

# Parametric Study for Additive Manufacturing of Structural Steel by TIG Welding Method

Yusuf Ayan\*, Nizamettin Kahraman\*

\*Karabuk University, Turkey

yusufayan@karabuk.edu.tr

nkahraman@karabuk.edu.tr

**Abstract**— Additive manufacturing process with welding technology; because it is innovative, environmentally friendly, economical and has many superior features, the interest in the development of this technology has been increasing. Scraped materials in production using this method are less than traditional production methods. Thus, this reduction minimizes energy consumption and harmful effects on the environment. In addition, the method allows the production of materials with superior properties in the desired geometry and the production of larger parts at low cost. This work was carried out to determine the pre-welding parameters for the additive manufacturing process. The TIG method is used as the welding method and ER70S-6 mild steel wire is used for the feed wire. Welding current, wire feed rate and welding speed were determined as variable parameters in the study. As a result of the study, the effects of parameter variation on the geometry of the weld beads were examined. The weld beads were produced in a single layer and the width, height and penetration depth of the beads were calculated. As a result of the study, it was concluded that the selection of welding parameters is highly effective on the surface profiles obtained with the weld bead geometries.

**Keywords**— TIG welding, additive manufacturing, weld bead, 3D printer, weld parameters.

## I. GİRİŞ

Eklemeli imalat günümüzde plastik, seramik ve metal gibi birçok farklı malzeme türü için üretim yöntemine konu olmuştur [1]. Mühendislik amaçları için çoğunlukla metalik malzeme gerektiğinden yeni çalışmalar metal Eİ yöntemini oluşturmaktadır [2]. Metal yapıların eklemeli imalat yöntemiyle üretiminde birçok teknik geliştirilmiştir. Bunlar; seçici lazer sinterleme, direk metal biriktirme, elektron ışını ile ergitme, şekil biriktirme ile üretim ve tel ark eklemeli imalattır [3]. Tel ark Eİ yöntemi tel besleme kombinasyonu ile ark kaynak işleminin kullanıldığı bir tekniğe dayalıdır [4]. Metal biriktirme işlemi, gaz altı metal ark kaynağı, gaz tungsten ark kaynağı veya plazma ark kaynağı torçları tarafından sağlanır [5].

Tungsten ark kaynak yöntemi (TIG) kararlı olması, düşük maliyetli ve yüksek kaliteli olması sebebiyle endüstriyel uygulamalarda önemli bir yöntem durumundadır [6]. TIG kaynak işlemi geniş aralıkta demir, demir dışı alaşımları ve her ikisinin kombinasyonuna uygulandığında yüksek ark kararlılığı gösterir. MIG-MAG kaynak yöntemiyle kıyaslandığında TIG yönteminde göz ardı edilebilir sıçrama görülür. Ayrıca yöntem istenilen kimyasal bileşim ile birlikte tutarlı malzeme birikimi sağlayarak sakin ergiyik havuzu üretme kabiliyetine sahiptir [7].

TIG kaynağı paslanmaz çelik, alüminyum, magnezyum, bakır ve diğer demir dışı metaller gibi kaynak işlemi zor olan metallerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Kaynak yöntemiyle Eİ imalat işlemlerinde kaynak dikişinin boyutsal durumu ve düzgünlüğü Eİ ürünleri için önemlidir. Kaynak dikiş geometrisi kaynaklı birleştirmelerin çalışmaya elverişliliği konusunda önemli rol oynamaktadır. Her bir kaynak dikişinin geometrik özellikleri ve kaynak işlemi parametreleri arasındaki ilişki kaynak genişliği, dikiş yüksekliği ve nüfuziyet derinliği gibi kendine özgüdür [9]. Ark kaynak yöntemlerinde kullanılan koruyucu gaz ve içeriği de kaynak dikiş profilini etkilemektedir [10].

