frekans – kanat alanı grafiği üzerinde dağılımı

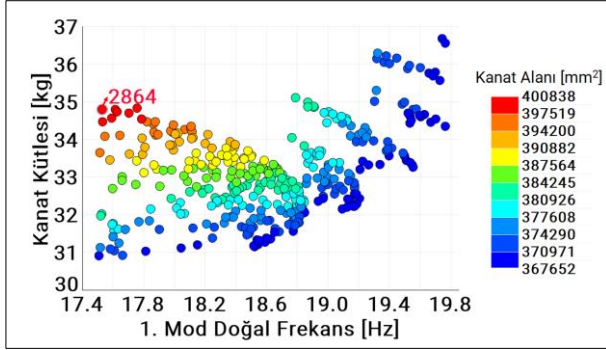


Şekil 11. Uygulanabilir optimizasyon çözümlerinin frekans – kanat kütlesi grafiği üzerinde dağılımı

Birden fazla amaca sahip optimizasyon çalışmalarında tek bir optimum çözümden bahsetmekten öte optimum çözüm alternatiflerini içeren bir pareto-optimal çözüm kümesi bulunur. Şekil 12 ve 13'te çalışma kapsamında elde edilen pareto-optimal çözüm kümeleri sunulmuştur.



Şekil 12. Pareto-optimal çözüm kümesinin frekans – kanat alanı grafiği üzerinde dağılımı



Şekil 13. Pareto-optimal çözüm kümesinin frekans – kanat kütlesi grafiği üzerinde dağılımı

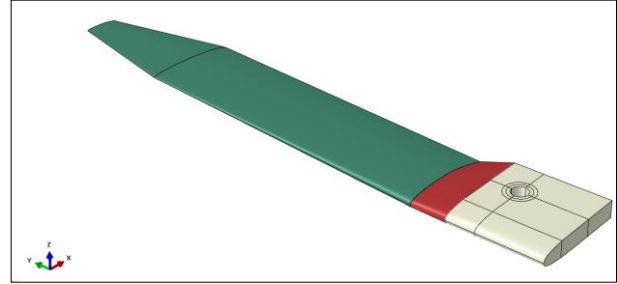
Kanat alanı, kanadın ürettiği taşıma değerini doğrudan etkileyen bir parametre olduğu için bu çalışmada, pareto-optimal çözüm kümesi üzerinde seçim yaparken öncelikli kriter kanat alanı olarak belirlenmiştir. Bu sebeple, pareto-optimal küme içerisinde bulunan en büyük kanat alanına sahip tasarım olan ID2864 optimum tasarım alternatifleri arasından seçilmiştir. 2864 numaralı tasarıma ait optimizasyon değişkenleri Çizelge 4’te sunulmuş olup elde edilen kanat geometrisi Şekil 14’de gösterilmiştir.

Doğal frekans değeri, kanat alanı ve kanat kütlesi parametreleri göz önünde bulundurularak yürütülen bu optimizasyon çalışmasında elde edilen sonuçların yapısal dayanım açısından da incelenmesi önem arz etmektedir. Kanat üzerinde kökten uca doğru eliptik yük fonksiyonuna sahip bir taşıma dağılımı olduğu bilinmektedir. Ancak kanat kökünde eliptik dağılıma göre daha yüksek gerilmeye ve kanat ucunda da daha yüksek düşey yer değiştirmeye yol açacağı bilindiği ve eliptik taşıma dağılımına göre daha hızlı modellendiği için; kanat üzerindeki taşıma dağılımının eşdeğer olarak kanat yüzeyine yayıldığı varsayılmış ve bu sayede daha

kötümser bir senaryoda yapısal analiz gerçekleştirilmiştir.

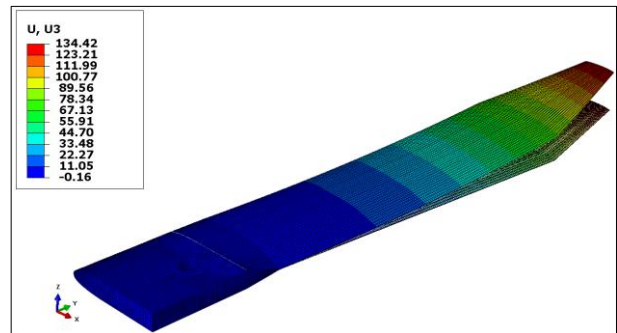
Çizelge 4. Çalışma kapsamında seçilen optimum tasarıma ait özellikler (ID2864)

