


## Topoloji Optimizasyonu ile Metal Eklemeli İmalat Yönteminin Endüstriyel Uygulamaları

Melih Canlıdınç<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye

Geliş: 13.12.2023, Kabul: 19.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

### ÖZ

Metal eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemleriyle mümkün olmayan karmaşık metal yapıları üretme kapasitesiyle yenilikçi üretim süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Topoloji optimizasyonu ise, belirlenen tasarım alanlarında hedeflenen parametreleri en uygun şekilde dağıtarak malzeme verimliliğini artırır. Bu çalışma, metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun endüstriyel uygulamalarını derinlemesine inceleyerek, bu teknolojilerin özellikle havacılık, medikal ve otomotiv sektörlerinde üretilebilirlik, işlevsellik ve tasarım özgürlüğü açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Havacılık sektöründe, uçak parçalarının hafifletilmesi ve yapısal bütünlüğün artırılmasında metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun birleşimi kritik öneme sahiptir. Medikal alanda, özelleştirilmiş implantlar ve kemik yapıları için bu yöntemlerin entegrasyonu, hastalara özel çözümler sunarak tedavi süreçlerini iyileştirmektedir. Otomotiv endüstrisinde ise, bu teknolojiler araçların performansını artırırken ağırlığını azaltarak enerji verimliliğini yükseltmektedir. Bu çalışma metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun endüstriyel uygulamadaki zorlukları ve sınırlamaları da ele almıştır. Ayrıca bu teknolojilerin gelecekteki gelişim yönlerini ve potansiyellerini detaylı bir şekilde ortaya koyarak, endüstriyel tasarımda yenilikçi yaklaşımların önünü açması amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Metal eklemeli imalat; Topoloji optimizasyonu; Optimum tasarım

## Industrial Applications of Metal Additive Manufacturing with Topology Optimization

### ABSTRACT

Metal additive manufacturing plays a significant role in innovative manufacturing processes with its capacity to produce complex metal structures that are not feasible with traditional manufacturing methods. Topology optimization, on the other hand, enhances material efficiency by optimally distributing targeted parameters within designated design areas. This study thoroughly examines the industrial applications of metal additive manufacturing and topology optimization, demonstrating that these technologies offer significant advantages in terms of manufacturability, functionality, and design freedom, particularly in the aerospace, medical, and automotive sectors. In the aerospace sector, the combination of metal additive manufacturing and topology optimization is critically important for lightening aircraft parts and enhancing structural integrity. In the medical field, the integration of these methods for customized implants and bone structures offers patient-specific solutions, improving treatment processes. In the automotive industry, these technologies enhance vehicle performance while reducing weight, thereby increasing energy efficiency.

This study also addresses the challenges and limitations in the industrial applications of metal additive manufacturing and topology optimization. Furthermore, it elaborates on the future directions and potentials of these technologies, aiming to pave the way for innovative approaches in industrial design.

**Keywords:** Metal additive manufacturing; Topology optimization; Optimum design

## **1. GİRİŞ**

Metal eklemeli imalat (MEİ), geleneksel süreçlerle üretimi zor olan geometrik olarak karmaşık, tamamen işlevsel metal yapıları gerçekleştirdiği için giderek artan bir ilgi çekmektedir [1-4]. Çoğu geleneksel imalat yöntemi, eklemeli imalat süreçleriyle oldukça mümkün olan parçaların topolojik tasarım karmaşıklıklarını sınırlar. Topoloji optimizasyonu (TO), belirlenmiş bir tasarım alanında bir hedef parametreyi bir veya bir dizi kısıtlamaya karşı optimize ederek en iyi malzeme veya yapısal düzeni kurar. TO'nun sunduğu bu tasarım özgürlüğü nedeniyle, karmaşık bir şekilde bağlantılı özelliklere sahip organik şekiller yaygındır. Diğer yapısal optimizasyon yöntemlerine kıyasla optimum tasarımlar elde edilebilirken, TO, bu tür tasarımları gerçekleştirmek için gerekli imalat tekniklerinin sınırlamaları nedeniyle geçmişte büyük ölçüde teorikti. Bu hızla değişmekte ve son on yılda, eklemeli imalat süreçlerinin ilerlemesi nedeniyle çeşitli bileşenlerin tasarım akışında TO'yu dikkate alma çabaları büyük ölçüde artmıştır. Araştırmacılardan bazıları eklemeli imalatın imalat süreçleri üzerine çalışmışlardır [5]. Bir diğer grup eklemeli imalat parçalarının mikroyapısı ve mekanik özelliklerini, maliyet modelleri ve eklemeli imalat süreçlerinin simülasyonu üzerine birkaç inceleme bulunmaktadır [6-9].

Bu çalışmada topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalatla üretimin endüstrideki uygulamaları göz önüne alınmıştır. Bu kapsamda, TO ve MEİ arasındaki ortaklığın, iyileştirilmiş işlevsellikler, imalat kolaylığı ve genel tasarım ifadesi özgürlüğü için endüstriye özgü tasarım uygulamalarına ne derece yardımcı olduğu tartışılmaktadır.

