





Jet motor braketini için eklemeli imalata yönelik topoloji optimizasyonu tabanlı tasarım

Topology optimization-based design for additive manufacturing of a jet engine bracket

Kazım Canberk Elmas^{1,*} , Ayşe Öndürücü² 

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

Öz

Havacılık sektöründe yapısal bileşenlerin hafifletilmesi, yakıt verimliliğini artırmak ve performansı iyileştirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, General Electric tarafından sağlanan bir jet motor braketini modeli üzerinde eklemeli imalata yönelik yoğunluk tabanlı topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları, ANSYS Mechanical Topology Optimization modülünde SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) yöntemi kullanılarak yürütülmüş ve Ti-6Al-4V titanyum alaşımı esas alınmıştır. Dört farklı yükleme senaryosu altında gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri ile kritik yük yolları belirlenmiş, yük taşımaya katkısı düşük bölgeler tasarımdan uzaklaştırılmıştır. Optimizasyon sürecinde başlangıç hacminin %40'ının korunması hedeflenmiş ve elde edilen ham geometri, minimum 2 mm et kalınlığı, 45° destek açısı kriteri ve $\pm 0,1$ mm tolerans dikkate alınarak CAD ortamında yeniden modellenmiştir. Nihai tasarımın doğrulama analizlerinde maksimum Von Mises gerilmesi 612.17 MPa olarak hesaplanmış olup, bu değer Ti-6Al-4V malzemesi için 1.5 emniyet katsayısı esas alınarak belirlenen 633 MPa izin verilen gerilme sınırının altında kalmıştır. Başlangıç tasarımına göre kütle 2.05167 kg'dan 0.73138 kg'a düşürülmüş ve %64.3 oranında ağırlık azaltımı sağlanmıştır. Başlangıç ve optimize tasarımlar arasındaki maksimum gerilme artışı %2.3 ile %6.3 arasında değişmiş, emniyet katsayısındaki azalma ise yaklaşık %2.5 ile sınırlı kalmıştır. Elde edilen sonuçlar, topoloji optimizasyonu ile eklemeli imalat için tasarım yaklaşımının birlikte kullanılmasyla havacılık uygulamalarında yüksek yapısal verimlilik, üretilebilirlik ve önemli ölçüde hafifletme sağlanabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Yoğunluk tabanlı topoloji optimizasyonu, Eklemeli imalat için tasarım, Jet motor braketini tasarımı, Ti-6Al-4V, Havacılık yapılarında hafifletme

1 Giriş

Günümüzde mühendislik tasarımlarında ağırlığın azaltılması ve yapısal dayanımın korunması havacılık ve

Abstract

Lightweighting of structural components is of critical importance in aerospace applications to improve fuel efficiency, reduce emissions, and enhance overall system performance. In this study, density-based topology optimization for additive manufacturing was performed on a jet engine bracket model provided by General Electric. The optimization process was carried out in the ANSYS Mechanical Topology Optimization module using the Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) method, considering Ti-6Al-4V titanium alloy as the structural material. Finite element analyses under four different loading scenarios were conducted to identify critical load paths and eliminate regions with low structural contribution. During optimization, 40% of the initial design volume was retained. The resulting raw geometry was remodeled in CAD by incorporating additive manufacturing constraints, including a minimum wall thickness of 2 mm, a 45° overhang criterion, and a dimensional tolerance of ± 0.1 mm. Verification analyses of the final design yielded a maximum Von Mises stress of 612.17 MPa, which remained below the allowable stress limit of 633 MPa determined by applying a safety factor of 1.5 to the 950 MPa yield strength of Ti-6Al-4V. The bracket mass was reduced from 2.05167 kg to 0.73138 kg, corresponding to a 64.3% weight reduction. The increase in maximum stress relative to the initial design ranged from 2.3% to 6.3%, while the reduction in the safety factor was limited to approximately 2.5%. The results demonstrate that integrating topology optimization with Design for Additive Manufacturing provides a robust approach for achieving substantial lightweighting, structural integrity, and manufacturability in aerospace bracket applications.

Keywords: Density-based topology optimization, Design for additive manufacturing, Jet engine bracket design, Ti-6Al-4V, Aerospace lightweighting

otomotiv gibi ileri teknoloji sektörlerinde temel öncelikler arasında yer almaktadır. Özellikle yakıt verimliliğini artırmak, karbon salınımını azaltmak ve üretim maliyetlerini

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: canberk.elmas@gmail.com (K. C. Elmas)

Geliş / Received: 30.09.2025 Kabul / Accepted: 16.06.2026 Yayımlanma / Published: 08.07.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1793430

düşürmek amacıyla geleneksel tasarım yöntemlerinin ötesine geçilerek daha etkin ve optimize edilmiş yapılar geliştirilmektedir [1]. Bu bağlamda topoloji optimizasyonu, belirli yüklem koşulları altında bir yapının sadece gerekli bölgelerinde malzeme barındırmasını sağlayarak hem yapısal etkinliği artırmakta hem de gereksiz malzeme kullanımını ortadan kaldırmaktadır [2, 3].

Topoloji optimizasyonu, tasarım hacmi içinde yük taşımayan veya az yük taşıyan bölgelerin belirlenerek yapıdan çıkarılması esasına dayanır. Böylece hem kütle azalımı sağlanmakta hem de yapının rijitliği büyük oranda korunmaktadır [4, 5]. Havacılık sektöründe uçuş güvenliği ve yakıt tasarrufu doğrudan yapısal ağırlıkla ilişkili olduğundan, topoloji optimizasyonu bu alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [6, 7]. Uçak yapılarında kullanılan braketler gibi bağlantı elemanları, motor veya kontrol yüzeylerinin taşıdığı manevra yüklerini aktaran ve oldukça karmaşık yüklem koşullarına maruz kalan bileşenlerdir [8, 9].

Bununla birlikte topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen geometriler çoğu zaman geleneksel üretim teknikleriyle üretilemeyecek kadar karmaşıktır. Bu noktada eklemeli imalat (Additive Manufacturing, AM) teknolojileri, özellikle karmaşık ve içi boş geometrilerin üretiminde önemli avantajlar sunmaktadır [10-12]. Eklemeli imalat, tasarım üzerindeki imalat kısıtlarını büyük ölçüde ortadan kaldırmakta ve topolojik olarak optimize edilen bileşenlerin doğrudan üretimini mümkün kılmaktadır [13, 14].

Ti6Al4V gibi yüksek mukavemetli ve hafif titanyum alaşımları, özellikle uçak braketleri gibi yüksek yüke maruz kalan parçalarda tercih edilmekte ancak yüksek yoğunlukları nedeniyle optimize edilmemiş ağır yapılar ortaya çıkabilmektedir [9]. Bu nedenle bu tür alaşımlar kullanılarak üretilen parçaların hem topolojik hem de üretilebilirlik açısından optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır [15, 16].

