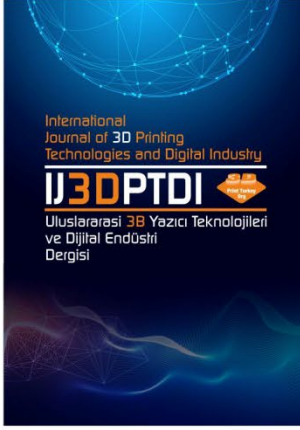




ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 [Online]

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

316L PASLANMAZ ÇELİK TOZUNUN ARK İLE TEK ÇİZGİ ERGİTİLMESİNDE ELEKTROT MESAFESİNİN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ELECTRODE
DISTANCE ON SINGLE-TRACK MELTING OF 316L
STAINLESS STEEL POWDER BY ARC

Yazarlar (Authors): Arif Balcı *

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Balcı A., “316L Paslanmaz Çelik Tozunun Ark ile Tek Çizgi Ergitilmesinde Elektrot Mesafesinin Etkilerinin Araştırılması” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 9(2): 183-193, (2025).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1637693

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

316L PASLANMAZ ÇELİK TOZUNUN ARK İLE TEK ÇİZGİ ERGİTİLMESİNDE ELEKTROT MESAFESİNİN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Arif Balcı^a 

^aKafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: arifbalci@kafkas.edu.tr

(Geliş/Received: 11.02.25; Düzeltme/Revised: 02.04.25; Kabul/Accepted: 01.05.25)

ÖZ

Eklemeli imalat yöntemleri, karmaşık geometrilerin ve prototip numunelerin üretimindeki avantajları nedeniyle yaygın olarak araştırılmaktadır. Toz yatakta birleştirmede, uygun ısı kaynağı ve işlem parametrelerinin belirlenmesi tek çizgi katılma ile başlamaktadır. Bu çalışmada, lazer ve elektron ışınına alternatif olarak ark kullanılarak, 316L paslanmaz çelik tozunun tek çizgi ergitilebilirliği incelenmiştir. Ergitmeler 0,4 mm kalınlığındaki toz yatakta, 17, 22 ve 27 amper akım değerleri ile gerçekleştirilmiş; ilerleme hızları 1 ve 2 mm/s, elektrot mesafeleri ise 0,7 ve 1 mm olarak belirlenmiştir. Farklı parametre kombinasyonları ile yapılan deneylerde katılma geometrisi, ısı etkilenmiş bölge ve mikroyapı detaylı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük akım ve yüksek ilerleme hızlarında çizgisel katılma kabiliyetinin azaldığını; yüksek akım ve düşük ilerleme hızlarında ise daha geniş ve homojen katılma bölgelerinin oluştuğunu göstermektedir. Elektrot mesafesindeki artışın enerji yoğunluğunu azaltarak katılma genişliği ve tabla nüfuziyetini düşürdüğü belirlenmiştir. Çalışma, ark kullanımının lazer ve elektron ışınına alternatif olarak uygulanabilirliğini ortaya koymakta ve işlem parametrelerinin optimizasyonu için önemli bulgular sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Ark, Metal Tozu.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ELECTRODE DISTANCE ON SINGLE-TRACK MELTING OF 316L STAINLESS STEEL POWDER BY ARC

ABSTRACT

Additive manufacturing techniques are extensively studied nowadays because of their benefits in fabricating intricate geometries and prototype specimens. In powder bed fusion, the selection of the suitable heat source and process parameters initiates with single-line solidification. This study examined the single-line meltability of 316L stainless steel powder utilizing an arc as an alternative heat source to laser and electron beam methods. Melting was conducted on a 0,4 mm thick powder bed utilizing current values of 17, 22, and 27 amperes; travel speeds of 1 and 2 mm/s; and electrode distances of 0,7 and 1 mm. The experiments, performed with various parameter combinations, were assessed regarding solidification geometry, heat-affected zone, and microstructure. The findings indicated that linear solidification efficiency diminished at low current and elevated travel speeds, whereas broader and more uniform solidification areas were achieved at high current and reduced travel speeds. An increase in electrode distance was found to diminish energy density, resulting in a reduction of solidification width and substrate penetration. This study illustrates the viability of employing arc technology as a substitute for laser and electron beam methods in powder bed single-track melting, yielding significant insights for the optimization of process parameters.

Keywords: Additive Manufacturing, Arc, Metal Powder.

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat yöntemleri karmaşık veya prototip numune geometrilerinin üretiminde önemli bir yöntemdir [1]. Toz yatakta ergitme ise bir eklemeli imalat metodu olup ergitme için gereken ısı enerjisi genellikle lazer ve elektron ışınından sağlanmaktadır. Toz yatakta ergitme yöntemi için mevcut bu ısı kaynaklarına ek olarak araştırılacak yeni enerji kaynağının denenmesine lazer ve elektron ışın yöntemlerinde olduğu gibi ilk adımda tek çizgi katılmasının sağlanması ile başlanmaktadır [2]. Tek çizgi ergitme çalışmalarında ise belirlenen ilerleme hızı ve güç gibi parametrelerin enerji yoğunluğunu etkileyerek ergime havuzu boyutlarını, katılma geometrisini ve mikroyapı oluşumlarını doğrudan etkilediği bilinmektedir [3].

Toz yataklı ergitme yönteminde etkili olan parametrelerin anlaşılmasına yönelik yapılan literatür taramasında, lazerle gerçekleştirilen ergitme çalışmalarına ilişkin çok sayıda yayına rastlanmıştır. Nayak ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, lazer gücünün etkileri araştırılmış olup 150 W ile 450 W arasında değişen güç değerleri ile ergitme yapılmıştır [4]. Yapılan çalışmada lazer gücündeki artışın ergime havuzunun genişliğini %40'a yakın artırdığı ve iz stabilitesinin geliştiği gözlenmiştir. Lazer gücünün 400 W üzerine çıkmasıyla %15 oranında porozite artışı tespit edilmiştir. İlerleme hızının etkilerinde ise Nayak ve arkadaşları, 0,02 m/s ile 0,08 m/s arasında değişen ilerleme hızlarının ergime havuzuna etkilerini araştırmışlardır. Artan ilerleme hızının lazer ile malzeme arasındaki etkileşim süresini %50 azalttığı ve ergime havuzu derinliğinde oransal olarak %30 azalma tespit edilmiştir [4]. İlerleme hızı ve gücün katılma geometrileri üzerindeki etkilerini inceleyen Yadroitsev ve Smurov tek çizgi ergitme çalışması yapmış olup çizgisel ergitmede kusur bölgelerini kararlılık, istikrarsızlık ve damla (toplaşma) bölgeleri olmak üzere üç bölgeye ayırmıştır [5]. Tespit edilen kusur bölgelerinde güç/ilerleme hızı oranı sırasıyla azalama göstermiştir. Tek çizgi ergitmede toz katmanın ergimesini inceleyen bir diğer çalışmada Wang ve arkadaşları [6], yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızının çizgisel ergimeyi desteklediği fakat ergime bölgesi etrafındaki tozları buharlaştırarak uzaklaştırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca ilerleme hızının artışı ile tek çizgi kabiliyeti

