

Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi

Hakan Dedeakayoğulları¹, Alaattin Kaçal^{2,*}

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Kütahya, Türkiye

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 26.03.2020

Kabul: 27.04.2020

Anahtar Kelimeler:

Eklemeli İmalat

Laser Işını Ergitme

Ti6Al4V

İşlenebilirlik

ÖZET

Son yıllarda imalat sektörüne giren ve hızla gelişen, hızlı prototipleme ve üç boyutlu (3B) baskı adlarıyla da bilinen eklemeli imalat (Eİ); geleneksel bilgisayar destekli üretimdeki talaş kaldırma yaklaşımının aksine malzemelerin katmanlar halinde birleştirilerek, üretilmesine imkân sağlayan modern bir imalat yöntemidir. Eİ yöntemi, karmaşık geometriye sahip parçaların imalatı, hızlı tedarik ve operasyon, düşük maliyet, verimli malzeme kullanımı, montaj aşamalarının sadeleştirilebilmesi, iç kanal ve boşluklara sahip parçaların üretilmesi, uzaktan üretim için uygun bir imalat yöntemi olması gibi birçok avantaja sahiptir. Ancak yüksek sayılı üretimler dikkate alındığında Eİ seri üretimden daha maliyetli olmaktadır. Malzeme çeşidinin ve baskı boyutunun sınırlı olması, üretim sonrası son-işlem uygulamaları Eİ'nin diğer dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. Yetersiz yüzey kalitesi talaşlı imalat araştırmalarına ihtiyacı öne çıkarmıştır. Eİ yöntemiyle üretilen parçaların uygulama gereksinimleri karşılamak için talaşlı imalat operasyonlarına da ihtiyacı vardır. Eİ ile üretilen parçaların talaşlı imalatında ise geleneksel malzemelerden parça üretmeye kıyasla farklı işlenebilirlik özellikleri ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, işleme parametrelerinin Eİ parçalarının delme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak büyük önem taşımaktadır. Yapılacak araştırmalarla Eİ üretim maliyetlerinde avantaj elde edilebilir. Eİ'de eksikliği görülen alanlarda yapılacak çalışmalar her zaman olacaktır. Geleceği olan bir imalat prosesinin araştırılması ülkemizin havacılık ve savunma sanayisindeki hedefleri düşünüldüğünde önem arz etmektedir.

Evaluation of Studies on Additive Manufacturing Methods and Used Machining Methods

ARTICLE INFO

Received: 26.03.2020

Accepted: 27.04.2020

Keywords:

Additive Manufacturing

Laser Beam Melting

Ti6Al4V

Machinability

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM), which has entered the manufacturing sector in recent years and is rapidly developing, also known as rapid prototyping and three-dimensional (3D) printing names; It is a modern manufacturing method that allows the materials to be combined and produced in layers as opposed to the stock removal approach in traditional computer aided production. The AM method has many advantages such as the production of complex geometry parts, rapid supply and operation, low cost, efficient material use, simplifying assembly stages, producing parts with internal channels and cavities, and being a suitable manufacturing method for remote production. However, considering the high number of productions, AM is costlier than mass production. The limited variety of materials and print size, post-production post-processing applications are other disadvantages of AM. Poor surface quality has highlighted the need for machining research. Parts produced by the AM method also need machining operations to meet application requirements. In machining of parts produced with AM, different machinability properties may emerge compared to producing parts from traditional materials. For this reason, it is of great importance to investigate the effects of machining parameters on the piercing properties of AM parts. Advantages in AM production costs can be obtained through the researches to be carried out. There will always be studies to be carried out in areas that have deficiencies in AM. Researching a future manufacturing process is important considering the goals of our country in the aviation and defence industry.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

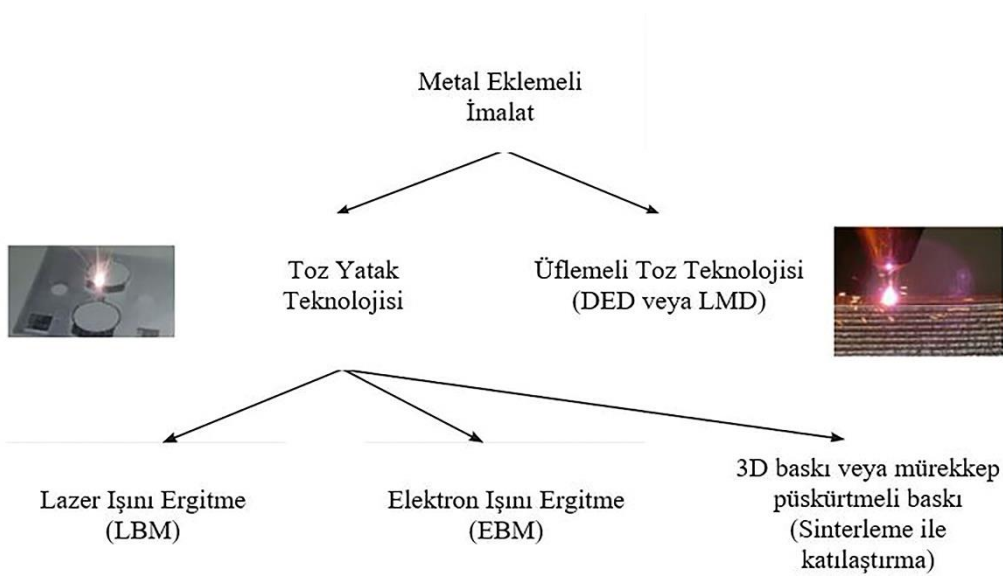
İmalat endüstrilerinde talaşlı imalat (tornalama, frezeleme, delme, taşlama vb.) ve talaşsız imalat (döküm, plastik şekil verme ve kaynak vb.) yöntemleri başlıca imalat yöntemleri olarak öne çıkmaktadır. Bunların yanında elektro erozyon, lazer, ultrasonik, basınçlı su jeti ve plazma ile işleme gibi yeni nesil imalat yöntemleri de kullanılmaktadır. Son yıllardaki hızlı teknolojik gelişmelerle birlikte imalat sektörüne giren ve hızla gelişen ilgi çekici bir imalat yöntemi olan eklemeli imalattır [1]. Hızlı prototipleme ve üç boyutlu (3B) baskı adlarıyla da bilinen eklemeli imalat (Eİ); geleneksel bilgisayar destekli üretimdeki talaş kaldırma yaklaşımının aksine malzemelerin katmanlar halinde birleştirilerek, karmaşık geometriye parçaların üretilmesine imkân sağlayan modern bir imalat yöntemidir. Bazı sektörlerde teknolojiye gelişmeler, müşteri beklentileri ve güvenlik taleplerinin sürekli artması tasarımı yapılan parçaları karmaşıklaştırmaktadır. Bu da geleneksel imalat yöntemlerinden modern imalat yöntemlerine geçişi arttırmaktadır. Bu üretim yöntemleri otomotiv, havacılık, biyomedikal, tıp, gıda, eğitim ve eğlence sektörlerinde artarak kullanılmaktadır. Üretim yaklaşımlarının değiştiği ve bilginin dijital olarak aktarıldığı günümüzde endüstrinin endüstri 4.0 ile eklemeli imalatın geniş çapta yayılacağı ön görülmektedir. Çünkü akıllı endüstri olarak da bilinen endüstri 4.0, 3B yazıcılarla son derece uyumlu olan nesnelerin interneti, hizmetlerin interneti, büyük veri, bulut tabanlı hesaplama, siber-fiziksel sistemler gibi bileşenlerden oluşmaktadır. [2-5]. Son şekle yakın ve minimum malzeme hacmi ile yapılan bu imalat yönteminde, polimer esaslı malzemeler, takım çeliği, paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımları, karbür metal tozları kullanılarak kaynak kabiliyeti iyi olan malzemelerden endüstriye parça imalatı yapılabilir hale gelmiştir [4]. Eİ'nin metal tozları ile birlikte kullanılması yeni ve büyüyen bir endüstri sektörüdür. Bu yöntem, daha önce olduğu gibi sadece prototipler değil, metalden bitmiş şekilli karmaşık parçalar üretmek için de uygun bir yöntemdir. Eklemeli üretim artık havacılık-uzay, enerji, otomotiv, tıp, aletler ve tüketici ürünleri gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde hem bir tasarım devrimine hem de bir endüstriyel devrime olanak vermektedir [6]. Son on yılın gelişmeleri, lazer ışını Eritme (LBM)'nin sadece prototipleme ve kalıp üretimi için değil, aynı zamanda protez ve küçük seri üretim gibi son derece kişiselleştirilmiş ürünler için umut verici, güvenilir ve tamamlayıcı bir üretim yöntemi olduğunu göstermektedir [7,24].