Topoloji optimizasyonunun tarihi 1900'lü yıllara kadar uzanmakta olup, özellikle son 20 yılda sonlu elemanlar yöntemiyle (FEM) entegre şekilde yaygınlaşmıştır [17, 18].

Literatürde, otomotiv [19], savunma sanayi [5], Formula araçları [20], uçak koltukları [21] ve hatta N95 maskeler [22] gibi birçok farklı alanda topoloji optimizasyonu uygulanmıştır.

Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalarda, topoloji optimizasyonu sayesinde önemli düzeyde hafifletme sağlanan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Deshmukh [23], ağır vasıta jantı üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada başlangıçta 725.80 kg ağırlığa sahip yapısal çelik jantı magnezyum alaşımı kullanarak optimize etmiş ve nihai kütleyi 139.67 kg seviyesine düşürerek %80.73 oranında hafifletme sağlamıştır. Çalışmada optimize edilen yapı üzerinde oluşan maksimum Von Mises gerilmesi 31.610 MPa olarak hesaplanmış ve bu değer magnezyum alaşımının akma dayanımının altında kaldığı belirtilmiştir. Ayrıca maksimum toplam deformasyon değeri 2.9182 mm olarak rapor edilmiş ve yapının güvenli sınırlar içerisinde çalıştığı ifade edilmiştir. Ingale [24], arazi aracı fren pedalı üzerinde gerçekleştirdiği topoloji optimizasyonu

çalışmasında Al-6061 alaşımı için kütleyi 0.521 kg'dan 0.384 kg'a düşürerek %26.30, Al-7075 alaşımı için ise 0.562 kg'dan 0.370 kg'a indirerek %34.16 oranında ağırlık azaltımı elde etmiştir. Optimizasyon sonrasında maksimum gerilme değerinin 35.47 MPa'dan 47.77 MPa'ya yükseldiği, deformasyon miktarlarının ise Al-6061 için 0.52 mm'den 0.77 mm'ye, Al-7075 için 0.89 mm'den 1.20 mm'ye çıktığı belirtilmiştir. Buna rağmen emniyet katsayılarının Al-6061 için 6.99'dan 5.19'a, Al-7075 için ise 12.00'dan 9.29'a düşmesine karşın güvenli çalışma sınırlarının korunduğu rapor edilmiştir. Dhore ve Thorat [25], otomobil alt süspansiyon kolu üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada topoloji optimizasyonu ile %15.39 oranında kütle azaltımı sağlamışlardır. Statik analizler sonucunda optimize edilen yapıdaki maksimum gerilme değeri 240.59 MPa olarak hesaplanmış ve bu değer kullanılan malzemenin akma dayanımının altında kaldığı belirtilmiştir. Ayrıca modal analiz sonuçlarında, parça kütlelerinin azalmasıyla birlikte doğal frekans değerlerinin arttığı ve yapının titreşim davranışının iyileştiği gösterilmiştir. Havacılık alanında Seabra vd. [26], seçici lazer eritme (Selective Laser Melting, SLM) yöntemi ile üretilen uçak bileşenlerinde topoloji optimizasyonu uygulayarak malzeme hacmini %54 oranında azaltmış ve buna karşılık yaklaşık %28 seviyesinde net ağırlık azaltımı elde etmiştir. Çalışmada, alüminyum alaşımdan daha yüksek yoğunluğa sahip titanyum alaşımına geçilmesi nedeniyle hacim azalımının doğrudan ağırlık azaltımına aynı oranda yansımadağı belirtilmiştir. Ayrıca optimize edilen parçaların emniyet katsayısının orijinal tasarımın yaklaşık iki katına çıktığı ifade edilmiş, SLM yöntemi ile üretilen parçalar üzerinde gerçekleştirilen deneysel testlerde ölçülen maksimum birim şekil değiştirme değerlerinin sonlu eleman analizleri ile büyük ölçüde uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Brusa vd. [27] ise Ti-6Al-4V malzemeden üretilen eklemeli imalat braketlerinin mekanik davranışını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada lazer tabanlı SLM yöntemiyle üretilen parçaların iç boşluk içermediği ancak yüksek termal gradyanlar nedeniyle sınırlı düzeyde çarpılma oluştuğu belirtilmiştir. Elektron demeti tabanlı EBM yöntemiyle üretilen numunelerde ise yüksek seviyede porozite gözlemlenmiştir. Ayrıca SLM yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların akma ve çekme dayanımlarının geleneksel dövme titanyuma oldukça yakın olduğu gösterilmiş, gerçekleştirilen statik ve yorulma testlerinde parçaların limit yüklerin iki katına kadar akma göstermeden dayanabildiği rapor edilmiştir. Yorulma analizlerinde ise SLM ile üretilen braketlerin 1 milyon çevrimi hasarsız tamamladığı, EBM yöntemiyle üretilen braketin ise 729.000 çevrimde kırıldığı belirtilmiştir.

GE Jet Engine Bracket problemi üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda, başlangıç kütlesi 2.0517 kg olan aynı referans braket modeli üzerinde önemli düzeyde hafifletme sonuçları elde edilmiştir. Mohamed vd. [28], yoğunluk tabanlı topoloji optimizasyonu yaklaşımı kullanarak braketin 0.81137 kg seviyesine düşürmüş ve yaklaşık %60.5 oranında kütle azaltımı sağlamışlardır. Gülbahçe vd. [29] ise sonlu eleman analizleri ve modal değerlendirmeler ile destekledikleri çalışmalarında optimize edilmiş braket kütlesini 0.4780 kg'a