istikrarsızlaşmaya ve ergiyik metalin sürekliliğinin azalmasıyla toplaşma oluşmaya başladığını tespit edilmiştir [6].

Metal ergitmede enerji kaynakları arasında lazer, elektron ışını ve ark bulunmaktadır [7]. Eklemeli imalat yöntemlerinde ark kullanımı araştırıldığında tel formu sistemlerin halihazırda araştırılmaya devam ettiği ve ticari olarak kullanıldığı görülmüştür [3]. Toz yatakta ergitme için lazer ve elektron ışınına alternatif olarak ark ile ergitme araştırılmaya başlanmış olduğu ve parametrelerin etkileri hakkında literatürün yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Ark ile metal ergitmede ilerleme hızı ve kullanılan gücün ergiyik havuzu boyutlarına etkisi lazer ile benzer olup tungsten elektrot mesafesi ise bir diğer etken parametre olarak literatürde yer almaktadır [3,8]. Ark ile metal ergitmede amper büyüklüğünün etkisinin araştırıldığı Singh ve Agrawal tarafından yapılan çalışmada, lazer gücü etkisine benzer şekilde amper büyüklüğünün artması ergime havuzunun genişliği ve derinliğini artırmıştır [9]. Ark ile metal ergitmede ilerleme hızının etkilerine bakıldığında ise ilerleme hızındaki artışın ergime havuzu genişliğini azalttığı gözlenmiştir [10]. Ark ile metal ergitmede amper büyüklüğü ve ilerleme hızına ek olarak bir diğer etken parametre olan elektrot ile ergitme yapılacak yüzey arası mesafenin ergime havuzuna etkilerine bakıldığında elektrot mesafesindeki artışın ergime havuzu derinliğini düşürmüştür [11,12]. Ayrıca elektrot mesafesinin azalmasıyla ark yolunun yoğunluğunun arttığı raporlanmıştır [13].

Eklemeli imalat yöntemlerinde katman kalınlığı parça kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Literatüre bakıldığında toz yatakta ergitme yapılan eklemeli imalat yöntemlerinde katman kalınlığının 150 mikron ve üstü değerler için [14–21] çalışmaların var olduğu ve en fazla 400 mikron [22] katman kalınlığı kullanılarak ergitme yapıldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada literatür kaynaklarında yapılan araştırmalar sonucunda sınır değer olarak belirlenen 400 mikron katman kalınlığındaki 316L paslanmaz çelik alaşımından oluşturulan toz yatakta lazer ve elektron ışınına alternatif olarak ark ile tek çizgi ergitilebilirlik araştırılmıştır. Tek çizgi ergitilebilirliğe etken parametreler olarak arkı oluşturan farklı amper değerleri, tek çizgi ergitme için ilerleme hızları ve elektrot mesafeleri seçilmiştir. Yapılan ergitme

deneyleri sonrası katılaşma görünimleri elde edilerek parametrelerin etkisi raporlanmıştır. Ayrıca ergitme yönüne dik kesitlerde alınan mikroyapı görünümünden tabla nüfuziyeti ve ergiyik yüksekliği araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Deney numunelerinin üretiminde kullanılan düzenek ve ekipmanların gösterimi Şekil 1 a)'da yer almaktadır. Yapılacak deneylerde kullanılacak güç kaynağı akım büyüklükleri 17,22 ve 27 amper olarak seçilmiştir. Belirlenen her bir amper değerinde 1 ve 2 mm/s ilerleme hızları için ayrı ayrı 0,7 ve 1 mm elektrot mesafelerinde ergitmeler yapılmıştır. Yapılan ergitme işleminde arkı oluşturan torcun uç kısmındaki lensli dağıtıcıdan 5 Lt/dak debide yüksek saflıktaki argon gazı ile koruyucu atmosfer oluşturulmuştur. Ergitmeler 10 x 30 mm boyutlarında 2 mm kalınlığındaki 316L paslanmaz çelik sac altlıklar üzerinde yapılmıştır. Altlıklar toz yatak serimi sırasında konumlarının bozulmaması adına yine 2 mm derinliğinde ve 31 x 31mm boyutlarına sahip kare taban yüzeyli boşluklara üçer adet yerleştirilmiştir. Altlıkların tutucu tablaya yerleştirilmesi sonrası tabla üzerine getirilen sericinin toz haznesi tarafından gönderilen ışık ergitme tarafında ilk görünmez olduğu andaki tutucu tabla seviyesi üretim ekseninde sıfır konumda kabul edilmiştir. Sonrasında serici en başa yönlendirilmiş ve yükseltilecek toz haznesinden aldığı ilk katman tozu sıfır konumdaki tabla üzerinde taşıyarak altlık yerleşimindeki boşluklar toz ile doldurularak sıfırlama işlemi tamamlanmıştır. Tutucu tablaya yerleştirilen altlıkların toz yatak serme işlemi sonrası sıfırlanmış görünümü Şekil 1 b)'de gösterilmiştir. Sıfırlama işlemi sonrası serilen toz tabakasının görünümü ise Şekil 1 c)'de yer almaktadır.