Eİ'de toz malzemenin şekli ve boyutu, lazer gücü, tarama yönü, tarama hızı, tarama çizgi aralığı ve katman kalınlığı gibi işlem parametrelerinin ürün mekanik dayanımı, boyutsal değişimi ve yüzey kalitesi üzerine önemli bir etkiye sahiptir [4]. Katmanlar malzemenin bir ısı kaynağı ile yerel olarak eritilmesiyle oluşturulduğundan malzemelerin termo-fiziksel özellikleri önemle ele alınmalıdır [3]. Lazer gücünün artması çekme dayanımını artırırken, tozların yüksek lazer enerjisini absorbe ettiklerinden dolayı daha fazla boyutsal değişime neden olduğu ve dolayısıyla yüzey kalitesini düşürdüğü belirtilmektedir [4].

Ancak yüksek sayılı üretim beklentileri oluştuğunda, Eİ seri üretimden daha maliyetli olabilmektedir. Ayrıca bazı havacılık, sağlık vb. kritik öneme sahip alanlarda yüksek mekanik özellikli ve çözünürlüklü basım yapabilen 3B yazıcılar gerekmektedir. Böylesi bir durumda yazıcıların yüksek fiyatları bu teknolojinin kullanımını kısıtlamaktadır. Malzeme çeşidinin ve baskı boyutunun sınırlı olması, gözeneklilik, üretim için tasarım zorluğu, baskı işlemi bittikten sonraki son işlem uygulamaları 3B baskı teknolojisinin diğer dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu alanda endüstriyel ve akademik ortamlarda geliştirme çalışmaları sürekli devam etmektedir. Tasarım ve son işlem aşamaları üzerine yoğunlaşıldığı söylenebilir. Eİ Sonrasında yapılan son işlemler (Post Processing); makineyle işleme, elektro erozyon, bilya püskürtme, taşlama, cilalama, yüzey işleme, ısıl işlem, artık poroziteleri gidermek için sıcak izostatik presleme (HIP) ve kontroldür. [2, 6,8]. Bu çalışmada katmanlı imalat ile üretilen metalik malzemelerin kaynakla birleştirilmesi sonucu mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin araştırıldığı çalışmalar derlenmiştir.

2. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ (ADDITIVE MANUFACTURING METHODS)

Eklemeli imalat esaslı parça imalat yöntemleri Şekil 1'deki şemada verilmiştir. Ayrıca daha geniş sınıflandırma Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Eklemeli imalat yöntemleri (Additive manufacturing methods) [6]

Eİ yöntemlerinin uygulanmasında en yaygın kullanılan teknolojinin Stereolitografi (Stereolithography SLA) olduğu görülmektedir. Bu yöntem yüksek doğrulukta, renkli parçalar üretebilmektedir. Ancak parçalarda çarpılma ve büzülme olabilmektedir. Mukavemetli parçalar yapılacağına seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering SLS), ergiterek yığılma ile modelleme (Fused Deposition Modeling FDM), elektron ışını ergitme (Electron Beam Melting EBM) ve şekil biriktirme imalat prosesi (Shape Deposition Manufacturing SDM) teknolojileri tercih edilebilir. Özellikle SLS, EBM ve SDM teknolojileri metal parça üretimini mümkün kılmaktadır. Fonksiyonel parça üretiminde SLS, SLA, FDM, EBM ve SDM sistemleri avantaj sağlamaktadır [1]. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) metodunun işlem süreleri, süreç analizleri, hasar oluşumundaki sıcaklık dağılım etkileri üzerine yapılan çalışmalarda; mevcut denklemler ve imalatın tüm adımlarını ve her türlü gideri hesaplamaya dâhil ederek genel bir maliyet ve süreç hesaplaması denklemi türetilmiştir. Geliştirilen model ve elde edilen sonuçlar DMLS ile imal edilmesi planlanan parçaların imalat süreleri, verimliliği ve hataların giderilmesi konusunda yapılması gerekenleri endüstrileşme potansiyeli ve imalatçılar tarafından kullanılabilirliğini arttırmıştır [9, 10]. SLS/E İ için lazer parametre değerlerine göre imalatı yapılacak metal parçanın mekanik özelliklerin tahminini için geliştirilen bulanık mantık modeli geleneksel yöntemler ile imal edilmiş 316L paslanmaz çelik parçadan daha iyi çekme dayanımına ve sertliğe sahip son kullanım parça imalatına imkan vermektedir [11]. Bunun yanı sıra Eİ ile, dövme çubuktan işlenmiş bir diz implantında işlemeyen kaynaklanan malzeme atıkları %80'e kadar ulaşabilir [12]. Sofu'nun çalışmasında, SLS ve SLM makinelerine lineer motorlar ve galvanotarıyıcı adapte ederek gövde tasarımının CAD modeli yapılmış ve lazerin çalışma alanı genişletilmiştir. Yeni oluşturulan CAD modelinin imalatının gerçekleştirerek ileride bu cihazların yerli üretiminin yapılması ve mevcut teknoloji üzerinde gelişmeler yapmak için geleceğe ışık tutması amaçlanmıştır [13]. Polat'ın çalışmasında, lazer ergitme metodu ile üretime yönelik bir düzene geliştirilmiştir. Bu düzeneğin üretim yeteneğini üzerine, üretimi etkileyen temel işlem parametrelerinin ürün üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneylerde Stellite-12 eşdeğeri toz kullanılmıştır. İşlem parametrelerinden lazer gücü, lazer tarama hızı, lazer frekansı, lazer tarama şekli ve katman kalınlığı göz önüne alınmıştır. MATLAB ortamında geliştirilen program ile görüntü işleme esaslı analizler yapılarak işlem parametrelerinin gözeneklilik oranına olan etkileri karşılaştırılmıştır. Lazer gücündeki artışın, tarama hızındaki azalmanın ve lazer frekansındaki artışın lazer enerji yoğunluğunu arttırmıştır. Giriş ısısının artışının uygun ergitmenin gerçekleşmesine sebep olduğu ve bu durumun gözenekliliği azalttığı belirtilmiştir [14].

