

## Metal Eklemeli İmalatta Topoloji Optimizasyonu Uygulamaları

Büşra ÇALIK<sup>1\*</sup> Gültekin UZUN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi University, Technology Faculty, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Turkey

### Article Info

Research article  
Received: 03/09/2024  
Revision: 14/10/2024  
Accepted: 23/10/2024

### Anahtar Kelimeler

Metal Eklemeli İmalat  
Topoloji Optimizasyonu  
Üretim Verimliliği  
Sürdürülebilir Üretim  
Yapısal Verimlilik

### Makale Bilgisi

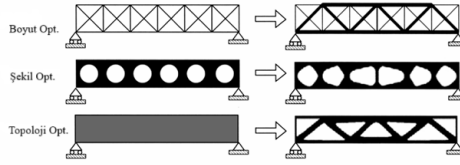
Araştırma makalesi  
Başvuru: 03/09/2024  
Düzeltilme: 14/10/2024  
Kabul: 23/10/2024

### Keywords

Metal Additive  
Manufacturing  
Topology Optimization  
Manufacturing Efficiency  
Sustainable Manufacturing  
Structural Efficiency

### Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji optimizasyonunun entegre olduğu çalışmalar ele alınmıştır. Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonunun entegrasyonu, havacılık, otomotiv ve medikal gibi sektörlerde verimliliği artırmak, maliyetleri düşürmek ve sürdürülebilir üretimi desteklemek için uygulanmaktadır. Bu yöntemle, karmaşık geometrilere sahip, hafif ve dayanıklı parçalar üretilebilirken, üretim sürecindeki malzeme ve enerji verimliliği de artırılmaktadır. Çalışma sonuçlarına göre, metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun bir arada kullanılması, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerde yenilikçi çözümler sunmaktadır.



Şekil A: Boyut, Şekil ve Topoloji Optimizasyonunun Karşılaştırmalı Gösterimi / Figure A: Comparative Representation of Size, Shape, and Topology Optimization

### Önemli noktalar (Highlights)

- Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonu Entegrasyonu, daha hafif, dayanıklı ve verimli yapılar elde edilmesini sağlar. / The integration of Metal Additive Manufacturing and Topology Optimization enables the creation of lighter, stronger, and more efficient structures.
- Üretim sürecinde yüzey kalitesi, destek yapı gereksinimleri ve malzeme anizotropisi gibi kısıtlamalar dikkate alınmıştır. / Considerations include limitations such as surface quality, support structure requirements, and material anisotropy in the manufacturing process.
- Bu teknolojilerin kullanımı ile maliyetlerin azaltılması ve sürdürülebilir üretim sağlanması hedeflenmektedir. / The use of these technologies aims to reduce costs and support sustainable manufacturing.

**Amaç (Aim):** Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonunun entegre edildiği çalışmalar incelenerek bu alanda yapılacak akademik araştırmalara ve özel sektör uygulamalarına katkıda bulunması amaçlanmaktadır. / This study aims to contribute to future academic research and private sector applications by reviewing studies that integrate metal additive manufacturing and topology optimization.

**Özgünlük (Originality):** Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonunun üretimde verimliliği artırma potansiyeline dair giderek artan ilgi doğrultusunda, bu alandaki güncel akademik ve endüstriyel çalışmalar, yerli ve yabancı kaynaklar taranarak sistematik bir şekilde bir araya getirilmiştir. / In response to the growing interest in the potential of metal additive manufacturing and topology optimization to enhance production efficiency, recent academic and industrial studies in this field have been systematically compiled by reviewing both domestic and international sources.

**Bulgular (Results):** Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonunun entegrasyonunun, üretimde malzeme verimliliği, maliyet azaltımı, daha dayanıklı ve hafif yapıların, karmaşık geometrilerin üretimi gibi konularda sağladığı katkılar ve kısıtlamalar ortaya konulmuştur. / The integration of metal additive manufacturing and topology optimization has demonstrated contributions and limitations in terms of material efficiency, cost reduction, production of complex geometries, and industrial applications in manufacturing.

**Sonuç (Conclusion):** Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonu entegrasyonu, üretimde verimlilik, maliyet azaltımı ve yenilikçi tasarımlar açısından önemli avantajlar sunmaktadır. / The integration of metal additive manufacturing and topology optimization offers significant advantages in terms of efficiency, cost reduction, and innovative designs in production.



## Metal Eklemeli İmalatta Topoloji Optimizasyonu Uygulamaları

Büşra ÇALIK<sup>1\*</sup> Gültekin UZUN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi University, Technology Faculty, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Turkey

### Makale Bilgisi

Research article  
Received: 03/09/2024  
Revision: 14/10/2024  
Accepted: 23/10/2024

### Anahtar Kelimeler

Metal Eklemeli İmalat  
Topoloji Optimizasyonu  
Üretim Verimliliği  
Sürdürülebilir Üretim  
Yapısal Verimlilik

### Öz

Geleneksel çıkarmalı üretim metodolojilerinin aksine metal malzemelerin direkt olarak 3D-CAD verilerinden alınarak katman katman inşa edilmesi süreci olarak tanımlanan metal eklemeli imalat günden güne yoğun bir talep görecik çalışmalara konu olmaktadır. Bu araştırma çabalarından bazıları fizik, istatistiksel veya yapay zekâ odaklı süreç modelleme ve optimizasyonu, yapı-özellik karakterizasyonu, yapısal tasarım optimizasyonu veya maliyetlerin azaltılması ve daha hızlı üretim için ekipman iyileştirmeleriyle ilişkilidir. Özellikle, havacılık gibi, karmaşık geometrili, yüksek ölçü hassasiyetine sahip ve hafif bileşenlerin hızlı bir şekilde üretilmesinin istendiği kritik sektörlerde metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar giderek yaygınlaşmaktadır. Bu teknoloji, tasarım esnekliği ve malzeme kullanımında optimize edilmiş çözümler sunarken, üretim sürecinde israfı azaltarak sürdürülebilirlik açısından da büyük avantaj sağlamaktadır. Geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan karmaşık geometrilere sahip yapıların üretimini mümkün kılan metal eklemeli imalat, aynı zamanda daha düşük maliyetli ve daha hafif ürünler sunarak, endüstriyel devrim niteliğinde bir gelişme göstermektedir. Bu çalışma, metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun endüstriyel uygulamadaki potansiyelini değerlendirmektedir. Aynı zamanda karşılaşılan yüzey pürüzlülüğü, destek yapı gereksinimleri ve üretim sonrası işlemler gibi kısıtlamaları da ele almaktadır. Gelecekte, bu kısıtların üstesinden gelinmesi için gelişmiş malzeme teknolojileri ve yeni optimizasyon algoritmalarının kullanımı sayesinde, bu iki teknolojinin entegrasyonunun daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Bu çalışmanın sonucunda eklemeli imalatın endüstriyel tasarımda düşük maliyetli üretimlerin önünü açarak daha yenilikçi ve verimli bir yaklaşıma öncülük etmesi beklenmektedir.

## Application of Topology Optimization in Metal Additive Manufacturing

### Article Info

Araştırma makalesi  
Başvuru: 03/09/2024  
Düzelme: 14/10/2024  
Kabul: 23/10/2024

### Keywords

Metal Additive  
Manufacturing  
Topology Optimization  
Manufacturing Efficiency  
Sustainable  
Manufacturing  
Structural Efficiency

### Abstract

Metal additive manufacturing which is defined as the process of building metal materials layer by layer directly from 3D-CAD data, in contrast to traditional subtractive manufacturing methodologies, is becoming increasingly popular and a subject of intense study. Some of these research efforts focus on process modeling and optimization through physics-based, statistical, or artificial intelligence approaches, as well as structure-property characterization, structural design optimization, and equipment improvements to reduce costs and enable faster production. Particularly in critical sectors such as aerospace, where the rapid production of complex, high-precision, and lightweight components is essential, studies on metal additive manufacturing and topology optimization are becoming increasingly prevalent. This technology offers optimized solutions in terms of design flexibility and material utilization, while reducing waste in the production process and providing significant advantages for sustainability. Metal additive manufacturing, which enables the production of complex geometries that are difficult to achieve using traditional methods, also delivers lower-cost and lighter products, marking an industrial revolution. This study assesses the potential of metal additive manufacturing and topology optimization in industrial applications, while also addressing constraints such as surface roughness, support structure requirements, and post-processing challenges. In the future, the integration of advanced material technologies and new optimization algorithms is expected to overcome these constraints. Consequently, the widespread adoption of these two technologies is anticipated to further facilitate cost-effective production, positioning additive manufacturing as a more innovative and efficient approach in industrial design.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

