

Cilt 2 Sayı 1 Haziran 2021
Volume 2 Number 1 June 2021

ISSN: 2717-8811(Online)

JOURNAL

**Materials
and
Mechatronics:A**

2021
JMM
A

JOURNAL

Materials

and

Mechatronics: A

e-ISSN: 2717-8811

Cilt: 2 Sayı: 1 Haziran 2021

Volume:2 Number:1 June 2021

2021

JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

Editör Kurulu / Editorial Board		
Yusuf KAYALI (Editor-in-Chief)	ykayali@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Şükrü TALAŞ (Section Editor)	stalas@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Ali GÜNEN (Section Editor)	ali.gunen@iste.edu.tr	İskenderun Teknik University, TURKEY
Aysel BUYUKSAĞIŞ (Section Editor)	absagis@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Said Mahmut ÇINAR (Section Editor)	smcinar@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Mahmud YALÇIN (Layout Editor)	mcyalcin@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY

Danışma Kurulu / Advisory Board	
Dr. Adem KURT	Gazi University, TURKEY
Dr. Adnan MAQBOOL	Institute of Space Technology, PAKISTAN
Dr. Ali Sabea HAMMOOD	University of Kufa, IRAQ
Dr. Anas Al ATTIEH	German University of Jordan, JORDAN
Dr. Anne Schuzl BEENKEN	South Westphalia University of Applied Sciences, GERMANY
Dr. Aytekin HİTİT	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Dursun ÖZYÜREK	Karabük University, TURKEY
Dr. Erdoğan KANCA	İskenderun Teknik University, TURKEY
Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Hazizan Md AKİL	Sains Malaysia University, MALAYSIA
Dr. İsmail YABANOVA	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Kubilay ASLANTAŞ	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Michał KULKA	Poznan University of Technology, POLAND
Dr. M. Serhat BAŞPINAR	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Metin ÖZGÜL	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Mourad KEDDAM	University of Science and Technology Houari Boumediene, ALGERIA
Dr. Oğuz ARSLAN	Bilecik Seyh Edebali University, TURKEY
Dr. Ramazan KAÇAR	Karabük University, TURKEY
Dr. Selçuk AKTÜRK	Muğla University, TURKEY
Dr. Süleyman GÜNDÜZ	Karabük University, TURKEY
Dr. Shabana SHEIK	University of Pune, Department of Physics, INDIA
Dr. Sumanjit SINGH	Senior Audi Engineer, GERMANY
Dr. Yılmaz YALÇIN	Afyon Kocatepe University, TURKEY

Yayımcı / Publisher	
Yusuf KAYALI	ykayali@aku.edu.tr

JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

İçindekiler/Contents	Sayfa/Page
Araştırma Makalesi (Research Article) AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Levhaların TIG Kaynağı ile Birleştirilmesinde Farklı Koruyucu Gaz Tiplerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi The Effect of Different Shielding Gas Types on Mechanical Properties in TIG Welding of AISI 304 Austenitic Stainless-Steel Plates Kahraman, H., Güvenç, M.A., Mıstıkoğlu, S.	1-12
Araştırma Makalesi (Research Article) Mikro Tornalama İşlemlerinde Kesici Takım Burun Yarıçapının Kesme Kuvvetlerine Etkisi The Effect of Cutting Tool Nose Radius on Cutting Forces in Micro Turning Process Hasçelik, A., Aslantaş, K.	13-25
Araştırma Makalesi (Research Article) Direnç Punta Kaynak Robotlarında KSR ve IQR (Adaptif Punta) Modun Spot Punta Performansının Karşılaştırılması Comparison of KSR and IQR (Adaptive Spot) Models for Spot Performance in Resistance Spot Welding Robots Yazar, M., Kul, M., Çaylak, M., Alp, A.K.	26-36
Araştırma Makalesi (Research Article) Digital Compass Calibration Using Particle Swarm Optimization and Least Squares Method Parçacık Sürü Optimizasyonu ve En Küçük Kareler Yöntemi Kullanılarak Dijital Pusula Kalibrasyonu Pektürk, T., Kocaoğlu, S.	37-50
Araştırma Makalesi (Research Article) FR4 ve FR2 Baskı Devre Kartlarının Mikroşerit Anten Uygulamasında Tasarımı ve Simülasyonu Design and Simulation of FR4 and FR2 Printed Circuit Boards in Microstrip Antenna Application Konuk Ege, G., Kesen, U., Yüce, H., Genç, G.	51-59

Araştırma Makalesi / Research Article

AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Levhaların TIG Kaynağı ile Birleştirilmesinde Farklı
Koruyucu Gaz Tiplerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi

Hasan KAHRAMAN¹, Mehmet Ali GÜVENÇ^{2*}, Selçuk MISTIKOĞLU³

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9483-3270>, hasankahraman.mfbe16@iste.edu.tr

² İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4652-3048>, mali.guvenc@iste.edu.tr

³ İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2985-8310>, selcuk.mistikoglu@iste.edu.tr

Geliş/ Recieved: 12.11.2020;

Kabul / Accepted: 20.01.2021

ÖZET: AISI 304 kalite Östenitik paslanmaz çelikler, paslanmaz çelikler arasında en çok kullanılan kalitelerden biridir. Kimyasal bileşimin ve mekanik özellikleri sayesinde kolay işlenebilir ve şekil alabilir olması, kaynaklanabilme kabiliyetinin yüksek olması ve düşük maliyetle korozyon direnci sağlaması nedenleriyle başta gıda, kimya, ilaç ve petrokimya endüstrisi olmak üzere birçok alanda tercih edilen bir paslanmaz çelik kalitesidir. Bu çalışmada, 3 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik levhalar birbirlerine Tungsten Inert Gaz (TIG) kaynak yöntemi ile 2 mm 308L ilave metali ve 60/90 Amper, 65/100 Amper, 70/110 Amper ısı girdileri ile %100 Argon ve Karışım 212 koruyucu gazları kullanılarak kaynaklanmıştır. Bu aşamada malzemelerin kaynaklanmasında %100 Argon ve Karışım 212 koruyucu gaz kullanımlarının birleştirmelerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kaynaklı numuneler için çekme testi yapılmış, makroyapı, mikroyapı özellikleri optik mikroskop ile incelenmiş ve kaynak bölgesi ve ana malzemeyi içerecek şekilde 10 farklı noktadan mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Yapılan ölçümler sonrasında koruyucu gaz değişiminin kaynaklı paslanmaz çelik malzemelerin çekme dayanımı ve sertlik özellikleri gibi mekanik özelliklerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. %100 Argon gazı kullanımında 58.7 kg/mm² değeri ile en yüksek çekme mukavemeti değerine, 222.5 HV değeri ile de en yüksek kaynak metali sertliğine ulaşılmıştır. İki koruyucu gaz için de benzer mikroyapı özellikleri görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AISI 304, TIG Kaynağı, Koruyucu Gaz, Makroyapı, Mikroyapı, Mikrosertlik.

*Sorumlu yazar / Corresponding author: mali.guvenc@iste.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Kahraman, H., Güvenç, M. A., Mistikoğlu, S. (2021). AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Levhaların TIG Kaynağı ile Birleştirilmesinde Farklı Koruyucu Gaz Tiplerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 2(1), 1-12.

The Effect of Different Shielding Gas Types on Mechanical Properties in TIG Welding of AISI 304 Austenitic Stainless-Steel Plates

ABSTRACT: AISI 304 quality austenitic stainless steels are one of the most used grades among stainless steels. It is a preferred stainless-steel quality in many areas, including the food, chemical, pharmaceutical and petrochemical industry, due to its chemical composition and mechanical properties, it can be easily processed and shaped, has high weldability and corrosion resistance at cost. In this study, 3 mm thick AISI 304 stainless steel plates were welded to each other by TIG welding method using 2 mm 308L additional metal and 60/90 Amper, 65/100 Amper, 70/110 Amper heat inputs with 100% Ar and Mix 212 shielding gases. At this stage, the effects of using 100% Argon and Mix 212 shielding gas on the mechanical properties of the joints were investigated. Tensile test was performed for welded samples, macrostructure and microstructure properties were examined by optical microscope, and microhardness measurements were taken from 10 different points, including the weld area and the main material. After the measurements, it has been determined that the shielding gas exchange is effective on the mechanical properties of welded stainless-steel materials such as tensile strength and hardness properties. In the use of 100% Argon gas, the highest tensile strength value was reached with 58.7 kg/mm² and the highest weld metal hardness was reached with 222.5 HV value. Similar microstructural properties were observed for both shielding gases.

Keywords: AISI 304, TIG Welding, Shielding Gas, Macrostructure, Microstructure, Microhardness.

1. GİRİŞ

Paslanmaz çelikler sahip oldukları yüksek mekanik özellikler ve korozyon dirençlerinden dolayı günümüz endüstrisinin en vazgeçilmez malzeme gruplarından biridir. Yaklaşık 200 çeşit farklı paslanmaz çelik türü bulunmaktadır (Aronsson, 2010). Paslanmaz çeliklerin kullanım alanları her geçen gün artmakta olup, gıda endüstrisinde, depolama tankı olarak, basınçlı kaplar yapımında, fırın parçalarında, dekoratif çalışmalarda ve birçok farklı sektörde kullanılmaktadır (Kükürtçü, 2014).

Ekonomik açıdan üretim maliyeti daha az olan düşük alaşımli çeliklere benzer mekanik özellikler gösteren paslanmaz çeliklerin yüksek üretim maliyetlerine rağmen yoğun ve yaygın kullanımlarının ana nedeni yüksek korozyon direnci sağlamalarıdır. Oksidasyon ve korozyona karşı direncin artması için çelik içerisinde bulunan krom miktarının %12 'den fazla olması gerekmektedir. Krom çelik yapısının ince taneli hale getirmekle birlikte kritik soğuma hızını azaltmaktadır. Böylece çeliğin sertleşmesini sağlamaktadır (Davis, 1994; Su ve ark., 2020).

Malzemelerin mekanik özellikleri sertlik, tokluk ve mukavemet değerlerine bakımından incelenmektedir. Mekanik özellikler malzemelerin bileşimlerine, üretimi sırasında gördüğü mekanik ve ısı işlemlere ve sonrasında kullanımı sırasında maruz kaldığı sıcaklıklara göre değişmektedirler (Dillon, 1992; Wang ve ark., 2019).

Paslanmaz çelikler arasında en büyük inceleme ve çalışma sahasına sahip olan grup östenitik paslanmaz çeliklerdir. Bu çelikler tavlандıklarında manyetik özellik göstermez ve soğuk şekillendirme ile sertlikleri artırılabilen çeliklerdir (Kant ve ark., 2018). Tavllanmış durumda manyetik olmayan özellik gösterirler ve sadece soğuk işlemeyle sertleştirilebilirler. Düşük sıcaklıklarda genellikle çok iyi kriyojenik özellik göstermeleri, açık hava koşullarında yüksek sıcaklık mukavemetlerinin iyi olması ve korozyona karşı yüksek dayanımlı olmaları önemli özelliklerindedir. Östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları incelendiğinde %16-26 arasında krom, %15'e kadar manganez ve %35'e kadar nikel içermekle birlikte bazı özel kalitelerde bakır, alüminyum, titanyum, niyobyum, vanadyum, molibden, azot vb. gibi elementleri yapılarında

görmek mümkündür (Davis, 1994; Su ve ark., 2020).

Paslanmaz çelik imalatlarında, %90'nın üzerinde bir oranda östenitik paslanmaz çelikler kullanılmaktadır. Bunu asıl nedeni Östenitik paslanmaz çeliklerin iyi kaynaklanabilirliğidir. Östenitik paslanmaz çeliklerde kaynaklar genellikle ana metal ile karşılaştırılabilecek kadar iyi kimyasal bileşim ve mekanik özelliklere sahip olurlar. Östenitik paslanmaz çelikler çeşitli kaynak yöntemleri ile kolay bir şekilde kaynaklanabilirler (Tülbentçi, 1998; Hicken, 1993; Somani ve Lalwani, 2020).

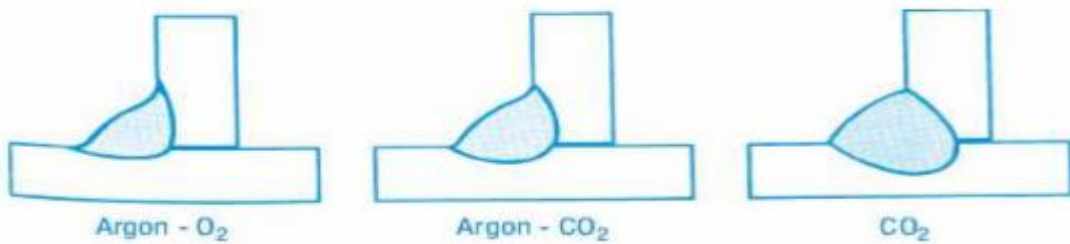
Çağımızın çeşitli endüstri alanlarının vazgeçilmez malzemeleri haline gelen paslanmaz çeliklerin kullanım alanları birçok tür ve şekilde bulunabilmeleri ile birlikte çeşitli kaynak yöntemleri ile kolaylıkla kaynaklanabilmeleri sayesinde giderek genişlemektedir. Paslanmaz çeliklerin kaynaklanma işlemleri genellikle ark kaynak yöntemleri ile gerçekleştirilirken, kullanılan en yaygın ark kaynak uygulaması ise TIG kaynak yöntemidir (Odabaş, 2007; Somani ve Lalwani, 2020). Bu yöntemin en büyük avantajı ısı girdisini oluşturan ark ve birleşimi sağlayan ilave kaynak metalinin birbirinden ayrı şekilde ayarlanabilmesidir. Bu sayede düşük kalınlıktaki paslanmaz çelik malzemelerin birbirlerine kaynaklanmasına olanak sağlamaktadır. (Kaluç ve Tülbentçi, 1995; Kahraman ve ark., 2004; Yılmaz ve Barlas, 2011; Kumar ve Dixit, 2020).

TIG kaynak yöntemi ile kalınlığı 7 mm'ye kadar olan östenitik paslanmaz çelik levhalar tüm kaynak pozisyonlarında kaynatılabilirler. Ancak ergime gücünün düşük olması nedeniyle dolgu oranı düşük olmaktadır. Bu yöntemde argon, helyum, azot veya bu gazların karışımı kullanılmaktadır (Gürcan, 1987; Kumar, 2020).

Kaynak kalitesinde istenilen değerlere ulaşılabilmesi için tüm kaynak yöntemlerinde olduğu gibi TIG kaynak yönteminde de yapılacak birleştirme işlemine en uygun kaynak parametrelerinin seçimi ve doğru şekilde uygulanması oldukça önemlidir. Kaynak işleminde uygulanan parametreler kaynak dikiş geometrisine ve mekanik özelliklerinin istenilen düzeye ulaşmasında etkilidir (Yılmaz ve Tehçi, 2013).

Kaynak işleminde koruyucu gazların hem kaynak işlemine hem de dikiş geometrisine etkileri bulunmakla birlikte, TIG kaynak yönteminde koruyucu gazın ana görevi kaynak yapılan ortamdaki hava etkenlerinin ergimiş kaynak banyosuna olan olası istenmeyen etkisini ortadan kaldırmaktır (Eryürek, 2003; Kahraman ve ark., 2004).

TIG kaynağında kullanılacak saf koruyucu gaza ilave edilecek O_2 ve CO_2 miktarı kaynaklanacak levhaların yüzey kalitesi, birleştirme geometrisi, ilave kaynak metal ve ana metalin bileşimine bağlı olarak belirlenir (Eryürek, 2003). Östenitik paslanmaz çeliklerin TIG yöntemi ile kaynağında en yaygın kullanılan koruyucu gaz argondur (Ural ve Kaluç, 1996; Kurt, 2006). Ayrıca, koruyucu gaz olarak kullanılacak olan Argon gazına yapılacak CO_2 ilavesi kaynak dikişinin profilinin daha da iyi olmasını sağlayacaktır (Eryürek, 2003). Şekil 1'de Ar- O_2 , Ar- CO_2 , CO_2 gazlarının dikiş şekline ve kaynak nüfuziyetine etkisi verilmiştir.



Şekil 1. Ar- O_2 , Ar- CO_2 , CO_2 gazlarının dikiş şekline ve kaynak nüfuziyetine etkisi (Eryürek, 2003)

Bu çalışmada 3 mm kalınlığındaki östenitik paslanmaz elik levhaların birbirlerine TIG kaynak yöntemi ile %100 Argon ve Karışım 212 (%84 Ar / %12 CO₂ / %4 O₂) koruyucu gazları altında kaynaklanmasının malzemelerin metalografisi ve mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kaynaklanacak olan AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi izelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. AISI 304 kalite paslanmaz östenitik çeliğinin kimyasal bileşimi

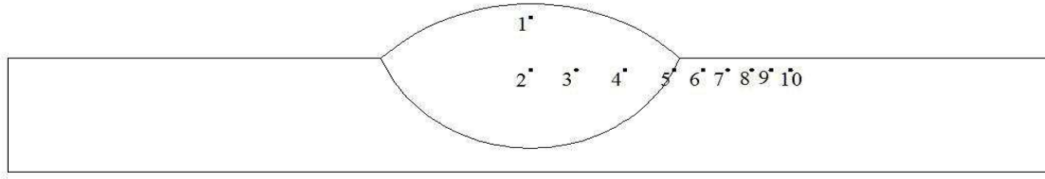
C	Mn	Cr	Si	P	S	Ni	Fe
0.08	2.00	18-20	1.00	0.045	0.03	8-10.5	66.345-70.845

Çalışmada kaynak işlemi 8 adımda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya başlanırken ilk adım olarak AISI 304 paslanmaz elik levhaların deneysel çalışmalara uygun olarak 200x200mm ölçülerinde kesim işlemi yapılmıştır. Kesim işlemi yapılırken hadde yönüne dikkat edilmiştir. 2. Adım olarak levhalara kaynak ağzı seçimi 60° V – alın kaynak ağzı olarak yapılmış ve sonrasında kaynak ağzı açma işlemi Karbosan marka Inox taşla taşlanması suretiyle gerçekleştirilmiştir. 3. Adım olarak levhaların birbirlerine çatma (puntalama) işlemi gerçekleştirilmiş olup, alttan koruyucu gaz verecek düzenek hazırlanmıştır. 4. Adım olarak kullanılacak farklı koruyucu gaz ve uygulanacak farklı amper değerleri uygulamayı yapacağımız levhalar üzerine yazılarak levhalar için tanımlama yapılmıştır. 5. Adım olarak koruyucu gaz seçimi gerçekleştirilmiş olup, TIG kaynağı için uygun olacak gaz debisi Argon gazı için 12 L/dk Karışım 212 gazı için 8 L/dk ayarlanmıştır. 6. Adım olarak ise uygun kaynak akımı ve dolgu teli seçimi yapılarak kaynak işlemine hazırlıklar tamamlanmıştır. 7. Adım olarak kaynak işlemine ilk paso kök kaynağı olarak yapılmıştır. 8. Adım olarak kaynak yapılan levhanın sıcaklığı lazer termometre yadımı ile 50 °C’ye kadar düşmesinin ardından diğer paso kaynak işlemleri tamamlanmıştır. 8 adımdan oluşan kaynak işlemi bu şekilde farklı opsiyonlar ile tüm levhalara uygulanmıştır.

Sekiz adımda gerçekleştirilen kaynaklama işlemi için; 12 adet 200x200mm AISI 304 paslanmaz elik levha hazırlanmış olup, kaynaklama sonrasında 6 adet kaynaklı numune elde edilmiştir. Kaynaklama işleminde Zenweld Ultimate 320 THP marka TIG kaynak makinası kullanılmış olup, Magmaweld marka 2 mm kalınlığında 308L ilave kaynak teli kullanılmıştır. %100 Argon kullanımı ve Karışım 212 koruyucu gaz kullanımları için ayrı ayrı olmak üzere 3 farklı (düşük, orta, yüksek) amper değerinde kaynaklama işlemi yapılmıştır. Kök pasolar için 60, 65, 70 Amper değeri seçilirken, kapak pasolar için 90, 100, 110 Amper değerleri seçilmiştir.

Kaynaklama işlemi sonrasında kaynaklı levhalardan ve kaynak ana metalinden standartlara uygun olarak çekme testi numunesi alınmış ve kaynaklı numuneler Zwick/Roel Z600 marka test makinasında TS EN ISO 6892 ekme test standardına uygun olarak çekilmiştir. Akma test hızı 4mm/dk iken çekme test hızı 50mm/dk olacak şekilde çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, metalografik çalışmalar için ilave kaynaklı numuneler alınarak Struers Citopress-30 marka makinede bakalite alınmıştır. Bu işlemden sonra yüzeyler Struers Tegramin-25 marka zımparalama makinası ile sırasıyla P180, 320, 600, 1200 ve 2500 kademelerinde zımparalardan geçirilmiş ve zımparalandıktan sonra 3 ve 1 m’lik elmas süspansiyon ile parlatılmıştır. Aqua Regia (damıtılmış su (30ml), nitrik asit (20 ml) ve hidroklorik asit (15 ml)) karışımıyla dikine daldırma yöntemi ile 2 dakika bekletilerek dağlanan kaynaklı numunelerden önce Nikon SMZ800N marka optik mikroskop

ile makroyapı görüntüleri sonrasında ise Nikon EPIPHOT 200 marka optik mikroskop ile Mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Son olarak, kaynaklı numunelerden Şekil 2’de belirtilen şablona göre 10 farklı noktadan Future-Tech FM700 marka cihaz ile 300gr yük altında mikrosertlik ölçümleri alınmıştır.



Şekil 2. Sertlik ölçümlerinde kullanılan şablon (Bos, 2007)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Ana malzemeye ait çekme testi sonucu

Bu çalışmada ana malzeme olarak kullanılan AISI 304 östenitik paslanmaz çelik levhalara ait çekme testi sonucu Çizelge 2 ‘da yer almaktadır.

Çizelge 2. Ana malzeme çekme testi sonucu

Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Akma Muk. (kg/mm ²)	Çekme Muk. (kg/mm ²)	Uzama (%)	Akma/Çekme
3.01	25.35	31.0	55.6	71	0.56

3.2 Kaynaklı numunelere ait çekme testi sonuçları

TIG kaynak yöntemi ile kaynaklanan numunelere ait veriler ile çekme testi sonuçları Çizelge 3’de verilmiştir.

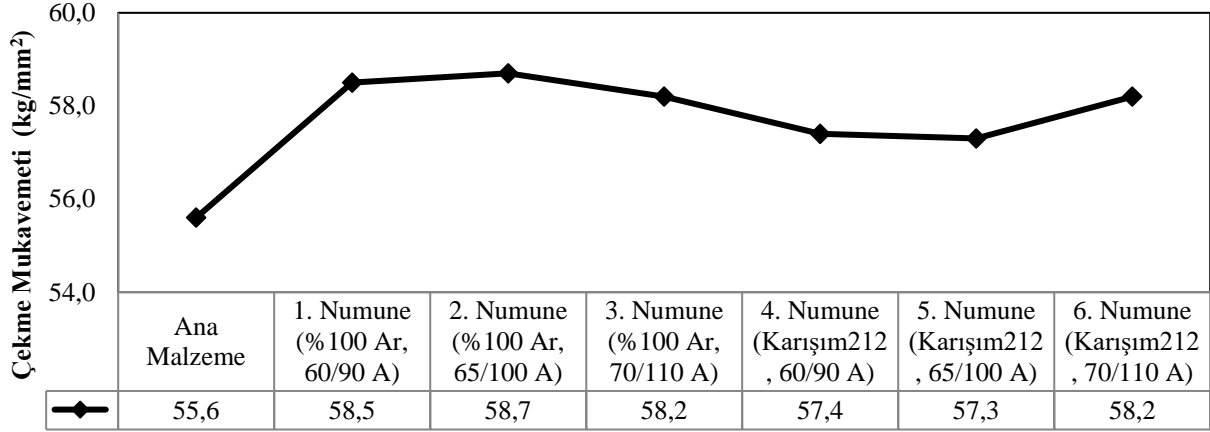
Çizelge 3. TIG kaynaklı AISI 304 östenitik paslanmaz çelik birleştirmelerin çekme test sonuçları

Kaynak Tipi	Kaynak Ana Metali (200x200mm)	Kaynak İlave Metali	Koruyucu Gaz	Numune Sırası	Kaynak Paso Sırası	Kaynak Akımı (Amper)	Çekme Test Sonuçları			
							Akma Muk. (kg/mm ²)	Çekme Muk. (kg/mm ²)	Uzama (%)	Akma/Çekme
TİG	AISI 304	2mm Ti 308L	%100 Ar	1. Numune	1. Paso	60	30.2	58.5	56	0.52
					2. Paso	90				
				2. Numune	1. Paso	65	31.7	58.7	55	0.54
					2. Paso	100				
				3. Numune	1. Paso	70	33.2	58.2	58	0.57
					2. Paso	110				
TİG	AISI 304	2mm Ti 308L	KARIŞIM 212	4. Numune	1. Paso	60	27.9	57.4	58	0.49
					2. Paso	90				
				5. Numune	1. Paso	65	30.3	57.3	58	0.53
					2. Paso	100				
				6. Numune	1. Paso	70	31	58.2	60	0.53
					2. Paso	110				

AISI 304 paslanmaz çelik ana malzemesinin çekme mukavemet değeri 55.6 kg/mm² olarak ölçülmüştür. Kaynaklanmış numunelerin çekme testleri yapıldığında bütün kaynaklanmış numunelerin ana metale göre daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu Şekil 3’te de görüleceği

üzere tespit edilmiştir (Kaçar ve ark., 2008). Paslanmaz çeliklerin endüstride kullanılmasının en temel sebebi korozyon direncinin yüksek olmasıdır. Çalışmamızda ise ana metale en yakın çekme mukavemet değerinin elde edildiği Karışım-212 koruyucu gazının kullanıldığı 5. Numuneye ait çekme dayanımlarının ana metale en yakın değer olduğu görülmektedir. Argon koruyucu gazı ile elde edilen kaynak dikişlerinin daha gözeneksiz olduğu tespit edilmiştir.

AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ana malzeme ve tüm kaynaklı numunelerin çekme mukavemeti değerleri Şekil 3’de yer alan çizelgede verilmiştir.



Şekil 3. Ana malzeme ve Kaynaklı numunelere ait çekme testi sonuçları

3.3 Kaynaklı numunelere ait sertlik incelemeleri

Sertlik ölçümleri kaynak metali merkezinden başlayarak ana metale doğru 300 gr yük altında Şekil 2’de yer alan şablona göre 10 farklı noktadan yapılmıştır.

