KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(3), 2026
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 29(3), 2026
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 06.03.2026
Kabul Tarihi : 03.08.2026

Received Date : 06.03.2026
Accepted Date : 03.08.2026

ROBOTİK GAZALTI METAL ARK KAYNAĞINDA PROSES PARAMETRELERİNİN ALIN VE BİNDİRME BİRLEŞİMLERİNDE KAYNAK DİKİŞİ OLUŞUMU ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS ON WELD BEAD FORMATION IN BUTT AND LAP JOINTS DURING ROBOTIC GAS METAL ARC WELDING

Onur YILMAZ[1] (ORCID: 0009-0002-1862-6063)
Salih KARAKAŞ[1] (ORCID: 0009-0005-6034-1557)
Celalettin YÜCE[2,*] (ORCID: 0000-0003-1387-907X)

[1]ORAU Orhan Holding A.Ş, Bursa, Türkiye
[2]Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Celalettin Yüce, cyuce@uludag.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, robotik gazaltı metal ark kaynağında (GMAW) tel besleme ve robot ilerleme hızlarının, alın ve bindirme birleşimlerinde kaynak dikişi makro geometrisine etkileri incelenmiştir. Deneylerde 2 mm kalınlığındaki S420MC çelik saclar, Pulse Multi Control (PMC) ark modu ile birleştirilmiştir. Makro kesitlerden üst dikiş yüksekliği, dikiş/etkin bağlanma genişliği ve nüfuziyet derinliği ölçülerek sonuçlar proses parametreleri ve yaklaşık ısı girdisiyle değerlendirilmiştir. Alın birleşimlerinde tel besleme hızının artması genel olarak akım, ısı girdisi ve dikiş genişliğini artırırken nüfuziyet doğrusal olmayan değişim göstermiştir. İlerleme hızının azaltılması ise daha geniş ve yüksek nüfuziyetli dikişler oluşturmuştur. Bindirme birleşimlerinde hızın 10 mm/s'den 12 mm/s'ye çıkarılması etkin bağlanma genişliği ve alt sac nüfuziyetini azaltırken üst dikiş yüksekliğini artırmıştır. Sonuçlar, proses parametrelerinin etkisinin birleşim geometrisine bağlı olduğunu ve parametre seçiminde makro geometrik ölçümlerin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Robotik gmaw, pulse multi control, alın birleşimi, bindirme birleşimi, kaynak dikişi geometrisi

ABSTRACT

This study investigates the effects of wire feed speed and robot travel speed on weld bead macrogeometry in robotic gas metal arc welding (GMAW) for both butt and lap joints. In the experiments, 2 mm thick S420MC steel sheets were joined using the Pulse Multi Control (PMC) arc mode. Macro-sections were evaluated in terms of weld reinforcement height, weld/effective bonding width, and penetration depth, and the results were assessed together with the process parameters and estimated heat input. For butt joints, increasing the wire feed speed generally increased the welding current, heat input, and weld width, while penetration depth exhibited a non-linear response. Reducing the robot travel speed resulted in wider weld beads and generally greater penetration. For lap joints, increasing the travel speed from 10 mm/s to 12 mm/s reduced the effective bonding width and penetration into the lower sheet, while increasing the weld reinforcement height. The results demonstrate that the influence of process parameters strongly depends on joint geometry and that macrogeometrical characteristics should be considered in addition to surface appearance when selecting parameters for robotic GMAW applications.

Keywords: Robotic gmaw, pulse multi control, butt joint, lap joint, weld bead geometry

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

GİRİŞ

Gaz metal ark kaynağı (GMAW), yüksek ergime verimi, sürekli tel elektrot kullanımı ve otomasyona uygunluğu sayesinde endüstriyel birleştirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan kaynak yöntemlerinden biridir (Norrish, 2017). Özellikle otomotiv, beyaz eşya ve ağır sanayi sektörlerinde robotik sistemlerle bütünleştirilen GMAW prosesleri; yüksek üretkenlik, tekrarlanabilir işlem koşulları ve proses kararlılığı açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Biber vd., 2024). Bununla birlikte, kaynaklı bağlantılardan beklenen geometrik ve mekanik özelliklerin elde edilmesi, yalnızca kullanılan kaynak yöntemine değil, proses parametrelerinin uygun ve dengeli biçimde seçilmesine de bağlıdır (Chen vd., 2024).

Robotik GMAW uygulamalarında tel besleme hızı, kaynak akımı, ark gerilimi, kaynak ilerleme hızı, torç açısı ve salınım hareketi gibi parametreler; birim kaynak uzunluğu başına aktarılan enerjiyi, damla transfer mekanizmasını, kaynak banyosunun davranışını, kaynak dikişi geometrisini ve ısıdan etkilenen bölgenin morfolojisini belirleyen temel değişkenlerdir. Literatürde tel besleme ve kaynak hızındaki değişimlerin ark kararlılığı ve damla transferi üzerinde etkili olduğu; buna bağlı olarak nüfuziyet derinliği, dikiş genişliği ve üst dikiş yüksekliği gibi geometrik özelliklerin önemli ölçüde değişebildiği bildirilmiştir (Roshan vd., 2023; Son vd., 2023). Roshan vd. (2023), standart ve darbeli GMAW proseslerinde tel besleme hızı ile kaynak hızının dikiş geometrisi üzerindeki etkilerini incelemiş ve uygun olmayan parametre kombinasyonlarının doğrusal olmayan geometrik değişimlere neden olabileceğini göstermiştir.

Geleneksel kısa devre, sprey ve klasik darbeli ark modlarının bazı sınırlılıklarını azaltmak amacıyla kontrollü metal transferine dayalı farklı prosesler geliştirilmiştir. Bunlar arasında yer alan Cold Metal Transfer (CMT), tel hareketinin dijital olarak kontrol edilmesi sayesinde düşük ısı girdisi ve kararlı ark davranışı sunmaktadır (Pickin ve Young, 2006). Pulse Multi Control (PMC) ise klasik darbeli GMAW prosesinin geliştirilmiş bir varyantı olup, optimize edilmiş darbe karakteristiği, ark boyu dengeleyicisi ve nüfuziyet dengeleyicisi aracılığıyla damla ayrılmasını ve ark davranışını daha hassas biçimde kontrol etmeyi amaçlamaktadır. Nüfuziyet dengeleyicisi, temas memesi–iş parçası mesafesi ve serbest tel uzunluğundaki değişimlerin nüfuziyet üzerindeki etkisini azaltırken, ark boyu dengeleyicisi arkın kısa ve kararlı bir çalışma aralığında tutulmasına katkı sağlamaktadır. Bu özellikler, daha düzenli damla transferi, düşük sıçrama oluşumu ve daha tutarlı kaynak dikişi geometrisi elde edilmesine olanak tanımaktadır (Pang vd., 2016). Deneysel çalışmalar ve endüstriyel uygulamalar, kontrollü metal transferine dayalı bu ark modlarının dikiş geometrisini iyileştirebildiğini ve robotik kaynak uygulamalarında kullanılabilir proses aralığını genişletebildiğini göstermektedir (Selvi vd., 2018).