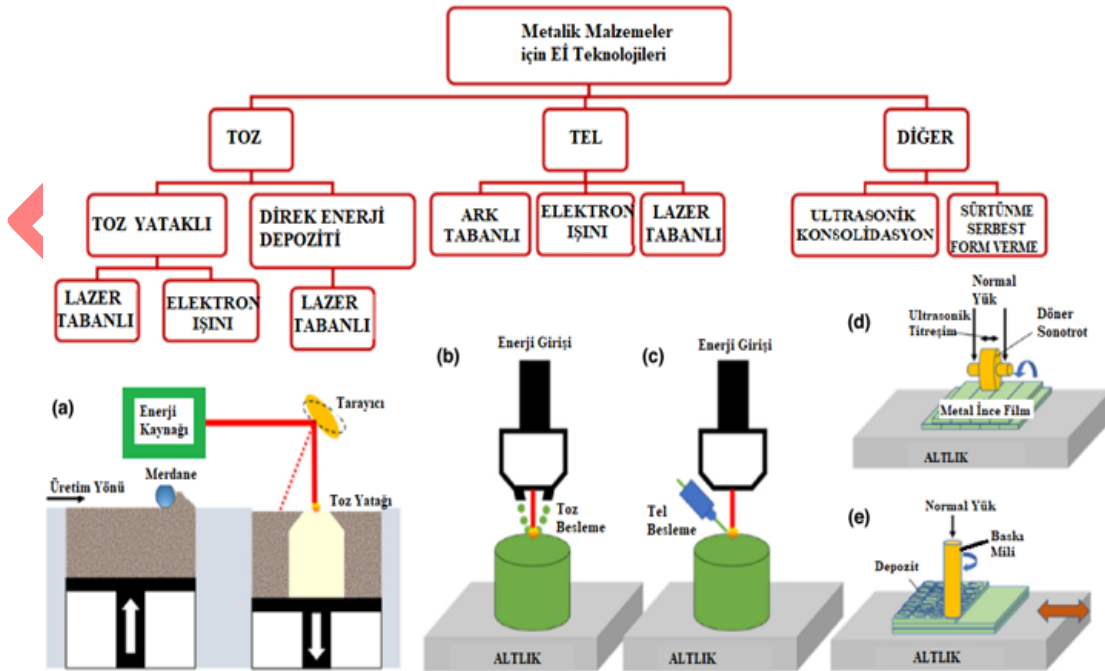
Metal Eklemeli İmalat (MEİ) 3D yazıcılar kullanılarak metal malzemelerin katman katman inşa edilmesi süreci olarak tanımlanmaktadır. MEİ geleneksel çıkarmalı üretim yöntemleri ile üretimi mümkün olmayan fonksiyonel ve karmaşık yapıların hızlı ve verimli bir şekilde üretilmesine olanak tanıyarak atık materyalin azalmasına yardımcı olur. Tasarım özgürlüğü ve hızlı prototipleme imkanı sunarak geleneksel üretim yöntemlerinin kısıtladığı tasarım parametrelerinin sınırlarını ortadan kaldırır. Net şekle yakın üretim ve karmaşık geometri yapıların eklemeli imalat yöntemleri ile üretilebilirliği mümkündür. Üretim sürecinde ekstra takım maliyetleri oluşturmaz. Bu teknolojinin gelişmesi yüksek mukavemetli, hafif yapıların daha yaygın bir şekilde üretilmesine olanak tanır ve bu da bir dizi endüstri için yenilikçi çözüm önerileri sunmaktadır [1-6].

Metal Eklemeli İmalat sistemlerinin sınıflandırılması çeşitli şekillerde yapılmaktadır. En sık kullanılan sınıflandırma yöntemi prosese göre yapılan sınıflandırma iken enerji kaynağına göre, hammaddenin kullanım biçimine göre veya malzemenin birleştirilme yöntemine göre yapılan sınıflandırmalar da mevcuttur. Elektron ışını, lazer vb. kaynaklar enerji kaynağı olarak kullanılır. Hammaddenin kullanım şekli toz, tel veya levha olarak farklılık gösterirken kullanılan malzemenin birleştirilme yöntemi lazer veya bağlayıcı olabilir. Şekil 1'de kullanılan hammadde şekline göre proseslerin sınıflandırılması verilmiştir [3].

Prosesler toz besleme sistemleri, toz yatak sistemleri ve tel besleme sistemleri olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Bu sistemler için enerji kaynağı farklılık gösterebilir [1-4].

Toz yatak sistemlerinde oluşturulan toz yatağının üzerine elektron ışını (EBM) veya lazer ışını (SLM, DMLS ya da SLS) enerji kaynakları ile enerji verilerek toz istenilen forma getirilir. Toz besleme sistemlerinde (LENS, DED) tozlar nozul aracılığıyla platform üzerine iletilir ve lazer, tozu istenilen formda eritmek için kullanılır. Tel besleme sistemlerinde ise besleme stoğu teldir ve enerji kaynağı elektron ışını, lazer veya plazma arki olabilir [1-3].

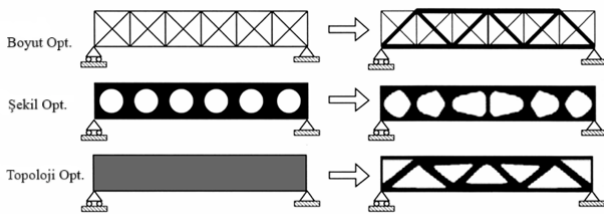
Optimizasyon, bir problem ya da süreç için belirli kısıtlar ve hedefler doğrultusunda en iyi (optimum) çözümü bulma işlemidir. Başka bir deyişle, belirli bir hedefe (örneğin maliyetin düşürülmesi, kaliteyi artırma, hız kazanma) ulaşmak için mevcut kaynakların (zaman, malzeme, enerji vb.) en verimli şekilde kullanılmasıdır. Eklemeli imalat süreçlerinde verimliliği artırmak, malzeme kullanımını ve üretim süresini minimize etmek, maliyetleri düşürmek ve yapısal dayanımı artırmak için optimizasyon teknikleri kullanılır. Bu süreçte en yüksek performansı elde etmek amacıyla kaynakların en etkili şekilde kullanılması hedeflenir [5].



Şekil 1. Metal Eklemeli İmalat sistemleri sınıflandırılması [3] (Classification of Metal Additive Manufacturing Systems)

Ekllemeli İmalat için incelenen üç ana optimizasyon türü artan karmaşıklık ve kapsam sırasına göre Boyut Optimizasyonu, Şekil Optimizasyonu ve Topoloji Optimizasyonu olarak kategorilere ayrılabilir. Topoloji optimizasyonu (TO) Mekanik tasarım ile ilgili problemlerde, bir ürünün boyutu, şekli ve topolojisinin ayrı ayrı veya eş zamanlı olarak optimize edildiği yapısal bir optimizasyon kavramı olarak ortaya çıkmıştır. Bu kavramlar, ürünü geliştirme aşamasında en uygun şekil, boyut ve malzeme dağılımını bulmak için önem içermektedir. Şekil 2'de gösterildiği gibi boyut optimizasyonu, bir nesnenin boyutunun (uzunluk, genişlik veya derinlik) optimizasyonu ile ilgilidir; şekil optimizasyonu ise parçadaki açıklıkların en uygun şeklini bulmaktır; topoloji optimizasyonu ise hem boyut hem de şekil dahil olmak üzere parçanın tüm geometrisinin optimize edilmesiyle ilgilidir. Topoloji Optimizasyonu ve şekil veya boyut optimizasyonu arasındaki temel farklar geometrik konfigürasyon ve değişkenlerin seçimidir, bu da yapısal performansta önemli değişikliklere yol açmaktadır [8-10].

