



Eklemlı İmalat Teknolojilerinin Havacılık Sektöründe Enerji Verimliliğini Artırma ve Emisyon Azaltma Potansiyeli

Nedim SUNAY^{1*}  Enis Turhan TURGUT¹ 

¹ Eskisehir Technical University, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, Eskisehir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/02/2024
Revision: 15/04/2024
Accepted: 24/04/2024

Keywords

Additive Manufacturing
Aerospace
Environmental Impacts
Energy Consumption
Material Consumption

Makale Bilgisi

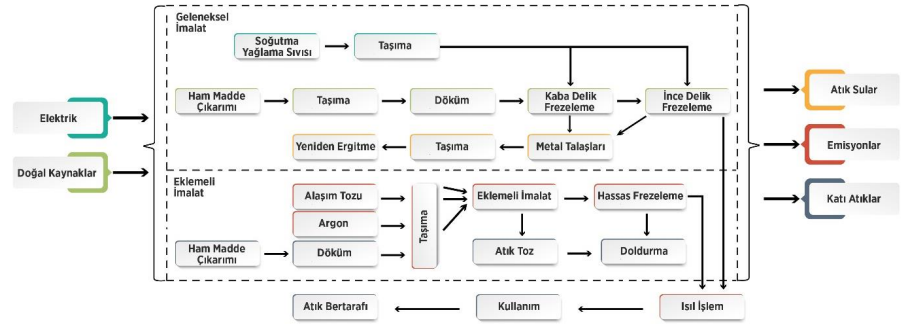
Araştırma makalesi
Başvuru: 15/02/2024
Düzeltilme: 15/04/2024
Kabul: 24/04/2024

Anahtar Kelimeler

Eklemlı İmalat
Havacılık ve Uzay
Çevresel Etkiler
Enerji Tüketimi
Malzeme Tüketimi

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada havacılık sektöründe, eklemlı imalat (Eİ) teknolojilerinin enerji verimliliği ve emisyonları azaltma potansiyeli incelenmiştir. Eİ ile üretilen hafif ve uygun tasarımı ürünler sayesinde enerji tüketiminin ve havacılık emisyonlarının düşürülebileceğini böylece hava araçlarının çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlanabileceğini göstermektedir. /This study examines the potential of additive manufacturing technologies to improve energy efficiency and reduce emissions in the aviation sector. The research demonstrates that through the production of lightweight and well-designed products using AM, energy consumption and aviation emissions can be reduced, thereby contributing to mitigating the environmental impact of aircraft.



Şekil A: Türbin impeller parçasının Gİ ve Eİ yöntemleriyle üretim sürecinin LCA analizi. / Figure A: Life cycle assessment analysis of the production process of turbine impeller component using conventional and additive manufacturing methods

Önemli Noktalar (Highlights)

- Eİ'nin uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik üzerine sınırlı ancak umut vadeden çalışmalar bulunmaktadır. /There are limited but promising studies on the long-term economic sustainability of AM.
- Eİ'nin bazı sınırlamaları bulunmakla birlikte, endüstrinin bu engelleri aşmak için yoğun bir çaba sarf ettiği gözlemlenmektedir. /Despite some limitations, there is observed intensive effort in the industry to overcome these barriers.
- Havacılık endüstrisindeki Eİ uygulamaları, uzun vadeli olarak karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine katkıda bulunabilir ve enerji tüketimini optimize ederek sürdürülebilirlik sağlayabilir. /Applications of AM in the aviation industry can contribute to long-term reduction of carbon emissions and sustainability by optimizing energy consumption.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, havacılık sektöründe, Eİ teknolojilerinin enerji verimliliğini ve emisyonları azaltma potansiyelini incelemektir. / The aim of this study is to examine the energy efficiency and emission reduction potential of AM technologies in the aviation sector.

Özgünlük (Originality): Çalışmanın özgünlüğü, havacılık endüstrisinde Eİ teknolojisinin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesidir. / The originality of the study lies in the evaluation of AM technology in the aviation industry in terms of economic and environmental sustainability.

Bulgular (Results): Bulgular, Eİ'nin havacılık endüstrisinde kullanımının arttığını ve potansiyel çevresel etkilerini göstermektedir. / The findings indicate an increasing usage of AM in the aviation industry and highlight its potential environmental impacts.

Sonuç (Conclusion): Havacılık endüstrisinde Eİ'nin kullanımının sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayabileceği ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu sonucuna varılmıştır. / In conclusion, it is concluded that the usage of AM in the aviation industry can contribute to sustainability goals and further research is needed.



Eklemlerli İmalat Teknolojilerinin Havacılık Sektöründe Enerji Verimliliğini Artırma ve Emisyon Azaltma Potansiyeli

Nedim SUNAY^{1*} Enis Turhan TURGUT¹

¹ Eskisehir Technical University, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, Eskisehir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/02/2024
Revision: 15/04/2024
Accepted: 24/04/2024

Keywords

Additive Manufacturing
Aerospace
Environmental Impacts
Energy Consumption
Material Consumption

Öz

Havacılık sektörü, 2050 net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada kendi alanına düşen sorumluluklar doğrultusunda havacılığı ve hava araçlarını ilgilendiren tüm alanlarda iklim ve diğer çevresel etkileri azaltıcı tedbirler anlamında sürdürülebilir, verimli ve döngüsel ekonomi modellerine uygun bir yapıya dönüşüme odaklanmaktadır. Bu makalenin amacı, bu yapı üzerinde büyük öneme sahip malzeme bilimi çerçevesinde, eklemeli imalat (Eİ) teknolojilerinin havacılık sektöründeki enerji verimliliği ve emisyonlar üzerindeki potansiyel etkilerini incelemektir. Uçak parçalarının üretiminde geleneksel üretim yöntemlerinin, enerji tüketimi ve malzeme atığı konusunda sınırlamaları mevcuttur. Eklemlerli imalatın hafif uçak parçaları, motor parçaları ve diğer kritik bileşenlerin üretiminde uygulama potansiyeli ele alınmıştır. Ayrıca, eklemeli imalatın sürdürülebilir malzeme kullanımı ve üretim sürecinin optimize edilmesi konularındaki katkıları vurgulanmıştır. Bu durumun, malzeme kaynaklarının verimli kullanılmasını teşvik ederken, enerji tüketiminin de azaltılmasına yardımcı olacağı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada enerji verimliliğinin artırılması ve emisyon azaltılmasına odaklanarak havacılık sektörü için Eİ süreçlerine ilişkin sistematik bir literatür taraması yapılmıştır. Böylece havacılık sektöründe emisyonları azaltma ve enerji verimliliğini artırma konularında geline son aşamalar hakkında bilgiler sunulmuştur. Araştırma, Eİ ile üretilen hafif ve uygun tasarımı ürünler sayesinde enerji tüketiminin ve havacılık emisyonlarının düşürülebileceğini böylece hava araçlarının çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlanabileceğini göstermektedir.

The Potential of Additive Manufacturing Technologies to Increase Energy Efficiency and Reduce Emissions in the Aviation Sector

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/02/2024
Düzeltilme: 15/04/2024
Kabul: 24/04/2024

Anahtar Kelimeler

Eklemlerli İmalat
Havacılık ve Uzay
Çevresel Etkiler
Enerji Tüketimi
Malzeme Tüketimi

Abstract

The aviation sector is focusing on transitioning towards sustainable, efficient, and circular economy models in all areas related to aviation and aircraft, in line with its responsibilities towards achieving the 2050 net-zero emission goals. This article aims to examine the potential impact of additive manufacturing (AM) technologies on energy efficiency and emissions in the aviation sector within the framework of material science, which holds significant importance in this structure. Traditional manufacturing methods have limitations regarding energy consumption and material waste in aircraft parts production. The application potential of additive manufacturing in producing lightweight aircraft parts, engine components, and other critical elements has been addressed. Additionally, the contributions of additive manufacturing to sustainable material usage and optimization of the production process have been emphasized. It is evaluated that this situation will promote efficient utilization of material resources while also reducing energy consumption. This study systematically reviews the literature on AM processes for the aviation sector with a focus on enhancing energy efficiency and reducing emissions. Thus, it provides insights into the latest developments in reducing emissions and increasing energy efficiency in the aviation sector. The research demonstrates that through the production of lightweight and well-designed products using AM, energy consumption and aviation emissions can be reduced, thereby contributing to mitigating the environmental impact of aircraft.

1. Giriş (Introduction)

Eklemlerli İmalat (Eİ), geleneksel imalat (Gİ) yöntemlerinin sınırlarını aşan ve karmaşık geometrik yapıdaki parçaların üretimini mümkün

kılan bir üretim teknolojisidir [1]. Gİ yöntemlerinde, malzemelerin çıkarılması veya biçimlendirilmesi yoluyla parça üretilirken, Eİ yöntemlerinde, malzemelerin eklenmesi yoluyla tasarımın gerçekleştirilmesine imkan tanır [2, 3].

Bu fark, malzemelerin verimli kullanılmasını ve atıkların önemli ölçüde azaltılmasını sağlar. Böylece Eİ yöntemleri özellikle havacılık ve uzay endüstrileri gibi enerji verimliliğinin önemli olduğu sektörlerde yüksek talep görmektedir [4, 5].

Havacılık ve uzay endüstrilerinde, Eİ ile karmaşık parçaların üretiminin Gİ ile karşılaştırıldığında, daha hafif, sağlam ve etkili tasarımlar elde edilebildiği literatürde belirtilmiştir [6-8]. Ayrıca, “nihai ürünün kütlesi başına gereken hammadde kütlesi” olarak tanımlanan parçaların “buy-to-fly” (BtF) oranının azaltılması, bu sektörlerde malzeme satın alma maliyetlerini, enerjiyi ve yakıt tüketimini azaltmak için oldukça arzu edilen bir hedefi temsil eder [4]. Ancak Eİ büyük potansiyele sahip yeni bir teknoloji olmasına rağmen, endüstrilerin bu teknolojiyi benimsemesi için sürdürülebilirlik, güvenilirlik, verimlilik, sağlamlık, malzeme sınırlamaları ve kalite açısından hala bazı sınırlamalar bulunmaktadır [9, 10].

Havacılık ve uzay endüstrileri, enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra emisyon oranlarını azaltmak için de yoğun bir şekilde çalışmaktadır. Özellikle havacılık sektöründe son yıllarda yaklaşık %4,3'lük büyüme [11], artan uçak sayısı ve uçuş sayıları hava kirliliğinin önemli bir nedeni haline gelmiştir. Ayrıca, hava taşımacılığı talebinin gelecek 20 yıl boyunca yılda ortalama %4,3 artacağı Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından tahmin edilmektedir [12].

Uçaklar, uçuşları sırasında atmosfere zararlı kirleticiler salarlar ve aynı zamanda yüksek miktarda yakıt tüketirler, bu da büyük miktarlarda emisyon oluşturur. En bilinen emisyon türü karbondioksit (CO₂) olsa da, uçaklar atmosfere azot oksit (NO_x), karbon monoksit (CO), kükürt oksit (SO_x) gibi diğer gazlar ve partiküller de salarlar. Bu emisyonlar, havacılık sektörünün doğrudan ve dolaylı çevresel etkilerini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle, havacılık endüstrisi, enerji verimliliğini artırmak ve bu zararlı emisyonları azaltmak amacıyla sürekli olarak çözüm arayışındadır [13].