Tablo 1. Eklemeli imalat yöntemleri ve özellikleri (Additive manufacturing methods and properties) [2]

	TİP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER
EKLEMELİ İMALAT	SIVI	Eriyik	Malzeme Ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal Enerji	-Düşük yazıcı maliyeti -Çoklu malzeme ile baskı -Yüksek mukavemet -Düşük parça çözünürlüğü -Zayıf yüzey iş-sonu -Düşük baskı hızı
		Polimerize edilebilir	Fotopolimerisasyon	SL(SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV Işını	-Yüksek baskı hızı -Yüksek parça çözünürlüğü -Yüksek detay -Malzeme maliyeti yüksek
				DLP		Projeksiyon	-Yüksek baskı hızı -Çözünürlük, projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır
			Malzeme Püskürtme	Çoklu Püskürtme (PJ)	Fotopolimer, Wax	UV Işını	-Çoklu malzeme ile baskı -İyi yüzey iş-sonu -Yüksek doğruluk -Yüksek detay
	KATI	Yapışık Objeler	Sac Lamimasyon	Lamine Nesne İmalatı (LOM)	Kağıt, Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer Işını	-İyi yüzey iş-sonu -Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük -Büyük boyutlu malzeme basabilme -Dikey yönde zayıf mukavemet
	TOZ	Eritme	Toz Yataklı Eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek Güçlü Lazer Işını	-Yüksek doğruluk -Yüksek detay -Tam dolu parça üretimi -Yüksek mukavemet -Destek yapıları gerekmez
				DMSL			
				SLM	Metal Tozu, Seramik Tozu		
				EBM		Elektron Işını	
		Direk Enerji Depolama	LENS	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını	-Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme -Son-işlem gerekir	
EBAM							
Yapıştırma	Yapıştırıcı Püskürtme	Bağlayıcı Püskürtme (BJ)	Seramik Tozu, Metal Tozu, Kum	Termal Enerji	-Renkli obje baskısı -Destek yapıları gerekmez -Geniş malzeme seçeneği -Yüksek baskı hızı -Son-işlem için infiltran malzeme gerektirir -Düşük dayanım -Yüksek gözeneklilik		

Seçer'in çalışmasında, eklemeli üretim yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM) üretim yöntemi ile 316L paslanmaz çelik tozu kullanılarak farklı yüzey desenlerine (altıgen, dağınık, elips, kare, üçgen ve yeni model) sahip numuneler üretilmiştir. Numunelerin morfolojik, yapısal ve mekanik özelliklerini incelemek için XRD, SEM, üç boyutlu profilometre ve mikro sertlik cihazı kullanılmıştır. Numuneler kuru ve simüle edilmiş vücut sıvısı (SBF) ortamında dairesel (pin-on-disk) aşınma testine tabii tutulmuştur. Kuru ortamda yapılan deneylerde, geometrik desende keskin köşelerin olmaması ve aşınma azaltma yeteneğinden dolayı, sıvı ortamda ise pozitif net hidrodinamik fayda elde edildiğinden dolayı en iyi tribolojik özelliği elips geometrik desen göstermiştir [15]. Ahuja vd. çalışmalarında, bir toz yatağında lazer ışını ergitme yöntemi için değişen işleme koşulları ve sistem teknolojisine bağlı mekanik özelliklerde varyasyonları anlamayı amaçlayan bir testin tasarımını yapmışlardır. Yapım sonrası ısıl işlem, yüzey değişimi ve yapının oryantasyonu gibi tasarlanmış varyasyonların etkisi de sonuçlarda belirtilmiştir [16]. Nath vd., Lazer-toz yatak füzyon (L-TYF) tekniği ile üretilen AISI-420 paslanmaz çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin

incelemişlerdir. Isıl işlem öncesi 1050 MPa çekme mukavemeti, %2.5 uzama ve 55 HRC sertlik değerleri elde edilirken, ısıl işlem sonrası 1520 MPa çekme mukavemeti, %6 uzama ve 53 HRC sertlik değeri elde edilmiştir [17].

Lopez-Galilea vd. çalışmalarında, iki SLM işleme parametresinin (tarama hızı ve tarama mesafesi) Ni-esaslı süper alaşım CMSX-4'ün mikro yapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ayrıca, dönüşüm kusurlarını iyileştirmek için sıcak izostatik presleme (HIP) ile mikroyapı geliştirilmiştir. SLM ile elde edilen ince hücreli mikro yapılar, materyalin tamamen homojenleştirilmesi ve birincil çökeltilerin çözünmesi için tutma sürelerinin kısaltılmasını sağlar. 15 dakika tutma süresi 1300 °C'de alaşımı homojenleştirmek için yeterlidir [18]. Schönrrath vd. LBM içindeki proses parametrelerinin perma alaşımının (Ni78.5 Fe21.5) element dağılımı ve manyetik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Fe-Ni yumuşak mknatıslarda özel manyetik anizotropi yönleri yaratmanın etkileri tartışılmıştır. Ticari olarak temin edilebilen Fe ve Ni tozlarının Ni78.5 Fe21.5 bileşimi ile ikili bir karışımından LBM ile homojen bir FeNi₃ alaşımı oluşturulmuştur. En yüksek enerji girdisi olan numunelerde, tek eksenli manyetik anizotropi sağlayan Demir ve Nikelin şerit şeklinde bir yüzey ayrımı bulunmuştur. Sonuç olarak, toz karışımlarından manyetik alaşımların eklemeli üretimi, gelecekteki cihazlarda manyetikleşmenin yönünü ve büyüklüğünü ve manyetik anizotropiyi ayarlamaya izin verebilir [19]. Weirather vd. çalışmasında, Lazer Işını Eritme işleminin simülasyonu için uygun üç boyutlu çok fazlı, zayıf sıkıştırılabilir bir SPH yaklaşımı sunulmuştur. Simülasyon sonuçları, tarama hızı ve lazer gücü proses parametreleri açısından model geçerliliğini değerlendirmek için tekli eriyik izlerinin deneysel bulguları ile karşılaştırılmıştır. [20]. Douellou vd. LBM eklemeli imalat sırasında meydana gelen termal bozulmaların değerlendirilmesi için GPS standartlarından esinlenen sayısal bir yaklaşım geliştirilmişlerdir. Temel geometrik özellik (duvar) için, düzlük kusurundaki farklılaşmayı boyutların bir fonksiyonu olarak tanımlamak mümkün olmuştur. Şekil optimizasyonu açısından beklentiler, LBM eklemeli imalat sürecinin sunduğu yeni olasılıklardan daha iyi yararlanılmasını sağlayabilir [21]. Pfaff vd., yaptıkları çalışmada, LBM ile malzemeler üretmede, üretim parametrelerinin malzeme yapısına ve özelliklerine etkisi araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, mikroyapının ortaya çıkan değişimi analiz edilmiştir. Alınan veriler, lazer gücü ve pozlama hızı ile ortaya çıkan tane büyüklüğü ve eriyik havuzu boyutları arasındaki korelasyonu göstermiştir [22].