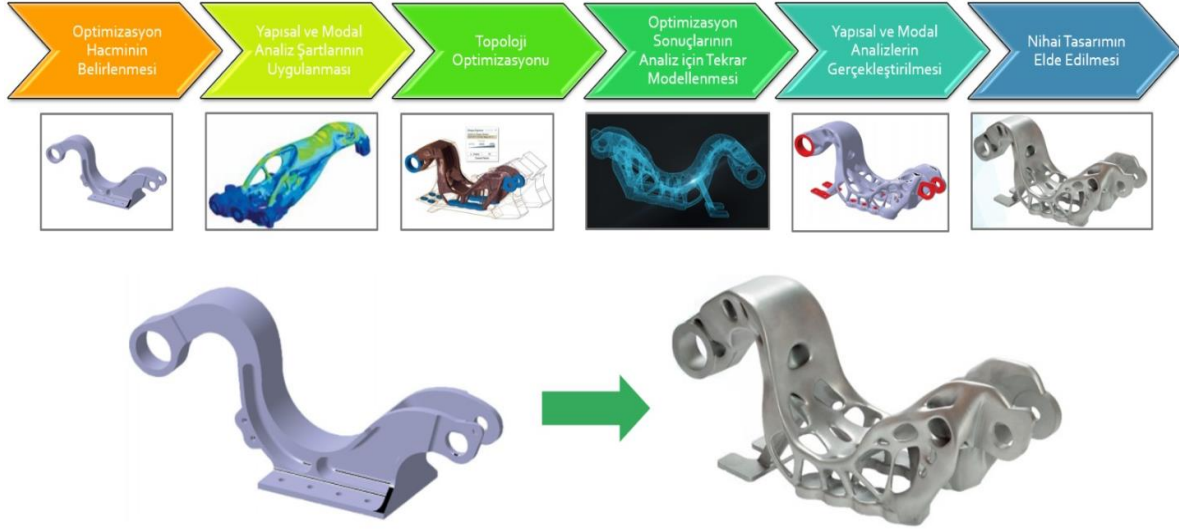
Topoloji Optimizasyonu yapısal performans veya ağırlık ile ilgili kısıtlamaları ihlal etmeden istenilen hedeflere ulaşmak için tasarım değişkenlerini ayarlayarak bir yapının tasarımını iyileştirir. Belirli bir tasarım alanı içindeki malzeme dağılımını belirli bir yük ve sınır koşulları için optimize eden ve belirlenen tasarım ve üretim hedefine ulaşmada kolaylık sağlayan bir yaklaşımdır. Parçanın uygulanan yükleri yeterince desteklemeyen, önemli deformasyona uğramayan ve genel performansına katkıda bulunmayan alanlardan malzemenin kaldırılarak hafifletilmesi amacıyla uygulanır [9]. Topoloji uygulamalarındaki hedef sertliği en üst düzeye çıkarmak, üretilebilirliği sağlamak, stresi azaltmak, hafif yapıların üretimini mümkün kılmak ve üretim maliyetlerini düşürmek olarak sıralanabilir [7-8].



**Şekil 2.** Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonunun karşılaştırmalı gösterimi [8] (Comparative Representation of Size, Shape, and Topology Optimization)

Topoloji optimizasyon yöntemlerinin büyük bir kısmı, Şekil 3'teki topoloji optimizasyon aşamalarında gösterildiği üzere Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) konsepti, Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) konsepti ve çeşitli optimizasyon algoritmalarının farklı üretim teknikleri göz önünde bulundurularak bir arada kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Başlangıç olarak bir 3D CAD modelleme yazılımında orijinal CAD tasarımı çizilir. Daha sonra orijinal tasarım, gerilim ve yer değiştirme dağılımını görmek amacıyla verilen yükleme koşullarıyla yapısal olarak analiz edilir. Gerilme ve yer değiştirme dağılımına bağlı olarak topoloji optimizasyonu ile uygulanan yüklerin taşınmasına önemli ölçüde katkıda bulunmayan alanlardan malzeme kaldırılır. Topoloji optimizasyonu sonucuna göre parça bir CAD yazılımı aracılığıyla yeniden modellenir. Yeni CAD modeli, yükleri taşımak ve tasarım gereksinimlerini karşılamak için FEA ile doğrulanır. Yeni oluşturulan model doğrulamayı karşılıyorsa, fiziksel model doğrulaması, fiziksel prototip oluşturma yöntemlerinden herhangi biri kullanılarak yapılır. Değil ise, doğrulama tamamlanana kadar yeniden modellenir. Nihai tasarım daha sonra nihai katmanlı imalata yönelik hazırlanır [8].

MEİ yoluyla metal parçaların geliştirilmesi, diğer polimer bazlı süreçlerin aksine, tasarım ve süreçle ilgili benzersiz zorluklar ortaya çıkarır. Metal parçaların üretiminde, yüksek sıcaklıkların sebep olduğu malzeme deformasyonları, katmanlar arası yapışma kalitesi ve karmaşık geometrilerde destek yapılarına olan ihtiyaç gibi teknik engeller, bu süreci daha karmaşık hale getirir. Ayrıca, malzeme anizotropisi ve parçanın nihai performansını etkileyen üretim sonrası işlemler gibi ek zorluklar da bulunmaktadır [10]. Bu noktada, topoloji optimizasyonu (TO), bu zorlukların üstesinden gelmek ve malzeme kullanımını en aza indirirken aynı zamanda yapısal dayanımı ve performansı artırmak için uygun bir araç olmuştur [11]. Endüstride ayrılmaz bir ikili haline gelen MEİ ve TO özellikle uzay ve havacılık alanlarında karmaşık yapıların üretilebilirliğini, geleneksel üretim yöntemleriyle mümkün olmayan çoklu yapıların tek yapı altında toplanmasını ve havacılıkta büyük öneme sahip olan hafifletme çalışmalarını mümkün kıldığı için uygulama alanı bulmaktadır [14].



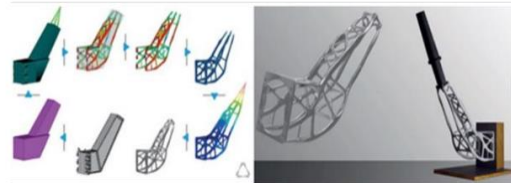
Şekil 3. Topoloji Optimizasyonu süreci [9] (Process of Topology Optimization)

Bu çalışmanın amacı, metal eklemeli imalat (MEİ) ve topoloji optimizasyonu (TO) teknolojilerinin entegrasyonunun endüstriyel uygulamadaki potansiyelini incelemektir. Metal eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha karmaşık ve fonksiyonel parçaların üretimini mümkün kılarken, topoloji optimizasyonu, malzeme kullanımını minimize ederek yapısal verimliliği artırma yeteneği sunmaktadır [15]. Bu bağlamda çalışmamız, özellikle havacılık, otomotiv ve medikal sektörlerinde bu iki teknolojinin nasıl uygulandığını ve sağladığı avantaj ve dezavantajları değerlendirmektedir. Metal eklemeli imalatın sunduğu esneklik ile topoloji optimizasyonunun sağladığı verimlilik avantajı, sürdürülebilir ve düşük maliyetli çözümler sunarak endüstriyel devrimde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılan topoloji optimizasyonu, bu teknolojiyi daha stratejik bir üretim aracı haline getirmiştir [16]. Bu çalışma, bu teknolojilerin gelecekteki entegrasyon potansiyelini ortaya koyarak, daha verimli ve yenilikçi üretim süreçleri geliştirme konusundaki önemini vurgulamaktadır.

## 2. HAVACILIK VE UZAY SEKTÖRÜNDE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU UYGULAMALARI (APPLICATIONS OF TOPOLOGY OPTIMIZATION IN THE AVIATION AND AEROSPACE INDUSTRY)

Havacılık ve uzay sektöründe yapıları hafifletme, verimliliği en üst düzeye çıkarma, karmaşık geometrili yapıların ve hassas ölçülerin üretilebilirliğini sağlama çabaları araştırmacıları topoloji optimizasyonu ile ilgili çalışmalara sevk etmiştir.

Bir çalışmada RUAG şirketi ve Altair tarafından geliştirilen Sentinel-1A ve Sentinel-1B uydularının braketleri geleneksel imalatla karşılaştırılmak üzere MEİ teknikleri kullanılarak EOS 400 model makinede DMLS yöntemiyle AlSi10Mg malzemeden imal edilmiştir. Başlangıçta 1.6 kg olan braket RUAG şirketinin, topoloji optimizasyonu uygulaması sonucunda 940 gr'a düşmüştür. Ağırlıkta %40 azalma görülürken braketin sertliği %30 oranında artmıştır. Braketin optimizasyon öncesi ve üretim sonrası hali Şekil 4'te görülmektedir [12].



Şekil 4. Sentinel-1A ve Sentinel-1B uydularının anten braketinin TO süreci [12] (Topology Optimization Process of the Antenna Bracket for Sentinel-1A and Sentinel-1B Satellites)

Başka bir çalışmada bir İHA tasarımcısı ve üreticisi olan Cobra Aero bir İHA motorunun kütesini azaltmak ve ısı transfer özelliklerini optimize etmek için TO uygulaması yapmışlardır. Minimum destek kullanılacak şekilde başlangıçta altı parçadan oluşan bir motor silindirin tek parça olacak şekilde geliştirmişlerdir. Altı parçadan oluşan hava soğutma silindirin başlangıçta ağırlığı 80 gr gelmektedir. Cobra Aero, motor silindirin ağırlığını topoloji optimizasyonu sonrası Eİ yöntemleri ile 420 gr'a düşürmüştür [13-14].

