

# MIG KAYNAKLI 304 ve 321 ÖZEL ÇELİKLERİNİN ITAB BÖLGESİNDEKİ KIRILGANLIK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İsmail TOPCU

*Alanya Alaaddin Keykubat, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme mühendisliği  
Bölümü, Alanya, Antalya, Türkiye  
E-mail: ismail.topcu@alanya.edu.tr*

Alındı 15 Ekim 2023; revize 16 Kasım 2023; kabul 20 Aralık 2023

## Özet

Metal inert gaz (MIG) kaynak işlemi, imalat sanayinde kullanılan en önemli ark kaynağı tekniklerinden biridir. Süreci kontrol etmek ve böylece kaynak sonucunu tahmin etmek için araştırmacılar girdi (kaynak hızı, voltaj, tel besleme hızı, gaz akış hızı, nozul plakası mesafesi, torç açısı, erimiş metalin yüzey gerilimi, elektromanyetik kuvvet, vb. gibi) ve çıktı (yani boncuk geometrisi ayrıca yükseklik ve genişlik-, yatak penetrasyonu) değişkenleri arasındaki ilişkileri ortaya koymaya çalışmışlardır. Kaynak prosedürünün ve optimum parametrelerinin doğru seçimi ve kaynak sırasında termal deformasyon ve taneler arası korozyonun kontrolü, kaynak uygulamalarında daha yüksek bir kalite elde etmek için anahtar faktörlerdir. Bu çalışmada, kaynak metali olarak kullanılan 4 mm kalınlığındaki AISI 304 ve 321 paslanmaz çelik sacların mekanik özelliklerinin ve karakterizasyonunun karşılaştırılması yapılmıştır. Böylece, benzer ve benzer olmayan metallerin kombinasyonunu sağlamak için AISI 304 kaynak metal çiftleri, AISI 321 kaynak metal çiftleri ve AISI 304 ve 321 kaynak metal çiftleri seçilmiştir. MIG kaynak işlemi argon koruyucu gaz atmosferi altında tek pasoda manuel olarak gerçekleştirilmiştir. MIG kaynak uygulamalarından sonra, numunelerin sertlik değerlerinin 132-151 HRV (ortalama) aralığında ve çekme mukavemeti değerlerinin 332-364 MPa (ortalama) skalasında değiştiği gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesinin karakterizasyonu için, metalografik hazırlıktan sonra makro ve mikro incelemeler sırasıyla oksalik asit ve aqua regia kullanılarak dağlanmıştır. Mikroskobik incelemeler, kaynak boncuğu ve ısıdan etkilenen bölgeleri ortaya çıkarmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** AISI 304, AISI 321, MIG kaynağı

## 1. Giriş

Nominal %18 krom ve %8 nikel içeriğiyle en yaygın kullanılan paslanmaz çelikler olan östenitik paslanmaz çelikler, oda sıcaklığında östenitik yapısı [1,2] ve krom oksidin çok ince şeffaf pasif yüzey filmi [3] nedeniyle iyi mukavemet, süneklik, tokluk, mükemmel korozyon direnci ve iyi ıslanabilirliği bir araya getirir. Çoğunlukla enerji üretimi, otomotiv, petrokimya, kağıt, denizcilik, gıda işleme ve biyomedikal endüstrilerinde kullanılan paslanmaz çelik yapıları üretmek için çeşitli birleştirme işlemleri vardır [2,3]. Bununla birlikte, ana ve birleştirme metalleri arasındaki kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler gibi farklılıklar, ayrıca kaynak metali ve proses parametreleri kadar önemli olduğu sürece dolgu metali gibi sarf malzemeleri de önemlidir, çünkü işlem sırasında kullanılan her iki malzeme, işlemin kendisi ve parametreleri nihai kaynak bileşimini, kristal yapısını ve hatta kristallerin yönelimini etkiler [2]. Ayrıca, soğutma sırasındaki segregasyon, element dağılımına bağlı faz değişiklikleri ve ikincil faz partiküllerinin çökmesi, ısıdan etkilenen bölgenin nihai bileşiminde önemli bir rol oynar [4]. Bu nedenle, artık gerilmeler, kaynak kusurları -örneğin gözeneklilikler, mikro çatlaklar-, lokalize faz veya bileşim değişiklikleri bozulmalara, çatlak ilerlemesine, korozyon direncinin yerel olarak azalmasına ve sonuç olarak gerilme korozyonu çatlamaına neden olur [2,4]. Bu nedenle, kaynak prosedürünün ve optimum parametrelerinin doğru seçimi ve kaynak sırasında termal deformasyon ve taneler arası korozyonun kontrolü, kaynak uygulamalarında daha yüksek bir kalite elde etmek için kilit faktörlerdir [5].