kadar düşürerek %76.7 oranında hafifletme elde etmişlerdir. Mohiuddin ve Khan [30], yeniden tasarladıkları uçak braketi üzerinde yaklaşık %39.18 oranında ağırlık azaltımı rapor etmiş ve topoloji optimizasyonunun yapısal bütünlük korunurken önemli ölçüde hafifletme sağlayabildiğini göstermiştir. Daha güncel çalışmalarda Le vd. [31], SIMP tabanlı topoloji optimizasyonunu “design-to-production” yaklaşımıyla değerlendirerek sayısal analizleri fiziksel doğrulamalar ile desteklemişlerdir. Çalışmalarında ticari çözümlerin güvenilirliğini doğrulamış, GE braket modeli üzerinde %75.23 oranında kütle azaltımı elde etmiş ve FKM Guideline kriterlerine göre statik emniyet katsayısını 1.43 olarak hesaplayarak optimize edilen yapının güvenli olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca lokal gerilme yığılmaları tespit edilmesine rağmen yapısal bütünlüğün korunduğu belirtilmiştir. Wan Muhamad vd. [32] ise topoloji optimizasyonu sonrasında elde edilen ham geometrinin doğrudan üretilebilir olmadığını belirterek PolyNURBS tabanlı yeniden modelleme gerçekleştirmiştir. Çalışmada başlangıç modeli 2.052 kg kütle ve 1.4 minimum emniyet katsayısına sahipken, topoloji optimizasyonu sonrası elde edilen 0.324 kg’lık ham modelde minimum emniyet katsayısının 1.1 seviyesine düştüğü görülmüştür. Bunun üzerine gerçekleştirilen yeniden modelleme sonrası nihai PolyNURBS geometrisinin kütlesi 1.007 kg olarak elde edilmiş ve yaklaşık %51 oranında ağırlık azaltımı sağlanırken minimum emniyet katsayısı tekrar 1.4 seviyesine yükseltilmiştir. Bu sonuçlar, topoloji optimizasyonu sonrası yeniden modelleme ve üretilebilirlik düzenlemelerinin yapısal güvenlik açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Eklemeli imalat yöntemleri, karmaşık geometrilerin üretimine olanak tanımakla birlikte, üretim yönelimi, katmanlar arası bağ dayanımı, artık gerilmeler ve porozite gibi nedenlerle mekanik özelliklerde anizotropiye ve dayanım değişimlerine yol açabilmektedir [7, 12, 27]. Özellikle Ti-6Al-4V alaşımında statik ve yorulma performansının üretim parametrelerine duyarlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle topoloji optimizasyonu ile elde edilen geometrilerin yalnızca yapısal açıdan değil, aynı zamanda eklemeli imalat kısıtları dikkate alınarak değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bununla birlikte, jet motor braketi gibi yüksek güvenlik gereksinimine sahip havacılık bileşenlerinde, çoklu yükleme senaryolarını, emniyet katsayısı gereksinimlerini ve eklemeli imalat için tasarım kriterlerini birlikte ele alan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada, General Electric tarafından düzenlenen GE Jet Engine Bracket Challenge kapsamında sunulan jet motor braketi modeli üzerinde yoğunluk tabanlı topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Braketin yük yolları sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve Ti-6Al-4V titanyum alaşımı esas alınarak optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

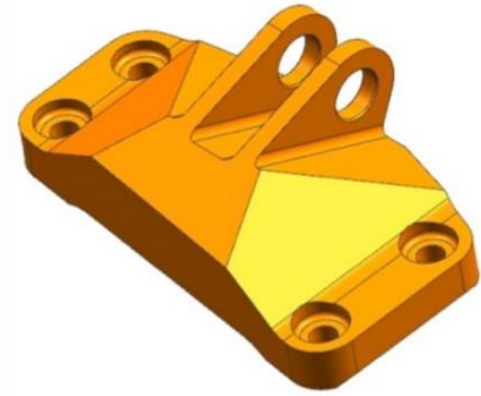
2 Materyal ve metot

Bu bölümde çalışmada kullanılan yöntemler, analiz süreçleri ve ilgili modelleme detayları açıklanmıştır. Araştırmanın temel amacı, GE tarafından sağlanan jet motor braketi üzerinde topoloji optimizasyonu gerçekleştirilerek,

yapının ağırlığını azaltırken mekanik performansını artırmaktır. Bu doğrultuda model belirleme süreci, malzeme özelliklerinin tanımlanması, yüklerin ve sınır koşullarının belirlenmesi gibi aşamalar detaylandırılmıştır. Ayrıca, topoloji optimizasyonu için kullanılan yazılım ve program ayarları ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

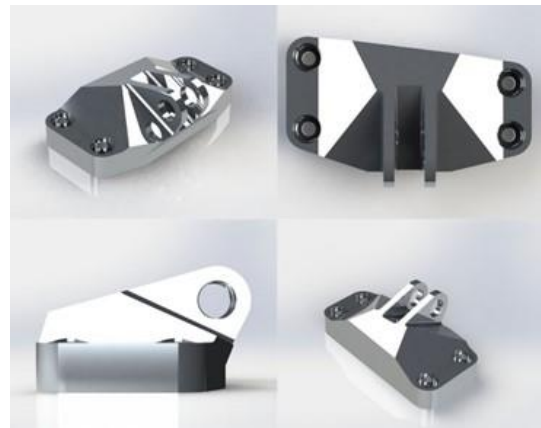
2.1 Model Belirleme

Topoloji optimizasyonu uygulamalarında mühendislik probleminin çözümünde uygun modelin seçimi kritik bir rol oynamaktadır. Optimizasyon sürecinin başarısı, büyük ölçüde kullanılan modelin geometrisi, uygulanan yükleme koşulları ve tanımlanan sınır şartlarına bağlıdır. Bu çalışmada, analiz ve optimizasyon çalışmaları için General Electric (GE) tarafından geliştirilen bir jet motoru braketi modeli kullanılmıştır (Bk. Şekil 1). Model, gerçek uygulama koşullarını yansıtacak şekilde tasarlanmış olup farklı yük senaryoları ve üretim kısıtlarını göz önünde bulundurarak topoloji optimizasyonu için uygun bir temel oluşturmaktadır.



Şekil 1. GE tarafından sağlanan braket geometrisi [33]

Optimizasyon sürecinden önce braket CAD ortamına aktarılmış ve SolidWorks yazılımında ayrıntılı olarak modellenmiştir (Bk. Şekil 2). Bu adım geometrinin kapsamlı bir şekilde incelenmesini, kritik bölgelerin tanımlanmasını ve topoloji optimizasyonu için gerekli hazırlıkların yapılmasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 2. Braket geometrisi

2.2 Malzeme

Braketin gerekli geometrisi, yükleme koşulları ve malzeme bilgileri, 2013 yılında General Electric tarafından duyurulan bir çevrimiçi tasarım yarışmasından elde edilmiştir [28]. İstenildiği üzere braketin malzemesi Ti-6Al-4V titanyum alaşımı tanımlanmış ve çevrimiçi olarak erişilebilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. Ti-6Al-4V malzemesine ait malzeme özellikleri Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Ti-6Al-4V malzemesinin mekanik özellikleri

Parametre	Büyükük	Birim
Yoğunluk	4.43	g/cm ³
Poisson oranı	0.33	-
Elastisite modülü	110	GPa
Akma mukavemeti	950	MPa
Kopma mukavemeti	1020	MPa