Yapılan ergitmeler sonrası katılaşma ve ara kesitlerden mikro görünüm elde edilmiştir. Elde edilen katılaşma görünümünden ısı etkilenen bölge ve çizgisel katılaşma kalınlıklarına ulaşılmıştır. Yapılan çalışmada katılaşma görünümüne ek olarak, üzerinde ergitme yapılan altlıklar orta bölgesinden hassas kesilmiştir. Hassas kesme sırasında kullanılan elmas kaplamalı disk dakikada 200 devir ile bir kısmı su içerisinde kalacak şekilde doldurulmuştur. Bu sayede hem disk hem numune kesim sırasında ısınmamıştır. Mikroyapı görünimleri için hassas kesim ile

elde edilen ergitme kesitleri zımpara ve keçe yardımıyla parlatılarak ergime nüfuziyetinin belirlenmesi için dağlanmıştır. Dağlama sıvısı olarak Viella solüsyonu, (5 ml HCl, 1 g pikrik asit ve 100 ml 95% ethanol) kullanılmıştır.

3. DENEYSEL BULGULAR

Yapılan çalışmada katılaşma geometrilerine dair incelemelerin araştırılması iki ana başlıkta yapılmıştır. Bu başlıklar katılaşma ve ara kesitlerin mikroyapısal görünümünün incelenmesi olup elde edilen bulgular aşağıdadır.

3.1. Katılaşma Görünümlerinin İncelenmesi

Ark ile farklı parametrelerde toz yataкта gerçekleştirilen çizgisel ergitme deneyleri sonucunda elde edilen katılaşma görünümü, Şekil 2'de sunulmuştur. İncelemelerde, katılaşma bölgesinin hem ısı etkilenmiş bölge dış sınırında hem de merkezinde bütünleşik olmayan ergiyik toplaşmalarının mevcut olduğu gözlenmiştir. Bu durum, enerji yoğunluğunun yeterli olmadığı ya da süreklilik arz etmediği koşullarda ergiyik katılaşmalarının düzensiz topaklanmalar halinde oluştuğunu göstermektedir [23]. Enerji yoğunluğunun yeterli ve sürekli olduğu koşullarda ise daha düzenli bir çizgisel katılaşma gözlenmiştir. Akım şiddeti arttıkça ve özellikle düşük ilerleme hızlarında ark temas süresinin uzaması, ısı girdisini artırarak katılaşma genişliğini önemli ölçüde artırmıştır [5]. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalara paralel olarak, ark ile ergitme süreçlerinde enerji girdisinin ergime havuzu stabilitesi ve katılaşma formu üzerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Örneğin, TIG kaynağında enerji yoğunluğu ve ilerleme hızı gibi parametrelerin ergime havuzu geometrisini doğrudan etkilediği ve yetersiz enerji girdisinin düzensiz katılaşma veya mikro gözeneklere yol açabileceği çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir [8,24].

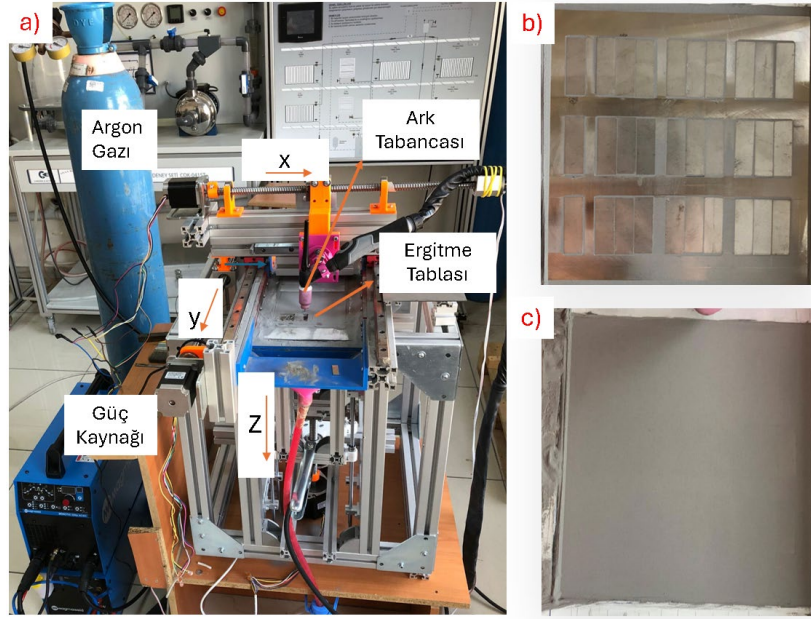
Katılaşma davranışının genel değişimine ait görünüm Şekil 2'de verilmiş olup, elde edilen ısı etkilenen bölge ve çizgisel katılaşma genişlikleri sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de sunulmuştur. Isı etkilenen bölge genişlikleri için yapılan incelemelerde, elektrot mesafesinin 0,7 mm'den 1 mm'ye çıkarılması durumunda ısı etkilenen bölge genişliğinde azalma eğilimi gözlenmiştir. Ancak, bu durum akım ve ilerleme hızına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Düşük ilerleme hızında (1

mm/s) ve yüksek akım değerlerinde (örneğin, 27 amper) veya yüksek ilerleme hızında (2 mm/s) ve düşük akımda (örneğin, 17 amper), ısı etkilenen bölge genişliğinde artış kaydedilmiştir. Orta ve yüksek akım değerlerinde ise ısı etkilenen bölge genişliği genellikle azalmıştır. Elde edilen sonuçlar elektrot mesafesinin artışıyla birlikte enerji yoğunluğunun dağılım şeklinin değişmesi ve ergime bölgesine aktarılan ısı enerjisinin farklılaşmasıyla açıklanabilmektedir [25].

Varyasyon katsayısı (CV), ölçümlerin ortalamaya göre ne kadar değişkenlik gösterdiğini belirler. CV %10'un altında olduğunda düşük, %10-20 arasında orta, %20'nin üzerinde ise yüksek ve %40'ın çok yüksek [26] değişkenlik olarak kabul edilir. Isı etkilenen bölge değişikliğinin belirlenmesinde çizgisel ergitme görünümlerinden en az 15

ölçüm alınmıştır Genel olarak Çizelge 1'de yer alan varyasyon katsayıları incelendiğinde %10'un altında olduğu ve ısı etkilenen bölge genişliklerinin düzenli bir kalınlığa sahiptir. Isı etkilenen bölge genişliklerinde en büyük varyasyon katsayısına sahip değerler incelendiğinde ark çanı sınırında oluşan ikincil ergime ve sinterleme karışımlarının çizgiselliği bozduğu tespit edilmiştir.