Kaynaklı yapıların tasarımında yaygın olarak kullanılan alın ve bindirme birleşimleri, kaynak banyosunun oluşumu ve ergiyik metalin akış davranışı bakımından farklı özellikler göstermektedir. Alın birleşimlerinde nüfuziyet derinliği, dikiş simetrisi ve kök bölgesindeki ergime ön plana çıkarken, bindirme birleşimlerinde ergiyik metalin iki sac arasındaki akışı, etkin bağlanma genişliği, alt sac nüfuziyeti ve torç konumu daha belirleyici hâle gelmektedir. Önceki çalışmalarda, bindirme kaynaklarında torç açısı ile kaynak hızının dikiş ayakları, ergiyik metal akışı ve bağlanma kalitesi üzerinde önemli etkileri bulunduğu bildirilmiştir (Yao vd., 2019).

Literatürde GMAW, darbeli GMAW, CMT ve PMC proseslerine ilişkin çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, robotik sistemlerde farklı birleşim geometrilerini aynı deneysel yaklaşım içerisinde ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir (Singh vd., 2025; Kannan vd., 2019; Yao vd., 2019). Mevcut araştırmaların önemli bir bölümü tek bir birleşim geometrisine veya kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerine odaklanmakta; proses parametreleri ile makro dikiş geometrisi arasındaki ilişki çoğu zaman ikincil düzeyde değerlendirilmektedir. Özellikle aynı malzeme, sac kalınlığı, ark kontrol modu ve benzer kaynak koşulları altında alın ve bindirme birleşimlerinin dikiş oluşumu bakımından karşılaştırıldığı çalışmalar sınırlıdır.

Alın ve bindirme birleşimlerinin aynı deneysel çerçevede incelenmesi, proses parametrelerinin her iki birleşim tipi üzerindeki ortak etkilerinin yanı sıra birleşim geometrisine özgü farklılıkların da ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır. Alın birleşimlerinde dikiş genişliği ve nüfuziyet derinliği temel değerlendirme ölçütleri olurken, bindirme birleşimlerinde etkin bağlanma genişliği ve alt sac nüfuziyeti de önem kazanmaktadır. Bu karşılaştırmalı yaklaşım, aynı kaynak koşullarının farklı birleşim geometrilerinde neden farklı kaynak banyosu ve dikiş oluşumu davranışları meydana getirdiğinin anlaşılmasına katkı sağlayabilir.

Bu çalışmada, PMC ark modu kullanılarak tel besleme hızı ve robot ilerleme hızındaki değişimlerle birlikte alın ve bindirme birleşimlerinde oluşan makro geometrik farklılıklar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Kaynaklı numunelerin makro kesitlerinden üst dikiş yüksekliği, dikiş veya etkin bağlanma genişliği ve nüfuziyet derinliği ölçülmüş; elde edilen sonuçlar akım, gerilim, ilerleme hızı ve hesaplanan yaklaşık ısı girdisi değerleriyle ilişkilendirilmiştir. Böylece proses parametrelerine bağlı olarak gözlenen dikiş oluşumu davranışlarının birleşim geometrisine göre nasıl değiştiğinin ortaya konulması ve robotik GMAW uygulamalarında parametre seçimine yönelik karşılaştırmalı veriler sunulması amaçlanmıştır.

MATERYAL YÖNTEM

Bu çalışmada, robotik gazaltı metal ark kaynağı (GMAW) yöntemi kullanılarak S420MC kalite ve 2 mm kalınlıktaki sac malzemeler üzerinde deneysel kaynak çalışmaları gerçekleştirilmiştir. S420MC sac, yüksek dayanım ile iyi şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirliği birlikte sunması nedeniyle özellikle otomotiv ve makine imalatındaki taşıyıcı sac parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Malzemeye ait kimyasal bileşim ve mekanik özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Deneyler, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan iki farklı birleşim geometrisi olan alın (butt) ve bindirme (lap) kaynak konfigürasyonlarında yürütülmüştür. Birleşim geometrilerinin seçimi, sac metal yapıların otomotiv ve makine imalatı endüstrilerinde en sık karşılaşılan bağlantı tiplerini temsil etmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Kaynak işlemleri öncesinde numuneler, yüzey kirliliğini ve olası kaynak kusurlarını önlemek amacıyla mekanik olarak temizlenmiş ve kaynak bölgesinde yağ, oksit ve partikül kalmayacak şekilde hazırlanmıştır. Numuneler, robotik kaynak sırasında konum değişimini engellemek amacıyla uygun fikstürleme sistemi ile sabitlenmiştir (Şekil 1).

Tablo 1. Kullanılan Malzemenin Kimyasal Bileşimi (Kašpar vd., 2023)

Element	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti
Bileşim (ağırlıkça %)	≤0,12	≤1,60	≤0,50	≤0,025	≤0,015	≥0,015	≤0,09	≤0,20	≤0,15

Tablo 2. Kullanılan Malzemenin Mekanik Özellikleri (Kašpar vd., 2023)

Malzeme	Sac kalınlığı (mm)	Minimum akma dayanımı, (MPa)	Çekme dayanımı, (MPa)	Minimum kopma uzaması, (%)
S420MC	2	420	480–620	16

Şekil 1. Fikstür Üzerine Bağlanmış Örnek Numune Görüntüsü

Kaynak işlemleri, Fronius marka robotik gazaltı metal ark kaynağı sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, darbeli gazaltı metal ark kaynağının gelişmiş bir varyantı olan Pulse Multi Control (PMC) ark modu tercih edilmiştir. PMC prosesi, darbeli ark yapısını ark boyu ve nüfuziyet dengeleyicileri ile optimize ederek daha kararlı metal transferi ve tekrarlanabilir kaynak dikişi oluşumu sağlamaktadır. Kaynak işlemleri sırasında 1,2 mm çapında G3Si1 türü tel elektrot sürekli beslemeli olarak kullanılmış ve tüm deneylerde koruyucu gaz olarak ISO 14175'e göre hacimce %82 Ar ve %18 CO_2 içeren gaz karışımı 12 L/dak debide kullanılmıştır. Temas memesi–iş parçası mesafesi yaklaşık 18 mm, serbest tel uzunluğu ise yaklaşık 13 mm olarak sabit tutulmuştur. Kaynak torcu ilerleme yönüne doğru hafif itme konumunda hareket ettirilmiş, alın birleşimlerinde nominal birleşme boşluğu 0 mm

olarak uygulanmış ve numuneler kaynak sırasında yer değiştirmeyi önleyecek rijit mekanik bir fikstürle sabitlenmiştir.