## **2. ENDÜSTRİYEL TASARIM VE UYGULAMALAR**

Endüstriyel tasarım ve üretimin amacı, bireysel veya ticari piyasa ihtiyaçlarını karşılamaktır. Bu ihtiyaçların çeşitliliği, birçok geleneksel ve/veya konvansiyonel üretim süreci tarafından ele alınmış olsa da eklemeli imalat bazı ana endüstrilerde büyük uygulama alanı bulmuştur. Metal parçaların MEİ yöntemiyle üretim için tasarlanması ve üretiminin geliştirilmesi, diğer polimer bazlı süreçlerden farklı olarak benzersiz tasarım ve üretim süreçleriyle ilgili zorluklar sunmaktadır. TO, bu zorlukları ele almak için geçerli bir araç olmuştur, ancak bu algoritmaların bazıları henüz başlangıç aşamasındadır. Bu çalışma kapsamında, özel endüstriyel amaçlar için hedeflenen TO ve MEİ yöntemi kullanımı incelenmektedir.

### **2.1. Havacılık ve Uzay Sektörü**

Bu bölümde, uçak ve uzay araçlarıyla ilgili yapıların topoloji optimizasyonu ele alınmıştır. Yapısal tasarımların ilerlemesinde eklemeli imalatın oynayabileceği rolü kısaca tartışmış olsalar da MEİ süreçleri üzerine detaylı bir tartışma yapılmamıştır. Ancak, yaptıkları önemli bir sonuç, TO'nun havacılık yapılarının tasarımı için yaygın olarak kabul edildiği, ancak üretilebilirlik noktasında endişeler barındırdığıdır [10].

Havacılık endüstrisinde TO ve MEİ arasındaki ortaklığı-ilişkiyi incelemek için çalışmalardan birinde, bir helikopterin ana vites kutusunu topolojik olarak optimize etmiş ve seçilen eklemeli imalat süreci olarak elektron ışını ile eritme (Ti-6Al-4V-malzeme) yöntemini tercih etmiştir [11]. Çalışmanın üç ana hedefi: ağırlık tasarrufu, parça birleştirmesi ve mekanik özellikler için gereksinimlerin karşılanmasıdır. Farklı başlangıç tasarım alanları kullanılarak iki optimizasyon çözümü elde edilmiş ve topolojileri yeniden yapılandırmak için ayrı yeniden tasarlama stratejileri kullanılmıştır. Dikkat çeken bir zorluk, topolojilerin yeniden yapılandırılmasındaki karmaşıklık ve zaman gereksinimidir. Yine de her iki optimizasyon durumunda yeniden yapılandırmadan sonra %40'ın üzerinde malzeme azaltımı başarmış ve diğer hedefleri de gerçekleştirmişlerdir. Bir başka çalışmada araştırmacılar hafif bir uçak braketini tasarlamak ve üretmek için TO ve lazerle toz yatağı füzyonu yöntemini kullanmışlardır [12]. Bu yöntemle üretilen parçalar, optimum süreç parametre seçimleri yapılmazsa elektron ışını ile eritmeye göre daha fazla gözeneklilik ve artık gerilimlere eğilimlidir; bu nedenle baskı sonrası sıcak izostatik presleme gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada braketin malzemesi alüminyum alaşımı-titanyum alaşımı değişiminde %28'lik bir ağırlık azalması sağlanmıştır. Başka bir çalışmada, türbin kanatları, hedef fonksiyon olarak gerilme enerjisi minimizasyonunu ve iki kısıtlamayı (malzeme hacminde çift azalma ve ilk 6 öz frekans üzerinde bir sınır) içeren bir TO formülasyonu ile tasarlanmıştır [13]. Düşük basınçlı türbinlerin tasarımında rezonans frekansını ayarlamak için öz frekansların kısıtlanması gereklidir. Türbin kanatlarının tomografisi nedeniyle, tasarımda üretim açısından zorluk oluşturabilecek çok ince özellikler olabileceği belirtilmelidir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, tasarım sırasında minimum özellik kalınlığı olarak 0.15 mm belirlenmiştir. Küçük boyutlu temsilci kanatlar, lazerle toz yatağı füzyonu aracılığıyla Nikel bazlı bir süper alaşımdan imal edilmiştir. Bir diğer çalışmada GE Uçak Motoru braketini, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme kullanılarak yeniden tasarlanmış ve üretilmiştir [14]. Çalışmada Şekil 1'de gösterilen braketin önceki sürümlerinin ağırlığını, Ti-6Al-4V yerine Paslanmaz Çelik AISI 15-5PH kullanarak basılmış bir optimize alternatif ile azaltma amaçlanmıştır. Eklemeli imalat süreci için geometrik kısıtlamalara uygun olarak, TO sırasında minimum özellik boyutu sınırı olarak 9 mm belirlenmiş ve orijinal tasarımla yakın fonksiyonel gerilme ve deformasyon profillerini korurken %56'lık bir ağırlık azalması gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 1:** Uçak braketlerinin geliştirilmesinde topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalatın uygulama örneği [14].