Havacılık sektörü, ulaşım sektörü içerisinde küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %9'unu oluşturarak ulaşımın çevresel etkilerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ek olarak, bu sektörün önümüzdeki yıllarda hızla büyümesi beklenmektedir ve tahminlere göre yakıt tüketimi 2050 yılına kadar üç katına çıkacaktır [4, 14]. Bu nedenle, yakıt verimliliğinin artırılması, havacılığın çevresel etkisini azaltma çabalarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu çerçevede karbon nötr hedefe

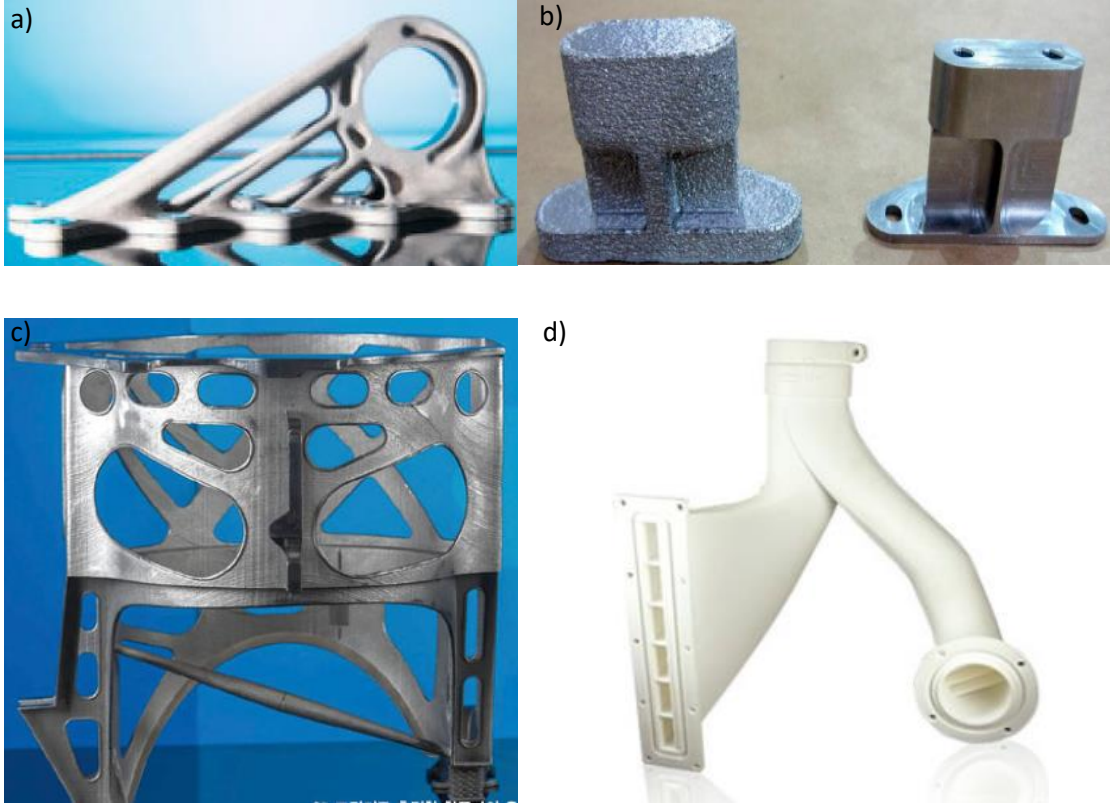
ulaşmak ve havacılığın çevresel etkilerini azaltmak için Eİ teknolojilerinin kullanımında kaynak verimliliğine (malzeme ve enerji) odaklanmanın önemli bir strateji olacağı değerlendirilmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, geniş çaplı Eİ süreçlerinin avantajlarına, sınırlamalarına ve potansiyel sürdürülebilirliğine yoğunlaştığı görülmektedir [15, 16]. Buna ek olarak Eİ'nin malzeme ve enerji tüketimi, sürdürülebilirliği ve çevresel etkileri genel olarak ele alan çalışmalara rastlamak mümkündür [17-19]. Ancak spesifik olarak Eİ teknolojilerinin havacılıkta kullanımıyla ilgili kapsamlı derleme çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür [20]. Sadece Helena ve ark.'nın [21] metal eklemeli imalatın havacılıkta enerji ve malzeme verimliliğine yönelik kapsamlı bir çalışma yaptığı görülmektedir. Ancak Eİ teknolojilerinin tamamının ele alındığı ve havacılıkta enerji verimliliği ile emisyon etkilerine yer verildiği kapsamlı bir derleme çalışması bilindiği kadarıyla mevcut değildir.

Bu çalışmada, Eİ'nin havacılık sektöründeki potansiyel uygulama alanları ele alınmış, özellikle hafif uçak parçaları, motor bileşenleri ve diğer kritik unsurların üretimi üzerinde odaklanılarak, havacılık endüstrisinde emisyon azaltma ve enerji verimliliğini artırma amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar kapsamlı bir şekilde sunulmuştur.

2. Eklemeli İmalat ve Havacılık (Additive Manufacturing and Aviation)

Eİ'nin havacılık endüstrisinde, özellikle çeşitli uçak parçalarının üretiminde kullanımı giderek artmaktadır. Havacılık ve uzay üretim raporlarına göre [22], küresel Eİ pazarının 2026 yılına kadar 23,33 milyar ABD Dolarına ulaşması beklenmektedir. Bu eğilimin ana nedenlerinden biri, parçaların talep üzerine yeniden tasarlanabilmesi ve üretilmesiyle mekanik özelliklerden ödün vermeden önemli derecede malzeme ve maliyet açısından tasarruf sağlama olanağıdır [14, 23, 24]. Ayrıca, Eİ teknolojileri, tane yapısı, doku ve topoloji gibi mikroyapısal özelliklerin, imalat aşaması sırasında proses parametrelerinin değiştirilmesi yoluyla kontrol edilmesine olanak tanır [25, 26]. Böylece Eİ, yalnızca geleneksel imalat işlemleriyle işlenmesi veya üretilmesi zor olan karmaşık geometri parçaların oluşturulmasına izin vermekle kalmaz, aynı zamanda genellikle yüksek sıcaklıklar, sert hava koşulları gibi zorlu koşullar altında çalışan yüksek performanslı hava aracı parçalarının yapımında kritik önem taşıyan mikroyapıların düzenlenmesine olanak tanır [27].



Şekil 1. Eİ teknolojileriyle üretilen havacılık parçaları; a) Ti6Al4V'den eklemeli olarak üretilmiş A350 braketleri [30], b) uzay aracında kullanılan dalga kılavuzu braketi [31], c) Eİ ile tek bir parça şeklinde üretilen hidrolik depo tankı [5], d) poliamid 12 (PA 2200)'den yapılmış laminer akış için hava kanalları [33]. (Aviation components manufactured with additive manufacturing (AM) technologies; a) Additively manufactured Ti6Al4V A350 brackets [30], b) waveguide bracket used in spacecraft [31], c) hydraulic reservoir tank produced as a single part with AM [5], d) air channels for laminar flow made from polyamide 12 (PA 2200) [33].)

Eİ teknolojileri, havacılık endüstrisinde hafif parça üretimine ağırlık vermektedir. Geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen havacılık parçalarının yüksek üretim maliyetine neden olan önemli unsurlardan biri, giriş malzemesi ile nihai ürün arasındaki kütle oranı olarak tanımlanan "buy-to-fly" oranıdır. Havacılık endüstrisi için özellikle bu oran, 10:1 ile 15–20:1 arasında dalgalanmakta ve giderek karmaşık parçalar için 40:1'e kadar çıkabilmektedir [5, 20]. Eİ, neredeyse net şekilli ürünler üretme avantajı sunduğundan, "buy-to-fly" oranı önemli ölçüde azaltılabilir ve hatta 1:1'e yaklaştırılabilir [15]. İç mikroyapıların iyileştirilmesi, daha yüksek giriş malzemesi kullanımı, daha az malzeme israfı ve daha hızlı işleme süresi ile birlikte, Eİ teknolojisi artık sadece bir prototip seçeneği olarak değil, yüksek kaliteli neredeyse net şekilli ürünler üretebilen doğrudan bir üretim yöntemi olarak görülmektedir [15]. Ayrıca, Eİ'nin havacılık sektöründe başarılı bir şekilde adapte edilmesi, gelecekte sürdürülebilirlik ve ilişkili tedarik zinciri yapıları konusunda daha fazla fırsat sunmaktadır.

Eİ hala gelişen bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Eİ tarafından üretilen parçalar için belirlenmiş ilgili standartların ve sertifikasyonun bulunmamasından dolayı mevcut Eİ kullanımının çoğunluğu, havacılık endüstrisindeki kritik olmayan uygulamalarla sınırlı kalmıştır [28]. Ancak metal Eİ'nin havacılık endüstrisinde uygulanması bağlamında birkaç standart ve yeterlilik oluşturulmuştur. Örnekler arasında lazer toz yataklı füzyon (L-PBF) metal Eİ süreçleriyle üretilen uzay uçuşu donanımına ilişkin MSFC-STD-3716 ve havacılık, uzay ve savunma kuruluşlarındaki kalite yönetim sistemleri gereksinimlerine ilişkin SAE AS9100 yer almaktadır [29]. Bu nedenle, metal Eİ standartlarını tam olarak entegre etmek ve özellikle şu anda Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi'nin (NASA) öncülüğünü yaptığı havacılık ve uzay uygulamalarının gerekliliklerini karşılamak için hâlâ önemli çabalara ihtiyaç vardır.

Son yıllarda Eİ parçalarının uçakların hem yapısal hem de tahrik sistemlerine yerleştirilmesi için önemli çabalar sarf edilmiştir. Airbus, 2014 yılında ticari bir uçağın iç kısmında kullanılan ilk Eİ parçaları olan Ti6Al4V'den A350 braketlerini

üretmek için Eİ'yi kullanmıştır (Şekil 1a). Topoloji açısından optimize edilmiş bileşen, Gİ ile frezelenmiş bir braketten %30 daha hafiftir ve malzeme atığında %95'ten %5'e kadar önemli bir azalma sağlama potansiyeline sahiptir [30]. Eİ'nin bir uzay aracındaki ilk kullanımı ise, elektron ışınıyla ergitme (EBM) kullanılarak üretilen dalga kılavuzu braketleridir (Şekil 1b)[31]. GE Aviation, geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak üretilen 855 parçayı, Eİ ile sadece bir düzine parçaya indirgeyerek üretmeyi başarmıştır. Basitleştirilmiş tasarımıyla, ağırlık azaltılarak yakıt verimliliği %20'ye kadar artmış ve %10 daha fazla güç elde edilmiştir. Ayrıca, 20 parçalı bir nozül, tek bir Eİ ünitesinde birleştirilmiş ve ağırlığı %25 azaltılmıştır [32]. Benzer şekilde, Airbus, 126 parçalı hidrolik bir depo tankını tek bir Eİ parçasına indirmiştir (Şekil 1.c) [5]. Metal parçalara ek olarak Eİ ile üretilen plastik malzemelerin de havacılıkta kullanıldığı uygulamalar mevcuttur. Motor bölmelerinde ısı direnci gerektiren parçaların seçici lazer sinterleme (SLS) ile üretiminde cam dolgulu naylon kullanılmaktadır. Esneklik gerektiren parçalarda Nylon 12 tercih edilmekte olup, hava akışı için kullanılan kanallar gibi uygulamalar literatürde mevcuttur (Şekil 1d) [33].

Genel Electric (GE), Boeing ve Airbus gibi büyük havacılık şirketleri, Eİ teknolojilerinin sunduğu fırsatları değerlendiren geniş araştırma programları yürütmektedir [5]. Havacılık alanında bilinen bir Eİ örneği, GE LEAP motoru için üretilen yakıt lülesi (fuel nozzle) ve bu lüle, Nisan 2016'da Airbus A320neo üzerinde test edilmiştir. Bu parçanın üretimi, piyasaya sürülmesinden itibaren 2 yıl içinde 3,000 adede ulaşmıştır. Airbus, 2020'de 120,000'den fazla Eİ parçasını kullanmayı planlamıştır [34].