Deneysel çalışma iki ana aşamada yürütülmüş ve her parametre kombinasyonu için ayrı bir numune hazırlanmıştır. Parametre seviyeleri, ana deneyler öncesinde gerçekleştirilen ön kaynak denemeleri temel alınarak belirlenmiştir. Ön denemelerde ark kararlılığı, dikiş sürekliliği, aşırı yığılma, yetersiz ergime ve sacda delinme oluşumu değerlendirilmiş; kararlı kaynak dikişi elde edilen tel besleme ve robot ilerleme hızı aralıkları ana deney programına dâhil edilmiştir. İlk aşamadaki alın kaynağı deneylerinde, birinci grupta robot ilerleme hızı sabit tutularak üç farklı tel besleme hızı, ikinci grupta ise tel besleme hızı sabit tutularak üç farklı robot ilerleme hızı incelenmiştir. Kaynak torcu birleşim yüzeyine dik konumlandırılmış ve kaynak işlemi boyunca 3 mm genliğinde dairesel torç salınımı uygulanmıştır. Salınım frekansı, robotik kaynak sistemi tarafından seçilen proses parametrelerine bağlı olarak otomatik biçimde belirlenmiştir. Uygulanan hareket, ayrı bir wobble prosesi olmayıp kaynak torcunun programlanmış dairesel salınımını ifade etmektedir. Deneyler sırasında oluşan kaynak akımı ve ark gerilimi değerleri kayıt altına alınmıştır. İkinci aşamadaki bindirme kaynağı deneylerinde tel besleme hızı sabit tutulmuş, robot ilerleme hızının üç farklı seviyesi incelenmiş ve torç açısı 45° olarak belirlenmiştir. Deney parametreleri ve seviyeleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Deney Parametreleri ve Seviyeleri

Numune	Birleşim türü	Tel besleme hızı (m/dak)	Robot ilerleme hızı (mm/s)	Akım (A)	Gerilim (V)	Torç açısı
A1	Alın	5,0	11	108	22,6	90°
A2	Alın	6,0	11	127	23,8	90°
A3	Alın	7,0	11	146	25,1	90°
A4	Alın	5,5	10	118	23,2	90°
A5	Alın	5,5	11	118	23,2	90°
A6	Alın	5,5	12	118	23,2	90°
B1	Bindirme	5,5	10	118	23,2	45°
B2	Bindirme	5,5	11	118	23,2	45°
B3	Bindirme	5,5	12	118	23,2	45°

Kaynak işlemleri tamamlandıktan sonra numuneler, kaynak dikişine dik doğrultuda kesilerek makroyapı incelemeleri için hazırlanmıştır. Kesit yüzeyleri, kaba zımparalamadan başlanarak kademeli biçimde 2000 grit SiC zımparaya kadar zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin ardından numuneler keçe üzerinde sırasıyla 3 µm ve 1 µm parlatma solüsyonları kullanılarak parlatılmıştır. Hazırlanan yüzeyler, kaynak metali, ısıdan etkilenen bölge ve ana malzeme sınırlarının belirgin hâle getirilmesi amacıyla hacimce %3 Nital çözeltisiyle dağlanmıştır. Makroyapı ölçümleri, ölçek kalibrasyonu yapılmış dijital görüntüler üzerinden Nikon SMZ 800 makroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen görüntüler; üst dikiş yüksekliği, dikiş genişliği, nüfuziyet derinliği ve bağlanma bölgesinin sürekliliğinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

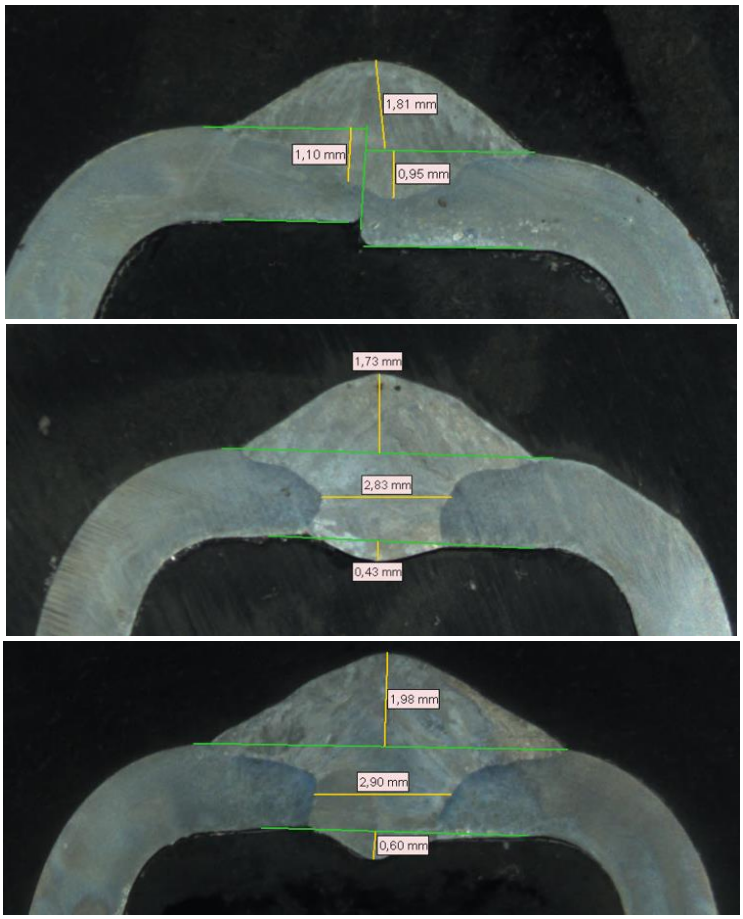
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, robotik GMAW proses parametrelerinin alın ve bindirme birleşimlerinde kaynak dikişi oluşumu üzerindeki etkileri, makro yapı kesitlerinden elde edilen geometrik ölçümler esas alınarak değerlendirilmiştir. Analiz kapsamında üst dikiş yüksekliği, dikiş veya etkin bağlanma genişliği ve nüfuziyet derinliği temel ölçütler olarak ele alınmıştır. Her deney koşulu tek bir kaynak numunesinden alınan temsilî bir makro kesit üzerinden değerlendirildiğinden, sonuçlar incelenen koşullara ait karşılaştırmalı bulgular olarak yorumlanmıştır.