TO ve MEİ'nin metal uçak bileşenleri için üretilebilirliği keşfetmeden kullanıldığı diğer çalışmalara örnekler, uçak iniş takımı ve motor montajı, tesla valfi ve uçak braketleri üzerinde görülebilir [15-18]. Uzayla ilgili uygulamalar için, bazı araştırmacılar tarafından TO ve MEİ kullanılarak aynaların tasarımı incelenmiştir [19]. Aynalar, uzay uçuşunda kullanışlı bir uygulama bulur, bu nedenle, iyi yapısal sertlik, kaliteli yüzey ve şiddetli titreşim etkilerine dayanabilme gibi kritik özellikler gerekiyordu. Bu doğrultuda, uygun yük ve sınır koşulları altında yerleştirilmiş bir başlangıç CAD dosyası, sertlik maksimizasyonu için optimize edilmiş ve bir malzeme hacmi ile 250 Hz. doğal frekans kısıtlaması altına alındı. Ayna, iki MEİ süreci Ti-6Al-4V ile elektron demet ergitme yöntemi ve AlSi10Mg ile doğrudan metal lazer sinterleme kullanılarak imal edilmiştir. Her iki malzemeyle de başarılı bir şekilde imal edilen aynalardan, daha az gözeneklilik ve daha iyi mikro pürüzlülükle alüminyum ayna daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Başka bir uzay aynası yine topoloji ve boyutlandırma optimizasyonu ile geliştirilmiştir [20]. Bir diğer çalışmada araştırmacılar, ay uzay aracının bir maket çerçevesini (4 ayak ve bir merkezden oluşan) tasarladı ve üretti [21]. Optimize edilmiş çerçeve, AlSi10Mg malzeme kullanarak EOS M290 3B yazıcı ile imal edildi ve çerçevenin makineye göreli boyutu nedeniyle, 4 tane aynı ayak tasarlandı. Kullanılan optimizasyon yazılımının sınırlamaları nedeniyle, optimize edilmiş topolojinin CAD yorumu, son optimizasyon FEA'sı, destek minimizasyonu ve genel basılabilirlik için gereklidir.

Havacılık endüstrisinin kritik bir yönü, hava/uzay araçları ve motor/motor parçaları, yapısal çerçeveler gibi önemli bileşenlerin sertifikasyonu ve standardizasyonudur ki bu süreçler genellikle zaman almaktadır. Sertifikasyon ve standardizasyon olmadan, bu bileşenler başarısızlığa eğilimli olup, felaketselere ve kayıplara yol açabilir. Konuyla ilgili olarak bir araştırmacı, eklemeli imalat parçalarının sertifikasyonu ve standardizasyonunun, birçok sınırlamadan dolayı hava aracı endüstrisi için en zor aşama olduğunu belirtti ki bu, mevcut imalat teknolojisinin gelişimi olarak özetlenebilir [22]. MEİ teknolojisi hala gelişmekte olduğundan, eklemeli imalat malzemeleri, süreçler, kalite kontrolü, değerlendirme ve tasarım için yaygın

olarak kabul edilebilir standartlar elde etmek hala önemli bir eksiktir. Bu, birçok yeni tasarlanmış havacılık bileşeninin homologasyonunu engelleyen ana etkenlerden biridir. Bu konuda ülkemizde Hava Aracı ve Parçası Sertifikasyonu Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır.

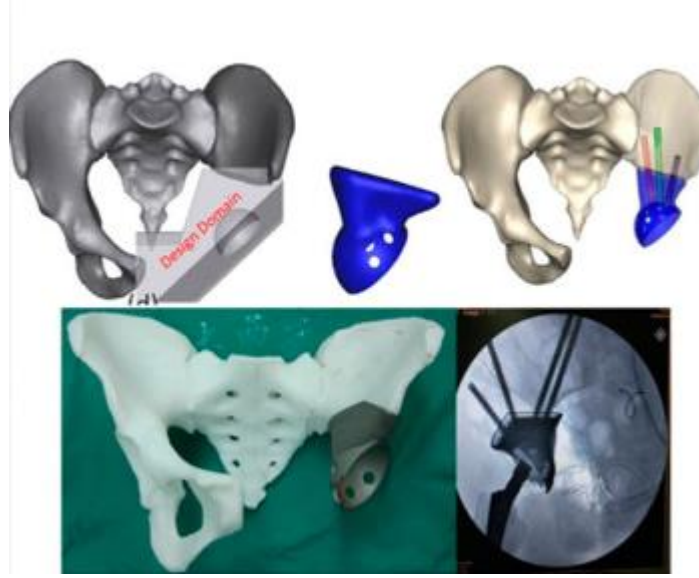
## **2.2. Medikal Sektörü**

Geçtiğimiz 10 yılda, tıbbi amaçlar için eklemeli imalatın ihtiyacı ve önemi büyük ölçüde artmıştır. Bu sektördeki çakışmaları incelersek, Dr. Jules Poukens ve ekibi, dünyanın ilk eklemeli imalatla üretilmiş mandibulasını (çene kemiğini) bir hastaya yerleştirmiştir [23]. Bu gelişme, tıbbi implantların tasarımı ve üretimi açısından birçok yönden önemlidir, çünkü hasta özelleştirilmiş implantlar veya hastanın kemiğine yakın mekanik ve geometrik özelliklere sahip ızgara tabanlı implantlar gibi fırsatlar sunmuştur [24-27]. Kafes yapılı tasarım dışında, hasta özelleştirilmiş implantlar tasarlamının popüler bir yaklaşımı TO kullanımıdır. İmplantların ve kemik doku mühendisliğinin tasarımında, kemik yeniden şekillenmesi, kemik yapısının dış yük koşullarını yeterince destekleyebilmesi için iç yapısının uyum sağlaması gereken temel bir yönüdür. Bunu başarmak için, implant yapısının yapısal sertliği maksimize etmek için optimal olarak yeniden tasarlanması gerekmektedir [26,28,29]. Ek olarak, uygun olmayan bir kemik-implant montajında meydana gelen istenmeyen bir fenomen, gerilme korumasıdır; burada komşu kemik bölgesine göre çok daha sert bir implant, yanlış kemik yeniden şekillenmesine yol açmaktadır [30].