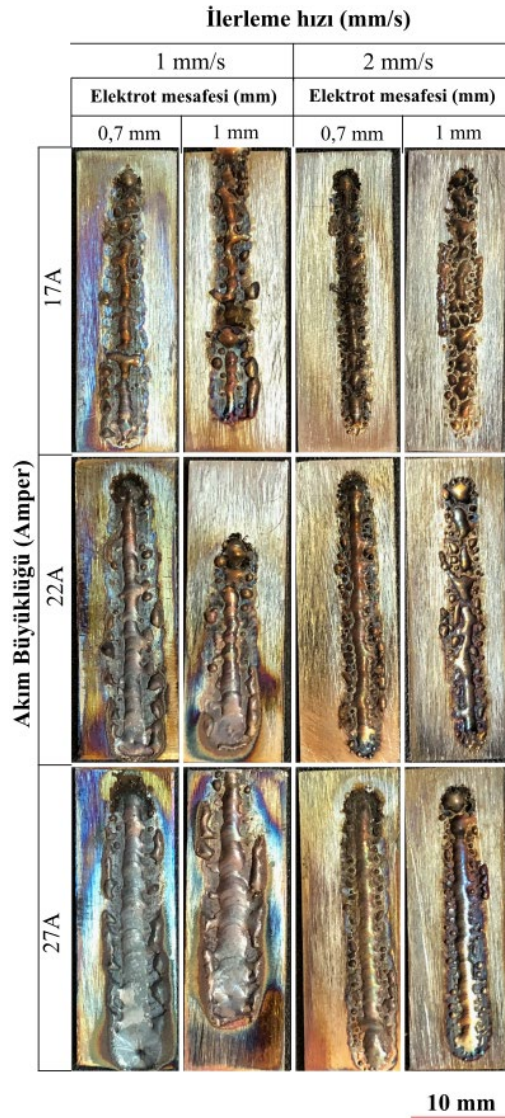
Çizelge 2'de verilen çizgisel katılma genişlikleri incelendiğinde, ilerleme hızı 1 mm/s ve akım 17 amper olduğunda 0,7 mm ve 1 mm elektrot mesafeleri için çizgisel katılma gözlenmemiştir. Aynı hız ve akım değerleri için çizgisel katılma genişliklerinde elektrot mesafesindeki artışın etkisi incelendiğinde, 22 amper için azalma (1,89 mm'den 1,58 mm'ye) ve 27 amper için artış (2,28 mm'den 2,44 mm'ye) görülmüştür.



Şekil 1. Ergitmeler yapılırken kullanılan; a) Deney düzeneği, b) Sıfırlama işlemi sonrası altlıkların tutucu tablaya yerleşimi ve c) Toz serimi sonrası oluşan görünüm

İlerleme hızı 2 mm/s olduğunda, düşük akımda (17 amper) yine çizgisel katılma gözlenmezken, 22 amper için 0,7 mm elektrot mesafesinde 1,29 mm sürekli çizgisel katılma elde edilmiş olup 1 mm elektrot mesafesi için sürekli çizgisel katılma elde edilememiştir. 27 amper için elektrot mesafesindeki artış ile çizgisel genişlikte azalma (1,63 mm'den 1,38 mm'ye) meydana gelmiştir. Genel olarak, elektrot mesafesi 0,7 mm'den 1 mm'ye çıktığında çizgisel katılmanın, akım ve

ilerleme hızına bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Düşük akım seviyelerinde çizgisel katılma oluşmazken, elektrot mesafesindeki artışla birlikte orta ve yüksek akımlarda aynı ilerleme hızlarında genellikle çizgisel katılma genişliğinde azalma eğilimi görülmüştür. Bu durum, elektrot mesafesi, akım ve ilerleme hızının birlikte kaynak sırasında enerji yoğunluğunu ve malzemenin katılma davranışını doğrudan etkilediğini göstermektedir [9,10].



Şekil 2. Farklı amper ve ilerleme hızları ile yapılan ergitmelere elektrot mesafesinin etkisi

Çizelge 1. Katılma görünümünden elde edilen ısı etkilenen bölge genişlikleri

İlerleme Hızı (mm/s)	1 mm/s						2 mm/s					
Elektrot Mesafesi (mm)	0,7 mm			1 mm			0,7 mm			1 mm		
Akım Şiddeti (Amper)	17A	22A	27A	17A	22A	27A	17A	22A	27A	17A	22A	27A
Ortalama (mm)	4,61	5,67	6,13	4,32	5,54	6,60	3,23	4,18	4,75	3,77	3,95	4,30
Standart sapma	0,40	0,64	0,64	0,67	0,64	0,43	0,21	0,37	0,41	0,68	0,33	0,42
Varyasyon katsayısı %	8,68	11,29	10,44	15,51	11,55	6,52	6,50	8,85	8,63	18,04	8,35	9,77

Çizgisel katılmanın olmadığı durumlar genellikle düşük akım seviyelerinde ve yüksek ilerleme hızlarında enerji yoğunluğunun çizgisel katılma oluşturacak kadar yüksek olmadığını işaret etmektedir [17,19]. Buna karşılık, orta ve yüksek akımlarda enerji yoğunluğu yeterli olduğunda çizgisel katılma oluşmakta, ancak elektrot mesafesinin artışı ile katılma genişliğinde azalma görülmektedir [20]. Yüksek akım ve düşük ilerleme hızında

görülen artış eğilimi ise, daha uzun süreli bir enerji aktarımı ile ergime bölgesindeki termal birikimin artmasından kaynaklanmaktadır [19,20]. Literatürde, özellikle ark ile ergitme yöntemlerinde enerji yoğunluğu ve ilerleme hızının kaynak havuzu boyutları ve katılma davranışı üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiş ve benzer sonuçlar rapor edilmiştir [27–29].

Çizelge 2’de yer alan varyasyon katsayıları incelendiğinde, ilerleme hızının 1mm/s olduğu durumlarda genel olarak %20 ve üstü değerler görülürken ilerleme hızı 2 mm/s olduğunda değerler %15 ve altında elde edilmiştir. Elde

edilen bu sonuç ilerleme hızındaki artışın sürekli çizgisel katılaşmada genişlik dalgalanmalarını azalmaya sebep olduğunu göstermiştir.