Alın Kaynak Geometrisinde Elde Edilen Sonuçlar

Tel Besleme Hızının Dikiş Geometrisine Etkisi

Robot ilerleme hızının 11 mm/s sabit tutulduğu deney grubunda, tel besleme hızı 5–7 m/dak aralığında değiştirilmiştir. İlgili makro kesitlerden elde edilen görseller Şekil 2'de verilmiştir.



A1
Robot ilerleme hızı: 11 mm/s,
Tel besleme hızı: 5 m/dak,
Akım: 108 A,
Voltaj: 22,6 V

A2
Robot ilerleme hızı: 11 mm/s,
Tel besleme hızı: 6 m/dak,
Akım: 127 A,
Voltaj: 23,8 V

A3
Robot ilerleme hızı: 11 mm/s,
Tel besleme hızı: 7 m/dak,
Akım: 146 A,
Voltaj: 25,1 V

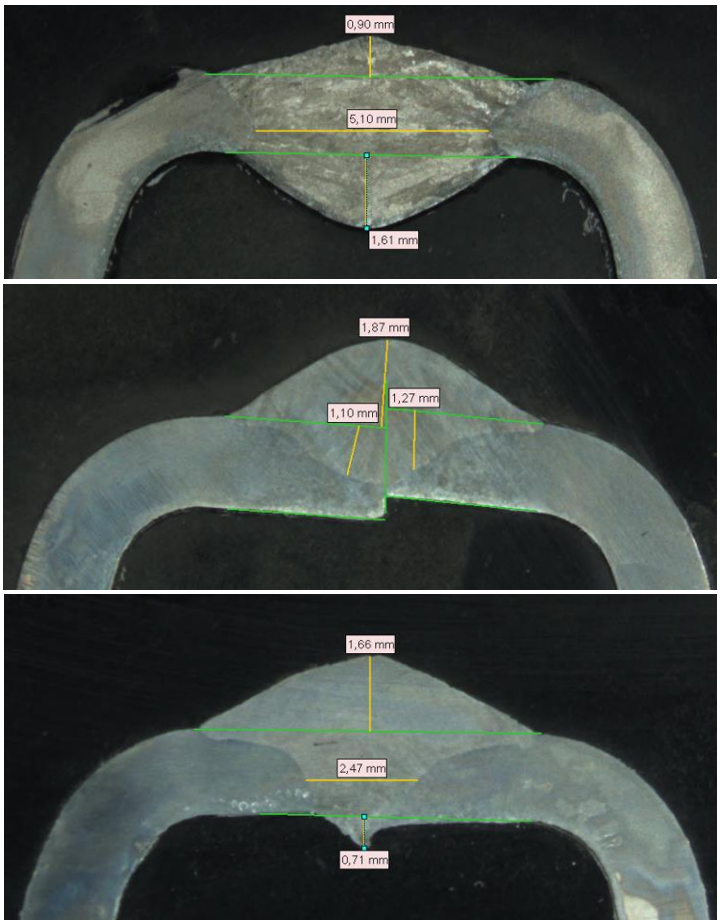
Şekil 2. Tel Besleme Hızının Kaynak Dikiş Boyutu Üzerindeki Etkisi

Tel besleme hızının artırılmasıyla birlikte, akım ve voltaj değerleri de bu parametreye bağlı olarak artış göstermiştir. Bu artış hem ergiyen tel miktarını hem de ana malzemedeki ergiyik miktarını artırmıştır. Bu durum, tel besleme hızına bağlı olarak kaynak banyosuna aktarılan ergiyik metal miktarının artmasıyla ilişkilendirilebilir. Nüfuziyet derinliği açısından sadece A1 numunesinde kısmi bir kaynak dikişi elde edilmiş olup, A2 ve A3 numaralı numunelerde tam penetrasyon sağlanmıştır. Artan tel besleme hızının kaynak dikiş genişliğini de artırdığı tespit edilmiştir. A3 numunesinde tel besleme hızının daha da artırılmasıyla birlikte nüfuziyetin yeniden artış göstermesi, daha yüksek akım–voltaj seviyelerinin kaynak banyosu kararlılığını kısmen yeniden sağladığını düşündürmektedir. Bununla birlikte, üst dikiş yüksekliğindeki belirgin artış, bu parametre seviyesinde aşırı ergime ve kontrolü zor bir dikiş profiline yaklaşım olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, tel besleme hızının alın kaynaklarda dikiş geometrisini belirleyen kritik bir parametre olduğunu ve optimum bir aralıkta tutulması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Robot İlerleme Hızının Dikiş Geometrisine Etkisi

İkinci deney grubunda tel besleme hızı 5,5 m/dak değerinde sabit tutulmuş, robot ilerleme hızı ise 10–12 mm/s aralığında değiştirilmiştir. Elde edilen makro geometrik ölçümler Şekil 3'te verilmiştir. Robot ilerleme hızının 10 mm/s olduğu A4 numunesinde, dikiş genişliği ve nüfuziyetin bu deney grubundaki diğer numunelere göre en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Bu durum, düşük ilerleme hızında birim kaynak uzunluğu başına aktarılan enerjinin artması, kaynak banyosunun daha uzun süre ergimiş hâlde kalması ve ergiyik metalin hem yatay hem de düşey yönde daha fazla yayılmasıyla açıklanabilir. Kaynak hızındaki artışın birim uzunluk başına ısı girdisini azaltarak dikiş genişliği ve nüfuziyeti düşürdüğü yönündeki genel eğilim literatürde bildirilen sonuçlarla da uyumludur (Roshan vd., 2023; Son vd., 2023). Bununla birlikte, A5 ve A6 numuneleri karşılaştırıldığında ilerleme hızındaki artışa rağmen A6 numunesinde A5'e göre daha yüksek ve daha sürekli bir nüfuziyet bölgesi gözlenmesi, beklenen doğrusal eğilimle tam olarak örtüşmemektedir. Akım, gerilim ve tel besleme hızı sabit olduğundan, ilerleme hızının 11 mm/s'den 12 mm/s'ye çıkarılmasıyla nüfuziyetin azalması beklenmektedir. Gözlenen bu farklılığın yerel birleşim boşluğu, sacların düzlemselliği ve hizalanması, fikstürleme koşulları, torç ile birleşim hattı arasındaki konumsal değişimler veya makro kesitin alındığı bölgeden kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmektedir. Her deney koşulunun temsilî tek bir makro

kesit üzerinden değerlendirilmiş olması nedeniyle A5 ve A6 arasındaki farklılığın kesin nedeni belirlenememiş ve bu sonuç genel bir proses eğilimi olarak yorumlanmamıştır. Genel olarak bulgular, robot ilerleme hızının alın kaynağı geometrisini etkileyen temel parametrelerden biri olduğunu göstermekle birlikte, gözlenen doğrusal olmayan değişimlerin bağımsız tekrar deneyleriyle doğrulanması gerektiğini ortaya koymaktadır.