TIG kaynağının uygulamasına yönelik şimdiye kadar pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda genel olarak seçilen bir malzemenin veya malzemelerin kaynak edilebilirliği incelenmiş ve/veya yöntemle edinilmiş kaynaklı bağlantının mekanik-metalurjik özellikleri araştırılmıştır. TIG yöntemi kullanılarak yapılan Eİ işlemleri de mevcuttur [11, 12]. Kaynak dikiş formunu inceleyen ve kaynak dikişini kalitesini artırmaya yönelik yapılan çalışmalarda bulunmaktadır. Örneğin; Silwal vd. ER70S-6 malzeme ile ürettikleri TIG kaynak dikişinde, sıcak tel besleme ve soğuk tel beslemenin kaynak dikişine olan etkilerini tele titreşim uygulayarak ve uygulamadan 4 farklı grupta araştırmışlardır. Çalışmaların sonucunda titreşim uygulanan sıcak ve soğuk tel beslemede dikiş formunda farklılara rastlarken titreşim uygulanmadan üretilen diğer dikişlerde kayda değer değişim görmemişlerdir [13]. Bir başka çalışmada Chen vd. Ti6Al4V malzemesine ultrasonik pulse destekli TIG kaynağı uygulamışlar ve uygun frekanslarda kaynak dikiş ve kaynak nüfuziyetinde artış görmüşlerdir. Son zamanlarda activated TIG (A-TIG) olarak adlandırılan ve kaynak edilecek birleşme yüzeyine yapıştırılan bir flux ile dikiş nüfuziyeti artırmaya yönelik çalışmalarında gerçekleştirildiği görülmüştür [14].

Günümüzde TIG kaynağı genellikle manuel olarak uygulanmaktadır. Ancak teknolojinin ilerlemesi, sanayide artan talepler ve Eİ işlemleri için TIG kaynağının otomatik tel beslemeli olarak uygulanmasını gerektirmiştir. Bu çalışmada otomatik tel beslemeli TIG kaynak yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle yumuşak çelik malzeme içeriğine sahip ER70S-6 kaynak teli ile kaynak dikiş üretilmiştir. Yumuşak çelik genel amaçlı yapı çeliği olmakla beraber bu çelik birkaç mm kalınlığından cm kalınlığı aralığına kadar plaka, boru ve diğer değişik formlarda kullanılabilir [15]. ER70S-6 telinin yaygın bir şekilde kullanımı sebebiyle çalışma bu malzemenin TIG kaynağı işlemine odaklanmıştır. Çalışmada birçok farklı

kaynak parametresi uygulanarak çok sayıda üretilen TIG kaynak dikişlerinin boyutsal değişimi incelenmiştir. Ayrıca dikişler birbirleriyle kıyaslanarak uygun parametrelerin nasıl olabileceği konusu tartışılmıştır.

## II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kaynak çalışmaları INV DC P-TIG 320 A marka ve model numaralı TIG kaynak makinesiyle yapılmıştır. Dikiş biriktirmede ise sanayide birleştirme işlemlerinde yoğun bir şekilde kullanılan 1.2 mm çapında ER70S-6 kaynak teli tercih edilmiştir. Kaynak dikişleri, yaklaşık boyutları 10 mm x 140 mm x 350 mm olan 2 adet S235JR malzemeli plaka üzerine uygulanmıştır. Plaka kalınlığı kaynak sırasında meydana gelen ısı etkilerinden en az etkilenecek ve dikiş kesitlerinin rahat bir şekilde gözlemleyebilecek şekilde seçilmiştir. Plakaların yüzeyleri kaynak işlemi öncesinde zımparalanmış, alkol ve aseton kullanılarak yüzeyleri temizlenmiştir. TIG kaynak işlemlerinde 2.4 mm çapında Lanthan alaşımli açık mavi ile boyalı olan tungsten elektrod kullanılmıştır. Bu elektrod 30° uç açısında bilenmiştir. Kaynak işlemleri özel olarak geliştirilen ve üretilen 3B yazıcı kullanılarak yapılmıştır. Bu yazıcı 3 eksende kaynak torcunu hareket ettirebilmekte ve eşzamanlı bir şekilde tel besleme yapabilmektedir. Dolayısıyla TIG kaynak işlemleri otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak hızı ve tel besleme hızı bu yazıcı sayesinde bilgisayar destekli ayarlanabilmektedir. Çalışmalarda bütün kaynak dikişleri bu şekilde üretilmiştir.