Birçok çalışma, bu yönleri ele almak için TO ve MEİ birlikte kullanmıştır. Bir araştırmada, kemik kırıklarının tedavisinde metalik kemik plakalarının yeniden tasarımını incelemiştir [31]. Gerilme koruması ile mücadele etmek için, plakalar kortikal kemiğe benzer bir sertlik elde etmek üzere topolojik olarak optimize edilmiştir. Optimize edilen plakalar, Ti-6Al-4V kullanılarak Elektron Demet Ergitme Yöntemi yoluyla imal edilmiştir ve gerilme, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerini gözlemlemek için birkaç karakterizasyon yapılmıştır. Gerilme testlerinin sonuçları, sayısal sonuçlarla yakın eşleşmeler göstermiştir. Plakaların in-vitro testlerini, çevreleyen dokularla biyolojik bağın hızını ve kalitesini anlamak için yapılmış ve Elektron Demet Ergitme Yöntemi plakalarının pürüzlü yüzeylerinin, ticari olarak üretilen daha pürüzsüz plakalara kıyasla daha iyi bağlanmaya katkıda bulunduğunu tespit etmişlerdir. Benzer bir yaklaşımla, TO optimizasyonu ve kafes tasarımının bir kombinasyonu aracılığıyla lazerle toz yatağı füzyonu ile üretilmiş Ti-6Al-4V kalça protezindeki gerilme koruması ile mücadele edilmiştir [32]. Başka bir çalışmada her ne kadar in-vitro biyolojik test yapılmamış olsa da, optimize edilmiş tasarımda gerilme koruması artışının %50'den fazla azaldığı ve eşdeğer implantlara kıyasla 107 ömür döngüsünden daha uzun süre dayanabileceği fark edilmiştir [33,34].

Bir araştırmada tarafından bir pelvik implantı tasarlamak için çok amaçlı bir TO modeli kullanılmıştır [35]. Bu tasarım stratejisi, farklı doku alınması türlerinden elde edilen dört başlangıç tasarım alanı için yerine

getirilmiştir. Şekil 2’deki implant, Ti-6Al-4V kullanılarak Elektron Demet Ergitme Yöntemi ile üretilerek bir hastaya yerleştirilmiştir.



**Şekil 2:** Topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalatı tıpta başlıca uygulamaları: pelvik ve kalça örneği [35].

Bazı zorluklar ve varsayımlar, daha az gerçekçi statik yükleme koşullarının benimsenmesi, bağlayıcı kaslar ve bağların etkilerinin dışlanması ve deneysel mekanik test doğrulamaları olmadan sadece sayısal analize dayalı performans değerlendirmesi olmuştur. Gelecekteki gelişmeler için, sayısal model, doğal fizyolojik rutinle daha yakından eşleşecek dinamik yükleme girdileri kullanılarak güçlendirilebilir.

### 2.3. Otomotiv Sektörü

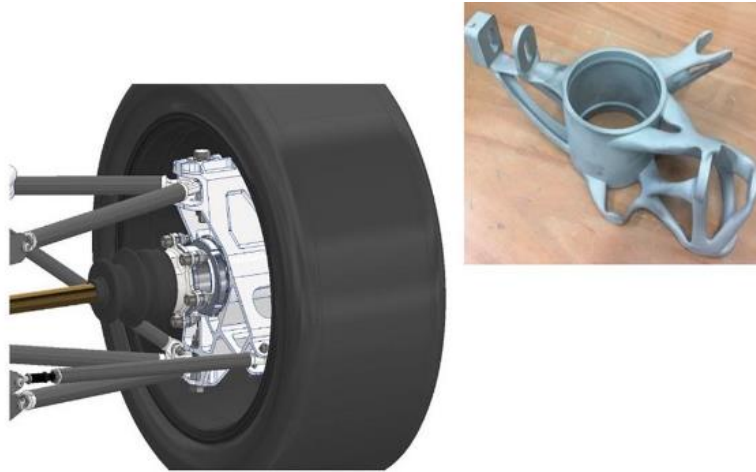
Otomobillerin verimliliklerini artırmak amacıyla, turbo şarj, daha iyi emisyon kontrolü, yakıt tüketimi, gelişmiş frenleme, direksiyon ve süspansiyon sistemleri gibi birçok gelişmiş teknik geliştirilmiştir. Bu teknolojileri gerçekleştirmek için, ileri yaklaşım sunan tasarım ve üretim tekniklerinin benimsenmesi gerekmektedir. Birçok araştırma, bu otomobil bileşenleri ve sistemleri için tasarım akışlarına TO ve MEİ’yi dahil etmeye başlamaktadır.