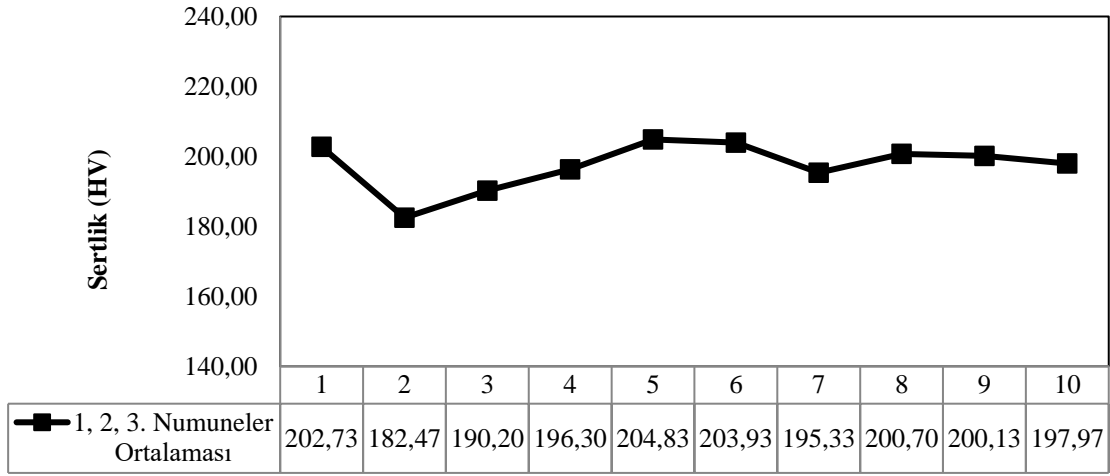
TIG kaynak yöntemi ile kaynaklanan numunelere ait veriler ile sertlik analizi sonuçları her bir deney seti için ortalama değerleri Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 4. Sertlik analizi ortalama sonuçları

Kaynak Tipi	Kaynak Ana Metali (200x200mm)	Kaynak İlave Metali	Koruyucu Gaz	Numune Sırası	Kaynak Paso Sırası	Kaynak Akımı (Amper)	Sertlik Analiz Ortalama Sonuçları HV (300gr)									
							1. Nokta	2. Nokta	3. Nokta	4. Nokta	5. Nokta	6. Nokta	7. Nokta	8. Nokta	9. Nokta	10. Nokta
TİG	AISI 304	2mm Ti 308L	%100 Ar	1. Numune	1. Paso	60	202.7	182.5	190.2	196.3	204.8	203.9	195.3	200.7	200.1	198.0
				2. Numune	2. Paso	90										
				3. Numune	1. Paso	70										
				4. Numune	2. Paso	110										
				5. Numune	1. Paso	65										
				6. Numune	2. Paso	100										
TİG	AISI 304	2mm Ti 308L	KARIŞI M 212	1. Numune	1. Paso	60	152.1	159.0	157.1	170.9	171.2	163.7	164.5	169.3	162.6	165.5
				2. Numune	2. Paso	90										
				3. Numune	1. Paso	70										
				4. Numune	2. Paso	110										
				5. Numune	1. Paso	65										
				6. Numune	2. Paso	100										

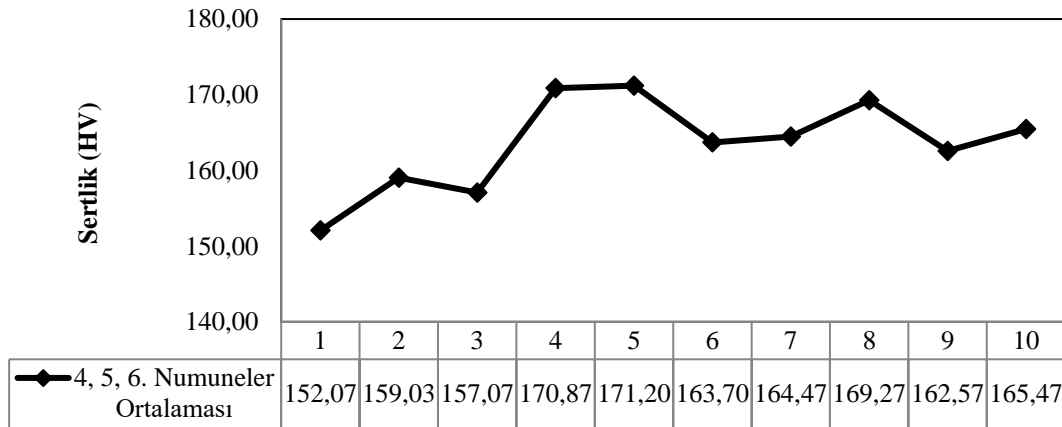
AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin TIG kaynak yönteminde koruyucu gaz olarak %100 Argon kullanılması ile kaynatılması sonrasında 1, 2 ve 3 nolu kaynaklı numunelere ait 10 noktadan alınan sertlik ölçümlerinin ortalamasına ait dağılım grafiği Şekil 4’te verilmiştir. Kaynak metali,

ITAB bölgesi ve ana metale kadar olan bölgede alınan ortalama sertlik değerleri incelendiğinde sertliğin çok fazla değişkenlik göstermeyerek stabil bir hat çizdiği görülmektedir.



Şekil 4. 1. 2 ve 3 nolu kaynaklı numunelere ait sertlik dağılım grafiği (%100 Argon gazı)

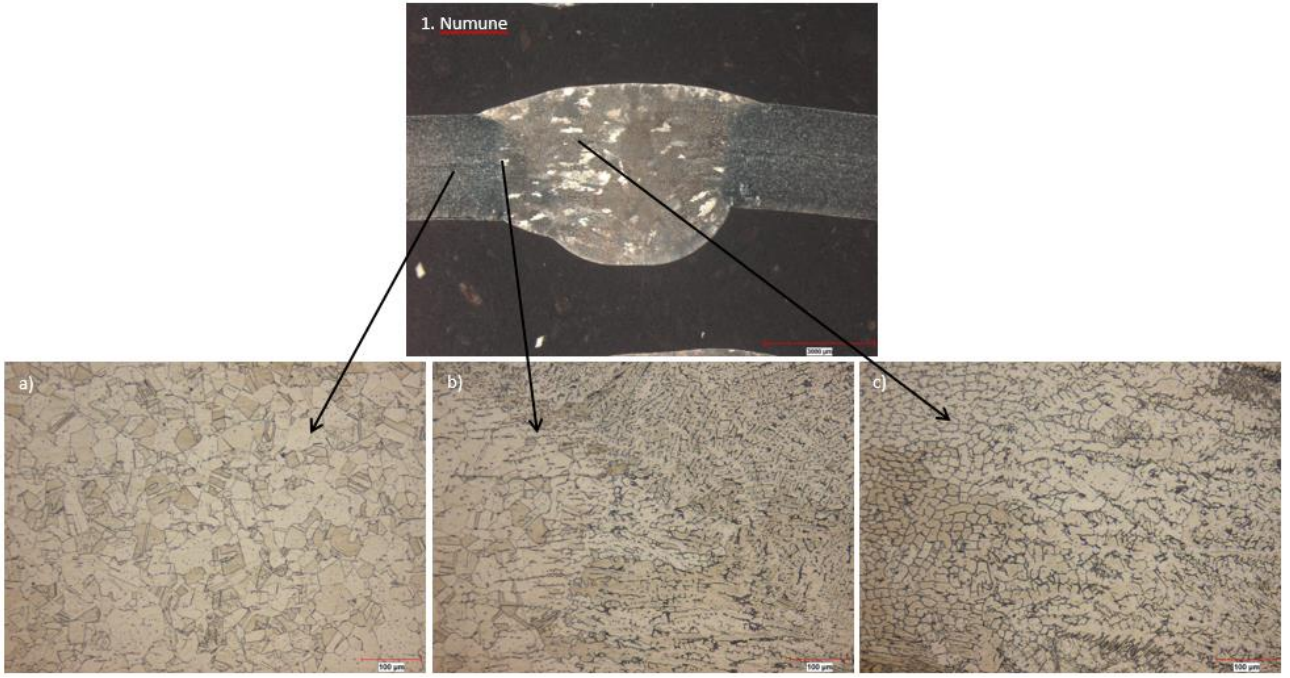
AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin TIG kaynak yönteminde koruyucu gaz olarak Karışım 212 gazı kullanılması ile kaynatılması sonrasında 4, 5 ve 6 nolu kaynaklı numunelere ait 10 noktadan alınan sertlik ölçümlerinin ortalamasına ait dağılım grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Kaynak metali, ITAB ve ana metale kadar olan bölgede sertlik değişimlerinin hem artma hem de azalma yönünde olduğu bunun da nedenin uygulanan karışık 212 gazı ve 2 pasoda gerçekleşen kaynak işlemi dolayısıyla ısıl etkinin mekanik özellikler üzerinde daha fazla olumsuz etki yarattığı gözlemlenmiştir.



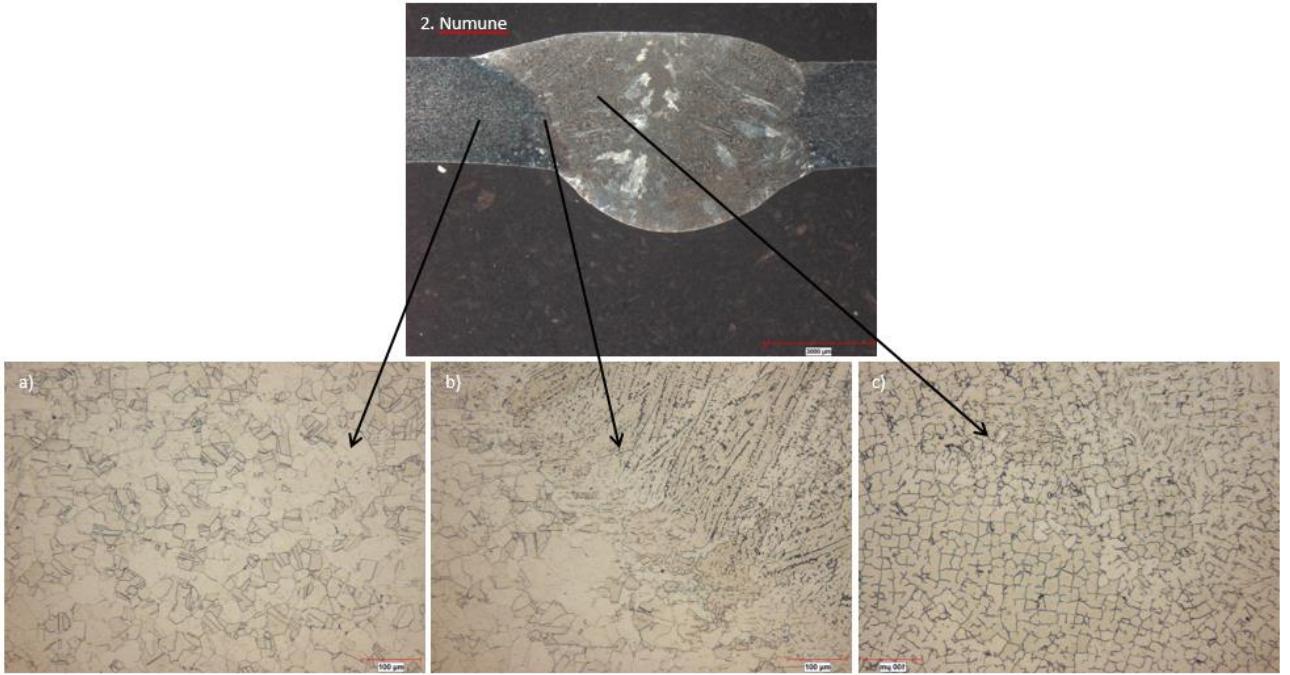
Şekil 5. 4. 5 ve 6 nolu kaynaklı numunelere ait sertlik dağılım grafiği (Karışım 212 gazı)

3.4 Kaynaklı numunelere ait optik mikroskop incelemeleri

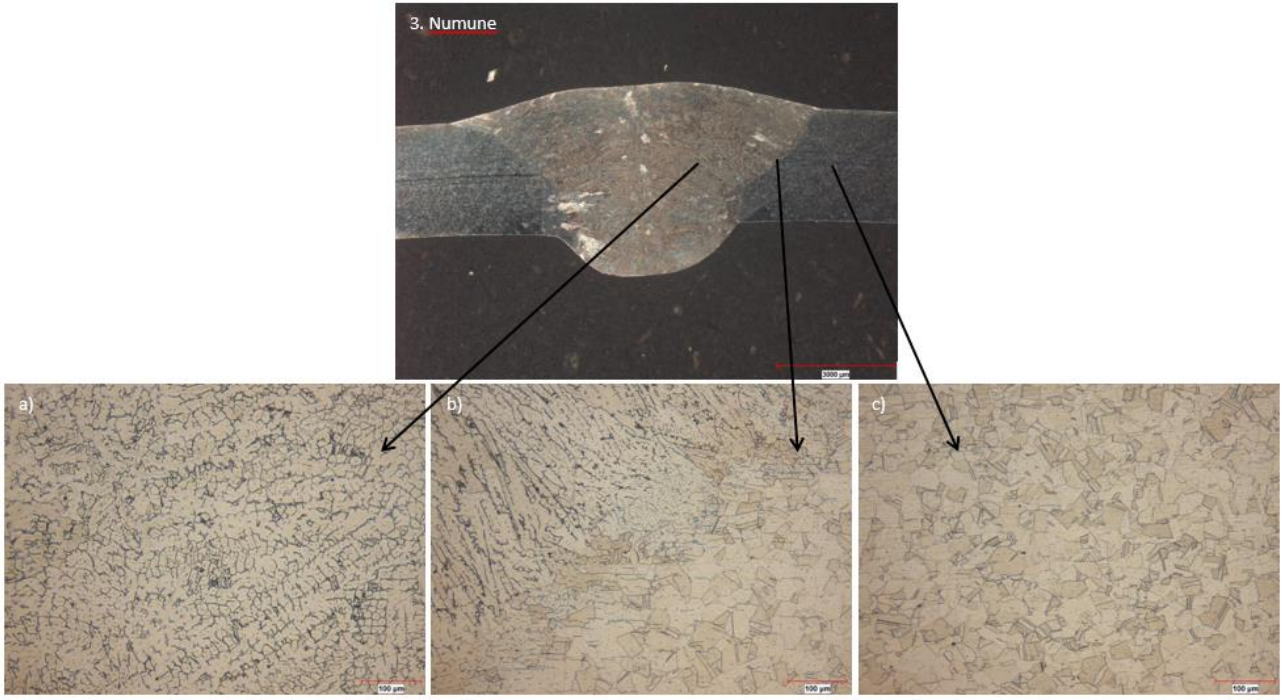
TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen kaynaklı numunelerin makroyapı ve ana metal, ITAB, kaynak metali mikroyapı resimleri Şekil 6, 7, 8, 9, 10, 11'de gösterilmektedir. Tüm kaynaklı numuneler kaynak işlemi sonrasında kendiliğinden soğumaya bırakılmış olup, soğuma morfolojisine uygun olarak ana metalden kaynak metaline doğru tane yapılarının değiştii görülmektedir.



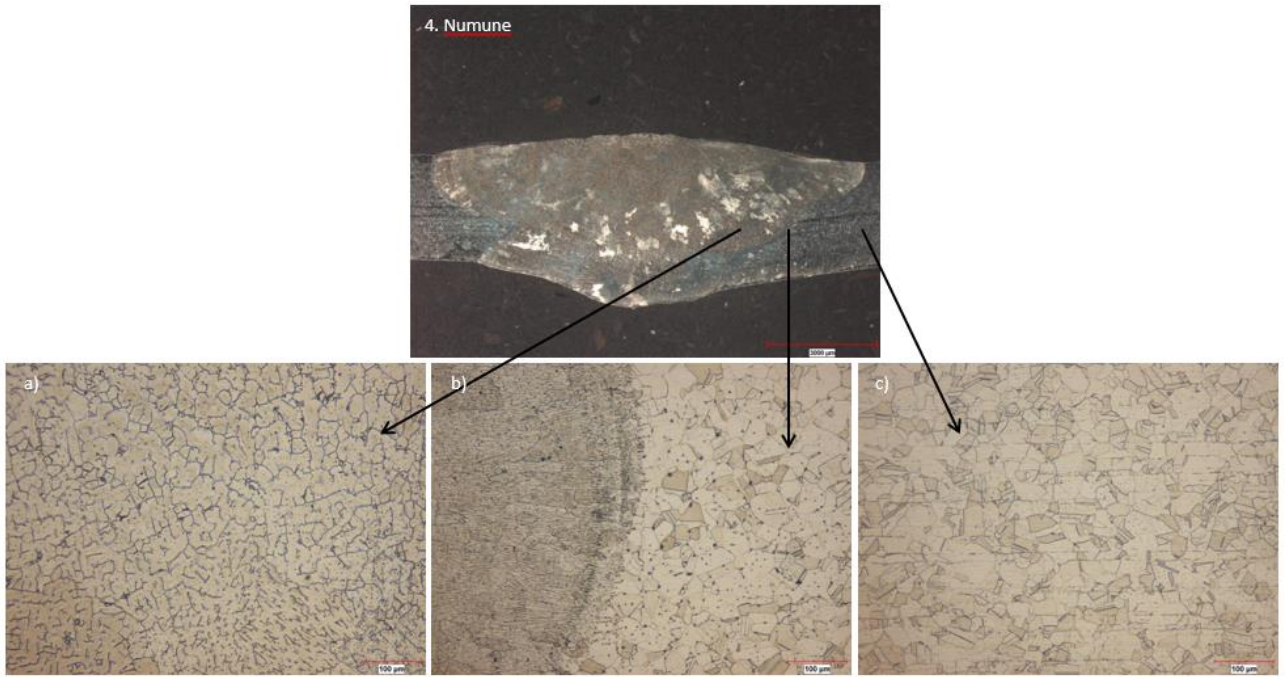
Şekil 6. 1. Numune makroyapı görüntüsü, a) Ana metal mikroyapı görüntüsü, b) ITAB mikroyapı görüntüsü, c) Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü (%100 Ar. 60/90 Amper)



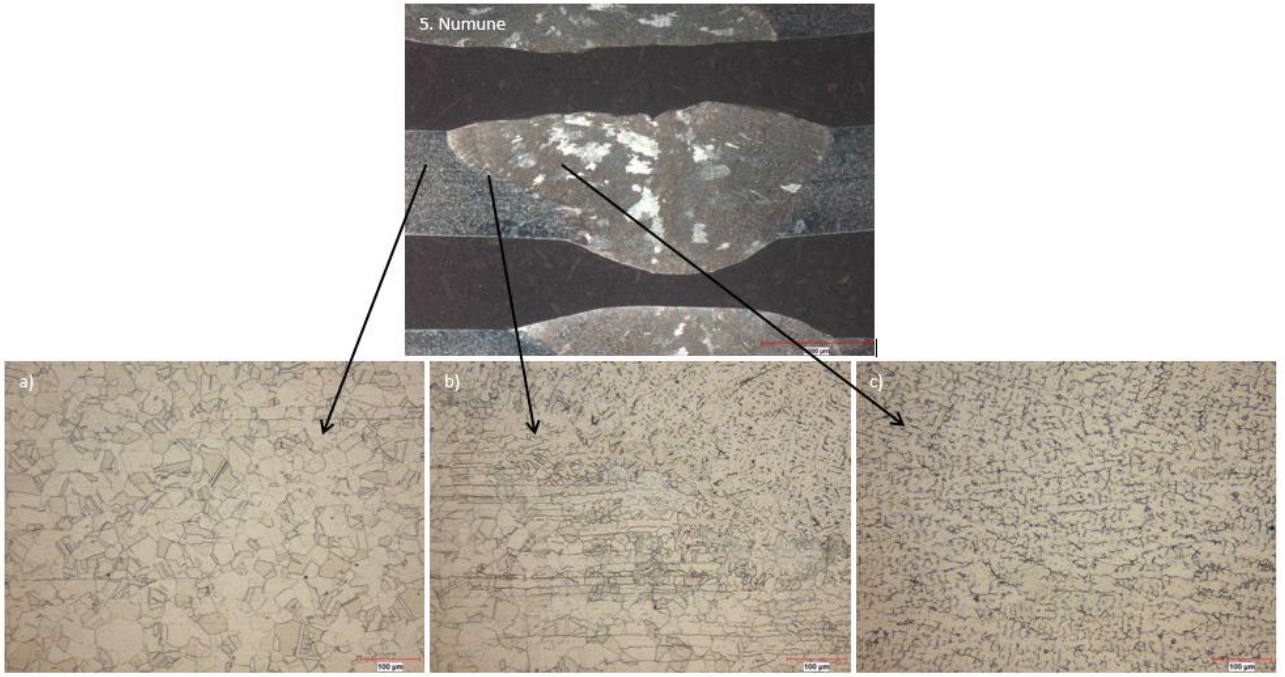
Şekil 7. 2. Numune makroyapı görüntüsü, a) Ana metal mikroyapı görüntüsü, b) ITAB mikroyapı görüntüsü, c) Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü (%100 Ar. 65/100 Amper)



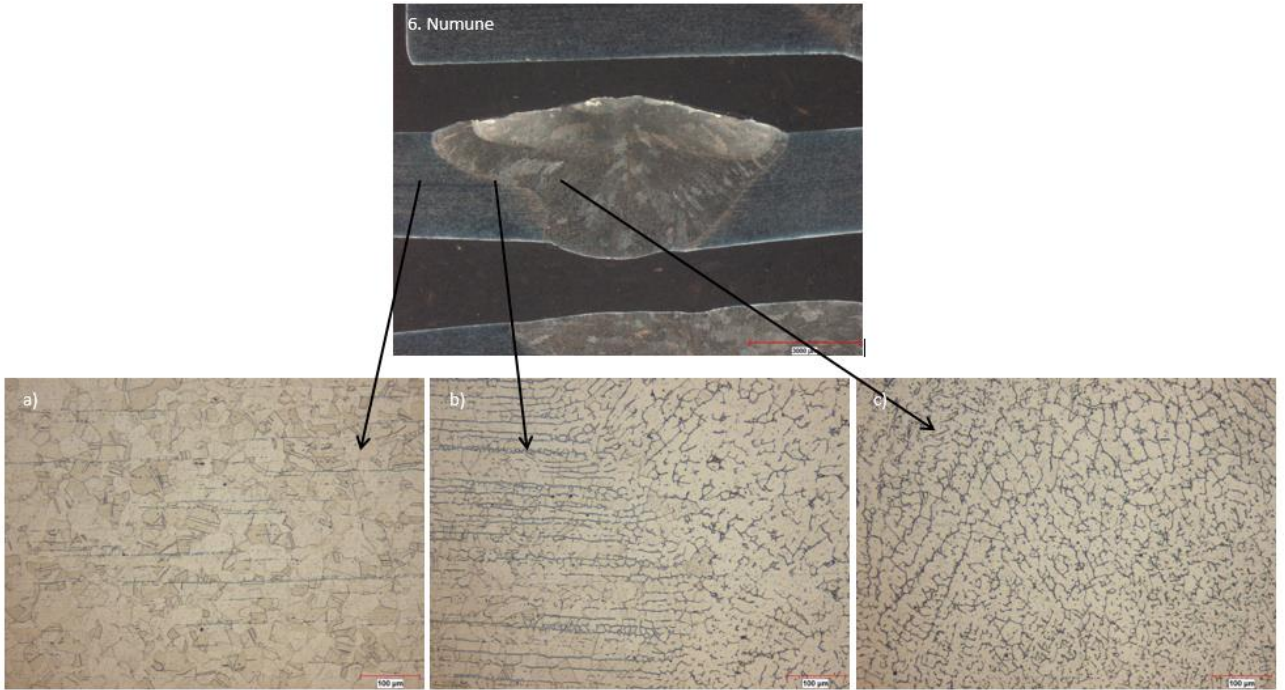
Şekil 8. 3. Numune makroyapı görüntüsü, a) Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü, b) ITAB mikroyapı görüntüsü, c) Ana metal mikroyapı görüntüsü (%100 Ar. 70/110 Amper)



Şekil 9. 4. Numune makroyapı görüntüsü, a) Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü, b) ITAB mikroyapı görüntüsü, c) Ana metal mikroyapı görüntüsü (Karışım 212. 60/90 Amper)



Şekil 10. 5. Numune makroyapı görüntüsü, a) Ana metal mikroyapı görüntüsü, b) ITAB mikroyapı görüntüsü, c) Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü (Karışım 212. 65/100 Amper)



Şekil 11. 6. Numune makroyapı görüntüsü, a) Ana metal mikroyapı görüntüsü, b) ITAB mikroyapı görüntüsü, c) Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüleri (Karışım 212. 70/110 Amper)

Makroyapı ve mikroyapı görüntülerine bakıldığında ana metalde tane yapılarının tüm numuneler ile benzer şekilde olduğu gözlemlenmiştir. ITAB’da ana metalin iri taneli yapıda olduğu ve kaynak bölgesine doğru geçişin görüldüğü gözlemlenmektedir.

Ayrıca akım şiddeti ile doğru orantılı olarak tane ebatlarında farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak akım şiddetinin artması sonucunda malzemeye giren ısı girdisi değeri artmıştır, ısı girdisi artması ile doğru orantılı olarak malzemenin daha da fazla zamanda soğumasına neden olduğundan daha iri taneli yapılar oluşmuştur (Kaçar ve ark., 2008).

4. SONUÇ

AISI 304 Östenitik paslanmaz çelik levhaların birbirlerine koruyucu gaz ve kaynak akımı değişkenleri ve 2 mm Ti 308L ilave metal kullanılarak TIG kaynak yöntemi ile kaynaklanması sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- %100 Argon koruyucu gaz kullanılan kaynaklı numunelerin çekme mukavemet değerlerinin aynı kaynak akımı ve koruyucu gaz olarak Karışım 212 gazı ile kaynaklanmış numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

- %100 Argon koruyucu gaz kullanılan kaynaklı numunelerin çekme mukavemet değerleri kendi aralarında kıyaslandığında 65/100 Amper kaynak akımı ile kaynaklanan numunenin tüm kaynaklı numuneler içerisinde en yüksek çekme mukavemet değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

- Kaynaklı numunelerin mikrosertlik incelemelerinde kaynak metali ile ana metal arasında sertlik genellikle dengeli görülmekle birlikte noktasal artma ve azalmalar fark edilmektedir. Kaynak işleminin 2 pasoda yapılması ile pasolar arasındaki geçiş ve ITAB bölgesindeki ısıl etkiden kaynaklı olduğu değerlendirilmektedir (Kaçar ve ark., 2008).

- %100 Argon koruyucu gazı kullanılan kaynaklı numunelerin mikrosertlik değerlerinin aynı kaynak akımı ve koruyucu gaz olarak Karışım 212 gazı ile kaynaklanmış numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. %100 Argon kullanılması durumu ile içerisinde CO₂ içeren Karışım 212 gazları kullanılması sonucunda CO₂ miktarının artması sertlikte düşüşe neden olmaktadır (Şık, 2007).

- En yüksek sertlik değerlerine %100 Argon koruyucu gaz ve 65/100 Amper kaynak akımı ile kaynaklanan 2 nolu numunenin 1. mikrosertlik ölçüm noktasında ulaşıldığı görülmektedir.

- Tüm kaynaklı numunelere ait mikroyapı görüntülerinde; ana malzemede tane yapısının istikrarlı ve küresele yakın seviyede adacıklar şeklinde olduğu, ITAB bölgesinde tanelerin soğuma morfolojisine uygun şekilde kaynak metaline doğru dallandığı, kaynak metalinde ise sınırları daha belirgin ve daha küçük boyutlu taneler olduğu gözlemlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

Aronsson B., On the origins and early growth of stainless steel: A survey with emphasis on the development in Sweden. Outokumpu Stainless research foundation, 2010.

Bos E., Ark Esaslı Kaynak Yöntemleri ile Kaynak İşleminde Isı Tüketimi ile Malzeme/Kalınlık İlişkisinin İncelenmesi, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2007.

Davis J.R., ASM Specialty Handbook: Stainless Steels. ASM International. 3-66, 1994.

Dillon C.P., Rahoi D.W., Tuthil A.H., Stainless Steels for Bioprocessing. Nickel Development Institute / Biopharm 5, 1992.

Eryürek B., "Gazaltı Kaynağı". Askaynak Yayınları. Mart 2003.

Gürcan M., "TIG Kaynağı". SAGEM. Ankara. 1987.

Hicken G.K., Gas-tungsten arc welding. ASM Handbook. Vol. G. 190-193. 1993.

Kaçar R., Gündüz S., AISI 304-AISI 430 Paslanmaz Çeliklerin Direnç Kaynak Kalitesine Soğuk Deformasyonun Etkisi. IV. Demir-Çelik Kongresi Bildiriler Kitabı, 273-279, 2007.

Kahraman N., Durgutlu A., Gülenç B., 316L Paslanmaz Çeliğin TIG Kaynağında Koruyucu Argon Gazına Hidrojen İlavesinin Kaynak Bölgesi Tane Morfolojisine Etkilerinin Araştırılması, Politeknik Dergisi 7: 223-228, 2004.

- Kaluç E., Tülbentçi K., “Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği” Seminer Notları. Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi Araştırma. Eğitim ve Uygulama Merkezi. Kocaeli. s. 170-178. 1995.
- Kant R., Mittal R., Kumar C., Rana B.S., Kumar M., Kumar R., Fabrication and Characterization of Weldments AISI 304 and AISI 316 Used in Industrial Applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18475-18481, 2018.
- Kumar A., Dixit P.K., Investigating the effects of filler material and heat treatment on hardness and impact strength of TIG weld. *Materials Today: Proceedings*, 2766-2782, 2020.
- Kumar R., Comparative study of TIG and MIG welding for Bi-metallic weld of AISI 304 and monel 400. *Materials Today: Proceedings*, In press, 2020.
- Kurt H.İ., TIG kaynak yöntemiyle birleştirilen östenitik paslanmaz çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2006.
- Kkrt G.E., stenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti ve Mekanik zelliklere Etkilerinin Incelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2014.
- Odabaş C., Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı. Askaynak Teknik Yayınları, İstanbul, 47, 2007.
- Somani C.A., Lalwani D.I., Experimental study of some mechanical and metallurgical properties of TIG-MIG hybrid welded austenitic stainless-steel plates. *Materials Today: Proceedings*, 644-648, 2020.
- Su Y., Song R., Wang T., Cai H., Wen J., Guo K., Grain size refinement and effect on the tensile properties of a novel low-cost stainless steel. *Materials Letters*, 260, 126919, 2020.
- şık A, MIG/MAG Kaynağı ile Kaynatılan Çelik Yapılarda Koruyucu Gaz Karışımlarının Mekanik zelliklere Etkilerinin Araştırılması, *Trakya Univ. J. Sci.*8(1), 55-60, 2007.
- Tülbentçi K., MIG/MAG Gazaltı Kaynak Yöntemi, Arctech Yayını, İstanbul, 1998.
- Ural M., Kaluç E., Paslanmaz Çeliklerin TIG Yöntemi ile Kaynağı, *Metal Makine*, 12-20 Mart, 1996.
- Wang L., Xue J., Wang Q., Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 751, 183-190, 2019.
- Yılmaz R., Tehçi T., stenitik Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynağında Kaynak Akımı ve Kompozisyonun Nufuziyete Etkisi, *Sakarya University Journal of Science*, 16(1), 53-61, 2012.
- Yılmaz R., Barlas Z., Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Koruyucu Gaz Kompozisyonunun Mikroyapı ve Mekanik zelliklere Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3). 391-400, 2011.