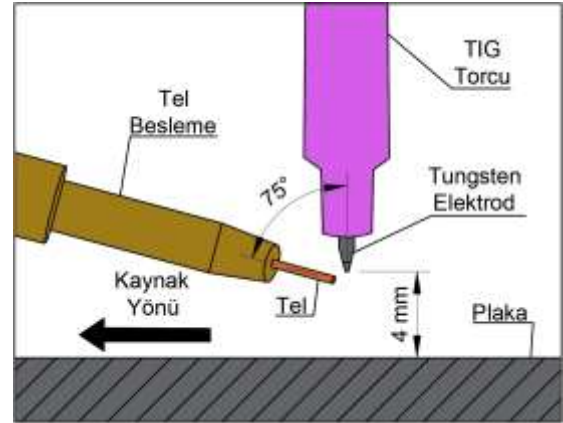
Tel besleme açısı 3B yazıcıya özel olarak üretilen aparat sayesinde hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir. Ark mesafesi de benzer şekilde her bir dikiş için yüksek oranda sabit tutulmuş hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Değişen parametrelerde 3 farklı kaynak akımı, 4 farklı kaynak hızı ve 3 farklı tel besleme hızı kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan kaynak parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Bütün bu parametrelere bağlı olarak toplamda her birinin uzunluğu 70 mm olan 36 farklı kaynak dikişi gerçekleştirilmiştir.

Kaynak dikişleri Şekilde gösterildiği gibi üretilmiştir. İlk olarak tel besleme hızı sabit tutulmuş 12'li dikişler halinde 3 grup olarak üretilmiştir. Her bir grup üretilirken tungsten uç bilenmiştir. Her bir dikiş üretildikten sonra 100 °C ye kadar soğuması beklenmiştir.

Kaynak dikiş üretimlerinden sonra dikişlerin boyutlarını ölçme aşamasına geçilmiştir. Ölçme işlemlerinden önce her bir kaynak dikişi enine kesilmiştir. Daha sonra kesit yüzeyleri kaynak nüfuziyetini görebilecek şekilde kaba olarak zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra numuneler %2 nital çözeltilisinde dağlanmıştır. Bu şekilde dikiş kesitlerinde kaynak nüfuziyet bölgeleri makro resim alabilecek şekilde görülebilmektedir. Bu görüntüler elde edildikten sonra her bir dikişin yüksekliği genişliği ve nüfuziyet derinliği ölçülmüştür. Ölçümler için kaynak dikişin boyutsal olarak daha uzun mesafelerde süreklilik gösterdiği bölgeleri dikkate alınmıştır. Dikiş boyutlarının ölçüm işlemlerinde öncelikle yükseklik için kaynakçı kumpası ve genişlik için ise standart kumpas kullanılmıştır. Bu ölçümler daha sonra esas ölçümlerin yapıldığı Nikon marka mikroskopla elde edilen resimlerle desteklenmiştir.

TABLO I  
KAYNAK PARAMETRELERİ

Numune No	Deneç Grubu	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Akımı (A)	Kaynak Hızı (m/dk)
1	1	0.75	160	0.05
2				0.075
3				0.1
4				0.125
5			180	0.05
6				0.075
7				0.1
8				0.125
9			200	0.05
10				0.075
11				0.1
12				0.125
13	2	1	160	0.05
14				0.075
15				0.1
16				0.125
17			180	0.05
18				0.075
19				0.1
20				0.125
21			200	0.05
22				0.075
23				0.1
24				0.125
25	3	1.25	160	0.05
26				0.075
27				0.1
28				0.125
29			180	0.05
30				0.075
31				0.1
32				0.125
33			200	0.05
34				0.075
35				0.1
36				0.125



Şekil 1 Kaynak işlemi uygulama şeması.