Birçok çalışmada süspansiyon/tekerlek sistemi ve motor etrafındaki parçalara odaklandığı gözlemlenmektedir. Bazı çalışmalarda, Formula yarış arabaları için tekerlek poyraları veya dikmeleri incelemiştirler [36,37]. Bir çalışmada lazerle toz yatağı füzyonu kullanarak AlSi10Mg ile basılmış topoloji optimize edilmiş örnekler üretilirken, diğer çalışmada sırasıyla elektron ışını ile ergitme ve lazerle toz yatağı füzyonu kullanarak Ti-6Al-4V ile optimize edilmiş örnekler üretmişlerdir [38-40]. Bu çalışmalarda, iyi performanslar korunurken önemli ağırlık tasarrufları elde edilmiştir, ancak maliyet açısından

değerlendirildiğinde Walton'un çalışmasında, elektron ışını ile ergitmeyle işlenmiş alternatiflere karşı maliyeti %700'den fazlaydı [37].

Bir çalışmada Catia'nın 3DEXperience'ında parça simülasyonu, baskı hazırlığı ve süreç simülasyonu için birkaç iş akışını araştırılmıştır [36]. MEİ'yi diğer üretim süreçleriyle karşılaştıran çalışmalar için, lazerle toz yatağı füzyonu yoluyla üretilmiş topolojik olarak optimize edilmiş bir perçinleme aracını, frezeleme için kısıtlanmış optimize edilmiş bir versiyonu ve orijinal frezelenmiş bir versiyonu karşılaştırmıştır [41]. Diğerleri arasında, ağırlıkları, üretim maliyetleri, zamanı, simüle edilen maksimum yer değiştirmeleri, eşdeğer gerilmeleri ve atık malzeme karşılaştırmıştır. Optimize edilmiş MEİ parçası, ağırlık, atık malzeme ve eşdeğer gerilme açısından diğerlerinden daha iyi performans gösterdiğini; ancak, üretim zamanı ve maliyeti açısından daha az performans gösterdiğini elde etmişlerdir.

Bir başka çalışmada lazerle toz yatağı füzyonu kullanarak Ti-6Al-4V ile basılmış ön ve arka fren kaliperlerini yeniden tasarlanmıştır, diğerinde ise bir süspansiyon salıncak bağlantısını topolojik olarak optimize etmişler ve bunun MEİ için iyi bir aday olduğu görüşüne varmışlardır [42]. Bu çalışmada TO aracılığıyla bir fren montajını yeniden tasarlamış ve prototip üretmişlerdir. İyileştirmeler ve düzeltmelerden sonra, son parça AlSi10Mg kullanarak lazerle toz yatağı füzyonu ile imal edilmiştir. Çalışmada, fren montajındaki ağırlık azalması ile karbon ayak izi arasındaki ilişki kurulmuş ve 81 g'lık bir kütle azalmasının 855 mg/100 km CO2 azalmasına yol açabileceği tahmin edilmiştir [43]. Diğer çalışmalarda AlSi10Mg kullanılarak lazerle toz yatağı füzyonu ile basılmış vites kutusu gövdesi yeniden tasarımı, yarış arabası dikmesi tasarımı, dizel motor desteği ve otomotiv Şekil 3'teki direksiyon sütunu desteği çalışmaları yapılmıştır [44-47].



**Şekil 3:** Otomotiv endüstrisinde topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalat uygulamaları: direksiyon sütunu tasarımı örneği [45].



## **2.4. Diğer Sektörel Uygulamalar**

Birçok diğer endüstri sektöründe de TO ve MEİ'nin ortak ilişkisinden yararlanmıştır. Bu çalışmalarını incelediğimizde 2007 yılındaki bir araştırmada, eksenel simetrik bileşenlerin malzeme azaltma ve gerilme kısıtlı TO süreci kullanılarak tasarımını bildirmiştir [48]. Tasarım stratejisi, fren diskleri, volanlar, basınç kapları vb. gibi bir dizi bileşen için uygun olduğu belirtilmiştir. Optimizasyonla tasarımın bir prototipi SLS kullanılarak plastik malzeme ile imal edilse de metalik malzemelerin kullanılabilceği ve simülasyon sırasında kullanılan karbon çeliğe benzer özelliklere sahip olacağı bildirilmiştir. Bir başka araştırmada 7-serbestlik dereceli ExoArm tasarımında bileşenlerin ağırlığının sürücülerdeki güce olumsuz etkisini iyileştirmek için parçaları hafifletme düşünülmüştür [49]. İlk olarak, orijinal malzeme özelliği Ti-6Al-4V, ağırlık azaltma için 7075 alüminyum ve çelikle değiştirildi. Daha sonra, ExoArm kelepçelerinin ağırlıklarını daha da azaltmak için TO ve kafes yapıları uygulandı. Kelepçeler, lazerle toz yatağı füzyonu kullanılarak imal edilerek, optimize edilen tüm parçalar için %45 ve üzerinde bir malzeme azalması elde edildi.