Araştırma Makalesi / Research Article

Mikro Tornalama İşleminde Kesici Takım Burun Yarıçapının Kesme Kuvvetlerine Etkisi

Ahmet HASÇELİK^{1*}, Kubilay ASLANTAŞ²

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4615-0640>, ahascelik@aku.edu.tr

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4558-4516>, kaslantas@aku.edu.tr

Geliş/ Recieved: 13.12.2020;

Kabul / Accepted: 24.01.2021

ÖZET: Mikro tornalama işlemi, talaş kaldırma prensibi olarak geleneksel tornalama işleminin mikro seviyede boyutlandırılmış halidir. Talaş kaldırma mekanizmasındaki boyut etkisinden dolayı kesme kuvvetlerinin birbirleri arasındaki oran değişmekte, titreşim oluşmakta ve minimum talaş kalınlığına bağlı negatif talaş açısı gözlenmektedir. Bu boyut etkisinde takım geometrisindeki kesici takım kenar ve burun yarıçapının payı oldukça fazladır. Deneysel çalışmalarla burun yarıçapı etkisini incelemek oldukça zaman alıcı ve maliyetlidir. Bu sebeple, deneysel çalışmalarla malzeme modeli doğrulandıktan sonra, mikro tornalama işlemi nümerik olarak modellenerek, ilave bir deneysel çalışmaya gerek duyulmadan imalat işlemi hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Bu çalışmada DEFORM-3D yazılımı kullanılarak takım geometrisindeki burun yarıçapı farklılığı modellenmiş ve burun yarıçapının kesme işlemine etkisi tespit edilmiştir. Modellemede Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmış, kullanılan malzeme modeli, iki farklı takımla yapılan deneysel çalışmalarla kesme kuvvetleri açısından %2 ila %9 hata payı ile doğrulanmıştır. İş parçası malzemesi olarak ise biyomedikal uygulamalarında ve havacılık sektöründe sıklıkla tercih edilen Ti6Al4V alaşımı kullanılmıştır. Ayrıca kesici takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi de incelenmiştir. Çalışma sonunda boyut etkisinden kaynaklanan etkilerden dolayı burun yarıçapının kesme derinliğine göre çok büyük değerler alması hem yüzey pürüzlülüğünün hem de kesme kuvvetlerinin azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikro Tornalama, Ti6Al4V, Kesme Kuvvetleri, Burun Yarıçapı, Yüzey Pürüzlülüğü, Sonlu Elemanlar Metodu

*Sorumlu yazar / Corresponding author: ahascelik@aku.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için / To cite this article

Hasçelik, A., Aslantaş, K. (2021). Mikro Tornalama İşleminde Kesici Takım Burun Yarıçapının Kesme Kuvvetlerine Etkisi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 2(1), 13-25.

The Effect of Cutting Tool Nose Radius on Cutting Forces in Micro Turning Process

ABSTRACT: Micro turning process is micro-scaled version of traditional turning process as chip removal principle. Due to the size effect in the chip removal mechanism, the ratio of cutting forces to each other changes, vibration occurs and negative chip angle is observed depending on the minimum chip thickness. In this size effect, the share of cutting tool edge and nose radius in tool geometry is quite high. Examining the nose radius effect with experimental studies is quite time consuming and costly. For this reason, micro turning process is modelled numerically, and knowledge about the manufacturing process is obtained without the need for an experimental study. In this study, using the DEFORM-3D software, the nose radius difference in the tool geometry was modelled and the effect of the nose radius on the cutting process was determined. Johnson-Cook material model was used in modeling, and the material model used was verified by comparing it in terms of cutting forces with experimental studies conducted with two different sets. Ti6Al4V alloy, which is frequently preferred in biomedical applications and aviation industry, is used as workpiece material. In addition, the effect of the cutting tool geometry on the surface roughness was also examined. At the end of the study, it was determined that due to the effects caused by the size effect, the nose radius took very large values according to the depth of cut, causing a decrease in both surface roughness and cutting forces.

Keywords: Micro Turning, Ti6Al4V, Cutting Forces, Nose Radius, Surface Roughness, Finite Element Method

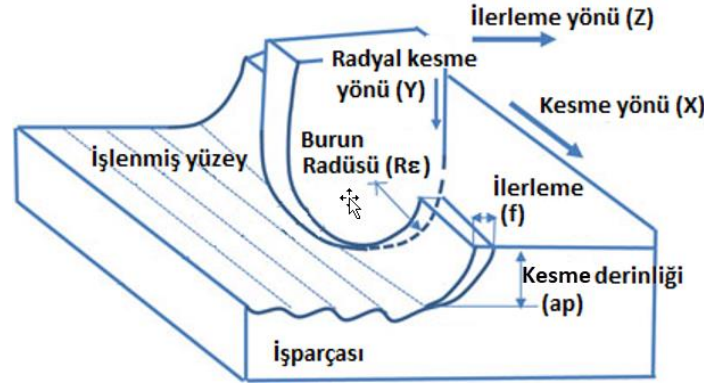
1. GİRİŞ

Titanyum, vücut dokusuna karşı ahengi ile alerjik reaksiyonlara yol açmaması sebebiyle biyo uyumlu bir materyal olmasının yanında yüksek ısı ve hızda çalışan titreşimli parçalar için vazgeçilmez bir metaldir. Titanyum, düşük yoğunluk, ısıl iletkenlik ve elastisite modülü, yüksek korozyon direnci, çatlak yayılımına karşı direnç gibi özellikleriyle sıklıkla tercih edilir. Genelde titanyum alaşımlarının çalışma sıcaklığı yaklaşık 550°C ile 700°C arasındadır (Chunxiang ve ark., 2011). Titanyum alaşımı (Ti6Al4V), havacılık sanayi ve biyomedikal uygulamalarda kullanılan eksenel simetrik minyatür parçaları üretmek için yaygın olarak tercih edilen bir alaşımdır (Jagadesh ve Samuel, 2015).

Kendi ekseni etrafında dönmekte olan iş parçası üzerinden, ekseni doğrultusunda hareket eden bir kesici takım yardımıyla mikro boyutlarda talaş kaldırma süreci olarak tanımlanan mikro tornalama işlemi ile, mikro silindirik parçaların üretiminde kaynak kullanımı ve zaman açısından yüksek verimlilik elde etmek mümkündür. Kısaca konvansiyonel tornalama işleminin mikro boyutlara ölçeklendirilmiş hali olarak tanımlanan mikro tornalama işleminde, bu ölçeklendirmeden kaynaklı fiziksel değişimler, talaş kaldırma mekanizmasında farklı etkilere sebep olmaktadır. Boyut etkisi olarak tanımlanan bu farklılıklardan dolayı mikro tornalama işlemini analiz etmek daha zor ve karmaşık bir hal almaktadır (Ucun, 2013). Genel olarak talaş kaldırma prensibi aynı olsa da boyut küçüldükçe kesme kuvvetlerinin birbirleri arasındaki oran değişmekte, özellikle mikro boyutlara inildiğinde ilerleme kuvvetinin esas kesme kuvvetine (F_f/F_c) oranı artmaktadır. Geleneksel tornalama işleminde kullanılan kesici takımların burun yarıçapları 0.2 ile 1.6 mm arasında değişmekte iken, mikro tornalama işleminde burun yarıçapı 0.2 mm'den daha küçük kesici takımlar kullanılır. Bu nedenle, kesme kuvvetlerinin yüksek olması, boyut etkisinden dolayı oluşan titreşimler ve minimum talaş kalınlığına bağlı negatif talaş açısı gibi farklı etkiler ortaya çıkmaktadır. Özellikle burun yarıçapına bağlı olarak kesme derinliği ve kenar yarıçapına bağlı olarak ilerleme hızının seçimi hem

kesme kuvvetlerini hem de yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir (Aslantaş ve Şahan, 2017).

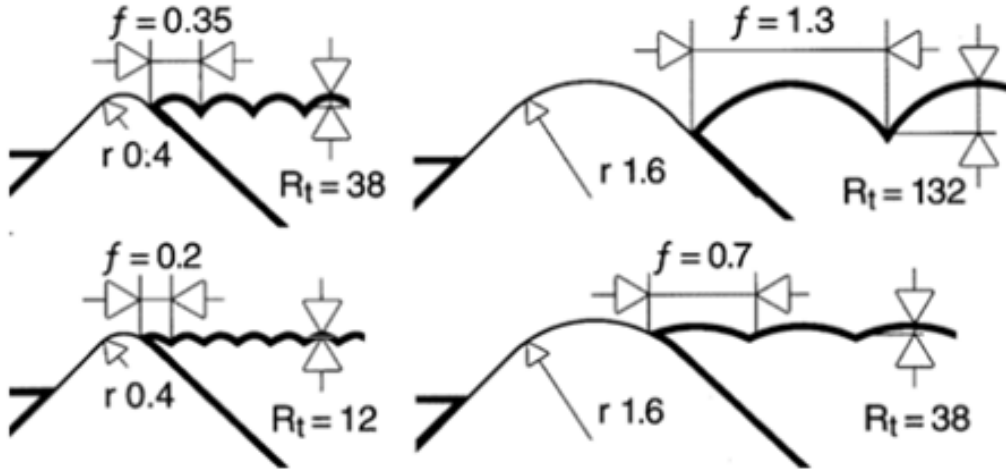
Mikro tornalama işlemindeki kesme derinliklerinin, burun yarıçapından dahi küçük olması, kesici ucun burun kısmı iş parçasına daha az temas etmesine sebep olmakta, bu da kesilmemiş talaş kalınlığını etkilemektedir. Kesici takım ve iş parçasının göreceli hareketine göre tanımlanan kartezyen koordinat sisteminde, kesme yönü x eksenini, ilerleme yönü z eksenini ve radyal yönü y eksenini kabul edilir. Şekil 1’de tipik bir mikro tornalama işlemi 3 boyutlu olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Mikro tornalama süreci gösterimi (Jagadesh ve Samuel, 2015)

Sonlu elemanlar metodu (SEM), mühendislik problemlerinin tasarım ve analizi için kullanılan oldukça yaygın bir yöntemdir. Sonlu elemanlar metodu ile çözüm yapan DEFORM yazılımı ile, iş parçası üzerinde yapılan deneyleri nümerik çözümleyerek analiz etmek mümkündür. Bu modelleme ile, deneysel yöntemlerle veri almanın çok zor olduğu durumlarda dahi, takım talaş ara yüzeyindeki sıcaklıklar, kesme kuvvetleri ve kesme bölgesindeki gerilmeler gibi birçok veri tespit edilebilir. Mikro kesme işleminin modellenmesinde ise malzeme modelinin seçimi oldukça önemlidir. Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli, Ti6Al4V alaşımı için talaşlı imalat işleminde sıklıkla kullanılan bir malzeme modelidir (Ducobu ve ark., 2017). Calamaz ve arkadaşları (2008), Ti6Al4V alaşımının işlenmesini farklı bir malzeme modeli kullanarak 2 boyutta modellemiş, farklı ilerleme hızlarında talaş formunu ve kesme kuvvetlerini deneysel çalışmalarla kıyaslamışlardır (Calamaz ve ark., 2008). Özel ve Sima (2010) ise, Ti6Al4V alaşımının modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanmışlardır. Testere formunda talaş oluşumu elde etmişler ve malzeme modelini buna göre modifiye etmişlerdir. Malzeme modelinin talaş formu ve kesme kuvvetlerine etkisini incelemişlerdir (Özel ve Sima, 2010).

Yüzey pürüzlülüğü, mikro mekanik işlemede çok önemli bir çıktı parametresi olup, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğine göre değişmektedir. Genellikle, kesme derinliği ve ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artarken, kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Ayrıca kesici takım geometrisi ve kesici takım ile iş parçası arasındaki titreşim, yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkiler (Kirik, 2010). Bunun dışında kesici takım burun yarıçapı ve kesici takımın zamanla meydana gelen aşınmaların da yüzey pürüzlülüğünü etkilediği görülmüştür (Şekil 2) (Çakır, 1999). Literatürde, aşınmanın yüzey pürüzlülük değerini olumsuz etkilediği çalışmalar mevcutken, bazı çalışmalarda ise bunun aksine yüzey kalitesini artırdığı ifade edilmiştir (Fang ve ark., 2004; Schmidt ve Tritschler, 2004; Filiz ve ark., 2007; Li ve ark., 2008).



Şekil 2. Takım burun yarıçapı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Çakır, 1999)

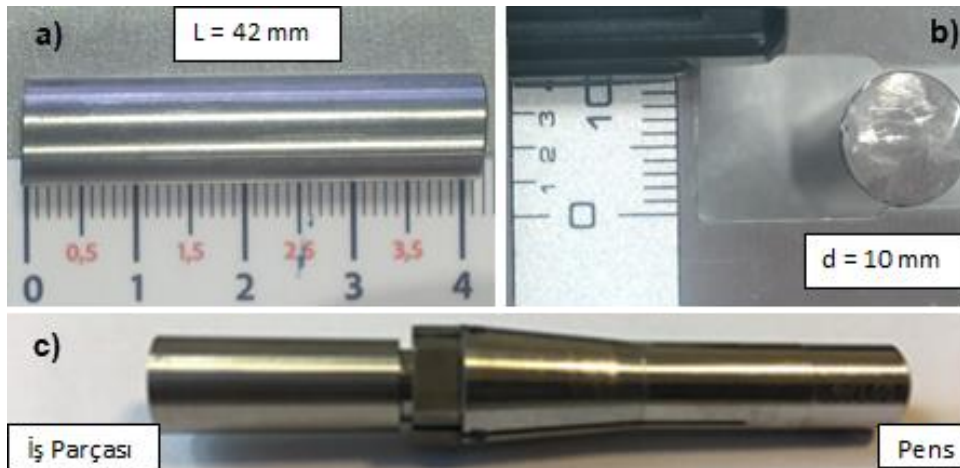
Bu çalışma sonucunda Ti6Al4V alaşımının mikro tornalanması nümerik olarak modellenerek herhangi bir deneysel çalışmaya gerek duymadan imalat işlemi hakkında bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır. Burun yarıçapı etkisi modellenerek ise, burun yarıçapı farklılıklarının kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediğinin tespiti amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında mikro tornalama işleminde burun yarıçapının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır. Farklı kesme parametreleri kullanılarak iki farklı burun ve kenar yarıçapı dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar çözümleri ve uygun malzeme modelinin doğrulanarak seçimi sonucunda, nümerik modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. 3D modelleme yapılarak takım geometrisinin kesme işlemine ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir.

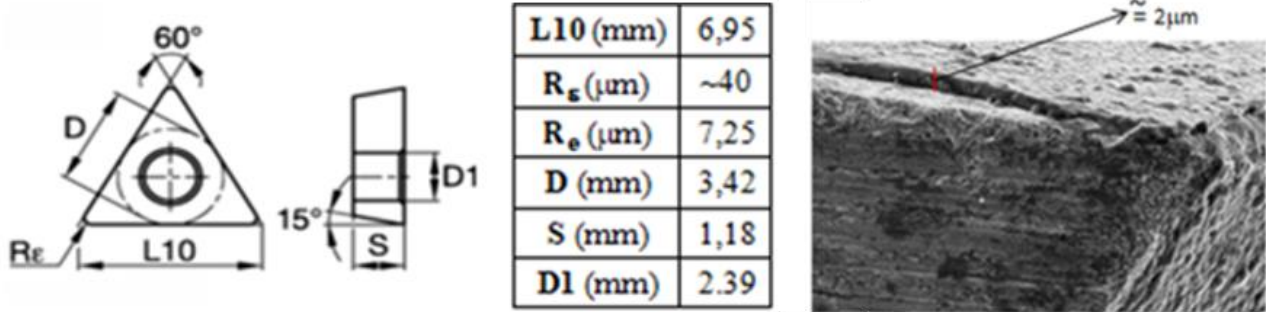
2.1 Kesici Takım ve İş Parçası

Çalışmada, havacılık ve dental uygulamalarda sıklıkla tercih edilen Ti6Al4V iş parçası kullanılmıştır. Kesme deneylerinde kullanılmak üzere iş parçasının boyu 42 mm ve çapı 10 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. İş parçasını pense geçirebilmek için, yaklaşık 20 mm' lik kısmının çapı 6 mm olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Deneylerde kullanılan Ti6Al4V alaşımının a) boyu b) çapı c) pense bağlı hali

Kesme ve doğrulama deneylerinde kullanılan kesici takım (I. takım) malzemesi WC olup, üzerinde yaklaşık 2 μm TiAlN kaplama mevcuttur. Takım tutucu, yanaşma açısı 90° olacak şekilde tasarlanmıştır. I. takımın talaş açısı sıfır ve boşluk açısı 15° olup, burun yarıçapı yaklaşık 40 μm , kenar yarıçapı ise yaklaşık 7.25 μm olarak ölçülmüştür (Şekil 4).

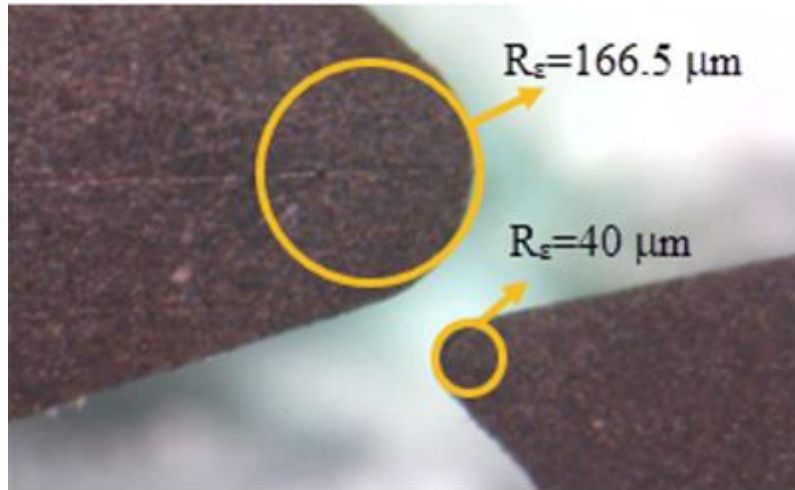


Şekil 4. Doğrulama deneylerinde kullanılan kesici takım (I. takım) üzerindeki ölçümler ve SEM görüntüsü

Kesme deneylerinde takım geometrisinin etkisini incelemek adına iki farklı kesici takım kullanılmıştır (Çizelge 1). Her iki kesici takımın kenar ve burun yarıçap değerleri haricinde diğer parametreleri, malzemesi ve kaplaması aynıdır. Bu takımlara ait mikroskop görüntülerinde burun yarıçapı farklılığı çok net anlaşılmaktadır (Şekil 5).

Çizelge 1. Kesme deneylerinde kullanılan iki farklı takımın geometrik özellikleri

	I.takım	II.Takım
Kenar Yarıçapı	R _e =7.25 μm	R _e =12 μm
Burun Yarıçapı	R _e =40 μm	R _e =166.5 μm



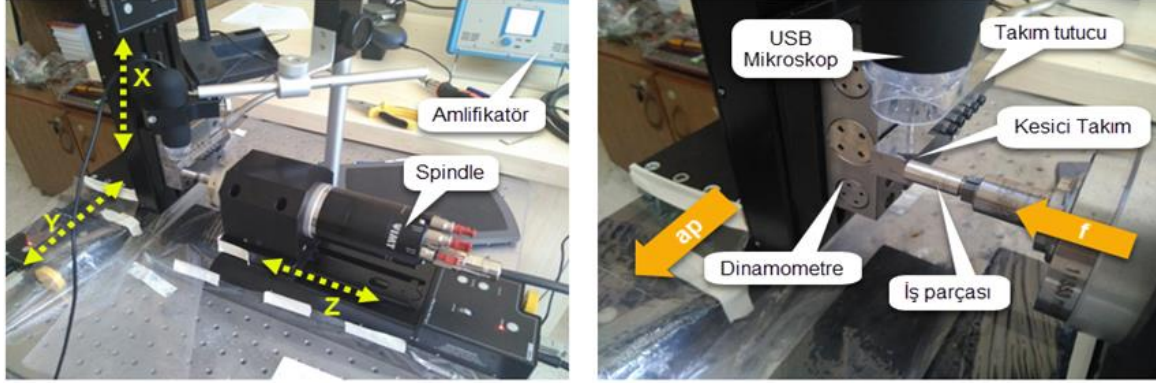
Şekil 5. İki farklı kesici takımın burun yarıçaplarının kıyaslanması

2.2 Deney Düzenegi

Çalışmada kesici takım geometrisinin kesme işlemine etkisini gözlemlemek adına üç farklı ilerleme hızında (10 $\mu\text{m}/\text{dev}$, 20 $\mu\text{m}/\text{dev}$, 40 $\mu\text{m}/\text{dev}$) kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

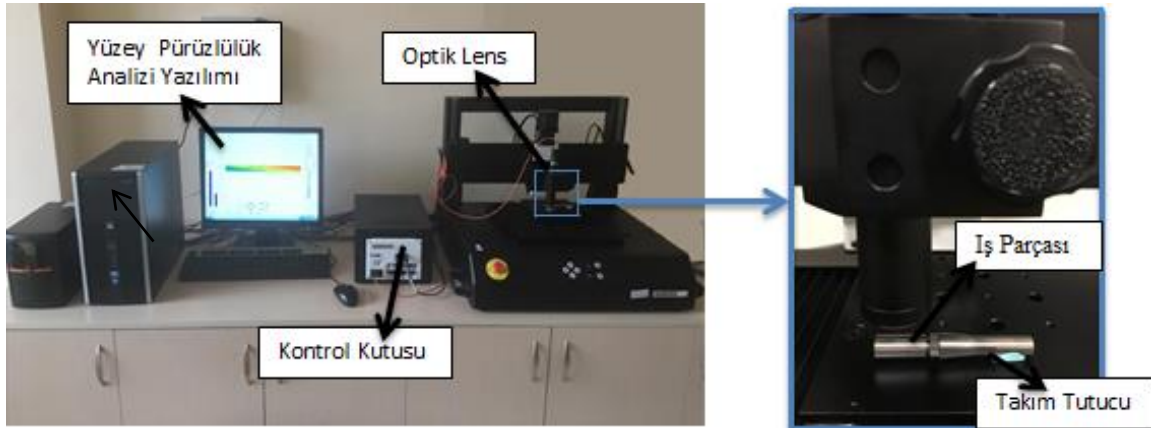
Çalışmada mikro tornalama deneyleri için özel olarak hazırlanmış bir deney düzenegi kullanılmıştır (Şekil 6). Deney düzeneginde, iş parçasını pens yardımıyla fener miline sabitlemek için kompresörden elde edilen basınçlı hava kullanılmıştır. Mikro step motorla desteklenen eksen

hareketleri ve Fener milinin devir ayarı, bilgisayar yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Fener mili maksimum 60000 dev/dk 'ya kadar çıkabilmekteyken, eksen hareketlerinin hassasiyeti ise $0.1 \mu\text{m}$ 'dir. Fener mili Z eksenini boyunca hareket ederken, kesme derinliği Y eksenini vasıtasıyla verilmektedir. Kesme kuvvetleri verilerini elde etmek amacıyla kullanılan mini dinamometre ise, X eksenini ifade eden kızak üzerine sabitlenmiştir. Kesici takım ise mini dinamometre üzerine yanaşma açısı 90° olacak şekilde mesnetlenmiştir. Kesme bölgesini gözlemek için ise bir USB mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 6. Mikro tornalama deney düzeneğinin genel görünümü

Mikro tornalama işleminde, takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi gözlemlenmiştir. Kesme deneyleri sonrasında, Nanovea optik profilometre cihazı kullanılarak üç farklı ilerleme hızında ($10 \mu\text{m}/\text{dev}$, $25 \mu\text{m}/\text{dev}$, $40 \mu\text{m}/\text{dev}$) numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır (Şekil 7).

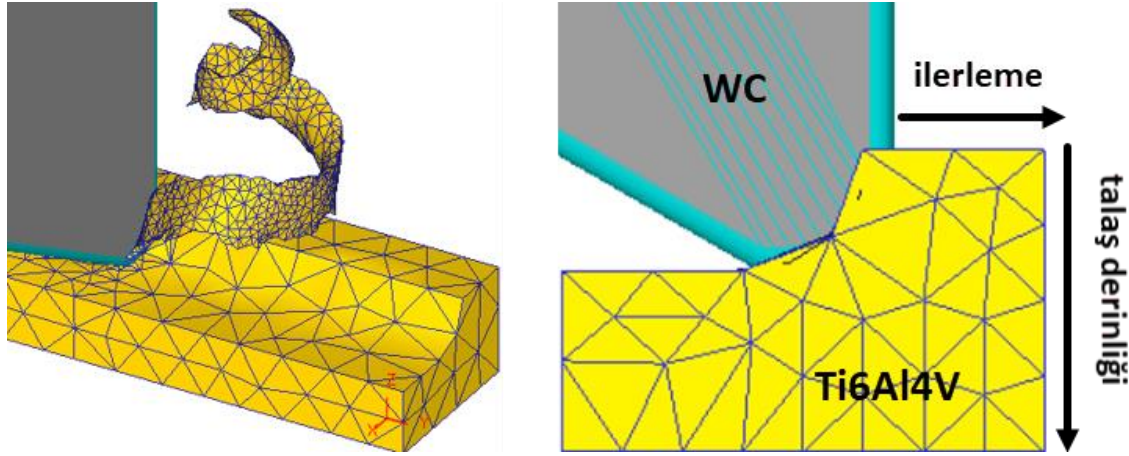


Şekil 7. İş parçası yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan optik profilometre cihazı

X ekseninde 1 mm mesafe ve y ekseninde 0.1 mm mesafe için adım değeri $1 \mu\text{m}$ alınarak yüzey boyunca tarama işlemi yapılmıştır. Tarama tipi çift yön olup, cihazın tarama hızı ise $0.5 \text{ mm}/\text{s}$ 'dir. İş parçası 90° döndürülerek, iş parçası yüzeyinde 4 farklı yerden yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Böylece iş parçasının yüzey pürüzlülüğüne, takım geometrisinin etkisi araştırılmıştır.

2.3 Nümerik Modelleme

Talaşlı imalat işleminin modellenmesinde malzeme modelinin doğruluğu, nümerik çözüm sonuçlarını büyük ölçüde etkilediği için oldukça önemlidir. Çalışmada DEFORM yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar çözümleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çözümler deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, malzeme modelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. DEFORM 2D yazılımında kesme kuvvetleri ve talaş formu dikkate alınarak malzeme modeli doğrulanmıştır. Modelleme işleminde iş parçası için 4111 adet, kesici takım için ise 1154 adet kuadratik eleman kullanılmış, iş parçası ve kesici takıma ait tane boyutu, mesh yapısı, Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Tornalama işleminin üç boyutlu ifadesi, iş parçası mesh yapısı ve talaş formu.

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı için talaş kaldırma çözümlerinde sıklıkla tercih edilen Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli kullanılmıştır (Denklem 1).