## III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Belirlenen kaynak parametrelerine göre üretilen kaynak dikişleri Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2 de alt kısımda bulunan ve tüm parametrik çalışmalar sonucunda yaklaşık 150 mm uzunluğundaki dikiş, 18 nolu numunenin parametreleri uygun bulunması sonucu örnek olması açısından üretilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde diğer dikiş uzunluklarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Uygulanan kaynak parametrelerine göre ise dikiş formlarında boyutsal farklıklar bulunmaktadır. Bununla birlikte üretilen dikişlerin bazılarının çevresinde sıçramalar görülmüştür. Bu durumun genellikle sadece TIG kaynağı uygulamasında rastlanılan ark sapmalarından [16], kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumda elektrod ucunda manyetik alan oluşmakta ve arkın

yön değiştirmesi-gezmesi sıçramaya yol açmaktadır. Bunun yanı sıra tel beslemeden gelen kaynak telinin kaynak bölgesindeki hareketlerindeki küçük değişimler ve besleme teli ucundaki damlacık çaplarının değişkenliği de sıçrantılara ve dikişte sapmalara neden olabilmektedir. Son olarak ergime sırasında kısa devre (kaynak esnasında tungsten elektrod ile iş parçası arasındaki iletkenliğin bozulması ile elektrod ve damlacık arasında meydana gelmesi) oluşumu da kaynak dikişi üzerinde küçük boyutsal değişimlere, ark sapmasına, dikişin doğrusalığının bozulmasına ve sıçrantılara neden olabilmektedir. Şekil 2'de 9 ve 33 nolu dikişlerde bu durumlar görülebilmektedir.



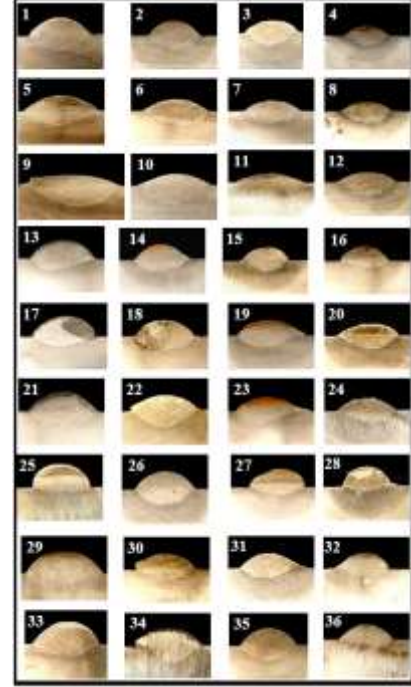
Şekil 2 Üretilen kaynak dikişleri.

Değişen dikiş formlarına göre elde edilen dikiş kesitlerinin resimleri Şekil 3 de gösterilmektedir. Şekil 3'e bakıldığında parametrelere göre kesit değişimleri açıkça görülmektedir. Her bir resim için soldan sağa doğru gidildiğinde kaynak hızı artmaktadır. Buna bağlı olarak kaynak yüksekliğindeki azalmalarda kesit değişimlerinden görülmektedir. Ancak yukarıda bahsedilen ark sapmalarından ötürü kesit değişimlerinde beklenen düzen sağlanamayıp; Örneğin Şekil 3'de 9 numarada gösterilene gibi kaynak dikişi bozulma sergilemiştir. Dikiş genişliklerinin ise kaynak akımı arttığında artması beklenmektedir. Bu durum örneğin 2, 6 ve 10 nolu dikişlerde belirgin bir şekilde görülmektedir. Nüfuziyet derinliği bakımından Şekil 3 incelendiğinde ise beklenen kesit değişimleri kısmen sağlanmıştır. Örneğin 1, 2, 3 ve 4 nolu dikişlerde kaynak hızı giderek arttığı için nüfuziyette azalması beklenen durum bu dikişler için görülebilmektedir. Ancak 25, 26, 27 ve 28 nolu dikişlerde bu durum bir düzen oluşturmamıştır. Bu durum uygulanan kaynak akımının 200 A kadar yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 4'de her bir üretilen kaynak dikişi için hesaplanan genişlik, Şekil 5 yükseklik ve Şekil 6 nüfuziyet derinliği sonuçlarını gösterilmektedir. Uygulanan kaynak parametreleri fazla sayıda olduğundan her bir parametrenin etkisinin anlaşılması için bu şekilde grafikler oluşturulmuştur.