Günümüzde çelikler, alüminyum ve titanyum alaşımları gibi birçok malzeme, bir lazer veya elektron ışını (Lazer Işını Ergitme-LBM ve Elektron Işın Ergitme-EBM) vasıtasıyla toz katmanlarını eriten toz yatak çözeltileri ile üretilebilir. Yüksek soğutma hızına sahip katman katman katılma ile gerçekleştirilen mikroyapı izotropik olarak kabul edilemez. Bu nedenle, mekanik özellikler inşaa yönünden etkilenebilir. [23].

Hattal vd., %1 ve %2.5 (ağırlıkça%) nano itriya stabilize zirkonya (nYSZ) ile güçlendirilmiş Ti6Al4V'nin seçici lazer eritme (SLM) sonuçlarını incelemişlerdir. nYSZ tozlarının Ti6Al4V ve kontrollü hacim fraksiyonları SLM teknolojisi ile harmanlanmıştır. Üretilen parçalar yaklaşık% 99.6 gibi çok yüksek bir yoğunluk göstermiştir. XRD sonuçları, oluşturulmuş Ti6Al4V örneğinde neredeyse α fazının (~% 99) ve% 1 ve% 2.5 nYSZ takviyesinin eklenmesiyle az miktarda β fazın varlığını göstermiştir. Kalıntı stres değerlendirmeleri yapıldı ve sonuçlar, sıkıştırma tipi kalıntı gerilmelerin varlığını gösterdi. NYSZ ile güçlendirilmiş Ti6Al4V'nin basınç dayanımı 1751 MPa'ya kadar arttırılmıştır. Ti6Al4V sünekliği,% 1 nYSZ ilavesinden sonra muhafaza edildi. Bu özellikler havacılık, savunma, nükleer ve petrokimya alanları gibi alanlarda çok faydalı olabilir [24]. Yüksek mekanik mukavemeti korurken seçici lazer eritme (SLM) ile üretilen Ti bazlı alaşımların sünekliğinin arttırılması, eklemeli imalatın en büyük zorluklardan biridir. Liu vd., böyle bir materyalin elde edilmesi için işlem parametreleri üzerinde sistematik bir araştırma yapmıştır. SLM sırasında optimal parametreler kullanılarak güçlü ve sünek Ti6Al4V alaşımlarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen mekanik özelliklerin önemli ölçüde artması, esas olarak martensit oluşumunun sınırlandırılması ve gözeneklerin en aza indirilmesi ile ilgilidir. Üretilen Ti6Al4V alaşımlarının mekanik özellikleri, imalat sonrası ısı veya basınç işlemlerine ihtiyaç duyulmaksızın dövme ve dökme malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde aşmaktadır [25]. Meneghetti vd. doğal kusurlar içeren SLM Eİ ile üretilmiş çelik numuneler üzerinde itme-çekme, gerilim kontrollü yorulma testleri

yapılmışlardır. İnşa yönüne paralel (0° yönlendirmeli) ve dik (90° yönlendirilmiş) olan numuneler test edilmiştir. Malzeme mikro yapısı imal edildiği durumdadır, yani yaşlandırma ısıl işlemi imalattan sonra yapılmamıştır. 0° -odaklı örnekler yaklaşık 30000 çevrim yorulma ömürlerinde yaklaşık 90° -odaklı örneklerle aynı yorulma mukavemetini sergilemiştir [26]. Moridi vd.'nin çalışmasında Ti6Al4V üretmek için seçici lazer eritme (SLM) kullanılmıştır. SLM işleminden sonra Ti6Al4V'nin mikroyapı analizi ile çekme testleri yapılmıştır. Basılan Ti6Al4V'nin birincil, ikincil ve üçüncül α 'martenzitten oluşan mikroyapıları tabaka bazında SLM işlemi sırasında döngüsel ısıl işlemin bir sonucu olarak oluşur. Gerilme deformasyonu üzerine primer α martensit içindeki gerinim lokalizasyonu, mikroskobik sünek mikro boşluk oluşumu ve birleşmesinin yanı sıra makroskopik gevrek kırılma ile sonuçlanmıştır [27]. Larimian vd. çalışmalarında, farklı işleme parametreleri ile SLM işlemi ile üretilen 16 örnek incelenmiştir. Mikro sertlik testleri, çekme testleri ve bir tarama elektron mikroskobu (SEM) analizi yaparak tarama hızının, tarama stratejisinin ve enerji yoğunluğunun bu örneklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Öncelikle soğutma hızındaki azalma nedeniyle tarama hızının azalması sonucunda dendritlerin genişliğinde bir artış gözlenmiştir. 316L paslanmaz çelik numunelerin mekanik özellikleri olarak tarama stratejisi, tarama hızı ve enerji yoğunluğunun yoğunlaşmayı, mikro yapıyı önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Daha yüksek tarama hızında işlenen SLM numuneleri, daha düşük tarama hızıyla işlenen örneklere kıyasla daha iyi yoğunlaştırma, rafine mikro yapı ve mükemmel mekanik özellikler sergiledi. Bu öncelikle yüksek tarama hızları ile işlenen numunelerde elde edilen yüksek soğutma oranı nedeniyle daha yüksek yoğunlaştırma ve rafine mikroyapıdan kaynaklanmaktadır [28]. Holovenko vd. İnterpenetrasyon Faz Kompozitlerinin (IPC) üretilmesinde titanyum hücresel kafes yapılarının sert metal (WC-Co) tozu ile doldurulması ve ardından Spark Plazma Sinterleme (SPS) ile konsolidasyon yoluyla üretilmiştir. Konsolidasyon işlemi sırasında kimyasal reaksiyonların ve difüzyonun derecesini değiştirmek için titanyum kafesin yüzey nitrürlenmesi ve karbürizasyonu gerçekleştirilmiştir. Mevcut araştırma bulguları, Eİ uygulanarak metal-seramik IPC'lerin üretilebileceğini göstermektedir [29].

