



Derleme Makalesi – Review Article

Tel Ark Katmanlı İmalat (TAKİ) Yöntemi ve Farklı Malzemelerde Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Method and Investigation of Mechanical Properties for Different Materials

Ersin Çakır¹, Mustafa Ulutan^{2*}

Geliş / Received: 24/03/2022

Revize / Revised: 29/09/2022

Kabul / Accepted: 10/10/2022

ÖZ

Katmanlı (eklemeli) imalat yöntemi geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiş ve araştırılmaya devam etmektedir. Bu yöntem, üç boyutlu bilgisayar destekli yazılımlardan doğrudan parça üretimi temeline dayanmaktadır. Üç boyutlu (3D) yazıcı olarak da adlandırılan katmanlı imalat, kullanılan metal malzeme türüne göre toz ve tel olarak ikiye ayrılmaktadır. Toz esaslı sistemde metal altlık üzerine biriktirilen tozların; elektron, lazer veya ark ısı kaynağı ile ergitilmesi veya sinterlenmesi ile parça üretilmektedir. Tel esaslı sistemde ise, MIG/MAG, TIG veya plazma kaynak sistemleri kullanılarak tel malzemenin ergitilmesi ve üst üste biriktirilmesi yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) yöntemi açıklanarak kullanılan ısı kaynağına göre sınıflandırılması yapılmıştır. Yöntem, üretim zamanında sağladığı azalmalar, net şekle yakın üretim sağlaması ve tel hammaddenin toza göre ucuz olması gibi avantajları ile endüstri için önemli araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmada, sanayide ticari olarak kullanılan paslanmaz çelik, alüminyum, nikel süper alaşımları, magnezyum ve Ti6Al4V alaşımları için yapılan araştırmalar incelenmiştir. Mekanik özellikleri döküm-dövme gibi geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan üretimler ile elde edilen mekanik özelliklerde çelik alaşımları için soğuma şartlarının önemli olduğu ancak geleneksel imalat yöntemleriyle elde edilen değerlerin karşılanabileceği not edilmiştir. Alüminyum alaşımlarında üretimde veya sonrasında yapılan işlemlerin(hadde, dövme vb.) mekanik özelliklerin gelişmesini olumlu etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımları için yapılan üretimlerde istenilen mekanik özelliklerin yeterli seviyede sağlanabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Tel ark katmanlı imalat (TAKİ), Paslanmaz çelik, Alüminyum, Magnezyum, Ti6Al4V

ABSTRACT

The additive manufacturing method has been developed and continues to be investigated as an alternative to conventional manufacturing methods. This method is based on part production from 3D computer aided software. Additive manufacturing, also called a three-dimensional (3D) printing technology, is divided into two sections as powder and wire according to the type of used material. Powder-based system, the powder accumulated on the metal substrate; parts are produced by melting or sintering them with electron, laser, or arc heat source. In wire-based system, the method of melting and depositing the wire material using MIG / MAG, TIG or plasma welding systems is used. In this study, Wire arc additive manufacturing (WAAM) method is explained and classified

¹ İletişim: dr.ersincakir@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2902-624X>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Batı Meşelik Kampüsü Odunpazarı/Eskişehir

^{2*} Sorumlu yazar iletişimi: mulutan@ogu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-1821-6486>)

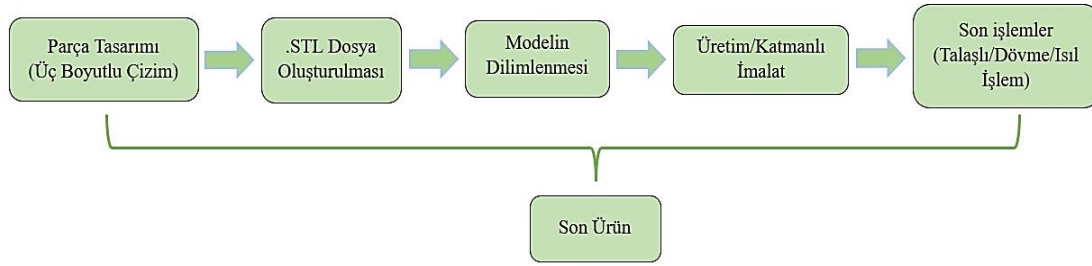
Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Batı Meşelik Kampüsü Odunpazarı/Eskişehir

according to the type of heat source. This method has become an important research topic for the industry with its advantages, such as reductions in production time, production close to net shape and cheapness of wire raw material compared to powder. In this study, research about stainless steel, aluminium, nickel super alloys, magnesium, and Ti6Al4V alloys which are used commercially in industry were reviewed. Mechanical properties were compared with traditional manufacturing methods such as casting and forging. It has been noted that the cooling conditions for steel alloys are important for mechanical properties obtained in the productions. It has been determined for aluminium alloys that the processes performed during or after production (rolling, forging, etc.) positively affect mechanical properties. In addition, it has been seen that the desired mechanical properties can be achieved for Ti6Al4V alloys.

Keywords- Wire arc additive manufacturing (WAAM), Stainless steel, Aluminum, Magnesium, Ti6Al4V

1. GİRİŞ

Katmanlı/eklemeli imalat, eksiltmeli veya biçimlendirici olan geleneksel imalat süreçlerinin aksine malzemelerin, katmanlı olarak üst üste biriktirilmesiyle oluşturulduğu imalat yöntemidir [1]. Bu yöntem, imal edilmesi planlanan parçanın üç boyutlu (3D) katı modelinin oluşturulması, yazılım programları kullanılarak birden fazla katmanlara dilimlenmesi, elde edilen verilerin üç boyutlu yazıcı sistemine aktarılması ve istenilen modelin bu sistemde malzeme besleme ünitesi ve ısı kaynağı vasıtasıyla katmanlı olarak imal edilmesi işlemidir[2]. Yöntemin uygulanmasında kullanılan akış prensibi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Katmanlı imalat yönteminin şematik akışı

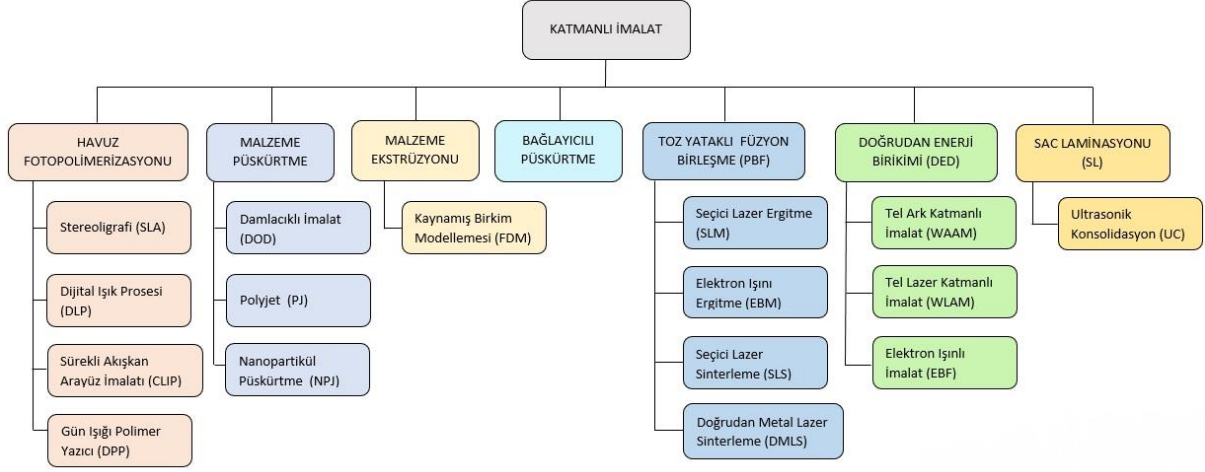
Katmanlı imalat, üç boyutlu olarak hazırlanan bilgisayar destekli tasarımlardan doğrudan fiziksel modeller elde etmeyi sağlayan imalat teknolojisidir. Bu sistemler temel olarak, hareket ünitesi, malzeme besleme sistemi ve ısı kaynağından oluşmaktadır [3]. Katmanlı imalat teknolojileri, karmaşık parçaların net şekle yakın üretimi, üretim süresindeki kısaltmalar, malzeme atığının minimum olması ve düşük maliyetler ile parça üretimi sağlamaktadır. Belirtilen bu üstünlükleriyle son yıllarda üzerinde yoğun çalışılan konu haline gelmiştir [4]. 1980'lerin başlarında polimer malzeme modellerine yönelik ilk çalışmalar gerçekleştirilirken [5], günümüzde titanyum [6], alüminyum [7], nikel [8] ve düşük karbonlu çelikler [9] dahil olmak üzere birçok mühendislik malzemesi için çalışmalar yapılmaktadır. Katmanlı imalat yöntemlerinde elde edilmesi planlanan ürün ile malzeme kullanım oranı (buy to fly ratio) birbirine çok yakındır [10]. Bundan dolayı malzeme atığı sifıra yakındır ve titanyum alaşımları gibi değerli malzemelerde önemli oranda maliyet kazançları sağlanabilmektedir.

Bu üretim yöntemlerinde birikimler katmanlı olarak gerçekleştiğinden karmaşık termal çevrimler olmaktadır. Bu çevrimler dolayısıyla oluşan kalıntı gerilmeler önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca kalıntı gerilmelerin etkisiyle malzemelerde distorsiyon oluşabilmektedir [11]. Isı yığılmaları ve termal davranışlar üretilen malzemenin mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir[12]. Günümüze kadar katmanlı imalat yöntemleri ile ilgili yirmiden fazla farklı yöntem geliştirilmiş olup [13], ASTM standardına göre katmanlı imalat yöntemleri yedi (7) kategoride sınıflandırılmıştır [1]. Şekil 2’de katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.

Toz yataklı füzyon birleşmede, serili halde duran toz üzerine enerji uygulanması ile malzeme üretimi gerçekleştirilirken, doğrudan enerji birikim metodunda; odaklanmış enerji kaynağına doğrudan toz veya tel besleme işlemi yapılmaktadır. Tel besleme yönteminin kullanıldığı doğrudan enerji birikim metodları uygulanan ısı kaynağı türlerine göre; Tel ark katmanlı imalat, Tel lazer katmanlı imalat ve Elektron ışınli serbest üretim şeklinde sınıflandırılmaktadır [14].

Ülkemizde katmanlı imalat yöntemlerinin genel olarak açıklandığı ve kullanım alanlarının incelendiği çalışmaların [15,16] yanında, havacılık uygulamaları [17], yapı üretimi [18] ve gemi inşaatı [19] gibi sektörel düzeyde kullanım alanlarının araştırıldığı derleme çalışmaları bulunmaktadır. Ayrıca yöntemin geliştirilmesi ile

alakalı olarak üretimde ısı değişimleri ve modellemesi [20], alüminyum alaşımları için parametre etkileri [21] ve Ti6Al4V alaşımlarında mekanik özelliklerin incelendiği [22] derleme çalışmaları da yapılmıştır. Bu araştırmalar yoğun olarak tozun ilave malzeme olarak kullanıldığı katmanlı imalat yöntemleri üzerine gerçekleştirilmiş olup Tel ark katmanlı imalat yönteminin araştırıldığı çalışmalar [23,24] sınırlı kalmıştır.