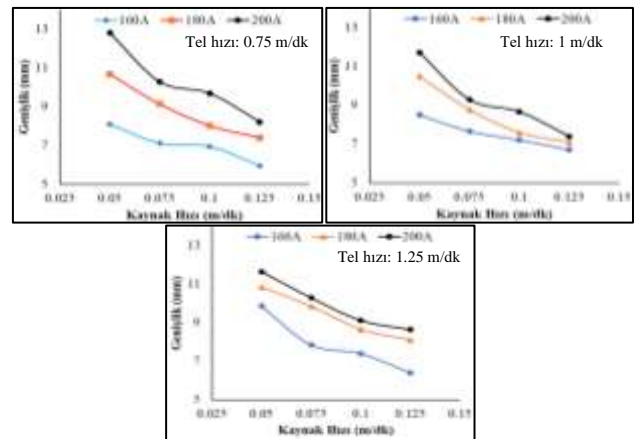
Şekil 4 incelendiğinde diğer parametreler sabit tutulduğunda kaynak hızının artmasıyla dikiş genişliklerinde azalma görülmektedir. Kaynak akımı açısından bakıldığında ise akım tükçe aynı kaynak hızı ve tel ilerleme hızında dikiş genişliği de

artmıştır. Kaynak akımı 0.75 m/dk tel ilerleme ve 0.05 m/dk kaynak hızında 160 A'dan 200 A'ya çıkınca dikiş genişliği yaklaşık %50 olarak artmıştır. Genişlik ise yine aynı tel hızında ve 200 A'da 0.05 m/dk hızından 0.125 m/dk hızına çıktığında neredeyse %50 olarak azalmıştır. Bu durum diğer numune gruplarında artış ve azalış yüzdesi olarak değişiklik gösterse de bir geneli yansıtmaktadır.

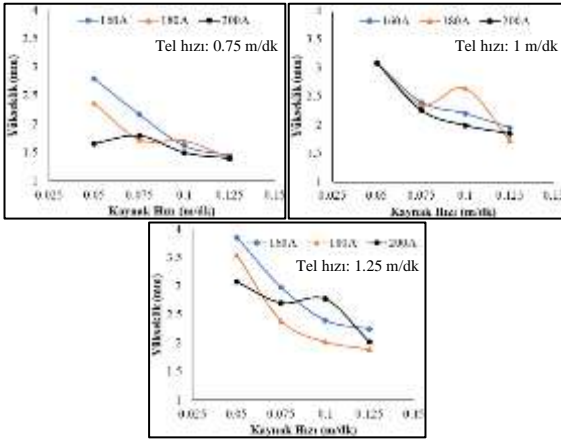


Şekil 3 Kaynak dikişi kesitleri.