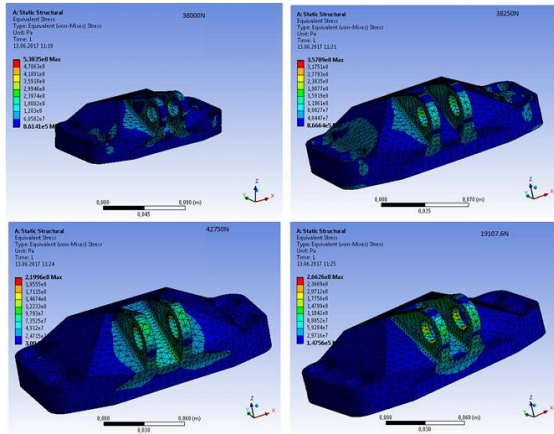


Şekil 5. İHA motorlarının hava soğutmalı silindiri [13] (Air-Cooled Cylinder of UAV Engines)

Diğer bir çalışmada bir jet motoru braketi, topoloji optimizasyonlu tasarım yaklaşımının, katmanlı imalatla birleştirildiğinde bir ürünün ağırlığını azaltma potansiyelini gösteren bir örnek olay çalışması olarak ele alınmıştır. Orijinal braket General Electric (GE) tasarımına dayanmaktadır. Orijinal braketin gerilim dağılımını görmek için orijinal braket üzerinde sonlu elemanlar analizi yapılır. Şekil 6'da gösterilen kontur grafikleri, parçada oluşan tüm yük durumları için Von Mises gerilim dağılımını göstermektedir. Kontur grafiğinde mavi ile gösterilen alanlar malzemenin verimsiz kullanıldığını ve bu alanlardan malzemenin kaldırılabilirliğini göstermektedir.

- Malzeme, oda sıcaklığında (23°C) 904 MPa varsayılan akma dayanımına sahip Ti6Al4V idi.
- Minimum malzeme özelliği boyutu (duvar kalınlığı): 1.13 mm

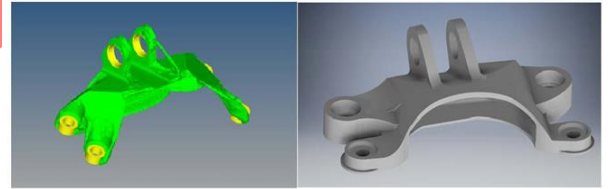
Topoloji optimizasyon aracı, tüm yükler için parça üzerindeki gerilim ve yer değiştirme dağılımını ayrı ayrı hesaplar. Gerilme ve yer değiştirme dağılımına bağlı olarak, daha az yükü destekleyen veya yükün desteklenmesine önemli ölçüde katkıda bulunmayan alanlar kaldırılarak Şekil 7 'de gösterildiği gibi doğal bir geometri elde edilmiştir.



Şekil 6. Orijinal braketin sonlu elemanlar analizi [7] (Finite Element Analysis of the Original Bracket)

Jet motoru braketine TO uygulanmasındaki amaç tüm tasarım gereksinimlerini karşılarken braketin ağırlığını azaltmaktır. Topoloji optimizasyonu için Altair Hypemesh 14 Optistruct ticari yazılımı kullanılmıştır. Motor braketi için tasarım gereksinimleri aşağıda listelenmiştir.

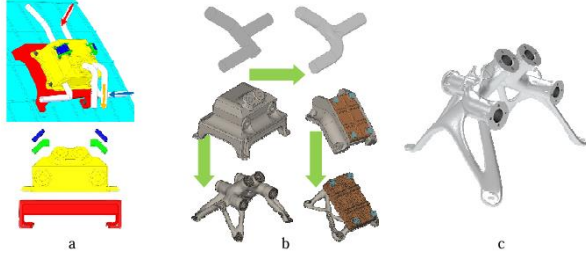
- Optimize edilmiş geometri orijinal parça zarfına sığmalıdır.



Şekil 7. Topoloji uygulanmış braketin görüntüsü [7] (Image of the Topology-Optimized Bracket)

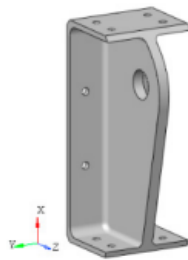
TO uygulaması sonucunda braketin yapısal doğrulama analizi ANSYS R17 Akademik Eğitim aracı üzerinde yapılmıştır. Parçanın MEİ teknikleri ile üretimi yapılarak 2.067 kg'lık orijinal parçadan 0.72 kg'lık nihai parçaya olmak üzere %65 ağırlık azalmasıyla sonuçlanmıştır. Ağırlığın azaltılması, büyük miktarda malzeme ve işleme enerjisinden tasarruf sağlayarak maliyetleri azaltmaktadır. Ayrıca, geleneksel yöntemlerdeki üretim kısıtlamaları artık olmadığından topoloji optimizasyonu yeteneğinin eklemeli üretim teknikleriyle tam olarak kullanılabilirliğini de göstermektedir. Ağırlıkta %65 azalma anlamına gelen örnek olay sonucundan, katmanlı üretim için topolojiyle optimize edilmiş tasarımın kütleinin büyük bir kısmını azaltabileceği sonucuna varılabilir [8].

Bir diğer çalışmada Şekil 8’de görülen havacılıkta kullanılan bir parçaya TO uygulaması yapılarak geleneksel üretim yöntemleriyle üretimi mümkün olmayan çok sayıda bağlantı elemanı kullanılan bir yirmi parçadan oluşan montaj tek yapı altında toplanarak 5 kat daha hafif bir yapı elde edilmiştir. SLM yöntemiyle üretimi yapılan bileşenin iç kanallarının şekli iyileştirilmiş, kütlesi azaltılmış ve mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Temel parçaların ve bağlantı elemanlarının entegrasyonu sağlanmıştır [17].

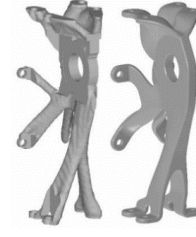


Şekil 8. Topoloji Optimizasyonu uygulanmış bir havacılık parçası [17] (A Topology-Optimized Aerospace Component)

Farklı bir çalışmada Şekil 9’da görülen orijinal olarak 7050-T7451 alüminyum alaşımından üretilen braket TO uygulanarak Ti6Al4V malzemeden imal edilmiştir. Buradaki amaç gerilim seviyelerini korurken ağırlığı azaltmaktır. Optimize edilmiş bileşen nihai tasarımı, gerilim seviyelerini doğrulamak ve gerilim yoğunlaşma bölgelerini veya bazı malzeme takviyesi ihtiyaçlarını kontrol etmek için Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Optimize edilmiş braket SLM yöntemiyle üretilmiştir. Baskıdan sonra optimize edilmiş bileşen, malzemedeki gözenekleri ortadan kaldırmak ve artık gerilmeleri ortadan kaldırmak için Sıcak İzostatik Presleme (HIP) işleminden geçmiştir. Çalışma sonucunda Orijinal bileşenin malzeme hacmini %54 oranında azaltmak mümkün olmuştur, bu da malzemenin alüminyumdan titanyum alaşımına dönüştürülmesiyle ağırlıkta %28’lik bir azalma elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca malzeme değişikliği nedeniyle güvenlik faktörü orijinal değerinin iki katı kadar artmıştır [18].



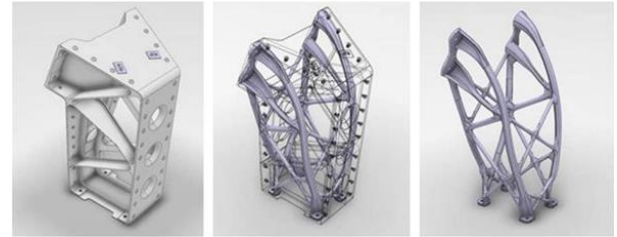
Şekil 9. Orijinal braket [18] (Original Bracket)



Şekil 10. TO uygulaması sonrası braket [18] (Bracket After TO Application)

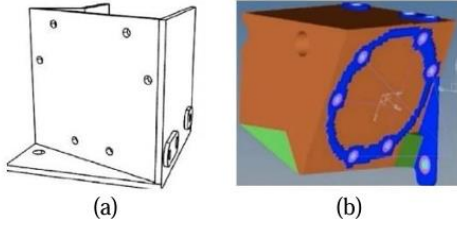
Havacılıkta eklemeli imalat teknolojisinin diğer bir önemli uygulaması, birden fazla bileşenden oluşan montajların birleştirilebilmesidir. Genellikle bu yapılar, parçalar halinde imal edilerek bağlantı elemanları yardımıyla birbirine bağlanır. Bu yöntemin kullanılmasının sebebi, genellikle geleneksel imalat yöntemleri ile montajların tek parça şeklinde kolaylıkla imal edilememesidir. Bununla birlikte, eklemeli imalat teknolojisi ile gerek duyulan bağlantı elemanlarının sayısı azaltılabilir ve bir montajda kullanılan bileşenler tek bir yapı altında toplanabilir [19].