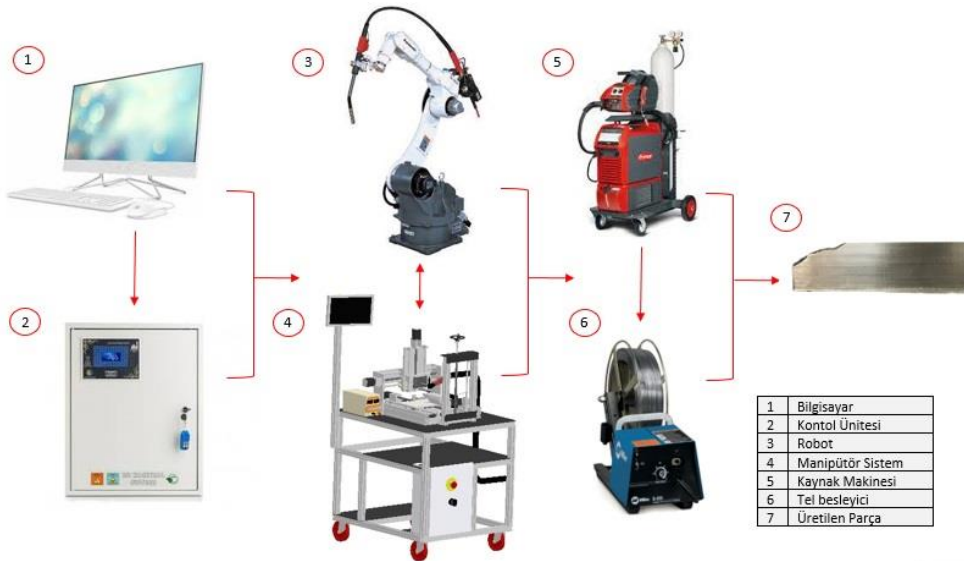


Şekil 2. Katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması

Bu derleme çalışmasında öncelikle katmanlı (eklemeli) imalat yöntemi açıklanarak yaygın olarak kullanılan katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması yapılmıştır. Daha sonra ise tel besleme yönteminin kullanıldığı Tel ark katmanlı imalat yöntemi tanıtılmış ve bu yöntem ile çelik, alüminyum, nikel, magnezyum ve titanyum alaşımlarından üretilen malzemelerin mekanik özellikleri geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırılarak detaylı olarak incelenmiştir.

II. TEL ARK KATMANLI İMALAT (TAKİ) YÖNTEMİ

Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) yöntemi elektrik arkının enerji kaynağı olarak kullanıldığı ve tel besleme sisteminin ilave malzeme olarak kullanıldığı doğrudan enerji ile birikim yöntemidir. Bu yöntemde toz yataklı füzyon birleşme yöntemlerinin aksine yüksek oranda malzeme birikimi yapıldığından büyük parçaların imalatı mümkün olabilmektedir [25]. Yöntemin çalışma sistemine bir örnek Şekil 3'te gösterilmiştir.

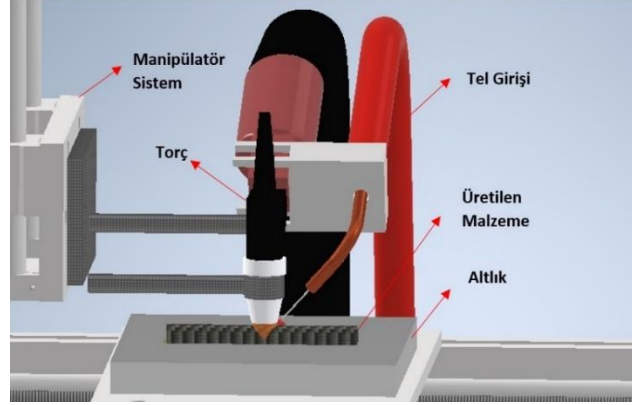


Şekil 3. Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) sistemine bir örnek

TAKİ sisteminde; imal edilecek parçaların üç boyutlu modellerinin oluşturulması ve bu modellerin dilimlenerek uygun dosya türüne (.stl) dönüştürülmesinde bir bilgisayar ara yüzü ① kullanılmaktadır. Kontrol paneli ② üretimde kullanılacak parametrelerin yüklenmesi ve işlenmesinde, robot ③ veya manipülör sistem

④ ise hareket ünitesi olarak kullanılmaktadır. Kaynak makinesi torcu ⑤ ile tel besleyicinin ⑥ hareket ünitesine monte edilmesi ve uygun parametrelerin işlenmesi ile parça ⑦ imal edilebilmektedir.

Bu imalat yöntemi 1926 yılında Baker'in elektrik arkının ısı kaynağı olarak kullanılması ile katı cisimler üretmeyi başararak patentlenmiş olup [26], son yıllarda artan maliyetler ve üretimde zaman kayıplarının önüne geçilmesi bakımından dikkat çekici bir hal almıştır [27]. Bu yöntem ile malzeme birikim örneği Şekil 4'te gösterilmiştir. Günümüze kadar TAKİ yöntemiyle havacılık sanayi [28], denizcilik endüstrisi [29] ve mimari yapılar [30] gibi alanlarda üretimler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) malzeme birikimi şematik gösterimi

Toz yataklı füzyon birleşme prosesleri ile karşılaştırıldığında TAKİ yöntemi önemli avantajlar ve dezavantajlar gösterebilmektedir. Kullanılan enerji kaynaklarına göre yaygın kullanıma sahip katmanlı imalat yöntemlerinin karşılaştırılması Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Katmanlı imalat yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Enerji Kaynağı	Özellikler	Avantajlar	Dezavantajlar	Kaynaklar
Tel Ark Katmanlı İmalat (WAAM)	Plazma TIG MIG/MAG	Birikim oranı:50-130 gr/dk Kurulum maliyeti:7000\$ Geniş ergime havuzu: ~5-10 mm Orta/Büyük ölçekte malzeme üretimi	Yüksek birikim oranı Düşük ekipman maliyeti	Yüksek ısı girişi Kalıntı gerilme ve distorsiyon	[31]
Seçici Lazer Ergitme (SLM)	Lazer Işını	Birikim oranı:2-10 gr/dk Kurulum maliyeti:500 bin \$ Küçük ölçekte malzeme üretimi Daha dar ergime havuzu	Net şekle daha yakın üretim Karmaşık parçaların üretimi	Düşük birikim oranı Yüksek ekipman maliyeti	[32] [33]
Elektron Işını Ergitme (EBM)	Elektron Işını	Birikim oranı: 2-10 gr/dk Kurulum maliyeti:1 milyon \$ Küçük ölçekte malzeme üretimi Daha dar ergime havuzu	Net şekle daha yakın üretim Karmaşık parçaların üretimi	Düşük birikim oranı Yüksek ekipman maliyeti	[34]

Birikim oranları SLM ve EBM gibi toz yataklı füzyon proseslerinde yaklaşık 2-10 g/dk iken bu yöntemde 50-130 g/dk 'ya ulaşabilmektedir [31]. Tel Ark Katmanlı İmalat (TAKİ) sistemi için kurulum maliyeti yaklaşık 7000\$ iken, lazer katmanlı imalat metodunda 500 000\$, elektron ışını katmanlı imalat yöntemi için ise 1 milyon \$ civarında rakamlara ulaşabilmektedir [32]. Bu avantajlarının yanında karmaşık parçaların üretim zorlukları ve net şeklin istenilen doğrulukta olmaması dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır [33]. Birikimler katmanlı olduğundan karmaşık termal çevrimler ortaya çıkmaktadır. Bu çevrimler dolayısıyla oluşan ısı yığılmaları ve

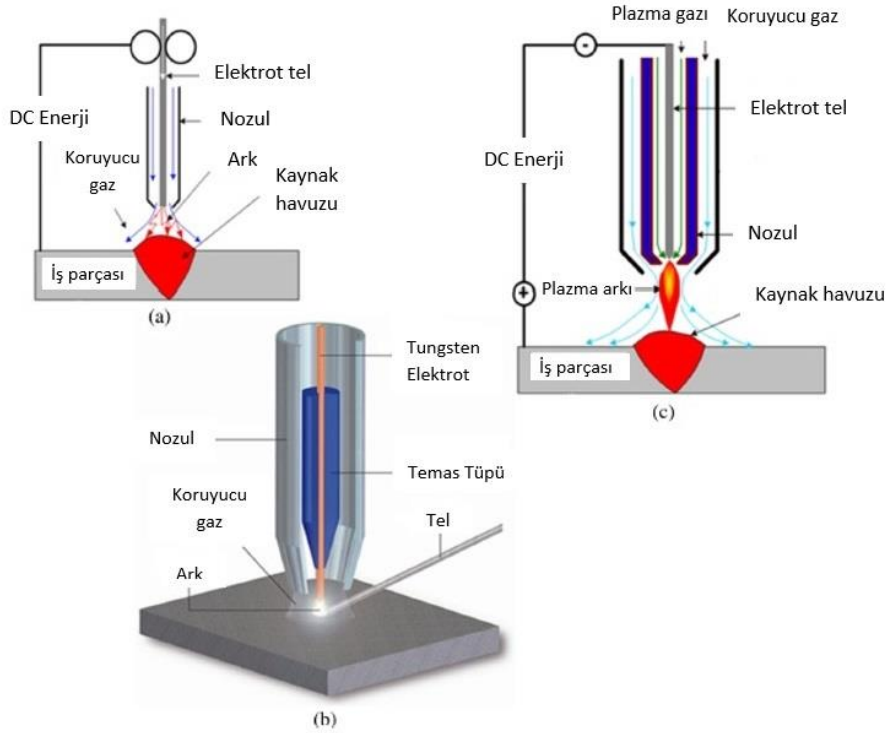
termal davranışların uniform olmayan birikimlere yol açtığı ve mekanik özellikleri olumsuz etkilediği belirtilmiştir [35, 36].

TAKİ yönteminde ark ve plazma gazının oluşturduğu ergiyik havuzu boyutları ve soğuma oranları farklıdır. Ergiyen havuz genişliğinin mikroyapıda homojenliği azalttığı ve katman bantlarının belirginliğini artırdığı belirtilmiştir. Daha düşük olan soğuma hızı ile martenzit oluşumu düşük olduğundan bu durumun mekanik özelliklere olumlu etkideği raporlanmıştır [34, 37].

III. TEL ARK KATMANLI İMALAT (TAKİ) YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

TAKİ teknolojilerinde; gaz altı kaynak makineleri (MIG/MAG), gaz tungsten ark kaynak makineleri (TIG) ve plazma ark kaynak makineleri (PAW) olmak üzere üç farklı türde kaynak makinesi kullanılmaktadır [38]. Bu kaynak makinelerinin sistematik çalışma prensipleri Şekil 5’te gösterilmiştir.