Metal inert gaz (MIG) kaynak işlemi, imalat endüstrisinde mevcut olan en önemli ark kaynağı tekniklerinden biridir. Süreci kontrol etmek ve böylece kaynak sonucunu tahmin etmek için araştırmacılar girdi (kaynak hızı, voltaj, tel besleme hızı, gaz akış hızı, nozul plakası mesafesi, torç açısı, erimiş metalin yüzey gerilimi, elektromanyetik kuvvet, vb. gibi) ve çıktı (yani boncuk geometrisi -ayrıca yükseklik ve genişlik-, yatak penetrasyonu) değişkenleri arasındaki ilişkileri ortaya koymaya çalışmışlardır. Karmaşık bir prosedür olan MIG kaynağı çok sayıda değişkenden oluşur, bu nedenle istatistiksel modellerin elde edilen deneysel verilerle desteklenmesi önemlidir.

Bu çalışma, kendi alanlarında gelecekte çok değerli araştırmacılar olmaya aday genç mühendislerin lisans tez çalışmalarını bilimsel bir araştırma olarak göstermeyi ve aynı zamanda MIG kaynaklı bölgelerin nihai mekanik özelliklerini etkileyen malzeme bazlı özellikleri belirlemeyi amaçlamaktadır [6, 9].

## 2. Malzeme ve Metot

Bu çalışmada kaynak metali olarak 4 mm kalınlığında AISI 304 ve 321 paslanmaz çelik saclar temin edilmiştir. Bu nedenle benzer ve farklı metallerin kombinasyonunu sağlamak amacıyla AISI 304 kaynak metali çiftleri (Numune tipi: M1), AISI 321 kaynak metali çiftleri (Numune tipi: M2) ve AISI 321 ve 304 kaynak metali çiftleri (Numune tipi: M3) seçilmiştir. Kimyasal bileşimleri Tablo 1 ve 2'de verilen, 4 mm kalınlığında, 304 ve 321 kalite östenitik paslanmaz çelikler ile dolgu teli olarak Tablo 3'te sırasıyla verilen GeKa ELOX SG 309 L Si kaynak teli kullanılmıştır.

Numuneler öncelikle aşındırıcı kesici kullanılarak 150 x 30 x 4 mm boyutlarında, daha sonra torna tezgahında 45° oluk açılı tek oluklu V kaynaklı alın birleştirme konfigürasyonunda kesilmiştir. Kaynak yapılmadan önce kaynak plakaları 180 grit zımpara kağıt ile manuel olarak taşlandı ve ardından asetonla temizlenmiştir. MIG kaynak işlemi, metalurji ve malzeme mühendisliği lisans öğrencileri tarafından laboratuvar tabanlı bilimsel çalışmaları öncesinde altı aylık atölye çalışması sonrasında argon koruyucu gaz atmosferi altında tek geçişte manuel olarak gerçekleştirildi. Kaynak parametreleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

MIG kaynağı uygulamaları sonrasında numunelerin bir kısmı kesilerek metalografik incelemeye hazırlandı. İşlemden sonra numuneler asetonla temizlendi, monte edildi, ardından taşlandı, cilalandı ve son olarak Aqua regia aşındırma çözeltisiyle yaklaşık 30 saniye süreyle dağlandı. Mikroyapılar optik mikroskop (Olympus) ile gözlemlendi. Makroskobik inceleme için öncelikle kaynaklı bağlantı, aşındırıcı kesici ile numuneden soğuk olarak kesildi. Daha sonra yüzey 240 grid'den başlayarak 1000 grid zımparaya kadar taşlandı ve 2 mikron elmas pasta kullanılarak parlatıldı. Metalografik hazırlıktan sonra, oksalik asit çözeltisinden (10 g oksalik asit ve 10 cc distile su) oluşan bir asit çözeltisi atıldı ve yumuşak, temiz bir bezle test parçasının üzeri silindi. Kısa bir süre sonra ana metal ve kaynak bölgelerinin rengi solmuş ve fotoğrafları Sony DSC-W730 dijital fotoğrafçı tarafından yakınlığa yapılmadan çekilmiştir.