Şekil 5'de kaynak yüksekliklerinin değişimine bakıldığında diğer parametreler sabit tutulduğunda kaynak hızı arttıkça dikiş yüksekliği azalmıştır. Dikiş yüksekliği genel olarak düşük akım değerlerinde daha yüksek ölçülmüştür. 160 A kaynak akımında üretilen kaynak dikişi yükseklikleri diğerlerine göre daha fazla bulunmuştur. Tel ilerleme hızının en yüksek olduğu numunede malzeme yığılma miktarı artacağı için dikiş yüksekliği daha fazla ölçülmüştür. Bir başka ifade ile tel ilerleme hızı arttıkça dikiş yükseklikleri de artmıştır.

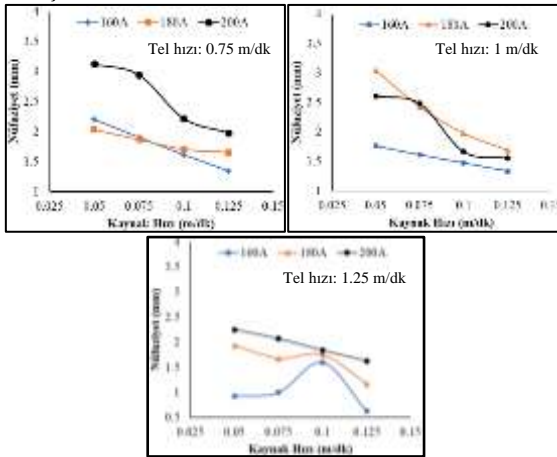


Şekil 4 Kaynak parametrelerine göre dikiş genişlikleri değişimi



Şekil 5 Kaynak parametrelerine göre dikiş yükseklikleri değişimi.

Kaynak hızının düşük ve kaynak akımının yüksek olması ısı girdisinin yüksek olduğunu göstermektedir [17]. Şekil 6 incelendiğinde kaynak akımı arttığında genel olarak dikiş nüfuziyet derinliklerinde artış görülmüştür. Kaynak ilerleme hızına göre ise derinliklerin artış azalış trendlerinde değişimler görülmektedir. Bu durum 1.25 m/dk tel hızı için verilen grafiğe bakılınca daha belirgin görülebilmektedir. Buradan iyi bir nüfuziyet sağlanabilmesi için kaynak hızının belirli değer aralığında tutulması gerektiği anlaşılmaktadır. Kaynak ilerleme hızı arttığında ise nüfuziyet derinliklerinde genel olarak azalma görülmüştür.



Şekil 6 Kaynak parametrelerine göre nüfuziyet derinlikleri değişimi.

#### IV. SONUÇ

- Geleneksel TIG kaynak makinası 3B yazıcıya tel besleme ünitesiyle birlikte uyarlanarak başarılı bir şekilde kaynak dikişleri üretilebilmiştir. Böylelikle çalışmada kullanılan sistem sayesinde kaynak hızı ve tel besleme hızı bilgisayar destekli kontrol edilmiştir.
- Kaynak parametrelerinin otomatik kontrolü sayesinde uygulan değişkenlerin kaynak dikişi boyutları üzerindeki etkileri kolaylıkla ölçülebilir hale getirilmiştir.
- TIG kaynağının manuel uygulamasında hissedilmeyen ark gezinmesi olayı, yöntemin otomatikleşmesi sayesinde görülebilmektedir.

- Uygulanan parametrelerden kaynaklı ısı girdisine bağlı olarak dikiş boyutlarında değişimler gözlemlenmiştir. Kaynak akımının artmasıyla genel olarak dikiş genişliğinin ve nüfuziyet derinliğinin arttığı buna karşın dikiş yüksekliğinin azaldığı görülmüştür. Kaynak hızının artması durumunda ise genel olarak dikiş genişliği, nüfuziyet derinliği ve dikiş yüksekliğinin azaldığı belirlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 219M111 ve Karabük Üniversitesi BAP koordinatörlüğü tarafından FDK-2019-2130 numaralı projeler ile desteklenmiştir. Yazarlar ilgili kurumlara teşekkür ederler.