Şekil 11’de gösterilen, Airbus tarafından alüminyum parçalar kullanılarak bağlantı elemanları ile birleştirilen E3000 uydusunun bazı bileşenleri bunun bir örneğidir. Braketler eklemeli imalat teknolojisi ile üretilerek %35 hafiflik kazanmış olup aynı zamanda %40’a kadar sağlamlık kazanmıştır. Alüminyum bileşenlerden meydana gelen ve 44 adet perçin yardımıyla montajı yapılan braket tek bir yapı altında toplanarak üretilmiştir [19].



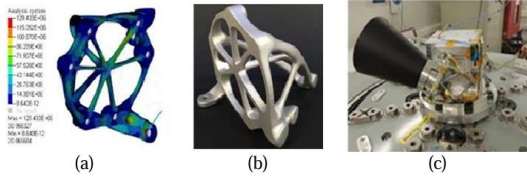
Şekil 11. Eurostar E3000 uydusunun bileşenleri [19] (Components of the Eurostar E3000 Satellite)

Bir diğer çalışmada Surrey Uydu Teknoloji Ltd. Şirketi’nde kullanılan ilk etapta titanyum malzemenin geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen yıldız izleyici Şekil 12’de verilen kamera braketini üzerine bir çalışma yapılmıştır. Braket havacılık alanında faaliyet gösteren RUAG firması tarafından AlSi10Mg malzemenin DMLS yöntemi kullanılarak imal edilmiştir. Başlangıçta ağırlığı 425 gr olan braket topoloji optimizasyonu uygulaması sonucu eklemeli imalat yöntemiyle üretilerek 89 gr’a kadar hafifletilmiştir [20].



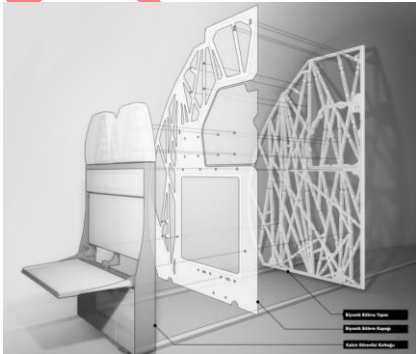
**Şekil 12.** Orijinal yıldız izleyici kamera braketi [19] (Original Star Tracker Camera Bracket)

Şekil 13’de görülen yıldız izleyici kamera braketi son tasarımı üzerindeki tüm bağlantı noktalarına Altair Optistruct programı aracılığıyla sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Parça imalatı EOS M290 eklemeli imalat yapı platformunda yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir [21].



**Şekil 13.** TO uygulanmış yıldız izleyici kamera brakentinin FEM analizi (a) ve montaj görünümü (b, c) [21] (FEM Analysis of the Topology-Optimized Star Tracker Camera Bracket (a) and Assembly View (b,c))

Farklı bir çalışmada Autodesk Studio kuruluşu olan The Living, Biyonik bölme duvarı projesini geliştirmiştir. Airbus ve APWorks ile ortaklaşa yürüttükleri projede bir panelin yapısal verimliliğini maksimize etmeyi, yakıt tasarrufu sağlamayı ve uçağın ağırlığını azaltmayı hedeflemişlerdir. Biyonik bölme, oturma alanı ile mutfağı birbirinden ayıran bir duvardır. Projedeki amaç bölme duvarının ağırlığını %50 oranında azaltmaktır. Şekil 14’de görülen biyonik bölme duvarı, AlMgSc (Scalmalloy) ve Titanyum (Ti) malzemeden EOS M400 ve Concept Laser M2 model 3B yazıcı aracılığıyla DMLS yöntemi ile imal edilmiştir [22].



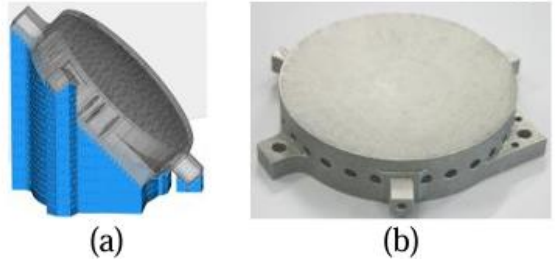
**Şekil 14.** Eklemeli imalat ile elde edilen biyonik bölme duvarı [22] (Bionic Partition Wall Produced by Additive Manufacturing)

Hilpert ve çalışma arkadaşları teleskoplar ve spektrometreler gibi uzay kaynaklı optik sistemlerde kullanılan metal aynalara TO uygulayarak metal eklemeli imalat yöntemleri ile imal etmişlerdir. Mamulün mekanik dengesini korurken, ağırlığını azaltarak topoloji optimizasyonu sayesinde daha hafif yapılar elde etmeyi hedeflemişlerdir. Şekil 15’te görülen yeni tasarlanmış olan petek aynanın iç kısmı, tüm yüzeyi kaplayacak şekilde her biri 4 mm çapında olan altıgen bir hücrelerden oluşmaktadır [23].



**Şekil 15.** Metal aynanın CAD modeli (a) ve iç yapısı (b) [23] (CAD Model of the Metal Mirror (a) and its Internal Structure (b))

Şekil 16’da eklenen destek yapısı “Materialise Magics” yazılımı aracılığıyla gösterilmektedir. Optimizasyon sonrası ayna AlSi40 ve AlSi12 malzemeden Concept Laser M2 Cusing cihazında SLM yöntemi ile imal edilmiştir [23].



**Şekil 16.** Destek yapısı uygulanmış ayna tasarımı (a) ve ikincil işlem görmüş metal ayna (b) [23] (Mirror Design with Support Structure Applied (a) and Post-Processed Metal Mirror (b))

Bir diğer çalışmada GE Uçak Motoru braketi, yeniden tasarlanmış ve DMLS yöntemiyle üretilmiştir. Şekil 17’de gösterilen brakentin ağırlığını, Ti6Al4V yerine AISI 15-5PH paslanmaz çelik kullanarak alternatif bir malzeme ile azaltmak hedeflenmiştir. Geometrik kısıtlamalara uygun olarak eklemeli imalat süreci için, TO sırasında minimum özellik boyutu sınırı 9 mm olarak belirlenmiş ve esas tasarımla yakın fonksiyonel gerilme ve deformasyon profillerini korurken %56’lık bir hafifletme çalışması gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V ile karşılaştırıldığında AISI 15-5PH, neredeyse üç kat daha düşük maliyet ve 1.75 kat daha yüksek yoğunlukla benzer mekanik özelliklere



sahiptir. GE Aircraft motor braketini AISI 15-5H ve kaynakçada yer alan yük koşullarını dikkate alarak analiz etmek ve optimize etmek için Solidthinking Inspire ve Optistruct kullanılmıştır. Ayrıca AISI 15-5PH ile optimizasyon yapılmadan kütle azaltımı braket kütlelerinin neredeyse %80'i kadardır. Optimize edilen ve yeniden tasarlanan braket, Şekil 17 (a), EOS M290 makinesinde AISI 15-5PH (EOS PH1) ile oluşturulmuştur. Üretim süreci 29 saat sürmüştür. Şekil 17 (b), eklemeli imalat ve ardıl işlem sonrası sonucu gösterir. Bu optimize edilmiş braketin kütlesi 0.80 kg gelmektedir, yani Ti6Al4V'li orijinal parçanın kütlelerinin yüzde 56'sıdır [24].



**Şekil 17.** Optimize edilmiş braketin son tasarımı. (b) Optimize edilmiş DMLS aracılığıyla üretilen ardıl işlem sonrası braket [24] (Final Design of the Optimized Bracket. (b) Post-Processed Bracket Produced via Optimized DMLS)

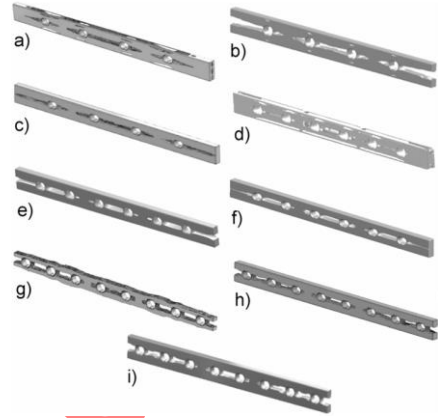
Havacılık ve uzay sektöründe topoloji optimizasyonu uygulamaları, yapıların hafifletilmesi ve verimliliğin artırılması açısından büyük önem taşır. Özellikle uydu ve uçak parçalarında yapılan optimizasyon çalışmaları, malzeme miktarını azaltırken yapısal dayanıklılığı artırmayı hedefler. Bu teknolojiler, yüksek performans gereksinimlerini karşılayarak, geleneksel üretim yöntemleriyle mümkün olmayan karmaşık geometrik yapıların üretimine olanak tanımakta ve sektörün verimlilik odaklı ihtiyaçlarına yanıt vermektedir.