Parametre	Değer	Birim
C_{ara}	300	mm
$C_{uç}$	111	mm
L_{ara}	1045	mm
$\lambda_{kök}$	4	°
λ_{ara}	12	°
Kök Kesit Kanat Profili	SC1014	-
Ara Kesit Kanat Profili	SC1006	-
Uç Kesit Kanat Profili	SC1006	-
S_w	400840	mm ²
f_1	17.529	Hz
m_w	34.797	kg

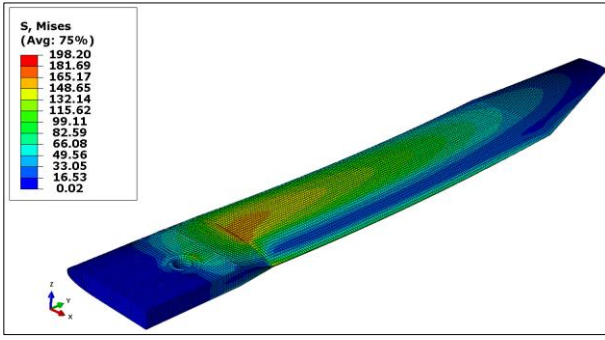


Şekil 14. Çalışma kapsamında seçilen optimum kanat geometrisi (ID2864)

Kanadın dayanması gereken en yüksek yük olan 9810 N (1000 kg) kanat üst yüzeyine eşdeğer basınç yükü olarak dağıtılmış, kanat üzerinde oluşan yer değiştirme ve von Mises gerilmesi dağılımları sırasıyla Şekil 15 ve 16’da gösterildiği şekilde elde edilmiştir.



Şekil 15. Kritik uçuş koşulunda optimum kanat geometrisi (ID2864) üzerindeki yer değiştirme dağılımı [mm]



Şekil 16. Kritik uçuş koşulunda optimum kanat geometrisi (ID2864) üzerindeki von Mises gerilmesi dağılımı [MPa]

Analiz sonuçları incelendiğinde, en kötümser senaryoda bile kanat ucunda oluşabilecek maksimum düşey yer değiştirme değerinin 134.4 mm'yi, kanat kökünde oluşabilecek maksimum von Mises gerilmesi değerinin de 198.2 MPa'ı geçmeyeceği öngörülmüştür. Kanat malzemesine ait akma dayanımının oda sıcaklığında 503 MPa olduğu göz önüne alınarak emniyet faktörünü 2.53 olarak hesaplanmış ve kanadın kritik yükleme koşulunda yapısal açıdan yeterli dayanıma sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5'te başlangıçtaki kanat tasarımı ve optimum kanat tasarımı değişkenleri sunulmuştur. Çizelge 6'da başlangıçtaki ve optimum kanat tasarımları arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Çizelge 5. Başlangıç tasarımı ile optimum tasarıma ait tasarım değişkenleri

Parametre	Başlangıç	Optimum
C_{ara}	250 mm	300 mm
$C_{uç}$	200 mm	111 mm
L_{ara}	735 mm	1045 mm
$\lambda_{kök}$	35°	4°
λ_{ara}	20°	12°
Kök Kesit Kanat Profili	SC1012	SC1014
Ara Kesit Kanat Profili	SC1010	SC1006
Uç Kesit Kanat Profili	SC1008	SC1006

Çizelge 6'da başlangıçtaki ve optimum kanat tasarımları arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Çizelge 6. Başlangıç tasarımı ile optimum tasarımın sonuçlarının karşılaştırılması

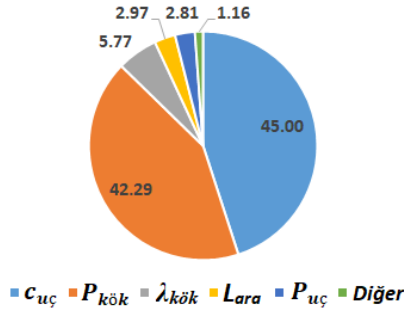
Parametre	Başlangıç	Optimum	% Fark
S_w	428250 mm ²	400840 mm ²	-6.40
f_1	10.964 Hz	17.529 Hz	59.88
m_w	32.864 kg	34.797 kg	5.88

Başlangıç tasarımındaki kanadın ilk moduna ait doğal frekans değeri 10.964 Hz olup bu değer 17.5 Hz olan minimum izin verilen frekans kısıtını ihlal etmektedir. Dolayısıyla başlangıç tasarımının