Son yıllarda uçak imalatında hafif kompozit parçalar metallerin yerini almaya başlamıştır. Buna rağmen halen küçük bir yolcu uçağında birkaç ton titanyum kullanılmaktadır. Bu parçalar çoğunlukla talaşlı imalatla elde edilirken, proses esnasında malzemenin %90'ı kesilip atılmaktadır. Katmanlı imalatla, talaşlı imalattaki malzeme sarfiyatından da kaçınılarak hem enerji tasarrufu sağlanmakta hem de çevreye daha az zarar verilmektedir. Son zamanlarda geliştirilen ve lazer yardımıyla eritilmiş Ti6Al4V, TiCP, 17-4, 316L paslanmaz çelik gibi metal tozlarının kullanıldığı metal esaslı katmanlı imalat teknolojisi, havacılık sanayi tarafından kucaklanmış durumdadır [5]. Katmanlı imalat yöntemlerinin havacılık firmaları tarafından gelecekte önemli ölçüde kullanılacağı ve bu amaçla ciddi Ar-Ge çalışmalarını gerçekleştirdiği görülmektedir. Maliyet ve işçilik kazançlarından dolayı oldukça tercih edilebilecek bir yöntem olacaktır [30]. Motor parçalarında Inconel 718 ve Inconel 625 gibi malzemeler, gövde ve yapısal parçalarda ise Ti6Al4V daha fazla kullanılmaktadır. Parça için kritik olan malzeme özellikleri katmanlı imalat yöntemiyle elde edilebildiğinden, örneğin GE havacılık türbinli motorların sıcak kısımlarına uygun bazı parçaları bu teknoloji yardımıyla imal etmeyi tercih etmektedir [5]. Katmanlı imalat ile 20 parçadan oluşan yakıt nozulü tek parça haline getirilebilmiştir. Yüksek ısıya karşı dayanıklı malzemelerin kullanılacağı ve %15-20 yakıt tasarrufu sağlayacak olan bu jet motoru, Airbus'un uçak serilerinde de kullanılması beklenmektedir [13]. Havacılık sanayinde katmanlı imalat; zaman, yetkin çalışan (örneğin kalıp yapımında) ve hurdaya çıkan malzeme miktarının çokluğundan dolayı pahalıya mal olan döküm, dövme ve talaşlı imalat parçalarının yüksek fiyatlarına göre daha avantajlı olmaktadır. Ayrıca kalıp ihtiyacını azaltarak ya da tamamen ortadan kaldırarak yeni parçaların geliştirilmesini de hızlandırmaktadır. Tasarım hatalarını düzeltme, montaj kolaylığı sağlama veya versiyon değişikliği gibi durumlarda bu teknolojide sadece 3 boyutlu modeli değiştirerek, takım masrafı olmadan parçada istenen değişikliğin oluşturulması mümkündür [5].

3. EKLEMELİ İMALATTA SON İŞLEM OLARAK TALAŞLI İMALAT UYGULAMALARI (MACHINING PRACTICE AS A POST PROCESSING IN ADDITIVE MANUFACTURING)

Holmberg vd., üç yüksek enerjili işleme yöntemini (aşındırıcı su jeti (AWJM), elektrik deşarj ile işleme (EDM) ve lazer ışını ile işleme (LBM)) yüzey bütünlüğü, küresel uçlu frezelenmiş bir yüzeyle karşılaştırılmıştır. AWJM'nin yüzey bölgesindeki basınç kalıntı gerilmeleri ve düşük yüzey pürüzlülüğü ile en yüksek kalitede sonuçlandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, EDM'nin yüzeyde sıg kalıntı gerilmeleri ve daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip izotropik bir yüzey dokusu ile sonuçlandığı gösterilmiştir. Bununla birlikte, her iki yöntem de geleneksel frezelemeye olası alternatifler olarak düşünülse de ek işlem gerektirir. Bunun nedeni, yüzeylerin AWJM'den aşındırıcı ortamdan veya EDM'den yeniden katmandan temizlenmesi gerektiğidir. Ayrıca, LBM'nin, işleme sürecinden kaynaklanan derin zararlı etki nedeniyle bu durumda bir alternatif olarak görülmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Lazer ışını ile işleme, yüksek gerilimli artık gerilmelere, yüksek yüzey pürüzlülüğüne ve işlenmiş iş parçası için mikro yapının derin değişikliklerine yol açan olumsuz etkisi nedeniyle 8 mm kalınlığında Inconel 718 levhaların işlenmesi için uygun bir işleme yöntemi değildir [31].

Bonaiti vd. çalışmalarında, Laser Engineered Net Shaping (LENS) eklemeli imalat işlemiyle üretilen Ti-6Al-4V alaşımının mikro-frezeleme işlenebilirliğini yüzey kalitesine, kesme kuvvetlerine ve talaş oluşumuna göre incelemiştir. Eklemeli imalat parametrelerinin etkileri de incelenmiştir, çünkü işleme sırasındaki malzeme termal geçmişi, numunelerin gözenekliliğini ve mekanik davranışını etkileyebildiği için farklı frezeleme performansları vermiştir. Ti-6Al-4V'nin temel sorunları, yüksek deformasyon sertleşmesi davranışı, kimyasal yakınlık ve takım aşınmasını hızlandıran düşük termal iletkenlik ile ilgilidir. Diş başına ilerlemenin ve kesme derinliğinin doğrudan pozitif bir etkisi vardır. Bununla birlikte, malzeme tipinin etkisi belirli bir eğilim göstermiştir. Ayrıca, pürüzlülük değerlerinden ortalama olarak standart dövme titanyumun üç Eİ malzemesinden çok daha yüksek pürüzlülük değerine sahip olduğu görülmüştür. Eİ malzemelerin artan sertliği daha ince bir martenzit ve artan lazer gücünün kullanımı ile ilgilidir. Bununla birlikte, lazer gücündeki artış daha düşük gözeneklilik üretir, böylece malzeme numunelerinin genel bütünlüğünü geliştirir. Pürüzlülük, kesme derinliği ve ilerleme parametrelerindeki artışla artar. Bununla birlikte, Eİ malzemelerinin sertliğinde bir artış daha düşük bir pürüzlülük değeri üretir. Standart titanyum malzemenin işlenmesi, düşük sertliğine rağmen Eİ malzemelerinden çok daha pürüzlü bir yüzey üretir. Ortaya çıkan kesme kuvvetleri, yüksek sertliklerine rağmen Eİ materyalleri için standart titanyumdan daha düşüktür. Genel olarak kuvvetler, diş başına ilerleme ve kesme derinliği ile birlikte artar. Aynı yönlü frezelemenin çapak oluşumu, standart titanyum ile karşılaştırıldığında Eİ malzemeleri için önemlidir. Çapak oluşumu, Eİ malzemeleri için kullanılan lazer gücü ile ilgilidir [32]. Bordin vd. EBM ile eklemeli üretilmiş Ti6Al4V asetabular kapların tornalanmasında işlenebilirliği kriyojenik işleme ve kuru işleme şartlarında karşılaştırmışlardır. 40 saniyelik kısa tornalama işlemleri için, kriyojenik tornalama uygulanabilir çünkü ıslak ve kuru tornalamada benzer geometrik sapmalar sergilemiştir. Daha uzun tornalama işlemleri için, takım tutucunun kaçınılmaz soğutulması geometrik sapmaları giderek artırır [33]. Ti6Al4V, genellikle kesilmesi zor bir metal alaşımı olarak kabul edilir. Kesme sıcaklığını azaltarak işlenebilirliğini arttırmak için, Sıvı Azot (LN₂) ile kriyojenik soğutma, özellikle biyomedikal alanda toksik olmayan, güvenli ve temiz olmasına çok dikkat çekmiştir. Sartori vd.'nin çalışmasında, iki Metalik Sinterleme (DMLS) ve Elektron Işın Eritme (EBM) iki Eklemeli Üretim (Eİ) tekniği ile üretilen farklı Ti6Al4V mikroyapı değişimlerinde yarı ince talaş işlemede kuru kesme ile karşılaştırıldığında bu soğutma stratejisinin etkinliğini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, incelenen alaşımların mekanik ve termal özellikleri ile hem kuru kesme hem de kriyojenik soğutma koşullarında takım aşınma mekanizmaları arasında bir ilişki olduğunu kanıtlamaktadır. En derin krater aşınması DMLS'yi işleyen takımda hem en yüksek sertliği hem de en düşük termal içeriği nedeniyle oluşmaktadır. Hem kesici kenardaki abrasiv aşınma hem de yan yüzey aşınması LN₂ uygulanarak azaltılmıştır [34]. Bordin vd.'nin çalışmasında da aynı malzeme için benzer sonuçlara işaret edilmiştir [35]. Gong ve Li Eİ'den sonra, frezeleme sonrası takım aşınması ve kırılan takımları incelemiştir. 316L paslanmaz çeliği farklı frezeleme sonrası takım aşınma performansını ve yüzey