2.3 Ağ yapısının oluşturulması

Bu çalışmada, braketin ağ yapısı oluşturulurken analiz doğruluğunu artırmak için hassas bir mesh kontrolü uygulanmıştır. Geometrinin karmaşık bölgelerinde daha küçük elemanlar kullanılarak yüksek çözünürlük sağlanmış, düz ve simetrik alanlarda ise daha büyük elemanlar tercih edilerek analiz süresi optimize edilmiştir. Ayrıca eğrisel yüzeylerin düzgün bir şekilde ağ yapısına dahil edilmesi ve ağın uniform dağılımının sağlanmasına özen gösterilmiştir. Bu yaklaşımlar hem analiz doğruluğunu artırmak hem de topoloji optimizasyon sonuçlarının kalitesini yükseltmek için benimsenmiştir. Ansys’de ağ yapısı oluşturulurken quadratic mesh türü tercih edilmiştir. Bu ağ yapısı özellikle eğrisel yüzeylerin ve karmaşık geometrilerin daha doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan ağ yapısının doğruluğunu ve çözüm hassasiyetini değerlendirmek amacıyla farklı ağ yoğunlukları ile yakınsama analizi yapılmıştır. Üç farklı ağ yoğunluğu (kaba, orta ve ince mesh) için gerçekleştirilen analizlerde Von-Mises gerilme değerleri arasındaki farkın %2’nin altına düştüğü görülmüş ve bu durum çözümün ağ bağımsızlığını doğrulamıştır (Bk. Tablo 2).

Tablo 2. Ağ yapısının kalite metrikleri

Mesh Kalitesi	Eleman Sayısı	Maksimum Von Mises Gerilmesi (MPa)
Kaba Mesh	62.814	604.82
Orta Mesh	119.249	612.17
İnce Mesh	185.736	614.01

Ayrıca oluşturulan ağ yapısının kalite metrikleri de ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ağ yapısında elde edilen ortalama skewness değeri 0.21 olarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda ortalama skewness değeri iyi kalite aralığında bulunmakta olup yalnızca sınırlı sayıda elemanın maksimum değeri yüksek çıkmıştır. Aspect ratio değerleri incelendiğinde, tüm elemanların oranlarının 4’ün altında kaldığı görülmektedir. Ayrıca element quality metriği de genel olarak 0.7’nin üzerinde olup bu değer iyi kalite aralığında yer almaktadır. Sonuç olarak elde edilen tüm

metrik değerleri literatürde kabul edilen sınırlar içerisinde yer almakta ve ağ yapısının yeterli kalitede olduğunu göstermektedir. İlgili metrikler ve karşılıkları Tablo 3’te sunulmuştur.

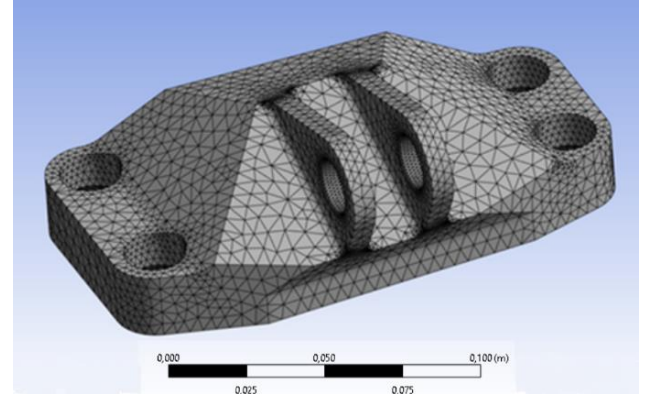
Tablo 3. Ağ yapısının kalite metrikleri

Parametre	Değer
Ortalama Skewness Değeri	0.21
Aspect Ratio	<4
Element Quality	>0.7

Geometrinin meshlenmesi sonucunda toplamda 172.140 düğüm (nodes) ve 119.249 eleman (elements) elde edilmiştir (Bk. Tablo 4). Şekil 3’te braket ağ yapısı verilmiştir.

Tablo 4. Ağ yapısında bulunan düğüm ve eleman sayısı

Parametre	Adet
Düğüm Sayısı	172.140
Eleman Sayısı	119.249

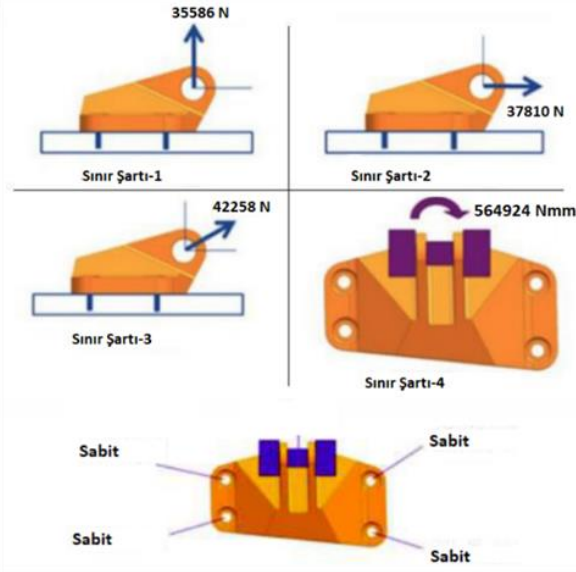


Şekil 3. Braket ağ yapısı

2.4 Yüklerin ve sınır koşullarının tanımlanması

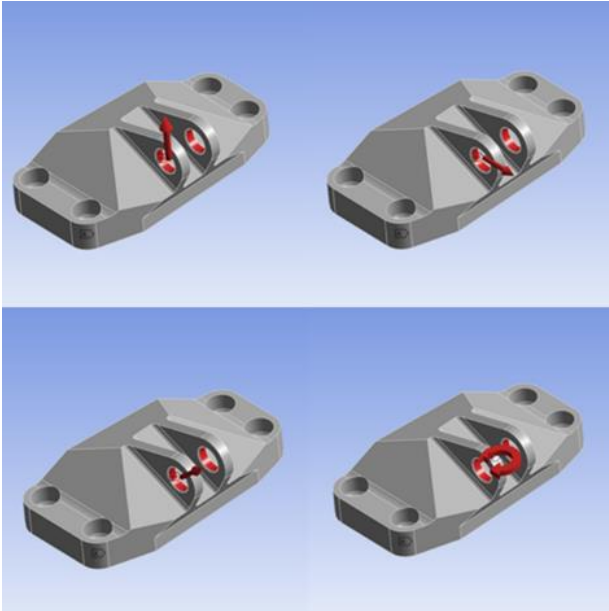
Bu çalışmada, topoloji optimizasyonu için gerekli olan yük ve sınır koşulları, parçanın çalışma şartlarını doğru bir şekilde yansıtabilecek şekilde tanımlanmıştır. Yük ve sınır koşulları, General Electric (GE) tarafından 2013 yılında düzenlenen “GE Jet Engine Bracket Challenge” çevrimiçi tasarım yarışmasında paylaşılmıştır ve çalışmada birebir uygulanmıştır.