#### KAYNAKLAR

- [1] F. Li, S. Chen, J. Shi, H. Tian, and Y. Zhao, "Evaluation and Optimization of a Hybrid Manufacturing Process Combining Wire Arc Additive Manufacturing with Milling for the Fabrication of Stiffened Panels," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 12, Art. no. 12, Nov. 2017, doi: 10.3390/app7121233.
- [2] G. Posch, K. Chladil, and H. Chladil, "Material properties of CMT—metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries," *Weld World*, vol. 61, no. 5, Art. no. 5, Sep. 2017, doi: 10.1007/s40194-017-0474-5.
- [3] M. Liberini *et al.*, "Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 62, pp. 470–474, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.06.124.
- [4] F. Martina *et al.*, "Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti–6Al–4V components," *Materials Science and Technology*, vol. 32, no. 14, Art. no. 14, Sep. 2016, doi: 10.1080/02670836.2016.1142704.
- [5] J.-Y. Hascoët, J. Parrot, P. Mogno, and E. Willmann, "Induction heating in a wire additive manufacturing approach," *Weld World*, vol. 62, no. 2, Art. no. 2, Mar. 2018, doi: 10.1007/s40194-017-0533-y.
- [6] C. Feng, G. Qin, X. Meng, and P. Geng, "Defect evolution of 409L stainless steel in high-speed TIG welding," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 35, no. 2, pp. 179–186, Jan. 2020, doi: 10.1080/10426914.2020.1711925.
- [7] C. Shen, Z. Pan, D. Cuiuri, J. Roberts, and H. Li, "Fabrication of Fe-FeAl Functionally Graded Material Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process," *Metall and Materi Trans B*, vol. 47, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2016, doi: 10.1007/s11663-015-0509-5.
- [8] N. Kahraman, A. Durgutlu, and B. Gülenç, "316L Paslanmaz Çeliğin TIG Kaynağında Koruyucu Argon Gazına Hidrojen İlaresinin Kaynak Bölgesi Tane Morfolojisine Etkilerinin Araştırılması," *Politeknik Dergisi*, vol. 7, no. 3, pp. 223–228, 2004.
- [9] A. Sharma, D. K. Verma, and N. Arora, "A scheme of comprehensive assessment of weld bead geometry," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 82, no. 9–12, pp. 1507–1515, Feb. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7452-0.
- [10] X. Cai, S. Lin, A. B. Murphy, B. Dong, C. Fan, and C. Yang, "Influence of helium content on a ternary-gas-shielded GMAW process," *Weld World*, vol. 62, no. 5, Art. no. 5, Sep. 2018, doi: 10.1007/s40194-018-0631-5.
- [11] F. Wang, S. Williams, and M. Rush, "Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 57, no. 5–8, Art. no. 5–8, Nov. 2011, doi: 10.1007/s00170-011-3299-1.
- [12] B. Wu *et al.*, "Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 250, pp. 304–312, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037.
- [13] B. Silwal and M. Santangelo, "Effect of vibration and hot-wire gas tungsten arc (GTA) on the geometric shape," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 251, pp. 138–145, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.08.010.
- [14] J. Sivakumar and N. N. Korra, "Optimization of Welding Process Parameters for Activated Tungsten Inert Welding of Inconel 625 Using the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution Methodology," *Arab J Sci Eng*, Feb. 2021, doi: 10.1007/s13369-021-05409-w.
- [15] R. S. Vidyarthi and P. Sivateja, "Influence of activating flux tungsten inert gas welding on mechanical and metallurgical properties of the mild steel," *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 977–981, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.335.
- [16] N. Kahraman and B. Gülenç, *Modern Kaynak Teknolojisi ve Kaynak İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği*, 4th ed. EPAMAT Basım Yayın, 2020.
- [17] A. Durgutlu and B. Gülenç, "Ark Kaynağında Kaynak Hızının Nüfuziyete ve Mikroyapıya Etkisi," *Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, vol. 23, no. 4, pp. 251–259, 1999.