Numunelerin sertlik ölçümleri FM-ARS 7000 (Future Tech Corp Tokyo, Japonya) tam otomatik mikro sertlik test sistemi kullanılarak, 100 g yükte 15 saniye süreyle yapıldı. Geri kalan kısım ise Instron Universal Testing kullanılarak çekme mukavemeti ölçümü için şekillendirilmiştir.

## 3. Deneysel Prosedür

Bu çalışmada, kaynak metali olarak 4 mm kalınlığında AISI 304 ve 321 paslanmaz çelik saclar temin edilmiştir. Böylece, AISI 304 kaynak metal çiftleri (Numune tipi: M1), AISI 321 kaynak metal çiftleri (Numune tipi: M2) ve AISI 321 ve 304 kaynak metal çiftleri (Numune tipi: M3) benzer ve benzer olmayan metallerin bir kombinasyonunu sağlamak için seçilmiştir. Kimyasal bileşimi Tablo 1 ve 2'de verilen 4 mm kalınlığındaki 304 ve 321 kalite östenitik paslanmaz çelikler ile dolgu teli olarak Tablo 3'te verilen GeKa ELOX SG 309 L Si kaynak teli kullanılmıştır.

Öncelikle, numuneler aşındırıcı bir kesici kullanılarak 150 x 30 x 4 mm boyutlarında kesilmiş, ardından torna makinesi ile 45° oluk açısına sahip tek oluklu V kaynak alın bağlantı konfigürasyonu oluşturulmuştur. Kaynak öncesinde, kaynak plakaları 180 gridlik zımpara kağıdı ile manuel olarak taşlanmış ve ardından aseton ile temizlenmiştir. MIG kaynak işlemi, metalurji ve malzeme mühendisliği lisans öğrencileri tarafından laboratuvar tabanlı bilimsel çalışmalarından önce altı aylık atölye uygulamasından sonra argon koruyucu gaz atmosferi altında tek pasoda manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak parametreleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

MIG kaynak uygulamalarından sonra numunelerin bir kısmı kesilmiş ve metalografik inceleme için

hazırlanmıştır. İşlemden sonra numuneler aseton ile temizlenmiş, monte edilmiş, ardından taşlanmış, parlatılmış ve son olarak Aqua regia aşındırma çözeltisi ile yaklaşık 30 saniye boyunca aşındırılmıştır. Mikroyapılar optik mikroskop (Olympus) ile gözlemlenmiştir. Makroskopik inceleme için ilk olarak, kaynaklı bağlantı numuneden aşındırıcı bir kesici ile soğuk kesilmiştir. Daha sonra yüzey 240 grid'den başlayarak 1000 grid'e kadar zımpara kağıdı ile taşlanmış ve 2 mikronluk elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır. Metalografik hazırlıktan sonra, oksalik asit çözeltisinden (10 g oksalik asit ve 10 cc distile su) oluşan bir asit çözeltisi atılmış ve yumuşak temiz bir bezle test parçası üzerinde silinmiştir. Kısa bir süre sonra, ana metal ve kaynak bölgeleri renk değiştirmiş ve Sony DSC-W730 dijital fotoğraf makinesi ile yakınlaştırma yapılmadan fotoğrafları çekilmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri FM-ARS 7000 (Future Tech Corp Tokyo, Japonya) tam otomatik mikro sertlik test sistemi kullanılarak, 100 g yükte 15 sn süreyle yapılmıştır. Geri kalanlar ise Instron Ünlversal test makinesi kullanılarak 5 mm/dak çapraz kafa hızıyla çekme mukavemeti ölçümü için şekillendirilmiştir.

Tablo 1. AISI 321 paslanmaz çelik kaynak metalinin bileşimi (wt %) [7].

Fe	C	Ni	Cr	Mn
68.49	0.08	9-12.00	17-19.00	2.00
Ti	Si	S	P	N
0.70	0.75	0.03	0.045	0.10

Tablo 2. AISI 304 paslanmaz çeliğin AISI 304 paslanmaz çeliğin bileşimi (wt %) [8].