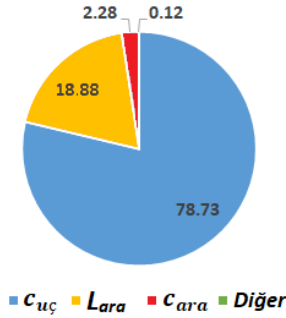
kullanımı hem daha hafif hem de daha büyük kanat alanına sahip olduğu halde doğal frekans gereksinimlerini karşılamadığı için mümkün değildir. Optimizasyon çalışmasında, optimizasyon kısıtları ile tanımlanmış olan bütün tasarım gereksinimlerini karşılayan mümkün olduğunca büyük kanat alanına sahip, mümkün olduğunca hafif ve mümkün olduğunca yüksek ilk mod doğal frekans değerine sahip bir kanadın tasarlanması hedeflenmiştir. Bütün amaç ve kısıtlar doğrultusunda gerçekleştirilen optimizasyon çözümü sonucunda kanadın doğal frekans değeri başlangıç tasarımına göre yaklaşık %60 oranında arttırılarak 17.5 Hz seviyesinin hemen üzerine çıkartılmış, bunu gerçekleştirirken kanadın kök bölgesindeki rijitlik artışını sağlamak amacıyla kanat %6 civarında ağırlaşmış, kanat alanı da %6 civarında azalmıştır. Optimizasyon sürecinde incelenen çözüm sayısının (bu çalışmada 3138 adet çözüm yapılmıştır) yeterince fazla olması durumunda, farklı başlangıç değerleri ile optimizasyona başlanması çözüm sonucunda elde edilen optimum geometriye ait değerlerde sadece ihmal edilebilir boyutta bir değişime yol açar.

5. Hassasiyet Analizi

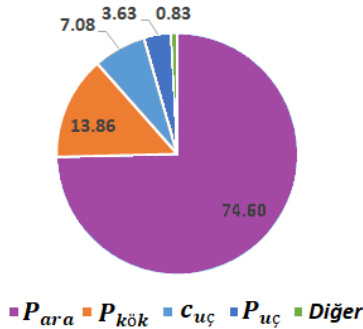
Hassasiyet analizleri tasarım girdilerinin tasarım çıktıları üzerine olan etkilerinin hangi boyutta olduğunu göz önüne sermek amacıyla kullanılır. Bu sayede, değiştirilmek istenen çıktı parametresi üzerinde hangi değişkenin en etkili olduğu bilgisi elde edilerek yapılması gereken değişiklikler ağırlıklı olarak bu değişken üzerinden yürütülebilir. Çalışma kapsamında, optimizasyon girdi parametrelerinin kanadın birinci titreşim modunun doğal frekans değeri, kanat alanı ve kanat kütlesi üzerindeki etkileri hassasiyet analizi sonucunda sırasıyla Şekil 17, 18 ve 19'da gösterildiği gibi elde edilmiştir. Şekil 17 incelendiğinde uç veter uzunluğunun ve kökte kullanılan kanat profilinin kanadın birinci titreşim modunun doğal frekans değerini belirleyen temel parametreler olduğu; Şekil 18 incelendiğinde uç veter uzunluğunun kanat yüzey alanını belirleyen en etkili parametre olduğu; Şekil 19 incelendiğinde ara kesitte kullanılan kanat profilinin kanat kütlesini belirleyen en etkili parametre olduğu gözlenmiştir.



Şekil 17. Optimizasyon girdilerinin f_1 üzerine yüzdeleri etkisi



Şekil 18. Optimizasyon girdilerinin kanat alanı üzerine yüzdeleri etkisi



Şekil 19. Optimizasyon girdilerinin kanat kütlesi üzerine yüzdeleri etkisi

6. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında, güdümlü kanat kitlerinde kullanılabilir, çift sivrilme oranı ve değişken kanat profiline sahip içi dolu metalik bir jenerik kanat geometrisinin çok amaçlı geometrik optimizasyonu modal analiz sonuçları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3'te listelenen 8 farklı parametre optimizasyon değişkeni olarak belirlenmiş ve çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu yöntemi kullanılarak kanat kütlesi minimize, kanat alanı ve kanadın birinci moduna ait doğal frekans değeri maksimize edilmeye çalışılmıştır. Optimizasyon girdilerine, kanadın kökten uca doğru sivrilmesine ve incelmeye veya

sabit kalmasına olanak sağlayacak kısıtlar uygulanmıştır. Ayrıca, kanadın ilk moduna ait doğal frekans değerinin kuyruk kontrolcüsünün manevra ve denge sağlama amacıyla uyguladığı müdahale frekansından daha yüksek olmasını garanti altına almak amacıyla; izin verilen minimum doğal frekans değeri belirlenerek optimizasyon döngüsüne kısıt olarak tanımlanmıştır.