kalitesini değerlendirmektir. Frezeleme süresinin artmasıyla birlikte takım aşınması ilk aşınma aşamasını, normal işleme aşamasını ve ciddi kırık aşamasını yaşar. Frezelenmiş yüzey kalitesi ve pürüzlülüğü de üç aşamadan oluşur. İlk olarak, yüzey kalitesi çok iyidir. Sonra pürüzlülük sabit kalır. Son olarak, yüzey pürüzlülüğü hızla azalır. Aşağı frezeleme, LAM tarafından elde edilen bileşenler için yukarı frezelemeden daha iyidir [36]. Zhang vd. tel ark eklemeli imalatı (WAAM) ve frezelemeyi birleştiren hibrit bir teknik ile Al5Si alüminyum alaşımı kullanılarak incelemiştir. Sonuçlar, frezeleme kesme derinliği 0.4-1.2 mm aralığında olduğunda, bu hibrit katkı / çıkarıcı imalatın hem yüzey pürüzlülüğünün hem de işleme payının saf WAAM ile karşılaştırıldığında azaldığını göstermiştir. Ayrıca, bu şekillendirme parçalarının uygulama gereksinimini karşılamak için genellikle işlem sonrası kullanılır [37,38]. Dang vd., kuru delme işlemi altında kesme kuvvetleri, sıcaklıklar, işlenmiş yüzey pürüzlülüğü, takım aşınma tipleri, seçilen kesme hızları, ilerleme hızları ile talaş morfolojisi dahil olmak üzere Eİ ile üretilen Ti6Al4V'nin işlenebilirliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde kullanılan malzeme, Direct Metal Lazer Sinterleme (DMLS) teknolojisi tarafından üretilen Ti6Al4V'dir. Deneysel sonuçlar, DMLS Ti6Al4V'nin işlenebilirliği üzerindeki parametrik etkiyi vurgulamış ve işleme parametrelerini buna göre yeniden tasarlama imkanı sunmuştur [39]. Rysava vd., DMLS adı verilen Eİ teknolojisi ile üretilen Ti6Al4V titanyum alaşımının delinebilirlik özelliklerini araştırmışlardır. Kuru kesme koşullarında değişen kesme hızında ve ilerleme hızında 5 eksenli yüksek hassasiyetli bir mikro freze tezgahında 1.6 mm çapında delikler açılmıştır. İşlenmiş deliklerin en temsili geometrik özelliklerini (çap ve diklik) ve çapakların miktarını ölçmek ve karşılaştırmak için özel bir ölçüm prosedürü geliştirilmiştir. Deneysel yaklaşım diş pimi implantının üst kısmı ile insan çenesi arasındaki bağlantıyı sağlayan fonksiyonel özelliği üretmek için gerekli olan, diş açmadan önceki yüksek hassasiyetli delikler açmak için kullanılmıştır. Uygun bir delme parametresi seti seçilerek, sonraki diş açmanın yüksek doğrulukta geometrik kalite sağlayabileceği kanıtlanmıştır [10]. Ming vd., kuru delme işlemi sırasında yaygın olarak kullanılan standart helisel matkap ile talaş morfolojisi ve talaş gelişimi ve delinmiş deliklerin yüzey bütünlüğü araştırmıştır. Doğrudan metal lazer sinterleme özellikli EOS TM EOSINT M280 (DMLS) Eİ tekniği ile üretilen Ti6Al4V deney numunesi malzemesi olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, talaşların matkap ucunun ilerlemesi ile farklı morfolojiler gösterdiğini ve kesme değişkenlerinden bağımsız olarak sürekli talaşların elde edildiğini göstermektedir. Matkap ilerledikçe, talaş morfolojisi spiral koniden katlanmış şeride dönüşmektedir. Matkap ucundaki karışık talaşlar nedeniyle delik yüzeylerinde bazı çizik ve bulaşma izleri oluşturmuştur [40].

Talaşlı imalatın temel hedefi, üretilecek iş parçasının geometrik ve boyutsal tamlığıyla birlikte yüzey kalitesinin ve delik çıkışındaki çapakların yüksekliğinin istenen sınırlar içerisinde ekonomik olarak sağlanmasıdır. Yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımlarının gerek Eİ ile gerekse geleneksel olarak üretilenlerinin dolayı talaşlı işlenmesi veya delinmesi oldukça zordur. Tungsten karbür (WC) ve yüksek hız çeliği (HSS) matkaplarla, farklı kesme hızı ve ilerlemelerde Ti-6Al-4V'nin delinmesinde yüzey pürüzlülüğü, delik çapındaki sapma, çapak yüksekliği, sıcaklık, talaş oluşumu ve takım aşınması üzerine etkileri incelenmiştir. Kesme hızının artması takım ve iş parçasındaki sürtünmeyi arttırdığından ve Ti-6Al-4V malzemenin düşük termal özelliğe sahip olması, kesici takımların daha fazla ısınmasına neden olmuştur. Hem ilerlemenin hem de kesme hızının artması takım aşınmasını arttırmıştır. İlerleme arttıkça ortalama yüzey pürüzlülük değeri, kesme kuvvetleri ve aşınma artış eğilimindedir [41-43]. Ayrıca bu alaşım için soğutma sıvısı kullanımı delik kalitesini ve takım aşınmasını da iyileştirmektedir [44, 45].

Tablo 2. Literatür özet tablosu (Literature summary table)

İşleme Yöntemi	Deney Parametreleri	Ekllemeli İmalat Parametreleri	Değerlendirme kriterleri:
Frezeleme : F Tornalama : T Delme: D Ekllemeli İmalat: Eİ	Kesme Parametreleri Kesme Hızı:Vc Kesme derinliği:ap İlerleme:f Kesici takım tipi:KT	Lazer Gücü: W Tarama Hızı: Th	Kesme kuvvetleri: KK Takım aşınması:TA Takım ömrü:TÖ Yüzey pürüzlülüğü:YP Parça Mukavemeti: PM Mikroyapı Analizi: MA Isıl İşlem: Ht Kriyojenik Soğutma: LN
LBM = Laser Beam Melting (Lazer Işını Ergitme) DMLS/E = Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Metal Lazer Sinterleme/Ergitme) SPS = Spark Plasma Sintering (Kıvılcım Plazma Sinterleme) SLM = Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme) EBM = Electron Beam Melting (Elektron Işını Ergitme) LENS = Laser Engineered Net Shaping (Lazerle Tasarlanmış Ağ Şekillendirme) WAAM = Wire Arc Additive Manufacturing (Tel Ark Ekllemeli İmalat)			