Gaz altı kaynak makineleri tükenen bir tel ve iş parçası arasında elektrik arkının oluşması prensibiyle çalışırken, gaz tungsten ark ve plazma ark kaynak makinelerinde tükenmeyen elektrot ve iş parçası arasında elektrik arkı üretilir. Dolayısıyla bu sistemlerde tel dışarıdan bir cihaz yardımıyla ark bölgesine beslenmektedir [39]. Katmanlı imalat yönteminde kullanılan gaz altı kaynak makinelerinde beslenen tel ve oluşan ark eş eksenli iken, diğer yöntemlerde tel dışarıdan beslenmekte ve telin girişi için sisteme yeni bir parametrenin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu durum dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5. (a) Gaz altı kaynak makinesi (MIG/MAG), (b) Gaz tungsten ark kaynak makinesi (TIG) torcu, (c) Plazma ark kaynak makinesi (PAW) çalışma prensipleri [38]

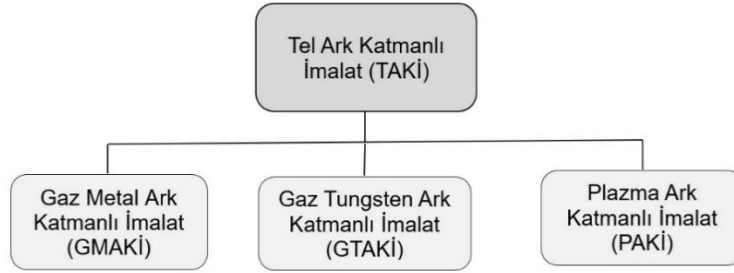
Kullanılan kaynak makinesi türlerine göre katmanlı imalat yöntemleri; Gaz metal ark katmanlı imalat (GMAKİ), Gaz tungsten ark katmanlı imalat (GTAKİ), Plazma ark katmanlı imalat (PAKİ) şeklinde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma Şekil 6’da gösterilmiştir.

Plazma ark katmanlı imalat yönteminde kullanılan ark 0,1-15 A aralığında olduğunda işlem mikroplazma olarak isimlendirilir. Bu yöntem kullanılarak yapılan üretimlerde birikim oranı 1gr/dk’ ya kadar düşmesine rağmen yüzey kalitesinin diğer ark katmanlı imalat yöntemlerine göre daha iyi olduğu görülmektedir [40]. Ayrıca mikroplazma yönteminde ısıdan etkilenen bölge daha küçük olduğundan distorsiyon oluşumlarının daha az olduğu tespit edilmiştir [41].

Yeni bir yöntem olarak geliştirilmekte olan darbeli (pulsed) plazma ark katmanlı imalat yöntemi, çalkantılı bir ergiyik havuzu oluşturduğundan daha ince mikroyapının elde edilmesini sağlamaktadır [42].

Soğuk metal transfer (SMT) yöntemi; gaz altı kaynak teknolojilerinden geliştirilmiş, tel besleme mekanizması hareket kontrollerinin sağlanması esasına dayanan, düşük ısı girdileri ile daha az sıçramaların görüldüğü kaynak sistemleridir[43]. Bu yöntem katmanlı imalat araştırmalarında son dönemlerde yaygın olarak çalışılmaktadır [44, 45].

GMAKİ yönteminde, malzeme birikim oranı GTAKİ ve PAKİ yöntemlerine göre 2-3 kat daha fazladır. Ancak GMAKİ yönteminde görülen üretim esnasındaki sıçramalar, distorsiyon ve gözenek oluşumları daha fazladır[32]. Büyük oranda titanyum alaşımlarından oluşan havacılık malzemelerinde ısı girişi yüksek olan PAKİ yönteminin kullanılmasının diğer metodlarının kullanımına göre daha verimli olabileceği belirtilmiştir[46].



Şekil 6. Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) yönteminin kullanılan kaynak türlerine göre sınıflandırılması

IV. FARKLI MALZEMELERDE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

TAKİ yöntemiyle bir çok farklı malzeme için çalışma yapılmıştır. Savunma sanayi ve havacılık endüstrisinde geniş kullanım alanlarına sahip alüminyum ve titanyum alaşımları için yoğun çalışmalar gerçekleştirilirken; otomotiv sanayi, denizcilik endüstrisi ve konstrüksiyon malzemeleri gibi alanlarda genel kullanıma sahip farklı türdeki çelikler için de çalışmalar yapılmıştır.

Çalışmamızın bu bölümünde; TAKİ yöntemiyle üretilen çelik, alüminyum, nikel, magnezyum ve titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri geleneksel imalat yöntemleriyle karşılaştırılarak incelenecektir.

A. Çelik

Çelik alaşımları; otomotiv, gemicilik, konstrüksiyon ve gaz endüstrisi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır[47]. Katmanlı imalat yöntemlerinde, geleneksel üretim yöntemleriyle üretimleri yüksek maliyetli olan titanyum ve nikel alaşımları gibi değerli malzemeler yaygın olarak çalışılmasına rağmen; SS304 [48], SS308L [49] ve SS316L [50] gibi paslanmaz çelikler, ER70S-6 [51] düşükkarbonlu çelik alaşımı, 2Cr13 [52] ve maraging [53] gibi özel alaşımlı çelikler için de araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Le vd., çalışmalarında SS308L paslanmaz çeliği kullanarak TAKİ yöntemiyle ürettikleri numunelerde soğuma şartlarının etkilerini araştırmışlardır. Kuru hava soğuma şartlarında üretilen numunelerin akma ve çekme değerleri, serbest ortamda soğutulan numunelere göre daha yüksek elde edilirken, uzama(%) değerlerinin ise daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Üretimde katmanlar arası kuru hava ile soğutmanın mekanik özellikleri ve yüzey özelliklerini geliştirebileceğini belirtmişlerdir [54].

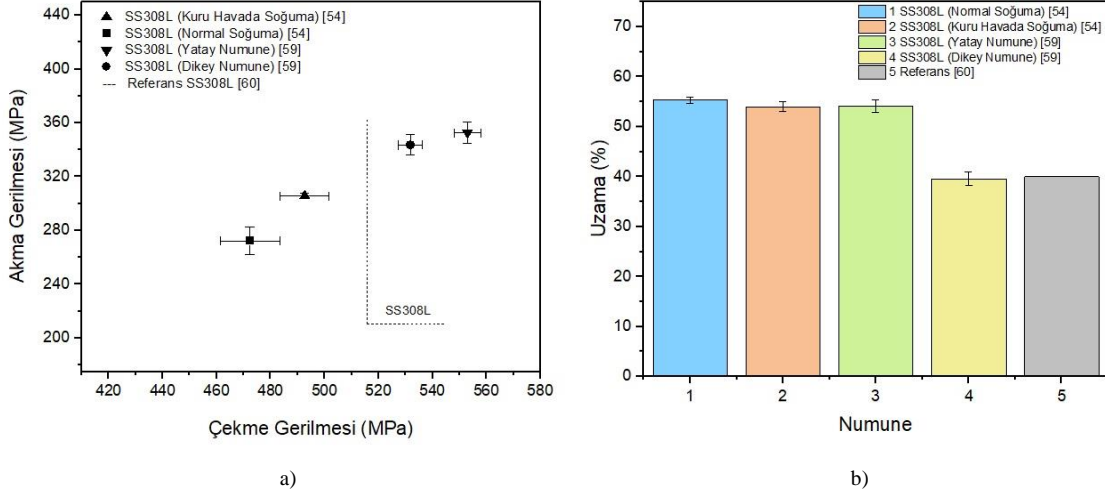
Wang vd., SMT katmanlı imalat yöntemiyle S316L teli kullanarak 100x100x100 boyutlarında blok üretmişler ve üç eksen için mekanik özellikleri karşılaştırmışlardır. Enine birikim yönünde çekme gerilmelerinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca birikim esnasında yeniden ergiyen bölge ve geçiş bölgelerinde mekanik olarak tutarsızlıklar olduğunu, çekme deneylerinde boyun vermelerin ve kırılmaların katman geçiş bölgelerinde olduğunu tespit etmişlerdir [55].

Xu vd., maraging çeliği ile üretim yapmışlar ve elde ettikleri mekanik değerlerde yatay-dikey numuneler için anizotropik özellikler olduğunu tespit etmişlerdir. Dövme maraging çeliği için uygulanan (çözeltiyeye alma+yaşlandırma) ısıl işlemi TAKİ yöntemi ile üretilen numuneye uygulamışlar ve gerilme değerlerinde %24,7 artış olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu işlem ile mikroyapıdaki heterojen yapının homojen hale geldiğini raporlamışlardır [56].

Haden vd., çalışmalarında ürettikleri düşük karbonlu çelik(ER70S) ve paslanmaz çelik (SS304) alaşımlarının, akma/çekme gerilmelerini, aşınma değerleri ve üretimde oluşabilecek gözenek durumlarını incelemişlerdir. SS304 için, aşınma dirençleri ve çekme gerilmelerinde kademeli değerler elde etmişlerdir. ER70S için, numunede yatay ve dikey yönde akma gerilme değerlerinde farklılıklar görülmemesine rağmen, çekme gerilmesi değerleri için anizotropik özellikler olduğunu tespit etmişlerdir [57].

Wang vd. H13 teli kullanarak yaptıkları üretimde, sertlik değerlerinin 300-360 HV aralığında yaklaşık tüm malzemede homojen olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak mekanik değerlerde anizotropik değerler ile karşılaşmışlardır. 830 °C-4 saat süre ile yapılan tavlama işleminde mekanik özelliklerin izotropik düzene girdiğini belirtmişlerdir[58].

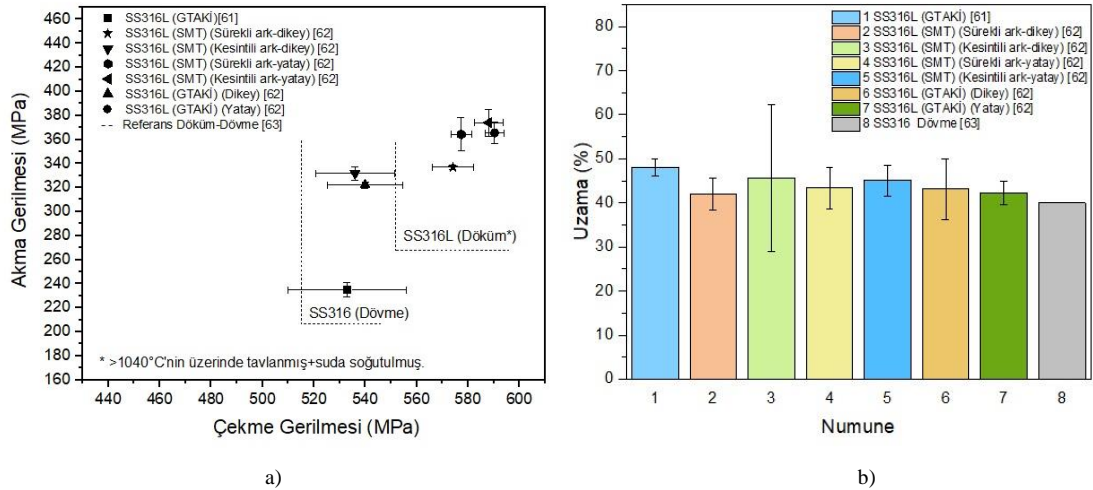
SS308L [54,59] numuneleri ile referans olarak alınan tavllanmış SS308L [60] paslanmaz çelik kıyaslamaları gerçekleştirilmiş, çekme-akma gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için bu grafikler Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş SS308L için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [54,59,60]

Üretimlerde SS308L için akma gerilmelerinin referans değerlerden yüksek olduğu ancak çekme gerilmelerinin üretim şartları ve parametrelere göre önemli farklılıklar gösterebileceği tespit edilmiştir. Uzama (%) değerleri için referans değerlere yakın olarak üretim yapıldığı ancak anizotropi sebebiyle yatay ve dikey numunelerde farklı değerlerin elde edildiği görülmektedir.