### 3. MEDİKAL SEKTÖRÜNDE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU UYGULAMALARI (APPLICATIONS OF TOPOLOGY OPTİMİZATION IN THE MEDICAL INDUSTRY)

Medikal alanda, özelleştirilmiş kemik yapıları ve implantlar için Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonu yöntemlerinin entegrasyonu hastalar için özel çözümler sunmakta ve tedavi süreçlerini iyileştirmektedir.

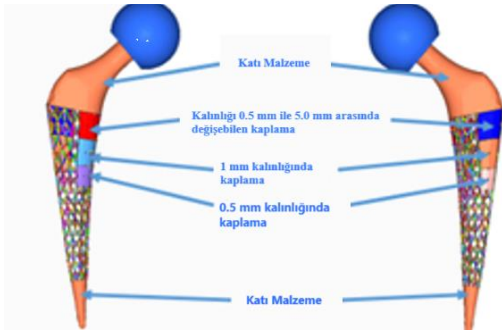
Bir çalışmada, kemik kırıklarının tedavisi için metalik kemik plakalarının tasarımı yeniden optimize edilmiştir. Gerilme koruması ile mücadele etmek ve kortikal kemiğe benzer bir sertlik elde etmek amacıyla plakalara topoloji optimizasyonu

uygulanmıştır. Şekil 18'de verilen optimize edilmiş plakalar, Elektron Demet Ergitme Yöntemi yoluyla Ti6Al4V malzemeden imal edilmiştir. Plakalara gerilme, yüzey pürüzlülüğü ve sertlik gibi özellikleri gözlemek için birkaç karakterizasyon yapılmıştır. Çevreleyen dokularla biyolojik bağın hızını ve kalitesini anlamak için in-vitro testleri yapılmıştır. Testler sonucunda Elektron Demet Ergitme Yöntemi ile üretilen plakaların pürüzlü yüzeylerinin, geleneksel olarak üretilen daha pürüzsüz plakalara oranla bağlanmaya katkıda bulunduğu tespit edilmiştir [25].



**Şekil 18.** Optimize edilmiş plakalar. Dört Delikli Plakalar a) %75 hacim azalması, b) %45 hacim azalması c) %25 hacim azalması. Altı delikli plakalar d) %75 hacim azalması, e) %45 hacim azalması, f) %25 hacim azalması Sekiz delikli plakalar g) %75 hacim azalması, h) %45 hacim azalması, i) %25 hacim azalması [25] (Optimized Plates. Four-Hole Plates a) 75% Volume Reduction, b) 45% Volume Reduction, c) 25% Volume Reduction. Six-Hole Plates d) 75% Volume Reduction, e) 45% Volume Reduction, f) 25% Volume Reduction. Eight-Hole Plates g) 75% Volume Reduction, h) 45% Volume Reduction, i) 25% Volume Reduction.)

Farklı bir çalışmada, kalça protezindeki gerilme koruması ile mücadele etmek amacıyla TO optimizasyonu ve kafes tasarımının bir kombinasyonu aracılığıyla lazerle toz yatağı füzyonu ile üretilmiş Ti6Al4V kalça protezi imal edilmiştir. Optimizasyon odaklı tasarım süreci sayesinde optimize edilmiş implant, stres korumasını genel implanta kıyasla %50'den fazla azaltmış ve 107'den fazla yaşam döngüsüne dayanmıştır. Şekil 20'de gösterildiği gibi üretilebilirliğini kanıtlamak için EOS M290 yazıcıyla bir Ti6Al4V prototipi basılmıştır [26].

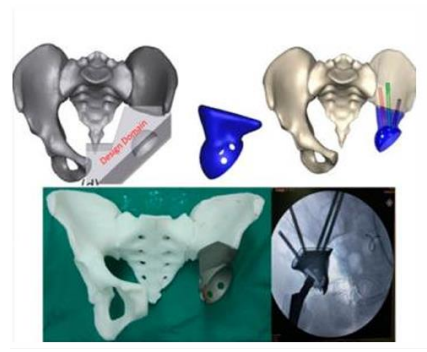


Şekil 19. Katı kafes implant tasarım alanı - yan görünüm [26] (Solid Lattice Implant Design Area - Side Views)



Şekil 20. EOS baskılı titanyum katı kafes kalça implantı [26] (EOS-Printed Titanium Solid Lattice Hip Implant)

Başka bir çalışmada, pelvik implantı tasarlamak amacıyla çok amaçlı bir TO modeli kullanılmıştır. Bu tasarım stratejisi, farklı doku alınması türlerinden elde edilen dört başlangıç tasarım alanı için oluşturulmuştur [27]. Şekil 21'deki implant, Elektron Demet Ergitme Yöntemi ile Ti6Al4V malzemeden üretilmiştir. TO'nun pelvik protez tasarımında uygulanmasındaki amaç, sıfır yük taşıyan bölgeden gereksiz malzemeyi uzaklaştırarak fizyolojik mekanik ortam altında protezin sağlamlığını ve stabilitesini garanti etmenin yanı sıra protezin ağırlığını/hacmini azaltmaktır [28].

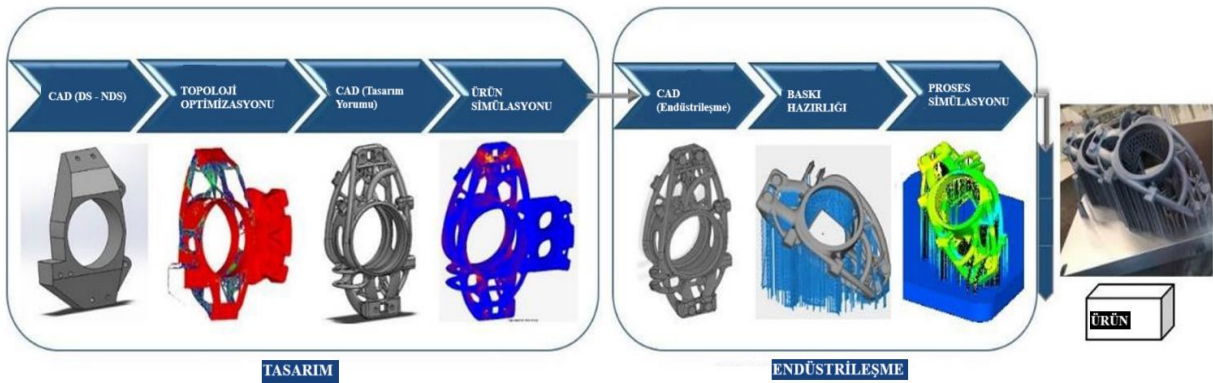


Şekil 21. Optimize edilmiş pelvik ve kalça örneği [28] (Optimized Pelvic and Hip Example)

Medikal sektörde, topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalatın entegrasyonu, özellikle kişiye özel kemik yapıları ve implantların tasarımında büyük bir ilerleme sağlamıştır. Bu gelişmeler, medikal cihazların hastalara daha hızlı ve etkin çözümler sunmasına olanak tanımakta, tedavi süreçlerini iyileştirmekte ve bireylerin yaşam kalitesini yükseltmektedir.

#### 4. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU UYGULAMASI (APPLICATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY)

Son yıllarda otomotiv sektöründe yer alan firmalar yakıt tüketimini azaltmak ve enerji verimliliğini arttırmak için taşıt ağırlığında azaltma yoluna gitmektedirler. Tasarımı yapılan taşıt parçalarında, malzeme dağılımının en etkin şekilde sağlanması amacıyla optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır [29].



Şekil 22. Tekerlek mafsallının optimizasyon süreci [30] (Optimization Process of the Wheel Knuckle)

Bir çalışmada MEİ için topoloji optimizasyonu konusunu göstermek amacıyla Warwick Üniversitesi Formula Öğrenci Ekibi ile bir vaka çalışması düzenlenmiştir. Odak bileşeni, süspansiyon düzeneğinin ana yapısal elemanı olan bir çift arka direktir.