Siemens şirketi tarafından gerçek çalışma sıcaklığı (700 °C) ve 13,000 devir/dakika hızında tam yük motor testleri için lazer tabanlı toz yataklı birleştirme (LB-PBF) yöntemiyle üretilen nikel alaşımlarının türbin paleleri için kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu proje, Eİ kullanıldığında, iş süresinin geleneksel bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) frezeleme ve torna sistemlerine kıyasla önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir [35].

Genel olarak literatürde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında Eİ süreci parametrelerini anlamak ve kontrol etmek, sertifikalı havacılık parçalarının öngörülebilir ve tutarlı kalitede makul bir maliyetle üretilmesini sağlayan önemli bir gerekliliktir. Havacılıkta Eİ ile üretilen parçalar için temel zorluk, tamamen yoğun parçaların üretilmesi

ile ilgilidir. Bu, süreç parametrelerinin optimize edilmesi ve ardından ikincil işlemler uygulanması ile çözülebilir.

3. Enerji Verimliliği Artırma ve Emisyon

Azaltma (Increasing Energy Efficiency and Reducing Emissions)

Eİ, Gİ yöntemleri kullanılarak üretilmesi zor veya imkansız olan tasarımların üretilmesini mümkün kılar [36], böylece parçaların mühendislik performansı artırılabilir. Ayrıca Eİ, Gİ yöntemleri ile ilişkilendirilen araçlar, kalıplar ve malzeme atıklarından kaçınarak parça üretiminin "beşikten mezara" çevresel ayak izlerini azaltabilir [37]. Bunlara ek olarak, Eİ teknolojileri tarafından üretilmesi mümkün kılınan yeni geometriler, parçanın ürün uygulamasında performans ve çevresel avantajları da beraberinde getirmektedir [38]. Örneğin, literatürdeki çalışmalarda havacılık endüstrisinde, uçak kütlelerini azaltmak amacıyla farklı Eİ yöntemleriyle üretilen parçaların, uçakların yakıt verimliliğini arttırdığını bildirilmiştir[39, 40].

Uçak ağırlığının azaltılması, toplumsal enerji kullanımını ve sera gazı emisyonlarını azaltma açısından kritik bir öneme sahiptir. Havacılık, şu anda küresel taşımacılıkta kullanılan yakıtların ikinci büyük tüketicisidir [41]. Dünya genelindeki uçaklar, küresel taşıma sektörü enerji kullanımının %12'sini ve sera gazı emisyonlarının %9'unu oluşturmaktadır[42, 43]. Ayrıca, küresel uçak yakıt kullanımının 2050'ye kadar hızlı ekonomik büyüme ve artan küreselleşme nedeniyle üç katına çıkması beklenmektedir [44].

Eİ parçaların "beşikten mezara" malzeme kütle ihtiyaçları, Gİ süreçlerinininkinden 12:1 ila 25:1 arasında oranda çok daha düşüktür [45]. Bu yüksek oranlar Gİ yöntemlerinde, "beşikten mezara" üretim sisteminde önemli miktarda malzeme atığına neden olur [46], bu durum da yüksek üretim maliyetlerine, enerji ve çevresel emisyonlara yol açar. Bu nedenlerden dolayı, Airbus, Boeing ve General Electric gibi birçok uçak endüstrisi şirketi, Eİ parçalarını geliştirmeye, test etmeye ve kullanmaya başlamışlardır [39, 47-50]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde sera gazı emisyonu ve enerji tüketimi açısından Eİ yöntemlerinin daha olumlu olduğu net bir şekilde görülmektedir. Havacılık sektöründe farklı Eİ uygulamalarının, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma mevcuttur ve Tablo 1'de özet olarak listelenmiştir.

Tablo 1. Eİ'nin, havacılık ve uzay sektöründe enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları üzerindeki etkileri inceleyen çalışmaların özeti (Summary of studies investigating the effects of additive manufacturing on energy consumption and greenhouse gas emissions in the aerospace sector)

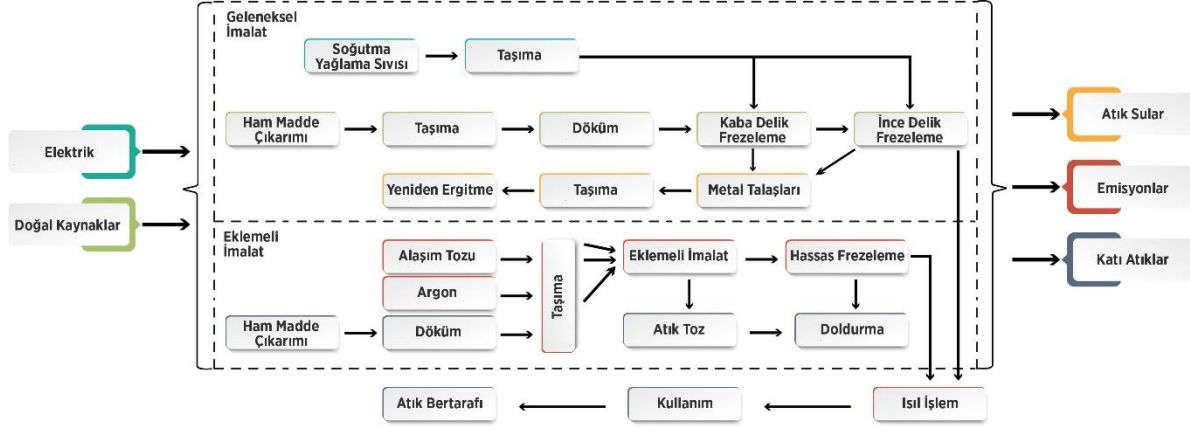
Uygulama	Üretim Yöntemi	Eİ'nin sera gazı salınımına etkisi	Eİ'nin Enerji Tüketimine Etkisi	Ref.
Uçak motoru braketi	Bağlayıcı püskürtme yöntemi	-%24	-%58	[51]
Havacılık ve uzay ve tıbbi parçalar	Stereolitografi (SLA), seçici lazer sinterleme (SLS), dijital ışık işleme (DLP), kaynaşık biriktirme modelleme (FDM), seçici lazer ergitme (SLM) ve elektron ışınıyla ergitme (EBM)	-%8 ~-%19	-2,54 ~ -9,30 EJ	[52]
Braket		-%89~-%94		
Biyonik braket		-%82~-%90		
Motor kapağı kapı menteşesi	SLM, SLM ve EBM	-%76~-%84	-1,2~-2,8 GJ	[42]
Emniyet kemeri tokası		-%26~-%92		
Çatal bağlantı parçası		-%23~-%86		
Uçak motoru braketi	Lazer ışını ile ergitme (LBM), EBM, Tel arkı ile eklemeli imalat (WAAM), Lazer ile metal biriktirme (LMD)	-%65~-%77	-%87	[53]
Türbin parçası	SLS	-	-9,36~-12,49 GJ	[54]
Türbin disk	EBM	-%5~-%78	-	[55]
Türbin impeller parçası	Doğrudan enerji biriktirme (DED)	-%62	-	[56]
Türbin pale profili	Lazer ile doğrudan biriktirme (LDD)	-%45	-%36	[57]
Dişli parçası	DED	+%250 (100 yıl)	-	[58]
Brülör	LBM	-	-%30	[59]

Son yıllarda, üretim yöntemlerinin çevresel ve ekonomik etkilerini değerlendirmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Titanyum uçak parçalarının Eİ ve geleneksel çelik döküm süreci ile üretiminin karşılaştırıldığı bir çalışmada, Eİ ile üretilen hafif titanyum parçasının çevresel etkisinin %48 ve enerji tüketiminin %67 daha düşük olduğu bildirilmiştir [34]. Bir başka çalışmada Gİ yöntemlerinden enjeksiyon kalıplama (EK) yerine kullanılabilecek seçici lazer sinterleme (SLS)

işleminde üretim süresinin daha uzun olduğunu (10 ila 100 kat daha uzun), ancak EK'ya kıyasla çok daha düşük güç kullanıldığını (kilowatt [kW] cinsinden 1 ila 10 kat) bildirmişlerdir [60]. Kellens ve ark., SLS ve seçici lazer ergitme (SLM) yöntemlerini üretim süresi, güç ve malzeme tüketimi açısından analiz etmişler ve sonuç olarak, çevresel etkilerin başlıca nedenlerinin elektrik tüketimi ve inert gaz tüketimi olduğunu ortaya koymuşlardır [61]. Peng ve ark. [56] türbin impeller parçasının Eİ ve Gİ üretim yöntemleriyle

üretiminin çevresel etkilerini yaşam döngüsü analizi (LCA) kullanarak karşılaştırmışlardır. Tablo 2. 'de sunulan sonuçlar doğrultusunda Eİ ile yeniden imalatın çevresel etkiler bakımından en uygun seçenek olduğu bildirilmiştir. Ancak sadece Eİ yönteminin kullanılması çok fazla toz ve enerji tüketimi sağlayacağından impeller parçasının alt katmanı için hassas döküm veya dövme Gİ

yöntemlerinin kullanılması; kısacası Eİ ve Gİ yöntemlerinin ortak kullanımıyla çevresel etkilerin ve enerji tüketiminin minimize edilebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada değinilen en önemli nokta tedarik zincirini de içeren "beşikten mezara" LCA yöntemiyle analiz doğrultusunda (Şekil 2), Eİ yöntemleriyle üretimin çevresel etkileri en aza indireceğidir.



Şekil 2. Türbin impeller parçasının Gİ ve Eİ yöntemleriyle üretim sürecinin LCA analizi. (Life cycle assessment analysis of the production process of turbine impeller component using conventional and additive manufacturing methods)

Tablo 2. Türbin impeller parçasının farklı imalat yöntemleriyle üretimi sonucu enerji tüketimi ve emisyon verileri [56]. (Energy consumption and emission data resulting from the production of turbine impeller component using different manufacturing methods)

Kirlilik türü	Kaynaklar/emisyonlar	Geleneksel imalat	Eklemeli İmalat
Kaynak tüketimi (kg)	Kömür	339,21	124,01
	Doğal gaz	0,249	0,187
	Ham petrol	0,89	0,461
Su emisyonu (kg)	Amonyum nitrojen	$1,69 \times 10^{-3}$	$1,30 \times 10^{-3}$
	Nitrat	$4,98 \times 10^{-5}$	$8,84 \times 10^{-5}$
	Fosfat	$1,28 \times 10^{-4}$	$2,31 \times 10^{-4}$
Atmosfer emisyonu (kg)	CO ₂	520,58	197,88
	CH ₄	1,495	0,55
	HCL	0,136	0,041
	HF	0,017	0,005
	NO ₂	$9,37 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^{-2}$
	SO ₂	1,493	0,498
	H ₂ S	$6,50 \times 10^{-3}$	$6,03 \times 10^{-3}$
	NO _x	1,391	0,435
	Partiküller PM2.5	$1,34 \times 10^{-4}$	$2,42 \times 10^{-4}$
Solunabilir partiküller	$4,34 \times 10^{-2}$	$8,75 \times 10^{-2}$	