TAKİ yöntemlerinden SMT ve GTAKİ yöntemiyle üretilen SS316L paslanmaz çeligi için elde edilen grafikler Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş SS316L için a) akma-çekme gerilme değerleri b)uzama (%) değerleri[61-63]

SS316L için TAKİ yöntemi ile üretilen numunelerde akma-çekme gerilmelerinin dövme referans değerleri karşıladığı görülmektedir. Uzama (%) değerlerinin tamamı referans değerlerden yüksek olarak tespit edilmiştir. Ayrıca SS308L ve SS316L malzemeleri kullanılarak üretilen malzemelerden elde edilen sertlik değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilen çelikler için sertlik değerleri

Malzeme	Özellikler	Sertlik Değerleri (Hv)	Kaynaklar
SS308L	Kuru havada soğuma	160.04±5.58	[54]
	Normal Soğuma	156.56±4.72	
	Alt kısım	169±5.67	[59]
	Orta kısım	163±5.36	
Üst kısım	155±1.20		
	Dövme (SS308)	92,6	[63]
SS316L	Gaz tungsten ark katmanlı imalat (GTAKİ)	190.37*	[61]
	Döküm	158#	[63]
	Dövme (SS316)	95	

(* : Ortalama değer alınmıştır.)(# : >1040°C'nin üzerinde tavllanmış ve suda soğutulmuş.)

TAKİ yöntemi ile üretilen SS308L ve SS316L malzemelerin sertlik değerleri geleneksel imalat yöntemleriyle elde edilen sertlik değerlerini karşılamaktadır.

B. Alüminyum

Alüminyum alaşımları üstün mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri sebebiyle havacılık, gemi endüstrisi ve otomotiv gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır[64]. Maliyet kazançları ve üretim zamanında sağladığı önemli kısalmalar gibi avantajlı özellikleriyle TAKİ yöntemi bu malzemeler için önemli çalışma konusu olmuştur.

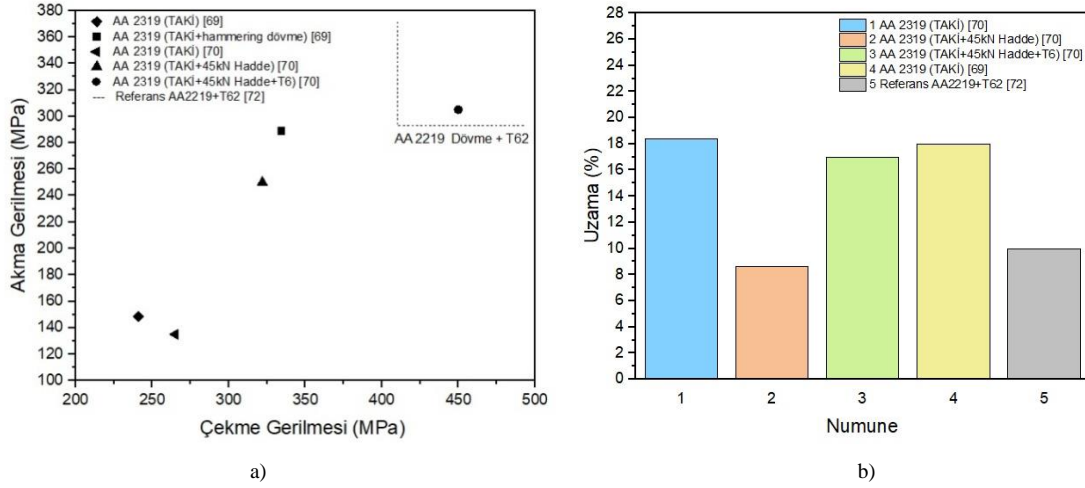
TAKİ yöntemiyle AA2319 [65], AA4043 [66] ve AA 5087[67] gibi farklı alüminyum alaşımları için araştırmalar yapılmıştır. Üretimlerde oksitlenme ile gözenekler oluştuğu ve yüksek ısı iletkenliği sebebiyle ergimeyen malzemelerin heterojen birikime neden olduğu belirlenmiştir [68]. Bu durumlar değerlendirildiğinde daha homojen üretim yapılabilmesi ve mekanik özelliklerin geliştirilebilmesi için üretim sırası veya üretim sonrası işlemler içeren farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Fang vd. çalışmalarında SMT yöntemini kullanarak katmanlar arası dövme işlemlerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Bu dövme işlemini pnömatik dövme metodu ile gerçekleştirmişlerdir. AA2319 alüminyum alaşımı için üretimde kullanılan bu yöntemin mekanik özellikleri geliştirdiğini raporlamışlardır [69].

Gu vd. havacılık endüstrisinde alüminyum 2000 serisinin özellikle AA2219 alaşımının yaygın olarak kullanıldığını belirtmişler ve TAKİ yöntemiyle istenilen mekanik özelliklerin sağlanması için soğuk işlem (haddeleme) ve üretim sonrası ısıtma işlemlerini araştırmışlardır. Çalışmalarında katmanlar arası 15kN-30kN-45kN şeklinde üç farklı yük uygulamışlardır. Ayrıca 45kN yük uygulanan numune için ilaveten T6 ısıtma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları değerlendirdiklerinde haddeleme işlemi uygulanan yük ile mekanik özelliklerin orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. T6 ısıtma işlemi ve 45kN şeklinde üretilen numunenin ise akma ve çekme gerilmesi değerlerini 305MPa ve 405MPa olarak tespit etmişlerdir. Bu değerlerin 2219+T6 dövme alaşım malzeme değerlerinden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir[70].

Geng vd. çalışmalarında 5A06 alüminyum alaşımı için karmaşık parça üretiminde geometrik sınırları ve malzemenin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Seçtikleri parametreler için açılı birikimlerde 20° üzerinin tercih edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir. X ve Y düzlemlerinde çekme gerilmelerinin izotropik değerlere sahip olduğunu, çekme gerilmesini 273MPa akma gerilmesini 124 MPa ve uzama değerini ise %34 olarak raporlamışlardır [71].

AA2319 ve AA5087 alüminyum alaşımları için TAKİ yöntemi ile üretimde elde edilen mekanik değerler geleneksel imalat yöntemiyle üretimde elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. TAKİ yöntemiyle üretilen AA2319 numuneleri için elde edilen çekme-akma gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 9'da gösterilmiştir.

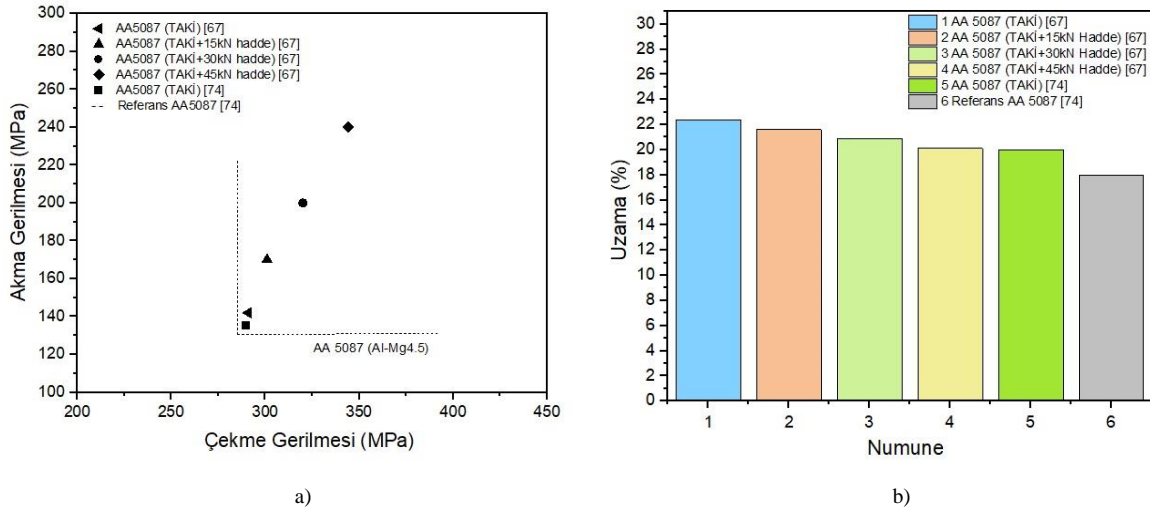


Şekil 9. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş AA2319 için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [69,70,72]

AA2319 alüminyum alaşımları için üretim esnasında uygulanan dövme yöntemi mekanik özellikleri geliştirmiştir. Ayrıca 45kN haddeme işlemi sonrasında yapılan ısıl işlem(T6) ile akma ve çekme gerilmelerinin dövme yoluyla üretilen AA2219+T6 alaşımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Üretilen numunelerin uzama (%) değerleri ise genel olarak referans değerleri karşılamaktadır.

TAKİ yöntemiyle üretilen AA5087 numuneleri için elde edilen akma-çekme gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 10'da gösterilmiştir.

AA5087 alaşımlarında katmanlar arası hadde işleminde yükün artması ile mikro boşluk sayısı, hacim, boyut ve pürüzlülük değerlerinde orantılı olarak azalma olduğu tespit edilmiştir [73]. Buna bağlı olarak 15kN, 30kN ve 45kN şeklinde yüklerin artması ile orantılı olarak akma ve çekme gerilmesi değerleri artış göstermektedir.



Şekil 10. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş AA5087 için a) akma-çekme gerilme değerleri, b)uzama (%) değerleri [67,74]

AA5087 alüminyum alaşımı için TAKİ ile yöntemiyle üretilen numuneler geleneksel üretim metotları ile üretilen numunelerden daha iyi akma ve çekme gerilmesi değerleri sağlamaktadır. Ayrıca uzama (%) oranlarının da daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

C. Nikel

Nikel ve nikel esaslı alaşımlar; korozyon dayanımı, sıcaklık direnci ve yüksek mukavemet özellikleri bakımından modern endüstri için önemli malzemelerdendir. Bu üstün özellikleri sebebiyle petrokimya endüstrisi, havacılık sanayi ve nükleer santral gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [75]

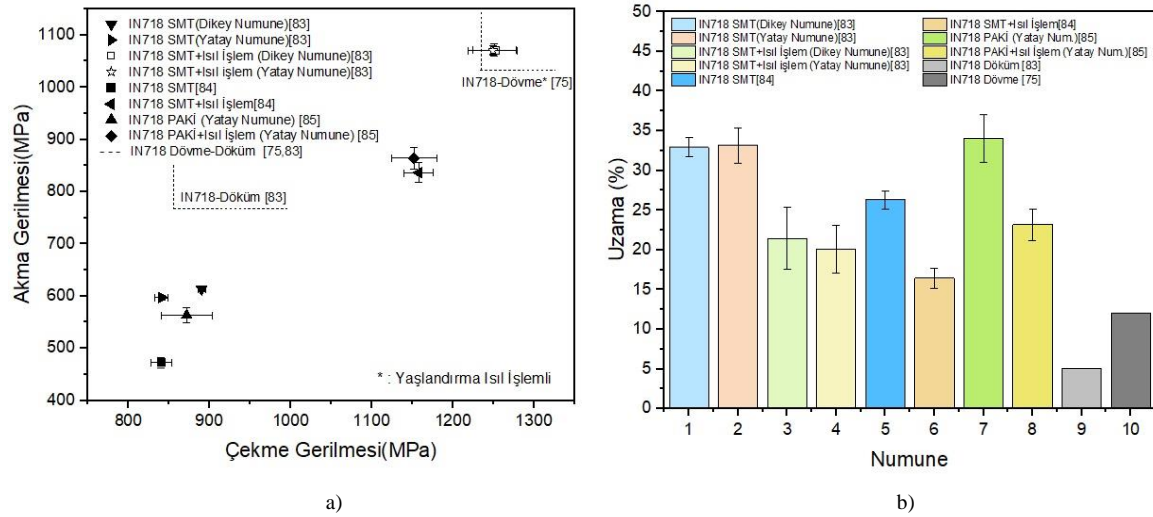
TAKİ yöntemiyle IN718 [76], IN625 [77], IN825[78] ve HastelloyC276 [79] gibi nikel süper alaşımları için birçok araştırma gerçekleştirilmiştir.