TO ve MEİ, inşaat endüstrisinde de araştırılmıştır. Bir araştırmada, eklemeli imalatla üretilmiş topoloji optimize edilmiş tübüler bağlantıların performansını, boş kare kesitli kaynaklı muadilleriyle karşılaştırılmıştır [50]. Birkaç mekanik test yapıldı ve bazı önemli sonuçlar şunlardır: basılmış ve kaynaklı tübüler bağlantılar arasında Young Modülünde %1.6'lık bir fark, basılmış bağlantılar kaynaklı bağlantılara göre daha simetrik gerilme dağılımları sağladı, maksimum gerilme, basılmış parçaları tasarlamak için TO kullanıldığında %49 azaldığını tespit ettiler. Bir başka çalışmada TO kullanarak, soğuk püskürtmeli eklemeli imalatla üretilen parçaların tasarımı ve optimizasyonu için bazı kılavuzlar önerilmiştir [51]. Tasarım kılavuzları arasında düz yüzeylerin, sürekli püskürtme için yüzeyler arasındaki düzgün geçişlerin, birikim açısının ve kesit geometrisinin, soğuk püskürtme parametrelerine dayalı özellik kalınlığı sınırlamalarının vb. dikkate alınması yer almıştır. Bir diğer çalışmada, termo-mekanik bir TO modeli ve kafes yapılar kullanarak plastik enjeksiyon aracının yeniden tasarımı üzerinde çalışılmıştır [52]. Farklı bir çalışmada araştırmacılar, akustik ayarlanabilirliği olan bir meta-malzeme TO modeli ile insansız bir su altı aracının yeniden tasarımını incelemiştir [53].

## **3. TARTIŞMA ve SONUÇLAR**

Bu çalışmada, topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalatın birlikte kullanılmasıyla elde edilen tasarım ve ürünlerin sektörel olarak kullanımı ve gelişimiyle ilgili çalışmalar hakkında bilgi sunulmuştur. TO'nun faydalarıyla birlikte, MEİ'nin iki önemli zorluğu: eklemeli imalat teknolojilerinin yüksek maliyeti (özellikle lazer ve elektron ışını teknolojileri hem başlangıç hem de işletme maliyetleri) ve sınırlı inşa hacimleriyle limitli üretim hızları ele alındığında gelişen teknolojik gelişmelerle ve özel ihtiyaçlarla birlikte daha fazla

endüstride yaygın olarak benimsenmesi beklenmektedir. Bu limitlemelerden bazıları için güncel bazı çalışmalarda bu zorlukların çoklu lazerli toz yataklı füzyon sistemlerinin tanıtımıyla ele alındığını gösterdiler [53,54]. Orta üretim hacimli tek lazerli bir sistemden büyük üretim hacimli dört lazerli bir sisteme geçilerek, bir kontrol kolunun üretim oranlarının neredeyse %100 arttığını ve maliyetlerin neredeyse %50 azaldığını gösterdiler. Araştırılan büyük endüstriler ve diğerleri arasında birçok vaka çalışması için, işlevsellik açısından deneysel doğrulama çalışmaları sınırlıdır. Üretilecek parçaların işlevsellik açısından MEİ için uygunluğunun, maliyet ve üretilebilirlikle birlikte değerlendirilmesi önemlidir. Uygulamaya bağlı olarak, sertlik/güç, frekans, ısı transferi, basınç düşüşü, yüzey pürüzlülüğü vb. gibi yaygın işlevsellikler araştırılmalı ve geleneksel üretim süreçleriyle yapılan karşıt tasarımların performanslarına karşı değerlendirilmelidir.

## **ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI**

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## **KAYNAKLAR**

- [1] 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.
- [2] B. Blakey-Milner et al., "Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A Review," *Materials and Design*, vol. 209, 110008, 2021. doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [3] 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.
- [4] T. DebRoy et al., "Additive Manufacturing of Metallic Components—Process, Structure and Properties," *Progress in Materials Science*, vol. 92, pp. 112–224, 2018. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
- [5] Y. Kok et al., "Anisotropy and Heterogeneity of Microstructure and Mechanical Properties in Metal Additive Manufacturing: A Critical Review," *Materials and Design*, vol. 139, pp. 565–586, 2018. doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.021.
- [6] A. Gisario et al., "Metal Additive Manufacturing in the Commercial Aviation Industry: A Review," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 53, pp. 124–149, 2019. doi: 10.1016/j.jmsy.2019.08.005.
- [7] A. Bandyopadhyay and K. D. Traxel, "Invited Review Article: Metal-Additive Manufacturing—Modeling Strategies for Application-Optimized Designs," *Addit Manuf*, vol. 22, pp. 758–774, 2018. doi: 10.1016/j.addma.2018.06.024.
- [8] S. Srivastava et al., "Measurement and Mitigation of Residual Stress in Wire-Arc Additive Manufacturing: A Review of Macro-Scale Continuum Modelling Approach," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 3491–3515, 2020a. doi: 10.1007/s11831-020-09511-4.