Fe	C	Ni	Cr	Mn
Balance	0.05	7.84	18.07	1.537
Cu	Nb	V	Si	Mo
0.389	0.047	0.089	0.572	0.332

Tablo 3. MIG için GeKa ELOX SG 309 L Si kaynak teli bileşimi (wt %) [9].

Fe	C	Ni	Cr	Mn	Si
Balance	0.03	13.0	23.5	1.8	0.80

Tablo 4. MIG kaynak parametreleri.

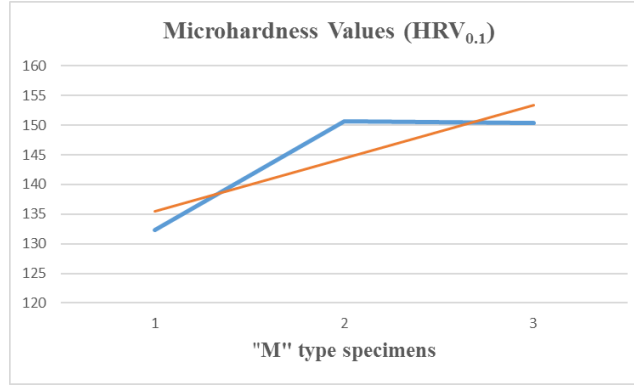
Tel nominal çapı (mm)	Bağlantı konfigürasyonu ve açısı (o)	Torç açısı Kaynak	Kaynak Akımı (A)
1.2	V/ 45	70	200
Kaynak Voltajı (V)	Koruyucu Gaz ve akış hızı (L/min)	Kaynak hızı (cm/min)	Kaynak teli besleme hızı (m/min)
20	Ar/15	40	8

#### 4. Bulgular ve Tartışma

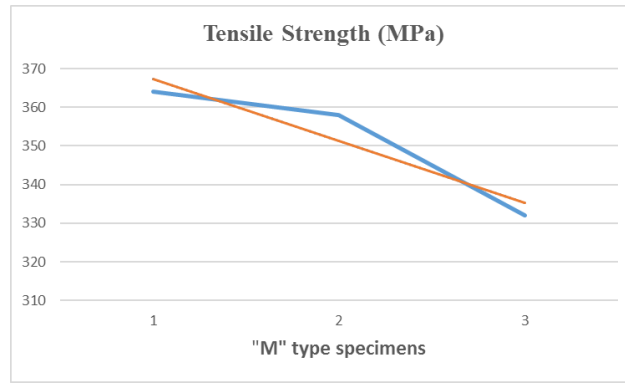
Kaynak sonuçlarının genel özeti Tablo 5'te verilmiştir. Şekil 1 ve 2'de kaynak bölgesindeki mikrosertlik ve çekme mukavemeti değerleri çizilmiş ve grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 5. Kaynak koşullarının ve mekanik test sonuçları.

Numune Mekanik Özellikleri	M1	M2	M3
Micro			
Sertlik (HRV <sub>0.1</sub> )	132.33±6,03	150,67±3,06	150,33±6,66
Çekme Dayanımı	364 ±12	358 ±10	332 ±16



Şek. 1. Numune gruplarının mikrosertlik değerlerinin (mavi çizgi olarak gösterilmiştir) ve eğilim eğrisinin (turuncu çizgi olarak gösterilmiştir) karşılaştırılması.



Şek. 2. Numune gruplarının çekme kesme kuvveti değerlerinin (mavi çizgi olarak gösterilmiştir) ve eğilim eğrisinin (turuncu çizgi olarak gösterilmiştir) karşılaştırılması.