Seow vd. IN718 alaşımından PAKİ yöntemiyle yaptıkları çalışmada, üretim esnasında mikro yapıda oluşan anizotropinin giderilmesi için yeni bir ısıl işlem modeli araştırmışlardır. Üretimlerden sonra uygulanan 1186°C’de 40dk olarak uygulanan homojenizasyon ısıl işlemi ile tane yapısında anizotropinin azaldığı ve çekme gerilmeleri için elde edilen değerlerin geleneksel imalat yöntemlerinden döküm yöntemini karşıladığını ancak dövme değerlerinin elde edilemediğini belirtmişlerdir [80].

Safarzade vd. çalışmalarında IN625 alaşımları için GMAKİ yöntemiyle üretim gerçekleştirmişler ve üretimden sonra uygulanan çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işlemlerinin etkilerini araştırmışlardır. Çözeltiye alma ısıl işlemi ile malzeme akma gerilmesi ve sertlik değerlerinde artış olduğu sünekliği azaldığı ve çekme gerilmesinde önemli bir değişiklik olmadığını, sonra uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi ile akma-çekme gerilmeleri, süneklik ve sertlik değerlerinde azalmalar olduğunu raporlamışlardır [81].

Qiu vd. GTAKİ yöntemiyle ürettikleri nikel esaslı Hastelloy C276 alaşımında ısıl işlemin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Üretim sonrasında 1177°C’de çözeltiye alma ısıl işlemi ile Molibdenin (Mo) mikroyapıda çözündüğü ve dayanımın arttığını, mekanik özelliklerde görülen anizotropinin kaybolduğunu ve süneklik değerinin arttığını tespit etmişlerdir [82].

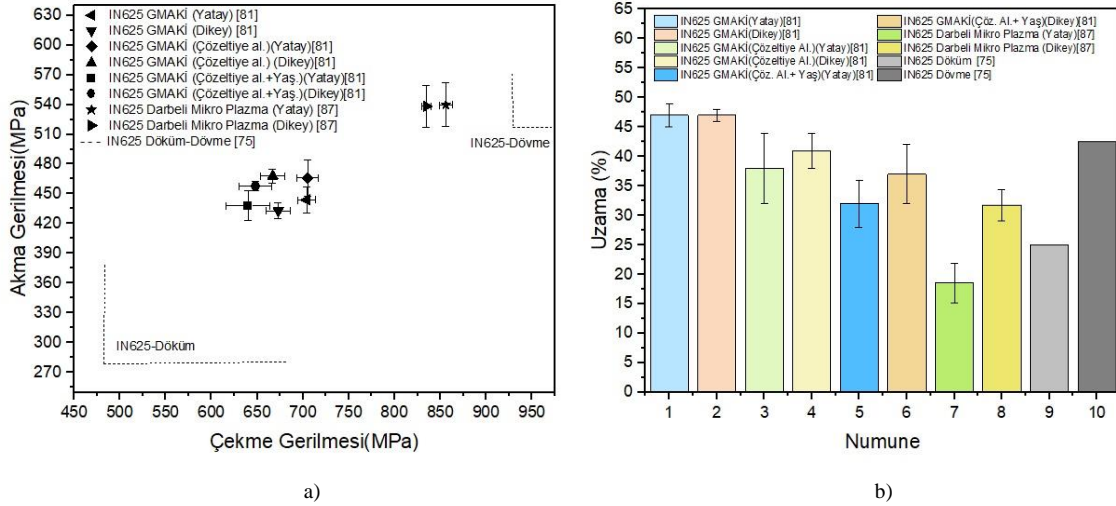
IN718 ve IN625 nikel süper alaşımları için TAKİ yöntemi ile üretimde elde edilen mekanik değerler geleneksel imalat yöntemiyle üretimde elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. TAKİ yöntemiyle üretilen IN718 numuneleri için elde edilen çekme-akma gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş IN718 için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [75,83-85]

SMT ve PAKİ yöntemiyle üretilen IN718 numuneleri için akma-çekme gerilmelerinin referans değerleri karşılamadığı görülmektedir. Numunelere uygulanan ısıl işlemin sonucunda akma-çekme gerilmeleri döküm değerleri karşıladığı ancak dövme değerlerinin altında kaldığı tespit edilmiştir. Uzama (%) değerlerinin tamamı dövme ve döküm referans değerlerinden yüksek olarak tespit edilmiştir.

IN625 nikel süper alaşımı, çözeltiye alma sertleştirme uygulanabilen yüksek sürünme dayanımı ve korozyon direnci sebebiyle endüstride yoğun olarak kullanılan alaşımlardandır [86]. TAKİ yöntemiyle üretilen IN625 numuneleri için elde edilen çekme-akma gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş IN625 için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [75,81,87]

GMAKİ yöntemiyle üretilen IN625 alaşımları için çözeltiyeye alma ısıl işleminin akma gerilmesi değerlerine olumlu etki ettiği ancak çözeltiyeye alma + yaşlandırma ısıl işleminin akma-çekme değerlerinde azalmalara neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu ısıl işlemlerin uzama (%) değerlerinde azalmalara neden olduğu görülmüştür.

Darbeli mikro plazma ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilen numunelerde akma-çekme gerilmeleri daha yüksek olarak tespit edilmiş ancak uzama (%) miktarlarında anizotropik değerlere ulaşılmış ve yatay numunenin referans değerleri karşılamadığı, dikey numunenin dövme değerlerini sağladığı tespit edilmiştir.

GMAKİ yöntemi ile üretilen IN625 alaşımları için ısıl işlemlerin akma-çekme gerilmelerine olumlu yönde etki ettiği ancak uzama (%) değerlerinde azalmalara neden olduğu tespit edilmiştir.

D. Magnezyum

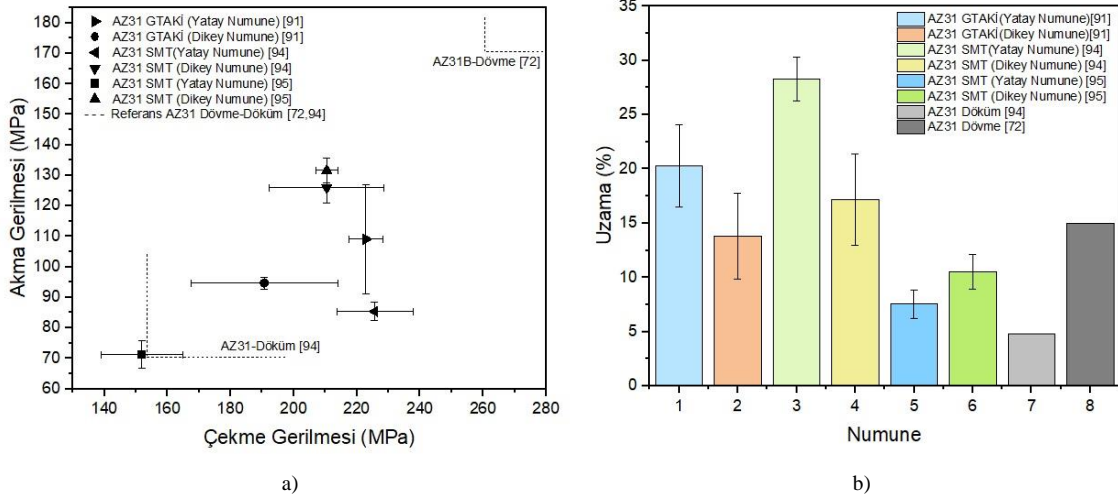
Magnezyum alaşımları, düşük yoğunluğuna ($1,74 \text{ gr/cm}^3$) rağmen yüksek çekme gerilmesi (160-365 MPa) ve elastik modülü (45MPa) özelliği gösterdiği için otomotiv ve havacılık endüstrisinde yoğun olarak kullanılmaktadır [75]. TAKİ yöntemiyle AZ31 [88], AZ61 [89] ve AZ80M [90] gibi birçok farklı magnezyum alaşımı için araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Fang vd. GTAKİ imalat yöntemiyle AZ31 magnezyum alaşımı numune üretmişlerdir. Mekanik özelliklerin geleneksel imalat yöntemlerinden döküm ile elde edilen değerleri sağladığını ve dövme değerlerine yaklaştığını tespit etmişlerdir [91].

Ying vd. çalışmalarında farklı proses parametreleri kullanarak AZ61 magnezyum alaşımı üretmişlerdir. Mikroyapıda ince tanelerin elde edildiği ve gözeneklerin azaltılabildiği proses parametrelerini 130A akım, 12.5 kV voltaj ve 820 mm/dk tel besleme hızı değerleri olarak raporlamışlardır [92].

Guo vd. GTAKİ yöntemiyle ürettikleri AZ80M alaşımları için, çözeltiyeye alma (T4), yaşlandırma (T5) ve çözeltiyeye alma+yaşlandırma (T6) ısıl işlemlerinin mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır. T4 ısıl işlemi ile en yüksek süneklik değerlerine ulaştıklarını ve T6 ısıl işlemi ile T5 ısıl işlemine göre çekme gerilmesi ve süneklik değerlerinin arttığını, mekanik özellikler için yatay ve dikey numunelerde görülen anizotropik özelliklerin neredeyse kalmadığını raporlamışlardır [93].