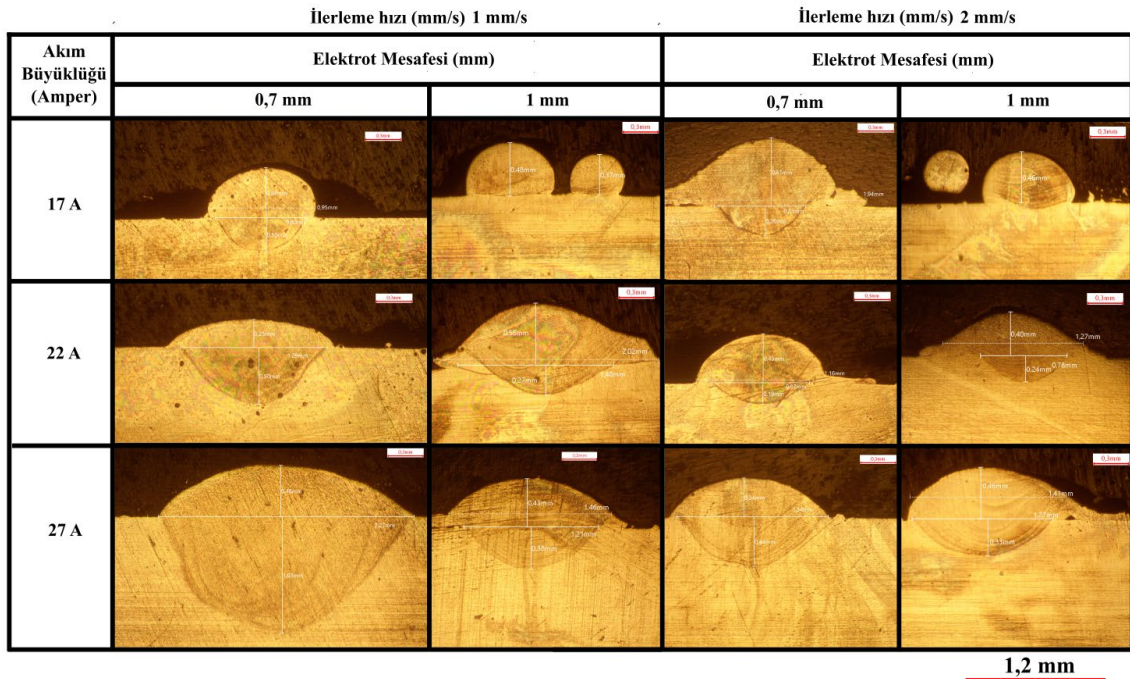
Çizelge 2. Katılaşma görünümünden elde edilen çizgisel katılaşma genişlikleri (SÇKY: Sürekli Çizgisel Katılaşma Yok)

İlerleme Hızı (mm/s)	1 mm/s						2 mm/s					
Elektrot Mesafesi (mm)	0,7 mm			1 mm			0,7 mm			1 mm		
Akım Şiddeti (Amper)	17 A	22A	27A	17A	22A	27A	17A	22A	27A	17A	22A	27A
Ortalama (mm)	S	1,89	2,28	SÇK Y	1,58	2,44	SÇK Y	1,29	1,63	SÇK Y	SÇK Y	1,38
Standart sapma	Ç	0,59	0,41		0,36	0,69		0,20	0,25			0,19
Varyasyon katsayısı %	K Y	31,22	17,98		22,78	28,28		15,50	15,34			13,77

3.2. Mikroyapı Geometrilerinin İncelenmesi

Yapılan ergitmeler sonrası tabla ve toz yatak katılaşmalarının durumunu gösteren mikro yapı görüntüleri Şekil 3’te yer almaktadır. Elde edilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, ergitme tablası içerisinde ve üzerinde ergiyip katılaşan kısımlara ek olarak ergime alanına komşu sinterlenmiş toz bölgeleri tespit edilmiştir. Tespit edilen sinterlenmiş toz bölgelerinin oluşumunda enerji yoğunluğunun en etkin parametre olmasının yanı sıra malzeme özellikleri ve termal iletkenlik gibi faktörlerin etkin olduğu belirtilmiştir [5]. 17 amper ve 1

mm elektrot mesafesi ile yapılan deneylerde gözlemlenen yetersiz ergime ve nüfuziyet eksikliği, literatürde toplama etkisiyle ilişkilendirilmiştir [30]. Ancak, toplama yalnızca düşük enerji yoğunluğuna bağlı olmayıp, ısı kaynağının hızı ve toz yatağın homojenliği ile de ilişkilidir [31]. Mikroyapı görüntülerinde gözlemlenen toplaşmanın yüzeyel ergime bölgelerinden alt tablaya yetersiz tutunması, ergime havuzunun tablaya nüfuziyet edebilirliği hakkında ergitme parametrelerinin kritik rolünü vurgulamaktadır [23].



Şekil 3. Farklı amper ve ilerleme hızları ile yapılan ergitmelere elektrot mesafesinin etkisi

Mikroyapı görünümünden elde edilen tabla nüfuziyet kalınlığı, tabla nüfuziyet genişliği, toz yatakta ergime sonucu oluşan katılma genişliği ve katılma yüksekliğine ait ölçümler için tanımlanan boyutların gösterimi Şekil 4'te

yer almaktadır. Şekil 4'te tanımlanan boyutlar her bir mikroyapı için baz alınarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümler Şekil 5'te grafikler halinde gösterilmiştir.