Kaynak	Malzeme	Üretim Yöntemi	İşleme Yöntemi	Deney Param.	Değ. Kriterleri
1			Eİ		YP, PM, Derleme
2			Eİ		Eİ Geleceği derleme
3			Eİ		Eİ Kullanılan malzemeler
7		LBM	Eİ		MA, PM
9		DMLS	Eİ		Eİ Verimlilik, Maliyet,
10		DMLS	Eİ		Eİ Etkileyen parametreler
11		DMLS/E	Eİ		Tezgaah parametresi
14	Stellite-12	LBM	Eİ	W,Th	MA
15	316L	SLM	Eİ		Tribolojik, MA
16		LBM	T		YP, Ht
18	CMSX-4	SLM	Eİ		MA,Ht
19	Fe-Ni	LBM	Eİ		MA
20	Inconel 718	LBM	Eİ	W, Th	MA
22		LBM	Eİ	W, Th	MA
23		LBM, EBM	Eİ		MA, PM
24	Ti6Al4V	SLM			MA, PM
25	Ti	SLM	Eİ	W	PM, Ht
26		SLM	Eİ		PM, Ht
27	Ti6Al4V	SLM			MA
28	316L	SLM	Eİ	W, Th	MA
29	WC-Co	SPS	Eİ		MA
31	718	LBM, EDM			YP
32	Ti6Al4V	LENS	F	Vc,ap,f,W	KK, YP
33	Ti6Al4V	EBM	T		YP
34	Ti6Al4V	EBM, DMLS	T	Vc,ap,	TA, LN, YP
35	Ti6Al4V	EBM	T	Vc,f,	TA, YP, LN
36	316L		F	Vc,ap	TA, YP
37	Al5Si	WAAM	F	Vc,ap	YP, KK
39	Ti6Al4V	DMLS			KK, TA, YP, MA
40	Ti6Al4V	DMLS			KK, TA, YP, MA, LN, Ht
41	Ti6Al4V		F	Vc,f,KT	YP, TA, YP
42	Ti6Al4V		D	KT,f,Vc	TA, KK, YP
43	Ti6Al4V		D	Vc,f,	LN, KK, YP, TA
44	Ti6Al4V		D	Vc,f,KT	YP
45	Ti6Al4V		D	Vc,f	KK, YP

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Yukarıda verilen literatür bilgileri ve Tablo 2 değerlendirildiğinde Eİ konusunda akademik alanda yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmada yer verilemeyen çok sayıda çalışmanın da olduğu göz ardı edilmemelidir. Eİ konusunun her yönüyle endüstriyel ve akademik olarak geliştirilmek istendiği görülmektedir. Bu da gelecekte Eİ proseslerinin endüstriyel sahada geniş kullanım alanı bulacağını göstermektedir. Araştırmaların temel çıkış noktasının Eİ süreçlerinin olumsuz yönlerinin azaltılması ya da ortadan kaldırılması olduğu söylenebilir. Özellikle üretim parametrelerinin optimizasyonu ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi arayışları öne çıkmaktadır. Eİ ile üretilen mekanik parçaların son işlem gereksinimleri halen kaçınılmazdır. Yüzey kalitesindeki yetersizliklerin talaşlı imalat ihtiyacını öne çıkardığı söylenmektedir. Bu aşamada tornalama, frezeleme, taşlama, delik delme ve parlatma gibi operasyonların çalışıldığı görülmektedir. Delik delme operasyonlarında ise dolu parçadan delik delme ve kılavuz çekme için delik delme gibi çalışmalar [39,40] son aylarda literatüre girmiştir. Özellikle protez ve diş implant parçaları üzerine araştırmalara ilgi gösterilmektedir. Eİ yöntemiyle üretilen parçaların kullanılacağı yerlerdeki montaj şartlarını karşılamaları için genellikle delme gibi geleneksel işlemeye ihtiyacı vardır. Bazı sektörlerde üretilen ve kullanılan parçalarda özellikle montaj ve kılavuz çekme amaçlı delik delme operasyonları önemli yer tutmaktadır. Bu durumda delik delme işlemlerinin fazlalığı prosesin iyileştirilmesi beklentisini arttırmaktadır. Bu tür talaşlı imalatta ise geleneksel dövme işlemleriyle üretilen malzemelere kıyasla farklı işlenebilirlik özellikleri anlamına gelmektedir. Bu nedenle, işleme (delme) parametrelerinin Eİ parçalarının delme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak büyük önem taşımaktadır. Yapılacak araştırmalarla Eİ üretim maliyetlerine getireceği avantaj elde edilebilir.

Bu alanda eksikliği görülen alanlarda yapılacak çalışmalar her zaman olacaktır ve olmalıdır. Geleceği olan bir imalat prosesinin araştırılması ülkemizin havacılık ve savunma sanayisindeki hedefleri düşünüldüğünde önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. İ. Çelik, F. Karakoc, M.C. Cakir, A. Duysak, Rapid prototyping technologies and application areas, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31:53–70, 2013.
2. H.K. Sürmen, Eklemeli imalat (3B Baskı): Teknolojiler ve uygulamalar, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24:373–92, 2019.
3. O. Özsolak, Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 1:9–14, 2019.
4. B. Yalçın, B. Ergene, Endüstride yeni eğilim olan 3-B eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknol. Bilim Dergisi*, 9:65–88, 2017.
5. N. Kara, Havacılıkta katmanlı imalat teknolojisinin kullanımı, *Mühendis ve Makine*, 54:70–5, 2013.
6. Epma. Introduction to additive manufacturing technology, a guide for designers and engineers, *Euro Powder Metall Assoc., Shrewsbury*, 2019.
7. M. Schmidt, M. Merklein, D. Bourell, D. Dimitrov, T. Hausotte, K. Wegener, Laser based additive manufacturing in industry and academia, *CIRP Ann Manuf Technol*, 66:561–83, 2017.
8. H. Irrinki, M. Alhofors, J. Stitzel, O. Gulsoy, Sıcak izostatik preslemenin lazer-toz yatak füzyon tekniği ile üretilmiş 17-4PH paslanmaz çelikler üzerine etkisi, *2nd International Turkish World Engineering and Science Congress*, 7-10 Kasım, 2019, Türkiye.
9. M.Y. Kayacan, N. Yılmaz, DMLS eklemeli imalatta süreç ve maliyet modeli geliştirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 22:763–70, 2019.
10. M.Y. Kayacan, N. Yılmaz, DMLS ile eklemeli imalatta dengesiz sıcaklık dağılımı ve parçaya etkilerinin araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 7:79–94, 2019.
11. B. Duman, M.C. Kayacan, Doğrudan metal lazer sinterleme / ergitme yöntemi ile imal edilecek parçanın mekanik özelliklerinin tahmini, *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 7:12-28, 2017.
12. Z. Rysava, S. Bruschi, S. Carmignato, F. Medeossi, E. Savio, F. Zanini, Micro-drilling and threading of the Ti6Al4V titanium alloy produced through additive manufacturing, *Procedia CIRP*, 46:583–6, 2016.
13. M.M. Sofu, Hızlı direkt imalatta kullanılan seçici lazer sinterleme ve ergitme cihazının gövde tasarımı ve imalatı, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü, Isparta, 2007.
14. E. Polat, Katmanlı lazer ergitme metodu ile üretime yönelik düzenek geliştirilmesi ve işlem parametrelerinin etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2016.