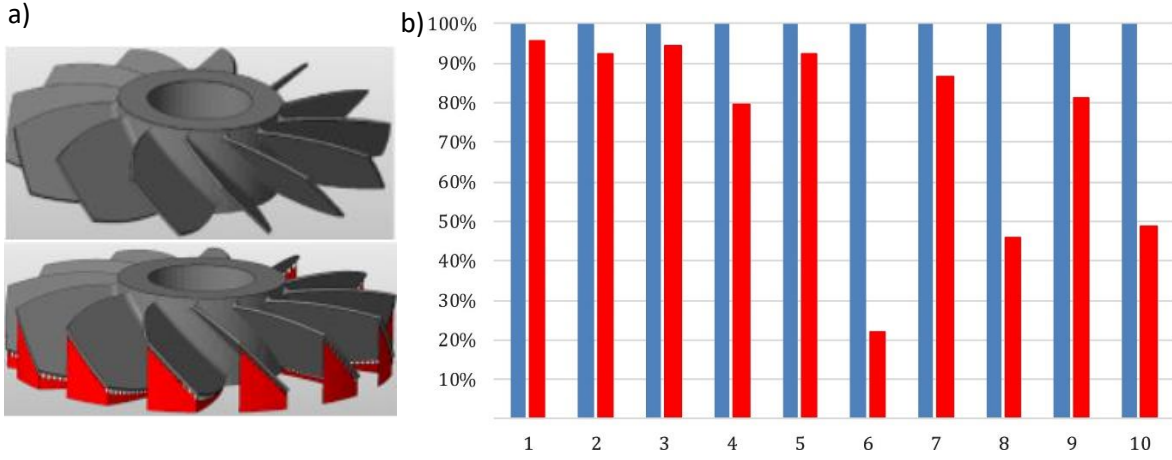
Eİ ile Gİ yöntemlerinin çevresel etkilerinin kıyaslandığı bir diğer çalışmada, EBM (Elektron Işınli Erime) ve frezeleme üretim yöntemlerinin, seçilmiş 10 çevresel etki üzerinden karşılaştırılması yapılmıştır. EBM işleminin her zaman frezelemeden daha az çevresel etki oluşturduğu

görülmektedir (Şekil 3). Ancak EBM, malzeme kaldırma işlemi gerektiren yüksek karmaşıklıkta parçalar için daha çevre dostu ve iyi bir üretim seçeneğidir. Diğer yandan, beş eksen frezeleme işlemi için karmaşıklığı kabul edilebilir seviyede olan parçalar için frezeleme işlemi ile daha düşük

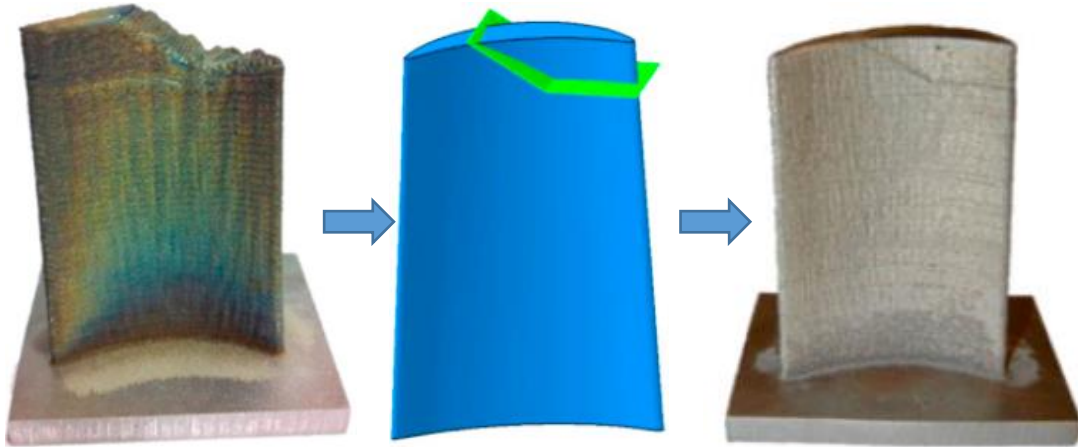
bir çevresel etki yaratacağı sonucuna varılmıştır[55].

Eİ işlemlerinin Gİ yöntemlerine kıyasla daha olumlu sonuçlar elde edildiği açıkça görülmektedir ancak bu çalışmalarda Eİ yöntemlerinin üretim parametrelerinin optimize edildiği unutulmamalıdır. Örneğin Mami ve ark. yaptıkları çalışmada, Eİ'nin optimize edilmiş senaryosunun (3DO), geleneksel işleme senaryosuna (CMA) göre yaklaşık %12'lik bir maliyet azalması ve daha düşük ağırlık sayesinde düşük yakıt tüketimi ve çevresel etki azalması gösterdiğini belirtmişlerdir [62]. Eİ yöntemleri sadece üretim aşamasında değil aynı zamanda parçaların onarılması veya başlangıç

boyutlarına yeniden getirilmesi amacıyla kullanılabilir [63]. Literatürde; türbin palelerin [64, 65], yakıt nozulların [66], blisk parçasının [67], kompresör parçaların [68], gaz türbini motor dış gövde parçaların [69] ve daha bir çok havacılık parçasının Eİ teknolojileri ile onarımının başarıyla gerçekleştiği çalışmalar mevcuttur. Eİ teknolojileriyle parçaların onarımını çevresel etki bakımından değerlendiren Wilson ve ark. ise türbin palesini LDD yöntemiyle başarılı bir şekilde onarmayı başarmışlar ve toplam enerji açısından %36 tasarruf sağlandığını, böylece karbon ayak izinde %45'lik bir iyileşme elde ettiklerini bildirmişlerdir (Şekil 4) [57].



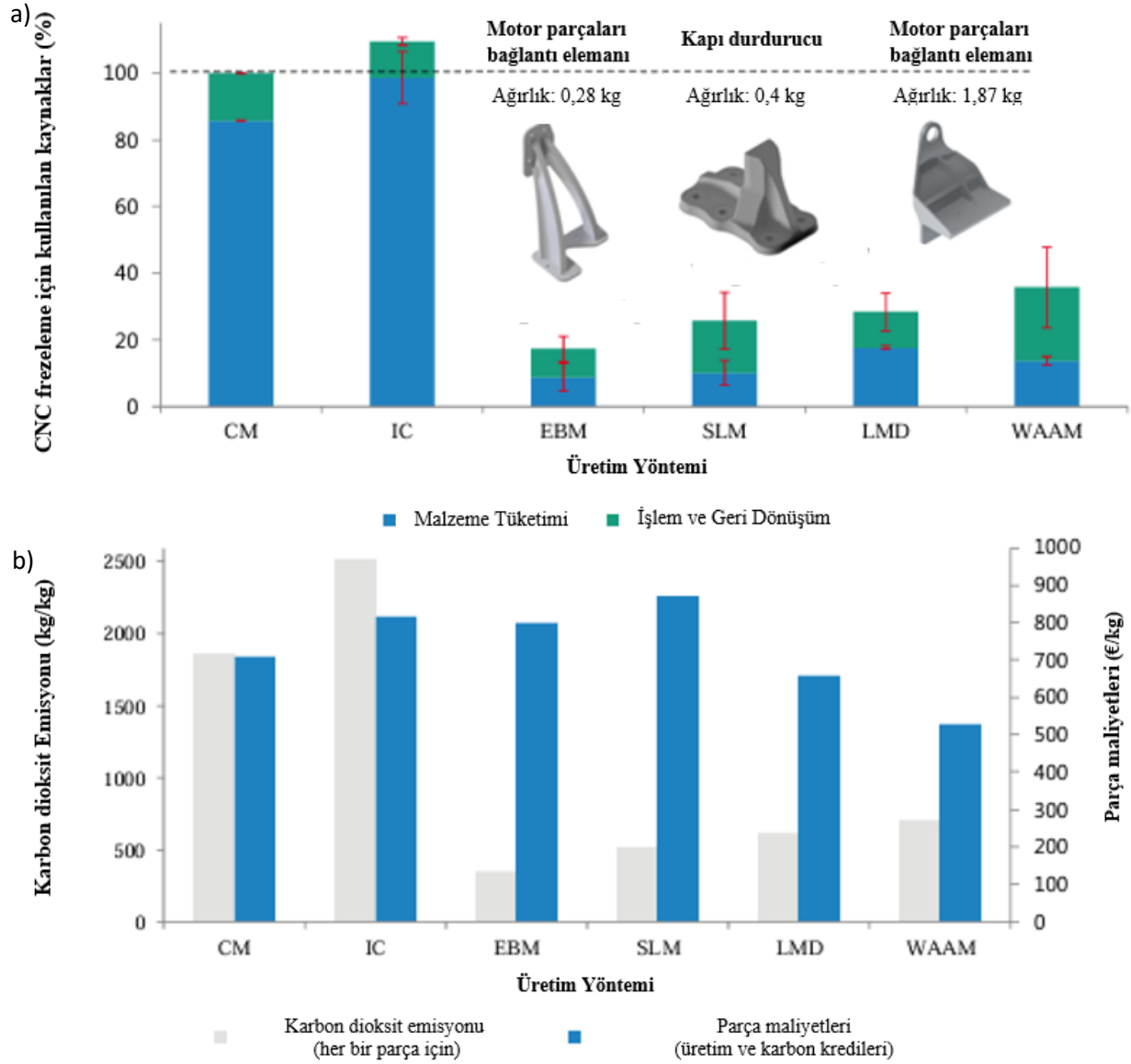
Şekil 3. a) Eİ işleminden sonra optimize edilmiş destekli türbin parçası, b) EBM (kırmızı) ve frezelemenin (mavi) çevresel etkileri; abiyotik tükenme (1), asitlenme (2), küresel ısınma (3), tatlı sudaki sucul ekotoksosite (4), denizdeki sucul ekotoksosite (5), karasal ekotoksosite (6), yenilenemez fosil (7), yenilenemez nükleer (8), yenilenebilir enerji potansiyeli (9) ve yenilenebilir su (10) [55]. [(a) Optimized support-assisted turbine component after AM process, b) Environmental impacts of EBM (red) and milling (blue); abiotic depletion (1), acidification (2), global warming (3), freshwater aquatic ecotoxicity (4), marine aquatic ecotoxicity (5), terrestrial ecotoxicity (6), non-renewable fossil (7), non-renewable nuclear (8), renewable energy potential (9), and renewable water (10)]



Şekil 4. Türbin kanatçık (vane) parçasının LDD yöntemiyle onarılma işlemi [57]. (Repair process of turbine blade component using LDD method)

Başka bir çalışmada, özellikle toz tabanlı Eİ süreçlerinin malzeme kullanımını etkili bir şekilde kullanmasıyla Gİ yöntemlerine göre çevresel açıdan daha sürdürülebilir olduğu gösterilmiştir [53]. Şekil 5'te görülen sonuçlara göre, destek elemanı ve kapı durdurucu parçalarının Eİ yöntemleri ile üretimi parçalarda hem kaynak tüketiminin önemli ölçüde daha küçük olduğu gösterilmiş hem de önemli bir CO₂ tasarruf potansiyeli ve ekolojik avantaj

sergilemiştir. Ancak Eİ yöntemlerinin SEC'si (spesifik enerji tüketimi), Gİ yöntemlerinininkinin neredeyse iki katıdır. Eİ yöntemlerinin çevresel etki ve enerji tüketimi açısından daha verimli olduğu çalışmaların aksine Tablo 1'de de dikkat çeken Liu ve ark.'nın yaptıkları çalışmada, DED işleminin Gİ yöntemine göre daha yüksek enerji tükettiği dolayısıyla çevresel etkisinin çok daha olumsuz olduğu ortaya koyulmuştur [58].