Braketin geometrisinde yer alan dört adet alt montaj deliği sabit destek olarak tanımlanmış ve bu noktaların hareketinin tamamen kısıtlandığı kabul edilmiştir. Bu sayede analiz sırasında braketin sabit bir yapı üzerinde çalıştığı varsayılmıştır. Brakete etkiyen yükler ise üst montaj deliğine uygulanmış olup yarışmada belirtilen senaryolara uygun olarak dört farklı sınır koşulu tanımlanmıştır. Bu yükleme senaryoları, parçanın X, Y ve Z yönlerinde kuvvet ve bu kuvvetlere ek olarak moment yüklemesi içermekte ve braketin farklı çalışma koşullarındaki davranışını incelemek amacıyla modellenmiştir. Bu yaklaşım, parçanın gerçek çalışma koşullarını temsil etmekte ve optimizasyon sürecinin güvenilirliğini artırmaktadır. Parçaya etki eden yükler ve moment Şekil 4’te gibidir.



Şekil 4. General Electric (GE) tarafından sağlanan sınır şartları [33]

Bu yük ve sınır koşulları, parçanın gerçek çalışma koşullarına uygun olacak şekilde modellenmiş ve analizlerin güvenilirliğini artırmak amacıyla simülasyon sürecinde dikkatlice tanımlanmıştır (Bk. Şekil 5). GE tarafından sağlanan bu veriler, optimizasyon çalışmasının doğruluğu ve tutarlılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Kuvvetlerin ve momentin doğru bir şekilde uygulanması, topoloji optimizasyonunun sonuçlarının kalitesini doğrudan etkilemektedir.



Şekil 5. Sınır şartları tanımlanması

2.5 Topoloji optimizasyonu parametreleri

Bu çalışmada topoloji optimizasyonu, ANSYS Mechanical Topology Optimization modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu modül, literatürde yaygın

olarak kullanılan SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) tabanlı yoğunluk yöntemini esas almaktadır. Bu yaklaşımda, her sonlu eleman için bir yoğunluk değişkeni (ρ_e) tanımlanmakta olup $\rho_e=0$ boş bölgeyi, $\rho_e=1$ ise katı bölgeyi ifade etmektedir. Ara yoğunluk değerleri ise cezalandırma katsayısı (p) aracılığıyla sınırlandırılmaktadır. Böylece yapının yalnızca gerekli bölgelerinde malzeme kalması sağlanmaktadır.

Optimizasyon sürecinde “Percent to Retain” parametresi %40 olarak belirlenmiştir. Bu ayar başlangıç geometrisinin yalnızca %40'ının korunacağını kalan %60'lık kısmın ise yük taşıma kapasitesine katkı sağlamadığı durumda algoritma tarafından tasarımdan çıkarılabileceğini ifade etmektedir. Çalışma kapsamında farklı hacim koruma oranlarının topoloji optimizasyon sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla %30, %40 ve %50 olmak üzere üç farklı “Percent to Retain” değeri incelenmiştir. %30 hacim oranında daha yüksek düzeyde kütle azaltımı elde edilmesine rağmen kritik bölgelerde maksimum Von Mises gerilmelerinin belirgin şekilde arttığı ve bazı yüklenme senaryolarında izin verilen gerilme sınırını aştığı gözlenmiştir. %50 hacim oranında ise yapısal gerilmeler daha düşük seviyelerde kalmasına rağmen sağlanan kütle azaltımı sınırlı olmuş ve optimizasyonun hafifletme potansiyeli yeterince değerlendirilememiştir. %40 hacim oranı ise yapısal güvenlik ile ağırlık azaltımı arasında en uygun dengeyi sağlamıştır. Bu hacim oranında elde edilen tasarımda maksimum gerilme değerleri Ti-6Al-4V malzemesi için belirlenen izin verilen sınırlar içerisinde kalırken, başlangıç tasarımına kıyasla %64.3 oranında kütle azaltımı sağlanmıştır. Bu nedenle, %40 “Percent to Retain” değeri hem yapısal bütünlüğün korunması hem de yüksek hafifletme performansının elde edilmesi açısından optimum çözüm olarak seçilmiştir.

Topoloji optimizasyonu sürecinde kullanılan parametreler Tablo 5'te özetlenmiştir. Çözüm, başlangıçta tüm tasarım hacminin dolu kabul edilmesi ile başlatılmıştır. SIMP yöntemine ait penalizasyon katsayısı $p=3$ olarak seçilmiş ve böylece ara yoğunluk değerleri cezalandırılarak yapının yalnızca gerekli bölgelerinde malzeme bırakılması sağlanmıştır. Yoğunluk eşiği 0.5 olarak tanımlanmış yani bu değerin altındaki elemanlar boş, üzerindeki elemanlar dolu kabul edilmiştir. Optimizasyon %1 hacim değişiminden daha küçük fark elde edildiğinde yakınsama kriterine ulaşmış kabul edilmiş, maksimum iterasyon sayısı ise 150 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5. Optimizasyon parametreleri

Parametre	Büyükçlük
Penalizasyon Katsayısı (p)	3
Yoğunluk Eşiği	0.5
Başlangıç Koşulu	$\rho=1$ (tam dolu)
Maksimum İterasyon Sayısı	150
Yakınsama Kriteri	%1 hacim değişimi
Percent to Retain	%40

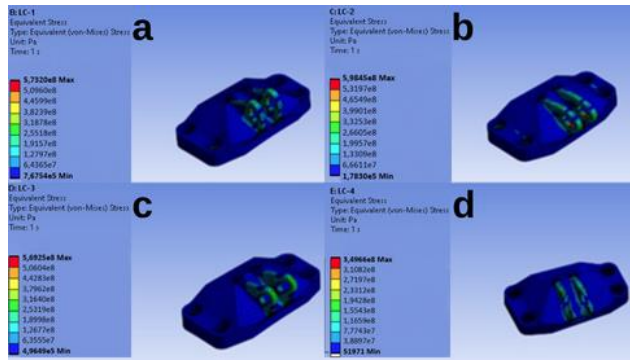
3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, jet motor braketini üzerinde gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu sürecine ait analiz sonuçları ve bu sonuçların değerlendirilmesi sunulmaktadır. Çalışmada elde edilen bulgular, başlangıç tasarımı ile optimize edilmiş tasarımın farklı yüklem senaryoları altındaki davranışlarının karşılaştırılması üzerine kurgulanmıştır. Öncelikle başlangıç tasarımının yapısal performansı incelenmiş, kritik gerilme bölgeleri ve verimsiz malzeme dağılımları belirlenmiştir. Ardından topoloji optimizasyonu ile elde edilen yeni geometrilerin yapısal etkinliği değerlendirilmiş ve düzenlemelerle üretime uygun hale getirilmiş tasarım üzerinde yeniden analizler yapılmıştır. Sonuçlar hem kütle azaltımı hem de yapısal güvenlik açısından karşılaştırmalı olarak ele alınmış, optimize edilen tasarımın farklı senaryolardaki performansı tartışılmıştır.