Şekil değiştirme yumuşaması ve sıcaklığa bağlı, J-C malzeme modeli (Calamaz ve ark., 2008) ve D parametresinin hesaplanması aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir.

$$\sigma = \left[A + B \varepsilon^n \left(\frac{1}{\exp(\varepsilon^a)} \right) \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \left[D - (1 - D) \left[\tanh \frac{1}{(\varepsilon + p)^r} \right]^s \right] \quad (1)$$

$$D = 1 - \left(\frac{T}{T_m} \right)^d \quad p = \left(\frac{T}{T_m} \right)^b \quad (2)$$

3D nümerik çözümler ile kesici takım burun yarıçapı farklılıklarının kesme kuvvetlerine etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan I. takımın burun yarıçapı 40 µm, II. takımın ise 166.5 µm idi. Modellemede, I. Takıma $R_\varepsilon=30, 50$ ve $100 \mu\text{m}$, II. takıma ise $R_\varepsilon=50$ ve $100 \mu\text{m}$ burun yarıçapları ilave edilerek burun yarıçapı farklılıklarının özellikle, $ap < R_\varepsilon$, $ap = R_\varepsilon$ ve $ap > R_\varepsilon$ olması durumlarında kesme işlemine etkisi gözlemlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

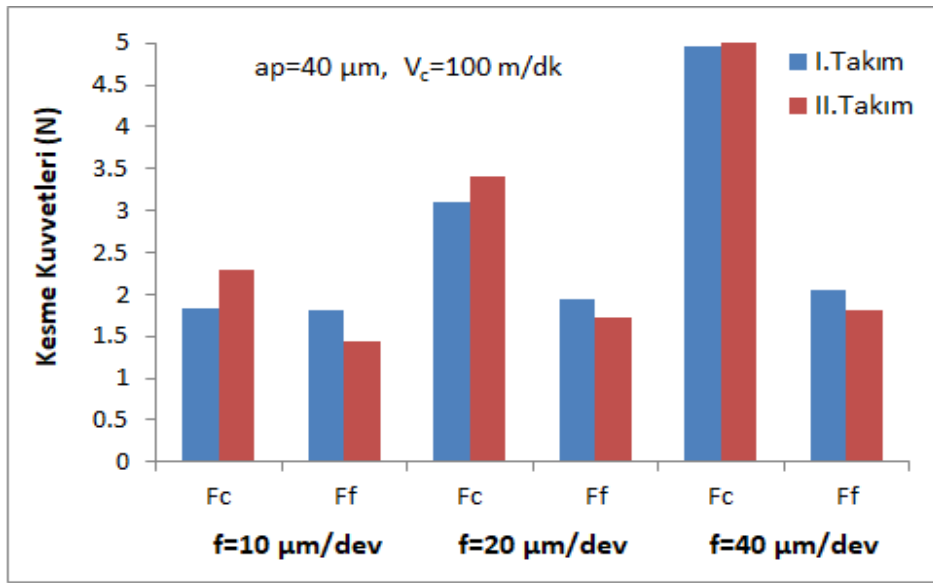
Geometrisi birbirinden farklı iki takım ile (I. takım $R_\varepsilon=7.25 \mu\text{m}$ ve $R_\varepsilon=40 \mu\text{m}$, II. takım $R_\varepsilon=12 \mu\text{m}$ ve $R_\varepsilon=166.5 \mu\text{m}$) mikro tormalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Takım geometrisinin kesme işlemine etkisini incelemek adına mikro tormalama deneylerinde aynı kesme parametreleri kullanılmıştır. Bunun yanında DEFORM-3D yazılımı ile takım geometrisindeki burun yarıçapı farklılığı modellenmiş ve burun yarıçapının kesme işlemine incelenmiştir.

Takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek adına iki farklı kesici takım kullanılarak üç farklı ilerleme hızında ($f=10 \mu\text{m/dev}$, $f=25 \mu\text{m/dev}$, $f=40 \mu\text{m/dev}$) mikro tormalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V iş parçası yüzeyinde dört farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalaması alınarak S_a ve S_z yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Böylece mikro tormalama işleminde takım geometrisi ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır.

3.1 İlerlemenin ve Burun Yarıçapının Kesme Kuvvetlerine Etkisi

Geometrisi farklı olan iki kesici takım ile mikro tormalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kesme derinliği ve kesme hızı sabit alınmış, üç farklı ilerleme hızı kullanılmıştır. Böylece ilerleme hızının ve takım geometrisinin kesme kuvvetlerine etkisi incelenmiştir (Şekil 9).

Her iki takımla yapılan kesme deneylerinde de F_c esas kesme kuvvetinin F_f ilerleme kuvvetinden büyük olduğu görülmüştür. İlerleme hızının artmasıyla F_c/F_f oranı artmaktadır.



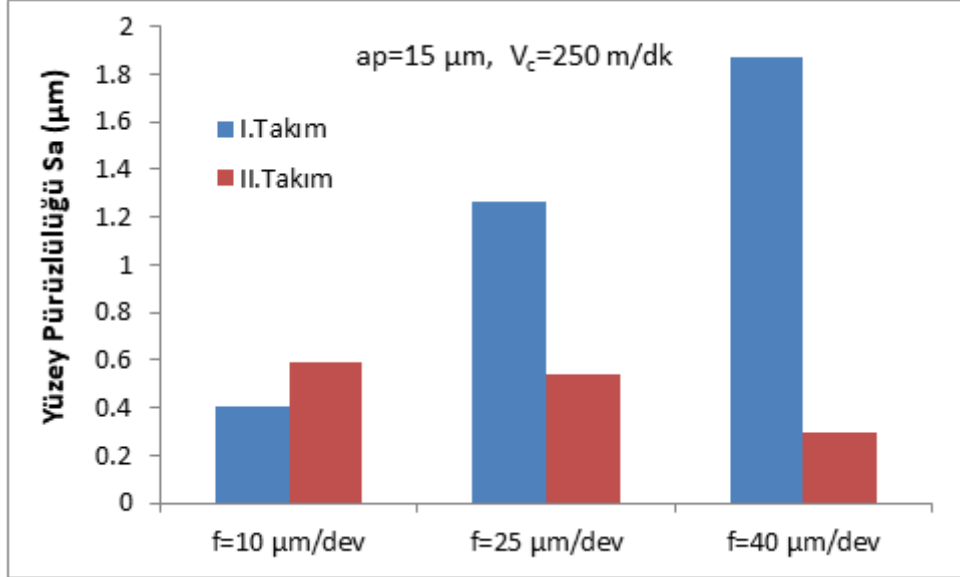
Şekil 9. Farklı ilerleme değerinde, her iki takıma ait deneylerdeki kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

Konvansiyonel tormalama işleminde burun ve kenar yarıçapının artması ile kesme kuvvetleri artmaktadır (Ma ve ark., 2012). Fakat mikro tormalama işleminde burun ve kenar yarıçapının artması ile F_c kuvveti artarken, F_f kuvveti azalmaktadır (Madariaga ve ark., 2014). Konvansiyonel tormalama işlemine göre meydana gelen bu farklılığın sebebi, kesme parametrelerinin takım geometrisine göre çok küçük değerler almasıdır. Mikro tormalama işleminde meydana gelen bu farklılık literatürde boyut etkisi olarak isimlendirilmektedir (Aslantaş ve Şahan, 2017).

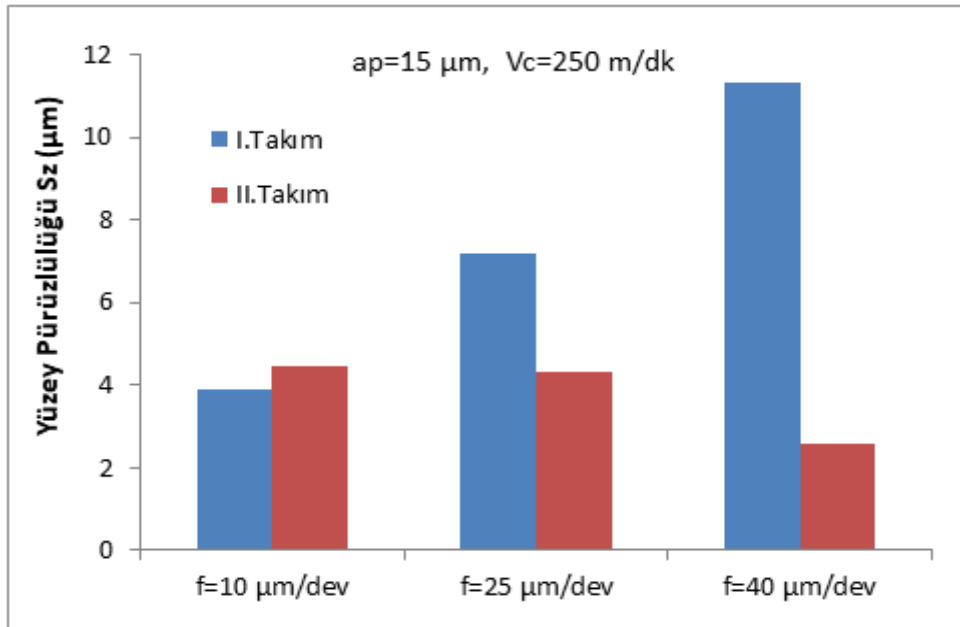
Mikro tormalama işleminde burun yarıçapının kesme derinliğinden büyük olması durumunda burun yarıçapının artması ile kesme kuvvetleri bir miktar azalmaktadır. Şekil 9'da görüldüğü üzere II. takım ile yapılan deneylerdeki F_f değerleri I. takıma kıyasla daha küçüktür. Aksine F_c değerlerinin daha büyük olmasının sebebi ise kenar yarıçapı değişiminin daha ağır basmasıdır. Kısacası F_c kuvvetinin değişiminde R_c 'nin, F_f kuvvetinin değişiminde ise R_c 'un daha etkili olduğunu söylemek mümkündür (Şekil 9). Düşük ilerleme hızlarında yapılan kesme işlemlerinde F_c ve F_f kuvvetlerinin birbirine çok yakın olmasının sebebi ise mikro tormalama işlemindeki boyut farklılığıdır. Burun ve kenar yarıçapının ilerleme hızıyla kıyaslanabilecek seviyede küçük sayısal değerler alması, bu boyut farklılığına sebebiyet vermektedir.

3.2 İlerlemenin ve Burun Yarıçapının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Mikro tornalama işleminde, yüzey pürüzlüğü ölçümleri için, geometrisi farklı 2 takım ile sabit $15 \mu\text{m}$ kesme derinliği, 250 m/dk kesme hızı ve üç farklı ilerleme hızında ($f=10 \mu\text{m/dev}$, $f=25 \mu\text{m/dev}$, $f=40 \mu\text{m/dev}$) yeniden kesme deneyleri yapılmıştır. Sonrasında iş parçası üzerinde x ekseninde 1 mm ve y ekseninde 0.1 mm mesafe için yüzey boyunca tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tarama sonucu elde edilen S_a (Şekil 10) ve S_z (Şekil 11) yüzey pürüzlülük değerleri grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 10. Üç farklı ilerleme değerinde, takım geometrisinin S_a (μm) değerine etkisi



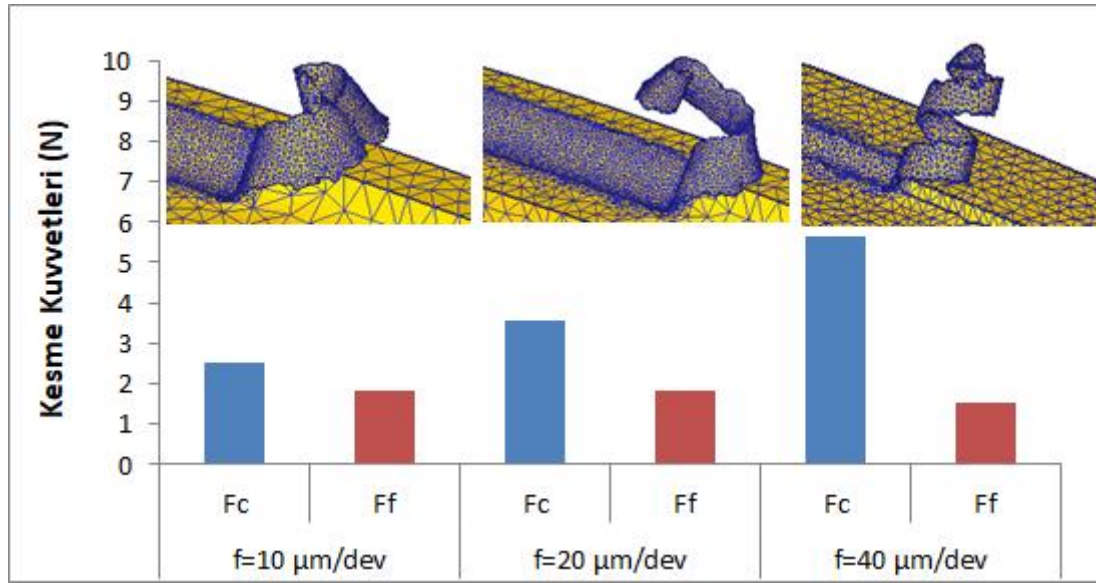
Şekil 11. Üç farklı ilerleme değerinde, takım geometrisinin S_z (μm) değerine etkisi

Şekil 10 ve 11'den anlaşıldığı üzere; I. takımın kullanıldığı kesme deneylerinden elde edilen iş parçasında S_a ve S_z yüzey pürüzlülük parametreleri, ilerleme hızı ile doğru orantılı şekilde artarken, II. takımın kullanıldığı kesme deneylerinden elde edilen iş parçasında S_a ve S_z yüzey pürüzlülük parametreleri, ilerleme hızı ile ters orantılı olarak azalmıştır. Burada takım geometrisine

değişiminden kaynaklı iki farklı etkiden söz etmek mümkündür. I. takımın burun yarıçapı, kesme derinliğinden büyük ($40 \mu\text{m} > 15 \mu\text{m}$), kenar yarıçapı ise üç farklı ilerleme hızından da küçüktür ($7.25 \mu\text{m} < 10 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$). II. takımın ise burun yarıçapı konvansiyonel tornalama işlemine zıt bir şekilde kesme derinliğinden oldukça fazladır ($166.5 \mu\text{m} > 40 \mu\text{m}$). Kenar yarıçapı ise ilerleme hızlarına yakın değerdedir ($10 \mu\text{m} < 12 \mu\text{m} < 25 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$). S_a ve S_z yüzey pürüzlülük parametreleri, I. Takım için konvansiyonel tornalama işlemine benzer bir etki gösterdiğinden ilerleme hızı ile artmıştır. Bunun sebebi burun ve kenar yarıçapı değerlerinin çok küçük olmasıdır. II. takım için ise, ilerleme hızının artmasıyla S_a ve S_z yüzey pürüzlülük parametrelerinin azalması, mikro tornalamada boyut etkisinin bir sonucudur. İlerleme hızının kritik bir değerinden sonra ilerleme hızının azalmasıyla yüzey pürüzlülük parametresi artmaktadır. Yani burun yarıçapının ilerleme hızına göre çok büyük değerler alması ile S_a ve S_z parametreleri ilerlemenin artmasıyla beklenen aksine azalabilmektedir.

3.3 Burun Yarıçapı Etkisinin Modellenmesi

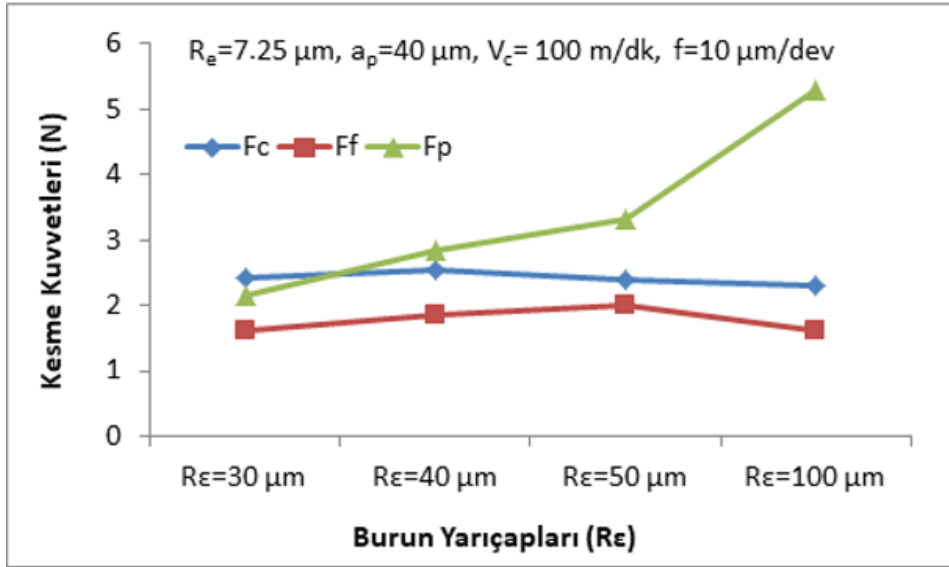
Çalışmanın bu kısmında öncelikle I. takım kullanılarak kesme kuvvetlerinin farklı ilerleme hızlarına göre değişimi incelenmiş, talaş oluşumu 3 boyutlu olarak modellenmiştir (Şekil 12). İlerleme hızının artmasıyla F_c kuvvetinde lineer bir artış gözlenirken, F_f kuvveti azalma eğilimindedir.



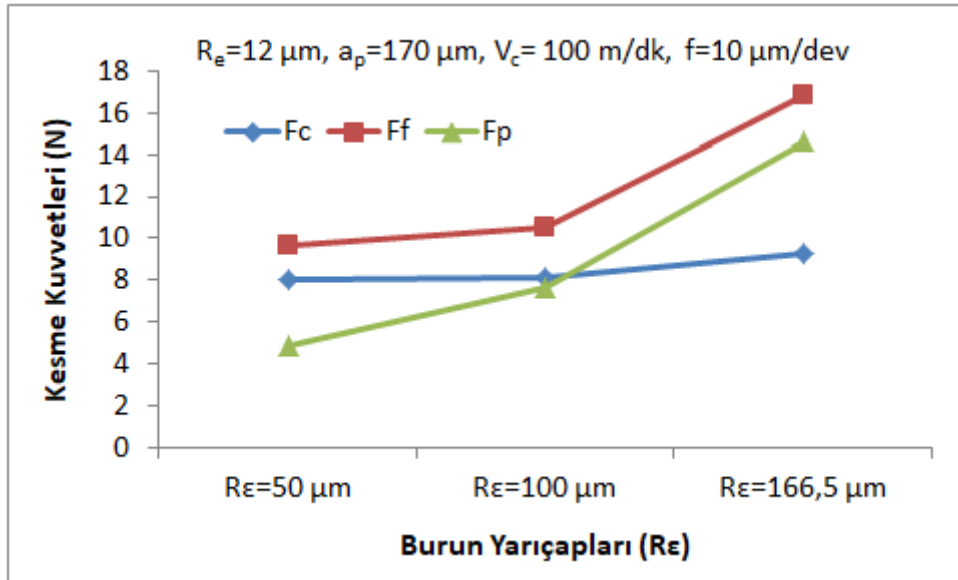
Şekil 12. Kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına göre değişimi ve 3 boyutlu talaş oluşumu

Kesme deneylerinde kullanılan I. takımın kenar ve burun yarıçapı $R_e=7.25 \mu\text{m}$, $R_e=40 \mu\text{m}$ idi. Burun yarıçapı farklılığının kesme kuvvetlerine etkisi inceleneceğinden, sabit kesme derinliği, kesme ve hızında $R_e = 30, 40, 50, 100 \mu\text{m}$ olmak üzere 4 farklı burun yarıçapı modellenmiştir. Bu değerlerinden seçiminde kesme derinliği referans alınmıştır. Burun yarıçapı ile kesme derinliği ilişkili olduğundan kesme derinliğine eşit, küçük ve büyük değerler alınmasına özen gösterilmiştir. Sabit kesme ve ilerleme hızında DEFORM-3D yazılımında gerçekleştirilen modellemeler sonucu kesme kuvvetleri sonucu grafiksel olarak sunulmuştur (Şekil 13).

II. takımın ise kenar yarıçapı $R_e=12 \mu\text{m}$ sabit kalmak üzere, sabit kesme derinliği, kesme ve hızında, burun yarıçapı $R_e=50, 100, 166.5 \mu\text{m}$ olarak modellenmiş ve burun yarıçapı farklılığı kesme kuvvetleri açısından kıyaslanmıştır (Şekil 14).



Şekil 13. Kesme kuvvetlerinin kesici takım burun yarıçapı ile değişimi ($a_p=40 \mu\text{m}$)



Şekil 14. Kesme kuvvetlerinin kesici takım burun yarıçapı ile değişimi ($a_p=170 \mu\text{m}$)

Şekil 13'te burun yarıçapının kesme derinliğine kıyasla eşit ve küçük ($R_e \leq a_p$) olduğu nümerik modellemelerde, konvansiyonel tormalama işlemine benzer bir etki görüldüğünden, burun yarıçapının artmasıyla kesme kuvvetlerinde de artış gözlenmiştir. Burun yarıçapının $R_e=50 \mu\text{m}$ olduğu modellemelerde ise, R_e , a_p 'den büyük olduğu için, kesici ucun burun kısmı ile iş parçası daha az temas durumundadır. Bu sebeple F_c kuvveti azalırken, F_f kuvveti artış eğilimine bir süre daha devam etmektedir. Burun yarıçapının $R_e=100 \mu\text{m}$ olduğu modellemelerde ise R_e 'nin a_p 'den fazlasıyla büyük olması ile kesici ucun burun kısmı iş parçasına çok daha az temas etmektedir. Bu sebeple F_c ve F_f azalmıştır. Mikro tormalama ile konvansiyonel tormalama işleminin farklarından en önemlisi boyut etkisinden kaynaklanan fiziksel değişimlerdir. F_p kuvvetinin değişimi incelendiğinde ise radyal yönde işlenmiş yüzeye dik etki eden bu kuvvet, ilerlemenin artmasıyla artmaktadır. R_e 'nin a_p 'den büyük değerler almasıyla F_c azalırken F_p 'nin arttığı gözlenmiştir.

Şekil 14'de gösterildiği gibi II. takım kullanılarak gerçekleştirilen modellemelerde, burun yarıçapı değerleri kesme derinliğinden ($a_p=170 \mu\text{m}$) küçüktür. Bu sebeple burada konvansiyonel

tornalama işlemine benzer bir etki söz konusudur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, (Asad ve ark., 2014) beklenildiği üzere burun yarıçapının artmasıyla kesme kuvvetleri artmıştır (Şekil 12). Burun yarıçapının artmasıyla F_f kuvvetindeki artış oranı F_c kuvvetindeki artışa göre daha belirgin olmuştur. Bu durum da kesme işleminin, kayma mekanizmasından ziyade, kazınma mekanizmasıyla gerçekleştiği şeklinde yorumlanabilir (Madariaga ve ark., 2014; Aslantaş ve Şahan, 2017) Burun yarıçapı arttıkça pasif kuvvet de artmaktadır. R_e/a_p oranının 1'e yaklaşması F_p 'nin F_c 'ye nazaran büyük değerler almasına sebep olmaktadır (Jagadesh ve Samuel, 2015; Ducobu ve ark., 2017).

4. SONUÇ

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının mikro tornalanmasında farklı ilerleme hızlarında burun yarıçapının kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Kesme kuvvetlerine göre malzeme modeli doğrulandıktan sonra 3D modelleme ile farklı burun yarıçapları için çözümler yapılmıştır. Ayrıca burun yarıçapının yüzey pürüzlülüğüne etkisi de deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- İlerlemenin artması F_c kuvvetinin artmasına, F_f kuvvetinin ise azalmasına neden olmaktadır.
- Mikro tornalama işleminde burun yarıçapı, kesme derinliğine yakın ve büyük değerler aldığı için, konvansiyonel tornalama işleminden farklı olarak, burun yarıçapı arttıkça, kesme kuvvetleri azalmaktadır. Bu, boyut etkisinin bir sonucudur.
- Burun ve kenar yarıçapı farklı iki takımla ve aynı parametrelerle yapılan kesme işlemleri karşılaştırıldığında, II. takımın F_c kuvveti, I takımın ise F_f kuvveti daha büyüktür. Bu sonuç, F_c kuvvetinde R_e 'nin, F_f kuvvetinde ise R_e 'un değişiminin daha etkili olduğu şeklinde yorumlanmıştır.
- Mikro işlemede burun yarıçapı, kesme derinliğine göre çok büyük değerler almaktadır. Bu da yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olmasına, bir diğer deyişle daha düzgün bir yüzey oluşumuna sebep olmaktadır.
- Mikro tornalama işleminde çok küçük ilerleme değerleri kullanılmaktadır. Kritik bir ilerleme değerinden sonra ilerleme azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir. Özellikle II. takımda, ilerleme hızı 40 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'den, 10 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e düşüldükçe yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür.

5. KAYNAKLAR

- Asad M., Mabrouki T., Ijaz, H., Khan, M., A., Saleem, W., On the Turning Modeling and Simulation, 2D and 3D FEM Approaches. *Mechanics & Industry*, 15, 427-434, 2014.
- Aslantaş K., Şahan Ö., Ti6Al4V Alaşımının Mikro İşleme Şartlarında Yüksek Hızda Tornalanması, 8. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu, 2-4 Kasım, 2017, Antalya.
- Calamaz M., Coupard D., Girot F., A New Material Model For 2D Numerical Simulation of Serrated Chip Formation When Machining Titanium Alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 275-288, 2008.
- Chunxiang C., Baomin H., Lichen Z., Shuangjin L., Titanium Alloy Production Technology, Market Prospects and Industry Development. *Materials and Design*, 32, 1684-1691, 2011.
- Çakır M.C., Modern Talaşlı İmalatın Esasları, Uludağ Üniversitesi Yayınları, Yayın No:140, Bursa, 1999.

- Ducobu F., Riviere-Lorphevre E., Filippi E., On the Importance of the Choice of the Parameters of the Johnson-Cook Constitutive Model and Their Influence on The Results of a Ti6Al4V Orthogonal Cutting Model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 122, 143-155, 2017.
- Fang F.Z., Liu Y.C., On Minimum Exit-Burr in Micro Cutting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14, 984-988, 2004.
- Filiz S., Conley C.M., Wasserman, M.B., Özdoğanlar, O.B., An Experimental Investigation of Micro Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro Endmill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 1088-1100, 2007.
- Jagadesh T., Samuel G., L., Mechanistic and Finite Element Model for Prediction of Cutting Forces During Micro-Turning of Titanium Alloy. *Machining Science and Technology*, 19, 593-629, 2005.
- Li H., Lai X., Li C., Feng J., Ni J., Modelling and Experimental Analysis of the Effects of Tool Wear, Minimum Chip Thickness and Micro Tool Geometry on the Surface Roughness in Micro-End-Milling. *Journal of Micromechanical and Microengineering*, 18, 1-12, 2008.
- Ma J., Yong Y. Lei S., 3D FEM Investigation of the Effects of Nose Radius and Edge Radius on Turning of AISI 4140, *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress*, November, 2012, Houston, pp: 9-15.
- Madariaga A., Esnaola J. A., Fernandez E., Arrazola P. J., Garay A., More F., Analysis of Residual Stress and Work-Hardened Profiles on Inconel 718 When Face Turning with Large-Nose Radius Tools. *International Journal Advanced of Manufacturing Technology*, 71, 1587-1598, 2014.
- Özel T., Sima M., Finite Element Simulations of High-Speed Machining Ti-6Al-4V Alloy Using Modified Material Models. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 38, 49-56, 2010.
- Schmidt J., Tritschler H., Micro Cutting of Steel. *Microsystem Technologies*, 10, 167-174, 2004.
- Ucun İ., Inconel 718 Malzemesinin Mikro İşlenebilirliği ve Kaplama Malzemesinin Etkisinin Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Basılmış), 2013.

Araştırma Makalesi / Research Article

Direnç Punta Kaynak Robotlarında KSR ve IQR (Adaptif Punta) Modun Spot Punta Performansının Karşılaştırılması

Mustafa YAZAR^{1*}, Milat KUL², Melih ÇAYLAK³, Ali Kemal ALP⁴

¹ AR&GE Merkezi, Şahinkul Makina ve Yedek Parça Sanayii ve Ticaret A.Ş. Bursa, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9927-3268>, yazatmustafa08@gmail.com

² AR&GE Merkezi, Şahinkul Makina ve Yedek Parça Sanayii ve Ticaret A.Ş. Bursa, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0732-9354>, milat.kul@sahinkulmakina.com.tr

³ AR&GE Merkezi, Şahinkul Makina ve Yedek Parça Sanayii ve Ticaret A.Ş. Bursa, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4148-0341>, melih_caylak@hotmail.com

⁴ AR&GE Merkezi, Şahinkul Makina ve Yedek Parça Sanayii ve Ticaret A.Ş. Bursa, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4770-4123>, alpalkemal@gmail.com

Geliş/ Recieved: 07.11.2020

Kabul / Accepted: 02.02.2021

ÖZET: Bu çalışmada, MFDC trafolu direnç punta kaynak robotlarında akım ve kaynak zamanının, KSR (Akım kontrollü) ve IQR (adaptif) mod seçeneğinde punta çekirdek çapına ve deformasyonuna etkisi incelenmiştir. Direnç punta kaynak robotlarındaki çevrim süresini düşürmek için KSR ve IQR mod için optimum parametreler belirlenmiştir. Proje aşamasında, doğru parametrelerle çalışarak emek, zaman ve maliyet minimuma indirmeye çalışılmıştır. Punta kaynak operasyonunda bir adet punta için harcanan sürenin düşük olması karlılık oranını arttıracaktır. Bu proje ile ayrıca, seri üretim şartlarında parça üretimi denemesi yapılarak, ana sanayinin şartnamelerle belirlediği kalitede, çekirdek çapı, çekirdek nüfuziyeti ve çekirdek derinliği elde edilmesi amaçlanmıştır. Referans sac kalınlığı, punta elektrot tipi ve kuvvet sabit tutulmuş olup belirlenen akım ve kaynak zamanı değerlerinin KSR ve IQR modlu seri üretim şartlarında, direnç punta kaynak robotlarında, punta kaynağı yapılarak parçalar tahribatsız muayene testine tabi tutulmuştur. Puntaların çekirdek derinliği ve çekirdek çapları ayrıca ölçülmüştür. Ayrıca literatürde ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yapılan bu çalışma ile, servo motorlu direnç punta kaynak robotlarında operasyon süresinin minimuma düşürülmesi sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Punta kaynağı, Akım değeri, Kaynak zamanı, Punta çekirdek çapı.