Şekil 5. a) Gİ yöntemlerine kıyasla Eİ yöntemlerinde kaynak tüketimi, b) Parçaların üretim yöntemlerine göre karbon ayak izi ve ekolojik maliyet potansiyeli [53]. (CM: Geleneksel imalat, IC: Hassas döküm, EBM: Elektron ışınıyla ergitme, SLM: Seçici lazer ergitme, LMD: Lazer metal biriktirme, WAAM: Tel arkı ile eklemeli imalat) (Türkçeye çevrilmiştir.) [a) Resource consumption in AM methods compared to conventional manufacturing resources, b) Carbon footprint and ecological cost potential of parts according to production resources [53]. (CM: Conventional Manufacturing, IC: Investment Casting, EBM: Electron Beam Melting, SLM: Selective Laser Melting, LMD: Laser Metal Deposition, WAAM: Wire Arc Additive Manufacturing]

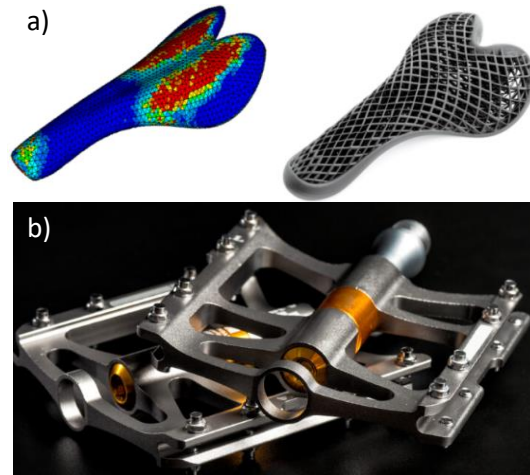
4. Tasarım Esnekliği ve Hafifleme Avantajları

(Design Flexibility and Lightweighting Advantages)

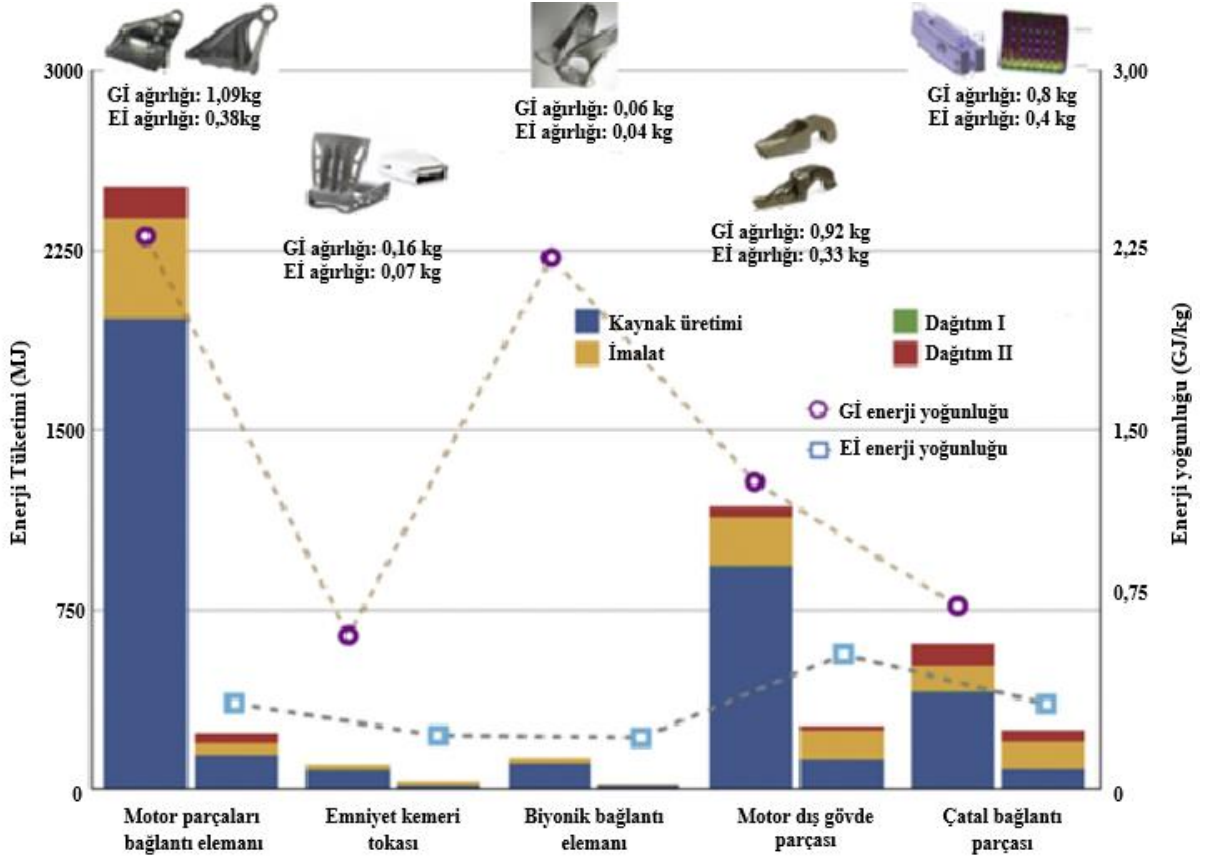
Çevresel kaygılar tüketiciler için giderek daha önemli hale geldikçe, birçok sektör daha fazla enerji bilincine ve sürdürülebilirliğe doğru kaymaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, elektrikli araçlar ve sürdürülebilir malzemeler gibi çözümler araştırmacıların büyük ilgisini çekerken, hafiflik gibi uygulamalar, daha az görünür olsa da, enerji verimliliğinde daha fazla kilit rol oynamaktadır [70]. Eİ, özellikle tasarım esnekliği ve hafifleme konularında havacılık endüstrisinde bir dizi avantaj sunmaktadır. Bu avantajlar arasında esnek tasarımlı hafif parçaların oluşturulması, malzeme kaybının azaltılması ve parçaların talep üzerine hızlı bir şekilde üretilme yeteneği bulunmaktadır [71]. Eİ ayrıca, geleneksel imalat yöntemleri ile elde edilemeyen karmaşık ve hafif tasarımların üretilmesine olanak tanıyarak, uçak tasarımında aerodinamik, ağırlık/dayanıklılık oranları ve fonksiyonel entegrasyonun geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, havacılık bileşenlerinde Eİ kullanımı, tedarik süresinde azalmaya, ilişkili maliyetlerin düşmesine ve tedarik zinciri verimliliğinin artmasını sağlamaktadır. Genel olarak, havacılık endüstrisinde Eİ uygulaması, tasarım esnekliği ve hafifleme açısından önemli avantajlar sunarak, maliyetlerin düşürülmesinin, performansın ve sürdürülebilirliğin artmasına katkıda bulunmaktadır. Hafifliği stratejik tasarım seçenekleriyle eşleştirmek, parça performansının iyileştirilmesine yardımcı olabilir. Örneğin, hafifletme için kafes yapılarının kullanılması, hem ağırlığı azaltma avantajına sahip olabilir hem de darbe emme davranışını iyileştirme ve ayarlama yeteneği kazandırabilmektedir (Şekil 6.a.) [70]. Parçanın geometrisi de üretken tasarımla beraber parçaların daha hafif ve kullanışlı olmasına olanak tanıyabilmektedir (Şekil 6.b.). Ancak hafifletilen parçaların yüzey alanı/hacim oranını önemli ölçüde artırdığını ve parçaların paslanmaz çelikler gibi hızla oksitlenen malzemelerle çalışması durumunda parçanın ömrünü veya dayanıklılığını etkileyebileceğini göz önünde bulundurmak gereklidir [70].

Eİ ile üretilen parçalarda elde edilen kütle azaltımı, uçuş için gereken yakıtın azalması, dolayısıyla emisyonların azalması anlamına gelmektedir. Gisario ve ark. [4] 326 g ağırlığındaki havacılık aparatını topoloji optimizasyonu yaparak, Gİ ile üretilmiş parçaya kıyasla %64 ağırlık azalması (malzeme değişikliği nedeniyle %32 ve tasarım nedeniyle %32) elde etmiştir. Zhang ve ark. [72], önerdikleri Eİ ürün tasarım modeli ile daha hafif parçalar elde ederek, malzeme atığını azaltmış ve

aynı zamanda maliyeti düşürmüşlerdir. Uçakların yakıt tüketimi doğrudan ağırlıkla ilişkilidir, bu nedenle havacılık parçalarının ağırlıklarını azaltmak, operasyonel maliyetleri ve CO₂ emisyonlarını düşürmek için önem verilen konuların başında gelmektedir. Eİ ile ağırlığı 100 kg azaltılmış uçağın 30 yıllık bir ömür boyunca 13,4–20 TJ tasarruf sağlayabileceği literatürde bildirilmiştir [21, 73]. Bu azalma filo düzeyinde değerlendirildiğinde çevresel açıdan sağlanacak fayda çok daha önemli bir seviyeye gelecektir. Huang ve ark. [42], Eİ ile üretilen parçalar sayesinde, 2050 yılında tüketilen enerjinin yılda 70–173 milyon GJ azaltılabileceğini ve 1.2–2.8 milyar GJ kümülatif tasarrufa ulaşabileceğini göstermiştir. Ayrıca, binlerce ton malzeme kaynağının (Ti, nikel, alüminyum alaşımları) tasarruf edilebileceği tahmin edilmektedir. Bu çalışmadan alınan sonuçlar (Şekil 6) incelendiğinde, Eİ teknolojilerinin Gİ teknolojilerine kıyasla enerji tasarrufu sağladığı ve enerji tüketimi farklarının (emniyet kemeri bağlantı parçası için) yaklaşık 70 MJ ile (motor parçaları bağlantı elemanı için) 2 GJ değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Bu enerji tasarrufları, Eİ yöntemlerinin düşük satın alma oranlarına ve Eİ parçalarının gelişmiş hafif geometrilerine bağlı olarak enerji kullanımında meydana gelen azalmalardan kaynaklanmaktadır. Eİ teknolojileri, malzeme üretimi için kullanılan enerji miktarını düşürmeleri ve Şekil 7’de görüldüğü üzere hafif geometrileri nedeniyle azalan kütleyle sahip olmaları, bu enerji tasarruflarına önemli katkı sağlamaktadır.



Şekil 6. a) Kafes yapılarıyla tasarlanan parçalar, **b)** Tasarımcıların geleneksel emsallerine göre daha az malzeme kullanarak, daha hafif ve yapısal olarak sağlam oluşturdukları parçalar [70]. [(a) Parts designed with lattice structures, b) parts designed by designers to be lighter and structurally stronger with less material compared to traditional counterparts]