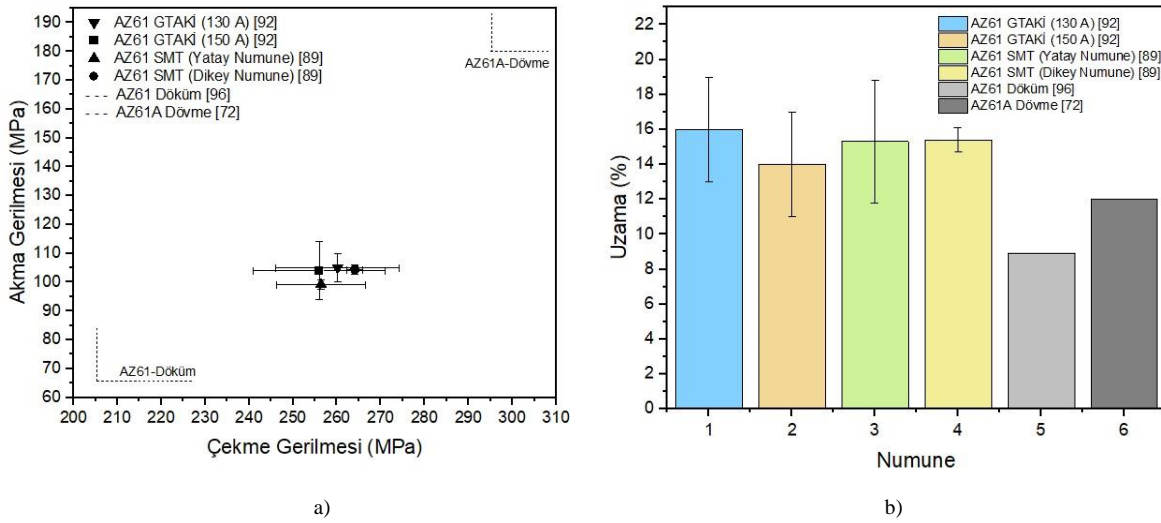
AZ31 ve AZ61 magnezyum alaşımları için TAKİ yöntemi ile üretimde elde edilen mekanik değerler geleneksel imalat yöntemiyle üretimde elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. TAKİ yöntemiyle üretilen AZ31 numuneleri için elde edilen çekme-akma gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş AZ31 magnezyum alaşımı için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [72, 91,94, 95]

AZ31 alaşımı için TAKİ yöntemiyle üretilen numunelerin mekanik özelliklerinde anizotropik özellikler görülmektedir. Elde edilen akma-çekme gerilmesi değerleri döküm yöntemi ile elde edilen değerleri karşılarken, dövme yöntemi değerlerinin altında kaldığı tespit edilmiştir. Yöntem kullanılarak elde edilen uzama (%) değerleri döküm ve dövme malzeme değerlerini sağlamaktadır.

TAKİ yöntemiyle üretilen AZ61 magnezyum alaşımları için elde edilen akma-çekme gerilmeleri ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş AZ61 magnezyum alaşımı için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [72, 89,92, 96]

AZ61 magnezyum alaşımları için mekanik özelliklerde anizotropi [89] ve farklı proses parametreleri [92] üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve akma-çekme gerilmelerinin döküm ile elde edilen değerleri karşıladığı ancak dövme ile elde edilen değerlerden düşük olduğu tespit edilmiştir. Uzama (%) değerleri için ise TAKİ yöntemi ile elde edilen veriler döküm ve dövme değerlerini karşılamaktadır.

Magnezyum, oksijen ile reaksiyona girebildiği için bu alaşımın katmanlı imalat yöntemleriyle imalatında atmosferik ortamdaki korunması imalat zorluğu olarak açıklanmış ancak gerekli olduğu belirtilmiştir [97].

E. Titanyum

Geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak üretilen titanyum alaşımlarında malzeme kaybı önemli bir sorun olmaktadır. Bu nedenle katmanlı imalat yöntemleri titanyum alaşımları için özellikle yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımı için dikkat çekici olmuştur. TAKİ yönteminde diğer katmanlı imalat yöntemlerinde

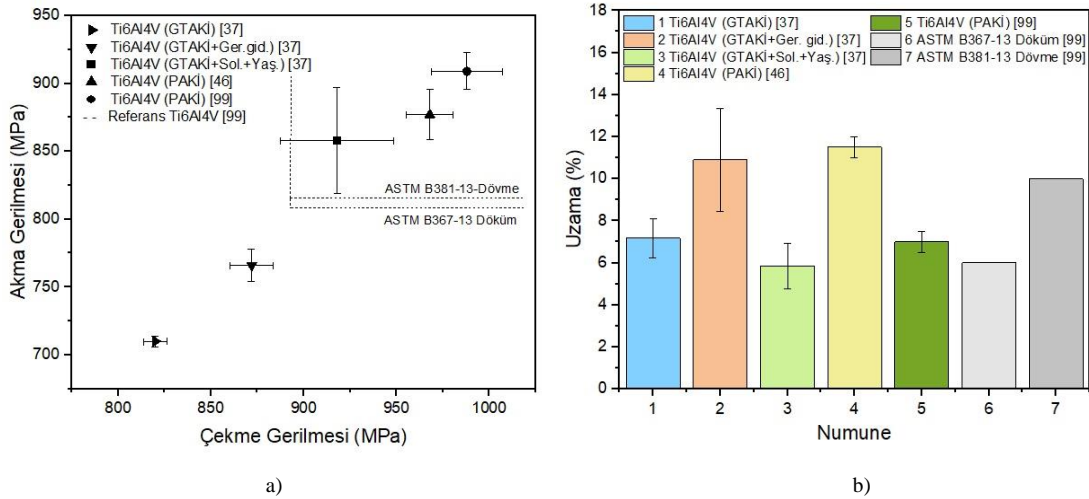
olduğu gibi ürün ile ham malzeme kullanım oranı birbirine yakındır ve titanyum gibi malzemelerde maliyet kazançları sağlanmaktadır. Bu yöntem ile yapılan çalışmalarda, Ti6Al4V alaşımı için elde edilen mekanik özelliklerin geleneksel imalat yöntemlerine yakın düzeyde olduğu [10], ayrıca dövme ve döküm malzemelerden istenilen mekanik özellikleri de sağladığı bildirilmiştir [98]. TAKİ yöntemi ile Ti6Al4V alaşımı için birçok farklı çalışma gerçekleştirilmiştir.

Lin vd. yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerini incelemiştir. Akma ve çekme gerilmelerinin sırasıyla 909 MPa ve 988MPa olduğunu ve zamanın yaklaşık %7,5'e ulaştığını tespit etmişlerdir. Katman geçişlerinde alfa fazı yığılması sebebiyle sertliğin düştüğünü ve daha düşük uzama görüldüğünü belirtmişlerdir. Üretilen malzemenin oda sıcaklığındaki mekanik özelliklerinin klasik döküm malzemeden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir[99].

Martina vd. Ti6Al4V alaşımı için PAKİ yöntemiyle yaptıkları çalışmalarında efektif duvar genişliği için en uygun işlem parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Maksimum malzeme biriktirme hızını 1,8 kg/sa olarak elde etmişlerdir. Üretilen numunelerin sertlik değerini 387 Hv olarak ölçmüşler ve üretilen malzemenin birikim yapılan altlığa oranla da %12 daha yüksek sertlik değerine ulaştığını tespit edilmişlerdir. Plazma ark katmanlı imalat yönteminin büyük boyutlu havacılık bileşenleri için uygun olduğunu belirtmişlerdir [100].

Yong Xie vd. çalışmalarında, Ti-6Al-4V malzemesi kullanarak ürettikleri malzemede yorulma çatlak ilerlemesini ve çatlak ilerleme yönünün etkilerini araştırmışlardır. Gerilme yoğunluk faktörü geçiş noktasının δ_{kt} yatay numunelerde 10,3 MPa $m^{1/2}$ dikey numunelerde 11,3 MPa $m^{1/2}$ olduğunu tespit etmişlerdir. Gerilim şiddeti faktörü geçiş noktasının δ_{kt} , δ_k değerinden küçük olduğunda dikey numunenin yatay numuneye göre yorulma çatlak ilerlemesi %5 daha yüksek olduğunu ve yorulma çatlak ilerlemesindeki farkın mikro yapı karakterizasyonu ve yorulma çatlak büyüme yönünden kaynaklandığını tespit etmişlerdir [101].

Ti6Al4V alaşımı için TAKİ yöntemi ile üretilen malzemelerden elde edilen akma-çekme gerilmesi ve uzama (%) değerleri için oluşturulan grafikler Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 15. Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımları için a) akma-çekme gerilme değerleri, b) uzama (%) değerleri [37, 46, 99]

Ti6Al4V alaşımları için TAKİ yöntemiyle üretimlerde kullanılan yöntemin önemli olduğu ve PAKİ ile üretilen Ti6Al4V alaşımları için dövme ve döküm gibi geleneksel imalat yöntemlerinden elde edilen akma-çekme ve uzama (%) gibi mekanik değerlerin sağlanabildiği tespit edilmiştir. GTAKİ ile yapılan üretimlerde gerilme giderme ve çözültüye alma + yaşlandırma ısıl işlemlerinin akma ve çekme gerilmelerinde önemli artışlar sağladığı, çözültüye alma + yaşlandırma ısıl işlemi yapılan numunede uzama (%) değerinde azalma olduğu görülmüştür.

TAKİ yöntemiyle imal edilen parçalarda kalıntı gerilme, oksitlenme, gözenek ve çatlak oluşumu gibi imalat hataları ile karşılaşılabilir. Titanyum ve magnezyum alaşımları yoğun oksitlenme gösterirken alüminyum alaşımlarında gözenek oluşumu, çelik alaşımları imalatında çatlak oluşumları görülebilmektedir[102]. Ayrıca nikel alaşımlarının bu yöntemle imalatında gözenekler, gaz boşlukları ve termal çatlaklar görülebilmektedir. Bu problemlerin çözümü için birikim sonrası ısıl işlem uygulamaları, proses parametrelerinin optimize edilmesi ve sıcak deformasyon gibi farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [76].

Üretim zamanında tasarruf sağlamak ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi için TAKİ yöntemleri ile talaşlı imalatın uyumlaştırılması [103] ve birikim esnası haddeleme işlemleri [104] gibi hibrit çalışmalar yöntemin gelişmesine katkı sağlamaktadır. Yöntemin geliştirilmesinde malzeme araştırmalarının yanında, farklı birikim

stratejileri [105], topoloji optimizasyonu[106] ve akıllı öğrenme algoritması [107] gibi yenilikler ile araştırmalar devam etmektedir. Bu çalışmaların yoğunlaşması ile yöntemin yakın gelecekte endüstride yaygın olarak kullanılacağı düşünülmektedir.

V. SONUÇLAR

Bu derleme çalışması ile; Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) yönteminin açıklanması, sınıflandırılması ve yapılan araştırmalarda üretilen çelik, alüminyum, nikel, magnezyum ve titanyum alaşımları için elde edilen mekanik özelliklerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde özetlenmiştir.