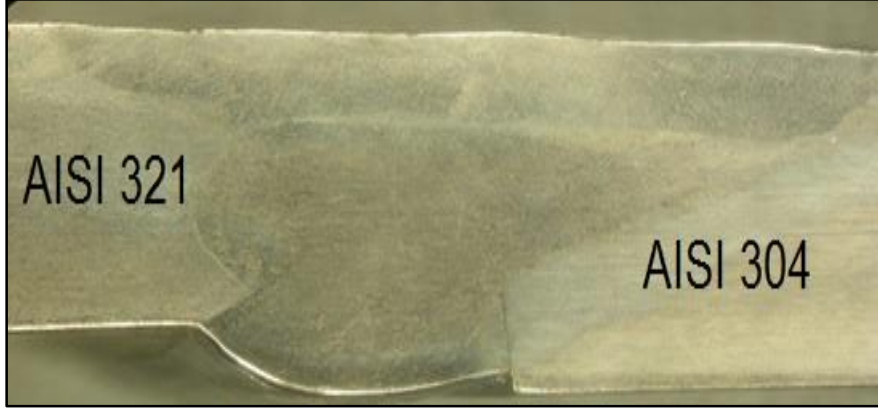
Şekil 3-5'te, MIG kaynak çiftlerinin kaynak boncuklarının makroskopik görüntüleri ve Şekil 6-8'de mikroskopik görüntüleri gösterilmektedir.



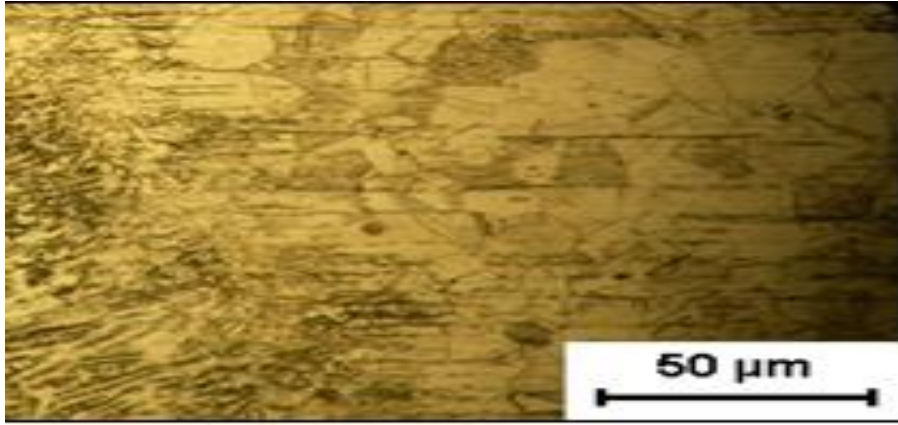
Şek. 3. AISI 304 tipi metal çiftlerinin -temel ve kaynak metalleri- benzer kaynağına ait kaynak kordonunun makroskopik görüntüsü.



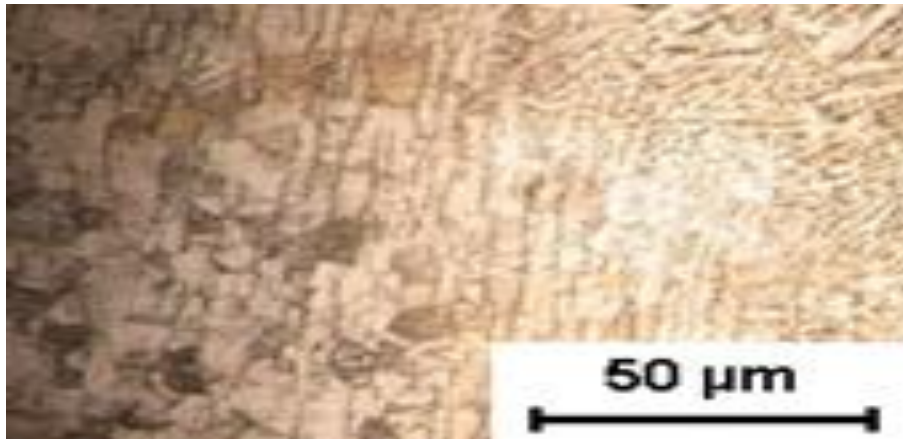
Şek. 4. AISI 321 tipi metal çiftlerinin benzer kaynağının kaynak boncuğunun makroskopik görüntüsü -taban ve kaynak metalleri.