3.1 Başlangıç tasarımın analiz sonuçları

Mevcut tasarıma ait statik analizler dört farklı sınır şartı altında gerçekleştirilmiştir. Her bir analiz, yapının farklı yüklem koşulları altındaki davranışını ortaya koymakta ve tasarımın zayıf ya da gereksiz malzeme içeren bölgelerini belirlemeye yardımcı olmaktadır.

Birinci sınır şartı altında yapılan analizde başlangıç tasarımının maksimum Von-Mises gerilme değeri 573.20 MPa olarak hesaplanmıştır. İkinci sınır şartı altında gerçekleştirilen analiz sonucunda ise maksimum gerilme değeri 598.45 MPa olarak elde edilmiştir. Üçüncü sınır şartı analizinde maksimum gerilme 569.25 MPa seviyesinde kalmıştır. Dördüncü sınır şartı altında gerçekleştirilen analizde en düşük gerilme değerleri gözlemlenmiş ve maksimum Von-Mises gerilmesi 349.66 MPa olarak hesaplanmıştır (Bk. Şekil 6).



Şekil 6. (a) Birinci, (b) ikinci, (c) üçüncü ve (d) dördüncü sınır şartları altında elde edilen Von Mises gerilme dağılımları

3.2 Topoloji sonrası yeniden modelleme ve üretilebilirlik değerlendirmesi

Topoloji optimizasyonu süreci, parçanın yapısal verimliliğini artırmak ve gereksiz malzeme kullanımını ortadan kaldırmak amacıyla uygulanmıştır. Bu süreç sonunda elde edilen ilk geometri, yük taşıma kapasitesine göre yeniden şekillendirilmiş ve başlangıç tasarımına kıyasla önemli ölçüde hafifletilmiştir. Ortaya çıkan ham

geometri, yalnızca yapısal gerekliliklere dayalı olarak oluşturulmuş olup, üretim süreci açısından bazı eksiklikler barındırmaktadır. Özellikle yüzey pürüzlülüğü, keskin geçişler ve karmaşık iç yapılar gibi özellikler, doğrudan üretime uygun olmayan detaylar olarak dikkat çekmektedir.



Şekil 7. Topoloji Optimizasyonu sonrası ham geometri

Optimizasyon sonucunda elde edilen geometri, GE Jet Engine Bracket Challenge kapsamında tanımlanan üretim gereksinimleri doğrultusunda CAD ortamında yeniden modellenmiştir. Braketin üretim yöntemi olarak Doğrudan Metal Lazer Ergitme (Direct Metal Laser Melting, DMLM) esas alınmıştır. Bu süreçte minimum üretilebilir et kalınlığı 0.05 inç (1.27 mm) olarak tanımlanmış olup, yapısal güvenlik ve üretim kararlılığını artırmak amacıyla tasarımda minimum et kalınlığı 2 mm olarak uygulanmıştır. Desteksiz üretilebilirliği artırmak ve destek yapısı miktarını azaltmak amacıyla 45°'nin altındaki çıkıntılı bölgeler yeniden düzenlenmiştir. Gerektiğinde destek yapısı kullanımının mümkün olduğu değerlendirilmiş ancak destek kaldırma işlemlerini kolaylaştırmak amacıyla erişimi zor kapalı bölgelerden kaçınılmıştır. Üretim sırasında oluşabilecek artık gerilmeler ve çarpılma riskini azaltmak için keskin köşeler yuvarlatılmış, ani kesit geçişleri yumuşatılmış ve mümkün olduğunca simetrik geometrik geçişler tercih edilmiştir.



Şekil 8. Topoloji Optimizasyonu sonrası yeniden modellenen geometri

Kritik bağlantı bölgeleri, yük aktarımının güvenilirliğini sağlamak amacıyla korunmuştur. Birinci bağlantı noktası 0.75 inç (19.05 mm) çapında bir pim ile diğer dört bağlantı noktası ise 0.375 inç (9.525 mm) civatarlarla modellenmiştir. Bu bölgelerde montaj hassasiyetini sağlamak amacıyla ± 0.1 mm boyutsal tolerans hedeflenmiştir. Kritik temas yüzeyleri için ise $Ra < 3.2$ μm yüzey pürüzlülüğü hedeflenmiştir.

3.3 Optimize edilmiş tasarımın analiz sonuçları

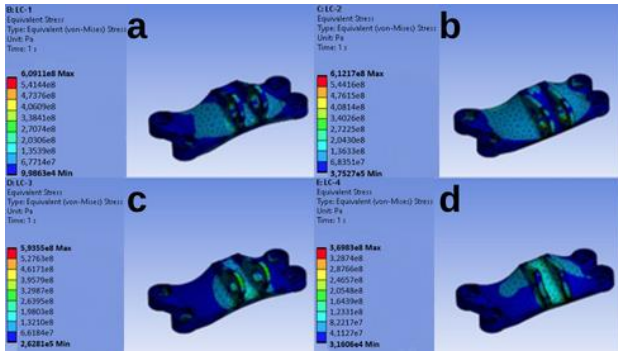
Optimize edilen geometri üzerinde uygulanan statik analizler, ilk tasarımla aynı sınır şartları altında gerçekleştirilmiştir. Böylece hem yapısal performans karşılaştırması yapılabilmiş hem de optimizasyonun etkinliği değerlendirilmiştir.

Birinci sınır şartı altında elde edilen 609.11 MPa'lık maksimum gerilme değeri optimize edilmiş parçanın bu yükleme senaryosunda da güvenli bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu değer Ti-6Al-4V alaşımının akma sınırına yaklaşırsa da izin verilen sınırın altında kalmakta ve yapının güvenli bir şekilde çalışabileceğini doğrulamaktadır.

İkinci sınır şartı altında elde edilen 612.17 MPa'lık maksimum gerilme değeri ise, optimize edilmiş parçanın bu yükleme senaryosunda da başarılı bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir. Bu durum, malzeme kullanımının verimliliğini artırırken, dayanıklılıktan ödün verilmediğini ortaya koymaktadır.

Daha düşük zorlamaları temsil eden üçüncü sınır şartı analizinde, maksimum Von-Mises gerilmesi 593.55 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, parçanın optimize edilmiş haliyle dahi oldukça güvenli bir sınırdaki çalıştığını ve dayanım açısından yeterli olduğunu ortaya koymuştur.