Şekil 4. Ergime bölgesine ait ölçümü yapılan geometrilerin gösterimi

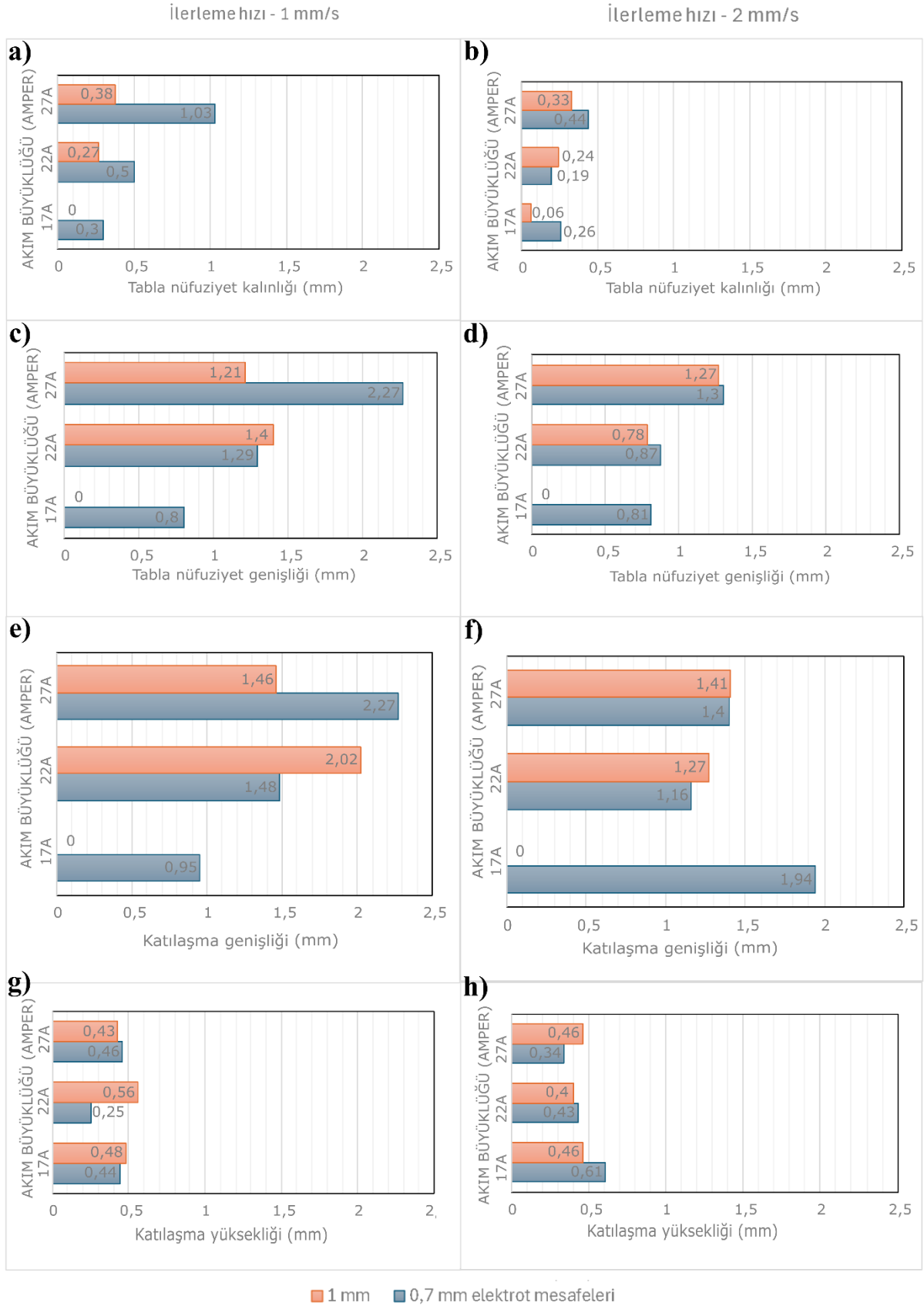
Farklı elektrot mesafesi (0,7 mm ve 1 mm) ve ilerleme hızlarının tabla nüfuziyet kalınlığı üzerindeki etkisi Şekil 5 a) ve b)'de gösterilmiştir. Elektrot mesafesi ve ilerleme hızına bağlı olarak nüfuziyet kalınlığının değiştiği gözlemlenmiş olup 0,7 mm elektrot mesafesi ile daha yüksek nüfuziyet kalınlığı değerleri elde edilmiş olup daha kısa elektrot mesafesi daha yüksek nüfuziyet değerleri sağlamıştır, ancak ilerleme hızındaki artışın bu etkiyi dengelendiği görülmüştür [32]. İlerleme hızının artışı, nüfuziyet kalınlığını azaltıcı bir etki yaratmıştır, bu da düşük hızlarda malzemeye daha fazla ısının aktarılmasının enerji yoğunluğunu ve dolayısıyla ergimeyi artırdığını göstermektedir [27–29].

Şekil 5 c) ve d)'de elektrot mesafesi ve ilerleme hızının tabla nüfuziyet genişliği üzerindeki etkileri verilmiştir. 0,7 mm elektrot mesafesi ve 1 mm/s ilerleme hızıyla yapılan ölçümlerde, akımın artışıyla nüfuziyet genişliğinin tutarlı bir şekilde arttığı (0,8 mm'den 2,27 mm'ye) gözlemlenmiştir. Elektrot mesafesi 1 mm'ye çıkarıldığında, düşük akımlarda ergime oluşmamıştır. Akım artışı nüfuziyet genişliğinde 1 mm/s için artış 2 mm/s için azalma şeklinde görülmüştür. Bu durumlar, elektrot mesafesindeki artışın enerji yoğunluğunu azaltarak özellikle düşük akımlarda ergimeyi engellediğini, ergime

genişliğini azalttığını ve düzensiz ergimeye sebep olduğunu göstermektedir [25,27,32].

Şekil 5 e) ve f)'de ise katılma genişliğine dair ölçümler verilmiştir. 0,7 mm elektrot mesafesi ile yapılan ölçümlerde, akımın artışıyla katılma genişliği belirgin bir şekilde artmıştır (örneğin, 1 mm/s hızda 0,95 mm'den 2,27 mm'ye). Buna karşın, 1 mm elektrot mesafesi kullanıldığında, düşük akımlarda (17 amper) ergime gözlenmezken, 1 mm/s ilerleme hızı için tabla nüfuziyet genişliğine benzer şekilde genişlik azalmıştır. İlerleme hızı 2 mm/s'ye çıkarıldığında, akım değişimlerinin etkisinin daha dengeli olduğu ve genişlik değerlerinde daha az dalgalanma gözlemlenmiştir.