- [9] S. M. Hashemi et al., "Computational Modelling of Process–Structure–Property–Performance Relationships in Metal Additive Manufacturing: A Review," *International Materials Reviews*, pp. 1–46, 2021. doi: 10.1080/09506608.2020.1868889.
- [10] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, and W. Zhang, "A Review of Topology Optimization for Additive Manufacturing: Status and Challenges," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, no. 1, pp. 91–110, 2021b. doi: 10.1016/j.cja.2020.09.020.
- [11] M. Süß et al., "Aerospace Case Study on Topology Optimization for Additive Manufacturing," *DDMC 2016 Proceedings*, March 2016: 6.
- [12] M. Seabra et al., "Selective Laser Melting (SLM) and Topology Optimization for Lighter Aerospace Components," *Procedia Structural Integrity*, vol. 1, pp. 289–296, 2016. doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.039.
- [13] L. Magerramova, B. Vasilyev, and V. Kinzburskiy, "Novel Designs of Turbine Blades for Additive Manufacturing," in *Volume 5C: Heat Transfer*. American Society of Mechanical Engineers, 2016. doi: 10.1115/gt2016-56084.
- [14] J. D. López-Castro et al., "Topological Optimization and Manufacturing by Direct Metal Laser Sintering of an Aeronautical Part in 15-5PH Stainless Steel," *Procedia Manuf*, vol. 13, pp. 818–824, 2017. doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.121.
- [15] D. J. Munk, D. J. Auld, G. P. Steven, and G. A. Vio, "On the Benefits of Applying Topology Optimization to Structural Design of Aircraft Components," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 60, no. 3, pp. 1245–1266, 2019. doi: 10.1007/s00158-019-02250-6.
- [16] A. Gaymann, F. Montomoli, and M. Pietropaoli, "Design for Additive Manufacturing: Valves Without Moving Parts," in *Volume 2C: Turbomachinery*. American Society of Mechanical Engineers, 2017. doi: 10.1115/gt2017-64872.
- [17] A. W. Gebisa and H. G. Lemu, "A Case Study on Topology Optimized Design for Additive Manufacturing," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 276, 12026, 2017a. doi: 10.1088/1757-899x/276/1/012026.
- [18] K. V. Fetisov and P. V. Maksimov, "Topology Optimization and Laser Additive Manufacturing in Design Process of Efficiency Lightweight Aerospace Parts," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1015, 52006, 2018. doi: 10.1088/1742-6596/1015/5/052006.
- [19] H. Herzog et al., "Optical Fabrication of Lightweighted 3D Printed Mirrors," in *Optomechanical Engineering 2015*. SPIE, 2015. doi: 10.1117/12.2188197.
- [20] R. Hu et al., "Design Optimization Method for Additive Manufacturing of the Primary Mirror of a Large-Aperture Space Telescope," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 30, no. 3, 4016093–4000000, 2017. doi: 10.1061/(asce)as.1943-5525.0000690.
- [21] M. E. Orme et al., "Designing for Additive Manufacturing: Lightweighting Through Topology Optimization Enables Lunar Spacecraft," *Journal of Mechanical Design*, vol. 139, no. 10, 2017. doi: 10.1115/1.4037304.
- [22] S. Singamneni et al., "Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review," *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, vol. 8, no. 1, 13, 2019. doi: 10.4172/2329-6542.1000214.
- [23] Xillo, "The World's First 3D Printed Total Jaw Reconstruction," 2011. Available: <https://www.xilloc.com/patients/stories/total-mandibular-implant/>.
- [24] M. Leary, "Design of Titanium Implants for Additive Manufacturing," in *Titanium in Medical and Dental Applications*, edited by F. H. Froes and M. Qian. Elsevier Inc., 2018. doi: 10.1016/B978-0-12-812456-7.00009-3.

- [25] D. Shidid, M. Leary, P. Choong, and M. Brandt, "Just-in-Time Design and Additive Manufacture of Patient-Specific Medical Implants," *Physics Procedia*, vol. 83, pp. 4–14, 2016. doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.002.
- [26] X. Wang et al., "Topological Design and Additive Manufacturing of Porous Metals for Bone Scaffolds and Orthopaedic Implants: A Review," *Biomaterials*, vol. 83, pp. 127–141, 2016. doi: 10.1016/j.biomaterials.2016.01.012.
- [27] G. Reinhart and S. Teufelhart, "Load-Adapted Design of Generative Manufactured Lattice Structures," *Physics Procedia*, vol. 12, PART 1, pp. 385–392, 2011. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.049.
- [28] S. Bose, S. Vahabzadeh, and A. Bandyopadhyay, "Bone Tissue Engineering Using 3D Printing," *Materials Today*, vol. 16, no. 12, pp. 496–504, 2013. doi: 10.1016/j.mattod.2013.11.017.
- [29] I. Goda et al., "Topology Optimization of Bone Using Cubic Material Design and Evolutionary Methods Based on Internal Remodeling," *Mechanics Research Communications*, vol. 95, pp. 52–60, 2019. doi: 10.1016/j.mechrescom.2018.12.003.
- [30] K. Haase and G. Rouhi, "Prediction of Stress Shielding Around an Orthopedic Screw: Using Stress and Strain Energy Density as Mechanical Stimuli," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 43, no. 11, pp. 1748, 2013. doi: 10.1016/j.combiomed.2013.07.032.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] H. Weinans, D. R. Sumner, R. Igloria, and R. N. Natarajan, "Sensitivity of Periprosthetic Stress-Shielding to Load and the Bone Density-Modulus Relationship in Subject-Specific Finite Element Models," *Journal of Biomechanics*, vol. 33, no. 7, pp. 809–817, 2000. doi: 10.1016/s0021-9290(00)00036-1.
- [34] M. Fraldi, L. Esposito, G. Perrella, A. Cutolo, and S. C. Cowin, "Topological Optimization in Hip Prosthesis Design," *Biomechanics and modeling in mechanobiology*, vol. 9, no. 4, pp. 389–402, 2010. doi: 10.1007/s10237-009-0183-0.
- [35] 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.
- [36] 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, 2020a. doi: 10.1007/s12008-020-00684-7.
- [37] D. Walton and H. Moztafzadeh, "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.
- [38] 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.
- [39] S. N. Reddy et al., "Application of Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing Guidelines on an Automotive Component," in *Volume 2A: 42nd Design Automation Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2016b. doi: 10.1115/detc2016-59719.