En düşük yükleme koşullarını içeren dördüncü analizde ise maksimum Von-Mises gerilme değeri 369.83 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç, düşük yüklü bölgelerde malzeme azaltımının başarılı bir şekilde uygulandığını ve yapının gereksiz ağırlıktan arındırılarak üretim maliyetinin düşürüldüğünü göstermektedir.



Şekil 9. Optimize edilmiş parçanın (a) birinci, (b) ikinci, (c) üçüncü ve (d) dördüncü sınır şartları altındaki Von Mises gerilme dağılımları

Yapılan analizler ve topoloji optimizasyonu sonucunda mevcut tasarım ve optimize edilmiş tasarımın farklı sınır şartları altındaki maksimum gerilme değerleri Tablo 6'da, kütle ve hacim karşılaştırması Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 6. Başlangıç ve optimize tasarımın maksimum gerilme değerleri

Sınır Şartı	Başlangıç Tasarım	Optimize Tasarım
Birinci	573.20 MPa	609.11 MPa
İkinci	598.45 MPa	612.17 MPa
Üçüncü	569.25 MPa	593.55 MPa
Dördüncü	349.66 MPa	369.83 MPa

Tablo 7. Başlangıç ve optimize tasarımın kütle-hacim karşılaştırması

Parametre	Başlangıç Tasarım	Optimize Tasarım
Kütle	2.05167 kg	0.73138 kg
Hacim	463.2574 cm ³	165.1431 cm ³

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, General Electric tarafından sağlanan GE Jet Engine Braket modeli üzerinde eklemeli imalat için üretilebilirlik kriterleri dikkate alınarak yoğunluk tabanlı topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Başlangıç geometrisi çoklu yükleme koşulları altında sonlu eleman analizleri ile değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda ANSYS Mechanical Topology Optimization modülünde SIMP yöntemi kullanılarak yapısal açıdan verimsiz bölgelerdeki malzeme uzaklaştırılmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen ham geometri, CAD ortamında yeniden modellenmiş ve eklemeli imalat kısıtları dikkate alınarak üretilebilir hale getirilmiştir.

Yeniden modellenen nihai tasarım üzerinde gerçekleştirilen doğrulama analizleri sonucunda maksimum Von Mises gerilmesi 612.17 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Ti-6Al-4V malzemesinin 950 MPa akma dayanımı esas alınarak 1.5 emniyet katsayısı ile belirlenen 633 MPa izin verilen gerilme sınırının altında kalmıştır. Başlangıç tasarımında elde edilen maksimum Von Mises gerilmesi 598.45 MPa olup efektif emniyet katsayısı yaklaşık 1.59 olarak hesaplanırken, topoloji optimizasyonu sonrasında maksimum gerilme değerinin 612.17 MPa'a yükselmesiyle efektif emniyet katsayısı yaklaşık 1.55 seviyesine düşmüştür. Buna rağmen optimizasyon sonucunda braket kütlesi 2.05167 kg'dan 0.73138 kg'a düşürülmüş ve yaklaşık %64.3 oranında hafifletme elde edilmiştir. Böylece yüksek oranda hafifletme elde edilmesine rağmen emniyet katsayısındaki azalma yalnızca yaklaşık %2.5 düzeyinde kalmıştır. Elde edilen hafifletme oranı ve emniyet katsayısı değerleri literatürde aynı GE Jet Engine Bracket modeli üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar ile uyumludur. Mohamed vd. [28] yaklaşık %60.5, Gülbahçe vd. [29] yaklaşık %76.7, Mohiuddin ve Khan [30] ise yaklaşık %61.6 oranında kütle azaltımı rapor etmiştir. Ayrıca Le vd. [31] yaklaşık 1.43, Wan Muhamad vd. [32] ise yeniden modelleme sonrası yaklaşık 1.4 seviyesinde emniyet katsayısı elde etmiştir. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, bu çalışmada elde edilen yaklaşık %64.3'lük hafifletme oranının literatürde bildirilen çalışmalar ile benzer seviyede olduğu, buna karşın yaklaşık 1.55'lik efektif emniyet katsayısının korunabilmiş olması nedeniyle optimize edilen tasarımın hafiflik ile yapısal

güvenlik arasında dengeli bir çözüm sunduğu görülmektedir.

Optimize edilmiş yapının yapısal davranışı detaylı olarak incelendiğinde ise maksimum gerilmelerin özellikle bağlantı bölgeleri, yük aktarım noktaları ve kesit geçişlerinde lokal gerilme yığılması şeklinde oluştuğu gözlenmiştir. Bu durumun temel nedeni topoloji optimizasyonu sürecinde yük taşımayan bölgelerdeki malzemenin uzaklaştırılmasıyla birlikte yük yollarının daha dar kesitler üzerinden aktarılmasıdır. Yoğunluk tabanlı optimizasyon algoritmaları, yapısal kütleyi minimize ederken kritik yük bölgelerinde yalnızca gerekli minimum malzemeyi bırakmakta ve böylece yapısal verimliliği artırmaktadır. Bu nedenle optimize edilmiş yapılarda gerilmelerin sınır değerlere yaklaşması beklenen bir durum olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda bu sonuç, yük taşıyan bölgelerde daha etkin bir malzeme dağılımı elde edildiğini göstermektedir. Yeniden modelleme aşamasında uygulanan radyus geçişleri ve geometrik iyileştirmeler sayesinde ani gerilme yoğunlaşmalarının azaltılması hedeflenmiş ve tüm analiz senaryolarında yapının elastik bölgede çalıştığı doğrulanmıştır. Bununla birlikte çalışma yalnızca statik yüklenme koşulları altında gerçekleştirilmiş; yorulma davranışı, titreşim etkileri, termal yükler ve malzeme anizotropisi kapsam dışında bırakılmıştır. Bu nedenle gelecekte deneysel doğrulama testleri ile birlikte yorulma, modal ve termo-mekanik analizlerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

CRedit yazarlık katkı beyanı

Kazım Canberk Elmas: Kavramsallaştırma, Veri düzenleme, Formal analiz, Araştırma, Yöntem, Yazılım, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma-ilk taslak, Yazma-inceleme ve düzenleme; **Ayşe Öndürücü:** Kavramsallaştırma, Yöntem, Danışmanlık, Doğrulama, Proje yönetimi, Yazma-inceleme ve düzenleme

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Yazım sürecinde üretken yapay zekâ (YZ) ve YZ destekli teknolojilerin kullanımına ilişkin beyan

Yazarlar, bu çalışmanın hazırlanmasında herhangi bir yapay zekâ aracı kullanmamıştır.