*Sorumlu yazar / Corresponding author: yazatmustafa08@gmail.com

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Yazar, M., Kul, M., Çaylak, M., Alp, A. K. (2021). Direnç Punta Kaynak Robotlarında KSR ve IQR (Adaptif Punta) Modun Spot Punta Performansının Karşılaştırılması. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 2(1), 26-36.

Comparison of KSR and IQR (Adaptive Spot) Modes for Spot Performance in Resistance Spot Welding Robots

ABSTRACT: In this study, the effect of current and welding time on spot nugget diameter and deformation in KSR (Current controlled) and IQR (adaptive) mode options in resistance spot welding robots with MFDC transformer was investigated. Optimum parameters for KSR and IQR mode were determined to reduce cycle time in resistance spot welding robots. During the study, labour, time and cost were attempted to be minimized by working with the correct parameters. The lowest time for one spot in welding operation increases profitability. In this project, spot weld appearance, nugget diameter measurement and cavity depth within the quality are determined by the specifications of the main industry by making part production trials under mass production conditions. Reference sheet thickness, electrode type and force were kept constant, and spot-welded parts were subjected to the non-destructive test in the resistance spot welding robots under the KSR and IQR mode mass production conditions of the current and welding time values that were determined. The spot weld depth and core diameters of the centers were also measured. In addition, no similar study was found in the literature. With this study, the operation time of the resistance spot welding robots with servo motor has been reduced to a minimum.

Keywords: Spot welding, Current value, Welding time, Spot core diameter.

1. GİRİŞ

Direnç punta kaynağı günümüzde birçok endüstri alanında yaygın olarak kullanılan, farklı ya da aynı kalınlıktaki sacların bir veya daha fazla nokta ile birleştirilmesini sağlayan en eski kaynak tekniklerinden birisidir. Özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bu kaynak tekniğinde kaynak işlemini etkileyen parametreler; akım değeri, kaynak zamanı ve elektrot baskı kuvvettir. Bu kaynak parametreleri ile istenen çekirdek çapının oluşturulması amaçlanmaktadır. Otomotiv ana sanayi sac kalınlığına göre istediği çekirdek çapını şartnamelerle belirtmektedir.

Bu şartname şartlarına bağlı kalınarak istenilen kaynaklı bağlantılar için kullanılan punta kaynak robotları AC (Alternative Current) ve MFDC (Mid Frequency Direct Current) trafolu punta kaynak robotları birçok sanayi kuruluşları tarafından kullanılmaktadır. Yaygın olarak Servo motor sistemli kaynak makineleri tercih edilmektedir (Buchanan, 2003). Bunların arasındaki fark; AC trafolu kaynak robotlarının elektrik frekans değeri 50 Hz, MFDC trafolu kaynak robotlarının kaynak voltaj frekansı 1000 Hz. olarak kullanılmaktadır (Anonymous, 2020).

Elektrik nokta direnç kaynağında ısı girdisi veya enerjisi (Q , Joule), kaynak akımı (I , Amper), direnç (R , ohm) ve t (sn) kaynak zamanına bağlıdır (Zhang ve Senkara, 2006) ve Q enerjisi kaynak akımı, kaynak akım uygulama zamanı ve baskı kuvveti ile doğru orantılı olarak ilişkilidir. Elektrodun baskı kuvveti uyguladığı sac yüzeyi ve elektrod baskı kuvveti uygulanan iki sac arasında kalan ara yüzeyde direnç değerleri önemlidir. Baskı kuvveti uygulayan elektrodun geometrisi ve elektrod baskı yükü uygulanan parça yüzeyinin durumu, yüzey direncini ve elektrod baskı kuvvetini etkilemektedir. Yüzey direnci ve elektrod baskı kuvveti arasında ters bir orantı vardır (Babu ve ark., 2001). Teorik çalışmalara göre, yüksek elektrot baskı kuvveti kolaylıkla sıçramaya neden olabilir. Ayrıca, elektrod baskı kuvveti uygulanan iş parçası arasındaki ve sac-sac ara yüzeyindeki dinamik direnç değerlerini düşürebilir ve ilk erime noktasının ortaya çıktığı zamanı değiştirebilir, ilk erime noktası ile sıcaklık tepe değerinin görüldüğü zamanlar arasındaki süreyi uzatabilir. Uygulanan yüksek elektrot baskı kuvveti, başlangıçtaki küçük çekirdek çapını büyümesine yol açar. Bu nedenle, optimum değerlerin bulunması ve kullanılması kaynak

sektöründe ve özellikle otomotiv sektöründe önemlidir (Zhou ve Cai, 2014; Anastassiou ve ark., 1990). Yükseltilebilen elektrod baskı kuvveti ve kaynak enerji girdisi (Q) ile nokta kaynak çekirdek çapı arasındaki doğru orantılı bir ilişki olması yanında bu değer baskı kuvveti arttıkça belirli bir değerden sonra yatay olarak devam etmekte ve hatta düşmektedir (Zhou ve Cai, 2014b). Kaynak parametreleri (kaynak süresi, kaynak akımı, elektrod kuvveti ve sac metal kalınlığı), dinamik direnç eğrisinin tipik özellikleriyle temsil edilen kaynak koşulları ve kaynak kalitesi indeksleri (çekirdek çapı, çekirdek nüfuziyeti ve çekirdek derinliği) arasındaki ilişkileri kurarak, bu unsurların proses koşullarının değişimine duyarlılığı konusunda çeşitli çalışmalarda mevcut olup, genel kanı bu parametrelerin oldukça karmaşık olduğudur ve dinamik direnç değişimi malzeme dışında elektrod baskı kuvvetinin doğrudan bir etkisidir (Quafi, 2010; Cho ve ark., 2001).

Punta kaynak optimizasyonunda, kaynak zamanı sabit tutularak 3 farklı akım değeri ve akım değeri sabit tutularak 3 farklı kaynak zamanı değeri verilerek KSR (Constant Current Regulation-Konstant Strom Regelung) ve değişken IQR (Inter Quartile Range) mod'da spot punta operasyonu gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları için tahribatsız muayene ile çekirdek çapı ölçümü yapılarak akım değeri ve kaynak zamanı değerinin 2 mod da çekirdek çapına etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmamızda, MFDC trafolu Hyundai marka punta kaynak robotu kullanılmıştır. Çok farklı robot kol üreten markalar olmasına rağmen çalışma prensipleri aynıdır. Bu çalışmada kullanılan 1.1 mm FEE 340 F çeliğinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. KSR mod robota verilen değerler ile spot punta kaynak işlemini yaparken, IQR mod ise robot verilen kaynak parametrelerini ihtiyaca göre ayarlamaktadır. Kaynak operasyonu için gerekli olan akım değeri ve kaynak zamanını, IOR mod, adaptif punta özelliği ile artırıp veya azaltmaktadır; bu mod ile adaptif punta aktif olarak çalışır.

Çizelge 1. 1.1 mm FEE 340 F Erdemir çeliğine ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)			Çekme Dayanımı (MPa)			Uzama (%)	
FEE 340 F	340-420			410 (Minimum)			22	
Element	C	Mn	P	S	Si	Nb	V	Al
Ağ. % Oranı	0.12	1.5	0.03	0.03	0.5	0.10	0.10	0.015

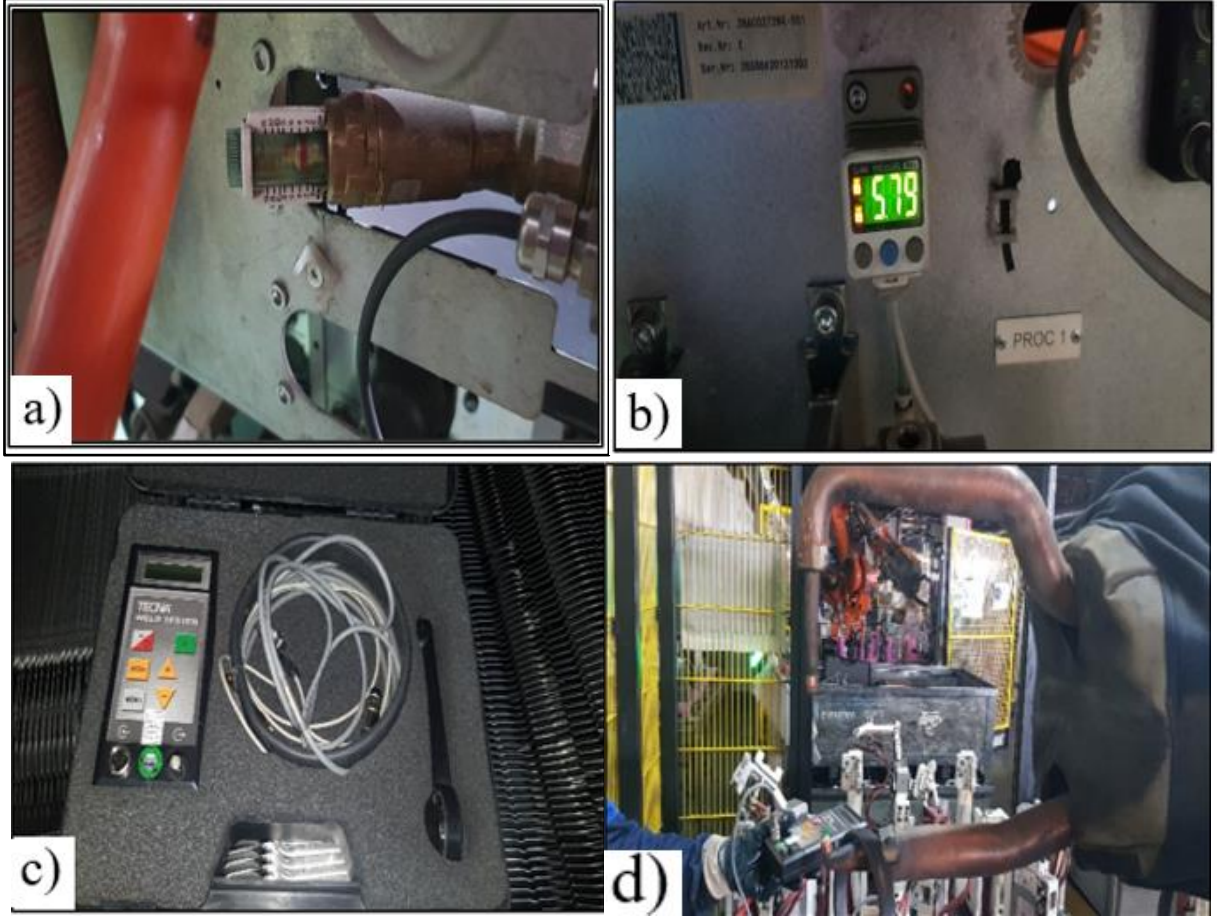
2.1 Robot Punta Optimizasyon Hazırlığı

Şekil 1'de, direnç punta kaynak robotlarında kaynak operasyonu işlemine geçmeden önce yapılması gereken kontrollerin görselleri verilmiştir. Kaynak işlemi için, direnç punta kaynak robotunun punta optimizasyonu öncesi, a) su ve hava debisinin kontrolü, b) gan (elektrod torçu) kuvvet ve akım değeri kontrolü ve c) gan eksenellik kontrolü olarak üç aşamalı işlemler yapılmıştır.

Robota gelen soğutma suyu debisi 6 lt/dk olarak ve hava basıncı ise 5 Bar olarak ayarlanmıştır; eğer istenilen su debisi sağlanamazsa düşük dayanımlı “yanık punta” olarak adlandırılan kalite problemi meydana gelmekte ve hava basıncı yetersiz olursa spot punta operasyonu yapmak için kullanılan fikstür ve fikstür klempleri açma kapama görevini yerine getiremediği için seri üretim esnasında duruşlara neden olmaktadır. Gan kuvvet ve akım kontrolü, spot punta operasyonu için robota verilen kuvvet ve akım değeri kontrolü TECNA marka kaynak test cihazı ile yapılmıştır. Punta görsellik ve çekirdek çapı için gan eksenellik kontrolünde üst ve alt çenenin birinin karşılanması kaynak işleminden önce kontrol edilmiştir.

Punta kaynağı özel proses olduğu için malzemenin fiziksel, kimyasal özellikleri farklı olabilir

bu yüzden seri üretim şartlarında takibi yapılmalıdır. Direnç punta kaynak robotlarında kaynak operasyonu işleminde punta kaynağı üst bölgesinde yığılma çapağı ve punta kaynağı hattında birleştirilen saclar arasında sıçranta şeklinde çapak oluşumu istenmemektedir. Kaynak esnasında oluşan çapaklar çalışan operatör için iş güvenliği riski oluşturmakla birlikte, kaynak fikstürlerine sıçrayan punta çapağı kullanılan alet ve ekipmana zarar vermektedir



Şekil 1. a) Su debisi göstergesi b) Hava Basınç göstergesi, c) TECNA kaynak test cihazı, d) Elektrot baskı kuvveti ve kaynak akımı ölçümü

2.2 Spot Kaynak Robotlarında Punta Parametreleri

Direnç punta kaynak robotunda punta optimizasyonunda akım değeri, kaynak zamanı ve elektrod baskı kuvveti ana parametrelerdir. Şekil 2’de bu çalışmada kullanılan ve referans sac kalınlığına göre şartnameden gelen değerler gösterilmiştir. Direnç punta kaynak robotlarında bir adet punta atmak için çok sayıda parametreler kullanılır; bu parametreler, yaklaşma zamanı, sıkma (baskı) zamanı, kaynak zamanı, soğutma zamanı ve ayrılma zamanı olup birbirini takip eden beş aşamadan meydana gelmekte olup Şekil 3’te görseli verilmiştir. Şekil 2’de verilen değerlere göre 1 mm kalınlığındaki sac için ortalama 8.2 kA kullanılması gerekmektedir ancak akımın etkisini de çalışmak için, bu çalışmada, 7, 9 ve 11 kA değerleri seçilmiştir.

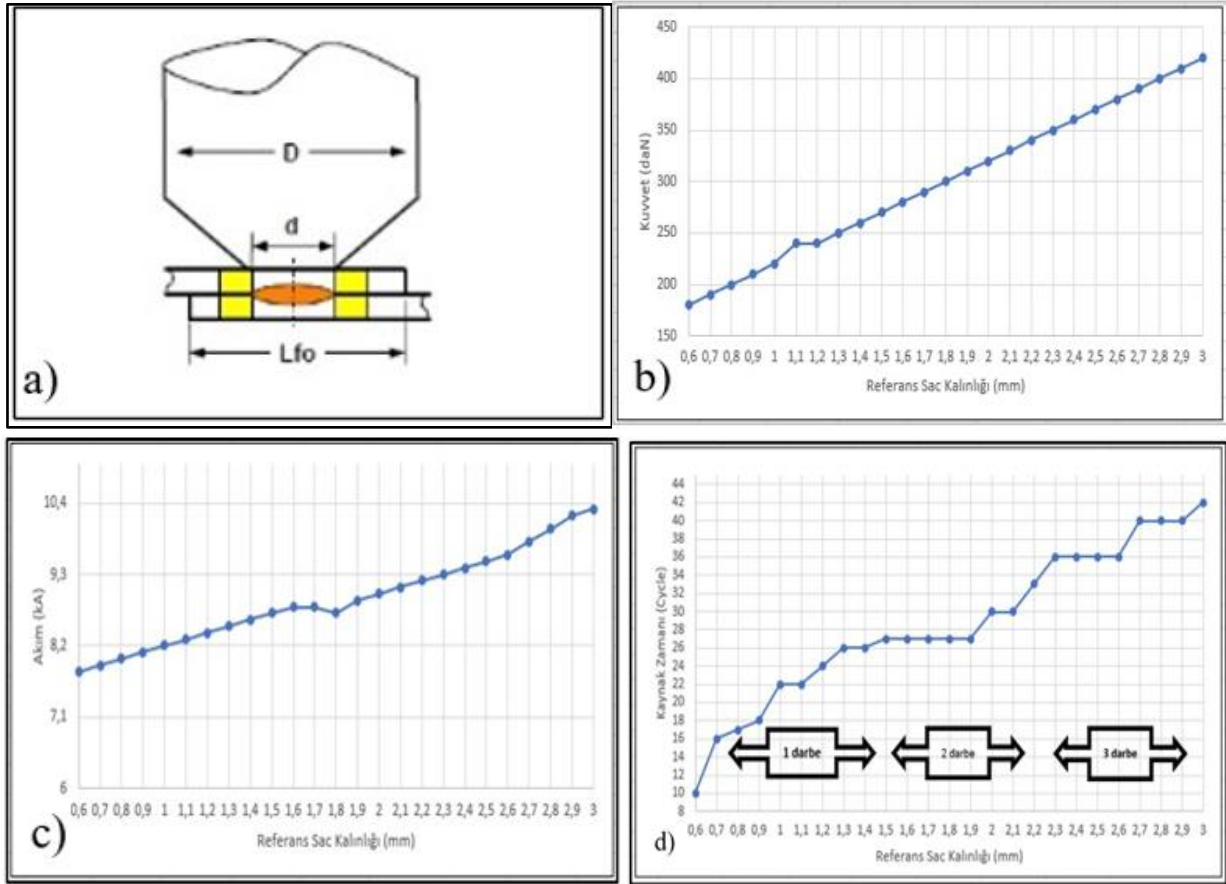
IQR ve KSR modlarında farklı akım değerleri kullanılmıştır. Çizelge 2 ve 3’te ana akım, ön akım ve kaynak zamanları ayrı olarak verilmiş ve KSR mod ile akım miktarı çalışılırken, IQR mod ile kaynak zamanı 800 ms seçilmesine rağmen IQR mod ayarları otomatik olarak değiştirildiği için kaynak zamanlarında kısmi değişiklikler kaynak operatörünün iradesi dışında değişmiştir. Ancak, her iki mod ile kaynak akımının etkisi çalışılabilmiştir.

Çizelge 2. KSR mod ile akım değeri punta optimizasyonu değerleri

Spot	Ana Akım (kA)	Ön Akım ve Son Akım (kA)	Kaynak Zamanı (ms)	İmpuls
Spot 43	7	7	1100	2
Spot 45	9	9	1100	2
Spot 44	11	11	1100	2

Çizelge 3. IQR mod ile akım değeri punta optimizasyonu değerleri

Spot	Akım (kA)	Kaynak Zamanı (ms)	IQR Akım (kA)	IQR Kaynak Zamanı (ms)
Spot 43	6.2	800	8.08	920
Spot 45	8.2	800	10.59	910
Spot 44	10.2	800	12.97	880



Şekil 2. a) Bu çalışmada kullanılan nokta kaynak kep görseli, b) Referans sac kalınlığına göre elektrot kuvvet değeri seçimi diyagramı, c) Referans sac kalınlığına göre kaynak akım değeri seçimi için diyagramı d) Referans sac kalınlığına göre kaynak zamanı ve sayısı diyagramı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

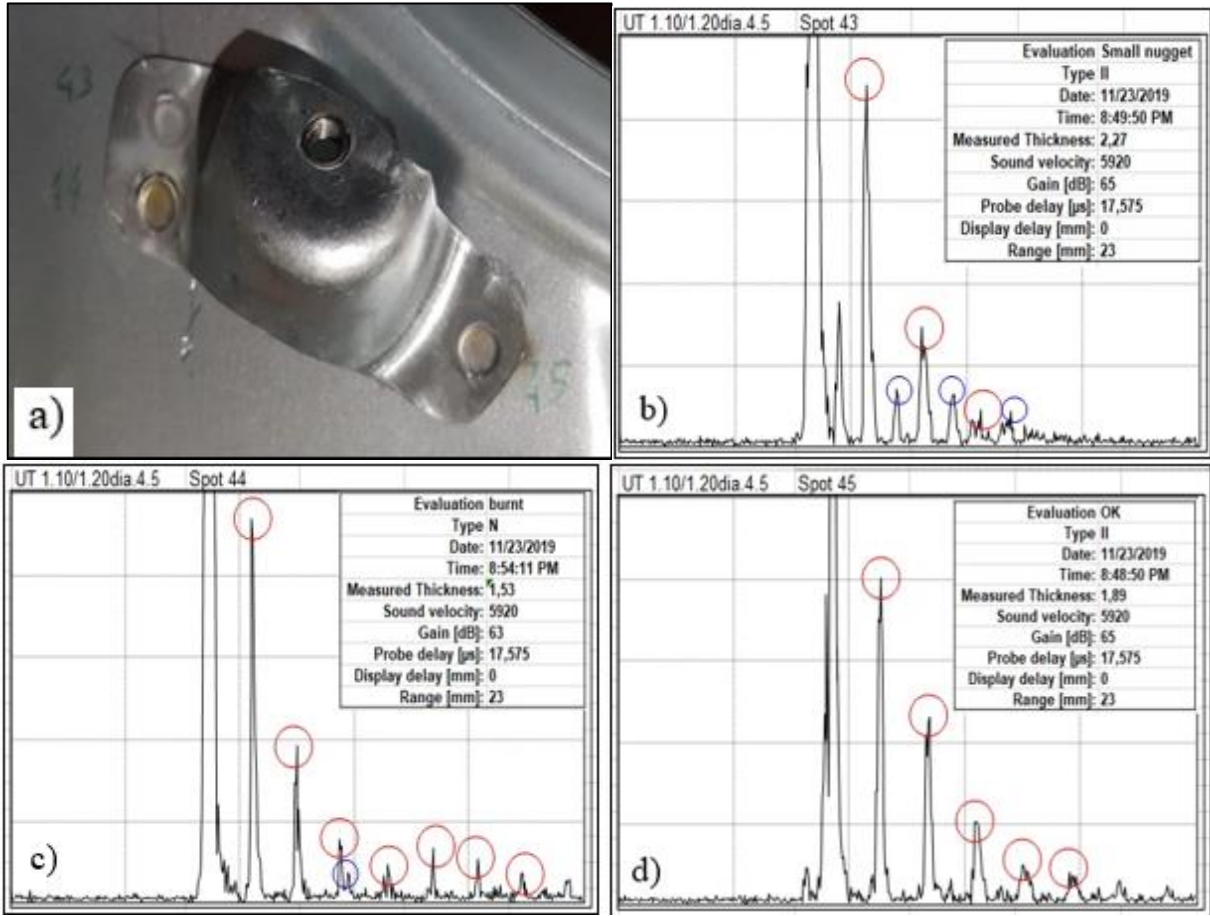
3.1.KSR VE IQR Mod ile Akım Değeri Punta Optimizasyonu

Yapılan test işleminde kaynak süresi sabit tutularak KSR ve IQR mod ile farklı akım değerlerinin spot punta performansına etkisi incelenmiştir.

3.1.1. KSR Mod ile Akım Değeri Punta Optimizasyonu

KSR mod ile yapılan punta optimizasyonu çalışmasında kontrol kullanıcıdadır ve robot akım değerini ve kaynak süresini artırıp veya düşüremez bu nedenle adaptif punta modu aktif değildir. Çizelge 2’de gösterildiği gibi kaynak süresi sabit tutularak 7 kA, 9 kA, 11 kA ana akım kaynak

değerleri ile spot punta kaynağı testi yapılmıştır. Isı girdisi değerleri, Çizelge 2’de verilen değerlere göre, sırasıyla 7.7, 12.1 ve 9.9 kJ olarak bulunmuştur. Kaynak zamanı sabit olduğu ve akım değeri değişmediği için parametre çalışması sırasında değişikliklere rastlanmamıştır.



Şekil 3. a) KSR mod ile test edilen spot punta görseli ve spot ölçüm raporları, b) 43, c) 44, d) 45

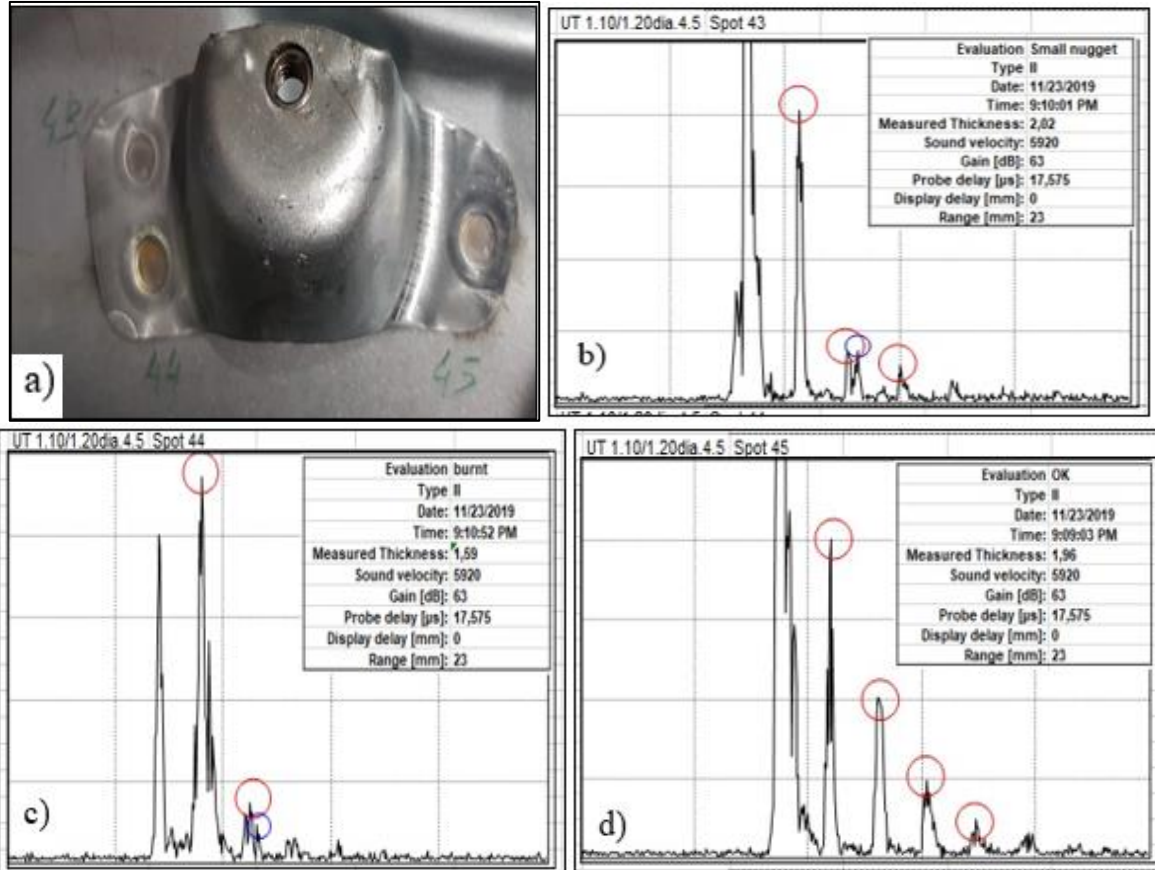
Şekil 3’te Spot 43 test sonucunda 7 kA akım değerinin yetmediği istenen çekirdek çapının oluşmadığı, spot 44 test sonucunda 11 kA akım değerinin yüksek geldiği ve spot puntoda göçertmenin %30 dan fazla olduğu ve spot 45 test sonucuna göre ise 9 kA akım değerinin uygun parametre olduğu rapor sonucunda görülmektedir. Bu raporda, ölçülen kalınlık değerleri, elde edilen piklerle beraber değerlendirilmekte olup, kalınlık değerlerinin üst üste gelen sacların kalınlığından çok düşük olduğu takdirde “yanık” arızası vermekte ve eğer sac kalınlıkları toplamına eşit veya daha fazla ise yeterince nüfuziyet olmadığına karar vermektedir. Ayrıca, Ultralog cihazından elde edilen verilerin pik değerlerinde, sıralı bir düşüş gözlemlenmesi durumunda kaynak oluşumu başarılı olarak da kabul edilmektedir ve bu nedenle spot 43 ve spot 44 nokta kaynaklarından elde edilen pik düzeninin değişken olması nedeniyle başarısız olarak kabul edilmiştir. Piklerin ayrışması veya bölünmesi de geri dönüş piklerinde bir sorun olduğu değerlendirilmesine yol açmaktadır.