- SS308L ve SS316L paslanmaz çelik alaşımları için TAKİ yöntemi ile yapılan üretimlerde soğuma koşulları ve katmanlar arası geçiş sıcaklığı mekanik özellikleri önemli oranda etkilemektedir.
- Alüminyum alaşımları için üretimlerde birikim sırası veya sonrasında haddeleme işlemleri mekanik özelliklere olumlu etki etmektedir. Ayrıca haddeleme sonrasında uygulanan ısıl işlem ile akma-çekme gerilmesi değerlerinin arttığı görülmüştür.
- IN718 nikel alaşımları için birikim sonrası ısıl işlemler akma-çekme gerilmelerinde önemli artışlar sağlarken, bu alaşımlar için geleneksel imalat yöntemleri ile elde edilen verilen sağlanması için ısıl işlemlerin önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. IN625 alaşımlarına uygulanan ısıl işlemlerin mekanik değerleri çok az etkilediği görülmüştür.
- Magnezyum alaşımları için yapılan çalışmalarda elde edilen mekanik veriler döküm yöntemi akma-çekme gerilme değerlerini sağlarken, dövme yöntemi ile elde edilen verilerin çok aşağısında kalmıştır. Bu alaşımlar oksitlenme özelliği gösterdiği için atmosfer ortamından arındırılmış kapalı ortamlarda yapılacak çalışmalar ile istenilen mekanik değerlerin sağlanabileceği düşünülmektedir.
- Ti6Al4V alaşımları için Plazma ark katmanlı imalat (PAKİ) yöntemiyle yapılan üretimlerde geleneksel yöntemlerle (döküm-dövme) üretilen referans değerler sağlanabilmektedir.

Tüm bu durumlar değerlendirildiğinde, TAKİ yöntemi kullanılarak üretilen çelik, alüminyum, nikel, magnezyum ve titanyum alaşımları için üretimler ve üretim sonrası yapılan işlemler ile geleneksel imalat yöntemleri mekanik değerlerinin sağlanabileceği ve bu yöntemin önümüzdeki yıllarda imalat teknolojisinde önemli bir konu olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ASTM International. (2021). *52900:2021 Additive manufacturing-general principles-fundamentals and vocabulary*. ASTM International, USA.
- [2] Turhan, S., & Özsoy, A. (2016). DMLS yöntemiyle imal edilen Ti6Al4V alaşım özelliklerine işlem parametrelerinin etkisi. *SDU International Journal of Technological Science*, 8 (2),15-27.
- [3] Aktimur, B., & Gökpınar, E. S. (2015). Katmanlı üretimin havacılıktaki uygulamaları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3 (2), 463–469.
- [4] Zhang, J., Wang, X., Paddea, S., & Zhang, X. (2016). Fatigue crack propagation behavior in wire+arc additive manufactured Ti6Al4V: Effects of microstructure and residual stress. *Materials and Design*, 90, 551-561.
- [5] Oesterreicher, A., Wiener, J., Roth, M., Moser, A., Gmeiner, R., Edler, M., Pinter, G., & Griesser, T. (2016). Tough and degradable photopolymers derived from alkyne monomers for 3D printing of biomedical materials. *Polymer Chemistry*, 32, 5169-5180.
- [6] Zhou, Y., Qin, G., Li, L., Lu, X., Jing, R., Xing, X., & Yang, Q. (2020). Formability, microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V deposited by wire and arc additive manufacturing with different deposition paths. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138654.
- [7] Hauser, T., Silva, A., Reisch, R., T., Volpp, J., Kamps, T., & Kaplan, A. (2020). Fluctuation effects in wire arc additive manufacturing of aluminum analyzed by high-speed imaging. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1088–1098.
- [8] Dinovazer, M., Chen, X., Lallberte, J., Huamg, X., & Frei, H. (2019). Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure, *Additive Manufacturing*, 26, 138-146.
- [9] Gonzalez, J., Rodriquez, I., Prado-Cerqueira, J. L., Diequez, J. L., & Pereira, A. (2017). Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology, *Procedia Manufacturing*, 13, 840-847.
- [10] Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. (2016). Wire + arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32 (7), 641-647.
- [11] Taberero, I., Paskual, A., Álvarez, P., & Suárez, A. (2018). Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 68, 358-362.

- [12] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., & Li, H. (2018). Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing, *Additive Manufacturing* 23, 151–160.
- [13] Yılmaz, O., & Ugla, A. A. (2016). Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230 (10), 1781-1798.
- [14] Wang, C., Suder, W., Ding, J., & Williams, S. (2021). Wire based plasma arc and laser hybrid additive manufacture of Ti6Al4V, *Journal of Materials Processing Tech.*, 293, 117080.
- [15] Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1): 606 – 621.
- [16] Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24, 2, 373-392.
- [17] Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2018). Havacılık komponentlerinin bakım uygulamalarında katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı. *Mühendis ve Makina* 59, 691, 59-69.
- [18] Çalışkan, C. İ., & Arpacıoğlu, Ü. (2020). Yapı üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılmalı değerlendirmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25, 2, 1117-1136.
- [19] Güngör, A. (2020). Türkiye’de katmanlı imalat ve gemi inşaatı üzerine etkileri. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 218, 36-53.
- [20] Özsolak, O. (2019). Thermal changes and modelling in additive manufacturing. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3, 2, 33-38.
- [21] Aktürk, M., & Korkmaz, M. E. (2021). Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş alüminyum alaşımlarının malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi üzerine bir derleme, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları* 2, 1, 49-60.
- [22] Gülcan, O., Konukseven, E. İ., & Temel, S. (2017). Katmanlı imalatla üretilen Ti6Al4V parçalarının mekanik özellikleri. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 15, 1, 27-37.
- [23] Güler, S., Serindağ, H. T., & Çam, G. (2022). Tel ark eklemeli imalat: son gelişmeler ve değerlendirmeler, *Mühendis ve Makina* 63, 706, 82-116.
- [24] Ayan Y., & Kahraman N. (2018). Metal eklemeli imalat: Tel ark yöntemi ve uygulamaları, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* 2, 3, 74-84.
- [25] Hönnige, J. R., Colegrove, P., & Williams, S. (2017). Improvement of microstructure and mechanical properties in wire+arc additively manufactured Ti6Al4V with machine hammer peening, *Procedia Engineering* 216, 8–17.
- [26] Jin, W., Zhang, C., Jin, S., Tian, Y., Wellmann, D., & Liu, W. (2020). Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A Review, *Applied Sciences*, 10, 1563.
- [27] Wang, J., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2019). Phase constituent control and correlated properties of titanium aluminide intermetallic alloys through dual-wire arc additive manufacturing, *Materials Letters*, 242, 111–114.
- [28] Omiyale, B. O., Olugbade, T. O., Abioye, T. E. & Farayibi, P. K. (2022). Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys for aerospace and automotive applications: a review. *Materials Science and Technology*, 38, 7, 391-408.
- [29] Queguineur A, Rückert G, Cortial F, & Hascoet J. Y. (2018). Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. *Welding in the World*, 62, 259–266.
- [30] Buchanan, C., & Gardner, L. (2019). Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, 180, 332–348.
- [31] Li, F., Chen, S., Wu., Z., & Yan, Z. (2018). Adaptive process control of wire and arc additive manufacturing for fabricating complex-shaped components, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 871-879.
- [32] Stavinoha, J. N. (2012). Investigation of plasma arc welding as a method for the additive manufacturing of titanium-(6) aluminum-(4) vanadium alloy components. Master Thesis, Montana Tech of the University of Montana, Master of Science General Engineering, USA.
- [33] Brandl, E., Baufeld, B., Leyens, C., & Gault, R. (2010). Additive manufactured Ti- 6Al- 4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications. *Phys. Procedia* 5, 595–606.
- [34] Ho, A., Zhao, H., Fellowes, J.W., Martina, F., Davis, A.E., & Pragnell, P.B. (2019). On the origin of microstructural banding in Ti-6Al4V wire-arc based high deposition rate additive manufacturing. *Acta Materialia*, 166, 306-323.
- [35] Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J., & Fei, Z. (2017). Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *J. Mater. Process Technol.* 250, 304–312.

- [36] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., & Fei, Z. (2018). The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. *J. Mater. Process Technol.* 258, 97–105.
- [37] Bermingham, M. J., Nicastro, L., Kent, D., Chen, Y., & Dargusch, M. S. (2018). Optimizing the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments. *Journal of Alloys and Compounds*, 753, 247–255.
- [38] Ding, D. H., Pan, Z. X., Cuiuri, D., & Li, H. J. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 465-481.
- [39] Li, J. Z., Alkahari, M. R., Rosli, N. A. B., Hasan, R., Sudin, M. N., & Ramli, F., R. (2019). Review of wire arc additive manufacturing for 3D metal printing. *Int. J. of Automation Technology*, 13 (3), 346-353.
- [40] Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R. M., V., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Materials*, 12(7), 1121.
- [41] Sawant, M. S., & Jain, N. K. (2017). Characteristics of single-track and multi-track depositions of stellite by Micro-plasma Transferred Arc Powder Deposition Process, *J. of Materials Engineering and Performance*, 26,8, 4029-4039.
- [42] Correa, E. O., Costa, S. C., & Santos, J. N. (2008). Weldability of iron-based powder metal materials using pulsed plasma arc welding process, *J. Mater. Process. Technol.* 198, 323–329.
- [43] Feng, J., Zhang, H. & He, P. The CMT short circuiting metal transfer process and its use in thin aluminum sheets welding. (2009). *Materials and Design*, 30, 1850-1852.
- [44] Mou, G., Hua, X., Wang, M., & Li, F. (2019). Effects of Ni addition on removing Fe-Ti intermetallic compounds in cold metal transfer arc-brazed TC4/304L dissimilar joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 38, 104-112.
- [45] Wang, L., Suo, Y., Liang, Z., Wang D., & Wang, Q. (2019). Effect of titanium powder on microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Al-Mg alloy, *Materials Letters*, 241, 231-234.
- [46] Lin, J., Lv, Y., Liu, Y., Sun, Z., Wang, K., Li, Z., Wu, Y., & Xu, B. (2017). Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 69, 19–29.
- [47] McGuire, M. (2008). *Stainless Steels for Design Engineers*. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 304.
- [48] Gordon, J. V., & Harlow, D. G. (2019). Statistical modeling of wire and arc additive manufactured stainless steel 304: microstructure and fatigue. *International Journal of Reliability Quality and Safety Engineering*, 26, 4 1950016.
- [49] Bekker, A. C. M. & Verlinden, J. C. (2018). Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and cnc milling in stainless steel. *Journal of Cleaner Production*, 177, 438-447.
- [50] Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., & Seely, D. W. (2015). Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel. *Materials Science & Engineering A*, 644, 171-183.
- [51] Aldalur, E., Veiga, F., Suarez, A., Bilbao, J., & Lamikiz, A. (2020). High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties, *Journal of Manufacturing Processes* 58, 615–626.
- [52] Ge, J., Lin, J., Chen, Y., Lei, Y., & Fu, H. (2018). Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties. *Journal of Alloys and Compounds* 748, 911-921.
- [53] Yang, G., Deng, F., Zhou, S., Wu, B., Qin, L. & Zheng, J. (2022). Influence of shielding gas nitrogen content on the microstructure and mechanical properties of Cu reinforced maraging steel fabricated by wire arc additive manufacturing. *Materials Science & Engineering A*, 832, 142463.
- [54] Le, V. T., Mai, D. S., & Hoang, Q. H. (2020). Effects of cooling conditions on the shape, microstructures, and material properties of SS308L thin walls built by wire arc additive manufacturing, *Materials Letters*, 280, 128580.
- [55] Wang, C., Liu, T. G., Zhu, P., Lu, Y. H., & Shoji, T. (2020). Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel fabricated by CMT wire and arc additive manufacturing. *Materials Science & Engineering A*, 796, 140006.
- [56] Xu, X., Ganguly, S., Ding, J., & Guo, S., Williams, S., & Martina, F. (2018). Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire+arc additive manufacture process, *Materials Characterization* 143, 152–162.
- [57] Haden C. V., Zeng, G., Carter, F. M., Ruhl, C., Krick, B. A., & Harlow, D. G., (2017). Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties. *Additive Manufacturing*, 16, 115–123.