A4
Robot ilerleme hızı: 10 mm/s,
Tel besleme hızı: 5,5 m/dak,
Akım: 118 A,
Voltaj: 23,2 V

A5
Robot ilerleme hızı: 11 mm/s,
Tel besleme hızı: 5,5 m/dak,
Akım: 118 A,
Voltaj: 23,2 V

A6
Robot ilerleme hızı: 12 mm/s,
Tel besleme hızı: 5,5 m/dak,
Akım: 118 A,
Voltaj: 23,2 V

Şekil 3. Robot İlerleme Hızının Kaynak Dikiş Boyutu Üzerindeki Etkisi

Tüm ölçümler birlikte değerlendirildiğinde, tel besleme hızı ve robot ilerleme hızının kaynak dikişi geometrisi üzerinde birbirinden bağımsız değil, etkileşimli etkilere sahip olduğu görülmektedir. Tel besleme hızının artışı, ergiyik metal miktarını artırarak dikiş genişliğini büyütürken; robot ilerleme hızının düşürülmesi, birim uzunluk başına ısı girdisini artırarak hem genişlik hem de nüfuziyeti belirgin şekilde artırmaktadır. Ölçümlere dayalı bu sonuçlar, alın kaynak geometrisi için dar ancak tanımlanabilir bir proses penceresi bulunduğunu göstermektedir. Orta seviyedeki tel besleme hızları ile aşırı düşük olmayan robot ilerleme hızlarının, dengeli dikiş genişliği ve yeterli nüfuziyet sağladığı söylenebilir. Aşırı düşük ilerleme hızları veya yüksek tel besleme hızları ise, aşırı ergime ve geometrik kararsızlık riskini artırmaktadır.

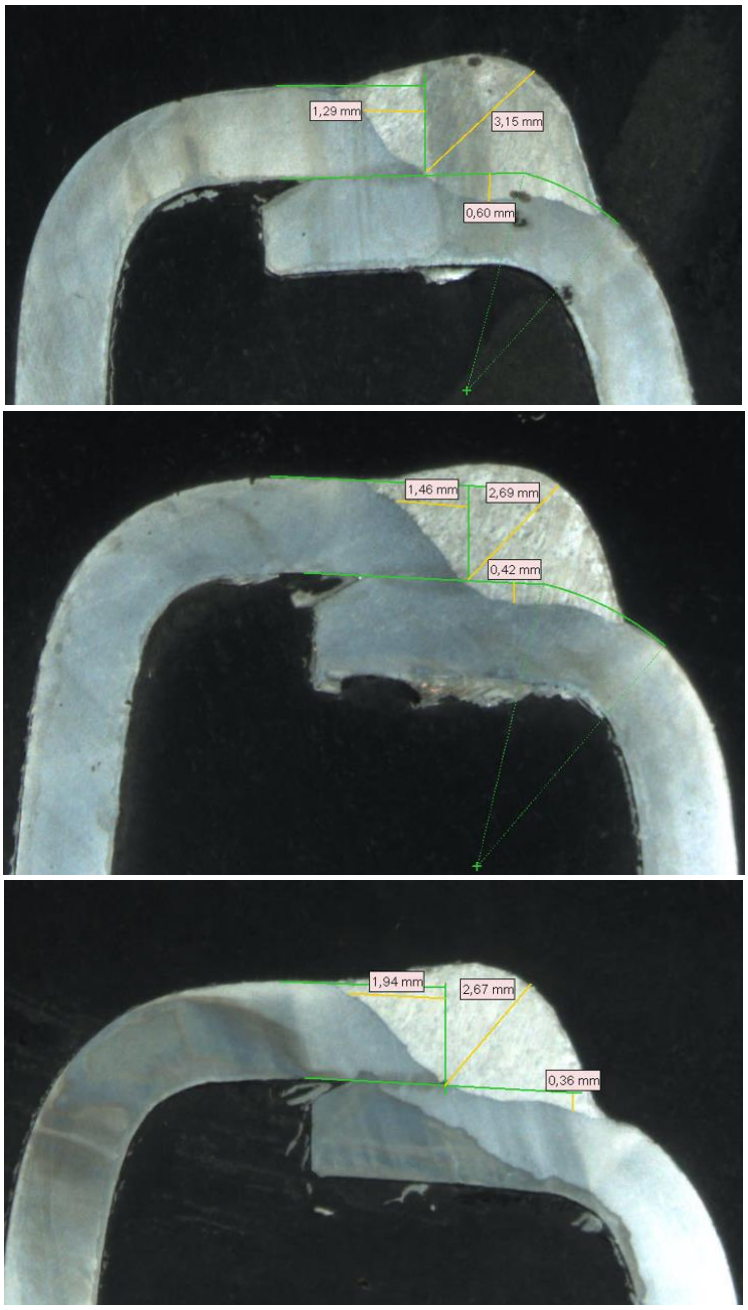
Bindirme Kaynak Geometrisinde Elde Edilen Sonuçlar

Çalışma kapsamında ayrıca bindirme kaynak formatında da denemeler yapılmıştır. Bu denemelerde tel besleme hızı (5,5 m/dak) ile akım–voltaj değerleri (118 A – 23,2 V) sabit tutulmuş, yalnızca robot ilerleme hızı (10, 11 ve 12 mm/s) değiştirilmiştir. Bu yaklaşım ile ilerleme hızının, bindirme birleşimlerinde ergiyik metal akışı, bağlanma bölgesi ve dikiş geometrisi üzerindeki etkileri nicel olarak incelenmiştir. Makro yapı kesitlerinden elde edilen ölçümler değerlendirilmiştir (Şekil 4).