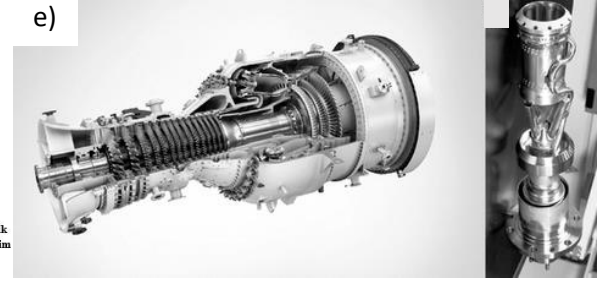
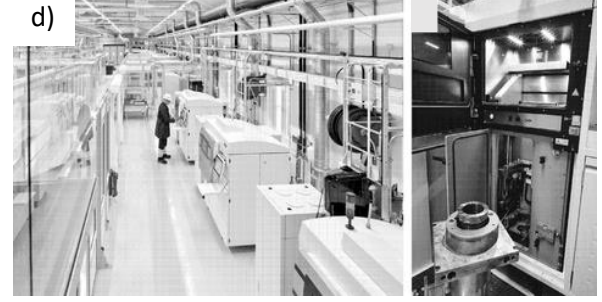
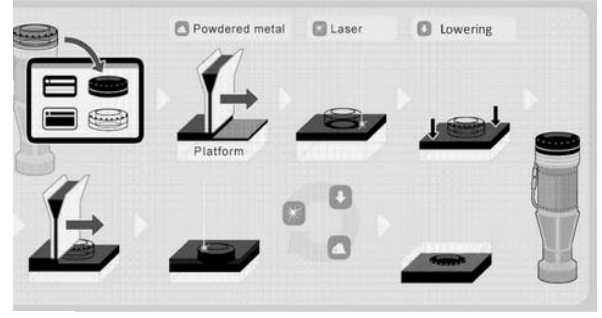
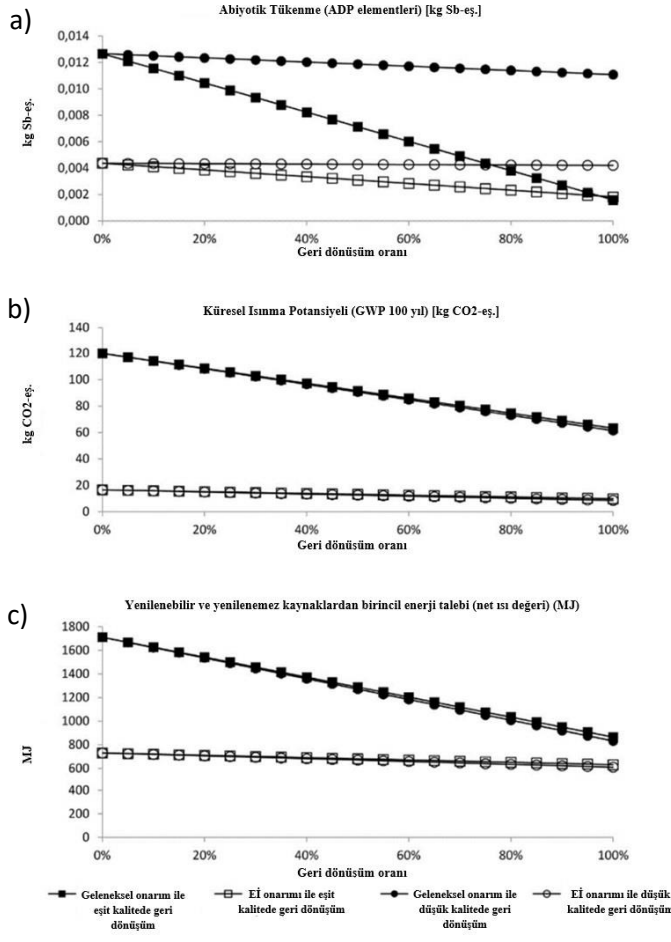
Şekil 7. Eİ ve Gİ ile üretilen parçaların beşikten mezara tüketilen enerji miktarları (Türkçeye çevrilmiştir.) [42]. (The amount of energy consumed from cradle to grave for parts produced with AM and conventional manufacturing.)

5. Sürdürülebilir Malzeme Kullanımı ve Üretim Sürecinin Optimizasyonu (Sustainable Material Usage and Optimization of the Production Process)

Sürdürülebilirlik, kaynakların tükenmeden ve çevreye olumsuz etki bırakmadan kullanılması anlamına gelir. Üretim süreçlerindeki önemli sürdürülebilirlik zorlukları arasında enerji kullanımı, atık oluşumu, su kullanımı ve üretilen ürünün çevresel etkisi bulunmaktadır. Sürdürülebilirlik, küresel ekolojik koşullarla (çevre), ekonomik kalkınma ile (teknoloji) ve toplumsal eşitlikle ilgilidir. Mühendislik prosedürleri genellikle ekonomik ilerleme ile ilişkilendirilir. Eİ, tasarımların hızlı prototiplenmesine ve yinelenmesine olanak tanımaktadır. İşlevsel prototipleri hızlı bir şekilde üretme yeteneği, mühendislerin ve tasarımcıların farklı tasarım yinelenmelerini çok daha kısa bir zaman diliminde değerlendirmesine ve test etmesine olanak tanımaktadır. Böylece ürün geliştirme süreci hızlanmaktadır. Eİ, parçaların ihtiyaç duyuldukça üretilmesine olanak tanıyarak envanter maliyetlerini ve kapsamlı depolama ihtiyacını azaltmakta ve bu isteğe bağlı üretim

yaklaşımı aynı zamanda tedarik zinciri gecikmelerini de en aza indirmektedir.

Bazı araştırmacılar, Eİ'nin, her işlem için yalnızca gerekli miktarda malzeme kullanarak ve dolayısıyla sifıra yakın atıkla ürünleri, parçaları ve montajları oluşturabilmesi nedeniyle sürdürülebilir bir çözüm olduğuna inanmaktadır [74]. Gİ yöntemleri ise özellikle malzeme çıkarma işlemi yapılan yöntemlerde, blok parçaların, ölçüleri ve ağırlıkları genellikle üretilmeye çalışılan parçadan önemli ölçüde (19:1'e varan oranlarda) büyüktür [75]. Diğer taraftan Eİ, nakliye ihtiyaçlarını ve paketlemeyi azaltarak bu kategorideki çevresel etkileri de azaltabilir, böylece hava ve plastik kirliliğini azaltmaya katkı sağlayabilir [76]. Eİ yöntemlerinin özgül enerji tüketiminin, geleneksel üretim süreçlerine kıyasla yaklaşık olarak 100 kat daha yüksek olduğu rapor edilmiştir [77]. Bir başka çalışmada Siemens endüstriyel gaz türbininde bir yanma odasının onarım prosedürü uygulanmış ve elde edilen sonuçlar, malzeme ve birincil enerji kullanımını önemli ölçüde azaltan bir Eİ tabanlı onarım prosedürünün etkili olduğunu göstermiştir (Şekil 8) [59].



Şekil 8. (a) Abiyotik tükenme potansiyeli (ADP elementleri), (b) küresel ısınma potansiyeli ve (c) birincil enerji talebi, (kg Sb-eş. = kilogram antimon eşdeğeri; kg CO₂-eş. = kilogram karbon dioksit eşdeğeri; net kal. değeri = net ısı değeri), d) Yanma odasını değiştirmek için kullanılan Eİ onarım süreci, e) Gaz türbinli motor (Türkçeye çevrilmiştir.) [59]. ((a) Abiotic Depletion Potential (ADP Elements), (b) Global Warming Potential, and (c) Primary Energy Demand (kg Sb-eq. = kilogram antimony equivalent; kg CO₂-eq. = kilogram carbon dioxide equivalent; net cal. value = net calorific value), (d) AM repair process used to change the combustion chamber, (e) Gas turbine engine)

Despeisse ve ark. Eİ'nin endüstrileşmesinin sürdürülebilirlik etkilerini incelemişlerdir ve metal tozunun malzeme kayıpları, destek yapıları nedeniyle bozulması dolayısıyla geri dönüşüm döngülerinin sınırlamaları göz önüne alındığında, potansiyel olarak %95 ila %98 ağırlığında geri dönüştürülebileceğini tahmin etmişlerdir [78].

Girdwood ve ark. [79], en verimli Eİ Ti havacılık parçası imalatı için üretim sürecinde yeni bir tasarım ve planlama modeli önermişlerdir. Bu çalışmada, kalite kontrolü (geometrik hassasiyet, yüzey kalitesi, vb.), enerji tüketimi, zaman (kurulum, bekleme ve programlama), malzeme atığı ve maliyeti analizleri yapılmıştır. Malzeme tasarrufları ölçülmüştür ve üretim parametreleri ve üretim makinesi kapasitesinin daha iyi tasarlanması ve planlanması durumunda ciddi iyileştirmeler sağlanabileceğini vurgulamışlardır.

6. Uygulama Alanları ve Gelecek Perspektifleri (Applications and Future Perspectives)

1990'ların başında sadece prototipleme amacıyla kullanılan Eİ, zaman içinde olgunlaşmaya başlamıştır. Günümüzde birçok havacılık şirketi, üretim hatlarına Eİ 'yi entegre etmektedir. Son eğilimler, havacılık üreticileri ile Eİ sağlayıcıları arasında artan iş birliği ve ortaklık, aynı zamanda Eİ sağlayıcılarının ana havacılık şirketleri tarafından satın alınması veya bünyelerine katılması yönündedir. 2014 ile 2016 arasında, metal Eİ makineleri ve ilgili ekipman sağlayan Eİ işletmelerinin sayısı 49'dan 97'ye çıkmıştır [80]. 2017'de havacılık endüstrisi, toplam Eİ pazarının %18,2'sini oluşturmuş ve gelecekte Eİ kullanımı için en umut verici endüstri olarak kabul edilmiştir [81].

Eİ ile ilgili uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik konusunda sınırlı literatür bulunsa da, üreticiler son zamanlarda bir Eİ ürününün tam yaşam döngüsünün malzeme ve enerji tüketimi açısından etkilerini incelemek için yaşam döngüsü değerlendirmelerini (LCA) kullanmaya başlamışlardır [82]. Dünya çapında tüm imalat endüstrilerini içeren son LCA'lar, çeşitli bileşenlerin Eİ ile üretiminde önemli maliyet tasarrufları sağlama potansiyelini ortaya koymuştur [83].

Artan kullanımına rağmen, Eİ'nin şu anda birçok ürüne uygulanmasını engelleyen bazı sınırlamaları vardır. Eİ süreçlerinin verimliliği şu anda düşüktür, dolayısıyla Eİ teknolojilerini yüksek hacimli üretime uygun değildir [84]. Geometrik tekrarlanabilirlik, kalıntı gerilmeler ve yüksek yüzey pürüzlülüğü gibi sorunlar, yüksek boyutsal hassasiyet, yüzey kalitesi ve yorgunluk direnci gerektiren uygulamalarda engeller oluşturur [36, 38, 85]. Bununla birlikte, endüstride Eİ teknolojilerini geliştirmeye yönelik yoğun bir odaklanma göz önüne alındığında, bu engellerin gelecek 20 yıl içinde aşılması öngörülmektedir [86].

Airbus, kabin askıları ve hava kanalları gibi parçaların üretiminde Eİ'yi kullanmaktadır. Airbus ayrıca, Eİ yazılım ve hizmet sağlayıcısı olan Materialise ile iş birliği yaparak, Eİ parçalarının tasarımını ve üretimini optimize eden bir yazılım geliştirmiştir. Boeing, Eİ'yi prototip üretimi ve düşük hacimli üretim parçalarına odaklanarak üretim süreçlerine entegre etmiştir. Birçok çevresel kontrol sistem kanalı, yapısal parça ve takım ekipmanı artık Eİ ile üretilmektedir. Boeing ayrıca, uçakları için titanyum yapısal parçaların Eİ üretim sürecini geliştirmek amacıyla Norsk Titanium ile iş birliği yapmıştır. GE Aviation, uçak motorlarında Eİ'yi geniş ölçüde kullanmaktadır. Eklemeli imalat teknikleri kullanarak geliştirdikleri ileri düzey yakıt nozzle'ları, motor performansını ve yakıt verimliliğini artırmıştır. GE Aviation aynı zamanda, havacılıktaki Eİ'nin potansiyelini daha fazla keşfetmek için araştırma ve geliştirme merkezlerine yatırım yapmıştır. Rolls-Royce, türbin kanatçıkları ve yakıt nozzle'ları gibi parçaları Eİ ile üretmektedir. Ayrıca, National Additive Manufacturing Innovation Institute ile iş birliği yaparak havacılıkta eklemeli imalatın kullanımını ilerletmeyi amaçlamaktadır. Lockheed Martin, prototip üretimi, takım yapımı ve bileşenlerinde Eİ'yi kullanmaktadır. Lockheed Martin ayrıca, gelecekte Eİ'den daha fazla fayda elde etmek amacıyla araştırma ve geliştirme projelerine yatırım yapmıştır. Prodways Technologies, Boeing ve Safran'ın ortak girişimi olup, havacılık uygulamaları için Eİ üretim sürecini geliştirmeye

odaklanmaktadır. Endüstri sınıfı 3D yazıcılar kullanarak yüksek performanslı polimerlerle büyük ölçekli yapısal uçak parçalarını üretebilen bu teknolojiyi geliştirmeyi amaçlamaktadır[34].