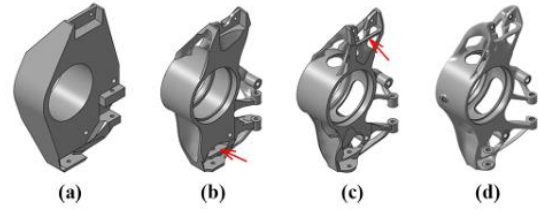
- Tasarım, orijinal işlenmiş alüminyum tasarıma hafif bir alternatif olmalıdır;
- Tasarımın EBM tarafından Ti6Al4V alaşımından üretilmesi gerekmektedir;
- İki arka dikme aynı olmalıdır;
- Tasarımın malzeme kullanımı iyileştirilmelidir.

Nihai tasarımın kütlesi 0.536 kg gelmektedir ve %36 oranında bir azalma sağlanmıştır. Ti6Al4V alaşımından ARCAM A2X EBM makinesi ile 20 saatlik bir süreçte imal edilmiştir. Bileşen, X-ışını Bilgisayarlı Tomografi (CT) kullanılarak incelenmiştir ve aracın bütünlüğünü tehlikeye atabilecek önemli bir boşluk veya katman kaymasına rastlanmamıştır [31].

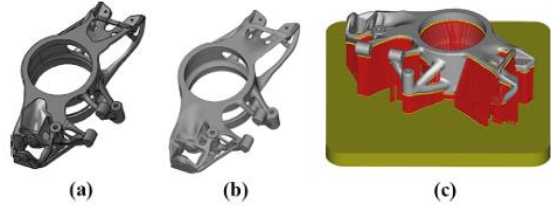


Şekil 23. Süspansiyon düzeneği arka direği [31]  
(Rear Strut of the Suspension Assembly)

Başka bir çalışmada The TU Bruno Yarış Takımı Formula yarışları için aks taşıyıcı sisteme TO uygulamışlardır. Şekil özgürlüğü ve etkili malzeme dağıtımı potansiyelinden yararlanmak amacıyla aks taşıyıcısını tasarlamak için bir topoloji optimizasyonu kullanmışlardır. Topoloji uygulanan aks taşıyıcısını AlSi10Mg malzemeden SLM yöntemi ile imal etmişlerdir. TO uygulaması SolidThinking Inspire yazılımında gerçekleştirilmiştir. Aks taşıyıcısının ilk tasarım aşamasındaki ağırlığı 875 gramken optimizasyon sonucu ağırlık 596 grama hafifletilmiştir. İşlem sonrası sırasında bileşen platformdan kesilerek destek yapıları manuel olarak çıkarılmış ve bileşen kumlanmıştır [32].

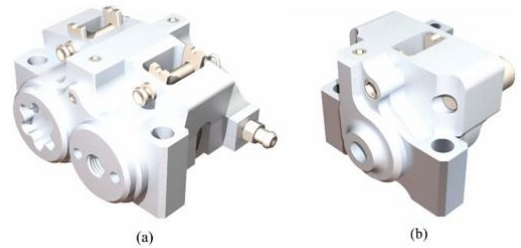


Şekil 24. Aks Taşıyıcı Sistem (a) Tasarım alanı; (b) 1. tasarım aşaması; (c) 3. tasarım aşaması; ve (d) 6. tasarım aşaması (imalat) [32] (Axle Carrier System (a) Design Area; (b) 1st Design Stage; (c) 3rd Design Stage; and (d) 6th Design Stage (Manufacturing))

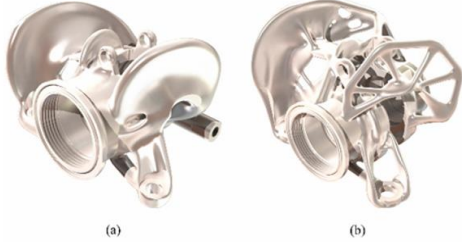


Şekil 25. Step Model (a), STL Model (b), Destek Yapısı ile Üretim Modeli (c) [32] (Step Model (a), STL Model (b), Production Model with Support Structure (c))

Başka bir araştırma makalesindeki yazarlar, ön ve arka fren kaliperinin yuvalarını örnek olay incelemesi olarak kullanarak TO'nun faydalarını ve sınırlamalarını araştırmışlardır. Yuvalar topolojik olarak optimize edilerek kısmen yeniden tasarlanmıştır, 3D baskı için hazırlanarak doğrulanmış ve seçici lazer eritme (SLM) kullanılarak titanyum malzemeden imal edilmiştir. Optimize edilmiş kaliperlerin ağırlığı, ticari kaliperlere kıyasla %41.6 oranında azaltılmıştır. Daha hafif bir otomobilin hızlanması artmakta ve dolayısıyla performansı da artmaktadır. Üstelik bu ağırlık azalması malzeme maliyetini azaltarak yakıt verimliliğini artırmakta ve aracın egzoz emisyonlarını azaltmaktadır. Optimize edilmiş kaliperler, Ti6Al4V'de EOS Lasertec 30 Dual SLM 3D yazıcıda 3D olarak basılmıştır [33].



Şekil 26. Ön kaliper (a), Arka kaliper (b) [33]  
(Front Caliper (a), Rear Caliper (b))



**Şekil 27.** Optimize edilmiş ön kaliper (a), Arka kaliper (b) [33] (Optimized Front Caliper (a), Rear Caliper (b))

Otomotiv sektöründe topoloji optimizasyonu uygulamaları, araçların ağırlık azaltma ve enerji verimliliği artırma hedeflerine ulaşmalarında kritik bir rol oynamaktadır. Bu teknoloji, araç parçalarının daha hafif ve dayanıklı hale getirilmesine olanak tanırken, yakıt tüketiminin ve emisyonların azaltılmasına da katkı sağlar. Bu tür uygulamalar, hem araç performansını artırmakta hem de sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır.

## 5. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada ana tema havacılık, uzay, otomotiv ve medikal sektörlerinde metal eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen yapıların, bileşenlerin tasarlanmasında topoloji optimizasyonu uygulamalarının kattığı avantaj ve iyileştirmelerdir. Bu avantaj ve iyileştirmeler;

- Eklemeli üretim hem bir tasarım devrimine hem de bir endüstriyel devrime olanak tanımaktadır.
- Fonksiyonların entegrasyonu, daha az sayıda bileşen, ağırlıktan tasarruf, performansın artırılması, farklı malzemelerin aynı yapıda kullanılması, verimliliğin artırılması imkanlarını sağlamaktadır.
- Otomotiv sektöründe topoloji optimizasyonu uygulamaları parçaların ağırlıklarından azaltarak araçların hafifletilmesine, egzoz emisyonlarının azaltılmasına, yol tutuşunun artırılmasına ve böylelikle yakıttan tasarruf edilmesine olanak sağlamaktadır.
- Havacılık sektöründe uçak bileşenlerinin karmaşık geometrilerde imal edilmesine ve hassas ölçülerdeki bileşenlerin daha kısa sürede üretilmesine yol açarak zamandan ve maliyetlerden tasarruf edilmesini mümkün kılmaktadır.

- Medikal sektöründe hastalar için yenilikçi çözümler sunarak doku organ uyumluluğunun artırılmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun entegrasyonunun sunduğu avantajlar ele alınmıştır. Özellikle havacılık, otomotiv ve medikal sektörlerinde sağlanan performans artışları, malzeme tasarrufu ve karmaşık yapıların üretimi açısından bu yöntemler önemli katkılar sunmaktadır. Ancak, bu yöntemin getirdiği bazı kısıtlar da mevcuttur. Bu kısıtlar;

- Metal Eklemeli İmalatta üretim yönüne bağlı olarak parçaların mekanik özellikleri değişebilir. Bu malzeme anizotropisi, performansı olumsuz etkileyebilir ve optimizasyon gerektirmektedir.
- Yüzey pürüzlülüğünün sağlanması adına üretilen parçalar genellikle ek yüzey işlemlerine ihtiyaç duyar ve maliyetleri arttırabilir.
- Karmaşık geometrilerin üretimi sırasında destek yapılarına ihtiyaç duyulur ve bu yapıların çıkarılması süreci zorlaştırmaktadır.
- Kullanılan tozun kalitesi nihai ürünün performansını etkilemektedir. Tozun parçacık boyutu ve yeniden kullanım durumları da üretim verimliliği üzerinde etkili olmaktadır.
- Parçanın minimum boyutları, ince duvarların ve küçük geometrik detayların üretilmesi açısından sınırlıdır. Minimum boyut kısıtlamaları, özellikle karmaşık tasarımlar ve hassas yapılar için tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken bir faktördür. Bu kısıtlamalar, hem üretim hassasiyeti hem de yapısal bütünlük açısından önemlidir.