Kaynaklar

- [1] İ. Saraç and A. T. Koçak, "Topology optimization and numerical verification in an aircraft engine bracket," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(1), 325–335, 2024. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1329278>.
- [2] S. Coniglio, J. Morlier, C. Gogu and R. Amargier, "Generalized geometry projection: a unified approach for geometric feature based topology optimization," *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(5), 1573–1610, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09362-8>
- [3] G.I. Rozvany, "A critical review of established methods of structural topology optimization," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 37(3), 217–237, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00158-007-0217-0>.
- [4] F. Kahraman ve M. Küçük, "Otomotiv endüstrisinde topoloji optimizasyonu ile ağırlık azaltma uygulaması üzerine bir araştırma," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 20, 623–631, 2020. <https://doi.org/10.31590/ejosat.789424>.
- [5] M. M. Topaç, E. Bahar, A. Kaplan ve E. Z. Sarıkaya, "Topoloji optimizasyonu yardımıyla, askeri taşıt bağımsız ön süspansiyonu için alt salıncak tasarımı," *IDEFIS, 2. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu*, 2017.
- [6] M. Attaran, "The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing," *Business Horizons*, 60, 677–688, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>.
- [7] R. Brighenti, M. P. Cosma, L. Marsavina, A. Spagnoli and M. Terzano, "Laser-based additively manufactured polymers: a review on processes and mechanical models," *Journal of Materials Science*, 56, 961–998, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05254-6>.
- [8] M. Peters, J. Kumpfert, C. H. Ward and C. Leyens, "Titanium alloys for aerospace applications," *Advanced Engineering Materials*, 5(6), 419–427, 2003. <https://doi.org/10.1002/adem.200310095>.
- [9] H. D. Morgan, H. U. Levatti, J. Sienz, A. J. Gil and D. C. Bould, "GE Jet engine bracket challenge: a case study in sustainable design," *International Conference on Sustainable Design and Manufacturing*, 95–107, 2014.
- [10] D. Brackett, I. Ashcroft and R. Hague, "Topology optimization for additive manufacturing," *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX*, 1, 348–362, 2011.
- [11] S. T. Lim and T. T. Wong, "Unleash the potential of additive manufacturing with topology optimization," *AIP Conference Proceedings*, 2035(1), 040007, 2018.
- [12] S. S. Alghamdi, S. John, N. Roy Choudhury and N. K. Dutta, "Additive manufacturing of polymer materials: progress, promise and challenges," *Polymers*, 13(5), 753, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13050753>.
- [13] S. Junk, B. Klerch, L. Nasdala and U. Hochberg, "Topology optimization for additive manufacturing using a component of a humanoid robot," *Procedia CIRP*, 70, 102–107, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.270>.
- [14] M. Leary, L. Merli, F. Torti, M. Mazur and M. Brandt, "Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures," *Materials & Design*, 63, 678–690, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.015>.
- [15] M. Tomlin and J. Meyer, "Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part," *Proceedings of the 7th Altair CAE Technology Conference*, 1–9, 2011.
- [16] M. P. Rossow and J. E. Taylor, "A finite element method for the optimal design of variable thickness

- sheets,” *AIAA Journal*, 11(11), 1566–1569, 1973. <https://doi.org/10.2514/3.50631>.
- [17] M. P. Bendsøe and N. Kikuchi, “General optimal topologies in structural design using a homogenization method,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 93, 291–318, 1988. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2).
- [18] L. A. Schmit, “Structural design by systematic synthesis,” *Proceedings of the Second National Conference on Electronic Computation*, 105–132, 1960.
- [19] O. Koçar, “Dorse tasarımında stres dağılım analizi ve topoloji optimizasyonu,” *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 309–316, 2018.
- [20] E. İ. Albak, “Formula SAE aracında ağırlık azaltılmasına yönelik fren pedalının topoloji optimizasyonu yöntemiyle optimum tasarımı,” *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 328–334, 2019. <https://doi.org/10.29137/umagd.467057>.
- [21] S. Erden ve S. Yalçınkaya, “Uçak koltuğunun yapısal analizi ve topoloji optimizasyonu,” *Mühendislik Alanında*, 121, 2020.
- [22] K. Özsoy, E. Şentürk, D. Aydoğan ve Ö. E. Korucu, “3B yazıcı teknolojisi için topoloji optimizasyonu: N95 maske üzerine bir çalışma,” *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, Özel Sayı, 152–159, 2020. <https://doi.org/10.46810/tdfd.754863>.
- [23] P. Deshmukh, “Topology optimization of wheel rim of heavy vehicle,” *International Journal of Current Advanced Research*, 7(6), 13289–13291, 2018. <https://doi.org/10.24327/ijcar.2018>.
- [24] P. M. Ingale, “Topology optimization of an all-terrain vehicle brake pedal,” *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(6), 763–767, 2019.
- [25] R. Dhore and M. L. Thorat, “Experimental analysis and topology optimization of lower suspension arm of car,” *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6(3), 7605–7609, 2019.
- [26] M. Seabra, J. Azevedo, A. Araújo, L. Reis, E. Pinto, N. Alves, R. Santos and J.P. Mortágua, “Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components,” *Procedia Structural Integrity*, 1, 289–296, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.039>
- [27] E. Brusa, R. Sesana and E. Ossola, “Numerical modeling and testing of mechanical behavior of AM titanium alloy bracket for aerospace applications,” *Procedia Structural Integrity*, 5, 753–760, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.166>.
- [28] A. I. Mohamed, A. A. Abdelmonaem and M. Adly, “Optimal design of jet engine bracket,” *2nd IUGRC International Undergraduate Research Conference, Military Technical College, Cairo, Egypt*, 24–27 July 2017.
- [29] E. Gülbahçe, H. Ç. Sezgen ve A. Çakan, “Topology design and modal analysis of a bracket via FEA,” *Applied Engineering Letters*, 4(3), 102–105, 2019. <https://doi.org/10.18485/aeletters.2019.4.3.5>.
- [30] M. V. Mohiuddin and M. M. A. Khan, “Re-design of an aircraft bracket using topology optimization technique,” *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 7(11), 42–53, 2020. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V7I11P106>.
- [31] V. K. Le, T. V. Truong, Q. N. Banh and M. T. Ho, A comprehensive SIMP-based topology optimization study for structural components: GE Bracket and 3D-printer Adapter applications,” *Results in Control and Optimization*, vol. 23, p. 100697, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2026.100697>.
- [32] W. M. Wan Muhamad, M. N. Reshid, K. A. Abd Wahid and M. N. F. Saniman, “Mass reduction of a jet engine bracket using topology optimisation for additive manufacturing application,” *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 29, no. 8s, pp. 4438-4444, 2020.
- [33] GE Jet Engine Bracket Challenge, GE Jet Engine Bracket Challenge. <https://grabcad.com/challenges/ge-jet-engine-bracket-challenge> [Accessed May. 26, 2026]