Şekil 5 g) ve h)'de elde edilen tek çizgi ergitmelerin katılma yükseklikleri verilmiştir. 2 mm/s ilerleme hızında 0,7 mm elektrot mesafesinde 17A, 22A ve 27A akım büyüklüklerinde katılma yükseklikleri 0,61 mm, 0,43 mm ve 0,34 mm olarak ölçülmüştür. Aynı ilerleme hızında elektrot mesafesi 1 mm'ye çıkarıldığında katılma yüksekliklerinde 17A ve 22A için azalma ve 27 A için artış gözlemlenmiştir. İlerleme hızının 1 mm/s olduğu durumda 17 amperden 27 ampere akım artışında katılma yüksekliğinde önce akım şiddetiyle artış sonra ise azalma gözlemlenmiştir. Aynı ilerleme hızında 0,7 mm



Şekil 5. Farklı amper, ilerleme hızı ve elektrot mesafesi ile yapılan ergitmeler için mikroyapı unsurlarına ait ölçüm sonuçları (a), c), d) ve g) için ilerleme hızı 1mm/s olup b), d), f) ve h) için ilerleme hızı 2 mm/s'dir.)

elektrot mesafesinde ise katılma yüksekliği önce azalmış sonra artmıştır. Yapılan katman kalınlığı katılma yüksekliği karşılaştırmasında özellikle Şekil 5 g)'de kırmızı ok ile gösterilmiş ergitme parametresi yapılacak üst üste katman ergitmelerinde katman kalınlığının toz yatak kalınlığının artarak yaklaşık 0,65 mm'ye çıkması sebebiyle ergitme için enerji yoğunluğu yetersiz kalacaktır. Ergitme için oluşan yetersiz enerji yoğunluğu ise toplama ve düşük alt katman nüfuziyeti sonuçlarına sebep olacaktır [5]. Tam tersi durum özellikle Şekil 5 h)'de mavi ok ile gösterilen ergitme parametreleri için geçerli olup artan katılma yüksekliği yeni katmanın kalınlığını azaltacağından enerji yoğunluğunun fazla olması sebebiyle kontrolsüz katılmalara sebep olacaktır [5].

Bu sonuçlar, elektrot mesafesi ve ilerleme hızının enerji yoğunluğu, ergime kalitesi ve katılma davranışı üzerindeki kritik rollerini vurgulamaktadır. Daha kısa elektrot mesafesi ve düşük ilerleme hızının genellikle daha iyi ergime sonuçları sağladığı, ancak yüksek hız ve mesafe koşullarının bu etkiyi sınırlayabileceği görülmüştür [32–34]

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 316L paslanmaz çelik alaşımından oluşturulan toz yatakta ark ile tek çizgi ergitilebilirlik incelenmiş ve ergitme parametrelerinin (elektrot mesafesi, akım ve ilerleme hızı) katılma davranışları ve mikroyapı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, işlem parametrelerinin ergitme performansı ve malzemenin katılma geometrisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Elektrot mesafesi arttıkça (0,7 mm'den 1 mm'ye) çizgisel katılma genişlikleri ve ısı etkilenmiş bölge genişliklerinde azalma gözlenmiştir, ancak bu azalma eğiliminin akım ve ilerleme hızına bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Düşük akım ve yüksek ilerleme hızlarında çizgisel katılma gözlenmezken, yüksek akım değerlerinde ve düşük ilerleme hızlarında daha geniş katılma bölgeleri elde edilmiştir. Elektrot mesafesinin artışıyla enerji yoğunluğunun dağılım şeklinin değişmesi, düşük akım seviyelerinde ergimeyi engellerken yüksek akım seviyelerinde katılma genişliğinde azalmaya neden olmuştur.

Mikroyapı görünüşleri incelendiğinde, elektrot mesafesi ve ilerleme hızlarının tabla nüfuziyet kalınlığı ve genişliği üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Daha kısa elektrot mesafesi (0,7 mm) ve düşük ilerleme hızında (1 mm/s), daha yüksek nüfuziyet değerleri elde edilirken, yüksek ilerleme hızlarında ve büyük elektrot mesafelerinde enerji yoğunluğunun azalması sebebiyle ergime yetersiz kalmış ve sinterlenmiş toz bölgeleri ile yüzeysel topaklanmalar meydana gelmiştir. Akım arttıkça genellikle tabla nüfuziyet genişliği ve kalınlığı artış göstermiş, ancak bu artış, elektrot mesafesine ve ilerleme hızına bağlı olarak farklılık göstermiştir.

Genel değerlendirmede, düşük ilerleme hızında ve kısa elektrot mesafesinde enerji aktarımı daha verimli gerçekleşmiş ve daha homojen katılma geometrileri elde edilmiştir. Elektrot mesafesi düzenli ergime için en etkili parametre olarak görülse de elektrot mesafesi arttıkça enerji yoğunluğunun malzeme üzerinde homojen dağılımı bozulmuş ve bu durum düşük akımlarda ergimeyi sınırlandırırken yüksek akımlarda katılma genişliğinde azalmaya yol açabilmiştir. Bu sonuçlar, toz yatakta ark ile tek çizgi ergitilebilirlik için işlem parametrelerinin enerji yoğunluğu, ergime geometrisi ve katılma özellikleri üzerindeki etkilerinin optimize edilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymuş ve bu alanda yapılacak ileri araştırmalar için yol gösterici olmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kafkas Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2023-FM-40 nolu projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Babaev A., Promakhov V., Schulz N., Semenov A., Bakhmat V., Vorozhtsov A., "Processes of Physical Treatment of Stainless Steels Obtained by Additive Manufacturing", *Metals*, Vol. 12, Issue 9, Pages 1-18, 2022.
2. Liu, B., Fang, G., Lei, L., Yan, X. "Predicting the porosity defects in selective laser melting (SLM) by molten pool geometry", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 228, Issue 1, Pages 1-14, 2022.
3. DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson-Heid, A., De, A., Zhang, W., "Additive manufacturing of metallic components – Process,

structure and properties", *Progress in Materials Science*, Vol. 92, Issue 1, Pages 112-224, 2018.

4. Nayak, S. K., Mishra, S. K., Paul, C. P., Jinoop, A. N., Bindra, K. S., "Effect of energy density on laser powder bed fusion built single tracks and thin wall structures with 100 μm preplaced powder layer thickness", *Optics & Laser Technology*, Vol. 125, Issue 1, Pages 112-224, 2018.

5. Yadroitsev, I., Smurov, I., "Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape", *Physics Procedia*, Vol. 5, Issue 1, Pages 551–560, 2010.