3.1.2. IQR Mod ile Akım Değeri Punta Optimizasyonu

IQR Mod ile akım değeri punta optimizasyonunda kaynak süresi sabit olup 6.20 kA, 8.20 kA, 10.20 kA akım değerleri ile spot punta testi gerçekleştirilmiştir. Teste IQR modun özelliği adaptif punta aktif olarak çalışmasıdır. Kaynak öncesi girilen akım değerini ve kaynak süresini spot punta operasyonu için gerekli olan değere göre artırıp azaltma işlemini yapan bir sistemdir. Kısacası, IQR

mod ayarında spot punta operasyonu için gerekli değerleri ayarlaması için kontrol robota verilmektedir.

Çizelge 3'te görüldüğü gibi verilen akım değerini ve kaynak süresini IQR mod adaptif punta özelliğini kullanarak değerleri artırmıştır. Gözle muayenede KSR mod ile aynı sonuçlar görülmektedir. Artış değerleri doğrusal olarak yaklaşık olarak 2 kA civarında olup, Çizelge 3'ten anlaşılacağı üzere, kaynak uygulama zamanının değişimi %15, %10 ve %13 oranlarında olmuştur. Bu aşamada, ısı girdileri hesaplanıp KSR modu ile karşılaştırılırsa, bu durumda, 7.43, 11.4 ve 9.63 kJ değerleri elde edilmektedir. Görüldüğü gibi, IQR mod ve KSR mod değerleri ısı girdisi açısından yaklaşık olarak aynı değerlerde sabitlenmiş olmaktadır.



Şekil 4. a) IQR mod ile test edilen spot görseli ve spot ölçüm raporları b) 43, c) 44, d) 45

Şekil 4'te görüleceği üzere Spot 43 test sonucunda 6.2 kA akım değerini adaptif punta özeliği ile 8.08 kA'ye artırdığı, kaynak süresi ise 800 ms den 920 ms yükselttiği çekirdek çapının oluşmadığı rapor sonucunda görülmektedir. Geri dönüş piklerinin yeterince yüksek olmaması ve/veya kalınlık değerlerindeki değişim (2.02 mm sac kalınlıklarından fazladır ve 1.58 ise sac kalınlıklarının toplamının %75'ine denk gelmektedir) bu sonuca ulaşılmasına sebep olmuştur. Spot 44 test sonucunda ise 10.2 kA akım değerini 12.97 kA çıkmış olup kaynak süresi 800 ms den 880 ms yükselmiş ancak ısı girdisinin KSR mod ile yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Elde edilen spot kaynağının test edilmesi sonucunda, çekirdek kalınlığının çok düşük olduğu ve bu değer %30 dan fazla olduğu için kaynak reddedilmiştir. Spot 45 test sonucunda ise 8.2 kA akım değeri 10.59 kA artmış olup kaynak süresi 800 ms den 910 ms yükselmiştir. Spot punta parametresinin uygun olduğu elde edilen geri dönüş piklerinin düzgün sıralanması ile onaylanmış ve kaynak kabul edilmiştir. Bu kaynaktaki ısı girdisinin de 9 kJ civarında olup, KSR mod ile yapılan kaynak ısı

girdisine çok büyük oranda benzerlik taşımaktadır. Statik direnç eğrisi özellikleriyle yapılan kaynak koşullarında, yani KSR ile yapılan kaynaklardaki durumu ifade eder, kaynak kalitesi indeksleri (çekirdek çapı, çekirdek nüfuziyeti ve çekirdek derinliği) arasındaki ilişkiler sabittir ve değişken direnç değerlerine karşı herhangi bir değişim olmadığı için ısı girdisinin değişkenliği problem yaratmaktadır. Ancak dinamik direnç ölçümlerinde, proses koşullarının değişimine duyarlılığı dikkate alındığı için anlık olarak direnç değişimine cevap verebilmektedir (Quafi, 2010; Cho ve ark., 2001). Optimizasyon çalışmaları çeşitlidir, Taguchi yöntemi kullanılarak (Rawal, 2016) veya yorulma dayanımı esas alınarak yapılan çalışmalar mevcuttur (Rui, 2016). Ancak bu tür bir çalışma literatürde yapılmamıştır.

3.2. KSR ve IQR Mod ile Kaynak Zamanı Punta Optimizasyonu

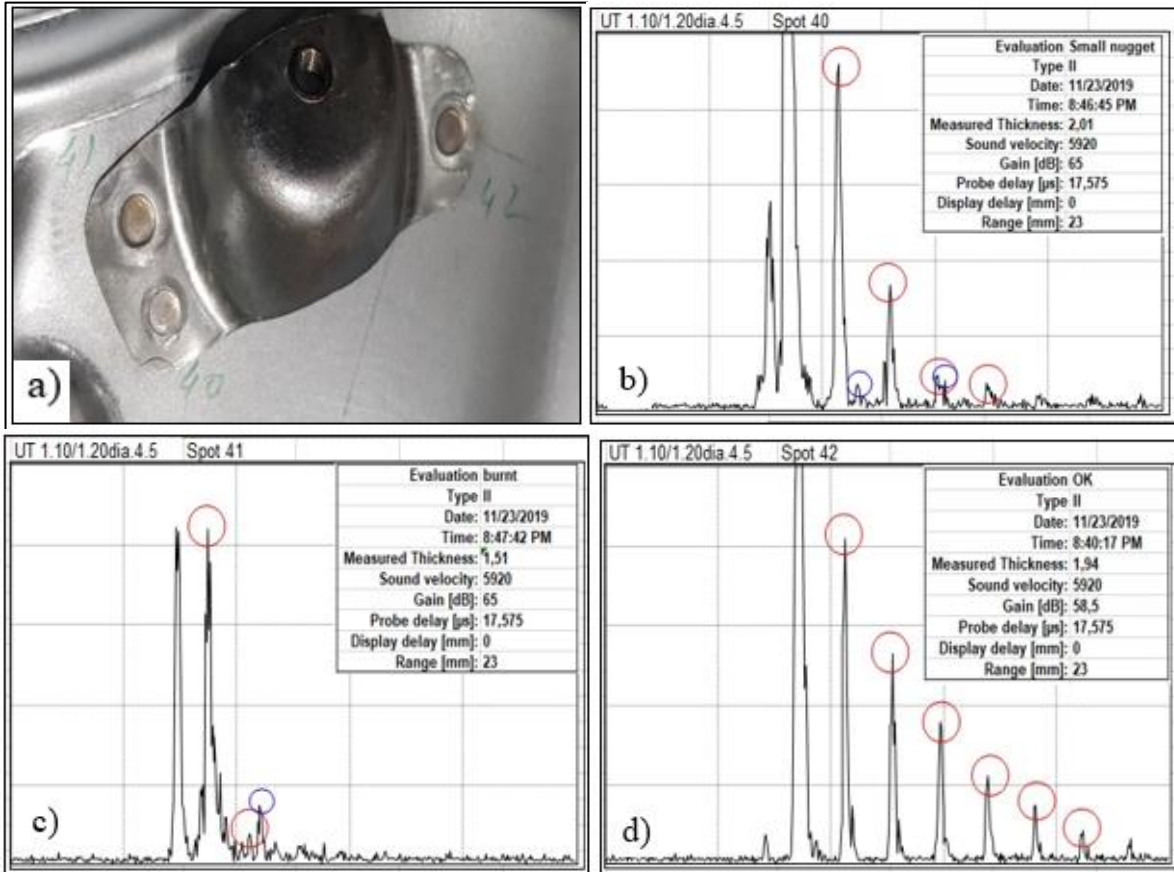
Yapılan test işleminde akım değeri sabit tutularak KSR ve IQR mod ile farklı kaynak zamanı değerlerinin spot punta performansına etkisi incelenmiştir.

3.2.1. KSR Mod ile Kaynak Zamanı Punta Optimizasyonu

Akım değeri sabit tutularak Çizelge 4’te gösterildiği gibi 600 ms, 1100 ms, 1800 ms kaynak zamanı değeri verilerek spot punta kaynağı testi yapılmıştır.

Çizelge 4. KSR mod ile kaynak zamanı punta optimizasyonu değerleri

Spot	Ana Akım (kA)	Ön Akım ve Son Akım (kA)	Kaynak Zamanı (ms)	İmpuls
Spot 40	9	9	600	2
Spot 42	9	9	1100	2
Spot 41	9	9	1800	2



Şekil 5. a) KSR mod ile test edilen punta görseli ve spot ölçüm raporları b) 40, c) 41, d) 42

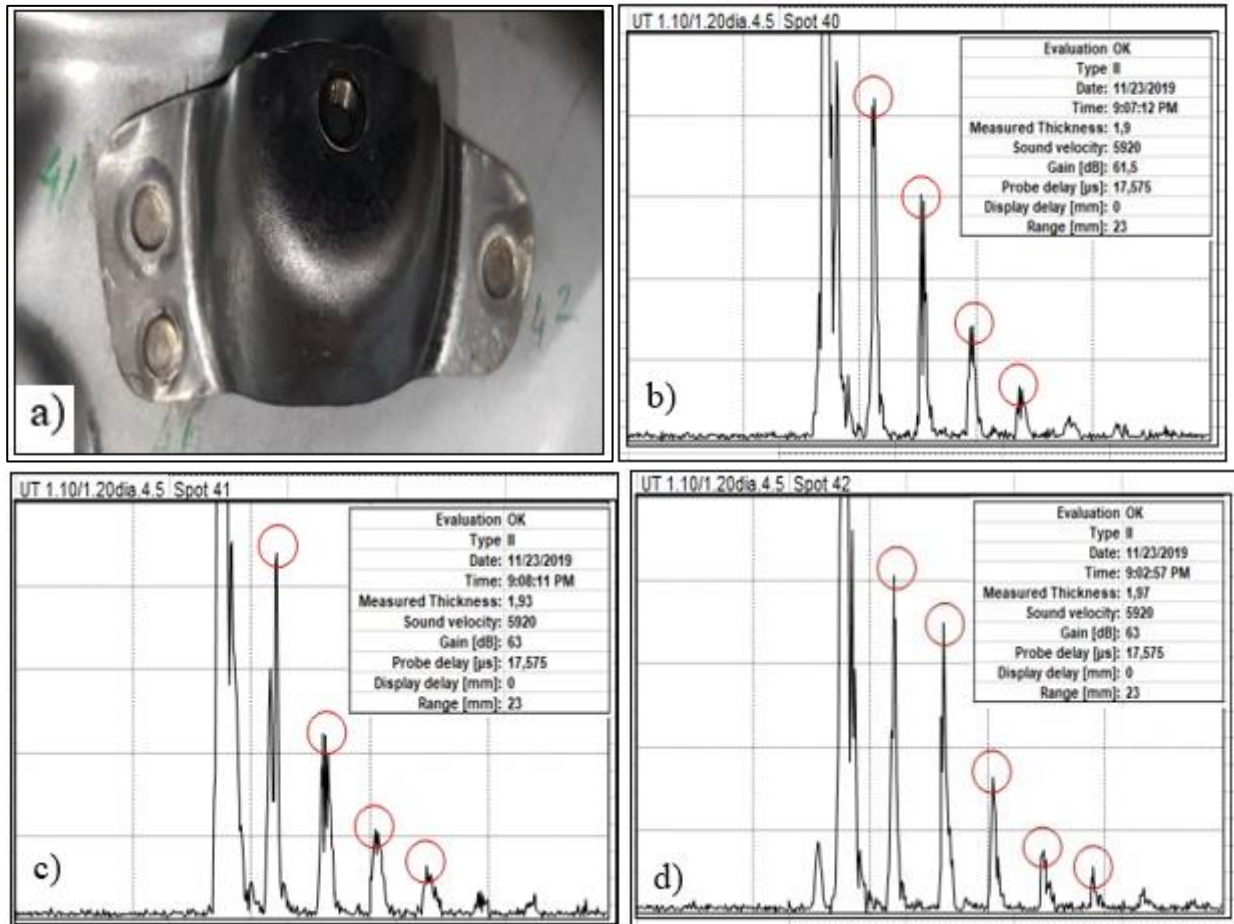
Şekil 5'te görüldüğü gibi Spot 40 test sonucunda 600 ms kaynak süresi değerinin yetmediği çekirdek çapının oluşmadığı rapor sonucunda görülmektedir. Spot 41 test sonucunda 1800 ms kaynak zamanı değerinin yüksek geldiği spot puntada göçertmenin %30 dan fazla olduğu rapor sonucunda görülmektedir. Spot 42 test sonucunda 1100 ms kaynak zamanı değerinin uygun parametre olduğu rapor sonucunda görülmektedir.

3.2.2. IQR Mod ile Kaynak Zamanı Punta Optimizasyonu

IQR Mod ile yapacağımız kaynak zamanı değeri punta optimizasyonunda akım değeri sabit tutularak Çizelge 5'te 400 ms, 800 ms, 1200 ms kaynak zamanı değerleri ile spot punta kaynağı testi yapılmıştır. Testte IQR modun özelliği adaptif punta aktif olarak çalışmasıdır ve girilen akım değerini ve kaynak zamanını genellikle artıracaktır.

Çizelge 5. IQR mod ile hedeflenen kaynak zamanı ve IQR ile elde edilen punta optimizasyonu değerleri

Spot	Akım (kA)	Kaynak Zamanı (ms)	IQR Akım (kA)	IQR Kaynak Zamanı (ms)
Spot 40	8.2	400	10.53	490
Spot 42	8.2	800	10.59	910
Spot 41	8.2	1200	10.61	1280



Şekil 6. a) IQR mod ile test edilen punta görseli, Spot ölçüm raporları, b) 40, c) 41, d) 42

Şekil 6'de görüleceği üzere Spot 40 test sonucunda 8.2 kA akım değerinin adaptif punta özelliği ile 10.53 kA'ye çıktığı ve kaynak zamanı 400 ms den 490 ms yükseldiği görülmüştür. Spot punta parametresinin uygun olduğu rapor sonucunda görülmektedir. Spot 41 test sonucunda 8.2 kA

akım değeri 10.61 kA çıkmış olup kaynak zamanı 1200 ms den 1280 ms yükselmiştir. Spot punta parametresinin uygun olduğu rapor sonucunda görülmektedir. Spot 42 test sonucunda 8.2 kA akım değeri 10.59 kA'e artırmış olup kaynak süresi 800 ms den 910 ms yükselmiştir. Spot punta parametresinin uygun olduğu rapor sonucunda görülmektedir. IQR mod da Çizelge'5 görüleceği üzere Spot 42 test sonucuna göre 910 ms gerçekleşen spot punta kaynak süresi KSR modda Çizelge'4 verilen Spot 42 test sonucuna göre spot punta kaynak süresi 1100 ms gerçekleşmiş olup IQR modda spot punta kaynak işlemi süresinin %17'lik bir kazanç sağlamıştır. Spot punta kaynak işlemi için Çizelge 2 ve Çizelge 3' te Spot 45 test sonuçlarına göre KSR modda verilen akım değeri 9 kA gerekirken IQR modda 8.2 kA akım değeri yeterli gelmekte olup IQR mod enerji maliyetinde %9 daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Bu değişimler, IQR modunun kaynak sırasında punta yapılacak olan bağlantının değerlerini ölçüp (örneğin direnci vb.) bu değere uygun akım ve süre değerlerini ayarlayarak daha önceden verilen değerlere göre optimize etmesi ile sonuçlanmaktadır.

Yapılan literatür araştırmasında IQR ve KSR ile ilgili firma kataloğu dışında bir bilgiye rastlanmamıştır. Direnç kaynağının optimizasyonuna ait çalışmalar (Quafi, 2010; Cho ve ark., 2001, Saha ve ark., 2012) mevcut olmasına rağmen cihaz ve parametre optimizasyonu hakkında çok sınırlı bilgiler mevcuttur.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma sonucunda elde edilen genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- İstenen görsellikte punta elde edilmiştir.
- Puntalama esnasında çapak oluşumu minimum düzeydedir.
- Sıçrantılı punta noktaları incelendiğinde saclar arası kopyalama probleminden kaynaklandığı tespit edilmiş olup çekirdek çapına etkisi yoktur.
- Optimum parametre değerleriyle çalışmada enerji maliyetinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- IQR mod da spot punta operasyon süresinin %17, enerji maliyetinde %9 daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Bursa Şahinkul Makina AR-GE merkezi tarafından öz kaynaklı AR-GE_2019_013/2000030000 proje numarası ile desteklenmiştir. Teknik destek için İkrâm Kanat'a teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

- Anastassiou M., Babit M., Lebrun J.L., Residual stress and microstructure distribution in spot welded steel sheets. *Materials Science and Engineering: A* 125, 141-156, 1990.
- Anonymous, Harms-Werde Product catalogue, www.harms-wende.de/ (Erişim Tarihi: 16.10.2020)
- Babu S., Santella M., Feng Z., Riemer B., Cohron J., Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals. *Science and Technology of Welding and Joining* 6(3), 126-132, 2001.
- Buchanan G., Resistance Welding Manual. Resistance Welder Manufacturers' Alliance, Fourth Edition, Bridgeport, NJ., U.S., 2003.

- Cho Y., Kim Y., Rhee S., Development of a quality estimation model using multivariate analysis during resistance spot welding. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture 215(11),1529-1538, 2001.
- Ho J.E., Wei P.S., Wu T.H., (2012). Workpiece Property Effect on Resistance Spot Welding. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 2(6), 925-934, 2012.
- Quafi A.E., Belanger R., Méthot J.F., An On-line ANN-Based Approach for Quality Estimation in Resistance Spot Welding. Advanced Materials Research 112(1),141-148, 2010.
- Rawal M.R., Kolhapure R.R., Sutar S.S., Shinde V., Optimization of Resistance Spot Welding of 304 Steel Using GRA. International Journal of Computer Engineering in Research Trends 3(9), 492-499, 2016.
- Rui Y., Yang R.J., Chen C.J., Agrawal H., Fatigue optimization of spot welds. Body Design Engineering, IBEC, 96, 68-72, 1996.
- Saha D.C., Han S, Chin K.G., Choi I, Do Y.D., Weldability evaluation and microstructure analysis of resistance-spot- welded high-Mn steel in automotive application. Steel Research International 83(4), 352-357, 2012.
- Zhang H., Senkara J., Resistance welding: fundamentals and application, 1st Edition, Taylor & Francis Group, 105, 2006.
- Zhou K, Cai L., On the development of nugget growth model for resistance spot welding. Journal of Applied Physics 115(16), 164901, 2014.
- Zhou K., Cai L., Study on effect of electrode force on resistance spot welding process. Journal of Applied Physics 116(8), 084902, 2014.

Araştırma Makalesi / Research Article

Digital Compass Calibration Using Particle Swarm Optimization and Least Squares Method

Türkay PEKTÜRK¹, Sıtkı KOCAOĞLU^{2*}

¹ Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6610-5425>, turkaypekturk@gmail.com

² Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Kırklareli, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1048-9623>, sitki.kocaoglu@klu.edu.tr

Geliş/ Recieved: 10.12.2020;

Kabul / Accepted: 22.02.2021

ABSTRACT: Recently, electronic compass sensors have become very common, due to their small size and low price. Sensor output information turns out to be incorrect if the magnetometers and accelerometers in the structure of these sensors are not calibrated. The main reason for such an error could be the slope value that is generated because of not placing the sensor parallel to the ground. Moreover, zero value inequalities between the axes of multi-axis sensors, offset errors, and scaling errors cause drift in the compass sensor output. In order to fix the problems, the study uses the methods of Particle Swarm Optimization Algorithm and Least Squares for the calibration of magnetometer and accelerometer. The results indicate that the calibration process can be successfully performed using these methods.

Keywords: Compass, Calibration, Particle Swarm Optimization, Least Squares, IMU.

*Sorumlu yazar / Corresponding author: sitki.kocaoglu@klu.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Pektürk, T., Kocaoğlu, S. (2021). Digital Compass Calibration Using Particle Swarm Optimization and Least Squares Method. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 2(1), 37-50.

Parçacık Sürü Optimizasyonu ve En Küçük Kareler Yöntemi Kullanılarak Dijital Pusula Kalibrasyonu

ÖZET: Elektronik pusula sensörleri, küçük boyutları ve düşük fiyatları sayesinde son yıllarda oldukça yaygın hale gelmiştir. Bu sensörlerin yapısında bulunan manyetometreler ve ivmeölçerlerin kalibre edilmediği durumlarda sensör çıkış bilgisi hatalı olmaktadır. Bunun temel sebebi sensörün kullanım alanında zemin yüzeyine paralel tutulamaması ve bir eğim değerine sahip olmasıdır. Ayrıca çok eksenli sensörlerin eksenleri arasındaki sıfır değer eşitsizlikleri, ofset hataları ve ölçekleme hataları da pusula sensör çıkışında kaymaya neden olur. Bu çalışmada, bahsedilen problemlerin giderilmesi için, manyetometre ve ivmeölçer kalibrasyonu Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması ve En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada önerilen yöntemle elde edilen sonuçlar, kalibrasyon işleminin bu yöntem kullanılarak başarıyla yapılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Pusula, Kalibrasyon, Parçacık Sürü Optimizasyonu, En Küçük Kareler, IMU.

1. INTRODUCTION

With the emergence of microelectromechanical systems (MEMS) technology, the dimensions of the mechanical sensors are reduced to a measure that can be expressed in millimeters and their energy consumption is reduced to very low levels (Li et al., 2009). This situation has led to the emergence of many new application areas and MEMS technology has spread rapidly and become quite economical. This technology, which has also entered into mobile phones today, is widely used in many applications such as navigation, robotics, unmanned vehicles, medical devices, automotive, computer technologies, wearable devices, virtual reality, and military defense systems (Petrucha and Kaspar, 2009).

In addition to these advantages of MEMS sensors, there are some engineering challenges; especially surface micro-processing and extremely low-cost variations need to be mentioned. Since the accuracy and sensitivity performances of the sensors which are produced by surface micro-processing are low, it is necessary to minimize the errors by using mathematical and heuristic methods in applications.

Magnetic compasses have been used for navigation for centuries. Today, advances in technology have led to the emergence of solid-state electronic compasses based on magnetic sensors and acceleration-based slope sensors. Electronic compasses have many advantages over traditional needle type or Gimbaled compasses in terms of shock and vibration resistance, electronic compensation for stray field effects, and direct interface to electronic navigation systems. Usually compasses are hand-held, attached to an airplane, or housed on a vehicle over rough terrain. This makes it difficult to determine the azimuth or its direction as the compass is not always horizontal to the earth's surface. The error caused by tilt angles can be quite substantial. A typical method of correcting the compass slope is to use a tilt sensor to determine the turn and tilt angles (Xisheng et al., 2009; Kuşçu, et al., 2018).

Three-dimensional magnetic digital compasses are widely used as handheld navigation devices. Anisotropic magneto resistivity (AMR) sensors and MEMS accelerometers in compasses are used to obtain geomagnetic field and gravitational field (Barbert and Arrott, 1988; Caruso, 2000; Choudhury et al., 2008; P. Zhang et al., 2005). Attitude and heading can be calculated from two vectors using the following equations (Cho and Park, 2003):

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{-B_y \cos\phi + B_z \sin\phi}{B_x \cos\theta + B_y \sin\theta \sin\phi + B_z \sin\theta \cos\phi} \right) \quad (1)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{A_x}{A_z} \right) \quad (2)$$

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{A_y}{A_z} \right) \quad (3)$$

where θ and ϕ represent the sensor's angle calculated from the accelerometer readings and the roll, respectively. Ψ represents heading angle calculated from two sensor whose tilts are compensated. A_i and B_i ($i = x, y, z$), show the sensor readings of the three axes.

In (Fang et al., 2011), ellipsoid fitting (EF) is proposed to calibrate magnetometers without an external reference. In (Gietzelt et al. 2013), satisfactory results are received with accelerometers calibrated using EF. In (Vcelak et al., 2006), problems associated with EF used to prove the false attitudes. Later, many methods are proposed to compensate for these problems. In (Z. Zhang, 2015), an iterative algorithm is validated to ensure efficient calibration of magnetometers and accelerometers, but requires an external attitude reference. In (X. Li and Z. Li, 2012), it is assumed that the accelerometers provide an internal, pre-calibrated reference. The Deep Packet Inspection (DPI) algorithm is proposed to calibrate magnetometers. The experimental results are satisfactory, but in most cases, it is necessary to calibrate two area sensors.

PSO is an optimization algorithm inspired by the observation that the actions of some animals moving in a herd, while meeting their basic needs such as finding food, affect other individuals in the herd and reach the purpose of the herd more easily. Particle swarm optimization (PSO) is a parallel search technique developed by Kenney and Eberhart in 1995 (Bo and Hongxia, 2020). PSO is a stochastic optimization algorithm based on Swarm Intelligence Algorithm (SIA). It does not require much prior knowledge about initial parameter values, but provides a wide range of searches (Zhao et al., 2009). Each individual searching for the solution in PSO is called a particle, while the population containing the particles is called a herd. The fitness function is used to understand how close an individual is to the solution. This function could be a function that evaluates the suitability of the solution, taking into account the total value of the selected loads, taking our freighter example. The main purpose of this function is to measure how close we are to the real solution. While a particle is looking for the solution, its best state at that moment is called pbest, while the particle closest to the solution throughout the entire flock is called gbest.

In recent years, some researchers have used PSO to define control parameters (Bo and Hongxia, 2020; Zhao et al., 2009). Unfortunately, when the target function reaches the local optimal solution zone, convergence rates will likely slow down and fall to local optimal solutions in this method. Path planning is an important study area where PSO is used. In (Gong et al., 2013), an improved PSO is used to solve the shortest and safest path for a robot. Similarly, in (Mac et al., 2017), the shortest and smoothest path planning applied by using an improved PSO algorithm. In 2019, Wu used PSO algorithm to do coordinated path planning for unmanned aerial-aquatic vehicle. In (Das et al., 2016), an improved PSO and gravitational search algorithm is presented for path planning.

In this study, a tilt compensated digital compass application is carried out using a very low-cost MEMS sensor combining a three-axis magnetic field sensor and a three-axis acceleration sensor in a single case. The main purpose of this application is improving the measuring accuracy of IMU sensors. The errors and their reasons are mentioned and precautions to decrease the errors are taken.

In practice, sensor errors are examined, "Particle Swarm Optimization" and "Least squares" methods are used to eliminate the errors.

2. MATERIALS AND METHODS

In this study, GY-89 IMU module is used. Inside the module are LSM303D, L3GD20 and BMP180 units. LSM303D contains one 3-axis magnetometer and one 3-axis accelerometer. L3GD20 is a 3-axis gyroscope module. BMP180 is the absolute pressure sensor. Software configuration of the IMU module and sensor data reading are performed by the STM32 Smart microcontroller module over the I2C interface. The sensor data collected by the microcontroller has been exported over the NRF24L01 + RF communication module.

2.2 Magnetometer Calibration

In Figure 1, the dual axis comparative analysis of the uncalibrated magnetic field sensor used in the study is shown. The fact that XY (ZN), XZ (YN) and YZ (XN) charts are elliptical is related to the axes having different scaling values. This can be called a scaling error. Sensors with scaling errors produce different values when exposed to magnetic field in the same direction and equal intensity with their core axes. In addition, it is seen that the center points of the ellipses are also shifted from the origin. The reason for this is that the axes do not give zero (0) value at their outputs corresponding to the zero (0) gauss magnetic field value. This error is called an offset error. In the figure, the YZ (ZN) graph shows the change of the Z axis value (vertical) and the Y axis value (horizontal) when the sensor is rotated around the Z axis. Normally, the magnetic field value measured by the Y axis changes continuously during rotation, while the magnetic field measured by the Z axis does not change. For this reason, the graph is expected to be in the form of a straight line parallel to the horizontal axis. However, as can be seen in the figure, the magnetic field changes on the Y axis also affect the Z axis measurement. This indicates that the Y axis and the Z axis are not perpendicular to each other. A similar situation is also valid for XZ (ZN), XY (YN) charts. This error is called a cross-axis interaction error.