Robot ilerleme hızının 10 mm/s olduğu B1 numunesinde, etkin bağlanma genişliği ve alt sac nüfuziyeti diğer numunelere kıyasla en yüksek değerleri almıştır. Bu durum, düşük ilerleme hızında birim uzunluk başına düşen ısı girdisinin artmasıyla kaynak banyosunun daha uzun süre ergimiş halde kalmasına ve ergiyik metalin bindirme bölgesine daha etkin biçimde yayılmasına bağlanabilir. İlerleme hızının 11 mm/s seviyesine çıkarıldığı B2

numunesinde, kaynak genişliğinin 2,69 mm'ye ve alt sac nufuziyetinin 0,42 mm'ye düştüğü görülmektedir. Buna karşın üst dikiş yüksekliğinde hafif bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, azalan ısı girdisinin ergiyik metalin derinlemesine akışını sınırladığını, ancak metalin üst sac üzerinde yığılma eğilimini artırdığını göstermektedir. İlerleme hızının 12 mm/s olduğu B3 numunesinde ise alt sac nüfuziyeti 0,36 mm ile minimum seviyeye inerken, üst dikiş yüksekliği 1,94 mm ile maksimum değere ulaşmıştır. Bu sonuç, yüksek ilerleme hızlarında kaynak banyosunun daha dar ve yüzey ağırlıklı bir morfolojiye dönüştüğünü ve bindirme birleşimlerinde etkin bağlanma yerine üst dikiş birikiminin baskın hale geldiğini ortaya koymaktadır.

Bindirme birleşim geometrilerinde, alın kaynaklardan farklı olarak kaynak banyosunun davranışı yalnızca ısı girdisine değil, aynı zamanda ergiyik metalin akış yönüne ve torç ilerleme dinamiğine de bağlıdır. Elde edilen ölçümler, ilerleme hızının artmasıyla birlikte ergiyik metalin alt sac ile etkileşiminin zayıfladığını ve metalin üst sac üzerinde birikme eğilimi gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır.



B1
Robot ilerleme hızı: 10 mm/s,
Tel besleme hızı: 5,5 m/dak,
Akım: 118 A,
Voltaj: 23,2 V

B2
Robot ilerleme hızı: 11 mm/s,
Tel besleme hızı: 5,5 m/dak,
Akım: 118 A,
Voltaj: 23,2 V

B3
Robot ilerleme hızı: 12 mm/s,
Tel besleme hızı: 5,5 m/dak,
Akım: 118 A,
Voltaj: 23,2 V

Şekil 4. Robot İlerleme Hızının Köşe Kaynak Dikiş Boyutu Üzerindeki Etkisi

Makro yapı kesitlerinden ölçülen kaynak dikişi geometrisi parametreleri, deney koşulları arasındaki karşılaştırmayı kolaylaştırmak amacıyla Tablo 4'te toplu olarak sunulmuştur. Tabloda alın ve bindirme birleşimlerine ait üst dikiş

yüksekliği, dikiş veya etkin bağlanma genişliği ve nüfuziyet derinliği değerleri, ilgili tel besleme ve robot ilerleme hızlarıyla birlikte verilmiştir.

Tablo 4. Alın ve Bindirme Kaynak Numunelerinin Makro Yapı Kesitlerinden Elde Edilen Kaynak Dikişi Geometrisi Ölçümleri

Numune	Birleşim türü	Tel besleme hızı (m/dak)	Robot ilerleme hızı (mm/s)	Üst dikiş yüksekliği (mm)	Dikiş/bağlanma genişliği (mm)	Nüfuziyet derinliği (mm)
A1	Alın	5,0	11	1,81	—	1,10 / 0,95*
A2	Alın	6,0	11	1,73	2,83	0,43
A3	Alın	7,0	11	1,98	2,90	0,60
A4	Alın	5,5	10	0,90	5,10	1,61
A5	Alın	5,5	11	1,87	—	1,10 / 1,27*
A6	Alın	5,5	12	1,66	2,47	0,71
B1	Bindirme	5,5	10	1,29	3,15	0,60
B2	Bindirme	5,5	11	1,46	2,69	0,42
B3	Bindirme	5,5	12	1,94	2,67	0,36

*A1 ve A5 numunelerinin mevcut makro görüntülerinde, diğer numunelerdeki gibi tek bir yatay dikiş genişliği ölçümü gösterilmemiş; birleşimin iki tarafında iki ayrı yerel dikey ölçüm sunulmuştur. Bu nedenle değerler ayrı ayrı verilmiştir.

Deney koşullarının birim kaynak uzunluğu başına enerji seviyelerini karşılaştırabilmek amacıyla yaklaşık ısı girdisi değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır;

$$Q = \frac{\eta UI}{1000v} \quad (1)$$

Burada Q ısı girdisi (kJ/mm), U gerilim (V), I akım (A), v ise robot ilerleme hızıdır (mm/s). GMAW prosesi için ısıl verim katsayısı η=0,80 kabul edilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 5'te sunulmuştur. Tel besleme hızının 5 m/dak'dan 7 m/dak'a çıkarıldığı A1–A3 deneylerinde, akım ve gerilimdeki artışa bağlı olarak ısı girdisi 0,178 kJ/mm'den 0,267 kJ/mm'ye yükselmiştir. Akım, gerilim ve tel besleme hızının sabit tutulduğu A4–A6 deneylerinde ise robot ilerleme hızının 10 mm/s'den 12 mm/s'ye çıkarılmasıyla ısı girdisi 0,219 kJ/mm'den 0,183 kJ/mm'ye azalmıştır. Bindirme birleşimlerinde de aynı parametreler kullanıldığından B1–B3 numuneleri için sırasıyla 0,219, 0,199 ve 0,183 kJ/mm değerleri elde edilmiştir. Böylece dikiş geometrisinde gözlenen değişimler yalnızca nitel olarak değil, hesaplanan yaklaşık ısı girdisi değerleri üzerinden de değerlendirilmiştir.