- [40] H. Bikas, J. Stavridis, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, "A Design Framework to Replace Conventional Manufacturing Processes with Additive Manufacturing for Structural Components: A Formula Student Case Study," *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 710–715, 2016a. doi: 10.1016/j.procir.2016.11.123.
- [41] A. Großmann, P. Weis, C. Clemen, and C. Mittelstedt, "Optimization and re-Design of a Metallic Riveting Tool for Additive Manufacturing—a Case Study," *Addit Manuf*, vol. 31, 100892, 2020. doi: 10.1016/j.addma.2019.100892.
- [42] 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.
- [43] S. Junk, C. Fleig, and B. Fink, "Improvement of Sustainability Through the Application of Topology Optimization in the Additive Manufacturing of a Brake Mount," in *Sustainable Design and Manufacturing 2017*. Springer International Publishing, pp. 151–161, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-57078-5\_15.
- [44] P. Barreiro et al., "New Improvement Opportunities Through Applying Topology Optimization Combined with 3D Printing to the Construction of Gearbox Housings," *Forschung im Ingenieurwesen*, vol. 83, no. 3, pp. 669–681, 2019. doi: 10.1007/s10010-019-00374-1.
- [45] M. Hunar et al., "Comprehensive View on Racing Car Upright Design and Manufacturing," *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 6, 1020, 2020. doi: 10.3390/sym12061020.
- [46] T. R. Marchesi et al., "Topologically Optimized Diesel Engine Support Manufactured with Additive Manufacturing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 2333–2338, 2015. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.436.
- [47] S. Mantovani, G. A. Campo, and A. Ferrari, "Additive Manufacturing and Topology Optimization: A Design Strategy for a Steering Column Mounting Bracket Considering Overhang Constraints," *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 235, no. 10, pp. 1703–1723, 2020. doi: 10.1177/0954406220917717.
- [48] D. B. Ngim, J.-S. Liu, and R. C. Soar, "Design Optimization for Manufacturability of Axisymmetric Continuum Structures Using Metamorphic Development," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, no. 2, pp. 685–704, 2007. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2006.05.016.
- [49] P. Herbin, D. Grzesiak, and M. A. Krolkowski, "Topology Optimisation Aimed at Additive–SLM Manufacturing of Metal Parts of ExoArm 7-DOF," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer International Publishing, pp. 533–541, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-68619-6\_51.
- [50] S. Huang, X. Deng, and L. K. Lam, "Integrated Design Framework of 3D Printed Planar Stainless Tubular Joint: Modelling, Optimization, Manufacturing, and Experiment," *Thin-Walled Structures*, vol. 169, 108463, 2021. doi: 10.1016/j.tws.2021.108463.
- [51] M. E. Lynch et al., "Design and Topology/Shape Structural Optimisation for Additively Manufactured Cold Sprayed Components," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 8, no. 3, pp. 213–231, 2013. doi: 10.1080/17452759.2013.837629.
- [52] T. Wu, S. A. Jahan, Y. Zhang, J. Zhang, H. Elmounayri, and A. Tovar, "Design Optimization of Plastic Injection Tooling for Additive Manufacturing," *Procedia Manuf*, vol. 10, pp. 923–934, 2017. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.082.
- [53] J. C. Steuben, J. G. Michopoulos, A. P. Iliopoulos, and A. J. Birnbaum, "Functional Performance Tailoring of Additively Manufactured Components via Topology Optimization," in *Volume 1: 37th Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2017. doi: 10.1115/detc2017-67600.
- [54] J. E. Barnes, "Speed is Relative in AM: A Data-Driven Comparison of Multi-Laser Powder Bed Fusion and Binder Jet Processing," *Additive Manufacturing Magazine*, 2021a. [Online].

<https://www.additivemanufacturing.media/articles/speed-is-relative-in-am-a-data-driven-comparison-of-multi-laser-powder-bed-fusion-and-binder-jet-processing>.

[55] J. E. Barnes, "Making a Slow Decision on a Fast Technology: Evaluating the Business Case for Multi-Laser Powder Bed Fusion," *Additive Manufacturing Magazine*, 2021b. [Online]. Available: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/making-a-slow-decision-on-a-fast-technology-evaluating-the-business-case-for-multi-laser-powder-bed-fusion>.