- [58] Wang, T., Zhang, Y., Wu, Z., & Shi, C. (2018). Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire. *Vacuum*, 149, 185-189.
- [59] Le, V. T. & Mai, D. S. (2020). Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing. *Materials Letters* 271, 127791.
- [60] Li, M., Lu, T., Dai, J., Jia, X., Gu, X., & Dai, T. (2020). Microstructure and mechanical properties of 308L stainless steel fabricated by laminar plasma additive manufacturing. *Materials Science & Engineering A* 770, 138523.
- [61] Chen, X., Li, J., Cheng, X., He, B., Wang, H., & Huang, Z. (2017). Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing. *Materials Science & Engineering A*, 703, 567–577.
- [62] Rodriguez, N., Vázquez, L., Huarte, I., Arruti, E., Tabernero, L., & Alvarez, P. (2018). Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel. *Welding in the World*, 62, 1083–1096.
- [63] ASM International. (2008). *Stainless Steels, Metals Handbook Desk Edition*. Materials Park, USA, 368-388.
- [64] Horgar, A., Fostervoll, H., Nyhus, B., Ren, X., Eriksson, M., & Akselsen, O. M., (2018). Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire. *Journal of Materials Processing Tech*, 259, 68-74.
- [65] Yongjie, L., Shengfu, Y., Ying, C., Runzhen, Y. & Yusheng, S. (2020). Wire and arc additive manufacturing of aluminum alloy lattice structure. *Journal of Manufacturing Processes*, 50, 510-519.
- [66] Campatellia, G., Campanella, D., Barcellona, A., Fratini, L., Grossia, N., & Ingarao, G. (2020). Microstructural, mechanical and energy demand characterization of alternative WAAM techniques for Al-alloy parts production. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 492-499.
- [67] Gu, J., Wang, X., Bai, J., Ding, J., Williams, S., Zhai, Y., & Liu, K., (2018). Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire +arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling. *Materials Science & Engineering A*, 712, 292–301.
- [68] Ding, Y., Muñoz-Lerma, J.A., Trask, M., Chou, S., Walker, A. & Brochu, M. (2016). Microstructure and mechanical property considerations in additive manufacturing of aluminum alloys. *MRS Bulletin*, 41, 745–751.
- [69] Fang, X., Zhang, L., Chen, G., Huang, K., Xue, F., Wang, L., Zhao, J., & Lu, B. (2021). Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering. *Materials Science & Engineering A*, 800, 140168.
- [70] Gu, J., Ding, J., Williams, S., Gu, H., Bai, J., Zhai, Y., & Ma, P. (2016). The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al–6.3Cu alloy. *Materials Science & Engineering A*, 651, 18–26.
- [71] Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., & Zhang, F. (2017). Geometric limitation and tensile properties of wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminum alloy parts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 621–629.
- [72] ASM International. (1990). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Volume 2, Metals Handbook. USA, 29-122.
- [73] Gu, J., Yang, S., Gao, M., Bai, J., Zhai, Y., & Ding, J. (2020). Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling. *Materials & Design*, 186, 108288.
- [74] Hauser T., Reisch, R. T., Seebauer S., Parasar, A., Kamps T., Casati, R., Volpp, J., & Kaplan, A. F. H., (2021). Multi-Material Wire Arc Additive Manufacturing of low and high alloyed aluminum alloys with in-situ material analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 69, 378-390.
- [75] ASM International. (2008). *Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Metals Handbook, Desk Edition*. The Materials Information Society, USA, 415-639.
- [76] Lan, B., Wang, Y., Liu, Y., Hooper, P., Hooper, C., Zhang, G., Zhang, X., & Jiang, J. (2021). The Influence of microstructural anisotropy on the hot deformation of wire arc additive manufactured (WAAM) Inconel 718. *Materials & Engineering A*, 823, 141733.
- [77] Wang, Y., Chen, X., Shen, Q., Su, C., Zhang, Y., Jayalakshmi, S. & Singh, R. A., (2021). Effect of magnetic field on microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 10-19.
- [78] Rajkumar, V., Visnukumar, M., Sowrirajan, M. & Kannan A. R. (2022). Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Incoloy 825 manufactured using wire arc additive manufacturing. *Vacuum*, 203, 111324.
- [79] Qiu, Z., Wu, B., Zhu, H., Wang, Z., Hellier, A., Ma, Y., Li, H., Muransky, O., & Wexler, D. (2020). Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured Hastelloy C276 alloy. *Materials and Design*, 195, 100007.

- [80] Seow, C. E., Coules, H. E., Wu, G., Khan, R., Xu, X., & Williams, S. (2019). Wire+arc additively manufactured Inconel 718: Effect of post-deposition heat treatments on microstructure and tensile properties. *Materials and Design*, 183, 108157.
- [81] Safarzade, A, Sharifitabar, M. & Afarani, M. S. (2020). Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30, 3016-3030.
- [82] Qiu, Z., Wu., B., Wang., Z., Wexler, D., Carpenter, K., Zhu, H., Muransky, O., Zhang, J. & Li, H. (2021). Effects of post heat treatment on the microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured Hastelloy C276 alloy. *Materials Characterization*, 177, 111158.
- [83] Xi, N., Fang, X., Duan, Y., Zhang, Q.& Huang, K. (2022). Wire arc additive manufacturing of Inconel 718: Constitutive modelling and its microstructure basis. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 1134-1143.
- [84] Zhang, T., Li, H., Gong, H., Wu, Y., Ahmad, A. S. & Chen, X. (2021). Effect of rolling force on tensile properties of additively manufactured Inconel 718 at ambient and elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 884, 161050.
- [85] Wang, K., Liu, Y., Sun, Z., Lin, J., Lv, Y. & Xu, B., (2020). Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 718 superalloy thin wall fabricated by pulsed plasma arc additive manufacturing. *Journal of Alloys and compounds*, 819, 152936.
- [86] Sharifitabar, M., Khorshahian, S., Afarani, M. S., Kumar, P. & Jain, N. K. (2022). High temperature oxidatiton performance of Inconel 625 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing. *Corrosion Science*, 197,110087.
- [87] Yuan, X., Qiu, H., Zeng, F., Luo, W., Li, H., Wang, X., Guan, N. & Cui, F. (2022). Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed microplasma rapid additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 77, 63-74.
- [88] Wang, P., Zhang, H., Zhu, H., Li, Q., & Feng, M. (2021). Wire-arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy fabricated by cold metal transfer heat source: processing, microstructure, and mechanical behavior. *Journal of Materials Processing Tech.*, 288,116895.
- [89] Klein, T., Arnoldt, A., Schnall, M., & Gneiger, S. (2021). Microstructure formation and mechanical properties of wire-arc additive manufactured magnesium alloy, *JOM*, 73, 4, 1126-1134.
- [90] Guo, Y., Pan, H., Ren, L., & Quan, G. (2019). Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured AZ80M magnesium alloy. *Materials Letters*, 247,4-6.
- [91] Fang, X., Yang, J., Wang, S., Wang, C., Huang, K., Li, H., & Lu, B. (2022). Additive manufacturing of high performance AZ31 magnesium alloy with full equiaxed grains: Microstructure, mechanical property, and electromechanical corrosion performance. *Journal of Materials Processing Tech.*, 300, 117430.
- [92] Ying, T., Zhao, Z., Yan, P., Wang, J., & Zeng, X. (2022). Effect of fabrication parameters on the microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured AZ61 alloy. *Materials Letters*, 307, 131014.
- [93] Guo, Y., Quan, G., Çelikin, M., Ren, L., Zhan, Y., Fan, L.& Pan, H. (2022). Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of AZ80M magnesium alloy fabricated by wire arc additive manufacturing. *Journal of magnesium and alloys*, 10, 7, 1930-1940.
- [94] Yang, X., Liu, J., Wang, Z., Lin, F., Huang, W., & Liang, E. (2020). Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured AZ31 magnesium alloy using cold metal transfer process. *Materials Science & Engineering A*, 774, 138942.
- [95] Li, J., Qiu, Y., Yang, J., Sheng, Y., Yi, Y., Zeng, X., Chen, L., Yin, F., Su, J., Zhang, T., Tong, X., & Guo, B. (2021). Effect of grain refinement induced by wire and arc additive manufacture (WAAM) on the corrosion behaviors of AZ31 magnesium alloy in NaCl solution. *Journal of Magnesium Alloys*, basimda.
- [96] Xia, X., Chen, M., Lu, Y., Fan, F., Zhu, C., Huang, J., Deng, T. & Zhu, S. (2013). Microstructure and mechanical properties of isothermal multi-axial forging formed AZ61 Mg alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 3186-3192.
- [97] Karunakaran, R., Ortgies, S., Tamayol, A., Bobaru, F., & Sealy, M. P. (2020). Additive manufacturing of magnesium alloys. *Bioactive Materials*, 5, 44-54.
- [98] Baufeld, B., & Biest, O. (2009). Mechanical properties of Ti6Al4V specimens produced by shaped metal deposition. *Science and Technology of Advanced Materials*, 10 (1).
- [99] Lin, J. J., Lv, Y. H., Liu, Y. X., Xu, B. S., Sun, Z., Li, Z. G., & Wu, Y. X. (2016). Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing, *Materials and Design*, 102, 30–40.
- [100] Martina, F., Mehnen, J., Williams, S., Colegrove, P., & Wang, F. (2012). Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti6Al4V. *Journals of Materials Processing Technology*, 212 (6), 1377-1386.
- [101] Xie, Y., Gao, M., Wang, F., Zhang, C., Hao, K., Wang, H., & Zeng, X. (2018). Anisotropy of fatigue crack growth in wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Materials Science & Engineering A*, 709, 265-269.

- [102] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects, and quality improvement. *Journal of manufacturing processes*, 35 127-139.
- [103] Li, F., Chen, S., Shi, J., & Tian, H. (2018). Investigation on Surface Quality in a Hybrid Manufacturing System Combining Wire and Arc Additive Manufacturing and Machining, *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 127-137.
- [104] Lu, Y., Wang, G, Zhang, M., Li, R., & Zhang, H. (2022). Microstructures, heat treatments and mechanical properties of AerMet100 steel fabricated by hybrid directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, 56, 102885.
- [105] Arana, M., Ukar, E., Rodriguez, I., Aguilar, D., & Álvarez, P. (2022). Influence of deposition strategy and heat treatment on mechanical properties and microstructure of 2319 aluminum WAAM components, *Materials & Design*, 221, 110974.
- [106] Mishra, V., Ayas, C., Langelaar, M., & Keulen, F. (2022). Simultaneous topology and deposition direction optimization for Wire and Arc Additive Manufacturing, *Manufacturing Letters*, 31, 45–51.
- [107] Ding, D., He, F., Yuan, L., Zengxi Pan, Z., Wang, L., & Ros, M. (2021). The first step towards intelligent wire arc additive manufacturing: An automatic bead modelling system using machine learning through industrial information integration, *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100218.