Tablo 5. Deney Koşulları İçin Hesaplanan Ark Enerjisi Ve Yaklaşık Isı Girdisi Değerleri

Numune	Akım (A)	Gerilim (V)	İlerleme hızı (mm/s)	Ark enerjisi (kJ/mm)	Isı girdisi (kJ/mm)
A1	108	22,6	11	0,222	0,178
A2	127	23,8	11	0,275	0,220
A3	146	25,1	11	0,333	0,267
A4	118	23,2	10	0,274	0,219
A5	118	23,2	11	0,249	0,199
A6	118	23,2	12	0,228	0,183
B1	118	23,2	10	0,274	0,219
B2	118	23,2	11	0,249	0,199
B3	118	23,2	12	0,228	0,183

Tüm deney grupları birlikte değerlendirildiğinde, tel besleme hızı ile robot ilerleme hızının kaynak dikişi geometrisini farklı ancak birbiriyle ilişkili mekanizmalar üzerinden etkilediği görülmektedir. Tel besleme hızındaki artış, kaynak akımı ile ergiyen dolgu metali miktarını artırarak genel olarak dikiş genişliği ve nüfuziyetin yükselmesine neden olurken, robot ilerleme hızının azaltılması birim kaynak uzunluğu başına aktarılan enerjiyi artırarak daha geniş ve daha derin nüfuziyetli dikişlerin oluşmasını sağlamıştır. Bu eğilimler, darbeli GMAW prosesinde tel besleme hızı ve kaynak hızının dikiş geometrisi üzerindeki belirleyici etkilerini ortaya koyan Roshan vd. (2023) ve Son vd. (2023) tarafından bildirilen sonuçlarla genel olarak uyumludur.

Robot ilerleme hızının 11 mm/s'de sabit tutulduğu A2 ve A3 deneylerinde, tel besleme hızının 6 m/dak'dan 7 m/dak'a çıkarılmasıyla hesaplanan yaklaşık ısı girdisi 0,220 kJ/mm'den 0,267 kJ/mm'ye yükselmiştir. Bu artışla birlikte dikiş genişliği 2,83 mm'den 2,90 mm'ye yaklaşık %2,5, nüfuziyet derinliği 0,43 mm'den 0,60 mm'ye %39,5 ve üst dikiş

yüksekliği 1,73 mm'den 1,98 mm'ye %14,5 oranında artmıştır. Roshan vd. (2023), 3,5–10 m/dak tel besleme hızı ve 300–1000 mm/dak kaynak hızı aralıklarında gerçekleştirdikleri deneylerde, hem standart hem de darbeli GMAW için en yüksek nüfuziyetin düşük kaynak hızı ve yüksek tel besleme hızı kombinasyonunda elde edildiğini bildirmiştir. Bu yönüyle mevcut çalışmada tel besleme hızının artırılmasıyla nüfuziyette gözlenen artış literatürle uyumludur. Bununla birlikte A1–A3 deney grubunda nüfuziyetin tel besleme hızıyla tamamen doğrusal biçimde değişmemesi, kaynak dikişi geometrisinin yalnızca tel besleme hızına değil; akım, gerilim, damla transferi, ark kuvveti ve kaynak banyosu akışının birlikte etkisine bağlı olduğunu göstermektedir. Benzer doğrusal olmayan nüfuziyet davranışları Roshan vd. (2023) tarafından da rapor edilmiştir.

Robot ilerleme hızının 10 mm/s'den 12 mm/s'ye çıkarıldığı A4–A6 deney grubunda ise yaklaşık ısı girdisi 0,219 kJ/mm'den 0,183 kJ/mm'ye azalmıştır. A4 ve A6 numuneleri karşılaştırıldığında dikiş genişliği 5,10 mm'den 2,47 mm'ye yaklaşık %51,6, nüfuziyet derinliği ise 1,61 mm'den 0,71 mm'ye %55,9 oranında düşmüştür. Benzer biçimde Yao vd. (2019), çift darbeli GMAW deneylerinde robot kaynak hızının 20 cm/dak'dan 40 cm/dak'a yükselmesiyle ortalama dikiş genişliğinin yaklaşık 9,25 mm'den 5,28 mm'ye gerilediğini ve kaynak hızının dikiş oluşumunu etkileyen temel parametrelerden biri olduğunu bildirmiştir. Ancak söz konusu çalışmada kaynak hızıyla birlikte bazı darbe parametreleri de değiştirildiğinden, mutlak değerlerden çok dikiş genişliğindeki azalma eğilimi karşılaştırılabilir niteliktedir. Son vd. (2023) de darbeli GMAW'da ısı girdisinin artmasıyla kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölgenin genişlediğini, daha geniş ve derin bir kaynak kesiti oluştuğunu göstermiştir. Mevcut çalışmada hesaplanan 0,178–0,267 kJ/mm aralığındaki ısı girdileri, Son vd. tarafından kalın ve çok pasolu zırh çeliği kaynağı için kullanılan 1,11–2,06 kJ/mm aralığından belirgin biçimde düşüktür. Bu farklılık; sac kalınlığı, malzeme sınıfı, paso sayısı, koruyucu gaz ve birleşim geometrilerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla mutlak dikiş boyutlarının doğrudan karşılaştırılması uygun olmamakla birlikte, birim uzunluk başına aktarılan enerjinin artmasıyla dikiş genişliği ve nüfuziyetin yükselmesi yönündeki genel proses davranışı literatürle uyumludur.

Bindirme birleşimlerinde B1 ve B3 numuneleri karşılaştırıldığında, robot ilerleme hızındaki %20'lik artış ve yaklaşık ısı girdisindeki %16,4'lük azalma sonucunda etkin bağlanma genişliği 3,15 mm'den 2,67 mm'ye yaklaşık %15,2, alt sac nüfuziyeti ise 0,60 mm'den 0,36 mm'ye %40 oranında düşmüştür. Buna karşılık üst dikiş yüksekliği 1,29 mm'den 1,94 mm'ye yükselerek yaklaşık %50,4 artmıştır. Bu durum, yüksek ilerleme hızında ergiyik metalin iki sac arasındaki bağlanma bölgesine yayılması için gerekli süre ve enerjinin azalması, buna karşılık dolgu metalinin üst sac üzerinde birikme eğiliminin artmasıyla açıklanabilir. İlerleme hızındaki artışın etkin bağlanma genişliğini ve alt sac nüfuziyetini azaltması, bindirme birleşimlerinde torç konumu ve ergiyik metal akışının ısı girdisine ek olarak belirleyici olduğunu göstermektedir. Yao vd. (2019) tarafından bildirilen sonuçlar da bindirme kaynaklarında kaynak hızı ve torç konumunun dikiş ayakları, metal akışı ve bağlanma kalitesi üzerinde önemli etkileri bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Alın ve bindirme birleşimlerinin benzer akım, gerilim ve ilerleme hızı koşullarında farklı geometrik tepkiler göstermesi, kaynak dikişi oluşumunun yalnızca yaklaşık ısı girdisiyle değil; birleşim geometrisi, torç açısı, yerel ısı dağılımı ve ergiyik metalin akış yönüyle birlikte belirlendiğini göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, PMC ark modu kullanılarak gerçekleştirilen robotik GMAW işleminde tel besleme hızı ve robot ilerleme hızındaki değişimlerin, 2 mm kalınlığındaki S420MC sacların alın ve bindirme birleşimlerindeki kaynak dikişi makro geometrisine etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, tel besleme hızının artırılmasının kaynak akımı, birim uzunluk başına aktarılan enerji ve dolgu metali miktarı üzerinden dikiş geometrisini etkilediğini; robot ilerleme hızının ise özellikle dikiş genişliği, nüfuziyet ve bağlanma bölgesinin oluşumunda belirleyici olduğunu göstermiştir. Ayrıca aynı proses koşullarının alın ve bindirme birleşimlerinde farklı geometrik tepkiler oluşturması, parametre seçiminin birleşim tipinden bağımsız olarak yapılamayacağını ortaya koymuştur.