- 15.Y. Seçer, Seçici lazer ergitme yöntemi ile oluşturulan farklı yüzey tekstürlerinin ve plazma nitrüleme işleminin AISI 316L paslanmaz çeliğinin yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi , Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2019.
- 16.B. Ahuja, A. Schaub, D. Junker, M. Karg, F. Tenner, R. Plettke, A round robin study for laser beam melting in a metal powder bed, *South African J Ind Eng* 27:30–42, 2016.
- 17.S. D. Nath, H. Irrinki, M. Kearns, O. Gulsoy, S. V. Atre, Microstructure and mechanical properties of AISI-420 stainless steels produced by laser-powdered bed fusion, 2nd International Turkish World Engineering and Science Congress, 7-10 Kasım, 2019, Türkiye.
- 18.I. Lopez-Galilea, B. Rutttert, J. He, T. Hammerschmidt, R. Drautz, B. Gault, Additive manufacturing of CMSX-4 Ni-base Superalloy by Selective Laser Melting: Influence of Processing Parameters and Heat Treatment, *Addit Manuf*, 30:874-899, 2019.
- 19.H. Schönrrath, M. Spasova, S.O. Kilian, R. Meckenstock, G. Witt, J.T. Sehr, Additive manufacturing of soft magnetic permalloy from Fe and Ni powders: Control of Magnetic Anisotropy, *J Magn Magn Mater*, 478:274–8, 2019.
- 20.J. Weirather, V. Rozov, M. Wille, P. Schuler, C. Seidel, N.A Adams, A smoothed particle hydrodynamics model for laser beam melting of Ni-based alloy 718, *Comput Math with Appl*, 78:2377–94, 2019.
- 21.C. Douellou, X. Balandraud, E. Duc, Assessment of geometrical defects caused by thermal distortions in laser-beam-melting additive manufacturing: a simulation approach, *Rapid Prototyp J*, 25:939–50, 2019.
- 22.A. Pfaff, M. Jäcklein, K. Hoschke, M. Wickert, Designed materials by additive manufacturing—impact of exposure strategies and parameters on material characteristics of AlSi10Mg processed by laser beam melting, *Metals (Basel)*, 8, 2018.
- 23.D. Rigon, G. Meneghetti, M. Görtler, D. Cozzi, W. Waldhauser, M. Dabalà, Influence of defects on axial fatigue strength of maraging steel specimens produced by additive manufacturing, *MATEC Web Conf*, 165:2–8, 2018.
- 24.A. Hattal, T. Chauveau, M. Djemai, J.J. Fouchet, B. Bacroix, G. Dirras, Effect of nano- Yttria stabilized zirconia addition on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V parts manufactured by selective laser melting, *Mater Des*, 180, 2019.
- 25.J. Liu, Q. Sun, C. Zhou, X. Wang, H. Li, K. Guo, Achieving Ti6Al4V alloys with both high strength and ductility via selective laser melting, *Mater Sci Eng A*, 766, 2019.
- 26.G. Meneghetti, D. Rigon, C. Gennari, An analysis of defects influence on axial fatigue strength of maraging steel specimens produced by additive manufacturing, *Int J Fatigue*, 118:54–64, 2018.
- 27.A. Moridi, A.G. Demir, L. Caprio, A.J. Hart, B. Previtali, B.M. Colosimo, Deformation and failure mechanisms of Ti–6Al–4V as built by selective laser melting, *Mater Sci Eng A*, 768, 2019.
- 28.T. Larimian, M. Kannan, D. Grzesiak, B. AlMangour, T. Borkar, Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel processed via selective laser melting, *Mater Sci Eng A*, 770, 2020.
- 29.Y. Holovenko, L. Kollo, M. Saarna, R. Rahmani, T. Soloviova, M. Antonov, Effect of lattice surface treatment on performance of hardmetal - titanium interpenetrating phase composites, *Int J Refract Met Hard Mater*, 86, 2020.
- 30.B. Aktimur, E.S. Gökpinar, Katmanlı üretimin havacılıkdaki uygulamaları, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim Dergisi*, 3:463–9, 2015.
- 31.J. Holmberg, J. Berglund, A. Wretland, T. Beno, Evaluation of surface integrity after high energy machining with edm, laser beam machining and abrasive water jet machining of alloy 718, *Int J Adv Manuf Technol*, 100,1575–91, 2019.
- 32.G. Bonaiti, P. Parenti, M. Annoni, S. Kapoor, Micro-milling machinability of DED additive titanium Ti-6Al-4V, 45th SME North Am Manuf Res Conf, 10,497–509, 2017.
- 33.A. Bordin, F. Medeossi, A. Ghiotti, S. Bruschi, E. Savio, L. Facchini, Feasibility of cryogenic cooling in finishing turning of acetabular cups made of additive manufactured Ti6Al4V, *Procedia CIRP*, 46:615–8, 2016.
- 34.S. Sartori, L. Moro, A. Ghiotti, S. Bruschi, On the tool wear mechanisms in dry and cryogenic turning additive manufactured titanium alloys, *Tribol Int*, 105:264–73, 2017.
- 35.A. Bordin, S. Sartori, S. Bruschi, A. Ghiotti, Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by additive manufacturing, *J Clean Prod*, 142:4142–51, 2017.
- 36.Y. Gong, P. Li, Analysis of Tool Wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel, *J Mech Sci Technol*, 33:2387–95, 2019.
- 37.S. Zhang, Y. Zhang, M. Gao, F. Wang, Q. Li, X. Zeng, Effects of milling thickness on wire deposition

- accuracy of hybrid additive/subtractive manufacturing, *Sci Technol Weld Join*, 24:375–81, 2019.
- 38.F. Li, S. Chen, J. Shi, H. Tian, Y. Zhao, Evaluation and optimization of a hybrid manufacturing process combining wire arc additive manufacturing with milling for the fabrication of stiffened panels, *Appl Sci*, 7, 2017.
- 39.J. Dang, G. Liu, Y. Chen, Q. An , W. Ming, M. Chen, Experimental investigation on machinability of DMLS Ti6Al4V under dry drilling process, *Mater Manuf Process*, 34:749–58, 2019.
- 40.W. Ming, J. Dang, Q. An, M. Chen, Chip formation and hole quality in dry drilling additive manufactured Ti6Al4V, *Mater Manuf Process*, 1-9, 2019.
- 41.H. Yıldız, Ti-6AL-4V alaşımın delinmesinde kesme parametrelerinin delik üzerine ve kesici takıma etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi , Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, Türkiye, 2019.
- 42.G. Uzun, S.A. Yaşar, I. Korkut, Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve delik kalitesine etkisinin incelenmesi, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi* 7:469–75, 2017.
- 43.M. Perçin, K. Aslantas, I. Uzun, Y. Kaynak, A. Çicek, Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: The effects of cooling/lubricating, *Precis Eng*, 45:450–62, 2017.
- 44.T. Kıvak, U. Şeker, Tİ-6AL-4V alaşımının delinmesinde M42 HSS takımlara uygulanan kriyojenik işlemin delik kalitesi üzerine etkileri, 7th International Symposium On Machining, Kasım 3-5, 2016.
- 45.J. Nam, S.W. Lee, Machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V) in environmentally-friendly micro-drilling process with nanofluid minimum quantity lubrication using nanodiamond particles, *Int J Precis Eng Manuf - Green Technol*, 5:29–35, 2018.