Optimizasyonun çözümü sonunda elde edilen pareto-optimal çözüm kümesi içerisinde, en büyük kanat alanına sahip olan tasarım seçilmiştir. Bu tasarım üzerinde kritik uçuş koşuluna ait yük senaryosu için gerçekleştirilen statik analiz sonucunda kanadın yapısal dayanım açısından herhangi bir problem ile karşılaşmayacağı sonucuna varılmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda kanadın ilk moduna ait doğal frekans değeri %59.88 oranında arttırılmıştır. Buna karşın, kanat alanı %6.40 oranında azalmış ve kanat %5.88 oranında ağırlaşmıştır. Doğal frekans değerindeki artışın sağlanabilmesi amacıyla optimizasyon algoritması tarafından yürütülen iyileştirmeler sonucunda kanadın kök kısmındaki rijitliğin arttırıldığı gözlenmiştir. Kök kısmında rijitliği arttırabilmek amacıyla algoritma, kökteki kanat profilini en kalın alternatif olan SC1014 olarak belirlemiş ve ara kesit veter uzunluğunu da en büyük değer olan kök veter uzunluğuna eşit olarak almıştır. Kanadın uç kısmını hafifleterek eğilme moduna ait doğal frekans değerini arttırabilmek amacıyla optimizasyon algoritması, kanadın ara ve uç kesitinde tercih edilen kanat profillerini en ince alternatif olan SC1006 olarak seçmiştir. Yine kanadın uç kısmını mümkün olduğunca hafifletebilmek amacıyla uç veter uzunluğu mümkün olduğunca düşürülmüştür. Tüm bu değişiklikler kanadın uç bölgesini hafifletmiş, kök kısmını ağırlaştırmış, kök rijitliğini arttırmış ancak kanat alanını da bir miktar azaltmıştır. Sonuç olarak, doğal frekans değerinde %60'a yakın iyileştirme yapıldığı için bunun karşılığında kanat alanında meydana gelen azalma ve kanattaki kütle artışı kabul edilebilir bir mertebede tutulmuştur.

Çalışmadaki optimizasyon sürecinde, optimizasyon değişkenlerinin optimizasyon çıktıları üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla hassasiyet analizi yürütülmüştür. Analiz sonuçlarına göre, uç veter uzunluğunun ve kökte kullanılan kanat profilinin

kanadın birinci titreşim modunun doğal frekans değerini belirleyen temel parametreler olduğu; uç veter uzunluğunun kanat yüzey alanını belirleyen etkili parametre olduğu; ara kesitte kullanılan kanat profilinin kanat kütlesini belirleyen etkili parametre olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

5. Kaynaklar

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyerivan, T., 2002. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**, 2, 182-197.

Ding, Y., Song, B., Wang, P. and Wu, X., 2018. Modal analysis and frequency based structure optimization of a 3D flexible wing working in uniform flow. OCEANS'18 MTS/IEEE Kobe/Techno-Ocean 2018 (OTO'18), at Kobe, Japan.

Hanif, A.A.G., Li, H., Kamran, G. and Abdullah, M., 2020. Structural analysis and response surface optimization of transport aircraft wing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **6**, 1, 1-10.

Hu, Z., Qui, J. and Zhang, F., 2020. Fully parametric optimization designs of wing components. *International Journal of Aerospace Engineering*, **2020**, 1-11.

Kennedy, J. and Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization. IEEE International Conference on Neural Networks, at Perth, Australia.

Marler, R. and Aurora J., 2004. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **26**, 6, 369-395.

Montrone, T., Costanzo, S. and Engel, M., 2016, MOPSO Algorithm: General Description, modeFrontier Technical Report.

Nikbay, M. and Acar, P., 2011. Integrating Analytical Aeroelastic Instability Analysis into Design Optimization of Aircraft Wing Structures. *TWMS Journal of Applied and Engineering Mathematics*, **1**, 2, 237-253.

Nikbay, M., Öncü, L. and Aysan, A., 2009. Multidisciplinary Code Coupling for Analysis and Optimization of Aeroelastic Systems. *Journal of Aircraft*, **46**, 6, 1938-1943.

Poole, D.J., Allen, C.B. and Rendall, T.C.S., 2022. Efficient aeroelastic wing optimization through a compact aerofoil decomposition approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **65**, 3, 1-19.

Sarojini, D. and Mavris, D. 2021. Structural analysis and optimization of wings subjected to dynamic loads using beam models. *AIAA Journal*, **60**, 2, 1013-1023.

Vieira, D. A. G., Adriano, R. L. S., Vasconcelos, J. A. and Krähenbühl, L. 2004. Treating Constraints as Objectives in Multiobjective Optimization Problems Using Niche Pareto Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Magnetics*, **40**, 2, 1188-1191.

İnternet kaynakları

1-<http://newatlas.com>, (09.09.2022).

2-<http://www.matweb.com>, (30.08.2022).