Mühendislik uygulamaları açısından, yalnızca kaynak dikişinin yüzey görünümünün değerlendirilmesi, özellikle bindirme birleşimlerinde alt sac nüfuziyeti ve etkin bağlanma genişliği hakkında yeterli bilgi sağlamamaktadır. Bu nedenle robotik kaynak hücrelerinde parametre doğrulaması yapılırken yüzey kontrolünün makro kesit ölçümleriyle desteklenmesi önerilmektedir. Düşük ilerleme hızları daha geniş ve nüfuziyetli dikişlerin oluşmasını sağlayabilmekle birlikte aşırı ısı girdisi, gereğinden fazla ergime ve geometrik düzensizlik riskini artırabilir. Buna karşılık yüksek ilerleme hızları üretim süresini azaltırken, özellikle bindirme birleşimlerinde etkin bağlanma genişliğinin ve alt sac

nüfuziyetinin azalmasına neden olabilir. Bu bakımdan tel besleme ve ilerleme hızı, üretkenlik ile gerekli dikiş geometrisi arasında denge sağlayacak şekilde ve birleşim türü dikkate alınarak seçilmelidir.

Çalışmanın temel sınırlılığı, her deney koşulunun tek bir kaynak numunesi ve bu numuneden alınan temsilî bir makro kesit üzerinden değerlendirilmiş olmasıdır. Bu nedenle elde edilen bulgular istatistiksel olarak genellenebilir proses eğilimleri olarak değil, incelenen koşullara ait karşılaştırmalı sonuçlar olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca mikroyapı, sertlik dağılımı ve mekanik performans incelemeleri çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Gelecekte yapılacak çalışmalarda bağımsız deney tekrarlarının gerçekleştirilmesi, ölçüm belirsizliğinin değerlendirilmesi ve kaynak geometrisi ile mekanik-metalurjik özellikler arasındaki ilişkinin araştırılması önerilmektedir.

Yapay Zeka Katkı Beyanı

Bu makale tamamen herhangi bir yapay zeka aracının yardımı olmadan yazılmış, düzenlenmiş, analiz edilmiş ve hazırlanmıştır. Metin, veri analizi ve şekiller dahil tüm içeriğin yalnızca yazarlar tarafından oluşturulduğunu beyan ederim.

KAYNAKLAR

Biber, A., Sharma, R., & Reisgen, U. (2024). Robotic welding system for adaptive process control in gas metal arc welding. Welding in the World, 68(9), 2311–2320. https://doi.org/10.1007/s40194-024-01756-y.

Chen, C., Tang, B., Ye, Y., Lian, G., & Huang, X. (2024). Effect of Position of Robotic Gas Metal Arc Welding on Bead Quality and Multi-objective Optimization Through Gray Relational Analysis. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 25(7), 1359–1374. https://doi.org/10.1007/s12541-024-00997-7.

Kannan, A. R., Shanmugam, N. S., & Vendan, S. A. (2019). Effect of cold metal transfer process parameters on microstructural evolution and mechanical properties of AISI 316L tailor welded blanks. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2019 103:9, 103(9), 4265–4282. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03856-2.

Kašpar, J., Bernardin, P. ve Lašová, V. (2023). Fatigue Estimation Using Inverse Stamping. Metals, 13(12), Article 1956. https://doi.org/10.3390/met13121956

Norrish, J. (2017). Recent gas metal arc welding (GMAW) process developments: the implications related to international fabrication standards. Welding in the World, 61(4), 755–767. https://doi.org/10.1007/s40194-017-0463-8.

Pang, J., Hu, S., Shen, J., Wang, P., & Liang, Y. (2016). Arc characteristics and metal transfer behavior of CMT + P welding process. Journal of Materials Processing Technology, 238, 212–217. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.033.

Pickin, C. G., & Young, K. (2006). Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. Science and Technology of Welding and Joining, 11(5), 583–585. https://doi.org/10.1179/174329306X120886.

Roshan, R., Kumar Naik, A., Kumar Saxena, K., Arora, K. S., Shajan, N., Msomi, V., & Mehdi, H. (2023). Effect of welding speed and wire feed rate on arc characteristics, weld bead and microstructure in standard and pulsed gas metal arc welding. Journal of Adhesion Science and Technology, 37(23), 3297–3314. https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2192314.

Selvi, S., Vishvaksenan, A., & Rajasekar, E. (2018). Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. Defence Technology, 14(1), 28–44. https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002.

Singh, I. J., Murtaza, Q., & kumar, P. (2025). A comprehensive review on effect of cold metal transfer welding parameters on dissimilar and similar metal welding. Journal of Engineering Research (Kuwait), 13(2), 1184–1201. https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.12.009.

Son, H. J., Jeong, Y. C., Seo, B. W., Hong, S. T., Kim, Y. C., & Cho, Y. T. (2023). Weld Quality Analysis of High-Hardness Armored Steel in Pulsed Gas Metal Arc Welding. Metals, 13(2). https://doi.org/10.3390/met13020303.

Yao, P., Zhou, K., & Huang, S. (2019). Process and Parameter Optimization of the Double-Pulsed GMAW Process. Metals 2019, Vol. 9, Page 1009, 9(9), 1009. https://doi.org/10.3390/met9091009.

Yao, P., Zhou, K., Lin, H., Xu, Z., & Yue, S. (2019). Exploration of Weld Bead Forming Rule during Double-Pulsed GMAW Process Based on Grey Relational Analysis. Materials 2019, Vol. 12, Page 3662, 12(22), 3662. https://doi.org/10.3390/ma12223662.