Havacılık endüstrisinin önde gelen şirketlerin Eİ'yi kullanımını zaman geçtikçe artmakta ve Eİ'nin, uçak tasarımı, üretimi ve bakımı üzerinde önemli bir devrime sahip olması beklenmektedir. Hava aracı parçaları tasarlayan ve üreten firmaların yeni teknolojileri güvenli bir şekilde uygulamalarını sağlamak amacıyla kuruluşlara EASA Part21 yetkisi verilerek belirli standartlar oluşturulmuştur. EASA Part21 yetkisi ve Eİ arasındaki ilişki, havacılık endüstrisinde yeni teknolojilerin güvenli ve uygun bir şekilde benimsenmesini teşvik etmeye yönelik önemli bir mekanizmayı temsil etmektedir. Havacılık ürünlerinin tasarım ve üretiminde kullanılan her teknolojinin, emniyet ve uygunluk gereksinimlerini karşılamak üzere sıkı bir şekilde denetlenmesi önem arz etmektedir.

Eİ teknolojilerinin havacılık sektöründe ilgi görmesi ve kullanımının hızla artmasıyla beraber, EASA ve FAA önemli havacılık firmalarının katılımıyla, havacılıkta Eİ kullanımıyla ilgili düzenli olarak çalıştay düzenlemektedir. 2023 yılında yapılan son çalıştayda sunulan raporlara göre; Eİ teknolojilerinin havacılıkta kullanım yerlerinin hassas motor parçalarına kadar uzandığı ancak üretilen parçaların mekanik performans olarak bazı noktalarda sınırlı kaldığı ve ikincil işlemlere ihtiyacın olduğu anlaşılmaktadır. Ancak genel olarak Eİ teknolojilerinin umut vadettiği ve Eİ teknolojileriyle ilgili çalışmaların artmasıyla birlikte dezavantajlarının elemine edilerek kullanımının yaygınlaşacağı açık bir şekilde görülmektedir [87].

Doğası gereği, uçak tasarımı yenilikçiliği teşvik etmektedir. Eİ, mühendislerin yeni kavramları keşfetmelerine, uçak parçalarının aerodinamikleri iyileştirmelerine ve performanslarını artırmalarına olanak tanımaktadır. Ayrıca, üretim süreçlerini optimize ederek, malzeme israfını azaltarak ve talep üzerine üretimi mümkün kılarak, artan verimlilik ve maliyet azaltma potansiyeli sunar. Enerji verimliliğindeki bu artış sayesinde havacılığın olumsuz çevresel etkilerinin minimize edilebilmesine önemli seviyede katkı sağlanacağı öngörülmektedir.

7. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu derleme çalışması, Eİ uygulamalarının havacılık endüstrisindeki enerji verimliliğini artırma ve emisyon azaltma potansiyelini kapsamlı bir şekilde

sunmayı amaçlanmıştır. Eİ'nin başlangıcında, genellikle sınırlı servis uygulamasına sahip bir prototip seçeneği olarak görülmekteydi. Ancak yıllar içinde, teknolojik kapasitelerdeki ilerlemeler ile birlikte parçaların Eİ ile nihai ürün elde edilmesi sağlanabilmiştir. Ancak üretilen Eİ parçaların mekanik özelliklerinin tekrarlanabilirliği ve tutarlılığı henüz tam anlaşılamadığından, standartlar, sertifikasyonlar ve muayene protokollerine yönelik gelişmeler açısından daha fazla gelişme gerekmektedir.

Şu anki durumuyla Eİ, Gİ yöntemlerinin tamamen yerine geçemez, ancak Gİ yöntemleri ile paralel olarak çalışır durumdadır. Bu durumda Eİ, düşük hacimli üretim serileri için genellikle daha kârlıdır. Yüksek hacimli üretim serileri için mevcut Gİ altyapısı, Eİ'ye kıyasla önemli ölçüde daha yüksek verimlilikle toplu üretimlere izin verir. Ancak, genellikle havacılık endüstrisinin yalnızca düşük ve orta hacimli bileşen üretimi gerektirmesi nedeniyle Eİ için şimdilik sorun teşkil etmemektedir.

Eİ, diğer üretim yöntemlerine kıyasla yüksek malzeme kullanımı ve düşük malzeme atığı avantajına sahiptir. Özellikle CNC işleme gibi geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, Eİ yöntemleri malzeme kullanımını optimize edebilir ve atık miktarını minimize edebilir. Bununla birlikte, mevcut durumda Eİ yöntemlerinde birim başına enerji tüketimi daha yüksek olsa da Eİ üreticileri istenilen parça sayısını tam olarak veya tek bir makine işlemi içinde birden çok parça üretebilir, bu da performans verimliliğini artırabilmektedir. Bu performans verimliliği doğrudan çevresel etkileri olumlu yönde etkilemektedir.

Küresel iklim değişikliğiyle mücadelede, hükümetler ve havacılık kuruluşları, karbon emisyonlarını azaltma hedeflerini belirlemişlerdir. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA) gibi kuruluşlar, üye ülkeler için bu hedeflere ulaşma konusunda rehber niteliğinde olan kilometre taşlarını açıklamışlardır. 2020'den itibaren net havacılık CO₂ emisyonlarının sınırlandırılması ve 2050'ye kadar havacılık CO₂ emisyonlarında %50'lik bir azalma bulunmaktadır [20, 88, 89]. Bu hedeflere ulaşılmasında Eİ ile üretilen parça sayısının artırılmasının önemli bir paya sahip olacağı düşünülmektedir. Enerji tüketimi açısından, literatürdeki çalışmalar genellikle Eİ'nin Gİ'den daha fazla enerji tükettiğini belirtse de, Eİ ile üretilen parçaların hizmette kullanılmasıyla büyük enerji tasarrufları elde edildiğini sonuçlanmaktadır. Bu tasarruflar, Eİ'nin, mekanik özelliklerini değiştirmeden optimize etme ve hafifletme yoluyla

parçanın kütlesini azaltma yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Parçaların hizmet ömrü boyunca, bu optimizasyonun, azaltılmış yakıt tüketimi sayesinde CO₂ emisyonlarında önemli miktarda azalmalara katkıda bulunması beklenmektedir.

Çevresel etkilerin minimize edilmesinin yanında Eİ'nin sürdürülebilirlik açısından bakıldığında insan sağlığına olan etkisi önemle dikkate alınmalıdır. Eİ işlemlerinin iş sağlığına olası zararları, ultra ince metallerin ve nanopartiküllerin solunması veya teması sonucu ortaya çıkabilir ve bu da ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Emniyet riskleri arasında elektrostatik deşarj ve kıvılcım nedeniyle yangın veya patlamalar bulunmaktadır. Bu riskler, vakum altında veya inert bir atmosferde işlem yapma, temizleme sistemleri kullanma ve solunum cihazları kullanma gibi önlemlerle azaltılabilir.

Öte yandan, Eİ yöntemlerinin neredeyse net şekilli bileşenler üretebilme kapasitesi sayesinde, atık oranlarını ve gerekli girdi malzemeyi önemli ölçüde azalttığı için genel üretim verimliliğini artırma potansiyeli bulunmaktadır. Bu, atık oranlarını ve girdi malzeme ihtiyacını azaltarak çevre dostu bir yaklaşım sunar. Ancak, bu avantajlar, daha fazla araştırma ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi için daha fazla yaşam döngüsü analizi çalışması gerektirir.

Enerji tüketiminin azaltılarak çevre emisyonların en düşük seviyeye indirilmesi hedeflerine ulaşmak için havacılık şirketleri, Eİ teknolojisinden faydalanarak malzeme hafifletme, yakıt tüketimini azaltma ve ürün performans verimliliğini artırmak için parça yeniden tasarımı ve birleştirmeye odaklanması gerekmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı 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)

Nedim SUNAY: Literatür taraması, araştırma, düzenleme ve yazma sürecini yürütmüştür.

He conducted the literature review, research, editing and writing process.

Enis Turhan TURGUT: 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 (REFERENCES)

1. Gökhan, Ö. 2020. Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), p 606-621.
2. Pereira, T., Kennedy, J.V.Potgieter, J. 2019. A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job, Procedia Manufacturing, 30 11-18. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.003
3. Achilles, C., Tzetzis, D.Raimondo, M.O. 2017. Alternative production strategies based on the comparison of additive and traditional manufacturing technologies, International Journal of Production Research, 55(12), p 3497-3509. DOI: 10.1080/00207543.2017.1282645
4. Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F.Mehrpouya, M. 2019. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review, Journal of Manufacturing Systems, 53 124-149. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.08.005
5. Najmon, J.C., Raeisi, S.Tovar, A. 2019. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry, Additive manufacturing for the aerospace industry, 7-31. DOI: 10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9
6. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B.Khorasani, M. 2021. Design for additive manufacturing, Additive manufacturing technologies, 555-607. DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7_19
7. Additive Applications. <https://www.ge.com/additive/industry-overview> (Erişim tarihi 29.01.2024).
8. Additive Manufacturing Applications. <https://optomec.com/additive-manufacturing/> (Erişim tarihi 29.01.2024).
9. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Hui, D. 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, Composites Part B: Engineering, 143 172-196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
10. Rejeski, D., Zhao, F.Huang, Y. 2018. Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing, Additive Manufacturing, 19 21-28. DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.019
11. Airbus-Commercial-Aircraft <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-07/GMF-2019-2038-Airbus-Commercial-Aircraft-book> (Erişim tarihi 29.01.2024).
12. Future Of Aviation. <https://www.icao.int/Meetings/FutureOfAviation/Pages/default.aspx> (Erişim tarihi 19.01.2024).
13. Fan, W., Sun, Y., Zhu, T.Wen, Y. 2012. Emissions of HC, CO, NOx, CO2, and SO2 from civil aviation in China in 2010, Atmospheric Environment, 56 52-57. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.03.052
14. Nickels, L. 2015. AM and aerospace: an ideal combination, Metal Powder Report, 70(6), p 300-303. DOI: 10.1016/j.mprp.2015.06.005
15. Ford, S.Despeisse, M. 2016. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, Journal of cleaner Production, 137 1573-1587. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150
16. Sürmen, H.K. 2019. Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), p 373-392.

17. Liu, Z., Li, C., Fang, X.Guo, Y. 2018. Energy consumption in additive manufacturing of metal parts, *Procedia Manufacturing*, 26 834-845. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.104
18. Garcia, F.L., Moris, V.A.d.S., Nunes, A.O.Silva, D.A.L. 2018. Environmental performance of additive manufacturing process—an overview, *Rapid Prototyping Journal*, 24(7), p 1166-1177. DOI: 10.1108/RPJ-05-2017-0108
19. Agrawal, R. 2019. State of art review on sustainable additive manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, 25(6), p 1045-1060. DOI: 10.1108/RPJ-04-2018-0085
20. Mohd Yusuf, S., Cutler, S.Gao, N. 2019. The impact of metal additive manufacturing on the aerospace industry, *Metals*, 9(12), p 1286. DOI: 10.3390/met9121286
21. Monteiro, H., Carmona-Aparicio, G., Lei, I.Despeisse, M. 2022. Energy and material efficiency strategies enabled by metal additive manufacturing—A review for the aeronautic and aerospace sectors, *Energy Reports*, 8 298-305. DOI: 10.1016/j.egy.2022.01.035
22. Data, R. 2019. Additive Manufacturing Market to Reach USD 23.33 Billion by 2026.
23. Oliveira, J., Santos, T.Miranda, R. 2020. Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice, *Progress in Materials Science*, 107 100590. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100590
24. Sames, W.J., List, F., Pannala, S., Dehoff, R.R.Babu, S.S. 2016. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International materials reviews*, 61(5), p 315-360. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649
25. DebRoy, T., Mukherjee, T., Milewski, J., Elmer, J., Ribic, B., Blecher, J.Zhang, W. 2019. Scientific, technological and economic issues in metal printing and their solutions, *Nature materials*, 18(10), p 1026-1032. DOI: 10.1038/s41563-019-0408-2
26. Çelik, K.Özkan, A. 2017. Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), p 107-121.
27. Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F.Newkirk, J. 2017. Aerospace applications of laser additive manufacturing, in *Laser additive manufacturing*, Elsevier, p. 351-371. DOI: 10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0
28. M., O'Brien, 2018. Existing standards as the framework to qualify additive manufacturing of metals, *IEEE Aerospace Conference of Conference.:* IEEE.
29. George, C. 2017. Marshall Space Flight Center. Standard for Additively Manufactured Spaceflight Hardware by Laser Powder Bed Fusion in Metals. NASA Marshall Space Flight Center Huntsville, AL, USA.
30. Kumar, L.J.Krishnadas Nair, C. 2017. Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry, *Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies*, 39-54. DOI: 10.1007/978-981-10-0812-2_4
31. Jupiter Orbit Insertion 2016.—Press Kit, J.P.L.N.P., CA, USA.
32. Kellner, T. 2017. An epiphany of disruption: GE additive chief explains how 3D printing will upend manufacturing, *GE Reports*, 13
33. Najmon, J.C., Raeisi, S.Tovar, A. 2019. 2.1 Aerospace requirements and opportunities for additive manufacturing, *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 7. DOI: 10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9
34. Xometry T., 2023. 6 Main Advantages of 3D Printing in the Aircraft Industry. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/advantages-of-3d-printing-in-the-aircraft-industry/>(Erişim tarihi 24.01.2024).
35. Manufacturing, A., 2018. Siemens Uses Innovative Technology to Produce Gas Turbines., Press—Siemens Global Website. Munich.