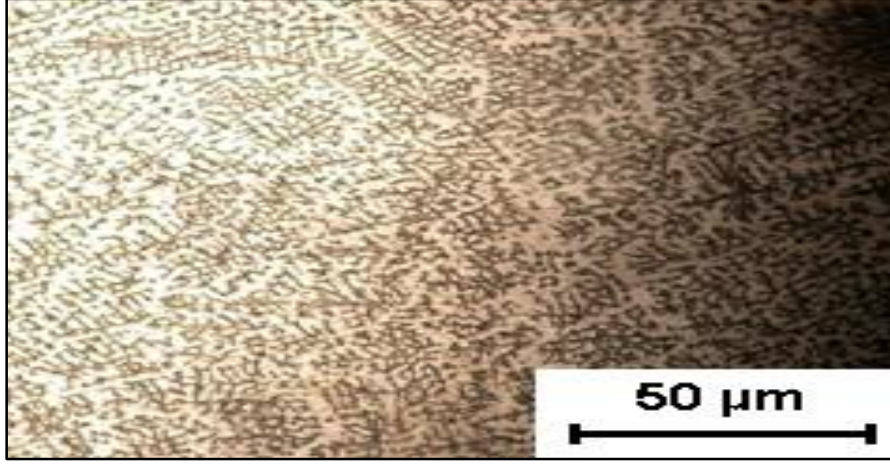
Şek. 5. AISI 321 tipi metal çiftlerinin AISI 304 ve 321 tipi metal çiftlerinin -taban ve kaynak metalleri- benzer olmayan kaynaklarının makroskopik görüntüleri.



Şek. 6. AISI 321 tipi metal çiftlerinin -temel ve kaynak metalleri- benzer kaynağının kaynak boncuğu (Büyütme 10x).



Şek. 7. AISI 304 tipi metal çiftlerinin -taban ve kaynak metalleri- benzer kaynağının kaynak boncuğu (Büyütme 10x).



Şek. 8. AISI 304 ve 321 tipi metal çiftlerinin AISI 304 ve 321 tipi metal çiftlerinin -temel ve kaynak metalleri- birbirine benzemeyen kaynağına ait kaynak boncuğu (Büyütme 10x).

Grafiğin eğilimleri mikro sertlikte bir artışa işaret etse de, benzer kaynak çiftlerinin -T1, T2 ve T3 tipi numuneler- standart sapma değerleri, sonuçların neredeyse örtüştüğünü ve kaynak bölgesinde benzer veya benzer olmayan östenitik paslanmaz çeliklerle homojen karışım nedeniyle önemli bir fark olmadığını göstermektedir. Ancak, Tablo 5'te verildiği gibi, dolgu metali ve ana metal arasındaki uyumun kaynağın nihai mekanik özelliklerinde çok önemli bir rol oynadığı çekme dayanımı sonuçlarında daha açıktır, AISI 316L paslanmaz çeliklerden oluşan T1 kaynak çiftinin çekme dayanımı, sırasıyla AISI 321 ve 316L ve 321 paslanmaz çeliklerin kombinasyonundan oluşan T2 ve T3'e kıyasla çok daha yüksektir.

T1 ve T3 tipi kaynak çiftlerinin makroskopik görüntüleri, dolgu metalinin ana metalin biri veya her ikisi ile aynı bileşime sahip olması nedeniyle kaynak dikişi bölgesinin veya ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) başlangıcını veya sonunu açıkça göstermez. Şekil 6 ve 8'de 6 ve 8'de, kaynak füzyon bölgeleri, faz sınırları mevcut olmadığından dengede olmayan ancak homojen katılaşma bölgesi olarak tanımlanabilir, ancak ısıdan etkilenen bölge, işlem sırasında uygulanan daha yüksek kaynak akımı ve nispeten daha düşük kaynak hızı nedeniyle genişlemiş gibi görünmektedir, ancak işlem sırasında aşırı ısınmaya işaret eden granüler iri taneler mevcut değildir, aksine, her üç mikro yapı tipinde de ince taneli bölgeler, yüksek soğutma hızının işaretleri belirgindir ve ayrıca tanelerin olası yeniden kristalleşmesini sınırlayan bazı karbür fazı çökeltileri de vardır. Şekil 7'de, T1 tipi kaynak çiftlerinin makroskopik resminde çok net bir şekilde yakalanmayan, dolgu ve ana metal arasındaki bir arka andıran dikiş görülmektedir.