Sonuç olarak, MEİ ve topoloji optimizasyonu kombinasyonu, gelecekte endüstriyel üretimde devrim yaratacak potansiyele sahiptir. Endüstri 4.0'ın getirdiği dijitalleşme ile birlikte bu teknolojinin önemi daha da artacaktır; bu bağlamda, metal eklemeli imalatın sektörel uygulamaları gelecekte daha geniş bir yelpazeye yayılacaktır. Bu nedenle, hem akademik hem de endüstriyel araştırmaların bu alanlara odaklanması büyük önem taşımaktadır.

MEİ süreçlerinde karşılaşılan malzeme anizotropisi, katmanlar arası yapışma sorunları, yüzey pürüzlülüğü, destek yapıları gibi zorlukların üstesinden gelmek için daha ileri düzeyde

optimizasyon algoritmalarına ve üretim sonrası işlemlerin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Gelecekte, bu teknolojilerin daha yaygın ve etkin kullanımı için üretim parametrelerinin optimize edilmesi, tasarım araçlarının geliştirilmesi ve yeni malzeme teknolojilerinin entegrasyonu önerilmektedir. Makine öğrenimi ve yapay zeka destekli optimizasyon araçları, bu süreçlerde kullanılabilir ve daha karmaşık tasarımların daha hızlı ve verimli bir şekilde optimize edilmesini sağlayabilir. Aynı zamanda, endüstriyel uygulamalarda süreç modellemesi ve simülasyon tabanlı yaklaşımların kullanılması, bu teknolojilerin üretim aşamasındaki etkinliğini artırabilir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Büşra ÇALIK:** Literatür taraması, araştırma, düzenleme ve yazma sürecini yürütmüştür. / She conducted the literature review, research, editing and writing process.

**Gültekin UZUN:** Literatür taraması, araştırma ve danışmanlık yapmıştır. / He conducted the literature review, research and consultancy.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. There is no conflict of interest in this study.

#### KAYNAKLAR (REFERANCES)

- [1] Aumund-Kopp C., Riou A., EPMA Introduction to Additive Manufacturing, 3rd edition 2019, p.5.
- [2] Armstrong, M., Mehrabi, H., & Naveed, N. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1001-1029.
- [3] Bandyopadhyay, A., Zhang, Y., & Bose, S. (2020). Recent developments in metal additive manufacturing. *Current opinion in chemical engineering*, 28, 96-104.

- [4] Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 23, 1917-1928.
- [5] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2014). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer.
- [6] T. Pan, S. Karnati, and F. Liou, "General Rules for Pre-Process Planning in Powder Bed Fusion System—A Review," in *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—an Additive Manufacturing Conference, SFF 2018*, pp. 1161–1173, 2020b.
- [7] A. Bacciaglia, A. Ceruti, and A. Liverani, "Additive Manufacturing Challenges and Future Developments in the Next Ten Years," in *Design Tools and Methods in Industrial Engineering*, pp. 891–902, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-31154-4\_76.
- [8] Gebisa, A. W., & Lemu, H. G. (2017, December). A case study on topology optimized design for additive manufacturing. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 276, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- [9] <https://digi-mode.com.tr/eklemeli-imalat/> Son Erişim Tarihi: 31.07.2024
- [10] Jihong, Z. H. U., Han, Z. H. O. U., Chuang, W. A. N. G., Lu, Z. H. O. U., Shangqin, Y. U. A. N., & Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91-110.
- [11] Ibadode, O., Zhang, Z., Sixt, J., Nsiempba, K. M., Orakwe, J., Martinez-Marchese, A., ... & Toyserkani, E. (2023). Topology optimization for metal additive manufacturing: current trends, challenges, and future outlook. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1), e2181192.
- [12] Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., ... & Du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, 209, 110008.
- [13] nTop. Cobra Aero Reimagines the Combustion Engine Cylinder using Multiphysics Simulation & Field Driven Design. Erişim adresi <https://ntop.com/case-studies/cobra-aero-multiphysics-simulation-drone-engine/>
- [14] Evrensel, R., & Ertek, C. (2023). Eklemeli İmalatta Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Uygulamaları ve Topoloji Optimizasyonu. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(3), 2008-2025.

- [15] Kumar, S., & Jain, P. K. (2018). Additive Manufacturing Processes. CRC Press.
- [16] Yi, J., Hsu, K. C., Wu, C., & Rosen, D. W. (2019). "A Hybrid Approach to Optimize Material Distributions for Additive Manufacturing". Additive Manufacturing, 30, 100893.
- [17] Fetisov, K. V., & Maksimov, P. V. (2018, May). Topology optimization and laser additive manufacturing in design process of efficiency lightweight aerospace parts. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1015, No. 5, p. 052006). IOP Publishing.
- [18] Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., ... & Mortágua, J. P. (2016). Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components. Procedia Structural Integrity, 1, 289-296.
- [19] Günaydın, A. C. (2022). Eklemeli imalat prosesinde yapı oryantasyonunun çok-amaçlı optimizasyonu (Doctoral dissertation, Bursa Uludağ University (Turkey)).
- [20] Orme, M., Madera, I., Gschweitzl, M., & Ferrari, M. (2018). Topology optimization for additive manufacturing as an enabler for light weight flight hardware. Designs, 2(4), 51.
- [21] Sleger, G. (2019). Minibike features ground-breaking 3D-printed fuel tank. Erişim adresi <https://www.thefabricator.com/additivereport/article/additive/minibike-features-ground-breaking-3d-printed-fuel-tank> Theliving. Bionic Partition. Erişim adresi <http://www.thelivingnewyork.com/>
- [22] Jaimes, D. D. (2016, January 20). The Living's 3D Printed Airplane Partition is Designed to Mimic Bone Structure. [Archdaily] <https://www.archdaily.com/780661/the-livings-parametric-3d-printed-airplane-partition-is-designed-to-mimic-bone-structure>
- [23] Hilpert, E., Hartung, J., Risse, S., Eberhardt, R., & Tünnermann, A. (2018). Precision manufacturing of a lightweight mirror body made by selective laser melting. Precision Engineering, 53, 310-317.
- [24] López-Castro, J. D., Marchal, A., González, L., & Botana, J. (2017). Topological optimization and manufacturing by Direct Metal Laser Sintering of an aeronautical part in 15-5PH stainless steel. Procedia Manufacturing, 13, 818-824.
- [25] A. A. Al-Tamimi et al., "Topology Optimised Metallic Bone Plates Produced by Electron Beam Melting: A Mechanical and Biological Study," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 104, no. 1–4, pp. 195–210, 2019. doi: 10.1007/s00170-019-03866-0.
- [26] Y. He et al., "Solid-Lattice Hip Prosthesis Design: Applying Topology and Lattice Optimization to Reduce Stress Shielding from Hip Implants," in 2018 Design of Medical Devices Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2018. doi: 10.1115/dmd2018-6804.
- [27] Canlıdınç, M. (2023). Topoloji Optimizasyonu ile Metal Eklemeli İmalat Yönteminin Endüstriyel Uygulamaları. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 552-565.
- [28] T. Iqbal et al., "A General Multi-Objective Topology Optimization Methodology Developed for Customized Design of Pelvic Prostheses," Medical Engineering & Physics, vol. 69, pp. 8–16, 2019. doi: 10.1016/j.medengphy.2019.06.008.
- [29] Kahraman, F., & Küçük, M. (2020). Otomotiv endüstrisinde topoloji optimizasyonu ile ağırlık azaltma uygulaması üzerine bir araştırma. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (20), 623-631.
- [30] E. Dalpadulo, F. Pini, and F. Leali, "Integrated CAD Platform Approach for Design for Additive Manufacturing of High Performance Automotive Components," International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), vol. 14, no. 3, pp. 899–909, 2020'a. doi: 10.1007/s12008-020-00684-7.
- [31] D. Walton and H. Moztaazadeh, "Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimisation," Procedia CIRP, vol. 60, pp. 205–210, 2017. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.027.
- [32] O. Vaverka, D. Koutny, and D. Palousek, "Topologically Optimized Axle Carrier for Formula Student Produced by Selective Laser Melting," Rapid Prototyping Journal, vol. 25, no. 9, pp. 1545–1551, 2019. doi: 10.1108/rpj-07-2018-0171.
- [33] E. Tyflopoulos, M. Lien, and M. Steinert, "Optimization of Brake Calipers Using Topology Optimization for Additive Manufacturing," Applied Sciences, vol. 11, no. 4, 1437, 2021. doi: 10.3390/app11041437.