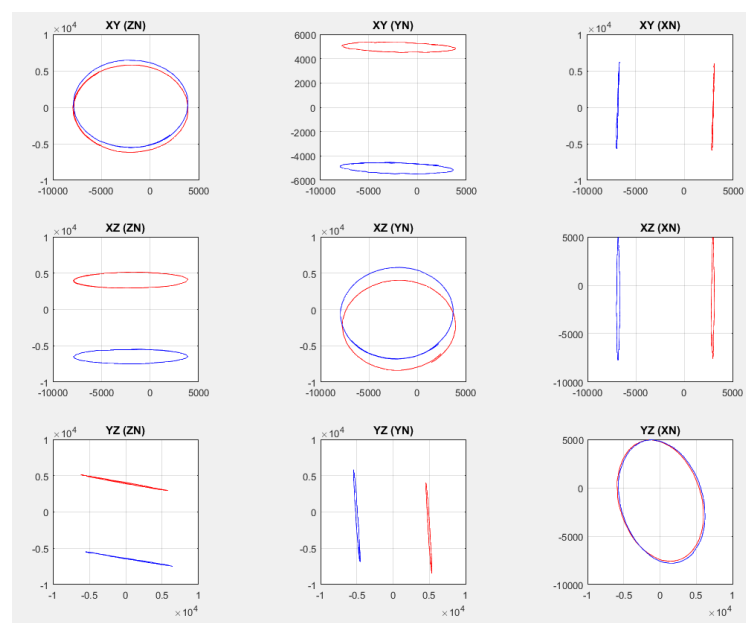


Figure 1. Magnetic field measurement results before calibration

Equation 4 shows the relationship between the actual magnetic field that the sensor is exposed to and the sensor output values. Here $[M]_{1 \times 3}$ shows the real magnetic field value to which the sensor is exposed, and $[M_s]_{3 \times 1}$ shows the unwrought sample value taken from the sensor. $[M_c]_{3 \times 3}$, $[M_s]_{3 \times 3}$ and $[M_o]_{3 \times 1}$ are the cross-axis effect correction matrix, scale factor correction matrix and offset error correction matrix, respectively. As a result of the calibration process, these three matrices will be obtained, which are used to correct errors in sensor measurements.

$$[M]_{1 \times 3} = [M_c]_{3 \times 3} [M_s]_{3 \times 3} ([M_m]_{3 \times 1} - [M_o]_{3 \times 1}) \quad (4)$$

The first thing to do in the calibration process is to roughly eliminate offset errors. Thus, the centers of the elliptical shapes formed by the measurements in the horizontal axes will be brought closer to the origin. For this, the offset values are calculated as follows by taking the average of the output values given by the axes in the vertical and upward positions (rotated 180 °) while the axes are perpendicular to the ground plane (Equations 5-7). Here X_o , Y_o and Z_o are the offset values for the X, Y and Z axes, respectively, XU_X , YU_Y and ZU_Z are the x values obtained with the X axis pointing upwards, the y values obtained with the Y axis pointing upward, and the z values obtained with the Z axis pointing upwards respectively and XD_X , YD_Y ve ZD_Z are x values obtained with the X axis pointing down, y values obtained with the Y axis pointing down, and z values obtained with the Z axis pointing down, respectively.

$$X_o = \frac{1}{2n} \left(\sum_{i=0}^n XU_{Xi} + \sum_{i=0}^n XD_{Xi} \right) \quad (5)$$

$$Y_o = \frac{1}{2n} \left(\sum_{i=0}^n YU_{Yi} + \sum_{i=0}^n YD_{Yi} \right) \quad (6)$$

$$Z_o = \frac{1}{2n} \left(\sum_{i=0}^n ZU_{Zi} + \sum_{i=0}^n ZD_{Zi} \right) \quad (7)$$

The offset values determined by calculating the offset values of each of the X, Y and Z axes are removed from all measurement results, thus offset errors are roughly eliminated.

In the next step, using the PSO, which is a heuristic optimization method, the interaction matrix between axes and offset correction values are found to make the already roughly calculated offset values more precise.

In the PSO method, there are pieces of data called randomly located particles in the possible solution space of the system. Each of these particles has speed and direction information that is changed randomly from iteration to iteration. In each iteration, the probable solution value contained by the particles is evaluated using a performance function. As a result of the evaluation, the value of the particle with the highest performance affects the speed and direction values of other particles in the next iteration. Thus, particles occupy a position in the solution space at a point in their tendency to approach the best available solution. The real or best solution is likely to be somewhere in the solution space, close to the best available solution. The effect of the best available solution value obtained in each iteration causes the particles to get closer and closer to each other in the solution space, and as the real solution approaches, all particles begin to cluster around a solution. This cycle continues until the result of the performance function reaches the desired value or stabilizes at a

certain value, and the data of the particle that provides the best value in the performance function becomes the solution value of the problem. Corrected results are obtained by multiplying the matrix created with the values found using the particle swarm algorithm with the sensor data vector (Equation 8). The matrix is formed as follows: X, Y and Z are the axis interference error and offset error corrected samples, Mx, My and Mz are the offset error roughly corrected samples and $P_{1...9}$ are the parameters to be found with PSO (Kocabiçak and Demir, 2020; Kocaoğlu and Akdoğan, 2019).

$$[X \ Y \ Z] = [M_x \ M_y \ M_z \ 1] \begin{bmatrix} 1 & P_4 & P_7 \\ P_1 & 1 & P_8 \\ P_2 & P_5 & P_1 \\ P_3 & P_6 & P_9 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Here, P3, P6 and P9 are the offset correction values of the X, Y and Z axes respectively, P1 and P2 are the interaction coefficients of the Y and Z sensor values on the X axis, P4 and P5 are respectively the action coefficients of the X and Z sensor values on the Y axis, P7 and P8 are respectively X and Y are the coefficients of the sensor values on the Z axis.

In the performance test function, 3 metrics are determined as success criteria. These are;

- i) **The slope of the horizontal axis graph relative to the vertical axis:** The best case is that it is as close to zero as possible. To quantify this, the slopes of a total of 12 graphs obtained from the samples are calculated, the square root of the squares of these slopes are calculated and multiplied by a gain factor of 10000. The gain factor increases the effectiveness of the slope information, which normally takes values between 0 and 1, on the performance evaluation of the algorithm.
- ii) **Shapes of horizontal axis charts:** Shapes should be like a circle. For this, the center point and the mean radius of the graph are determined. The perfect circle function is created accordingly. The corresponding angle for each data pair from the samples is found and the X and Y values corresponding to the same angle in the perfect circle function are calculated. The square root of the difference between the real sample and desired is calculated and the similarity value is determined. Similarity criterion is obtained by summing the similarity values for 6 graphs obtained from the samples.
- iii) **Variance of the vector sum of X, Y and Z measurement values:** Calculation results for all sample points must be found on a sphere. In order to achieve this, it is necessary that the vector sum of X, Y and Z should give the radius of the sphere, so this value should not vary from sample to sample. With this aim in mind, the criterion value was determined by taking the calculated variance for all samples as $R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$.

Finally, the three criterion values are divided by the expected best values, added together and the performance value is obtained.

In the last step of the calibration, the least squares method is applied to the calibrated sensor data and scaling values are obtained in a way that fits the sensor values on the unit circle. Magnetic field measurement results after calibration are shown in Figure 2.

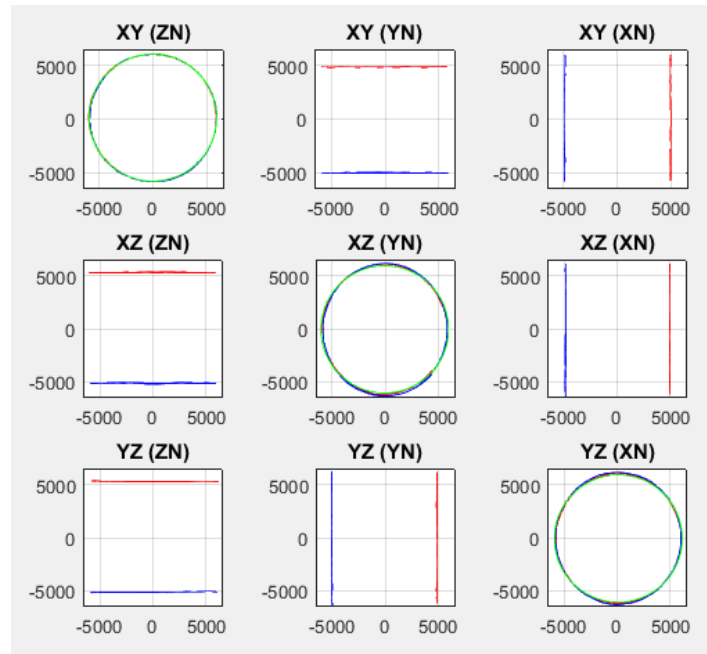


Figure 2. Magnetic field measurement results after calibration

2.2 Accelerometer Calibration

In accelerometer calibration, there are two calibration values for each axis of the sensor. These are the offset value that allows the sensor to produce a value of 0 when not subjected to any acceleration, and the scaling value that allows each of the three sensors to produce the same value when subjected to the same magnitude of acceleration. In the examples used for calibration, the sensor is calibrated for gravity acceleration (1g) as it is subjected only to gravitational acceleration. In Equation 9, A_a represents the calibrated sensor measurement values, A_m represents the raw sensor measurements, and A_c represents the calibration parameters.

$$[A_a] = [A_m][A_c] \tag{9}$$

When matrices are expressed explicitly;

$$[X, Y, Z] = [A_x \ A_y \ A_z \ 1] \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ P_4 & P_5 & P_6 \\ P_7 & P_8 & P_9 \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} \end{bmatrix} \tag{10}$$

Equation 10 contains the offset values of each axis in the last row of the calibration parameters matrix.

In the calibration process, the value sets, collected in 6 fixed positions such as XD, XU, YD, YU, ZD, ZU, are used. X, Y and Z are the sensor axes, U suffix refers to the upward direction according to gravity and the suffix D to the downward direction. Since the gravity value is taken as 1g after calibration, the value of the upward facing sensor according to gravity takes -1, and the value of the downward facing sensor takes 1. Horizontal axes will not be subject to any acceleration since they are perpendicular to gravity and will take zero value. Value sets are calculated through the following equations to represent the number of samples collected at the respective location.

$$\begin{aligned}
 XD: [1 \ 0 \ 0]_{nx3} &= [A_x \ A_y \ A_z \ 1]_{nx4} [A_c]_{4x3} \\
 XU: [-1 \ 0 \ 0]_{nx3} &= [A_x \ A_y \ A_z \ 1]_{nx4} [A_c]_{4x3} \\
 YD: [0 \ 1 \ 0]_{nx3} &= [A_x \ A_y \ A_z \ 1]_{nx4} [A_c]_{4x3} \\
 YU: [0 \ 1 \ 0]_{nx3} &= [A_x \ A_y \ A_z \ 1]_{nx4} [A_c]_{4x3} \\
 ZD: [0 \ 0 \ 1]_{nx3} &= [A_x \ A_y \ A_z \ 1]_{nx4} [A_c]_{4x3} \\
 ZU: [0 \ 0 \ -1]_{nx3} &= [A_x \ A_y \ A_z \ 1]_{nx4} [A_c]_{4x3}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Since the values of the matrices $[A_a]$ and $[A_m]$ are known, the value of the matrix $[A_c]$ can be obtained using the matrix form of the least squares method;

$$[A_c] = ([A_m]^T \cdot [A_m])^{-1} \cdot [A_m]^T \cdot [A_a] \tag{12}$$

2.3 Compass Calibration

Thus, the measurements taken from the accelerometer and magnetic field sensors are calibrated simultaneously and the magnetic direction angle is determined. Before converting to magnetic direction angle, the slope of the sensor to the front, back and sides is calculated using accelerometer values. The slope correction is made by rotating the magnetic field components in the opposite direction of the slope in both directions. In this way, magnetic field values, which are changed due to the slope, are transformed into values parallel to the flat surface, and the direction angle is calculated correctly.

The rotations made around the sensor axes are shown in Figure 3. Let the angle made by the sensor around the X axis is R_x , around the Y axis is R_y , and around the Z axis is R_z . The so-called rotation matrix is used to find the angles R_x , R_y and R_z based on the accelerometer data and calculated as follows (Equation 13).

$$\begin{aligned}
 RM_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_x & \sin R_x \\ 0 & -\sin R_x & \cos R_x \end{bmatrix} \\
 RM_y &= \begin{bmatrix} \cos R_y & 0 & -\sin R_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R_y & 0 & \cos R_y \end{bmatrix} \\
 RM_z &= \begin{bmatrix} \cos R_z & \sin R_z & 0 \\ -\sin R_z & \cos R_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{13}$$

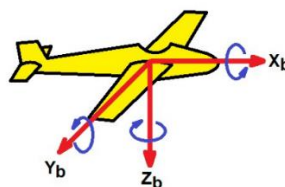


Figure 3. Axial rotational movements of the sensor

Calibrated values of the acceleration sensors give a value of 1 under gravity. When the sensor is parallel to the ground, the acceleration sensor values are $X = 0$, $Y = 0$ and $Z = 1$. These values, when multiplied by rotation matrices, give calibrated values of the acceleration sensors. While RM_x , RM_y and RM_z represents rotation matrices around the X, Y and Z axes respectively, calibrated sensor measurement values;

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = [RM_x] \cdot [RM_y] \cdot [RM_z] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Using Equation 14, the expressions are found as follows.

$$\left. \begin{aligned} RM_x &= \arcsin\left(\frac{A_y}{\cos RM_y}\right) \\ RM_y &= \arcsin(-A_x) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

After this step, slope correction can be applied on the calibrated values of the magnetic field sensor. M_{XT} , M_{YT} and M_{ZT} are the slope corrected magnetic field measurements of the X, Y and Z axes respectively. The magnetic field measurements are calculated as follows.

$$\begin{bmatrix} M_{XT} \\ M_{YT} \\ M_{ZT} \end{bmatrix} = [M_X]^{-1} \cdot [M_Y]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos R_y & 0 & \sin R_x \\ \sin R_x \sin R_y & \cos R_x & -\sin R_x \cos R_y \\ -\cos R_x \sin R_y & \sin R_x & \cos R_x \cos R_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

As a result of these processes, the slope of the magnetic field sensor values is corrected and made parallel to the ground surface. Only the X and Y components of the magnetic field values are used to find the magnetic direction angle. The Z component is used for tilt correction only. Direction angle is calculated as follows;

$$\beta = \arctan\left(\frac{M_{YT}}{M_{XT}}\right) \quad (17)$$

Since the arctan function values are within $\pm 90^\circ$ range, the following correction should be made to calculate the angle value between 0-360°;

- If $M_{XT} > 0$ & $M_{YT} \geq 0$ then $\beta = \arctan\left(\frac{M_{YT}}{M_{XT}}\right)$
- If $M_{XT} < 0$ then $\beta = 180 + \arctan\left(\frac{M_{YT}}{M_{XT}}\right)$
- If $M_{XT} > 0$ & $M_{YT} < 0$ then $\beta = 360 + \arctan\left(\frac{M_{YT}}{M_{XT}}\right)$
- If $M_{XT} = 0$ & $M_{YT} < 0$ then $\beta = 90^\circ$
- If $M_{XT} = 0$ & $M_{YT} > 0$ then $\beta = 270^\circ$

3. RESULTS AND DISCUSSION

The error graph of the PSO fitness function is given in Figure 4. Here PSO is trying to bring the error closer to zero. The red line is the filtered version of all samples shown in blue, with a floating average of 100 samples.

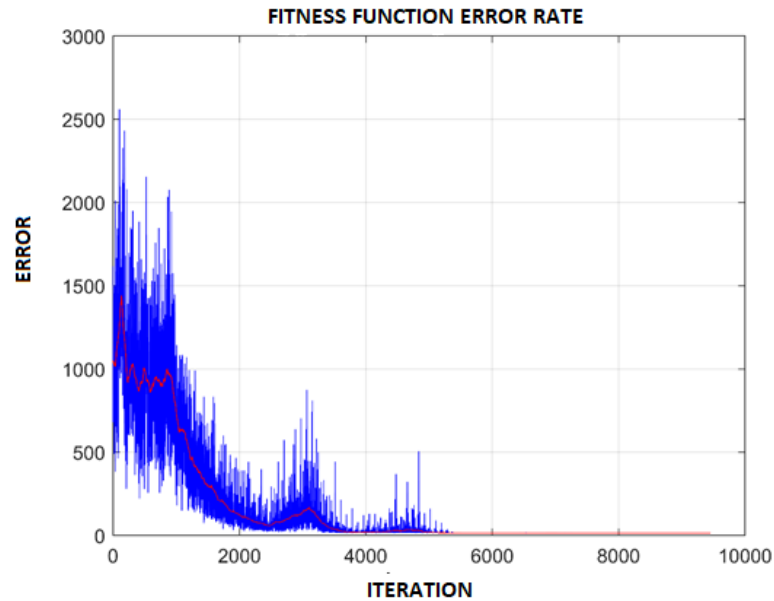


Figure 4. PSO fitness function error graph

The slope error is the slope of the graph of the plane vector and the vertical vector. For example, while the Z axis is facing down, the X axis and Y axis are parallel to the plane. The slope value of the ZX graph is found by fitting the first order polynomial. In this way, slopes are found for all sample sets and the square root of all the square is taken and summed (Figure 5).

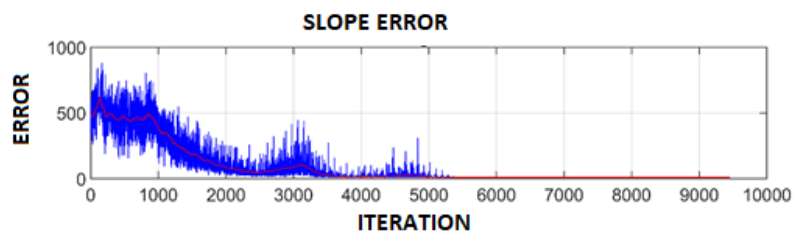


Figure 5. Slope error graph

The circle fitness error checks for the circle resemblance to the shape of planar vector pairs. In doing so, the vector sum of each pair of samples in the sample group is expected to give the same value (circle radius). For this, the magnitude of the vector sum of the plane vector pair is computed for each value of the sample set. Then their variance is taken and divided by the total number of samples (Figure 6).

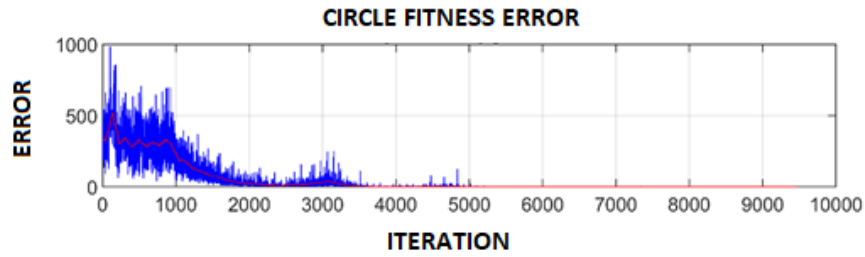


Figure 6. Circle fitness error graph

For the sphere fitness error, all groups in the sample set are combined and the vectoral total for each sample is calculated. The variance of the amplitude of the vector sum of each sample is taken and multiplied by the correction coefficient. In order to obtain a smooth sphere, the variance is tried to be brought closer to zero (Figure 7).

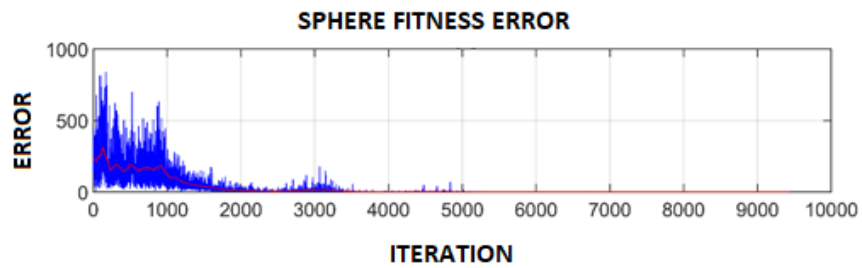


Figure 7. Sphere fitness error graph

Figure 8 shows the sample set corrected with PSO. Red stars that have not yet scaled to the unit circle indicate the reference circle. The sample circle and the reference circle overlap.

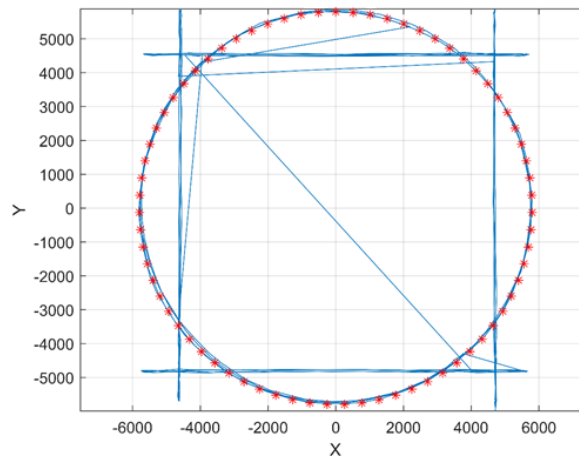


Figure 8. Corrected sample set

Figure 9 shows the normal distribution graph of the amplitude of the vector sum of XYZ axes after calibration. It shows that all samples are located on the unit sphere.

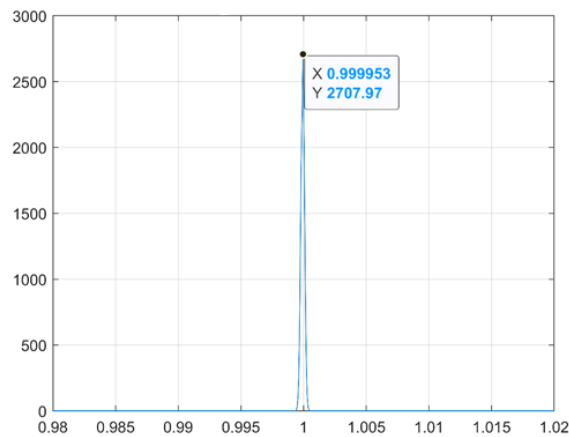


Figure 9. Normal distribution graph

Many errors related to MEMS sensors are mentioned in the literature. For magnetic field sensors, there are errors caused by external factors such as hard metal effect and soft metal effect, as well as scaling error, offset error, inter-sensor interaction error and structural errors. The hard metal effect is caused by metals that change the direction of the natural magnetic field. Soft metal effect is caused by alternating currents in the circuit board where the sensor is located. Scaling error is caused by the nature of the sensor. The offset error is caused by the sensors not displaying 0 for zero magnetic field strength. Interference error between sensors is caused by the sensor axes not being perpendicular to each other. In addition, there are structural errors such as the sensors display different values for magnetic field values with equal amplitude but opposite to each other. There are also structural errors such as offset error caused by not being able to display 0 value, inter-sensor interaction error caused by the sensor axes not being exactly perpendicular to each other, and sensors displaying different values for magnetic field values with equal amplitude but in opposite direction to each other. In high-cost MEMS sensor models, since these errors have been corrected, the calibration process can be performed simply by correcting the offset error (hard metal effect and soft metal effect errors are seen as offset error at the sensor output). In the case of low-cost sensors, manufacturers are providing some statistical information about these errors. Most of the time, the heat stress that the sensor is exposed to during the soldering of the electronic card and the mechanical stresses that occur after soldering disrupt the sensor characteristics and cause it to exceed the values provided by the manufacturer.

The most difficult parameter to determine during the calibration of the magnetic field sensor is the parameters of the matrix that show inter-axial interaction errors. In order for these parameters to be determined correctly, the offset and scaling errors of the sensors must be corrected, that is, the sensor values must be able to accurately show the magnetic field value they detect. However, scaling and offset errors cannot be detected precisely because of the interaction error between axes. As a result of the experiments carried out within the scope of the study, it was observed that first rough elimination of the sensor's offset errors greatly reduced the amount of error in the remaining steps of the calibration process. After a rough determination of the offset values, sensor samples are formed into a spherical form when the inter-sensor interference and the rest of the offset error are heuristically compensated.

Because the magnetic field sensor is affected by external factors, substantial errors may occur in the direction angle. For such cases, there is a need to determine when the sensor measurement value can be trusted and when it cannot. In this study, the vector sum of the axis values of the sensor under the natural magnetic field is determined as the parameter to verify the reliability of the sensor.

4. CONCLUSION

The results obtained with the algorithm developed within the scope of the study have an error of approximately $\pm 2^\circ$ and meet the value specified by the manufacturer in the sensor document. The biggest challenge encountered during sensor calibration is that the reference measurement values are generated from the values collected from the sensor itself. Inherent errors of the sensor, especially the inter-axial interaction matrix values, can be determined with reference to another highly accurate sensor. Thus, by using the values of both the reference sensor and the sensor to be calibrated, a sensor with higher accuracy can be obtained by simply fixing the sensors on the same plane so that they are facing the same direction and moving together.

Since accelerometer values are used in slope compensation, the noise of the slope angles is high. Especially in applications such as navigation, where the sensor needs to move continuously, the noise becomes more and more affecting the direction angle. This situation caused by the accelerometer can be made suitable for mobile applications by adding a gyro sensor to the system and combining both sensor values in the Kalman filter. In addition, the gyro sensor can be used as a reference sensor during the calibration of the magnetic field sensor. However, in addition to all these, the calibration of the gyro sensor and the way to compensate the constantly changing bias value should be considered, and the additional costs it will bring to the system should also be considered.

5. REFERENCES

- Barbert G.W., Arrott A.S., History and magnetics of compass adjusting. *IEEE Transactions on Magnetism*, 6, 2883-2885, 1988.
- Bo L., Hongxia P., A hybrid PSO-DV based intelligent method for fault diagnosis of gear-box. 2009 *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA)*, December 15-18, 2009, Daejeon/Korea.
- Caruso M. J., Application of magnetic sensors for low-cost compass systems. *IEEE 2000 Position location and navigation symposium*, March 13-16, 2000 pp:177-184, San Diego, California, ABD.
- Cho S.Y. Park C.G., Tilt Compensation Algorithm for 2-Axis Magnetic Compass. *Electronics Letters* 39(22), 1589-1590, 2003.
- Choudhury T., Consolvo S., Harrison B., Hightower J., LaMarca A., LeGrand L., Rahimi A., Rea, A., Borriello G., Hemingway B., Klasnja P., Koscher K., Landay J.A., Lester J., Wyatt D., Haehnel D., The mobile sensing platform: An embedded activity recognition system, *Activity Based Computing. IEEE Pervasive Computing* 7(2), 32-41, 2008.
- Das P.K., Behera H.S., Panigrahi B.K., A hybridization of an improved particle swarm optimization and gravitational search algorithm for multi-robot path planning. *Swarm Evol Comput* 28(6), 14-2, 2016.
- Fang J., Sun H., Cao J., Zhang X., Tao Y., A Novel Calibration Method of Magnetic Compass Based on Ellipsoid Fitting. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60(6), 2053-2061, 2011.
- Gietzelt M., Wolf K., Marschollek M., Haux, R., Performance Comparison of Accelerometer Calibration Algorithms Based on 3D-Ellipsoid Fitting Methods. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 111(1), 62-71, 2013.

- Gong D.W., Zhang J.H., Robot path planning in uncertain environment using multi-objective particle swarm optimization. *Neurocomputing* 103(1), 172-185, 2013.
- Kamış Kocabaçak Z., Demir U., Design and Optimization of an Electromechanical Actuator for the Latch of a Foldable Vehicle Seat. *Component-Oriented Testing and Simulation* 62(7), 1-7, 2020.
- Kocaoğlu S., Akdoğan E., Design and Development of an Intelligent Biomechatronic Tumor Prosthesis. *Biocybernetics and Biomedical Engineering* 39(2), 561-570, 2019.
- Kuşçu H., Yılmazlar E. Tez T., Examination on Bipedal Robots Structures and Motion Control, *Journal of the Technical University of Gabrovo* 57, 69-72, 2018.
- Li X., Li Z., A New Calibration Method for Tri-Axial Field Sensors in Strap-down Navigation. *Measurement Science and Technology* 23, 1-6, 2012.
- Li Z., Li X., Wang Y., A Calibration Method for Magnetic Sensors and Accelerometer in Tilt-compensated Digital Compass, 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI'2009), Beijing/China, August 16-19, 2009, pp: 868-871.
- Mac T.T., Copot C., Tran D.T., A hierarchical global path planning approach for mobile robots based on multi-objective particle swarm optimization. *Applied Soft Computing* 59 (1), 68-76, 2017.
- Petrucha V., Kaspar P., Calibration of a Triaxial Fluxgate Magnetometer and Accelerometer with an Automated Non-Magnetic Calibration System, *IEEE Sensors 2009 Conference*, New Zealand, October 25-28, 2009, pp: 1510-1513.
- Vcelak J., Ripka P., Platil A., Kubik J., Kaspar P., Errors of AMR Compass and Methods of Their Compensation, *Sensors and Actuators A: Physical* 129, 53-57, 2006.
- Wu Y., Coordinated path planning for an unmanned aerial-aquatic vehicle (UAAV) and autonomous underwater vehicle (AUV) in an underwater target strike mission. *Ocean. Engineering* 182(6), 162-173, 2019.
- Xisheng L., Ruiqing K., Xiongying S., Guanghua Y., Tilt-Induced-Error Compensation for 2-Axis Magnetic Compass with 2-Axis Accelerometer, 2009 World Congress on Computer Science and Information Engineering, Los Angeles, California, USA, March 31-April 2, 2009 pp: 122-125.
- Zhang P., Milios E.E., Huynh P., Navigation with IMU / GPS / Digital Compass with Unscented Kalman Filter, 2005 IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls/Canada, July 29-August 1, 2005, pp: 1497-1502.
- Zhang Z., Two-Step Calibration Methods for Miniature Inertial and Magnetic Sensor Units, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62(6), 3714-3723, 2015.
- Zhao Q., Yue Y., Guan Q., A PSO-Based Ball-Plate Calibration for Laser Scanner, *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA 2009)*, Zhangjiajie/Hunan/China, April 11-12, 2009, pp: 479-481.