## 5. Sonuç

Bu çalışmanın iki temel hedefi, lisans öğrencilerine temel becerileri aktararak tüm çalışmayı tek başına yuvarlamak ve daha sonra lisans tez çalışmalarına dayalı bilimsel bir araştırma oluşturmaktır. Bu hedefin gerçekleştirilmesi amacıyla, kaynak parametrelerinin (basınç, ısı ve zaman) farklı tipteki paslanmaz çeliklerin ve bunların kombinasyonlarının kaynağı üzerindeki etkisinin araştırılması hazırlanmıştır. Bu nedenle sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır;

Kaynak bölgesindeki sertlik değerleri, dolgu metali AISI 309L'nin karakteristik fiziksel özellikleri ve kaynak sırasında eridiğinde daha iyi uyum sağlaması nedeniyle AISI 321 çelik çiftleri ve AISI 304 ve 321'in benzer olmayan kaynak çiftleri için daha yüksekti. Kaynak sonrası sertlik değerleri bile artma eğiliminde görünmektedir, aslında standart sapmaları her numune için neredeyse aynı sertlik oranına işaret etmektedir. Bununla birlikte, çekme mukavemeti değerleri, AISI 321 kaynak metalinin üstün mekanik özellikleri ve AISI 309L SS tipi dolgu teli ile uyumluluğu nedeniyle, elde edilen çekme mukavemetinin, sırasıyla AISI 304 kaynak metallerinin benzer kaynağına ve AISI 304 ve 321 çeliklerinin benzer olmayan kaynağına kıyasla daha yüksek olduğuna işaret etmektedir. daha sert davranış nedeniyle mekanik özellikleri arasında bir ayrım AISI 316L tipi kaynak metalleri, aynı zamanda kaynak metali ve dolgu çubuğunun mekanik ve kimyasal uyumu.

İşlem sırasında uygulanan daha yüksek kaynak akımı ve nispeten daha düşük kaynak hızı nedeniyle ısıdan etkilenen bölge genişlemiş gibi görünmektedir, ancak işlem sırasında aşırı ısınmaya işaret eden granüler iri taneler mevcut değildir, aksine, her üç mikro yapı tipinde de ince taneli bölgeler, yüksek soğutma hızının işaretleri belirgindir ve ayrıca tanelerin olası yeniden kristalleşmesini sınırlayan bazı karbür fazı çökeltileri de vardır.

Daha fazla veri elde etmek için, numuneler EDX eklentili SEM kullanılarak gözlemlenmelidir.

## References

- [1] İ. Topcu, TIG ve MIG kaynağı ile işlem gören 304 ve 1040 çeliklerin ITAB bölgesindeki mekanik özelliklerin incelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi **34 (3)**, 171-182 (2019).
- [2] P. Vasantharaja, M. Vasudevan, P. Palanichamy, Effect of welding processes on the residual stress and distortion in type 316LN stainless steel weld joints, Journal of Manufacturing Processes **19**, 186-193 (2015).
- [3] J. Sule, S. Ganguly, H. Coules, T. Pirling, Application of local mechanical tensioning and laser processing to refine microstructure and modify residual stress state of a multi-pass 304L austenitic steels welds, Journal of Manufacturing Processes **18**, 141-150 (2015).
- [4] D. S. Yawas, S. Y. Aku, S. O. Aluko, Fatigue behaviour of welded austenitic stainless steel in different environments, Results in Physics **4**, 127-134 (2014).
- [5] İ. Topcu, A. Devrim, B. Ünal, B. Vanli, Development and design and heat treatment of production, storage and mine drilling pipes in petroleum and geothermal industries, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi **8 (1)**, 410-417 (2020).
- [6] E. Zumelzu, J. Sepulveda, M. Ibarra, Influence of microstructure on the mechanical behaviour of welded 316L SS joints, Journal of Materials Processing Technology **94**, 36-40 (1999).
- [7] S. Zuo, X. Zhou, G. Zhang, Comprehensive welding technology for type 304 stainless steel rotating shaft, Procedia Engineering **24**, 840-844 (2011).
- [8] J. P. Ganjigatti, D. K. Pratihar, A. R. Choudhury, Global versus cluster-wise regression analyses for prediction of bead geometry in MIG welding process, Journal of Materials Processing Technology, **189 (1-3)**, 352-366 (2007).
- [9] B. -W. Cha and S.- J. Na, A study on the relationship between welding conditions and residual stress of resistance spot welded 304-type stainless steels, Journal of Manufacturing Systems, **22 (3)**, 181-189 (2003).