36. Horn, T.J.Harrysson, O.L. 2012. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications, *Science progress*, 95(3), p 255-282. DOI: 10.3184/003685012X13420984463047
37. Morrow, W., Qi, H., Kim, I., Mazumder, J.Skerlos, S. 2007. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 15(10), p 932-943. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.11.030
38. Huang, S.H., Liu, P., Mokasdar, A.Hou, L. 2013. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, *The International journal of advanced manufacturing technology*, 67 1191-1203. DOI: 10.1007/s00170-012-4558-5
39. Munsch, M., Wycisk, E., Kranz, J., Seyda, V.Claus, E. 2012. Functional products through laser additive manufacturing of TiAl6V4, in *Workshop LAM Laser Additive Manufacturing.of Conference*.
40. Daisy C. 2013. Jet engine makers get lift from 3-D printing technology <https://edition.cnn.com/travel/article/leap-engine-3-d-printing/index.html>. (Erişim tarihi 30.01.2024).
41. IEA World energy outlook 2022. Conference.: IEA Paris, France.
42. Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J.Masanet, E. 2016. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components, *Journal of cleaner production*, 135 1559-1570. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.109
43. 2023. Use of energy explained. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/transportation>. (Erişim tarihi 28.01.2024).
44. Façanha, C., Blumberg, K.Miller, J. 2012. Global transportation energy and climate roadmap, *International Council on Clean Transportation*.
45. Dornfeld, D. 2010. *Green Manufacturing: Degrees of Perfection*.
46. Allwood, J.M., Ashby, M.F., Gutowski, T.G.Worrell, E. 2011. Material efficiency: A white paper, *Resources, conservation and recycling*, 55(3), p 362-381. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.11.002
47. Kaufmann, M. 2008. *Cost/weight optimization of aircraft structures (Doctoral dissertation, KTH)*.
48. Cole, W. 2004. Boeing engineers and technologists are constantly developing better ways to design and make products, *Boeing Frontiers*.
49. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E.Emmelmann, C. 2016. Additive manufacturing of metals, *Acta Materialia*, 117 371-392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019
50. Little, M. 2010. Redefining What's Possible, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 154(2), p 192-200.
51. Tang, Y., Mak, K.Zhao, Y.F. 2016. A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 137 1560-1572. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.037
52. Gebler, M., Uiterkamp, A.J.S.Visser, C. 2014. A global sustainability perspective on 3D printing technologies, *Energy policy*, 74 158-167. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.08.033
53. Möller, M., Vykhhtar, B., Emmelmann, C., Li, Z., Huang, J. 2019. Sustainable Production of Aircraft Systems: Carbon Footprint and Cost Potential of Additive Manufacturing in Aircraft Systems. In *8th international Workshop on Aircraft System Technology (AST), Hamburg*.
54. Hettesheimer, T., Hirzel, S.Roß, H.B. 2018. Energy savings through additive manufacturing: an analysis of selective laser sintering for automotive and aircraft components, *Energy Efficiency*, 11 1227-1245. DOI: /10.1007/s12053-018-9620-1
55. Paris, H., Mokhtarian, H., Coatanéa, E., Museau, M.Ituarte, I.F. 2016. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies, *CIRP Annals*, 65(1), p 29-32. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.036

56. Peng, S., Li, T., Wang, X., Dong, M., Liu, Z., Shi, J.Zhang, H. 2017. Toward a sustainable impeller production: Environmental impact comparison of different impeller manufacturing methods, *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), p S216-S229. DOI: 10.1111/jiec.12628
57. Wilson, J.M., Piya, C., Shin, Y.C., Zhao, F.Ramani, K. 2014. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis, *Journal of Cleaner Production*, 80 170-178. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.084
58. Liu, Z., Jiang, Q., Cong, W., Li, T.Zhang, H.-C. 2018. Comparative study for environmental performances of traditional manufacturing and directed energy deposition processes, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15 2273-2282. DOI: 10.1007/s13762-017-1622-6
59. Walachowicz, F., Bernsdorf, I., Papenfuss, U., Zeller, C., Graichen, A., Navrotsky, V., Rajvanshi, N.Kiener, C. 2017. Comparative energy, resource and recycling lifecycle analysis of the industrial repair process of gas turbine burners using conventional machining and additive manufacturing, *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), p S203-S215. DOI: 10.1111/jiec.12637
60. Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrimsson, J.G.Thiede, S. 2015. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications, *Journal of Cleaner Production*, 107 615-625. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.009
61. Kellens, K., Yasa, E., Dewulf, W., Kruth, J.Duflou, J. (Year) Energy and resource efficiency of SLS/SLM processes. in 2011 International Solid Freeform Fabrication Symposium.of Conference.: University of Texas at Austin. DOI: 10.26153/tsw/15272
62. Mami, F., Revéret, J.P., Fallaha, S.Margni, M. 2017. Evaluating eco-efficiency of 3D printing in the aeronautic industry, *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), p S37-S48. DOI: 10.1111/jiec.12693
63. Östlin, J., Sundin, E.Björkman, M. 2009. Product life-cycle implications for remanufacturing strategies, *Journal of cleaner production*, 17(11), p 999-1009. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.02.021
64. Bi, G.Gasser, A. 2011. Restoration of nickel-base turbine blade knife-edges with controlled laser aided additive manufacturing, *Physics Procedia*, 12 402-409. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.051
65. Kaierle, S., Overmeyer, L., Alfred, I., Rottwinkel, B., Hermsdorf, J., Wesling, V.Weidlich, N. 2017. Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19 196-199. DOI: 10.1016/j.cirpj.2017.04.001
66. Xue, L., Donovan, M., Li, Y., Chen, J., Wang, S.Campbell, G. (Year) Integrated rapid 3D mapping and laser additive repair of gas turbine engine components. in International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics.of Conference.: AIP Publishing. DOI: 10.2351/1.5062894
67. Kelbassa, I., Gasser, A., Wissenbach, K. 2004. Laser cladding as a repair technique for BLISKS out of titanium and nickel base alloys used in aero engines. In Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics. Laser Institute of America.
68. Richter, K. H., Orban, S., Nowotny, S. 2004. Laser cladding of the titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades. In International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Laser Institute of America.
69. Lin, C.-M., Chandra, A., Morales-Rivas, L., Huang, S.-Y., Wu, H.-C., Wu, Y.-E.Tsai, H.-L. 2014. Repair welding of ductile cast iron by laser cladding process: microstructure and mechanical properties, *International journal of cast metals research*, 27(6), p 378-383. DOI: 10.1179/1743133614Y.0000000126
70. Technologies, S. 2020. 4 Benefits of Lightweighting. <https://sybridge.com/lightweighting-benefits/>.(Erişim tarihi 30.01.2024).
71. Alami, A.H., Olabi, A.G., Alashkar, A., Alasad, S., Aljaghoub, H., Rezk,

- H.Abdelkareem, M.A. 2023. Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals, *Ain Shams Engineering Journal*, 14(11), p 102516. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102516
72. Zhang, H., Nagel, J.K., Al-Qas, A., Gibbons, E.Lee, J.J.-Y. 2018. Additive manufacturing with bioinspired sustainable product design: a conceptual model, *Procedia Manufacturing*, 26 880-891. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.113
73. Yusuf, S., Cutler, S.Gao, N., Review: The impact of metal additive manufacturing on the aerospace industry. *Metals* 9 (12): 1286. 2019. DOI: 10.3390/met9121286
74. Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O.Garrett, B. 2011. Could 3D printing change the world, *Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*, Atlantic Council, Washington, DC, 3 1-16.
75. Reeves, P. 2009. Additive Manufacturing–A supply chain wide response to economic uncertainty and environmental sustainability, *Econolyst Limited, The Silversmiths, Crown Yard, Wirksworth, Derbyshire, DE4 4ET, UK.*
76. Kate, D. 2015. Can We 3D Print our Way to Sustainability?. <http://www.earthisland.org>, (Erişim tarihi 30.01.2024).
77. Yoon, H.-S., Lee, J.-Y., Kim, H.-S., Kim, M.-S., Kim, E.-S., Shin, Y.-J., Chu, W.-S.Ahn, S.-H. 2014. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1 261-279. DOI: 10.1007/s40684-014-0033-0
78. Umeda, S., Nakano, M., Mizuyama, H., Hibino, N., Kiritsis, D., Von Cieminski, G. 2015. *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2015, Proceedings, Part I Tokyo, Japan*, 459.
79. Girdwood, R., Bezuidenhout, M., Hugo, P., Conradie, P., Oosthuizen, G.Dimitrov, D. 2017. Investigating components affecting the resource efficiency of incorporating metal additive manufacturing in process chains, *Procedia Manufacturing*, 8 52-58. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.006
80. Kianian, B. 2017. *Wohlers report 2017: 3d printing and additive manufacturing state of the industry, annual worldwide progress report: Chapters titles: The middle east, and other countries.*
81. Wohler, T. 2016. *Executive summary of the Wohlers Report 2016*, Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado.
82. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B.P.Pennington, D.W. 2004. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications, *Environment international*, 30(5), p 701-720. DOI: 10.1016/j.envint.2003.11.005
83. Villamil, C., Nylander, J., Hallstedt, S. I., Schulte, J., Watz, M. 2018. Additive manufacturing from a strategic sustainability perspective. In *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (pp. 1381-1392).
84. Wohlers, T. 2013. *State of additive manufacturing, US Manufacturing Competitiveness Initiative Dialogue*, 16.
85. Frazier, W.E. 2014. Metal additive manufacturing: a review, *Journal of Materials Engineering and performance*, 23 1917-1928. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z
86. Gausemeier, J., Echterhoff, N.Wall, M. 2013. *Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing–Innovation Roadmapping of Required Advancements*, University of Paderborn.
87. *Joint EASA-FAA Additive Manufacturing Workshop 2023* [https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/events/joint-easa-faa-additive-](https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/events/joint-easa-faa-additive)

manufacturing-workshop-2023. (Erişim tarihi 30.01.2024).

88. Jones, C. P., Robertson, E. H., Koelbl, M. B., Singer, C. 2016. Additive manufacturing a liquid hydrogen rocket engine (No. M16-5225).
89. Waller, J. M. 2018. Nondestructive testing of additive manufactured metal parts used in aerospace applications (No. JSC-E-DAA-TN49270).