Araştırma Makalesi / Research Article

FR4 ve FR2 Baskı Devre Kartlarının Mikroşerit Anten Uygulamasında Tasarımı ve Simülasyonu

Gözde KONUK EGE^{1*}, Uğur KESEN², Hüseyin YÜCE³, Garip GENÇ⁴

¹ İstanbul Gedik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7349-0416>, gozde.konuk@gedik.edu.tr

² Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3460-9060>, ukesen@marmara.edu.tr

³ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5525-7733>, huseyin@marmara.edu.tr

⁴ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7711-3845>, ggenç@marmara.edu.tr

Geliş/ Recieved: 24.11.2020;

Kabul / Accepted: 25.02.2021

ÖZET: Elektrik-elektronik aygıt teknolojilerinde kablosuz haberleşmenin hızlı gelişimi ile birlikte mikroşerit antenler önem kazanmıştır. Baskı devre kartı (PCB) teknolojisi de dünya çapında köklü bir endüstriye sahiptir. PCB teknolojisi, çeşitli elektrik-elektronik aygıtların üretimi için alternatif, düşük maliyetli bir yaklaşım sunar. FR4 ve FR2 tipi PCB kartlar elektronik endüstrisinde en çok tercih edilen iki PCB kart türüdür. Bu çalışmada, PCB kartlarda tespit edilen arıza veya diğer olumsuzlukları tanımlayabilmek ve bu olumsuzluklara çözüm üretebilmek için bir mikroşerit tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım ve analizde FR4 ve FR2 PCB'ler kullanılarak PCB kartın mikroşerit anten üzerindeki 3 boyutlu kazanç ve empedans-frekans davranışları analiz edilerek sunulmuştur. FR4 ve FR2 PCB'lerin 2.4 GHz referans frekans bandında kullanılabilirlikleri MATLAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonların sonucu gösterilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, FR4 malzemenin S11 geri dönüş kaybının -14.9 dB olduğu ve bant genişliğinin 80 MHz olduğu görülmektedir. Bu bant genişliği değeri WiFi çalışma bandını karşılamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Baskı devre kartı (PCB), Mikro şerit anten, Yama anten, Performans değerlendirmesi.

*Sorumlu yazar / Corresponding author: gozde.konuk@gedik.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Konuk Ege, G., Kesen, U., Yüce, H., Genç, G. (2021). FR4 ve FR2 Baskı Devre Kartlarının Mikroşerit Anten Uygulamasında Tasarımı ve Simülasyonu. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 2(1), 51-59.

Design and Simulation of FR4 and FR2 Printed Circuit Boards in Microstrip Antenna Application

ABSTRACT: Microstrip antennas have gained importance with the rapid development of wireless communication in electrical-electronic device technologies, Printed circuit board (PCB) technology also has a well-established industry worldwide. PCB technology offers an alternative, low-cost approach for manufacturing a variety of electrical-electronic devices. FR4 and FR2 type PCB boards are the two most preferred PCB board types in the electronics industry. In this study, a microstrip design and analysis has been carried out in order to identify malfunctions or other negativities detected in PCB boards and to find solutions to these negativities. In this design and analysis, 3D gains and impedance-frequency behaviors of the PCB board on the microstrip antenna are analyzed and presented by using FR4 and FR2 PCBs. The usability of FR4 and FR2 PCBs in the 2.4 GHz reference frequency band has been shown as a result of simulations using MATLAB software. Examining the analysis results, it is seen that the S11 return loss of FR4 material is -14.9 dB and the bandwidth is 80 MHz. This bandwidth value corresponds to the WiFi spectral band.

Keywords: Printed circuit board (PCB), Microstrip antenna, Patch antenna, Performance evaluation.

1. GİRİŞ

Günümüzde, bilgisayarlar ve tabletler, cep telefonları gibi kişisel elektronik ürünleri; robotlar, algılayıcılar ve eyleyiciler gibi endüstriyel elektronik ürünleri, tıp elektroniği gibi elektrik-elektronik aygıtlar hayatımızın her alanının vazgeçilmez öğeleri haline gelmiştir. Yarı iletken teknolojisinin gelişimi elektronik komponentlerin geliştirilmesinde bir dönüm noktası olmuştur. Ve bu süreçten itibaren elektrik-elektronik aygıt üretiminde ivme kazanılmıştır. Teknolojinin sürekli gelişimi ile beraber elektrik-elektronik komponentlerin ve buna bağlı gelişen aygıtların artan büyüme oranı, elektrik-elektronik aygıt endüstrisini dünyadaki en baskın imalat endüstrisi haline getirmiştir (Ning ve ark., 2017). Bununla beraber bu aygıtların hızlı ve yenilenen gelişimi, bu aygıtların temel bileşenini oluşturan baskı devre kartı (PCB) endüstrisinin de gelişmesine yol açmıştır.

Baskı devre kartı (PCB) teknolojisi, dünya çapında yaygınlaşmış endüstriye sahiptir. PCB teknolojisi klasik elektronik kart üretimine ek olarak farklı biyolojik ve kimyasal algılayıcı üretimleri için de kullanılmaktadır. PCB teknolojisinin kökeni 1903'lü yıllara dayanmaktadır ve 1980'li yıllara kadar çeşitli evrelerden geçerek günümüzde yaygın olarak bilinen cam-epoksi, kağıt-fenol bileşenlerinin kullanıldığı, piyasada FR4, FR2, FR1, CEM1, CEM3 isimleri ile bilinen tek taraflı veya çift taraflı kullanılabilen halini almıştır (Shamkhalichenar ve ark., 2020). En yaygın baskı devre kartı FR4 (Flame Reterdant 4) olarak bilinen PCB karttır. FR4; Ulusal elektrik üreticileri derneği endüstriyel termoset ürünleri (NEMA LI 1-1998) gereksinimlerini karşılayan bir malzeme sınıfıdır. FR4 malzeme, aleve dayanıklı bir epoksi reçine ile birleştirilmiş dokuma fiberglas kumaştan oluşur. FR4 suya karşı dayanıklıdır. Ortamdaki nemden bağımsız olarak yalıtkanlığı çok yüksektir. Mükemmel mukavemet/ağırlık oranına sahiptir (Shamkhalichenar ve ark., 2020). FR4 PCB uzun ömürlü standart süreçlerle üretilmesi ve çok sayıda rekabetçi üretimden kaynaklı düşük maliyete sahip olması ve son kullanıcı tarafından kolay kullanım avantajları sayesinde yeni elektronik aygıt geliştirilme süreçlerinde elektronik parçaları modellemek için sıklıkla tercih edilmektedir. FR2 PCB kart ise kâğıt ve bromlu alev geciktiricilerle güçlendirilmiş fenolik reçineden yapılmış bir diğer baskı devre kartıdır (Fellman, 2018). Sadece tek katmanlı PCB için kullanılır. FR1 ve FR2 benzer özelliklere sahip olmakla beraber tek fark cam geçiş sıcaklığıdır. FR1, FR2'ye kıyasla daha yüksek

Geri dönüş kaybı parametresi, empedans uyumunu ve gücün maksimum transferini gösteren, antenin en önemli parametrelerinden biridir. Empedans uyumu olmazsa gücün bir kısmı yansır, kayıp meydana gelir ve bu da tüm gücün yüke aktarılamaması demektir. Geri dönüş kaybı belirli bir frekans aralığında -9.95 dB'in altında değer alması, bu frekans bölgesinde antenin çalıştığını gösterir (Supratha ve Robinson, 2018). Geri dönüş kaybı değeri eşitlik 2.1 ve eşitlik 2.2 ile hesaplanabilir. Eşitlik 1 ve 2'de bulunan Z_L , Γ , Z_0 sırasıyla yük empedansını, yansıma katsayısını ve iletim hattının karakteristik empedansını göstermektedir (Reineix ve Jecko, 1989).

$$RL = -20 \log \log_{10}[\Gamma] \quad (2.1)$$

$$RL = -20 \log_{10} \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right| \quad (2.2)$$

2.1.2 Voltaj duran dalga oranı (VSWR)

Voltaj duran dalga oranı Yük ve iletim hattı arasındaki uyumsuzluğun bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. İdeal durum için ve ideal eşleşme için VSWR'nin değeri 1 olmalıdır (Supratha ve Robinson 2018).

Anten ile besleme kaynağı arasında empedans uyumu tam olarak sağlanamayan anten sistemlerinde elektromanyetik dalgaların bir kısmı geri yansır ve bu geri yansıyan dalgalar ile ilerleyen dalgalar girişim oluştururlar. Bu durum ise hatta duran dalga oluşmasına neden olur. Bu duran dalga oranı eşitlik 2.3 ile ifade edilmektedir (Johnson ve Jasik, 1984).

$$VSWR = \frac{V_{maksimum}}{V_{minimum}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.3)$$

2.1.3 Kazanç

Kazanç, test anteninin radyasyon alanı yoğunluğunun referans anteninin radyasyon alanı yoğunluğuna oranıdır (Supratha ve Robinson, 2018). Anten kazancının matematiksel hesaplaması Eşitlik 2.4'te sunulmuştur. $D(\theta, \phi)$ yönlendiricilik, $U(\theta, \phi)$ antenin ışınma şiddeti yoğunluğu, $P_{ışınma}$ ise antenin yayınladığı toplam güçtür. Kutupsal koordinat sisteminde θ x eksenine ve ϕ ise z eksenine yapıldığı açı parametreleridir. θ ve ϕ açılarının alt ve üst sınır değerleri 0-360 derece alınmıştır.

Antenin girişine gelen sinyali ne kadar yönlendirebildiğinin göstergesine yönlendiricilik denir (Johnson ve Jasik, 1984).

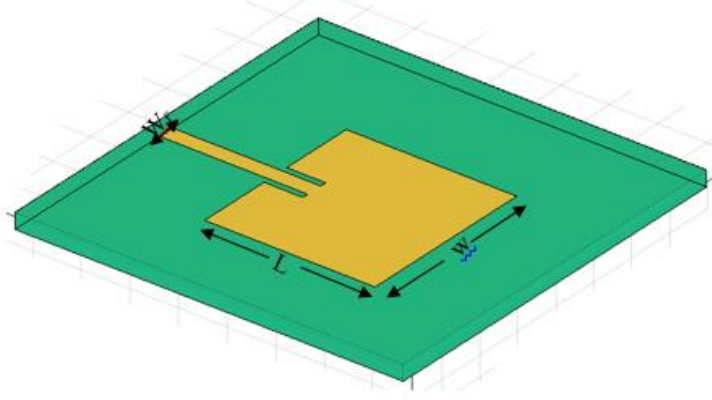
$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{P/4\pi} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{ışınma}} \quad (2.4)$$

2.2 Mikroşerit Anten Tasarımı

2.2.1 Anten tasarımı için fiziksel parametreler

Mikroşerit anten tasarımlarında kullanılmak üzere dikdörtgen, daire, üçgen, beşgen, altıgen, elips, yıldız şekillerinde yama geometrileri bulunmaktadır. Ancak bunlardan en çok tercih edilenleri üretim ve tasarım kolaylığı nedeniyle dairesel ve dikdörtgen yapıları geometrilerdir (Johnson ve Jasik, 1984). Tasarlanacak antenin geometrisi için gömülü (inset fed) mikroşerit beslemeli dikdörtgen yama

formu seçilmiştir. Dikdörtgen yama formu; tasarım ve üretim kolaylığının yanı sıra zorlu uygulamalarda da analiz kolaylığı sağlamaktadır (Johnson ve Jasik, 1984). Tasarlanan antenin fiziki yapısı Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Tasarlanan antenin fiziksel yapısı

Anten tasarımında öncelikle antenin rezonans frekansı ve antenin üretileceği dielektrik malzeme belirlenmelidir. Bu yapıdaki tasarımlar için antenin rezonans frekansı $f_r = 2.4$ GHz olarak belirlenmiştir. WiFi, 802.11 kablosuz yerel ağ (WLAN) için kullanılan bir teknolojidir. WiFi teknolojisini kullanabilen cihazlar arasında güvenlik kameraları, kişisel bilgisayarlar (PC), akıllı telefonlar, akıllı televizyonlar (TV), dijital kameralar, dijital ses çalarlar ve yazıcılar gibi çok sayıda cihaz bulunur. WiFi kullanan cihazların çoğunluğu 2.4 GHz radyo frekanslarını kullanır. Dielektrik malzeme olarak kullanım kolaylığı, düşük maliyet ve yüksek yalıtkanlık özellikleri ile FR4 ve FR2 PCB seçilmiştir.

Yukarıdaki parametreler dikkate alınarak 2.4 GHz çalışma frekansı için yama boyutları aşağıdaki eşitlik 2.5, 2.6, 2.7 ve 2.8 kullanılarak yapılan hesaplamalar ile belirlenmiştir. Eşitlik 2.5’te verilmiş w , c , f_c , ϵ_r sembolleri sırasıyla; yama genişliği, ışık hızı, çalışma frekansı ve dielektrik sabitini ifade etmektedir. Eşitlik 2.6’da verilen ϵ_e etkin dielektrik katsayısını temsil ederken eşitlik 2.7 ve 2.8’de verilmiş h , L ve Δl sırasıyla; yama kalınlığı, yama uzunluğu ve hat boyunu ifade etmektedir.

$$W = \frac{c}{2f_c} \times \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12t}{w} \right] \quad (2.6)$$

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.7)$$

$$L = \frac{c}{2f_c \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \quad (2.8)$$

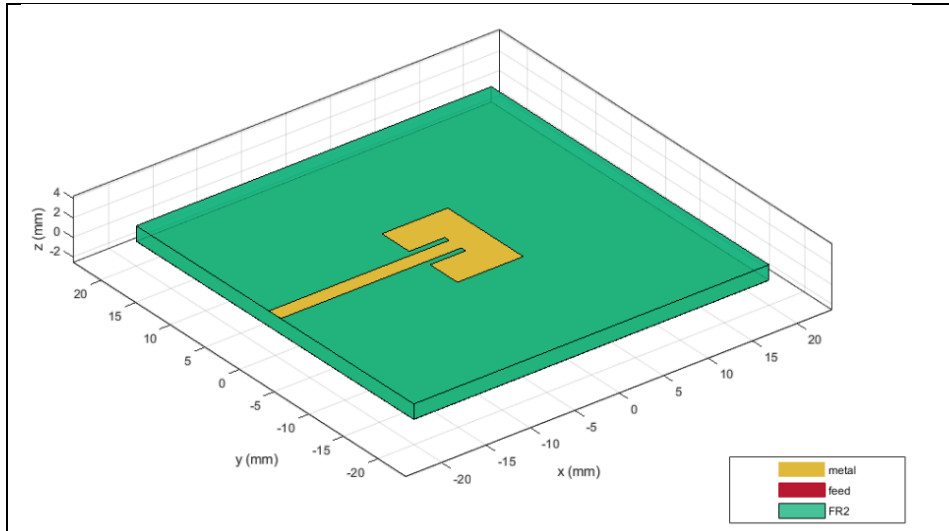
Bu hesaplamalar sonucu yama boyutları ve tasarım için gereken temel parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler Çizelge 1’de sunulmaktadır. Bu aşamadan sonra sırasıyla mikroşerit besleme yöntemi için antenler tasarlanmıştır.

Çizelge 1. Tasarlanan antenin fiziksel parametreleri

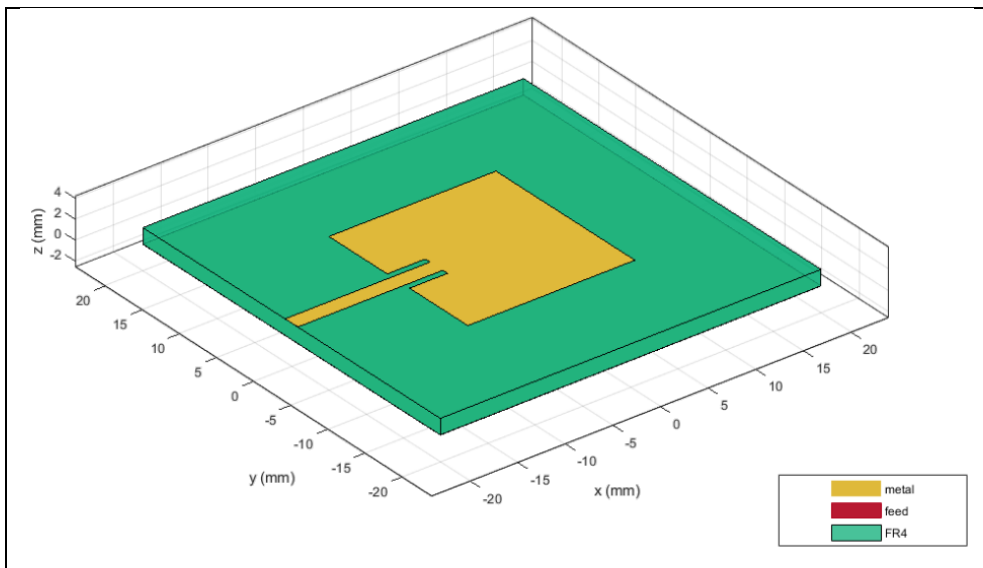
Tasarım Parametreleri	FR2 PCB	FR4 PCB
Dielektrik sabiti	14.86	4.8
Kalınlık (mm)	1.6	1.6
Tan δ (tanjant kaybı)	0.03	0.02
Yama Uzunluğu (mm)	7.41	17.55
Yama Genişliği (mm)	10.89	18.68

2.2.2 Anten tasarımı

Matlab programının “Antenna Designer” uygulamasında çizelge 1’de verilen fiziksel parametrelere uygun olarak antenlerin tasarımı yapılmıştır. Bu parametrelere göre simülasyon gerçekleştirilmiştir. Antenlerin tasarım çizimleri Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 3. FR2 PCB Anten Tasarımı

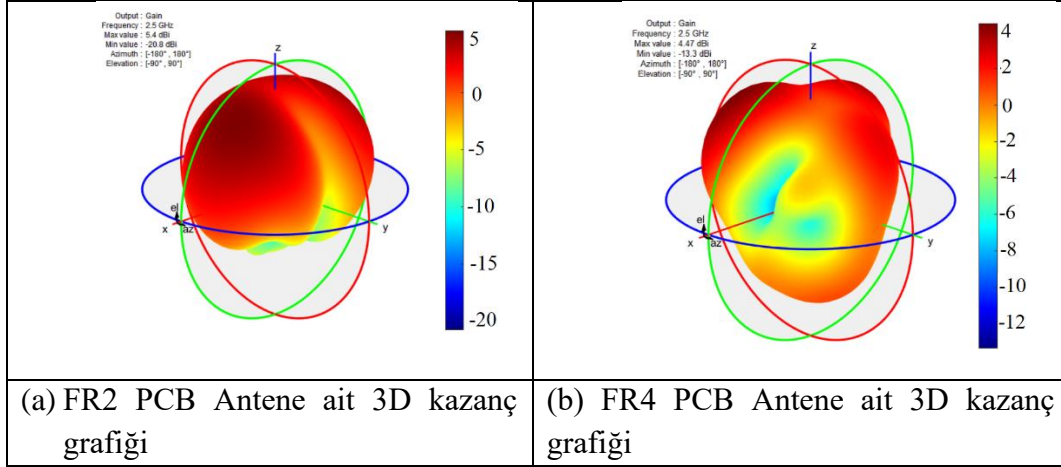


Şekil 4. FR4 PCB Anten Tasarımı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

FR4 ve FR2 PCB kullanılarak tasarlanan mikroşerit antenlerin fiziksel özellikleri çizelge.1’de belirtilmiştir. Bu fiziksel özelliklere göre Matlab programında “Antenna Designer” uygulaması kullanılarak anten çizimleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan mikroşerit antenlerin simülasyon sonuçları ve sonuçların değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

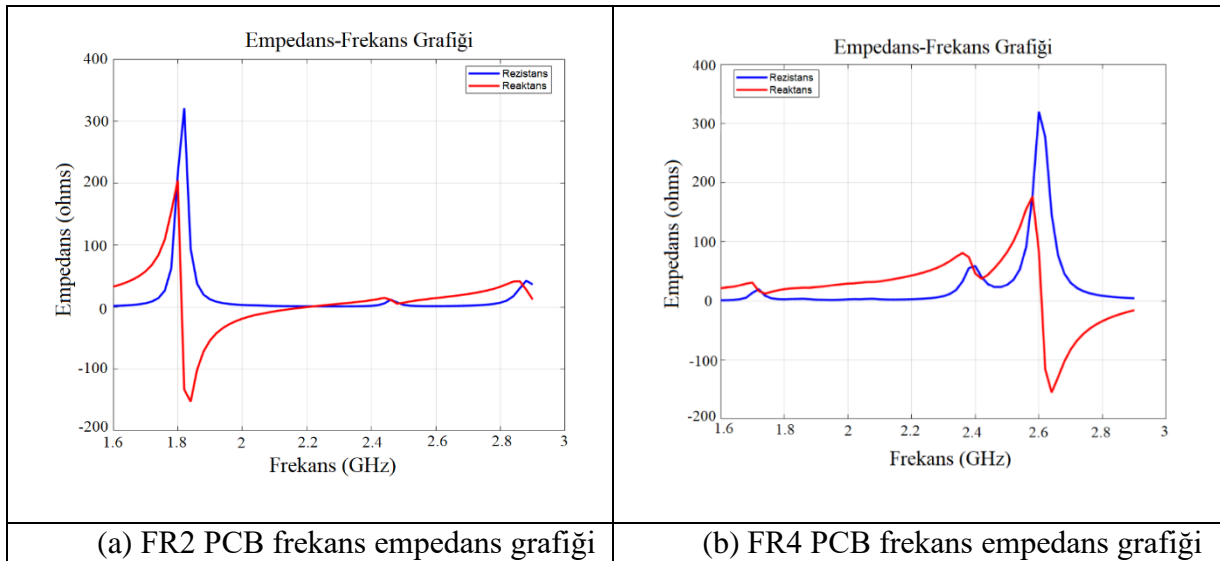
Antenlerin tablo 1’de belirlenen parametrelere göre FR4 ve FR2 PCB ile tasarlanan mikroşerit antenlerin simülasyon sonuçları aşağıda verilmiştir. FR4 ve FR2 PCB’ler ile tasarlanmış antenlerin 3D kazanç grafiği Şekil 5 (a)(b)’de gösterilmektedir.



Şekil 5. FR2 (a) ve FR4 (b) PCB Antene ait 3D kazanç grafikleri

Şekil 5 (a)’ya göre FR4 malzemenin maksimum anten kazancı 4,47 dBi, minimum anten kazancı ise -13,3 dBi’dir. Şekil 5 (b)’ye göre FR2 malzemenin maksimum anten kazancı 5.4 dBi, minimum anten kazancı ise -20,8 dBi’dir. FR4 malzemenin S_{11} geri dönüş kaybının -14,9 dB olduğu ve bant genişliğinin 80 MHz olduğu görülmektedir. Bu bant genişliği değeri WiFi çalışma bandını karşılamaktadır.

Şekil 6.(a) ve (b)’de ise; FR2 ve FR4 PCB’ler ile tasarlanmış antenlerin frekans-empedans grafikleri sunulmuştur. FR2 malzeme için rezistans ve reaktans değişiminin 1900 MHz’lerde olduğu, FR4 malzeme için rezistans ve reaktans değişiminin 2600 MHz’lerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6. FR2 (a) ve FR4 (b) PCB’lerin frekans-empedans grafikleri

FR2 ve FR4 PCB ile tasarlanan mikroşerit antenlerin 3 boyutlu kazanç ve yönlülük özellikleri incelenmiştir. Anten tasarım ve simülasyonunda 2.4 GHz çalışma frekansı referans olarak alınmış olup FR4 PCB kullanılarak tasarlanmış malzemede yapılan simülasyon sonuçlarında FR4 malzemenin 2.6 GHz’de değişim göstermiştir. FR2 malzeme ile elde edilen sonuçlar ise literatürde bulunan değerler ile yaklaşık çıkmıştır. Bu farklılıkların çözümü için tasarım parametreleri değiştirilerek, gelecek çalışmalarda tekrar simülasyon gerçekleştirilecektir. Simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde FR2 ve FR4 malzemelerinin dielektrik özelliklerinin farklı olması sebebiyle tasarlanan antenin fiziksel boyutlarının farklı olduğu ve mikroşerit antenin tasarım parametrelerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. FR2 ve FR4 malzeme yerine dielektrik özelliği farklı bir malzeme kullanıldığında tasarım parametrelerinin de değişeceği tespit edilmiştir.

4. SONUÇ

Günümüz teknolojisinde modern kablosuz iletişim teknolojileri, antenler ve ağ teknolojilerinin hızla gelişimiyle, mikroşerit antenler büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada FR4 ve FR2 PCB’ler kullanılarak mikroşerit anten fiziksel özellikleri belirlenmiş ve bu özelliklere göre tasarımı ve simülasyonları yapılmıştır. FR4 ve FR2 PCB’ler düşük maliyet, bulunabilirlik, kolay kullanım yöntemleri ve yüksek yalıtkanlık avantajları nedeniyle mikroşerit anten tasarımında tercih edilmiştir. FR4 ve FR2 PCB ile tasarlanan mikroşerit antenlerin 3 boyutlu kazanç ve frekans-empedans grafikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde FR4 malzemenin S11 geri dönüş kaybının -14.9 dB olduğu ve bant genişliğinin 80 MHz olduğu görülmektedir. Bu bant genişliği değeri WiFi çalışma bandını karşılamaktadır. Bu çalışmada yapılan tasarım ve simülasyon sonuçlarına göre, PCB’lerde kullanılan FR4 ve FR2 malzemelerin dielektrik özelliklerinin, tasarlanan dikdörtgen yamalı mikroşerit antenin fiziksel boyutlarına etki ettiği görülmüştür.

Bu çalışma, gelecekte özellikle yeni nesil Biyokompozit malzeme türleri (Genc ve ark., 2020; Zhan ve Wool, 2016; Zhan ve ark., 2011) kullanılarak, farklı anten geometrilerinde tasarlanacak anten tasarım ve uygulamaları için ön çalışma niteliği oluşturmaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Marmara Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği öğrencisi Mehmet Ali Acar'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

- Fellman J., Printed Circuit Board (PCB) Scrap Melting and Mixing with Molten Fayalite Slag, Aalto University School of Chemical Engineering, Master Thesis (Printed), 2018.
- Genc G., Sarikas A., Kesen U., Aydın S., Luffa/Epoxy Composites: Electrical Properties for PCB Application. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 10(6) 933–940, 2020.
- Hall W. J., Williams P. T. Separation and Recovery of Materials from Scrap Printed Circuit Boards. Resources, Conservation and Recycling 51(3) 691–709, 2007.
- Johnson R. C., Jasik H., Antenna Engineering Handbook. McGraw-Hill Professional, 1984.
- Ning C., Lin C. S. K., Hui D. C. W., McKay G., Waste Printed Circuit Board (PCB) Recycling Techniques. Topics in Current Chemistry 375(2), 1-36, 2017.

- Reineix A., Jecko B., Analysis of Microstrip Patch Antennas Using Finite Difference Time Domain Method. *IEEE Transactions On Antennas and Propagation* 37(11), 1361-1369, 1989.
- Shamkhalichenar H., Bueche C. J., Choi J. W., Printed Circuit Board (PCB) Technology for Electrochemical Sensors and Sensing Platforms. *Biosensors* 10(11), 159, 2020.
- Singh I., Tripathi V. S., Micro Strip Patch Antenna and Its Applications: A Survey. *International Journal of Computer Technology and Applications* 2(5), 1595-1599, 2011.
- Supratha C., Robinson S., Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna for WLAN Application. *International Conference on Current Trends towards Converging Technologies, (ICCTCT) India, March 1-3, pp: 1114–1118, 2018.*
- Werfelli H., Tayari K., Chaoui M., Lahiani M., Ghariani H., Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna. *2nd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), Monastir/Tunisi, March 21-24, pp: 798–803, 2016.*
- Zhan M., Wool R. P., Mechanical Properties of Composites with Chicken Feather and Glass Fibers. *Journal of Applied Polymer Science* 133, 44013, 2016.
- Zhan M., Wool R. P., Xiao J. Q., Electrical Properties of Chicken Feather Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42(3), 229–233, 2011.