6. Di, W., Yongqiang, Y., Xubin, S., Yonghua, C., "Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 58, Issue 1, Pages 1189–1199, 2012.

7. Cary, H. B., and Helzer, S. C., "Modern Welding Technology", Pages 271-292, Pearson/Prentice Hall, New Jersey, 2005.

8. Kutelu, B. J., Seidu, S. O., Eghabor, G. I., Ibitoye, A. I., "Review of GTAW welding parameters", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 6, Issue 1, Pages 541-554, 2018.

9. Singh, R. P., Agrawal, M. K., "Effect of welding current on the dimensions of bead in tungsten inert gas welding process", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, Issue 2, Pages 3235-3239, 2021.

10. Singh, L., Singh, D., Singh, P. "A Review: Parametric effect on mechanical properties and weld bead geometry of Aluminium alloy in GTAW", *IOSR-JMCE*, Vol 6, Issue 1, Pages 24-30, 2013.

11. Stenbacka, N., Choquet, I., Hurtig, K., "Review of arc efficiency values for gas tungsten arc welding", *IIW Commission IV-XII-SG212 Intermediate Meeting*, Pages 18-20, Berlin, 2012.

12. Mills, K.C., Keene, B.J., "Factors affecting variable weld penetration", *International Materials Reviews*, Vol. 35, Issue 1, Pages 185–216, 1990.

13. Shaoyong, C., Shixin, X., Jimei, W., & Xing, L., "Influence of gap distance on the arc modes transition of cup type AMF electrode", *International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Pages 384-387, Matsue, 2016.

14. Schleifenbaum, H., Diatlov, A., Hinke, C., Bültmann, J., Voswinkel, H., "Direct photonic production: Towards high speed additive

manufacturing of individualized goods", *Production Engineering*, Vol. 5, Issue 1, Pages 359-371, 2011.

15. Ma, M., Wang, Z., Gao, M., Zeng, X., "Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 215, Issue 1, Pages 142-150, 2015.

16. Shi, X., Ma, S., Liu, C., Chen, C., Wu, Q., Chen, X., Lu, J., "Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V", *Materials*, Vol. 9, Issue 12, Pages 1-15, 2016.

17. Wang, S., Liu, Y., Shi, W., Qi, B., Yang, J., Zhang, F., Han, D., Ma, Y., "Research on high layer thickness fabricated of 316L by selective laser melting", *Materials*, Vol. 10, Issue 9, Pages 1-15, 2017.

18. Shi, W., Liu, Y., Shi, X., Hou, Y., Wang, P., Song, G., "Beam diameter dependence of performance in thick-layer and high-power selective laser melting of Ti-6Al-4V", *Materials*, Vol. 11, Issue 7, Pages 1-17, 2018.

19. Shi, W., Wang, P., Liu, Y., Hou, Y., Han, G., "Properties of 316L formed by a 400 W power laser Selective Laser Melting with 250 μm layer thickness", *Powder Technology*, Vol. 360, Issue 1, Pages 151-164, 2020.

20. Shi, X., Yan, C., Feng, W., Zhang, Y., Leng, Z., "Effect of high layer thickness on surface quality and defect behavior of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting", *Optics & Laser Technology*, Vol. 132, Issue 1, Pages 1-11, 2020.

21. Brudler, S., Medvedev, A. E., Pandelidi, C., Piegert, S., Illston, T., Qian, M., Brandt, M., "Systematic investigation of performance and productivity in laser powder bed fusion of Ti6Al4V up to 300 μm layer thickness", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 330, Issue 1, Pages 1-18, 2024.

22. Aboulkhair, N. T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I., & Everitt, N. M., "On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 230, Issue 1, Pages 88-98, 2016.

23. Yadroitsev, I., Krakhmalev, P., Yadroitsava, I., Johansson, S., Smurov, I., "Energy input effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, Issue 4, Pages 606-613, 2013.

24. Singh, A. K., Dey, V., Rai, R. N., "Techniques to improve weld penetration in TIG welding (A review)", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, Issue 2, Pages 1252-1259, 2017.
25. Anık S., Tülbentçi, K., Kaluç, E., "Örtülü Elektrot İle Elektrik Ark Kaynağı", Sayfa 16-83, Gedik Holding A.Ş., İstanbul, , 1991.
26. Abubakar, M.L., Ahmed, M.S., Abdussalam, A.F., Mohammed, S. "Meteorological drought and long-term trends and spatial variability of rainfall in the Niger River Basin", *Nigeria. Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 32, Pages 5302–5319, 2025.
27. Samiuddin, M., Li, J. L., Taimoor, M., Siddiqui, M. N., Siddiqui, S. U., Xiong, J. T., "Investigation on the process parameters of TIG-welded aluminum alloy through mechanical and microstructural characterization", *Defence Technology*, Vol. 17, Issue 4, Pages 1234-1248, 2021.
28. Tseng, K. H., Chuang, K. J., "Application of iron-based powders in tungsten inert gas welding for 17Cr–10Ni–2Mo alloys", *Powder technology*, Vol. 228, Issue 1, Pages 36-46, 2012.
29. Singh, S.R., Khanna, P., "A-TIG (activated flux tungsten inert gas) welding: – A review", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 44, Issue 1, Pages 808–820, 2021.
30. Tang, C., Tan, J. L., Wong, C. H., "A numerical investigation on the physical mechanisms of single track defects in selective laser melting", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, Issue 1, Pages 957-968, 2018.
31. Gu, H., Wei, C., Li, L., Han, Q., Setchi, R., Ryan, M., & Li, Q., "Multi-physics modelling of molten pool development and track formation in multi-track, multi-layer and multi-material selective laser melting", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 151, Issue 1, Pages 1-16, 2020.
32. İpek, İ., "Nikel ve monel malzemelerin kaynağı", Yüksek Lisans Tezi, [Welding of nickel and monel materials], [Thesis in Turkish], Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2007.
33. Kou, S., "Welding metallurgy", John Wiley and Sons Inc., Hoboken N.J., 2003.
34. Coniglio, N., Cross, C. E., "Effect of weld travel speed on solidification cracking behavior. Part 2: testing conditions and metrics", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 107, Issue 1, Pages 5025-5038, 2020.